

氏 名	若浦 光
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 8045 号
学 位 授 与 年 月 日	平 成 29 年 3 月 24 日
学 位 授 与 の 要 件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
審 査 研 究 科	数 理 物 質 科 学 研 究 科
学 位 論 文 題 目	

スピン渦誘起ループ電流を量子ビットとした量子計算機に関する理論的研究

主 査	筑波大学教授	工学博士	日野健一
副 査	筑波大学教授	理学博士	矢花一浩
副 査	産業技術総合研究所上級主任研究員	理学博士	柳澤 孝
副 査	筑波大学准教授	Ph.D.	小泉裕康

論 文 の 要 旨

審査対象論文は、量子コンピュータの実現に関する問題に、理論的立場からモデル計算を行い、検討を加えたものである。本論文の最大の特徴は、量子ビットとして‘スピン渦誘起ループ電流’を使っていることである。

第 1 章では、序論として、‘スピン渦誘起ループ電流’とその存在が期待されている物質系、銅酸化物高温超伝導体についての説明と、本論文の主題である量子コンピュータの基本的な原理と実現化に向けた現状について記述がなされている。

第 2 章では、本論文で使用するモデルハミルトニアンの説明と、‘スピン渦誘起ループ電流’が存在するために必要な‘電子がスピンを捻りながら遍歴運動をする’状況を記述するための準備として電子スピンの回転について説明されている。

第 3 章では、第 2 章で取り上げたハミルトニアンを用いたシュレディンガー方程式の解を、ハートリー・フォック近似を使って求める方法を説明している。ハートリー・フォック1電子波動関数の数値計算の方法としては、カー・パリネロ法が用いられている。

第 4 章では、第 3 章で説明された数値計算で求めたハートリー・フォック1電子波動関数が座標に関しての多価関数となる場合についての説明が行われている。これは、ハートリー・フォック場中に遍歴電子が作るスピン渦が存在する場合、遍歴電子とスピン渦の自己無撞着な相互作用により、スピンの回転を伴う電子の移動が起こるためであると説明されている。厳密な多体波動関数は一価関数でなければならない

が、この多価のハートリー・フォック1電子波動関数を1電子基底として作った多体波動関数は多価となり、矛盾が起こる。この矛盾を解消する為に位相因子を導入し、多価のハートリー・フォック 1 電子基底を持つ正規直交条件を保ったまま、新たな1電子基底を構成する方法が説明されている。

第5章では、磁場を印加し、異なるスピン渦誘起ループ電流を持つ量子状態の縮重を解き、量子ビットとして使う際に問題となる、遷移双極子モーメントの計算を安定な量子ビットの最小単位、Spin-Vortex-Quartet (SVQ)に関して、計算を行っている。遷移双極子モーメントは量子ビットとして使用するのに十分大きさであることが示されている。

第6章から、量子計算に関するシミュレーションが始まる。スピン渦誘起ループ電流を量子ビットとして、量子計算を行う方法が2量子ビット系に対し説明されている。

第7章では、グローバーの探索アルゴリズムを計算機上でシミュレートされている。

第8章では、量子ビット間の距離を大きくし、独立な量子ビットとなる状況の実現を考察している。そして、量子ビットの独立性を測る量として、‘結合エネルギー’が導入されている。

第9章では、量子ビット間の距離を大きくし、独立な量子ビットとなる状況を考え、そこに外部電流を導入することにより、量子ビット間の結合を、量子重ね合わせ状態を壊さずに行う方法についてのシミュレーションが行われている。これは、制御ビット等の2量子ビットの実行を行うために必要な、量子ビットカップラーとなることが主張されている。

第10章では、4量子ビット系に対し、バリア原子を導入し、独立な量子ビットとなる状況を実現する方法について説明されている。

第11章が本論文の結論である。少数量子ビット系ではあるが、Di Vincenzo が提出した量子ビットが満たさなければならない、5つの条件

1. すべての量子ビットはある特定の状態に初期化できる。(初期化)
2. すべての量子ビットは観測できる。(観測)
3. 単一量子ゲートと制御 NOT 演算が実行できる。(ゲート演算)
4. ゲート演算にかかる時間はデコヒーレンス時間に対して十分短い。(長寿命)
5. 量子ビットが系にいくつ存在しても、それらすべてが独立かつそれらの間の結合が制御できる。または、そのような系を実現できる。(集積化可能性)

のうち、4以外をスピン渦誘起ループ電流量子ビットは持つことを理論的に示したと主張している。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

著者が序論で述べているように、量子コンピュータの実現に向けた現状は楽観論もあるが、なかなか厳しいのが現実である。特に現在問題になっているのは、量子ビットの集積化の問題である。現実的に量子演算を任意の回数行うためには、量子誤り訂正を行うことが必要で、これには、論理的な量子ビット数の100倍以上の物理的な量子ビットが必要であるという見積もりもある。現在、提案されている量子ビットは量

子誤り訂正導入の為の集積化を行うことが困難であると考えられている。しかし、本研究で提案されている‘スピン渦誘起ループ電流’量子ビットではそれが、可能であるかもしれない。その理由は量子ビットがトポロジカルな量子数(winding number)で規定された頑強なものであり、また、1量子ビットの大きさが数ナノメートル大きさであり、量子ビットの結合や量子ビット状態の制御・観測も同程度の大きさのコンパクトなものにすることができる可能性あるからである。本論文では、2量子ビット系という非常に小さな系であるが、上記のことを理論的に明らかにしている。

しかし、本研究は理論的な可能性を示しただけで、実験的な裏付けがほとんどない。そもそも、‘スピン渦誘起ループ電流’が銅酸化物高温超伝導体に実際に存在しているかどうか、確定したものでない。またシミュレーションで使ったモデルは簡単なもので現実をどれくらい的確に表しているか、わからない。特に、Di Vincenzo の条件の4については何も言っていない。

上記の不確定性要素に関する批判は、フロンティアを開拓する理論においては宿命的なものであり、あまり、強く批判するのも問題がある。本論文で述べられていることが現実可能であるとすれば、これは、画期的なことである。量子コンピュータの実現は、大きな技術革新をもたらす可能性があり、リスクを負っても追求すべきものである。また、この論文のように理論的な可能性を示すことが、実験を行う強い動機となり、ブレイクスルーをもたらす要因の一つとなりうる。実際、欧米では、その存在もまだ実験的に確証されていない‘マヨラナ粒子’を使った量子コンピュータが提案され、実験もおこなわれている。

理論的なシミュレーションは、ここで取り上げたモデルハミルトニアンに対しては自然なもので、本研究が示した可能性が実現したとしても、理論的には不自然ではない。今後、実験家と協力して、実験的な裏付けを持った理論にしていく必要があるが、本論文は博士論文として十分な内容を含んでいると考えられる。

〔最終試験結果〕

平成 29 年 2 月 13 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。