

Study on Enhancement of Vacuum Decay in Higher-Dimensional Theory

塚原, 壮平

<https://hdl.handle.net/2324/7363581>

出版情報 : Kyushu University, 2024, 博士 (理学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :



氏 名 : 塚原 壮平

論文名 : Study on Enhancement of Vacuum Decay in Higher-Dimensional Theory
(高次元理論における真空崩壊の促進に関する研究)

区 分 : 甲

論文内容の要旨

超弦理論は量子化された重力相互作用を自然に内包する量子重力理論の有力な候補と考えられているが、その低エネルギー極限で我々の宇宙を記述する唯一の真空を導出する試みには未だ成功例がない。その原因の一つとして超弦理論のような高次元理論において、余剰次元をコンパクト化する際の決定的な指導原理が存在しないことが挙げられ、むしろ膨大な真空が導出されてしまう可能性も指摘されている。このような状況を受け、直接 de Sitter (dS) 真空を構築するのではなく、ある準安定真空から別の真空への相転移の過程で生じるバブル上において dS 真空を構築する試みも精力的に行われている。

他方で、この dS 真空をトップダウンに構築する技術的困難から、重力と結合した有効理論の満たすべき数学的条件を定式化するボトムアップのアプローチに注目が集まっている。これはスワンプランド問題と呼ばれており、大統一理論や宇宙論などにおける経験則から様々な予想と条件が提唱されている。近年のスワンプランド問題の観点では、量子重力と無矛盾な dS 真空は少なくとも準安定で、十分早く崩壊しなければならないと予想されている。この予想に照らし合わせると、ほとんどの低エネルギー有効理論における準安定真空は量子重力理論と整合的ではなくなり、スワンプランドに属することになると考えられている。

しかし、自然界に目を向けると、不純物の存在により相転移の促進される例が多く知られている。同様の現象は高エネルギー物理においても起こりうる事が確認されており、モノポールやブラックホールが初期宇宙での相転移を促進する例などが挙げられる。この触媒効果を加味すると、何らかのコンパクト物体や特異点が系の不安定性を増強し、スワンプランドを回避しつつ dS 真空を構築できるのではないかと期待される。本論文では、高次元理論において真空崩壊を促進しうる可能性として Dp-ブレーンと特異インスタントンという 2 つのオブジェクトについて論じる。

まず、弦理論特有の触媒効果として Dp-ブレーンによる不安定性の増強について議論する。Dp-ブレーンは弦理論に存在する高次元物体であり、弦理論ではこれを用いた準安定真空の構成がよく議論されている。本研究では D5-ブレーンと anti D5-ブレーンを特異点のある高次元多様体に巻き付けることで具体的に準安定真空を構成し、更に内部空間に D3-ブレーンを巻き付けることを考えた。この D3-ブレーンはドメインウォール D5-ブレーンに溶解し、束縛状態を形成する。本研究では、WKB 近似による崩壊率の表式を、汎関数行列式を計算するための Gel'fand-Yaglom 法を一般化し、1-loop レベルで完全に導出した。この表式を用いた数値計算から、近似の信頼できるパラメータ領域では、D3-ブレーンの枚数を多くするほど準安定真空の寿命が短くなることを確かめた。更に、ポテンシャル障壁が消失する極限における寿命を 3 次の非調和振動子系での結果を応用する

ことで近似的に求め、スワンプランド予想の 1 つであるトランスプランキアン検閲官予想から課せられる条件との比較を行った。その結果、妥当なコンパクト化空間のサイズの仮定の下では、弦の結合定数に対し、弦の摂動論の妥当性から課せられる条件と整合的な制限を得た。これはトランスプランキアン検閲官予想の正当性を担保する具体的な状況証拠の 1 つとなっている。

2 つ目のテーマはインスタントン解の保有する特異点による崩壊率の増大である。時空のコンパクト化を伴うような高次元真空には、内部に時空の自由度の存在しない無の泡 (**Bubble of Nothing; BoN**) が拡大することによる非摂動的な崩壊チャンネルが存在する。この崩壊を媒介するインスタントン解は **Euclidean** 化された高次元ブラックホール解であり、元のブラックホール解の事象の地平面に対応する位置に円錐特異点を持つことで知られている。一般的な議論では、このような特異点が生じないように虚時間の周期に対して適当な条件を課し、事象の地平面の位置で滑らかになっているようなインスタントン時空を考える。

一方で、真空崩壊において重要な物理量は崩壊率であるため、崩壊率への寄与が有限であるならば、特異点を有するインスタントン解、所謂特異インスタントンも許容される可能性がある。本研究では最も簡単な高次元真空である 5 次元 **Kaluza-Klein** 真空の特異インスタントンによる崩壊を考え、**conical deficit regularization** に基づいて円錐特異点のバウンス作用への寄与を導出した。この寄与の全体の符号は負であるため、バウンス作用を小さくするように働く。解析の結果、実際に特異インスタントンによる崩壊の方がより崩壊率が小さく、支配的な崩壊過程である可能性を示した。併せて、熱力学的関数を用いてバウンス作用の計算を再建し、インスタントン解に含まれる特異点が崩壊を促進することの熱力学的な解釈についても議論した。