

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 2 月 24 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20340060

研究課題名（和文） 動的カシミア効果の研究

研究課題名（英文）Study of Dynamical Casimir Effect

研究代表者

松木 征史（MATSUKI SEISHI）

立命館大学・総合理工学研究機構・教授

研究者番号：50037941

研究成果の概要（和文）：

動的カシミア効果に関する実験的・理論的研究を行った。共振空洞の壁を振動させると、実の光子が生成されるという動的カシミア効果を実験的に確認出来るように、マイクロ波共振空洞を極低温に冷却し、空洞の中心に置いた半導体薄膜をパルスレーザーで照射して実効的に壁の振動を起こさせる。これに外部よりリドベルグ原子を導入して光子を検出する装置を製作した。関連して、最適な実験装置の配置と予想される光子数を理論的に求めた。

研究成果の概要（英文）：

Real photon production from the dynamical Casimir effect was investigated experimentally and theoretically: A cryostat was constructed to cool a resonant microwave cavity in which a semiconductor slab is set and irradiated by a pulsed laser to move and vibrate effectively the wall of the cavity. Photons produced in the cavity are detected with a Rydberg-atom single-photon detector. Optimum setup of experiment was studied theoretically by taking into account the slab and the photon-atom coupling in the cavity.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2009 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野： 宇宙粒子物理学

科研費の分科・細目：物理学 / 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード： 動的カシミア効果、単一光子検出、リドベルグ原子、共振空洞、パラメトリック共振

1. 研究開始当初の背景

カシミア効果は、Casimir が 1947 年に理論的にその存在を明らかにした効果で、無限に広い平行平板の間には引力が働くというものである。この効果は、量子的な真空状態にけるゼロ点振動の効果であると考えられるが、別の表現をすれば、平行平板間における

電磁場のモードが自由空間のそれと異なることによる効果であるとも言える。この静的カシミア効果は最近実験的に確認されており、すでにそのナノ物質の制御などへの応用も考えられている状況になっている。一方、平行平板の一方を振動させる（一般に、共振空洞の壁を振動させる）と、実の光子が生成

されるという動的カシミア効果については、理論的な研究は多いが、実験的な証拠は得られていない。動的カシミア効果は、ホーキング・アンルー輻射と言われる宇宙における現象と深く関連しており、宇宙物理や素粒子物理に対しても大きな影響を持つ現象である。

動的カシミア効果の検証実験が困難な理由は2つあって、一つは空洞の壁を大幅にかつ高い(マイクロ波)周波数で振動させることが困難であることと、実光子の高感度検出が困難であることによっている。

2. 研究の目的

本研究は、我々独自の実験方法で動的カシミア効果の検証を行う装置を開発し、検証実験を行うことを目的とする。具体的には、5GHz領域に共振周波数を持つ共振空洞の壁を実効的に振動させ、マイクロ波光子を高感度のリドベルグ原子単一光子検出装置で検出する。同時に、量子論に基づく理論計算により、具体的な実験条件で、どの程度の実光子数の生成が期待されるかを求める。特に、本研究では、光子の検出にリドベルグ原子単一光子検出装置を用いて、共振空洞内で光子を1個毎に検出するので、リドベルグ原子と光子との相互作用まで考慮した理論計算を行う。

3. 研究の方法

実験装置の模式図を図1に示す。方法は以下のようになる：

(1) NbTi製のマイクロ波共振空洞内に半導体GaAs薄膜を設置し、パルスレーザーを照射して伝導帯に電子を励起する。これにより半導体でマイクロ波をパルス状に反射させる。この方法による空洞壁の振動は共振周波数の2倍にし、パラメトリック共振を誘起させる。

(2) 空洞は、パルスチューブと希釈冷凍機による冷却装置で100mK程度に冷却し、空洞内での熱光子による光子生成への影響を低減する。まず、温度効果の無い状況での光子生成を検証し、次に温度効果を調べる。

(3) 冷却した空洞内にリドベルグ原子ビームを導入し、マイクロ波光子を1個毎に検出する。用いる原子は ^{39}K で、シュタルク効果の影響を比較的大きく受けないリドベルグ原子として利用する。

(4) リドベルグ原子の生成は、2段階のレーザー励起により行う。2段階として767nmと455nmの波長を用い、ダイオードレーザーを利用する。

(5) 量子論に基づいて、空洞内の光子生成と、生成された光子とリドベルグ原子との相互作用を考慮した計算を行い、実光子生成の割合、検出効率の実験パラメータ依存性を求める。これにより、実験条件の最適値を求める。

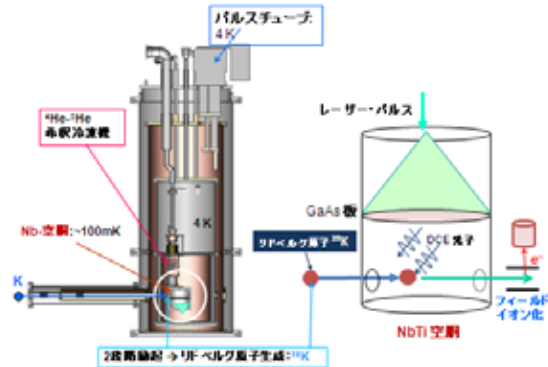


図1：動的カシミア効果検証実験の模式図

4. 研究成果

(1) 理論シミュレーション計算の結果、GaAs半導体は空洞中心に置くのが最も効率が良いことが分かった。また、円筒型・矩形型空洞で、それぞれの特徴があるが、まずは円筒型の空洞使用が最適であると結論出来た。

(2) 空洞のQ値は十分高いので、パルスレーザーで100~1000個のパルスレーザーを照射した後に励起を止め、その時点から空洞内の光子を検出する。この時間差検出で大幅に雑音を減らすことが可能である。

(3) 空洞を冷却する為のクライオスタットを製作し、パルスチューブと希釈冷凍機による冷却装置を導入した。

(4) アルカリK原子のリドベルグ原子励起用の2段階ダイオードレーザー系を整備した。そのレーザー波長の安定化制御は、Pound-Drever-Hall法を用いている。

(4) 半導体薄膜励起のパルスレーザーは、GHz領域の短パルスレーザーを生成するのに適したNd:YVO4-Nd:YAGレーザー系による多段増幅を行って生成する。波長1064nmの系で増幅し、第2高調波の生成の後にオプティカルパラメトリック共振OPOを用いて、800nm領域のレーザー光を生成する。

(5) 関連して、リドベルグ原子による単一光子検出システムでは、空洞内の浮遊電場の効果が、検出感度を決定する要因となる。これを解決する手段として、レーザー冷却・圧縮による原子ビームのパンチ化を行い、空洞内で交流電場をかけて浮遊電場を時間的に相殺する方法を開発した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

著者名：T. Kawakubo, K. Yamamoto, , 論文表題：Photon creation in a resonant

cavity with a nonstationary plasma mirror and its detection with Rydberg atoms. 雑誌名: Physical Review A. 査読: 有、巻: 83、発行年: 2011、ページ: 013819-1 - 013819-7.

著者名: W. Naylor, S. Matsuki, T. Nishimura, Y. Kido, 論文表題: Dynamical Casimir effect for TE and TM modes in a resonant cavity bisected by a plasma sheet. 雑誌名: Physical Review A. 査読: 有、巻: 80、発行年: 2009、ページ: 043835-1 - 043835-9.

著者名: T. Haseyama, Y. Kido, S. Matsuki, T. Nishimura, K. Yamamoto et al., 論文表題: A high-sensitivity microwave- single-photon detector with Rydberg atoms at low temperature. 雑誌名: Journal of Low Temperature Physics. 査読: 有、巻: 150、発行年: 2008、ページ: 549-554.

著者名: M. Shibata, Y. Kido, S. Matsuki, T. Nishimura, K. Yamamoto et al., 論文表題: Practical design for improving the sensitivity to search for dark-matter axions with Rydberg atoms. 雑誌名: Journal of Low Temperature Physics. 査読: 有、巻: 151、発行年: 2008、ページ: 1043-1048.

[学会発表](計 13 件)

発表者名: 城戸義明、西村智朗、ウエイド・ネイラー、松木征史、発表表題: 動的カシミア効果の検証実験に向けて、学会名など: イオンビーム解析研究会、発表年月日: 2011年12月9-10日、発表場所: 東京大学(東京)

発表者名: K. Yamamoto, 発表表題: Dynamical Casimir effect and its detection with Rydberg atoms in cavity QED, 学会名など: International Workshop on Dynamical Casimir Effect, 発表年月日: June 8, 2011, 発表場所: Padova, Italy.

発表者名 M. Saeed, S. Matsuki, et al., 発表表題: A bunched atomic beam scheme with laser compression to improve the detection sensitivity in a Rydberg-atom dark matter axion detector, 学会名など: Symposium on Low Temperature Physics and Materials Sciences, Kyoto University, 発表年月日: March 14, 2011, 発表場所: Kyoto

University, Kyoto.

発表者名 M. Saeed, S. Matsuki, et al., 発表表題: A bunched atomic beam scheme with laser compression to improve the detection sensitivity in a Rydberg-atom dark matter axion detector, 学会名など: GCOE Symposium「フロンティア開拓」, Kyoto University, 発表年月日: February 21-23, 2011, 発表場所: Kyoto University, Kyoto.

発表者名: 榊原尚、西村智朗、城戸義明、松木征史、ウエイド・ネイラー、山本克治、発表表題: 動的カシミア効果検証実験: 実験計画・装置、学会名など: 日本物理学会秋季講演、発表年月日: 2010年9月23日、発表場所: 大阪府立大学(大阪)

発表者名 M. Saeed, Y. Kido, S. Matsuki, T. Nishimura, K. Yamamoto et al., 発表表題: Improving Detection Sensitivity of Dark-Matter Axion Search with a Rydberg-Atom Single-Photon Detector. 学会名など: Symposium on fundamental physics using atoms, 発表年月日: August 9, 2010, 発表場所: Osaka University, Osaka.

発表者名 K. Imai, S. Matsuki, Y. Kido, T. Nishimura, K. Yamamoto, et al., 発表表題: Rydberg-atom single-photon detector for dark matter axion search. 学会名など: Symposium on the fundamental physics using atoms, 発表年月日: August 5, 2009, 発表場所: 東京工業大学(東京都)

発表者名 S. Matsuki, Y. Kido, T. Nishimura, K. Yamamoto et al., 発表表題: Improving detection sensitivity in the microwave single-photon detection for the dark matter axion search. 学会名など: Symposium on Low Temperature Physics, and materials Science, 発表年月日: March 13, 2009, 発表場所: Kyoto University, Kyoto.

発表者名: 濱田遼介、西村智朗、城戸義明、松木征史、発表表題: 高励起 Rydberg 原子を用いた極微弱電場計測法の開発 II 学会名など: 日本物理学会第 64 回年次大会、発表年月日: 2009年3月30日、発表場所: 立教大学(東京)

発表者名: 松木征史、発表表題: リドベルグ原子による表面極微弱電場計測と物理、学会名など: 日本物理学会第 64 回年次大会、発表年月日: 2009年3月27日、発表場所:

立教大学（東京）

発表者名：西村智朗、城戸義明、松木征史、
発表表題：高励起リドベルグ原子を用いた
固体表面の極微電界検出システム、

学会名など：第4回真空・表面科学アジア・
オーストラリア会議（VASSCAA-4）、発表年月
日：2008年10月29日、発表場所：くにびき
メッセ（島根県）

発表者名：西村智朗、城戸義明、松木征史、
発表表題：高励起 Rydberg 原子を用いた極
微弱電場計測法の開発 I、学会名など：日
本物理学会秋季大会、発表年月日：2008年
9月22日、発表場所：岩手大学（岩手県）

発表者名 S. Matsuk, Y. Kido, T. Nishimura,
K. Yamamoto et al., 発表表題：Improving
detection sensitivity in the microwave
single-photon detection for the dark
matter axion search. 学会名など：
International Conference on Low
Temperature Physics, 発表年月日：August
6, 2008, 発表場所：Leiden University,
Netherlands.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松木 征史 (MATSUKI SEISHI)
立命館大学・総合理工学研究機構・教授
研究者番号：50037941

(2) 研究分担者

城戸 義明 (KIDO YOSHIAKI)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号：40224993

(3) 連携研究者

山本 克治 (YAMAMOTO KATSUJI)
京都大学・工学研究科・教授
研究者番号：90191395

西村 智朗 (NISHIMURA TOMOAKI)
法政大学・イオン工学センター・准教授
研究者番号：80388149

ネイラー ウエイド (NAYLOR WADE)
大阪大学・理学研究科・准教授
研究者番号：30411218