

## 論文審査の結果の要旨

氏名 渡邊 元太郎

本論文は、9章からなり、第1章は序、第2章が中性子星の中心付近に存在すると考えられる原子核パスタのレビューにあてられている。第3章以降が、論文提出者のオリジナルな研究に対応し、平衡状態における核物質の相図と原子核パスタの出現（第3章）、摂動法に基づく原子核パスタの安定性（第4章）、原子核パスタにおける遮蔽効果（第5章）、を議論した後、第6章から第8章が量子分子動力学を用いた原子核パスタ生成の研究成果の紹介である。第9章が結論で、いくつかの補足的な話題が付録AからCで論じられている。

星の進化の最終段階である超新星爆発の結果、中心部には、中性子を主成分とする極めて高密度な天体、即ち中性子星が残される。超新星や中性子星といった高密度天体の性質並びにこれらの天体における現象を理解するにあたって、それらの内部に存在する高密度核物質の性質やそこでの原子核の状態を調べることは必要不可欠である。これらの物質は常温常圧における地上の実験室では見られないような興味深い相を示す。

Ravenhall et al. (1983) と Hashimoto et al. (1984) は、核の表面エネルギーとクーロン格子エネルギーとのバランスの議論から、中性子星内殻底部並びに超新星コアといった部分では、球状の原子核から一様核物質に融解していく中間の密度領域において、スパゲッティのような円柱状やラザニアのような板状の原子核がクーロン結晶を組んだ相、及び一様核物質に円柱状や球状の孔が空いたようなバブル状の相がエネルギー的に最安定な状態として存在し得るという興味深い結果を得た。このような非球状の原子核は、その形状から “Nuclear Pasta” と呼ばれている。

本論文ではまず「温度ゼロの基底状態において、“Nuclear Pasta” は不定性の大きな核モデルに対して普遍的に存在するものなのか？」という問題を考察した。Baym, Bethe & Pethick (1971) による可圧縮液滴モデルを基にして、高密度物質の不定性を取り込むようにこれを拡張した。中性子星物質での不定性の中で、“Nuclear Pasta” の発現の可否を左右するものとして考慮すべきものは、核の表面張力  $E_{\text{surf}}$  と、純粋な中性子物質における陽子の化学ポテンシャル  $\mu_p^{(0)}$  である。超新星物質においては、上記の物理量以上にニュートリノの縮退の度合いに左右される lepton fraction  $Y_L$

の不定性が重要になってくる。これらのパラメータに対する現実的な領域を考えると、温度ゼロの下、標準核密度（核子数密度  $\rho = \rho_0 \simeq 0.16\text{fm}^{-3}$ ）近傍では、バブル状の相も含む考慮した全ての Pasta 相が、核モデルによらず極めて普遍的にエネルギー最安定の状態となるということがわかった。

この結論を受けて、次に「少なくとも中性子星の冷却やコアの崩壊の時間スケール以下の有限の時間スケールで、動的なプロセスを通して Pasta 相が形成され得るか」という問題の考察に進んだ。この目的のためには、動的かつ核の構造を仮定しないような議論が必要不可欠であり、“量子分子動力学法（QMD）”と呼ばれる方法を用いることにした。

具体的には、高温（ $T \simeq 20\text{ MeV}$ ）の一樣な核子気体を初期条件として用意し、これを摩擦緩和法等によって  $10^3\text{--}10^4\text{ fm}/c$  のオーダーの時間スケールで極めて緩やかに冷却することで基底状態の実現を試みた。核子間相互作用のハミルトニアンとしては Maruyama et al. (1998) によるものを用い、相対論的縮退電子は一樣なバックグラウンドとして扱った。シミュレーションの結果、核の形状を仮定せずとも、動的なプロセスを通して一樣核物質から密度に応じた“Nuclear Pasta”の各形状が発現していることがわかった。この結果は、現実の高密度天体内部においても Pasta 相が存在することを強く示唆するものである。

今回の QMD シミュレーションによって得られた温度ゼロにおける高密度物質の相図は、従来の Pasta 相のような単純な形状やそれらの共存とは全く異なった複雑な構造をした「中間相」の存在が明らかになった。この中間相における核の構造について、オイラー数を求めたところ、これらの構造は「負のオイラー数」という一言で特徴づけられることが分かった。中間相における負のオイラー数とは、核の部分とガスの部分の両者それぞれでつながった領域を構成していることを示しており、定性的にはスポンジの様な多孔質物質となっていることを意味する。cylinder, slab 相については、それらの構造上の類似性から、液晶と共通する弾性を持つことが知られているが、今回新たに示されたスポンジ的な相は、液晶的な相と交互に現れる形で高密度天体内部に存在するということが示唆される。

なお、本論文の一部は、佐藤勝彦、飯田圭、戎崎俊一、泰岡顕治 との共同研究に基づくものではあるが、実質的な計算とその結果の解析の全般にわたり提出者が中心となって行ったものであり、その寄与が十分であると判断する。

したがって博士（理学）を授与できると認める。