

機関番号：14301
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20540267
 研究課題名（和文）クォーク物質の物性とコンパクト星の磁場の起源
 研究課題名（英文）Properties of quark matter and the origin of the magnetic field in compact stars
 研究代表者
 巽 敏隆（TATSUMI TOSHITAKA）
 京都大学・大学院理学研究科・助教
 研究者番号：40155099

研究成果の概要（和文）：QCDの有効理論を用いて、フェルミ液体論に基づいてクォーク物質の強磁性相転移を議論し、温度—密度平面での磁気的相図を導出した。理論的には相互作用の遮蔽効果を議論して新たな非フェルミ液体効果が磁化率に出現することを示した。コンパクト星内部でのハドロン—クォーク相転移を研究し、混合相の特徴を明らかにするとともに、重力波スペクトルへの影響を議論した。カイラル相転移に伴う非一様相の出現を議論し、対称性の破れを効果的に取り入れる理論形式を提案した。

研究成果の概要（英文）：

Using an effective theory of QCD, possible ferromagnetic transition is discussed in quark matter within the Fermi-liquid theory. We draw the magnetic phase diagram in the temperature-density plane. As a theoretical consequence, it is shown that the screening effect for the interaction produces a novel non-Fermi-liquid effect in the magnetic susceptibility. Hadron-quark transition is studied in compact stars to reveal the properties. Signatures of the phase transition are suggested in the spectra of the gravitational waves. Emergence of an inhomogeneous phase is discussed following the chiral transition and a new theoretical framework is proposed to properly take into account the symmetry breaking effect.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：原子核理論

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：コンパクト星、相転移、強磁性、クォーク物質

1. 研究開始当初の背景

(1)高温・高密度などの極限状況での核物質の研究は、実験・側面では高エネルギー重イオン反応でのクォークグルオン状態の探求や中性子星、X線バースト、 γ 線バーストの

観測の進展、理論面では格子QCDによるシミュレーションや有効理論を用いた研究などを通して大きく発展していた。

(2)コンパクト星との関連では内部での新しい物質とくにクォーク物質の存在様式と超

新星爆発や中性子星の熱的進化など現象との関係に対する関心が大きく高まっていた。(3)新しく発見された第三グループの中性子星というべきマグネターなどの強磁場での現象は観測的にも理論的にも多くの研究がなされていたが、多くの理解されていない問題があった。

2. 研究の目的

- (1)コンパクト星内部でのクォーク物質の発現および特徴をそれが内在するであろう磁氣的性質に注目して相対論的多体論を用いて研究し、明らかにする。
また温度—密度平面での QCD 相図を導出し、臨界密度、臨界温度の情報を得る。
- (2)(1)での成果およびハドロン—クォーク相転移の研究を基に、パルサー発見以来の大きな謎である中性子星の磁場の微視的起源の可能性、熱的進化など現象との関連を議論し逆に理論へのフィードバックを得る。
- (3)天体研究者との連携、共同研究によって原子核物理、天体物理の効果的、有機的結合を図る。

3. 研究の方法

- (1)QCDの有効理論であるMITバグ模型を用いて、ランダウ・フェルミ液体理論により磁化率を計算し、強磁性相転移の様相を明らかにする。
- (2)重要な多体効果であるグルオンの遮蔽効果を適切に考慮して、磁化率にどのような効果を及ぼすかを明らかにする。有限密度、有限温度での相図を導出する。
- (3)熱力学的に適切な方法としてギブスの条件に基づく相転移の理論を展開し、中性子星内部などでの多成分系の相転移を議論して状態方程式を得る。

4. 研究成果

- (1)クーロン相互作用している電子ガスでの強磁性発現の機構として知られているブロッホ機構のアイデアを用いて、—グルオン交換(OGE)によって相互作用しているクォーク物質での強磁性状態の発現可能性を研究した。
相対論的なフェルミ液体論の枠組みを構築し、それに基づいて磁化率の表式を得、強磁性転移を議論した。このとき磁化率 χ はランダウ・ミグダルパラメーターと呼ばれる粒子間の相互作用の強さの関数として表される。このパラメーターを摂動的に計算することにより、実質的に高次の非摂動効果を考慮した形で磁化率が計算されることになる。
図1には温度0での χ の計算例を示した。

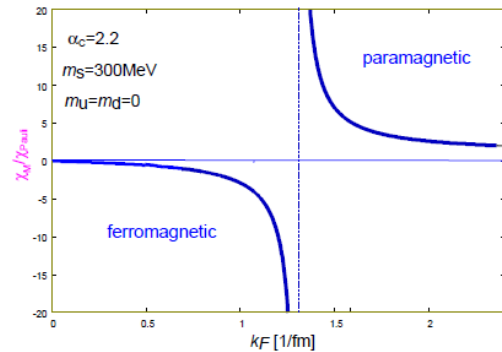


図 1

フェルミ運動量が 1.4/fm あたりの密度で発散していることがわかり、これは強磁性相転移を示している。

(2)クーロン相互作用や OGE 相互作用のような長距離相互作用では、粒子の再配置効果による相互作用の遮蔽効果が重要であることが良く知られており、クーロン相互作用（縦波成分）の到達距離が有限になる。これとは別に相対論的な場合にはいわゆる横波成分への遮蔽効果も重要になってくる。この場合の特徴は、縦波成分の遮蔽とは異なりランダウ減衰と呼ばれる動的効果をもたらせることである。これらの遮蔽効果の主要項を考慮して、その磁化率への効果を明らかにした。とくに、横波成分に対する遮蔽効果は有限温度の場合に重要な役割を果たし、フェルミ液体論では現れなかった非フェルミ効果と呼ばれる $\ln T$ を含む特異項が磁化率に新たに出現することを見出した。

(3)以上の結果をもとに温度—密度平面で QCD の磁氣的相図を描き、臨界温度、密度がそれぞれ数十 MeV, 原子核密度程度であることを見た。

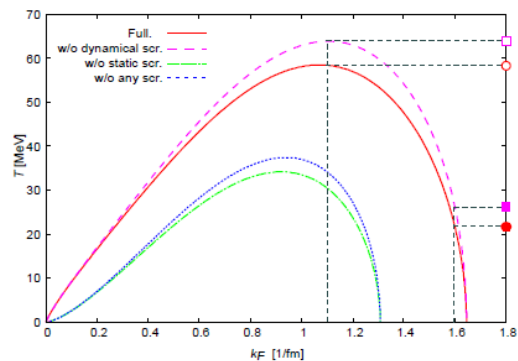


図 2

図2には我々の計算結果があたえられている。赤い実践が最終結果で、点線との差が上記の非フェルミ液体効果によるものである。青および緑の曲線は縦波成分による遮蔽効果を無視したものである。

(4)一般化されたコヒーレント状態を用いた経路積分の方法により強磁性相での低エネルギー集団励起であるスピン波の定式化を行った。強磁性相ではスピンの方向が揃っているために空間回転対称性が自発的に破れているけいである。このとき各スピンの微小な変化が空間的に伝わっていくのがスピン波であると考えることができる。個の描像に基づきスピン方向の微小な変化を集団座標として導入し、スピンコヒーレント状態の経路積分を計算する。その結果スピン波の分散関係を導出すると共に、マグノンとしての量子化も可能であることがわかった。

(5)一方、コンパクト星内部でのハドロンクォーク相転移に関する研究を熱力学的に適切に行い、混合相でのパスタと呼ばれる非一様構造の性質およびそのときの状態方程式を導出した。

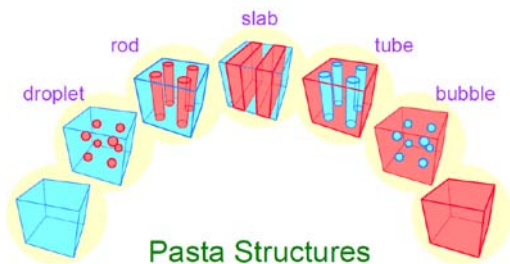


図3

図3には相転移にともなう混合相での物質の小僧変化を示しており、これらはパスタ構造と呼ばれている。左端の図が一般的なハドロン物質に対応し、右端が一般的なクォーク物質に対応し、その移行過程で様々な幾何学的構造をもつ非一様相が出現する。

(6)コンパクト星内部でハドロンクォーク相転移が起こるのかどうかは現代的な課題になっている。我々はコンパクト星の振動による重力波放出を考え、物質の状態方程式、パスタ相を始めとする相転移の情報が引き出すことが出来るかを議論した。特に、相転移により圧力が一定になる領域（密度不連続面）が存在すればはっきりとした証拠になりうることを示した。

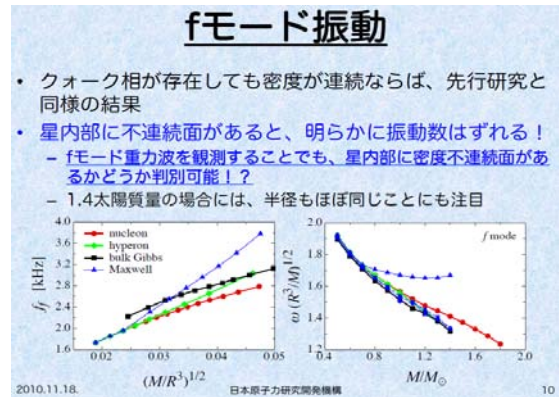


図4

fモード振動と呼ばれる振動からの重力波の振動数は他の場合に比べて顕著な違いを示すことがわかった。重力波観測に関してはいくつかの将来計画があり、多くの関心と期待が集まっているが、高密度状態での物質の性質に対しても重要な情報を提供すると期待できる。

(7)この研究計画期間の途中で、カイラル相転移に伴う新たな非一様相の出現が大きな話題になった。これに関連して我々は数年前に先駆的研究を行っていたので、その研究を広げることを試みた。特に、対称性の破れを適切に取り込む理論形式を提案した、

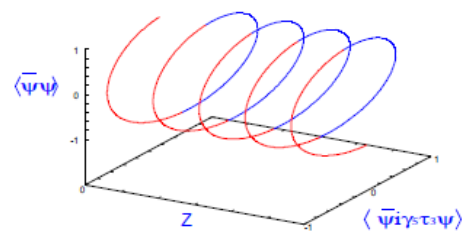


図5

我々の提案した二重カイラル密度波(DCDW)は図に示されている通り、一次元的な周期構造をもち、そこではスカラー密度と擬スカラー密度が存在する。そこでは、粒子密度は空間的に一定でありながら、磁気的秩序としてはクォークの磁気モーメントがスピン密度波のように周期的に変化している。構造的に

はスメクティック液晶に類似している。この状態の出現機構はまだはっきりしていないが、我々はスピン密度波に対するOverhauser の議論を参考にフェルミ面でのネスティング効果であることを示した。

一方、カイラル相転移との関連を調べてみると、超伝導での空間的に非一様な秩序変数をもつ FFLO と呼ばれる状態に類似していることがわかる。カイラル相転移によりスカラー密度が消滅し、クォークの動的質量がなくなる前に、擬スカラー密度の出現とともに一次的に非一様な状態が現れる。

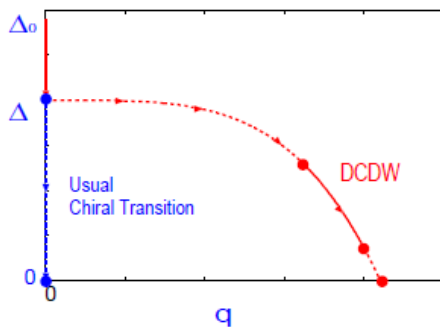


図 6

クォーク物質中でどのようにカイラル対称性が回復していくのかという問題は原子核物理での最新の課題であり、将来高エネルギー重イオン反応やコンパクト星の観測を通して明らかにされると期待される。

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 6 件)

- ① H. Sotani, N. Yasutake, T. Maruyama, T. Tatsumi, Signatures of hadron-quark mixed phase in gravitational waves, Phys. Rev. D 83 (2011) 024014 (査読あり).
- ② K. Sato, T. Tatsumi, Spontaneous magnetization in QCD and non-Fermi-liquid effects, Nucl. Phys. A826 (2009), pp. 74-100 (査読あり).
- ③ T. Tatsumi, K. Sato, Non-Fermi-liquid effect in magnetic susceptibility, Phys. Lett. B672 (2009) 132(査読あり).
- ④ T. Tatsumi, K. Sato, Magnetic susceptibility of quark matter within Fermi-liquid theory, Phys. Lett. B663 (2008) 322 (査読あり).

[学会発表] (計 6 件)

- ① T. Tatsumi, Magnetic aspects of QCD at finite density and temperature, INPC, 2010年7月, Vancouver, Canada
- ② 巽敏隆, クォーク物質の磁性、日本物理学会、2010年3月、岡山
- ③ T. Tatsumi, Ferromagnetic properties of quark matter - an origin of magnetic field in compact stars -, CSQCDII, 2009年5月20-24日
- ④ T. Tatsumi, Spontaneous magnetization of quark liquid and origin of magnetic field in compact stars, Int. Workshop, 2008年2月, Phuri, India

[図書] (計 1 件)

- ① T. Maruyama, E. Nakano and T. Tatsumi, Relativistic Spin-Polarization and Ferromagnetism in Quark Matter, Horizons in World Physics, Vol. 276, NOVA pub., NY, 2011, 56 ページ、印刷中。

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況 (計◇0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

巽 敏隆 (TATSUMI TOSHITAKA)
 京都大学・大学院理学研究科・助教
 研究者番号：40155099

(2) 研究分担者
()

研究者番号：

(3) 連携研究者
丸山 智幸 (MARUYAMA TOMOYUKI)
日本大学・生産資源科学部・准教授
研究者番号：50318391