

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540405

研究課題名(和文) 多者間の非古典相関に関する量子情報理論的研究

研究課題名(英文) Quantum information theoretical research on multipartite non-classical correlations

研究代表者

石坂 智 (Ishizaka, Satoshi)

広島大学・総合科学研究科・教授

研究者番号：10443631

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：『受信者が受け取れる情報量は古典通信のビット数より大きくはなり得ない』という情報因果律の不等式を、量子力学に内在するランダムネスの効果を取り入れるように拡張した。その不等式を用いることにより、情報因果律ではなく、『十分に攪乱されたメッセージは情報を伝達することができない』という暗号の基本原理由って量子相関の強さが制限される場合があるという基礎科学的な知見を示すことに成功した。また、その内因性ランダムネスの下限を計算する方法の開発も行った。

研究成果の概要(英文)：Information causality (IC) states that the information obtainable by a receiver cannot be greater than the communication bits from a sender. We extended the formula of IC to include the effects of randomness that is intrinsic in quantum mechanics. The obtained formula is tight and saturated at some quantum mechanical boundary in the space of no-signaling correlations, and the strength of the quantum correlations at the boundary is considered to be limited by a cryptographic principle rather than IC. Moreover, we developed a device-independent method to calculate a lower bound of the degree of the remote randomness.

研究分野：量子情報理論

キーワード：量子相関 ベル不等式 エンタングルメント 情報因果律

1. 研究開始当初の背景

量子相関は量子力学に従う2つ以上の物理系の中に現れる長距離相関のことであり、古典力学系には存在しない量子力学のみが示す性質である。この量子相関を利用することにより、量子暗号や量子計算などの量子情報処理が可能になることが知られており、量子相関の性質を明らかにすることは、基礎科学的にも応用上も重要である。近年、量子相関の研究は世界的にも活発に行われ、量子相関には量子エンタングルメント、非局所相関、ベル非局所性、ステアラビリティ (steerability) といった様々な性質があることが次々と明らかにされている。しかしながら、それら個々の性質の詳細も、それら相互の関係も依然として良く分かっていない状況であり、なお一層の研究が必要不可欠な状況にある。

2. 研究の目的

量子相関の性質を理論的に明らかにすることが本研究の目的である。特に情報理論的な視点から量子相関の性質を定量的に明らかにする。また、量子相関の性質を明らかにすることは、新しい量子情報処理の可能性を発見することにもつながっているため、新しい性質を発見した際には、応用可能性も慎重に検討する。

3. 研究の方法

近年発展した量子情報理論を駆使し、また必要に応じて量子情報理論の整備も行いながら、量子相関の性質を明らかにしていく。また、解析的には解けないような問題については、計算機を積極的に利用した研究を行う。理論研究であるため、研究者の力量が研究資源の全てであるが、計算機を活用することは研究者の力量の補助にもなるため、解析的な問題解決に対しても計算機を積極的に活用する。

4. 研究成果

(1) 『受信者が受け取れる情報量は、量子力学的な非局所資源を使ったとしても、古典通信のビット数より大きくはなり得ない』という情報因果律を物理原理として採用することにより、量子力学では許されない非局所相関の一部を上手く排除できることが知られている。この情報因果律の発見は、量子相関の研究に対し世界的に大きな衝撃を与えた。しかしながら、情報因果律を精査したところ、或る種の非局所資源(具体的には部分的にエンタングルした状態)を使うと、古典通信には不可避的なランダムネスが乗ってしまい、受信者が受け取れる情報量は減少してしまうことが分かった。

このランダムネスは遠隔者(送信者)の測定結果を通して入り込むものであるが、これまで誰にも指摘されていない新しい効果であり、情報因果律でも無視されていたもので

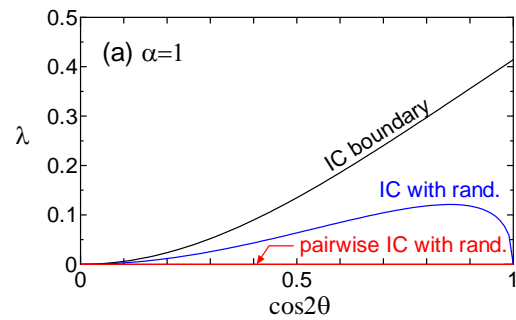


図1. 情報因果律の公式と導出した公式の比較

ある。また、量子力学にのみ特徴的に存在し、量子力学的な非局所資源に内在するランダムネスなので、通信プロトコルの工夫等で除去することはできない類のランダムネスである。このような遠隔性ランダムネスが情報因果律に及ぼす影響を調べる研究を行った。

その結果、量子力学が満たすべき情報因果律の公式を、遠隔性ランダムネスの効果を取り入れるように拡張することに成功した。次に導出した公式が、量子力学で許される量子相関と、そうでない相関との境界を、どれだけ正確に予言できるのかを、2量子ビットにおける量子相関を使って評価した。図1がその評価結果である。黒線は従来の情報因果律の公式が予言する境界を示しているが、正しい境界($\lambda=0$)とは大きくずれてしまっている。一方、我々が導出した公式が予言する境界(赤線)は、正しい境界と完全に一致している。このことは、遠隔性ランダムネスが量子相関に及ぼす影響の大きさを示すとともに、我々が導出した公式の強力を示すものである。

また、この量子境界は従来の情報因果律では説明できないことも示している。遠隔性ランダムネスが存在すると、古典通信は実効的にスクランブル(攪乱)された状況になるが、このような状況では、情報因果律が予言する古典通信のビット数までの情報伝達は不可能であり、量子相関の大きさは、情報因果律とは別の物理原理によって制限されることになる。その物理原理は暗号の基本原則であることも突き止めた。すなわち、遠隔性ランダムネスが存在する状況では『完全に攪乱されたメッセージは、何の情報も運べない』という暗号の基本原則が、量子相関の大きさを制限しているのである。

更に、遠隔性ランダムネスの下限を、系の次元、系の状態、測定装置などに何の仮定も置くことなく、送信者と受信者の測定結果の統計的性質だけから決定するような方法、すなわち device independent (DI) 法と呼ばれる近年の量子暗号において主流となりつつある方法も開発した。図2は、このような計算結果の一例である。挿入図が、或る量子相関境界において求めた遠隔性ランダムネスの下限を示している。

これらの成果のインパクト等についてで

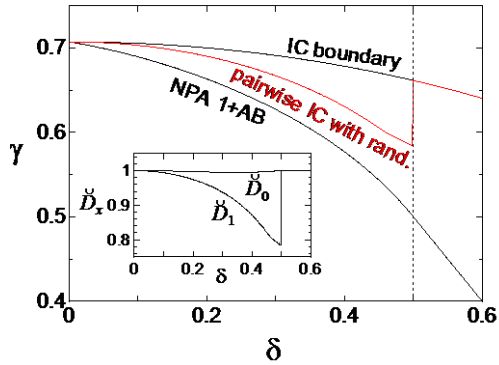


図 2. DI 法による遠隔性ランダムネスの下限

あるが、量子相関の大きさが情報因果律ではなく、暗号の基本原理由によって制限されているという知見は、これまで誰にも指摘されておらず全く新しい発見である。情報因果律が基礎科学に与えたインパクトを考えると、この発見のインパクトも大きいと考えている。また、情報因果律の公式は、量子相関の性質の解明に広く使われており、その公式を拡張できたことの意義も大きいと考えている。

また、遠隔性ランダムネスの下限は、同時に受信者の量子状態の非直交性の下限でもある。つまり、非直交性の下限を device independent に求める方法を開発できたことになる。非直交性も古典力学にはない量子力学のみが特徴的に示す性質であり、量子暗号などにも利用されている。したがって、非直交性の下限を device independent に保障できる方法は、量子情報処理への直接的な応用があるものと考えている。この成果は研究期間の最後に得られたものであり、応用例を具体的に示すことは今後の課題である。本研究の成果は、現在論文投稿中である。

(2) 遠く離れた2者であるAとBが予め共有している量子状態を、局所操作と古典通信(LOCC)でAとBの役割が入れ替わった状態にする(状態をスワップする)という量子情報処理についての研究を行った。

純粋状態はAとBの入れ替えに関して対称なので、AとBが予め共有している状態が純粋状態であれば、LOCCで常にスワップが可能である。このように、LOCCによる状態スワップは量子相関の対称性と密接に絡んでおり、量子相関の基本的性質を探る上で重要な問題である。ところが混合状態の場合については、AとBの局所密度行列の固有値が等しくなければスワップできないという定性的な事柄が分かっているのみであり、スワップ可能性の定量的な事柄は何も分かっていない状況であった。そこで、ランダムに発生させた2量子ビット状態に対して、LOCCに近い操作であるPPT操作におけるスワップ成功確率を数値的に計算し、量子状態の入れ替え困難

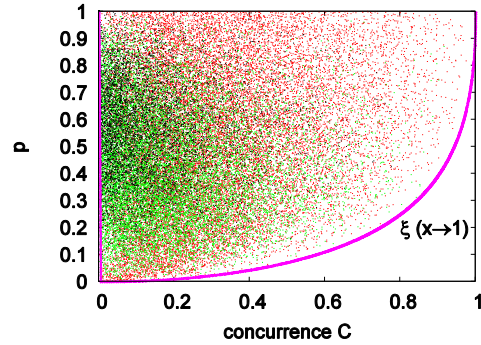


図 3. スワップ確率とエンタングルメント量

度の定量的評価を行った。図3は、スワップ成功確立をエンタングルメント量(concurrence)の関数として表したものである。この計算により、すべての2量子ビットの状態は有限確率で入れ替えが可能である事、この確率はエンタングルメント量と共に減少する事を明らかにした。また、この下限を与える特殊な混合状態クラス(すなわち、LOCCで入れ替えが最も困難な状態クラス)を突き止める事にも成功した。

この状態クラスは、エンタングルメント量ゼロの極限で、スワップ成功確率がゼロになるという極めて特異な性質を持っている。入れ替えが不可能という性質は、暗号への応用可能性があると考えている。本研究の成果は論文発表済みである。

(3) 非古典相関や量子相関の性質を、量子状態の複製(cloning)という量子情報処理の観点から調査する研究を行った。

量子状態の完全な複製はNo-cloning定理によって禁止されているが、近似的な複製は可能である。しかしながら、このような近似的な複製では、複製された量子状態間には何かしらの相関(量子もしくは古典相関)が残っており、この状況は量子情報を複製したというよりは、量子情報を複数の系に単に分配したに過ぎないと言うことができる。そこで、複製された量子状態間に全く相関がないような近似的複製(無相関の複製)は可能なのか考える。(近似的に)複製された系間に相関が全くなく、それぞれの複製が元の量子情報の一部を保持しているとき、元の量子情報は複数の系に分割されたと言うことができるだろう。すなわち、無相関の複製可能性を調べることは、量子情報の分割可能性を明らかにすることでもあり、極めて基本的な問題である。例えば、元の量子情報を100としたとき、50対50や10対90、あるいは10対10(このとき80は失われる)のように分割できるかどうかを明らかにするという事である。また、量子暗号における安全性にも関係した応用上も重要な問題である。

この問題に関しては、任意の純粋状態が入

力されたとき、それを(確率 1 の)決定論的な方法で分割することは不可能であることが示されている。すなわち、量子情報は複製できないだけでなく、分割すらできないという強い制限が存在していることになる。またこれより、確率的にも量子情報は分割できないことが示唆されている。しかしながら、本研究により、確率的には量子情報の分割は可能であることが判明した。その際の最適な分割忠実度の導出にも成功した。また、分割忠実度は決定論的か確率論的で大きく変化し、このことは通常の近似的複製と大きく異なることも明らかにした。本研究の成果は論文発表済みである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

1. T. Ikuto and S. Ishizaka, Entanglement and swap of quantum states, *Quant. Inf. & Comp.* 15, 923 (2015). 査読有
<http://www.rintonpress.com/journals/qiconline.html>
2. Y. Sekino and S. Ishizaka, Quantum-information Division and an Optimal Uncorrelated Channel, *Phys. Rev. A* 89, 034304 (2014). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevA.89.034304

[学会発表] (計 6 件)

1. 石坂智、情報因果律と内因性ランダムネス、第 34 回量子情報技術研究会 (高知工科大), 2016 年 5 月 30 日
2. Y. Sekino and S. Ishizaka, Quantum-information Division and an Optimal Uncorrelated Channel, The 18th Conference on Quantum Information Processing (QIP2015, 13 Jan 2015, Sydney, Australia).
3. T. Ikuto and S. Ishizaka, Entanglement and swap of quantum states, The 18th Conference on Quantum Information Processing (QIP2015, 12 Jan 2015, Sydney, Australia).
4. 生藤貴也、石坂智、LOCC による量子状態スワップ、日本物理学会第 68 回年次大会 (広島大), 2013 年 3 月 28 日
5. 関野裕司、石坂智、量子情報の分割と忠実度、日本物理学会第 68 回年次大会 (広島大), 2013 年 3 月 27 日
6. 関野裕司、石坂智、量子情報の分割と忠実度、第 27 回量子情報技術研究会 (慶應大), 2012 年 11 月 28 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石坂 智 (ISHIZAKA SATOSHI)

広島大学・大学院総合科学研究科・教授

研究者番号: 10443631