

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03768

研究課題名（和文）回路量子電磁力学における人工原子・光子間相互作用の深強結合領域に対する数理的研究

研究課題名（英文）Mathematical Research on Deep-Strong Coupling Regime of Interaction between Artificial Atom and Photon in Circuit QED

研究代表者

廣川 真男（Hirokawa, Masao）

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号：70282788

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：回路量子電磁力学における人工原子と1モード光子の間に働く相互作用の深強結合領域に対する数理的研究を行った。数理モデルとして、量子ラビ模型と、これに2次の相互作用を加えたものの強結合極限を調べた。その結果、2次の相互作用の有る無しにより、量子ラビ模型が違った様相を見せ、それは仮想ボース粒子の影響によるものであると結論付けた。この結果を基にして、量子ビットと相互作用する仮想ボース粒子の数理モデルが、超対称性からその自発的破れへ向かう相転移を示す理論へと発展させた。特に、自発的超対称性の破れが起こる数理構造と、ボゾンの状態のみならずフェルミオンの状態にも質量生成をもたらすことを証明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で、量子ビットと相互作用する仮想ボース粒子の数理モデルを超対称性からその自発的破れへ向かう相転移を示す数理模型へと発展させた。ボース粒子に関する2次の相互作用が無い場合に、清華大学の実験チームがこの数理模型による理論予想の幾つかを実験検証したと報告したが、本研究課題の結果に基づけば、そこで扱った2次の項を実験的に実現すれば、自発的超対称性の破れによる質量生成をも観測することができるかもしれない。この実験結果が報告される迄は、超対称性とその自発的破れが物理的に実在なのかは未解決であったが、超対称性粒子を探す巨大施設ではなく、超対称性量子力学を実験室で検証する可能性を示唆できたように思う。

研究成果の概要（英文）：I have made the mathematical research on the deep-strong coupling regime of the interaction between an artificial atom and a 1-mode photon in circuit QED. I have studied the quantum Rabi model and that model with the quadratic interaction as the mathematical models describing that physical system. I have considered the strong coupling limit for both the models, and then, I have shown that the quantum Rabi model reveals different aspects of its bound states depending on whether it has the quadratic interaction or not, which is caused by the effect coming from the virtual Bose particles. Based on the results, I have developed the mathematical theory with those models of the virtual Bose particle coupled with a qubit so that it illustrates the phase transition from supersymmetry (SUSY) to its spontaneous breaking. In particular, I have proved that the spontaneous SUSY breaking works for the mass enhancement in the fermionic states as well as the bosonic states.

研究分野：数理論理学

キーワード：量子ラビ模型 深強結合領域 シュレディンガーの猫状態 強結合極限 超対称性 自発的超対称性の破れ ヒッグスポテンシャル 質量生成

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

最近の回路量子電磁力学では、深強結合領域における量子ラビ模型が、基底状態をも含め各束縛状態でシュレディンガーの猫的量子もつれ(SCQE)状態を形成する事を示唆する実験結果が得られていた。この実験では、かなり大きなラムシフトが観測されているが、ラムシフトは仮想光子による揺らぎに起因する。SCQE 状態を形成していると思われる基底状態から光子を取り出す実験的試みも引き続き行われている。そこでは、何らかの物理的構造で仮想光子から実光子へ転化され、この実光子が観測されると予想されていた。

2. 研究の目的

回路量子電磁力学の深強結合領域における SCQE 状態を形成することを示唆する実験結果に対し、そこに介在する光子を解析し、SCQE 状態形成の数理物理学的構造を明らかにすることを研究目的の一つに挙げた。また、SCQE 状態を形成していると思われる基底状態から光子を取り出す実験において、何らかの物理的構造で仮想光子から実光子へ転化され、この実光子が観測されると予想されたので、仮想光子から実光子への転化の数理構造を解明し、基底状態から如何にして光子を観測するかを数理物理学的に考え、回路量子電磁力学の理論物理学、それを検証する実験物理学へと繋げることを目的とした。

3. 研究の方法

回路量子電磁力学の深強結合領域の数理構造を数理物理学的に調べるため、一つの2準位原子(量子ビット)と1モードのボゾン(レーザー光やマイクロ波の作る光子)との共振器内で相互作用する物理系を記述する、量子ラビ模型を数理モデルとして採用した。この原子・光子間の相互作用が深強結合領域に入ると、1モード・ボゾンの2次の相互作用の項が現れて来るので、量子ラビ模型にその2次の相互作用を加えた数理モデルを考え、強結合極限を取り、その数理解析を行うことで、束縛状態とその束縛エネルギーを調べる数理的手法を採用した。

4. 研究成果

量子ラビ模型のみで強結合極限を取ると、2準位原子は光のエネルギーに比べ、無視できるほどの摂動項となり、仮想光子が作るシュレディンガーの猫的状态が束縛状態となることが証明できた。このとき、その束縛エネルギーも明らかになった。一方、量子ラビ模型にその2次の相互作用を加えた数理モデルで強結合極限を取ると、2準位原子の影響が現れ、束縛状態は2次の相互作用の項が無いときは別のタイプのシュレディンガーの猫的状态を形成することが証明できた。これは本研究課題の後半の取り組みの土台となるので、以後、「前半の研究結果」と呼ぶことにする。なお、付け加えた2次の相互作用への2準位原子からの寄与はパウリのスピン行列の2乗のため単位行列となり、結局、1モード光子が作る場の2次の効果のみとなっている。

本研究の後半は、イオントラップでのフォノンを光子に代わる粒子として採用することも見据え、光とフォノンの両方を数理的に扱えるボゾンとして議論を進めた。本課題の研究代表者は、2011年のプレプリント[arXiv:1101.1770]、2015年に出版された論文[Quantum Stud.: Math. Found. Vol.2, pp.379-388 (2015)]で、2次の相互作用の項が無い通常の量子ラビ模型で、2準位原子の状態遷移振動数と1モード・ボゾンの振動数を調整すると、相互作用が無いときに超対称性を示し、強結合極限を取った後では、その超対称性が自発的に破れるという、超対称性からその自発的破れに向かう相転移を数学として示し、この相転移を理論予想としていた。この理論予想では、自発的超対称性の破れと、それに起因する質量生成をもたらすヒッグス・ポテンシャルに対応する効果が、量子ビットとカップルした(仮想粒子としての)ボゾンの持つ量子調和振動子のポテンシャルによって近似されることが分かっていた。この近似での質量生成は、ボゾンの2次の効果が担うと予想していて、当初、仮想粒子の影響を自発的超対称性の破れで起きる質量生成として数理的に取り出すことを考えていた。ところが、前半の研究結果を基に、「2次の相互作用があると、強結合極限をとったときに、自発的超対称性の破れへと向かう相転移は起こらない」という数学の証明を研究結果として得られた。実験としては、2次の相互作用の項の無い通常の量子ラビ模型に対し、研究代表者が予想した超対称性からその自発的破れへ向かう相転移をイオントラップの手法で確認したと、清華大学の Luming Duan の実験チームが本研究課題期間中に報告して来た[Nature Comm. Vol.13, 3412 (2022)]。彼らは、予想で使われたモデルでの強結合極限と同等な結果をもたらす別の極限を採用して実験での実証を行っている。この Duan らの極限を採用すると、量子ラビ模型に2次の相互作用を付け加えた数理モデルでも、超対称性からその自発的破れへ向かう相転移が起こり、その自発的破れの際に仮想粒子としての1モード・ボゾンの場の2次の項が質量項として働き、自発的超対称性の破れにより、ボゾンの状態のみならず、フェルミオンの状態でも仮想粒子による質量生成として見られるという数理

的结果を得た。この質量生成は、通常、エネルギー準位の観測によって実験で確認されるものなので、このエネルギー増加を観るには、実粒子としてのボゾン(実際は光子かフォノン)を観測することになると思われ、本研究課題として掲げた仮想粒子から実粒子への転化による実粒子の観測へ繋がると思っている。

以上の研究結果はプレプリント[arXiv: 2209.04546, arXiv:2210.02778]として公表し、現在投稿中である。なお、本研究課題で提案した数理モデルとその観測は、実験で2次の相互作用を作り出せると、Duanらと同様な手法が有効になるのではないかと予想している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hirokawa Masao	4. 巻 5
2. 論文標題 Schrodinger-cat-like states with dressed photons in renormalized adiabatic approximation for generalized quantum Rabi Hamiltonian with quadratic interaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Open	6. 最初と最後の頁 100039 ~ 100039
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physo.2020.100039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 4件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 M. Hirokawa
2. 発表標題 Can We Make the Noise Filtering Theory for NISQ Computer?
3. 学会等名 3rd Workshop on Quantum and Classical Cryogenic Devices, Circuits, and Systems（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Hirokawa
2. 発表標題 コンピューティング・システムとしての量子コンピュータへ向けて
3. 学会等名 量子多体計算のフロンティア（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Hirokawa
2. 発表標題 開発の視点から見た量子コンピューティング，センシング，シミュレーション
3. 学会等名 時間・量子測定・準古典近似の理論と実験：古典論と量子論の境界（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Hirokawa
2. 発表標題 SUSY breaking and a radiative mass enhancement in quantum Rabi model with A^2 -term
3. 学会等名 マス・フォア・イノベーション卓越大学院プログラムイベント Rabi model and Spin-Boson Model (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関