

超伝導位相量子ビットのデコヒーレンスに関する理論的研究

小杉 範仁

広島大学大学院総合科学研究科

Theoretical studies on decoherence of superconducting phase qubit

Norihito KOSUGI

Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

Abstract

Decoherence of a quantum bit (qubit) as a building block for quantum computer is one of the most important problem for the practical realization of quantum computing. In the previous research for the quantum computing, it is known that decoherence is caused by the relaxation processes in the qubits.

In this thesis, we study the measurement and control methods of relaxation times for superconducting phase qubit that contributes to the scalable quantum computer. Firstly, we propose a measurement method by using dynamically-controlled qubits. Secondly, we estimate the relaxation times by using the formula of the relaxation times obtained by the Bloch-Redfield theory. Thirdly, we try to control the relaxation processes in order to confirm the validity of the estimation. As a result, we can eliminate the pure dephasing process in the superconducting phase qubit. Herewith, the validity of the estimation of relaxation time is partly confirmed. We find the possibility of the variable coupling between the qubit and its environment.

The study outlined above provides a new approach to the solution of the decoherence problem underlying the practical realization of quantum computing.

第1章 序論

本章では、研究の背景として、量子情報科学について概観し、研究対象である超伝導位相量子ビットの説明を行った。そして、デコヒーレンスの研究の現状と問題の所在を明らかにし、本論文の目的と構成を述べた。

量子情報科学は、古典情報科学で問題となった量子効果を積極的に利用した新しい情報科学であ

る。量子力学的状態の重ね合わせを用いて超並列演算を行う量子コンピュータは、その主要な研究分野である。量子コンピュータの基本要素は、量子ビットと呼ばれ、情報の単位として0と1の重ね合わせ状態を用いる。ところが、その重ね合わせ状態は、環境ノイズによって乱され、量子重ね合わせ状態は消失する。この現象は、デコヒーレンスと呼ばれ、量子計算を阻害することから、量子コンピュータの実用化に向けて克服すべき現象で

ある。本論文の目的は、デコヒーレンスを克服するため、環境と相互作用する超伝導位相量子ビットの緩和現象を探究することである。

第2章 超伝導位相量子ビット

超伝導位相量子ビットは、超伝導量子素子である Josephson 接合に実現された量子ビットである。本章では、Josephson 接合の基本特性を古典論と量子論の両面から整理し、量子ビットの実装法について述べた。また、量子ビットのデコヒーレンスの研究のため、環境との相互作用を定式化した。

Josephson 接合は、絶縁層を超伝導体で挟んだ構造の接合である。この絶縁層を Cooper 対が量子トンネルするため、接合を Josephson 電流と呼ばれる電流が流れる。Josephson 電流の古典的挙動は、位相差空間上の洗濯板ポテンシャル中の古典的粒子（位相粒子）の動力学として取り扱うことができる。そして、位相粒子の質量に相当する接合キャパシタンスが小さい場合、位相粒子は量子的に振舞い、洗濯板ポテンシャルに離散化したエネルギー準位が形成される。洗濯板ポテンシャル中のポテンシャル井戸はすべて同形であるので、エネルギー準位の構造は、梯子状になる（Wannier-Stark ラダー）。ここで、エネルギー準位は、量子トンネル過程による崩壊幅を持つ。従って、各準位の状態は準安定状態であり、Wannier-Stark 状態と呼ばれる。超伝導位相量子ビットは、特定のポテンシャル井戸に形成された量子2準位を用いることで構成される。

また、超伝導位相量子ビットのデコヒーレンス過程を考察するために、注目する系と調和振動子の集団である環境が結合したモデルである Caldeira-Leggett モデルを用いて、超伝導位相量子ビットと環境及び、それらの中での相互作用を定式化した。

第3章 Bloch-Redfield理論

本章では、Bloch-Redfield理論を用いて、超伝導位相量子ビットのデコヒーレンスを定式化した。

緩和現象の詳細は、対象とする系によって異なる。

しかし、系に依らず緩和過程の情報は、最終的には緩和時間に集約される。そこで、緩和時間を指標として、緩和過程を現象論的に研究した。緩和現象は、大別すると2種類ある。その1つは、環境と注目する系の間でのエネルギーのやり取りにより引き起こされるエネルギー緩和である。このエネルギーのやり取りは、2準位に共鳴する環境の周波数揺らぎによって引き起こされる。もう1つの緩和現象である純粋位相緩和は、環境の低周波揺らぎによって、量子ビットの位相の時間発展が乱される為起こる現象である。

これまで、超伝導位相量子ビットに対して、緩和過程を特徴付けるエネルギー緩和時間と純粋位相緩和時間を分離して測定する方法は確立していなかった。そこで、本論文では、これらの緩和時間を分離・抽出する方法について考案した。まず、全系に対する密度演算子の運動方程式から、注目する系に対する密度演算子を抜き出した。これにより、環境と分離しているにもかかわらず、相互作用の情報を取り込んだ注目する系に対する密度演算子の運動方程式（マスター方程式）を得た。注目する系の固有状態を基底として行列（密度行列）表示したマスター方程式は、Bloch-Redfield 方程式と呼ばれる。これは、一般の量子系の緩和過程を考察するために広く用いられている。

本章では、準安定状態である超伝導位相量子ビットに対する緩和過程を考察するために Bloch-Redfield 方程式を導出した。この Bloch-Redfield 方程式には、緩和過程を記述する項が含まれ、そこからエネルギー緩和と純粋位相緩和に関する情報を時定数として取り出すことができる。また、この時定数の逆数が、それぞれエネルギー緩和時間と純粋位相緩和時間として定義される。これら緩和時間についての表式も求めた。

第4章 デコヒーレンス時間の抽出

本章では、超伝導位相量子ビットに対する Bloch-Redfield 方程式を用いて、緩和時間を抽出する方法について考察した。

Bloch-Redfield 方程式は、量子準位の占有確率に対する時間発展を予言する。その占有確率は、

超伝導位相量子ビットにおける複数の減衰過程を反映して、単調に指数関数的に減衰する項と共鳴外場による振動を伴う減衰振動の項の和で与えられる。これまで、緩和時間は、この減衰項を表す指数関数に含まれる時定数から得ることができたが、その時定数には、エネルギー緩和時間と純粋位相緩和時間の両者が混在しているため、緩和時間を独立には取り出すことができなかった。

そこで、今回、2つの項に含まれる緩和時間の割合が異なっていることに着目して、共鳴外場を用いたこれまでの動的測定法に加え、系の自由発展をもとに占有確率を測定した静的測定法を導入し、両者の時定数を組み合わせることで、これら緩和時間を分離・抽出することに成功した。

これまで実施されてきた共鳴外場を用いた動的測定法では、密度行列の対角成分と非対角成分が互いに影響しながら時間発展を行うため、時定数には、エネルギー緩和時間と併せて、純粋位相緩和時間も含まれていた。そこで、今回新たに導入した静的測定法では、系の占有確率と各占有状態間の量子可干渉性（コヒーレンス）の大きさを表す成分は独立に時間発展する。このため、占有確率は、非対角成分の減衰に寄与する純粋位相緩和ではなく、エネルギー緩和によって減衰する。従って、量子準位の占有確率を観測することでエネルギー緩和時間だけを含んだ時定数を得ることができる。結果、静的測定での系の自由発展で測定された純粋位相緩和時間を含まない時定数と、これまでの動的測定法による時定数を比較することで、2つの緩和時間が初めて分離することに成功した。

第5章 デコヒーレンスの制御

第4章では、緩和時間の抽出方法を提案したが、その方法の正当性は自明ではない。従って、本章では抽出方法に正当性を与えるために、得られた緩和時間をもとにして、積極的に緩和を制御することを試みた。この制御により、緩和時間が期待通りに応答するならば、抽出された緩和時間の正当性の一端が保証されるばかりでなく、これまで制御不能と思われていた環境が操作できる可能性

が生まれることから、応用上も有用である。そこで、超伝導位相量子ビットにおいて、純粋位相緩和を消去する方法が提案されていなかったため、前章で得られた緩和時間の表式をもとに純粋位相緩和の抑制法を探索した。

純粋位相緩和時間の表式は、純粋位相緩和がバイアス外場（バイアス電流）の低周波揺らぎによって引き起こされることを示している。この揺らぎは、量子2準位のエネルギー間隔がバイアス電流に対して極値を持つとき、バイアス電流の低周波揺らぎによって変化しない。結合したJosephson接合を基にした超伝導位相量子ビットでは、エネルギー間隔がバイアス電流に対して非単調に変化するため、極値を持つ。このため、最適点と呼ばれるこの極値において、バイアス電流の低周波揺らぎは、超伝導位相量子ビットの位相の時間発展に影響を与えない。従って、位相の時間発展の乱れに起因した純粋位相緩和を除去できるという結果を得た。これより、前章で述べた緩和時間の抽出方法の正当性の一端を与え、また同時に、環境と注目する系との結合を制御する可能性を示すことができた。

第6章 結論

本章では、研究の背景を説明した後、各章を概観するとともに、得られた結果とその意義について総括した。

本論文では、量子コンピュータ実現の障害となる量子ビットのデコヒーレンスに対し、その原因である緩和現象について、超伝導位相量子ビットを対象に、緩和時間の測定法と制御に関する研究を行った。まず、確立されていなかった緩和時間の抽出方法に対して、これまでの動的手法に静的手法を加えた新たなスキームを提案した。次に、得られた緩和時間の表式をもとに、緩和時間の評価を行った。そして、評価の正当性を確認するために、緩和過程の制御を試みた。結果として、超伝導位相量子ビットにおいて、純粋位相緩和過程を除去することができた。これより、緩和時間評価の正当性の一端を保証し、また、環境と量子ビットとの結合制御の可能性を見出した。以上の

結果は、量子ビットのデコヒーレンス克服に向けた研究に対して、既存の枠組みを超えた新たなアプローチを提供するものである。