

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01906

研究課題名（和文）弱値・弱測定の切り拓く新たな素粒子・量子物理研究

研究課題名（英文）New Approach in Particle and Quantum Physics Based on Weak Value and Weak Measurement

研究代表者

筒井 泉 (Tsutsui, Izumi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・特別准教授

研究者番号：10262106

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、まず弱測定との関連する一般的な不確定性関係を構築した。また複数の物理量の実在性の分離を弱値の中性子干渉実験により実証した。この結果は遷移確率振幅において弱値が測定物理量の感度に相当することを示すものであり、例えば量子共鳴は弱値増幅として解釈することができる。さらに弱測定の精密測定への応用として、粒子の崩壊寿命の変化によるCPの破れ測定への有効性を検証し、またCERNのAtlas実験にてB中間子対の崩壊現象に基づくベル不等式の検証可能性を示した。加えて、パリティ対称性に基づく量子暗号の秘匿性や、量子乱数と疑似乱数の識別可能性についての新知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、量子力学の基礎問題の一つである物理量の実在性に関して、弱値の概念に基づいて新しい知見を得たことである。端的に言えば、弱値は不確定性関係における中核的概念であり、また遷移確率振幅における測定物理量の感度に相当し、これに基づく考察から1粒子の持つ複数の物理量の分離性が確認される。また量子共鳴現象は実質的には弱値の増幅現象に他ならない。本研究は、弱値を利用した測定はCPの破れなど素粒子物理学の新しい実験方法を提供し、また逆にB中間子対の崩壊現象を利用したベル不等式の検証実験を可能にするなど、多様な物理分野での相互的な貢献が期待される点で、社会的意義があるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this project, we established a general class of uncertainty relations related to the weak value. Also, through the weak measurement in neutron interferometry we confirmed the separable nature of reality of physical quantities. This indicates that the weak value represents the sensitivity of physical interactions which yield the transition of states specified in weak measurement, and this is exemplified by the connection between the quantum resonance and the weak value amplification. As application, we propose the use of prolongation of lifetime in the weak value for precision measurement of the CP violation. We also examine the feasibility of the Bell test in the Atlas experiment at CERN with entangled B meson pairs. As a by-product, we showed that a secure random number generation is possible from parity symmetric radiations, while the quantum randomness is hardly distinguishable from pseudo-randomness under standard randomness measures such as the Borel normality.

研究分野：量子基礎論、素粒子論

キーワード：weak value weak measurement Bell inequality quantum randomness uncertainty relation

## 1. 研究開始当初の背景

量子と古典の世界の差異を顕著に特徴づけるものに、「粒子と波動の二重性」に起因する現象と、「量子もつれ (エンタングルメント)」による非局所相関の存在がある。これらの現象や性質が示唆するのは物理量の局所実在性の否定であり、それは19世紀までに培われた伝統的な自然観を否定するものであった。この問題は、量子力学の建設時からアインシュタインとボーアの論争などを通して広く知られていたものの、その後は長い間、哲学的な問題として物理学の研究対象とは認識されてこなかった。ところが、近年の量子操作技術や量子情報科学の著しい発展を受けて、最近では物性物理から宇宙物理まで、広い分野の物理学の基礎と応用を念頭に置いた研究課題として盛んに研究されるようになってきた。

その研究の主な方法としては、光子を用いたベル不等式の検証実験や、高分子などマイクロでない系の量子性の確認実験などが挙げられるが、これらに加えて量子論における物理量概念そのものを見直し作業も行われるようになってきた。その契機は1988年のアハロノフらによる弱値 (Weak Value) と呼ばれる新しい物理量の概念の提唱 (Y. Aharonov, D. Z. Albert, and L. Vaidman, *Phys. Rev. Lett.* **60**, 1351 (1988)) である。これは、物理系の任意に指定された状態遷移の中での量子的な物理量の推定値であるが、対象系を (殆ど) 乱さずに測定する「弱測定」 (Weak Measurement) によって測定が可能であり、その具体的な表式は、状態遷移を規定する始状態  $\psi$  (事前選択状態: preselected state) と終状態  $\phi$  (事後選択状態: postselected state) 及び測定対象の物理量に対応する (演算子)  $A$  を用いて  $A_w = \langle \phi | A | \psi \rangle / \langle \phi | \psi \rangle$  で与えられる。

アハロノフらは測定状態の指定の上で対称的にした量子力学の時間対称形式の中でこの弱値の概念に辿り着いたが、弱値はその名に反してその値は必ずしも「弱い (小さな)」わけではない。実際、弱値の定義式から、事前・事後状態の選択に依って任意の複素数の値にすることが可能であり、またそれらをほぼ直交するものを選んで弱値を大きく増幅することも可能である。さらに、表式の上で類似している統計量としての期待値 (事前・事後の選択状態が同一の場合、弱値は期待値に等しくなる) とは異なり、個々 (single shot) の測定時の実在量として見なすこともできる。これは弱値による粒子の時間的経路を知る手段を与え、その局所実在性を示唆する道具として重要になる。本研究代表者の弱値に基づく複素空間における粒子の軌跡の考察 (2015) や、Vaidman 教授と行った2重干渉計における粒子経路の考察 (2018)、さらには研究分担者である長谷川らによる粒子の経路とスピンを分離した「量子チェシャ猫の実験」(2014) 等の先行研究は、粒子の経路と実在性の関連性を探究するものであった。

さてこのような弱値の概念的意義とは別に、弱値の増幅可能性を精密測定に用いることが行われ、応用面の上でも大きな注目を集めた。その例に光の量子ホール効果の検証がある。Hostenらの実験 (*SCIENCE*, **319**, 787 (2008)) がその最初の例であり、また翌年には別の実験グループがレーザー光角度の超高精度測定に成功するなど、従来の測定に較べて数百から数千倍の精度が報告された。これらの成功に触発されて、現在までに速度、位相、時間、温度など、様々な物理量の精密測定が精力的に行われるようになってきている。

しかし、従来の実験はその制御の容易さから専ら光学系を対象として行われており、さらにその多くは未知な現象の発見ではなく、既知の (予言された) 現象の精密な測定を目的としたものであった。弱測定の対象を光子に限定する理由は全く無く、それゆえ質量を持つ高エネルギーの素粒子に適用することは、量子力学の基礎研究の上で重要な拡張になっている。

事実、弱値・弱測定の研究は米国の複数の研究グループを中心として英国、イスラエルの研究者らが研究を主導しているものの、非光学的系への応用、特に素粒子系への応用については未着手であった。また、弱値に基づく粒子の軌跡や自由度の分離、不確定性関係など基礎的な研究では、研究分担者の長谷川グループが実施する中性子干渉実験の先進性などに鑑みて、本研究グループが最前線の位置にあった。

以上の学術的背景と研究状況の下、本研究課題ではその核心をなす学術的「問い」を

- (I) 「弱測定」という新たな精密測定を用いて、どのような未知の素粒子現象が見えてくるか
- (II) 「弱値」が示唆する量子世界の物理量の存在形態は、いったいどのようなものか

と設定した。これらを概念的な基礎においた弱値と弱測定の研究を通して、今に至るまでその解釈を巡って論議の続く量子力学の基礎に関する深い理解と、新たな素粒子実験の方法への道を

拓く上で重要な足がかりを与えることが期待された。

## 2. 研究の目的

まず前項での核心をなす学術的「問い」(I)に関する本研究の目的を

1) 弱測定に特有な要素(事後選択の存在)を考慮した測定誤差や擾乱の評価方法の確立と、それらに対する制限(弱測定に対する不確定性関係)を明らかにする。

2) 弱測定に基づく素粒子の標準模型を越えた新粒子の探索や、CP対称性の破れ、重力波検出の新たな手法など、既知の物理的性質の測定の精度向上に関する新たな提案を行う。

の2つとした。一方、「問い」(II)に関する研究目的は以下のように設定した：

3) 弱値の物理量としての存在形態を粒子の軌跡描像と干渉効果との共存や擬確率としての意味を探ることで明確にし、これによって量子力学の基礎(物理量の非局所的実在性や相補性など)の理解を深める。

これらの目的を達成するために、本研究では、研究代表者及び研究分担者(李)による理論研究を行うとともに、CERNのAtlas実験グループに所属する研究分担者(田窪)と共同で、弱測定を用いたCPの破れの精密測定の可能性、及びB中間子を用いたBell不等式の検証の可能性を検証することとした。また研究分担者(長谷川)による中性子干渉実験(北大・ウィーン工科大)を通して、核子を用いた弱値の実在性の正確な理解に向けた実験を行うこととした。

## 3. 研究の方法

上記の3つの研究目的毎に研究方法を述べる：

### 1) 弱測定の精度評価の理論的枠組の確立

一般に測定誤差は系統的誤差、統計的誤差といった実験に起因する誤差と、解析に用いるモデル設定や評価に必要な近似など理論に起因する誤差に分類することができる。弱測定に関して、これらすべてを系統的に扱うことが可能で、かつ具体的な状況に対応できるような、可能な限り一般的な誤差評価の枠組を構築する。また、弱測定に固有な誤差、擾乱、及び(事前・事後の)状態選択に伴うゆらぎを定義し、これらの量に対するtrade-off関係式を不確定性関係として確立する。

### 2) 弱測定等による素粒子を中心とした未知の物理現象の探索方法の提案

KEKのBelle II実験において事後選択の実施により、CP対称性の破れを弱測定により、従来の測定精度を改善する方法を提案する。また状態選択を通して、粒子の崩壊時間を実効的に変化させ、これによって未知の長寿命粒子の存在を探る。また、弱測定とは別に、CERNのAtlas実験におけるBell不等式の検証実験の可能性を検討し、その実施に向けたデータを提供する。

### 3) 弱値としての物理量の量子的性質

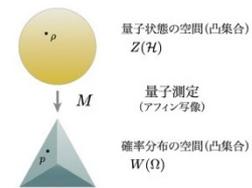
物理量の実在の形態に対する量子力学的な制限(非局所性、状況依存性、相補性など)に関する弱値への制限を精確に調べ、弱値の量子力学的な意味を明確にする。特に粒子の軌跡描像と干渉効果との共存現象等の量子性が顕著になる状況を分析し、弱値の擬確率との関係や物理的意味を明らかにする。通常期待値を通して考察する場合に較べて、弱値を通して物理量を考察する利点は、事後選択による遷移過程の特定のためにより詳しい情報が得られることにある。これを利用して、直接的な量子物理量の実在性や局所性に関する知見を弱値を通してどのように得るかを探る。

## 4. 研究成果

まず、以上の3つの研究目的に関連する成果を6項目に分けて以下に列挙する。

### (1) 弱測定と不確定性関係

不確定性原理は量子論の根幹を成す量子世界の基本的な性質であり、弱値概念や弱測定技術とも深く関連する。不確定性を評価する方法として、本研究では弱測定に特有な要素（事後選択の存在）を考慮した測定誤差や擾乱の評価方法を提示し、量子ゆらぎや量子測定、その観測効果などに関する不確定性関係の普遍的な定式化を行い、新たな誤差と擾乱、標準偏差を含む関係式を得た（右図）。この関係式では、誤差や擾乱等が量子状態の空間と測定結果を記述する確率空間の間の写像  $M$  に基づいて一般的な形で定義されており、小澤の不等式を含めて従来のいくつかの主要な定式化の統一的理解に繋がるものになっている。また、量子論における「確率」概念を記述する上で、負値・複素数値の分布（擬確率分布）を考慮することの意義や、弱値概念の統計的解釈や弱測定の擬古典的な記述などに対する有用性の基準を提示し、それらの性質を比較評価した（文献1）。

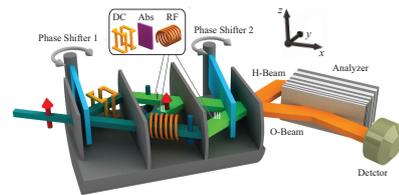


$$\epsilon_{\rho}(A; M) \epsilon_{\rho}(B; N) \geq |I|$$

$$I = \left\langle \frac{[A, B]}{2i} \right\rangle_{\rho} - \left\langle \frac{[M_{\rho}^{\dagger} M_{\rho}, A, B]}{2i} \right\rangle_{\rho} - \left\langle \frac{[A, N_{\rho}^{\dagger} N_{\rho}, B]}{2i} \right\rangle_{\rho}$$

### (2) 弱値に基づく実在性の概念

中性子干渉に基づく種々の実験により、物理量の実在性を弱値を通して考察し、複数の物理量に関与する場合の各々の実在性に関する新たな知見を得た。具体的には、オーストリアの長谷川グループで行われた「量子チェンヤ猫」の（スピンを持つ粒子自身の局所的存在とスピンの存在を干渉計の2つの経路上で分離させる）実験を高度化し、干渉計の測定器に入った後に事後選択を行う遅延選択の自由度を付加し、また3種類の物理量の3つの経路上の存在の分離を示す実験を実施した（上図）。その結果、弱値の観点からは、遅延選択を行うことにより2つの経路上の分離が逆転すること、及び3種類の物理量でも3つの経路上に分離できることを示した（文献2）。一般に量子状態の（事前選択状態から事後選択状態への）遷移過程において、遷移を引き起こす（弱い）相互作用が存在するが、その相互作用の物理量（ユニタリー変換の生成子）の遷移への影響を表す感度が、弱値に他ならないことを示すものになっている。

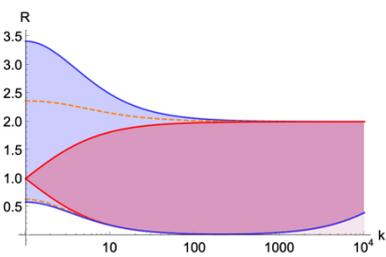


### (3) 量子共鳴現象と弱測定

弱値の物理的意義を補強する別の結果として、外部からの微弱なシグナル（擾乱）を増幅する機構として従来から良く知られた Rabi 共鳴及び Ramsey 共鳴の現象を再考し、それが上記のシグナル獲得の感度としての弱値の測定に相当することを示した。すなわち、これらの量子共鳴現象での精密測定は、弱測定の応用として知られた弱値増幅の一例として見做すことができる。この量子共鳴現象での精密測定と弱値増幅の同等性を逆に辿ることにより、例えば中性子の電気双極子モーメントの精密測定を弱値に基づいて行うことを含めて、極めて微小な物理量や相互作用の存在の測定に対する新しい方策が与えられる。このことにより、アキシオンなど標準模型を越える新たな素粒子の探究や、宇宙初期の研究等にも有効な手段を提供することが期待される（文献3）。

### (4) 弱測定と崩壊寿命の延長

粒子の崩壊寿命は、弱測定（事後選択）により統計的な対象を限定することで実効的に延長することができる。その効果の可能な範囲と粒子崩壊の現象の特性との関係を一般に  $K$  中間子や  $B$  中間子のような2状態系の場合について詳しく調べた。その結果、崩壊を特徴付ける2つの固有エネルギー（質量）の差と崩壊幅の比率に依存して弱測定による崩壊寿命の可変域が変化し、最大で3.5倍程度の延長が可能であるという結果を得た（右図）。この結果は、以下のCPの破れの測定の例で議論されるように、考察する粒子系によっては弱測定が有効になる場合があることを示す（文献4）。

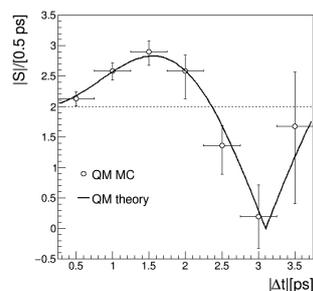


### (5) CPの破れの精密測定と弱測定

$B$  中間子を用いた  $CP$  の破れの弱測定に基づく精密測定について、上記の崩壊寿命の延長効果と誤差と擾乱の評価方法を用いて、数値計算によりその妥当性を検討した。その結果、一定の範囲の弱測定を実施するのに必要な事後選択が可能な場合には、現在進行中の  $KEK$  の  $BeII$  II 実験での  $B$  中間子の崩壊寿命の延長効果は最大で2.6倍程度が見込めることを示した。一方、 $CP$  の破れパラメータにおける不定性の改善は約20%に留まる。これを改善するには、事後選択のための中間子の崩壊モードの選択幅を拡大する必要があり、これは今後の検討課題として残された（文献5）。

### (6) Atlas 実験におけるベル不等式の検証可能性

現在、進行中である CERN の Atlas 実験において、陽子衝突から生じた B 中間子対を用いてベル不等式の検証を行った場合の測定精度を数値計算に基づき評価した。その結果、Atlas 実験においては (Bell 実験とは異なり) 個々の B 中間子崩壊の時空点が十分な精度で特定できることから、従来の高エネルギー実験に基づくベル不等式の検証の問題点であった局所性の抜け穴 (locality loophole) を塞ぐことができ、有意な実験が可能であることが判明した (右図)。これについては、現在、実施中の LHC Run 3 の実験において必要なデータを収集して分析することにしており、その結果が判明すれば、これまでの主として低エネルギーの光子ビームを用いたベル不等式の検証実験の対象範囲をエネルギーの上でも粒子の質量の上でも大幅に拡大し、量子世界の非局所実在性をより普遍的に確認することが期待される (文献 6)。



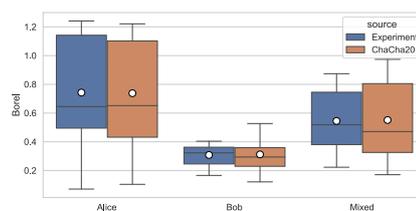
なお、先の研究目的には記載されていないが、本研究の副次的な研究成果として、下記の素粒子の対称性と量子測定の乱数性の関連に関する 2 つの研究成果を得た：

### (7) パリティ対称な原子崩壊現象による量子暗号の秘匿性

パリティ対称性を持つ崩壊現象を示す原子を用いて、量子的なランダム性に基づく崩壊時刻を基にして暗号を生成した場合の秘匿性の保証を考察した。例えばアメリカシウム ( $^{241}\text{Am}$ ) のようなパリティ対称性を持つ原子崩壊を示す原子の場合、その崩壊時間に基づいて生成した乱数を暗号鍵とすることが可能であり、崩壊に伴って発生する  $\alpha$  粒子の放出方向の上下対称性により、生成された暗号鍵の秘匿性が保証されることを厳密に示すことに成功した (文献 7)。これは素粒子の対称性と量子情報の秘匿性とを関係づける結果として注目される。

### (8) 量子乱数と疑似乱数の識別可能性

量子崩壊等や測定における状態収縮に関する量子現象は真の乱数性を持つものと考えられており、それゆえこれらの量子現象に基づいて生成された量子乱数を用いた数値シミュレーションや、上記のような暗号鍵生成が考案されているが、一方で量子乱数とアルゴリズム的に生成された疑似乱数とが果たして乱数性において識別可能かは未解決の問題として残されている。本研究では、従来のベル不等式の検証実験で用いられた量子現象に加えて、IBM Quantum から生成された乱数データを Borel 規則性などの標準的な指標に基づいて評価し (右図)、現状では (種々の技術的な理由から) その識別が困難であることを示した (文献 8)。



### <引用文献>

1. J. Lee and I. Tsutsui, Entropy 22 (2020) 1222; J. Lee and I. Tsutsui, arXiv:2004.06099, arXiv:2008.03094.
2. S. Sponar, Y. Hasegawa et al., Phys. Rev. Research 3, 023175 (2021); A. Danner, Y. Hasegawa et al., Atoms 11,98 (2023).
3. D. Ueda and I. Tsutsui, arXiv:2309.16281.
4. Y. Mori and I. Tsutsui, Phys. Rev. A 104 (2021) 032202.
5. S. Higashino, Y. Takubo, I. Tsutsui et al., Phys. Rev. D 104 (2021) 033001.
6. Y. Takubo, I. Tsutsui et al., Phys. Rev. D 104 (2021) 056004.
7. T. Tsurumaru, T. Sasaki and I. Tsutsui, Commun. Phys. 5 (2022) 147.
8. T. Tsurumaru, T. Ichikawa, Y. Takubo, T. Sasaki, J. Lee and I. Tsutsui, Phys. Rev. A 109 (2024) 022243.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Toyohiro Tsurumaru, Toshihiko Sasaki and Izumi Tsutsui	4. 巻 5, 147
2. 論文標題 Secure random number generation from parity symmetric radiations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 COMMUNICATIONS PHYSICS	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-022-00915-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yosuke Takubo, Tsubasa Ichikawa, Satoshi Higashino, Yuichiro Mori, Kunihiro Nagano, and Izumi Tsutsui	4. 巻 104
2. 論文標題 Feasibility of Bell Inequality Violation at ATLAS Experiment with Flavor Entanglement of $B_0$ bar $B_0$ Pairs from pp Collisions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D.	6. 最初と最後の頁 56004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.056004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yuichiro Mori and Izumi Tsutsui	4. 巻 104
2. 論文標題 Weak-value amplification and the lifetime of a decaying particle	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A.	6. 最初と最後の頁 32202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.104.032202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Satoshi Higashino, Yuichiro Mori, Yosuke Takubo, Takeo Higuchi, Akimasa Ishikawa, and Izumi Tsutsui	4. 巻 104
2. 論文標題 Weak value amplification in high energy physics: A case study for precision measurement of CP violation in B meson decays	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D.	6. 最初と最後の頁 33001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.033001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Sponar, M. Pitschmann, R. Sedmik, H. Abele, and Y. Hasegawa	4. 巻 3
2. 論文標題 Tests of Fundamental Quantum Mechanics and Dark Interactions with Low-Energy Neutrons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nat. Rev. Phys.	6. 最初と最後の頁 309
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42254-021-00298-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sponar Stephan, Danner Armin, Ozawa Masanao, Hasegawa Yuji	4. 巻 7
2. 論文標題 Neutron optical test of completeness of quantum root-mean-square errors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 npj Quantum Information	6. 最初と最後の頁 106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41534-021-00437-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsurumaru Toyohiro, Ichikawa Tsubasa, Takubo Yosuke, Sasaki Toshihiko, Lee Jaeha, Tsutsui Izumi	4. 巻 109
2. 論文標題 Indistinguishability between quantum randomness and pseudorandomness under efficiently calculable randomness measures	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.109.022243	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Umekawa Shun, Lee Jaeha, Hatano Naomichi	4. 巻 2024
2. 論文標題 Advantages of the Kirkwood Dirac distribution among general quasi-probabilities on finite-state quantum systems	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptae005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sponar Stephan, Danner Armin, Pecile Vito, Einsidler Nico, Demirel Bulent, Hasegawa Yuji	4. 巻 3
2. 論文標題 Experimental test of entropic noise-disturbance uncertainty relations for three-outcome qubit measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.023175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wagner Richard, Kersten Wenzel, Lemmel Hartmut, Sponar Stephan, Hasegawa Yuji	4. 巻 13-3865
2. 論文標題 Quantum causality emerging in a delayed-choice quantum Cheshire-Cat experiment with neutrons	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-29970-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Danner Armin, Lemmel Hartmut, Wagner Richard, Sponar Stephan, Hasegawa Yuji	4. 巻 11
2. 論文標題 Neutron Interferometer Experiments Studying Fundamental Features of Quantum Mechanics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Atoms	6. 最初と最後の頁 98 ~ 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms11060098	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 13件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 L. Jaeha
2. 発表標題 A Universal Formulation of Uncertainty Relations in Quantum Theory
3. 学会等名 2022 Japan-China International Conference on matrix theory with applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李 宰河
2. 発表標題 不確定性関係の普遍的定式化
3. 学会等名 量子情報と量子基礎論の諸側面（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 李 宰河
2. 発表標題 不確定性関係の普遍的定式化
3. 学会等名 中部量子若手ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Takubo
2. 発表標題 On the Feasibility of Bell Inequality Violation at ATLAS Experiment with Flavor Entanglement of BB Pairs from pp Collisions
3. 学会等名 CERN Top working group plenary (October 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田窪洋介
2. 発表標題 素粒子実験における弱測定の実用について（B中間子を用いたCP非保存測定を例に）
3. 学会等名 Kagoshima Workshop on Particles, Fields and Strings 2023（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田窪洋介
2. 発表標題 LHC-ATLAS実験におけるB中間子対を用いたベル不等式の破れについての感度の評価
3. 学会等名 量子情報と量子基礎論の諸側面（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 筒井 泉
2. 発表標題 量子の基礎をめぐる問題と新しい量子測定
3. 学会等名 IPNS-IMSS-QUP Joint workshop（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 筒井 泉
2. 発表標題 B中間子崩壊に見る素粒子物理と量子力学の基礎との交流
3. 学会等名 時間・量子測定・準古典近似の理論と実験-古典論 と量子論の境界（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 筒井 泉
2. 発表標題 量子力学の基礎と高エネルギー物理
3. 学会等名 Flavor Physics Workshop 2023 (FPWS2023)（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 筒井 泉
2. 発表標題 素粒子物理と量子基礎の研究について
3. 学会等名 Quantum Foundations 2024 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Hasegawa
2. 発表標題 Foundation of Quantum Mechanics studied in Neutron optics
3. 学会等名 時間・量子測定・準古典近似の理論と実験-古典論 と量子論の境界 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Hasegawa
2. 発表標題 Neutron interferometry for studies of experimental quantum mechanics
3. 学会等名 Frontiers of Matter Wave Optics - FOMO 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Hasegawa
2. 発表標題 Foundation of quantum mechanics studies with neutrons
3. 学会等名 Aspects of Quantum Information and Quantum Foundations (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Hasegawa
2. 発表標題 Neutrons on the run
3. 学会等名 From GHZ to Tic Tac Toe: Symposium to celebrate Danny Greenberger 's 90th birthday (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究成果(7)関連HP: 理想的な乱数実現へ - 「パリティ対称性」利用が有効 - <a href="https://www2.kek.jp/ipns/ja/news/3194/">https://www2.kek.jp/ipns/ja/news/3194/</a> 理想的な乱数実現へ 「パリティ対称性」利用が有効 <a href="https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2022-07-07-002">https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2022-07-07-002</a> Test of completeness of quantum rms errors <a href="http://www.neutroninterferometry.com/home/latestnews/test-of-completeness-of-quantum-root-mean-square-errors">http://www.neutroninterferometry.com/home/latestnews/test-of-completeness-of-quantum-root-mean-square-errors</a> 量子系の測定に内在する隠れた誤差の検証実験に成功 <a href="https://www.chubu.ac.jp/news/1314/">https://www.chubu.ac.jp/news/1314/</a></p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	李 宰河 (Lee Jaeha) (20816607)	東京大学・生産技術研究所・助教  (12601)	
研究分担者	田窪 洋介 (Takubo Yosuke) (50423124)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子 原子核研究所・研究機関講師  (82118)	
研究分担者	長谷川 祐司 (Hasegawa Yuji) (60282498)	北海道大学・工学研究院・教授  (10101)	ウィーン工科大(オーストリア)兼任

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
オーストリア	Atominstitut, TU Wien			
フランス	Institut Laue Langevin			
ドイツ	University of Stuttgart			