

## 強磁場を考慮したクォーク核物質の状態方程式

Equation of state for quark matter with strong magnetic fields

遠藤 友樹 (ENDO Tomoki)

超新星爆発後にはブラックホールや中性子星が残されるが、この中性子星は観測可能な天体であり、かつ物質の極限状態（超高密度、強重力、強磁場、高速回転など）が実現している対象として「宇宙の実験室」と言われている。解明には高密度物質の状態方程式(Equation of State : EOS)が必須であるが、EOSの研究は太陽質量の2倍の中性子星の観測報告以来、その「硬さ」が着目されるようになってきている。

特に、星の中心部付近では超高密度のために、通常の陽子や中性子はその個性を失い、ハイペロンやクォークなどのエキゾチックな相になっていると考えられているが、このような相はEOSを極端に軟化させることが知られており、これらのエキゾチックな相を入れた場合は2.0倍の太陽質量を支えることが困難となることが知られ、“ハイペロンパズル”と言われている。このため、EOSの研究では「硬化」させる何等かの寄与を導入する試みが多く行われている。さらに近年、重力波の観測（GW170817）が報告され、様々な課題が提示されているが、特に中性子星の半径の範囲が狭められたことは、EOS研究に更なる条件を課したと言える。半径についてはこれまでX線バースト等、観測手段が少なかったこともあり、不定性が数kmもあったが、GW170817の報告から12~13km程度とかなり狭められた。数kmもあった許容範囲が1km程度になったことは相当な衝撃であるのは想像に難くない。EOS研究はかつてない程、観測との適合性を求められるようになってきたと言える。

このような状況の中で、我々は強磁場に注目している。中性子星の多くはその表面磁場が $10^{12}$  G程の強い磁場をもつことが知られ、この強磁場の起源も明確になっていないが、さらなる問題として、超強磁場中性子星（マグネター）という、表面磁場が $10^{15}$  Gに達するものも報告数が増えており、磁場については益々謎となっている。このようなマグネター内部の中心磁場は $10^{18}$ - $10^{19}$  Gにも達すると予測されているが、その様に非常に強い磁場中ではランダウレベルが無視できなくなる。例えば $1.0 \times 10^{19}$  Gをエネルギーとして見積もってみると、 $(240 \text{ MeV})^2$ 程度になり、強い相互作用にも比肩する有意な影響があることが想定される。

共同研究者である祖谷・巽の論文 [1]では、クォーク相のLowest Landau Level (LLL)を考慮した結果、状態方程式は非常に硬くなり、太陽質量の2.8倍を支えられる程になることが分かった。しかし[1]の研究はLLLのみに留まっており、かつまた $\beta$ 平衡を考慮していなかった。このため、本研究ではまず $\beta$ 平衡を課し、かつSecond Landau Level (2LL)を考慮した計算を行い、EOSの導出を行った。この結果、EOSは

LLL のみの場合ほどではないが、十分に硬い性質を示し、実際に星の質量を計算すると、LLL と 2LL の臨界磁場の中間値で 2.3 倍、2LL の臨界磁場でも 2.0 倍の太陽質量を支えられることが分かり、十分に硬い EOS となることが分かった。

[1] H. Sotani and T. Tatsumi, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **447**, 3155 (2015).