

巨視的スケールでの実在性の破れを実証

量子力学では、日常の常識に反する量子重ね合わせ状態などが起こるとされ、単一の電子など微視的な環境では、その確認がされてきました。しかし、巨視的なスケールでも量子重ね合わせ状態が発現するか、ということは理論的には予測されていても実際に確認することは困難と思われていました。NTTではこのような量子力学の基本原則が巨視的なスケールでも成り立つかどうかを実験的に調べました。

かくやなぎ こうすけ まつぎき ゆういちろう
角柳 孝輔 / 松崎 雄一郎

といだ ひらく やまぐち ひろし
樋田 啓 / 山口 浩司

さいとう しろう
齊藤 志郎 / William J. Munro

NTT物性科学基礎研究所

実在性と非実在性

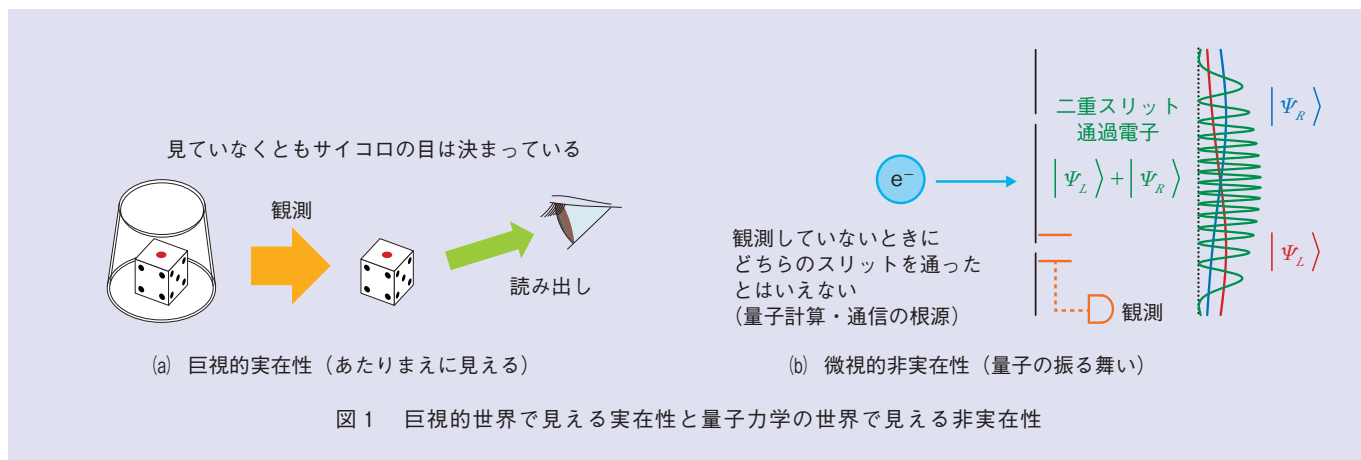
カップの中にサイコロを入れて振ることを想像しましょう。カップを開けてサイコロの目を見て「1」の目が出たならば、開ける前からサイコロの目が「1」であったと考えられます。このようにある物体を観測してその状態を知ることができたら観測以前からすでにその状態に決まっていたという考えは「実在性」と呼ばれ、日常の世界で当たり前になり立っているようにみえます (図1 (a))。

一方、量子力学に従う微視的な粒子は日常の世界での常識に反する奇妙な振る舞いを示します。例えば、電子を1個ずつ二重スリットに通してから

スクリーンに当てて電子の位置を記録することを考えます。はじめはランダムに見える電子の位置も、測定を繰り返すにつれて干渉縞を示すことが知られています。通常、干渉縞は左右のスリットを通った波が重なり合わさって生じます。電子が1個ずつスリットを通過しても干渉縞が現れることは、電子1個が分割できないにもかかわらず、右スリットを通った状態と左スリットを通った状態が同時に実現して重ね合わさる量子重ね合わせが実現していると理解されています。このとき、電子がどちらのスリットを通過したかを知るための観測を行うと、干渉縞が消失します。これは、観測以前にはどちらのスリットを通過したとはいえない

量子重ね合わせ状態であったものが、観測によって初めてどちらかのスリットを通った状態に確定したためです。このように観測以前には状態が確定しておらず観測によって初めて状態が確定する性質は「非実在性」と呼ばれ量子力学に従う微視的な系で現れることが知られています (図1 (b))。

巨視的世界の物体も量子力学に従う原子や電子で構成されているので、その振る舞いは量子力学に従うと考えられます。しかし、巨視的世界では、先ほどのサイコロの例からも明らかのように、非実在性が現れないようにみえます。巨視的な世界でも非実在性が現れるのか、それとも量子力学には適応限界があるのかという問題 (巨視的実



在性問題)は、量子力学の黎明期からの未解決問題の1つでした。本研究では巨視的なスケールでも量子力学に従う非実在性が現れるかを調べました。

実在性の破れを調べるには

巨視的世界の物体は、適切に観測を行えば、状態を乱さないと考えられています。これはサイコロの目を人間が観察しても、その目が変わらないことから明らかです。状態を乱さない観測が可能であり、かつ実在性が成り立つ場合には、複数の時刻での観測値の相関で表されるLeggett-Garg不等式と呼ばれる条件が満たされることが知られています。つまり、状態を乱さないような観測を行い、Leggett-Garg不等式の破れを示すことができれば実在性が破れている、つまり非実在性が表れているということが出来ます。NTTでは、理論研究からこのLeggett-Garg不等式と数学的に等価でより簡便な条件を示し、この条件が実験的に満たされているかどうかを調べることで巨視的実在性問題に挑みました。

超伝導磁束量子ビット

今回、巨視的スケールでの非実在性を調べるため、NTTで取り組んでいる量子力学研究で用いてきた超伝導磁束量子ビットに注目しました。2つの超伝導体を薄い絶縁体層で挟んだ構造のジョセフソン接合はコイルと同じインダクタンスとみなすことができ、流れる電流の大きさによってインダクタンスが変化する非線形性を持ちます。このジョセフソン接合を複数含む超伝導ループ回路は一種のLC共振器として振る舞うのですが、適切な磁場バイアスを印加するとジョセフソン接合の

非線形性のために、電流が右回りと左回りに流れる2つのエネルギー状態をとり得る量子ビットとして機能します。注目すべきは、この電流(数100 nA)は毎秒1兆個もの巨視的な数の電子の流れであり、この巨視的な電流が量子重ね合わせ状態となり得るかということです。

量子状態の観測

もし、観測による状態の乱れが大きければ、Leggett-Garg不等式の破れが実験的に確認されたとしても、実在性を否定することができません。例えば、サイコロの入ったカップを開けたときに、誤ってカップがサイコロに触れてしまい、目が変わってしまう場合を考えれば、サイコロを使った実験でもLeggett-Garg不等式が破れることは起こり得ます。そのため観測は、状態の乱れがないように行う必要があります。

状態を乱さない観測のために、今回、超伝導量子干渉素子(SQUID)を用いました。超伝導磁束量子ビットの2つの状態ではそれぞれ右回りと左回りの電流が流れているので、電流による磁場が発生します。この磁場の検出を伝送線路共振器内にSQUIDの入った回路で行います。この回路と量子ビットは磁氣的に結合しており、SQUIDのインダクタンスが磁束量子ビットの状態によって変化するので、伝送線路共振器の透過マイクロ波の状態は磁束量子ビットの状態を反映します。この量子ビットの状態読み出し方法はジョセフソン接合を電圧状態にしないため、観測による状態の乱れが小さい量子非破壊測定^{*1}を実現することが出来ます(図2)。

実験の原理

超伝導量子ビットが量子重ね合わせ状態を持つとすると、それは量子状態操作によって実現できます。量子状態操作とは、量子ビットのエネルギーと同じエネルギーを持つマイクロ波を量子ビットに照射することにより共鳴を起こし量子状態を変化させることです。照射するマイクロ波の強さや時間の制御により、さまざまな量子状態の生成が可能になります。超伝導磁束量子ビットの2つの状態をそれぞれ $| - 1 \rangle$ 、 $| + 1 \rangle$ ^{*2}とします。十分な時間を待つことでエネルギーの小さい $| - 1 \rangle$ 状態に初期化することが出来ます。量子系は量子状態操作によって $| - 1 \rangle \xrightarrow{\text{状態操作}} | - 1 \rangle + | + 1 \rangle \xrightarrow{\text{状態操作}} | + 1 \rangle \xrightarrow{\text{状態操作}} | - 1 \rangle - | + 1 \rangle \xrightarrow{\text{状態操作}} | - 1 \rangle$ と変化します(図3(a))。この状態操作量は4回繰り返すと元に戻るなので状態操作 $\frac{\pi}{2}$ と呼びます。 $| - 1 \rangle + | + 1 \rangle$ は量子重ね合わせ状態を表しています。このような状態が超伝導磁束量子ビットで現れて、観測によって $| - 1 \rangle$ か $| + 1 \rangle$ に状態が確定することの確認をめざします。

量子ビットが真の量子性を持っているならば、 $| - 1 \rangle$ 状態に量子状態操作 $\frac{\pi}{2}$ を作用することで $| - 1 \rangle + | + 1 \rangle$ という量子重ね合わせ状態を生成することが出来ます。この重ね合わせ状態に対して観測を行わなければ、重ね合わせ状態はそのままなので、次の状態

*1 量子非破壊測定：量子系で純粋な状態を用意して測定した際に量子状態が変わらないような測定。

*2 $| - 1 \rangle$ 、 $| + 1 \rangle$ ：量子状態を表す記述法で、今回の場合 $| - 1 \rangle$ 、 $| + 1 \rangle$ は右回りと左回りの電流状態に対応します。量子重ね合わせ状態を表す場合には $| - 1 \rangle + | + 1 \rangle$ のように表すことが出来ます。

操作 $\frac{\pi}{2}$ で $|+1\rangle$ 状態になり、この状態の読み出しの期待値は1となります。観測を行う場合、重ね合わせ状態は確率的に $| - 1 \rangle$ か $| + 1 \rangle$ に量子的な射影*3が起こるので、次の状態操作 $\frac{\pi}{2}$ で $| - 1 \rangle + | + 1 \rangle$ か $| - 1 \rangle - | + 1 \rangle$ の重ね合わせ状態が生成され、状態の読み出しの期待値は0となります。

次に、量子重ね合わせ状態が現れない場合を考えます。 $| - 1 \rangle$ 状態を用意し、 $\frac{\pi}{2}$ 状態操作を行った後に観測を行い、もう一度、状態操作 $\frac{\pi}{2}$ と最

終状態の読み出しを行います(図3(b))。一方で、同じ実験ですが、最初の状態操作 $\frac{\pi}{2}$ を行った後の観測を行わない場合も考えます。この量子ビットで量子重ね合わせ状態が存在しない、つまり実在性が満たされているならば、状態は観測される以前に確定しているので観測の有無で状態が変わらず、2つの実験の読み出し結果も変わらないことが期待されます。

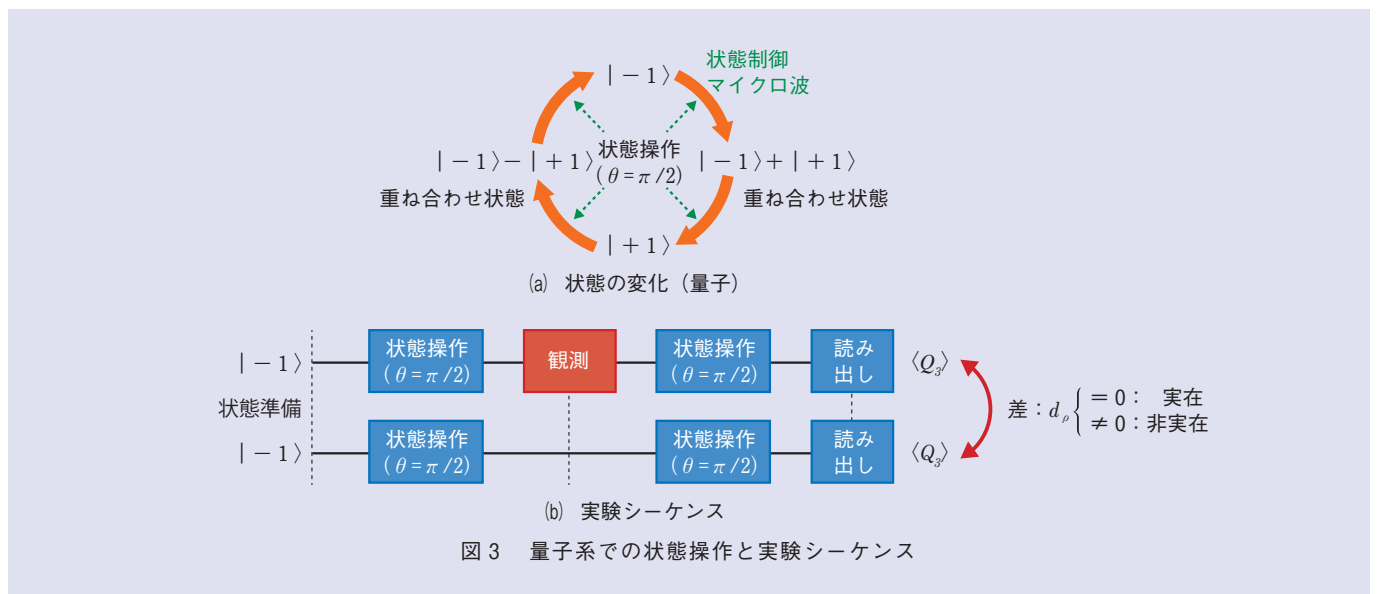
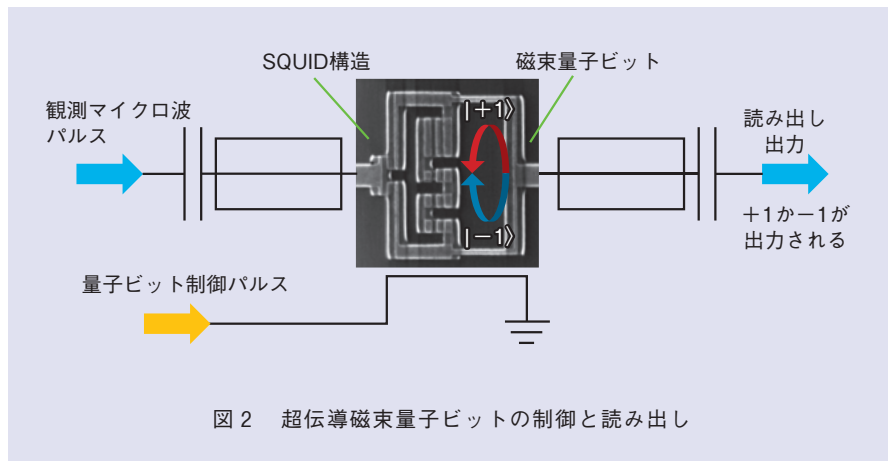
以上の考察から分かるように、実在性が成り立っているのであれば、観測の有無による差は現れません。一方で、

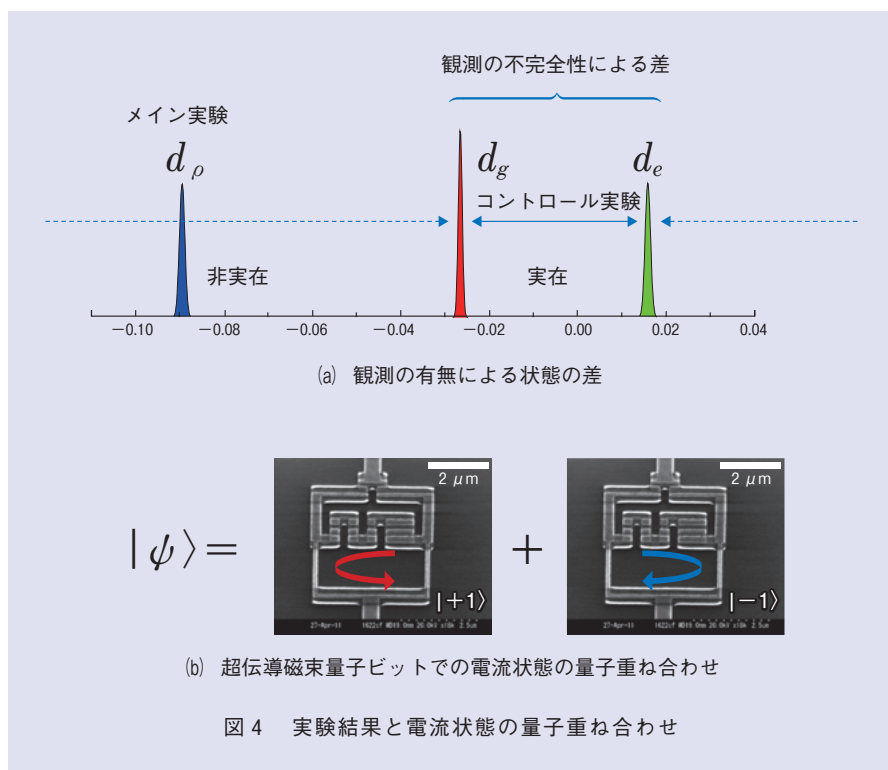
実在性が破れているのであれば有限の差が出るのが期待されます。この実験をメイン実験と呼びます。

なお、「状態を乱さない観測」でメイン実験を行うのが理想的ですが、ノイズの存在や観測の不完全性のために、現実には「観測による状態の乱れ」がわずかに存在します。これを定量的に評価する必要があります。そのために最初の状態操作で重ね合わせではなく純粋な $| - 1 \rangle$ または $| + 1 \rangle$ を用意し、観測をした後に、結果を読み出す実験を行います。また同じ実験ですが、観測をしないものも行います。これをコントロール実験と呼び、これで観測による状態の乱れを評価します。

コントロール実験により観測の有無で得られた差を考えます。 $| - 1 \rangle$ を用意した場合に得られた差を d_g とし、 $| + 1 \rangle$ を用意した場合に得られた差を d_e とします。一方で、メイン実験で得られた観測の有無による差を d_ρ と

*3 射影：観測によって量子重ね合わせ状態がそれを構成するどれかの純粋な状態に収束すること。





します。もし超伝導磁束量子ビット系で実在性が満たされるのであれば、観測するたびに+1か-1の値がそれぞれある確率で得られますが、それは観測以前に確定していると考えられます。2つのコントロール実験は確率1で+1か-1が得られる特殊な場合に対応するので、実在性が成り立つならば d_ρ は d_g と d_e の間のどこかに現れると考えられます。一方、メイン実験で得られた差 d_ρ が観測の乱れである d_g と d_e の間の範囲を超えていれば、この系で実在性が破れているといえます。

実験

超伝導磁束量子ビットの2つの状態の間のエネルギー差は数GHzのマイクロ波帯に属します。熱による励起を抑えるためにこのエネルギー差よりも熱エネルギーを十分小さくする必要があります。そこで、希釈冷凍機と呼

ばれる特殊な冷凍機を用いて絶対温度で10 mKまで冷却し実験を行いました。

実験の結果得られた d_ρ 、 d_g 、 d_e の値は図4(a)のようになり、 d_ρ は d_g と d_e の間を大きく超えた値をとりました。これは、超伝導磁束量子ビット系の振る舞いは実在性では説明できず、実在性が確かに破れていることを意味しています。この実験では実験誤差の標準偏差の約84倍の精度で超伝導量子ビットにおいて電流の量子重ね合わせが実現することを示しており(図4(b))実在性が破れていることを示すことに成功しました⁽¹⁾。

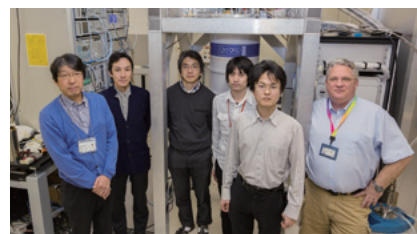
今後の展開

1個の電子などの微視的なスケールでしか現れていなかった量子重ね合わせ状態のような量子力学の本質的な現象が、光学顕微鏡で見える程度のスケールのデバイス上の電流のような巨

視的な量でも現れ得ることを実証しました。この成果は、基礎物理分野に大きく貢献するものです。今後は観測による状態の乱れをさらに抑えた測定や、さらに巨視的なスケールでの実在性の破れの検証をめざします⁽²⁾。

参考文献

- (1) G. C. Knee, K. Kakuyanagi, M-C. Yeh, Y. Matsuzaki, H. Toida, H. Yamaguchi, S. Saito, A. J. Leggett, and W. J. Munro: "A strict experimental test of macroscopic realism in a superconducting flux qubit," Nat. Comm., Vol.7, No.13253, 2016.
- (2) Focus on the News: "超伝導磁束量子ビットを用いた巨視的実在性問題の実験的検証に成功," NTT技術ジャーナル, Vol.29, No.1, pp.57-58, 2017.



(左から) 山口 浩司/ 齊藤 志郎/
角柳 孝輔/ 樋田 啓/
松崎 雄一郎/ William J. Munro

NTT物性科学基礎研究所では超伝導量子デバイスを用いることで応用だけではなく、量子力学の基礎に関する研究も行っています。量子の世界の不思議な現象を少しでも身近に感じていただけたでしょうか。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部
TEL 046-240-3767
FAX 046-240-4722
E-mail kakuyanagi.kosuke@lab.ntt.co.jp