



10. 核物質中の超流動性に対する 中間子質量減少の効果

九大理 谷川 知憲
福岡教育大物理 松崎 昌之

概要

1S_0 pairing in nuclear matter is investigated by taking the hadron mass decrease into account via the “In-Medium Bonn potential” which was recently proposed by Rapp *et al.* The resulting gap is significantly reduced in comparison with the one obtained with the original Bonn-B potential and we ascertain that the meson mass decrease is mainly responsible for this reduction.

核物質中の超流動性は原子核構造論の基礎であること、中性子星の物理と密接な関連があることなどから、原子核物理において重要なテーマの一つに挙げられる。またアプローチ法に関して言えば、原子核多体系を記述するために相対論的な枠組みが近年注目を集めている。これは1970年代のChinとWaleckaの研究に端を発する量子ハドロン力学(QHD)の成功に負うものである[1]。

我々は無限核物質中の 1S_0 対ギャップをこのQHDによって研究している。この枠組みは核物質の飽和性だけでなく、球形核・変形核・回転核など原子核の様々な性質を記述できる。それゆえ、開殻構造を持つ原子核に必須である対相関を詳細に調べることはQHDの信頼性を高めることにつながる。一方、中性子星の物理に関しては、通常の原子核飽和密度の数倍にもなる高密度領域の記述に際して、相対論的表式が重要であるとの指摘もなされている。

よく知られているように、QHDはハドロンの自由度における有効場の理論である。このモデルでのラグランジアン密度は以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \bar{\psi}(i\gamma_\mu\partial^\mu - M)\psi + \frac{1}{2}(\partial_\mu\sigma)(\partial^\mu\sigma) - \frac{1}{2}m_\sigma^2\sigma^2 \\
 & - \frac{1}{4}\Omega_{\mu\nu}\Omega^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_\omega^2\omega_\mu\omega^\mu - \frac{1}{4}\mathbf{R}_{\mu\nu}\cdot\mathbf{R}^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_\rho^2\rho_\mu\cdot\rho^\mu \\
 & - g_\sigma\bar{\psi}\sigma\psi - g_\omega\bar{\psi}\gamma_\mu\omega^\mu\psi - g_\rho\bar{\psi}\gamma_\mu\boldsymbol{\tau}\cdot\rho^\mu\psi - \frac{1}{3}g_2\sigma^3 - \frac{1}{4}g_3\sigma^4, \\
 & \Omega_{\mu\nu} = \partial_\mu\omega_\nu - \partial_\nu\omega_\mu, \quad \mathbf{R}_{\mu\nu} = \partial_\mu\rho_\nu - \partial_\nu\rho_\mu.
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 ψ は核子場、 σ, ω, ρ はそれぞれ σ 中間子場、 ω 中間子場、 ρ 中間子場である。また QHD の近似である相対論的平均場理論 (RMFT) において、有限核の性質の定量的再現のためにしばしば用いられる σ 中間子場の非線形自己結合項をここでも導入している。RMFT による有限核の計算においては、粒子-粒子チャンネルに非相対論的な力、例えば Gogny 力などを用いることが多いものの、粒子-粒子チャンネル相互作用を相対論的模型で導出することは、閉じた RMFT で原子核を記述できるかという点からも重要な課題である。

QHD による最初の対相関の研究は Kucharek と Ring により 1991 年になされた [2]。対相関場を取り入れるためには、Gor'kov 分解により定義される異常グリーン関数を用い、中間子場を量子化せねばならない。結果として得られるのはよく知られた Relativistic-Hartree-Bogoliubov 方程式である。従って、有効核子質量の超越方程式と通常のギャップ方程式とからなる、連立非線形方程式を解くことでギャップの値が得られる。

しかし、NL1 のような RMFT のパラメータセットを元にした一中間子交換相互作用を適用した際のギャップの値は、コンセンサスを得ているものに比べ数倍大きなものになる。前述の有限核に対する『現実的なアプローチ』はこの過大ギャップ問題の処方箋の一つである。一方、核物質ではその代わりに粒子-粒子相互作用として自由空間での裸の核力を用いることができ、それによりギャップの最大値が 2 MeV から 4 MeV という非相対論的な研究と矛盾のない結果が得られる [3]。

上の考え方に沿った拡張としてハドロンの性質の変化を導入することが考えられる。Brown と Rho による先駆的な研究において、カイラル対称性の部分的回復に伴いハドロンの質量に変化が起こるという指摘がなされた [4]。これについては現在でも議論の余地が残っているが、ベクトル中間子の質量の減少を支持する実験結果も得られている。その変化は質量と密度との間の一次式で次のように表される。

$$\frac{M^*}{M} = \frac{m_{\rho,\omega}^*}{m_{\rho,\omega}} = \frac{\Lambda_{\rho,\omega}^*}{\Lambda_{\rho,\omega}} = 1 - C \frac{\rho}{\rho_0}, \quad C = 0.15. \quad (2)$$

ここで、 $M, m_{\rho,\omega}, \Lambda_{\rho,\omega}$ はそれぞれ核子の質量、 ρ, ω 中間子の質量、各々の核子-中間子のバーテックスに適用されるカットオフ質量である。スケール因子 C は 0.15 であり、これは QCD 和則から得られるものとほぼ一致する。この関係式はしばしば『Brown-Rho (BR) スケーリング』と呼ばれる。

その後、このスケーリングに従うハドロン質量の減少が核物質の飽和性と両立することを Rapp 達が示した [5]。彼らは元の Bonn-B ポテンシャルに二つの新たな σ ボゾンを付け加えることで OBEP を作った。この『In-Medium Bonn ポテンシャル』により、超流動性に対する媒質の効果を簡単に調べることが可能になる。そこで我々はこのポテンシャルをギャップ方程式に現れる粒子-粒子相互作用として採用する。

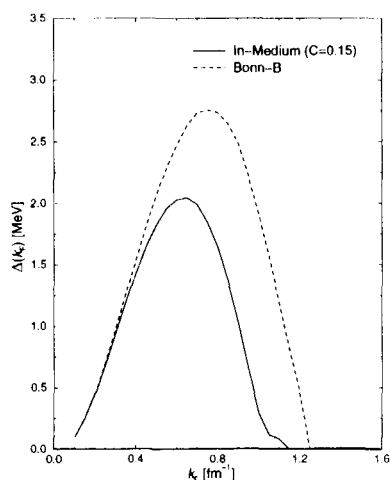


図 1: Fermi 運動量 k_F の関数として表した Fermi 面上でのギャップ。詳細は本文参照。

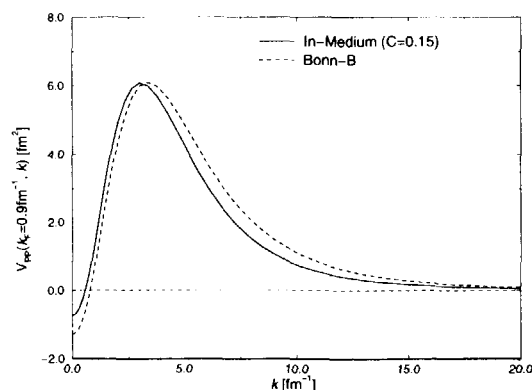


図 2: 運動量の関数として表した粒子-粒子チャンネルの相互作用。密度は Fermi 運動量で $k_F = 0.9 \text{ fm}^{-1}$ である。詳細は本文参照。

図 1 に In-Medium Bonn potential により得られた Fermi 面上でのギャップを、Fermi 運動量の関数として実線で示した。破線は元の Bonn-B ポテンシャルにより得られた結果である。両者を比べると、BR スケーリングに従うハドロン質量の減少を導入することにより、ギャップが大きく減少することがわかる。しかしながら、その値はコンセンサスの得られている範囲に留まっている。

さて、このようにして得られるギャップの詳細な議論に入る前に、どの運動量領域からどのような寄与があるのかを明らかにするためにギャップ方程式の構造を調べておかねばならない。Rummel と Ring が指摘したように [3]、ギャップへの正の寄与はギャップとポテンシャルとが逆の符号を持つような低運動量・高運動量の両領域に由来する。これはギャップ方程式の負符号のためである。一方、負の寄与は二つのポテンシャルが斥力の山を持つ中間運動量の領域から来る。

次に、粒子-粒子相互作用への質量減少の効果を見るために、In-Medium Bonn ポテンシャルと元の Bonn-B ポテンシャルとを図 2 に示した。In-Medium Bonn ポテンシャルに関して、より低い運動量の領域へのずれが見られる。換言すれば、上述のギャップへの正の寄与を与える領域のポテンシャルの強さが、ハドロン質量の減少により弱くなっている。これが In-Medium Bonn ポテンシャルを用いるとギャップが減少する主因だと考えられる。

ここで、「核子と中間子のどちらがこの減少に大きく寄与しているのか」という疑問が生じる。この疑問に答えるため、我々は一方のハドロンだけに BR スケーリングを施した場合の計算を行った。しかし、そのような取り扱いにより Dirac-Brueckner-Hartree-Fock 計算で核物質の飽和性を再現できなくなるという観点から、もはや物理的なポテンシャルではなくなるということに注意しておかねばならない。結果は次頁の図 3 に示した。実線、破線、長破線はそれぞれ、核子質量のみ、中間子質量のみ、両方の質量 (完全な BR ス

ケーリングに相当) を減らした場合に対応する。この図から、ある程度は核子がギャップの減少を担うものの、主として中間子質量の減少が原因になっていることが結論づけられる。

要約すれば以下の通りである。我々は In-Medium Bonn ポテンシャルを粒子-粒子相互作用に用い、ギャップの計算を行った。結果として得られたギャップは元の Bonn-B ポテンシャルの場合に比べ大きく減少し、それは非相対論的研究の結果と矛盾しないものである。また、中間子論的なポテンシャルを用いることで、ベクトル中間子の質量の減少、つまり斥力の到達範囲が長くなることがギャップの減少の主要因であることを明らかにした [7]。なお、非相対論的枠組みにおいてギャップを減らす Fermi sea の偏極だけでなく、相対論的枠組みにおいて中間子質量の軽減を導く Dirac sea の偏極を考慮することで、同様にギャップの減少が得られるか否かについてはまだ推測の段階に留まっており、今後の研究課題である [8]。

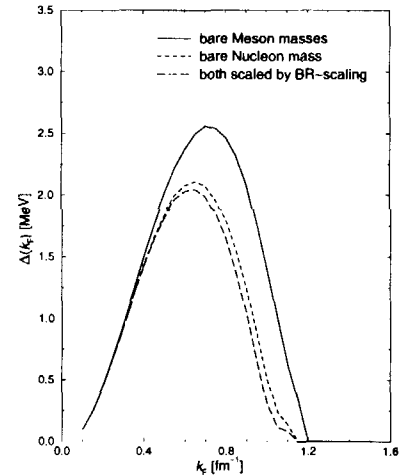


図 3: 部分的に BR スケーリングを施した粒子-粒子相互作用から得られるギャップ。詳細は本文参照。

参考文献

- [1] B. D. Serot and J. D. Walecka, *Adv. Nucl. Phys.* **16**, 1 (1986).
- [2] H. Kucharek and P. Ring, *Z. Phys.* **A339**, 23 (1991).
- [3] A. Rummel and P. Ring, preprint (1996, unpublished).
- [4] G. E. Brown and M. Rho, *Phys. Rev. Lett.* **66**, 2720 (1991).
- [5] R. Rapp *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1827 (1999).
- [6] R. Machleidt, *Adv. Nucl. Phys.* **19**, 189 (1989).
- [7] M. Matsuzaki and T. Tanigawa, *Phys. Lett.* **B445**, 254 (1999).
- [8] M. Matsuzaki and P. Ring, *Proceedings of the APCTP Workshop on Astro-Hadron Physics in Honor of Mannque Rho's 60th Birthday: Properties of Hadrons in Matter* (World Scientific, Singapore, in press), [LANL e-Print archive nucl-th/9712060]; M. Matsuzaki, *Phys. Rev.* **C58**, 3407 (1998).