

クォーク物質の状態方程式への強磁場の影響と高密度星への適用

Impact of strong magnetic fields on the equation of state for the quark matter and its application to high-density stars

遠藤 友樹 (Endo Tomoki)

太陽よりもはるかに重い恒星は、その終焉に超新星爆発を起こすとされており、その“残骸”の1種である中性子星は、既におよそ 2000 個以上観測されている。この中性子星は、超高密度、強重力、強磁場、高速回転といった「物質の極限状態」が自然界に体现した“究極の物体”とも言える。ブラックホールは一般的にも良く知られているが、現状で放出される電磁波等が観測可能な天体としては中性子星が「極限」である。

中性子星は超高密度に物質が詰まった星であるが、星の中心部に行くに従い、自らの重力に押しつぶされ、密度は更に高くなり、原子核すら崩壊し、その原子核を構成している陽子や中性子も“個性を失い”、陽子・中性子を構成するクォークにまでなっていると考えられている。クォークは物質の構成要素であり、所謂、全ての物質をつくっている基本粒子として理解されている。このクォークは、通常では陽子や中性子の中に「閉じ込められて」おり、単体として出て来ることはない。しかしながら、中性子星中心部では、その「極限状態」のために、クォークが閉じ込めから解放され、クォークで満たされた領域があると考えられている。これがクォーク物質である。

中性子星の表面磁場は、観測によると一般的におよそ 10^{12} G の強さを持つことが分かっている。現在、地球上で最も強い「永久磁石」とされるネオジウム磁石は、数千から数万 G の強さを持っている。簡単のために、 10^4 G とすると、中性子星の表面磁場はネオジウム磁石より 8 桁（1 億倍）も強い。また、実験室等で生成される磁場としては、近年およそ $1000 \text{ T} = 10^7 \text{ G}$ が生成できるとされているが、それでも中性子星の表面磁場は更に 5 桁（10 万倍）も強いことが分かる。つまり地上では未だに実現出来ないほどの強さを持っている。中性子星が自然界にそのまま存在し続けている“永久磁石”と考えると、その偉大さに圧倒されてしまう。そして更には、一般的な中性子星よりも表面磁場が更に 3 桁強い磁場、 10^{15} G をもつ「超強磁場中性子星（マグネター）」がいくつも観測されており、まさに自然界の驚異と言わざるを得ない。

これらの観測値は星の表面磁場の強さであることから、星の中心部に向かうに従って、磁束密度はより高くなり、星の中心部では 10^{17} G あるいは 10^{18} G といった強さをもつと考えられている。ここまでに強力な磁場中では、クォーク物質は、磁場の影響を有意に受け、ランダウレベルと言われる離散的なエネルギー状態に束縛され、物質の性質として大きな影響を受けることになる。

クォーク物質がこの様な強磁場下でどのように振る舞うかは、中性子星の内部を理解する上で重要であり、強磁場はクォークのスピンや荷電状態に影響を与え、それによっ

て中性子星の状態方程式に変化をもたらすと考えられる。この影響を精確に理解することは、中性子星の質量、半径、冷却率などの観測量と理論的予測を一致させるために不可欠とされており、最近の研究では、強磁場下でのクォーク物質の状態方程式を改良し、実際に簡易的なランダウレベルまでを考慮すると、状態方程式は如実に「硬化」され、重い星の質量を十分に支えられることが分かった。この結果、中性子星の内部構造について新たな洞察を提供することが可能となりはじめており、今後の進展により、中性子星の質量や半径の推定精度が向上し、我々の宇宙の最も密な天体についての知識を深めていくことが期待される。