

プログラム名：量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現

PM名：山本 喜久

プロジェクト名：量子シミュレーション

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平 成 2 7 年 度

研究開発課題名：

非平衡開放系量子シミュレーション（理論）

研究開発機関名：

大阪大学

研究開発責任者

小川 哲生

I 当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

量子材料や量子デバイスを含む開放量子多体系の非平衡状態を理論的に正しく追跡し理解するために、その時空間ダイナミクスを正しく記述できる量子理論を構築する。これにより、非平衡開放量子系での微視的現象と巨視的現象をつなぐトランススケール理論を構築する。さらに、量子測定とそれに基づく量子フィードバックの効果をも含める拡張を行い、新しい非平衡量子ダイナミクス理論を構築する。「コヒーレントイジングマシン」等の実験結果との定量的比較を行う。

平成 27 年度は、上記の目標に向けて 3 つの研究を計画した。

第 1 は、熱環境下においても、制御された散逸が超伝導の安定化に寄与できるか否か理論的に検証し、散逸を利用した超伝導転移温度増大の実現可能性について解析する。具体的には、熱環境下にある従来型 s 波超伝導体において、散逸が超伝導転移温度に与える影響を量子マスター方程式と BCS 平均場近似を援用し、解析計算・数値計算の両面から調べる。本年度は、解析に必要な模型の設定・理論の定式化・プログラムの作製を主な目標とする。非平衡開放系において散逸を制御し、超伝導の準粒子を不安定化させることによって、絶対零度環境下で内部相互作用に起因しない超伝導を作りだせる可能性の検証になる。

第 2 は、光と物質の超強結合の量子シミュレーターへの応用可能性に関する研究である。この研究によって、超強結合が示す超放射相転移と呼ばれる熱平衡下の相転移現象とレーザー発振とを比較することで、コヒーレントイジングマシンで起こっている物理現象を統計力学の観点から理解する。当該年度は、超強結合下でのレーザー発振が示す超強結合特有でかつ観測可能な特徴を見出すこと、また超放射相転移を示す物理系を発見することを目標とした。当該年度の前半にレーザー発振の解析をし、後半に超放射相転移の研究を行う計画を想定した。

第 3 は、量子シミュレーションの途中で系に現れるコヒーレンスやエンタングルメントなどの量子性が系の外へのシグナルにどのように反映されるかを熱力学的な観点から明らかにすることを目標とする。具体例として原子レーザー系を考え、高温・低温熱浴による熱励起と緩和および光損失を取り入れた開放系の設定のもとでエネルギー効率を調べる。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況

第 1 の研究テーマに関しては、模型の設定、定式化並びに数値計算に必要なプログラムの整備を行った。さらに当初の計画より順調に進んだため、実際に解析計算・数値計算を実行した。次節に詳しく述べるように、散逸を制御できれば超伝導の安定化に大きく寄与でき、室温超伝導の実現につながる可能性のあることが明らかとなった。

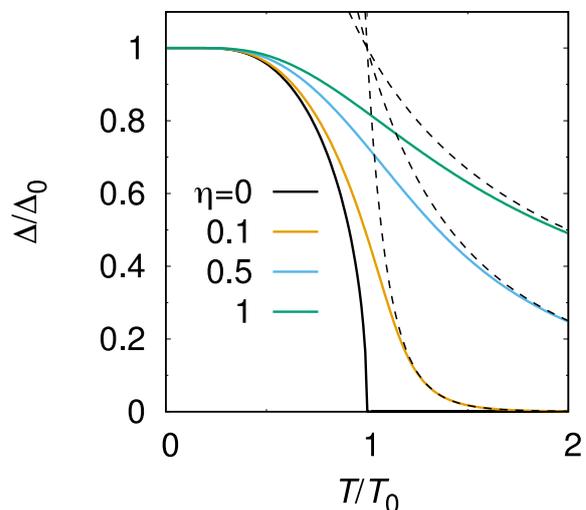
第2の研究テーマについては、昨年度までの研究で、「光」と「物質の励起状態」に基づいた描像が破綻することで一般に高調波が発生し、双安定性などが得られることが分かっていた。これらが実際に観測可能かどうか、また超強結合由来であることを実験的に示せるかどうかの問題であるが、定性的には、分数調波の発生が最も良い指標であると結論づけた。また、超放射相転移については、それが起こる超伝導回路構造を見出すことに成功した。

第3の研究テーマに関しては、原子レーザー系を熱機関として捉えるためのモデルを構築し、古典的なレート方程式と量子マスター方程式による定式化を行った。それぞれの定式化において、熱浴の温度差を変化させると放出光のエネルギーの熱効率がどのように変化するかを調べた。

2-2 成果

第1の研究テーマについて、通常の熱環境下にある従来型 s 波超伝導体は、温度を上げると徐々に超伝導ギャップが小さくなり、ある温度を境にしてゼロになるため超伝導が消失する。一方、超伝導の準粒子を不安定化させるように制御された散逸が加えられた場合は、超伝導が温度によらず安定化し、高温領域では超伝導ギャップが温度の冪で減衰することが明らかになった。図は、超伝導ギャップ Δ の温度 T に対する依存性を解析した数値計算結果である（点線は、高温での冪減衰 $\Delta/\Delta_0=(T/T_0)^{-1/\eta}$ を表す）。ここで、 Δ_0 と T_0 は従来の BCS 理論

で与えられる s 波超伝導体の絶対零度でのギャップと転移温度を意味し、 η は熱環境と超伝導体との結合の強さでスケールした散逸の強さを表す。図にあるように、制御された散逸のない場合 ($\eta=0$)、超伝導ギャップは温度増大させると徐々に小さくなり、転移温度 T_0 で消失する。一方、制御された散逸がある場合 ($\eta \neq 0$)、超伝導転移温度は消失し、高温で冪減衰する。この振る舞いは解析計算により、 $\Delta/\Delta_0=(T/T_0)^{-1/\eta}$ となることがわかった。



第2の研究テーマについて、超強結合下でのレーザー発振を進め、高調波だけでなく、分数調波とも共に発振することを解析により見出した。奇数次の分数調波の発生は非線形光学効果によっても観測が難しいとされており、それが観測されれば、超強結合固有の特徴と言える。本研究成果は、Physical Review A 誌に掲載され、QIT32 にて発表した。ただし、定量的なレーザーの解析が課題として残ったため、光と物質の相互作用の表式依存性の問題に取り組み、色素分子によるレーザー発振を解析する上で最も良い表式を見出すことに成功した。また、外界との内部系の接続の問題にも取り組み、簡便な計算法を見出した。一方、超放射相転移については、まず、それが期待で

きない超伝導回路構造を比較的広い範囲で示した。また、静磁場下ではあるが、超放射相転移が起こりうる回路構造を見出し、理論的にその検証を進めた。この成果は、論文として現在投稿中である。

第3の研究テーマについては、レート方程式による定式化では温度差がある閾値を超えるとレーザー発振し、そこから熱効率が非ゼロの値を持ち始めるという期待通りの振舞を得た。一方、量子マスター方程式による定式化では放出光のエネルギーを全て仕事として計算するとレーザー発振前から熱効率が非ゼロになるだけでなく、カルノー効率を超えてしまう場合があることが分かった。このことから、放出光のエネルギーは全て仕事となるわけではなく一部は熱とみなすべきであることが分かった。

2-3 新たな課題など

ある種の制御された散逸が実現できれば、超伝導転移温度の増大に大きく寄与する可能性がある。そこで、次の課題はそのような散逸の実現方法の検討である。現在、電流を利用するメゾスコピック系のマイクロ冷却器や光のラマン散乱を利用して、制御された散逸が実現できるか検討を行っている。

放出光のエネルギーを仕事と熱に分解することは、熱力学的な観点からの研究において必要不可欠であり、どのように分けるべきかが新たな課題となった。

3. アウトリーチ活動報告

高等学校の理数科クラスの生徒を対象に、現代物理学と国際光年との関係を講述するアウトリーチ活動を2回行った。本研究の成果や途中結果も分かりやすく解説した。

また日本物理学会第71回年次大会および日本物理学会2015年秋季大会において、第2の研究テーマに関する成果について発表した。