

## 中性子星内部の強磁場を考慮したクォーク物質の状態方程式

Equation of state for quark matter with strong magnetic fields inside neutron stars

遠藤 友樹 (ENDO Tomoki)

近年、重力波(Gravitational Wave)が度々観測され、非常に興味深い結果が報告されつつある。中でも著名な GW170817 は中性子星同士の衝突とされ、この衝突によって重元素が合成されたという報告もされている（宇宙の進化において、重元素がどのように合成されたかは明確には分かっていない）。中性子星は“ブラックホールの一步手前”の物質の極限状態が実現した対象として非常に興味深く研究されている。しかし物質の極限状態の解明には状態方程式(Equation of State : EOS)が必須であるが、中性子星のような物質の EOS の詳細は未解明の部分が非常に多い。

中性子星はその名の通り、大半は中性子で構成された星であり、中性子は陽子と共に核子と言われているが、核子同士の相互作用（強い相互作用）の概要は一定の理解を得ているものの、理論的には不明な部分が多い。特に、核子同士の近距離での相互作用は、その斥力芯があるのは知られているが、核子を構成するクォークの力学（量子色力学）の特性が色濃く出現するため、詳細は良く分かっていない。然しながら、星の中心部付近での高密度状態は核子が“核子でいること”を困難とし、構成子であるクォークへ「溶けている」可能性が高く、クォーク物質の力学が必要不可欠となっている。この強い相互作用に基づいた EOS も容易ではないが、近年では星の高速回転や強磁場をも考慮することが必然となっており、我々は強磁場に注目している。

通常の中性子星はその表面磁場はおよそ  $10^{12}$  G 程度の強い磁場をもつことが分かっている。この“通常の中磁場”の起源も不定性があるが、問題は根深く、さらに3桁も大きい表面磁場を持つ「超強磁場中性子星（マグネター）」が幾つも観測されている。つまり、表面磁場が  $10^{15}$  G 程度の星であり、簡易的に見積もっても星の中心部付近の磁場はおよそ  $10^{18}$  G 程度にも達すると予測されている。このオーダーになってくると、磁場は強い相互作用に匹敵するスケールを持つようになる。例えば  $1.0 \times 10^{19}$  G をエネルギーとして換算すると、 $(240 \text{ MeV})^2$  程度になり、強い相互作用に有意に影響することが分かる。すると必然的にランダウレベルが無視できなくなる。

これまでの研究でクォーク相の Lowest Landau Level (LLL) のみを考慮した結果、状態方程式は非常に硬くなることが知られているが、LLL が影響するのは  $10^{20}$  G ほどの更に強力な磁場であり、現実的な磁場として  $10^{17}$ - $10^{18}$  G ほどの領域を調べる必要がある。そこでまずは LLL より磁場が下がる Second Landau Level (2LL) を考慮することにした。この 2LL では  $10^{19}$  G ほどの領域となり、LLL よりも1桁小さい磁場領域を調べる

ことが出来る。この 2LL までを考慮した強磁場中のクォーク物質に対する EOS を導出し、相対論的星を計算する際の基本である TOV(Toleman-Oppenheimer-Volkoff)方程式に適用して星の質量を計算したところ、2LL でも 2.0 倍の太陽質量を超える星を支えられることが分かった[1]。然し既述したように、2LL は磁場としてはまだ強く、今後は更に下がった領域を調べる必要がある。

[1] T. Endo, H. Sotani and T. Tatsumi, *Journal of Physics, Conf. Ser.* **1468**, 012087, (2020).