

平成30年6月7日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05057

研究課題名（和文）電弱相転移とヒッグスの物理

研究課題名（英文）Electroweak Phase Transition and Higgs Physics

研究代表者

船久保 公一（Funakubo, Koichi）

佐賀大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：60221553

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,300,000円

研究成果の概要（和文）：標準理論を拡張したモデルにおいて電弱バリオン数生成が可能であるためには電弱ゲージ対称性が自発的に破れる相転移が強い一次転移でなければならない。ヒッグス場二重項を1つだけ含む標準理論では、発見されたヒッグス粒子の質量では相転移はクロスオーバーになることも非摂動計算により確かめられている。

本研究では、電弱バリオン数生成が可能になるための条件を決定する精度を高めることにより、標準理論を拡張したモデルにおけるヒッグス粒子の質量などの性質に対する制限を正確に決めるため、相転移の性質の決定とスファレロン遷移率の評価の精度の向上を目指し、特に後者においては初めてバンド構造を取り入れた評価を行なった。

研究成果の概要（英文）：To judge the possibility of the electroweak baryogenesis (EWBG) in the framework of the BSM, the EW phase transition must be a strongly first-order one. The SM is known to have a cross over for the phase change.

In this project, we attempted to improve the precision to determine the condition for the EWBG by considering the resummation of the thermal mass without use of the high-temperature expansion in a gauge-invariant way based on a method which was developed for the abelian gauge theory by us. We also studied the effect of the band structure in the effective theory describing the quantum tunneling between the adjacent classical vacua of the bosonic sector of an EW theory, pointed by Tye and Wong. We reformulated the effective theory in a gauge-invariant way to avoid the divergence in the mass parameter and improved the precision of the energy band structure by use of 3 different WKB methods.

研究分野：素粒子論

キーワード：電弱相転移 スファレロン過程 ヒッグス粒子の物理

1. 研究開始当初の背景

ヒッグス粒子の発見以降、暗黒物質・ニュートリノ質量など標準理論では説明できないが観測では明らかな事実を説明するため標準理論を拡張した模型の研究が盛んになっている。初期宇宙の元素合成と宇宙背景放射の温度ゆらぎの相関から明らかになっている宇宙の物質・反物質非対称性も同種の問題の1つである。この問題を解決するシナリオとして、近い将来の加速器実験による検証可能性のあるものに電弱バリオン数生成がある。今後の実験の方向性を決めるためにも、このシナリオの可否と拡張された模型のヒッグスの物理との関係を精度良く決める必要がある。

電弱バリオン数が可能であるためには、ゲージ対称性が破れていない相の領域で生成されるバリオン数とレプトン数の和(B+L)を、相転移直後に凍結しなければならない。そのためにはゲージ対称性が自発的に破れた非対称相における(B+L)の変化率が十分に抑制されなければならない。この反応はスファレロン過程として知られており、反応率の評価にはスファレロンという電弱理論の古典解の性質が重要な因子である。最も重要なものはスファレロン・エネルギーであり、ヒッグス場の期待値に比例している。従って、相転移が起こる温度とその温度におけるヒッグス場の期待値を正確に定めることが最も重要な問題である。従来、電弱相転移を調べるために有限温度の有効ポテンシャルが用いられてきた。解析的には有限温度場の理論の摂動展開を用いるが、結合定数が小さい場合でも理論の質量スケールと同程度以上の高温では摂動展開の近似が悪くなることが知られている。これを改善するために最も温度依存性の大きなボソン場の質量項を再和(resummation)することにより高温の補正項を高次まで取り込むことで近似を改善する方法が用いられてきた。ただし、有限温度のループ積分、特に2ループの積分を実行することなく高温展開の少数の項だけを使う方法が用いられてきた。この方法は定量的な精度の問題の他に、温度に依存しローレンツ共変性を破るカウンター項を含み、2ループ以上では通常は繰り込みでは処理できない発散が生じるが、これらが単純捨てられるため、理論的に繰り込みが可能であるか定かではない。

本研究代表者は、可換ゲージ理論において熱的質量を含んだ2点関数を適切に選ぶことで、2ループレベルで温度に依存したカウンター項を用いて繰り込み可能になることを高温展開を用いることなく示した。本研究計画はその手法を非可換ゲージ理論に拡張し、標準理論を拡張した模型において相転移の振る舞いを精度良く調べ、電弱バリオン数生成の可否とその模型が含む複数のヒッグス粒子性質との関係を付けることが課題である。

2. 研究の目的

電弱バリオン数生成が可能であるためには、ゲージ対称性が破れていない相で生成されたバリオン数(とレプトン数の和)を相転移直後に凍結されねばならない。この凍結が実現されるには、(1) 相転移が起こる温度と相転移直後のヒッグス場の期待値の大きさと、それに基づく(2) スファレロン過程が起こる確率(スファレロン遷移率)が宇宙の膨張率よりも十分小さくなることが要請される。

(1)を精度良く知るためには、相転移の研究の基礎となる有限温度有効ポテンシャルの計算精度を上げる必要があるが、熱的質量を再和する2ループ以上の計算では、温度補正のループ積分に高温展開が用いられ、その精度が悪いことと、熱的質量を再和する方法では通常は摂動論に無かった温度に依存する発散項がローレンツ共変性を破る形で生じるが、繰り込み可能性も保証されていない。研究代表者は可換ゲージ理論においてこの問題を解決する方法を提案し、実際に温度に依存しローレンツ共変性を破るカウンター項があっても繰り込み可能で高温展開を使わない結果を導出した。この方法を非可換ゲージ理論に拡張することが1つの目的である。研究期間中に、高エネルギーにおけるスファレロン遷移率の評価にボソン場セクター有効理論におけるエネルギー固有値がバンド構造を持つことが影響を与えると主張する論文が発表された。[Tye and Wong, Phys. Rev. D92 (2015) -045005] この有効理論はスファレロン遷移率の評価が始められた1990年代に考えられたもので、当時から質量項に発散が生じる問題が指摘されていたが、Tyeらはこの問題を無視して定量的評価を行なっている。まずこの有効理論の質量項の問題を解決した上で、エネルギー固有値のバンド構造を正確に求め、その結果に基づいてバンド構造を取り入れた有限温度のスファレロン遷移率の再評価も行う必要がある。研究計画全体をい意味があるものにするには、この課題も解決しなければならない。

3. 研究の方法

有限温度有効ポテンシャルを、高温展開を使うことなく、且つ、1ループで得られた熱的質量の再和を取り入れて矛盾なく計算する方法を可換ゲージ理論で開発しており、それを非可換ゲージ理論に発展させる。まず可換ゲージ理論で開発した熱的質量を含む2点関数を、非可換ゲージ理論に形式的に拡張すると、ゲージ不変性は微分演算子を全て共変微分にすることを要求するため、高度に非線形で非局所的な項を含むことになる。さらに電場の質量と磁場の質量の違いも考えると、ローレンツ共変性も破れてしまう。この取り扱いが困難な項のために、量子色力学ではhard-thermal-loop近似といった方法が採ら

れてきたが、ヒッグス場の期待値という電弱スケールのある理論ではその近似が妥当ではないため、全く異なる新しい方法が望まれる。本研究では理論の有効作用を経路積分表示し、補助場をいくつか導入することで、それと等価であるが局所的な項だけを含む形に書き換えることで、ローレンツ共変性が無い熱的質量を含む、且つ、ゲージ不変な作用を構成する。

こうして得られた作用を使って2ループレベルで温度に依存する発散が繰り込まれることを一般的に示す。ここで開発した計算法を、ヒッグス二重項を複数含む模型などの標準理論を拡張した模型に適用し、相転移の振る舞いを調べる。K. Funakubo and E. Senaha, Phys. Rev. D79, 115024 (2009)の方法を用いて、実際に相転移が始まる核形成温度を求め、その温度におけるスファレロン遷移率を計算する。その結果から当該温度におけるスファレロン脱結合条件を決定し、その条件を満たすための制限をヒッグス粒子の質量スペクトルについて求める。

もう1つの研究期間内に生じた新しい課題である、スファレロン過程を記述する有効理論のエネルギーバンド構造の効果を調べるために、従来では無視されてきたゲージ場の時間成分を考慮して、ゲージ不変性を保つ有効理論を定式化する。この有効理論では非物理的な発散は生じないと期待される。こうして構成された有効理論においてエネルギーバンド構造を数値的に計算し、禁則帯を熱的平均を定義するエネルギー積分領域から除外した場合に、有限温度のスファレロン遷移率が、バンド構造を考慮しない場合とどの程度変わるかを評価する。

な形でスファレロン遷移率にエネルギー固有状態がバンド構造を考慮した計算をすることについては、バリオン数の変化の自由度に相当するパラメータを力学変数と見做して数値的にエネルギーバンドの計算を低エネルギーからスファレロン・エネルギー以上のこのエネルギーまで行い、有限温度における遷移率への影響を定量的に評価する。

4. 研究成果

熱的質量を考慮した摂動展開については、有効作用の経路積分表示を用いて補助場を導入することでゲージ不変、且つ局所的な作用を構成することで回避することを示した。しかしながら計画していた、具体的に拡張された模型に適用して熱的質量の再和を伴う2ループの摂動計算については、可換ゲージ理論で得られた項以外のものを全て書き出すことが未達成で、繰り込み可能性の証明など研究期間内に完了できなかった。

一方で、期間内に取り組みを始めた新たな問題については、研究に見られた有効理論の質量の発散はゲージ不変な作用からスタートすることで回避できることを示すことがで

きた。また有効理論におけるバンド構造をエネルギーの広い範囲を3つに分け、それぞれに異なるWKB近似の方法を用い、境界領域で連続的になることを確認し、全領域で精度良く計算できた。実際にはトンネル効果に効く低エネルギーのバンド幅は非常に狭く、実際には単純なトンネル効果による抑制と変わらないことが示され、一方高温では、本来熱的遷移が優勢であり、エネルギーバンドの効果は無視できることも示され、従来のスファレロン脱結合条件が大きく変わらないことが判明した。その結果に高エネルギーでのバリオン数非保存過程の可否に関する考察を加えて学会で発表した。

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 1件)

船久保公二、「バリオン数の破れ-スファレロン過程--」, 日本物理学学会誌、72巻、630-631 (2017) 査読有り

〔学会発表〕(計 1件)

船久保公二, 冬頭かおり、瀬名波栄問、高エネルギーでスファレロン過程は見えるか?、日本物理学会2016年秋季大会、2016年9月21日、宮崎大学

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://astr.phys.saga-u.ac.jp/~funakubo/research/research-j.html>

<http://astr.phys.saga-u.ac.jp/~funakubo/BAU/BAU.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

船久保 公一 (FUNAKUBO, Koichi)

佐賀大学・工学系研究科・教授

研究者番号：60221553

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()