

氏 名 松井 宏樹

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1991 号

学位授与の日付 平成 30 年 3 月 23 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 The Gravitational Higgs Phenomena and the Vacuum  
Instability

論文審査委員 主 査 教授 磯 暁  
教授 野尻 美保子  
教授 北野 龍一郎  
准教授 遠藤 基  
講師 阪村 豊  
助教 中山 和則 東京大学 大学院  
理学系研究科

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

Recent discovery of the Higgs boson at the large hadron collider (LHC) has been recognized as a major breakthrough in the particle physics and established the Standard Model (SM). However, there are still many unanswered questions or deepest puzzles. Even for the Higgs physics, we have been plagued with many problems: What is the origin of the electroweak symmetry breaking? Why is the observed Higgs mass unnaturally small against the Planck scale? Whether does the Higgs field participate in the cosmic inflation and why does the Standard Model Higgs vacuum seem to be metastable? These problems are important clues to discover new physics beyond the SM and understand cosmological history of our Universe.

The stability problem of the Higgs vacuum has been theoretically discussed for quite a long time. However, the recent measurements of the observed Higgs boson mass and the top quark mass strongly suggest that the SM Higgs potential develops an instability below the Planck scale if the SM is correct. Thus, our living electroweak vacuum is not stable and would eventually collapse. For the present best-fit values of the parameters of the SM, the life time of the Higgs vacuum is much longer than the age of the Universe. Fortunately, the metastability of the Higgs vacuum does not seem to require additional new physics beyond the SM.

However, the above situations drastically change when gravitational effects can not be ignored. The strong gravitational background generates the vacuum fluctuation of the Higgs field, which triggers a collapse of the false Higgs vacuum. Most subtle situation is the inflationary Universe where the large fluctuation of the Higgs field can be generated during inflation. In the case where the Higgs field can be effectively regarded as the massless scalar field like inflaton itself, the Higgs vacuum fluctuation enlarges in proportion to the Hubble scale. Thus, if large inflationary fluctuation of the Higgs field overcomes the barrier of the Higgs effective potential, it triggers off a catastrophic vacuum collapse of the Universe. Furthermore, even at the end of the inflation called the preheating stage, the large vacuum fluctuation of the Higgs field can be generated via parametric or tachyonic resonance and poses a threat to the Higgs vacuum stability. The thermal fluctuation at the reheating stage can also trigger a false vacuum decay, but the effects can be somewhat relaxed by the thermal corrections to the Higgs potential. The evaporating black holes, which emit thermal Hawking radiation, also raise a same problem about the Higgs vacuum stability.

These issues are the subjects of this thesis. Several aspects about the Higgs vacuum

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

stability in gravitational background or cosmological situations have already been investigated in the literature, but here we focus on and clarify how gravitational vacuum fluctuation of the Higgs field affects the electroweak vacuum stability. The effects of gravitational fluctuation of the Higgs field on the vacuum stability are twofold. On one side, the gravitational Higgs fluctuation can stabilize or destabilize the effective Higgs potential as backreaction effects. On the other side, the local and inhomogeneous Higgs fluctuation can generate true vacuum bubbles or domains and triggers off a collapse of the electroweak false vacuum. Whether the Higgs vacuum in various gravitational backgrounds or cosmological situations becomes stable or not is determined by these effects although there are some essential difficulties to analyze the vacuum field fluctuation in gravitational background.

In standard QFT, the vacuum field fluctuation is formally described by the two-point correlation function, which has troublesome ultraviolet (UV) divergences. Therefore, a regularization or renormalization must be required. In flat Minkowski spacetime, these UV divergences can be eliminated by standard renormalization methods. However, in curved spacetime where the gravity curves the background spacetime, it is trouble to perform the renormalization and analyze gravitational vacuum fluctuation. In this thesis we adopt some techniques of the QFT in curved spacetime, which corresponds to performing QFT with the classical Einstein gravity. Here we derive the effective potential in curved spacetime with the gravitational backreaction and clearly show how gravitational vacuum fluctuation affects the stability of the Higgs vacuum. Based on this semiclassical approach, we investigate the electroweak vacuum stability in various background spacetimes or cosmological situations as during inflation corresponding to the de-Sitter spacetime, after inflation in particular the preheating stage and around evaporating black holes.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

LHC 実験でヒッグス粒子が発見され、その質量が確定したことで、標準模型とそれを元にした初期宇宙論には、真空の不安定性に関する重大な問題が内在することが明らかになった。この真空の不安定性は、ヒッグス場の真空期待値が  $10^{11}$  乗 GeV 以上という大きな値をとる時に、自己相互作用定数が負になることで誘起される。現在の宇宙では、このように真空が不安定な状態へと崩壊する確率は極めて小さいことが知られているが、初期宇宙ではヒッグス場の揺らぎが大きな値をとる可能性があり、その結果、真空が崩壊して現在の宇宙が創生されない可能性が指摘されている。

松井宏樹氏の学位論文は、このような標準模型の精密測定から示唆される真空の不安定性、特に宇宙初期における加速膨張（インフレーション）の影響でこの不安定性がどこまで増大されるかについての一連の研究を纏め上げたものである。松井氏の研究では次の3つの場合において、真空安定性条件から導かれる物理量への制限を与えた。一つ目が宇宙初期の加速膨張期における真空の安定性条件である。松井氏は、曲がった時空での標準模型の拡張として、ヒッグス場と時空のスカラー曲率が結合する非ミニマル相互作用項が存在するモデルを考えた。加速膨張期でのヒッグス場の揺らぎの評価を行うことで真空安定性条件を導き、各種物理量に対する制限を与えた。二つ目がインフレーション終了期でのプレヒーティングによる真空崩壊の可能性である。インフレーション終了時には、インフレーションを引き起こすスカラー場であるインフラトン場が振動し、それがプレヒーティングと呼ばれるヒッグス粒子の粒子生成を引き起こす。この粒子生成により誘起されるヒッグス場の不安定性についての解析も行い、インフレーションのエネルギースケールが大統一理論のスケールよりも十分に小さい必要があることを明らかにした。三つ目の解析がブラックホール周辺での真空の不安定性の研究である。松井氏は、現在の宇宙においても、ブラックホール周辺ではホーキング輻射の影響で同様の真空不安定性がおきることを示し、これから原始ブラックホールの残存量についての制限を出した。特に、 $10^9$  乗グラム程度の質量をもつ原始ブラックホールの残存量に関しては、宇宙初期の元素合成による制限よりも強い制限を与えることを示した。

これらの結果は、松井氏のオリジナルな研究に基づくものであり、すでに5本の査読付き論文として雑誌に発表されている。学位論文では、前半部分において、ヒッグス場の不安定性に関する包括的な解説を行い、その後、曲がった時空における場の量子論の有効ポテンシャルの計算をレビューしている。論文の後半では、これらの結果を、宇宙初期のドジッター時空、インフレーション終了直後のプレヒーティング期における粒子生成の効果、そしてブラックホール時空、という3種類のケースへ適用し、ヒッグス場の不安定性とそれに付随した真空の安定性条件から、インフレーション期のハッブル定数やヒッグス場のとりうる値の上限など様々な物理量への制限を与えた。

これらの成果は初期宇宙におけるヒッグス場の不安定を考える上での重要な新しい知見を与えており、学位論文の研究として必要な水準を十分に満たしている。またこれらの研究はすでに5本の査読付き学術雑誌に掲載され、関係する研究者の注目を集めている。博士論文は、関連する研究のレビューを含めて要領よくまとめられている。これらのことか

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

ら、審査委員会として松井宏樹氏の博士論文審査を合格と判断した。