

二光子によって長生きする量子コヒーレンス現象

[1]要旨

二準位原子の多光子光学遷移によるラビ振動を、励起光の量子性を完全に考慮して解析することによって、サブミリ秒の長時間に渡りラビ振動の消失と復活が繰り返し観測されること、その原因が二光子遷移に特有のラビ周波数の光子数依存性であることが示された。この知見は、二準位系を量子ビットとする量子情報分野にも大いに役立つことが期待できる。

[2]本文

二準位原子間の一光子遷移については、回転波近似の下で導かれる Jaynes-Cummings モデル (JC モデル) のハミルトニアンによる解析が良く知られている。これを用いた解析で、原子状態が時間の経過とともに崩壊と再生を繰り返し、準位間の占有数の差 (反転分布) が時間とともに振動するが、これはラビ振動として知られている。

最近、中華人民共和国の衡水大学のメンバーを中心とする研究グループは、この JC モデルを多光子遷移に拡張した研究を行った。ここでは、二光子プロセスに焦点をあて、いったん消失したラビ振動が時間の経過とともに復活する現象 (collapse-revival effect) が驚くほど長期間持続する可能性があることが示された。また、その原因が二光子遷移に特有のラビ周波数の光子数依存性であることが明瞭な解析計算で示された。さらに、冷却原子 (リユードベリ原子) を用いた共振器量子電気力学実験を想定して、共振器内でのレーザー光の減衰時間、および、リユードベリ原子の励起状態の輻射寿命を考慮しても、これが十分に実験的に観測可能であることも示された。この成果は JPSJ の 2025 年 2 月号に掲載された。

この研究は、量子原子システムに関する理解を深めるだけでなく、量子コンピューティングや量子情報処理などの将来の量子技術の開発にも重要な意味を持つ。多光子遷移下での量子システムの挙動は、量子コンピューティング技術の進歩に不可欠な、より安定した量子ビットの理論的基礎となる可能性がある。さらに、長時間にわたり消失と復活を繰り返す事からわかるように、強い量子コヒーレンスを維持する能力は、堅牢な量子情報システムを構築するための必須要件である。

数値計算の結果と理論分析を通じて、この研究は特に多光子相互作用下での原子反転分布のダイナミクスに関する理解を深めている。この研究は量子光学の分野に貢献し、複雑な量子システムの挙動を明らかにしていることから、将来、共振器量子電気力学と多光子量子プロセスの実験への可能性を広げている。

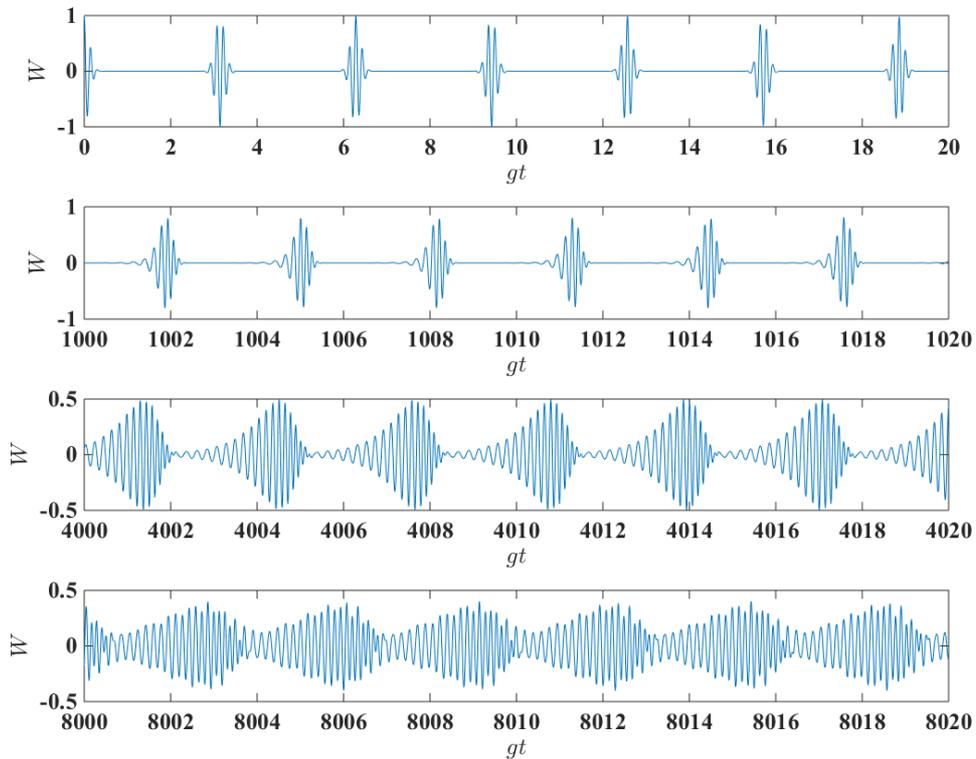


図 二光子遷移 JC モデルの解析によるラビ振動が消失して復活する様子 g は真空のラビ振動数であり、 gt は無次元の時間スケールである。

原論文 (2025 年 1 月 31 日公開済)

The Long-Time Behavior of Collapse-Revival Effects in a Multi-Photon Jaynes–Cummings Model

S. Chong, X. Liu, Y. Han, J. Du, J. Liu, L. Meng, Y. Gao, C. Yang, J. Q. Shen, J. Zhang, and L. Li, J. Phys. Soc. Jpn. **94**, 024402 (2025).

< 情報提供 : Shiyao Chong (College of Electronics and Information Engineering, Hengshui University) >