

## 論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 國分 直明

本論文は6章からなり、第1章は序論、第2章は量子誤り訂正の概説とそれを利用した時間発展についての議論、第3章は論理ラビ振動の新しい駆動法について、第4章は新しい駆動法に適した訂正操作について、第5章はハミルトニアン自由度について、第6章は本論文のまとめ、をそれぞれ論じている。

量子系を、擾乱(ノイズ)から守り、本来の時間発展(ハミルトニアンによるユニタリー発展)をさせることは、純粋物理学としても量子情報処理などの応用上も、ともに重要であり、多くの興味を集めている。擾乱から守るための手法は様々なものが提案されてきたが、中でも、量子エラー訂正が、どんな擾乱の影響も低減できることから、最も優れていると思われる。しかしながら、量子系の時間発展を守るという用途に量子エラー訂正を利用しようとすると、物理的に様々な障害があり、その実現は著しく困難であった。従来理論は、任意の qubits 間に、任意の相互作用を、正確な大きさで、時間的にも正確に ON/OFF できることなどを仮定した形式論であり、これらの物理的な障害や困難には目を背けていた。

本論文は、量子ドットなどの実在の物理系の間、物理的に自然な相互作用を利用し、その ON/OFF もせずに、量子系の時間発展を量子エラー訂正により守ることができるという、全く新しい方法を提案し、その有効性を理論的に証明したものである。具体的には、量子系の時間発展の典型例としてラビ振動をとりあげ、それを擾乱(ノイズ)から守る手法を以下のように提案した。

量子ドットなどの2準位系(qubit)を9個用意し、それを、中央に三角形ができるように配置する。すると、この9個の qubits が、自然に、量子エラー訂正の code のひとつである Shor code における論理 qubit を成し、その論理 qubit が、ラビ振動を始める。これを論理ラビ振動と名付けた。ただし、このような配置では、望まない相互作用も生じるのが自然なので、その影響を考慮すると、この系の量子状態が論理ラビ振動に一致するのは、離散的な時刻だけになる。これを離散論理ラビ振動と名付けた。この離散時刻の間隔は非常に短いので、実質的に論理ラビ振動を実現できていると言って良い。この量子系を測定するときには、連続測定ではユニタリー時間発展が妨げられるので、離散的な時刻に測定することになる。だから、十分に短い時間間隔で本来の時間発展が実現されていれば十分なのである。

ただし、望まない相互作用の影響はこれだけには留まらず、通常量子エラー訂正が、そのままでは使えないという問題も引き起こす。なぜなら、それらの相互作用により、上記の離散時刻以外の時間には、量子系の状態が、code 空間の外に出てしまうからである。そこで、この問題を解決するために、量子エラー訂正の特別な処方箋を提案した。

さらに、量子エラー訂正を行うための装置についても、物理的に自然な相互作用を利用し、その ON/OFF もせずに、実現する方法を提案した。それは、上記の9個の qubits に加えて、いくつかの補助 qubits を配置し、それらの間に生じる自然な相互作用を利用する、という方法である。そして、自然に生じる全ての相互作用が、望まない相互作用も含めて存在し、なおかつ

外部からの擾乱（ノイズ）が間断なく加わる、という厳しい条件の下で、全体がきちんと動作し、高い確率で離散論理ラビ振動を守れることを、精密に論証した。

そして、これらの多数の qubits の相互の位置関係や、補助 qubits を測定したり操作したりする時刻が少しくらい設計とはずれても、やはり高い精度で離散論理ラビ振動を守れることも、精密に論証した。

以上のように、本論文は量子系の時間発展を量子エラー訂正により守るための全く新しい方法を提案し、その有効性を理論的に証明したものであり、量子物理学の進展に重要な寄与をした論文であると認められる。

なお、本論文は、清水明氏 との共同研究であるが、論文提出者が主体になって分析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、本審査委員会は博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認定する。