

氏名（本籍） 川^{かわ}端^{ばた}正^{まさ}弘^{ひろ}（埼玉県）
学位の種類 博士（理学）
学位記番号 乙第 1094 号
学位授与の日付 平成 27 年 9 月 30 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目 クォーク・中間子の微分結合モデルを用いた
核物質の研究

論文審査委員 （主査）教授 齋藤 晃一
教授 浜田 典昭 教授 鈴木 英之
教授 川口 靖夫 教授 東平 光生

論文内容の要旨

原子の中心に存在する原子核は、陽子と中性子（まとめて核子と呼ぶ）の間に働く力（核力）により狭い領域に束縛された結合系である。極めて軽い原子核を除くと、原子核内部では核子の密度はほぼ一定（標準核密度）となる核密度の飽和性が成り立っている。また、核子数が多くなると、陽子間に働くクーロン斥力が核力による結合力を上回ってしまい不安定になる。一方、仮想的にクーロン斥力を除外すると、多数の核子でも安定であり、核物質というものが考えられる。陽子と中性子が同数となる核物質を標準核物質と呼ぶ。核物質を取り扱うことで、原子核全体に共通する性質を研究することができる。核密度の飽和は、1核子あたりの結合エネルギーが極小値をもつこと（結合エネルギーの飽和性）と同等である。標準核密度をこえる核物質については、中性子星の高重力下の内部や、原子核を高速で衝突させる実験など興味深い研究対象である。核力は核子間で中間子を交換することで生じる。核子と中間子を用いた核物質の相対論的研究は 1975 年に Walecka によって始められた。このモデルでは、中距離における σ 中間子の引力と近距離における ω 中間子の斥力により核密度の飽和性を再現している。その後、多くの核物質の性質を記述するのに成功したが、標準核密度での非圧縮率が実験値を大きく上回る、標準核密度のこえる密度に対して有効核子質量は極めて小さくなり高密度へ適用が困難になるなどの問題点があった。 σ の非線形自己相互作用の効果が

考えられ改善されたが、パラメーターが2個増えてしまう弊害があった。別の方法として、核子中間子結合定数に密度依存性を仮定して実験値を再現する理論があるが、その核密度依存性の起源について導き出す必要があった。Zimanyiらは核子と σ 中間子の結合に微分型結合を導入することで、 σ を通して間接的に結合定数に密度依存性の構造を取り入れることに成功した (ZM モデル)。

ここまでは、核子を点状粒子として扱って来たが、核子は3個のクォークからなる複合粒子である。核子のクォーク構造は原子核内に存在することで変化を受けると考えられる。重水素と鉄を標的とする高エネルギー μ 粒子の散乱実験の比較から、原子核中のクォーク分布が単体の核子の場合と異なることがわかった。理論研究は、Guichonにより核子のMIT バッグモデルを用いることではじめられた。MIT バッグモデルは、球形な境界の内部に自由なクォークを完全に閉じ込めるモデルである。Guichonは、核子内のクォークと中間子が直接相互作用することで核密度の飽和性を再現することに成功した。中間子は核子に比べ小さいので点状粒子として扱った。後にクォーク中間子結合 (QMC) モデルとして拡張された。一方、Tokiらにより核子に構成子クォークモデルを用いた核物質の研究がなされた。このモデルはクォーク平均場 (QMF) モデルと呼ばれる。構成子クォークモデルでは、カイラル対称性の破れにより質量を得た3個のクォークが、閉じ込めポテンシャルにより核子内に閉じ込められている。QMF モデルでは、構成子クォークと中間子の直接結合することにより核密度の飽和を再現している。

本論文の目的は、核子と中間子からなる核物質のモデルに、クォーク構造を持つ核子を取り入れたモデルを構築することである。特に、クォークと中間子の間に微分結合を用いることの有効性を検討することが主目的である。核子のクォーク構造の変化と、その変化の核物質への影響を議論する。今回のモデルでは、2つのパラメータであるクォーク- σ 中間子結合定数、クォーク- ω 中間子結合定数を核物質の飽和性を再現するように、標準核密度で結合エネルギーが極小値を取るように決定し、核物質の圧力、非圧縮率、歪みの係数、スカラーポテンシャル、ベクターポテンシャル、有効核子質量、核子の平均二乗半径などの物理量を求めてモデルの有効性について検討した。

第1章では、序論として、核物質及び核子にクォーク構造を取り入れた核物質の研究についての概要を述べ、本論文の構成について述べる。

第2章では、ハドロンレベルの相対論的平均場モデルとして Walecka モデルと ZM モデルについて紹介する。特に、ZM モデルにおいて、核子と σ 中間子の相互作用に微分結合を導入したことについて述べる。

第3章では、クォーク・中間子の微分結合を用いたモデルを構築する。以後、q-ZMモデル（クォーク ZM モデル）と呼ぶ。このモデルは、核子を構成子クォークモデルにより記述する第1ステップと、その核子から核物質を構成する第2ステップから構成される。

第1ステップでは、クォーク場と σ 中間子場、 ω 中間子場からなるラグランジアン密度から出発する。クォークは調和振動子型閉じ込めポテンシャルで核子内に束縛されている。クォークは核物質の他の核子から生成される σ 中間子と ω 中間子と相互作用する。中間子場は第2ステップで求める。クォークと σ 中間子間には微分結合を用いる。この微分結合には任意性があり、3種類の結合方法を検討する。それぞれ q-ZM1、q-ZM2、q-ZM3 モデルと呼ぶ。3種類のラグランジアン密度は、クォーク場と ω 中間子場に対してリスケールすることで、クォークと σ 中間子は直接結合し、差異をクォークと ω 中間子結合のみに取り込み、統一した形式に変型できる。さらに、中間子場には平均場近似を用いて、空間的に一様な定数の古典場 σ と ω に置き換える。これらの変型により、核子中に束縛され、 σ と ω の中を運動するクォークの Dirac 方程式が求まる。Dirac 方程式を解くことにより、クォークの波動関数が求まり、クォークのエネルギーから有効核子質量が求まる。有効核子質量は σ 中間子の影響を受けて σ の関数として求まる。よって、核子にクォーク構造を取り入れることができた。第2ステップでは、Walecka モデルと同形の核子と σ 中間子、 ω 中間子からなるラグランジアン密度から出発する。但し、核子と中間子間の結合定数は一定の値ではなく、 σ の関数として核物質の密度依存性を仮定する。ここで、第1ステップと第2ステップを2つの量について関連づける。第1に、核子と σ 中間子の結合定数から求まる有効核子質量と、第1ステップの有効核子質量が等しいとおく。第2に、核物質全体では核子の密度はクォークの密度の3倍になることから、核子と ω 中間子の結合定数がクォークと ω 中間子の結合定数の3倍となるようにする。この関連づけにより、核子の Dirac 方程式、 σ 中間子と ω 中間子の運動方程式を解くことができ、その解を用いて、核物質の結合エネルギー、圧力、有効核子質量、スカラーポテンシャル、ベクターポテンシャル、標準核密度における非圧縮率と歪みの係数を計算できる。第1ステップで求めたクォークの波動関数から核子の平均二乗半径を求める。クォーク質量の変化量と有効核子質量の関係を検討することで、核子がクォーク構造をもつことで、核物質に与える影響を示す因子を抜き出した。

第4章と第5章では、q-ZM1 モデルと q-ZM2 モデルの計算結果を示す。理論的モデルの比較対象として、クォーク構造をもたない核子のモデルである ZM1 モデルと、実験との比較として核子中間子結合定数にパラメータを含んだ Tan らの QMF モデルを

用いた。q-ZM1、q-ZM2 モデルは、ZM1、ZM2 モデルとそれぞれ比較すると、核密度に対する核子の結合エネルギーの変化は良く似ているが、わずかに状態方程式が柔らかくなった。実験の解析から得られている標準核物質に対する結果との比較として、2つの核密度領域における圧力、標準核密度における非圧縮率と歪みの係数、合わせて4つの物理量について検討した。q-ZM1、q-ZM2 モデルの両方ともこの4つの結果すべてを満たした。標準核物質に対して、q-ZM1 モデルと q-ZM2 モデルは、核物質中の核子にクォーク構造を取り込むことができ、かつ良く物性値を再現するモデルであると結論できた。核子-中間子結合定数については、q-ZM1、q-ZM2 モデルの両方で、核子のクォーク構造から核密度に依存する核子- σ 中間子結合定数を導くことができ、核密度の増加とともに減少することがわかった。一方、核子- ω 中間子結合定数については、q-ZM1 モデルでは密度依存性を持たず、q-ZM2 モデルのみ核密度依存性をクォーク構造から導くことができ、q-ZM2 モデルでは核密度の増加とともに減少した。スカラーポテンシャルとベクターポテンシャルについては、実験に合わせた QMF モデルと比較した場合、q-ZM1 モデルで半分程度、q-ZM2 モデルで 2/3 程度の値となり小さくなった。ZM モデルにおいても、小さな値が得られるので、微分結合を用いた影響と考えられる。但し、ZM モデルより大きめの値となり改善しており、q-ZM2 モデルが微分結合を用いたモデルの中で最も良い値を与えた。核物質中で核子が受けるクォーク構造の変化として、核子の平均二乗半径を計算した。核密度の増加に伴って緩やかに増大することがわかった。QMF モデルも同様に増加することから妥当なことだと考えられる。前章で述べた核子にクォーク構造を取り込んだ影響を表す因子は、ZM モデルは 1 となるのに対して 1.35 となり、その影響を因子として取り出すことができた。

第6章に q-ZM3 モデルの結果を示す。平均場近似の範囲では q-ZM3 は標準核密度で結合エネルギーの飽和を再現できない。3種類の q-ZM モデルはクォークと ω 中間子結合のみ異なるが、それは一つの因子 α で表せて、それぞれ 0、1/2、1 の値を取る。この α を連続としてモデルを拡張し、有効核子質量を求めると、 α が 0.5 以上で急激に減少し飽和を再現する解がないことがわかった。そこで、平均場近似の範囲外として、真空のゆらぎの効果を検討した。真空のゆらぎの効果より結合エネルギーの飽和性は再現できるが、標準核密度における非圧縮率は実験値と大きく異なる値となり、有効なモデルとならない。

第7章では、本論文の結論と今後の適用と拡張について述べる。

論文審査の結果の要旨

本研究の目的は、対称核物質(陽子と中性子を同数含む核物質)を記述する核子と中間子からなるモデルに、核子のクォーク構造の効果を取り入れることである。今までにもこのような目的で核物質を研究した例はあるが、申請者は、特に、クォーク・中間子間の微分結合の有効性を検討することで新しいモデルを構築することに成功した。このモデルでは、クォークとシグマ、オメガ中間子の結合定数を標準核密度で結合エネルギーが極小値となるように決定することで、それ以外の核物質の諸性質、例えば、圧力、非圧縮率、歪みの係数、スカラーポテンシャル、ベクターポテンシャル、核子の有効質量、核子の平均二乗半径などを実験誤差の範囲内でうまく再現することに成功している。核子を点粒子として取り扱う今までのモデルと比較して、クォーク構造を取り入れた本研究のモデルの場合には、物理量を再現するために導入されるパラメーターの数を少なくすることができる。このような利点は、核子のクォーク構造効果で核子・中間子の結合の強さが密度に依存して変化することから生じることがわかった。

本論文の内容としては、最初にハドロンレベルの相対論的平均場モデルの代表例として、Walecka モデルと ZM (Zimanyi - Moszkowski) モデルを紹介する。Walecka モデルは核物質を記述するために最初に提示された相対論的平均場モデルであり、核密度の飽和性を良く再現することができる。しかし、非圧縮率(核物質の硬さを表す量)が実験値と比べて大きすぎるという欠点があり、Walecka モデルを単純に高密度核物質に適用することは難しい。一方で、その欠点を改良するために提案されたのが ZM モデルであり、このモデルで初めて点粒子としての核子と中間子間の微分結合が導入された。

次に、本論文の主要な理論となるクォーク・中間子の微分結合が詳細に説明されている。第3章の第2節で、申請者のモデルである q-ZM モデル(クォーク ZM モデル)を解説する。ここでは、構成子クォーク模型を用いて核子を表し、以下の2段階でモデル全体を構築している。

まず、第1ステップでクォーク場とシグマ、オメガ中間子場からなるラグランジアン密度を設定する。クォークは調和振動子型閉じ込めポテンシャルにより核子内に束縛され、そのクォークが核物質中の他の核子から生成されるシグマ中間子やオメガ中間子と相互作用する(中間子場は核子多体系の中で self-consistent に解くことによって求められ、このプロセスは第2ステップで詳説される)。実際にはクォーク・シグマ中間子の微分結合には任意性があり、ここでは3種類の結合型(q-ZM1、q-ZM2、q-ZM3 モデル)を議論している。さらに、これら3種のモデルのラグランジアン密度でクォーク場とオメガ中間子場をリスケールすることにより、モデルの違いをクォーク・オメガ中間子の結合定数に繰り込むことができた。この変型を用いて、シグマ、オメガ中間子の平均場と相互作用するクォークの Dirac 方程式を求め、その解を得ることができた。

第2ステップでは、Walecka モデルと同形の核子とシグマ、オメガ中間子からなるラグランジアン密度を設定し、第1ステップで得た核子中のクォーク自由度の効果を核子・中間子間の結合定数に反映するように結合定数の密度依存性を決定する。この段階では、中間子の平均場と核子内クォーク波動関数の密度変化に関連した結合定数を self-consistent に解く必要があり、申請者はそのような複雑な非線形連立微分方程式を数値的にうまく処理することに成功している。

第4章以降で申請者は、数値計算の結果から核子中のクォーク自由度の効果についての重要な知見を見出している。特に、色々な実験から得られている標準核物質に対する情報や物理量におけるクォーク自由度の効果について詳しく検討を行っている。また、核物質内の核子が感

じるスカラーポテンシャル、ベクターポテンシャルの密度変化や、クォーク質量の変化、核子の平均二乗半径の変化などについても詳しく考察している。

以上のように、本論文では核子多体系内のクォーク自由度に関する重要で新しい知見が与えられている。この結果は原子核・ハドロン物理学に大きく貢献するもので、博士（理学）の学位に充分値するものである。