

中性子星の最大質量の問題と強磁場下でのクォーク物質

Neutron star maximum mass problem and quark matter under strong magnetic fields

遠藤 友樹 (Endo Tomoki)

中性子星の質量は太陽質量の 1.4 倍程度とされてきましたが、2.0 倍の太陽質量をもつ中性子星の観測報告以来、最大質量は大きな問題となっています。星の内部を記述する高密度物質の状態方程式は、第 1 原理計算である格子 QCD (Quantum Chromodynamics) が有限密度では困難（符号問題）であることから、様々なモデル計算が提案されています。しかし近年、NASA による NICER (Neutron Star Interior Composition Explorer) の観測が進展し、状態方程式に様々な制限が課されるようになってきました。

中性子星の多くは表面磁場が 10^{12} G 程度として観測されていますが、更に 3 桁も強い 10^{15} G 程度の表面磁場をもつ超強磁場中性子星 (マグネター) も多く観測されています。星の内部では、表面よりも磁束密度がより高くなることから、磁場は更に強力になると考えられ、マグネターのような非常に強力な磁場をもつ星の中心部付近では 10^{18} G 程度にも達するという報告もあります。これほどの強力な磁場の環境下では、磁場の影響は陽子や中性子などの核子や、それらを構成するクォークといった粒子の相関である「強い相互作用」に比肩するほどの強さを持ち、特に荷電粒子はランダウレベルに離散化された影響が無視できず、状態方程式を変えるほどの影響があります。これまでの研究では、1st から 2nd レベルまでを考慮した状態方程式を作成し、太陽質量の 2.0 倍程度を支えられることが分かっていますが、対応する磁場が 10^{19} - 10^{20} G 程度とやや強いことが難点であり、より高次のランダウレベルを考慮することが必要となっています。然し 3rd レベル以上となると、状態方程式は煩雑化し、状態方程式の構築は容易ではないことが分かってきました。

また近年、強力な磁場のもとでは、高密度物質の圧力に非等方性が生じることが注目されています。磁場には方向があり、磁場に平行な方向と垂直な方向では圧力への寄与が大きく異なりますが、磁場の値が小さければこの差異による影響は少ないものの、星の中心部付近の様な非常に強力な磁場では、物質の状態方程式を有意に変えるほどの影響を持つことが分かってきました。しかし現実の磁場はトロイダル方向やポロイダル方向といった複雑な影響が絡むために精確に取り入れることは難しく、まずは極方向に磁場が一律に向いていると仮定し、この極方向と赤道方向とで異なる圧力の表式を取り入れることが試行されています。この影響により、星の形状は赤道方向が膨らみ、星は回転楕円体の様な形状となることが想起されますが、相対論的星を記述する Einstein 方程式の解の 1 つである TOV (Tolman-Oppenheimer-Volkoff) 方程式は、球対称かつ非回転かつ静的の条件であることから、星の変形を考慮した計算をすることが求められています。然しながら、変形した星の計算は非常に容易ではないことから、圧力の非等方性

に着目し、圧力が大きくなる場合と、圧力が減少する場合について計算した結果を示しました[1]。これにより、星の最大質量にも影響が出ることが分かりました。

[1] T. Endo, “Equation of state for strongly magnetized quark matter and hybrid stars”, SKCM² Spring Symposium 2024.