

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20371

研究課題名(和文) 宇宙論および素粒子論への応用に向けた真空中転移の基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental study of vacuum decay towards the application to cosmology and particle physics

研究代表者

大下 翔誉(Oshita, Naritaka)

国立研究開発法人理化学研究所・数理創造プログラム・基礎科学特別研究員

研究者番号：50911632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙論および素粒子論で重要な現象の1つである真空崩壊の研究に取り組み、主に3つの研究成果を得た。(i)従来まで用いられてきたユークリッド経路積分を超えた手法として、ローレンツ経路積分による真空泡生成率の計算を提案し、ユークリッド経路積分の結果と一貫する結論を導いた。(ii)また、Wheeler-DeWitt方程式を用いて、従来まで知られていた典型的な真空泡の生成率の値よりも大きな生成率を導く相転移過程を数値的に導いた。(iii)超弦理論と一貫性のある高次元AdS時空に、ブラックホールのような非一様な成分が存在しても、4次元膨張宇宙を模倣する真空泡の生成が可能であることを理論的に検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、宇宙誕生直後などの初期宇宙において重要となる真空の安定性の理解に貢献する。従来まで用いられた真空崩壊率の計算法であるユークリッド経路積分には、幾らか問題点が指摘されており、それらを克服する新たな計算法の確立の第一歩となる研究成果である。また、素粒子論と重力理論を統合し得る有力な理論として超弦理論が知られているが、この理論では、我々の宇宙のように膨張する時空を包含し難いという性質が知られている。超弦理論で許される高次元空間が非一様な場合でも、そこで生成した真空泡の膨張が我々の宇宙の膨張を模倣することから、異なるスケールの物理が、一貫性を持ってこの宇宙を記述し得る理論的傍証も示した。

研究成果の概要(英文)：The vacuum decay or nucleation of vacuum bubble, which describes an important phenomenon in cosmology and particle physics, has been studied and the following three achievements were obtained: (i) The Lorentzian path integral was applied to the vacuum decay as a novel way to compute the vacuum decay rate. (ii) Based on the Wheeler-DeWitt equation, it was numerically discovered that there exists another bubble solution, which gives a higher decay rate than that of the common bubble solution discovered by Coleman and de Luccia. (iii) It was theoretically shown that an expanding bubble can be nucleated in the higher-dimensional AdS spacetime, compatible with the superstring theory, and mimics the expanding four-dimensional Universe on the bubble surface even if there exists a black hole in the AdS spacetime. This gives a supporting evidence of that the superstring theory, in which an expanding universe is difficult to be realized, can be compatible with cosmology.

研究分野：重力、宇宙論、場の量子論

キーワード：真空崩壊

## 1. 研究開始当初の背景

本研究課題では、場の量子論における相転移現象である「真空崩壊」の物理を研究対象としている。真空崩壊は、場の状態が量子揺らぎ、あるいは熱揺らぎによって、別の相へ転移する現象である。この真空崩壊は、従来まで主に「ユークリッド経路積分」によって定式化されていた。しかし、初期宇宙やブラックホール近傍など、時空の歪みが大きな領域など、重力の効果が無視できない環境で、このユークリッド経路積分が正しく機能しているかは非自明な問題であった。実際に、重力を取り入れたユークリッド経路積分や真空崩壊率の計算には、いくつかの問題点が指摘されていた。これらの問題点にアプローチし、真空崩壊率を適切な手法で計算することで、素粒子論で予言されている「ヒッグス準安定性」と宇宙論の整合性を適切に議論できる。

基礎物理のよく知られた他の問題点として、宇宙論と素粒子論（特に超弦理論）の間の不調和が挙げられる。宇宙論は膨張宇宙（近似的に de Sitter (dS) 宇宙）内での物理を対象とする一方で、超弦理論では de Sitter 宇宙ではなく、主に現実の宇宙とそぐわない anti de Sitter (AdS) 宇宙が理論的に一貫した形で実現するという予言がある。この不調和は、一様な 5 次元 AdS 時空での真空崩壊によって生成する真空泡のダイナミクスで理解できることが指摘されていた。しかし、AdS 時空内では、わずかな揺らぎを種として、ブラックホールを形成するという不安定性を有していることも知られており、「一様な 5 次元 AdS 時空」は、この意味で理想化された状況であることも知られている。また、ヒッグス場の準安定性も、初期宇宙における極小のブラックホールが存在しているような状況では、大きな不安定性を持つことがあり得る。しかし、ブラックホールがあるような状況下での真空の相転移は、ホーキング放射や超放射不安定性などの効果も適切に取り入れて考える必要がある。

## 2. 研究の目的

以上の背景から、私は以下の問題にアプローチすることを主目的とした。

(1) ユークリッド経路積分以外での、より適切な真空崩壊率の計算法構築へアプローチすること。

(2) 従来まで用いられている典型的な真空崩壊率が、適切であるかの理論検証を行うこと。

(3) ブラックホールが存在する状況下で、従来よりも現実的な仮定の下、真空崩壊の計算を展開すること。

これら 3 つを主目的として研究を行い、そこから得られた帰結を基に、原始ブラックホールがヒッグス不安定性に与える影響や、超弦理論と膨張宇宙の互換性といった、素粒子論と宇宙論の調和性を議論するための礎を構築する。

## 3. 研究の方法

(1)

ユークリッド経路積分（実時間を虚時間へ解析接続する経路積分）を超えた手法として、虚時間を用いないローレンツ経路積分を、Picard-Lefschetz 理論によって、真空泡生成の物理へ適用することを考える。Picard-Lefschetz 理論の真空崩壊への応用の第一歩として、本研究では、生成された真空泡の構造が、thin-shell な球対称真空泡を考え、重力が含まれていない系を対象とする。つまり、その真空泡の物理的自由度は、その半径  $R$  のみであり、 $R=0$  から有限のサイズの泡への生成過程を時間での経路積分で扱う。しかし、実時間での経路積分は絶対収束しない場合があり、本研究で扱うのもその一例である。それを解決するのが Picard-Lefschetz 理論であり、これを適用することで、絶対収束する経路積分の積分路を特定できる。本研究では、簡易化された真空泡生成モデルを考えているため、この計算を、解析的に実行できる。

(2)

実際に相転移現象が生じる際は、場の全体でなく、ある一部の領域のみが相転移を経験し、その結果として有限のサイズの真空泡が生成される。一方で、従来までの相転移の計算では、時間を大局的に虚時間に置き換え、解析を行うことが慣例であった。この「局所的な相転移現象」と「虚時間を大局的に導入する計算法」とのギャップを埋めるべく、Wheeler-DeWitt (WdW) 方程式を用いて、虚時間と実時間が混在した物理系の経路積分を実行する。これを数値的に実行するため、便宜上、系の対称性は空間 3 次元で球対称性となるプロセスのみに限定する。

(3)

この研究課題では、非一様な系での真空泡生成を対象とし、計算が複雑化することが予想された。したがって、ここでは計算の手順が確立しているユークリッド経路積分を用いた。5 次元 AdS 時空中のブラックホール (Myers-Perry ブラックホール) は、回転軸が 2 つあることが知られて

おり、今回は対称性を大きく崩すことは避け、2つの回転（角運動量）が同じ値となるように設定する。この状況で、Myers-Perry ブラックホールの周りで真空泡が生成する確率をユークリッド積分法の半古典近似で見積もる。また、回転ブラックホールは超放射現象により、その回転エネルギーを外界へ散逸するという性質を持つ。この効果が生じる時間スケールを、ブラックホール準固有振動の計算から数値的に求める。そして、真空泡生成率と超放射による回転減衰率を比較してどの程度、真空泡生成の計算が妥当であるかを評価する。

#### 4. 研究成果

##### (1)

ユークリッド経路積分によって、先行研究で得られた最も生成しやすい泡のサイズは、Coleman によって計算されている。この Coleman bubble と (i) 同じ、あるいはそれより (ii) 小さい (iii) 大きいサイズの真空泡生成に対する生成率を各々計算した。(i) の場合は Coleman の予言値と同じ値を得た。これは、少なくとも重力がなく、thin wall 近似が成立するような状況では、Picard-Lefschetz 理論は、ユークリッド経路積分と一貫性のある解析結果を導くことを示した。これは Picard-Lefschetz 理論による真空崩壊の新たな定式化の可能性を切り拓く意義深い研究成果である。今後は、この新手法を重力を含む系や、ブラックホールなどが存在する状況へ拡張することなどが課題となる。本研究の研究成果は、以下の論文で発表された。

Takumi Hayashi, Kohei Kamada, Naritaka Oshita and Jun'ichi Yokoyama, "Vacuum decay in the Lorentzian path integral", JCAP 05 (2022) 041.

##### (2)

半古典近似の範囲内で、WdW 方程式を数値的に解き、Coleman と de Luccia (CdL) が導いた真空泡生成率よりも高い確率で生成する解を数値的に見出した。この解の特徴として、そのサイズは CdL の真空泡とほぼ同じであるが、その全体が量子トンネリングで相転移するのではなく、その一部の領域のみが量子トンネリングを経験する。そして、それ以外の領域は、場の（古典的な）勾配による力で、安定な相へ引きずられ、古典的に相転移を経験していると解釈した。その分だけ、量子トンネリングによる相転移率の抑制が弱まるため、崩壊率が高くなったと考えられる。この数値計算結果による予言が正しければ、それは、準安定な真空状態の相転移率は、従来まで過小評価されていたことを意味する。この意味で、本研究では、素粒子論における「ヒッグス場の準安定性」にも関わる極めて意義深い成果が得られた。今後の展望としては、この計算を、より非一様性の高い（対称性が低い）状況へ拡張すること、あるいはブラックホールなどの強重力系へ拡張することなどが挙げられる。本研究成果は、以下の論文で発表された。

Naritaka Oshita, Yutaro Shoji and Masahide Yamaguchi, "Polychronic tunneling: New tunneling processes experiencing Euclidean and Lorentzian evolution simultaneously", Phys. Rev. D 107, 045007 (2023).

##### (3)

本研究では、5次元 AdS 時空の真空エネルギーの大きさ、ブラックホールの質量や角運動量、真空泡の表面のエネルギー密度などによって、非一様な AdS 時空においても真空泡が生成し、膨張し得ることを明らかにした。また、その膨張によって、真空泡の表面膨張は、4次元 dS 時空の膨張と同様に、指数関数的な膨張へと漸近することを確認した。超放射不安定性の影響を無視できる状況が存在することも示すことができた。つまり、本研究成果から、ブラックホールを含む非一様な 5次元 AdS 時空中 (Myers-Perry ブラックホール解) でも、真空泡は生成し得ること、その表面は擬似的に、4次元の膨張宇宙をよく模倣することが明らかとなった。このシナリオにおいて、超弦理論と宇宙論が両立し得る新たな傍証を示すことができた。本研究成果は、以下の論文で発表された。

Issei Koga, Naritaka Oshita and Kazushige Ueda, "dS<sub>4</sub> universe emergent from Kerr-AdS<sub>5</sub> spacetime: bubble nucleation catalyzed by a black hole", JHEP 05 (2023) 107.

また、この研究中に必要性が生じた「5次元時空におけるブラックホールの準固有振動の計算」は、それ自体に重要な学術的価値がある。準固有振動の性質から、そのブラックホールの熱的性質や量子論的な性質を類推できることが以前から知られており、その動機に関連した研究成果として、準固有振動の解析結果、解釈を以下の論文にまとめ、公表した。

Issei Koga, Naritaka Oshita and Kazushige Ueda, "Global study of the scalar quasinormal modes of Kerr-AdS<sub>5</sub> black holes: Stability, thermality, and horizon area quantization", Phys. Rev. D 105, 124044 (2022).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Takumi Hayashi, Kohei Kamada, Naritaka Oshita, Jun'ichi Yokoyama   | 4. 巻<br>5            |
| 2. 論文標題<br>Vacuum decay in the Lorentzian path integral  | 5. 発行年<br>2022年      |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Cosmology and Astroparticle Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>41     |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1088/1475-7516/2022/05/041   | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-            |
| 1. 著者名<br>Naritaka Oshita, Yutaro Shoji, and Masahide Yamaguchi  | 4. 巻<br>107          |
| 2. 論文標題<br>Polychronic tunneling: New tunneling processes experiencing Euclidean and Lorentzian evolution simultaneously                           | 5. 発行年<br>2023年      |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review D  | 6. 最初と最後の頁<br>45007  |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1103/PhysRevD.107.045007   | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する         |
| 1. 著者名<br>Koga Issei, Oshita Naritaka, Ueda Kazushige  | 4. 巻<br>105          |
| 2. 論文標題<br>Global study of the scalar quasinormal modes of Kerr-AdS <sub>5</sub> black holes: Stability, thermality, and horizon area quantization | 5. 発行年<br>2022年      |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review D  | 6. 最初と最後の頁<br>124044 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1103/PhysRevD.105.124044   | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |
| 1. 著者名<br>Koga Issei, Oshita Naritaka, Ueda Kazushige  | 4. 巻<br>5            |
| 2. 論文標題<br>dS <sub>4</sub> universe emergent from Kerr-AdS <sub>5</sub> spacetime: bubble nucleation catalyzed by a black hole                     | 5. 発行年<br>2023年      |
| 3. 雑誌名<br>Journal of High Energy Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>107    |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1007/JHEP05(2023)107   | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>大下 翔誉                                  |
| 2. 発表標題<br>Lorentzian description of vacuum decay |
| 3. 学会等名<br>素粒子物理学の進展2022（招待講演）                    |
| 4. 発表年<br>2022年                                   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

| 6. 研究組織 | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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                           |  |  |
|---------|-----------------------------------|--|--|
| イスラエル   | Hebrew University of<br>Jerusalem |  |  |