



## クォーク・ハドロン・クロスオーバー

古城 徹

東北大学大学院理学研究科

中性子星は、標準核物質の2-5倍程度のバリオン密度を持つQCD物質の舞台であり、その中心付近でクォーク物質が発現している可能性があります。核物質からクォーク物質への転移の理解は、近年目覚ましい進展を見せる中性子星の質量・半径関係式等の観測結果の解釈に必要不可欠です。この文脈でクォーク・ハドロン・クロスオーバー転移の可能性について議論します。

量子色力学 (QCD) において、基礎自由度としてのクォーク・グルーオンはハドロンに閉じ込められていますが、ハドロン同士が重なり合う程度に圧縮していけば、内在する自由度がより直接的に物理現象に現れます。このような極限状況下にある QCD 物質の性質を調べるのが「QCD 物性」の分野で、主に温度とバリオン密度 ( $n_B$ ) を軸に取った QCD の相図を完成させるべく、実験・理論が緊密な連携を取りつつ研究がなされています [1]。

高温・低バリオン密度の領域では、温度を上げるにつれハドロン物質がクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) へ転移しますが、それぞれが一見全く異なる自由度に支配されているにも関わらず、転移がクロスオーバー型であることがわかっています。ここでは格子 QCD による第一原理モンテカルロ計算が重要な役割を果たしました [2]。一般に自由度の変更を含む転移領域は摂動論的記述の範疇を越えるので、格子 QCD から得られる非摂動的な情報は重要です。

低温・高密度の QCD 物質についてはどうでしょうか。低密度では核物質を含むハドロン物質があり、高密度においてはクォーク物質が実現されているはずですが。問題はハドロン物質とクォーク物質の中間領域ですが、この種の問題に適した格子 QCD 計算は、「符号問題」と呼ばれる問題のためこの領域には適用できません。純ハドロンの模型と純クォーク的模型を素朴に比較すると一次相転移的な記述になり、従来これが標準的模型として用いられてきました。しかし高温領域での経験を踏まえれば、クロスオーバーの可能性についても考えてみる必要がありそうです。この問題について考えるには、純ハドロン物質、純クォーク物質の適用範囲を規定しておく必要があります。

ハドロン物質としての核物質を研究する最も系統的な手法は、散乱実験等で決めた2体・3体核力を用いた微視的多体系計算です [3]。その計算は、標準核物質密度 ( $n_0 \simeq 0.16 \text{ fm}^{-3}$ ) の2倍程度のバリオン密度領域で2体、3体力の寄与が同程度になり、従って4体力以上が重要であることを示唆しています。中間子交換等のハドロン間力がクォーク交換により媒介されていることを考慮すれば、 $n_B \sim 2n_0$  であってもクォーク自由度を考慮に入れる必要がありそうです [4]。

クォーク物質については、まず摂動論的 QCD 計算の適用範囲は  $n_B \sim 40n_0$  以上の高密度で、それ以下では  $\alpha_s$  展開の収束性を制御できないことが示されています [5]。一方、構成子クォーク模型のように、摂動論で記述できなくても準粒子的クォーク描像が有効な場合はあり得ます。仮にバリオン同士が重なり始めた物質をクォーク物質として特徴づけることにすれば、その始まりは  $5n_0$  の程度で、強相関クォーク系になっていると予想されます。

以上をまとめれば、素朴なハドロン物質ともクォーク物質とも規定できない密度領域が  $2-5n_0$  に存在することになります。この領域は、自由度が不明瞭であることによる理論的記述の難しさがある一方で、中性子星の観測からの制限が最も強い領域となっています。中性子星に関する最も基本的な観測量は中性子星の質量・半径 ( $M-R$ ) 関係式であり、中性子星物質の圧力・エネルギー密度関係式  $P(\varepsilon)$  と一対一対応しています。従って、原理的には  $M-R$  関係式から QCD の状態方程式 (EOS) を直接決めることができ、それを足がかりに微視的理解を得ることも可能です。

中性子星観測史上重大な進展、i) 2 倍の太陽質量 ( $M_\odot$ ) を持つ中性子星の発見、ii) 連星中性子星の衝突からくる重力波の初観測、iii)  $1.4M_\odot$ 、 $2.1M_\odot$  中性子星の半径測定、が 2010 年以降にありました [6]。中性子星観測は基本的に  $1.3-2.1M_\odot$  程度の領域をカバーし、対応する密度は  $2-7n_0$  程度となります。ここに  $n_B \simeq n_0$  領域の原子核物理の実験・理論からくる制限が付け加わりますが、異なる密度領域の EOS は、因果律条件 (音速  $c_s = \sqrt{dP/d\varepsilon}$  が光速  $c$  以下) と熱力学的安定性を通してお互いを拘束し合います。以上から浮かび上がる中性子星の質量と半径に関する傾向は「比較的小さい半径 11-13km と大きな最大質量  $2.1-2.3M_\odot$ 」であり、これを EOS の言葉に焼き直せば「EOS は低密度では比較的柔らかいが高密度では相当に硬い」こと、または「 $P(\varepsilon)$  が低密度から高密度へ向かって急激に大きくなる」ことを示唆しています。

この著しい EOS の硬化の説明は、有限密度 QCD における現状で最も重要な問題の 1 つです。ここまでの QCD 物性の議論と観測からくる EOS への制限を考慮に入れた結果、浮かび上がるのはクォーク・ハドロン・クロスオーバー描像です [7]。EOS の構成上の観点から見れば、a) 一次・二次相転移のような相転移領域における EOS の軟化を含まない、b) 一次相転移模型で暗黙のうちに除かれていた硬いクォーク EOS が選択肢に戻ってくる、という利点があります。しかしもっと重要な点は、このシナリオを出発点に取ることで、ハドロン物質に対するクォーク描像、クォーク物質内におけるハドロン的相関、に対する問題意識が自ずと生まれるところにあります。この文脈で、クォーク描像に基づくハドロン構造・バリオン間力、あるいはクォーク物質におけるカラー超伝導 [8] や quarkyonic 物質 [9] といったシナリオについての研究がいくつか出ています。しかしいずれも成熟しているとは言い難く、今後のより詳細な研究が待たれます。

## 参考文献

- [1] K. Yagi, T. Hatsuda and Y. Miake, “Quark-gluon plasma: From big bang to little bang,” Camb. Monogr. Part. Phys. Nucl. Phys. Cosmol. **23** (2005), 1-446.
- [2] Y. Aoki et al., Nature **443** (2006), 675-678.
- [3] A. Akmal, V. R. Pandharipande and D. G. Ravenhall, Phys. Rev. C **58** (1998), 1804-1828.
- [4] K. Fukushima, T. Kojo and W. Weise, Phys. Rev. D **102** (2020) no.9, 096017.
- [5] E. Annala et al., Nature Phys. **16** (2020) no.9, 907-910.
- [6] T. Kojo, G. Baym and T. Hatsuda, Astrophys.J. 934 (2022) 1, 46, and reference therein.
- [7] G. Baym et al., Rept. Prog. Phys. **81** (2018) no.5, 056902.
- [8] M. G. Alford et al., Rev. Mod. Phys. **80** (2008), 1455-1515.
- [9] L. McLerran and R. D. Pisarski, Nucl. Phys. A **796** (2007), 83-100.