

中性子星の中にパスタ？

1 はじめに

中性子星とはその名の通り、主に中性子でできた星である。その内部に存在する**原子核パスタ**と呼ばれる原子核の変わった構造について説明する。

2 中性子星とは

2.1 進化の過程

星は星間ガスが重力収縮することで誕生し、コアができると水素の核融合が始まって**主系列星**となる。主系列星は質量によって進化の仕方が異なる。太陽質量の8倍以上の星は、コアで核融合が進み重い元素の原子核ができ、最も安定な元素である鉄ができると反応が止まる。するとコアは自身の重力を支えきれなくなって重力収縮し、崩壊が止まった際に衝撃波によって星の外側が吹き飛ぶ(**超新星爆発**)。爆発の際に陽子が電子を捕獲して中性子となり、爆発後中性子を多く含んだコア、すなわち原子核の塊が残りが中性子星となる。[1]

2.2 特徴

半径は10km程度、質量は太陽の1-2倍程度。表面温度は10億 $^{\circ}\text{C}$ 。質量密度が大きく強い重力場を持つので(表面で地球の1000億倍)、一般相対論的な効果が働き、限界質量が存在する。また、核が重力収縮する際に角運動量を保存するので、自転周期が非常に短い(最速で100回転/秒)。強い磁場を持つものは磁極から電波パルスを直線的に放出し、磁軸と自転軸がずれていると**パルサー**として観測される。

2.3 内部構造

中性子星は中性子のみでできているわけではなく、中心に向かって密度と温度が高くなるにつれて、異なる状態の物質の層が存在する。一番外側の層は、球形な原子核が**クーロン反発**によって作る結晶と縮退した電子からできている。一方、密度が高くなって原子核内部と同じ程度になると、原子核は溶けて核子(陽子、中性子)が一様に分布する層が現れる。球形の原子核から一様な核子に変化する途中で、核子間に働く**核力**による引力と、陽子間に働く**クーロン力**による斥力との釣り合いで、複雑な構造の原子核ができる。これが**原子核パスタ**である(図1)。

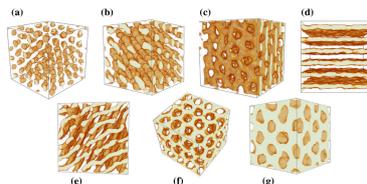


図1: 原子核パスタの構造。黄色の部分が原子核。密度が高くなると(a)→(g)へと変化する。(a) ニョッキ (b) スpaghetti (c) ワッフル (d) ラザニア (e) 欠陥 (f) アンチspaghetti (g) アンチニョッキ。[2]より引用。

3 原子核パスタ

原子核パスタの構造の変化について考える。すなわち、密度を変化させたとき、原子核のエネルギーが最も小さくなる構造を考えれば良い。

原子核を、密度体積一定で変形可能な液体の雫とみなす**液滴模型**を用いると、そのエネルギーは体積に比例する**体積エネルギー** $\omega_V \cdot$ 表面積に比例する**表面エネルギー** $\omega_S \cdot$ クーロン力による**クーロンエネルギー** ω_C の和でかける。このうち、 ω_V は構造によらず一定、 ω_C はエネルギー密度の平衡

(安定)条件を考えると、 $\omega_S = 2\omega_C$ となるので[3]、 ω_S のみ考えれば良い。すなわち、密度を変化させた時、パスタは表面積が最小となる構造をとる。

密度が低い時、原子核は**球形**をしている(図1(a))。密度が高くなり隣の原子核との間隔が狭くなると、接触した方がその分だけ全体の表面積が小さくなるため、(b) **円柱形**、(d) **平板**へと変化する。一方、密度が一樣な状態、高密度な状態から密度を下げていくことを考える。はじめは**球形のパブル**(原子核の存在しない部分)ができて(g)、さらに密度を低くすると(f) **円柱形**、(d) **平板**へと変化する。

現在では、シミュレーションを用いて詳細な構造を解析する研究が多い。構造がわかると、**静的構造因子** $S(q)$ 、すなわち、パスタによって電子などの粒子が散乱される様子がわかる(q : 散乱前後の粒子の運動量の差)。電子は熱や電気を伝えるので、構造因子から**熱伝導率**や**電気抵抗率**などの性質を求められる。パスタ構造は複雑なので熱伝導率が低いため、中性子星の表面温度が低くなると考えられ、実際に原子核パスタの存在を仮定した方が観測結果をより良く説明する。

参考文献

- [1] 高原文朗.“宇宙物理学”第2巻 朝倉書店(2022)。
- [2] M. E. Caplan and C. J. Horowitz. “Astromaterial science and nuclear pasta” Rev. Mod. Phys. **89**. (2010): 100–199.
- [3] H. et al.. “Shape of nuclei in the crust of neutron star” Progress of Theoretical Physics, **71.2** (1984): 320–326.