

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400250

研究課題名(和文) 非平衡熱場の量子論で探る高エネルギー極限状況における自発的対称性の破れ

研究課題名(英文) Spontaneous symmetry breaking in high energy critical environment by thermal quantum field theory

研究代表者

稲垣 知宏 (Inagaki, Tomohiro)

広島大学・情報メディア教育研究センター・教授

研究者番号：80301307

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：非平衡熱場の量子論の提供により、自発的対称性の破れに伴う新しい高エネルギー臨界現象を発見することを目的に研究を実施した。

自発的に対称性の破れる系の基礎理論として、ヒグスポテンシャルの振動解近傍でのスカラー場の理論の構成、強結合ゲージ理論の非摂動効果を近似的に扱うことから現れるゲージ依存性を抑える解析処方¹の提案等を行った。また、インフレーション期の揺らぎの成長に関して量子補正の高次項とくりこみ群による補正を解析した。さらに、新しいインフレーションモデルとしてゲージ相互作用する南部、ヨナ・ラシニオインフレーションモデルを構築し、宇宙背景放射の揺らぎに対して特徴的なアトラクター構造を発見した。

研究成果の概要(英文)：We have studied high energy critical phenomena associated with spontaneous symmetry breaking based on thermal quantum field theory.

As a fundamental theory for spontaneous symmetry breaking, we have constructed a field theory around oscillating solutions of the equation of motion for the Higgs potential. A procedure to suppress the gauge dependence has been proposed in the analysis of Schwinger-Dyson equation for strong coupling QED. We have also evaluated cosmic microwave background fluctuations induced by the primordial inflation. For a fundamental scalar inflaton field, it is found that the two-loop correction on the fluctuations is much larger than the leading-log correction. Introducing a composite scalar inflaton constructed by fermion and anti-fermion, we have proposed the gauged Nambu-Jona-Lasinio inflation model. It is found that the model represents an attractor which can not be found in a fundamental scalar model.

研究分野：素粒子論

キーワード：自発的対称性の破れ 非平衡熱場の量子論 南部、ヨナ・ラシニオ模型 インフレーション 宇宙背景放射の揺らぎ

1. 研究開始当初の背景

非平衡過程を記述する理論としては、経路積分を出発点にする閉時間形式が利用される事が多い。非平衡 TFD では相転移点を股がった解析ができるという利点が知られていたが、相対論的な理論の取り扱いに問題があった。現代的な視点から代数構造が見直されることで、非平衡 TFD は徐々に進展し、閉時間形式との関係も明らかになってきた。我々の研究グループでは、スカラー場、ディラック場の相対論的非平衡 TFD の構築に成功したところであった。

一方で、有限温度、密度、曲率時空中におけるフェルミ粒子による自発的対称性の破れの研究は、1990 年代に大きく進展した。当時、研究代表者が行った曲率時空中での研究は対称性を保持した正則化という点で独創的、先駆的位置づけにあった。最近 10 年間の発展として、標準模型を超える理論、広範囲の極限状況への拡張があり、研究代表者も、多体相互作用の導入、非線形曲率相互作用の解析、余剰次元時空中での考察を行っている。また、自発的対称性の破れ下でアインシュタイン方程式を解き、緩やかに時間発展する曲率時空中の構造解析も実施している。我々の研究グループでは、有限温度、密度中での自発的対称性の破れとクォーク物質について、低エネルギー有効模型に基づく解析も進めており、中間子 9 重項の振る舞いと正則化依存性を解明している。

従来成果を進展させ、相対論的に拡張した非平衡熱場の量子論と自発的対称性の破れを伴う素粒子模型を結びつける事で、新しい高エネルギー臨界現象に迫るという着想に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、非平衡熱場の量子論を素粒子理論に適用し、高温、高密度、強曲率といった極限状況にある不安定系に応用することで、自発的対称性の破れに伴う新しい高エネルギー臨界現象を発見することである。自発的に対称性が破れる系で、分布関数と基底状態の時間発展を解析する処方確立するのが、本研究前半の目標である。ゲージ対称性の導入、非一様な空間への理論の拡張を実施し、基礎的な理論を完成させる。本研究後半の目標は、非平衡熱場の量子論に基づく自発的対称性の破れの解析処方を応用し、新しい高エネルギー臨界現象を解明することである。特に、観測の進展が期待される宇宙物理の諸問題他について可能な限り多様な現象を扱う事を目標にする。

3. 研究の方法

自発的に対称性の破れる系における相対論的非平衡熱場の量子論を構築し、高エネルギー臨界現象の解析に必要な理論と計算方法を確立することから研究をスタートする。また、非一様な空間への理論の拡張に着手す

る。構築した基礎理論に基づいて、素粒子模型の諸問題について研究を進める。研究協力者として、宇宙物理の国際的な専門家である S. D. Odintsov 教授他とも議論し分野を越えて新しい臨界現象を探っていく。同時に基礎理論の拡張を行い、適用可能な系を広げる。

本研究計画開始後、宇宙背景輻射の揺らぎの観測について大きな進展があったことから、これまでの研究成果をアインシュタイン方程式と連立させて解析することで時空の発展への影響について探ることを優先し研究を進めることとした。特に基礎的な研究については、関連研究を進めている名古屋大の研究グループと定期的に研究情報を交換する事で、研究の確実な進展を目指した。

4. 研究成果

(1) 自発的に対称性の破れる系の基礎理論

4点相互作用模型

平衡状態から外れた古典解近傍でのスカラー場の量子論の構成と計算方法の開発を進めた。ヒグス模型で用いられる 4 次関数で記述されるポテンシャルでの運動方程式の解はヤコビの楕円関数を用いて表すことができる。

本論では、運動方程式の古典解を 3 つの場合に分類し、有効ポテンシャルの最小値の周りで振動する解を求め、この解の周りでスカラー場を展開することで、ファインマン規則に対応する計算則を構成した。さらに、構成した規則に従って、真空から多粒子状態が生成される確率が有限の値を持つことと初期状態依存性を示した。以上、平衡状態から大きく外れた現象を記述する枠組みの構築を進めた。(雑誌論文 4)

3次元強結合ゲージ理論

非摂動効果を近似的に扱うことから現れるゲージ依存性について明らかにすることを目的に研究を実施した。

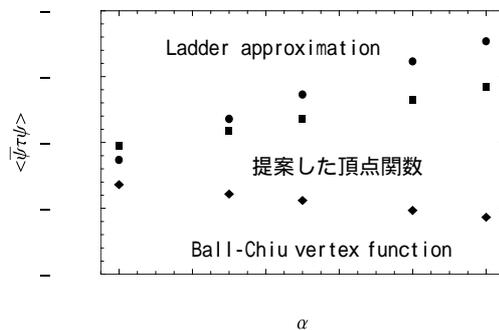


図1 オーダーパラメータのゲージ依存性

3次元では2つの型のカイラル対称性を定義することができる。トポロジカルな効果である Chern-Simons (CS) 項を考慮した 3次元強結合可換ゲージ理論について、2つのカイラル対称性のオー

ダーパラメータの CS 項、及びゲージ依存性を、はしご近似、及び頂点関数を仮定して求めた。ランダウゲージを取ることでゲージ依存性が抑えられることを明らかにし(図1)、強結合ゲージ理論解析の処方提案した。(雑誌論文 9, 11)

非一様な空間

従来の研究で扱っていた有限サイズ空間における自発的対称性の破れの相構造が、非一様なフェルミ場を考慮することで大きな変更を受ける場合があるとの指摘を受け、量子論的な真空のトポロジカルな性質について研究した。

ゲージ相互作用する4体フェルミ相互作用模型でカイラル対称性を持つ相におけるフェルミ粒子に課した有限サイズ方向の境界条件と有効ポテンシャルの関係を明らかにし(図2)、反周期的境界条件の場合を除き、フェルミ粒子の場の配位が空間依存性を持つことでエネルギーが下がることを示した。

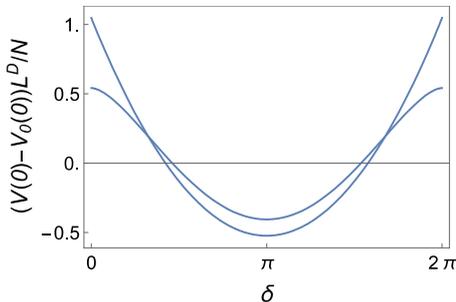


図2 有効ポテンシャルの境界条件依存性

南部、ヨナ・ラシニオ (NJL) 模型

中間子の物理をQCDの低エネルギー理論であるNJL模型で記述する。4体フェルミ相互作用は4次元で繰り込み不可能であり、結果は正則化に依存する。グルオン伝搬関数を単純に無視すると考えると2次元の理論になり、次元正則化を採用するのが自然である。高エネルギーでは4体フェルミ相互作用が使えないと考えるとカットオフ正則化を採用するのが自然である。

ここでは、中間子の質量、崩壊定数と2光子崩壊の幅等をインプットとして正則化毎の模型のパラメータを決め、理論の相構造の正則化依存性を明らかにした。(雑誌論文 3,8)

(2) インフレーション期の揺らぎの成長

4理論

宇宙背景輻射の揺らぎに見られる非平衡現象について、曲率相互作用と4点相互作用するスカラー場の理論で、量子補正の高次効果、くりこみ群による補正が揺らぎのスペクトル指数、スカラー揺らぎとテンソル揺らぎの比に与える影

響を明らかにした。スカラー場の配意がゆっくりと変動するスローロール近似の下、有効ポテンシャルを計算し、曲率相互作用結合と4点相互作用結合に対するリアプノフ安定の条件を求め(図3)、また、2次の量子補正がくりこみ群による補正よりも大きな寄与を持つこと等を明らかにした。(雑誌論文 7,10)

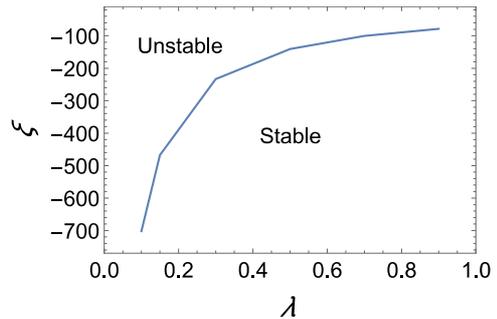


図3 リアプノフ安定の条件

NJL インフレーション

フェルミ場と反フェルミ場からなる複合スカラー場に支配されたインフレーション期の宇宙の可能性は、これまでにほとんど議論されていなかった。本研究では、ゲージ相互作用するNJL模型が支配するという仮定の下に、インフレーション模型を構築した。スローロールする解が存在することを示し(図4)、生成される宇宙背景輻射の揺らぎを解析することで、観測と矛盾しない新しいインフレーション模型を構築することに成功した。

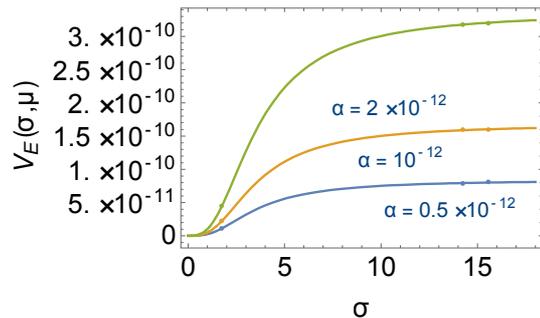


図4 ポテンシャルのゲージ相互作用依存性

宇宙背景輻射の揺らぎを系統的に調べ、NJL インフレーション模型が曲率の2次の項を導入したスタロピンスキー模型、もしくはⁿ相互作用するスカラー場理論と一致するアトラクター構造を見つけた。また、ゲージ相互作用が小さい極限で $\alpha=2$ のアルファアトラクター模型に一致するというゲージ相互作用するNJL模型に特有なアトラクター構造を発見した。(雑誌論文 1,2,5,6)

複合場の模型では、多数の場が宇宙のエネルギー密度に寄与する場合は考え

られる。より一般的な場合も含めた系統的解析が今後の大きな課題である。

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 11件)

T. Inagaki, S. D. Odintsov and H. Sakamoto, "An alternative attractor in gauged NJL inflation," EPL 118, no. 2, 29001 (2017), 査読有
Doi:10.1209/0295-5075/118/29001

T. Inagaki, S. D. Odintsov and H. Sakamoto, "Inflation from the finite scale gauged Nambu-Jona-Lasinio model," Nucl. Phys. B919, 297 (2017), 査読有
Doi:10.1016/j.nuclphysb.2017.03.024

H. Kohyama, D. Kimura and T. Inagaki, "Parameter fitting in three-flavor Nambu-Jona-Lasinio model with various regularizations," Nucl. Phys. B 906, 524 (2016), 査読有
Doi:10.1016/j.nuclphysb.2016.03.015

Y. Kitadono and T. Inagaki, "Elliptically Oscillating Classical Solution in Higgs Potential and the Effects on Vacuum Transitions," Phys. Rev. D93, No. 9, 093014 (2016), 査読有
Doi:10.1103/PhysRevD.93.093014

T. Inagaki, "Inflationary Expanding Universe by a Composite Scalar Field," GESJ: PHYSICS Vol. 1, No.15, 89-91 (2016), 査読有

T. Inagaki, S. D. Odintsov and H. Sakamoto, "Gauged Nambu-Jona-Lasinio inflation," Astrophys. Space Sci. 360, No. 2, 67 (2015), 査読有
Doi:10.1007/s10509-015-2584-0

T. Inagaki, R. Nakanishi and S. D. Odintsov, "Non-Minimal Two-Loop Inflation," Phys. Lett. B745, 105 (2015), 査読有
Doi:10.1016/j.physletb.2015.04.038

H. Kohyama, D. Kimura and T. Inagaki, "Regularization dependence on phase diagram in Nambu-Jona-Lasinio model," Nucl. Phys. B896, 682 (2015), 査読

有

Doi:10.1016/j.nuclphysb.2015.05.015

Y. Hoshino, T. Inagaki and Y. Mizutani, "Gauge-covariant solution for the Schwinger-Dyson equation in 3D QED with a Chern-Simons term," PTEP 2015, No. 2, 023B03 (2015), 査読有
Doi:10.1093/ptep/ptu182

T. Inagaki, R. Nakanishi and S. D. Odintsov, "Inflationary parameters in renormalization group improved φ^4 theory," Astrophys. Space Sci. 354, No. 2, 2108 (2014), 査読有
Doi:10.1007/s10509-014-2108-3

T. Inagaki, "Schwinger-Dyson analysis of 1+2 dimensional QED," Proceedings of the International Conference "Quantum Field Theory and Gravity 2014," Eds. I. L. Buchbinder and V. Y. Epp, Tomsk State Pedagogical University Bulletin, Vol. 12, 100-102 (2014), 査読無

[学会発表](計 18件)

坂本弘樹, 稲垣知宏, Sergei D. Odintsov, "南部・ヨナラシーニョインフレーションにおける複数のスカラーモードの曲率揺らぎへの寄与"、日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学、2018年3月

T. Inagaki, "Inflationary Cosmology in Four-fermion Interaction Model," Mini-Workshop on "Gravitation and Cosmology," Rhodes Island, Greece, July, 2017

T. Inagaki, "Inflationary Cosmology in the Gauged Nambu-Jona-Lasinio Model," International Conference "Modern Trends in Physics," Baku State University (BSU), Baku, Azerbaijan, April, 2017

坂本弘樹, 稲垣知宏, Sergei D. Odintsov, "Gauged Nambu-Jona-Lasinio 模型におけるCMB揺らぎのアトラクター構造"、日本物理学会第72回年次大会、大阪大学、2017年3月

坂本弘樹, 稲垣知宏, Sergei D. Odintsov, "有限な複合スケールを持つGauged Nambu-Jona-Lasinio 模型によるインフレーション"、日本物理学

会 2016 年秋季大会、宮崎大学、2016 年 9 月

T. Inagaki, “Inflation Induced by Composite Scalar Field,” *Cosmology and the Quantum Vacuum*, Benasque, Spain, September, 2016

稲垣知宏, 複合スカラー場によるインフレーション”, 松江素粒子物理学研究会、島根大学、2016 年 3 月

木村大自, 幸山浩章, 稲垣知宏, “3 フレーバー-NJL 模型を用いた相構造の正則化依存性”, 日本物理学会第 71 回年次大会、東北学院大学、2016 年 3 月

坂本弘樹, 稲垣知宏, Sergei D. Odintsov, “ゲージ相互作用する南部・ヨナラシーニヨ模型でのインフレーション”, 日本物理学会第 71 回年次大会、東北学院大学、2016 年 3 月

T. Inagaki, “Inflationary Expanding Universe by a Composite Scalar Field,” *International Conference “Modern Trends in Physics” devoted to the 10year celebration of Institute for Physical Problems (IPP) of Baku State University (BSU)*, Baku, Azerbaijan, December, 2015

T. Inagaki, “CMB Fluctuations from Gauged Nambu-Jona-Lasinio Inflation,” *Particle Cosmology and beyond 2015*, Kanazawa, Japan, November, 2015

木村大自, 幸山浩章, 稲垣知宏, “3 フレーバー-NJL 模型における相構造の正則化依存性”, 日本物理学会秋季大会、大阪市立大学、2015 年 9 月

稲垣知宏, “4 体フェルミ相互作用模型の正則化と有限温度密度相構造”, 基研研究会「熱場の量子論とその応用」, 京都大学基礎物理学研究所、2015 年 9 月

木村大自, 幸山浩章, 稲垣知宏, “異なる正則化による NJL 模型の相構造”, 日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学、2015 年 3 月

中西亮太, 稲垣知宏, “2 ループの量子補正を加えた $d=4$ 理論におけるインフレーション・パラメータ”, 日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学、2015 年 3 月

稲垣知宏, “4 体フェルミ相互作用模型と正則化”, 第 2 回 松江現象論研究会、島根県民会館、2014 年 11 月

中西亮太, 稲垣知宏, “繰り込み群で改良した $d=4$ 理論における初期揺らぎ”, 日本物理学会 2014 年秋季大会、佐賀大学、2014 年 9 月

T. Inagaki, “Schwinger-Dyson analysis of 1+2 dimensional QED,” *Quantum Field Theory and Gravity (QFTG 2014)*, Tomsk, Russia, August, 2014

〔その他〕
ホームページ等
<http://home.hiroshima-u.ac.jp/inagaki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

稲垣 知宏 (Tomohiro Inagaki)

広島大学・

情報メディア教育研究センター・教授

研究者番号：80301307

(4) 研究協力者

Sergei D. Odintsov

木村 大自 (Daiji Kimura)

北殿 義雄 (Yoshio Kitadono)

坂本 弘樹 (Hiroki Sakamoto)

中西 亮太 (Ryota Nakanishi)