



中性子星最大質量 (Neutron star maximum mass)

飯田 圭 (高知大学理学部)

高密度天体は、その内部物質の性質（特に状態方程式や輸送特性）を探る上で、「地上にない実験室」としての役割を担ってきました。白色矮星においては高密度プラズマが、中性子星においては核物質が、地上の実験では容易に窺い知ることのできない高い密度で存在します。これら天体の観測と高密度物質は、星のモデルを介して、互いに強く関連しています。チャンドラセカールやランダウによる理論上の業績、パルサー発見などの数々のブレークスルーに端を發し [1]、依然として観測・理論両面において相補的研究が進められています。最近になって、ある特殊なパルサーが約2倍の太陽質量を有する中性子星であると観測的に結論づけられました [2]、これは中性子星の中身をよりよく知る上で役に立ちそうです。

高密度天体の構造上の特徴は、主としてフェルミ粒子系の縮退圧で支えられているという点にあります。縮退圧の源が主に電子の場合を白色矮星と呼び、中性子の場合を中性子星と呼び、（存在は確かではありませんが）クォークの場合をクォーク星と呼ぶのが最もナイーブな区分でしょう。中性子星やクォーク星については、一般相対論の効果がグローバルなスケール（スケールハイト）で効いてきます。高密度天体では、収縮や核プロセスで熱エネルギーを捻出することがもはやできず、多かれ少なかれ冷え続ける運命にあります。内部物質が縮退していることの重要な帰結は、熱伝導率が高いという点です。すると、星の内部領域はほぼ一様な温度分布を示すことになります。

図1に、高密度天体の質量・半径関係の概要を示します。中性子星の質量・半径関係を特徴づけるものの一つが、ここでの主題である中性子星の最大質量です。標準核密度をこえた領域では、内部物質の状態方程式がよく定まっていないため、天体の半径が小さくなるにつれ、質量・半径関係の不定性も増します。観測的には、精度に限界がありますが、X線バースト現象を示す中性子星の連星系で質量・半径、さらには状態方程式を決めようという試みがあります。一方理論的には、状態方程式の不定性の原因として、核子多体系としての難しさ（核力、多体問題など）のみならず、そもそも核子以外の自由度（パイ中間子、ハイペロン、クォークなど）が入り込む余地がどの程度あるのかがはっきりしない点が挙げられます。

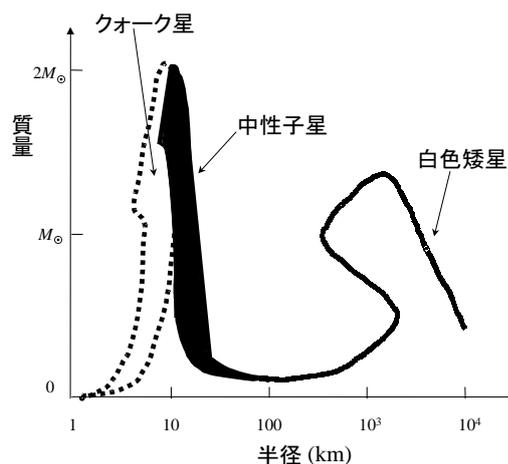


図1 高密度天体の質量・半径の概略 (幅は状態方程式の不定性による)

次に、これまで観測されてきた白色矮星と中性子星がどのようなものなのかを概観します。図2にあるように、孤立した天体、近接連星系をなす天体では、観測量や推定可能な天体の性質（半径 R 、質量 M 、表面磁場 B 、自転周期 P など）が大きく異なります。孤立した天体では、輻射は主に星内部の熱エネルギーや自転のエネルギーを起源とするのに対し、近接連星系の一部は、伴星からあふれ出た質量の降着を起源としています。従って、近接連星系は、しばしば爆発的現象を伴います。中性子星は、主にパルサーとして観測されます。孤立したパルサーは電波領域でよく観測されますが、パルスは、電磁波を放出する磁気圏が自転とともに動くことにより生じると考えられています。次で述べるように、ミリ秒の周期でかつ白色矮星と連星系を形成しているパルサーの一つ PSR J1614-2230 が最近話題となっています [2]。

このパルサーは、伴星が白色矮星であるため、中性子星同士の連星系に比べて公転運動に対する一般相対論的効果が小さいのですが、地球から見ると軌道面がほとんど寝ているという幸運がものをいいました。実際、パルスが白色矮星のそばを通過して地球に届く場合、そうでない場合と比べて、パルス到着時間の遅れが明確に観測されています。その遅れを一般相対論的な光線の速度変動によるもの（シャピロ遅延）と解釈することにより、公転周期や公転速度の情報と総合して、精度よくパルサーの質量を決定することができましたが、その値が $(1.97 \pm 0.04)M_{\odot}$ にも達しました。¹

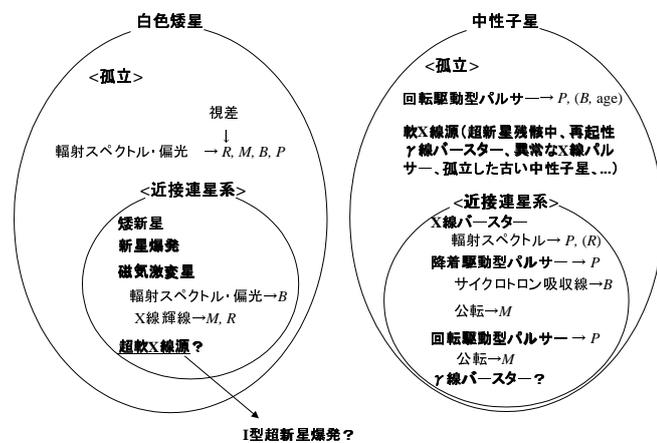


図2 観測されている白色矮星・中性子星

すると中性子星最大質量は、約2倍かそれ以上と考えてよさそうに思われます。ただし、ここでいう最大質量とはあくまで理論的なもの（オープンハイマー・ボルコフ方程式によって与えられる静水平衡解が重力崩壊に対して不安定となる状況に相当）で、現実の系で問題となる自転、磁場、有限温度、平衡からのずれ等は勘案されていません。とはいえ、ミリ秒の周期、一部の軟 X 線源において想定される超強磁場をもってしても、最大質量への影響は無視できそうです。

理論的には、もしある密度まで状態方程式が正確にわかっている場合、そこから音速 = 光速で状態方程式を外挿することにより、中性子星最大質量の上限値を得ることができます [3]。将来、理論的の上限値と観測値の差が狭まり、中性子星最大質量がよい精度で決まることを期待したいところです。

[1] 例えば、S.L. Shapiro and S.A. Teukolsky, *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars* (Wiley, New York, 1983).

[2] P.B. Demorest et al., *Nature* **467**, 1081 (2010).

[3] C.E. Rhoades and R. Ruffini, *Phys. Rev. Lett.* **32**, 324 (1974).

¹以前にも、例えば降着駆動型パルサーを含む X 線連星系 Vela X-1 において、パルサーが約 2 倍の質量をもつ可能性が示唆されていましたが、精度が問題視されていました。