



Title	Handling noises in neutral atom quantum computing
Author(s)	小林, 史佳
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/101715
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 (小 林 史 佳)	
論文題名	Handling noises in neutral atom quantum computing (中性原子量子コンピューティングにおけるノイズの対処)
論文内容の要旨	
<p>中性原子量子コンピュータは、多数の量子ビットが配列可能であることや、長いコヒーレンス時間、量子ビット配置の柔軟性、Rydberg相互作用を介したマルチ量子ビットゲートなどの特性を活かした量子計算を実装できると期待されている。しかし、実際の量子デバイスでは量子ビットがさまざまなノイズにさらされやすいため、信頼性の高い量子計算を実現するにはノイズへの適切な対処が不可欠である。これに対する主なアプローチとして、(1) 現在および近い将来の量子デバイスに実装可能な変分アルゴリズムを用いる「ノイズの多い小・中規模量子 (NISQ) 計算」と、(2) 量子誤り訂正符号によってノイズ耐性を付与し、計算量理論上優位であるアルゴリズムを実行するための高性能量子デバイスを必要とする「誤り耐性量子計算 (FTQC)」の二つが挙げられる。本論文では、中性原子量子コンピュータで発生する様々なノイズに対応する理論的手法について述べる。第一に、中性原子量子デバイス上で実装可能な、変分量子固有値ソルバー (VQE) のためのベンチマーク問題を行列積状態の親ハミルトニアンから生成する手法について提案する。この手法により、VQEの難しさを決める要因である古典最適化法的能力と問題ハミルトニアンの難しさを分離して評価することが可能になった。第二に、NISQの先にあるFTQCに向け、表面符号を用いて中性原子量子コンピュータ上で累積する消失エラーを扱う手法を提案する。これにより、消失誤りの影響を低減できることが明らかになった。第三に、中性原子系などのデバイス特性を反映した量子誤り訂正符号を構築するためにテンソルネットワーク符号を導入し、強化学習による符号設計の最適化を議論するとともに、テンソルネットワーク符号の最小単位である原子符号について示す。第四に、非マルコフノイズを表現するプロセステンソルに対するスタビライザー符号の最尤推定デコード手法と論理誤り率の算出方法を示す。これにより、非マルコフ的なノイズのある量子系における量子誤り訂正の性能評価が可能になる。これらの研究は、中性原子量子コンピュータでの量子計算の信頼性を高めることに寄与することが期待できる。</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (小 林 史 佳)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教 授	山本俊
	副 査	教 授	関 山 明
	副 査	教 授	藤井啓祐
<p>論文審査の結果の要旨</p> <p>本学位論文は中性原子量子コンピュータにおける量子ビットに対する多様なノイズに対処し、量子計算を行うための理論的方法を研究したものである。中性原子量子コンピュータは、現時点において、最も多くの量子ビットを空間的に配列することが可能な物理系であり、真空中にトラップされた孤立原子を量子ビットとすることで可能な長いコヒーレンス時間、孤立原子の配置の自在性、近傍原子間のRydberg相互作用を利用した量子ビット間ゲートなどの優位性がある。この中性原子量子コンピュータにおけるノイズに対処として、まず、中性原子量子デバイス上で実装可能な、ノイズの多い小・中規模量子（NISQ）計算における変分量子固有値ソルバー（VQE）のためのベンチマーク問題を行列積状態の親ハミルトニアンから生成する新しい手法を提案した。この手法により、VQEの難しさを決める要因である古典最適化法的能力と問題ハミルトニアン の 難しさを分離して評価することを可能にした。次に、誤り耐性量子計算（FTQC）に向け、量子誤り訂正符号の1つである表面符号を用いて中性原子量子コンピュータ上で累積する消失エラーを低減する手法を提案した。さらに、中性原子量子コンピュータを含む一般の量子コンピュータのデバイス特性を反映した量子誤り訂正符号を構築するためにテンソルネットワーク符号を導入し、強化学習による符号設計の最適化を議論し、テンソルネットワーク符号の最小単位である原子符号を発見する方法を見出した。そして、非マルコフノイズを表現するプロセステンソルに対するスタビライザー符号の最尤推定デコード手法と論理誤り率の算出方法を明らかにした。これにより、非マルコフノイズにおいても量子誤り訂正の性能評価が可能となった。以上の理論研究は新規性が高く、学術的に重要なものであり、博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。</p>			