

Quantum Foundations 2025

会場/Venue

東京大学柏キャンパス生研大会議室とオンライン

The University of Tokyo (Kashiwa Campus), Large conference room and online

日にち/Date

2025年3月10日から2025年3月11日

From March 10, 2025 to March 11, 2025

主催研究室/Sponsoring Laboratories

東京大学 羽田野研究室/The university of Tokyo Hatano laboratory

芝浦工業大学 量子情報システム研究室/SIT Quantum Information System laboratory

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

荒井駿（理研）/ Hayato Arai (RIKEN)

飯沼昌隆（広島大）/ Masataka Inuma (Hiroshima Univ.)

木村元（芝浦工大）/ Gen Kimura (SIT)

倉持結（電通大）/ Yui Kuramochi(UEC)

高倉龍（大阪大）/ Ryo Takakura (Osaka Univ.)

谷村省吾（名大）/ Shogo Tanimura (Nagoya Univ.)

筒井泉（KEK, 日本大学）/ Izumi Tsutsui (KEK, Nihon Univ.)

羽田野直道（東大）/ Naomichi Hatano (Univ. of Tokyo)

細谷暁夫（東京科学大）/ Akio Hosoya (Science Tokyo)

皆川慎太郎（名大）/ Shintaro Minagawa (Nagoya Univ.)

李宰河（東大）/ Jaeha Lee (Univ. of Tokyo)

Last Update: 2025年3月15日

目次

メッセージ/Message	3
プログラム一覧/Program at a glance	4
招待講演/Invited talks	7
羽田野 直道 (東京大学生産技術研究所)	7
開放量子系の非エルミート性と非マルコフ性	7
谷村 省吾 (名古屋大学)	8
量子力学の未解決問題：なぜマクロ古典力学系があるのか？	8
チュートリアル講演/Tutorial	9
高木 隆司 (東京大学)	9
量子リソース理論	9
口頭発表/Oral presentations	10
荒井駿 (理研)	10
事後選択と POVM を用いた一般確率論における Non-Positive Operator Valued Measurement の実装	10
秋笛 清石 (NTT)	11
Computing entanglement costs of non-local operations on the basis of algebraic geometry	11
森崇人 (京大基研・Perimeter Institute)	12
Haar ランダム状態とホログラフィーにおける 量子もつれと量子相関 / Entanglement and quantum correlations in random states and holography	12
Michele Dall'Arno (Toyohashi University of Technology)	13
SIC POVMs in Quantum Interpretations	13
Dariusz Chruściński (Nicolaus Copernicus University)	14
Universal bound on the relaxation rates for quantum Markovian dynamics	14
平良 敬乃 (九州大学)	15
ディラック粒子浴と結合した 2 準位系の短時間・長時間挙動 / Short- and long-time dynamics of a qubit coupled to a Dirac particle bath	15
梅川 舜 (東京大学 理学部物理学科)	16
Leggett-Garg 不等式の擬確率/量子化双対構造による解析	16
野神 亮介 (名古屋大学情報学研究科)	17
Bell-CHSH 設定における量子的相関の許容領域の完全な特徴付け	17
皆川 慎太郎 (名古屋大学情報学研究科)	18
堅牢な触媒とリソース放送: その可能性と不可能性	18
中嶋 慧 (筑波大学)	19
量子測定と量子操作に対する普遍的な速度-精度トレードオフ	19
木本 泰平 (京都大学大学院工学研究科)	20
Fine-Grained Uncertainty Relations for Quantum Testers	20
山下 晴輝 (芝浦工業大学)	21

量子状態の固有値に基づく不確定性関係の厳密な一般化	21
ポスター発表/Poster presentations	22
1 Michele Dall'Arno (Toyohashi University of Technology)	22
The classical symulation cost of general probabilistic theories	22
2 黄海 仲星 (大阪大学)	23
TE-PAI: Exact Time Evolution by Sampling Random Circuits	23
3 廣谷 知也 (九州大学大学院理学府物理学専攻量子宇宙物理理論研究室)	24
qutrit を用いた相対論的量子オート熱機関	24
4 上永 裕大 (九州大学)	25
有限時間相互作用における量子ランジュバン方程式	25
5 法橋 顕広 (東京大学)	26
時間反転対称性と Wigner-Araki-Yanase 定理	26
6 山本 有理子 (京都大学)	27
量子三角識別距離と量子相関限界への応用	27
7 中塚 海渡 (大阪大学)	28
統計的因果推論と量子相関の関係性について	28
8 柴田 礼 (芝浦工業大学 量子情報システム研究室)	29
No-Signaling 条件を考慮した緩和ベル不等式について	29
9 宮崎 慈生 (東京大学 大学院理学系研究科)	30
量子状態のイマジナリティの推定	30
10 鈴木 泰雅 (東京科学大学理学院物理学系)	31
可逆な測定過程を利用した量子状態推定と量子通信への応用	31
11 好村 清貴 (芝浦工業大学)	32
量子ビット系と一般確率論における同時測定不可能性の判定・Detection of measurement incompatibility in Qubit and General Probabilistic Theories	32
12 高倉 龍 (大阪大学 量子情報・量子生命研究センター)	33
Multi-object operational tasks for measurement incompatibility	33
13 岩越 丈尚 (Department of Mechanical Engineering, Hosei Univ.)	34
Restoring Security by Fresh Key Distribution in Y00/QNRC Quantum Cryptography	34
14 森川 雅博 (理研)	35
赤外発散と 1/f 揺らぎ Infrared Divergence and 1/f Fluctuations	35
15 山下 秀康 (愛知学院大学)	36
そもそも量子確率とは何か：Bayes 的観点から考え直す	36
16 Kenzo Ishikawa (北海道大学)	37
ポテンシャル下の連続状態の非直交性/Non-orthogonality of continuum states in potential problem	37
17 越原 健太 (早大理工)	38
有限時間周期の量子定常サイクルにおける受動性	38
18 王シン (東京大学生産技術研究所)	39
Characteristic oscillations in frequency-resolved heat dissipation of linear time-delayed Langevin systems	39
19 山岸愛 (東京大学生産技術研究所)	40
近藤量子ウォークの提案：磁性不純物と相互作用する量子ウォーカー	40
19 Jingyi Gao (東京大学生産技術研究所)	41
Three-level Quantum Absorption Refrigerator at Liouvillian Exceptional Points	41
19 金川隼人 (東京大学生産技術研究所)	42
開放量子系における内的要因による量子反ゼノ効果	42

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。研究会「Quantum Foundations (略して QF)」は、そうしたニーズを満たすために 2024 年設立されました。

2024 年 3 月 11,12 日に行われた第一回目の QF24 は、18 名の口頭発表 (ポスター 12 名)、参加者 80 名+オンライン参加者 100 名を超える参加者に恵まれ、量子基礎論への高い関心を改めて確認する機会となりました。これを受け、2025 年 3 月 10,11 日に第二回目となる QF25 を開催いたします。」 [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. This workshop was established to meet such needs.

The first edition of QF24, held on March 11-12, 2024, featured 18 oral presentations and 12 poster presentations. It attracted over 80 in-person participants and more than 100 online attendees, reaffirming the high level of interest in quantum foundations. Building on this success, we are pleased to announce that the second edition, QF25, will take place in March 10-11, 2025. ” [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: 2025 年 2 月 11 日) より抜粋

[2] Excerpted from the website of Quantum Foundations 2024 https://qsys.se.shibaura-it.ac.jp/kimura/QFound/index_e.html (access: February 11, 2025)

プログラム一覧/Program at a glance

3月10日/March 10

2025/3/10	プログラム	講演者(敬称略)	タイトル	座長(敬称略)
9:30 - 9:50	開会		挨拶+諸注意(李)	
9:50 - 10:20	一般講演①	荒井 駿	事後選択とPOVMを用いた一般確率論におけるNon-Positive Operator Valued Measurementの実装	木村
10:20 - 10:45	休憩			
10:45 - 11:15	一般講演②	秋笛 清石	Computing entanglement costs of non-local operations on the basis of algebraic geometry	飯沼
11:15 - 11:45	一般講演③	森 崇人	Haarランダム状態と量子重力におけるエンタングルメントと量子相関 / Entanglement and quantum correlations in Haar random states and quantum	
11:45 - 13:15	お昼休み			
13:15 - 14:15	招待講演①	羽田野 直道	開放量子系の非エルミート性と非マルコフ性	平良
14:15 - 14:40	休憩			
14:40 - 15:10	Contributed Talk④	Michele Dall'Arno	SIC POVMs in Quantum Interpretations	高倉
15:10 - 15:40	Contributed Talk⑤	Dariusz Chruściński	Universal bound on the relaxation rates for quantum Markovian dynamics	
15:40 - 16:00	休憩(ポスター準備)			
16:00 - 17:50	ポスター			
18:00 - 19:30	懇親会			

ポスター

番号	氏名	タイトル
1	Michele Dall'Arno	The classical symulation cost of general probabilistic theories
2	黄海 仲星	TE-PAI: Exact Time Evolution by Sampling Random Circuits
3	廣谷 知也	qutritを用いた相対論的量子オート熱機関
4	上永 裕大	有限時間相互作用における量子ランジュバン方程式
5	法橋 顕広	時間反転対称性とWigner-Araki-Yanase定理
6	山本 有理子	量子三角識別距離と量子相関限界への応用
7	中塚 海渡	統計的因果推論と量子相関の関係性について
8	柴田 礼	No-Signaling条件を考慮した緩和ベル不等式について
9	宮崎 慈生	量子状態のイマジナリティの推定
10	鈴木 泰雅	可逆な測定過程を利用した量子状態推定と量子通信への応用
11	好村 清貴	量子ビット系と一般確率論における同時測定不可能性の判定・ Detection of measurement incompatibility in Qubit and General Probabilistic Theories
12	高倉 龍	Multi-object operational tasks for measurement incompatibility
13	岩越 丈尚	Restoring Security by Fresh Key Distribution in Y00/QNRC Quantum Cryptography
14	森川 雅博	赤外発散と1/f揺らぎ Infrared Divergence and 1/f Fluctuations
15	山下 秀康	そもそも量子確率とは何か：Bayes的観点から考え直す
16	Kenzo Ishikawa	ポテンシャル下の連続状態の非直交性 /Non-orthogonality of continuum states in potential problem
17	越原 健太	有限時間周期の量子定常サイクルにおける受動性
18	王シン	Characteristic oscillations in frequency-resolved heat dissipation of linear time-delayed Langevin systems
19	山岸 愛	近藤量子ウォークの提案：磁性不純物と相互作用する量子ウォーカー
20	Jingyi Gao	Three-level Quantum Absorption Refrigerator at Liouvillian Exceptional Points
21	金川 隼人	開放量子系における内的要因による量子反ゼノ効果

3月11日/March 11

2025/3/11	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	谷村 省吾	量子力学の未解決問題：なぜマクロ古典力学系があるのか？	筒井
10:00 - 10:30	一般講演⑥	平良 敬乃	ディラック粒子浴と結合した2準位系の短時間・長時間挙動 / Short- and long-time dynamics of a qubit coupled to a Dirac particle bath	
10:30 - 10:55	休憩			
10:55 - 11:25	一般講演⑦	梅川 舜	Leggett-Garg不等式の擬確率/量子化双対構造による解析	荒井
11:25 - 11:55	一般講演⑧	野神 亮介	Bell-CHSH設定における量子的相関の許容領域の完全な特徴付け	
11:55 - 13:25	お昼休み			
13:25 - 14:25	チュートリアル講演	高木 隆司	量子リソース理論	皆川
14:25 - 14:50	休憩			
14:50 - 15:20	一般講演⑨	皆川 慎太郎	堅牢な触媒とリソース放送: その可能性と不可能性	倉持
15:20 - 15:50	一般講演⑩	中嶋 慧	量子測定と量子操作に対する普遍的な速度-精度トレードオフ	
15:50 - 16:15	休憩			
16:15 - 16:45	一般講演⑪	木本 泰平	Fine-Grained Uncertainty Relations for Quantum Testers	李
16:45 - 17:15	一般講演⑫	山下 晴輝	量子状態の固有値に基づく不確定性関係の厳密な一般化	
17:15	閉会		研究会アナウンス(高倉)+挨拶(細谷)	

招待講演/Invited talks

羽田野 直道 (東京大学生産技術研究所)

開放量子系の非エルミート性と非マルコフ性

開放量子系とは、典型的には無限に大きい単純な量子系（環境系と呼ぶ）に囲まれた、小さく複雑な量子系（注目系と呼ぶ）のことです。全体がエルミート系であっても、その部分系である注目系は環境系と粒子やエネルギーをやりとりするため、有効ハミルトニアンが一般に非エルミートのになります。また、そのダイナミクスでは環境系がメモリーバッファの役目を果たすため、一般に非マルコフ的になります。本講演では最も簡単な一粒子系のシュレディンガー方程式の範囲で、開放量子系の非エルミート性と非マルコフ性を厳密に議論します。

羽田野直道・井村健一郎「非エルミート・量子力学」(講談社サイエンティフィック, 2023)

羽田野直道「量子力学における「時間の矢」」日本物理学会誌, 72, 408 (2017)

N. Hatano and G. Ordonez, J. Math. Phys. 55, 122106 (2014)

G. Ordonez and N. Hatano, J. Phys. A: Math. Theor., 50, 405304 (2017)

谷村 省吾 (名古屋大学)

量子力学の未解決問題：なぜマクロ古典力学系があるのか？

我々の世界の基本構成要素が原子や電子などのマイクロ系であり、それらが量子力学もしくは相対論的場の量子論で記述される物理法則に従っていることは疑う余地がない。一方で、人間の身体スケールで顕在化する現象は正確に古典力学の法則に従っているように見える。量子力学と古典力学がそれぞれ支持する物理的世界像は大きく異なっており、それらの「相容れなさ」がしばしば論争の種になったり検証実験の動機になったりしている。実験で量子力学の正しさが確認されても、では、量子力学が基本法則であるなら、なぜ我々が目にする物体は量子力学とは異質な古典力学の法則に従うのか？ という疑問が残る。量子力学 100 周年にあたり、「量子力学は不思議だ」という論点から「古典力学系というものがあることが不思議だ」という論点に移行してもよいのではないか。そういう議論を試みたい。

チュートリアル講演/Tutorial lecture

高木 隆司 (東京大学)

量子リソース理論

量子情報理論の重要なゴールの一つは、量子情報処理の性能とその背後にある貴重な量子的特徴量との関係を定量的に明らかにすることである。本チュートリアルでは、この問いに有用なアプローチを与える枠組みである量子リソース理論の基礎を解説する。情報理論の視点やツールがどの様に量子リソースの定量化や変換性の特徴づけを可能にするかを、代表的なリソース理論であるエンタングルメント理論を例に用いながら紹介する。またそのアイデアの拡張として、異なるリソース量を操作的な視点から統一的に特徴づける一般リソース理論の結果を紹介する。

口頭発表 / Oral presentations

荒井駿 (理研)

事後選択と POVM を用いた一般確率論における Non-Positive Operator Valued Measurement の実装

物理的に実装可能な量子測定のクラスを明らかにすることは基礎的にも応用的にも重要な問題である。POVM (正値演算子値測度) 測定は間接測定によって実装可能であり、ヒルベルト空間の数学的構造によって決まる最大のクラスである。しかし、ヒルベルト空間の構造ではなく、確率論的整合性を第一原理として仮定すれば、一般確率論の枠組みとして、非正値演算子値測度 (N-POVM) 測定を扱うことができる。N-POVM 測定は量子論では記述できないため、物理的に実装可能であるとは考えられていなかった。本論文では、量子論において対象となる状態の定義域を限定した場合に、POVM 測定と事後選択によって N-POVM 測定を実装する構成的な方法を与える。また逆に、事後選択された POVM 測定は、限定された定義域では N-POVM 測定とみなされることを示す。これらの結果は、一般確率論における N-POVM 測定と事後選択との間に新しい関係を与え、一般確率論の物理的意味に新たな視点を与える。

本発表の内容は arXiv:2411.01873 に基づく。

秋笛 清石 (NTT)

Computing entanglement costs of non-local operations on the basis of algebraic geometry

In order to quantify entanglement and realize distributed quantum computations, it is crucial to minimize the entanglement consumption of implementing non-local operations by using local operations and classical communications (LOCC) channels. Although this optimization is generally NP-hard even if we relax the condition of LOCC channels to separable ones, many methodologies have been developed. However, each has only succeeded in determining the entanglement cost for specific cases.

As a main mathematical result, we introduce a concept based on algebraic geometry to simplify the algebraic constraints in the optimization. This concept makes it possible to generalize previous studies in a unified way. Moreover, via the generalization, we solve an open problem posed by Yu et al. about the entanglement cost for local state discrimination. In addition to its versatility for analysis, this concept enables us to strengthen the DPS (Doherty, Parrilo, and Spedalieri) hierarchy and compute the entanglement cost approximately. By running the algorithm based on our improved DPS hierarchy, we numerically obtain the trade-off between the (one-shot) entanglement cost and the success probability for implementing various non-local quantum operations under separable channels, such as entanglement distillation and local implementation of non-local unitary channels, measurements, and state verification.

森崇人 (京大基研・Perimeter Institute)

Haar ランダム状態とホログラフィーにおける

量子もつれと量子相関 / Entanglement and quantum correlations in random states and holography

3 体 Haar ランダム状態やホログラフィック状態の解析を通して、蒸留エンタングルメントや量子ディスコードの振る舞いを明らかにする。これらの観察から NPT 束縛状態や非局所量子計算のリソース状態のエンタングルメント、エンタングルメントを超える量子相関やコヒーレンスとの関係に迫る。この研究は [2411.03426](#) と [2502.04437](#)、準備中の研究に基づく。

Quantum entanglement in tripartite Haar random states challenges conventional (holographic) intuitions based on bipartite EPR-like entanglement by revealing the fundamental limitations on distillable entanglement and quantum correlations beyond entanglement. While $(n_A + n_B)$ -qubit bipartite Haar random states $|\Psi\rangle_{AB}$ exhibit near-maximal entanglement with $\sim \min(n_A, n_B)$ distillable EPR pairs via local unitaries (LU), tripartite Haar random states display distinct behavior. When each subsystem occupies less than half the total system, no high-fidelity EPR pairs can be distilled between any two subsystems via LU (or local operations (LO)). This is proven via an ϵ -net construction—a discrete approximation of Hilbert space—or measure concentration, showing doubly exponential suppression of the probability of sampling a state with finite distillable entanglement. Geometrically, this mirrors holographic settings where the Ryu-Takayanagi (RT) surfaces are mutually separated even when the mutual information is large (connected entanglement wedge), but this bipartite entanglement is not locally distillable due to the separated RT surfaces.

By inventing a geometric one-shot LOCC protocol, we find evidence that a tripartite Haar random states exhibit negative partial transpose (NPT) bound entanglement at the leading order, posing a possible solution to the long-standing problem. We show its existence by showing a pretty good decoder (Petz recovery map) fails to distill EPR pairs. This argument is straightforwardly generalized to random tensor networks on a hyperbolic lattice, which is a toy model of holographic states. The one-way LOCC protocol and its validity can be understood as the enlargement of the entanglement wedge. Combined with the position-based cryptography, our finding might support the existence of bound entanglement which is useful as a resource for nonlocal quantum computations.

Finally, our formula of distillable entanglement is extended to the quantum discord, which quantifies the quantum correlation beyond entanglement. For Haar random and holographic states, we show that the quantum discord $D(A|B)$ is strictly larger than the squashed entanglement $E_{sq}(A : B)$, supporting the claim that $D(A|B)$ quantitatively includes entanglement. Typically, quantumly correlated states without entanglement appear with quantum coherence. However, we demonstrate in holography that there exists a regime where the quantum discord increases as the state decoheres. This observation accords with the previous studies for two qubits but largely extended to the case of strongly-coupled quantum field theory.

This talk is based on [2411.03426](#) and [2502.04437](#) with Beni Yoshida (and Zhi Li as an updated collaborator) as well as my work in preparation.

Michele Dall'Arno (Toyohashi University of Technology)

SIC POVMs in Quantum Interpretations

Quantum measurements (POVMs) can be regarded as linear maps from quantum states to probability distributions; as such, and up to gauge symmetries, a state can be identified with the probability distribution it generates on the outcomes of a fixed measurement. But what measurement should be fixed for that purpose? Within the context of the interpretation of quantum theory known as quantum Bayesianism (QBISM), symmetric informationally-complete (SIC) POVMs have been proposed as the "bureau of standards" for the perceived "simplicity" of their reconstruction formula of the density matrix given the observed probability distribution and the knowledge of the POVM. Here, we introduce the problem of the Bayesian inference of a family of states assuming the ignorance of the POVM performed to measure them; being such a process exclusively driven by observed data, we refer to it as the data-driven inference. We show that, when complete ignorance of the POVM is assumed, the family of states that would produce the observed probability distribution over a SIC POVM (and, more generally, a 2-design POVM) corresponds to the mode of the Bayesian posterior, thus supporting the aforementioned subjective criterion of "simplicity" in quantum interpretations with an objective foundational basis.

Dariusz Chruściński (Nicolaus Copernicus University)

Universal bound on the relaxation rates for quantum Markovian dynamics

Relaxation rates characterize both classical and quantum processes, governing how quickly a system thermalizes, equilibrates, decoheres, or dissipates. They are experimentally accessible and provide key insights into a system's physical properties, allowing tests of theoretical models. Here, we address a fundamental question: Does quantum mechanics impose constraints on relaxation rates? We prove a conjecture stating that any quantum channel bounds the maximal relaxation rate by the sum of all rates divided by the Hilbert space dimension [1]. This universal and tight constraint is analogous to Bell and Leggett-Garg inequalities—while violations of these rule out local hidden variables and macrorealism, violations of our bound rule out completely positive-divisible evolution.

[1] Paolo Muratore-Ginanneschi, Gen Kimura and Dariusz Chruściński, *J. Phys. A: Math. Theor.* 58 045306 (2025).

平良 敬乃 (九州大学)

ディラック粒子浴と結合した 2 準位系の短時間・長時間挙動 / Short- and long-time dynamics of a qubit coupled to a Dirac particle bath

本講演では、ディラック分散関係を持つ粒子浴と結合した 2 準位系の生存確率について紹介します。解析的な結果として、ディラックギャップが閉じることで、生存確率が長時間領域において非指数的減衰から指数的減衰へと遷移することを示しました。一方、短時間領域では、ディラックギャップの有無にかかわらず指数的減衰が維持されることが明らかになりました。さらに、ディラック分散関係を持つ粒子浴を実現するための 2 つの実験的セットアップを提案しました。1 つ目は、Su - Schrieffer - Heeger 構造を持つ光学アレイ、2 つ目はグラフェンナノリボンです。どちらのケースにおいても、現実的なパラメータ範囲内で既存の実験装置を用いることで、理論的結果を実験的に確認できることを示しました。

梅川 舜 (東京大学 理学部物理学科)

Leggett-Garg 不等式の擬確率/量子化双対構造による解析

量子論と実在論的なモデルを区別する方法として Bell – CHSH (B – CHSH) 不等式が広く知られている。B – CHSH 不等式は空間的に離れた二つの系の間の相関に関する不等式であるが、単一系の時間相関に関する同様のものに Leggett – Garg (LG) 不等式 [1] がある。LG 不等式は、実在論的であること (Macro-Realism per se) や、系を乱さずに測定できること (Non-Invasive Measurability) などの条件下で成立する不等式であり、対象となる全ての物理量に関する同時確率分布の存在をもとに導かれる。

量子論における LG 不等式の破れを解析する方法の一つに、擬確率分布や弱値・弱測定を用いる手法が知られている [2, 3, 4]。ここで擬 (同時) 確率分布とは、必ずしも同時測定が許されない複数の量子的な物理量に関する「仮想的」な同時確率分布を指し、これと通常の同時確率分布との違いに、量子論における LG 不等式の破れの機構を見てとることができる。また、弱値 [5] は Kirkwood – Dirac (KD) 型の擬確率分布に関する擬条件付き期待値として理解できるが、系を極限的に弱く乱すことなく測定すること (弱測定) によって得られることなどから、実験的な LG 不等式の破れの検証にも用いられる。

一般に、擬確率分布の定義には物理量の非可換性に起因した任意性が存在し、歴史的には Wigner 分布や KD 分布をはじめ様々なものが独立に提唱されてきたが、李・筒井によって、同じく非可換性に起因した任意性を持つ物理量関数の量子化の問題と双対的な関係にあるものとして、それらを統一的に扱う枠組みが構築されている [6, 7]。

本研究では、上述の擬確率/量子化の一般的枠組みに基づくことで、擬確率分布や弱値等を用いた LG 不等式の解析手法を統一的に考察した。とりわけ、単一系の時間相関に関する不等式のうち、特に LG 型のものの解析においては、いずれの擬確率分布を用いても本質的に等価であることを明らかにした。これは、広く擬確率分布の手法の有効性を担保する結果であり、またその柔軟性を示すものと期待される。その一方で、擬条件付き期待値を用いた解析手法については、擬確率分布の台と物理量のスペクトルの非自明な関係 [8] から等価性が破れること、また一般には KD 型のもの (弱値) が最適であることが示された。これは、弱値を用いた LG 不等式の検証実験に関する既存の結果を、一般論の上でもその有効性を支持する結果を与えるものである。

-
- [1] A. J. Leggett and A. Garg, Phys. Rev. Lett., 54, 857 (1985).
 - [2] J. J. Halliwell, Phys. Rev. A, 93, 022123 (2016).
 - [3] A. K. Pan, Phys. Rev. A, 102, 032206 (2020).
 - [4] M. E. Goggin, et al., Proc. Natl. Acad. Sci., 108, 1256 (2011).
 - [5] Y. Aharonov, D. Z. Albert, and L. Vaidman, Phys. Rev. Lett., 60, 1351 (1988).
 - [6] J. Lee and I. Tsutsui, Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 052A01 (2017).
 - [7] J. Lee and I. Tsutsui, Springer Proc. Math. Stat. 261, 195 (2018).
 - [8] S. Umekawa, J. Lee, and N. Hatano, Prog. Theor. Exp. Phys., 2024, 023A02 (2024).

野神 亮介 (名古屋大学情報学研究科)

Bell-CHSH 設定における量子的相関の許容領域の完全な特徴付け

量子論における相関には、広く Bell – CHSH (Bell – Clauser – Horne – Shimony – Holt) 不等式 [1, 2, 3] の破れとして知られるように、局所实在論では説明できないものが存在する。本講演では、量子状態の擬確率分布による表現 (擬古典表現 [4, 5]) を特性関数空間で考えることで、この問題に対する明瞭な見通しが得られることを解説し、その上で量子論と局所实在論において許容される分布や相関の領域を考察する。本研究 [6] では、特に Bell – CHSH の設定における物理量の相関について、これが量子論で許容されるものであるための必要十分条件を、任意の物理量に対して明示的な不等式の形で与えることに成功した。また、本研究の新たな視点から従来の先行研究を振り返り、とりわけ Tsirel’ son 限界 [7] をはじめとした幾つかの既存の結果 [8, 9] の位置付けについても触れる。

-
- [1] J. S. Bell, *Physics Physique Fizika* 1(3), 195 – 200 (1964).
 - [2] J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony, and R. A. Holt, *Phys. Rev. Lett.* 23(15), 880 (1969).
 - [3] J. F. Clauser and A. Shimony, *Rep. Prog. Phys.* 41(12), 1881 (1978).
 - [4] J. Lee and I. Tsutsui, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2017(5), 052A01 (2017).
 - [5] J. Lee and I. Tsutsui, *Springer Proc. Math. Stat.* 261, 195 – 228 (Springer, 2018).
 - [6] R. Nogami and J. Lee, in preparation.
 - [7] B. S. Tsirel’ son, *Lett. Math. Phys.* 4, 93 – 100 (1980).
 - [8] B. S. Tsirel’ son, *J. Sov. Math.* 36, 557 – 570 (1987).
 - [9] L. J. Landau, *Found. Phys.* 18, 449 – 460 (1988).

皆川 慎太郎 (名古屋大学情報学研究科)

堅牢な触媒とリソース放送: その可能性と不可能性

量子状態を量子通信路で変換することは、量子情報処理の基本的な要素である。リソース理論は、何らかの制約が課された量子通信路をフリーな量子通信路と呼び、フリーな量子通信路による量子状態の変換の可能性を解明することが大きな目標の一つである (リソース理論のレビューは例えば [1])。我々は [2] にて「堅牢な触媒」という概念を導入し、それをを用いた状態の変換可能性を考察した。

系 A の状態 ρ_A を系 B の状態 σ_B に変換したいが、それを実現する A から B へのフリーな量子通信路が存在しないとする。このとき、しばしば ρ_A と補助系 C の状態 τ_C を合わせると、合成系 $A+C$ から $B+C$ へのフリーな量子通信路によって、 ρ_A を σ_B に変換できることがある。ここで補助系の状態が変換後も τ_C に戻るような場合、それは「触媒」と呼ばれる。このように、触媒は本来できなかった状態の変換を可能にするという点で、量子情報処理において重要な研究テーマになっている (触媒のレビューは例えば [3])。

ところが、変換したい状態に応じて触媒を調整して準備したとしても、変換したい状態がノイズによって別の状態に変化してしまうという可能性がある。そこで我々は [2] にて、変換したい状態がノイズを受けても、依然として触媒として作用するようなものとして「堅牢な触媒」の概念を導入し、その性質を調べた。その結果、僅かなノイズであってもそれに対して触媒が堅牢であることは、実現される変換が触媒的な量子通信路になることと等価なことがわかった。さらに、比較的自然的な性質を満たすリソース理論において一般的に、触媒的な量子通信路の存在はリソースの放送と関連することがわかった。また、対象となる系と触媒系のそれぞれにリソース理論があるとき、それらの合成系のリソース理論の構造の多様性に着目し、リソースの放送が可能/不可能になる構造について考察した。

[1] E. Chitambar and G. Gour, Quantum resource theories, *Rev. Mod. Phys.* 91, 025001 (2019).

[2] J. Son, R. Ganardi, S. Minagawa, F. Buscemi, S. H. Lie, and N. H. Y. Ng, Robust Catalysis and Resource Broadcasting: The Possible and the Impossible, arXiv:2412.06900 (2024)

[3] P. Lipka-Bartosik, H. Wilming, and N. H. Y. Ng, Catalysis in quantum information theory, *Rev. Mod. Phys.* 96, 025005 (2024).

中嶋 慧 (筑波大学)

量子測定と量子操作に対する普遍的な速度-精度トレードオフ

物を測ったり、操作したりするとき、経験的に、かかる時間 (速度) と精度との間にトレードオフが存在することが知られている。しかし、そうした経験則の多くは実験上の系の固有な制限であり、基本的な物理法則の要請としての速度-精度のトレードオフが測定や操作に存在するかどうかは未だ知られていない。本研究では、そうしたトレードオフが実際に存在し、それが相互作用の局所性とエネルギー保存則から導かれることを示す。論文 [1] において、一般的な量子操作に対して、保存量が存在する場合に、不可逆性についての普遍的な下限が示された (ただし、全系のヒルベルト空間は有限次元と仮定される)。論文 [2] では、この枠組みを用いて、量子操作に対する様々な誤差と擾乱を表せることが示された。Arthurs – Kelly – Goodman や小澤や李・筒井の誤差と擾乱もこの枠組みで表すことができる。本研究では、論文 [1, 2] の枠組みを、注目系が実験装置に対応する量子系 (ヒルベルト空間が無限次元) と結合している場合に拡張する。エネルギー保存則と相互作用の局所性を仮定したうえで、Lieb-Robinson bound を用いた近似手法と [1, 2] の手法を組み合わせることで、様々な誤差と擾乱に対する普遍的な下限を導出した [3]。

[1] H. Tajima, R. Takagi, and Y. Kuramochi, arXiv:2206.11086 (2022).

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

[3] S. Nakajima and H. Tajima, arXiv:2405.15291 (2024).

木本 泰平 (京都大学大学院工学研究科)

Fine-Grained Uncertainty Relations for Quantum Testers

The uncertainty principle is one of the features of quantum theory. Fine-grained uncertainty relations (FGURs) are a contemporary interpretation of this principle. Each FGUR is derived from a scenario where multiple measurements of a quantum state are stochastically performed. While state measurements are fundamental, measuring quantum processes, namely, completely positive and trace preserving maps, is also crucial both theoretically and practically. These measurements are mathematically characterized by quantum testers. In this study, we develop FGURs in terms of quantum testers. Because state preparation is a type of quantum process, our framework encompasses the conventional case as a special instance. The generalized FGURs' bounds are typically challenging to compute. Thus, we also provide estimates for these bounds. Specifically, we explore quantum testers involving maximally entangled states in detail. Consequently, some FGURs for quantum testers are derived as explicit forms for specific settings.

<https://arxiv.org/abs/2409.08542>

山下 晴輝 (芝浦工業大学)

量子状態の固有値に基づく不確定性関係の厳密な一般化

量子力学には、位置と運動量などの複数の物理量が同時に確定的な値を持つことができないという性質があり、これは不確定性原理として知られている。量子力学の理解において極めて重要な役割を果たしている不確定性原理を定量的に表現したものが不確定性関係であり、これは物理量間の不確定性のトレードオフを示す不等式として表される。不確定性関係の歴史は、1927年に Heisenberg が提唱した基本的な不確定性原理 [1] に端を発し、さらに 1929年に Robertson は任意の二つの物理量に対する不確定性関係を確立した [2, 3]。これに続き Schrödinger は 1930年に Robertson の関係のさらなる一般化として共分散項を含むより一般的な不確定性関係を導入し、物理量間の共分散を含む項を考慮に入れることで関係を拡張した [4]。本研究 [5] では、Robertson 型ならびに Schrodinger 型の不確定性関係を、量子状態の固有値に依存したタイトな関係として一般化する。さらには応用として、Arthurs-Goodman [6]、小澤の不確定性関係 [7] の一般化を導出する。

-
- [1] W. Heisenberg, Z. Phys. 43, 172-198 (1927).
 - [2] E. H. Kennard, Z. Phys. 44, 326 (1927).
 - [3] H. P. Robertson, Phys. Rev. 34, 163 (1929).
 - [4] E. Schrödinger, Proc. Prussian Acad. Sci. Phys. Math. Sect. XIX, 293 (1930).
 - [5] H. Yamashita, A. Mayumi, G. Kimura (in preparation).
 - [6] E. Arthurs, M. Goodman, Phys. Rev. Lett. 60, 2447-2449 (1988).
 - [7] M. Ozawa, Phys. Rev. A 67, 042105 (2003); M. Ozawa, Phys Lett A 320, 367-374 (2004).

ポスター発表/Poster presentations

1 Michele Dall'Arno (Toyohashi University of Technology)

The classical symulation cost of general probabilistic theories

General probabilistic theories (GPTs) represent a generalization of quantum theory in which the positive semi-definiteness of the operators is replaced with different constraints. Such constraints affect the set of input-output probability distributions that any given GPT can generate, and the smallest dimension of a classical system capable of reproducing all such distributions is called the signaling dimension, or the classical simulation cost, of the GPT. Already a decade ago, Frenkel and Weiner proved in a groundbreaking result that the signaling dimension of quantum theory equals its Hilbert space dimension; however, very little has been found ever since for more general GPTs. Here, we tighten known bounds on the signaling dimension of any given GPT, and we show that our bounds completely characterize, in closed-form, the signaling dimension of any GPT whose operators live in a two-dimensional linear space (that is the case, for instance, for all polygonal GPTs, as well as for the real qubit), thus settling the problem in that case. We provide an algorithm that, in a finite number of steps, exactly computes the signaling dimension of any given polytopic GPTs, and we apply it to classify several rational polytopic GPTs based on their signaling dimension.

2 黄海 仲星 (大阪大学)

TE-PAI: Exact Time Evolution by Sampling Random Circuits

We introduce TE-PAI, which simulates time evolution exactly by sampling random quantum circuits for estimating observable expectation values at the cost of an increased circuit repetition. The approach builds on the Probabilistic Angle Interpolation (PAI) technique and we prove that it simulates time evolution without discretisation or algorithmic error while achieving optimally shallow circuit depths that saturate the Lieb Robinson bound. Another significant advantage of TE-PAI is that it only requires executing random circuits that consist of Pauli rotation gates of only two kinds of rotation angles $pm\Delta$ and pi , along with measurements. While TE-PAI is highly beneficial for NISQ devices, we additionally develop an optimised early fault-tolerant implementation using catalyst circuits and repeat-until-success teleportation, concluding that the approach requires orders of magnitude fewer T-states than conventional techniques. We estimate 3×10^5 T states are sufficient for the fault-tolerant simulation of a 100 qubit Heisenberg spin Hamiltonian. Furthermore, TE-PAI allows for a configurable trade-off between circuit depth and measurement overhead by adjusting the rotation angle Δ . We expect that the approach will be a major enabler in the late NISQ and early fault-tolerant periods as it can compensate circuit-depth and qubit-number limitations through an increased circuit repetition.

3 廣谷 知也 (九州大学大学院理学府物理学専攻量子宇宙物理理論研究室)

qutrit を用いた相対論的量子オットー熱機関

ブラックホールの熱力学で知られるように、熱力学と相対論は密接に関わっていることが知られている。この関係性はこれまで様々な観点から研究されているが、本研究では、曲がった時空の量子場と相互作用する 3 準位の量子系を用いた相対論的量子情報 (RQI) と量子熱力学の横断的観点から研究を行う。ここでは RQI と量子熱力学の融合的研究の一端として、量子オットー熱機関のサイクルを通して、UDW 検出器が曲がった時空の量子場から仕事を取り出すための条件 (Positive Work Condition:PWC) に着目する。先行研究ではいずれも 2 準位系の UDW 検出器を用いた議論がなされてきたが、3 準位系を用いた議論は RQI の分野では未だ存在しない。そこで、本研究では任意の曲がった時空において、3 準位の UDW 検出器がオットーサイクルから取り出す仕事の条件を導出し、2 準位系には見られなかった性質を議論する。

4 上永 裕大 (九州大学)

有限時間相互作用における量子ランジュバン方程式

開放量子系の中心的特徴の一つは、環境との相互作用による散逸的な振る舞いである。これを記述する理論の一つとして、量子調和振動子を系とし、それが多数の量子調和振動子からなる環境と相互作用する Caldeira-Leggett モデルが知られている [1]。このモデルでは、系の時間発展を記述する量子ランジュバン方程式 (Quantum Langevin Equation, QLE) を厳密に解くことが可能であり、非平衡ダイナミクスや非マルコフ過程の解析に有用である。一般に、QLE を厳密に解くためには、系が環境と無限時間結合していると仮定する。

一方で、時間に依存する結合を持つ QLE の研究は限られており、その主要な要因としては解析解の導出が極めて困難であることが挙げられる。そのため、一般的な時間依存結合を持つ QLE の解析解は未だ明らかにされていない。

本研究では、この課題に対処するため、[2] で量子マスター方程式に用いられた手法を採用し、 N 個のデルタ関数型瞬間相互作用の列を用いて時間依存結合を再現する。この手法により一般的な時間依存結合を持つ QLE の解析解を得ることができた。この解は、デルタ関数型相互作用であるにも関わらず、環境の非マルコフ的な特徴を捉えることができる。さらにこの一般的な時間依存結合を持つ解析解が、環境との相互作用の強さが常に一定という過程の下で厳密に解ける QLE の解をどの程度再現できているのかについて調査し、妥当性について検証する。

[1] A. O. Caldeira and A. J. Leggett, "Influence of Dissipation on Quantum Tunneling in Macroscopic Systems", Phys. Rev. Lett. 46, 211 (1981)

[2] J. P-Gómez, E. M-Martínez, "Nonperturbative method for particle detectors with continuous interaction" Phys. Rev. D 109, 045014(2024)

5 法橋 顕広 (東京大学)

時間反転対称性と Wigner-Araki-Yanase 定理

Wigner-Araki-Yanase(WAY) 定理は、間接測定において保存量が存在する場合、保存量と非可換な物理量を正確に測定することは不可能であると主張する。保存量は連続ユニタリ対称性と等価であり、さらに WAY 定理は離散的なユニタリ対称性の場合にも一般化できる。したがって、WAY 定理は、測定モデルがユニタリ対称性をもつとき、実装された測定に課される制約を表していると言える。しかし、時間反転対称性のような非ユニタリ対称性において同様の制限があるかは自明ではない。本発表では、WAY 定理の非ユニタリ対称性への拡張の可能性について議論する。特に、WAY 定理の素朴な拡張が時間反転対称性では成立しないこと、また、測定の確率分布だけでなく、測定過程を考慮した場合、時間反転対称性に起因するある種の制約が存在することを示す。

6 山本 有理子 (京都大学)

山本 有理子^A, 木村元^B, 石坂智^C
京都大学^A, 芝浦工大^B, 広島大学^C

量子三角識別距離と量子相関限界への応用

量子情報理論における量子状態間の距離測定は多くの応用で重要な役割を果たすが, 従来の手法はエンタングル状態や混合状態への対応に課題が残されていた. 近年, その問題に対応し得る新たな量子距離測度が提案された.

文献 [1] では, 測定型量子三角識別距離 (M-QTD) が次式で導入された:

$$\text{QTD}^{\text{meas}}(\rho, \sigma) := \max_{M:\text{POVM}} \text{TD}(P_M(\rho), Q_M(\sigma)).$$

ここで M はすべての可能な量子測定 (POVM: Positive Operator-Valued Measure) であり, $P_M(\rho)$ および $Q_M(\sigma)$ は, それぞれ量子状態 ρ と σ に対する M の測定で得られる確率分布である. また, TD は古典三角識別距離であり, 確率分布 P と Q に対して次式で与えられる:

$$\text{TD}(P, Q) := \frac{1}{2} \sum_i \frac{|p_i - q_i|^2}{p_i + q_i}.$$

注目すべきことに, M-QTD は量子相関の境界を特徴づける疑トレース距離 [2] と関係することが示されている [1]. 一方, エンタングル状態や混合状態を扱う場合においても量子状態の識別性を定量化するものと解釈できる量子三角識別距離 (QTD) が [3] において次式で導入された:

$$\text{QTD}(\rho, \sigma) := \frac{1}{2} \text{Tr} [(\rho - \sigma)(\rho + \sigma)^{-1/2}(\rho - \sigma)(\rho + \sigma)^{-1/2}].$$

さらに, 量子版 Csiszár 距離に基づき導入される量子三角識別距離 (C-QTD) が [4] において次式で導入された:

$$\text{QTD}^{\text{C}}(\rho, \sigma) := 1 - F(\rho, \sigma). \quad (1)$$

ここで, $F(\rho, \sigma)$ は fidelity $F(\rho, \sigma) = [\text{Tr} \sqrt{\sqrt{\rho}\sigma\sqrt{\rho}}]^2$ である.

本発表では, これら 3 つの量子三角識別距離 M-QTD, QTD, C-QTD の概要について触れるとともに, これらの関係について発表する予定である.

[1] C. Ho, S. Ishizaka, G. Kimura (2022) (芝浦工業大学卒業論文 2021 年度); K. Saito, S. Ishizaka, G. Kimura (2021) (芝浦工業大学卒業論文 2020 年度).

[2] S. Ishizaka, Phys. Rev. A **95**, 022108 (2017).

[3] Y. Liu, arXiv:2303.01952 (2023).

[4] D. G. Bussandri, T. M. Osán, Entropy **25**, 912 (2023).

7 中塚 海渡 (大阪大学)

統計的因果推論と量子相関の関係性について

中塚海渡^A, 真弓愛菜^B, 木村元^B

阪大人科^A, 芝浦工大シス理^B

量子もつれなど Bell 不等式を破る相関は「自由意志を伴う局所実在論」によって説明することはできないと考えられている [1]. 実際, 測定独立性および局所性条件 (選択独立性+出力独立性) を満たすあらゆる隠れた変数理論が Bell 不等式を満たすことは数学的に証明できる. そのため, 実在性を決定論により記述し, 測定独立性を「自由意志の存在」と考えれば, 上の結論が導かれる. しかし, 測定独立性と自由意志の関係は明確ではなく, 必ずしも上記の結論が正しいとは言い切れない. また, Bell 自身は「局所因果律」を背景とした Bell 定理の解釈を提案しており, Bell 定理の背後の仮定やその含意は必ずしも明確となっているわけではない.

そこで本研究では, 統計的因果推論の理論 [2] に基づき, 上記の問題を含む Bell 定理を再考する. 統計的因果推論は, 機械学習, 医学, 経済学の分野で活発に研究されており, 近年は量子物理学への応用も行われている. 統計的因果推論とは, 統計的な相関からグラフを記述し因果性を求めるというものである. 数学的には確率論とグラフ理論の共通の性質を利用し, 両者の橋渡しを行う理論である. 因果推論と Bell 定理の関係性に関して Wood らによる研究があり, 量子論と因果推論の標準的な枠組みが両立せず, 量子相関を現状の因果推論の枠組みでは説明できないとされている [3]. 本発表では, 量子相関の因果推論による分析を行うことで, 自由意志を伴う局所実在論の回帰の可能性について論じる.

[1] J. S. Bell, On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox. *Physics*. **1**, 195 (1964).

[2] J. Pearl, *Causality: Models, Reasoning and Inference*. Cambridge University Press, 2nd ed. (2009).

[3] C. J. Wood and R. W. Spekkens, The lesson of causal discovery algorithms for quantum correlations: Causal explanations of Bell-inequality violations require fine-tuning *New J. Phys.* **17**, 033002 (2015).

8 柴田 礼 (芝浦工業大学 量子情報システム研究室)

No-Signaling 条件を考慮した緩和ベル不等式について

芝浦工業大学
柴田 礼, 木村 元

量子力学の理論では、測定によって得られる値の候補と、その値を得る確率のみが与えられる。これに対して Einstein は、完全な物理理論は決定論的であり、状態に関する十分な知識がないため確率的な振る舞いをしているように見えている、と主張した。したがって、我々が観測できていない状態に関する未知の変数（以後、隠れた変数と呼ぶ）があり、この変数の値を考慮することで量子力学は完成すると考えた。これに対し、Bell は隠れた変数に「局所性」（遠隔地に瞬時に影響する伝搬を排除する制約）と「測定独立性」（測定種類の選択と隠れた変数が独立であるとする制約）を課したあらゆる局所隠れた変数理論に対し、観測値の相関が満たすべき不等式（ベルの不等式）を導出した [1]。さらに、量子力学が生み出す一部の相関がその不等式を満たさないことも示した。この一連の成果はベルの定理と呼ばれ、Einstein が予言した隠れた変数理論は存在しないことが示された。

測定独立性は（自由意志の存在を想定することで）暗黙裡に仮定されることが多いが、ベルの定理においては本質的な仮定の一つであることを認識することは重要である。事実、測定独立性を満たさない局所隠れた変数理論では、ベルの不等式が破られることを示すことは容易にできる。このような背景から 2010 年 Hall は、測定非独立性を確率の全変動距離を用いて定量化し、あらゆる局所隠れた変数理論において、ベル非局所相関（ベルの不等式を破るような相関）と測定非独立性の関係を定式化した [2]。一方、2023 年我々は、Hall が用いた測定非独立性の指標に加え、隠れた変数の導入を隠れ度によって定量化し、やはりあらゆる局所隠れた変数理論において、ベル非局所相関と各指標の関係を定式化した [3]。しかし、この導出では局所性の一部である「No-Signaling 条件」（測定選択が相手の系へ影響を与えることを禁止する制約）が満たされていなかった。

本研究で我々は、No-Signaling 条件を満たす局所隠れた変数理論における、測定非独立性と隠れ度の振る舞いを再び調査した。その結果、それらの関係が 2023 年に定式化したものとは異なることを示した。特に一部の隠れ度では、測定非独立性が増加するほど再現可能なベル非局所相関が小さくなるという非自明かつ興味深い関係を発見した。

[1] J. S. Bell, *Physics* **1**, 195 (1964).

[2] M. J. Hall, *Phys. Rev. A* **184**, 022102 (2011).

[3] G. Kimura, Y. Susuki, and K. Morisue, *Phys. Rev. A* **108**, 022214 (2023)

9 宮崎 慈生 (東京大学 大学院理学系研究科)

量子状態のイマジナリティの推定

量子状態を密度行列で表したとき、その虚数成分があるかどうかがあると情報処理上便利な場合がある。特に量子パラメータ推定・量子メトロロジーの分野では、虚数成分が無い場合のみ使える推定手法が提案され [1]、最近実験的にも検証されている。

本研究ではこの先行研究から視点を変え、虚数成分を量子推定の対象として扱ってみたい。密度行列の虚数成分の大きさをリソース理論に基づいて定式化した「イマジナリティ」という概念がある。エンタングルメントやコヒーレンスと同じように、イマジナリティを定量化した測度が提案され、蒸留操作などによる意味付けも調べられてきた [2]。今回は、量子状態のイマジナリティ測度を推定するための最適な量子測定方法について理論的に考察する。量子状態の微妙なずれによるイマジナリティ測度の微小変化を捉えるモデルを考え、最小二乗誤差によって推定の精度を評価する。

この推定問題の特徴は、一般に状態は多次元のパラメータによって変化するのに対し、イマジナリティ測度は一つの実数を返す関数に過ぎないということである。イマジナリティ測度の値だけを取り出すのに、多次元パラメータをすべて推定するのは効率が悪いように思われる。今回はイマジナリティの相対エントロピー [3] の直接推定のために量子セミパラメトリック推定 [4] の理論を使い、最適測定と精度の評価を行った。イマジナリティの相対エントロピーを含む特定の関数に利用できる最適測定・精度の導出方法を紹介する。

[1] J. Miyazaki & K. Matsumoto, Quantum 6, 665 (2022).

[2] A. Hickey & G. Gour, J. Phys. A: Math. Theor. 51, 414009 (2018). K.-D. Wu, et. al., Phys. Rev. Lett. 126, 090401 (2021). K.-D. Wu, et. al., Phys. Rev. A 103, 032401 (2021).

[3] S. Xue, et al., Quantum Inf Process 20, 383 (2021).

[4] M. Tsang, et. al., Phys. Rev. X 10, 031023 (2020).

10 鈴木 泰雅 (東京科学大学理学院物理学系)

可逆な測定過程を利用した量子状態推定と量子通信への応用

可逆な測定過程とは、特定の条件を満たす測定が施された未知の量子状態に対して、適切な操作を適用することで、確率的に元の量子状態へと回復させる過程を指す。測定を通じて元の量子状態に関する情報を取得できることから、この可逆な測定過程を繰り返し適用することで、未知の量子状態を一定の精度で推定することが可能となる。

この精度が十分に高いと仮定した場合、可逆な測定過程は量子通信への応用が期待される。例えば、Alice と Bob がエンタングルした量子状態を共有している場合、Bob は自身の持つ量子状態について、ある程度の情報を取得できるため、Alice は測定手法を適切に選択することで、完全ではないものの、Bob とほとんど通信を行うことが可能であると考えられる。しかしながら、この仮定は誤りであり、未知の量子状態を高精度で推定するためには、成功確率が極めて低くなるため、本手法は実用的な通信手段としての有効性を持たない。

本研究では、この課題に対処するため、量子状態の推定精度自体は低いものの、測定回数が一定の閾値を超えた試行のみを選別することで、測定結果の統計的分散を利用し、Alice が測定を行ったか否かを十分に推定可能であることを示す。本手法により、可逆な測定過程を利用した量子情報伝達の新たな可能性を探ることを目的とする。

11 好村 清貴 (芝浦工業大学)

量子ビット系と一般確率論における同時測定不可能性の判定 • Detection of measurement incompatibility in Qubit and General Probabilistic Theories

芝浦工大シス理 阪大人科^A 阪大 QIQB^B
好村清貴, 須藤丈裕, 中塚海渡^A, 高倉龍^B, 木村元

近年, 同時測定不可能性を定量的に評価する研究が盛んに行われている [1]. 同時測定不可能性を定量的に評価する方法は様々なものがあるが, Heinosaari らは量子状態を制限した場合の同時測定可能性を定量的評価の指標として, 同時測定不可能性次元 (Incompatibility Dimension, 以後 ID) を提案した [2]. 同時測定不可能な POVM の組 (A, B) に対する ID は次のように定義される:

$$\chi(A, B) := \min_{\mathcal{S}_0 \subset \mathcal{S}} \{ \dim \text{aff} \mathcal{S}_0 + 1 | A, B : \mathcal{S}_0 - \text{同時測定不可能} \}.$$

ここで \mathcal{S} は状態空間, $\text{aff} \mathcal{S}_0$ は \mathcal{S}_0 のアフィン包を表す. また, \mathcal{S}_0 -同時測定不可能とは, 状態空間を $\mathcal{S}_0 \subset \mathcal{S}$ に制限した下で (A, B) の同時測定が不可能であることを意味する. この指標は, 同時測定不可能性の判定に必要な状態の個数を表現する量を表し, $\chi(A, B)$ の値が大きいほど, より多くの状態で同時測定が可能となることを意味する. そして Heinosaari らは, (A, B) としてノイズを付与したパウリ X, Y 測定を考えた際, ID の値が変化する閾値の存在を示した. しかし, その閾値の具体的な値は未だ求められていない.

本研究では, この閾値の具体的な値を決定することを目的とする. 我々はまず制限した状態空間 \mathcal{S}_0 における同時測定可能・不可能の判定問題が半正定値計画問題に帰着可能であることを示し, 判定アルゴリズムを構築した. その結果をもとに, 我々は閾値の具体的な値を一部解析的に特定した.

一方で近年, 一般確率論においても物理量の同時測定不可能性を定量的に評価する研究が進められている [3,4]. 本研究では, これらの研究を基に量子系における ID を一般確率論に拡張する. 具体的には, 二次元正 N 角形状状態空間 \mathcal{S} を対象として, 「ノイズを付与した相補的な測定」における ID の振る舞いを解析し, ID が変化する閾値を導出する. ただし, 完全な厳密証明は困難であるため, 現段階では数値解析的な議論を中心とする. ここで, 「ノイズを付与した相補的な測定」は $N \rightarrow \infty$ の下で量子ビット系におけるノイズを付与したパウリ測定に対応する. また, 状態空間は $N \rightarrow \infty$ の下で実 Hilbert 空間の量子ビット系となる. この対応を活用することで, 状態空間が古典系 ($N = 3$) から量子ビット系 ($N = \infty$) へ移行する過程で, ID の閾値がどのように変化するかを明らかにする.

[1] S. Designolle, M. Farkas, and J. Kaniewski, New J. Phys. **21**, 113053 (2019).

[2] T. Heinosaari, T. Miyadera, and R. Takakura, Phys. Rev. A. **104**, 032228 (2021).

[3] N. Stevens and P. Busch, Phys. Rev. A. **89**, 022123 (2014).

[4] A. Jenčová and M. Plávala, Phys. Rev. A. **96**, 022113 (2017).

12 高倉 龍 (大阪大学 量子情報・量子生命研究センター)

Multi-object operational tasks for measurement incompatibility

We introduce *multi-object* operational tasks for measurement incompatibility in the form of multi-object quantum subchannel discrimination and exclusion games with prior information, where a player can simultaneously harness the resources contained within both a quantum state and a set of measurements. We show that any fully or partially resourceful pair of objects is useful for a suitably chosen multi-object subchannel discrimination and exclusion game with prior information. The advantage provided by a fully or partially resourceful object against all possible fully free objects in such a game can be quantified in a *multiplicative* manner by the resource quantifiers of generalised robustness and weight of resource for discrimination and exclusion games, respectively. These results hold for arbitrary properties of quantum states as well as for arbitrary properties of sets of measurements closed under classical pre and post-processing and, consequently, include measurement incompatibility as a particular case. We furthermore show that these results are not exclusive to quantum theory, but that can also be extended to the realm of general probabilistic theories.

arXiv:2412.15615

13 岩越 丈尚 (Department of Mechanical Engineering, Hosei Univ.)

Restoring Security by Fresh Key Distribution in Y00/QNRC Quantum Cryptography

送信するメッセージがすでに知られている場合 (既知平文攻撃) のもとでは, Y00 / QNRC 量子暗号の共通鍵の安全性は時間の経過とともに低下する [1-6]. しかし真正乱数をメッセージの代わりに送信する場合, 既知平文攻撃を用いることはできない. この真性乱数を新しい共通鍵として使うことで本量子暗号プロトコルの安全性を回復できる [5-7]. 一方で, 本手法で本プロトコルの安全性が回復するのかは定量的には定かではない [5]. 本発表ではこの点を議論する.

-
- [1] K. Imafuku, (2024), <https://arxiv.org/abs/2412.07300>
 - [2] T. Iwakoshi, (2018), <http://dx.doi.org/10.1117/1.OE.57.12.126103>
 - [3] T. Iwakoshi, (2020), <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969455>
 - [4] T. Iwakoshi, (2021), <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056494>
 - [5] T. Iwakoshi, (2023), <http://dx.doi.org/10.1049/qtc2.12064>
 - [6] T. Iwakoshi, (2024), <https://www.researchgate.net/publication/386425167>
 - [7] T. Iwakoshi, (2019) <https://www.researchgate.net/publication/330506279>

14 森川 雅博 (理研)

赤外発散と $1/f$ 揺らぎ Infrared Divergence and $1/f$ Fluctuations

森川雅博 (理化学研究所, 埼玉県和光市 351-0198, 日本) 中道晶香 (京都産業大学共通教育, 京都市北区上賀茂本山, 603-8555, 日本)

普遍的な低周波揺らぎである $1/f$ 揺らぎはさまざまな自然系で広く観測されます。この揺らぎは、そのパワースペクトル密度が周波数の逆数に比例するという特性によって定義されます。このような揺らぎは、多様なデバイスや半導体における電流で顕著に現れ、その起源と持続性は長年にわたり理解が求められてきた重要な課題です。

本研究では、これらの揺らぎを量子電磁力学 (QED) における赤外発散 (IRD) と関連付けて検討しました。S 行列内での赤外発散はユニタリティによって相殺されますが、軟光子放射確率は依然として発散を保持します。私たちは、この赤外発散寄与を効果作用 Γ のユニタリー部分から分離し、それは独自の赤外発散相関を持つ古典的なランダム場となることを示しました。この手法により、過去に批判されていた量子ビート理論を完全に回避できます。この新しい形式では、電子のダイナミクスを支配するシュレジンガー・ランジュバン方程式を導出することが可能であり、ミクロな量子プロセスといくらでも長時間相関を持つマクロな揺らぎとの間の橋渡しを実現しました。

半導体のように、電子の平均自由行程が数十格子単位にしか満たない環境では、電子はこのサイズの波束として伝搬します。私たちは、赤外発散によるランダム場の影響下での波束ダイナミクスを記述する新しいモデルを提案しました [1]。数値シミュレーションにより、波束の軌跡そのものには $1/f$ 特性がない一方で、その振幅の二乗、すなわち電流が明確に $1/f$ 揺らぎを示すことが明らかになりました。この重要な結果は、振幅変調が $1/f$ 揺らぎの発生において果たす役割を強調しています。

さらに、これらの結果は、 $1/f$ 揺らぎが周波数の集積と干渉現象から生じるという仮説 [2] に一致しています。重要なことに、これらの揺らぎは整流、閾値処理、タイミングの抜き出しといった様々な変調プロセスを通じても持続することを示しました。このような耐久性は、 $1/f$ 揺らぎが (電流を源にして) 生物系にも広く存在することを示すものであり、その普遍性を強調しています。

上記、揺らぎ生成の機構は普遍的で、時間が許せば、発散や不安定性により系はヒルベルト空間を逸脱して不可逆でマクロな普遍構造を作ることをお話しします。例えば、a) 初期インフレーション宇宙における類似の赤外発散機構が、銀河形成に重要な HZ スペクトルの背後にある可能性があります。また、b) 不安定量子系の量子場は大きくスクイーズして真空を変え、QED の軟光子放出同様、粒子生成を可能にします。これも有効作用の虚部を与え、古典揺らぎとともに対称性の自発的破れを引き起こします。この系と結合させて、1 個の電子系のスピンを測定することができ、量子測定の物理モデルともなります。

[1] M. Morikawa, and A. Nakamichi, IEEE International Conference on Advances in Electrical, Electronics and Computational Intelligence (ICAEECI 2023) 2023.

[2] M. Morikawa, A. Nakamichi, Scientific Reports 13, 8364, 2023.

15 山下 秀康 (愛知学院大学)

そもそも量子確率とは何か：Bayes 的観点から考え直す

最近の私の研究の主題は表題のような哲学的な話題よりむしろどちらか言うと技術的な問題なのだが、正直、限られた時間で技術的細部 (群のユニタリ表現論等を含む) の解説ができそうにないので、そこを省いて素朴な哲学的問題の提起から始めることにする。去年の発表では、量子化という観点から量子確率を定式化しようとしていた。今回はその続きなのだが、時間の制約のため、今回の発表では量子化には触れない。詳細は次を参照:

<https://www.agu.ac.jp/~yamasita/paper/Bayes-v2.pdf>

量子確率とはそもそも何か? 「状態 ϕ において \dots である確率は p である」のような言い方がなされるのだから、量子確率という概念は量子状態という概念に帰着しそうである。では量子状態とは何か? Cassinelli and Lahti [2015] (Found. Phys. 46(10):1341-1373; arXiv:1508.03709) はこう説明している: “States are understood as equivalence classes of preparations of a physical system...” これ自体は真つ当な説明である。しかし、その同値関係を定義するのに結局は確率概念が要るであろう。よって堂々巡りになると思われる。

量子力学の基礎におけるこの根本的堂々巡りによる概念的不安定さが、解釈論における百家争鳴の一つの要因であろう。いっそのこと、状態概念に言及せずに量子力学を記述できれば、問題が解決するとまでは言わないにしても、少なくとも論争に巻き込まれずに済む。そこで、それを実践してみようというのが今回の発表である。そういう意図で書かれた直接的な先行研究が見つからないのだが、数学的には関係する文献が多数あり、見た目ほど無謀なことをやろうとしているわけではない。C* 代数の理論に、荷重や (抽象的) トレースという概念がある。今回の発表では C* 代数自体は全く用いないが、C* 代数上のトレースに似た概念を用いる。それは C* 代数上ではなく、射影型測定 (yes-no 型測定) の系から生成される半群 \mathcal{G} 上で定義される。

確率は「Bayes 的観点」から理解する: 対象についての情報が全く与えられていないという「状態」は、有限次元ヒルベルト空間では密度行列 $\rho = I/\text{Tr } I$ で与えられるが、無限次元では密度行列ではなくトレースで表される。大雑把に言えば、観測を実行して対象の情報が得られるたびに「状態」が絞られていく。今は直観的説明の都合上「状態」に言及したが、実際は「状態」なるものは定義されず、条件つき確率測度 $\mathbb{P}(\bullet|\bullet)$ だけが定義される。この条件つき確率測度は、半群 \mathcal{G} 上で定義される。より正確に言うと、 \mathcal{G} の両側イデアル \mathcal{I} を定め、条件つき確率測度を $\mathbb{P}: \mathcal{G} \times (\mathcal{I} \setminus \{0\}) \rightarrow [0, 1]$ なる関数として定義する。

16 Kenzo Ishikawa (北海道大学)

ポテンシャル下の連続状態の非直交性/Non-orthogonality of continuum states in potential problem

ポテンシャル下における異なるエネルギーの2状態は、連続状態では非直交である。非直交性は知られていたが、掘り下げる解析は、ほとんどなされてこなかった。本講演では、完全系をなす規格化状態である波束表現を使い、非直交性の起源や、孤立物理状態の遷移確率の計算を示す。得られた結果、特に確率の絶対値は、量子力学の原理や幅広い現象に直結する。時間が許せば、これらの応用についても簡単に説明する。

*Overlap integral of continuum stationary states, Kenzo Ishikawa and Yuya Nishio, *Annals of Physics* 469 (2024) 169750

* Potential scatterings in the L^2 space:(2) Rigorous scattering probability of wave packets, Kenzo Ishikawa, *Annals of Physics* 460 (2024) 160571

*量子力学 I, I I、石川健三(裳華房) 2020

17 越原 健太 (早大理工)

有限時間周期の量子定常サイクルにおける受動性

熱機関に量子系の量子力学的な効果を活用する量子熱機関の研究が盛んに行われている。中でも、量子系にユニタリー操作を加えることで取り出される仕事の限界が古くから議論されており、仕事を取り出すことができない「受動的な」量子状態が熱平衡状態の他にも存在することや [1,2], 受動的でない量子状態にある量子系から取り出すことができる最大仕事 [3] などが知られている。ただし、先行研究の結果は仕事の取り出しに要する時間を考慮に入れておらず、実用上重要となる有限の時間周期で動作する量子定常サイクルから取り出し可能な仕事の理解は未だ十分とは言い難い。

本研究では、量子系を受動的な非平衡定常状態に緩和させる熱接触を行う量子熱機関を議論し、サイクルの周期が十分長い場合に得られる非平衡定常状態の受動性が有限時間周期の量子定常サイクルにおける仕事の取り出し可能性を規定することを明らかにする。量子系を(複数の)熱浴に(同時に)一定時間接触させてエネルギーの充填を行い、その後、量子系の緩和を待たずにユニタリー操作を加えて仕事の取り出しを試みる、以上の操作を繰り返す量子熱機関を考える。熱接触過程は標準的なエネルギー緩和の GKLS 型量子マスター方程式で記述する。熱機関の操作を繰り返して到達する量子定常サイクルにおいて、量子系から取り出される仕事を数値的に求めた結果、有限時間周期の量子定常サイクルであっても仕事を取り出せないことが確認された。

さらに、数値計算の結果を解析的に保証するため、時間周期が 0 の極限における量子定常サイクルを議論した。仕事を取り出す操作を記述するハミルトニアンが十分小さい場合を考えて仕事率を近似的に与える公式を導出し、サイクルの周期が十分短い場合に仕事率の主要項が任意の微小ハミルトニアンに対して正値を取らないこと、すなわち仕事を取り出せないことを厳密に証明した。本研究の結果は、サイクルの周期が十分長い量子熱機関を想定して従来議論されてきた「受動性」の概念が、有限時間周期の量子定常サイクルの場合にも拡張し得ることを示唆するものと考えられる。

[1] W. Pusz and S. L. Woronowicz, Commun. Math. Phys. 58, 273 (1978).

[2] A. Lenard, J. Stat. Phys. 19, 575 (1978).

[3] A. E. Allahverdyan, R. Balian, and Th M. Nieuwenhuizen, Europhys. Lett. 67, 565 (2004).

18 王シン (東京大学生産技術研究所)

Characteristic oscillations in frequency-resolved heat dissipation of linear time-delayed Langevin systems

19 山岸愛 (東京大学生産技術研究所)

近藤量子ウォークの提案：磁性不純物と相互作用する量子ウォーカー

We propose a model of quantum walkers interacting through a Kondo-like interaction. Our final goal is to propose a model of quantum active *matter* by introducing interactions between quantum active *particles* [1].

In the present work, we first develop a description of quantum-walk dynamics in terms of scattering of a massless Dirac particle due to periodically located non-magnetic impurity potentials with the Hamiltonian of the form $H_{\text{non-mag}} := \epsilon p \sigma^z + m \sum_n \delta(x - na) \sigma^y$, where ϵ and m are positive parameters, a is the lattice constant, and $\delta(x)$ is Dirac's delta function. We then add a magnetic impurity to the site $x = 0$ with the following Hamiltonian: $H_{\text{mag}} := \epsilon p \sigma^z \otimes s^0 + H_m \delta(x)$ with $H_m := J_x \sigma^x \otimes s^x + J_y \sigma^y \otimes s^y + J_z \sigma^z \otimes s^z$, where J_x , J_y and J_z are real parameters describing the coupling between the impurity and quantum walkers. The new degree of freedom, represented by a set of Pauli matrices $\{s^x, s^y, s^z\}$, is a magnetic impurity localized at $x = 0$, with s^0 being the identity operator in the same space. Each quantum walker is scattered by the spinful magnetic impurity, thus interacting with each other indirectly, analogous to the Kondo model. We present numerical results for two particles in the cases with and without the magnetic impurity and compare the cases of different interactions with the impurity spins.

We have looked at dynamics of two quantum walkers with an impurity spin at the origin, focusing on differences between (a) a singlet state and (b) a direct product state as its initial state. We clearly observed a finite probability around the center in the case of the singlet initial state, whereas we did not in the other case of the direct-product initial state. This implies that in the second case, the walker at the origin is completely scattered away by the other incoming walker, while the walker at the origin in the first case partly screens the magnetic impurity, and hence the other walker cannot completely scatter it away. In the future, we aim to propose a multi-dimensional model using the results of Ref. [2] and introduce a quantum active matter in two and three dimensions.

This work is under collaboration with N. Hatano (U. Tokyo), A. Nishino (Kanagawa U.), F. Nori (RIKEN and U. Michigan) and H. Obuse (Hokkaido U. and U. Tokyo).

[1] M. Yamagishi, N. Hatano and H. Obuse, *Sci. Rep.* **14**, 28648 (2024).

[2] M. Yamagishi, N. Hatano, K.-I. Imura and H. Obuse, *Phys. Rev. A* **107**, 042206 (2023).

Three-level Quantum Absorption Refrigerator at Liouvillian Exceptional Points

Jingyi Gao

Department of Physics, the University of Tokyo,
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8574, Japan

and

Naomichi Hatano

Institute of Industrial Science, the University of Tokyo,
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8574, Japan

Quantum thermodynamics, especially quantum absorption refrigerators [1] and non-equilibrium quantum thermal machines [2] are attracting much attention in recent years. In the present research, we focus on the non-equilibrium process of a three-level quantum absorption refrigerator, comprising an internal three-level system with couplings between the neighboring energy levels and three external heat baths with a common dissipation rate; see Fig. 1.

First, we analyze the eigenvalue distribution of the Liouvillian that governs the non-equilibrium dynamics of the system and verify the existence of the second-order and the third-order exceptional points (LEPs). Then, we compare damping of the system state and the heat current at the third-order LEPs and at other points. We thereby verify the critical damping at the third-order LEPs in short- and long-term evolutions.

Second, we also analyze the influence of non-equilibrium process in the three-level quantum absorption refrigerator by comparing the heat extraction from the cold bath among the systems in the steady state, in non-LEP states, and in the third-order LEP states. By selecting proper parameters and the initial state, the non-equilibrium process can improve the performance of the three-level quantum absorption refrigerator. In particular, the LEP-state can help the system absorb much more heat from the cold bath compared to the non-LEP states.

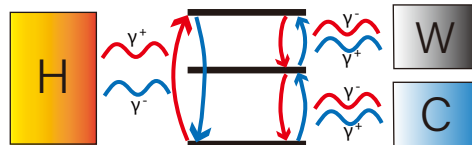


図1 Schematic view of the three-level absorption refrigerator.

[1] Segal, Dvira, *Current fluctuations in quantum absorption refrigerators*, *Phys. Rev. E* **97** (2018) 052145.

[2] Khandelwal, Shishir and Brunner, Nicolas and Haack, Geraldine, *Signatures of Liouvillian Exceptional Points in a Quantum Thermal Machine*, *PRX Quantum* **2** (2021) 040346.

21 金川隼人 (東京大学生産技術研究所)

開放量子系における内的要因による量子反ゼノ効果

Hayato Kinkawa¹ and Naomichi Hatano²

Department of Physics, The University of Tokyo¹,
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo²

Many physicists agree that the exponential decay law describes well experimental results of decay of an excited atom. However, more precise calculations reveal deviations from the exponential decay. For example, it is believed that the survival probability $p(t)$ of the excited state decays quadratically in short time, which causes the quantum Zeno effect; rapidly repeated measurements suppress the decay [1].

We here propose a new type of quantum *anti-Zeno* effect, which we refer to as the intrinsic anti-Zeno effect. Rapidly repeated measurements *accelerate* the decay, and *the excited state immediately decays into the ground state* in the limit of continuous measurements. In our study, we consider a two-level system coupled to a D -dimensional environment with its energy dispersion relation $\omega_{\mathbf{k}} = |\mathbf{k}|^n$. We find $p(t) \sim 1 - ct^{2-D/n}$ with a constant c in short time and that the quantum anti-Zeno effect occurs if $1 < D/n < 2$. We obtain this result by handling the divergence through analytic continuation.

The intrinsic anti-Zeno effect proposed here is physically different from the conventional anti-Zeno effect, which we refer to as the extrinsic anti-Zeno effect (Table 1). The intrinsic one occurs because the decay rate $dp/dt \sim t^{-(D/n-1)}$ diverges at $t = 0$. In the limit of continuous measurement, the survival probability immediately vanishes after $t = 0$. On the other hand, the extrinsic one is considered in systems with the quadratic short-time decay [2]. It happens for a sufficiently long measurement interval for which the decay rate is greater than the exponential decay without measurements. It reverts to the standard Zeno effect in the limit of continuous measurement.

表 1 Comparison of the extrinsic/intrinsic quantum anti-Zeno effect

	extrinsic anti-Zeno	intrinsic anti-Zeno
condition of the measurement interval	sufficiently long	short
decay rate at $t = 0$	0	∞
continuous measurement limit	Zeno	anti-Zeno

[1] E. C. G Sudarshan and B. Misra, *The Zeno's paradox in quantum theory*, *J. Math. Phys* **18** (1977) 756.

[2] A. Chaudhry, *A general framework for the Quantum Zeno and anti-Zeno effects*, *Sci. Rep.* **6** (2016) 29497.