



令和2年2月12日

誰も見ていないとき、物理量は存在するのだろうか？
量子フィードバックが語る驚くべき答えとは！？

【本研究成果のポイント】

- 量子測定から得られた測定結果に対応する物理量の正確な値を得る方法を発見し、その値が弱値と一致することを理論的に明らかにしました。
- 一般的には、通常の量子測定では物理量の値は得られないと考えられています。本研究では、用意した単一の量子ビットを被測定対象の量子システムと弱く結合させ、フィードバックを上手く活用することで、測定結果に対応する物理量の正確な値が得られることが分かりました。
- 今回の結果は、量子測定を定量的な測定への質的な大転換をもたらすとともに、現在でも未解決な物理量の実在の問題の解決につながると期待されます。

【概要】

広島大学大学院先進理工系科学研究科 ホフマン ホルガ (Holger F. Hofmann) 教授は、量子測定から得られた測定結果に対応する物理量の正確な値を得る方法を発見し、その値が弱値と一致することを理論的解析から明らかにしました。

量子力学では測定行為そのものが初期の状態を乱してしまうため、最初の状態の物理量は何の値だったのか、あるいはそこに存在していたのかも確認するのは容易ではありません。ポイントは、そのような測定から物理量の正確な値を得る可能性の追求にありました。本研究では、単一の量子ビットを量子システムと弱く結合させ、測定結果に応じて変化した量子ビットにフィードバックを施した測定系を理論的に解析しました。その結果、量子ビットを元に戻す変化量をフィードバックによる当てはめを利用して評価できれば、その測定結果に対応する物理量の正確な値が得られることが分かりました。またその値が最初の状態と測定結果の両方で決まる弱値と一致することも分かりました。これは別の物理量を測定すれば、得られた測定結果に対応する別の正確な値が存在することを示しています。(図1)

今回の結果は、物理量の値は測定結果がなければ実在としての意味を持たないことを意味します。これは実在に関する根本的な問題、「誰も見ていなければ、実在としての意味を持つのだろうか」という問いに対して一石を投じる結果であるとともに、本研究の成果を実際の量子測定に応用することによって、物理量の文脈依存性や実在性の問題の解決につながると期待されます。

本研究成果は、ロンドン時間の2021年2月3日15時(日本時間:2021年2月4日0時)「Physical Review Research」オンライン版に掲載されました。

論文タイトル

Direct evaluation of measurement uncertainties by feedback compensation of decoherence

著者

ホフマン ホルガ (Holger F. Hofmann)

広島大学大学院先進理工系科学研究科

掲載雑誌

Physical Review Research

DOI 番号

<https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.L012011>

【背景】

量子力学では測定行為が初期の状態を乱してしまうため、最初の状態での物理量の値を得る手がかりを失ってしまいます。そのため最初の状態の物理量の値は何だったのか、あるいはそこに存在していたかも確認するのは容易ではありません。その結果、量子力学における物理量の正確な値の実在については今でも未解決な問題となっています。近年のベルの不等式の破れに代表される数々の実験によって、現在では物理量の値の実在を否定せざるを得ないのではないかと、この認識が一般的です。その一方で実在の否定は、古典物理学との完全な矛盾を引き起こすことも大きな問題でした。

【研究成果の内容】

本研究では、図2に示すような測定系を理論的に解析しました。最初に最大のコヒーレンス⁽¹⁾を持つ単一の量子ビット⁽²⁾を用意し、量子システムと弱く結合させます。このとき量子ビットは量子システムの影響を受けるため、量子システムの測定後、測定結果に応じて量子ビットの状態が変化⁽³⁾します。その変化した量子ビットに、得られた測定結果 m に対応するフィードバックを施します。

フィードバックが不適切な場合には、量子ビットの状態は元に戻りません。その結果、元に戻らなかった量子ビットの最初の状態からの変化はデコヒーレンス⁽⁴⁾として現れ、この大きさは 2003 年に小澤によって導入された測定誤差⁽⁵⁾と一致することが分かりました。小澤の測定誤差は物理量の真値と測定値との差を意味するため、量子ビットを元に戻す適切なフィードバックがわかれば、デコヒーレンスをゼロにできます。量子力学ではフィードバックの量が物理量の値 $A(m)$ に対応するため、フィードバックで変化量を当てはめれば測定誤差がゼロとなる物理量の正確な値が得られることになります。理論的な解析の結果、物理量の正確な値は最初の状態と得られた測定結果の両方で決まる弱値⁽⁶⁾と一致することが分かりました。したがって別の測定結果を得た場合には、その測定結果に対応する別の正確な値が弱値として定まることになります。

今回の結果は、物理量の値は測定結果がなければ実在としての意味を持たないことを伝えています。これは実在に関する根本的な問題、「誰も見ていなければ、実在としての意味を持つのだろうか」という問いに対して一石を投じる結果とも言えます。

【今後の展開】

従来、量子測定は測定結果の統計分布を得るだけであり、物理量の値は得られないものと考えられてきました。本研究の成果は現在の実験技術で十分に検証可能であるため、今後は実験と理論の両方から物理量の値に関する文脈依存性⁽⁷⁾や実在性などの研究が大きく進展することが期待されます。

【参考資料】

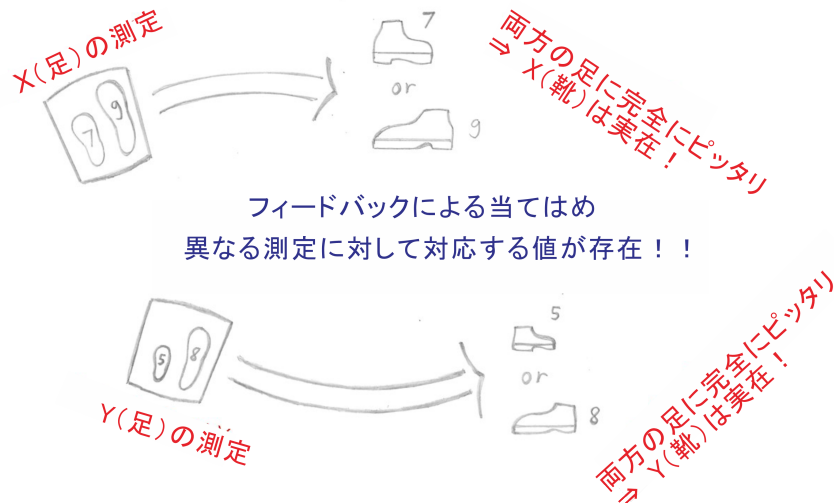


図 1) フィードバックによる変化量への当てはめによって、物理量の値が定まる。足の測定後、当てはめることで靴の実在をもたらすのと本質的には同じある。

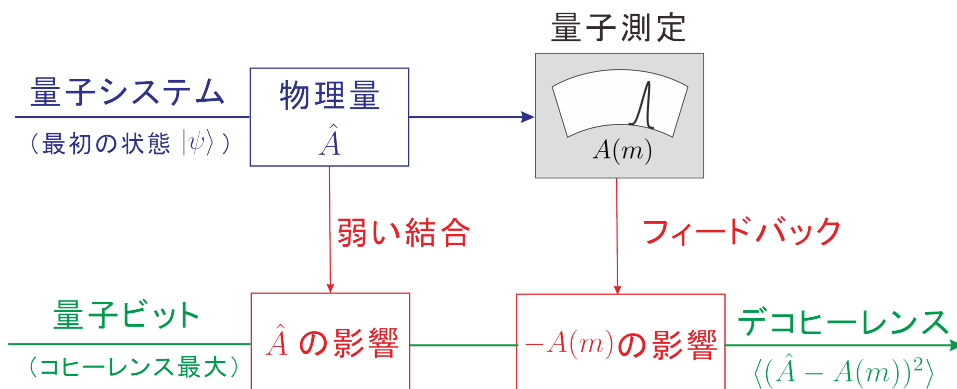


図 2) 物理量を得るための測定系

(*1) コヒーレンス：量子状態は一般的に測定結果の重ね合わせ状態で表される。このとき量子状態での重ね合わせの程度を表す量のこと。最大のコヒーレンスを持つ状態は純粋状態と呼ばれている。

(*2) 量子ビット：0 と 1 だけで記述する通常のビットに対して、0 状態と 1 状態のように二つの状態のみで記述される量子系のこと。光子の偏光や電子・中性子のスピンなどが該当する。

(*3) 状態の変化：量子システムと量子ビットを弱く結合させると、量子もつれ状態と呼ばれる状態が生成される。二つの系はもつれ合っているため、量子システムを測定すれば、その結果に応じて量子ビットの状態も変化する。

(4) デコヒーレンス：量子状態が外部環境などとの結合により、最初に持っていたコヒーレンスを損失すること、または損失した量のこと。

(5)測定誤差：量子力学ではいくつかの測定誤差の定義が提案されているが、ここでは 2003 年に小澤によって導入された測定誤差のことを指す。この測定誤差は、物理量の真値と測定値の差が測定誤差である、との考え方に基づいて導入された。

(6)弱値：1988 年にアハロノフらによって提唱された量子力学的な値のこと。量子状態が準備された始状態から選択した終状態へと変化したときに中間状態の情報を与える量として導入された。

(7)文脈依存性：物理量の値そのものが測定の方法に依存して変わること。古典物理学では物理量は測定する前から値が定まっているとされ、測定行為によって変化する量ではないとされている。この概念が古典物理学における物理量の实在論を支持する根拠となっている。一方の量子力学での物理量は数々の実験から文脈依存性を持つと考えられ、この性質が实在を否定する根拠の一つと認識されている。

【お問い合わせ先】

大学院先進理工系科学研究科 量子物質科学プログラム

Tel：082-424-7652 FAX：082-424-7649

E-mail：hofmann@hiroshima-u.ac.jp

発信枚数：A4版 4枚（本票含む）