

平成 21年 5月 21日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006 -2008

課題番号：18540253

研究課題名（和文） 有限バリオン密度におけるハドロン・クォーク物質の量子相転移

研究課題名（英文） Quantum Phase Transition of Quarks and Hadrons at Finite Baryon Density

研究代表者

初田 哲男（HATSUDA TETSUO）

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：20192700

研究成果の概要：

高密度クォーク物質と高密度バリオン物質の相変化において、軸性異常により誘起される新しい臨界点が存在する可能性をギンツブルグ ランダウ理論を用いて示した。さらに格子量子色力学の大規模数値シミュレーションを実行して、高密度バリオン物質の記述に本質的な核力の性質を調べ、短距離での斥力芯の存在を示した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,200,000	0	1,200,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	630,000	3,930,000

研究分野：数物

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙・宇宙線

キーワード：量子色力学， 格子 QCD， 中性子星， 高密度核物質

1. 研究開始当初の背景

量子色力学（QCD）は、有限温度・有限バリオン密度において、様々な物質相を呈すると考えられている。特に高温・低バリオン密度では、熱揺らぎによるエントロピー増加に起因して、ハドロン相からクォーク・グルオン・プラズマ相への古典相転移が起こる。この相転移の実験室での観測は、

RHICやLHCにおける相対論的重イオン衝突実験の主要テーマであり、強結合プラズマという観点から盛んな理論的研究も行われている。一方、低温・高バリオン密度では、クォーク・グルオン多体系がエネルギーを最小にする配位を選択する事で、バリオン密度の増加と共に様々な量子相転移が誘起される。一般に、量子相転移は古典相転移に比べ、量子ダイナミ

クスの詳細が関係するので理論的解析が難しい。さらに、第一原理計算である格子ゲージ数値シミュレーションは、低温・有限バリオン密度では、フェルミオン固有の負符号問題のため、定量的な予言が現在のところ不可能である。しかしながら、中性子星・超新星爆発・重イオン衝突実験などの物理に関係して、高密度物質の状態方程式やその量子相転移の詳細を明らかにすることは、急務の物理的課題となっている。

2. 研究の目的

以上の状況をふまえて、本研究では、有限バリオン密度におけるQCD相構造の全体像をまず定性的に明らかにし、次に各密度領域での物質の構造を定量的に詰めていくという2段階のアプローチをとる。特に集中的に行う研究テーマとして、以下の互いに密接に関係した3項目について研究した:

- [1] 南部相とカラー超伝導相の競合
- [2] カラー超伝導とハドロン超流動クロスオーバー
- [3] 核力の斥力芯の第一原理計算と高密度核物質

3. 研究の方法

研究目的の[1]については、カイラル凝縮とカラー超伝導の両方の秩序変数を内包するギンツブルグーランダウ関数を用いて、相競合を調べた。

研究目的の[2]については、冷却原子気体(特にフェルミ-ボース混合気体)を例にとり、弱結合から強結合に至る相構造の解析を行い、同時にクォーク-ハドロン相転移との類似性を追求した。

研究目的[3]については、格子QCDの第1原理計算を用いて、核子間ポテンシャルを導出する方向性を追求した。

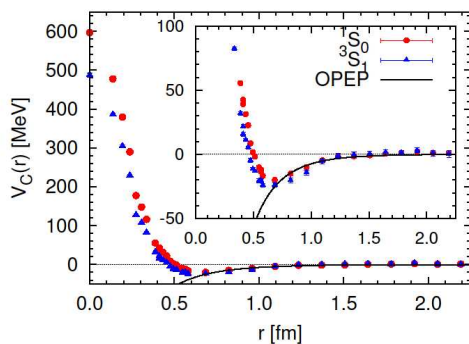
4. 研究成果

ハドロン間相互作用研究の第一歩として、重いチャームニュウムと軽いハドロンの相互作用、特に低エネルギーでの散乱長を、格子量子色力学シミュレーションに基づいて研究した。チャームニュウムと、中間子、核子、中間子の格子上での全エネルギーを格子体積の関数として考察することで、散乱長を引き出した。低エネルギー定理を反映して、チャームニュウムと中間子の相互作用は小さいが、チャームニュウムと核子はクォーク交換がなくグルオン交換のみに起因する強い相互作用を持つことがわかった。このことは、重イオン衝突実験におけるハドロン起源のチャームニュウム抑制機構の問題と密接に関係している。

高密度バリオン物質、特に中性子星内部で実現されるハドロン物質からクォーク物質への相転移現象は、いまだその詳しい性質が未知のままである。われわれは、相転移領域におけるカイラル対称性の回復とカラー超伝導の発現の相互関係に着目し、ギンツブルグーランダウ理論の枠内で、可能な相構造を分類した。その結果、量子色力学における軸性異常がもたらす結合項の影響で、ハドロン物質からクォーク物質への転移が、低温では滑らかなクロスオーバーとなり、さらに温度が上がるとクロスオーバーから一次相転移に変わる臨界点が現れる可能性を示した。この臨界点は、ストレンジクォークの質量が無限大とみなせる場合には消失することもわかった。どの温度密度でこの臨界点が現れるかは、対称性の議論では判断できないので、

高密度物質に関する様々なモデルを用いて定量的な検討を行った。

有限バリオン密度の原子核中では、真空中で自発的に破れたカイラル対称性が部分的に回復することが予想されている。この部分的回復を定量的に議論するため、原子核中に埋め込まれた中間子が受けるポテンシャルの密度変化と、低エネルギー N 散乱の情報を組み合わせた、実験データとカイラル凝縮(カイラル対称性の破れの秩序変数)の密度変化を直接結びつける新しい関係式を導出した。さらに、実験で観測されている深く束縛した中間子原子のスペクトルとこの新しい関係式を用いて、核媒質中での約30%の秩序変数の減少が確認された。



核力の起源の解明は、原子核物理学の基礎を与えると同時に、QCDにおける大きなチャレンジでもある。我々は、格子上に2核子を配置し、その相対ベータ・サルピーター振幅を数値シミュレーションで求めることにより、核子間ポテンシャルを逆算した。その結果、核力に中心力について、近距離での強い斥力芯・中間距離での引力を両方備えたポテンシャルが得られた。これは、現象論的に知られ

ていた核力の定性的性質と合致している。また、スピン3重項のポテンシャルが1重項に比べて強い傾向が見られた(左図参照)。

通常原子核は陽子と中性子の複合系であるが、ストレンジクォークを含むハイペロンが混在した原子核(ハイパー核)が約40種類見つかっている。また、2009年より本格稼働する大強度陽子加速器研究施設J-PARCでは、K中間子や中間子ビームを用いて、より多様なハイパー核の生成が期待されている。ハイパー核構造の理解の鍵になるのは、ハイペロンと陽子や中性子との相互作用(ハイペロン力)であるが、ハイペロン核子散乱実験データが極めて限られているため不定要素が大きい。このハイペロン力の問題を量子色力学の数値計算により理論的に解明しようとする試みを行った。特に、J-PARCで行われるハイパー核の実験と直接関係するN相互作用ポテンシャルとそのスピン依存性を、クエンチ近似の格子量子色力学計算により調べた。その結果、スピンに依存する斥力芯の存在、中間子交換とは異なることがわかった。

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 20 件)

- H.Nemura, N.Ishii, S.Aoki and T. Hatsuda,
Hyperon-nucleon force from lattice QCD,
Phys. Lett. B673, 136-141 (2009). 査読
有
Y. Akamatsu, T. Hatsuda and T. Hirano,
Heavy Quark Diffusion with Relativistic
Langevin Dynamics in the Quark-Gluon

- Fluid, Phys. Rev. C79, 054907 (2009). 査読有
- T.Umeda, S.Ejiri, S.Aoki, T.Hatsuda, K.Kanaya, Y. Maezawa and H.Ohno, Fixed Scale Approach to Equation of State in Lattice QCD, Phys. Rev. D79, 051501 (2009). 査読有
- D.Jido, T.Hatsuda and T. Kunihiro, In-medium Pion and Partial Restoration of Chiral Symmetry, Phys. Lett. B670, 109-113 (2008). 査読有
- S. Aoki, T. Hatsuda and N. Ishii, Nuclear Force from Monte Carlo Simulations of Lattice Quantum Chromodynamics, Comp. Sci. Discovery, 1, 015009 (2008). 査読有
- T.Hatsuda, M.Tachibana and N.Yamamoto, Spectral Continuity in Dense QCD, Phys. Rev. D78, 011501 (2008). 査読有
- G. Baym, T. Hatsuda, M. Tachibana and N.Yamamoto, The axial anomaly and the phases of dense QCD, J. Phys. G35, 104021 (2008). 査読有
- N.Yamamoto, T.Hatsuda and M.Tachibana, Spectral Continuity Of Vector Mesons In Dense QCD, Prog. Theor. Phys. Suppl. 174, 84-87 (2008). 査読有
- H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki and T.Hatsuda, Lattice QCD simulation of hyperon-nucleon potential, Mod. Phys. Lett. A23, 2285-2288 (2008). 査読無
- N.Ishii, S.Aoki and T.Hatsuda, Lattice QCD calculation of nuclear forces, Mod. Phys. Lett. A23, 2281-2284 (2008). 査読無
- T.Hatsuda, S.Aoki, N.Ishii and H.Nemura, From lattice QCD to nuclear force, Mod. Phys. Lett.A23, 2265-2272 (2008). 査読無
- M. OHTANI, C.LEHNER, T. WETTIG and T. HATSUDA, Topological susceptibility at finite temperature in a random matrix model, Mod. Phys. Lett. A23, 2465-2468 (2008). 査読無
- N. Yamamoto, M. Tachibana, T. Hatsuda and G.Baym, Phase structure, collective modes, and the axial anomaly in dense QCD, Phys. Rev. D76, 074001 (2007). 査読有
- T.Gunji, H.Hamagaki, T.Hatsuda and T.Hirano, Onset of J/psi melting in quark-gluon fluid at RHIC, Phys. Rev. C76, 051901 (2007). 査読有
- T.Hatsuda, Bulk and spectral observables in lattice QCD, J. Phys. G 34, S287 (2007). 査読有
- K. Hamaguchi, T. Hatsuda, M. Kamimura, Y.Kino and T.T.Yanagida, Stau-catalyzed Li-6 production in big-bang nucleosynthesis, Phys. Lett. B650, 268-274 (2007). 査読有
- N. Yamamoto, M.Tachibana, T.Hatsuda and G.Baym, Phase structure, collective modes, and the axial anomaly in dense QCD, Phys. Rev. D76, 074001 (2007). 査読有
- N.Ishii, S.Aoki and T.Hatsuda, The nuclear force from lattice QCD, Phys. Rev. Lett. 99, 022001 (2007). 査読有
- K.Yokokawa, S.Sasaki, T. Hatsuda and A.Hayashigaki, First lattice study of low-energy charmonium-hadron interaction, Phys. Rev. D74, 034504 (2006). 査読有

T.Hatsuda, M.Tachibana, N.Yamamoto and G.Baym, New critical point induced by the axial anomaly in dense QCD, Phys.Rev.Lett. 97, 122001 (2006). 査読有

[学会発表](計 5件)

N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda, Nuclear forces from quenched and 2+1 flavor lattice QCD using the PACS-CS gauge configurations, LATTICE2008, , Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19 (2008).

H.Nemura, N.Ishii, S.Aoki and T.Hatsuda, Lambda-nucleon force from lattice QCD, LATTICE2008, Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19 (2008).

S.Aoki, J.Balog, T.Hatsuda, N.Ishii, K.Murano, H.Nemura and P.Weisz, Energy dependence of nucleon-nucleon potentials, LATTICE2008, Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19 (2008).

N. Ishii, S.Aoki and T.Hatsuda, Lattice QCD approach to nuclear force, Lattice Field Theory, Regensburg, Germany, July 30 - Aug.4 (2007).

T.Hatsuda, Strong correlations in hot QCD, Lattice 2006, Tucson, Arizona, USA, July 23-28 (2006).

[その他]

6. 研究組織

(1)研究代表者

初田 哲男 (HATSUDA TETSUO)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：20192700

(2)研究分担者

江尻 信司 (EJIRI SHINJI) 2006年度のみ
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号：10401176

(3)連携研究者

無し