

領域略称名：極限宇宙

領域番号：21A201

令和6年度
科学研究費助成事業「学術変革領域研究（A）」
に係る中間評価報告書

「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」

領域設定期間

令和3年度～令和7年度

令和6年6月

領域代表者 京都大学・基礎物理学研究所・教授・高柳 匡

目 次

研究組織

1	総括班・総括班以外の計画研究	2
2	総括班・総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者	3
3	公募研究	7

研究領域全体に係る事項

4	研究領域の目的及び概要	10
5	審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	12
6	研究の進展状況及び主な成果	14
7	研究発表の状況	32
8	研究組織の連携体制	37
9	若手研究者の育成に係る取組状況	38
10	アウトリーチ活動に係る取組状況	39
11	研究費の使用状況・計画	40
12	今後の研究領域の推進方策	41
13	総括班評価者による評価	43

研究組織

(令和6年6月末現在。ただし完了又は廃止した研究課題は完了・廃止時現在。)

1 総括班及び総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数[2]
X00 総	21H05182 極限宇宙の物理法則を創るー量子情報で拓く時空と物質の新しいパラダイム	高柳 匡	京都大学・基礎物理学研究所・教授	16
A01 計	21H05183 理論物理学のための量子情報理論基礎	森前 智行	京都大学・基礎物理学研究所・准教授	5
B01 計	21H05184 量子情報を用いた量子ブラックホールの内部の物理学の解明	飯塚 則裕	大阪大学・理学研究科・助教	5
B02 計	21H05185 人工量子物質による量子ブラックホールの解明	手塚 真樹	京都大学・理学研究科・助教	5
B03 計	21H05186 量子情報を用いた量子ブラックホールの数理解明	石橋 明浩	近畿大学・理工学部・教授	3
C01 計	21H05187 量子情報を用いた量子宇宙の基礎理論	高柳 匡	京都大学・基礎物理学研究所・教授	5
C02 計	21H05188 量子ホール系による量子宇宙の実験	遊佐 剛	東北大学・理学研究科・教授	4
C03 計	21H05189 量子情報を用いた量子宇宙の数理解とその応用	白水 徹也	名古屋大学・大学院多元数理科学研究科・教授	6
D01 計	21H05190 場の量子論のダイナミクスへの量子情報的アプローチ	西岡 辰磨	大阪大学・理学研究科・教授	5
D02 計	21H05191 量子情報を用いた量子多体系の制御とテンソルネットワーク	奥西 巧一	新潟大学・自然科学系・准教授	5
総括班及び総括班以外の計画研究 計 9 件 (廃止を含む)				

[1] 総：総括班、計：総括班以外の計画研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

2 総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：X00

研究課題名：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

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	高柳 匡	京都大学・基礎物理学研究所・教授	領域全体の研究を領域代表として統括
分担	森前 智行	京都大学・基礎物理学研究所・准教授	領域運営（特にポストク公募）担当、分野融合活動（特に量子情報）担当
分担	飯塚 則裕	大阪大学・理学研究科・助教	分野融合活動（特に集会企画）担当
分担	手塚 真樹	京都大学・理学研究科・助教	若手支援活動（特に領域スクール）担当
分担	石橋 明浩	近畿大学・理工学部・教授	国際活動（特に領域国際会議）担当
分担	遊佐 剛	東北大学・理学研究科・教授	分野融合活動（特に実験物理学）担当
分担	白水 徹也	名古屋大学・大学院多元数理科学研究科・教授	領域運営（特に領域成果のとりまとめ）担当
分担	西岡 辰磨	大阪大学・理学研究科・教授	国際活動（特に若手海外派遣プログラム）担当
分担	奥西 巧一	新潟大学・自然科学系・准教授	領域運営（特に公募研究）担当
分担	中田 芳史	京都大学・基礎物理学研究所・特定准教授	分野融合活動（特に領域コロキウム）担当
分担	小林 努	立教大学・理学部・教授	広報活動（特に領域ホームページ）担当
分担	上田 宏	大阪大学・量子情報・量子生命研究センター・准教授	分野融合活動（特に循環ミーティング）担当
分担	堀田 知佐	東京大学・大学院総合文化研究科・教授	分野融合活動（特に理論物理学）担当
分担	堀田 昌寛	東北大学・理学研究科・助教	広報活動（特にアウトリーチ）担当
分担	中島 秀太	大阪大学・量子情報・量子生命研究センター・准教授	広報活動（特にニュースレター）担当
分担	泉 圭介	名古屋大学・大学院多元数理科学研究科・准教授	若手支援活動（特に若手研究会と若手循環滞在）担当
合計 16 名			

研究項目：A01

研究課題名：理論物理学のための量子情報理論基礎

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	森前 智行	京都大学・基礎物理学研究所・准教授	総括、量子計算・量子暗号に関する研究
分担	中田 芳史	京都大学・基礎物理学研究所・特定准教授	量子ランダムネスに関する研究

分担	Francesco Buscemi	名古屋大学・情報学研究科・教授	量子情報理論に関する研究
分担	東 浩司	NTT・物性科学基礎研究所・特別研究員	量子ネットワークに関する研究
分担	早川 龍	京都大学白眉センター・特定助教	量子アルゴリズム・量子計算量理論に関する研究
合計 5 名			

研究項目 : B01

研究課題名 : 量子情報を用いた量子ブラックホールの内部の物理学の解明

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	飯塚 則裕	大阪大学・理学研究科・助教	研究全体の総括。量子情報と時空に関する研究。ブラックホールに双対な量子多体系の研究
分担	宇賀神 知紀	立教大学理学部・准教授	ブラックホールの量子論、ワームホール、および量子情報理論に関する解析を担当
分担	重森 正樹	名古屋大学理学研究科・教授	ブラックホールを記述する重力解の解析を担当
分担	寺嶋 靖治	京都大学基礎物理学研究所・助教	ブラックホールの量子論の解析を担当
分担	野海 俊文	東京大学大学院総合文化研究科・准教授	量子重力における沼地予想の解析を担当
合計 5 名			

研究項目 : B02

研究課題名 : 人工量子物質による量子ブラックホールの解明

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	手塚 真樹	京都大学・理学研究科・助教	冷却原子気体の理論、SYK 模型、研究の統括
分担	中島 秀太	大阪大学・量子情報・量子生命研究センター・准教授	冷却原子気体の実験研究
分担	上西 慧理子	慶應義塾大学・理工学研究科・特任講師	量子系の熱化と量子計算
分担	森 貴司	慶應義塾大学・理工学研究科・准教授	開放量子系のダイナミクス
分担	山本 大輔	日本大学・文理学部・准教授	冷却原子気体の理論、量子系の熱化
合計 5 名			

研究項目 : B03

研究課題名 : 量子情報を用いた量子ブラックホールの数理の解明

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
-------	-------	-------------	------

代表	石橋 明浩	近畿大学・理工学部・教授	一般相対論および量子ブラックホールの数理解析と全体の総括を担当
分担	前田 健吾	芝浦工業大学・工学部・教授	量子情報と重力理論の解析を担当
分担	村田 佳樹	日本大学・文理学部・准教授	量子ブラックホールと量子多体系の観測量を担当
合計 3 名			

研究項目 : C01

研究課題名 : 量子情報を用いた量子宇宙の基礎理論

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	高柳 匡	京都大学・基礎物理学研究所・教授	研究全体を統括、量子情報と量子重力を結びつける解析を担当
分担	奥山 和美	信州大学・理学部・教授	二次元量子重力理論の解析を担当
分担	杉本 茂樹	京都大学・理学研究科・教授	ゲージ理論とその重力理論との対応関係の解析を担当
分担	関野 恭弘	拓殖大学・工学部・教授	ホログラフィー原理の解析を担当
分担	疋田 泰章	京都大学・基礎物理学研究所・特定准教授	高階スピン重力理論や二次元共形場理論の解析を担当
合計 5 名			

研究項目 : C02

研究課題名 : 量子ホール系による量子宇宙の実験

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	遊佐 剛	東北大学・理学研究科・教授	研究総括および量子ホール系の実験研究を担当
分担	堀田 昌寛	東北大学・理学研究科・助教	量子ホール系の理論研究(数値計算)を担当
分担	柴田 尚和	東北大学・理学研究科・教授	量子情報からの理論研究および実験提案、実験データ解析を担当
分担	米倉 和也	東北大学・理学研究科・准教授	数理物理による理論研究を担当
合計 4 名			

研究項目 : C03

研究課題名 : 量子情報を用いた量子宇宙の数理解析とその応用

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	白水 徹也	名古屋大学・大学院多元数理科学研究科・教授	研究全体の統括、ブレーンワールド宇宙の量子情報を念頭に置いた応用研究の組織
分担	吉野 裕高	大阪公立大学・大学院理学研究科・准教授	宇宙観測を念頭に置いた時空幾何学の基礎研究

分担	小林 努	立教大学・理学部・教授	重力理論に対する宇宙論的制限の包括的研究
分担	泉 圭介	名古屋大学・大学院多元数理科学研究科・准教授	重力理論の基礎研究
分担	野澤 真人	大阪工業大学・工学部・講師	重力理論の厳密解の構成と時空構造の解析
分担	棚橋 典大	京都大学・大学院理学研究科・特定准教授	ホログラフィー原理を念頭に置いた重力理論の数値解析
合計 6 名			

研究項目 : D01

研究課題名 : 場の量子論のダイナミクスへの量子情報的アプローチ

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	西岡 辰磨	大阪大学・理学研究科・教授	研究総括・量子情報理論の場の量子論への応用
分担	松尾 泰	東京大学・理学系研究科・教授	超対称場の量子論の数理的側面の解析
分担	伊藤 悦子	京都大学・基礎物理学研究所・准教授	場の量子論の量子シミュレーション
分担	本多 正純	国立研究開発法人理化学研究所・数理創造プログラム・上級研究員	場の理論の量子計算とアルゴリズム開発
分担	奥田 拓也	東京大学・総合文化研究科・助教	量子計算する物理系の理論的解析
合計 5 名			

研究項目 : D02

研究課題名 : 量子情報を用いた量子多体系の制御とテンソルネットワーク

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	奥西 巧一	新潟大学・自然科学系・准教授	テンソルネットワークとくりこみ群、研究統括
分担	上田 宏	大阪大学・量子情報・量子生命研究センター・准教授	テンソルネットワーク、および量子古典ハイブリッドアルゴリズム
分担	堀田 知佐	東京大学・大学院総合文化研究科・教授	物性模型の解析、サイン 2 乗変形
分担	原田 健自	京都大学・情報学研究科・助教	エンタングルメントくりこみ群、テンソルネットワークアルゴリズム
分担	桂 法称	東京大学・大学院理学系研究科・准教授	可解模型とトポロジカル物性
合計 5 名			

3 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
E01 公	22H05250 対称性と情報幾何に基づく量子重力・量子物性の探求	令和4年度 ～ 令和5年度	田島 裕康	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教	1
E01 公	22H05252 量子制御理論に基づく量子多体系における物理的に自然な t-design の生成法の研究	令和4年度 ～ 令和5年度	尾張 正樹	静岡大学・情報学部・准教授	1
E01 公	22H05254 量子情報理論的手法による1次元テンソルネットワークの数理的解析	令和4年度 ～ 令和5年度	加藤 晃太郎	名古屋大学・情報学研究科・助教	1
E01 公	22H05256 NMR を用いた非平衡量子多体系システム構築および量子情報制御	令和4年度 ～ 令和5年度	清水 康弘	静岡大学・理学部・教授	1
E01 公	22H05267 冷却リュードベリ原子を用いたグラフ状態の生成と測定型量子計算への応用	令和4年度 ～ 令和5年度	富田 隆文	分子科学研究所・特任助教	1
E01 公	24H00954 磁気共鳴による開放量子多体系の量子カオスと秩序形成	令和6年度 ～ 令和7年度	清水 康弘	静岡大学・理学部・教授	1
E01 公	24H00952 量子多体系における物理的に自然な t-design の生成法の実用化に向けた研究	令和6年度 ～ 令和7年度	尾張 正樹	静岡大学・情報学部・准教授	1
E01 公	24H00937 量子物質中での Toric code 相の探求	令和6年度 ～ 令和7年度	水上 雄太	東北大学・理学研究科・准教授	1
E01 公	24H00943 計算科学から見る量子性:量子マジックによる誤り耐性量子計算と量子多体系の解析	令和6年度 ～ 令和7年度	高木 隆司	東京大学・大学院総合文化研究科・准教授	1
E01 公	24H00977 スパイラル観測基底を用いた光格子中量子多体系の量子状態トモグラフィー	令和6年度 ～ 令和7年度	小沢 秀樹	国立研究開発法人理化学研究所・量子コンピュータ研究センター・研究員	1
E02 公	22H05247 量子もつれに基づいた強相関開放量子系でのトポロジカル物性の探索	令和4年度 ～ 令和5年度	吉田 恒也	京都大学・大学院理学研究科・准教授	1
E02 公	22H05248 量子情報理論及び物性理論からの量子重力理論へのアプローチ	令和4年度 ～ 令和5年度	沼澤 宙朗	東京大学・物性研究所・助教	1

E02 公	22H05251 テンソルネットワークの素粒子物理学への応用	令和4年度 ～ 令和5年度	武田 真滋	金沢大学・理工研究域・准教授	1
E02 公	22H05253 くりこみ群に基づくテンソルネットワークにおける時空の創発の研究	令和4年度 ～ 令和5年度	土屋 麻人	静岡大学・理学部物・教授	1
E02 公	22H05257 インフレーション宇宙モデルにおける量子もつれ構造と情報スクランブリン	令和4年度 ～ 令和5年度	南部 保貞	名古屋大学・大学院理学研究科・准教授	1
E02 公	22H05259 Jackiw-Teitelboim 重力理論に立脚した量子重力理論の研究	令和4年度 ～ 令和5年度	吉田 健太郎	埼玉大学・理工学研究科・准教授	1
E02 公	22H05263 重力の量子性の検証に向けた懸架型光学機械振動子の精密理論モデルの構築	令和4年度 ～ 令和5年度	山本 一博	九州大学・大学院理学研究院・教授	1
E02 公	22H05265 量子情報で繋ぐブラックホールのミクロ・マクロ描像の研究	令和4年度 ～ 令和5年度	玉岡 幸太郎	日本大学・文理学部・助教	1
E02 公	22H05266 量子フラストレート磁性体におけるエンタングルメントウィットネス	令和4年度 ～ 令和5年度	下川 統久朗	沖縄科学技術大学院大学・量子理論ユニット・スタッフサイエンティスト	1
E02 公	22H05268 孤立量子系の非エルゴード性に由来する新奇量子多体現象の研究	令和4年度 ～ 令和5年度	國見 昌哉	東京理科大学・理学部・助教	1
E02 公	22H05270 次世代観測で探る原始ブラックホールの蒸発における量子性の理論的研究	令和4年度 ～ 令和5年度	郡 和範	国立天文台・科学研究部・教授	1
E02 公	24H00944 量子エンタングルメントから創発する物理の研究	令和6年度 ～ 令和7年度	沼澤 宙朗	東京大学・物性研究所・助教	1
E02 公	24H00972 量子情報量で解き明かす量子宇宙と特異点の物理	令和6年度 ～ 令和7年度	玉岡 幸太郎	日本大学・文理学部・助教	1
E02 公	24H00974 大規模数値計算と実物質データで切り開くランダム量子フラストレート系の新奇磁性現象	令和6年度 ～ 令和7年度	下川 統久朗	沖縄科学技術大学院大学・量子理論ユニット・スタッフサイエンティスト	1
E02 公	24H00956 曲がった時空における量子もつれの物理: パートナー公式の応用	令和6年度 ～ 令和7年度	南部 保貞	名古屋大学・大学院理学研究科・准教授	1
E02 公	24H00957 強結合理論と弦理論の新たな半古典領域と時空の創発	令和6年度 ～ 令和7年度	渡邊 真隆	名古屋大学・情報学研究科・助教	1

E02 公	24H00946 混合状態トポロジカル相の理論的探求	令和6年度 ～ 令和7年度	押川 正毅	東京大学・物性研究所・教授	1
E02 公	24H00945 量子開放系のダイナミクスとエンタングルメント	令和6年度 ～ 令和7年度	川畑 幸平	東京大学・物性研究所・准教授	1
E02 公	24H00963 曲がった時空上の相互作用する場の赤外極限から探る極限宇宙	令和6年度 ～ 令和7年度	田中 貴浩	京都大学・理学研究科・教授	1
E02 公	24H00967 ホーキング放射で生成されるグラビトンの量子性	令和6年度 ～ 令和7年度	菅野 優美	九州大学・理学研究院・准教授	1
E02 公	24H00973 テンソルネットワーク法を用いた非平衡系に現れる量子スピン液体の探索	令和6年度 ～ 令和7年度	金子 隆威	上智大学・理工学部・特任教員(准教授)	1
E02 公	24H00940 テンソル繰り込み群による場の理論におけるエンタングルメント・エントロピーの研究	令和6年度 ～ 令和7年度	藏増 嘉伸	筑波大学・計算科学研究センター・教授	1
E02 公	24H00970 量子制御・量子もつれ・双対性に基づくトポロジカル相と相転移の研究	令和6年度 ～ 令和7年度	古川 俊輔	慶應義塾大学・理工学部・講師	1
E02 公	24H00975 ハミルトニアン形式による格子QCDの新展開	令和6年度 ～ 令和7年度	日高 義将	京都大学・基礎物理学研究所・教授	1
E02 公	24H00976 素粒子模型における量子ブラックストリングの研究	令和6年度 ～ 令和7年度	濱田 雄太	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教	1
E03 公	24H00949 冷却原子気体・量子シミュレータを用いた多体状態のエンタングルメント測定	令和6年度 ～ 令和7年度	素川 靖司	東京大学・大学院総合文化研究科・准教授	1
E03 公	24H00965 トポロジカル量子スピン液体における量子エンタングルメント	令和6年度 ～ 令和7年度	末次 祥大	京都大学・理学研究科・助教	1
E03 公	24H00979 短焦点レーザー航跡場電子加速によるウンルー効果検証に向けた高加速度場形成	令和6年度 ～ 令和7年度	近藤 康太郎	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構関西光量子科学研究所・光量子ビーム科学研究部・主任研究員	1
公募研究 計 38 件 (廃止を含む)					

[1] 公：公募研究

[2] 公募研究は研究代表者が1名で実施

研究領域全体に係る事項

4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させる」ものであるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

【本研究領域の目的】

これまで物理学では空間・時間・物質を基本的構成要素として自然法則を説明してきた。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ぶ）では、強い量子性による揺らぎのために、空間・時間・物質という従来の捉え方では対象が不明瞭になり、困難に直面する。この極限宇宙とは、具体的には次の自然界における3つの極限と関連する3つの物理学の究極の難問を意味する：

- (1) 空間の極限: ブラックホールの量子論「ブラックホールが蒸発すると中の量子情報は消えてしまうのか？」
- (2) 時間の極限: 宇宙創成のメカニズム「宇宙はどのように無から量子的に生まれたのか？」
- (3) 物質の極限: 量子物質のダイナミクス「量子情報を用いて量子物質を効率的に解けるか？」

ところが、重力理論と量子物質の理論が物理として同じ理論であるという「ゲージ重力対応」[Maldacena, ATMP(1998), Google Scholar(GS)引用件数 24500 回超]に基づいて、量子情報の相関を測るエンタングルメント・エントロピーが重力理論における曲面の面積に等しいという「笠-高柳公式」[Ryu-Takayanagi, PRL(2006), GS 引用件数 4500 回超]が、研究代表者らによって発見された。これらから、重力理論の宇宙は量子情報の無数の集積であるという予想が得られ、国際的に注目を集めている。一方、この量子情報の集積は「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る。そこで本領域では量子情報と物理学を融合させ、極限宇宙の3つの問題の解明を目指す(図1参照)。

図1：本領域の概念図



応や一般相対性理論の数理を量子情報理論と組み合わせることで取り組む。

(2) **C グループ**(C01,C02,C03): 宇宙創成の謎を解明するには、現在でも難問である量子重力理論の深い理解が必要である。この問題を量子情報とゲージ重力対応の関係やその数理構造から大きく進展させる。

(3) **D グループ**(D01,D02): 量子物質のダイナミクスを量子情報的な観点から効率的に解くことを目的に、量子計算機シミュレーションやテンソルネットワークによる量子物質解析のアルゴリズムを開発する。

この B,C,D のグループは、素粒子論(01)、物性物理(02)、宇宙論(03)からアプローチする計画研究に細分化される。このように、本領域では縦糸(従来の研究分野)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、ブレークスルーを狙う。また、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(BH)や宇宙創成を模した実験検証を行い、次世代の計算技術と期待される量子計算機を用いた量子物質の解析手法(D01,D02)を開発する。そして、公募研究による相補的研究が加わることで、量子情報と物理学の異分野融合研究を発展させる。

各計画研究の具体的な研究内容は以下のとおりである：

[A01] 量子計算複雑性、量子エンタングルメント、量子誤り訂正符号、ランダム性などの観点から、物理学のための量子情報理論を開拓する。

[B01] 量子情報とゲージ重力対応から BH 内部を解析し、BH の情報問題の解明を行う。

[B02] ブラックホールを模した冷却原子を用いた物性実験を行う。また関連する理論研究を行う。

[B03] 時空の大域的構造を解析から、BH の情報問題の解明とゲージ重力対応への応用を行う。

[C01] 量子情報からゲージ重力対応の基礎原理を解明して、量子宇宙の解析手法を開拓する。

[C02] 量子宇宙を模した量子ホール系の実験を理論的な解析と比較することで、理論検証を行う。

[C03] 宇宙論の数理的構造の解析から、ゲージ重力対応や量子宇宙論を解明する。

[D01] 量子情報に基づき場の量子論を分類。場の量子論の量子計算機シミュレーション法を開発する。

[D02] 2次元量子多体系のテンソルネットワーク法を開発。物性系の量子散逸ダイナミクスを解明する。

次に「**国際活動**」を重視する。量子情報と物理学の融合は国際的な潮流であり、領域代表の高柳は2020年まで続いた米国が中心の It from qubit 共同研究で PI を務め、欧米の主要研究者と研究連携してきた。本領域ではこのプロジェクトを受け継ぎ、国際的視野に立った研究員の雇用・派遣や、国際集会の開催などを行い、国際的主導権を握る。実際、本領域で現在雇用している計13名のポスドク研究員のうち8名が外国人である。本領域の総括班評価者にはウルフ賞受賞者の Ignacio Cirac 氏、ブレークスルー賞受賞者の Juan Maldacena 氏、Perimeter 研究所長 Robert Myers 氏など海外の著名研究者も含まれる。

そして最後に重視するのが「**若手支援**」である。このような最先端の研究では、既存の枠組みにはとられない若手研究者がブレークスルーを起こしている。本領域では、若手に異分野の最先端の知識を提供する領域スクール、若手を異なる計画研究のグループに派遣し異分野融合を促進する若手循環プログラム、若手を海外に派遣し、国際共同研究を推進する若手海外派遣プログラムを実施する。

【全体構想:期待される成果と意義】

本領域では、量子情報の視点から物理学を捉え直すことで、極限宇宙の3つの問題の解明に向けて大きな成果が期待される。まず、ゲージ重力対応と量子情報理論を組み合わせ、ブラックホールの蒸発過程における情報損失問題に説明を与える。同時に量子ブラックホールを模した冷却原子実験を行い、基礎理論を実証する。次に、ゲージ重力対応の起源を量子情報理論の観点から説明し、それを一般化することで、ドジッター宇宙など、宇宙創成を記述する量子重力理論を構築する。同時に、量子ホール系で時間的に膨張するエッジ状態を用いて宇宙創成を模した物性実験を行い、基礎理論を実証する。さらに、量子物質のダイナミクスに関して、量子情報理論を利用した数理的手法に加え、数値的解析法として、高次元テンソルネットワーク法や場の量子論を量子計算機で解析するアルゴリズムを開発する。上記の研究を通じ、量子情報の視点から物理学を再構築するとともに、物理学を念頭に置いた量子情報理論を整備して、異分野融合領域を誕生させる。

5 審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

本領域に関して「留意事項」は無しなので、「審査結果の所見」への対応の進捗状況を以下で述べる。

(1)新領域開拓に関して:「量子重力理論と量子情報理論、両分野の発展に関しても本領域研究が大きな寄与をもたらすことが期待できる。特に、場の量子論の非摂動的取り扱いや量子多体系のダイナミクスを情報理論の観点から新たに解析する着想は興味深く、新しい研究領域の開拓につながると予想され、新展開が期待できる研究計画である」と所見で述べられている。

このような融合研究を促進するために、領域内部の異分野融合勉強会である月例の**循環ミーティング**と、領域外より融合研究で著名な研究者を招聘する月例の**領域コロキウム**を議論の時間も十分確保する形でオンライン開催している。また**領域スクール**をこれまで5回開催しており、量子情報理論や量子計算機の手法、テンソルネットワーク法、重力理論などの基礎的知識などを、異分野の研究者が学べる機会を定期的に作っている。また国際研究活動として、**領域国際会議**を2021年12月(オンライン、米国の It from qubit 共同研究と共催)、2022年9月(京大)、また2023年9月には京大で5週間に及ぶ滞在型研究会として開催し、総括班評価者の Myers 氏を含む海外の著名講演者も多数講演を行った。その他、各計画研究が中小規模の**分野融合型研究会**や**集中講義**を、今まで10件以上開催してきた。

また、本領域では**各班の専門分野とは異なる分野の出身の PD(ポスドク研究員)**が採用されている。例えば、本領域の PD である Yosprakob は素粒子論出身であるが、物性理論の専門家の集まる計画研究 D02 に所属し、テンソルネットワークの研究に従事している。また、若手研究者を専門分野が異なる班に数週間程度滞在させ、異分野融合研究に従事していただく**若手循環プログラム**も実施している。

このような領域活動が功を奏し、既に**異分野融合による優れた成果**を次の例のように多く得ている:

- 量子情報専門の中田(A01)と物性理論専門の手塚(B02)が共同で、特異な量子カオス系として注目されている SYK 模型の性質を量子誤り訂正の観点から特徴付ける研究を行い、SYK 模型は量子誤り訂正の性質を持つが、一般の量子カオス系は必ずしも量子誤り訂正の性質を持たないことや、量子誤り訂正に関連した量子系のクロスオーバーを発見し PRR 誌のレターに掲載[PRR6(2024)L022021]。
- 素粒子論が専門の高柳(C01)と量子情報が専門の Parzygnat(当時 A01 雇用の研究員、現在米国 MIT の講師)が共同で、ブラックホールの情報問題でも重要な量子系で最終状態を選択する過程に対して、中間状態を持つ量子エンタングルメントの量を測るエントロピーの公式を発見[JHEP12(2023)123]。
- 物性理論が専門の奥西(D01)と素粒子論が専門の高柳(C01)が共同で、相転移の基本模型でもあるベータ格子イジング模型がホログラフィック繰り込み群の構造を持ち、ホログラフィー原理でベータ格子を p 進体上の反ドジッター宇宙と解釈できることを見出した[PTEP (2024) 1, 013A03]。
- 宇宙論専門の泉、白水、棚橋(C03)が素粒子論専門の高柳(C01)と共同で、ゲージ重力対応における重力波と対応する量子情報の性質を解析し、新しい双対性の検証に成功した[JHEP 10 (2022) 050]。
- 素粒子論が専門の伊藤と本多(D01)は、量子計算機のアルゴリズムを場の量子論の研究に応用することで、電荷が反対の粒子間に斥力が働く状況を実現[PTEP 2022 (2022) 033, Editor's choice]。
- 素粒子論が専門の高柳、疋田(C01)と西岡(D01)が共同で、量子情報を用いてゲージ重力対応を拡張して、ドジッター宇宙のホログラフィー原理の具体例を発見[PRL129(2022)041601, Editor's selection]。
- 宇宙論専門の村田(B03)と物性理論専門の山本(B02)らは量子臨界点近傍のスピン鎖で、3次元時空の重力理論とホログラフィー原理で対応するダイナミクスが実現する例を構成[arXiv:2310.13299]。
- 物性理論専門の手塚(B02)は、原子核理論出身の Rinaldi (Quantinuum 社) らと、ボソン系の量子計算を古典計算機で性能評価する手法を提案[Mach. Learn.: Sci. Technol. 4(2023)045021]。

- 物性理論が専門の上田(D02)は、量子コンピューティングが専門の藤井（大阪大学）らと、大規模量子系の解析に資する分割統治的量子変分固有値ソルバーを提案[PRX Quantum 3 (2022), 010346]。
- 素粒子論が専門の奥田（D01）は、量子情報が専門の助野（米国 Stony Brook 大学）と共同で、測定型量子計算を用いた格子ゲージ理論の新たなシミュレーションを行った[SciPost Phys. 14 (2023) 5, 129]。
- 量子暗号理論が専門の森前（A01）は、量子重力理論で見出された量子状態の双対性[Aaronson-Atiyah-Susskind]を量子暗号に用いることにより、新しい量子暗号機能を構成することに成功し暗号のトップ国際会議 Eurocrypt で発表した。また、森前(A01)は、物性物理におけるハミルトニアン基底エネルギーを求める複雑性を計算量理論の視点から解析し、計算機科学のトップ国際会議 ICALP で発表。
- 量子情報物理学が専門の堀田(C02)は宇宙論が専門の南部保貞氏（E02）とともに量子ホール系エッジ電流での量子宇宙シミュレータを用いた量子もつれ構造の研究を行った[Phys.Rev.D107(2023),085002]。

(2)実験研究に関して:「一方で、本領域研究の基盤を構成している「ゲージ・重力対応」は一つの仮説であるので、実験的結果も参考として、極限宇宙(ブラックホールや量子宇宙)の法則の解明にいかなる進展を本領域研究がもたらすかを整理して進める必要がある。」と所見で述べられているが、本学術変革領域で行われる二つの物性実験：量子ホール効果を用いた量子宇宙の実験（実験責任者 C02 遊佐）、冷却原子を用いたブラックホールを模した量子多体系シミュレーション(実験責任者 B02 中島)は、領域の実験家と理論家が緊密に連携をとることで、着実に進められている。循環ミーティングや領域会議などで、実験家（遊佐、中島）が、領域の多くの理論家と、極限宇宙の理論の実験的な検証法に関して討論する機会を十分設けてきた。

計画研究 C02 の量子ホール実験に関しては、2022年に量子ホール効果を用いて量子宇宙を実験室で再現できる理論を構築した論文を出版した[Phys.Rev.D 105 (2022) 10, 105009]。この論文は世界的にも注目され、多数の国際会議で招待講演を行い、2023年には応用物理学会誌『応用物理』に招待解説記事が掲載された。実際の測定に必要な希釈冷凍機が搬入されたのは2023年3月だったため、上記論文やその後理論提案に基づいたデバイスの試作や4ケルビンでの予備測定等の事前準備を行うとともに、既存設備を利用した超高速顕微分光測定によって、本研究の1+1次元時空の舞台となる量子ホールエッジの時空間の制御に関する研究を進め、エッジの励起状態の可視化や、エッジ伝搬経路の精密制御などに成功し、国内外で招待講演を行った。

計画研究 B02 の冷却原子実験に関しては、測定誘起相転移の観測や非時間順序相関関数の測定の舞台となる光格子中の冷却リチウム(Li)原子実験系の構築を進めており、2022年度中には光トラップ中で蒸発冷却を行なうことで、フェッシュバッハ分子 ${}^6\text{Li}_2$ のボース・アインシュタイン凝縮を実現・観測した[日本物理学会 2022年秋季大会]。2023年には交差型光トラップを導入して蒸発冷却を進めることで ${}^6\text{Li}$ のフェルミ縮退を達成した。並行して光格子のための光学系を構築し、pulsed lattice の方法による光格子ポテンシャルの評価を完了している。また測定誘起相転移の実現に向けた準備として、光会合による分子形成・原子ロス共鳴の観測に成功している。2023年度中に実験担当者の異動に伴う実験室の引越しにより実験系が解体されたため、早期の実験系の復旧および測定誘起相転移の観測を目指している。

また、**実験と理論の融合を促進**するために、2023年5月に東京大学駒場キャンパスにて「極限宇宙 WS ～実験と理論の協奏をめざして」を開催した。領域 C、D 班を中心とするメンバー6名と領域外から7名を招き、冷却原子系の実験、理論、物性の実験に関する初歩的な話から最先端の結果まで発表いただいた。活発な質疑応答と議論を通じ、実験の技術面の知見の共有および理論における概念の共有を進めることができた。この研究会での交流がもととなり、2024年9月日本物理学会において、「量子多体系におけるダイナミクス研究の進展：極限宇宙の物理法則を探る」を企画するに至っている。このシンポジウムでは固体物性や統計物理を含む領域 1,3,8,11 合同で、極限宇宙の柱の1つである量子ダイナミクスの問題について最新の理論と実験の進展を議論し、分野融合をさらに推し進める予定である。

6 研究の進展状況及び主な成果

(1) 及び(2)について、計画研究及びそれと連携している公募研究ごとに、具体的かつ簡潔に記述すること。(一つの計画研究及び連携する公募研究で2頁以内)

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか

(2) 各計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果について、(計画研究・連携する公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。)

計画研究 A01 と関連する公募研究(第一期:田島・加藤、第二期:尾張・高木)に関して

(1) 何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか

● **目標** 計画研究 A01「理論物理学のための量子情報理論基礎」が領域期間に目指している研究目標は、以下のようである:

本計画班は量子情報理論の専門家からなる班であり、「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、必要となる「言語」を他班に提供する役割と、量子情報の基礎理論そのものを深化させることによりその「言語」をより良いものに磨き上げる、というのが領域設定期間内でのゴールである。特に、中間評価実施時までには、以下の目標を目指した:

目標(I) 量子暗号理論や量子アルゴリズム理論における量子計算量理論の研究とその素粒子等への応用、

目標(II) 量子ランダムネス理論の研究とその情報スクランブリングや物性物理等への適用、

目標(III) 量子チャネル理論の研究とそれを用いた量子ネットワークの解明および統計物理等への応用、

公募班 量子測定の限界の理論的解明、テンソルネットワークによるトポロジカル物性等への応用、量子制御における t-design の研究、等を目指した。

● **進展状況** 以下のように総じて、想定以上に進展している(計 42 本の論文・国際会議 proceedings を出版)。

目標(I)に関して:量子暗号における基礎的な仮定が古典暗号のそれとは異なることを初めて指摘した。さらに、その仮定が物性物理における疑似エンタングルメントや素粒子物理における blackhole decoding と密接に関連していることが明らかになった。また、物性物理等で標準的な Hamiltonian に対する Ansatz 状態付きのハミルトニアン複雑性を明らかにした。

目標(II)に関して:量子情報と量子カオス系を分野横断的に解析し、量子多体系がブラックホールと双対になるには量子カオスという性質だけでは不十分で、さらに強い要請が必要であるという結果を得た。

目標(III)に関して:経済における expected utility という概念を基礎にして量子熱力学を構成することに成功した。また、量子インターネットの設計と実現という広範な課題の中で、量子中継器がどのように位置づけられるかについて総合的な検討を行った。

連携する公募研究班に関して:

Wigner-Araki-Yanase 定理の運動量保存則への拡張、また情報スペクトル理論で Fisher 情報量を取り扱うための手法を新たに開発し、任意相関を持つ量子状態の変換における問題を解決した。

(2)計画研究とそれと連携する公募研究で得られた成果

● **計画研究 A01 の成果**

◆古典暗号理論においては、一方向性関数が最も基礎的な要素であることが 30 年以上前から分かっており、どの教科書にも書かれている。つまり、一方向性関数が存在しないならば、ほぼ全ての暗号技術は不可能となる。しかしながら、森前らは量子を使った暗号(量子暗号)の場合は、一方向性関数が無くても様々な量子暗号技術が可能であることを世界で初めて証明した。本成果は暗号のトップ国際会議 Crypto および量子情報のトップ国際会議 QIP2023 に採択された。この成果は暗号のみにとどまらずに、計算機科学や物理にも大きな影響を与えている。例えば、最近、このような量子暗号におけるエレメン

トが **blackhole decoding** の解明に役立つことが示されたり、暗号に基づく疑似エンタングルメントという概念が提案され、素粒子や物性において活発に研究がなされている。そのため、2023 年夏に米国 **Simons Institute** においてこのテーマに特化したワークショップが開かれ、森前がワークショップの最初にこのテーマについてのレビューの招待講演を行った。

◆量子多体系の基底エネルギーを高速に求めるのは **BQP 完全**、すなわち、古典計算機では非常に難しく、量子計算機が必要であることが知られている。しかしながら、通常の量子多体物理においては、**Hamiltonian** からそのまま基底エネルギーを求めるのではなく、**Ansatz** 状態と呼ばれる、基底状態の候補となる状態を仮定し、そこから基底エネルギーを求めることが多い。森前らは、このように **Ansatz** 状態をもらったとしても、やはり基底エネルギーの計算は **BQP 完全**であることを証明した。この成果は計算機科学におけるトップ国際会議 **ICALP2023** および量子情報のトップ国際会議 **QIP2023** に採択された。これはオランダ、ドイツのチームとの国際共同研究である。

◆中田らは、複雑な量子多体系におけるダイナミクスを量子情報的な観点から解析した。近年の研究から、ブラックホールと量子カオスを結ぶホログラフィック双対を理解するためには、量子誤り訂正という量子情報的な視点が重要であることが判明しているが、これまで、量子カオスと量子誤り訂正の関係に対する網羅的な研究はなかった。今回、量子情報と量子カオス系を分野横断的に解析し、量子多体系がブラックホールの双対になるためには量子カオスという性質だけでは不十分で、さらに強い要請が必要であることを示す結果を得た。本結果は、**Phys. Rev. Research** の **Letter** として出版された。また、これは **B02** 班のメンバー手塚と行った、異なる班をまたぐ共同研究である。

◆**Buscemi** らは、経済における **expected utility** という概念を基礎にして量子熱力学を構成することに成功した。この成果はブリストル大およびシンガポール国立大との国際共同研究であり、**Physical Review Letters** に掲載され、量子情報のトップ国際会議 **QIP2024** にも採択された。**Buscemi** らはさらに、量子系における **time-like** な相関を統一的な方法でしかも操作論的に表現する方法を世界で初めて考案し、**Physical Review Letters** に掲載された。これは **MIT** および香港大との国際共著論文である。

◆量子インターネットは量子情報処理の究極形の一つであり、様々な量子情報処理タスクの世界規模での実装を可能にする。しかし、量子インターネットの実現には、数多くの解決しなければならない課題がある。その最たる例は、量子情報の長距離伝送に不可欠となる量子中継器の実現である。量子中継器は、古典的な中継器、エクステンダやブースタの対応物として、量子ネットワークを構成する量子通信路の損失やノイズを克服するために必要とされる。今回、東らは、量子中継の概念的枠組みやアーキテクチャ、実現に向けた実験的進展についてポイント・ツー・ポイントの量子通信による通信速度限界を克服するための、マイルストーンとなり得る提案についても議論し、量子インターネットの設計と実現という広範な課題の中で、量子中継器がどのように位置づけられるかについて総合的なレビュー論文を **Review of Modern Physics** に出版した。これは米国、オランダ、フランス、カナダの研究者との国際共著論文である。

●A01 と連携する公募研究の成果

◆**Wigner-Araki-Yanase(WAY)**定理は、「保存則の下では、保存量と非可換な物理量を誤差なく測定できない」という定理であるが、これまでの結果は有界な物理量に限定されていた。これは、運動量保存則に対して **WAY** 定理が成立するかどうか分からないことを意味しており、もしも運動量保存に対して **WAY** が成立するならば、運動量保存の下では、位置は単独でも誤差なし測定ができないことを意味するので、重要な問題である。田島らは、この問題を **Yanase** 条件と呼ばれる、当該分野でよく使われる条件を仮定するという条件下で完全に解決した。これは **WAY** 定理が 1960 年に成立して 60 年以上残されていた重要な未解決問題であり、該当分野の重要な進展と言える。この成果は、**Physical Review Letter** に掲載され、**Featured in Physics** に選ばれた。

◆また、田島らは、対称性を扱うリソース理論である Resource theory of asymmetry (RTA)の non-iid convertibility の問題を解決した。RTA では他のリソース理論と異なり、Fisher 情報量が基本的なリソース指標になる(他のリソース理論ではエントロピーが基本指標)ため、任意相関を持つ量子状態(non-iid)の変換理論を取り扱う際の基本理論である情報スペクトル理論が適用できず、non-iid の変換理論が構築されてこなかった。そこで、田島らは、情報スペクトル理論で Fisher 情報量を取り扱うための手法を新たに開発し、この問題を解決した。この成果は Physical Review Letters に採択された。

計画研究 B01と関連する公募研究(第一期:玉岡)に関して

(1) 何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

●目標 計画研究 B01「量子情報を用いた量子ブラックホールの内部の物理学の解明」が領域期間に目指している研究目標は、次の2つに大きく分かれる:

目標(I):ブラックホールと等価な量子多体系の解明 ゲージ重力対応と量子情報を組み合わせることにより、ブラックホールおよびそれに等価な量子多体系を解明する。ゲージ重力対応が成立するならば、ブラックホールに入った情報は失われることがない。しかしこの前提条件となるゲージ重力対応の成立、およびブラックホールを記述する量子多体系自体が一体どんな要素を必要とするかの理解がまだ乏しい。カオス性を鍵としてブラックホールに等価な量子多体系を解明する。中間評価時まで、(I-1)ブラックホールに等価な量子多体系のカオス性の解明、(I-2) ホーキング輻射などスクランブルされた状態から情報を読み解く研究、(I-3)ブラックホールの微視的な量子状態から特徴を読み解く研究を行う。

目標(II):量子重力理論の特徴の解明と量子情報量の探求 ゲージ重力対応をより理解するのに本学術変革の要となる量子情報的視点が必須であり、新しい物理量を探索する必要がある。また一般に量子重力理論はどのように定義すべきか、どのような特徴を持つべきであるかの理解が乏しい事を踏まえ、中間評価時まで、(II-1)ゲージ重力対応に関連した量子情報量の探求、(II-2)弱い重力予想に基づく量子重力理論の側面の解明、(II-3)ゲージ理論から重力理論を読み解くバルク再構成法の研究を行う。

連携する公募研究 (I)と(II)の目標に対し、対称性の制限下でのページ曲線や擬エントロピー(玉岡)の観点で相補的にアプローチする。

●進展状況 以下のように概ね想定通りに進展している(計 35 本の論文出版、55 件の招待講演)。

目標(I)に関して:飯塚(B01 代表)はカオス性の指標であるクリロフ複雑性が、飯塚らが以前提案した IP 行列モデルと呼ばれる行列の量子力学系で時間に対して指数増大する事を発見した[JHEP11(2023)065]。飯塚らはクリロフ複雑性が large N 理論において閉じ込め-非閉じ込め相の秩序変数たりうる事を発見した[JHEP04(2024)119]。飯塚と Sake(B01 ポスドク)らは希薄ランダム行列において、希薄さの度合いとスペクトラル密度間の新しい関係性を発見し[JHEP11(2023)234]、希薄 SYK モデルにおいてある極限下ではブラックホールのカオス性を再現する事を発見した[JHEP10(2023)160]。宇賀神(B01 分担)らは、情報を読み取るのに必要であると考えられている Petz 写像による情報の読み取りを、様々なモデルで解析した[PTEP(2023)123B04]。重森(B01 分担)らはブラックホールの微視的な状態であると考えられている時空の拡張解の構成に成功した[JHEP02(2023)099]。

目標(II)に関して:飯塚らは自身らが新たに開発した砂時計法という手法でゲージ理論の量子もつれの計算に成功した[PRD105(2022)085003]。飯塚、Sake、Zenoni(B01 ポスドク)らは2次元 JT 重力理論での量子複雑性の正しい定義法を指摘した[JHEP06(2023)213]。野海(B01 分担)らは、ユニタリー性を指導原理として暗黒物質と量子重力の整合性の検証に成功した[PRD108(2023)056013]。寺嶋ら(B01 分担)は時空の再構成法の部分領域相補性を指摘した[JHEP11(2022)041]。

連携する公募研究に関して: 玉岡、野海らは対称性の破れの下でブラックホールのユニタリー性を表すページ曲線がどのような補正を受けるのかの解析に成功した[JHEP10(2022)015]。

(2)計画研究とそれと連携する公募研究で得られた成果

●計画研究 B01 の成果

◆ 飯塚ら、行列模型でブラックホールのカオス性を示す事に成功 [JHEP11(2023)065,JHEP11(2023)096]

ゲージ重力対応に現れるラージ N 理論は解くのが困難である。飯塚らが 2008 年に提唱した IP モデルと呼ばれる量子力学モデルはこの困難を回避し解けるラージ N ゲージ理論である。本研究ではこの IP モデルでカオスの新しい指標であるクリロフ複雑性を計算し、高温ではブラックホールと同じ振る舞い示すことを発見した。行列模型でのクリロフ複雑性の具体的検証は世界初である。この結果は行列模型とブラックホールのカオス性に関する共通性を示す結果であり、研究目標(I-1)に関する代表的成果である。

◆ 飯塚ら、クリロフ複雑性が U(N)ゲージ理論の秩序変数たり得る事を発見 [JHEP04(2024)119]

上の研究で発見されたことは、クリロフ複雑性の振る舞いは温度に強く依存するという事実であり、ここからクリロフ複雑性が U(N) ゲージ理論の閉じ込め/非閉じ込めの秩序変数たり得る事を発見し、具体的なラージ N ゲージ理論でその検証に成功した。研究目標(I-1)へ貢献した成果である。

◆ 飯塚・Sake ら、局所 SYK モデルの極限からブラックホールの特徴を示すことに成功 [JHEP10(2023)160]

SYK モデルはフェルミオンの多体系量子力学模型である。これを変形し相互作用を近接相互作用のみに限定した局所 SYK モデルは SYK モデルと全く異なりカオスの特徴を示さないが、ある種のパラメータ極限をとればブラックホールと同じ特徴を示す。どの様な状況下でブラックホールと等価な量子多体系になれるのかに知見を与え研究目標(I-1)へ大きく貢献した成果である。

◆ 宇賀神ら、Petz map の手法を用いスクランブルされた情報を読み取ることに成功[PTEP(2023)123B04]

量子情報で知られる Petz map はブラックホール内部をホーキング輻射から読み取るのに重要だと考えられている。本研究ではこの写像を用い、SYK 模型およびランダムユニタリー模型で情報再現が可能だという事を発見した。本研究は目標(I-2)へ大きく貢献した。

◆ 重森ら、ブラックホールの微視的解の多中心解の解析に成功 [JHEP03(2024)052]

ブラックホールの典型的な微視的状態を弦理論的の枠内で構成する上でよく調べられている「多中心解」があるが、これまでは余次元 3 の中心を持つ解しか調べられていない。本研究ではこれを拡張し、特定のクラスの余次元 2 の中心を持つ解を露わに書き下すことに成功し目標(I-3)へ貢献した。

◆ 飯塚ら、砂時計法によりゲージ理論で蒸留可能なエンタングルメントエントロピー (EE) の計算に成功 [PRD106(2022)085010]

ゲージ理論では局所的でない自由度を含み EE の定義自体が明らかではない。本研究では「砂時計法」という新しい計算手法をゲージ理論に適用し、LOCC で蒸留可能な EE を計算し、別の手法で計算された文献値と一致することを示すことに成功し、研究目標(II-1)へ大きく貢献した。

hourglass prescription



図：砂時計法

◆ 飯塚・Sake・Zenoni ら JT 重力の量子複雑性の選別に成功[JHEP06(2023)213]

状態を再現するのに必要なゲート数を表す量子複雑性は時空によってその振る舞いが大きく異なり、特に膨張宇宙を表すドジッター時空では指数増加する。本研究では 2 次元 JT 重力理論において重力側で提案されているいくつかの定義はゲージに依存するなど、大きな欠陥があることを発見し、正しい量子複雑量を探求する目標(II-1)へ大きく貢献した。

◆ 野海ら、散乱振幅のユニタリー性より暗黒物質と量子重力の整合性の検証に成功 [PRD108(2023)056013]

散乱振幅のユニタリー性は理論のパラメータに非自明な制限を与える。本研究ではこれを指導原理として、暗黒物質模型と量子重力の整合性を議論した。散乱振幅に基づく既存の手法の課題を整理した上で、現在進行中の暗黒物質探査実験により「量子重力の整合性条件」を検証できる可能性を指摘することに成功した。本研究は目標(II-2)へ大きく貢献した。

◆ 寺嶋ら、バルク構成法の部分領域相補性を提案[JHEP11(2022)041]

CFT 側で空間の一部のみを切り取った理論を考えたときに、量子重力理論側でも、対応する部分領域をとれば同じ相関関数を再構成できることが予想されている。この時、量子重力の非摂動的な効果のために、CFT 作用素としては元のものとは異なることを指摘し、目標(II-3)へ大きく貢献した。

●B01 と連携する公募研究の成果

◆ 玉岡・野海ら、Page 曲線における対称性の破れの役割を明らかにすることに成功 [JHEP10(2022)015]

ブラックホールの蒸発で情報が失われない事を示すには、ページ曲線と呼ばれる情報量の時間発展性を示す必要がある。本研究では、対称性の破れがある場合、このページ曲線にどのような変化が生じるかを「対称性分解エントロピー」という新手法を用い明らかにした。ブラックホールの情報問題の解決に向けた重要な成果で、目標(I-2)と(II-1)へ大きく貢献した。

計画研究 B02 と関連する公募研究(第一期:富田・國見、第二期:小沢・素川・金子・古川)に関して

(1) 何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

●目標 計画研究 B02「人工量子物質による量子ブラックホールの解明」が領域期間に目指している研究目標は、次の二つに大きく分かれる:

目標(I): 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。また、これに必要な理論研究を行う。中間評価時までに (I-1)異動後の実験室における実験系の再構築と、Li 原子の量子縮退領域までの冷却および光格子系の復旧、(I-2) 光格子系での量子状態の測定手法の開発、(I-3) 周期外場で駆動された場合を含む、量子多体系の非平衡ダイナミクスの理解、を行う。

目標(II): ゲージ重力対応により、重力を含まない量子多体系の研究から極限宇宙のブラックホールの本質に迫る。関連した量子計算の手法を開拓し、理論研究を推進する。中間評価時までに (II-1) 量子ブラックホールとホログラフィック対応する既存の模型について、量子計算に適する簡略版の開拓、(II-2) カオスのダイナミクスを示す量子多体系で、スクランプリングが実現するかどうかを理解、(II-3) ボース粒子系を含む量子多体系で、量子計算機により非平衡状態の物理量を評価する方法を確立、する。

連携する公募研究: (I)と(II)の目標に対し、計画研究と相補的な研究を行う。実験的には、冷却リユードベリ状態を用いた測定型量子計算(富田)、スパイラル観測基底を用いた光格子中量子多体系の量子状態トモグラフィ(小沢)、冷却原子気体を用いた多体状態のエンタングルメント測定(素川)の研究を行う。理論的には、孤立量子系の非エルゴード性(國見)、非平衡系に現れる量子スピン液体(金子)、量子制御・量子もつれ・双対性に基づくトポロジカル相(古川)の研究を行う。

●進展状況 以下のように総じて、想定程度の進展が得られている(計 25 本の論文出版、36 件の招待講演)。

目標(I)に関して: 中島(B02 分担)と山下(B02 ポスドク)は、光格子系中の冷却リチウム原子系の構築を進めてきた。 ${}^6\text{Li}$ (フェルミオン)および ${}^7\text{Li}$ (ボソン)のレーザー冷却(磁気光学トラップ)を実現し、光トラップ中で蒸発冷却により ${}^6\text{Li}_2$ 分子のボース・アインシュタイン凝縮と、 ${}^6\text{Li}$ 原子気体のフェルミ縮退を達成した。また、pulsed lattice による原子波回折パターンから光格子ポテンシャルの構築を確認した。さらに、測定誘起相転移の実現に向け、フェルミ縮退した原子気体に光会合光を導入し、分子形成・原子ロス共鳴の観測に成功した。中島の異動に伴う実験室の引越しにより実験系を一旦解体せざるを得なかったが、異動先の大阪大学で実験系の再構築を進め、光格子中での量子相の変化の確認を目指している。

山本(B02 分担)と Marmorini(B02 ポスドク)らは、光格子中の冷却気体に対する、スパイラル観測基底による効率的な量子状態トモグラフィ測定法を開発した。森(B02 分担)は、速い周期駆動下での系の加熱率を、フロケハミルトニアンの高周波展開から評価する手法を開発し、量子多体系全体に弱い散逸がある場合のスペクトルギャップの特異性を発見した[Phys. Rev. B 109(2024)064311]。

目標(II)に関して: Sachdev-Ye-Kitaev(SYK)模型は、ゲージ重力対応により、2次元量子重力理論に対応することが知られている。手塚(B02 代表)らは結合定数を二値化した希薄 SYK 模型を数値的に解析し、従来と比べて少数の項でランダム行列的なエネルギー準位統計が得られることを発見した[Phys. Rev. B 107(2023)L081103]。山本は村田(B03)らと共同で、スピン鎖で空間 2次元の重力系とゲージ重力対応す

るダイナミクスがみられる例を構成した[Phys. Rev. D 109(2024)126003]。また、手塚は中田(A01)と共同で、SYK 型模型やスピン鎖でのスクランブリングを解析し、量子カオスとスクランブリングの非同次性を見出した[Phys.Rev.Res. 6(2024)L022021]。手塚らはボソン系を量子計算機でシミュレートする際のカットオフの影響を古典計算機で効率的に評価する手法を提案した[Mach. Learn.: Sci. Technol. 4(2023)045021]。

連携する公募研究に関して：富田は短時間での量子状態判別に優れた実験手法の開発に成功し、目標(I)へ貢献した。國見は、孤立量子系で熱平衡化が起きない模型を提案するとともに、富田や桂(D02)ら、また、金子らと、非可積分系の特別な固有状態である量子多体傷跡状態を理論的に構成し、量子シミュレータで実験する方法を提案し、目標(I),(II)へ貢献した。

(2) 計画研究とそれと連携する公募研究で得られた成果

●計画研究 B02 の成果

◆ 山本・Marmorini ら、連続対称性を持つ2次元系の自発的対称性の破れの新メカニズムを発見 [Phys. Rev. Res. 5(2023)L022056, Phys. Rev. Lett. 132(2024)213401] SU(3)対称性を有するアルカリ土類金属原子気体の系において、成分間に個数差を導入した場合に、有限温度で対称性が部分的に破れた新たな秩序相が生じることを発見した。また、山本らは、そのような SU(N)対称性を持つ原子気体を量子領域の温度まで効率的に冷やす新たな方法も提案し、目標(I-1,2)へ貢献した。

◆ 森ら、開放量子系の定常状態の自己相関関数に関する厳密な不等式を証明 [Phys. Rev. Lett. 130(2023)230404] Lindblad 型の量子マスター方程式で記述される開放量子系のダイナミクスについて、対称化リウビリアンギャップと呼ぶ新たな量を導入することにより、定常状態における物理量の自己相関関数に関する厳密な不等式を証明し、目標(I-3)へ貢献した。

◆ 森、速い周期駆動下での系の加熱率を評価する手法を開発 [Phys. Rev. Lett. 128(2022)050604]

速い周期駆動により制御された系のエネルギーの増加を、フロケ有効ハミルトニアンの高周波展開から評価する手法を開発し、古典系・量子系両方の場合に有用性を確認して目標(I-3)へ貢献した。

◆ 中島ら、周期駆動系で多様なトポロジカル相の実現手法を提案 [Phys. Rev. Res. 5(2023)043167]

名大の川口らと共に、10 種の Altland-Zirnbauer 対称性の各クラスを、冷却原子系を用いた kicked rotor 模型の実験で実現し新しいタイプのトポロジカル相の形成を実証する提案をして目標(I-2,3)へ貢献した。

◆ 手塚ら、SYK 模型のスピン演算子版を提案 [JHEP05(2024)280] 量子ブラックホールとホログラフィック対応をもつ量子系である SYK 模型に関連し、同模型でランダムな 4 体相互作用するフェルミオンのかわりにスピン演算子を考えても、準位統計が似た性質を示すことを発見し、目標(II-1)へ貢献した。

● B02 と連携する公募研究の成果

◆富田は、量子誤り訂正や測定型量子計算のリソースとして重要な多体エンタングルメント状態であるグラフ状態の、冷却リユードベリ原子間の相互作用による自然な時間発展での生成を目指し実験研究を行った。基盤技術として、原子間相互作用制御のためのパルスレーザー用ディレイラインの開発や、個別局所原子観測のための低ノイズ CMOS カメラでの個別原子撮影を行い、遅延時間を調整できる光学系と、短時間での量子状態判別に優れた手法の開発に成功して、目標(I)へ貢献した。

◆國見と段下、運動量空間でヒルベルト空間断片化模型を提案 [Phys. Rev. A 108(2023)063316]

孤立量子系で長時間時間発展しても熱平衡化が起きない非エルゴード系の機構として、ヒルベルト空間の断片化について、これまで実空間で運動学的拘束がある場合が調べられていたところ、運動量空間で状態遷移が制限された模型を提案し、永久流状態が実現することを確認、目標(I-3,II-2)へ貢献した。

◆金子と國見と段下、新たな量子多体傷跡状態の構成と観測法の提案 [Phys. Rev. A 109(2024)L011301]

量子多体傷跡状態を拘束条件付きの Bose-Hubbard 模型について構成して、実験での観測方法を提案し、

目標(I-3)に貢献した。

◆ 國見と富田と桂(D02 分担)ら、Dzyaloshinskii-Moriya(DM)相互作用の量子シミュレーション法を提案 [arXiv:2306.05591] 固体物性で重要な DM 相互作用を、リユードベリ原子を用いた量子シミュレータで実現する方法を提案し、DM 相互作用項と Zeeman 項からなる模型で量子多体傷跡状態が存在することの証明も与え、目標(I-3)に貢献した。

計画研究 B03 と関連する公募研究(第一期:吉田、第二期:菅野)に関して

(1) 何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているか

● 目標:計画研究 B03「量子情報を用いた量子ブラックホールの数理解明」が領域機関に目指す目標は、大きく次の二つに分かれる:

目標(I) 一般相対論と量子情報を組み合わせることによる量子ブラックホールの基礎理論の解明であり、因果境界とエネルギー条件を鍵として、因果構造と量子情報を結びつける基礎方程式を導出する。中間評価実施時までには、(I-1)量子エネルギー条件の適用限界の理解と、量子情報量の包摂による光的エネルギー条件の改良、(I-2)量子ブラックホールの基本性質の理解を行う。

目標(II) 実際の宇宙や量子物質系で起こり得る現象と量子ブラックホールの関係を明らかにすることである。この目標に向けて、中間評価実施時までには、特定の宇宙現象や量子多体系と双対な量子ブラックホール模型の構築と観測の理解を行う。

連携する公募研究 (I)と(II)の目標に対し、ゲージ重力対応とカオスや乱流の観点(吉田)、重力波と宇宙論の観点(菅野)から相補的にアプローチする。

● 進展状況 以下のように概ね想定通りに進展している(計 32 本の論文出版、16 件の招待講演)

目標(I)に関して:石橋(B03 代表)と前田(B03 分担)は、改良された光的エネルギー条件(ANEC)として、Hawking 輻射で蒸発するブラックホール時空においても成立する新しいエネルギー不等式を見出した[JHEP03(2022)]。石橋と前田は飯塚(B01 代表)とともにアトラクター機構と呼ばれる Hawking 温度零の極限ブラックホールの地平面の特殊性と熱力学的安定性を明らかにし[JHEP09(2022)]、それを回転ブラックホールの場合にも考察した[JHEP08(2023)]。松尾(B03 ポスドク)は、ブラックホール周辺の輻射場の量子効果の時空への反作用を考慮することで、量子情報理論における加法性予想が成立することを示した[JHEP06(2022)]。石橋らは繰り込み群の手法を用いた漸近安全量子重力理論の枠組みにおいて、熱力学第 1 法則を指導原理とする量子ブラックホールの新しい構成法を提案し、漸近安全量子ブラックホールの普遍的エントロピー公式を発見した[PRD105(2022)]。特に負の宇宙項を含む漸近反ドジッターな量子ブラックホールが引き起こす新しい相転移を発見した[CQG40(2023)]。

目標(II)に関して:村田(B03 分担)らはゲージ重力対応の場の理論側の操作により、対応するブラックホールの周りを周回する「星」の模型を作る方法を提案し、生成した星の位置は場の応答関数から観測できること、星と場を与える外場パラメータとの関係から双対時空の計量に関する情報が抽出できることを示した[PRD106(2022)]。松尾らは、ブラックホールの熱力学とカオス性に関して、従来予想された高い励起状態の弦の散乱が示すカオス性は、実際には起きないことを示した[JHEP11(2022)]。木下(B03 ポスドク)らは、重力場中を運動する量子的自由粒子に対する時間の遅れの公式を、外場として電磁場中を非慣性運動する量子的な荷電粒子に対する公式へ一般化した[PRD108(2023)]。

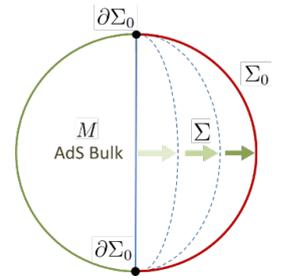
連携する公募研究に関して:吉田らは、ゲージ重力対応の文脈における弦の世界面上の乱流と境界条件の関係を調べ、特に目標(II)に貢献した[JHEP(2024)]。

(2)計画研究とそれと連携する公募研究で得られた成果

● 計画研究 B03 の成果

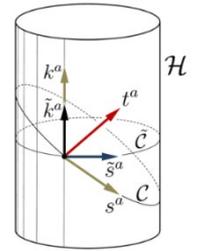
◆ 石橋・前田・岡村(B03) ホログラフィック半古典アインシュタイン方程式[JHEP05(2023)212]

重力に対して物質の量子効果の反作用を取り入れる自然な方法は、アインシュタイン方程式の右辺にあるエネルギー・運動量テンソルを量子場の期待値に置き換える方法である。その期待値の評価は一般に困難であるが、ゲージ重力対応を用いることで強結合の場合にも半古典アインシュタイン方程式を導出する方法を提案した。応用例として 3 次元の反ドジッター時空が強結合 CFT の量子効果により不安定化し得ることを示した。これにより目標(I-1)について量子場の時空への反作用を考慮した光的エネルギー条件を、ホログラフィー原理を用いて検討することが可能となった。曲がった場の量子論の新しいアプローチとして国際研究会 Quantum Effects in Gravitational Fields に於いて招待講演を行った。



◆ 石橋ら、有効理論におけるブラックホール剛性定理[CMP401,2757(2023)]

重力の量子効果を高階微分項を含めた作用積分で表す一般的な有効理論における定常ブラックホールに対して、一般相対論におけるのと同様の剛性定理が成り立つことを証明した。これにより、定常ブラックホールの熱力学第 0 法則が一般的な有効理論においても成立することを証明し、目標(I-2)に貢献した。

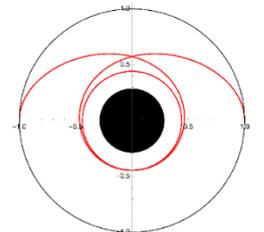


◆ 松尾、量子収束仮説の蒸発ブラックホール時空での証明[JHEP12(2023)050]

古典的な収束定理の量子版として提唱されている量子収束仮説は、これまでエンタングルメント・エントロピーの振舞いが熱力学エントロピーと異なる古いブラックホールについては検証されていなかった。松尾は、量子情報とホログラフィーから導かれる公式を用いることで、古いブラックホールでも量子収束仮説が成り立つことを示した。目標(I-1)に関する重要な成果が得られた。

◆ 村田・木下(B03)ら、反ドジッター時空の中に光的測地線を生成する方法 [JHEP10(2023)074]

ゲージ重力対応における場の理論側の操作によって、対応する漸近反ドジッター(AdS)時空中に光的測地線を生成する方法を提案した。光的測地線は、AdS 時空の境界から入射され、しばらく AdS 時空中を伝搬した後に再び AdS の境界に到達する。特にブラックホール時空では、光的測地線が強く曲げられブラックホールの周りの光子球を何周も回る軌道が考えられるので、入射してから再び境界に到達するまでの時間が無限に長くなり得ることが分かる。このことを用いて光子面の存在を場の理論側の操作で判定出来ることを提案した。今後、目標(II)においてゲージ重力対応での境界上の理論と双対な重力理論での観測量の対応づけに貢献できる成果である。



◆ 村田ら、回転するブラックストリングの新たな不安定性を発見[JHEP01-147,02-069,05-041(2023)]

回転するブラックホールに適切な周波数の波動を入射すると反射波の振幅が増幅される「超放射」現象が起こる。回転ブラックストリングに関しては、超放射で増幅された波がブラックストリング周りに束縛されることがあり得る。それゆえ、回転ブラックストリングの摂動は、摂動論の範疇では無限に増幅され続けることを示した。また、その不安定性の終状態の候補となる新しいブラックストリング解の構成に成功した。これは目標(I-2)と目標(II)に大きく貢献する成果である。

◆ 吉田ら、弦の世界面上の乱流の起源の理解[JHEP01(2024)073]

漸近反ドジッター時空内のストリングの可積分性、その世界面上で起こり得る乱流現象、およびストリング世界面の反ドジッター境界での境界条件の関係を分類し、乱流の起源を解明した。ゲージ重力対応を用いて乱流の観点から量子物質系と量子ブラックホールとの対応を探る上で、特に目標(II)に貢献する重要な成果である。

計画研究 C01 と関連する公募研究(第一期:土屋・沼澤、第二期:沼澤・濱田・渡邊)に関して

(1) 何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

●目標 計画研究 C01「量子情報を用いた量子宇宙の基礎理論」が領域期間に目指している研究目標は、次の二つに大きく分かれる:

目標(I) 重力理論と量子物質の等価性を意味するホログラフィー原理の特殊例に相当するゲージ重力対応を量子情報の観点から解析し、反ドジッター宇宙における量子重力理論のダイナミクスを解明する。中間評価時まで、(I-1)ゲージ重力対応の基礎原理の解明とそれに役立つ新しい量子情報量の開拓、(I-2) ゲージ重力対応におけるブラックホールの蒸発や宇宙創成の解析に役立つ「世界の果てブレン」の性質解明、(I-3)可解な2次元重力理論における非摂動効果を量子多体系の模型で解明、を行う。

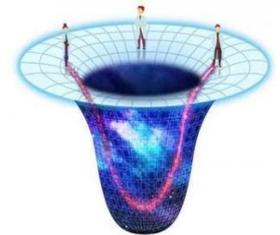
目標(II) 現実の宇宙を含む、一般の宇宙に対するホログラフィー原理を量子情報の観点から解明する。中間評価時まで、(II-1)ドジッター宇宙のホログラフィー原理の具体例を開拓、(II-2)超弦理論に基づき、ゲージ重力対応を超えるより一般的のホログラフィー原理を開拓する、を行う。

連携する公募研究 (I)と(II)の目標に対し、連続テンソルネットワーク(土屋)・量子多体系模型(沼澤)・素粒子論的宇宙論(濱田)・場の量子論の非摂動解析(渡邊)の観点で相補的にアプローチする。

●進展状況 以下のように総じて、想定以上に進展している(計48本の論文出版、48件の招待講演)。

目標(I)に関して: 高柳(C01代表)とHarper(C01ポスドク)らは時間的エンタングルメント・エントロピーをゲージ重力対応で計算する公式を見出し、(反)ドジッター宇宙における時間座標の量子情報からの創発を説明した[PRL130(2023)]。高柳らは量子情報が専門のParzygnat(A01ポスドク)と共同で、ゲージ重力対応で重要となる量子系の事後選択過程における量子エンタングルメントを測る量を見出した[JHEP12(2023)]。高柳らは境界のある空間における場の量子論と重力理論と接する場の量子論の等価性を示し、「世界の果てブレン」に対してゲージ重力対応を拡張できる証拠を得た[JHEP06(2022)]。奥山(C01分担)は、2次元JT重力理論におけるブラックホールの蒸発に関するこれまでの解析を改善して、ブラックホールの情報損失問題がより満足のいく形で解消されることを示した[JHEP02(2022)]。

目標(II)に関して: 高柳と疋田(C01分担)らは西岡(D01)と共同で、3次元ドジッター宇宙のホログラフィー原理の具体例の構成に成功した(右図)[PRL129(2022)41601]。さらに疋田らはこの例を用いて3次元ドジッター宇宙における相関関数をホログラフィー原理で計算することに成功した[PRL129(2022)31601]。関野(C01分担)は超弦理論のDpブレン解に対するホログラフィー原理の精密な検証を与えた[PTEP(2022)]。杉本(C01分担)は、超弦理論の考察により、新しい種類の世界の果てブレンを発見した[JHEP03(2024)]。



連携する公募研究に関して: 土屋らはゲージ重力対応における時空創発を説明するテンソルネットワークを記述するため、波動関数関数の厳密くりこみ群方程式を導出し、目標(I)へ貢献した[PTEP(2023)]。沼澤らは非エルミートなトポロジカル量子系において、エンタングルメント相転移を見出し、ゲージ重力対応における非ユニタリー現象を解析する良い模型を提案し[PRX13(2023)]、目標(II)へ貢献した。

(2)計画研究とそれと連携する公募研究で得られた成果

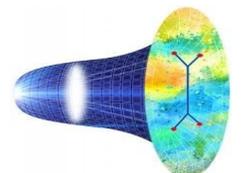
●計画研究 C01 の成果

◆ 高柳・疋田・西岡(D01)ら、ドジッター宇宙のホログラフィー原理の具体例を構成 [PRL129(2022)41601]

現実の宇宙に近いと考えられているドジッター宇宙に対するホログラフィー原理は、宇宙創成を解明する鍵として期待されるが、その理解は乏しく、具体例すら満足に得られていなかった。本研究はこの状況を大きく進展させ、3次元ドジッター宇宙の重力理論に対応する共形場理論を発見した(上図)。PRLのeditor's suggestionに選ばれ、米国物理学会のアウトリーチ誌PhysicsのViewpointに取り上げられ、国際的に大きな反響を得た。計画研究D01との共同研究による、研究目標(II-1)に関する代表的成果。

◆ 疋田ら、ドジッター宇宙における密度揺らぎの相関の計算に成功 [PRL129(2022)61601]

前記の研究で得た新しいホログラフィー原理を用い、3次元ドジッター宇宙に対する初期宇宙の密度揺らぎの相関を初めて計算した(右図)。中間評価までの目標(II-1)を既に超えた成果で、現実の宇宙の量子重力効果の解析に向けた重要な進展。



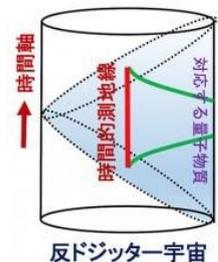
◆ 高柳・Parzygnat(A01)ら、事後選択過程における量子エンタングルメントを測る量を発見[JHEP12(2023)123]
量子系で最終状態を選択する過程(事後選択過程)は、量子情報に加え、ゲージ重力対応やブラックホールの物理においても重要な過程である。本研究はこの過程の中間状態が持つ量子エンタングルメントの量を測るエントロピー(SVD エントロピーと呼ぶ)を初めて見出した。また、この量が多体系の量子相転移の新しい秩序変数として機能することを見出した。量子情報が専門の A01 ポスドク研究員 Parzygnat と素粒子論が専門の高柳との異分野融合共同研究の成果であり、目標(I-1)へ大きく貢献した。

◆ 高柳ら、境界のある空間における場の量子論と重力理論の等価性を発見 [JHEP06(2022)095]

本研究では、「境界を持つ空間領域における場の量子論」が、「重力理論と場の量子論が接している系」と物理的に等価であることを量子エンタングルメントや相関関数の解析より見出した。これによって、ゲージ重力対応を「世界の果てブレン」に拡張できることが分かり、ブラックホールの情報問題の解決の糸口となるアイランド予想の検証に成功し、目標(I-2)へ大きく貢献した。国際的にも注目され、既にこれまでに 50 回以上引用されている。この業績が評価され、高柳は、米国プリンストン大学物理学科全体のコロキウムで招待講演を行った。

◆ 高柳・Harper ら、時間的エンタングルメント・エントロピーの幾何学公式を発見 [PRL 130(2023)31601]

ゲージ重力対応でエンタングルメント・エントロピーが極小曲面の面積に等しいという笠-高柳公式は、宇宙の空間座標が量子情報から創発することを示唆するなど新しい潮流を起し、高柳らの 2006 年の原論文も被引用件数が 4500 回(Google Scholar)に達している。本研究では、これを時間的に拡張した「時間的エンタングルメント・エントロピー」が、反ドジッター宇宙の時間的測地線から計算できることを見出した(右図)。またドジッター宇宙でも、擬エントロピーと呼ばれる量の虚数部分が時間的測地線長に等しいことを見出し、宇宙の時間座標が量子情報から創発する証拠を初めて得た。出版後 1 年余りであるが 50 回以上引用されており、目標(I-1)の代表的成果である。



◆ 奥山ら、2次元 JT 量子重力理論において完全なページ曲線を導出 [JHEP02(2022)087]

ブラックホールの蒸発で情報が失われるように見えるという「ブラックホール情報問題」の解決は、理論物理学における最難問の 1 つである。情報が損失しないことを示すには、まずブラックホールの蒸発に対しページ曲線と呼ばれる振る舞いを確認する必要がある。本研究では、行列模型を用いた 2 次元量子重力理論の解析に、「世界の果てブレン」の寄与を取り入れることで、初めて完全なページ曲線を導出した。ブラックホールの情報問題の解決に向けた重要な成果で、目標(I-2,3)へ大きく貢献した。

◆ 関野ら、Dp ブレーンのホログラフィー原理において、量子重力効果の計算に成功 [PTEP (2022) 4, 043B03]

本研究では、量子重力理論の最有力候補である超弦理論における Dp ブレーン解に対応する背景においてホログラフィー原理が成立することを定量的に確かめることに成功し、目標(II-2)へ大きく貢献した。

◆ 杉本ら、タイプ 0A 理論における新しい種類の世界の果てブレンを発見[JHEP 03 (2024) 165]

AdS ソリトンと呼ばれる時空における次元簡約の手法を M 理論に適用することで、タイプ 0A と呼ばれる超対称性を持たない弦理論における新種の世界の果てブレンを発見し、目標(I-2)に大きく貢献した。

●C01 と連携する公募研究の成果

◆ 沼澤ら、スキン効果によるエンタングルメント相転移と非ユニタリー量子臨界点を発見[PRX13(2023)2,021007]

スキン効果を用いて、非ユニタリーな量子系を記述し、量子エンタングルメントの相転移とそれに伴う非ユニタリーな量子臨界点を発見した。ドジッター宇宙のホログラフィー原理は非ユニタリーな量子系が対応すると期待され、研究目標(II-1)に別の角度からのアプローチする重要な成果である。公募研究 E02 代表で素粒子論出身の沼澤が、物性理論が専門の川畑(公募研究 E02)と笠(C01 研究協力者)と行った異分野共同研究の成果で、出版後 1 年の現在で 90 回以上引用され、国際的に大きな反響を得ている。

◆ 土屋ら、厳密繰り込み群によるスカラー場の波動関数導出 [PTEP (2023) 3, 033B03]

多体系の波動関数を計算するテンソルネットワーク(TN)法は、ゲージ重力対応の時空創発原理として期待される。この時、TN の連続極限をとる必要があるが、この問題を厳密繰り込み群という手法を用いて波動関数を構成することでスカラー場に対して解決した。目標(I-1)に貢献する重要な成果である。

計画研究 C02 と、関連する公募研究(第一期:山本・南部)に関して

(1) 何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

●目標 計画研究 C02「量子ホール系による量子宇宙の実験」は、高度な量子測定技術を含む実験技術を確立して量子ホールエッジの物性実験を行い、素粒子・宇宙・物性・量子情報の各理論から、エッジによる量子宇宙を検証することを大きな目的としている。領域期間に目指している研究目標は、次の4つに大きく分かれる:

目標(I) 量子ホールエッジの量子揺らぎ測定 量子宇宙の量子揺らぎは、それを模した量子ホール系では電圧の揺らぎに対応する。中間評価時まで(I-1)量子揺らぎ測定に向けた技術開発を行い、(I-2)エンタングルメント・エントロピーの測定、(I-3)量子テレポーテーション(QET)/量子メディアの実証実験を行う。

目標(II) 量子ホールエッジによる膨張宇宙の測定 量子ホールエッジによる膨張宇宙を実現するためには、エッジをナノ秒スケールで時間的に膨張・収縮させる技術とそれを測定する技術の両方が必須となる。そのため、まず(II-1)エッジの動的制御技術開発を進め、(I)の量子揺らぎ測定がある程度確立した段階で、(II-2)膨張宇宙の量子揺らぎ測定へと進める。

目標(III) 曲がった時空における量子効果の理論研究 インフレーション宇宙における物質場や重力場の量子揺らぎの理論研究を行う。まず、(III-1)インフレーション時期の量子古典転移の機構を量子情報から解明する。また、量子重力の候補である超弦理論において通常の電荷とは異なる保存量を考え、(III-2)量子重力をトポロジーの観点から解析する。QET 実証実験のため、(III-3)曲がった時空の量子情報の研究を行う。

目標(IV) 時空のバルクとエッジが絡み合う極限物理の探究 超弦理論においてどのような時空のトポロジーが許されるかという問題は、量子アノマリーの問題と密接に関係している。そこで(IV-1)超弦理論の量子アノマリーについての研究を行う。また、これを量子ホールに応用して、(IV-2)量子アノマリーから見たエッジの理論を軸性アノマリーから解析する。(IV-3)バルクから見たエッジの理論解析を行う。

連携する公募研究 目標(III)に関連して、重力の量子力学的性質の検証を最終的な目標として、懸架型光学機械振動子系で生成される量子状態の精密な理論モデルの構築と予言を目的とする(山本)。(III-3)に関連して、ドジッター宇宙における量子場の局所モードに対するパートナーモードを構築することで、局所モードの古典化の様相を理解し、(II-2)(III-3)に関連した古典化実験の理論評価を行う。(南部)

●進展状況 以下のようにほぼ想定どおりに進展している(計 37 本の論文出版、28 件の招待講演)。

目標(I): (I-1) 測定は 5 mK を実現する希釈冷凍機を用いて行う予定であるが、半導体不足やコロナ後の人手不足により納品が 2023 年 3 月となってしまう、それまでは研究室に既存の装置を用いて研究を進めた。デバイスの設計試作(図 1)や 1.5 K での評価も行った(I-2), (I-3)については計画通り(I-1)が進展してから進める。

目標(II): (II-1) エッジの膨張収縮を実験的に検証するために、極低温強磁場環境で動作するストロボ顕微鏡を開発し、分数量子ホール状態でのエッジの励起を実空間実時間で観測することに成功した(図 2)。この技術は量子ホール系で実現する量子宇宙を観測するうえで重要な探索手法となる。(II-2)は計画通り(I-2)(I-3)が進展してから進める。

目標(III): (III-1) 公募の南部、山本と C02 班の堀田・遊佐らにより、膨張エッジの場の量子論の解析を行い、1+1 次元のディラトン重力理論における膨張宇宙解での量子場を再現しており、インフレーション時にホーキング輻射の存在を理論的に示した。(III-2) 通常の電荷とは違った保存量をトポロジーの観点から考え、その保存量を持った新たな高次元の物体(ブレーン)を提唱した。これは、ブラックホールの高次元の類似物であるブラックブレーンとして実現される。特に、近ホライズン極限を記述する弦理論の世界面の共形場理論を近似無しに構成した。(III-3)エッジの基底状態における量子もつれ構造を調べた。それを踏まえて量子エネルギーテレポーテーション (QET) の量子ホール系での新しい物理を探索中である。

目標(IV): (IV-1)超弦理論において現れうる 8 次元時空においての非摂動的な量子アノマリーの存在と、

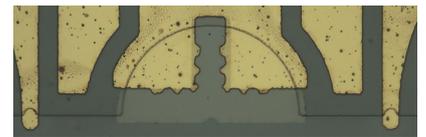


図 1 測定用デバイスの光学顕微鏡像

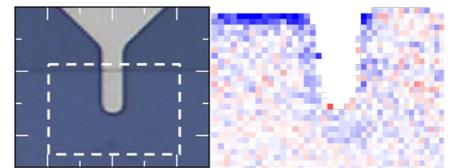


図 2(a)エッジ付近の光学顕微鏡像

それを相殺する機構を研究した。アノマリーの相殺のためには、時空のトポロジーに従来の手法では見えないような制限が必要であることを明らかにした。(IV-2) フェルミ粒子が境界のある空間にある状況は、量子ホール系や超弦理論など、さまざまな物理系で現れうる。この状況下での軸性アノマリーの解析を行なった。境界のある時空の場合には、Atiyah-Patodi-Singer 指数定理を物理的にフェルミ粒子の経路積分から導出することに成功した。(IV-3) 精密な数値計算から、 $\nu=2/3$ 分数量子ホール状態において、非圧縮性の領域の外側に局所占有率がほぼ 1 になる帯状の領域が等ポテンシャル線に沿って湾曲するように形成されることが分かり、系の端に圧縮性液体としての特徴が生み出されることが確認できた。

連携する公募研究: (山本)特に目標(I-2)(I-3)エッジ励起のモデルである一次元カイラルスカラー場を用いて、ローカルモードに対する Leggett-Garg 不等式の定式化を与え、その破れによる量子性検証の可能性を示した。(南部)目標(II-2)(III-3)に関連してエッジ励起のモデルである一次元カイラルスカラー場を用いて、Hawking 輻射の生成に伴う量子もつれ消失現象の理論評価を行なった。

(2)計画研究とそれと連携する公募研究で得られた成果

●計画研究 C02 の成果、および C02 と連携する公募研究の成果

◆ 堀田・南部・山本・遊佐ら、ビッグバン宇宙を実験室で再現できる理論構築 [PRD 105 (2022) 105009] 初期宇宙の原理的な問題を検証できるシミュレータを 1+1 次元の量子ホールエッジを使って作成可能であることを理論的に示した。この成果は、膨張宇宙でも現れるとされるホーキング輻射や、宇宙の構造形成、AdS/CFT 対応などを実験的に検証する道筋を示した重要な結果である。国内外で大きな反響を得ており堀田による Google 本社での招待講演や、日本経済新聞(2022/5/17, 2024/3/9)で取り上げられるなど研究目標 III を代表する成果。本研究は公募研究(南部・山本)と C02 班との共同研究の成果である。

◆ 遊佐・柴田ら、分数量子ホールエッジの励起を実時間実空間で可視化に成功 [PRR 4 (2022) L012040] エッジ膨張を測定する手法として、高時・空間(数 100 ps, 1 μm)分解能をもつストロボ顕微鏡を開発し、 $\nu=1/3$ 分数エッジの励起の動画の撮像に成功した。これは目標 II を代表する成果であり、物理学会(2023)、応用物理学会(2022)、ほか国際学会(2023 フランス,2024 スペイン)でも招待講演を行っている。

◆ 遊佐・柴田ら、トリオンによるストロボ反射測定でエッジの可視化に成功 [APL 122 (2023) 202103] 時間分解能を従来より 2 桁(数 ps)上げることに成功した。これは研究目標 II を代表する成果である。

◆ 南部・堀田、膨張する量子ホールエッジを使った量子宇宙シミュレータのエンタングルメント理論 [PRD 107 (2023) 085002] エッジで作る量子宇宙シミュレータにおいて、より詳細な理論研究を行い、エッジによるインフレーション宇宙のシミュレーションにおいてホーキング輻射の存在を理論的に示した。これは研究目標 III を代表する成果であり、南部(公募研究)との共同研究の成果である。

◆ 米倉ら、超対称性ヘテロティックブレーンに関する成果 [PRL 131 (2023) 121601]

超弦理論のトポロジーの構造を詳しく追求することによって、今まで知られていなかった全く新しい高次元物体(ブレーン)の存在を発見し、それを記述する世界面上の共形場理論を構成した。

◆ 米倉ら、超弦理論の量子アノマリーに関する成果 [JHEP (2022) 125]

超弦理論において現れうる 8 次元時空においての非摂動的な量子アノマリーの存在と、それを相殺する機構を研究し、アノマリーの相殺のためには、時空のトポロジーに従来の手法では見えないような制限が必要であることを明らかにした。これは研究目標 IV を代表する成果である。

●C02 と連携する公募研究の成果

◆ 山本ら、懸架型光学機械振動子の理論モデルを構築し、実現される量子状態を予言 [PRA 107 (2023) 033515] 有限の大きさを持った鏡と梁からなるビーム模型がレーザー共振器と結合した懸架型光学機械振動子の理論モデルを構築し、量子制御により実現される量子状態を予言した。

◆ 南部ら、ドジッター宇宙のエンタングルメントパートナーとモノガミーの理論[PRD 108(2023) 045002]

ドジッター時空上のスカラー場系において、量子もつれの振る舞いを、パートナーモードを用いて解析した。

研究計画 C03 と関連する公募研究(第一期:郡、第二期:田中)に関して

(1)何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

●目標 計画研究 C03「量子情報を用いた量子宇宙の数理とその応用」では近年の量子重力理論のモデルとして注目されている高次元宇宙モデルであるブレーンワールドと AdS/CFT 対応の接合系を念頭に大きく分けて二つの目標を掲げる:

目標(I)ブレーンワールドの数理構造を一般相対論や超弦理論に基づいた重力理論を用いて明らかにする。中間評価時までには、(I-1)ブレーンワールドにおける重力場の方程式の導出に向けた基礎研究、(I-2)高次元、反ドジッター宇宙の数理構造解析に向けた研究、(I-3)ホログラフィー原理による重力理論の数理構造解析、(I-4)超重力理論の数理構造の解明に必要な具体例の構成を行う。

目標(II)宇宙の観測を念頭に置いて量子宇宙の数理構造を解明する。中間評価時までには、(II-1)ブレーン宇宙の宇宙論的観測からの検証、(II-2)強重力宇宙の数理構造、(II-3)コンパクト化による4次元宇宙の解析、(II-4)加速膨張宇宙の数理構造の解明に取り組む。

連携する公募研究

次世代観測で探る原始ブラックホールの蒸発における量子性解明に向けた理論的研究から目標(I-1)、(II-1)にアプローチ(第一期:郡)。膨張宇宙における場の量子論で現れる赤外発散からの極限宇宙への洞察(第二期:田中)

●進展状況 以下のように総じて順調に進展している(計47の論文出版、計41回の招待講演)。

目標(I)に関して:白水(C03代表)らはC01代表の高柳らとホログラフィーを搭載したブレーンワールドモデルに対する重力場の線形摂動の系統的解析を行うことに成功した[JHEP10, 050 (2022)]。また、棚橋(C03分担)はB03班分担の村田とともに、クリロフ複雑性と量子カオスとの関係を示した[JHEP11, 040 (2023)]。泉(C03分担)はホログラフィー原理の観点で量子情報の鍵を握る笠-高柳面の拡張などを念頭に重力を検知する面の提案を行った[PTEP 2023, 043E01 (2023)]。

目標(II)に関して:小林(C03分担)は2つのテンソルモードをもつような重力理論に対して強い観測的制限を与えた[JCAP07, 040 (2022)]。また、吉野(C03分担)は田中(第二期公募研究代表)らとともに、ブラックホール周辺におけるアクシオン場の非線形・長期進化の解明を行った[JCAP06, 016 (2023)]。

連携する公募研究に関して:郡(第一期公募研究代表)らは、最近観測報告された重力波に対して、初期宇宙起源モデルに基づいた原始ブラックホール形成の可能性について指摘した。

(2)研究計画とそれと連携する公募研究で得られた成果

●計画研究 C03 の成果

◆白水、泉、棚橋、高柳(C01)ら、AdS/BCFT 対応の摂動解析に成功[JHEP10, 050 (2022)]

高次元宇宙モデルであるブレーンワールド系と AdS/CFT 対応の設定との接合系とみなすことができる AdS/BCF 対応に対して、線形化されたアインシュタイン方程式を適切な境界条件のもとで解き、CFT のエネルギー運動量テンソルを求めることでその正当性を確認することに成功した。これは場の理論に精通した C01 班と重力場の熟練した解析力も有する C03 班との共同研究によるものであり、目標(I-1)に欠かせない成果である。

◆泉、白水、吉野ら、高次元時空における重力場の新指標となる面を提案[PTEP 2023, 043E01 (2023)]

泉を中心に提案された強弱に寄らず重力を検知する面(重力検知面)に対する面積不等式の証明を高次元時空に拡張することに成功した。反ドジッター時空における笠-高柳面の拡張を念頭に進められた研究であり、目標(II-2)へ独創的な視点で迫る研究である。

◆棚橋、村田(B03)ら、クリロフ複雑性と量子カオスとの関係を具体例で示す[JHEP11, 040 (2023)]

量子カオスの新たな指標として提案されたクリロフ複雑性の性質を古典・量子ビリヤード系で解析し、

この量が他のカオス性の指標と強い相関を示すことなどを解明した。この結果は、AdS/CFT 対応に関連した様々な予想に対して重要な洞察を与えるものであり、物質の量子性から重力理論、特にブラックホールの量子性の謎に迫る研究であり、目標(I-3)に大きな貢献を果たした。

◆野澤ら、超重力理論解の構成[PRD107,064064(2023)]

あるクラスの超重力理論の新しい解の構成、並びにその時空の因果構造の解析を行った。この結果は、ブレーンワールドにおけるブラックホール解の構成に応用することが期待されることから、まさに目標(I-4)に沿った研究成果である。

◆小林ら、ある興味深い重力理論に対して宇宙論的観測から強い制限を与える[JCAP 07, 040 (2022)]

2つのテンソルモードをもち、余分なスカラーモードが存在しない一般的な修正重力理論において宇宙論的摂動論を扱い、宇宙背景輻射の揺らぎの数値コードを活用した理論計算を行った。その結果、理論のパラメータに太陽系や重力波伝搬よりも強い制限が得られた。これは目標(II-1)に大いに貢献したことを意味する。

◆泉、吉野、白水ら、無限遠方における光の軌道の非自明な振る舞いを発見[PRD106,084007(2022)]

観測者が存在すると考えられる時空の無限遠方近傍における光の軌道について解析を行った。その結果、一般にはすべての光が無限遠方に到達し、観測できるわけではないという驚くべき結果を得た。これは強重力場における現象の遠方における観測に影響を与えることから、目標(II-2)に密接に関連した重要かつ独創的な結果である。

◆吉野ら、回転ブラックホール周辺のスカラー場の長時間進化の解析に成功[JCAP 06, 016 (2023)]

ブラックホール周辺で増幅後のアクシオンの非線形自己相互作用によって実現される最終状態を明らかにするための長時間の時間発展を追うことが可能な近似法を開発した。その結果、2つのモードが共存する準定常状態に落ち着くことを世界で初めて示した。ここでのアクシオンは超弦理論から期待される余剰次元のコンパクト化などによって出現するものであり、目標(II-3)に観測的制限を与えるための基礎研究として位置づけられる。

◆吉田ら、特異点定理の加速膨張宇宙への応用で宇宙のサイズに制限を与える[PRD106, 124016 (2022)]

本財源による雇用の特任助教である吉田は、Penrose の重力崩壊に対する特異点定理を巧みに膨張宇宙に適用することで、量子重力などの効果により宇宙に初期特異点が存在しない場合、観測する外側の領域は有限の体積を持ち、そのサイズには観測される領域の膨張率で決まる上限が存在することを示した。これは、目標(II-4)に迫るための好材料を与える結果である。

●C03 と連携する公募研究の成果

◆郡ら、原始ブラックホール生成の新シナリオを提案 [PRD109, 063506(2024)]

2023年6月末に北アメリカナノヘルツ重力波天文台(NANOGrav)が宇宙初期から存在するナノヘルツ帯の背景重力波を観測した可能性があると報告した。そこで、インフレーションが量子的に作る小スケールの密度ゆらぎが大きい場合、非線形効果によりつくられた誘導重力波で説明可能であり、その密度ゆらぎから原始ブラックホールが形成された可能性のあることを指摘した。原始ブラックホールはブラックホールの量子性の検証に繋がる重要な天体であり、長期的な視点で目標(I-1)、(II-2)に重要となる。

計画研究 D01 と関連する公募研究 (第一期: 武田、第二期: 藏増・日高) に関して

(1) 何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

●目標 計画研究 D01 「場の量子論のダイナミクスへの量子情報的アプローチ」が領域期間に目指している研究目標は、次の二つに大きく分かれる:

目標 (I) 場の量子論の量子情報理論的側面に着目し、その数理構造を解析することにより、量子多体系の物理現象を解明する。中間評価時までには、(I-1) 場の量子論における量子情報量の実装およびくりこみ群の非摂動論的な性質の解明への応用、(I-2) 場の量子論において量子誤り訂正などの量子情報理論で用いられる数々の量子操作の実現、(I-3) 量子情報理論の数理構造に着目した場の量子論における無限自由度の情報が保存可能な一般化された量子誤り訂正モデルの構成、を行う。

目標 (II) 量子計算を用いた量子シミュレーションによる場の量子論のダイナミクスの解明を目指す。中間評価時までには、(II-1) 有限温度系や符号問題を克服するための量子計算に適したゲージ理論の定式化、(II-2) 場の量子論の量子計算によるシミュレーションを実装と強結合ダイナミクスの解明、(II-3) 測定誘起相転移に適用可能な量子計算アルゴリズムの開発、を行う。

連携する公募研究 (I) と (II) の目標に対して、テンソルネットワーク法による第一原理計算 (武田)、テンソル繰り込み群による場の理論におけるエンタングルメント・エントロピー (藏増)、ハミルトニアン形式による格子 QCD (日高) の観点から相補的にアプローチする。

●進展状況 以下のように総じて、想定通りに進展している (計 49 本の論文出版、92 件の招待講演)

目標 (I) に関して: 西岡 (D01 代表) と奥田 (D01 分担) らは量子誤り訂正符号を用いた共形場理論の新たな構成法を確立し、構成された理論の性質を明らかにした [SciPost Phys. Core 6 (2023) 035, JHEP 12 (2023) 127]。また理論に存在する Z_2 対称性をゲージ化することで、量子誤り訂正符号からフェルミオンを含む共形場理論を構成し、超対称性を持つ新たな共形場理論を発見した [PRD 108 (2023) 8, L081901]。松尾 (D01 分担) らは、量子誤り訂正が不要な量子素子を生成するために有用と考えられている非可換量子ホール効果を記述する可解模型として、一般化された Calogero 模型を提唱し、その系を記述する対称性を明らかにした [PRB 109 (2024) 15, 155158]。西岡らはボソン/フェルミオン双対性を用いて、質量無し Thirring 模型の Renyi エントロピーを厳密に導出し、相互作用依存性を明らかにした [PRD 108 (2023) 12, 125016]。

目標 (II) に関して: 伊藤 (D01 分担) と本多 (D01 分担) らは (1+1)次元の Schwinger 模型の量子シミュレーションを行い、反対の電荷が互いに反発することを示す負の弦テンションの振る舞いを観察した。また、局所エネルギー密度を測定して、内部のエネルギー密度が外部よりも低いことを明らかにした [PTEP (2022) 033B01]。奥田らは測定型量子計算の考え方を拡張することで、測定により駆動する格子ゲージ理論のシミュレーションに成功した [SciPost Physics 14, 129 (2023)]。伊藤らは、熱的な量子純粋状態に対して量子虚時間発展法という量子計算アルゴリズムを用いることで、有限温度の Schwinger 模型の量子シミュレーションを行い、従来の古典計算の手法では符号問題が現れるパラメータ領域でもシミュレーションが可能であることを示した [PoS LATTICE2023 (2024) 220]。

連携する公募研究に関して: 武田らはテンソルネットワーク法を用いて量子多体系の問題を解く上で生じる統計誤差を抑える新たな確率的ノイズを導入する手法を開発し、目標 (II-1) に貢献した [PRD 107 (2023) 11, 114515]。

(2) 計画研究とそれと連携する公募研究で得られた成果

●計画研究 D01 の成果

◆西岡ら、相互作用のある系の Renyi エントロピーの厳密計算に成功 [PRD 108 (2023) 12, 125016]

量子エンタングルメントは場の量子論の非摂動論的性質を探る上で有用な量子情報量だが、一般に計算することが難しいため、自由場のような相互作用を持たない系以外ではほとんど理解されていない。本

研究では相互作用するフェルミオンを記述する質量無し Thirring 模型において、ボソン/フェルミオン 双対性を用いることで Renyi エントロピーを厳密に導出した。この成果は非摂動的に量子エンタングルメントの相互作用依存性を明らかにするものであり、目標 (I-1) への大きな貢献である。

◆西岡・奥田ら、量子誤り訂正符号を用いた新たな共形場理論を構成 [SciPost Phys. Core 6 (2023) 035, JHEP 12 (2023) 127, PRD 108 (2023) 8, L081901]

量子誤り訂正符号は誤り耐性のある量子計算機の実現に重要なだけでなく、その数学的構造を用いて新たな場の量子論が構成できることが分かってきた。本研究では非二進数体上の量子誤り訂正符号からフェルミオンを含む二次元の共形場理論を構成する新たな手法を開発した。また量子誤り訂正符号が、超対称性を持つ新たな共形場理論の発見に役立つことを明らかにした。本研究は量子誤り訂正符号と場の量子論の新たな関係性を示唆するもので、目標 (I-2) の代表的な成果である。

◆松尾ら非可換量子ホール効果を記述する新たな可解模型を提唱 [PRB 109 (2024) 15, 155158]

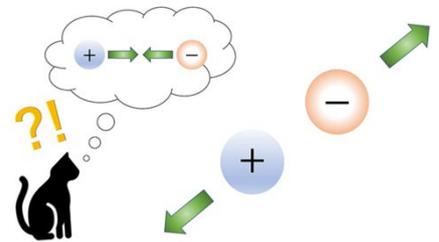
非可換量子ホール効果は量子誤り訂正が不要な量子素子を実現する上で有用と考えられている。本研究では非可換量子ホール効果を記述する可解模型として、一般化された Calogero 模型を提唱し、その系を記述する対称性として Kac-Moody 対称性が表れることを明らかにし、目標 (I-3) へ大きく貢献した。

◆伊藤ら、有限温度系の量子シミュレーションに成功 [PoS LATTICE2023 (2024) 220]

本研究では有限温度の Schwinger 模型において、量子虚時間発展法という量子計算アルゴリズムを用いることで、熱的な量子純粋状態から熱力学量が計算できることを示した。従来法では符号問題が生じるパラメータ領域でも量子計算が適用可能であることを示した本研究は目標 (II-1) の代表的な成果である。

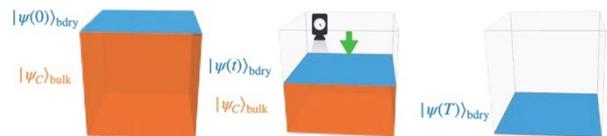
◆本多・伊藤ら、量子計算により電荷が反対の粒子間に斥力が働く状況を実現 [PTEP (2022) 033B01]

Schwinger 模型と呼ばれる 1 次元量子系において、電荷が反対の粒子間に斥力が働く状況を、数値シミュレーションにより実現することに成功した (右図)。これは量子計算機で用いられるアルゴリズム (量子アルゴリズム) の新たな応用であり、目標 (II-2) の代表的な成果である。本研究は PTEP の editor's choice にも選ばれ、今後も通常の方法では解析が困難だった初期宇宙の時間発展や、有限密度領域における初期宇宙の相構造などの重要な問題の理解に貢献していくことが期待される重要な進展である。



◆奥田ら、格子ゲージ理論の測定型量子シミュレーションに成功 [SciPost Physics 14, 129 (2023)]

測定型量子計算では、エンタングルした多体状態を測定することで計算を実行する。本研究ではシミュレートしたい (可換) 格子ゲージ理論の時空的構造に応じてエンタングルさせたリソース状態を用意し、1 キュービット適応的測定を行うことで、離散化された時間発展を実現できることを示した (右図)。また、そのリソース状態が、ゲージ理論が持つ大域的対称性で守られたトポロジカル秩序を持つことを示した。この結果は目標 (II-3) に大きく貢献する重要な成果である。



●D01 と連携する公募研究の成果

◆武田ら、テンソルネットワーク法の統計誤差を抑える手法を開発 [PRD 107 (2023) 11, 114515]

通常のテンソルネットワーク計算では、系統誤差を抑えるために確率的ノイズを導入すると、計算コストがシステムボリュームに比例する問題があった。本研究では統計誤差を抑える新しい確率的ノイズの方法と、計算コストをボリュームの対数に比例させる共通ノイズ法を提案し、計算精度が向上することを示した。目標 (II-1) に貢献する重要な成果である。

計画研究 D02と連携する公募研究(第一期:清水・吉田・下川、第二期:清水、下川、川畑、押川、末次)に関して

(1) 何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

●研究計画 D02「量子情報を用いた量子多体系の制御とテンソルネットワーク」の領域設定期間内の主たる研究目標は以下の三点に大別できる

目標(I) 領域全体のキーワードでもあるテンソルネットワーク(TN)法による量子多体エンタングルメント制御機構を解明するとともに、量子情報の操作論的な側面を組み合わせた高効率の量子シミュレーションアルゴリズムを開発すること、目標(II) 現代的な凝縮系物性の重要な課題である量子多体系のダイナミクスの定量的・数理解を構築するとともに、それを物性実験系の定量解析にも展開すること、目標(III) TN 法や量子多体ダイナミクスにゲージ重力対応や量子回路表現などの領域共通のキーワードを組み合わせて分野横断研究を展開し、物性サイドから極限宇宙の解明に貢献する、の三点である。

中間評価時までの達成目標は、(I)量子・古典の両面から TN 法による量子状態の制御機構を基本要素に分解・再構築し、それに基づく TN 法のアルゴリズム開発を推進する、(II)特徴的なダイナミクスを示す量子多体模型の数理解を系統的に解明するとともに、サイン 2 乗変形(SSD)のようなエネルギースケールの制御法の基礎解明と応用展開を実践する、(III)ホログラフィー原理の考察や量子古典ハイブリッド計算を実現するための基本要素を精選した TN 模型を構築する、に設定した。

連携する公募研究 上記の目標に対し、固体物性系における核磁気共鳴実験(清水)、非エルミート量子多体系(吉田恒)、ランダムスピン系の量子エンタングルメント解析(下川)について、第二期より、開放系の量子ダイナミクス(川畑)、量子トポロジカル相(押川)、量子スピン液体の実験(末次)の観点から、相補的な研究展開を実施する。

●中間評価までの研究の進捗状況(計 52 本の論文出版、54 件の招待講演)

(I)に関して、Tree 型の TN において、これまで手付かずであった量子エンタングルメントに基づくネットワーク構造最適化原理を解明し、具体的な最適化アルゴリズムの実装にも成功した[PRR5,13031. PTEP2023,23A02]。さらに、高次元も含む一般的な形でグラスマン TN の構成に成功し、フェルミ粒子系や格子ゲージ理論への拡張を可能にした[JHEP2023,1]。また、行列積状態と SSD に基づき典型熱的状态の系統的記述法とその計算効率を解明した[PRB106, 094409]ことで、その実践応用の道を拓いた。

(II)に関して、その特徴的なダイナミクスで注目を集めている量子傷跡状態が現れる模型の系統的構成法の提案[PRB106,144306; PRB 108,155102]、および、クリーン極限のマヨラナ SYK 模型の厳密解の構成とその特徴的な量子ダイナミクスの解明を実現した。また、それらの背後に潜む代数的・数理的構造の足場を確立することにも成功した。物性サイドでは、固体中の量子状態の創発するゲージ構造について実験と連携した研究を行い、例えば 3 副格子長周期磁気構造に由来する SU(3)ゲージ構造により熱ホール効果が誘起することを解明した[Nat. Comm.15, 566]。また、熱的典型状態の手法を初めて六角格子キタエフ模型に応用し、2 次元量子多体系の熱平衡状態の定量解析を実現した[SciPost.Phys.15,206]。

(III)に関して、Tree 型 TN ネットワーク構造の解析を契機とし、C01 との連携によりベータ格子模型に内在するホログラフィックくりこみ群を発見、および p 進体 AdS/CFT との対応も解明し、TN サイドからのホログラフィー原理への新しい突破口を開拓した[PTEP2024, 013A03]。A01 班との連携により、TN 法に基づくハイブリッド型変分量子計算アルゴリズムの提案[PRX Quantum 3,10346]、エンタングルメント制御機構を量子変分固有値解法へ組み込み[PRR6, 023009]を実現し、TN 法に基づく実践的量子古典ハイブリッド計算の開拓を主導した。また、E01,E02,B02 と連携した新奇量子傷跡状態の Rydberg 原子系を用いた実現方法の提案も行うことができた。

連携する公募研究に関して、吉田らは、開放量子系を念頭に非エルミート系の強相関効果を調べ、トポロジカル分類学のリダクションやそれに付随する例外点の不安定性を解明した[PRB107,075118]。下川は、量子絡み合いを指標にしたランダムシングレットと量子スピン液体の識別法の数値的検証を行った[投稿準備中]。また、上田と連携して量子スピンシミュレータ QS³の高度化の開発も行った。清水は量子スピン液体の候補物質に対する NMR 実験によりスピノン励起に特徴的な振る舞いの検出に成功している。

当初計画の目標は順当に達成できていることに加え、上記の成果は次のステップに繋がる重要な発見が含まれている。人材育成面でも、領域 PD のアカデミック職へ栄転に加え、現任の領域 PD2 名による研究も領域の内外から高い評価を得ている。総合的に当初の計画以上の進展が続いていると判断される。

(2)計画研究とそれと連携する公募研究で得られた代表的な成果

●計画研究 D02 の成果

◆上田・奥西・原田ら、Tree 型 TN の構造最適化原理の解明とその実装に成功[Phys.Rev.Res. 5,13031(2023)]
TN に関連する物理学にとって本質的に重要であるにもかかわらずこれまで手付かずであった、TN のネットワーク構造に対し、量子エンタングルメントに基づく最適化原理の解明、および実践的なアルゴリズムの開発を提案した。その後、C01 との連携研究や、Tree 型 TN 構造最適化法を機械学習の問題へ拡張などが続いており、多角的な発展に繋がる重要な研究成果となっている。

◆桂ら、量子傷跡状態を持つ量子多体模型を系統的に構成[Phys. Rev. B 108, 155102 (2023)]

量子傷跡状態と呼ばれる特異なダイナミクスで注目を集めている状態が現れる量子スピン模型の系統的な構成法を提示した。制限スペクトル生成代数や可積分境界状態等の背後の数理構造の解明に基づく発見であり、通常は厳密な理解の難しい量子多体ダイナミクスの解析の基礎を担う新たなひな型を付け加えることができた。目標(II)に対する重要な貢献である。

◆堀田ら、固体中の量子状態に発現する SU(3)ゲージ構造を解明[Nat. Comm.15, 566(2024)]

固体物性の量子状態に自然に表れるゲージ構造について調べ、特に実験と共同で熱ホール効果が 3 副格子の長周期磁気構造に由来する SU(3)ゲージによって現れることを解明した。目標(II)の観点はもちろん、理論と実験が有機的につながって生まれた研究成果であり、量子多体系の理論解析が現実の物性系の本質的な理解に貢献したという意味においても意義は大きい。

◆上田・藤井(A01 連携)ら、TN 型の量子古典ハイブリッド計算を開拓[PRX Quantum 3,10346 (2022); PRR 6 023009 (2024)]: TN の知見を量子計算に効率よく埋め込むことは、NISQ デバイスを念頭に置いた量子計算の開発の鍵となる。上田と藤井(A01 連携)らは TN の実空間的くりこみ群構造を反映させたハイブリッド型変分量子計算アルゴリズム、および、量子変分固有値解法と分岐 MERA の考え方を組み込んだエンタングルメントの制御法の開発に成功した。TN 型の量子・古典ハイブリッド計算の先駆けであり、前者の論文の被引用数は短期間ながら 66 に上るとともに、目標(III) にとって重要な貢献となっている。

◆奥西・高柳(C01)ら、ベータ格子模型とホログラフィックくりこみ群との関係を解明[PTEP2024, 013A03(2024)]

Tree 型 TN の構造最適化に端を発し、相転移の基本模型でもあるベータ格子イジング模型にホログラフィックくりこみ群の理論構造、および p 進体 AdS/CFT との対応関係を発見した。縁スピン相関関数の冪依存性出現メカニズムを解明し、ゲージ重力対応の解明へ TN サイドからの新たな視点を提示した。目標(III) はもちろん、領域共通の課題解明へ大きな一歩にもなっている。

◆堀田ら、量子リフシツ多重臨界点の発見[Phys. Rev. Lett.132,166701(2024), Editor's suggestion]

量子ジグザグ鎖に対し行列積型 TN の新しい厳密解析法と量子シミュレーションを用いて、量子リフシツ多重臨界点を発見し、新たなエキゾチックな 4f 磁性絶縁体の可能性を指摘した。目標(I)と目標(II)の研究が結びついて生まれた理論的に新奇性に富む研究成果であり、PRL 誌の Editor's suggestion にも選ばれた。

◆奥西・上田らがテンソルネットワークの招待レビュー論文を出版[J. Phys. Soc. Jpn. 91, 062001(2022)]

包括的な TN 状態の招待レビュー論文を出版し、同誌の 2022 年度 HotTopics に選ばれた。同誌の 2023 年の被引用数トップ 5 にもランクされ、領域内は勿論、国内外の TN 研究の振興に大きく貢献した。

◆数値計算パッケージの開発とリリース(GrassmannTN, QS³)

TN 法による量子多体系シミュレーション法の開発は目標(I)の主要課題でもある。これまでに、領域 PD の Yosprakob がフェルミオン系の TN パッケージ GrassmannTN を [SciPost.Phys. Codebases 20]、上田と下川(E02)らが希薄量子気体用の大規模数値対角化パッケージ QS³[Comp. Phys. Comm.277, 108369]をリリースした。アップデートや応用展開の共同研究等も継続的に行っている。

●D02 と連携する公募研究の成果

◆吉田(恒)らが非エルミート強相関係における例外点の安定性を解明[Phys.Rev.B 107,075113(2003)]

吉田らは非エルミートトポロジカル系に対し、強相関効果によるトポロジカル分類学のリダクションにともなうパラメータ空間中の例外点の不安定化機構を解明した。非エルミート系の解析による目標(II)に対する相補的な貢献となっている。

7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、主催シンポジウム等の状況。令和6年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

総括班 X00 の成果

●主催シンポジウム等 計10件(うち国際集会は以下の5件)

- [1] The 2nd young researchers' workshop of the Extreme Universe Collaboration, 白浜壮(滋賀県高島市), 2024年2月19日~23日
- [2] The 18th Kavli Asian Winter School on Strings, Particles and Cosmology, 京都大学, 2023年12月5日~14日
- [3] The 1st young researchers' workshop of the Extreme Universe Collaboration, 名古屋大学, 2023年2月13日~17日
- [4] YIPQS long-term workshop "Quantum Information, Quantum Matter and Quantum Gravity", 京都大学, 2023年9月4日~10月6日
- [5] Quantum extreme universe from quantum information, 京都大学, 2022年9月26日~30日

計画研究 A01 と関連する公募研究(第一期:田島・加藤、第二期:尾張・高木)の成果

●国際論文、国際会議 proceedings(すべて査読有) 計42本(うち他班との共著1本)、以下は代表例

- [1] *A.Parzygnat, J.Fullwood, F.Buscemi, G.Chiribella, Phys. Rev. Lett. **132**, 110203 (2024).
- [2] *T.Hiroka, F.Kitagawa, T.Morimae, R.Nishimaki, T.Pal, T.Yamakawa, Eurocrypt2024
- [3] T.Morimae, B.Nehoran, and *T.Yamakawa, Crypto2024
- [4] *F.Kitagawa, T.Morimae, R.Nishimaki, T.Yamakawa, Crypto2024
- [5] *T.Hiroka, F.Kitagawa, T.Morimae, R.Nishimaki, T.Pal, T.Yamakawa, Eurocrypt2024
- [6] *T.Morimae and T.Yamakawa, Crypto2024
- [7] *Y.Nakata and M.Tezuka, Physical Review Research **6**, L022021 (2024).
- [8] *A.Ducucara, P.Skrzypczyk, F.Buscemi, P.Sidajaya, V.Scarani, Phys. Rev. Lett. **131**, (2023).
- [9] *F.Buscemi, K.Kobayashi, S.Minagawa, P.Perinotti, A.Tosini, Quantum **7**, 1035 (2023).
- [10] *A.Parzygnat, F.Buscemi, Quantum **7**, 1013 (2023).
- [11] *K.Azuma, S.E.Economou, D.Elkouss, P.Hilaire, L.Jiang, H.-K.Lo, and I.Tzitrin, Rev. Mod. Phys. **95**, 045006 (2023).
- [12] *M.Hahn, T.Morimae, T.Yamakawa, Eurocrypt2023
- [13] S.Minagawa, H.Arai, *F.Buscemi, Phys. Rev. Research, **4**, 033091 (2022).
- [14] A.Danageozian, M.Wilde, *F.Buscemi, PRX Quantum, **3**, 020318 (2022).
- [15] *M.Dall'Arno, F.Buscemi, T.Koshiba, IEEE Transactions on Information Theory, **68**, 3139-3143, (2022).
- [16] *T.Morimae and T.Yamakawa, CRYPTO2022.
- [17] *T.Morimae and T.Yamakawa, ITCS2022.
- [18] *Y.Takeuchi, Y.Takahashi, T.Morimae, S.Tani, Quantum **6**, 758 (2022).
- [19] T.Hiroka, T.Morimae, R.Nishimaki, T.Yamakawa, CRYPTO2022
- [20] *E.Wakakuwa and Y.Nakata, IEEE Transactions on Information Theory **69**, 2400 (2022)
- [21 : 公募 E01] R.Takagi, *H.Tajima, M.Gu, Phys. Rev. Lett. **131** (21), 210602 (2023).
- [22 : 公募 E01] Y.Kuramochi, *H.Tajima, Phys. Rev. Lett. **131** (21), 210201 (2023).
- [23 : 公募 E01] K.Yamaguchi, *H.Tajima, Phys. Rev. Lett. **131** (20), 200203 (2023).

計画研究 B01 と関連する公募研究(第一期:玉岡)の成果

●論文出版(すべて査読国際誌) 計 35 本(うち他班との共著 5 本)、以下は代表例(素粒子論の慣習で著者名は alphabet 順)

- [1] T. Anegawa, *N. Iizuka, M. Nishida, JHEP04(2024)119.
- [2] *N. Iizuka, M. Nishida, JHEP11(2023)065.
- [3] T. Anegawa, *N. Iizuka, S. Sake(領域 PD), JHEP10(2023)160.
- [4] T. Anegawa, *N. Iizuka, S. Sake(領域 PD), N. Zenoni(領域 PD), JHEP06(2023)213.
- [5] R. Nemoto, *M. Shigemori, JHEP03(2023)052.
- [6] *T. Noumi, S. Sato, J. Tokuda, Phys. Rev. D. **108**(2023)056013,
- [7] A. Miyata, Y. Nakayama, *T. Ugajin, PTEP2023(2023)123B04.
- [8] T. Anegawa, *N. Iizuka, D. Kabat, Phys. Rev. D. **106**(2022)085010,
- [9] S. Sugishita, *S. Terashima, JHEP11(2022)041
- [10:公募 E01] P. Lau, T. Noumi, Y. Takii, *K. Tamaoka, JHEP10(2022)015

●招待講演 計 55 回(うち国際集会における招待講演 24 回、以下はその代表的なもの)

- [11] N. Iizuka, APCTP workshop “Quantum Black holes, Quantum Information and Quantum Strings”, 2023 年 6 月 (韓国) .
- [12] N. Iizuka, 14-th Taiwan String Workshop (台湾), 2023 年 10 月.
- [13] T. Noumi, East Asian Joint Workshop on Fields and Strings 2023(中国), 2023 年 11 月.
- [14] M. Shigemori, Black-hole microstructure V (フランス), 2023 年 10 月.
- [15] T. Ugajin, International workshop “Qubits on the Horizon” (西インド諸島アレゾ), 2022 年 4 月.

●主催シンポジウム等 計 5 件(うち国際集会は以下の 3 件)

- [16] Workshop on quantum information and quantum black holes, オンライン 2021 年 9 月 6 日~10 日
- [17] Recent Developments in Quantum Physics of Black Holes, 京都 YITP 2023 年 4 月 03 日~07 日
- [18] Beijing-Osaka String/Gravity/Black Hole Workshop, 北京 KITS 2023 年 8 月 23 日~30 日

計画研究 B02 と関連する公募研究(第一期:富田・國見、第二期:小沢・素川・金子・古川)の成果

●論文出版(すべて査読有の国際誌) 計 23(計画研究)+2(公募研究)本、以下は代表例

- [1] M. Bamba, K. Hashimoto, *K. Murata, D. Takeda, and D. Yamamoto, Phys. Rev. D **109**(2024)126003.
- [2] M. Hanada, A. Jevicki, X. Liu, E. Rinaldi, and *M. Tezuka, JHEP **05**(2024)280.
- [3] *D. Yamamoto and K. Morita, Phys. Rev. Lett. **132**(2024)213401.
- [4] *T. Mori, Phys. Rev. B **109**(2024)064311.
- [5] *Y. Koyama, K. Fujimoto, S. Nakajima, Y. Kawaguchi, Phys. Rev. Res. **5**(2023)043167.
- [6] *M. Hanada, J. Liu, E. Rinaldi, and M. Tezuka, Mach. Learn. : Sci. Technol. **4**(2023)045021.
- [7] H. Motegi, *G. Marmorini(領域 PD), N. Furukawa, and D. Yamamoto, Phys. Rev. Res. **5**(2023)L022056.
- [8] *T. Mori and T. Shirai, Phys. Rev. Lett. **130**(2023)230404.
- [9] *M. Tezuka, O. Oktay, E. Rinaldi, M. Hanada, F. Nori, Phys. Rev. B **107**(2023)L081103.
- [10] *T. Mori, Phys. Rev. Lett. **128**(2022)050604.
- [11:公募 E02] R. Kaneko, M. Kunimi, and I. Danshita, Phys. Rev. A **109**(2024)L011301.
- [12:公募 E02] M. Kunimi and I. Danshita, Phys. Rev. A **108**(2023)063316.

●招待講演 計 36 回(うち国際集会における招待講演 15 回、以下はその代表的なもの 7 件)

- [13] T. Mori, カブリ理論物理学研究所会議 “Long-range interacting quantum systems” (米国), 2023 年 11 月.
- [14] T. Mori, バートホンネフ物理学センター会議 “Nonequilibrium physics - current trends and future perspectives” (ドイツ), 2023 年 8 月.
- [15] M. Tezuka, 台湾物理学会 2023 年年次大会 (台湾), 2023 年 1 月.
- [16] T. Mori, The 15th Asia Pacific Physics Conference (オンライン), 2022 年 8 月.
- [17] M. Tezuka, 国際理論科学センター会議 “Nonperturbative and Numerical Approaches to Quantum Gravity, String Theory” (インド, ハイブリッド開催), 2022 年 8 月.
- [18] D. Yamamoto, 欧州原子核物理学理論センター(ECT*)会議 “Connections between cold atoms and nuclear matter: From low to high energy” (イタリア, オンライン), 2022 年 6 月.
- [19] M. Tezuka, 日本-スロベニアセミナー (オンライン), 2022 年 3 月.

計画研究 B03 と関連する公募研究(第一期:吉田、第二期:菅野)の成果

●論文出版(すべて査読有の国際誌)計 32 本(うち他班との共著 5 本)、以下は代表例

- [1] *A. Ishibashi, K. Maeda, T. Okamura, JHEP **02**(2024)146
- [2] T. Ishii, *K. Murata, K. Yoshida, JHEP **01** (2024) 073
- [3] A. Ishibashi, *S. Matsumoto, Y. Yoneo, Class. Quant. Grav. **41** (2024) 8, 085010
- [4] S. Kinoshita(領域 PD), *T. Kozuka, K. Murata, K. Sugawara, Class. Quant. Grav. **41**(2024)5, 055010
- [5] *S. Hollands, A. Ishibashi, H. S. Reall, Commun. Math. Phys. **401**(2023)2757
- [6] *O. J. C. Dias, T. Ishii, K. Murata, J. E. Santos, B. Way, JHEP**01**(2023)147
- [7] C-M. Chen, Y. Chen, A. Ishibashi, *N. Ohta, D. Yamaguchi, Phys. Rev. **D105**(2022) 106026
- [8] T. Ishii, Y. Kaku, *K. Murata, JHEP **10**(2022)24
- [9] N. Iizuka, A. Ishibashi, *K. Maeda, JHEP **9** (2022) 093
- [10] A. Ishibashi, *K. Maeda, JHEP **03** (2022) 104
- [11] *Y. Kaku, K. Murata, J. Tsujimura, JHEP **9** (2021) 138
- [12:領域 PD]*Y. Matsuo(領域 PD), JHEP **12**(2023) 50
- [13:公募 E02]* T. Ishii, K. Murata, K. Yoshida, JHEP **01**(2024)073

●招待講演 計 16 回(うち国際研究会における招待講演は以下の 7 回)

- [14] A. Ishibashi, 国際研究会 SGC2021 (韓国 オンライン) 2021 年 11 月
- [15] A. Ishibashi, 国際研究会 Fundamental aspects of gravity (英国) 2022 年 8 月
- [16] K. Maeda, 国際研究会 Fundamental aspects of gravity (英国) 2022 年 8 月
- [17] Y. Matsuo(領域 PD), 国際研究会 2022 NTU-Kyoto high energy physics (台湾) 2022 年 12 月
- [18] A. Ishibashi, 国際研究会 Quantum Effects in Gravitational Fields (ドイツ) 2023 年 8 月
- [19] K. Murata, 国際研究会 Integrability, Deformations and Chaos (日本) 2023 年 7 月
- [20] K. Murata, 国際研究会 2024 Kanto-NTU High Energy Physics (日本) 2024 年 1 月

●主催シンポジウム等 計 1 件

- [21] 「量子もつれと重力」近畿大学 2024 年 3 月 21 日～22 日

計画研究 C01 と関連する公募研究(第一期:土屋・沼澤、第二期:沼澤・濱田・渡邊)の成果

●論文出版(全て査読有国際誌)計 48 本(うち他班との共著 6 本)、以下は代表例(素粒子論の慣習で著者名は alphabet 順)

- [1] S. Sugimoto and Y. k. Suzuki, JHEP **03**(2024)165.
- [2] *A. J. Parzygnat, T. Takayanagi, Y. Taki, Z. Wei, JHEP **12**(2023)123.
- [3] K. Doi, J. Harper(領域 PD), A. Mollabashi, *T. Takayanagi, Y. Taki, Phys. Rev. Lett., **130**(2023)31601.
- [4] *K. Okuyama, JHEP, **03**(2023)152.
- [5] H.-Y. Chen, *Y. Hikida, Phys. Rev. Lett., **129**(2022)61601,
- [6] Y. Hikida, T. Nishioka, *T. Takayanagi, Y. Taki, Phys. Rev. Lett, **129**(2022)41601.
- [7] *K. Suzuki, T. Takayanagi, JHEP, **06**(2022)095.
- [8] T. Kitamura, S. Miyashita and Y. Sekino, PTEP **2022**(2022) no. 4, 043B03.
- [9] K. Okuyama, *K. Sakai, JHEP, **02**(2022)087.
- [10] I. Akal(領域 PD), Y. Kusuki, N. Shiba, *T. Takayanagi, Z. Wei, Class. Quant. Grav., **38**(2021)22, 224001.
- [11:公募 E02] *K. Kawabata, T. Numasawa and S. Ryu, Phys. Rev. X **13**(2023) no. 2, 021007.
- [12:公募 E02] T. Kuwahara, G. Tanaka, *A. Tsuchiya and K. Yamashiro, PTEP**2023**(2023)no. 3, 033B03.

●招待講演 計 48 回(うち国際集会における招待講演 42 回、以下はその代表例)

- [13] T. Takayanagi, KITP 研究所(UCSB)会議 “Spacetime and String Theory” (米国), 2024 年 4 月.
- [14] T. Takayanagi, カリフォルニア大バークレー校研究会” Quantum Complexity” (米国), 2024 年 3 月.
- [15] T. Takayanagi, プリンストン大学物理学科 “Donald R. Hamilton Colloquium” (米国), 2023 年 2 月.
- [16] T. Takayanagi, サイモンズ財団” It from qubit annual meeting” (米国), 2022 年 12 月.
- [17] T. Takayanagi, 第 77 回日本物理学会総合講演 (韓国物理学会と共催、オンライン), 2022 年 3 月.
- [18:公募 E02] A. Tsuchiya, Corfu 2022 workshop (ギリシャ), 2022 年 9 月.

●主催シンポジウム 計 4 件(うち国際集会は 3 件、全て C01 研究代表者の高柳が主催、以下は代表例)

- [19] IFQ-ExU Joint Workshop: Extreme Universe from Qubits, online開催 2021 年 12 月 16 日～18 日.
- [20] ExU-YITP Workshop on Holography, Gravity and Quantum Information, 2023 年 9 月 12 日～16 日.

計画研究 C02 と関連する公募研究(第一期:山本・南部、第二期:南部・水上・近藤)の成果

●論文出版(すべて査読有の国際誌) 計 37 本(うち他班との共著 5 件)、以下は代表例

- [1] J. N. Moore, A. Kamiyama, T. Mano, *G. Yusa, Europhysics Lett., **142** (2023) 16004.
- [2] A. Kamiyama, M. Matsuura, J. N. Moore, T. Mano, N. Shibata, and * G. Yusa. Appl. Phys. Lett., **122**(2023) 202103.
- [3] *Y. Nambu, M. Hotta, Phys. Rev. D **107** (2023) 85002.
- [4] J. Kaidi, K. Ohmori, Y. Tachikawa, *K. Yonekura, Phys. Rev. Lett, **131** (2023) 121601.
- [5] *遊佐剛、堀田昌寛 応用物理 **92**(2023)112.
- [6] *M. Hotta, Y. Nambu, Y. Sugiyama, K. Yamamoto, and G. Yusa, Phys. Rev. D, **105** (2022)105009.
- [7] A. Kamiyama, M. Matsuura, J. N. Moore, T. Mano, N. Shibata, *G. Yusa, Phys. Rev. Res., **4** (2022) L012040.
- [8] Y. Lee, *K. Yonekura, JHEP (2022) 125.
- [9] H. Oshiyama, S. Suzuki, *N. Shibata, Phys. Rev. Lett., **381** (2022) 20210411.
- [10:公募 E02] Y. Sugiyama, *K. Yamamoto, et al. Phys. Rev. A **107** (2023) 033515.
- [11:公募 E02] *Y. Nambu and K. Yamaguchi, Phys. Rev. D **108**, (2023) 045002.

●招待講演 計 28 回(うち国際集会における招待講演 23 回、以下はその代表例)

- [12] G. Yusa, “Synthetic Electronic Quantum Matter 2024” (スペイン), 2024 年 8 月.
- [13] K. Yonekura, “Strings 2024” (スイス) 2024 年 6 月.
- [14] K. Yamamoto, Laser Physics Workshop, LPHYS’ 23(オンライン), 2023 年 7 月
- [15] G. Yusa, “QHEdge-Grenoble” (フランス), 2023 年 7 月.
- [16] M. Hotta, “Relativistic Quantum Information North” (カナダ), 2022 年 9 月.
- [17] M. Hotta, Google, “Science Foo Camp “ (米国), 2022 年 6 月.
- [18] G. Yusa, “KEK IPNS-IMSS-QUP Joint workshop” (日本), 2022 年 2 月.
- [19] K. Yonekura, “Generalized Cohomology and Physics” 2021 年 11 月 (イタリア) ICTP

●主催シンポジウム 1 件(国際集会)

“Gravity and Quantum” Workshop, 九州大学 2023 年 5 月 8 日～9 日

計画研究 C03 と関連する公募研究(第一期:郡、第二期:田中)の成果

●論文出版(すべて査読有の国際誌)計 47 本 (うち他班との共著 3 本)、以下は代表例

- [1] *K. Izumi, Y. Tomikawa, T. Shiromizu, H. Yoshino, PTEP **2023**, 043E01 (2023).
- [2] K. Hashimoto, K. Murata, N. Tanahashi and *R. Watanabe, JHEP **11**, 040 (2023)
- [3] *M. Nozawa and T. Torii, Phys. Rev. D**108**, 064036 (2023).
- [4] H. Omiya, T. Takahashi, T. Tanaka and H. Yoshino, JCAP **06**, 016 (2023)
- [5] *M. Amo, K. Izumi, Y. Tomikawa, H. Yoshino and T. Shiromizu, Phys. Rev. D**106**, 084007(2022)
- [6] T. Hiramatsu and *T. Kobayashi, JCAP **07**, 040 (2022)
- [7] K. Izumi, T. Shiromizu, *K. Suzuki, T. Takayanagi and N. Tanahashi, JHEP **10**, 050 (2022)
- [8:領域 PD] K. Nomura and *D. Yoshida(領域 PD), Phys. Rev. D**106**, 124016 (2022)
- [9:公募 E02] K. Inomata, K. Kohri and *T. Terada, Physical Review D**109**, 063506(2024)

●招待講演 計 41 回(うち国際会議における招待講演は 20 回。以下はその代表的なもの 5 件)

- [10] N. Tanahashi, APCTP Focus Program (APCTP, 韓国)2023 年 6 月
- [11] T. Shiromizu, Fundamental aspects of gravity(イギリス)2022 年 8 月
- [12] T. Kobayashi, Non-linear aspects of cosmological gravitational waves, 2022 年 7 月
- [13] K. Izumi, LeCosPA 4th International Symposium(オンライン、台湾)2021 年 12 月
- [14:公募 E02] K. Kohri, CosPA2022(オンライン、韓国)2022 年 11 月

●主催シンポジウム等 計 11 回 (うち国際会議は 3 件、以下代表的なもの 2 件)

- [15] The 32nd workshop on general relativity and gravitation in Japan, 2023 年 11 月
- [16] The KEK-Cosmo 2024 on “Statistical Analysis of Random Fields in Cosmology”, 2024 年 3 月

計画研究 D01 と関連する公募研究 (第一期:武田、第二期:藏増・日高)の成果

●論文出版 (すべて査読有の国際誌) 計 49 本(うち他班との共著 5 本)、以下は代表例(素粒子論の慣習で著者名は alphabet 順)

- [1] J. E. Bourguine, Y. Matsuo, Phys. Rev. B **109** (2024) 15, 155158.
- [2] *J. W. Pedersen, E. Itou, R. -Y. Sun, S. Yunoki, PoS LATTICE2023 (2024) 220.
- [3] *H. Fujimura, T. Nishioka, S. Shimamori, Phys. Rev. D **108** (2023) 12, 125016.
- [4] *K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda, Phys. Rev. D **108** (2023) 8, L081901.
- [5] *K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda, SciPost Phys. Core 6 (2023) 035.
- [6] *H. Sukeno, T. Okuda, SciPost Phys. 14 (2023) 5, 129.
- [7] M. Honda, E. Itou, *Y. Tanizaki, JHEP **11** (2022) 141.
- [8] M. Honda, *E. Itou, Y. Kikuchi, Y. Tanizaki, PTEP **2022** (2022) 033B01.
- [9:公募 E02] *E. Arai, H. Ohki, S. Takeda, M. Tomii, Phys. Rev. D **107** (2023) 11, 114515.

●招待講演 計 92 回(うち国際集会における招待講演 45 回、以下はその代表的なもの 5 件)

- [10] T. Nishioka, East Asia Joint Symposium on Fields and Strings 2021, (日本) 2021年9月.
- [11] M. Honda, ACP T 研究会 “Numerical Methods in Theoretical Physics 2022,” (韓国) 2022年5月.
- [12] T. Okuda, “Gauge theories, supergravity and superstrings,” (スペイン) 2022年6月.
- [13] E. Itou, The 40th International Conference on Lattice field theory, (米国) 2023年8月.
- [14:公募 E02] S. Takeda, Tensor networks and quantum computing for high-energy physics, (台湾) 2023年12月.

●主催シンポジウム 計 5 件(うち国際集会は以下の 1 件)

- [15] KIAS-YITP joint workshop 2021, オンライン開催, 2021年12月13日~16日.

計画研究 D02 と連携する公募研究 (第一期:清水・吉田・下川、第二期:清水、下川、川畑、押川、末次)の成果

●出版論文(すべて査読有の国際誌)計 52 本(うち他班との共著 5 本)、以下は代表例

- [1] *H. Saito, C. Hotta, Phys. Rev. Lett. **132**, 166701 (2024). Editors' suggestion
- [2] *K. Okunishi, T. Takayanagi PTEP **2024**, 013A03 (2024).
- [3] *H. Takeda, 中略, C. Hotta[全 12 名中最終著者], Nat. Commun. **15**, 566 (2024).
- [4] *K. Sanada, Y. Miao, H. Katsura, Phys. Rev. B **108**, 155102 (2023).
- [5] *T. Hikihara, H. Ueda, K. Okunishi, K. Harada, T. Nishino, Phys. Rev. Research **5**, 13031 (2023).
- [6] *A. Yosprakob(領域 PD), J. Nishimura, K. Okunishi, JHEP **2023**, 187(2023).
- [7] *K. Okunishi, H. Ueda, T. Nishino, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 62001 (2022). [招待レビュー]
- [8] *K. Fujii, K. Mizuta, H. Ueda, K. Mitarai, W. Mizukami, Y. O. Nakagawa, PRX Quantum **3**, 010346(2022).
- [9:公募 E02] *T. Yoshida, H. Hatsugai, Phys. Rev. B **107**, 075113 (2023).

●招待講演 計 54 件(うち国際集会 25)、以下はその代表的なもの 4 件

- [10] C. Hotta, “Statphys 28” (東京)、2023年8月
- [11] H. Katsura, バンガロール, “Periodically and quasi-periodically driven complex systems” (インド), 2023年6月
- [12] K. Okunishi, 韓国物理学会 “APPC15” (オンライン)2022年8月
- [13:公募 E02] T. Yoshida, 基礎物理学研 “Frontiers in nonequilibrium physics” (京都)2023年8月

●主催シンポジウム 計 3 件(うち国際集会 2 件)

- [14] ExU-YITP Workshop: Condensed Matter Physics and Quantum Information, 2023年9月25~29日
- [15] 極限宇宙ワークショップ~実験と理論の協奏に向けて 2023年5月16~17日
- [16] Tensor Network States: Algorithms and Applications (オンライン) 2022年1月17~21日

●公開ソフトウェアパッケージ 計 2 件

- [17:領域 PD] *A. Yosprakob(領域 PD), “GrassmannTN”, SciPost. Phys. Codebases 20(2023).
- [18:公募 E02] *H. Ueda, S. Yunoki, T. Shimokawa, “QS3” Comp. Phys. Commun. **277**, 108369(2022).

8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本領域の目的である「極限宇宙」は、空間・時間・物質の3つの極限を意味し、「究極の物理法則」を量子情報の観点から探求するプロジェクトである。これに応じ、研究テーマは大きく次の[A]から[D]の4つに分かれる：[A] 物理学への応用を念頭に置いた量子情報の開拓（計画研究 A01 班が担当）、[B] ブラックホールの量子論の解明—空間の極限（計画研究 B01,B02,B03 班が担当）、[C] 宇宙創成のメカニズムの解明—時間の極限（計画研究 C01,C02,C03 班が担当）、[D] 量子物質のダイナミクスの解明—物質の極限（計画研究 D01,D02 班が担当）。この異分野融合研究を効率的に行うために、下の図3のように計画研究の9つの班が研究テーマを共有する班同士で横に連携し、上記の研究テーマに取り組む。さらに、図4のように、素粒子(01)、物性(02)、宇宙(03)という従来の分野内のつながりが計画研究の縦の絆を生む。極限宇宙の研究では、異分野の研究者が同じ目標に向かって知恵を出し合って連携すると同時に、同じ分野の研究者間で知識や手法を融通し合うことが欠かせない。この縦と横の強力な連携のもと、量子情報という新しい視点を取り入れ、究極の物理法則を解明していくことができるように本領域の体制を構成している。

図3 領域の研究テーマと計画研究

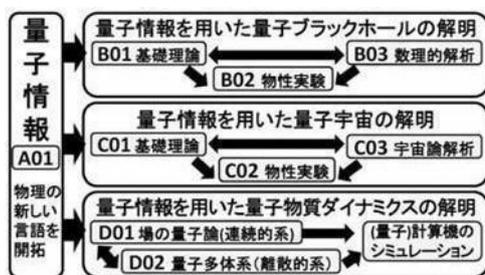
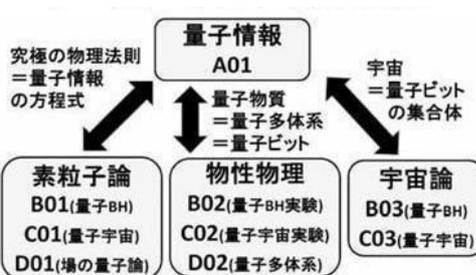


図4 従来の研究分野と計画研究



この連携を定期的に深めるために循環ミーティングをほぼ毎月開催している（これまで22回開催）。循環ミーティングでは、ABCDのローテーションで行い、例えばB班の時は、

B01,B02,B03 が協力して、研究成果の報告とその後の討論によって研究を効率的に進展できるよう企画する。研究協力者を含む領域メンバー全員が参加することができ、平均40人程度が参加している。また毎年開催している領域会議では、各班の代表が一年間の研究の進捗を報告し、さらに特筆すべき成果をいくつか選んでセミナー講演を企画し、また領域の若手研究者によるポスター講演も交えて、今後の本領域の研究の方向性を領域メンバー全員で議論している。そして、各計画研究の代表を含む計16名の総括班メンバーがオンラインで集まる総括班会議を毎月開催し(6月開催が26回目)、研究連携の促進に努めている。また領域外から著名な研究者を毎月招聘してオンラインで開催する領域コロキウム(これまで25回開催)は、様々な分野の領域メンバーが集い、異分野融合研究の着想を得る場を提供している。

公募研究は、E01(量子情報の研究)、E02(理論物理学の研究)、E03(実験物理学の研究)と研究する手法によって3つに分かれている。2022年度から2023年度までの第一期が計16件と2024年度から2025年度の第二期に計22件採択されている。それぞれの公募研究は、図5にあるように、9つの計画研究のいずれかがホスト班となり、公募研究代表者が領域全体と連携するためのサポートを行っている。

図5 各計画研究がホストとなる公募研究代表者

計画研究	第一期公募研究		第二期公募研究		
	E01(量子情報)	E02(理論物理)	E01(量子情報)	E02(理論物理)	E03(実験物理)
A01	尾張, 加藤, 田島		尾張, 高木		
B01		玉岡		玉岡	
B02	富田	國見	小沢	金子, 古川	素川
B03		吉田(健)		菅野	
C01		土屋, 沼澤		沼澤, 濱田, 渡邊	
C02		南部, 山本	水上	南部	近藤
C03		郡		田中	
D01		武田		蔵増, 日高	
D02	清水	下川, 吉田(恒)	清水	押川, 川畑, 下川	末次

領域全体のイベントとして、各公募研究の開始時にキックオフミーティングを行った。また、月一回程度公募研究セミナーを開催し、公募研究代表者に研究成果の報告をしていただいている。領域メンバーがほぼ全員集まる毎年の領域会議でも、公募研究代表者も全員講演する時間を割り振っており、計画研究と公募研究の連携を深めている。

9 若手研究者の育成に係る取組状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、本研究領域が育成に取り組んだ「若手研究者」の定義を始めに示すこと。

40歳未満の若手研究者の育成に関して、以下に述べるプログラムを導入して取り組んでいる。

【若手国内循環プログラム】

このプログラムは、領域 PD や大学院生などの若手研究者が国内の大学や研究機関を訪問し、領域に関係する研究を行う際の旅費を支援するものである。単にスクールや研究会への参加を目的とするものは対象とせず、計画研究関係者については、異なる計画研究班や公募研究者を滞在先とする申請を優先して採択している。プログラムの利用 25 件の内訳（派遣と受入の合計）は A01:2 件、B02:5 件、C01:4 件、C02:2 件、D01:3 件、D02:6 件、E01:1 件、E02:2 件である。名古屋大や大阪大に所属する領域 PD が複数回京都大に滞在、分野融合共同研究を進めるなど、人的資源の共用化、領域に所属する若手の研究経験の獲得に役立っている。例えば沖縄科学技術大学院大学(OIST)の若手研究者を堀田(D02)が受け入れ、研究室の大学院生(現東大特任助教)とともに、熱的量子純粋状態を初めて空間 2 次元の系に適用してキタエフ蜂の単格子模型の比熱等を求めた成果を挙げた[SciPost Phys.(2023)]。訪日する若手研究協力者の国内旅費も支援している。

【若手海外派遣プログラム】

このプログラムは、領域内の若手研究者が国外の大学や研究機関を訪問して領域に関係する研究を行う際の旅費を支援するものである。国内循環プログラムと同様に、単なるスクールや研究会への参加は対象としていない。プログラムを利用した 8 件（決定済を含む）の内訳は B01:2 件、C01:3 件、C03:1 件、D01:2 件である。うち 6 件は領域 PD の派遣であり、研究の推進、国際経験の獲得に役立っている。例えば C03 研究協力者の天羽将也は 2023 年 1-2 月(当時博士 1 年)にバルセロナ大学に滞在、共同研究の成果[Phys.Rev.Lett.(2023)]を同年の日本物理学会年次大会で発表し、学生優秀発表賞を受賞した。

【若手研究会・領域スクール】

第 2 年次以降毎年 1 回、若手研究会を開催してきた。また、初年度以来、5 回の領域スクールを開催してきた。若手研究会は、領域 PD や修士・博士課程の学生が中心となって企画する合宿型研究会であり、全員が口頭またはポスター発表をすることで研究内容の相互理解と分野の垣根を越えた若手の交流を図るものである。領域スクールは、関連分野の複数の講演者による講義を通じ、各分野の考え方や研究動向や課題等の情報を共有するものである。これらによって、領域内外の異なる研究分野の研究者・学生間での議論を促進し、新たな共同研究の契機とすることで、分野融合研究を推進できる若手の育成を進めている。スクールの録画は領域内で共有し、領域 YouTube チャンネルでも一部公開している。

【若手の就職状況】

領域 PD のうち、Arthur Parzygnat(A01)が米国 MIT 講師、古谷峻介(D02)が埼玉医科大学講師に着任した。計画研究の若手の代表者・分担者についても、西岡辰磨(D01 代表)が京大基研特定准教授→大阪大教授、野海俊文(B01 分担)が神戸大准教授→東京大准教授、宇賀神知紀(B01 分担)が京大白眉特定助教→立教大准教授、中島秀太(B02 分担)が京大白眉特定准教授→阪大 QIQB 准教授、森貴司(B02 分担)が理研研究員→慶應義塾大准教授、本多正純(D01 分担)が京大基研助教→理研上級研究員となるなど多くの昇進があった。若手の研究協力者も 1 名が国内の大学の准教授、4 名が助教に着任し、昨年に博士号を取得した魏子夏(C01 院生)は Harvard 大学 Society of fellows の Junior Fellow に選ばれ着任した。

【若手研究者の受賞】（受賞時点で 40 歳未満）主要なものを表に示す。

西岡 辰磨 (D01)	第 15 回 (2021 年度) 湯川記念財団木村利栄理論物理学賞	湯川記念財団	2021/9
吉田 豊 (D01)	第 16 回 中村誠太郎賞	素粒子奨学会	2022/3
水上 雄太 (E01)	令和 6 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞	文部科学省	2024/4
川畑 幸平 (E02)	第 5 回リサーチフロントアワード	クラリベイト	2024/5

このほか、本多正純(D01)らの論文 2 篇が PTEP Editor's choice に選ばれ(PTEP 2021, 103B04, PTEP 2022, 033B01)、延べ 5 名の大学院生が日本物理学会学生優秀発表賞を受賞した。

10 アウトリーチ活動に係る取組状況

研究領域全体を通じ、一般向けのアウトリーチ活動に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

当領域が実働を始めた2021年9月から現在まで、得られた研究成果をプレスリリース等によって広く社会に伝え、様々な報道にも取り上げられている。またメンバーによる小中学校、高校への出前授業や領域YouTubeチャンネルの開設、定期的なニュースレターの発行などによる活発なアウトリーチ活動を行ってきた。領域ホームページでこれらの活動の記録を公開している。概略を以下に述べる。

●ニュースレター

極限宇宙ニュースレター第1号 2022年3月25日発行 42ページ 330部
極限宇宙ニュースレター第2号 2023年3月25日発行 68ページ 400部
極限宇宙ニュースレター第3号 2024年3月28日発行 82ページ 400部
海外送付先：スタンフォード大、プリンストン大、カリフォルニア工科大、ハーバード大、Perimeter 研究所など、20校以上。

国内送付先：東北大、東京大、慶應大、早稲田大、名古屋大、京都大、大阪大、九州大、OIST、理研、KEKほか国内大学・研究機関など40ヶ所以上。



ニュースレター3号の表紙

●プレスリリースおよびメディアが報道で取り上げた研究紹介の総数:34件

例えば足田(C01)、西岡(D01)、高柳代表(C01)らの極限宇宙メンバーの研究が2022年に米国物理学会が出版する「Physics Magazine」においても紹介されている。また、伊藤(D01)の「量子コンピューターと素粒子の世界」に関するインタビュー記事が2024年3月30日の読売新聞の朝刊に掲載された。

●一般向け市民講演会の総数:14件

特に、2022年11月(第一回)と2023年11月(第二回)に、領域と深く関係する最新の研究動向を一般市民に解説する「極限宇宙市民講演会」をオンライン開催し、それぞれ200名以上が参加した。

●他学術領域との合同座談会

本学術領域と同様に「情報と物理学」がキーワードとなっている新学術領域「生命の情報物理学」との合同企画として、両領域の研究者による合同座談会を企画した。両領域代表および同じく情報と物理学がキーワードとなるERATO「沙川情報エネルギー変換プロジェクト」のメンバーを含む計8名の研究者による座談会をニュースレター記事として公開した。

●SNSによる情報発信

領域のX(ツイッター)のアカウントから、領域のイベント情報や研究成果を発信している。

●出前授業の総数:20件

出前授業とは別個に、高柳代表がNHK-BSプレミアム番組「コズミックフロント」に出演して最近の量子情報と時空の物理の解説も行った。

●一般向け科学雑誌への記事、および他分野の研究者が読む学会誌への記事の寄稿数:22件

上記に加え、領域のキーワードをメンバーが解説する「極限宇宙ガイド」を領域HPで公開。

●領域コロキウムの定期開催:計25回

月一回オンライン領域コロキウムを開催し、各分野の世界的に著名な研究者の方々に専門分野周辺を概観するコロキウム・トークを行っていただいている。このコロキウムにはMLに登録すれば誰でも参加できるオープンな形で開催しており、研究者のみならず企業や学生等も参加している。現在のMLの登録者数は1,000名を超えており、オンライン環境をうまく活用したアウトリーチ活動としての価値も高い。

●領域YouTube動画数(「極限宇宙の物理法則を創る」):計78本、登録者数:653名

6月時点で22000回の視聴を超える。(うち、領域コロキウムの動画視聴回数:3400回超)

11 研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本領域の研究費の主な使用対象は以下の通りで、メンバーは日頃より効果的使用を心がけている：

- [1] 総括班：コーディネーター1名と秘書1名の雇用。領域の各種集会や若手派遣プログラムの旅費。
 - [2] ポスドク研究員(計画研究)：各計画研究につき1-2名、計13名のポスドク研究員を雇用している。
 - [3] 実験装置(計画研究)：冷却原子実験(B02)や量子ホール効果実験(C02)の装置の購入。
 - [4] その他(計画研究)：数値計算用のワークステーションの購入、中小規模研究会の開催、メンバーの旅費。
- 以下では[1]-[4]の詳細について述べる。

[1] 総括班

本領域では、異分野融合・若手育成・進捗把握などのため多くの研究集会（領域会議、領域国際会議、若手研究会、領域スクールなど）を開催し、若手研究者の海外派遣や国内循環プログラムなども運営しており、総括班経費の約半分を各活動における若手研究者の旅費や、講師の招へい旅費に充当している。また各活動の責任者を務める領域代表や総括班員のサポートを行う物理学の博士号を持つコーディネーターを1名雇用している。さらに各活動の旅費事務や他の雑務を担当し、英語が堪能な秘書を1名雇用している。領域代表、コーディネーター、秘書が所属する共同利用・共同研究拠点の京大基礎物理学研究所に領域事務業務を集中させることで、領域全体を効率的に運営し、領域研究者が研究に集中できるように配慮している。今後も同様に総括班経費を活用し、領域活動を運営していく予定である。

[2] ポスドク研究員(計画研究)

理論物理学研究の成功の鍵は優秀な人材である。そこでポスドク研究員を初年度冬に国際公募し、応募者264名の中から卓越した人材を選抜し、各計画研究に1-2名、計13名雇用した。このうち8名が外国人研究者で、顕著な成果を挙げると同時に、国際活動の強化にも貢献している。特に量子情報が専門の外国人研究者1名は傑出した業績があり、任期制教員(特定講師)として雇用している。総括班の国内循環プログラムを活用し、研究員を異なる計画研究に派遣することで、異分野融合を促進し、人材を複数の計画研究で共有する効率化を行っている。今後も引き続き、上記研究員の雇用を継続する予定。

[3] 実験装置(計画研究)

B02 班の装置：本研究費で購入した大型備品(>500万円)2件のうち、多チャンネル波長計についてはほぼ常時使用し、複数台の冷却光源の周波数モニター・安定化に寄与している。また高出力レーザーについては交差型光トラップに使用され、 ${}^6\text{Li}$ 原子のフェルミ縮退を実現することができた。その他の各種光学機器・真空機器についても実験系に組み込まれており、今後の研究で使用する予定である。

C02 班の装置：本研究で購入した各種電気測定装置は、ほぼ常時使用し、論文成果も出ている。希釈冷凍機は導入時から不具合が発生したが2024年6月現在諸問題がほぼ解決し、測定の準備を開始した。昨年度まで実験班が少なく、領域内での共用装置としての実績はないが、第二期公募研究では実験班が増えたため、今後は実験研究同士の領域内連携を密にし、必要に応じ共用する予定である。

[4] その他(計画研究)

D02 班では、本科研費により導入したGPU計算サーバをシェアすることにより、複雑なテンソルやネットワークの最適化計算の効率的な開発および実行が実現するとともに、大規模計算機へのブリッジや機械学習等を組み合わせた新たな応用の開拓にもつながっている。また、各計画研究では、個々の研究計画を進展させるために、そのテーマに集中した中小規模の研究集会や、外部から講師を招へいする勉強会を開催しており、それに必要な旅費等も研究費の重要な用途である。各計画研究のメンバーの研究打ち合わせや研究成果の発表の旅費も必要経費である。今後も同様に研究費を使用する予定である。

12 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させることを先導する」観点から、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、今後実施する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

本領域ではこれまで順調に研究が進展し、**計画研究で308本、公募研究で56本**に達する論文を出版してきた。分野融合、国際活動、若手育成、アウトリーチでも十分な成果を得ている。この流れに乗って、今後も領域がさらに発展するように以下のように領域を推進させていく予定である。

[1] 総括班

本領域の総括班は、計画研究と公募研究の多数の研究プロジェクトを異分野融合の観点で束ね、国際活動・若手育成・アウトリーチを促進する役割を担っている。

総括班活動	各業務	担当者	総括班活動	各業務	担当者
領域運営	領域成果総括	*白水	分野融合	実験理論融合	*遊佐・堀田(知)
	公募研究	奥西		領域コロキウム	中田
	量子情報	森前		循環ミーティング	上田
国際活動	領域国際会議	*石橋	アウトリーチ	企画アレンジ	飯塚
	若手海外派遣	西岡		SNS・領域ニュース	*堀田(昌)
若手育成	領域スクール	*手塚	ニュースレター	中島	
	若手研究会・循環	泉	ホームページ	小林	

現在、領域総括を担当する領域代表に加え、各計画研究の代表者を含む15名の総括班員が上の表にあるように「領域運営」「国際活動」「若手育成」「分野融合」「アウトリーチ」の強化のため、役割分担して取り組んでいる(*印は責任者)。この体制はうまく機能しており、今後も引き続き現体制で領域を推進する。毎月オンラインで総括班会議を開催し、各活動の進捗報告と調整を行う。また2024年9月(大阪大)と2025年12月(愛媛県松山で開催予定)に領域会議を開催し、領域全体の成果の総括を行う。

[2] 理論の計画研究

各計画研究で量子情報・素粒子・宇宙・物性を専門とする多彩な第一線の理論家が、極限宇宙の三問題に取り組んでおり、すでに多くの研究成果が得られている。異分野融合研究の討論を行う月例の循環ミーティングを中心に異なる計画研究や公募研究の連携を促進し、以下のように研究を推進させる。

A グループ(A01)量子情報理論: 極限宇宙の物理を理解する言語としての量子情報理論を整備するとともに、量子情報理論自体の研究も遂行する。特に、量子計算量、量子アルゴリズム、量子暗号、量子ランダムネス、量子ネットワーク、量子通信について、他の計画研究と密接に連携して研究を進める。

B グループ(B01,02,03)ブラックホールの量子論: 量子情報理論とゲージ重力対応を用いて量子ブラックホールの理論的解明や量子計算の手法を開拓するとともに、冷却原子実験による非平衡ダイナミクスの解明も推し進める。理論と実験の連携でブラックホール情報問題など極限宇宙の根本問題を解明する。

C グループ(C01,02,03)宇宙創成のメカニズム: 量子情報量と重力理論の対応を一般相対論の数理と場の量子論の立場でさらに推し進め、ゲージ重力対応の基礎メカニズムを解明していく。これまでの研究で見出されたドジッター宇宙のホログラフィー原理の具体例を利用し、宇宙創成のメカニズムを解明する。

D グループ(D01,D02)量子物質のダイナミクス: 場の量子論や量子多体系の数理的側面の解析に、これまでに得られたテンソルネットワークや量子回路の視点を応用し、その量子ダイナミクスの解明をめざす。他班と連携してゲージ重力対応の基礎解明や、量子シミュレーション法の高度化・実践的検証も行う。

[3] 実験の計画研究

B02 冷却原子実験と C02 量子ホール実験と、二つある計画研究における実験研究では極限宇宙の理論の検証を目指している。実験装置の完成に時間を要するため理論研究ほどは進捗は早くはないが、着実に進んでおり、すでに部分的な成果も挙がってきている。今後の推進方針は以下の通りである。

B02 量子ブラックホールを模した冷却原子実験: 実験系の復旧後、量子縮退領域まで冷却したLi原子を光格子系に断熱的に導入し、測定誘起相転移や非時間順序相関関数の対象となるハバード模型を実装する。モット転移などハバード模型特有の性質を確認後、光会合光による測定誘起相転移の観測を目指す予定。

C02 量子宇宙を模した量子ホール実験: 計画研究予算で購入した超伝導マグネット付き希釈冷凍機が本格的に可動開始したので、5 ミリケルビンの極低温強磁場下で、2 次元の量子宇宙を模した量子ホールエッジの高速電気伝導測定から動的な古典膨張測定、さらに量子測定に向けた基礎的な測定を進める予定。

[4] 公募研究

2024 年度より開始している第二期公募研究では、22 件の採択枠に対して 70 件の応募があった。5 月にキックオフミーティングをオンラインで開催した。今後は公募研究代表者が進捗状況を報告するセミナーを毎月開催する予定。今年 9 月の領域会議でも公募研究代表者全員が口頭講演を行う予定。また、各公募研究のホストとなる計画研究が決まっており、毎月の循環ミーティングに公募研究代表者も参加頂くことで、計画研究と公募研究の連携を深める。また第二期公募研究には 6 件の実験研究が参画しており、実験研究は 2 件のみの計画研究に対して相補的役割を期待している。昨年 5 月に東京大学駒場キャンパスで実験と理論の協奏を目的とする研究会を開催し好評を博したが、それを拡大する形で今年 9 月の日本物理学会にて領域 1, 3, 8, 11 合同で実験と理論の融合を推進するシンポジウムを開催予定。

[5] 若手育成

本領域には現在、研究協力者として 13 名の領域ポスドクと 49 名の大学院生が参画しており、若手育成は重要な責務である。そこで、若手育成のため「若手研究会」「領域スクール」「若手国内循環プログラム」を実施している。**若手研究会**は、ポスドクと大学院生を参加者の主体とした研究会で、第 1 回が 2023 年 2 月に名古屋大で、第 2 回が 2024 年 3 月に滋賀県の旅館で開催した。様々な分野を専門とする若手研究者が集い、研究交流を深めることで分野融合人材の創出に寄与し、好評を博している。今年も、日本物理学会直前に北海道小樽で開催予定である。**領域スクール**は、異分野の知識を若手が効率的に習得できるように、各分野の第一線の講師を招へいし、第 1 回が 2022 年 3 月に京都大学、第 2 回が、2022 年 7 月にオンライン、第 3 回が 2023 年 2 月の若手研究会と並行して開催された。第 4 回は 2023 年 9 月の領域滞在型研究会の第 1 週として、第 5 回は米国カブリ財団の後援を得た冬季スクールとして、ともに京大で開催した。第 6 回は今年の若手研究会と並行して行う。その後も、2025 年度末までにオンラインを含め 3 回程度実施する。**若手国内循環プログラム**は、領域の若手研究者を別の研究グループに数週間程度派遣し共同研究を行うもので、異なる計画研究や公募研究の間の連携を深めると同時に、若手に武者修行をしてもらおうプログラムである。今まで 25 件が実施済で、今後も毎年 7-8 件程度実施する。

[6] 国際活動

本領域では、国際活動として、「領域国際会議」「若手海外派遣プログラム」を実施している。初回の**領域国際会議**はコロナ禍でオンライン開催となったが、米国 It from qubit (IFQ) 共同研究と共催し、本領域誕生を海外へ周知した。2022 年と 2023 年は領域国際会議を京都大学基礎物理学研究所で開催し、特に後者は 5 週間にわたる国際滞在型研究会として開催し、400 名以上が現地出席した(外国人参加者 250 名超)。量子情報と理論物理の異分野融合で世界最大のプロジェクトであったが 2022 年に終了した米国 IFQ 共同研究を、本領域が継承したことが広く国際的に認知された。領域会議もこの集會中に開催し、領域の成果を広く海外へ発信できた。今年度の国際会議は 10 月に沖縄科学技術大学院大学(OIST)で開催予定で、外国人研究者が多い OIST の量子重力研究グループと共催することで国際的プレゼンスを高める。2025 年度は京都大学にて超弦理論の滞在型研究会と共催する形で開催予定。**若手海外派遣プログラム**は、若手研究者と海外の一流の研究グループに派遣し、共同研究を実施いただくプログラムで、領域内の公募制となっており、これまで計 8 件採択した。今後も引き続き、年間数件採択する予定。

[7] アウトリーチ

アウトリーチとして、「ニュースレターの発行」「領域ホームページ(HP)の情報発信」「SNS の情報発信」「極限宇宙市民講演会」を実施している。**ニュースレター**は毎年度末に刊行しており、今後も 2025 年と 2026 年の 3 月に刊行する予定。**領域 HP** で公開している解説記事をさらに拡充し、**SNS の情報発信**も引き続き行う。領域の研究者が最先端の研究を一般市民に解説する市民講演会をこれまで 2 回オンラインで開催し、毎回 200 名以上が参加し好評を博している。今後も 2024 年と 2025 年の秋頃に開催予定。

13 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

本領域の5名の総括班評価者による評価コメントは以下の通りである。

[1] 井元信之氏(東京大学・特命教授、専門:量子情報処理・量子光学・統計物理)の評価コメント

この「極限宇宙」領域は世界最高水準の成果を次々と高IF論文誌に出版しており、研究活動としては申し分ない。これを可能にし且つ「見える化」している領域の企画・運営も特筆に値する。以下紙面と理解の及ぶ範囲で記すと、まず成果の方は、A01班(量子情報基礎)では「非保証量子通信路で行う量子公開鍵暗号の初提案」「非スタビライザー符号を使う量子誤り訂正回路」「量子インターネット設計の多層化」「観測エントロピー理解の拡大」等が著しい。量子情報と宇宙を結ぶ8つの計画班はそれぞれ成果が多く列挙できないが、これほど多くの学問的課題を見つけ一つ一つクリアすることで前進するということがよくわかった。中でも感心したのは、元々二つの謎を持っていたのであるが、それは「現実の宇宙は AdS でなく dS なのではないか?」ということと「ビッグバンにおいて時間はどのように発現したのか?」である。また、「情報」とは知らなかったことを知ることなので、時間や意識と関係があることは感じていた。これらを論理的に結びつける成果を見て、久々に学問的な興奮を味わった。本領域は、物性系からの量子宇宙解明の試みがあることがユニークである。原子系(Li、アルカリ土類、ボソン系)や量子ホール効果による実験提案や新しい視点の理論解析が進んでいる。今後が楽しみである。ところで、計画研究以外に公募研究が第一期に16件、第二期に22件ある。これらはどれもレベルが高いばかりでなく、元々バラエティーに富む「極限宇宙」に一層の多様性と華やかさを添えている。これも後半の進展に期待していることを付記しておく。上記のような質の高いインタラクティブな研究活動ができているのは、領域をそのように性格づけた当初の企画と、それを実現し続けている運営に負うところが大きい。研究は勿論、専門家から一般人まで対象とする様々なアウトリーチ活動・ニュースレターの発行、ホームページや講演動画の公開など、研究者に閉じず、活動が社会に見えることを考えて、質の高い並々な努力がなされている。研究の進展とともに、この領域の活動が完遂されることを願っている。

[2] 細谷暁夫氏(東京工業大学・名誉教授、専門:量子情報理論・一般相対論・宇宙論)の評価コメント

学術変革A「極限宇宙」プロジェクトは、笠・高柳両氏が AdS/CFT 対応と量子エンタングルメントの関係を見出したことに始まる。その研究は、物理学における広範な研究手法を AdS/CFT 対応から見ることを促した。例えば、物性理論におけるテンソルネットワーク、量子計算における誤り訂正などが挙げられる。それらは、順調に進化し、それぞれの分野を開いている。その一例として「公募研究」の中にテンソルネットワークが3件もあることが目を引く。一方、1970年代からあるブラックホールの蒸発に関係する情報喪失問題にもエンタングルメントが本質的であることが共通の理解になりつつある。こうした本流の他に当プロジェクトから派生して、量子情報科学プロパーの課題にも重要な貢献が現れた。一例を挙げると、量子暗号に関する基本的な貢献がある。他方、この学術創生プロジェクトは懐が深く、実験家にも門戸を開いていて、オーソドックスな研究以外に、極低温における量子ホール効果を利用したブラックホールのシミュレーションなどユニークな研究を促し、公募研究では重力の量子性を見るテーブルトップの実験の提案まで受け入れている。ニュースレター2と3を比べて読むと、この学術創生プロジェクトが論文数という意味でも研究の活性化を引き起こしていることが、量子情報とブラックホール、量子宇宙、場の理論の関係を探る研究グループたちが多産であることから知る事ができる。すでに成果を出しているもの、これから期待されるものが混在している現状で、しっかりとした成果とサプライズを内に秘めたものがバランスよくあり、若い研究者の間で極めて活発な議論がなされている。中間評価ではあるが、すでにこのプロジェクトの質の高さは見えている。しかし、本命の量子重力はその頂を地平線上彼方に微かに見せる程度であり、道のりは遠い。量子重力の解明は量子情報の先にあると、私は思うのだが。

[3] Ignacio Cirac 氏(ドイツ Max Planck 研究所 Quantum Optics 所長、専門:量子情報・物性理論)の評価コメント

In view of your mid-term evaluation and as a member of the Scientific Advisory Board of the Extremal Universe (ExU) Collaboration, I would like to congratulate you for your achievements so far. The collaboration is not only making progress in research in different disciplines, including

quantum information and computation, holography and quantum cosmology, and many-body systems, but also making connection among those research areas and producing remarkable results that would not be possible without this collaboration. The number and quality of publications is outstanding and includes several key results that have attracted a lot of attention to the physics community. Furthermore, the collaboration is fostering scientific exchanges among researchers in Japan, specially among young ones, by organizing different kind of activities. A very remarkable one was the long-term workshop that took place last fall, and which turned out to be very successful. Also, the workshop "Toward Collaboration of Experiment and Theory", opened up the possibility of new collaborations between theorists and experimentalist, something which will be very relevant for future research. Altogether, I think that the collaboration is holding its promise of playing a central role in research in the interface between quantum information, cosmology, and many-body physics and, at the same time, fostering the collaboration among different groups and disciplines across Japan and also internationally.

[4] Juan Maldacena 氏(米国 Princeton 高等研究所・教授、専門:量子重力理論・素粒子論)の評価コメント

The extreme universe collaboration is doing very interesting research in the area of quantum information, gravity and cosmology. It has produced many interesting and novel publications that were presented at workshops and conferences throughout the world. The collaborative aspect is working very well, with researchers in different fields talking to each other and sparking new ideas. This was facilitated by interesting workshops and meetings, in which I participated. This interconnection between quantum information and quantum gravity is an interesting and active area of research, not only because of the possible availability of quantum computers and quantum simulators in the near future, but also due to the deep way in which aspects of quantum information are connected to fundamental features of spacetime geometry.

[5] Robert Myers 氏(カナダ Perimeter 研究所・所長、専門:量子重力理論・一般相対論・宇宙論)の評価コメント

The "Extreme Universe" (ExU) project aims to build new bridges connecting physics and quantum information, fostering a very broad interdisciplinary fusion. This is truly one of the most exciting new areas of theoretical physics and the past decade has seen remarkable new advances in quantum gravity, condensed matter theory and quantum field theory. From an international perspective, it is positioned as a Japanese version of the It from Qubit Simons Collaboration, which was a large-scale research project centered in North America and which spearheaded international research activities at the nexus of quantum gravity, quantum fields and quantum information for many years. But the ExU project includes not only particle theory, quantum gravity and quantum information theory, but also extends its reach to include quantum cosmology and condensed matter physics, as well as experimental investigations. The latter is becoming a particularly exciting domain as ongoing efforts towards creating quantum computers have led to the development of an array of experimental platforms exhibiting exquisite control of dozens (and soon hundreds) of qubits. The ExU project is highly regarded by the international research community for the many outstanding research results that have been produced through the efforts of the project members, for the organization of a wide range of meetings and seminars to promote the fusion of the different fields. For example, a collaboration between researchers in quantum information theory and particle theory led to a new quantity that generalizes entanglement entropy to a post-selection process. In addition, collaboration between researchers in quantum information theory and those in condensed matter theory has led to a better understanding of the relationship between quantum error-correcting codes and chaos in quantum many-body systems, such as the SYK model. With its multifaceted approach and ongoing efforts, the ExU project is well positioned to make significant progress in the years ahead. I am confident that we will continue to see important and impactful new results emerge from this groundbreaking initiative in the remaining two years.