

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2006～2009

課題番号：18540276

研究課題名 (和文) 極限状況下にあるゲージ理論における対称性の動的破れと時空構造の謎

研究課題名 (英文) Dynamical Symmetry Breaking of Gauge Theories in Critical Situations and Space-time Structure

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・准教授

研究者番号：80301307

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：素粒子論、ゲージ場の量子論、動的対称性の破れ、カイラル対称性

#### 1. 研究計画の概要

本研究計画は、ゲージ理論における動的対称性の破れに対する有限温度・密度相構造と臨界現象を系統的に解析し、得られた臨界現象の下での時空構造の振る舞いを解明することを目的とする。具体的な研究計画は、以下の4つのテーマに絞って進めていく。

(1) 極限状況下でのゲージ理論の相構造解析  
ゲージ理論の低エネルギー有効理論である4体フェルミ相互作用モデルとこれを拡張したモデルについて、有限温度、密度、曲率、及び時空のトポロジーが動的対称性の破れに与える効果について系統的な解析を行う。

(2) 極限状況下でのストレステンソルの計算  
動的対称性の破れが時空の構造に与える影響を調べるには、アインシュタイン方程式の右辺に現れるストレステンソルを求める必要がある。本研究では、特に(1)で調べたモデルについて、ストレステンソルを計算する。

(3) アインシュタイン方程式の解析

アインシュタイン方程式を数値的に解析し、動的対称性の破れが時空の構造に与える影響を調べる。対称性の高い時空、及び静的な高密度星から解析を進めていき、動的対称性の破れが引き起こす現象を解明する。

(4) 非平衡過程取り扱い処方の開発

宇宙の進化を追う上で重要になる非平衡過程について、非平衡 Thermo-Field Dynamics による方法を相対論的な系に適用し、その解析処方を開発する。

#### 2. 研究の進捗状況

これまでの研究で、強結合ゲージ理論の低エネルギー有効理論についての相構造解析、動的対称性の破れが宇宙、及び星の構造に及ぼ

す影響の解析、及び非平衡 Thermo-Field Dynamics を相対論的な場の理論へ適用する方法を開発した。具体的な研究実績としては、(1) 極限状況下でのゲージ理論の相構造解析 QCD の低エネルギー有効理論として最も利用されている4体フェルミ相互作用モデルである NJL モデルに、クォーク対凝縮を記述する相互作用、高次元の演算子である8体フェルミ相互作用、ポリヤコフループの寄与等を加えたモデルについて、温度、密度、曲率中での動的対称性の破れの相構造を解析し、有効理論に特有な発散の処理方法に注目することで、正則化依存性を明らかにした。

(2) 極限状況下でのストレステンソルの計算  
4体フェルミ相互作用モデルについて有限温度、密度、及びコンパクトな時空中でのストレステンソルを求めた。特に、高密度系でのストレステンソルの計算で正則化依存性が大きくなることを示した。

(3) アインシュタイン方程式の解析

(2)の研究で得られた結果をアインシュタイン方程式に代入することで、理論の相構造と静的宇宙解の関係について数値的に研究した。この結果、動的対称性の破れにより宇宙のスケールが増大すること等を明らかにした。また、拡張した NJL モデルについて、静的で球対称な星に対するアインシュタイン方程式を解析し、カラー超伝導状態にある星に対する正則化依存性を明らかにした。

(4) 非平衡過程取り扱い処方の開発

非平衡 Thermo Field Dynamics(TFD)による相対論的場の量子論における非平衡過程の取り扱い方法を開発した。得られた成果は、湯川相互作用モデル、 $\phi^4$  相互作用モデルに適用し、数値解析を実施している。

### 3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している

研究計画の概要で述べた、(1)、及び(2) 極限状況下でのゲージ理論の相構造とストレステンソルの解析については、当初の計画にほぼ従った研究を進めることができ、研究成果の発表も行ってきた。これらについては、今後、模型の拡張等により、当初、計画していたゲージ理論により近い模型へと解析を進め、確実な成果に結びつけていけると考えている。(3) アインシュタイン方程式の解析については高密度星の解析で研究成果を上げることができた。ただし、宇宙論の問題解決の可能性を検討するためには、さらに時空の進化について研究を進める必要がある。これについては、発散の処理方法から来ていると予想される問題が残っており、これの解決を急いでいる。(4) 非平衡過程の取り扱いについては、単純な初期条件に限って解析処方を確立することができおり、ほぼ当初の計画に沿って研究を進展させることができている。

### 4. 今後の研究の推進方策

本研究計画の4つのテーマそれぞれについて、以下の方針で研究を推進する。

(1) 極限状況下でのゲージ理論の相構造解析  
これまでの解析方法で用いた有効理論と  $1/N$  展開について見直すことで、より適用範囲の広い理論における相構造の解析を行い、従来の解析で無視されてきた効果の影響を明らかにしていく。

(2) 極限状況下でのストレステンソルの計算  
一般化した有効理論におけるストレステンソルの解析を進め、格子計算等、他の処方とも比較することで、理論の適用範囲とその正当性について明らかにする。

(3) アインシュタイン方程式の解析

現段階では十分に解明できていない時空の進化に対する動的対称性の破れの影響について、発散の処理方法について見直すことで数値解析上の問題を克服し、定曲率時空におけるアインシュタイン方程式の解の振る舞いを明らかにする。

(4) 非平衡過程取り扱い処方の開発

解析アルゴリズムと系のパラメータの見直しにより、現在実施可能な単純な初期条件に対する場の配位の時間変化に関する解析を、より一般的な初期条件に拡張していく。

### 5. 代表的な研究成果

(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 6 件)

- ① T.Inagaki, D.Kimura and A.Kvinikhidze,  $\pi$  and  $\sigma$  Mesons at

Finite Temperature and Density in the NJL Model with Dimensional Regularization, Phys. Rev., 有, D77, 2008, 116004

- ② T. Fujihara, T. Inagaki, D. Kimura and A. Kvinikhidze, Reconsideration of the 2-flavor NJL model with dimensional regularization at finite temperature and density, Prog. Theor. Phys. Suppl., 有, 174, 2008, 72-75
- ③ T. Fujihara, T. Inagaki, D. Kimura, Influence of QED corrections on the orientation of chiral symmetry breaking in the NJL model, Prog. Theor. Phys., 有, 117, 2007, 139-160
- ④ T.Inagaki, Radiative symmetry breaking and dynamical origin of cosmological constant in  $\phi^4$  theory with non-linear curvature coupling, J. Phys. A: Math. Gen., 有, 39, 2006, 6455-6462
- ⑤ T.Hattori, M.Hayashi, T.Inagaki, Y.Kitadono, Thermal and curvature effects to spontaneous symmetry breaking in  $\phi^4$  theory, J. Phys. A: Math. Gen., 有, 39, 2006, 6441-6444

[学会発表] (計 25 件)

- ① T.Inagaki, Topological and curvature effects to dynamical symmetry breaking in multi-fermion interaction models, The Directions of Modern Cosmology, 2009年3月2日、Barcelona, Spain
- ② T.Inagaki, Dimensional Regularized NJL and Extended NJL Model, Summer Institute 2008, 2008年8月15日、Chi-Tou, Taiwan
- ③ T.Inagaki, Reconsideration of the 2-flavor NJL model with dimensional regularization at finite temperature and density, YITP International Symposium Fundamental Problems in Hot and/or Dense QCD, 2008年3月3日、Kyoto, Japan
- ④ T.Inagaki, Static solution of Einstein equations in NJL model at finite T and  $\mu$ , The International School/Seminar Quantum Field Theory and Gravity, 2007年7月5日、Tomsk, Russia
- ⑤ T.Inagaki, Color Superconducting Phase and Radius of Dense Star in Dimensional Regularized Extended NJL Model, Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities, 2006年11月1日、Hawaii, USA