

論文の内容の要旨

論文題目「平均場近似を用いた複合バリオンの核物質と中性子星物質」

学位申請者 野呂 凱人

キーワード：クォーク模型，相対論的な場の理論，対称核物質，中性子星物質，中性子星

中性子星はブラックホールの次に強い重力を持つ天体である。中性子星は主に中性子と少量の陽子と電子から構成されており、質量は太陽質量の1倍から3倍程度、半径が約10 km程度とコンパクトに圧縮された天体である。一般的に太陽質量の10倍から20倍の恒星が寿命によって星が圧縮され爆発した後の残骸が中性子星である可能性がある。中性子星の自転周期は数十秒から数ミリ秒と非常に短い。これは、角運動量保存則より爆発前よりも爆発後の自転速度が遥かに速くなるためである。また中性子星は強い磁場を持っている。これは元の天体が磁場を持っており、中心核の磁束を保持しながら収縮するからである。自転軸と磁極が一致しないとき、中性子星はパルサーとして観測される。

中性子星の中心付近には中性子、陽子、電子以外にハイペロンやクォーク凝縮体も存在することが予測される。それぞれの状態をハドロン相、カラー超伝導相と言い、これらはクォークレベルの物理を扱う量子色力学で記述できる。中性子星の中心付近の温度がゼロ程度でもハドロン相からカラー超伝導相への相転移が予想されるため、中性子星の内部の構造を調査するための状態方程式はクォークレベルで構築する必要がある。

中性子星物質の中にハイペロンが存在すると大抵の場合に状態方程式が柔らかくなる。この影響で許される中性子星の最大質量が大きく下がり、太陽の質量の2倍程度の重い中性子星を理論的に再現できない問題が浮上している。この問題は「ハイペロンパズル」と呼ばれている。この問題を解決するためには、点粒子のバリオンが生み出す斥力の効果の再検討や3体相互作用、カラー超伝導相への相転移を考慮する必要性などが挙げられている。これらを正確に行うためには、バリオンをクォーク模型で記述することが重要である。

本研究ではクォークの有効模型として、1961年に南部陽一郎氏と Giovanni Jona-Lasinio 氏の2名によって発案された Nambu-Jona-Lasinio (NJL) 模型を採用した。この模型の最大の特徴は、バリオンや中間子を点粒子ではなくクォークの束縛状態で記述できることである。さらに高密度で強く相互作用している物質の相の記述も可能であるため、中性子星物質の記述に適している。

本研究の目的は2つある。1つ目はバリオンと中間子を NJL 模型で記述し、内部構造を持つハイペロンを含む中性子星物質の記述がハイペロンパズルを解決できるのかを調査する

ことである。2つ目は中性子星の安定条件を調査することである。

本論文の構成は以下の通りである。

第1章では序論として原子核の理論、実験の最近のトピックスと本論文の目的を述べた。

第2章では中性子星の基礎を解説した。中性子星がどのような過程で誕生するのか述べるために、一般的な星(恒星)の一生を中心核の構成粒子の変化に焦点を当てて解説した。また理論計算により許される中性子星の最大質量と中性子星の観測データを用いて「ハイペロンパズル」がどのような問題であるのかを解説した。

第3章ではNJL模型の基礎を解説した。はじめに相対論的な場の理論をスカラー場とベクトル場の両方が存在する場合で解説した。次に核子と中間子を点粒子として見なしているWalecka模型の解説を行い、媒質中のスカラーおよびベクトル平均場の導入方法および核子とそれらの平均場との相互作用を考慮したラグランジアンを構成を解説した。次にNJL模型のラグランジアンに平均場を導入して、一番簡単な4-fermi相互作用ラグランジアンに基づく状態方程式を計算するために必要な物理量を用意した。最後にファデエフ方程式に従い、バリオンを2つのクォークの束縛状態であるダイクォークともう1つのクォークから成る合計3つのクォークの束縛状態として記述し、バリオンの質量を構成クォークの質量の関数として求める方法を解説した。

第4章では前半に状態方程式、後半に星の構造を決定する方法を述べた。前半では、第3章で求めたラグランジアンからエネルギー密度を導いて、さらに中性子星の内部構造を記述するために必要な2つの条件である化学平衡条件と荷電中性条件を用いて状態方程式を決定した。後半では、中性子星が球対称かつ静的重力平衡にあるとして、相対論的な重力平衡の式であるTolmann-Oppenheimer-Volkoff方程式(TOV方程式)をアインシュタインの重力場方程式から導いた。そしてTOV方程式を用いて星の構造を決める方法を解説した。

第5章では、第3章で議論した4-fermiの相互作用を6-fermi相互作用と8-fermi相互作用に拡張した場合にエネルギー密度などの物理量がどのように変化するのかを述べた。

第6章では、対称核物質中のバリオンの性質と中間子交換の有効相互作用をフェルミ液体論を基に解説をした。前半部分では対称核物質のときの有効バリオン相互作用の強さと、これに関連した中間子交換の相互作用の強さの導出方法を解説した。後半部分では、前半部分で解説した内容を用いてバリオンが運ぶカレントを解説した。

第7章では、第4章から第6章の内容をもとに行った数値計算の結果を示した。状態方程式と星の構造決定のそれぞれの数値計算で得られた様々な物理量の値を提示し、実験結果と比較して数値計算の結果が妥当であるのか考察を行った。また章のはじめでは数値計算に用いた各種パラメータの決め方を解説した。

第8章では本論文のまとめと今後の展望を述べた。本論文ではバリオンと中間子をNJL模型で記述し、内部構造を持つハイペロンを含む中性子星物質の状態方程式がハイペロンパズルを解決できるのか調査を行い、その結果ハイペロンの存在のため中性子星の許される質量が下がりハイペロンパズルが解決されないことが明らかになった。さらに8-fermi相互作用の効果の影響により中性子星が安定して存在できる密度範囲が広がることが明

らかになった。

なお本研究には、解決すべき問題点が大きく2つある。1つ目は対称エネルギーが実験値と一致しないことである。2つ目は Σ 粒子が媒質中に束縛することが実験と矛盾することである。今後は平均場近似の範囲を超えてバリオン間の短距離の斥力および量子効果を取り入れることで、これらの問題を解決したいと考えている。また、これらの効果を取り入れることによってハイペロンパズルが解決できると大いに期待できる。