

Josephson 人工原子を用いた動的 Casimir 効果の理論的研究

高嶋 耕司

広島大学大学院総合科学研究科

Theoretical studies on dynamical Casimir effect in Josephson artificial atoms

Kohji TAKASHIMA

Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

Abstract

The dynamical Casimir effect which predicts photon production from vacuum is a noteworthy example of the nonadiabatic effect in quantum field theory. Unfortunately, this effect has not yet been confirmed experimentally since 1970.

Here we propose a novel scheme for confirming the dynamical Casimir effect using a Josephson artificial atom with high external-field response and its strong coupling to photon fields. In addition, we found both analytically and numerically that generated quantum states due to nonadiabatic effect are squeezed vacuum states with peculiar probability distribution. This provides a strong evidence instead of conventional photon-detection scheme.

第1章 序 論

20世紀初頭に台頭した量子力学は、光や電子は波動と粒子の両方の性格を併せ持つことなど、古典物理学とは大きく異なる世界観を提供した。真空の概念もこれまでの常識は覆された。量子論において真空は、不確定性に起因する零点エネルギー（真空エネルギー）を持っている。

真空中に設置した電気的に中性な壁で構成された共振器の壁の間には、真空エネルギーに起因する引力が働く。この現象は静的 Casimir 効果と呼ばれる。1948年に H.B.G. Casimir によって予言され⁽¹⁾、1997年、S.K. Lamoreaux によって実験的に検証された⁽²⁾。

真空の静的性質を示す静的 Casimir 効果に対して、真空の動的性質を反映した効果が、1970年、G.H. Moore によって予言された⁽³⁾。共振器の壁を、基底状態のエネルギーが急激に変わるほど高速に動かすと、光子が発生するというもので、動的 Casimir 効果と呼ばれている。

静的 Casimir 効果が実験的に検証されたのに対し、動的 Casimir 効果は未だに実験的検証がなされていない。その理由は、共振器の壁を基底状態のエネルギーが急激に変わるほど高速に動かすことが難しいことと、動的 Casimir 効果によって発生するマイクロ波領域の光を単一光子レベルで高効率に検出することが難しいことである。

そこで、本研究の目的は、真空エネルギーの動

的特性を明らかにするため、動的 Casimir 効果の検証法を提案することである。本研究は、二つの段階で構成されている。第一段階として、Josephson 接合を含む超伝導量子回路による Josephson 人工原子を用いて、擬似的に動的 Casimir 効果を発現させる方法を提案する。ここで擬似的というのは、共振器の壁を高速に動かして真空の境界条件を変化させる代わりに、Josephson 人工原子のポテンシャル形状を急激に変化させ、電磁場の非定常現象に類似の現象を Josephson 人工原子の量子状態に発現させることを意味する。第二段階として、Josephson 人工原子を用いて発現させた動的 Casimir 効果を同定するため、どのような特徴を持つ量子状態が生成され得るかを明らかにする。

第2章 Josephson 人工原子

本章および第3章で、研究の第一段階としての Josephson 人工原子を用いた動的 Casimir 効果の発現方法を提案する。

本章では、動的 Casimir 効果発現の舞台となる Josephson 人工原子という概念を導入した。まず、超伝導や Josephson 接合などの基礎的事項を概観し、その Josephson 接合によって構成される各種 SQUID (超伝導量子干渉素子) について述べた。SQUID の一つである double SQUID は、Josephson ポテンシャル中を運動する磁束量子と等価である。double SQUID 内の Josephson 接合の静電容量が十分に小さい場合、ポテンシャル内には量子化されたエネルギー準位が形成され、天然原子に類似した性質を持つ (Josephson 人工原子)。この人工原子は、ポテンシャルの形状を人為的に制御することができる特徴を持つので、動的 Casimir 効果の発現を可能にする。

第3章 Josephson 人工原子を用いた動的 Casimir 効果

本章では、前章で導入した Josephson 人工原子を用い、動的 Casimir 効果に類似の現象を発現させる方法を提案した。

Josephson 人工原子は、超伝導リングを貫く磁束が十分に小さい場合、周波数が時間依存する量子調和振動子に近似できる。動的 Casimir 効果を発現させるためには、Josephson 人工原子のポテンシャルを Josephson プラズマ周波数の逆数よりも短時間で変化させる必要がある。ポテンシャルの急激な変化は、超伝導臨界電流のスイッチングを行うことによって可能である。現在の技術では、スイッチングの立ち上がり速度をサブピコ秒以内で行うことができ⁽⁴⁾、これは Josephson プラズマ周波数の典型値である 100GHz の逆数の 10ピコ秒よりも短く、動的 Casimir 効果発現の要請を満たすことが分かった。

また、マイクロ波領域で単一光子レベルの微弱な光を検出するために、Josephson 人工原子が天然原子に比較して、光との相互作用の大きさが 1000万倍もあるという性質を利用する。ここでは Josephson 人工原子で生成された量子状態を近接した dc-SQUID を用いて検出することを提案した。

このように、Josephson 人工原子のポテンシャルを急激に変化させることによって、動的 Casimir 効果に類似の現象を発現させ、光子の発生と検出を行うことが可能であることを明らかにした。

第4章 動的 Casimir 状態の時間発展 (理論解析)

本章から第6章まで、研究の第二段階として、動的 Casimir 効果によって Josephson 人工原子の量子状態がどのように時間発展するか、解析および数値シミュレーションの両面から考察した。

本章では、まず解析的に、Josephson 人工原子のポテンシャルが時間的に変化した場合に、どのような量子状態が得られるかを考察した。ポテンシャルが変化することは、Josephson プラズマ周波数が変化することと等価であるので、量子調和振動子の周波数が時間に依存する場合に生成される量子状態を解析した。

まず、周波数が時間に依存する量子調和振動子を記述する Hamiltonian が、縮退パラメトリック

過程の Hamiltonian と同形になることを導いた。この過程は、量子光学においてスクイズド光を作り出すことで知られている。また、周波数が階段関数に従って急激に変化する場合について、生成される量子状態の具体的な表式を求めた。その結果、Josephson 人工原子の初期状態が真空状態の場合、得られる量子状態は、真空スクイズド状態になることが分かった。したがって、単に生成される光子を検出するだけでなく、このスクイズド状態の検出こそが、動的 Casimir 効果の観測の大きな証拠となることが分かった。

第5章 動的 Casimir 状態の時間発展 (数値シミュレーション)

本章では、前章の取り組みとは別の角度から、動的 Casimir 状態の時間発展を考察した。すなわち、Hamiltonian が異なる時刻に対して交換するという前章で設けた仮定を用いずに定式化し、数値的に Schrödinger 方程式を解いて解を求めた。

まず、量子調和振動の量子状態を記述する波動関数の確率振幅に関する連立の時間発展方程式と、非断熱相互作用要素の表式を導いた。その結果、波動関数の確率振幅の時間発展方程式は、偶数準位と奇数準位に分離できることが分かった。したがって、初期状態を基底準位として周波数を変化させた場合、偶数準位にのみ0ではない存在確率が得られる。これが、周波数の時間変化によって生成された状態がスクイズド状態になる一つの要因である。

次に、得られた表式を利用して、Josephson 人工原子の量子状態がどのように時間発展するかを、数値シミュレーションによって求めた。その結果、生成された量子状態は、占有確率分布がスーパー Poisson 分布に従い、真空スクイズド状態になっていることが分かった。

また、スクイーピングパラメータに対する非断熱効果を表わすパラメータおよび周波数の変化比の依存性を調べることによって、生成されたスクイズド状態が、境界の非断熱量子効果である動的 Casimir 効果に起因するものであり、スクイーピングパラメータは非断熱度を測る新たなパラメ

ータになることが分かった。

第6章 動的 Casimir 効果に対する有限温度効果

前章まで、量子状態の時間発展に関する考察は、システムが絶対零度にあるということを仮定してきた。しかし、実際の実験系は、温度が有限である。そこで、本章では、有限温度下での量子状態の時間発展を考察し、各エネルギー準位の占有確率分布に与える有限温度の効果を検証した。有限温度の場合、奇数準位の占有確率も有限の値となり、温度が高くなるほど、占有確率分布がスーパー Poisson 分布からはずれ、指数関数的な分布になるために、動的 Casimir 効果を観測することが困難になる。ここでは、実験においてスーパー Poisson 分布を確認するための指標を用いて温度効果を評価し、現在の典型的なデバイスを用いた場合は、1.9K以下の温度である必要があることを示した。

第7章 結 論

本論文では、動的 Casimir 効果の検証法を、二つの段階に分けて検討した。

第一段階として、動的 Casimir 効果の研究舞台となる Josephson 人工原子を提案し、そのポテンシャルを急激に変化させることによって、動的 Casimir 効果で要請される真空の境界条件を急激に変化させる課題を解決した。また、もう一つの課題である、生成された光の高効率検出については、人工原子が天然原子に比較して光との相互作用が強いという性質を利用することによって克服した。

第二段階として、本手法で生成される磁束粒子の量子状態が、スーパー Poisson 分布に従うスクイズド状態になることを示した。したがって、Josephson 人工原子における動的 Casimir 効果の同定は、スーパー Poisson 分布を持った量子状態の観測によって可能であることが分かった。

以上、真空エネルギーの動的特性を明らかにするため、天然原子では不可能な制御性と卓越した

光との相互作用力を有する人工原子を用いて、動

的 Casimir 効果の新しい検証法を確立した。

文 献

- (1) H.B.G. Casimir, Proc. Kon. Ned. Akad. Wetensch. B51, 793–795 (1948).
- (2) S.K. Lamoreaux, Phys. Rev. Lett. 78, 5–8 (1997).

- (3) G.T. Moore, J. Math. Phys. 11, 2679–2691 (1970).
- (4) R. Adam, M. Currie, C. Williams, and R. Sobolewski, Appl. Phys. Lett. 76, 469–471 (2000).