

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： 量子人工脳

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平 成 2 8 年 度

研究開発課題名：

非平衡開放系の量子測定フィードバックと量子ダイナミクス

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

平成 28 年度は、下記の 3 つの研究を計画した。

第 1 は、散逸と測定を利用した量子状態の制御に関する研究である。超伝導状態や Ising 模型の基底状態等に関して、系内部で狙った状態を実現するために通常とられるアプローチは、系内部の要素とその組み合わせを最適化することである。しかし、実現する熱平衡状態は熱力学による制約を満たす必要があるため、組み合わせの可能性が狭まる。そこで本研究では、系外の環境と系との間の相互作用をも最適化することでこの制約条件を緩和し、より広範囲なパラメータ領域において狙った状態を実現することを目的とする。具体的な制御方法として、系外の散逸や系に対する測定並びに測定フィードバックを考える。本年度は特に、超伝導を散逸により安定化させること、ならびに、コヒーレントイジングマシンの構成要素である縮退光パラメトリック発振器に対する測定フィードバック制御のモデル化を理論的に検証することを目標とした。

第 2 は、非平衡下の相転移的現象であるコヒーレントイジングマシンによって、熱平衡下で期待される基底状態や熱平衡状態に近い状態がなぜ実現されるのか、またどのような場合にそれが保証されるかを解析する研究である。そのために、非平衡下での相転移的現象であるレーザー発振と熱平衡下での相転移現象である超放射相転移がどちらも起きる系において、両者の移り変わりを解析することを目標とした。本年度では、具体的な系での超放射相転移の振る舞いを解析し、その後、レーザー発振への移り変わりの解析を行う計画を立案した。

第 3 は、量子アニーリングの解析を念頭に、量子マスター方程式の適用範囲を拡張する研究である。量子アニーリングにおいては、着目系のハミルトニアンが時間的に変化することが特徴であるが、量子マスター方程式はこの時間変化が極めてゆっくりであり、断熱定理を満たす場合においてのみ適用可能であると考えられてきた。しかしながら、この適用範囲の制限は実際の解析上は極めて問題となる。そこで、この適用範囲の制限を再検証し、新たな方法論を開拓・整備する。

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 の研究テーマについては、昨年度までの研究で散逸を加えることで、転移温度以上の熱環境下においても、超伝導が定常状態として存在する可能性があることを見出していた。本年度は、転移温度以上にある超伝導状態が安定な定常状態となるかどうか解析した。外部の揺らぎに対する線形安定性を議論した結果、散逸が加わると、安定状態となることを明らかにした。さらに、理論的に提案した散逸が実現できる可能性のある実験系を提案した。

また、縮退光パラメトリック発振器の測定フィードバック制御に関しては、ダイナミクスを規定する構成要素を、系内部、ホモダイン測定、測定後のフィードバック操作に分け、それぞれの模型について理論的に検討を行った。

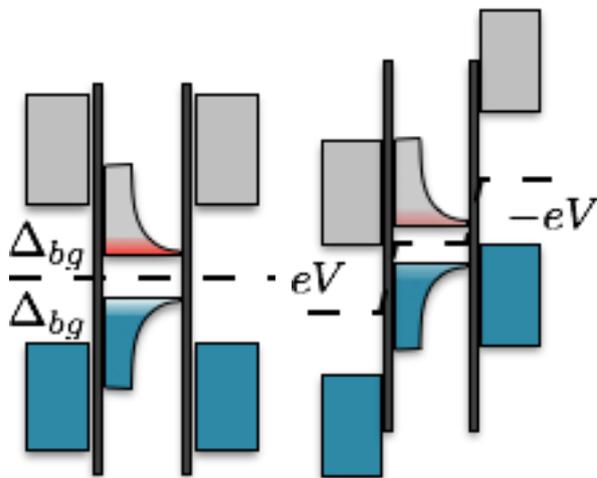
第2の研究テーマについては、超放射相転移の熱平衡下での解析は達成したものの、非平衡下の解析において肝心となる「環境との相互作用」について、その計算法を改めて検討する必要があると判断し、本年度内には非平衡への移り変わりまでは達成できず、信用できる計算法の検証に留まった。

第3の研究テーマに関しては、非断熱領域における量子マスター方程式の適用可能性を探った。特に着目系のハミルトニアンの変化を定量化するため新たな時間スケールを導入することで、これまでと異なる新たな視点から量子マスター方程式の導出過程について検証を行った。

2-2 成果

第1の研究テーマについて、熱環境下にある超伝導状態が、散逸を加えることで転移温度以上でも安定的に存在するか否か結論するために、動的安定性を調べた。散逸を加えた場合、温度によらず超伝導が動的に安定になることを見出した。さらに、動的安定性の議論を散逸がない場合にも適用したところ、転移温度以上では、超伝導が動的に不安定になることも明らかになった。この結果は熱力学的安定性の結果と整合し、従って、我々の結論は、熱平衡状態にある超伝導体の議論を拡張するものとなっていることがわかった。さらに、理論的に提案した散逸を実現する可能性のある系を探するため、超伝導を半導体で挟み込み電圧を印加した接合系における散逸を理論的に解析した。結果として、電子正孔対称な半導体を用い、半導体のバンドギャップと同じ電圧を左右の半導体に印加すると、目的とする散逸が実現できることを明らかにした(下図)。これらの結果は、日本物理学会 2016 年秋季大会、ImPACT 未来開発研究会 2016、ImPACT 「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」 量子情報技術ワークショップ(第3回全体会議)にて発表し、ImPACT 未来開発研究会 2016 ベストポスター賞を受賞した。

コヒーレントイジングマシンの解析に関しては、縮退光パラメトリック発振器に対するホモダイン測定の効果をミクロな量子測定理論に基づき定式化し、さらに測定を時間的に粗視化することで、系全体の測定フィードバックのダイナミクスを Lindblad 形式の量子マスター方程式としてモデル化した。

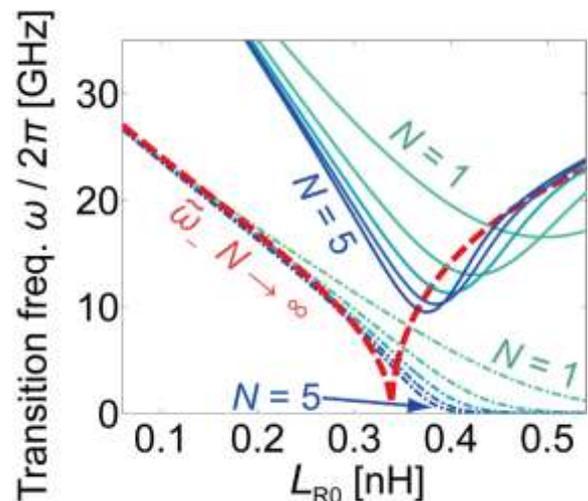


第2の研究テーマについて、昨年度見出した超伝導回路における超放射相転移について、非平衡下への移り変わりを解析して行くにあたり、励起状態の解析を行った。右図に示す通り、偶数粒子数の励起状態と奇数粒子数の励起状態への励起エネルギーが、原子数 N の増大と共に熱力学極限 ($N \rightarrow \infty$) に近づく振る舞いが得られた。また、相転移によって粒子の偶奇性に関する対称性が破れる様子も得られ、コヒーレントイジングマシンにおけるコヒーレンス形成を解析していく上で、重要な特性を示すことが分かった。この成果は Physical

Review Letters 誌に掲載され、3件の国際学会での招待講演を行った。また日本物理学会若手奨励賞受賞の受賞にもつながり、その受賞記念講演でも、この成果を中心に講演した。一方、非平衡下への移り変わりを解析していくために、Maxwell 境界条件などの物理法則を満たしながら、マスター方程式で解析していけるかどうか検討を行った。その結果、標準的に用いられる Lindblad 形式では物理法則が満たされず、

密度行列の正定値性が必ずしも保証されない non-Lindblad 形式にすべきという結論に至った。十分に非平衡な状況では、non-Lindblad 形式でも正定値になるので問題ないことも示した。この成果は Physical Review A 誌に掲載された。

第3の研究テーマについては、新たに導入した時間スケールを用いることで、これまでに形式的には知られていた量子マスター方程式が、非断熱領域においても導出可能であることを見出した。さらには、熱浴の相関時間と比較してハミルトニアン の時間変化が速い場合でも量子マスター方程式は依然として適用可能であることが分かった。このような結果は、これまでの認識と異なるものであり、非平衡開放系の解析可能範囲を大きく広げるものと期待している。本研究成果は、日本物理学会 2016 年秋季大会にて発表し、学術論文として Physical Review E 誌に掲載された。



2-3 新たな課題など

第1の研究テーマに関して、散逸による超伝導安定化の実験検証を行うためには、半導体の選定が課題となる。そこで、電子正孔対称性を持つ半導体物質について具体的な検討を行う予定である。また、モデル化した量子測定フィードバック制御について理論的に解析する前に、各要素のみを取り出し、モデルの妥当性を議論することが必要不可欠である。そこで、まず初めにホモダイン測定の妥当性を検証するため、単一の縮退光パラメトリック発振器に対する測定効果について数値的に検証することを予定している。

3. アウトリーチ活動報告

特になし。