

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 9 年 度

研究開発課題名：

非平衡開放系の量子測定フォ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

第1の研究テーマは、量子人工脳の「コヒーレントイジングマシン」において、測定フィードバックが系の量子ダイナミクスに与える影響を調べることである。コヒーレントイジングマシンではイジング模型における2スピン間の相互作用を表す係数行列の値を、測定フィードバックによって8ビットの精度で任意に与えることができる。そこで、量子フィードバック方式を取り扱えるように理論を拡張し、緩和時間や緩和過程を実験系と比較検討できるように整備することを目的とする。そのために、使われているホモダイン測定ならびにそのフィードバック操作を記述する超演算子を、系の実態に合わせて定式化することを最初の目標とした。この目標を達成した後は、系全体の量子ダイナミクスを記述する量子マスター方程式を定式化し、数値的に厳密な方法により定式化の検証を行うことを次の目標とした。

第2の研究テーマは、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。ただし、これまでに理論的に発見した超伝導回路での相転移をプロジェクト期間内に実証することが困難であると考え、当該年度では、それ以外の系での超放射相転移の可能性を探索することを目標とした。

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、まず光子検出の理論を応用してホモダイン測定を表す超演算子を定式化し、最初の目標を達成した。さらにこの結果を用いてホモダイン測定結果に依存した光注入（測定フィードバック）を表す超演算子を定式化した。この結果を用いてコヒーレントイジングマシンのダイナミクスを記述する量子マスター方程式を導出し、2スピン系に限定しモデルの検証を行った。

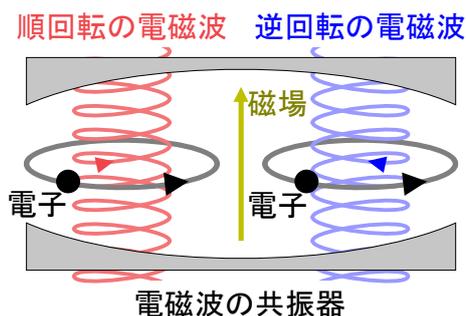
第2の研究テーマについては、超放射相転移が起こりうる他の系を発見するまでには到らなかったが、実験グループと協力し、それを探索していく上での有力な探索方針を明らかにすることができ、また既存の磁性体が示す相転移が、超放射相転移に類似のものである可能性を示唆する実験結果が得られた。

2-2 成果

第1の研究テーマについて、まずホモダイン測定を記述する測定超演算子を導出した。この結果、ホモダイン測定は直交位相振幅の射影演算子ではなく、超演算子のガウス型関数を用いて記述できることが明らかとなった。ここで、測定超演算子の測定値を積分すると、光子の散逸を記述する超演算子が得られる。この結果はホモダイン測定が光子検出によって実装されている事実と符合する。また、この超演算子が与える測定結果の確率分布は、従来の実験から予想される通り、直交位相振幅の射影測定分布にガウスノイズを畳み込んだ分布に一致する。このガウスノイズは測定の不十分さに由来する測定ノイズ

である。光子検出による散逸が大きくなるほど、情報を多く得ることができるため、測定ノイズが小さくなる。この関係は、ノイズと散逸の間に成り立つ原理的な不等式としてまとめられる。次に、ホモダイン測定を用いた光注入フィードバックを、上記の超演算子を用いて定式化した。結果として、測定フィードバックによって、スピン間に量子的にコヒーレントな相互作用が散逸とともに導入されることが明らかとなった。また、これらの結果を用いてコヒーレントイジングマシンを記述する量子マスター方程式を導出し、2 スピン系について数値的対角化を用いて解析した結果、実験と矛盾なく、ポンプレート各共振器の発振閾値以下にとると解探索に最適な値となることが確認できた。

第2の研究テーマについて、まず前年度に発見した超放射相転移を示す超伝導回路について、他のどのような回路であれば超放射相転移を示すのか、回路の分類に部分的にはあるが成功した。この成果は *Physical Review A* 誌に掲載済みである。一方、超放射相転移を様々な物質にて探索また制御していくに当たり、相転移の起源である電磁場と物質との相互作用の強さを自在に変えることが重要である。そこで、河野淳一郎教授（米国ライス大学）の実験



グループと協力し、カーボンナノチューブの励起子と共振器中の光であれば、試料の単なる回転によって相互作用の強さを変えられることを実証した。この成果は *Nature Photonics* 誌に掲載予定である。また、超放射相転移を探索していく上で、電磁場や物質の自己エネルギーを定量的に評価することが重要である。そこで、やはり河野グループと協力し、図のようにサイクロトロン運動とテラヘルツ波とが結合した際の透化スペクトルでは、電子と順回転する電磁波との結合、逆回転する電磁波との結合、電磁波の自己エネルギー (A^2 項と呼ばれる) からの3つの寄与を明確に切り分けられることを実証した。これにより、外部磁場によって時間反転対称性を破るなど、何らかの対称性を破ることが自己エネルギーの評価に繋がることを明らかにした。この成果も別途、*Nature Photonics* 誌に掲載予定である。カーボンナノチューブ・電子のサイクロトロン運動とも、残念ながら超放射相転移を起こすことは期待できない。ただし、 ErFeO_3 という磁性体が 4.5 K 付近で起こす相転移が、超放射相転移に類似の相転移であることを示唆する実験データが、やはり河野グループとの共同研究にて得られた。この場合、相転移するのは電磁場ではなくマグノンとなるが、様々な磁性体が示す既知の相転移の中で、すでに超放射相転移が起こっている可能性があり、今後、 ErFeO_3 の 4.5 K の相転移と超放射相転移とのアナロジーを解析していく。

2-3 新たな課題など

新たな課題は特に生じなかった。

3. アウトリーチ活動報告

特になし