

Quantum Foundations 2024

会場/Venue

芝浦工業大学大宮キャンパスとオンライン
Shibaura Institute of Technology Omiya campus and online

日にち/Date

2024年3月11日から2024年3月12日
From March 11, 2024 to March 12, 2024

主催/Organizer

芝浦工業大学量子情報システム研究室
Shibaura Institute of Technology, [Quantum information 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 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（京大）/Ryo Takakura (Kyoto Univ.)
谷村省吾（名大）/Shogo Tanimura (Nagoya Univ.)
筒井泉（KEK）/Izumi Tsutsui (KEK)
細谷曉夫（東工大）/Akio Hosoya (TIT)
皆川慎太郎（名大）/Shintaro Minagawa (Nagoya Univ.)
李宰河（東大）/Lee Jaeha (UTokyo)

Last Update: 2024年3月8日

目次

メッセージ/Message	3
プログラム一覧/Program at a glance	5
招待講演/Invited talks	7
細谷暁夫 (東京工業大学大学院)	7
弱値と量子アルゴリズムへの応用	7
筒井 泉 (高エネルギー加速器研究機構)	8
素粒子物理と量子基礎の研究について	8
チュートリアル講演/Tutorial	9
高倉 龍 (京都大学基礎物理学研究所)	9
一般確率論と量子論基礎	9
口頭発表/Oral presentations	10
倉持結 (九州大学大学院理学研究院物理学部門)	10
非有界保存量の存在下での射影測定ならびにユニタリーチャンネルに対する Wigner-Araki-Yanase 定理	10
並木亮 (学習院大学)	11
コヒーレント状態による単位作用素の分解の強収束性	11
荒井駿 / Hayato Arai (理化学研究所 量子コンピュータ研究センター 数理量子情報理研白眉研究チーム)	12
状態識別性能に基づく量子論の導出	12
Michele Dall'Arno (Toyohashi University of Technology)	13
The signaling dimension and the no-hypersignaling principle	13
越原 健太 (早大理工)	14
量子熱力学における量子測定とフィードバック制御の効果	14
白井仁人 (一関工業高等専門学校)	15
量子力学に因果観は必要か?	15
田中亜花音 (近畿大学)	16
2次元量子ブラックホールにおけるアイランドと量子収束仮説	16
中田芳史 (京都大学基礎物理学研究所)	17
量子誤り訂正と相補性原理	17
松山健悟 (広島大学大学院 先進理工系科学研究科) (代理: 飯沼昌隆)	18
操作的な初期状態準備によって観測される量子文脈依存性	18
山下秀康 (愛知学院大学)	19
操作的確率論の立場から見た古典-量子関係: 量子化を中心に	19
山本 有理子 (京都大学大学院 工学研究科 原子核工学専攻)	20
量子スピン系における状態空間の次元を削減する粗視化測定による古典化について	20
Shintaro Minagawa (Graduate School of Informatics, Nagoya University)	21

When is Maxwell's demon consistent with the second law?	21
真弓 愛菜 (芝浦工業大学)	22
交換子ノルム不等式に基づく新しい不確定性関係について	22
梅川 舜 (東京大学理学部物理学科)	23
量子有限準位系における擬確率分布	23
藤原 彬嵩 (電気通信大学 大学院情報理工学研究科)	24
量子状態空間上の主ファイバー束を介した計量の双対性について	24
ポスター発表/Poster presentations	25
1 下村拓滋 (affirmativeArchitect)	25
時間の矢はいつ現れるのか?	25
2 平良 敬乃 (東京大学 生産技術研究所)	26
ディラック分散関係を持つ粒子浴のマルコフ性と非マルコフ性	26
3 妹尾祐希 (広島大学 先進理工系科学研究科 高エネルギー物理学研究室)	27
光子の直進性の破れの実証に向けた不確定性限界を超える量子状態の生成準備	27
4 上地将平 (電気通信大学 大学院情報理工学研究科)	28
文字列検索とソートに関する量子アルゴリズム	28
5 児玉悠貴 (広島大学大学院先進理工系科学研究科)	29
光量子回路の多光子統計	29
6 鳥井健成 (京都大学工学研究科原子核工学専攻)	30
検証可能な状態集合による incompatibility の前順序関係と unbiased qubit observable の 組における同値関係	30
7 山岸愛 (東京大学、理研)	31
2次元量子ウォークの提案: 有効 Dirac ハミルトニアンと (高次) トポロジカル相	31
8 石崎 未来 (東京大学)	32
開放量子系のパスの可逆性と不可逆性の研究	32
9 Shoki Koyanagi (Kyoto University)	33
Classical and quantum thermodynamics described as a system–bath model: the dimen- sionless minimum work principle	33
10 柴田 礼 (芝浦工業大学)	34
Bell 非局所性に必要な最小の測定依存性と隠れ度の関係	34
11 丹間 梨温 (埼玉大学)	35
局所的測定従属な理論とベル不等式の破れ	35
12 好村 清貴 (芝浦工業大学)	36
量子同時測定の両立不能性次元の閾値の研究— 半正定値計画問題によるアプローチ	36

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。この研究会は、そうしたニーズを満たすために設立されました。」 [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.” [2]

[1] Quantum Foundations 2024 ウェブサイト <https://qsys.se.shibaura-it.ac.jp/kimura/QFound/index.html> (アクセス: 2024 年 3 月 5 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: March 5, 2024)

プログラム一覧/Program at a glance

3月11日/March 11

3月11日	講演者	タイトル	座長
9:40-10:00	開会		木村
10:00-11:00	細谷暁夫 (招待講演)	弱値と量子アルゴリズムへの応用	飯沼
11:00-11:15	休憩		
11:15-11:45	倉持結(オンライン)	非有界保存量の存在下での射影測定ならびにユニタリーチャンネルに対するWigner-Araki-Yanase定理	
11:45-12:15	並木亮(オンライン)	コヒーレント状態による単位作用素の分解の強収束性	
12:15-13:15	お昼休み(大学生協11:00-14:00)		
13:15-14:15	高倉 龍 (チュートリアル講演)	一般確率論と量子論基礎	李
14:15-14:45	荒井駿 / Hayato Arai	状態識別性能に基づく量子論の導出	
14:45-15:00	休憩		
15:00-15:30	Michele Dall'Arno	The signaling dimension and the no-hypersignaling principle	皆川
15:30-16:00	越原 健太	量子熱力学における量子測定とフィードバック制御の効果	
16:00-18:00 ポスター発表	1. 下村 拓滋	時間の矢はいつ現れるのか？	
	2. 平良 敬乃	ギャップ誘起量子ゼノン効果	
	3. 妹尾 祐希	光子の直進性の破れの実証に向けた不確定性限界を超える量子状態の生成準備	
	4. 上地 将平	文字列検索とソートに関する量子アルゴリズム	
	5. 児玉 悠貴	光子回路の多光子統計	
	6. 鳥井 健成	検証可能な状態集合による incompatibility の前順序 関係と unbiased qubit observable の組における同値関係	
	7. 山岸 愛	2次元量子ウォークの提案: 有効Diracハミルトニアンと(高次)トポロジカル相	
	8. 石崎 未来	開放量子系のパスの可逆性と不可逆性の研究	
	9. Shoki Koyanagi	Classical and quantum thermodynamics described as a system--bath model: the dimensionless minimum work principle	
	10. 柴田 礼	Bell非局所性に必要な最小の測定依存性と隠れ度の関係	
	11. 丹間 梨温	局所的測定従属な理論とベル不等式の破れ	
	12. 好村 清貴	量子同時測定の両立不能性次元の閾値の研究 --- 半正定値計画問題によるアプローチ	
18:10-20:00	懇親会		

3月12日/March 12

3月12日	講演者	タイトル	座長
9:00-10:00	筒井 泉 (招待講演)	素粒子物理と量子基礎の研究について	木村
10:00-10:30	白井仁人	量子力学に因果観は必要か？	
10:30-10:45	休憩		
10:45-11:15	田中亜花音	2次元量子ブラックホールにおけるアイランドと量子収束仮説	
11:15-11:45	中田芳史	量子誤り訂正と相補性原理	
11:45-12:15	飯沼昌隆	操作的な初期状態準備によって観測される量子文脈依存性	
12:15-13:15	お昼休み(大学生協11:00-14:00)		
13:15-13:45	山下秀康	操作的確率論の立場から見た古典-量子関係:量子化を中心に	荒井
13:45-14:15	山本 有理子	量子スピン系における状態空間の次元を削減する 粗視化測定による古典化について	
14:15-14:45	Shintaro Minagawa	When is Maxwell's demon consistent with the second law?	
14:45-15:00	休憩		
15:00-15:30	真弓 愛菜	交換子のノルムに関する不等式と量子物理学への応用	高倉
15:30-16:00	梅川 舜	量子有限準位系における擬確率分布	
16:00-16:30	藤原 彬嵩	量子状態空間上の主ファイバー束を介した計量の双対性について	
16:30-	閉会		飯沼

招待講演/Invited talks

細谷暁夫 (東京工業大学大学院)

弱値と量子アルゴリズムへの応用

量子コンピュータ開発のプロジェクトが進められている。それを使って何をするかが問題であるが、ショアの素因数分解のアルゴリズム以来、画期的なものは見つかっていない。私はその原因の一つが標準的な量子力学の表現の不自然さにあると思う。その代表が測定による波束の収縮だろう。ここでは、等価な内容を自然な言葉に言い換えることを考える。人間に有用な課題は自然な言葉で語られているから。この講演では、測定時点から時間を過去向きに量子状態の変化を記述することを提案する。その目的のためにアハラノフの「弱値」を梃子にして、アルゴリズムの要になる量子もつれ状態を探す。

筒井 泉 (高エネルギー加速器研究機構)

素粒子物理と量子基礎の研究について

非局所実在性や相補性などの量子力学の基礎問題は従来、低エネルギーの光子系を用いて検証されることが多かったが、近年では高エネルギーの素粒子や原子核系における検証実験も試みられるようになってきた。本講演では、CERN での量子もつれした B 中間子対を用いたベル不等式の検証の試みについて述べるとともに、弱値 (Weak Value) に基づく CP の破れや中性子の電気双極子モーメント (EDM) の精密測定の可能性についての最近の研究結果を紹介する。

チュートリアル講演/Tutorial lecture

高倉 龍 (京都大学基礎物理学研究所)

一般確率論と量子論基礎

一般確率論 (General Probabilistic Theories : GPTs) とは操作的に自然な公理のみを課した, 量子論を含むより一般的な物理理論である。近年, 非物理的な Hilbert 空間論を基礎とする量子論の物理的な本質を解明するという基礎的な問題に対し, GPTs という一般的な立場からのアプローチの有用性が盛んに報告されている。本講演では GPTs がどのような意味で量子論より広いのかをその数学的定式化を通して説明し, 量子論の基礎的な問題に対して GPTs の観点から得られている結果を幾つか紹介する。

口頭発表 / Oral presentations

倉持結 (九州大学大学院理学研究院物理学部門)

非有界保存量の存在下での射影測定ならびにユニタリーチャンネルに対する Wigner-Araki-Yanase 定理

Wigner-Araki-Yanase(WAY) 定理は量子測定理論における基本的な結果の一つであり、加法的保存則の下では系の保存量と非可換な射影測定を実装することが不可能であることを主張する。WAY 定理は保存則という基本的な物理法則が実装可能な量子測定に対して制限を与えることを示す重要な結果であるが、既存の WAY 定理の証明は保存量の有界性を仮定するか、または非有界な保存量についての既存の結果でも保存量に追加の仮定を置いており、運動量の保存のような物理的に重要な例について適用することができなかった。本講演では講演者等が最近得た、Yanase 条件下での非有界保存量に対する WAY 定理の証明について紹介する。ここで、Yanase 条件とはプローブ系の測定 POVM がプローブ系の保存量と可換であることを要請する仮定である。また、ユニタリーチャンネルの実装についても同様の WAY 型の定理の証明についても紹介する。それによると保存則下で実装されるユニタリーチャンネル U_S によって系の保存量 L_S は一般に $U^\dagger L_S U = L_S + \gamma I_S$ (I_S は単位作用素, γ は実数) のように定数 γI_S だけシフトする可能性があるが、 $\gamma \neq 0$ となり得るのは系が無限次元でかつ L_S のスペクトルが上方および下方に非有界 (例: 運動量作用素) となる場合に限り、そうでない場合は L_S と U_S は交換する。これらの結果の証明においては、保存量に対応する非有界な自己共役作用素 L_S を直接取り扱わずに対応する有界な 1 パラメーターユニタリー群 e^{itL_S} について考えることで非有界作用素の定義域にまつわる困難を回避し、また Heisenberg 描像における量子チャンネル (数学的には unital completely positive map で記述される) に対する乗法域 (multiplicative domain) の概念を用いる。量子光学系における例として、受動光学素子と光子数計数測定の有限個の組み合わせによっては、直行位相振幅 (消滅作用素 \hat{a} の実部または虚部) の射影測定および平行移動ユニタリー操作 $D(\alpha) = \exp(\alpha\hat{a}^\dagger - \bar{\alpha}\hat{a})$ の誤差のない実装が不可能であることを示す。

Yui Kuramochi and Hiroyasu Tajima, Phys. Rev. Lett. 131, 210201

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.210201>

並木亮 (学習院大学)

コヒーレント状態による単位作用素の分解の強収束性

コヒーレント状態は、量子光学だけではなく、量子力学全般の理論的な道具として広く用いられている。多くの文献において、コヒーレント状態を用いた単位の分解は弱収束の意味で成立すると記されている。具体的には、コヒーレント状態 $|\alpha\rangle$ を用いた単位作用素の分解が

$$I = \pi^{-1} \int |\alpha\rangle \langle \alpha| d^2\alpha, \quad (1)$$

と表現され、積分記号は次式を満たすものと定義される。

$$\langle \psi|\phi\rangle = \pi^{-1} \int \langle \psi|\alpha\rangle \langle \alpha|\phi\rangle d^2\alpha. \quad (2)$$

このように定義すると作用素値の積分を導入しないですむという効用があるだろうが、それ以外に利点があるとはおもえない。有限次元の作用素は行列として要素を全て指定すれば完全に定まるが、無限次元では事情がことなるようである。実際、弱収束は必ずしも強収束を意味しないことがよく知られているはずである。この性質にしたがうと、弱収束の表式 (2) は必ずしも次式の強収束の等式を正当化しないのである。

$$\phi = \pi^{-1} \int |\alpha\rangle \langle \alpha|\phi\rangle d^2\alpha. \quad (3)$$

ここでヒルベルト空間に値を持つ積分はスペクトル分解定理を思い起こさせるのだが、このようなお馴染みな分解が成立しないかもしれないといわれると困りそうである。

スペクトル定理においては、単位の分解は単調増加する射影作用素の族からなり、得られる積分は強収束が保証されている。コヒーレント状態から得られる作用素の族は射影とはならないものの、単調に増加する正作用素を与えるのだから、同様な収束性を示しそうなものである。

故に、強収束により保証される等式 (3) を頻繁に使うかもしれないにもかかわらず、その証明を見たことがないという状況なのである。例外としては、Web 上にみつかると Klauder の講義ノートには強収束することが明記されており、証明方針が示されているのだが、演習問題に付記されているため、そうそう目につかないかもしれない。尚また、作用素代数的な側面が強く、微分積分を多用する量子光学の流儀とは隔たりがあるかもしれない。

このような事情により、強収束の是非についてはっきりさせたほうがよいと思われる。本発表では、コヒーレント状態による単位の分解の強収束性の初等的な証明を示す。Klauder の講義ノートによる別証明および、ノルム収束の非存在証明についても解説する。

<http://arxiv.org/abs/2402.08317>

荒井駿 / Hayato Arai (理化学研究所 量子コンピュータ研究センター 数理量子情報理研白眉研究チーム)

状態識別性能に基づく量子論の導出

量子論の数理モデルを操作的条件によって特徴づけることは、量子論の基礎づけにおいて重要な問題である。近年では、一般確率論 (General Probabilistic Theories) の枠組みでこの問題を取り扱う研究が盛んである。しかし、既存の一般確率論の研究から、具体的な操作の禁止定理 (No-Go Theorem) や情報タスクの限界性能、例えば、No-Cloning 定理や Bell-CHSH 不等式では、標準的な量子論を選び出すことができないことが知られている。

一方で、操作の禁止やタスクの限界性能よりも操作的な解釈が明らかではないような数学的な性質を用いることで、一般確率論で記述される全てのモデルから、量子論のモデルだけを特徴づける方法が知られている。しかし、前者のような、禁止定理やタスクの限界性能による量子論の特徴づけは未解決の問題である。

本研究では、基礎的な情報タスクである 2 状態の識別タスクに注目し、この限界性能によって量子論を一意的に特徴づける。本研究では、識別の誤り確率の下限に注目し、一般確率論のモデルにおける新しい下限を与える。そして、トレースノルムを用いて記述される量子論における下限 (Helstrom Bound) を、特定条件下における量子論以外の全てのモデルが破ることを明らかにし、この事実を応用して量子論の特徴づけを行う。

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.11271>

Michele Dall'Arno (Toyohashi University of Technology)

The signaling dimension and the no-hypersignaling principle

The signaling dimension of a given physical system quantifies the minimum dimension of a classical system required to reproduce all input/output correlations of the given system. Thus, unlike other dimension measures - such as the dimension of the linear space or the maximum number of (jointly or pairwise) perfectly discriminable states - which examine the correlation space only along a single direction, the signaling dimension does not depend on the arbitrary choice of a specific operational task. In this sense, the signaling dimension summarizes the structure of the entire set of input/output correlations consistent with a given system in a single scalar quantity. For quantum theory, it was recently proved by Frenkel and Weiner in a seminal result that the signaling dimension coincides with the Hilbert space dimension.

We present analytical and algorithmic techniques to compute the signaling dimension for any given system of any given generalized probabilistic theory. We prove that it suffices to consider extremal measurements with ray-extremal effects, and we bound the number of elements of any such measurement in terms of the linear dimension. For systems with a finite number of extremal effects, we recast the problem of characterizing the extremal measurements with ray-extremal effects as the problem of deriving the vertex description of a polytope given its face description, which can be conveniently solved by standard techniques. For each such measurement, we recast the computation of the signaling dimension as a linear program, and we propose a combinatorial branch and bound algorithm to reduce its size.

The signaling dimension is multiplicative under system composition in classical theory (by definition) as well as quantum theory (by the aforementioned result by Frenkel and Weiner). We lift such a fact to the level of a principle, that we refer to as the no-hypersignaling principle. Notice that, in contrast with other well known principles - such as no-signaling or information causality - no-hypersignaling constraints time-like correlations, as opposed to space-like ones, and is therefore able to rule out theories that would, for instance, not violate any Bell test. Moreover, the no-hypersignaling principle inherits from the signaling dimension the aforementioned property of being agnostic to any arbitrarily chosen task, that is, it probes the entire set of time-like correlations that a system can achieve.

We apply our results on the signaling dimension to test a completely-positive composition of two square bits (or squits) against the no-hypersignaling principle. In particular, the composition we consider does not include any entangled state, and therefore its time-like correlations cannot violate any Bell test. Nevertheless we show that, while the signaling dimension of a single squit is two, the signaling dimension of such a composition is five, in violation of the multiplicative rule established by the no-hypersignaling principle. This shows that, in the foundational program of reconstructing quantum theory based on the correlations that systems can generate, it does not suffice to consider, as it is the case e.g. in Bell tests, space-like correlations, but it is also necessary to constraint time-like correlations.

This presentation is based on: M. Dall'Arno, A. Tosini, and F. Buscemi, The signaling dimension in generalized probabilistic theories, arXiv:2311.13103. M. Dall'Arno, The signaling dimension of physical systems, Quantum Views 6, 66 (2022). M. Dall'Arno, S. Brandsen, A. Tosini, F. Buscemi, and V. Vedral, No-hypersignaling principle, Phys. Rev. Lett. 119, 020401 (2017).

越原 健太 (早大理工)

量子熱力学における量子測定とフィードバック制御の効果

熱力学における情報の役割が測定とフィードバック制御を行う“Maxwellの悪魔”の熱機関の研究を通じて明らかになるなか、量子系の熱力学における量子測定それ自体の役割にも関心が寄せられている。量子測定は、単に情報を獲得するのみならず、不確定性原理によって被測定系に反跳(擾乱)を引き起こす。特に、量子測定による反跳の効果で量子系にエネルギーを充填・放出することも可能であり、これを積極的に活用する量子熱機関も追究されている。本研究では、量子測定とフィードバック制御を行う様々な量子熱機関において量子測定による反跳がもたらす効果を再考した。量子測定に伴う量子状態遷移の過程を「純粋な量子測定」とフィードバック制御に切り分けて整理することで、純粋に量子測定による効果とフィードバック制御のそれぞれの役割を明らかにした。まず、一般の量子測定過程を記述する枠組みである完全正值インストゥルメントには、量子測定後にフィードバック制御を行う過程と区別がつかない過程も含まれていることに注意する。そこで、一般の量子測定過程を与える測定演算子を極分解することで、純粋に量子測定のみを行う過程と、測定結果に応じて異なるユニタリー操作を追加で行う過程(フィードバック制御)に分解できること [Wiseman 1995; Fuchs and Jacobs 2001; etc.] を指摘する。極分解を通じて純粋な量子測定とフィードバック制御をはっきりと区別することで、以下の量子熱機関の実現にはいずれの場合においても純粋な量子測定後にフィードバック制御を加える必要があることを厳密に証明する: (i) 通常の Clausius 不等式を破る熱量を熱浴から取り出す定常サイクル (Maxwellの悪魔)。 (ii) 量子系へのエネルギー充填量・放出量のユニタリー操作限界 (受動性およびエルゴトロピー限界) を破る多量のエネルギー充填・放出。 (iii) 量子測定による反跳の効果で量子系に供給したエネルギーをユニタリー操作で仕事として取り出す定常サイクル (measurement-powered engine)。

K. Koshihara and K. Yuasa, Phys. Rev. E 106, 024134 (2022); K. Koshihara and K. Yuasa, Phys. Rev. E 107, 064109 (2023).

白井仁人 (一関工業高等専門学校)

量子力学に因果観は必要か？

「ベルの不等式の破れは局所实在論が成り立たないことを意味する。だから、局所性か实在性の少なくともどちらか一方を捨てるしかない」とよく言われる。しかし、因果性を捨てるという選択肢もある。それは（現在の環境条件に基づいて）過去の状態から未来の状態へと時々刻々と決まっていくという微分法の世界観から、過去から未来までの状態の全体が（全体の環境条件に基づいて）決まっているという変分法の世界観への移行である。本発表では、変分法の世界観が奇妙ではなく、最近の実験はむしろそれを支持するよう見えることなどを説明し、因果観を断念することがどういう世界観をもたらすのかについて議論する。

量子力学の諸解釈、白井仁人、森北出版（2022）

田中亜花音 (近畿大学)

2次元量子ブラックホールにおけるアイランドと量子収束仮説

量子の基礎を問う試みの一つに重力の量子化があり、ブラックホール時空はその主要舞台である。一般相対論では重力の引力的性質は、エネルギーの正值性の下での粒子や光の測地線束の収束定理 (Focusing Theorem) に集約される。この定理は、特異点定理やブラックホール熱力学の基礎として、一般相対論の研究に大きく貢献している。しかし、量子効果を考慮すると、一般に収束定理は成り立たない。例えば、ブラックホール熱力学第2法則は量子効果で破綻する。そこで、ブラックホールの面積エントロピーと外部量子場のエントロピーの和として提案された「一般化されたエントロピー」[1] の概念を用いて収束定理を一般化したのが「量子収束仮説 (QFC)」である [2]。これ迄に、量子効果で古典的な収束定理が破れる様々な状況で QFC の成立が証明されている。一方、近年の研究により、ブラックホールの蒸発過程においてホーキング輻射の自由度を宿す「アイランド」が地平面内に形成され得ることが判明し、ブラックホール情報損失問題の解決に向けて大きな進展があった [3]。しかしながら、ブラックホール外部の量子場のエントロピーをエンタングルメント・エントロピーと捉えるとアイランドが形成される Page 時間 [4] 以降は、ブラックホールの面積も量子場のエントロピーも減少する。そのため、QFC も成り立たないと予想される。本研究は、アイランド形成も考慮した動的ブラックホールにおいて QFC が成り立つことを証明する。この目的で4次元球対称ブラックホールでの先行研究 [6] があるが、様々な近似を用いており、特に、時空ダイナミクスに量子効果を取り入れる困難のため、背景時空は人為的模型となっている。そこで本研究では、ある種の2次元量子重力理論においてはホーキング輻射で蒸発する動的ブラックホールを解析的に構築できることに着目し [6]、2次元量子ブラックホールにおいて、アイランドと QFC を考察する。まず、QFC の基本要素である量子膨張率 (Quantum Expansion) を2次元で適切な定義を与え、次にアイランド形成前と形成後それぞれにおいて QFC が成り立つことを解析的に証明する [7]。2次元量子ブラックホールは、高次元重力のある種の極限として得られる事が分かっている。本研究成果の一般次元での意義についても考察したい。

[1] J.D. Bekenstein. Phys. Rev. D7(1973)2333 [2] R. Bosso, Z. Fisher, S. Leichenauer, and A.C. Wall, Phys. Rev. D93(2016)064044 [3] G. Penington, JHEP 09(2020)002, A. Almheiri, et al JHEP 12 (2019) 063 [4] D.N. Page, Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 3743 [5] Y. Matsuo, JHEP12 (2023) 050 [6] J.G. Russo, L. Susskind, and L. Thorlacius, Phys. Rev. D46 (1992) R1005 [7] A. Ishibashi, Y. Matsuo, A. Tanaka, work in progress”

中田芳史 (京都大学基礎物理学研究所)

量子誤り訂正と相補性原理

量子誤り訂正符号は量子情報をノイズから守るための手法である。その具体例の多くはスタビライザー符号と呼ばれるものだが、それらの符号では量子情報を「パウリ X 基底で定まる古典情報」と「パウリ Z 基底で定まる古典情報」に分解して符号化・復号化しており、相補的な基底をうまく活用することで量子誤り訂正を実現している。本講演では、(スタビライザー符号とは限らない) 一般の量子誤り訂正符号においても相補的な基底が本質であることを述べる。具体的には、「ノイジーな量子状態から量子情報を復元する量子チャンネル」を「二つの基底で定まる二種類の古典情報を復元する POVM 二つ」から構成し、その復元エラーが POVM 二つの復元エラーと、二つの基底の相補性の度合いで与えられることを示す。今回の結果は「相補的な基底で定まる二種類の古典情報を復元できる状況であれば、量子情報も復元できる」ことを意味しており、量子情報の復元という文脈における相補性の役割を示唆するものである。

arXiv:2210.06661

松山健悟 (広島大学大学院 先進理工系科学研究科) (代理：飯沼昌隆)

操作的な初期状態準備によって観測される量子文脈依存性

Bell の不等式の破れが実証されて以降、自然が持つ本質的な性質の 1 つとして量子文脈依存性が注目されているが、それを記述するための数学的形式と実験的操作の間の関係がほとんど理解されていないのが現状である。その原因の 1 つとして、初期状態準備が量子状態に基づいていることが挙げられる。実験的に直接観測することができない量子状態ではなく、直接観測することができる測定結果に基づいて、量子文脈依存性を示し得る初期状態の準備をすることができれば、量子文脈依存性とそれを観測するための操作に対する理解が進むことが期待される。

Frauchiger と Renner は測定結果に基づいた初期状態準備から量子力学と矛盾する結論が得られるような逆説を提唱した [1]。この逆説では、二人の観測者がそれぞれ二準位系の物理量 \hat{F} と \hat{W} を測定する。それぞれの物理量の値は $f \in \{0, 1\}$ および $w \in \{a, b\}$ である。さらに、非局所的な物理量が同時に測定されることによって得られる結合確率は次の 3 つの決定論的条件、(1) $P(f_1 = 0, w_2 = a) = 0$ 、(2) $P(w_1 = a, f_2 = 0) = 0$ 、(3) $P(w_1 = a, w_2 = a) = 0$ 、を満たすものとする。ここで f, w に付く下付き文字は二人の観測者を区別するためのラベルである。(1) と (2) の条件は、片方の観測者が $w = a$ を得たならば、もう片方の観測者は確率 1 で $f = 1$ を得ることを意味する。しかし (3) の条件は、二人の観測者が同時に $w = a$ を得ることはないことを示唆しているため、 $f = 1$ が同時に得られることはないはずである。実際の実験結果では、このような予測が正しくないことが実証されているが、量子力学に基づいて初期状態準備を行っているため、量子文脈依存性との関係は不明確である [2]。このような背景から、我々の理論的な研究では、上記の異なる測定の文脈で得られる決定論的条件の間の論理的な関係を探究した [3]。

実際の実験では、実験的な不完全性によって、確率が 0 になることを要求する上記の 3 つの決定論的条件を実現することは容易ではない。したがって、本研究では 3 つの決定論的条件の間の文脈的な関係に着目し、3 つの物理的条件を操作的に最適化する方法を実証する。具体的には、量子もつれの度合いが可変な偏光のもつれ合い光子対光源を用意し、2 つの測定系に対して局所的な直線偏光の回転操作を可能とする光学素子を導入する。このように非局所的な量子もつれの度合いと局所的な偏光の角度を連続的な変えることができる状況を実現することで、3 つの物理的条件を最適化することが可能となる。

本研究の結果は、操作的に課された 3 つの物理的条件を同時に満たす初期状態が、非局所的な量子もつれの度合いと局所的な直線偏光の度合いのバランスが取れた状況で、最も強く量子文脈依存性が現れることを示している。

[1] D. Frauchiger and R. Renner, “Quantum theory cannot consistently describe the use of itself,” *Nat. Commun.* 9, 3711, (2018). [2] M. Proietti, A. Pickston, ””Experimental test of local observer independence,”” *Sci. Adv.* 5, 9, eaaw9832 (2019) [3] M. Ji and H. F. Hofmann, “Characterization of the non-classical relation between measurement outcomes represented by non-orthogonal quantum states,” *Phys. Rev. A*, Vol. 107, 022208, (2023).

山下秀康 (愛知学院大学)

操作的確率論の立場から見た古典-量子関係：量子化を中心に

操作的確率論の立場から見た古典-量子関係：量子化を中心に ” 古典力学系の量子化に関する一般的な数学的理論には、幾何学的量子化・変形量子化・経路積分量子化 (e.g. Feynman – Kac 公式) 等がある。逆に、量子系から古典極限を経て古典系を得る過程を厳密に定式化しようとする理論もある。他方、近年非常に盛んに研究されるようになった一般確率論 (GPT) や操作的確率論 (OPT) は、おおまかに言えば、古典と量子の両方を含む一般的な確率論的構造の把握を目指すものである。よって古典-量子関係を論ずる量子化/古典極限の理論の概念的基礎に GPT や OPT を置くのは自然な発想であると思われる。しかし、その発想に基づく研究は極めて少ないようである。ただし、近年の GPT/OPT 文献があまりに膨大なため、私が知らない既成研究が多く存在する可能性がある。今回の集会に多く参加されるとと思われる GPT/OPT の専門家の方々のご教示をいただきたいところである。今回の発表は OPT を基礎として量子化/古典極限の理論を定式化しようとする試みの出発点である。

有限自由度の古典力学的相空間は一般に (有限次元) シンプレクティック多様体で表されるが、その特殊な場合として K^* ähler 多様体がある。コンパクト K^* ähler 多様体の量子化については最近 20 年間のうちに比較的解明されている。コンパクト K^* ähler 多様体を量子化した量子状態空間 (Hilbert 空間) は有限次元になるから数学的に易しいのは当然とも思えるが、実際のところコンパクト K^* ähler 多様体の最も簡単な例である 2 次元球面 S^2 の場合ですら未解決問題が残っている。コンパクト K^* ähler 多様体以外の場合、特に非コンパクト多様体については未解明部分が多い。

量子化/古典極限の研究に OPT を導入することが上記の問題の解決にどれだけ寄与しうるか明らかでない。が、量子化/古典極限という概念が一般には定義すら困難であり、よって量子化/古典極限が存在するか否かという問題設定自体が明確でない現状では、一旦発想を転換して OPT による概念的明瞭化を図り、問題を整理することは十分に有意義であると思われる。

今回の発表では時間の制約もあり S^2 だけを想定する。ここで用いる “OPT” は、(近年流行のものとはだいぶ趣が異なり) Devies-Lewis より前の Foulis(1960), Pool(1968) に遡る古い発想に基づく。 S^2 上の Borel 集合全体はブール代数を成し、それを測度 0 の Borel 集合全体で割った商ブール代数 \mathcal{B} は完備ブール代数となる。 \mathcal{B} の各元を射影的測定操作と解釈すると、 $A, B \in \mathcal{B}$ の操作としての合成は $AB := A \wedge B$ であり、この積のもとで \mathcal{B} は可換半群となる。 \mathcal{B} 上の確率論とは古典的な確率論に他ならない。次に \mathcal{B} を非可換化する。 \mathcal{B} に 1 個の新たな射影元 ε (単なる形式的記号と見てよい) とその補元 ε' を追加し、 $\mathcal{B} \cup \{\varepsilon, \varepsilon'\}$ から「自由に」生成される非可換半群 \mathcal{G} を考えるのである。半群 \mathcal{G} 上での確率測度を、写像 $\mathbb{P} : \mathcal{G} \rightarrow [0, 1]$ で加法性をみたすものと定義したいが、 \mathcal{G} には加法がないためうまくいかない。そこで \mathcal{G} を環あるいは実代数や複素代数 \mathcal{A} に拡張して、 \mathcal{A} の中で \mathcal{G} の適切な拡大半群 $\hat{\mathcal{G}}$ ($\mathcal{G} \subset \hat{\mathcal{G}} \subset \mathcal{A}$) を考え、確率測度 $\mathbb{P} : \hat{\mathcal{G}} \rightarrow [0, 1]$ を考える。しかし、古典的な確率の加法性 (の類似物) だけからは $\hat{\mathcal{G}}$ 上の有意義な確率論が展開できそうにない。そこで, Sorkin (1994) (see also Barnum-Müller-Ududec (2014), Müller (2019)) によって強調された「確率の Sorkin 加法性」に着目する。Sorkin 加法性は (古典的加法性とは違って) 非自明かつ非直観的な法則だが、量子と古典の両方で成り立ち、古典-量子関係を論じる上で本質的な役割を果たすと考えられる。

S^2 の量子化は加算無限個あり、それらは $SU(2)$ の既約表現に対応する。その各々を $\hat{\mathcal{G}}$ 上の Sorkin 確率測度として表現する。

D. J. Foulis (1960), “Baer *-semigroups”, Proc. Amer. Math. Soc. 11 (1960), pp. 648-654. J. C. T. Pool (1968), “Baer *-Semigroups and the Logic of Quantum Mechanics”, Commun. Math. Phys. 9 (1968), pp. 118-141. R. D. Sorkin (1994). “Quantum mechanics as quantum measure theory”. Mod. Phys. Lett. A, 9:3119 – 3128, 1994. arXiv:gr-qc/9401003. H. Barnum, M. P. Müller, and C. Ududec (2014), “Higher-order interference and single-system postulates characterizing quantum theory”, New J. Phys. 16 (2014), pp. 123029. arXiv:1403.4147. M. P. Müller (2021), “Probabilistic Theories and Reconstructions of Quantum Theory” (Les Houches 2019 lecture notes), SciPost Phys. Lect. Notes 28 (2021). arXiv:2011.01286.

山本 有理子 (京都大学大学院 工学研究科 原子核工学専攻)

量子スピン系における状態空間の次元を削減する粗視化測定による古典化について

我々が暮らしているマクロな世界では、物体の運動は古典論によって記述される。一方で、そのマクロな世界を構成しているミクロな物質の運動は量子論によって記述される。これら古典論と量子論は数学的枠組みも物理的帰結も大きく異なっており、ミクロな世界では我々がマクロな世界で培った直感では理解できないような現象が許されている。では、どのような条件が満たされる場合に、どのようにして量子系は量子性を失い古典化を示すのだろうか。

その一つの答えとして、粗視化測定 (coarse-grained measurement) と呼ばれる理論がある (Kofler & Brukner, 2007)。この粗視化測定の理論では「分解能が低いために全ての情報を正確に読み取ることができない測定器」を考慮することにより物理量に制限が与えられ、この分解能の低さにより、系が大きい場合に量子性が観測できずに古典化すると主張されている。近年では、粗視化測定における粗視化の操作は次元を削減するような量子チャンネル $\Lambda: \mathcal{L}(\mathcal{H}_D) \rightarrow \mathcal{L}(\mathcal{H}_d)$ ($d < D$) であると考えられている (Duarte et al., 2017)。ここで、 \mathcal{H}_n は n 次元の Hilbert 空間、 $\mathcal{L}(\mathcal{H}_n)$ は \mathcal{H}_n に作用する線形作用素全体からなる集合である。

本発表ではスピンの大きさによって系の大きさを表せる場合の粗視化された物理量の非自明な例を紹介する。そして、その粗視化測定の例により「巨視的重ね合わせ状態である cat state が観測されないこと」、「粗視化された物理量が同時測定可能であること」、「Leggett-Garg 不等式 (Leggett & Garg, 1985) を満たすこと」の3つを示すことで量子性の消滅を確認する。

J. Kofler and Č. Brukner, Phys. Rev. Lett. 99, 180403 (2007). C. Duarte, G. D. Carvalho, N. K. Bernardes, and F. de Melo, Phys. Rev. A 96, 032113 (2017). A. J. Leggett and A. Garg, Phys. Rev. Lett. 54, 857 (1985).

Shintaro Minagawa (Graduate School of Informatics, Nagoya University)

When is Maxwell's demon consistent with the second law?

As a model of Maxwell's demon [1], feedback control and erasure protocols have been studied to investigate the relationship between thermodynamics and information processing, for example, Refs. [2, 3, 4]. The community has reached the consensus that Maxwell's demon and the second law of thermodynamics can coexist harmoniously. This coexistence is attributed to the fact derived by Refs. [2, 3, 4] that the advantage gained by the feedback control is counterbalanced by the expenses associated with measuring and resetting the demon's memory to its initial state, or in other words, erasure. These findings are collectively known as the second laws of information thermodynamics. However, these previous works [2, 3, 4] made some assumptions, particularly regarding the feedback process and the measurement performed on the demon's memory. Thus, the currently known second law of information thermodynamics is not universally applicable, and its validity range remains unclear. This presentation addresses this gap by precisely deriving a condition of quantum feedback control and erasure protocols consistent with the second law of thermodynamics overall. We conclude that the second law of information thermodynamics is universally valid for any quantum feedback control and erasure protocol, irrespective of the measurement process involved, as long as the protocol is consistent with thermodynamics. Moreover, our analysis can reproduce previous results [2, 3, 4] with fewer assumptions. This abstract and presentation are based on Ref. [5].

[1] J. C. Maxwell, *Theory of heat* (Appleton, London, 1871) [2] T. Sagawa and M. Ueda, Second law of thermodynamics with discrete quantum feedback control, *Phys. Rev. Lett.* 100, 080403 (2008). [3] T. Sagawa and M. Ueda, Minimal energy cost for thermodynamic information processing: Measurement and information erasure, *Phys. Rev. Lett.* 102, 250602 (2009). [4] T. Sagawa and M. Ueda, Erratum: Minimal energy cost for thermodynamic information processing: Measurement and information erasure [*Phys. Rev. Lett.* 102, 250602 (2009)], *Phys. Rev. Lett.* 106, 189901 (2011). [5] S. Minagawa, M. H. Mohammady, K. Sakai, K. Kato, and F. Buscemi, Universal validity of the second law of information thermodynamics, arXiv: 2308.15558 (2023).

真弓 愛菜 (芝浦工業大学)

交換子ノルム不等式に基づく新しい不確定性関係について

交換子のノルムに関して, Böttcher-Wenzel 不等式が成り立つことが知られている [1]. 本研究では正値行列に依存するノルムを導入し, それを使用した Böttcher-Wenzel 不等式の一般化をいくつか考える [2]. これら不等式のタイトな予想は数値最適化により導き, $d=2$ や特別な行列を用いた場合においては厳密な証明も得られた. さらに, それぞれの不等式について, 量子開放系, 不確定性関係への応用ができることを示した. 特に, 本研究で新しく導いた不確定性関係は, 非可換性を起源とする新たな不確定性を考慮したものであり, Robertson 不等式や Schrödinger 不等式よりも厳密な関係を与えることがわかる [3],[4].

[1] A. Böttcher, D. Wenzel, *Linear Algebra Appl.* 429 (8) (2008).

[2] A. Mayumi, G. Kimura, H. Ohno, D. Chruscinski, Böttcher-Wenzel inequality for weighted Frobenius norms and its application to quantum physics (2024), arXiv:2403.04199.

[3] A. Mayumi, G. Kimura, H. Ohno, D. Chruscinski, (in prep.)

[4] A. Mayumi, J. Lee, G. Kimura, (in prep.)

梅川 舜 (東京大学理学部物理学科)

量子有限準位系における擬確率分布

量子有限準位系における擬確率分布

東大理^A, 東大生研^B

梅川 舜^A, 李 宰河^B, 羽田野 直道^B

量子論においては、複数の互いに非可換な物理量の組についての同時確率分布を定めることは一般にはできない。しかし、確率が負値や複素数値を取ることを許容すれば、その拡張概念である「擬(同時)確率分布」を定義できる。擬確率分布の定義は一意ではなく、Wigner 分布や Kirkwood–Dirac 分布など、歴史的には様々なものが提唱されてきた。近年、李と筒井によってそれらを統一的に扱う枠組みが構築された [1,2]。

本研究では、上述の一般的枠組みの下、二準位系や三準位系を中心に有限準位系における様々な擬確率分布の性質を比較し、とりわけ次の二つの観点から Kirkwood–Dirac 分布が望ましい性質を持つことを示した [3]。

量子論における物理量の「取り得る値」は、これに対応する演算子のスペクトル値に限られる。そのため、通常の同時確率分布との類似性の観点からは、擬確率分布も各物理量のスペクトルの直積集合に台を持つことが望ましい。本研究では、そのような性質を満たすものは、実質的には Kirkwood–Dirac 型のものに限られることを示した。

また、少数個の物理量についての擬確率分布によって量子状態を忠実に表現 [1,2] できるかどうかという点については、分布の虚部の存在が重要であることがわかり、その点でも Kirkwood–Dirac 分布の有用性が判明した。

[1] J. Lee and I. Tsutsui, Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 052A01 (2017)

[2] J. Lee and I. Tsutsui, Springer Proc. Math. Stat. 261, 195 (2018)

[3] S. Umekawa, J. Lee, and N. Hatano, Prog. Theor. Exp. Phys. 2024, 023A02 (2024)

藤原 彬嵩 (電気通信大学 大学院情報理工学研究科)

量子状態空間上の主ファイバー束を介した計量の双対性について

Uhlmann は、混合状態の幾何学的位相の定式化に際し、量子状態の純粋化全体をファイバーとする量子状態空間上の主ファイバー束を構成した (Uhlmann, 1986, 1991). 底空間上の曲線の全空間への持ち上げのうち、曲線に沿った接ベクトルの左表現が底空間の対称対数微分 (Symmetric Logarithmic Derivative, SLD) となるような持ち上げを考え、それを純粋化に用いた参照系の状態空間に射影すると、曲線に制限した底空間上の SLD 計量と参照系の状態空間上の右対数微分 (Right Logarithmic Derivative, RLD) 計量が一致することが知られている (Matsumoto, 2005). これを SLD 計量と RLD 計量の双対性という. ここで、量子操作に関する単調性を満たす量子状態空間上の計量を単調計量という. 量子状態空間上の単調計量は無数に存在し、作用素単調関数と 1 対 1 に対応する (Petz, 1996). そこで本研究では、同じ枠組みのもと、双対性が成り立つような SLD 計量と RLD 計量以外の単調計量の組を調査した. その結果、SLD 水平持ち上げにより計量の双対性が成り立つための必要十分条件と、その条件を満たす単調計量の組が SLD 計量と実 RLD 計量の組のみであること、また互いに双対な作用素単調関数に対応する単調計量の双対性が成り立つための十分条件を得た.

ポスター発表/Poster presentations

ポスター発表の概要は登録順です。

1 下村拓滋 (affirmativeArchitect)

時間の矢はいつ現れるのか？

次の引用を参照。 <http://manmodelmarketing.com/blog/5798.html>

次の引用を参照。 <http://manmodelmarketing.com/blog/5798.html>

2 平良 敬乃 (東京大学 生産技術研究所)

ディラック分散関係を持つ粒子浴のマルコフ性と非マルコフ性

環境に減衰する粒子の時間発展は一般的にシュレディンガー方程式から環境系の自由度を積分した線形微積分方程式で求められます。このため指数関数減衰からのズレが短時間領域では2次の冪減衰となり量子ゼノ効果 [1] を引き起こし、長時間では冪的に増幅と減衰を繰り返すロングテール [2] となります。全時間で指数関数減衰する時間発展は半群性を満たすため一般的にマルコフ過程と言います。本講演では短・長時間での指数関数減衰からのズレを非マルコフ過程と呼びます。

本講演では2準位系にディラック分散関係を持つ粒子浴を考えます。このモデルでは粒子浴のディラックギャップ m とスペクトル上限 L 、下限 $-L$ の二つのパラメーターを調整する事でスペクトル構造を操作することができます。一般的に全系のハミルトニアンが \mathbb{R} でない場合でのみ非マルコフ性が見えることが知られていますが [3]、具体的なスペクトル構造と非マルコフ性の関連性はこれまで十分に議論がなされてきていませんでした。この模型ではスペクトルの上限下限とギャップという二つの構造と非マルコフ性の関連性に焦点をあて、その短時間・長時間での振る舞いを調べました。結果として、『スペクトルの上限と下限は短時間での非マルコフ性』、『ギャップ構造は長時間での非マルコフ性』に寄与していることが明らかになりました。さらにギャップが開く事により粒子が完全に減衰せず、束縛状態が生じることも確認できました。

[1] C. Chiu, E. Sudarshan, and B. Misra. Time evolution of unstable quantum states and a resolution of Zeno's paradox. Phys. Rev. D, 16(2):520 – 529, 1977.

[2] Khalfin. Contribution to the decay theory of a quasi-stationary state. Sov. Phys. JETP, 6(6):1053 – 1063, 1958.

[3] Misra and E. G. Sudarshan. The Zeno's paradox in quantum theory. J. Math. Phys, 18(4):756 – 763, 1977.

3 妹尾祐希 (広島大学 先進理工系科学研究科 高エネルギー物理学研究室)

光子の直進性の破れの実証に向けた不確定性限界を超える量子状態の生成準備

古典力学において、粒子は確定した位置と運動量を持ち、自由空間中では慣性の法則にしたがって等速直線運動をする。一方量子力学においては、粒子の位置は確率分布としてしか記述されず、測定を行うまで値は定まらない。さらに、位置と運動量は非可換であるので、異なる時刻の位置も同時に定まらない。そのため、量子論的な粒子がどのように伝播するのか、その物理的視点は大変興味深い。この点について Hofmann により、量子論的な粒子が直進しないことを示す実験が提案された。提案では位置の幅を L 以下に制限した状態と、運動量の幅を B 以下に制限した状態の重ね合わせ状態を考える。二つの状態は非直交なので、両方の条件を有限の確率で同時に満たし得る。ここで $LB < \hbar$ という不確定性限界を超えるような位置と運動量の同時制御を行った場合、初期状態の位置分布と運動量分布、時間発展後の位置分布の測定結果は古典力学に矛盾し、 $LB \simeq 0.024\hbar$ ではそれが最も顕著に現れると、理論的に予想される。本研究の目的は単一光子を用いた実験により光子の直進性の破れを実証することである。その準備として今回は $LB \simeq 0.03\hbar$ を満たすような量子状態を生成するため、サニャック干渉計の設計と調整、コヒーレント光による状態の生成と評価を行い、おおむね理論に一致する結果を得た。また、理論に合わない部分についてその原因を考察し、今後の単一光子を用いた実験に向けて改善すべき点を検討した。

[1] Holger F. Hofmann, Quantum interference of position and momentum: A particle propagation paradox, *Phys. Rev. A* 96, 020101(R), (2017). [2] Takafumi Ono, Nigam Samantarray, and John G. Rarity, Controlling and measuring a superposition of position and momentum, arXiv:2207.07270v1[quant-ph], (2022).

4 上地将平 (電気通信大学 大学院情報理工学研究科)

文字列検索とソートに関する量子アルゴリズム

長大なテキストから特定の文字列を高速に検索するためには、テキストを工夫して保存することが必要であり、接尾辞配列 (SA, Suffix Array) やその性質を利用したデータ構造がよく利用されている。Burrows-Wheeler 変換 (BWT, Burrows-Wheeler Transform; Block Sorting) は接尾辞配列から自然に導かれるアルゴリズムであり、元のテキストと 1 対 1 の対応をとりながら、より圧縮に向けた文字列へと変換する。BWT をウェーブレット木やウェーブレット行列を用いてハフマン木による圧縮を行うことで、実用上最も高速な圧縮全文検索である FM-index が実現できる。量子計算においては、Grover のアルゴリズムを用いた全文検索が複数提案されているが、いずれも量子状態を壊してしまうことと量子状態生成にかかる計算量に問題を抱えていた。2023 年末には古典アルゴリズムと上手く組み合わせることで文字列検索を高速化する手法が提案された。本研究では、量子ランダムアクセスメモリ (QRAM, Quantum Random Access Memory) 上で量子比較回路を用いて量子マージソート (QMS, Quantum Merge Sorting) を量子文字列に適用することで、量子接尾辞配列 (QSA) や量子 Burrows-Wheeler 変換 (QBWT) を作成し、量子状態を破壊することなく高速な文字列操作を可能とする。また、QSA や QBWT に対して量子タイプ測定を用いることで、測定によって量子状態をほとんど壊すことなくクエリ長 m に対し $O(m)$ 時間で行えることを示した。本研究では文字列に対する全文検索のみを扱うが、データ列に対して特定の条件に一致する部分または要素のみを高速に抜き出し、加工ないしは直接利用することは汎用性の高い操作である。

5 児玉悠貴 (広島大学大学院先進理工系科学研究科)

光量子回路の多光子統計

近年、量子コンピュータをはじめとする様々な量子技術が急速に発展している。特に、光子は光量子コンピュータなどの技術に応用できる重要な資源として注目を集めている。これは、多光子状態が量子力学特有の性質であるエンタングルメントを生成するのに適しているからである。エンタングルメント状態にある光子を利用すると、光量子回路で制御し干渉させることによって今までの古典コンピュータでは解くことができない特定の問題に対しても効率的な解法を提供することが期待されている。この多光子干渉には Hong-Ou-Mandel 効果 (HOM 効果) という我々の直観では理解しがたい干渉効果が存在する。多光子干渉がほかの量子干渉と異なるところは、同種粒子が区別できないことに起因している。光子はボソンであり、位置の入れ替えに対して状態が変化しない特性を持っている。この特性が光量子回路内の光子の干渉をより複雑にする。HOM 効果も、2つの光子のたどってきた経路が違った場合でも光子が同種粒子であることにより、出力の状態が同じ状態を示すので干渉を引き起こす。しかし、HOM 効果は一つのビームスプリッター上で起こる局所的な効果なので多光子干渉の物理的プロセスを考えるのは難しい。本研究では干渉計内の光子の物理的プロセスを明らかにするため、近年の研究により考案されたフィードバック補償法を用いる。この方法を用いると、直接光路を測定するのではなく、その揺らぎを測定することで干渉結果を得ながら光路を評価することができる。そしてこの時の揺らぎは小澤の誤差に一致する。このフィードバック補償法を、2つの光子の交換によって起こる干渉計に適応すると、光子の干渉計内の特性を明らかにすることができる。今回私が用いた干渉計では2つの光子はちょうど半分に分割し、干渉後の光子は入力された光子のちょうど半分ずつによって構成されていることが明らかとなった。

[1] C. K. Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel, Phys. Rev. Lett. 59, 2044 (1987). [2] Holger F. Hofmann Phys. Rev. Research 3, L012011 (2021). [3] H. F. Hofmann, T. Matsushita, S. Kuroki, and M. Iinuma, Quantum Stud.: Math. Found. 10, 429-437 (2023).

6 鳥井健成 (京都大学工学研究科原子核工学専攻)

検証可能な状態集合による incompatibility の前順序関係と unbiased qubit observable の組における同値関係

量子論において、複数の操作を同時に行えない性質のことを incompatibility という。ある量子系に対する複数の操作は、任意の状態に対するそれらの操作がある 1 つの操作の周辺化によって得られるとき compatible である、そうでないとき incompatible であるという。例えば、同時測定不可能性は複数の操作がいずれも測定である場合の incompatibility である。先行研究では incompatibility を検証に使える状態が限られた場合へ拡張し、状態空間の部分集合 S_0 によって incompatibility が検証される場合にそれらの操作は S_0 -incompatible であり、検証されない場合は S_0 -compatible であるとした。また、2 つの操作の組 $A = \{A_1, A_2, \dots\}$, $B = \{B_1, B_2, \dots\}$ について、状態空間の任意の部分集合 S_0 に対して「 A が S_0 -compatible ならば B も S_0 -compatible」が成り立つとき $B \leq_{incomp} A$ とする前順序関係が導入された。さらに、この前順序関係に基づいて、 $A \leq_{incomp} B$ かつ $B \leq_{incomp} A$ であるとき $A \sim B$ とする同値関係も導入された。

本研究では簡単な場合として、系が qubit 系、操作の組が unbiased qubit observable の組 (A^a, A^b) , (A^c, A^d) であるときを考え、前述の同値関係がどのような組に対して成り立つかを調べた。Unbiased qubit observable A^a は、 $A^a(\pm) = (\mathbf{I} \pm \mathbf{a} \cdot \boldsymbol{\sigma})/2$ ($\mathbf{a} \in \mathbf{R}^3$, $|\mathbf{a}| \leq 1$, $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ は Pauli 行列) によって構成される POVM で表される。よって、 $(\mathbf{c}, \mathbf{d}) = (\pm \mathbf{a}, \pm \mathbf{b})$, $(\pm \mathbf{b}, \pm \mathbf{a})$ (複合任意) であるとき、unbiased qubit observable の組 (A^a, A^b) と (A^c, A^d) は本質的に同じ組であるから $(A^a, A^b) \sim (A^c, A^d)$ である。これを自明な同値関係と呼ぶ。まず、 $(A^a, A^b) \sim (A^c, A^d)$ となると Bloch 球内において \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} , \mathbf{d} が同一平面上に存在することを示した。続いて特に $|\mathbf{a}| = |\mathbf{b}| = |\mathbf{c}| = |\mathbf{d}|$ かつ \mathbf{a} と \mathbf{b} , \mathbf{c} と \mathbf{d} のなす角が等しいときを考え、このとき同値関係 $(A^a, A^b) \sim (A^c, A^d)$ が成り立つ非自明な組は存在しないことを示した。さらにこの系として、 $|\mathbf{a}| = |\mathbf{b}| \geq |\mathbf{c}| = |\mathbf{d}|$ で \mathbf{a} と \mathbf{b} , \mathbf{c} と \mathbf{d} のなす角が等しい場合や、 $|\mathbf{a}| = |\mathbf{b}| \geq |\mathbf{c}| \geq |\mathbf{d}|$ で \mathbf{a} と \mathbf{b} , \mathbf{c} と \mathbf{d} のなす角が等しい場合にも同値関係が成り立つ非自明な組が存在しないことも示される。

本講演では、以上の内容について先行研究のレビューや研究結果の紹介を行う。”

T. Heinosaari, T. Miyadera, and R. Takakura: “Testing incompatibility of quantum devices with few states”, Phys. Rev. A.104, 032228 (2021). 今村領太郎: 「検証に必要な状態集合に基づく同時測定不可能性における順序関係」, 京都大学工学研究科修士論文 (2023).

7 山岸愛 (東京大学、理研)

2次元量子ウォークの提案: 有効 Dirac ハミルトニアンと (高次) トポロジカル相

2次元量子ウォークの提案: 有効 Dirac ハミルトニアンと (高次) トポロジカル相

東大理^A, 理研^B, 東大生研^C, 北大工^D

山岸 愛^{A,B}, 羽田野 直道^C, 井村 健一郎^C, 小布施 秀明^{D,C}

Two-Dimensional Quantum Walk: Effective Dirac Hamiltonian and Its (Higher-Order) Topological Properties

^ADept. of Phys., U. Tokyo, ^BRIKEN, ^CIIS, U. Tokyo, ^DDept. of Appl. Phys., Hokkaido U.

Manami Yamagishi^{A,B}, Naomichi Hatano^C, Ken-Ichiro Imura^C and Hideaki Obuse^{D,C}

2次元 Dirac ハミルトニアンを有効ハミルトニアンとする 2次元離散時間量子ウォークのモデル [1] を提案し、その振舞とトポロジカルな性質を議論する。離散時間量子ウォークとは古典 (確率論的) ランダムウォークの量子版であり、格子上を波動関数が決定論的に時間発展する。これまで、2次元量子ウォークとしては、量子輸送の観点から 2自由度 Dirac 方程式と対応づけられるモデルがいくつか提案されていたが、2次元 4自由度の Dirac 方程式と対応づけられるモデルはなかった。

我々は、時空間連続極限での有効ハミルトニアンが 2次元 4自由度の Dirac ハミルトニアン

$$\begin{aligned} H_D^{(2)} &:= H_{D_x} \otimes \tau^0 + \sigma^x \otimes H_{D_y} \\ &:= (\epsilon\sigma^z p_x + m_x(x)\sigma^y) \otimes \tau^0 + \sigma^x \otimes (\epsilon\tau^z p_y + m_y(y)\tau^y). \end{aligned}$$

となるような量子ウォークのモデル [1] を提案する。ここで $\{\sigma^x, \sigma^y, \sigma^z\}$ と $\{\tau^y, \tau^z\}$ はそれぞれ Pauli 行列で、 τ^0 は単位行列である。さらに、Dirac 方程式と Schrödinger 方程式の対応関係より、2次元調和振動子ポテンシャル下の運動を量子ウォークで再現する。量子ウォーカーの位置の期待値の時間発展は 2次元調和振動子ポテンシャルによる束縛運動に収束することが確認できる。また、Dirac ハミルトニアンの質量項 $m_x(x)$ に比例する量子ウォークのパラメータ $\theta_x(x)$ を x の値に応じてステップ関数的に変化させると、質量項 $m_y(y)$ に比例するパラメータ $\theta_y(y)$ の設定に応じてエッジ状態や (2次元) コーナー状態が出現する。

[1] M. Yamagishi, N. Hatano, K.-I. Imura and H. Obuse, Phys. Rev. A **107**, 042206 (2023). [2] R. Jackiw and C. Rebbi, Phys. Rev. D **13**, 3398 (1976). [3] S. Hayashi, Commun. Math. Phys. **364**, 343 (2018).

8 石崎 未来 (東京大学)

開放量子系のパスの可逆性と不可逆性の研究

開放量子系のパスの可逆性と不可逆性の研究

石崎未来¹ 李宰河²

東大理¹ 東大生研²

開放量子系は環境系と呼ばれる巨視的な系に囲まれた注目系のダイナミクスを扱う。注目系のダイナミクスは、全体系の状態から環境系の状態をトレースアウトすることで記述される。このとき、注目系からは、環境系の情報と、注目系と環境系の相関の情報の一部にアクセスできなくなるため、そのダイナミクスは一般に不可逆となる。

注目系のダイナミクスを表す写像が可逆であるとき、逆写像を使って終状態から初期状態を求めることができる。ところが、一般には写像が可逆でない（写像の単射性が破れる）ため、本研究ではダイナミクスのパスの交わりという観点でその起源を研究する。

まず、注目系の考える初期状態に対し、それぞれを時間発展させて、横軸が時刻 t 、縦軸が状態を表す空間にパスを描く。異なる初期状態から発するパスは交わる場合があり、この場合は時刻 t で同じ状態となる。複数のパスが交わる場合は、分岐があるため、終状態から初期状態まで一意にパスをたどって戻ることができない。一方で、パスの交わりがない場合は、終状態の情報のみから初期状態まで一意に戻ることができる。このため、可逆性を、パスをたどって終状態の情報のみから初期状態に戻れるか否かという点で議論する。

この発表では、パスの交わりが、マスター方程式に対応する一般化固有方程式の解の線型従属性に対応することを示す。特に、初期状態が線形独立な部分基底で張られる場合には、パスは交わることはない。パスの交わりの観点からは、従来の単射性の議論に対して、それぞれの状態に対応した可逆性と不可逆性を議論することができる。

9 Shoki Koyanagi (Kyoto University)

Classical and quantum thermodynamics described as a system–bath model: the dimensionless minimum work principle

We develop a thermodynamic theory applicable to classical and quantum systems described as a thermodynamic system–bath model that can treat isothermal and thermostatic processes.

We have studied the isothermal process for the quantum system using the quasi–static Helmholtz energy and the Kelvin–Planck statement (or the minimum work principle) [1][2][3]. In this presentation, we extend the Kelvin–Planck statement to the thermostatic regime.

Our argument is based on dimensionless minimum work principle, which allows us to evaluate not only work but also heat when evaluating thermodynamic potentials. Thus, Planck function, Massieu function and entropy are obtained as the minimum values of the dimensionless work and heat evaluated from quasi–static changes in these intensive and extensive thermodynamic variables, which can be converted to each other by the time–dependent Legendre transformation. Using the thermodynamic functions above, we derive Helmholtz energy, Gibbs energy, enthalpy, and internal energy. Our results were verified numerically for an anharmonic Brownian system described in phase space using the low–temperature quantum Fokker–Planck equations in the quantum case and the Kramers equation in the classical case, both developed for the thermodynamic systems–bath model. Thus, we clarify the conditions for thermodynamics to be valid even for small systems described as Hamiltonian dynamics, and establish a basis for extending it to non-equilibrium systems.

[1] S. Sakamoto and Y. Tanimura, *J. Chem. Phys.* 153, 234107 (2020); [2] S. Koyanagi and Y. Tanimura, *J. Chem. Phys.* 157, 014104 (2022); [3] S. Koyanagi and Y. Tanimura, *J. Chem. Phys.* 157, 084110 (2022);

10 柴田 礼 (芝浦工業大学)

Bell 非局所性に必要な最小の測定依存性と隠れ度の関係

2020 年, Hall らはベルの定理における測定依存性を相互情報量で定量化し, 与えられた CHSH 値を再現するために必要な相互情報量の下限を導出した. 一方, 木村らは 2022 年に隠れた変数の導入を隠れ度という尺度で定量化し, 隠れ度と測定依存性, CHSH 値の関係の定式化をした. しかし, 木村らが測定依存性の尺度としたものは相互情報量ではなく確率の全変動距離を用いたものだった. したがって本研究では, 情報学への応用を念頭に測定依存性を相互情報量で定量化し, 与えられた隠れ度と CHSH 値の下での相互情報量の下限を導出した. なお, 本研究で Hall らの導出における論理的なギャップを発見しているが, これを解消することにも成功している.

[1] J. S. Bell, *Physics* 1, 195 (1964). [2] M. J. Hall and C. Branciard, *Phys. Rev. A* 102, 052228 (2020). [3] G. Kimura, Y. Susuki, and K. Morisue, *Phys. Rev. A* 108, 022214 (2022).

11 丹間 梨温 (埼玉大学)

局所的測定従属な理論とベル不等式の破れ

一般に Bell の定理は、量子力学という現代物理学の基礎が、「局所性」(情報が光速を超えて伝達されないという性質)と「実在性」(観測の有無にかかわらず物理量が定まっているという概念)の両者とは整合的でないことを示し、またその定量的な関係は Bell の不等式の破れとして一般に理解されている。しかし、実際には背後にもう一つ「測定独立性」、すなわち、実在(正確には、隠れた変数)と測定選択は独立であるという仮定がある。実際、局所实在論であっても、測定独立性を仮定しなければ Bell の不等式が成り立たないモデルが存在するため、局所实在論が直ちに量子力学と矛盾するとは言えない。測定独立性を緩和することは、測定選択が隠れた変数によって影響されることを意味する(平たく言えば自由意志を否定する)ため、陽に考える必要がないと言われることがある。しかし、相関は因果関係を意味しないことから、逆に測定選択が実在に影響を与える可能性も考えなければならない。そのため、測定独立性は本質的な仮定の一つであると考えべきである。そこで本研究では、局所实在性と測定者の自由意志を満たすが、測定独立性を「局所的に」緩和したモデルを考えた。結果、Bell の不等式を最大まで破る相関が存在すること、また、そのモデルが作る集合が No-Signaling 多面体(瞬間伝送ができない相関のなす集合)と一致することを示した。他方、共通原因によって古典的に準備可能な相関に限ると、それはベル不等式を満たす結果を得た。そのため、この相関を古典的に生成する方法が存在しないことが分かった。つまり、量子相関は古典的に生成可能でないという結論は変わらないことが分かった。なお、この結果は、Accardi らのカメレオン効果と反するものとなるが、我々は確率密度関数の正しい変換を考えることにより、Accardi らの論証の誤りを指摘する。

12 好村 清貴 (芝浦工業大学)

量子同時測定の両立不能性次元の閾値の研究— 半正定値計画問題によるアプローチ

近年、同時測定不可能性を定量的に評価する研究が活発に行われている。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考えることで、その次元に基づく定量化を考案した。そして、ノイズの付与によって同時測定不可能度合いが変化する閾値の存在を示した [1]。しかしその閾値の具体的な値は求められていない。本研究は、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、固定した量子状態の集合上の同時測定不可能性が、高速に計算可能な半正定値計画問題 (SDP) に帰着できることを示した。これにより、様々な状態集合を考えることにより、Heinosaari らの尺度の上限を論じることが可能となる。その結果、閾値は Heinosaari らが示した範囲より狭い範囲において存在することを特定した。

[1] T. Heinosaari, T. Miyadera, R. Takakura, PHYSICAL REVIEW A 104, 032228 (2021).