

審査の結果の要旨

氏名 ブルータ ユリア マリア

本論文は、理論的に提案されている平面クーロン結晶を利用した量子シミュレーションを実現するための理論的考察と数値解析を中心に8章から構成されている。

第1章は序論で研究の背景と目的を述べている。量子情報処理という広い分野の中で、量子シミュレーションは必要となるキュービット数が少ないこともあり、精力的に取り組むべき課題であることを指摘している。量子コンピュータの実現可能性の高いものとして捕獲イオンを用いた手法の現状について詳細に説明されている。これらを踏まえて近年理論的に提案された捕獲イオンを用いた量子シミュレーションの手法について紹介している。これは平面クーロン結晶を必要とするが、それについての研究はほとんどないことから、平面クーロン結晶の性質およびその実現可能性を明らかにすることを本研究の目的としている。

第2章では本研究で必要となる理論について説明している。量子シミュレーションの概念について説明した後、クーロン結晶の定義およびその性質を述べている。イオントラップとして、静電場を用いたペニングトラップとrf電場を用いたrf(ポール)トラップについて、それぞれに捕獲されたイオンの挙動を運動方程式から論じている。その後、理論的に提案されている平面クーロン結晶を利用した量子シミュレーションの手法について説明している。これはイオンの内部状態に応じた力をそのイオンに及ぼすことにより量子ゲートを実現する手法であり、その原理の紹介と発生する誤差の評価を行っている。

第3章ではクーロン結晶の状態を計算するために用いた手法を説明している。まず本研究で利用した分子動力学法計算コードProtoMolについて紹介した後、ペニングトラップ、rfトラップの双方の場合について捕獲イオンに及ぼされる力および閉じ込め周波数を示している。次にイオン加熱の効果について論じている。rf電場が主要因であるが、残留ガスとの衝突の効果もモデル化することにより考慮している。既往の実験結果と比較することにより、本研究でProtoMolが正しく利用されていることを確認している。

第4章では平面クーロン結晶の構造と性質について論じている。イオン5,000個までを対象として、その構造を整理している。量子シミュレーションに利用できる隣同士のイオンで構成する三角形の構造と、周辺部分で顕著な大きな円を描く殻構造の二つから構成されていることを明らかにしている。またイオン数に応じた殻構造数を求めている。平面クーロン結晶の半径に対するイオン個数をグラフ化することで、特に外周付近で殻構造が支配的であることを示している。さらに量子シミュレーションにおいて重要なイオン間距離を平面クーロン結晶の半径に対して求めており、イオン個数に対する

利用可能な有効半径を示している．また r f 加熱によるクリスタル構造の変化を明らかにしている．

第 5 章では複数種類のイオンで構成される平面クーロンクリスタルの構造と性質について論じている．2 種類のイオンの質量の差に対して平面クーロンクリスタルを形成できる最大イオン数を求めるとともに，その構造やイオン間距離を考察している．さらに軽いイオン（小さい m/q ）からクリスタルの中心を占めていくことに基づいて異種イオン間距離を理論的に導出し，分子動力学法による数値計算と比較して良好な一致が得られている．さらに異種イオン間での熱伝達について冷却と加熱の場合の数値計算を行い，異種イオン間距離との関係を明らかにしている．

第 6 章では量子シミュレーションを実行する際に発生する誤差について検討を行っている．平面クーロンクリスタルで実現される閉じ込め周波数，イオン間距離，温度をパラメータとして量子シミュレーションで発生する誤差を理論的解析により定量的に明らかにしている．

第 7 章では平面クーロンクリスタルを実現するために必要となる電極設計を行い，その性能を数値計算により評価している．具体的には，電場解析ソフトを用いて生成ポテンシャル場を評価するとともに，その電極形状依存性を明らかにしている．さらに電源の制約なども考慮した上で電極間距離を評価している．これにより得られる閉じ込め周波数を導出し，量子シミュレーションに利用可能な範囲を明確にしている．

第 7 章は結論であり，本研究のまとめが述べられている．

以上を要するに，本論文は量子シミュレーションにおいて有望な平面クーロンクリスタルを用いる手法について，r f トラップにより実現する上で必要となる平面クーロンクリスタルの性質や構造について数値計算により明らかにしている．さらに電極設計を行っており，平面クーロンクリスタルおよびその量子シミュレーションへの利用に対する知見を得る上で多大な寄与をしている．

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる．