

天体核物理と高密度 QCD 物性の新展開



古城 徹

華中師範大学
toruji@mail.ccnu.edu.cn

「強い力」の基礎理論である量子色力学 (QCD) は、カラー電荷を持つ素粒子、クォークとグルーオンの動力学である。クォークとグルーオンは、カラー電荷を中性にする組み合わせでハドロン (複合粒子) に閉じ込められる (カラーの閉じ込め)。

低エネルギーではカラー中性のハドロンが有効自由度であるが、高温・高密度ではカラー自由度が顕在化する。高温ではハドロンのガスからクォーク・グルーオン・プラズマへの相転移が起こる。この相転移は、重イオン衝突による加熱圧縮実験と格子 QCD に基づく第一原理計算やモデル解析により詳細に研究されている。

一方、低温で原子核を圧縮すると、まず多数のハドロンからなるハドロン物質、次いでクォーク物質になると考えられているが、その多体問題の記述は確立されていない。実験として、重イオン衝突による圧縮が考えられるが、高エネルギー実験では低温が実現せず、低エネルギー実験では高密度に達しない。ところが宇宙に目を転ずれば、中性子星という超高密度天体が存在する。中性子星は高密度における QCD 物性を観測できる天然の実験室系である。

たくさんの中性子星を観測していくと、それらが一つの質量・半径関係式を構成する。これは中性子星内部の状態方程式と一対一対応なので、原理的には観測から高密度 QCD の状態方程式を直接決めることができる。

これまで質量と半径の同時観測は難しい問題だったが、ここ十年程度でその状況も変わりつつある。特に2倍の太陽質量を持つ重い中性子星の発見、中性子星合体現象の観測、といった歴史的発見があった。前

者は、高密度物質が過去に考えられていたよりもずっと硬い——そうでなければ自己重力で潰れてブラックホールになる——ことを示唆する。後者は、重力波、電磁波、ニュートリノによる複数の観測量から天体現象を多角的に解析するマルチメッセンジャー天文学の幕を開き、今後計画されている観測により飛躍的な進展が予想される。

以上の観測の進展と、理論計算が有効な領域の情報とを組み合わせることで、QCD 物性に対する理解もまた深化する。低密度の原子核物理を考慮に入れたうえで高密度領域を考えたとき、2倍の太陽質量を持つ中性子星の中心部では、その密度が核子が重なり合うほどに大きいことが示唆される。ここではクォークに基づく記述が必要であろう。しかしこのクォーク物質は非常に硬いという点で、以前に用いられていた記述の範疇に収まらない。

特に今までよく用いられてきた、ハドロン物質とクォーク物質を1次相転移によって隔てる記述は、1次相転移による物質の軟化が柔らかいクォーク物質を導く、という点でやや具合が悪い。ここにハドロン物質、クォーク物質とは何か、という基本的な問いに立ち返る必要が出てくる。

この文脈で、「クォーク・ハドロン連続性」や「quarkyonic 相」といった、ハドロン物質とクォーク物質を相転移なく連続的につなげる新しい型の記述が現象論に活用されつつあり、一定の成功を収めている。より詳細な検証は、物質科学としての QCD にとって基礎的課題であり、また今後の中性子星の観測を予言・解釈する際に重要となる。

用語解説

量子色力学 (QCD) :

「強い相互作用」の理論。カラー電荷を持つ素粒子を基礎自由度として、それらの複合粒子として陽子・中性子、あるいは π 中間子などが現れる。

クォーク :

カラー電荷を持つフェルミオン。電磁気学における電子に対応。

グルーオン :

カラー電荷を持つゲージボソン。電磁気学における光子に対応するが、(カラー)電荷を持つ点で光子とは異なり、非線形効果、強い量子効果を導く。

ハドロン :

陽子・中性子や π 中間子といった、クォークとグルーオンからなる複合粒子で、カラー電荷を打ち消す組み合わせからなる。

中性子星 :

半径 10 km 程度に太陽質量程度が収まった、超高密度天体。中性子以外の粒子を含む場合にも中性子星と呼ぶのが慣例。

