

平成22年 5月15日現在

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

研究成果の概要（和文）：高温、高密度、強曲率、もしくはコンパクトな時空といった極限状況下で、素粒子を記述する基本概念であるゲージ理論の対称性が動的に破れる可能性と、それが時空の構造にどのような影響を与えるかについて研究を進めた。特に、有効理論に対する次元正則化適用の可能性を指摘し、理論の相構造、状態方程式と高密度星の構造について、正則化依存性の大きな現象を見出すことで、有効理論適用が正当な状況を検証するための予想を与えた。

研究成果の概要（英文）：Dynamical symmetry breaking in the gauge theory and its contribution to the space-time structure have been investigated under extreme circumstance, i.e. high temperature, high density, strong curvature and compact space-time. I have pointed out the usefulness of the dimensional regularization for an effective theory and found phenomena with a large regularization dependences. It gives us some predictions to judge the suitable circumstance to apply the effective theory.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	800,000	0	800,000
2007年度	800,000	240,000	1040,000
2008年度	900,000	270,000	1170,000
2009年度	900,000	270,000	1170,000
年度			
総計	3400,000	780,000	4180,000

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. 研究開始当初の背景

標準模型におけるゲージ対称性の自発的破れは質量の起源を説明する概念的基礎を与える。また、量子色力学におけるカイラル対称性の動的破れはハドロンの特長と相互作用を理解する上で本質的な役割を果たす。これら素粒子論で議論される対称性の

破れはアインシュタイン方程式の右辺を通じて時空の発展を決める。極限状況下にあるゲージ理論が示す複雑な相構造と臨界現象は、現在の宇宙の加速膨張と暗黒エネルギーの起源、インフレーション期にある初期宇宙の進化、コンパクト化された余次元時空といった時空構造の謎を解明する手がかりを

与える可能性を持つのである。

曲がった時空でのストレステンソルの計算とアインシュタイン方程式の解析は、1970年代に基本的な計算処方確立し盛んに調べられた。ここ数年間の発展としては、曲率とスカラー場の相互作用の拡張、ゴースト場の導入、時空発展によるバックリアクションの解析といった研究が挙げられ、当時、防衛大、バルセロナ大の研究グループによりさまざまな発展の可能性が探られつつあった。これらの研究に、対称性の動的破れという概念を取り入れることで、当該分野の発展を促すことが期待できる。

強曲率時空におけるゲージ理論の動的対称性の破れの研究は、1990年代に系統的に調べられた。当時、我々が行った研究は動的対称性の破れのモデルに対する曲率導入とくりこみ不可能な理論の次元正則化による取り扱い処方の開発という2つの点で独創的、先駆的位置づけにあった。これらの研究はレビュー論文にまとめており、広く引用されている。2000年代に入ってから発展としては、国内では広島大、京都大、海外ではカナダ、ロシア、スペインを中心に、標準模型を超える理論、より広範囲の極限状況を扱う形への拡張がなされてきた。

素粒子理論の対称性の破れが時空の進化を引き起こす過程を扱うには、素粒子理論に対しても非平衡過程を考慮する必要がある。非平衡熱場の量子論には、カノニカル量子化、経路積分、及び確率過程量子化に従う処方が研究されており、筑波大、大阪市立大、早稲田大といった日本の研究グループの寄与が大きい分野でもある。相対論的な系における相転移現象については、重イオン衝突実験結果の解析等の需要も高まっており、研究が着手されつつあるが、萌芽的な状況であった。

2. 研究の目的

本研究計画では、ゲージ理論の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。これにより、高密度状態も含めた有限温度・密度中での対称性の動的破れの検証可能性を時空構造の発展の中で探る。

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に迫るには、いろいろな極限状況を仮定しその下で、理論の相構造解析、ストレステンソルの計算、アインシュタイン方程式の解析を実施しなくてはならない。研究代表者は、本研究計画実施に先駆けて、対称性の動的破れに関連して、超対称性の導入、強磁場の導入、余次元時空の導入、非線形曲率相互作用の導入、補助質量の方法の開発、Schwinger-Dyson 方程式の有限温度、余次元時空への拡張、有限温度、

密度中で磁場について近似の無い2点関数の導出等を行っていた。

本研究では、従来の研究で開発、改良を進めた処方により可能な範囲を主なターゲットとして実施する。特に、高密度状態について4体フェルミ相互作用モデルを拡張しつつ解析を進めていき、より基本理論に基づいた形でゲージ理論における動的対称性の破れを解析し、相構造の系統的理解と満足できる物理的説明を与える。解析結果については宇宙論的諸問題を説明する可能性を探る。

基本的に平衡系にある状態を仮定するが、時空進化までを議論するには対称性の破れの時間発展を含めた解析を急がなくてはならない。このため、状態変化を伴う非平衡過程における動的対称性の破れの解析処方の開発を目的に、非平衡熱場の量子論の相対論的な拡張に関する基礎的な研究についても、本研究の中で実施していく。

3. 研究の方法

極限状況下で動的対称性の破れを引き起こす臨界現象を詳細に分析し、特に時空構造の諸問題解決の可能性を探った。並行して、相構造解析に用いる近似を改良し適用範囲を拡張する試み、相構造の解析において非平衡過程までを扱う試みに取り組み、当該分野の発展を促す研究を目指した。具体的には、以下の3つのテーマに絞って、研究を進めた。

(1) 極限状況下でのゲージ理論の相構造

高温、高密度、強曲率、コンパクト時空といった極限状況で強結合ゲージ理論の相構造を有効ポテンシャル、もしくはギャップ方程式を解析することで調べた。強結合ゲージ理論の基底状態の解析は、摂動論に寄らない解析が必要であるが、本研究では有効理論を用いることで相構造を調べた。特に、有効理論の拡張と正則化の影響に注目し、理論の改良を図った。これにより、理論の適用範囲を拡張し、従来よりも広いパラメータ領域で系統的に相構造の解析を進めた。

(2) アインシュタイン方程式の解析

まず、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について、動的に対称性の破れた基底状態の下での期待値を計算した。このようなストレステンソルに対して、アインシュタイン方程式の一般解を導くことは困難である。本研究では、一様、等方時空、静的、球対称時空等、時空に対称性を仮定した上で、アインシュタイン方程式の数値解析を進めていき、物理的に可能な時空構造の解明を図った。また、時空の構造変化が、素粒子モデルの基底状態に及ぼすバックリアクションの効果を考慮した解析処方の開発を進めた。

(3) 非平衡過程の解析処方の開発

基底状態の変化を伴う系の時間発展を記述する非平衡熱場の量子論の一般論構築に向け、非平衡 Thermo-Field Dynamics (NTFD) による方法を相対論的な系に適用することで、分布関数と基底状態の時間発展を計算する処方の開発を進めた。基底状態の時間発展の解析については、熱平衡状態への緩和、先行する解析結果との比較等を通じて計算処方の正当性を検討した。

4. 研究成果

有限温度、密度、曲率、及びコンパクト時空といった極限状況下での強結合ゲージ理論の相構造を有効理論の方法に基づいて系統的に解明した。さらに、物質場のストレストensorを解析し、正則化依存性とその特徴を明らかにした。これをアインシュタイン方程式に代入することで、動的対称性の破れが宇宙、及び星の構造に及ぼす影響を明らかにした。また、非平衡 Thermo-Field Dynamics を相対論的な場の理論へ適用するための基本的な処方を開発し、時空の構造変化を場の理論に基づいて議論する基礎を築いた。

(1) 極限状況下でのゲージ理論の相構造

強結合ゲージ理論の低エネルギー有効理論としては動的対称性の破れと中間子の物理をよく記述する Nambu-Jona-Lasinio (NJL) 模型が利用されることが多い。フェルミ粒子間の相互作用を4次元で繰りこみ不可能な4体フェルミ相互作用で記述するために、理論は正則化の処方に依存する。よく用いられるのがフェルミ粒子の内線運動量をカットオフスケールで切断するカットオフ正則化である。カットオフスケールは中間子の質量、崩壊定数を再現するように決める。導入されたカットオフは有効理論の適用限界を表すと考えられるが、QCD の低エネルギー有効理論として考えるとカットオフスケールは600~700MeV程度の値であり、 η' 中間子の質量よりも小さく、strange クォークの寄与が大きく効いているような系の記述には向いていない。strange クォークの寄与を考慮しなくても、化学ポテンシャルが大きくなるとフェルミ面がカットオフスケールを超えることになり、フェルミ運動量を持つ粒子からの寄与を取りこぼしてしまう。また、NJL 模型で考慮している4体フェルミ相互作用では記述できない相互作用が重要になる場合がある。

① ダイクォーク相互作用とカラー超伝導

QCD の低温、高密度状況ではカラー超伝導相の可能性が指摘されているが、これを記述するにはインスタントン効果が主要な寄与をするダイクォークペア間の引力相互

作用を考慮した拡張された4体フェルミ相互作用模型が Ebert 他によって提唱されている。図1は、up、down の2つの軽いフレーバー系での拡張された4体フェルミ相互作用模型の温度(T)、化学ポテンシャル(μ)平面での相構造である。 σ の期待値がカイラル凝縮を、 Δ の期待値がカラー超伝導相(2SC phase)の出現を表している。up、down クォークの質量を0とした場合と4.5MeVとした場合について、1次相転移、2次相転移、クロスオーバーのそれぞれを青、赤、紫のラインで描いており、黄色のラインは有効ポテンシャルの2番目の極小値を示している。カラー超伝導にはフェルミ面近傍のクォークが主に寄与している。化学ポテンシャル(μ)がおよそ600MeVを超えた付近でこの寄与をカットオフしてしまい、以降、化学ポテンシャルを大きくするに連れ、カラー超伝導相は消えていくが、理論の適用限界である。

カラー超伝導相の解析には非摂動効果が重要であり、理論を拡張する必要がある。候補の1つはカットオフを導入しない正則化を用いることである。本研究では次元正則化に着目した。次元正則化ではフェルミ粒子の内線運動量の時空次元を4からずらすことで理論を正則化する。時空の次元と繰りこみ

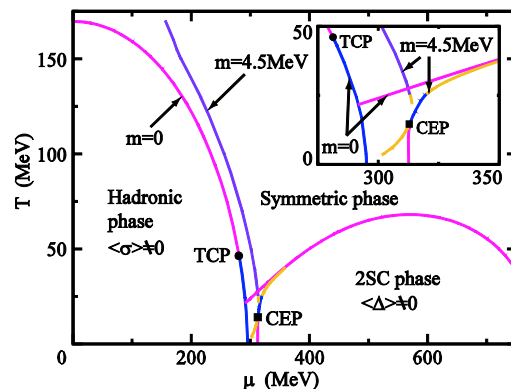


図1：相構造 (カットオフ正則化)

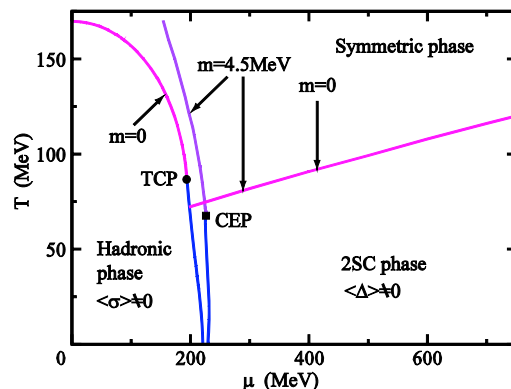


図2：相構造 (次元正則化)

スケールを現象論的に決める。次元正則化で理論を定義し直して描いたのが図2である。化学ポテンシャルを大きくするにつれカラー超伝導相が消えていく振る舞いは無くなっている。また、1次相転移の消える tricritical point (TCP)、あるいは critical end point (CEP) が高温側に移動する等、化学ポテンシャルが比較的小さな場合においても有効理論の正則化依存性は小さくない。

② 高次元演算子の寄与

初期宇宙では、温度、密度以外に曲率、コンパクト時空が動的対称性の破れに小さくない寄与を持つ。このような極限状況において4体フェルミ相互作用モデルによる相構造の系統的な解析が行われているが、より高次元の演算子による寄与も重要である可能性がある。本研究ではm体フェルミ相互作用するモデルについて、時空のサイズと曲率が相構造に及ぼす影響を系統的に調べた。数値解析は、4体、及び8体フェルミ相互作用を導入したモデルについて、カットオフ正則化と次元正則化を進めたが、ここでは次元正則化による結果を示す。

コンパクト時空の効果については1次元方向を長さLのS¹にコンパクト化し、フェルミ粒子に対して周期的、及び反周期的境界

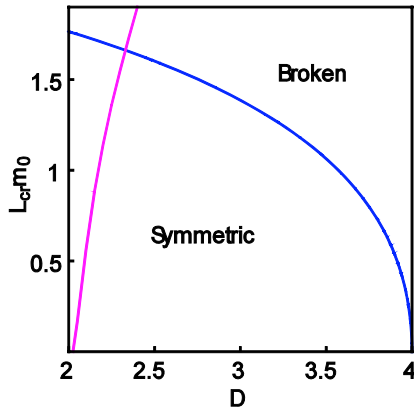


図3：有限サイズ効果（反周期的境界）

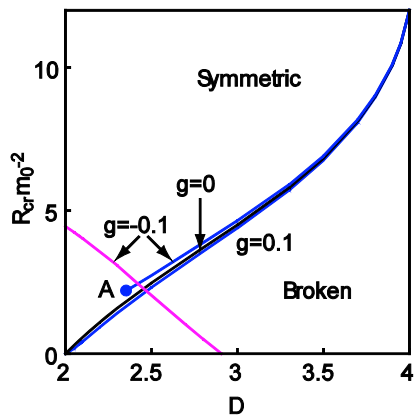


図4：曲率効果

条件を課して、Mikowski 時空でのカイラル凝縮が有限サイズ効果でどのように変化するかを調べた。反周期的境界条件の場合には有限サイズ効果がカイラル凝縮を弱めるためにカイラル対称性が回復する。周期的境界条件で有限サイズ効果がカイラル凝縮を強めるために新たな相は現れない。反周期的境界条件の場合の相構造を図3に示す。m₀は繰りこみスケールである。高エネルギー領域で実現する強結合ゲージ理論の有効理論を考える場合、次元を現象論的に決めることができないため、時空次元の関数として臨界サイズをプロットする。青いラインが4体フェルミ相互作用モデルの場合の2次のカイラル相転移点である。8体フェルミ相互作用導入後もこのラインは変化しないが、正符号の結合定数を持つ8体フェルミ相互作用を導入した場合、新たに赤いラインで示す1次相転移が生じ、低次元側で対称性の回復が遅れる。

曲率の効果に対して同様の解析を実施し臨界曲率(R_{cr})を示したのが図4である。曲率を強くすると1次相転移でカイラル対称性が回復する。gは8体フェルミ相互作用の強さを表し、gが負の場合に、赤いラインが生じ低次元側で対称性の回復が遅れる。

③ 電磁相互作用による補正

上記の解析では無視していた電磁相互作用は、中間子の物理に対して非自明な効果を持つ可能性がある。図5に示すように、upとdownクォークのカレント質量が軽くなると、低温でパイオンが凝縮する相が現れ、P及びCPが動的に破れる可能性があることを、カットオフ正則化した理論で指摘した。

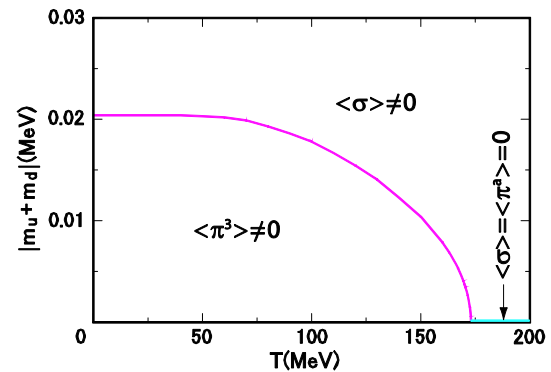


図5：π凝縮（カットオフ正則化）

(2) アインシュタイン方程式の解析

動的に対称性の破れる4体フェルミ相互作用モデル、もしくは、自発的に対称性の破れるスカラーφ⁴理論に対し、一様等方性を仮定したFriedmann-Robertson-Walker (FRW)時空、空間方向にS^{D-1}という高い対称性を課したアインシュタイン宇宙、及び、静的球対称時空の下でアインシュタイン方程式を数

値解析した。

① 高密度星の質量と半径

拡張した NJL 模型について、図 1、2 に示した基底状態の下で、ストレステンソルを計算し、静的球対称星に対する重力と圧力の釣り合いを表す Tolman-Oppenheimer-Volkov (TOV) 方程式に代入し、カラー超伝導状態にある高密度星として可能な半径と質量を求め、その正則化依存性を明らかにした。

図 6 は縦軸が圧力、横軸がエネルギー密度である。次元正則化により定義された理論は高密度側でより大きな圧力で星を支えることができるが、カットオフ正則化で定義された理論の方が緩やかな勾配を持ち低密度側で圧力が大きくなる。これを TOV 方程式に代入した結果が図 7 である。ここでの解析は星全体が電荷、カラー電荷に対して中性である等の条件を課していないため、具体的な数値は参考程度の意味しかないが、各正則化で実現可能な星の大きさに大きな差があり、このような星を観測することで、理論の有効性を検証できることが判明した。

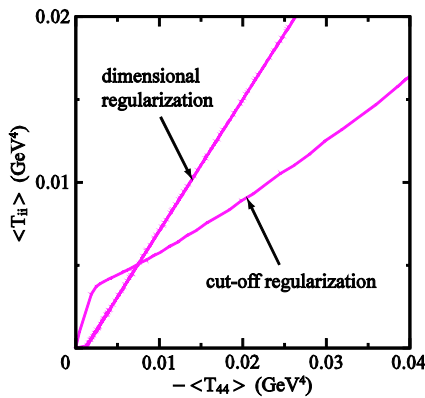


図 6 : 状態方程式

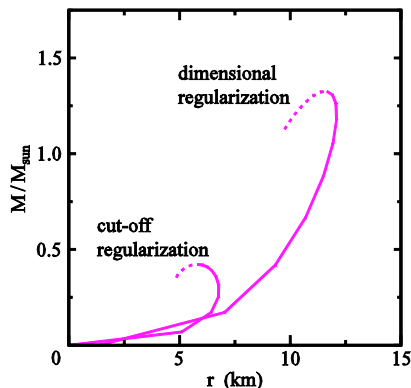


図 7 : クォーク星の質量と半径

② バックリアクション

基底状態の変化が時空構造に影響を与えるのと同時に、時空構造の変化が基底状態に影

響する。高密度星の解析においては、フェルミ運動量に対して曲率が僅かであり、その影響は無視できたが、宇宙初期においてはこのバックリアクションを無視できない状況が考えられる。本研究では、M. B. Altaie 教授他によるバックリアクションを取り入れた有限温度、強曲率状態でのアインシュタイン方程式の解析を 4 体フェルミ相互作用模型に適用し、アインシュタイン宇宙における動的対称性の影響を明らかにした。

また、時空の時間変化について議論するため、自発的対称性の破れの単純な模型であるスカラー ϕ^4 理論に対して、暗黒エネルギー問題と宇宙定数問題解決の可能性から注目されている、非線形曲率結合を取り入れた理論を基礎に、有効作用を計算し実現可能な解を示した。また、考えて模型の範囲内で宇宙定数問題を解決する解の存在を示した。

(3) 非平衡過程の解析処方の開発

時空の発展を調べる上で、基底状態の時間変化を取り込むことが重要であるが、上記では、時間発展の寄与を無視するか、Schrödinger 方程式にメトリックの時間依存性を導入することで量子力学的な取り扱いを行った。基底状態について輻射補正まで考慮して議論するには相対論的場の量子論での取り扱いが必要であるが、場の量子論に基底状態の時間空間変化を導入するには、理論の枠組みを拡張する必要がある。

本研究では、カノニカルな量子化による非平衡 Thermo-Field Dynamics (NTFD) について、相互作用する相対論的スカラー場、及びフェルミ場の系の解析処方を開発した。NTFD では自由度を倍加して熱的自由度を取り込む。このため、各種相関関数は 2×2 の行列で表される。ここでは、2 点相関関数に対する Schwinger-Dyson 方程式の非対角成分に一樣等方性を仮定した場合の熱的条件を課すことにより、場の分布関数の時間発展方程式を得た。また、湯川型相互作用をする理論について数値解析を実施し、スカラー場とフェルミ場の分布の熱平衡状態に向かう時間発展を記述できていることを示せたが、基底状態の変化と時間発展する時空への適用については今後の課題である。

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 9 件)

- ① M. Hayashi and T. Inagaki, Curvature and topological effects on dynamical symmetry breaking in a four- and eight-fermion interaction model, Int. J. Mod. Phys. A、有、掲載決定

- ② M. Hayashi, T. Inagaki, H. Takata、Phase structure of multifermion interaction models in weakly curved space-time、Int. J. Mod. Phys.、有、A24、2009、5363-5379
- ③ T. Fujihara, D. Kimura, T. Inagaki and A. Kvinikhidze、High density quark matter in the Nambu–Jona-Lasinio model with dimensional versus cutoff regularization、Phys. Rev.、有、D79、2009、096008
- ④ T. Inagaki, D. Kimura and A. Kvinikhidze、 π and σ Mesons at Finite Temperature and Density in the NJL Model with Dimensional Regularization、Phys. Rev.、有、D77、2008、116004
- ⑤ 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
- ⑥ 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
- ⑦ T. Inagaki、Radiative symmetry breaking and dynamical origin of cosmological constant in ϕ^4 theory with non-linear curvature coupling、J. Phys. A: Math. Gen.、有、39、2006、6455-6462
- ⑧ T. Hattori, M. Hayashi, T. Inagaki, Y. Kitadono、Thermal and curvature effects to spontaneous symmetry breaking in ϕ^4 theory、J. Phys. A: Math. Gen.、有、39、2006、6441-6444
- ⑨ T. Fujihara, T. Inagaki, D. Kimura、Color superconductivity and radius of quark star in extended NJL model by using the dimensional regularization、J. Phys. A: Math. Gen.、有、39、2006、6371-6375

[学会発表] (計36件)

- ① T. Inagaki, Y. Mizutani, Yukawa Type Interaction in Non-Equilibrium Thermofield Dynamics, Cosmology, the Quantum Vacuum, and Zeta Functions, 2010年3月10日、Barcelona, Spain,
- ② T. Inagaki、Topological and curvature effects in a multi-fermion interaction model、2009 Nagoya Global COE Workshop "Strong Coupling Gauge Theories in LHC Era", 2009年12月9

日、Nagoya, Japan

- ③ 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
- ④ T. Inagaki、Dimensional Regularized NJL and Extended NJL Model、Summer Institute 2008, 2008年8月15日、Chi-Tou, Taiwan
- ⑤ 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
- ⑥ M. Hayashi, T. Inagaki、Thermal and Curvature Effects for an Evolution of Curved Space in a Four-Fermion Interaction Model、VIII Asia-Pacific International Conference on Gravitation and Astrophysics (ICGA8), 2007年8月29日、Nara, Japan
- ⑦ T. Inagaki、Static solution of Einstein equations in NJL model at finite T and μ 、The International School/Seminar Quantum Field Theory and Gravity、2007年7月5日、Tomsk, Russia
- ⑧ T. Fujihara, T. Inagaki, D. Kimura、Phase structure of NJL model with finite quark mass and QED correction、Origin of Mass and Strong Coupling Gauge Theories, 2006年11月22日、Nagoya, Japan
- ⑨ 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

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：