

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：34315

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22654030

研究課題名（和文） 地上におけるホーキング・アンルー輻射検証実験

研究課題名（英文） Towards observation of Hawking-Unruh radiations on earth

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）：

地上においてホーキング・アンルー（HU）輻射を観測・検証出来る可能性を実験的・理論的に検討した。特に極低温に冷却したマイクロ波共振空洞中にリドベルグ原子を導入し、単一光子検出を行う過程において検討した。HU輻射と動的カシミア効果の研究を共通に行えるように、クライオスタット・空洞・リドベルグ原子装置系を設計・製作し、シュタルク効果による原子加速、HU輻射効果の観測手法、予想される輻射効果などを理論的にも検討した。

研究成果の概要（英文）：

Feasibility study on the observation of Hawking-Unruh (HU) radiations on earth was performed in the Rydberg-atom single-photon detection system in a cooled microwave resonant cavity. Specifically a cryostat and a cavity, together with a Rydberg-atom single-photon detection system, were constructed in which related dynamical Casimir effect can be also investigated. The HU radiations resulting from Stark acceleration of atoms with the above system were studied theoretically and experimentally.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	0	1,600,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	330,000	3,030,000

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：ホーキング・アンルー輻射、単一光子検出、リドベルグ原子、共振空洞、動的カシミア効果

## 1. 研究開始当初の背景

アンルー（Unruh）が 1976 年に発表した理論は、一様に加速された系では、加速度に比例した温度の熱光子が伴われるというものである。これは、その前（1974 年）に発表されたホーキングの「ブラックホールは粒子を放出して蒸発する」という理論と深く関係

しているもので、ホーキング・アンルー輻射（関連する議論を行った 2 人を加えて、フリリング・デービス・アンルー・ホーキング輻射とも呼ばれる）と言われる。宇宙におけるホーキング輻射を観測するのは、その温度が非常に低いので、現状では不可能であるが、これを地上で観測するアイデアが幾つか提案

されている（最近のレビュー：Crispino, Higuchi, Matsas, Rev. Mod. Phys. 80(2008)787 を参照）。実際に観測された例は、しかし、今のところ無い。

一方、1947年にカシミアが議論した所謂カシミア効果の一つで、空洞の壁を振動させると、それに応じて実光子が放出されるという動的カシミア効果(DCE)は、壁の振動を、加速された壁の動きと見れば、ホーキング・アンルー輻射の例と見ることが出来る(Yablonovitch, 1981)。DCE実験も、幾つかの案があるが、現在までに確認されていない（最近、超電導磁気干渉計 SQUID を使って、超電導マイクロキャビティー回路で確認したという論文が発表されているが、真に DCE に対応するものかどうかの議論もある）。

宇宙での HU 輻射の観測が困難な理由は、その輻射の温度が非常に低いことで、その強度・周波数の点で現時点では観測不可能である。一方、地上の実験室でこれを観測しようとする案も幾つか出されていて、実験・理論両面から議論されている。

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。HU 輻射観測の困難さは、大きな加速度を得ることと、実マイクロ波光子の高感度検出にある。

## 2. 研究の目的

本研究は、HU 輻射を地上の実験室で観測する可能性を探ることを目的とする。特に、低温に冷却したマイクロ波共振空洞中に、加速されたリドベルグ原子を導入し、単一光子検出により光子を検出する過程を通じて、HU 輻射の観測を行うことを考える。この系は、一方で、動的カシミア効果の検証にも利用できる装置系であり、共通の装置として汎用性を持たせることが出来る。具体的には、2~5GHz 領域に共振周波数を持つマイクロ波超電導共振空洞を 100mK 程度の極低温に冷却し、加速したリドベルグ原子を導入して、空洞を通過させ、その後イオン化して光子の吸収を観測する。即ち、空洞内で光子を吸収した原子を選択的にイオン化して検出することにより、HU 輻射由来の光子の効果を検出することを具体的に実験理論両面で検討するのが目的である。

一方、動的カシミア効果(DCE)の検出では、空洞中に設置した半導体薄膜をパルスレーザーで照射し、マイクロ波をパル的に薄膜で反射させることにより空洞の壁を実効的に振動させ、その結果放出される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。平行して、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・検出が期待されるかを求める。特に、本研究では、シュタルク加速やレーザー加速を用いて原子を加速し、HU 輻射を伴う加速度系を形成する可能性を検討し、理論・実験両面で HU 輻射観測の可能性を追求する。

## 3. 研究の方法

実験装置の模式図を図1に示す。空洞内の半導体薄膜中の電子をレーザー励起し、空洞の壁を実効的に加速して、HU 輻射を調べる実験用の空洞を図2に示す。実験方法は以下のようになる：

- (1) NbTi 製のマイクロ波共振空洞を極低温（100mK 領域まで）に冷却する。
- (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。
- (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  $^{39}\text{K}$  で、シュタルク効果の影響を比較的に受けにくいリドベルグ原子として利用する。

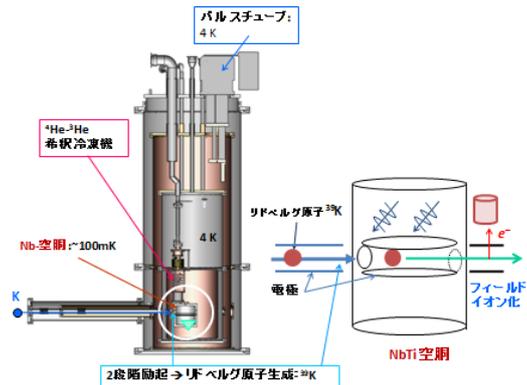


図1：ホーキング・アンルー輻射検証実験の模式図

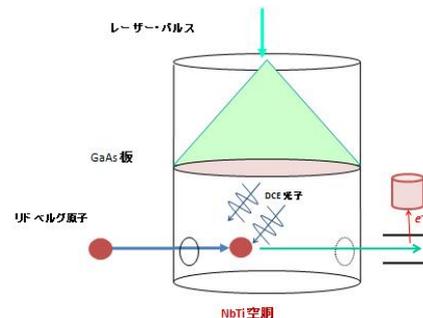


図2：半導体薄膜をパルスレーザーで照射し、実効的に壁(電子)を加速して、ホーキング・アンルー輻射を観測する実験の模式図

(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。

(6) 空洞導入前に、シュタルク加速の方法によりリドベルグ原子を加速し、空洞進入時の急峻な原子-空洞光子相互作用場の変化による光子吸収の割合を測定する。シュタルク加速は、Metcalf その他によって提案されて、分子の冷却などに利用されている (Breedon and Metcalf, Phys. Rev. Lett. 47 (1981) 1726; Procter et al., Chem. Phys. Lett. 374(2003)667; Bethlem et al., Phys. Rev. Lett. 83(1999)1558)。

(7) 別の加速機構として、レーザーにより光学モラセを作り、冷却・加速を行う方式も検討する。

(8) 空洞通過後にフィールドイオン化することで、励起されたリドベルグ原子を選択的に検出するが、励起状態の分布、強度などを測定することにより、空洞中の光子の状態を調べる。Scullyたちの解析 (Phys. Rev. Lett. 93(2004)129302; Phys. Rev. A74(2006)23807) によれば、HU放射の効果により、励起されて、かつ、光子を放出する過程の確率が増えるので、対応する変化をリドベルグ原子の励起状態から判別する。

(9) 別の試案として、リドベルグ原子を高速電場中に置き、高速パルスでイオン化する。この結果による電子の加速の効果と、その後のイオン化の様相を測定することで検出する。

関連して、最近提案されたBerryの位相を使って、HU放射を観測する手法

(Martin-Martinez et al., Phys. Rev. Lett. 107(2011)131301) を上記の実験に適用する可能性を検討する。加速度系と慣性系では、Berryの位相が異なってくることを利用すると、より高感度にHU放射の観測が可能になる。上記の実験の延長線上で、Berryの位相を測る手法を検討する。

#### 4. 研究成果

(1) 空洞内半導体壁中の電子を加速して、実光子生成を観測する方法 (動的カシミア効果の観測) に関しては、理論シミュレーション計算の結果、GaAs半導体を空洞中心に置くのが最も効率が良いことが分かった (Naylor, Matsuki, Nishimura, Kido, Phys. Rev. A80(2009)043835)。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。この装置により、寒剤を用いずに、空洞を100mK領域まで冷却することが可能となった。

(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。2段目の励起用455nmレーザーは、日亜化学のブルーレーザーで、出力は1Wである。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。

(5) 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。

(6) 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バンチ化を行い、空洞内に1個のバンチ原子のみを生成し、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。このバンチ化ビームを用いる方法は、フィールドイオン化にパルス電場を用いる関係上避けられないデューティファクターによる検出損失をゼロに出来る点でも極めて有効である。

(7) それぞれ任意の向きを持つ電磁場中でのリドベルグ原子の準位状態の計算と、時間的に回転変化する電磁場中での準位の時間発展の振る舞いを求める計算プログラムを作成し、浮遊電場などの影響を評価出来るようにした。この計算により、空洞内での電場の変化、選択的に準位をイオン化する際の電場のかけ方などについての定量的な解析が可能になり、実験の最適な条件設定が可能になった。

#### 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1件)

- ① 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.

[学会発表] (計 6 件)

①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(東京都)

②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.

③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.

④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.

⑤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(大阪府)

⑥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.

## 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) 連携研究者

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

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