

氏 名	えん とう とも き 遠 藤 友 樹
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2978 号
学位授与の日付	平 成 18 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	Hadron-quark matter phase transition and the mixed phase in hybrid stars (ハドロン-クォーク物質相転移とハイブリッド星における混合相)
論文調査委員	(主 査) 助教授 菅 沼 秀 夫 教 授 中 村 卓 史 教 授 畑 浩 之

論 文 内 容 の 要 旨

核物質などのハドロン物質は、高密度領域においては基本粒子からなるクォーク物質へ相転移すると考えられているが、その様な高密度のクォーク物質は、中性子星の中心領域において存在している可能性がある。実際、中性子星が示す強磁場や冷却過程などは、核物質だけでは説明が難しく、クォーク物質によって説明される可能性が指摘されている。

高密度領域でのハドロン物質からクォーク物質への非閉じ込め相転移は一次相転移であることが格子 QCD 計算や様々なモデル計算によって示されている。一次相転移においては、一様な物質相の他に、空間的に非均一な混合相が一般には存在し、この場合には、ハドロン物質とクォーク物質とが空間的に混在するような混合相が、中間の密度領域において現れ、多様な物質構造を呈すると考えられる。この様な一次相転移に対する熱平衡の状態方程式を得る手法としては、Maxwell 構成法が知られているが、中性子星物質のような複数の化学ポテンシャルが存在する系では、この方法は一般には不適切であり、相平衡に対する基本条件である Gibbs 条件を課す必要がある。この認識の下、Gibbs 条件に基づいた中性子星物質での相構造の研究が Glendenning らによって行われ、混合相が広い密度領域に渡って現れること、及び、ハイブリッド星では、純粋なクォーク物質相が出現しにくいこと等の結果が示された。

しかしながら、従来の研究では、混合相ではバリオン数密度のみならず電荷密度が非一様になるにも拘らず、クーロン相互作用に対する取り扱いが不十分であった。クーロン相互作用を考慮すると荷電遮蔽効果による荷電粒子の再配置が期待されるが、これまでの研究では殆ど考慮されていない。また、表面張力の存在が両相の圧力平衡条件に反映されていないなどの問題点もあった。

論文では、密度汎関数法のアイデアを用いることにより、常に Gibbs 条件を満たしつつ近似によらず数値的に Poisson 方程式を正確に解く定式化を行い、球状・棒状・板状といった混合相の様々な幾何学的構造に対して、荷電遮蔽効果を適切に取り入れた研究を実行した。とりわけ、混合相における表面張力およびクーロン相互作用の役割を詳細に分析し明らかにした。

非一様混合相に対しては、Wigner-Seitz 近似を用いて各セルの熱力学的性質を研究した。混合相はある有限なバリオン化学ポテンシャルの範囲に現れるが、遮蔽効果を取り入れた場合は、混合相が現れる範囲が狭まり、Maxwell 構成法の結果に近づく。また、クーロン相互作用に対する遮蔽長とセルの大きさとの対応関係を調べ、荷電遮蔽効果を入れない場合は、遮蔽長に対してセルや構造の大きさは小さく、一見遮蔽効果は小さいように見えるが、実際には、遮蔽効果を入れた場合は、遮蔽長に対してセルも構造もより大きくなることを示した。これは荷電遮蔽効果が顕著になることを意味するものであり、複雑な非線形方程式となる Poisson 方程式を正確に解いて初めて得られる結果である。また、荷電遮蔽効果による荷電粒子の再配置効果が顕著に現れ、各相では電荷の絶対量が減少し、局所荷電中性がセルの内部に部分的に出現することを示した。

次いで、具体的な状態方程式を導出し、荷電遮蔽効果の効果を調べた。混合相において密度変化に対する圧力変化の応答に関しては、遮蔽効果を入れた場合は、それを無視した場合に比べ、低密度領域において強い圧力、高密度領域において弱

い圧力を示しており、Maxwell 構成法から得られる圧力一定の相変化に近づく。更に、実際に得られた状態方程式を Tolman-Oppenheimer-Volkov (TOV) 方程式に適用し、ハイブリッド星の構造に対する研究を行った。荷電遮蔽効果等を考慮した場合、星の質量や半径には大きな違いは見られないが、内部構造は大きく異なることを示した。即ち、遮蔽効果により、混合相の範囲は狭められ、星の中心部に純粋なクォーク物質の領域が出現することを予測した。

論文審査の結果の要旨

高温・高密度でのクォーク非閉じ込め相転移は、近年の高温・高密度 QCD に対する理論的な展開、及び、高エネルギー重イオン衝突によるクォーク・グルーオン・プラズマの生成実験等を反映して、ハドロン物理学における主要な研究テーマのひとつになっている。申請論文の研究対象である中性子星などのコンパクト天体は、それ自身が星の進化や元素合成のプロセス等とも深く関わる重要な研究対象であると同時に、クォーク非閉じ込め相転移が実現し得る高密度の物理系としても極めて興味深い物理的対象である。

中性子星内部のような高密度物質では新しい物質の存在様式として強い相互作用に起因する様々な相転移が研究されてきたが、それらの多くは一次相転移である。一次相転移の特徴としては、準安定状態や熱力学的不安定状態の存在を反映して、相平衡にある 2 相共存の混合相が出現する。中性子星物質のような 2 種類以上の粒子を含む多成分系での一次相転移においては、単一種類の粒子系の相転移とは異なり、単純な Maxwell 構成法は不適切になる為、相平衡の基本的条件である Gibbs 条件に基づいた慎重な考察が必要であるが、これまでに為された混合相の研究の多くは、その取り扱いが不完全であった。

申請論文では、高密度下でのクォーク非閉じ込め転移における混合相に対して、明確に定義された熱力学的記述を与え、状態方程式を導出した上で、中性子星内部での構造を論じ、その中心領域でのクォーク物質相の出現等を予測している。その際、球状・棒状・板状といった混合相の様々な幾何学的構造の可能性を考慮し、荷電遮蔽効果を適切に取り入れた研究を実行している。この様な徹底した研究は世界で初めてであり、本研究は、クォーク・レベルのミクロなスケールの物理と中性子星の物理とを関連づける有効な方法を与えている。

また、論文では、混合相でのクーロン相互作用と荷電遮蔽効果の役割を詳細な分析によって明らかにしており、遮蔽効果の為に、状態方程式が Maxwell 構成法を適用したものになるという結論を得ている。クォーク非閉じ込め相転移以外に、申請者を含めた K 中間子凝縮や核物質の液相・気相転移の研究でも本研究と同様の結論が得られており、このことを合わせて考えると、本研究での結論は、個々の相転移の詳細によらず荷電遮蔽効果の重要性を示すとともに、多成分系の一次相転移の理論に対して有益な示唆を与えるものと言える。

論文では、得られた状態方程式に基づいて、中性子星の構造を議論している。最近では、マグネターと呼ばれる強磁場中性子星の極めて強い磁場を説明する上でも、中性子星内部においてクォーク物質相が存在する可能性が指摘されているが、論文では、荷電遮蔽効果により、混合相が出現する領域が狭められ、中性子星内部において、クォーク物質相のコアが出現すると予測している。

この様に、申請論文は、高密度でのクォーク・ハドロン物理のみならず、中性子星の物理、更には、多成分系の一次相転移という熱力学的な基本問題をも含む幅広い分野に亘って寄与しており、高密度物質の核物理に新たな認識をもたらし、クォーク・ハドロン物理と天体物理とを繋ぐ 1 つの方法を与えたという点からも、その寄与は大きい。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。