

論文の内容の要旨

論文題目 Scalable Quantum Computation Schemes with Trapped Ions
(拡張性を有するイオントラップ量子計算の研究)

氏 名 藤原 真吾

量子計算では量子力学的な二準位系(キュービット)を用い、重ねあわせ状態・シュレーディンガー方程式に従った時間発展・観測における波束の収縮という3つの重要な性質を利用している。そして、現在の計算機では膨大な時間を要する問題、例えば整数の因数分解やデータベース探索問題に対して量子アルゴリズムを用いて、高速に解くことが可能とされている。これは、キュービットに対してアルゴリズムに従いユニタリ変換(量子ゲート)を施し、解である量子状態の確率振幅を高確率で残すように操作されている。

量子計算機の実現できる物理系の候補の1つとして、イオンを電磁力によって狭い空間に閉じ込める技術であるイオントラップが挙げられる。キュービットとしては冷却されたイオンの内部状態、さらに任意のイオン間で情報伝達を行うため量子化された振動のエネルギーモードを用いる。そして、外部からのレーザー光操作によるイオンの状態制御とシェルビング法による観測を行うことで量子計算が実現される。状態制御においては、内部状態間のみの遷移であるキャリア遷移と、振動モード数も変化するサイドバンド遷移が代表的な遷移である。このような遷移を組み合わせる量子計算手法は、キュービット数の拡張性や多キュービットゲートの操作性から注目を集めており、実験においても量子計算の万能回路である制御NOTゲート(CNOT)、量子情報処理に用いられるエンタングル状態、そしてテレポーテーションなどが高いフィデリティで実現されている。フィデリティとは精度と同義であり、実現している状態と理想的な状態との近さをあらわす値である。

量子計算を利用して現在のコンピュータの性能を上回る実用的な計算を行うには数百以上のキュービット数を必要とする。現段階では原子の自然放出などの物理的要因や実験技術の不完全さなどによるデコヒーレンスの影響が大きいため、どの物理系でも実用的な量子計算を行うだけの精度を達成するには至っていない。イオントラップに関しては、レーザー光の強度や位相揺らぎが計算精度を落とす要因となっている。よって、量子計算の理論研究としては以下のようなものが重要視されている。

- ・デコヒーレンスの影響を克服するため、ハミルトニアン設計やその組み合わせを研究することで、キュービット数の拡張性を有し、かつ効率的に実現される量子計算手法を提案する。
- ・数値計算によって計算精度の減少やエネルギーの散逸等を評価することで、デコヒーレンスの影響の大きさを解析する。
- ・新しい量子アルゴリズムを考案する。

以上より本研究ではキュービット数の拡張性を有するイオントラップ量子計算を高フィデリティで実装することを目的とし、実験との対応性を持ち、かつ既往の手法

よりもレーザー光操作の少ない効率的な量子計算手法を提案した。対象とした量子計算手法は、

- ・ Groverのアルゴリズム(データベース探索)に必要な不可欠な制御位相反転ゲート
- ・ 量子情報理論において顕著な性質を示すエンタングル状態
- ・ 新しい量子アルゴリズム発見につながり得る量子ランダムウォーク(QRW)
- ・ 量子計算の万能回路形成に必要なとなるCNOTゲート

の4つである。ただし本研究では、CiracとZoller(CZ)による手法とMolmerとSorensen(MS)による手法という2つの著名なものを基本として新しい量子計算手法の考案を行った。さらに、イオントラップ量子計算における主要なデコヒーレンスであるレーザー光の強度と位相揺らぎを考慮し、数値計算によって既存の量子アルゴリズム実装時のフィデリティやエネルギーの散逸の評価も行った。

まず、制御位相反転ゲートに関して、全量子状態の反転を可能とし、かつキュービット数の拡張を有するシステムティックなレーザー光操作方法を提案した。これは、CZによるCNOTゲートの実装方法に基づき、レーザー光の位相を調節し、反転させたい量子状態と対応してNOTゲートの印加方法を考案した。そして、代表的な量子アルゴリズムであるGroverの探索アルゴリズムと量子フーリエ変換(QFT)に対して、実験で実現されているレーザー光の揺らぎの大きさを考慮した数値計算を行い、計算精度としてフィデリティ、エネルギーの散逸としてイオンの重心振動のHeatingレートを解析した。Groverのアルゴリズムの数値計算においては、本研究で提案したゲート実装方法を用いた。

レーザー光の位相と強度揺らぎに関して、ウィーナー過程を用いたモデルを利用し、マスター方程式を4次ルンゲクッタによって解き、密度行列の時間発展を計算している。CNOTの実験と同じレーザー光操作をプログラムし、ゲート操作時間を考慮することでラビ周波数を決定し、そして位相揺らぎによる10%、強度揺らぎによる1%の誤差を生じるようにパラメータを推定した。そのパラメータを用いることで実験レベルの精度を計算で再現している。数値計算の結果、両アルゴリズムにおいて強度揺らぎの影響がフィデリティの減少に大きく効くこと、QFTの方がGroverに比べ高フィデリティで実現されること、Groverでは確率振幅が十分に増幅されないこと、さらにHeatingレートはGroverの方がQFTに比べ2桁程度大きいこと等が判明した。

エンタングル状態とは量子情報処理の中で最も特徴的な性質であり、最大エンタングル状態であるGHZ状態は $|\text{GHZ}\rangle = (|0\dots 0\rangle + |1\dots 1\rangle)/2^{1/2}$ と記述される。イオントラップにおいても6個あるいは8個のイオンによるエンタングル状態が実験で実現されている。GHZ状態の実装手法としては、MSによる手法や量子ゲートを組み合わせた量子回路による方法等が存在する。最近、キャリアやサイドバンド遷移を組み合わせての量子計算が高フィデリティで実現していることから、量子回路による手法に着目した。既往の研究では連続してCNOTゲートの操作が必要となることから、本研究ではサイドバンド遷移の使い方において振動モードの制御をまとめることで多キュービットゲートとして実現する手法を考案した。数値計算によって、既往の連続したCNOTゲートを用いる場合と比較して高フィデリティで実現されることを確認し、さらにMSの手法と比較してもキュービット数の小さい場合にゲート操作時間に関して本手法の有効性が確認された。そして、ラムディックパラメータを小さく設定した場合は、イオン数20個以上でも操作時間の優位性を持つことが判明し

た。さらに、本手法を応用し、制御ビットと標的ビット数が任意の場合に拡張されたゲートの実現方法も考案した。

QRWでは古典の場合と同様にコインの出力(表裏)によって左右どちらに動くか決定されるが、粒子の位置とコインの出力が重ね合わせ状態を取りうる点で大きく異なる。QRWは空間的な探索問題などへ応用可能と知られている。

本研究では最も一般的な円環上の離散QRWを考える。提案した手法ではキュービットを用いて位置を表し、制御演算によって左右への移動を行う。そして、多キュービット用のCNOTゲートの組み合わせによってQRW用の演算子を実現されている。本手法の特徴として、直線上のQRWに適用可能であること、高次元のQRWへ適用可能であること等が挙げられる。さらに、左右への移動量が大きい場合にも応用可能である。既往のイオントラップにおけるQRWは、イオンの内部状態に依存して実空間内で左右に波束が分裂する手法、あるいは位相空間内の回転を利用した円環上のQRWなどが提案されていた。これらの手法ではQRWの実行可能なステップ数の限界、あるいは観測の容易性で問題が生じる。しかしながら、本手法では理論的にはステップ数の限界は無く、また観測もシェルピング法で良いため、多キュービットゲートの実現が容易なイオントラップでの実現性は高いと考えられる。

最後に振動モード数に依存しないラビ周波数を持つMSの手法の応用を考えた。CZによる制御演算を行う過程を補助状態と基底状態間でのMSによる遷移で代用し、Heatingの影響を受けにくいCNOTの実現方法を考案した。また、この手法をQRWに応用し、繰り返し施していたCNOTのためのレーザー光操作を簡略化できた。そして、イオンの振動モードの基底状態への冷却も不要なことから、より実験的制約を緩和することができた。

以上より本研究の結論として、キュービット数の拡張性を有するイオンチップ量子計算を高フィデリティで実装することを目的として、制御位相反転ゲート、エンタングル状態、QRW、そしてCNOTの実装方法を考案した。その結果、各量子計算において、既往の手法と比較してキュービット数の拡張性を有し、かつレーザー光操作の効率化を行うことでフィデリティの減少を抑えることに成功した。よって、本手法の利用によって実用的な量子計算実現に有用な手法と考えられる。