

氏名(本籍地)	岡本 稔 (東京都)			
学位の種類	博士(理学)			
学位記番号	博甲第 6795 号			
学位授与年月日	平成26年 3月25日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
審査研究科	数理物質科学研究科			
学位論文題目	Three-dimensional calculation of non-uniform structures in low-density nuclear matter and neutron star by a relativistic mean field model (相対論的平均場モデルによる低密度原子核物質と中性子星における非一様構造の3次元計算)			
主査	査	筑波大学教授	理学博士	矢花一浩
副査	査	筑波大学教授	博士(理学)	小澤 顕
副査	査	筑波大学准教授	博士(理学)	森 正夫
副査	査	筑波大学准教授(連携大学院)	博士(理学)	丸山敏毅

## 論 文 の 要 旨

本論文は、中性子表面や超新星コアで実現している低密度原子核物質の非一様構造を、相対論的平均場モデルによる数値計算によって明らかにすることを目的としている。本研究の特長は、従来の研究で通常用いられてきたように構造の幾何学的対称性を仮定する Wigner-Seitz 近似を用いず、周期的境界条件を課した 3 次元大規模セルで計算している点にある。これによって複雑な非一様構造や原子核の結晶構造に関する議論が可能である。以下に論文の各章の内容をまとめる。

イントロダクションである 1 章では原子核とその構成要素である原子核物質の基本的性質、すなわち標準原子核密度(飽和密度)や結合エネルギー、陽子含有率、表面張力などの解説から始まる。続いて天体を構成する物質の特徴である荷電中性条件と、電子を含んだ原子核物質の陽子含有率、対称エネルギー、非圧縮率などの導入をする。

続いて中性子星について、理論的予想に始まりパルサーの発見により中性子星の存在が証明されるまでの経緯、予想される内部構造などが述べられ、標準原子核密度より低い密度の表面層(クラスト)について、中間子凝縮やクォーク物質の出現が予想されている内部の高密度物質について述べている。

次に低密度物質で予想されているパスタと呼ばれる非一様構造について、研究されてきた歴史から始めて、その出現のメカニズムである共存する 2 相の間に働く表面張力とクーロン斥力の釣り合いについて、更にパスタの出現により影響を受ける可能性のある、ニュートリノによる冷却過程や天体の振動との関わりについて述べている。この章の最後に、この論文で明らかにすべき事柄、特に準周期振動に重点を置いて説明し、最後にこの論文の構成を述べている。

2 章では相対論的平均場モデルの導入について述べ、Thomas-Fermi 近似による核子・電子系の取り扱い、および非一様構造を計算する具体的方法について述べている。特に系の基底状態を得るために導

入した局所化学ポテンシャルの一様化について詳しく説明している。

3章からが結果であるが、節ごとに内容を述べる。

まず 3.1 では、超新星コアの物質に相当する陽子含有率が一定の物質について解析している。本来ならば温度が数 MeV から約 10MeV で、ニュートリノを含むレプトンの含有率が一定という条件であるが、温度ゼロ陽子含有率一定で近似する。陽子含有率が一定の系では、以前同じ相互作用を用いた計算が Wigner-Seitz (WS) 近似のもとで行われていて、飽和密度の約 2/3 以下の密度で物質が非一様になり、その構造が球形、棒状、板状、棒状の穴、球形の穴といったいわゆるパスタ構造となる結果が得られている。この WS 近似を用いた計算では、幾何学的対称性を持った構造以外は現れないが、今回の計算でパスタ構造が基底状態となることが確かめられた。また、励起状態として 2 種類の構造の混合構造などのエキゾチックな構造が観測された。

3.2 では、中性子星表面物質にあたる温度ゼロのベータ平衡な系を扱っている。これまでの WS 近似による計算では球形構造しか現れなかったが、円筒形構造も現れるようになったこと、球形原子核の結晶の種類が、低密度で体心立方、高密度側で面心立方となること等が分かった。

3.3 では、得られた基底状態をゆがめたときに系のエネルギーがどのように変化するかを用いて、中性子星表面物質の剪断係数を計算している。クーロン格子による解析的計算と比較している。

3.4 では、ここまでの計算と少し変わって、中性子星の内部の高密度物質で予想されている K 中間子凝縮での非一様構造を扱っている。低密度領域では希薄な核子気体と飽和密度に近い原子核物質の液体からなる混合相であったのに対し、ここでは K 中間子が凝縮した物質と通常原子核物質の混合層が構造を持つ。この章では改めて相対論的平均場模型に K 中間子の自由度を入れた Lagrangian の導入から始めて、密度の変化に応じて一連のパスタ構造が現れる様子、それによる状態方程式の変化などを報告している。

4章でまとめと展望が述べられている。

## 審 査 の 要 旨

[批評]

原子核物質の一次相転移に伴う構造を持った混合相は、1983年に Ravenhall、翌年 Hashimoto らが原子核パスタを提唱してから、原子核物質の非一様構造に関する多くの研究が様々な手法によりなされた。それらの多くの場合では Wigner-Seitz 近似を使うなど、構造の幾何学的対称性を仮定した計算によるものであった。対称性を仮定すると計算コストが大幅に節約できるが、得られる構造に対する制限が非常に大きい。対称性を仮定せずに 3次元空間で周期的境界条件を用いる計算でも、一部の分子動力学計算を除き、セルサイズが小さいため単純な構造しか扱えなかったり結晶構造に関して議論できなかつたりといった制約があった。本研究は、平均場模型による数値計算を 3次元大規模セルで行ったもので、上に挙げた制限を一気に取り去ったものである。その結果、超新星コアや中性子星表面の低密度原子核物質で予想されてきたパスタ構造が基底状態となることを、より確かなものにした。

また、原子核の結晶構造はクーロンエネルギーを最低にする体心立方格子となるというのがこれまでの定説であったが、これを覆し、球形原子核が棒状になる直前の高密度側と、棒状穴が球形穴になった直

後の低密度側に面心立方格子の領域がある事、そこではクーロンエネルギーは損するが原子核のサイズや陽子含有率が変化して系全体のエネルギーでは得するようになっている事を、初めて明らかにした。

これらの成果を原著論文2本に公表している。また剪断係数の計算や、高密度でのK中間子パスタの計算についても論文投稿の準備をしている。以上のことから、著者は高い研究能力を有すると認められる。

#### [最終試験結果]

平成26年2月17日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

#### [結論]

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。