

# 超伝導磁束量子ビットによる巨視的量子限界の探索

藤井 敏之

広島大学大学院総合科学研究科

## The search for macroscopic quantum limit by superconducting flux qubit

Toshiyuki FUJII

Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

### Abstract

Quantum mechanics has predicted many counterintuitive phenomena in daily life, and has changed our view of the world. Among such predictions, the existence of a macroscopic object in superposition is especially unbelievable. As Einstein asked, “Do you really believe that the moon exists only when you look at it?”. However, recent experimental results on a mesoscopic scale will ultimately require us to dismiss commonsense so-called macroscopic reality.

Leggett and Garg applied the Bell scheme for testing local realism to the time evolution of a macroscopic two-state system, and proposed a temporal version of the Bell inequality (the Leggett-Garg (LG) inequality) for testing macroscopic realism. However, as with the Bell inequality, the statistical approach behind this scheme may be less effective in showing clear incompatibility.

Here we propose a temporal version of the Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) scheme without statistical treatment for testing Einstein’s moon using three-time correlations.

## 第1章 序論

我々が日常的に目にする巨視的な物体は、たとえ我々が実際に見ていなくても存在しているはずである。このような考え方を实在論と呼ぶ。この实在論は長い間当然のこととされてきたが、量子力学の登場により、その前提が揺らいでいる。すなわち、量子力学では、微視系は実際に観測されるまで重ね合わせ状態にあり、物理量は不確定である。そのため、観測していない時の電子や原子のような微視的な物体について、素朴に实在

論を適用することができない。ところが、ひとたび微視系において非实在性を認めると、巨視系に対する实在論をも、疑わねばならなくなる。なぜならば、我々の巨視的世界もまた、微視的な電子や原子から構成されているからである。これは、Schrödingerの猫として知られている量子力学の根幹問題である。この問題が示すように、实在論が成り立つように見える我々の巨視的世界と重ね合わせ状態をとる微視的世界の間が、いかに結び付けられているのかは明らかではない。この二つの世界に境界が存在するのかどうか、あるとすれば

どこにあるのかは、実験によって明らかにする必要がある。

そこで本論文では、超伝導量子回路を舞台として、量子力学の適用限界（巨視的量子限界）を二つの段階に分けて探索した。一つ目は、巨視的量子現象を示す舞台を具現化すること（探索指針 I）、二つ目は、得られた巨視的量子系が真に量子力学に従っていることを示し、巨視的实在論に基づいた理論で記述される可能性を排除すること（探索指針 II）である。

## 第2章 巨視的量子現象と超伝導量子素子

本章では、超伝導体を例として、巨視的量子現象とはいかなるものかを説明した。超伝導現象は、巨視的な数の電子対が関与する巨視的量子現象である。ここで現れる量子性は、多数の電子対が同じ量子状態をとることによって、個別の量子性が増幅されていることによるものであり、本質的には各粒子の量子性が発現されているにすぎない。一方で、Schrödingerの猫に代表される巨視的に異なる状態の重ね合わせは、第二種の巨視的量子現象と呼ばれ、巨視系の集団的自由度が量子力学的に振る舞うものである。この第二種の巨視的量子現象は、近年のナノテクノロジーの発展により、1981年に微小なJosephson接合において、 $10^9$ 個程の電子対を伴った巨視的量子トンネル現象として確認され、2000年には巨視的な重ね合わせ状態が実現された。そして、現在、この重ね合わせ状態を情報の単位（量子ビット）として用いた超伝導磁束量子ビットが提案され、それを基本要素とする量子計算機の開発が進められている。本論文では、この超伝導磁束量子ビットの大規模集積化を通して、巨視的量子限界の探索を更なる巨視系へと進めることを目指す。以下の第3章と第4章では、研究目的で述べた探索方針 I について、その問題の所在を明らかにするとともに、解決策を提案した。具体的には、超伝導量子回路中の素励起であるフラクソンに着目し、その古典的性質（第3章）、及び量子的性質（第4章）を利用して問題の解決を図った。

## 第3章 量子計算を通した巨視的量子限界の探索 I—古典フラクソンを用いた量子計算—

本章では、まず、量子ビットの重ね合わせ状態を利用することで、超並列計算が可能な次世代の計算機である量子計算機について概論を述べた。この量子計算機の実現に当たっては、二種類の量子演算、すなわち、各量子ビットを独立に操作する一量子ビット演算と二つの量子ビットを結合させて操作する二量子ビット演算を、実現する必要がある。しかしながら、一般に固体素子を用いた量子ビットでは、固体中に存在する様々なノイズのために、量子力学的な重ね合わせが短時間で壊されてしまうという難点がある。それゆえ、量子計算を実行するためには、量子ビット間の相互作用を高速かつ正確に制御することが必要であり、これが、超伝導磁束量子ビットの集積化に向けた障害となっている。そこで、超伝導素子中の可動な素励起であるフラクソンを用いて解決を試みた。

- (1) Josephson伝送線路を伝播するフラクソンを用いて、量子ビット間の相互作用を制御し、量子計算を簡便に操作する方法を示した。
- (2) フラクソンによる結合制御法を応用し、巨視的量子状態であるグラフ状態の生成法を提案した。このグラフ状態は、近年提案された新たな量子計算法である一方向量子計算における初期状態となる高度なエンタングルメント状態（量子もつれ合い状態）である。
- (3) 大規模集積化において問題となる、個別配線からのノイズを除くために、NMRイメージングにおいて用いられる勾配磁束トリフォーカス法を用いた個別制御法を応用し、その有用性を示した。

以上の方法を用いることで、量子計算の大規模化を通して、より巨視的な量子系を探索することが可能となる。

## 第4章 量子計算を通じた巨視的量子境界の探索Ⅱ—量子フラクソンを用いた量子計算—

本章では、第3章に引き続き、フラクソンを用いた超伝導量子計算機の大規模集積化を目指すための方法を提案した。第3章では、古典的なフラクソンによって超伝導磁束量子ビット間の結合を制御することを提案した。この第4章では、フラクソンそれ自身を量子ビットとする新たな提案を行った。それは、二つのフラクソンからなる複合粒子であるブリーザーの内部自由度を利用した量子ビット（ブリーザー量子ビット）である。

ここでは、ブリーザーと共振回路、及びブリーザー同士の電磁気的な相互作用を定式化し、二つの基本演算の実装法を示した。このブリーザー量子ビットでは、回路上に固定された量子ビットとは異なり、ブリーザーが持つ機動性により相互作用を制御することができる。

さらに、ブリーザー量子ビットは、多数の電子対の運動を伴う巨視的な実体である。それゆえ、大規模量子計算機の実現という目的のみならず、量子力学における基礎を検証するために用いることもできる。この目的のために、CiracとZollerによって提案された共振器を介したエンタングル状態の生成法を応用し、Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ)状態を生成する方法を提案した。このGHZ状態を用いることで、巨視的な粒子間の量子力学的非局所性を検証することが可能である。

## 第5章 超伝導磁束量子ビットを用いた巨視的量子性の検証

巨視的量子境界を探索するに当たっては、実際に観測された現象が、量子力学的に運動しているように見えるだけではなく、確かに量子力学によって記述されていることを示す必要がある（探索指針Ⅱ）。この目的のために、A. J. LeggettとA. Gargによって判定式（Leggett-Garg(LG)不等式）が考案された。この不等式を用いた検証スキームでは、量子振動の二つの時刻における二点相関を

利用し、観測に伴う重ね合わせ状態からの不連続な飛び移りを、不等式の破れとしてみることができる。しかしながら、このスキームでは測定値の間の相関関数を精度良く求めるために、多数回の実験を行う必要があった。そのため、同一のアンサンブルを準備することが困難であるという問題がある。この問題は、LG不等式の元となったBell不等式にも存在していた。このBellスキームは、空間的に離れた二つの粒子の間の相関を見ることで、量子力学における非局所性を検証するものである。これに対して、Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ)によって提案されたスキームでは、空間的に離れた三つの粒子に対する相関を利用することで、少数回の実験で空間的な非局所性を判定するものである。そこで、この空間版のGHZスキームを時間版へと応用した新しいスキーム、時間GHZスキームを提案した。このスキームでは、少数回の実験から量子力学的な飛び移りを検出することが可能である。

## 第6章 結論

以上、本論文では、超伝導量子回路を用いた量子力学の適用境界の探索を行うために、以下の二つの探索指針に沿った提案を行った。

[I] 多数の超伝導量子回路を集積することによって実現される量子計算過程は、巨視的量子現象に他ならず、その実現には巨視系での量子境界を探索する上で実践的な意味があると言える。しかし現時点では、量子ビット間の相互作用を正確に制御することが困難であるために大規模化には至っていない。そこで超伝導素子中の素励起であるフラクソンを用いて、大規模量子計算の要となる量子ビット間結合を簡便に制御する方法を考案し、それを用いた量子計算の方法を示した。応用と基礎が深く融合する量子計算機の実現を通して、より大きなスケールを持つ量子系を探索することが可能となる。

[II] 巨視的量子性の検証のために、新たな判定スキームを提案した。このスキームは、実験で観測されている“量子振動”が、本当に量子的なものであるのかどうかを実験的に判定することがで

きるものであり、連続する三時刻の時間相関によって、その判定を下すことができる。従来の方法に比べて少数回の測定結果のみで判定を行うことができるため、巨視的实在論の排除をより決定的に行うことが可能である。

物理学は、我々の住む世界で起こる現象を説明することを目的とした学問である。現代の物理学において、量子力学は相対性理論と共にその根幹を成すものである。従って、量子力学によって如何に現象を理解するかは、我々がどの様に世界を

認識するのにかに関する根本問題である。高度にその挙動を制御可能な巨視的量子系である超伝導量子計算機の実現は、単なる応用的な意味だけではなく、根本問題である巨視的量子限界を探索する上で最適な舞台となる。

本論文で示したフラクソンを用いた量子相関の生成法、及び量子性の検出スキームは、その実現に必要な二つの段階において問題を解決するものであり、超伝導量回路を舞台とした更なる巨視的量子限界の探索に有効である。