

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540312

研究課題名(和文) 相関関数を用いた初期宇宙非平衡現象の解析

研究課題名(英文) Study of Nonequilibrium phenomena by use of the correlation functions

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) 1,000,000円、(間接経費) 300,000円

研究成果の概要(和文)：初期宇宙における非平衡現象の解析には従来はボルツマン方程式、しかも分布関数の運動量依存性が平衡分布に比例するという仮定の下、粒子数密度に対する積分されたボルツマン方程式が主に用いられてきた。平衡状態からの逸脱が本質的である現象を正しく記述するためには、この仮定をしない解析が必要である。熱的レプトン数生成において、重いニュートリノの分布関数の運動量依存性を正確に取扱うとともに、レプトン数の変化を伴う散乱過程を取入れたボルツマン方程式を導出し、一部の数値解を得た。また高温での理論の振舞を決める有効ポテンシャルを高次摂動論で高温展開を利用しない計算法を開発し、ゲージ・ヒッグス系に応用した。

研究成果の概要(英文)：To describe states out of equilibrium in the early universe, the integrated Boltzmann equations have been used assuming the distribution functions of the particles have the same momentum-dependence as those in equilibrium. Proper treatment of nonequilibrium states is necessary to evaluate the abundances of the dark matter and baryonic matter. In the context of thermal leptogenesis, we studied the evolution of the distribution function of the heavy neutrino and calculate the lepton number asymmetry including the effects of the lepton-number-violating processes.

We also developed a method to evaluate the effective potential, which are used to study the phase transitions, with the resummation of the thermal masses, without recourse to the high-temperature expansion. We applied it to the abelian Higgs model and obtained the two-loop resummed effective potential, which indicates a weaker symmetry-breaking phase transition than the previous studies with the high-temperature expansion

研究分野：数物系科学

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：バリオン数生成 電弱相転移 レプトン数生成 ボルツマン方程式

1. 研究開始当初の背景

現在の宇宙を占めるエネルギーのうち、ダークマターとバリオン物質の存在量を定量的に決定することは、宇宙の謎を解くだけでなく、素粒子の標準理論を超える理論の探索にも必要なことである。そのためには、場の量子論に基づく素粒子模型を使って第一原理的に初期宇宙の状態を正確に記述できなければならない。特に初期宇宙の高温状態での理論の相転移、および粒子数が変化する非平衡過程の研究は、現在観測される宇宙論パラメータから得られる素粒子模型への制限を高精度で決定するのに必要不可欠である。従来の非平衡状態の研究には粒子の分布関数の時間発展を支配する Boltzmann 方程式が用いられてきたが、分布関数の運動量依存性に関する仮定と一部の相互作用のみを考慮するという近似が使われている。

また、宇宙膨張率（ハッブルパラメータ）が粒子の反応率より小さくなる電弱スケールの温度においても、電弱相転移が強い一次転移ならば非平衡過程が生じる可能性がある。高温での理論の相転移を調べるのに使われる有効ポテンシャルについては、一部の格子数値計算を除いては、熱的質量の再和を用いる摂動論的研究が主たるものである。摂動計算に現れる有限温度ループ積分、特に2ループ積分の評価には専ら高温展開の初項のみが用いられてきたが、この近似はループを回る粒子の質量が温度程度のときには妥当ではない。相転移が強い一次転移の場合には、ループを回る粒子の質量が大きくなり高温展開に基づく結果が信用できない。また高温展開の初項のみを使う場合、温度に依存する発散項を無視しているため、熱的質量の再和というある種の摂動級数の組み替えにおいてループの各次数で温度に依存する発散が繰り込み可能であるかも自明ではない。以上の近似の改善が、高精度で理論の振舞を予言するには不可欠である。

2. 研究の目的

(1)ダークマターの残存量やレプトン数生成で宇宙に残るレプトン数の評価をするためには、非平衡状態の時間発展を解析しなければならない。現在の宇宙に残る種々の粒子数を素粒子模型から精度よく計算するために、非平衡状態の時間発展を解析する方法を改善する。従来は粒子の分布関数の時間発展を Boltzmann 方程式により記述し、散乱項には採用した素粒子模型における散乱断面積をその分布関数を乗じて運動量積分したものを扱うところを、非平衡分布関数の運動量依存性が平衡分布関数と同じであるとする仮定のもと粒子数密度の発展方程式に置き換えられてきた。熱的レプトン数生成において、この手法の妥当性を確認し、従来考慮されていなかったレプトン数が増加する散乱過程を取り入れて残存レプトン数評価の精度を

高める。

(2)高温の初期宇宙の状態をより正確に記述できる有効ポテンシャルの計算法を開発する。格子数値計算を除く方法では、最も温度依存性の大きい熱的質量を再和として取込み、さらに有限温度ループ積分に対して高温展開を用いるものが主たるものであった。ゲージ場は縦波・横波で熱的質量が異なること、電弱一次相転移の場合は相転移温度近傍で高温展開が必ずしも妥当でないこと、ローレンツ共変性がない摂動論において温度に依存する発散が通常の繰り込み処方では除去できるかが非自明であるなどの問題がある。ゲージ・ヒッグス系において、ゲージ場の熱的質量の再和において、高温展開を用いずに2ループレベルで有効ポテンシャルを評価し、繰り込み可能性を示す。得られた有効ポテンシャルを数値的に評価し、先行研究と比較することで、高温展開の妥当性を吟味する。

3. 研究の方法

(1)与えられた素粒子模型から第一原理的に初期宇宙における非平衡現象を記述するには場の相関関数に対する閉時間形式の Kadanoff-Baym (KB) 方程式が適している。しかし時間についても非局所的な KB 方程式は簡単な系でも数値解を得るのに膨大な時間を要する。従来は時間に依存する粒子の分布関数に対する Boltzmann 方程式、特に分布関数を積分した粒子数密度に対する Boltzmann 方程式が主として用いられてきた。この積分された Boltzmann 方程式が運動量依存性を持つ分布関数に対する本来の Boltzmann 方程式の良い近似になっているのかは自明ではないので、まず比較的簡単な系として重いニュートリノの崩壊による熱的レプトン数生成の問題について2つの Boltzmann 方程式の数値解を比較することによって、いかなる場合に積分された方程式が有用であるかを明らかにする。これは次の段階の KB 方程式の必要性を明らかにする研究の出発点となる。

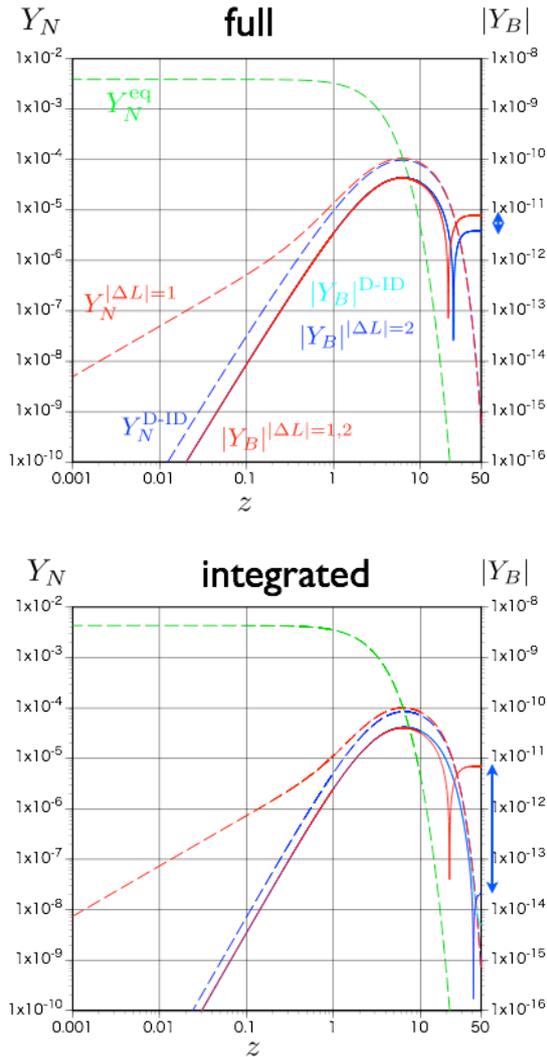
(2)標準理論を超える素粒子模型の高温での振舞い、特にゲージ対称性の自発的破れを伴う相転移の性質の予言の精度を高めるために、ゲージ場の熱的質量の再和を含む高次摂動計算を新たに定式化し、ゲージ・ヒッグス系の有効ポテンシャルを求め、数値的に相転移を調べる。まず可換ゲージ・ヒッグス系において2ループレベルの有効ポテンシャルを用い、高温展開を利用せずに温度に依存する発散が相殺することを証明し、数値計算により先行研究と比較する。次にその手法を非可換ゲージ理論に拡張する。

4. 研究成果

(1)運動量依存性を考慮した熱的レプトン数生成の数値解析を行い、重いレプトンの崩壊パラメータについて積分されたボルツマン

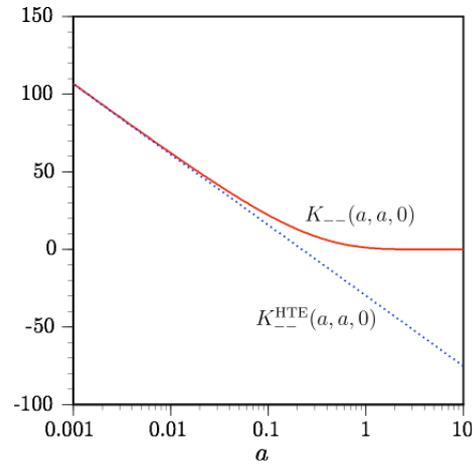
方程式が有効となる領域を明らかにした。また、従来取り入れられなかったレプトン数が2変化する散乱過程を取り入れた解析も行った。

重いニュートリノの崩壊パラメータ K を、(ニュートリノの崩壊率)/(ニュートリノ質量に相当する温度でのハッブルパラメータ)と定義すると、 K が小さいときは非平衡性が強い。例えば $K=0.01$ における運動量依存性を考慮した Boltzmann 方程式 (full) と粒子数密度に対する方程式 (integrated) の比較を以下に示す。



ここで右縦軸はスファレロン過程を考慮してレプトン数をバリオン数に換算して得た非対称性である。レプトン数を1および2変える散乱まで含んだ結果 (赤い実線) とレプトン数を1変える過程のみを含んだ結果 (青い実線) の差が、運動量依存性を考慮した場合とそうでない場合の差が顕著であり、運動量依存性を考慮することとレプトン数を2だけ変える過程の重要性を示している。他のパラメータについての結果などは学会発表③とホームページで公開している講演ファイルに記載している。

(2) 可換ゲージ・ヒッグス系において、ゲージ場の縦波および横波成分の熱的質量を取り入れた新たな再和法を用い、2ループまでの有効ポテンシャルを高温度近似によらずに計算する方法を開発するとともに、温度に依存する発散が繰込まれることを示した。この際、有限温度2ループ運動量積分を効率よく数値計算する方法を開発した。その結果、高温展開の初項のみを用いる従来の計算法がパラメータ $a=m/T$ (m はループを回る粒子の質量、 T は温度) が 0.1 より大きくなると信頼度が落ちることを示した。例えば、2ループ sunset 型ダイアグラムの2つの内線の粒子が同質量、残り1つの内線の粒子の質量が0の場合、そのダイアグラムが生じる温度依存部分を表す関数は下図のような振る舞いをする。赤い曲線は数値積分、青い点線は高温展開による結果を示している。



この関数は最小超対称模型において相転移を強くする寄与を生じるとされている squark-squark-gluon の sunset ダイアグラムの寄与を決めるものである。この他にもループ積分から生じる温度依存項を数値的に評価して可換ゲージ・ヒッグス系の対称性の破れを伴う相転移を調べた。高温展開を用いた先行研究に比べて、一次転移の場合でも秩序変数の変化が小さくなることを指摘した。結果の詳細は下記の雑誌論文を参照のこと。この方法を非可換ゲージ理論に拡張する際には、ゲージ場に作用する射影演算子に含まれる共変微分を局所化する新たな方法を開発し、有効ポテンシャルの計算に適用した (論文準備中)。

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)

K. Funakubo and E. Senaha, Two-loop effective potential, thermal resummation, and first-order phase transitions: Beyond

the high-temperature expansion, Physical Review D87, 054003 (2013) 査読有り

〔学会発表〕(計 3件)

①船久保公一, 丸鶴居史, 水口拓也、運動量依存分布関数を用いたレプトン数生成の解析、日本物理学会 2013 年年次大会、2013 年 3 月 26 日、広島大学

②船久保公一, 瀬名波栄問、2 ループ有効ポテンシャルに対する再和法の改善と一次相転移、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 9 月 11 日、京都産業大学

③船久保公一, 瀬名波栄問、高温展開された 2 ループ有効ポテンシャルの妥当性(II)、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 18 日、弘前大学

〔その他〕

ホームページ等

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