



Title	Quantum Dynamics and Computation with D-Wave Machine
Author(s)	池田, 一毅
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/76364
rights	
Note	

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 (池 田 一 毅)	
論文題名	Quantum Dynamics and Computation with D-Wave Machine (量子ダイナミクスとD-Waveマシンを用いた計算)
<p>論文内容の要旨</p> <p>パート1では、断熱量子計算のレビュー、量子カオスに関する相転移の研究、D-Wave 量子アニーラー (D-Wave 2000Q) を用いた組み合わせ最適化問題への応用を述べる。このパートの主な成果は次のとおりである。一般的に、量子アニーリングの過程で量子相転移が起こることが知られている。また、多くの例により、相転移の順序と計算効率は互いに密接に関係していることも知られている。さらに、量子計算は非もつれ状態から始まり、多くの身体相互作用とシステム全体の自由度にわたる量子情報の動的非局在化により、いくつかのもつれ状態に発展する。これは通常、情報スクランブルと呼ばれる。一般的に、単一のキュービットパウリ演算子の時間発展を観察することにより、スクランブルは議論される。さらに、スクランブルはシステムをカオスにし、非時間順序相関関数 (OTOC) の初期時刻での指数関数的成長は量子カオスの兆候であると考えられている。このように、量子相転移は量子カオスとスクランブルに関連している。本博士論文ではこれらの関係を OTOC で明確にする方法の確立を目指す。OTOC の時間平均を取ることにより、1次および2次の相転移の診断に成功した。私たちの方法は、量子アニーリングとリバースアニーリングに関連する相転移を検出するのに十分強力である。p-スピンモデルの場合、カオス/可積分モデルの転移が量子アニーリングの過程で発生することもわかる。これらの結果は、情報のスクランブルと量子カオスが相転移に重要であり、量子カオスが量子アニーリングの計算効率にも影響があることを示唆している。量子アニーリングの応用として、D-Wave 2000Q のパフォーマンスを分析する。特に、NP 困難な問題であるナーススケジューリング問題 (NSP) をイジングスピンで定式化し、量子デバイス上に実装する。NSP は、満たす必要のあるいくつかのハード制約と、満たすことが望ましいソフト制約で構成され、一般に、Ising 形式でこれらの制約を実装するのは難しい。量子アニーラーの現在のバージョンは常に古典的なコンピューターよりも優れているわけではないが、作成したハミルトニアンは他のスケジューリング問題に一般化でき、将来のどの量子アニーリングマシンにも実装可能である。</p> <p>パート2では、2次元電子系のエネルギースペクトルについて考察する。このセットアップは、一般に量子ホール効果の研究に使用され、高エネルギー物理学や数理物理学を含む多くの物理と関連する。特に、量子ホールシステムはロバストな量子計算を確立するために実際に使用される SPT 相の最も基本的な例として重要である。エネルギースペクトルは、ホフスタッターバタフライと呼ばれるフラクタル性を示すことが広く知られている。Hofstadter の問題は通常、欠陥のないシステムで考慮されているが、欠陥のないシステムでの問題はあまり研究されていない。現実的な材料には多くの欠陥や不純物があるため、欠陥システムで問題を調査するのは自然である。システムに欠陥がある場合、電流を生成する局在状態が存在する。局所電流に関連する線形なエネルギースペクトルが、フラクタル蝶のすべての世代のエネルギーギャップに現れる。また、量子アニーリングの過程での電子のエネルギースペクトルのダイナミクスを考察する。通常、量子アニーリングは組み合わせ最適化問題に適用されるが、完全な量子アニーリングマシンは一般的な量子システムへの応用にも役立つ。</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (池 田 一 毅)			
		(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教授	橋本幸士
	副 査	教授	越野幹人
	副 査	教授	藤井啓祐 (基礎工学研究科システム創成専攻)
	副 査	准教授	尾田欣也
	副 査	助教	飯塚則裕
	論文審査の結果の要旨		
<p>博士論文「Quantum Dynamics and Computation with D-Wave Machine」の論文審査の結果の要旨は、下記の通りである。</p> <p>量子コンピュータが技術的に量子超越性に達した現在、物理学的なモデルを量子コンピュータでシミュレートしたり、組み合わせ最適化問題を量子コンピュータで解くための物理学的な手法の開発が望まれている。特に量子アニーリングにより与えられたハミルトニアン基底状態を数値的に求める方法は、系の相転移や真空構造をプローブする物理学や、最適化問題を物理系で表すための条件とも密接に関連しており、これからの研究の展開が大いに期待される。</p> <p>池田は量子アニーリングに使用されるいくつかのモデルの量子ダイナミクスを研究し、特に D-Wave を用いた量子アニーリングへの組み合わせ最適化問題への解を研究した。特に、量子カオスで用いられる非時間順序積を用いた、アニーリングの際の相転移の検出を p-spin 模型とマヨラナ鎖模型において研究し、系の相転移が非時間順序積により特徴付けられることを示した。また池田は、ナーススケジューリング問題を量子アニーリングで解くための、量子ハミルトニアンを提案し、D-Wave 2000Q での実装と今後の問題点を明らかにした。また、2次元電子系に磁場をかけた時のエネルギー固有状態をプロットして形成されるホフスタッターの蝶と呼ばれる現象において、欠陥を導入した際の振る舞いを調べ、そこに新たな構造が発生することを示した。</p> <p>これら、本博士論文で明らかにされた新事象は、電子の量子状態に基づく量子計算や量子現象のより深い理解につながる発展に貢献しており、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。</p>			