

Quantum Foundations 2026

会場/Venue

大阪大学・豊中キャンパス南部陽一郎ホールとオンライン
The University of Osaka (Toyonaka Campus), Nambu Yoichiro Hall and online

日にち/Date

2026年3月5日から2026年3月6日
From March 5, 2026 to March 6, 2026

主催研究室/Organizing Laboratories

芝浦工業大学 量子情報システム研究室
Quantum Information System laboratory, Shibaura Institute of Technology

実行委員（あいうえお順）/Executive committee members (Japanese alphabetical order)

荒井駿（東大） / Hayato Arai (Univ. of Tokyo)
飯沼昌隆（広島大） / Masataka Iinuma (Hiroshima Univ.)
木村元（芝浦工大） / Gen Kimura (SIT)
倉持結（九大） / Yui Kuramochi (Kyushu Univ.)
高倉龍（大阪大） / Ryo Takakura (Univ. of Osaka)
谷村省吾（名大） / Shogo Tanimura (Nagoya Univ.)
筒井泉（KEK, 日本大） / Izumi Tsutsui (KEK, Nihon Univ.)
羽田野直道（東大） / Naomichi Hatano (Univ. of Tokyo)
細谷暁夫（東工大） / Akio Hosoya (Tokyo Tech)
皆川慎太郎（エクス=マルセイユ大） / Shintaro Minagawa (Aix-Marseille Univ.)
李宰河（東大） / Jaeha Lee (Univ. of Tokyo)

Last Update: 2026年3月3日

目次

メッセージ/Message	4
プログラム一覧/Program at a glance	5
招待講演/Invited talks	8
藤原 彰夫 (大阪大学)	8
量子局所漸近正規性の基礎：量子隣接性と量子漸近表現定理 / Foundations of Quantum Local Asymptotic Normality: Quantum Contiguity and Quantum Asymptotic Representation Theorem	8
若桑 江友里 (名古屋大学)	9
シャノン理論から見る古典論と量子論	9
口頭発表/Oral presentations	10
須藤 丈裕 (芝浦工業大学)	10
量子ビット系および一般確率論における同時測定不可能性の判定	10
大野 浩輝 (東京大学)	11
一般確率論における測定の間主観性による物理量の特徴付け	11
福田 竜也 (広島大学 先進理工系科学研究科)	12
光干渉計内での単一光子の非局在の観測	12
山森 直幸 (KEK/総研大)	13
複素鞍点を用いた量子デコヒーレンス解析：多体系と観測問題への応用, (Analysis of quantum decoherence using complex saddle points – Applications to many-body systems and measurement problems)	13
只木 孝太郎 (中部大学 工学部 情報工学科)	14
An analysis of Wigner’s friend in the framework of quantum mechanics based on the principle of typicality	14
谷村 省吾 (名古屋大学)	15
波動関数を持つ粒子, 持たない粒子 / Particles With and Without Wave Functions	15
梅川 舜 (東京大学 理学系研究科物理学専攻)	16
量子論における操作的相関と代数的相関の関係 / On the operational and algebraic quantum correlations	16
富塚 祥伍 (京都大学)	17
デコヒーレンスした量子系と古典-量子系の関係	17
長澤 輝明 (名古屋大学)	18
Quantum reference frame, non-invertible symmetry, and inferential reference frame	18
中林 拓紀 (東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻)	19
マルコフ的半群性を満たす非ユニタリダイナミクスの不在証明	19
中澤 聖 (電気通信大学)	20
対称性・不可逆性・量子性のトレードオフ関係の非加法的な保存則条件下への拡張	20
鳥井 健成 (名古屋大学数理情報学専攻)	21
Comparing quantum incompatibility of device sets from an operational perspective	21

野神 亮介 (名古屋大学情報学研究科)	22
CHSH設定における量子相関集合の双対的な特徴付けとエンタングルメントの検出	22
法橋 顕広 (東大理)	23
量子論を超えたエンタングルメント生成: ポペスク=ローリッヒ箱相関の達成 / Entanglement Generation Beyond Quantum Theory: Achieving the Popescu – Rohrlich Box Correlation	23
秋笛 清石 (NTT)	24
Localizable measurements under limited entanglement	24
中山 泰晶 (NTT コミュニケーション科学基礎研究所)	25
Uniqueness of imaginary resource for transformation from computationally universal to strictly universal quantum computation	25
ポスター発表/Poster presentations	26
1 松野 研 (大阪公立大学数学研究所)	26
一般化された不確定性原理に基づく squashed Kaluza-Klein ブラックホールからのスカラー粒子とフェルミオンのホーキング放射	26
2 小池 隆太 (早稲田大学)	27
調和振動子鎖モデルによる熱浴の構成とスペクトル関数の解析 / Construction of Heat Baths by Chains of Harmonic Oscillators and Analysis of Their Spectral Functions	27
3 小林 和樹 (静岡大学)	28
単一共振器モード量子電磁力学系における Fano 効果: マルコフ埋め込みによる解析	28
4 野村 堯良 (大阪大学大学院理学研究科数学専攻)	29
A game-theoretic probability approach to loopholes in CHSH experiments	29
5 柳沢 雄太郎 ((株) 浜松クオンタム)	30
特殊相対論による時間の別解釈 Another interpretation of time according to special relativity	30
6 平良 敬乃 (九州大学)	31
CP divisibility of Particle Bath with Dirac Dispersion Relation	31
7 原 愛貴 (電気通信大学)	32
Qubit 間の量子最適輸送問題におけるランダムユニタリチャンネル解の構成法	32
8 小林 弘和 (高知工科大学)	33
Kirkwood-Dirac 分布を用いた光子の直進性の破れの検証	33
9 安部七海 (大阪大学)	34
空間相関を持つ純粋位相緩和モデルにおける 3 体エンタングルメントの開放系ダイナミクス	34
10 越原 健太 (早大理工)	35
1 量子ビットオットーサイクルの有限時間周期動作による熱効率の向上	35
11 朴 宣奎 (東京大学生産技術研究所)	36
Gibbs 保存条件に基づく量子チャンネル変換の公理的クラスと操作的クラスの比較	36
12 落合 誠 (早稲田大学)	37
開放量子ドット系における生存確率の分数べき乗崩壊 / Fractional power-law decay of the survival probability in an open quantum-dot system	37
13 浅沼 達也 (みずほ第一フィナンシャルテクノロジー)	38
Over-parameterization in Dynamic Parameterized Quantum Circuits: Theory and Limitations	38
14 中出 捷 (情報通信研究機構)	39
一次元量子系のブラウン運動に現れる一方向輸送とその熱力学的整合性/ Unidirectional Transport in One-Dimensional Quantum Brownian Motion and Its Thermodynamic Consistency	39
15 中塚 海渡 (大阪大学)	40
Bell 定理の再解釈 —自由意志を伴う局所実在論は本当に否定されたのか	40
16 小柳 翔輝 (京都大学)	41

U(1) ゲージ場下における量子階層 Fokker-Planck 方程式と Aharonov-Bohm リングへの応用 . . .	41
17 地主 拓未 (高知工科大学大学院)	42
二光子対の非局所位相特異点と空間モード保存/Non-local phase singularity and spatial mode conservation of biphotons	42
18 小川 直哉 (東京女子大学)	43
量子測定が誘導する演算子としての時間：李・筒井形式とガウス波束 POVM によるアプローチ . . .	43
19 苑田 侃汰 (名古屋大学多元数理科学研究所)	44
Hypothesis testing and Stein's lemma in general probability theories with Euclidean Jordan algebra and its quantum realization	44
20 大平 徹 (Toru Ohira) (Graduate School of Mathematics Nagoya University)	45
「量子らしさ」の簡明な数理探求	45
21 廣谷 知也 (九州大学)	46
Oppenheim による相対論的半古典重力模型で予言される 測地線偏差の量子揺らぎ	46
22 上永 裕大 (九州大学)	47
時間依存結合を有する開放量子系の非摂動的解析	47

メッセージ/Message

「近年、量子の基礎に対する関心が増加しています。その背景には、量子情報科学の発展が一因として挙げられます。Bell 不等式の破れなど、従来は科学哲学の領域に留まっていたものが、量子テレポーテーションの本質であったり、量子暗号の安全性、量子計算の速度向上の根拠ともなることが明らかになり、情報的な量子基礎の見直しが世界的に行われています。時代の変遷とともに、量子基礎論の研究への敷居が下がり、多くの若者が自信を持って量子基礎について議論できる風潮が形成されてきたのは喜ばしいことです。しかし、我が国においては、量子基礎論の研究会が不足しており、特に若者が気軽に発表できる場所が少ないのが現状です。このような状況を踏まえ、研究会「Quantum Foundations (略称 QF)」は 2024 年に設立され、年に一度定期的で開催されることになりました。第 3 回目となる QF は、初めて関西（大阪大学）での開催となります。」 [1]

“In recent years, interest in quantum fundamentals has been on the rise, partly because of developments in quantum information science. Fundamental problems such as the violation of Bell inequalities, which had previously remained in the realm of philosophy of science, are essential for quantum teleportation, the security of quantum cryptography, and the basis for improving the speed of quantum computation. Quantum foundations are now given renewed consideration worldwide. It is of great benefit to the scientific community and to society in general that it has become much easier to participate in research into quantum foundations, giving more and more young students and researchers a chance to discuss quantum foundations and to contribute confidently to the frontiers of research. However, there is still a lack of events focusing on quantum foundations in Japan, and there are few opportunities for young people to present their research in a motivating and constructive atmosphere. Given this situation, the workshop “Quantum Foundations” (abbreviated as QF) was established in 2024 and is held annually. The third QF will be held for the first time in Kansai (at The University of Osaka). ” [2]

[1] Quantum Foundations 2025 ウェブサイト <https://qsys.se.shibaura-it.ac.jp/kimura/QFound/index.html> (アクセス: 2026 年 2 月 16 日) より抜粋

[2] Cited from the website of Quantum Foundations 2024 https://qsys.se.shibaura-it.ac.jp/kimura/QFound/index_e.html (access: February 16, 2026)

プログラム一覧/Program at a glance

2026年3月5日/March 5, 2026

2026/3/5	プログラム	講演者(敬称略)	タイトル	座長(敬称略)
9:20 - 9:30	開会		挨拶+諸注意 (高倉)	高倉
9:30 - 9:55	一般講演①	須藤丈裕	量子ビット系および一般確率論における同時測定不可能性の判定	高倉
9:55 - 10:20	一般講演②	大野浩輝	一般確率論における測定の間主観性による物理量の特徴付け	
10:20 - 10:45	休憩(25分)			
10:45 - 11:10	一般講演③	福田竜也	光干渉計内での単一光子の非局在の観測	飯沼
11:10 - 11:35	一般講演④	山森直幸	複素鞍点を用いた量子デコヒーレンス解析：多体系と観測問題への応用, (Analysis of quantum decoherence using complex saddle points – Applications to many-body systems and measurement problems)	
11:35 - 13:05	お昼休み(90分)			
13:05 - 14:05	招待講演①	藤原彰夫	量子局所漸近正規性の基礎：量子隣接性と量子漸近表現定理	細谷
14:05 - 14:30	休憩(25分)			
14:30 - 14:55	一般講演⑤	只木孝太郎	An analysis of Wigner's friend in the framework of quantum mechanics based on the principle of typicality	荒井
14:55 - 15:20	一般講演⑥	谷村省吾	波動関数を持つ粒子, 持たない粒子 / Particles With and Without Wave Functions	
15:20 - 15:45	ポスター紹介			荒井
15:45 - 17:55	ポスター(120分)			
18:10 - 19:45	意見交流会			

ポスター

番号	氏名	タイトル
1	松野 研	一般化された不確定性原理に基づくsquashed Kaluza-Kleinブラックホールからのスカラー粒子とフェルミオンのホーキング放射
2	小池 隆太	調和振動子鎖モデルによる熱浴の構成とスペクトル関数の解析 / Construction of Heat Baths by Chains of Harmonic Oscillators and Analysis of Their Spectral Functions
3	小林 和樹	単一共振器モード量子電磁力学系におけるFano効果：マルコフ埋め込みによる解析
4	野村 堯良	A game-theoretic probability approach to loopholes in CHSH experiments
5	柳沢 雄太郎	特殊相対論による時間の別解釈 Another interpretation of time according to special relativity
6	平良 敬乃	CP divisibility of Particle Bath with Dirac Dispersion Relation
7	原 愛貴	Qubit間の量子最適輸送問題におけるランダムユニタリチャンネル解の構成法
8	小林 弘和	Kirkwood-Dirac分布を用いた光子の直進性の破れの検証
9	安部 七海	空間相関を持つ純粋位相緩和モデルにおける3体エンタングルメントの開放系ダイナミクス
10	越原 健太	1量子ビットオットーサイクルの有限時間周期動作による熱効率の向上
11	朴 宣奎	Gibbs保存条件に基づく量子チャンネル変換の公理的クラスと操作的クラスの比較
12	落合 誠	開放量子ドット系における生存確率の分数べき乗崩壊 / Fractional power-law decay of the survival probability in an open quantum-dot system
13	浅沼 達也	Over-parameterization in Dynamic Parameterized Quantum Circuits: Theory and Limitations
14	中出 捷	一次元量子系のブラウン運動に現れる一方向輸送とその熱力学的整合性 / Unidirectional Transport in One-Dimensional Quantum Brownian Motion and Its Thermodynamic Consistency
15	中塚 海渡	Bell定理の再解釈 --- 自由意志を伴う局所实在論は本当に否定されたのか
16	小柳 翔輝	U(1)ゲージ場下における量子階層Fokker-Planck方程式とAharonov-Bohmリングへの応用
17	地主 拓未	二光子対の非局所位相特異点と空間モード保存/Non-local phase singularity and spatial mode conservation of biphotons
18	小川 直哉	量子測定が誘導する演算子としての時間：李・筒井形式とガウス波束 POVM によるアプローチ
19	苑田 侃汰	Hypothesis testing and Stein's lemma in general probability theories with Euclidean Jordan algebra and its quantum realization
20	大平 徹	「量子らしさ」の簡明な数理探求
21	廣谷 知也	Oppenheimによる相対論的半古典重力模型で予言される 測地線偏差の量子揺らぎ
22	上永 裕大	時間依存結合を有する開放量子系の非摂動的解析

2026年3月6日/March 6, 2026

2026/3/6	プログラム	講演者(敬称略)	タイトル	座長(敬称略)
9:00 - 10:00	招待講演②	若桑江友里	シャノン理論から見る古典論と量子論	木村
10:00 - 10:25	休憩(25分)			
10:25 - 10:50	一般講演⑦	梅川 舜	量子論における操作的相関と代数的相関の関係 / On the operational and algebraic quantum correlations	倉持
10:50 - 11:15	一般講演⑧	富塚祥伍	デコヒーレンスした量子系と古典-量子系の関係	
11:15 - 11:40	一般講演⑨	長澤輝明	Quantum reference frame, non-invertible symmetry, and inferential reference frame	
11:40 - 13:10	お昼休み(90分)			
13:10 - 13:35	一般講演⑩	中林拓紀	マルコフ的半群性を満たす非ユニタリダイナミクスの不在証明	李
13:35 - 14:00	一般講演⑪	中澤 聖	対称性・不可逆性・量子性のトレードオフ関係の非加法的な保存則条件下への拡張	
14:00 - 14:25	一般講演⑫	鳥井健成	Comparing quantum incompatibility of device sets from an operational perspective	
14:25 - 14:50	休憩(25分)			
14:50 - 15:15	一般講演⑬	野神亮介	C H S H設定における量子相関集合の双対的な特徴付けとエンタングルメントの検出	筒井
15:15 - 15:40	一般講演⑭	法橋顕広	量子論を超えたエンタングルメント生成：ポベスク=ローリッヒ箱相関の達成 / Entanglement Generation Beyond Quantum Theory: Achieving the Popescu-	
15:40 - 16:05	休憩(25分)			
16:05 - 16:30	一般講演⑮	秋笛清石	Localizable measurements under limited entanglement	谷村
16:30 - 16:55	一般講演⑯	中山泰晶	Uniqueness of imaginary resource for transformation from computationally universal to strictly universal quantum computation	
16:55	閉会		筒井 (5~10分) + アナウンス (荒井)	

招待講演/Invited talks

藤原 彰夫 (大阪大学)

量子局所漸近正規性の基礎: 量子隣接性と量子漸近表現定理 / Foundations of Quantum Local Asymptotic Normality: Quantum Contiguity and Quantum Asymptotic Representation Theorem

量子系の実験データから未知パラメータを推定する問題（量子推定）では、標本数が大きくなる極限で「推定精度はどこまで良くできるのか」「どの推定法がその限界を達成するか」を体系的に理解することが重要である。しかし量子系の場合、測定の選び方自体が推定手続きの一部になり、さらに観測対象の状態が確率測度ではなく密度作用素で表されるため、古典統計の漸近理論をそのまま適用することはできない。

本講演では、量子統計モデルの大標本極限を扱う基礎理論である「量子局所漸近正規性」を紹介する。まず、標本数が増えるにつれて「互いに見分けにくくなる」量子状態列同士をどの程度同一視してよいかを記述する概念として、新たに導入する量子版ルベグ分解に基づく量子 contiguity（隣接性）を定式化する [1]。これは局所的な推定問題を統一的に扱うための理論的土台を与える。次に、この土台の上で、十分大きな標本数のもとでは量子モデルが「ガウス型の単純な極限モデル」で近似できることを保証する量子漸近表現定理を示す [2]。これにより、複雑な量子推定問題を、より扱いやすい量子ガウスモデルに対する統計的決定問題へ還元して議論できるようになる。

応用として、独立同分布に限らない広い設定のもとで、達成可能な推定性能に関する普遍的な限界（タイトな下界）を導き、量子推定量の漸近的な最適性（正則性や minimax の意味で）を統一的に評価できることを説明する。

[1] A. Fujiwara and K. Yamagata, “Noncommutative Lebesgue decomposition and contiguity with applications in quantum statistics,” *Bernoulli*, **26**, 2105-2142 (2020).

[2] A. Fujiwara and K. Yamagata, “Efficiency of estimators for locally asymptotically normal quantum statistical models,” *Annals of Statistics*, **51**, 1159-1182 (2023).

若桑 江友里 (名古屋大学)

シャノン理論から見る古典論と量子論

量子シャノン理論は、量子力学的効果を取り入れた情報通信の基礎理論として、従来のシャノン理論を量子的に一般化することで得られた理論である。従来のシャノン理論と同様、その主要課題の1つは通信の高効率化・高精度化であり、その原理的限界は「符号化定理」によって示される。この理論は、量子系を用いた古典情報通信の研究に始まり、量子データ圧縮や量子状態の通信、さらにはエンタングルメント変換などを取り込んで発展してきた。近年注目を集める量子リソース理論においても、そこで生み出された概念や手法が重要な役割を果たしている。符号化定理を核とするシャノン理論の枠組みは、「情報」という抽象的な概念を、情報処理タスクにおける効率の原理的限界という形で、操作的かつ定量的に分析することを可能にするのだ。本講演では、「シャノン理論の観点から見て、古典論と量子論の間にはどのような共通点と相違点があるのか？」という問いに着目し、関連するいくつかのトピックを紹介する。

口頭発表 / Oral presentations

須藤 丈裕 (芝浦工業大学)

量子ビット系および一般確率論における同時測定不可能性の判定

量子論には同時測定不可能性という性質がある。これは複数の測定を同時かつ正確に行うことができないことを指す [1]。この性質は近年、定量的評価に関する研究が盛んに行われており、一般確率論 (General Probabilistic Theories, GPTs) と呼ばれる古典論や量子論よりも広い枠組みにも導入されその理解が進められている [2,3]。同時測定不可能性の定量的評価に関する指標の一つに、Heinosaari らにより提案された同時測定不可能性次元 (Incompatibility Dimension, ID) がある [4]。ID は「同時測定不可能性の判定に必要な状態の個数 (次元)」を表す量として導入され、操作的意味が明確である。このため GPTs の枠組みにも自然に拡張できる利点を持つが、これまでの議論は主として量子論に限られていた。本研究では、ID を GPTs へ拡張し、その性質を調査する。まず先行研究において Heinosaari らは、量子ビット系におけるノイズを付与したパウリ X, Z 測定を考えた際、ID の値が非連続的に変化するノイズの閾値が存在することを示している。しかし、この閾値の具体的な値は導出されていなかった。そこで第一に、この値を特定し、厳密な証明を与える。第二に、量子論のパウリ X, Z 測定に対応する概念として、GPTs において「相補的な測定」を導入し、量子ビット系と同様の議論を行う。具体的には、GPTs における「二次元正 N 角形状態空間 [5]」において「ノイズを付与した相補的な測定」について ID の挙動を解析し、ID が変化するノイズの閾値を導出する。ここで「相補的な測定」は $N \rightarrow \infty$ の下でパウリ X, Z 測定に、また状態空間は $N \rightarrow \infty$ の下で実ヒルベルト空間の量子ビット系となる。これを利用し、状態空間が古典系 ($N = 3$) から量子ビット系 ($N = \infty$) へと移行する過程における ID のノイズ閾値の変化の特徴を明らかにする。結果として、最も単純なモデルである二次元正四角形モデル ($N = 4$) において、ID の非連続的な変化が生じる閾値の存在と具体的な値を厳密に導出した。また、その他のいくつかの二次元正 N 角形モデルについても、数値計算により同様の閾値が存在することを確認した [6]。

参考文献

- [1] T. Heinosaari, T. Miyadera, and M. Ziman, *J. Phys. A: Math. Theor.* **49**, 123001 (2016).
- [2] N. Stevens and P. Busch, *Phys. Rev. A* **89**, 022123 (2014).
- [3] M. Plávala, *Phys. Rev. A* **94**, 042108 (2016).
- [4] T. Heinosaari, T. Miyadera, and R. Takakura, *Phys. Rev. A* **104**, 032228 (2021).
- [5] P. Janotta, C. Gogolin, J. Barrett, and N. Brunner, *New J. Phys.* **13**, 063024 (2011).
- [6] T. Sudo, K. Yoshimura, K. Nakatsuka, R. Takakura, and G. Kimura (in preparation).

大野 浩輝 (東京大学)

一般確率論における測定の間主観性による物理量の特徴付け

量子論において、射影測定 (PVM) は物理量 (可観測量) と 1 対 1 に対応しており、一般の測定 (POVM) の中でも理想的な測定のクラスとして知られている。しかし、PVM は代数的に定義されており、その操作的な特徴付けは不明瞭である。操作的な公理のみを用いて古典論や量子論よりも一般的な物理系を記述する枠組みである一般確率論においても、射影測定に相当する概念は明らかではなく、現在でも研究が行われている [1,2]。測定の「PVMらしさ」を定量的に評価する研究も行われているが [3,4]、その値に明確な操作的意味があり、かつ PVM の特徴付けになる定量化は知られていない。本研究 [5] では、小澤 [6] による量子測定の間主観性の概念を一般確率論に拡張することにより、特に量子系における PVM の操作的な特徴付けを与え、一般確率論における「物理量」の概念を定義した。同時に、測定の「物理量らしさ」を必要十分に定量化する操作的な指標を提案し、その性質を調べた。

測定 A が間主観的であるとは、2 人の観測者が 1 つの系に対して同時に測定 A を行ったときに、両者が必ず同じ結果を得ることをいう。これは、ランダムな結果を生成するのではなく、「物理系の内部に備わった量を読み出す」測定であるために必要だと思われる条件であり、量子系における PVM はこの性質を満たすことが小澤 [6] によって示されている。本研究では、Gudder [1] が提唱したシャープなエフェクトの概念を測定に拡張し、任意の物理系における測定に対して、一見異なる間主観性とシャープ性の条件が実際には等価であることを証明した。この定理を用いて量子系における POVM が間主観的であるための必要十分条件を決定し、間主観的な測定の中には PVM でない測定が存在することを示した。

上記の結果より、間主観性は PVM の特徴付けとしては不十分である。そこで、より強い条件として、測定結果のいくつかを同一視 (粗視化) した測定も必ず間主観的であるという「完全間主観性」を導入し、これが PVM の特徴付けを与えることを証明した。これは、完全間主観性が一般確率論における「物理量」の定義になりうることを示している。さらに、その拡張として、2 人の観測者が同じ結果を得る確率を用いて「物理量らしさ」を定量化することで、値に明確な操作的意味があり、かつ PVM の特徴付けを与える指標を導入し、その振る舞いを調べた。

本研究ではさらに、間主観的・完全間主観的な測定と、それに似た様々な概念の包含関係を、一般確率論・量子論・古典論のそれぞれについて完全に決定した。特に、非古典系には必ず間主観的であるが完全間主観的ではない測定が存在することを示した。この事実は、粗視化によって主観性が失われてしまうという反直観的な現象が、全ての非古典系において見られることを示すものであり、一般確率論における古典系の新たな特徴付けを与えている。

また、任意の物理系において (完全) 間主観的な測定が十分に存在することを、状態トモグラフィおよび状態識別という情報処理タスクの観点から明らかにした。

[1] S. Gudder. *International Journal of Theoretical Physics*, 35:2365, 1996.

[2] M. Kleinmann. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 47:455304, 2014.

[3] P. Busch. *Foundations of Physics*, 39:712, 2009.

[4] F. Buscemi, K. Kobayashi, and S. Minagawa. *Quantum*, 8:1235, 2024.

[5] S. Umekawa, K. Ono, and H. Arai. in preparation.

[6] M. Ozawa. *Scientific Reports*, 15:36112, 2025.

福田 竜也 (広島大学 先進理工系科学研究科)

光干渉計内での単一光子の非局在の観測

二重スリットの実験や光干渉計実験などの単一光子干渉実験では、干渉パターンが観測された時の光子の通過した光路は、量子力学の基本的な問題の1つとして長年議論されている。これまで、遅延選択実験や弱測定など様々な実験が行われているが、未だに明確な答えは得られていない。弱測定では、干渉縞の測定と光路の測定のトレードオフの問題を上手く回避しているが、測定で得られる弱値の物理的意味が明確になっていないことが問題となっている。

しかし近年の研究では、Hofmann が提案したフィードバック補償法によって未知な初期状態の POVM 測定で物理量の測定誤差が実験から評価可能となった。[1] 測定誤差を最小にする物理量の値を最適な推定値とすれば、POVM 測定から物理量の測定値が得られることになる。この手法を干渉計に適用した場合、経路を表す物理量（経路物理量）が実装できるような任意の2準位系のプローブと経路物理量を弱く結合させると、経路物理量の値と測定誤差が評価できる。Lemmel らによる中性子を用いた干渉計の実験では、経路物理量の測定値から1個の中性子が干渉計内部の2つの経路で分割（非局在）していることが示された。[2] また Hofmann らによる二重スリット実験の理論解析からは、干渉パターンの測定から光路を表す物理量 A の不確定性 $(\Delta A)^2$ が得られることが分かった。[3] 干渉計の一方の出力 (+) の測定から値 $A^2(+)$ 、もう一方の出力 (-) の測定から値 $A^2(-)$ を得ると、 A の平均値がゼロになることから、これらは不確定性を表すことになる。この量は、2つの光路上で分裂した単一光子の光路上の重みのゆらぎを表すと考えられる。

そこで本研究では、この不確定性を測定するために、干渉計の2つの光路と偏光を弱く結合させた後に、出力された単一光子の偏光を測定した。[4] その結果、 $0 < A(\pm)^2 < 1$ となる非局在や $A(\pm)^2 = 1$ の局在だけでなく、 $A(\pm)^2 \gg 1$ となる超局在が観測された。非局在は2つの光路上で1つの光子が分裂して、光路の光子の重みが0と1の間の大きさになる状態を指す。また局在は、光子がどちらか一方の光路を伝播し、光路上の重みが1もしくは0となる状態を指す。超局在は一方の光路の重みが1を超え、もう一方が負になる状態を表す。さらにこれらの非局在、局在、超局在は干渉計の位相に依存することも分かった。これは干渉計内部の光子の伝播は測定状況に依存して決まる、すなわち測定状況依存性を示していることになる。このことは測定状況を想定すれば、干渉計内の光路を表す物理量の値が測定できる、つまり実在論として議論できることを意味している。

[1] H. F. Hofmann, “Direct evaluation of measurement uncertainties by feedback compensation of decoherence” , Phys. Rev. Res. 3, L012011, (2021).

[2] H. Lemmel, et al., “Quantifying the presence of a neutron in the paths of an interferometer” , Phys. Rev. Res. 4, 23075, (2022).

[3] H. F. Hofmann, et al., ” A possible solution to the which-way problem of quantum interference” , Quantum Stud.: Math. Found. 10, 429-437, (2023).

[4] R. Fukuda, M. Iinuma, Y. Matsumoto, and H. F. Hofmann, arXiv:2505.00336, (2025)

山森 直幸 (KEK/総研大)

複素鞍点を用いた量子デコヒーレンス解析：多体系と観測問題への応用, (Analysis of quantum decoherence using complex saddle points – Applications to many-body systems and measurement problems)

量子デコヒーレンスは、環境との相互作用を通じて量子状態の重ね合わせが失われ、系が古典的な記述へと移行していく過程である。この過程の理解は、量子力学の基礎において中心的であると同時に、量子情報技術においては量子状態の保持を妨げる主要因としても重要である。

デコヒーレンスの解析的研究では Caldeira–Leggett 模型が長年標準的に用いられてきたが、従来広く使われるマスター方程式は Markov/Born 近似などの仮定のもとで導出されるため、低温・強結合領域では適用できない。近年、実時間経路積分の鞍点方程式に現れる複素鞍点を用いることで、これらの領域を含めてデコヒーレンスを近似なしに厳密に記述できることが示された [1]。

本研究では、この複素鞍点に基づく手法を量子力学における興味深い問題へ拡張する。第一に、分子を模した toy model に応用し、原子間相互作用がデコヒーレンスに与える影響を調べる。第二に、測定結果を事後選択 (post-selection) で条件づけた状況を考え、縮約密度行列の時間発展を通じて状態が特定の結果へ更新されていく過程を追跡することで、観測 (波束収縮) に関わる状態遷移を定量的に検討する枠組みを与える。

本研究は、同研究施設の西村淳、Tin Long Chau との共同研究に基づくものである。

[1] J. Nishimura and H. Watanabe, “Quantum decoherence in the Caldeira–Leggett model by the real-time path integral on a computer,” arXiv:2503.20699 [hep-lat].

只木 孝太郎 (中部大学 工学部 情報工学科)

An analysis of Wigner's friend in the framework of quantum mechanics based on the principle of typicality

The notion of probability plays a crucial role in quantum mechanics. It appears in quantum mechanics as the Born rule. In modern mathematics which describes quantum mechanics, however, probability theory means nothing other than measure theory, and therefore any operational characterization of the notion of probability is still missing in quantum mechanics. In our former works [K. Tadaki, arXiv:1804.10174], based on the toolkit of algorithmic randomness, we presented a refinement of the Born rule, called the principle of typicality, for specifying the property of results of measurements in an operational way. The Wigner's friend paradox is a Gedankenexperiment regarding when and where the reduction of the state vector occurs in a chain of the measurements by several observers where the state of the consciousness of each observer is measured by the subsequent observer, except for the last observer in the chain. It is one of the central open questions in the measurement problem of quantum mechanics. In this talk, we make an analysis of the Wigner's friend paradox in the framework of quantum mechanics based on the principle of typicality. We then draw common sense conclusions about the Wigner's friend paradox. Deutsch's thought experiment is a variant of the Wigner's friend paradox, which can, in principle, verify the effect of the consciousness of observer on the reduction of the state vector. In this talk, we make an analysis of the Deutsch's thought experiment comprehensively in our framework of the principle of typicality. Based on this, we make a prediction which is testable in principle. In our framework, we can analyze still more complicated situations than the Wigner's friend paradox or Deutsch's thought experiment. In this talk, as such an example, we introduce a combination of the Wigner's friend paradox and Deutsch's thought experiment, called the Wigner-Deutsch collaboration. We make an analysis of it comprehensively in our framework of quantum mechanics based on the principle of typicality. This analysis shows how effectively our framework works in an even more complicated situation. For the details of this talk, see arXiv:2509.07828.

谷村 省吾 (名古屋大学)

波動関数を持つ粒子, 持たない粒子 / Particles With and Without Wave Functions

今年 2026 年はシュレーディンガーが波動関数の方程式を発表した 1926 年から 100 周年にあたることも意識して, ここでは, 波動関数と波動方程式について考え直す問題提起をしたい. 電子に関しては, 波動関数の非相対論的シュレーディンガー方程式が適用できるし, 波動関数の解釈を変えれば相対論的ディラック方程式も使える. 光子に関しては, 絶対値 2 乗が光子の位置の確率密度になるという意味での波動関数はない. 一方で, 中性パイメソンは反粒子を持たない粒子であり, 場の量子論では実スカラー場で記述されるが, 非相対論近似では複素数値波動関数で記述される. 中性 K メソンは粒子と反粒子の区別があり, 2 成分複素数値波動関数で記述されるべきだろう. 絶対値 2 乗が確率密度になるような波動関数のある・なしと, 波動関数が満たす波動方程式のある・なしは区別すべき問題であるが, どういう条件を満たすときに「ある」のかはっきりさせたい. これらの問題について Pauli, T.D.Newton, Wigner, Wightman, 大貫義郎などの議論を紹介し, 私の考えを述べたい. この他に, マクロ系の波動関数はあるのか? 場の波動関数は数学的・物理的に well-defined な概念なのか? 場の path integral は定義になっているか? 宇宙の波動関数などというものがあるのか? 波束の収縮は波動方程式に従うのか? といった疑問もあり, これらの話題に少しづつ言及したい.

梅川 舜 (東京大学 理学系研究科物理学専攻)

量子論における操作的相関と代数的相関の関係 / On the operational and algebraic quantum correlations

相関関数は、物理学の様々な分野において重要な指標として用いられる。その代表的な定義には、実際の測定過程によって定まる「操作的相関」と、物理量の代数的な「積」の期待値として定められる「代数的相関」の2種類が考えられる。例えば、物理量 A, B のそれぞれ時刻 t_1, t_2 についての時間相関としては、これらの物理量の時間順序積によって定まる代数的相関 $\langle B(t_2)A(t_1) \rangle_\rho$ がしばしば用いられる。ところが、これは物理量の逐次的な射影測定から得られる操作的相関 $\langle A(t_1) \rightarrow B(t_2) \rangle_\rho^{\text{op}}$ とは、一般には一致しない。

量子論では、不確定性原理から複数の物理量は一般には同時に測定できず、これに起因して、相関関数の定義には本質的な任意性が存在する。これは、測定によって状態が単なる知識の更新を超えて本質的に乱れる [2,3] ためとも考えることができる。本研究 [1] では、この乱れを *invasiveness* として定量化し、操作的相関と代数的相関の差がこれによって抑えられることを示した。

本研究ではまた、これらの量子的な相関関数と、その背後に存在する(擬)同時確率分布との間の関係を調べた。実際の測定過程から定まるような、現実の分布に根拠を持つ操作的相関とは事情が異なり、一般に量子論における代数的相関には、これに対応する自然な同時確率分布が存在しない。ところが、擬確率/量子化双対構造 [4] に基づくことで、量子的な物理量に関する「仮想的」な同時分布である擬同時確率分布を、代数的相関に対応する分布関数として解釈することが可能になる。本研究ではこの事実に基づいて、操作的な同時確率分布と代数的な擬同時確率分布の差が、測定の *invasiveness* や非可換性の指標などによって、上下から抑えられることを示した。これは、標準的には「仮想的」な分布とみなされる擬同時確率分布やその任意性に関して、ある種の操作的観点からの正当性を示唆する結果とも考えることができる。

本結果の応用として、量子論における Leggett–Garg 不等式 [5] の破れを検証・解析する各手法の間の等価性やその構造を明らかにした。Leggett–Garg 不等式は、単一系の「時間相関」についての不等式であり、量子論とマクロ実在論を識別するのに用いられる。ここで「時間相関」の定義には、一般に上述のような本質的な任意性が存在するが、特に Leggett と Garg の原論文 [5] では、逐次的な射影測定によって定まる操作的相関が採用されていた。一方で後年、代数的相関や擬確率、弱値・弱測定を用いることでも、同様の破れが見られることも報告されていた [6,7]。本研究では、擬確率/量子化双対構造 [4] に立脚することで、これら各種の方法が本質的に等価であることを示した。これに関して、特に ± 1 を固有値に持つ物理量については、代数的相関と操作的相関とが一致することが知られていたが、本研究ではその逆の主張も示すことに成功した。

-
- [1] S. Umekawa and J. Lee, in preparation.
 - [2] G. Schild and C. Emary, Phys. Rev. A, 92(3), 032101 (2015).
 - [3] S. V. Moreira and M. T. Cunha, Phys. Rev. A, 99(2), 022124 (2019).
 - [4] J. Lee and I. Tsutsui, Springer Proc. Math. Stat., 261, 195 (2018).
 - [5] A. J. Leggett and A. Garg, Phys. Rev. Lett., 54, 857 (1985).
 - [6] J. J. Halliwell, Phys. Rev. A, 93, 022123 (2016).
 - [7] M. E. Goggin, et al., Proc. Natl. Acad. Sci., 108, 1256 (2011).

富塚 祥伍 (京都大学)

デコヒーレンスした量子系と古典-量子系の関係

重力の量子性に関する実験的な検証は未だされておらず、近年は重力により量子的なプローブ間に媒介されるエンタングルメントを観測することで重力の量子性を確認する机上実験 [1][2] が提案されている。このとき、量子系と「本質的に古典的」な媒介場の結合を与える古典-量子モデルによる予言が重要である。特に、Oppenheim により提案された、最も一般的なマルコフの古典-量子モデル [3] が注目されている。しかし本質的に古典的という概念は曖昧であり、更に、実験で見える“媒介場の古典性”が根源的なものか、環境によるデコヒーレンスから来る有効的なものかは自明でない。本研究では、環境を持つ、相互作用する二つの量子的な場がデコヒーレンスしたものと Oppenheim モデルが等価であることを示す。量子的な二つの場からなる系が古典-量子系として解釈できるかを判定するため、古典的に振舞ってほしい片方の場に関してウィグナー変換し、二つの場の状態を、残っている場のヒルベルト空間上の演算子として記述する。これを半ウィグナー演算子と呼ぶことにする。そして、この半ウィグナー演算子が半正定値であるとき、古典的に振舞ってほしい場のウィグナー関数は非負となり、系は古典-量子系になっていると解釈できる。この半ウィグナー演算子に関するダイナミクスが正值性を保つとき、古典-量子系の描像が保たれる。特に、具体例として、三つの相互作用するスカラー場を考え、環境をトレースアウトして得られる有効理論を解析する。マルコフ・白色雑音近似では、Oppenheim モデルが再現され、ダイナミクスの正值性は既知のデコヒーレンス-拡散トレードオフに還元されることを示す。以上より、古典重力モデルと整合する実験結果は、媒介場が根源的に古典であることを一意には示さず、環境によりデコヒーレンスした量子媒介場の有効的な記述である可能性を持つ。本講演ではこの含意を踏まえ、机上実験の解釈上の注意点についても議論する。

[1] C. Marletto & V. Vedral, Phys. Rev. Lett. 119, 240402 (2017)

[2] S. Bose et al., Phys. Rev. Lett. 119, 240401 (2017) [3] J. Oppenheim, Phys. Rev. X 13, 041040 (2023)

長澤 輝明 (名古屋大学)

Quantum reference frame, non-invertible symmetry, and inferential reference frame

一般的に、ミクロな物理法則は可逆であるのに対し、マクロな現象は不可逆性を示す。この問題は物理学の基礎における長年の課題であり、その解決に重要な概念の一つが「参照系 (reference frame)」である。標準的な量子力学では、参照系は位置やスピンの向きといった物理量を定義する物理系として扱われ、力学的な群 (可逆な対称性操作) と関連付けられてきた。しかし、マクロな観測者が直面する情報の損失や粗視化といったプロセスは本質的に不可逆であるため、従来の可逆な群対称性に基づく参照系だけでは十分に記述できない側面がある。そこで本講演では、統計的推論とレトロディクション (過去推定) の領域に参照系概念を拡張した「推論的参照系 (inferential reference frame)」を用いる。従来の量子参照系がユニタリ群 (可逆な対称性) と関連付けられるのに対し、推論的参照系は粗視化プロセスによって生じる「不可逆な対称性 (completely positive map)」と密接に関連している。この研究では測定、推論、対称性の関係が再構築され、量子力学における不可逆性や相関の性質について、観測者中心の統一的な視点が提示される。

参考文献: T. Nagasawa, E. Wakakuwa, K. Kato, and F. Buscemi, "Macroscopicity and Observational Deficit in States, Operations, and Correlations," *Reports on Progress in Physics*, Vol. 88, No. 11, 117601 (2025).

中林 拓紀 (東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻)

マルコフ的半群性を満たす非ユニタリダイナミクスの不在証明

孤立量子系のダイナミクスはシュレディンガー方程式により記述され、ユニタリ時間発展として与えられる。一方、外部環境と相互作用する開放量子系のダイナミクスは一般に非ユニタリであり、全体系のユニタリ時間発展を環境自由度について縮約をとることで表現できる。

開放量子系の時間発展写像は、系のヒルベルト空間 \mathcal{H}_S 、環境系のヒルベルト空間 \mathcal{H}_E 、環境系の状態 ρ_E 、および全体系 $\mathcal{H}_S \otimes \mathcal{H}_E$ 上の自己共役ハミルトニアン H を用いて

$$\mathcal{E}_t(\cdot) := \text{Tr}_E[e^{-iHt}(\cdot \otimes \rho_E)e^{iHt}] \quad (1)$$

と書ける。 \mathcal{E}_t は完全正値トレース保存写像 (CPTP 写像) であり、非ユニタリダイナミクスの満たすべき重要な性質である。

開放量子系の記述としては、Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad (GKSL) 方程式 [1,2] が広く用いられる。GKSL 方程式は CPTP 写像がマルコフ的半群性

$$\mathcal{E}_{t+s} = \mathcal{E}_t \mathcal{E}_s \quad \forall t, s > 0 \quad (2)$$

を満たすことと等価である。マルコフ的半群性を持つ非ユニタリな CPTP 写像、つまり GKSL 方程式は式 (1) から構成可能であることが、古くから様々な研究で示されてきた [3,4]。しかし、これらの構成方法が実験的に実現可能であるかについては未解決である。

本発表では、この問いに否定的な結論を与える。式 (1) の全体系ハミルトニアン H に対して、物理的に自然な三つの条件を課すことで、マルコフ的半群性を持つ非ユニタリ時間発展写像は存在しないことを示す。つまり、開放量子系のダイナミクスは必ず非マルコフになり、GKSL 方程式は近似的な記述に過ぎないことを示す。

[1] Gorini, V., Kossakowski, A., and Sudarshan, E. C. G. Completely positive dynamical semigroups of N-level systems. *Journal of Mathematical Physics*, 17(5), 821-825. *Mathematical Physics* **18.4** 756-763 (1976).

[2] Lindblad, G. On the generators of quantum dynamical semigroups. *Communications in mathematical physics*, **48.2**, 119-130 (1976).

[3] Davies, E. B. "Some contraction semigroups in quantum probability." *Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und Verwandte Gebiete* **23.4**: 261-273 (1972).

[4] Nagy, Béla Sz, et al. *Harmonic analysis of operators on Hilbert space*. Springer Science and Business Media, (2010).

中澤 聖 (電気通信大学)

対称性・不可逆性・量子性のトレードオフ関係の非加法的な保存則条件下への拡張

保存則が量子系のダイナミクスに及ぼす制限についての研究を行った。この研究分野の歴史は長く、これまで、量子測定における Wigner-Araki-Yanase(WAY) 定理, 量子計算におけるユニタリ WAY 定理, 量子エラー訂正における Eastin-Knill 定理などの No-go 定理が与えられてきた。そして近年, これら 3つの定理を統一する, 対称性・不可逆性・量子性のトレードオフ不等式 (Symmetry, Irreversibility and Quantumness trade-off inequality ; 以下 SIQ 不等式) が与えられた。SIQ 不等式は, 現代物理学の基本的な概念に関わることや, 導出される際の仮定の普遍性から非常に幅広い適用範囲をもつ。しかし, 加法的な保存則の下で導出された不等式のため, 加法的ではない保存則 (non-additive conservation law) が成り立つ系に対しては適用できないという課題を持つ。Bosonic code などの一部の重要な量子情報処理モデルは非加法的な保存則が成り立つ系を利用するため SIQ 不等式の非加法的な保存則条件下への拡張は重要な課題である。そこで, 本研究では, 非加法的な保存則条件下で SIQ 不等式の導出を試みた。その結果, 保存則が非加法的である場合においても同様に, 対称性・不可逆性・量子性のトレードオフ関係 (以下, non-additive SIQ 不等式) が成り立つことを厳密に証明した。non-additive SIQ 不等式は, 「局所保存量に対する非対称性は不可逆性をもたらすが, この不可逆性は, 局所保存量の量子ゆらぎを用いて抑制することができる」ということを定量的に表した関係式である。SIQ 不等式の様々な応用が研究されていることから, non-additive SIQ 不等式も同様に幅広い応用が期待される。

鳥井 健成 (名古屋大学数理情報学専攻)

Comparing quantum incompatibility of device sets from an operational perspective

本発表の内容は Phys. Rev. A 112, 062228 に基づく。量子論において複数の操作を同時に行えないという性質を incompatibility といい、同時測定不可能性や No-cloning 定理などの性質を統一的に記述する。近年、incompatibility は量子情報処理におけるリソースとして注目されており、incompatibility の「強さ」を特徴づけることが求められている。本研究では、「利用可能な状態が制限された状況下での incompatibility の検知可能性」という操作的な観点に基づき incompatibility の「強さ」を比較する前順序を導入する。具体例として unbiased qubit observable と呼ばれるノイジーなパウリ測定の組を取り上げ、この前順序が incompatibility の強さについてこれまで識別できなかった階層を与えることを数値的に示し、前順序から導かれる同値関係の成立条件についても調べた。さらに、distributed sampling と呼ばれる量子情報タスクにおける測定の組の有用性がこの前順序によって評価されることを示した。

野神 亮介 (名古屋大学情報学研究科)

CHSH設定における量子相関集合の双対的な特徴付けとエンタングルメントの検出

ベルの理論による量子論の局所実在性の否定とその実験検証は、前世紀の物理学における重要な発見の一つとして広く知られる。前回の Quantum Foundations 2025 では、Clauser-Horne-Shimony-Holt (CHSH) 設定のもとで、所与の2組の物理量の対によって実現可能な量子相関集合を考察し、特に不等式を用いた同集合の完全な特徴付け [1] の成功について報告した。今回の講演 [2] では、この不等式を量子相関集合のゲージ関数に係る条件式と解釈することで、同集合の特徴付けをゲージ関数とその双対的な記述の両面から与え、またその操作的な解釈を論じる。更に、セパラブルな量子状態のもとで実現可能な相関集合など、量子もつれに起因するものとは性質を異にする相関集合についても、その双対的な特徴付けを見る。特に、これらの結果が CHSH 設定における量子もつれの検出感度の一つの操作的な定量化を与えることを見た上で、その原理的限界や物理量の非両立性との関連についても論じる。

[1] R. Nogami and J. Lee, Phys. Rev. A 112, 062208 (2025).

[2] R. Nogami and J. Lee, in preparation.

法橋 顕広 (東大理)

量子論を超えたエンタングルメント生成: ポペスク=ローリッヒ箱相関の達成 / Entanglement Generation Beyond Quantum Theory: Achieving the Popescu – Rohrlich Box Correlation

Bell 定理 [1] とその代表例である CHSH 不等式 [2] $|S| \leq 2$ は、局所实在論の許す相関と量子エンタングルメントによる非局所相関の差異を鮮明にし、局所性と实在性の両立不可能性の実験検証 [3] を導いた。一方で、量子論にも Tsirelson 限界 $|S| \leq 2\sqrt{2}$ という越えられない限界が存在する [4]。これに対し Popescu と Rohrlich は、相対論的因果律に対応する no-signalling 原理の制限下でも最大値 $|S| = 4$ を達成する確率モデル (PR box) が構成できることを示した [5]。このような “beyond-quantum” な相関が自然界で観測されない事実は、量子論を特徴づける追加原理の探究を促し、情報因果律 [6] をはじめとする諸原理が提案されてきた。

上記は主として「与えられた状態 (相関) がどこまで強くなり得るか」という静的な制約の研究である。我々は、beyond-quantum 理論における動的な問題、すなわち「無相関な product state から非局所相関 (エンタングルメント) を生成できるか」に焦点を当てる。量子論では、2 量子ビットの product state に CNOT などの 2-qubit ユニタリを作用させることで容易にエンタングルメントを生成できる一方で、beyond quantum におけるエンタングルメント生成は具体例レベルですら知られていない。それどころか、Gross, *et al.* [7] は、boxworld と呼ばれる PR box を含む一般確率論では可逆なエンタングルメント生成が不可能であることを示し、「量子論の entangling unitary に相当するものは存在しない」と結論づけた。

我々は、可逆性の仮定を緩めることでこの描像が大きく変化し、エンタングルメント生成が可能になることを示した [8]。具体的には、純粋状態を純粋状態へ写す *pure-state-preserving (PSP)* 変換を “unitary のアナロジー” として採用する。量子論では (自明な反例を除き) PSP は可逆性とほぼ同等であるが [9]、一般に PSP は可逆性より弱くなり得る。我々は、2 体の最も単純な boxworld において、無相関な product state から PR box 相関を生成する非自明な PSP map を明示的に構成した。さらに、そのような PSP entangling map を完全に分類し、我々の構成以外には存在しないことを示した。

-
- 参考文献 [1] J. S. Bell, *Physics* 1, 195 (1964).
[2] J. F. Clauser et al., *Phys. Rev. Lett.* 23, 880 (1969).
[3] A. Aspect, P. Grangier, and G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* 49, 91 (1982).
[4] B. S. Tsirelson, *Lett. Math. Phys.* 4, 93 (1980).
[5] S. Popescu and D. Rohrlich, *Found. Phys.* 24, 379 (1994).
[6] M. Pawłowski et al., *Nature* 461, 1101 (2009).
[7] Gross et al., *Phys. Rev. Lett.* 104, 080402 (2010).
[8] S. Umekawa*, A. Hokkyo*, H. Arai, and K. Takasan, in preparation. (*: equal contribution)
[9] J. Hou, *Linear Algebra Appl.* 439, (2013).

Localizable measurements under limited entanglement

Joint quantum measurements are a ubiquitous primitive in quantum networks and distributed computation. A particularly stringent operational regime arises when spatially separated parties must implement a global measurement using only *instantaneous, non-adaptive* local operations (i.e., no inter-party signaling during the measurement), possibly assisted by pre-shared entanglement. Measurements admitting such implementations are often called *localizable* [1] and were originally motivated by foundational questions about which observables can be meaningfully assigned to spacelike separated regions, tracing back to early work on “impossible measurements” in quantum field theory [2].

A striking feature of this setting is the sharp contrast between (i) general POVMs, where (in principle) unlimited entanglement suffices to localize any bipartite POVM [3], and (ii) *ideal* measurements (projective instruments that also output the post-measurement quantum state), which are far more restrictive [4]. Despite significant progress on concrete localization protocols and refinements of blind-teleportation-type schemes [3,5,1], a protocol-independent understanding of which joint measurements are localizable under *finite* entanglement resources has remained incomplete.

Quantifying the *entanglement cost* of such localization tasks has direct applications to reducing expensive entanglement resources in distributed quantum information processing, and is also central to security proofs in position-based quantum cryptography [5]. Moreover, recent work highlights connections between entanglement cost, semi-quantum/nonlocal games, and resource theories of the LOSR (local operations and shared randomness), and constraints suggested by AdS–CFT correspondence on quantum gravity [6].

In this work [7], we obtain the following three main results.

1. **General qudits:** A rank-1 PVM on $\mathbb{C}^d \otimes \mathbb{C}^d$ containing at least one element of maximal Schmidt rank is localizable by using entanglement of Schmidt number at most d *iff* it forms a maximally entangled basis arising from a *nice unitary error basis*; the proof reveals an unexpected connection between localization constraints and Latin-square structure, and partially supplements open problems raised in [1].
2. **Two qubits:** A two-qubit rank-1 PVM is localizable by using entanglement of Schmidt number at most 2 *iff* it is the product basis, the Bell basis, or a BB84-type basis. This resolves a conjecture of Gisin and Del Santo [2].
3. **Ideal measurements:** An ideal measurement on a two-qudit basis containing at least one maximally Schmidt-rank element is localizable *iff* it is a maximally entangled basis arising from a nice unitary error basis. This strengthens earlier results [4].

[1] Jef Pauwels, Alejandro Pozas-Kerstjens, Flavio Del Santo, and Nicolas Gisin. Classification of joint quantum measurements based on entanglement cost of localization. *Phys. Rev. X*, 15:021013, Apr 2025.

[2] Nicolas Gisin and Flavio Del Santo. Towards a measurement theory in QFT: “Impossible” quantum measurements are possible but not ideal. *Quantum*, 8:1267, February 2024.

[3] Lev Vaidman. Instantaneous measurement of nonlocal variables. *Phys. Rev. Lett.*, 90:010402, Jan 2003.

[4] David Beckman, Daniel Gottesman, M. A. Nielsen, and John Preskill. Causal and localizable quantum operations. *Phys. Rev. A*, 64:052309, Oct 2001.

[5] Salman Beigi and Robert König. Simplified instantaneous non-local quantum computation with applications to position-based cryptography. *New J. Phys.*, 13(9):093036, sep 2011.

[6] Richard Cleve and Alex May. Lower bounds on non-local computation from controllable correlation, 2026.

[7] Seiseki Akibue and Jisho Miyazaki. Localization of joint quantum measurements on $\mathbb{C}^d \otimes \mathbb{C}^d$ by entangled resources with schmidt number at most d , 2026.

中山 泰晶 (NTT コミュニケーション科学基礎研究所)

Uniqueness of imaginary resource for transformation from computationally universal to strictly universal quantum computation

There exist two types of universality in quantum computation: strict and computational universalities. The example of strictly universal gate set is $H, \Lambda(S)$, and this is sufficient to simulate any unitary dynamics. The example of computationally universal gate set is H, CCZ . Since H, CCZ does not contain an imaginary number in their matrix representation, only operators represented by real orthogonal matrices are realizable. In this sense, the strict universality is stronger than the computational one. Takeuchi [PRL 133, 050601 (2024)] gave a method to transform the computationally universal gate set H, CCZ into the strict one by using a maximally imaginary state $|+i\rangle$, which is an eigenstate of the Pauli-Y operator. From the viewpoint of resource theory of imaginarity, it is important to study whether the maximum imaginarity is necessary for the transformation. We show that $|+i\rangle$ is a unique resource up to the free operations. Moreover, we show the stronger result that if a given resource state cannot simulate all unitary dynamics, then the realizable operators are restricted to the ones represented by real orthogonal matrices. This implies that a state ρ that is not maximally imaginary cannot be used as a resource to realize a non-real unitary operator U , even if ρ contains an imaginary number and the imaginary part of U is arbitrarily small.

ポスター発表/Poster presentations

1 松野 研 (大阪公立大学数学研究所)

一般化された不確定性原理に基づく squashed Kaluza-Klein ブラックホールからのスカラー粒子とフェルミオンのホーキング放射

ホーキング放射は、一般相対性理論と量子論の両方が役割を果たす興味深い現象である。その最終段階では、量子重力効果により半古典的な議論が破綻すると予想される。いくつかの量子重力モデルは、プランク長程度の測定可能な最小の長さが存在することを示唆している。弦理論では、いくつかの量子重力理論に着想を得て、ハイゼンベルク不確定性原理の修正である一般化された不確定性原理によって、そのような最小の長さが得られる。次に、高次元時空における相互作用理論は、重力・電磁気・弱い相互作用・強い相互作用という4つの基本相互作用を統一する最も有望なアイデアである。この考えに基づき、高次元ブラックホール解が活発に議論されている。観測可能な世界は実質的に4次元であるため、余剰次元をコンパクト化した高次元ブラックホール解を現実的なモデルの候補と見なせる。これらを Kaluza-Klein ブラックホールと呼ぶ。5次元 squashed Kaluza-Klein ブラックホール解の族は、ホップ束を部分空間として持ち、その基底空間のサイズは無限遠で発散するが、ファイバーのサイズは有限の極限を持つ [1]。これは余剰次元が無限遠でコンパクト化されることを意味し、結果として有効4次元時空が得られる。つまり、ひねられたコンパクトな余剰次元を持つ一連の Kaluza-Klein ブラックホール解は、現実的な高次元ブラックホールモデルの1つと見なせる。これまでに squashed Kaluza-Klein ブラックホール時空のいくつかの側面として、ホーキング放射、地平線の正則性、ジャイロ歳差運動、プラズマ媒質中の光の湾曲などを議論した。そこで、帯電した静的な5次元 squashed Kaluza-Klein ブラックホールからのホーキング放射を、荷電スカラー粒子と荷電フェルミオンのトンネル効果により議論した [2]。従来の squashed Kaluza-Klein ブラックホールからのホーキング放射の研究とは異なり、測定可能な最小の長さを伴う一般化された不確定性原理によって予測される現象論的量子重力効果を考慮した。一般相対性理論に対するホーキング温度の補正を導出し、それらは放射される粒子のエネルギー、コンパクト化された余剰次元の大きさ、ブラックホールの電荷、及び squashed Kaluza-Klein 時空における最小の長さの存在に関連していることがわかった。修正された温度の極限をとることで、5次元及び4次元ブラックホール時空における既知のホーキング温度を導出した。さらに、一般化された不確定性原理が放射によるホーキング温度の上昇を緩やかにして、squashed Kaluza-Klein ブラックホールの蒸発後にプランク質量程度の熱力学的に安定な残骸を生じうることを示した。そして、一般化された不確定性原理によって修正されたホーキング放射の疎密性が、squashed Kaluza-Klein ブラックホールの質量が残骸の質量に近づくにつれて無限大になる可能性があることもわかった。

[1] Hideki Ishihara and Ken Matsuno, Progress of Theoretical Physics, 116, pp.417-422 (2006).

[2] Ken Matsuno, Classical and Quantum Gravity, 39, pp.075022-1-075022-19 (2022).

2 小池 隆太 (早稲田大学)

調和振動子鎖モデルによる熱浴の構成とスペクトル関数の解析 / Construction of Heat Baths by Chains of Harmonic Oscillators and Analysis of Their Spectral Functions

開放量子系の解析では、熱浴のマイクロモデル（と相互作用）を具体的に構成することで、系のダイナミクスのより厳密な取り扱いが可能となる。本研究では、バネで連結された調和振動子鎖として熱浴を構成し、熱浴と相互作用を特徴付ける量であるスペクトル関数を厳密に計算する。そして得られたスペクトル関数の特徴を捉える上で、次の2点に着目する。1つはスペクトル関数の最小振動数（しきい値）近傍における漸近的挙動で、これは熱浴におけるゆらぎの相関関数の長時間挙動に寄与し、熱浴におけるゆらぎの緩和の様子を知ることができる [1]。もう1つはスペクトル関数の特異（非解析性）で、しばしば系のダイナミクスに非指数減衰などの特異なダイナミクスを引き起こす [1]。

本研究で扱うモデルでは、系と熱浴の相互作用は熱浴の端点を構成する調和振動子で局所的に導入する。構成する熱浴モデルの空間次元や調和振動子鎖の設定、すなわち、半・両側無限の方向の数、半無限鎖の境界条件（自由・固定端的）を変化させて、上に挙げたスペクトル関数の2点の特徴との関係を明らかにした。

また、本研究で扱ったモデルに現れたスペクトル関数の特異性は、Van Hove 特異点 [2] と呼ばれる特異性に起因することを確かめた。

最後に、具体的な系として、ブラウン粒子に本熱浴モデルを結合した場合を解析し、ブラウン粒子のダイナミクスに非指数減衰が生じることを確かめた。

[1] I. de Vega, D. Alonso, Rev. Mod. Phys. 89, 015001 (2017).

[2] L. Van. Hove, Phys. Rev. 89, 1189 (1953).

3 小林 和樹 (静岡大学)

単一共振器モード量子電磁力学系における Fano 効果：マルコフ埋め込みによる解析

Fano 効果とは、ある離散状態から連続状態へ直接遷移する経路と、別の離散状態を経由して同じ連続状態へ遷移する経路との干渉効果である。この干渉の結果、系の遷移率は離散状態間のエネルギー差に対して非対称な形状を示す。そして、Fano による提唱以降、電磁誘導透過 (EIT) やフォトニック結晶などで幅広い応用がなされている。

近年、共振器量子電磁力学 (cavity QED) 系において Fano 効果を取り込んだ量子マスター方程式 (QME) が提案されており、Fano レーザーの開発や、Purcell フィルタへの応用などが期待されている。一方で、得られる QME やその導出法には違いがあり、Fano 効果の記述や干渉の取り入れ方について、統一的な理解が得られていない。

そこで本研究では、単一の共振器モードと二準位系が共通の環境と結合した系に対し、Born-Markov 近似に基づいて得られた Fano 効果を取り込んだ QME を、Markov 埋め込み法により再導出した。このとき、Markov 埋め込みの一つである pseudomode 法を用いて、着目系 (原子系) に対して補助的な自由度 (共振器系) を導入し、Markov な QME へ埋め込んだ。そして、着目系と環境との相互作用の構造に由来するメモリー効果の特徴づけるスペクトル関数を明らかにした。

さらに、共振器モードおよびリザーバの自由度を対角化する Fano 対角化を用いて、Fano 効果を取り込んだ有効的なスペクトル関数を導出した。このスペクトル関数は、pseudomode 法による Fano 干渉が最も強く現れたときの結果と一致した。

本研究の結果より、単一共振器モードと原子系が結合した QED 系における Fano 効果をより統一的に扱うことができ、さらなる環境の効果が Fano 効果に及ぼす影響を解析するための基礎を与えるだろう。

4 野村 堯良 (大阪大学大学院理学研究科数学専攻)

A game-theoretic probability approach to loopholes in CHSH experiments

We study the CHSH inequality from an informational, timing-sensitive viewpoint using game-theoretic probability, which avoids assuming an underlying probability space. The locality loophole and the measurement-dependence (“freedom-of-choice”) loophole are reformulated as structural constraints in a sequential hidden-variable game between Scientists and Nature. We construct a loopholes-closed game with capital processes that test (i) convergence of empirical conditional frequencies to the CHSH correlations and (ii) the absence of systematic correlations between measurement settings and Nature’s hidden-variable assignments, and prove that Nature cannot satisfy both simultaneously: at least one capital process must diverge. This yields an operational winning strategy for Scientists and a game-theoretic probabilistic interpretation of experimentally observed CHSH violations.

arXiv:2601.09339

5 柳沢 雄太郎 ((株) 浜松クオインタム)

特殊相対論による時間の別解釈 Another interpretation of time according to special relativity

マックスウェル方程式や素粒子論がローレンツ変換により不変であること、光速は、慣性系によらず不変であることは、実験により確立された事実である。しかし、ローレンツ収縮の解釈には2つの流れが存在する。ランダウは「相対性理論入門」の中で、「ローレンツ収縮—ローレンツの考えでは、これは粒子とエーテルの相互作用によって説明され、電子はエーテルの反作用によって圧縮される—力学的効果である。アインシュタインは、、この効果は力学的なものではなく、純粹に幾何学的なもの、正確には運動学的なものである。この効果は物体が遠ざかるときにその見こむ角が小さくなるのと、、同列のものである。、、、ローレンツ収縮の場合と同じように、時間の遅れの力学的要因を探し求めることは無意味である。」と記述した。また一方、W. パウリは、「相対性理論」の中で、「ローレンツ収縮を原子論的に説明しようとする試みは全て放棄すべきであると言えようか？ この疑問に対する答えは「ノー」である。」と記述し、ロシアの物理学者 JANOSSY は、「物理的相対性理論」の中で、「ロケットに乗っている人間が外から加速される時は、神経、筋肉、心臓の脈の速さも全て遅れ、、化学過程も遅れ、、生物的過程が厳密にローレンツ不変であるという主張は、はるかに遠い外挿を含んでいる。この外挿が正しい結果となるかどうかは、将来の実験によってのみ決定されるであろう」と主張し、また、坂田昌一は JANOSSY を高く評価して、「物理学と方法」の中で、「ローレンツ不変性を「物の論理」によって保障しようとするれば、新しい意味でエーテルを復活させねばならないが、JANOSSY が主張しているごとく、ローレンツ解釈を絶対視するのは、あたかも量子力学のコペンハーゲン解釈を絶対視するのと同じくらい危険だと思う」と言明している。現在、アインシュタインの幾何学的な解釈で、世界の全ての現象を説明した場合、奇妙ではあるが矛盾は存在しない。また、この解釈はその数学的な美しさと相まって、奇妙さこそが、革新的理論であると評価されてきたのである。しかし、自然に解釈すると、納得がいかない部分が存在する。一番奇妙に思える部分は、ローレンツ変換による時間の解釈である。ある系 A (座標 x , 時間 t) に対して、系 B (座標 x' , 時間 t') が、速度 V で運動しているとする。この時、ローレンツ変換で、 $t = \gamma (t' - Vx'/c^2)$ という関係が成り立つ。この式の解釈は、系 A と系 B の原点 $x = x' = 0$ の2人が出会った時、お互いの時計が0に会っていると、別の位置にいた人の時計が、どうなっているかという式である。私がプラットフォームに入ってくる電車の先頭にいる人の時計を見たら、自分の時計と同じ0だったら、はるか後方の電車の方は、後方のプラットフォームの人とは、1億年でも異なるというのだ。ここで奇妙なのは、後方で時計を比較した2人が、お互い手をさしだして”触れる”かもしれないという点だ。その触った”時間”は、お互いの時計では異なるが、この空間的に同一近傍で、”手で接触した”時”とは何なのだろうか。ここでは、2つの慣性系での同時とは、お互い手をさしたして触れられる時を同時とすることによって、今までの時空の解釈と異なるを解釈を説明する。(この内容は、2016年 科学基礎論学会 埼玉大学での総会で発表した内容に追加したものである。埼玉大学発表の pdf は、総会サイトに2page にわたって公開されている)

6 平良 敬乃 (九州大学)

CP divisibility of Particle Bath with Dirac Dispersion Relation

An open quantum system is the study of the dynamics of a quantum system coupled to some unknown environment. Due to coupling with the environment, the system's dynamics can exhibit a memory effect, in which the history of the dynamics so far can affect the current dynamics. One way to quantify the effect of the memory is to analyze the dynamics' complete positivity (CP) divisibility. In this work, the dynamics of a two-level system coupled to a particle bath with the Dirac dispersion relation is studied. We analytically show the CP-divisibility of the quantum channel in the short- and long-time asymptotic limits and examine the connection between CP-divisibility and the environment's spectral features. Furthermore, we propose several experimental setups that serve as particle baths with Dirac dispersion relations. We give a detailed calculation for one of them, which is an optical array in the Su-Schrieffer-Heeger configuration. In this case, we show that our theoretical results can be observed experimentally with realistic parameters in an existing experimental setup.

7 原 愛貴 (電気通信大学)

Qubit 間の量子最適輸送問題におけるランダムユニタリチャンネル解の構成法

量子情報処理において、所望の量子状態間遷移を低コストかつ高精度に実現する量子操作の設計は重要な課題である。本研究では、量子最適輸送 (Quantum Optimal Transport: QOT) [1] の枠組みを用い、Qubit 系の状態間の輸送に対して物理的な実装要件を満たす量子チャンネルの新たな構成法を提案する。一般に、始状態 $\sigma \in \mathcal{S}(\mathcal{H}_1)$ から終状態 $\rho \in \mathcal{S}(\mathcal{H}_2)$ への輸送コストを最小化する QOT 問題は、そのカップリング (Choi 行列に対応) $\pi \in \mathcal{S}(\mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2)$ に対する以下の半正定値計画問題として定式化される：

$$\begin{aligned} & \underset{\pi \in \Pi(\sigma, \rho)}{\text{minimize}} && \text{Tr}[C\pi] \\ & \text{subject to} && \text{Tr}_2[\pi] = \sigma, \quad \text{Tr}_1[\pi] = \rho. \end{aligned}$$

ここで $\Pi(\sigma, \rho)$ は周辺化条件を満たすカップリングの集合、 C はコスト行列である。しかし、通常的手法で得られる最適な量子チャンネルは物理的に実装困難な CPTP 写像となる場合が多い。

そこで本研究では、Qubit 系において「ユニタリチャンネル (単位行列を保存する写像)」と「ランダムユニタリチャンネル (ユニタリチャンネルの凸結合)」が等価である性質 [2] に着目した。上記の問題にユニタリ制約 (二重確率性) を課すことで、探索空間を物理的に解釈容易なランダムユニタリチャンネルの集合に限定する。さらに、勾配法を用いた数値的な最適化により、輸送コストを最小化するユニタリ操作のアンサンブルを具体的に構成するアルゴリズムを提案する。本手法は、理論的な最適輸送解に対し、具体的なゲート操作に基づく実装デザインを与えるものである。

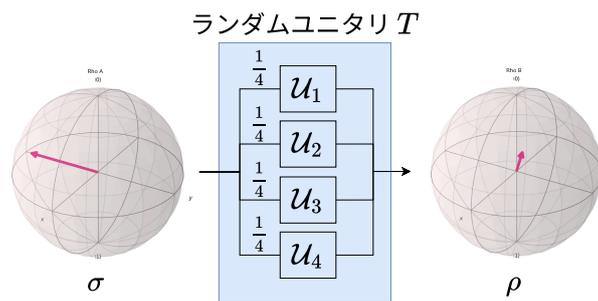


図1 本研究で構成するランダムユニタリチャンネルのイメージ図。

[1] De Palma, G., Trevisan, D. Quantum optimal transport: Quantum channels and qubits. *Optimal Transport on Quantum Structures*. pp. 203-239 (2024).

[2] Mendl, C., Wolf, M. Unital quantum channels – convex structure and revivals of Birkhoff’s theorem. *Communications in Mathematical Physics*. **289**, 1057-1086 (2009).

8 小林 弘和 (高知工科大学)

Kirkwood-Dirac 分布を用いた光子の直進性の破れの検証

本研究は、光子の伝搬における「直進性」の概念を、Kirkwood-Dirac (KD) 分布の実部を用いた二地点同時確率分布によって再検討するものである。 $z_1 < z_2 < z_3$ の三箇所の伝搬距離において、 z 軸に垂直な x 軸上で幅 L の領域 $D = \{x | -L/2 < x < L/2\}$ を通過する光子の同時確率分布 $P(z_1, z_3)$ と $P(z_2, z_3)$ を考える。古典的な粒子描像では、幾何学的直進性に基づく不等式 $P(z_1, z_3) < P(z_2, z_3)$ を満たすと期待される。これは、 z_1 と z_3 で D を通過する直進軌道は必ず z_2 でも D を通過するのに対して、 z_2 と z_3 で D を通過する直進軌道は z_1 において必ずしも D を通過する必要があるという古典的直観に対応する。しかし波動描像においては、干渉によりこの不等式が破れることが期待される。関連する先行研究 [1,2] では同時確率分布ではなく、各伝搬位置での確率分布を用いて光子の直進性を議論しており、不等式の破れは位置空間で局在した波動関数と波数空間で局在した波動関数を重ね合わせた非常に特殊な波動状態に限定されていた。

これに対し本研究では、二地点における位置射影の KD 分布の実部を波動描像における「同時確率分布」の指標として導入して直進性の破れを定量評価することで、より一般的な波動状態においても直進性の破れが現れることを示す。まず基本ガウシアンビームの自由空間伝搬に伴うビーム収束・拡大過程において、KD 分布が古典的不等式を破ることを数値解析で示す。さらにエルミート・ガウスモードの重ね合わせ状態においても、空間干渉に起因する非直進的伝搬の特徴が KD 分布に明確に現れることを数値解析により明らかにする。本研究は、光子の伝搬を粒子軌道として理解する古典的直観と、量子的干渉に基づく波動的伝搬との本質的差異を、二地点同時確率分布という観点から定量的に評価する新しい枠組みを提示するものである。KD 分布を用いた光子の直進性の概念は、量子力学における擬確率分布の物理的意味や直進性という制約下における Leggett-Garg 不等式との関連性を考える上でも重要な知見を与える。

[1] H. F. Hofmann, “Quantum interference of position and momentum: A particle propagation paradox,” *Phys. Rev. A*, **96**, 020101 (2017).

[2] T. Ono, S. Nigam, and J. G. Rarity, “Controlling and measuring a superposition of position and momentum,” *Phys. Rev. A* **108**, 012215 (2023).

9 安部七海 (大阪大学)

空間相関を持つ純粋位相緩和モデルにおける 3 体エンタングルメントの開放系ダイナミクス

開放量子系におけるエンタングルメントのダイナミクスを理解することは、堅牢な量子情報処理の実現に向けて極めて重要である。空間相関を持つ環境ノイズの影響は 2 体エンタングルメントについては広く研究されているものの [1]、真の多体エンタングルメントに対する影響は、もつれクラスのカテゴリや解析の複雑さゆえに、依然として未解明な点が多い [2]。そこで本研究では、空間相関を有する純位相緩和とノイズを伴う 3 量子ビット系のエンタングルメントダイナミクスを理論的に解析した。3 次元ボゾン環境と結合する 3 量子ビットを一辺が R の正三角形の頂点に配置し、量子ビット間距離に依存した環境の空間相関を取り込んだモデルを構築した。このモデルにおいて、注目系の時間発展は GKLS 型のマスター方程式 [3,4] で記述され、マルコフ性を判定する緩和率は、単一量子ビット由来の散逸モードと、環境相関由来の散逸モードの線型結合として表せることが示された。また初期状態を GHZ 状態とした場合において、量子ビット間距離が増大するほど、エンタングルメントの相対エントロピー (REE) の減衰が抑制される傾向が見られた。さらに緩和率が一時的に負となる非マルコフな時間領域において REE のリバイバルが生じることも明らかになった。以上の結果は、量子ビットの距離依存性がエンタングルメントの堅牢性に与える影響、および非マルコフ性と 3 体エンタングルメントの動的挙動との関係に新たな知見を与えるものである。

[1] S. McEndoo et al., EPL 101 60005 (2013).

[2] C. Radhakrishnan et al., EPL 146 38001 (2024).

[3] V. Gorini, A. Kossakowski, and E. C. G. Sudarshan, J. Math. Phys. **17**, 821 (1976).

[4] G. Lindblad, Commun. Math. Phys. **48**, 119 (1976).

10 越原 健太 (早大理工)

1 量子ビットオットーサイクルの有限時間周期動作による熱効率の向上

熱機関に量子力学的効果を活用する量子熱機関が研究されている。異なるエネルギー固有状態の量子重ね合わせが仕事を取り出しにもたらす効果が検討されている一方で [1], 多くの量子熱機関の研究では量子系を長時間熱接触させて量子重ね合わせが消失した Gibbs 状態に緩和させた後に仕事を取り出す操作を行う熱機関が議論されており, 量子重ね合わせが熱機関の性能向上に寄与するかどうかは明らかでない。本研究では, 1つの量子ビット系を介して熱を仕事に変換する 1量子ビットオットーサイクルを有限時間周期で動作させることで緩和を抑えて量子重ね合わせ状態を保持する量子熱機関を議論し, サイクル周期が無限時間周期の 1量子ビットオットーサイクルについて知られている最大熱効率を量子重ね合わせの効果で超えられることを示す。

オットーサイクルは断熱圧縮・定積加熱・断熱膨張・定積冷却を順番に繰り返す熱機関だが, 1量子ビットオットーサイクルでは 1量子ビット系のエネルギー準位幅を増大および減少させることで“断熱圧縮”および“断熱膨張”に相当するユニタリー操作を行い, エネルギー準位幅を一定に保って 1量子ビット系を高温熱源および低温熱源に接触させて“定積加熱”および“定積冷却”を行う。本研究では, この“定積加熱”および“定積冷却”過程を熱浴の温度の Gibbs 状態を保存する GKLS 型量子マスター方程式で記述し, 1量子ビット系を完全に熱平衡化させるのではなく, 有限時間だけ熱接触させる有限時間周期のサイクルを考える。先行研究では遷移レートが詳細つり合い条件を満たす典型的な量子マスター方程式が用いられているが, それは 1量子ビット系が Gibbs 状態に緩和する際に量子重ね合わせが単調に消失する“非コヒーレントな”熱接触過程を表していた [2]。本研究では, まず, 詳細つり合い型を含む“非コヒーレントな”量子マスター方程式で記述される有限時間熱接触を行う 1量子ビットオットーサイクルについて, 操作を繰り返して到達する定常サイクルでの最大熱効率が上述の無限時間周期サイクルでの最大熱効率と一致することを証明する。次に, 確率保存則 (完全正值性) を満たす一般の Gibbs 状態保存量子マスター方程式を遷移演算子の基底展開 (Kossakowski 表示) に基づいて書き下し, 熱接触開始後に 1量子ビット系に一時的に量子重ね合わせ状態が生成される量子マスター方程式を構築する。そして, そのような“コヒーレントな”有限時間熱接触を行う 1量子ビットオットーサイクルでは, 定常サイクルの熱効率が無限時間周期サイクルでの最大熱効率を上回ることを示す。

[1] A. Lenard, J. Stat. Phys. **19**, 575 (1978); etc.

[2] P. A. Camati, J. F. G. Santos, and R. M. Serra, Phys. Rev. A **99**, 062103 (2019).

11 朴 宣奎 (東京大学生産技術研究所)

Gibbs 保存条件に基づく量子チャンネル変換の公理的クラスと操作的クラスの比較

限られた量子操作のみを用いて、与えられた量子状態 ρ を異なる状態 σ に変換できるかという問題は、量子リソース理論 (Quantum Resource Theory, QRT) の枠組みで研究されている [1]。この枠組みでは、ある制約下における状態の「価値」を定量化することが課題となる。リソース理論における自由操作は大きく分けて、「無からリソースを生成しない」という数学的な要請に基づく公理的クラスと、「許された物理的プロセスのみで構成可能である」という要請に基づく操作的クラスに分類される。たとえば量子熱力学において「熱平衡状態から非平衡状態を生成できない」という数学的制約を課す Gibbs 保存 (GP) 写像は、公理的クラスの例である。両クラスのギャップを調べることは、抽象的な理論と実験環境の差を明らかにするだけでなく、双線形問題となり数値計算が困難な操作的クラスの代わりに、半正定値計画法 (SDP) 等で効率的に計算可能な公理的クラスを用いてリソース評価を行う正当性を検討する上で重要である [2]。一方で、対象を量子状態から量子チャンネルに拡張した動的リソース理論 (Dynamical Resource Theory) では、限られた「量子スーパーチャンネル」のみを用いてソースチャンネルをターゲットチャンネルに変換する状況を扱う [3]。DRT においても自由スーパーチャンネルは公理的と操作的に分類できる。任意のスーパーチャンネルは前処理・後処理・メモリ系によって分解可能であるが [4]、全体として公理的条件を満たすからといって、その前・後処理自体が自由操作のみで構成できるとは限らない。そこで本研究では量子熱力学の文脈から、全体として GP 写像を保存する「公理的クラス」と、前・後処理が GP 写像のみで構成可能な「操作的クラス」の違いを考察する。操作的クラスは公理的クラスに含まれるが、両者のチャンネル変換能力にギャップが生じるのは「ソースとターゲットが共に非 GP であり、かつ入出力間の通信能力 (signaling) を有する」場合に限られることを示す。この結果から、チャンネルでバッテリー状態を充電し、それを用いて別のチャンネルを生成するといった「中間状態を介する静的な評価手法」では、両者の変換コストの差を正しく計算できないことが導かれる [5]。さらに、この能力差の起源が、前処理が作る系とメモリとの間の相関に由来することを議論する。

[参考文献]

- [1] E. Chitambar and G. Gour, Quantum resource theories, *Rev. Mod. Phys.* **91**, 025001 (2019).
- [2] P. Faist, J. Oppenheim, and R. Renner, Gibbs-preserving maps outperform thermal operations in the quantum regime, *New J. Phys.* **17**, 043003 (2015).
- [3] G. Gour and C. M. Scandolo, Dynamical Resources, arXiv:2101.01552.
- [4] G. Gour, Comparison of Quantum Channels by Superchannels, *IEEE Trans. Inform. Theory* **65**, 5880 (2019).
- [5] Y. Luo, S. Milz, and F. C. Binder, Thermodynamic criteria for signaling in quantum channels, *Phys. Rev. Res.* **7**, 043327 (2025).

12 落合 誠 (早稲田大学)

開放量子ドット系における生存確率の分数べき乗崩壊 / Fractional power-law decay of the survival probability in an open quantum-dot system

不安定量子系は単に指数的に崩壊するだけでなく、初期状態の直後や非常に長い時間が経った後ではべき乗で崩壊することが知られている。この非指数的ダイナミクスは量子論の基礎的性質と密接に関係しており、理論と実験の両面から盛んに研究されている (例えば [1])。本研究では、技術的に作製・制御可能とされる半導体量子デバイスの一つとして、開放量子ドット系 (半導体上に量子ドットと量子細線 (導線) を作製し、それらの間を電子がトンネルできるようにした系) に着目する。特に、開放量子ドット系を単純化したモデルとして、量子ドットが導線上の 1 点と相互作用するモデルが最近提案されており、これは全体系の時間発展が厳密に解ける [2]。ところが、このモデルでは量子ドット上の電子の生存確率が指数的にしか減衰しない。これは、導線上の電子の分散関係が線形化されており、ハミルトニアンが下に有界ではなくなっていることが原因と考えられている。そこで本研究では、分散関係の線形化近似を課さずに生存確率を解析的に計算する。本研究では簡単のため量子ドットを 1 個としたモデルを考える。電子の 1 粒子状態は量子ドット上と導線上それぞれの 1 粒子状態の重ね合わせで表され、重ね合わせ係数の発展方程式は全体系の Schrödinger 方程式から導かれる。[2] では、導線上の分散関係が線形化されているおかげで、発展方程式を解く問題は 1 次元波動方程式を解く問題に帰着される。本研究では 2 次の分散関係 $E(p) = p^2/(2m)$ を課しており、[2] ほど簡単な問題には帰着できない。だが、導線上の電子の自由プロパゲーターを用いると、量子ドット上の電子の生存振幅について閉じた方程式を導くことができる。この方程式は時間に関する積分微分方程式となり、Laplace 変換を用いて解析的に解ける。その結果、生存確率は、時間領域によっては指数則だけでなくべき乗則にも従うことを示す。[1] とは違う特徴として、初期時刻の直後では時間の 2 次ではなく 3/2 次で崩壊が起こる。また、長時間領域では負べきの崩壊が生じ、そこでも分数のべき乗則 ($t^{-3/2}$) が現れる。

参考文献

- [1] A. Crespi, Francesco V. Pepe, Paolo Facchi, Fabio Sciarrino, Paolo Mataloni, Hiromichi Nakazato, Saverio Pascazio, and Roberto Osellame, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 130401 (2019).
- [2] A. Nishino and N. Hatano, *J. Phys. A: Math. Theor.* **57**, 245302, (2024).

13 浅沼 達也 (みずほ第一フィナンシャルテクノロジー)

Over-parameterization in Dynamic Parameterized Quantum Circuits: Theory and Limitations

変分量子アルゴリズム (Variational Quantum Algorithms; VQA) [1] において, Barren Plateau (不毛な台地) が存在しないこと [3,2] や, 悪い局所最小値 (spurious local minima) が存在しないことは, 量子回路の学習可能性を議論する上で重要な必要条件である. 古典ニューラルネットワークでは, 過剰パラメータ化 (over-parameterization) により悪い局所構造が消失し得ることが知られており [4,5], 同様の現象が量子ニューラルネットワークにおいても起こり得ることが示唆されている [6,7].

近年, 中間測定と測定結果に基づくフィードフォワード操作を含む Dynamic Parameterized Quantum Circuit (DPQC) が提案され, 損失勾配の分散が量子ビット数に対して指数的に減衰しない BP-free ansatz であることが報告されている [8]. 一方で, DPQC に対する過剰パラメータ化の解析は未だ十分ではない. 本研究では, DPQC による変分量子固有値ソルバーを Toric code ハミルトニアンに適用し, パラメータ数の増加に伴う (i) 最適化収束性の改善, および (ii) 量子フィッシャー情報行列 (QFIM) のランク・固有値分布などの幾何学的指標の飽和挙動を評価する.

数値計算の結果, パラメータ数が一定値を超える領域において悪い局所最小値の消失が示唆された一方で, その臨界パラメータ数近傍では QFIM のランク飽和は必ずしも確認されなかった. これは, 非ユニタリ操作により探索空間が拡大して QFIM のランクは増加し得るものの, 小さな固有値に対応する方向は最適化への寄与が小さい可能性を示唆する. 以上より, 非ユニタリ操作を含む一般の VQA においては, QFIM のランク飽和のみでは過剰パラメータ化を十分に特徴づけられない場合があり, これに代わる指標の検討が必要である.

-
- [1] M. Cerezo, A. Arrasmith, R. Babbush, S. C. Benjamin, S. Endo, K. Fujii, J. R. McClean, K. Mitarai, X. Yuan, L. Cincio, and P. J. Coles, *Nat. Rev. Phys.* **3**, 625 (2021).
- [2] M. Ragone, B. N. Bakalov, F. Sauvage, A. F. Kemper, C. Ortiz Marrero, M. Larocca, and M. Cerezo, *Nat. Commun.* **15**, 7172 (2024).
- [3] J. R. McClean, S. Boixo, V. N. Smelyanskiy, R. Babbush, and H. Neven, *Nat. Commun.* **9**, 4812 (2018).
- [4] D. Soudry and Y. Carmon, “No bad local minima: Data independent training error guarantees for multilayer neural networks,” arXiv:1605.08361 [stat.ML] (2016).
- [5] Q. Nguyen, M. C. Mukkamala, and M. Hein, “On the loss landscape of a class of deep neural networks with no bad local valleys,” arXiv:1809.10749 [cs.LG] (2018).
- [6] M. Larocca, N. Ju, D. García-Martín, P. J. Coles, and M. Cerezo, *Nat. Comput. Sci.* **3**, 542 (2023).
- [7] D. García-Martín, M. Larocca, and M. Cerezo, *Phys. Rev. Research* **6**, 013295 (2024).
- [8] A. Deshpande, M. Hinsche, S. Najafi, K. Sharma, R. Sweke, and C. Zoufal, arXiv:2411.05760 [quant-ph] (2024).

14 中出 捷 (情報通信研究機構)

一次元量子系のブラウン運動に現れる一方向輸送とその熱力学的整合性/ Unidirectional Transport in One-Dimensional Quantum Brownian Motion and Its Thermodynamic Consistency

古典的な確率過程に基づくブラウン運動では、熱で揺らぐ粒子に一方向性を与えるためには、非対称なポテンシャルや外部操作が不可欠であり、発熱やエントロピー生成といった熱力学的コストを避けることはできない。これは熱力学第二法則からの帰結として広く受け入れられている。しかし、これらの制約は量子系においても成り立つのだろうか。

本発表では、熱浴としてのフォノンと弱結合した一次元量子系における励起子のブラウン運動を考察し、対称な系かつ外力不在の条件下でも一方向輸送が実現しうることを示す。さらに、この一方向輸送を利用することで、励起子の波束が時間発展の過程で収縮しうることを示す。波束幅は位置の不確かさに対応するため、その減少はエントロピー減少を意味し、一見すると熱力学第二法則と矛盾するように見える。

この一見した矛盾を明確にするため、本研究では、スクイーズされたガウス波束を初期状態として用い、エントロピー変化を微視的な運動論的方程式の視点から解析した。その結果、一次元量子系では、初期状態で生成された座標と運動量の相関が、運動量緩和後も完全には失われず、ある種の情報として保存されることが分かった。この部分的に保存された情報は、相対エントロピーとして定量化され、これを用いて座標に関するエントロピーが減少しうる。一方で、相対エントロピーの変化を含めた全系のエントロピーは常に増大しており、第二法則は常に満たされる。

このような構造は、一次元系という運動の自由度が強く制限された空間において、励起子とフォノンの散乱過程で量子性が顕著に現れ、励起子の運動量緩和が起こる運動量空間が、互いに素な無数の部分空間へと分離されることに起因する。この部分空間への分離は温度に依存せずに生じるため、フォノンの量子性に由来する上述の一方向輸送現象は、比較的高温の領域においても起こり得る。

本発表の内容は下記の出版済論文を基に再整理したものである。

<https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/fskm-y179>

15 中塚 海渡 (大阪大学)

Bell 定理の再解釈 —自由意志を伴う局所実在論は本当に否定されたのか

Bell 定理は、量子力学の基礎論において最も重要な結果の一つである。標準的な理解によれば、Bell 不等式を破る相関は、局所実在論では説明できないとされる [1,2]。しかし、Bell 不等式の導出には、隠れた変数（実在論の拡張）を仮定したうえで、Bell-局所性（分離可能性）だけでなく、隠れた変数と測定設定の独立性（測定独立性）が本質的に用いられる。測定独立性はしばしば「自由意志の存在」すなわち測定の自由選択性によって正当化されるが、相関と因果は同一ではないため、その正当化は自明ではない。

そこで本研究では、測定選択が隠れた変数に局所的な影響を与える測定モデルを考えることにより、自由選択性を許容した局所実在論の枠内でも Bell 不等式を破り得ることを示す。特に、最も簡単な Bell-CHSH 設定（2 体 2 種類 2 値）において、CHSH 値が最大 4 に達する相関を、No-Signaling 多面体 [3] を用いて特徴付ける [4]。

[1] J. S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, 1987).

[2] M. Wayne, M. Genovese, and A. Shimony, "Bell' s Theorem", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2024 Edition), E. N. Zalta and U. Nodelman (eds.)

[3] J. Barrett, N. Linden, S. Massar, S. Pironio, S. Popescu and D. Roberts, Nonlocal correlations as an information theoretic resource. *Phys. Rev. A* **71**, 022101 (2005).

[4] G. Kimura, A. Mayumi and K. Nakatsuka (in preparation).

16 小柳 翔輝 (京都大学)

U(1) ゲージ場下における量子階層 Fokker-Planck 方程式と Aharonov-Bohm リングへの応用

階層型運動方程式は、量子開放系における系-熱浴模型において、非 Markov 過程や系-熱浴間のエンタングルメントを含めたダイナミクスを正確に取り扱うことのできる方法論であり、多次元分光法、エネルギーや電子の輸送問題、量子熱力学等に応用されてきた。しかし、量子ホール効果や Aharonov - Bohm リングといった電磁場と環境の効果の両方がダイナミクスに寄与する系があるにも関わらず、階層型運動方程式の電磁場中への拡張はなされていなかった。電磁場中にある量子系は、電磁場のゲージ変換に関して U(1) 対称性を持つため、量子開放系の方程式においてもその性質は保たれていなければならない。したがって、本研究においては、階層型運動方程式を U(1) ゲージ対称性を満たす形で電磁場中の系のダイナミクスを記述する方程式に拡張した [1]。また、古典極限との比較を行うため、Wigner 変換を行い、階層型運動方程式の位相空間上での表示である量子階層 Fokker - Planck 方程式を導出した。

この U(1) ゲージ対称性を満たす階層型運動方程式を、金属リング内を磁束が貫いている Aharonov - Bohm リングの系に適用した。本研究では、簡単のためにリング内の電子間相互作用を考えない 1 粒子近似を行い、線形応答スペクトル、永久電流の計算を行った。線形応答スペクトルに関しては、金属リング内に磁場を印加することにより、ピークが分裂することを確認した。また、永久電流の計算結果からは、永久電流が現れる温度領域においては、低温由来の非 Markov 効果を含めた補正が必要になることが示された [1]。

さらに、環境が異方性を持っている場合について、量子・古典の両方についてリング内の粒子の分布に関する計算を行い、量子系の場合にのみリング内の粒子の分布が不均一になることを示した [2]。

○参考文献

- [1] H. Yang, S. Koyanagi, and Y. Tanimura, J. Chem. Phys. **163**, 144107 (2025)
- [2] S. Koyanagi, H. Yang, and Y. Tanimura, J. Chem. Phys. **163**, 222502 (2025)

17 地主 拓未 (高知工科大学大学院)

二光子対の非局所位相特異点と空間モード保存/Non-local phase singularity and spatial mode conservation of biphotons

量子光学において、自発的パラメトリック下方変換 (SPDC) は量子もつれを生成する代表的な手法である。とくに、光波の軌道角運動量 (OAM) を与える方位角モード l や $p+1$ 重振幅リング構造を与える動径モード p を含むラゲールガウス (LG) ビームをポンプ光として用いることで、豊かな空間モードもつれを実現できる。ただし、SPDC 過程において OAM は保存するが、動径モードは保存しない。また、固有モード $N = 2p + |l|$ 依存の LG ビームが伝搬に伴い経験する Gouy 位相は、光子の検出位置を伝搬方向にシフトさせる際の位相制御において極めて重要な役割を果たす [1]。特筆すべきこととして、ポンプ光を高次動径モードとした SPDC 光子対を独立に伝搬させて光軸上で光子を観測する際の二次元伝搬空間の位相分布を観測すると、古典光学では現れない「非局所的な位相特異点」構造が発生することを発見した。この特異点構造は、動径モードのリング状ゼロ点を二次元状の自由空間伝搬によって変形させることで、与えることができる。本発表では、Gouy 位相において重要な N モードの保存手法を提案するとともに、二光子の独立伝搬が誘起する位相特異点と l, N モードの保存との関係について報告する。

[1] S. Feng and H. G. Winful, Opt. Lett. **26**, 485–487 (2001)

18 小川 直哉 (東京女子大学)

量子測定が誘導する演算子としての時間：李・筒井形式とガウス波束 POVM によるアプローチ

量子力学において、時間は通常「外部パラメータ」として扱われ、Pauli の定理により自己共役演算子としては定式化しにくい。位置や運動量と比べて理論的に微妙な対象である。そのような中で、Aharonov と Bohm が粒子の到着時刻を表す対称作用素を提案していることは注目される。近年、李と筒井は不確定性関係を普遍的に取り扱うことを試みた定式化を提案している。その定式化をわれわれは李・筒井形式と呼ぶ。李・筒井形式には量子測定により誘導される、「随伴」または「引き戻し」と呼ばれる写像がある。引き戻しは測定結果の古典論的な実関数を量子論的な演算子へ写す。また、ガウス波束基底による POVM は、有限な空間分解能を持つ現実的な測定モデルを与える。本講演では、まず李・筒井形式をガウス波束基底で与えられる初期純粋状態と POVM 測定に適用することにより、位置と運動量について得たわれわれの過去の結果を紹介する。ここでは、李・筒井の不等式は自明な下限しか与えないが、李の不等式は従来の不確定性原理と同じ下限を与え、等号を常に達成することを見る。その後、時間を「測定で得られる古典的な確率変数」と捉え直し、これを引き戻しにより量子側へ写すことで、時間（検出時刻）を演算子として構成するわれわれの新しい結果を紹介する。具体的には、自由粒子の検出時刻の POVM について、李・筒井形式における測定写像とそれが誘導する引き戻しを考えることにより、検出時刻を表す実関数を演算子化する。(i) 点検出器モデル、(ii) ガウス検出器モデルの検出時刻 POVM について引き戻し時間演算子 T と検出事象に対応する指示関数の引き戻し演算子 I を構成し、これらの演算子の性質について議論する。特に、ガウス検出器モデルについての T が自由ハミルトニアン H_{free} と正準交換関係と似た交換関係 $[T, H_{\text{free}}] = -iI$ をみたすことを見る。

19 苑田 侃汰 (名古屋大学多元数理科学研究所)

Hypothesis testing and Stein's lemma in general probability theories with Euclidean Jordan algebra and its quantum realization

量子仮説検定における Stein の補題は、未知状態を仮説としたときの誤り推定確率の漸近指数を未知状態の相対エントロピーが与えるという、量子情報理論の基本結果である [1]. 本研究は、量子論を一般化した枠組みである一般確率論 (general probabilistic theories; GPTs) において、Stein 型の漸近理論を確立することを目的とする. GPTs とは、量子論の操作論的な枠組みである状態や測定といった概念のみを残した枠組みである. そのために、GPTs の中でも行列積構造を仮定しない. ここで、より弱い代数構造である Jordan 積を備える重要なサブクラス、Euclidean Jordan algebras (EJAs) に注目する. EJAs ではスペクトル分解が成立し、エントロピーが自然に定義できるため、情報理論を展開する舞台として扱いやすい.

しかし EJAs では、合成系の構成が一般に一意でなく [2], その結果として (i) エントロピーの加法性, (ii) 完全正值性 (CP 性) の定義・判定が合成系の取り方に依存するという根本的な困難が生じる. そこで本研究では、特定の量子論への埋め込みに依存しない一般的な合成系の定式化を採用した. この枠組みの下でエントロピーの加法性を示し、部分トレースが CP であることを証明する.

以上を基盤として、EJAs のクラスでは合成系の構成に依存せず Stein の補題が成立することを示す. このことは一つの帰結として、仮説検定の定式化と Stein の補題の成立には量子論に特有の行列積構造は不要であり、Jordan 積に基づく代数構造、およびそれが与えるスペクトル性だけで十分である、という側面を与える.

[1] M. Hayashi. Quantum Information Theory: Mathematical Foundation. Graduate Texts in Physics. Springer, 2017.

[2] M. Wilce H. Barnum. Composites and categories of euclidean jordan algebras. Quantum, 4, 2016.

20 大平 徹 (Toru Ohira) (Graduate School of Mathematics Nagoya University)

「量子らしさ」の簡明な数理探求

二重スリット実験や量子トンネル共鳴のような、量子世界の不思議さを示す事例はいくつも知られている。理論においてもベルの不等式が量子と古典の境界を照らしていることは周知の通りである。ここでは2粒子-2準位系(2x2系)の数理的側面で最も簡明に「量子らしさ」を示す事例の探求の結果を2件提示する。

1つめの事例は下記にまとめられる [1]。

古典2 x 2系の確率変数 X, Y においては確率的に独立で有る $P(X:Y) = P(X)P(Y)$ ことと相関ゼロ $E[X, Y] = E[X]E[Y]$ となることが(例外的に)同値であるが、量子純粋2 x 2系においてどのようにエンタングルした状態でも $E[X, Y] = E[X]E[Y]$ となり得る演算子 X, Y が存在する。

一般には古典確率では相関ゼロでも確率的独立とは言えないことがよく知られているが、2 x 2系に限っては相関ゼロなら確率的に独立である。しかし純粋量子系では相関ゼロでもエンタングルメントがないとは言えない。この結果は、ゼロ相関観測だけでエンタングルメントの存在を確認するための最低観測回数 [2,3] や、より一般の純粋系のシュミットランクを同定する手法の開発に展開されている [4]。

2つめの事例は、2 x 2混合量子状態を記述する Werner 密度行列に関するものである [5]。この行列は古典独立な系とエンタングルした量子シングレット系の線形和ととらえることができる。この和の度合いを調整するパラメーターがある閾値を超えて量子側により重きをおくと全体がエンタングルした混合状態になることが知られている。ここであえて古典的な系の部分に相関を導入すると、逆にこの閾値が増大し、より多くの量子系の配分が全体のエンタングルメントのために必要となる。つまり、古典的な相関の導入が量子的なエンタングルメントを弱めるという逆説的な現象が現れ、実験的な検証にもかかると期待される。

-
- [1] T. Ohira, On Statistical Independence and No-correlation for a Pair of Random Variables Taking Two Values: Classical and Quantum, Prog. Theor. Phys., 2018-8, 083A02 (2018).
[2] T. Ohira, Zero-Correlation Entanglement, Prog. Theor. Phys., 2020-1, 013A01 (2020). [3] T. Ohira, Binary Correlation Measurements, ArXiv:2007.10605 (2020).
[4] A. Tanasescu, A. Balan, P. G. Popescu, Zero-Correlation Entanglement vs. Schmidt Rank, European Physical Journal Plus, 136, 476 (2021).
[5] T. Ohira, Separation out of Entanglement, (Presented at Foundations of Physics 2025, Gdansk, Poland) ArXiv: 2409.18495 (2024).

21 廣谷 知也 (九州大学)

Oppenheim による相対論的半古典重力模型で予言される 測地線偏差の量子揺らぎ

自然界の四つの基本相互作用のうち、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用は量子場理論として統一的に記述され、実験的にも高精度で検証されている。一方、重力は一般相対論によって古典的に記述されており、いまだ量子論と整合的に統合されていない。この点において、重力と量子論の統合は現代物理学における最重要課題の一つである。重力を量子的に記述する理論の構築とその実験的検証は近年急速に進展している。一方で、重力を古典的に扱いながら量子系との相互作用を導入する半古典重力模型の予測を精密実験によって検証し、その整合性や破れを通じて重力の量子性を間接的に評価するというアプローチもある。半古典重力理論の代表例として、非相対論的な Schrödinger – Newton 模型および Diósi – Penrose 模型、ならびに相対論的な半古典 Einstein 方程式が知られている。しかし、これらの模型はいずれも理論的な課題を抱えており、近年の実験的制約によっても否定的な評価が強まりつつあることが指摘されている。そして近年、重力を相対論的古典場として扱いながら量子系との相互作用を首尾一貫して記述する半古典重力模型として、Oppenheim et al. による新しいモデルが提案され注目を集めている [1-3]。しかしながら、その性質についてはいまだ十分な理解が得られていない。本研究では、この Oppenheim 模型の相対論的側面に着目し、量子的粒子間の測地線偏差が古典重力場中で受けるゆらぎに焦点を当て、ゆらぎのスペクトルを解析的に求める。その結果、Oppenheim のオリジナル模型は、現行の重力波干渉計の観測データを用いることで棄却され得る可能性があることが示唆される。さらに、Oppenheim 模型において仮定されている重力場のゆらぎの起源が明確でない点に着目し、その物理的起源を説明するため、量子重力場が環境量子場と相互作用することによって有効的な揺らぎが生じるとする、環境誘起型モデルを新たに構築する。このモデルに対しても同様にスペクトル解析を行い、Oppenheim 模型との比較を行う。最後に、本研究で扱った複数の模型の振る舞いと相違点について議論する。

[1] J. Oppenheim. A postquantum theory of classical gravity? *Phys. Rev. X*, 13:041040, Dec 2023.

[2] J. Oppenheim and Z. Weller-Davies. Covariant path integrals for quantum fields back-reacting on classical space-time, 2025.

[3] A. Grudka, T. R. Morris, J. Oppenheim, A. Russo, and M. Sajjad. Renormalisation of postquantum-classical gravity, 2024.

22 上永 裕大 (九州大学)

時間依存結合を有する開放量子系の非摂動的解析

開放量子系の理論における重要な性質として、注目する量子系 (注目系) と環境の過去の相互作用の影響が後の時間発展に影響を及ぼすメモリー効果が知られている。メモリー効果がなく、量子系の時間発展が過去の状態に依存しない場合、その時間発展は「マルコフ的」と呼ばれる。このとき、注目系の情報は環境へ一方向に流れるのみである。一方、「非マルコフ的」ダイナミクスでは、環境が過去の相互作用の履歴を保持し、環境から注目系への情報の逆流が生じうる [1]。

こうしたメモリー効果は、注目系が従う運動方程式のなかにメモリーカーネ $\Sigma(t, t')$ の時間畳み込み積分として現れる。特に、メモリー効果が非定常である場合の解析は非常に難しいことが知られている。そのような状況の例としては、注目系と環境の結合が時間依存する場合が考えられる。

本講演では [3] の結果に基づき、注目系と環境の結合が時間依存する場合に、結合を時間に対して離散化させ、注目系が従う運動方程式を非摂動的に解く手法や、過去の相互作用由来のメモリー効果の振る舞いを可視化する方法を提案する。具体例として、注目系が 2 準位量子系であり、環境がボソン場の Jaynes-Cummings モデルを扱う。また、本手法で可視化されたメモリー効果がマルコフ的か非マルコフ的かを RHP(Rivas, Huelga and Plenio)measure[2] を用いて評価する。

参考文献 [1] de Vega, Inés and Alonso, Daniel, “Dynamics of non-Markovian open quantum systems,” *Rev. Mod. Phys.* **89**, 015001 (2017)

[2] Ángel Rivas and Susana F. Huelga, Martin B. Plenio, “Entanglement and Non-Markovianity of Quantum Evolutions,” *Phys. Rev. Lett.* **105**, 050403 (2010)

[3] Yuta Uenaga, Kensuke Gallock-Yoshimura and Takano Taira, “Exact treatment of the memory kernel under time-dependent system-environment coupling via a train of delta distributions,” *Phys. Rev. A.* **113**, 012224 (2026)

講演に関する論文: Yuta Uenaga, Kensuke Gallock-Yoshimura and Takano Taira, “Exact treatment of the memory kernel under time-dependent system-environment coupling via a train of delta distributions,” *Phys. Rev. A* **113**, 012224