



3体核力と中性子星 (Nuclear three-body force and neutron stars)

鷹野 正利 (早稲田大学理工学術院)

3体核力とは、3つの核子が互いに接近した時に初めて生じる力であり、3核子系に働く核力から2核子間に働く2体核力を全て引き去った残りの力です。散乱実験を含む3体核力の解説として文献 [1] 等が挙げられます。本稿では、一様核物質や中性子星構造における3体核力の役割を論じます。3体核力ポテンシャルとして主に Urbana IX (UIX) [2] を対象としますが、近年精力的に研究されているカイラル有効場理論に基づく3体核力に関しては、例えば文献 [3] 等を参照下さい。

無限に大きい対称核物質 (陽子混在度 $x = 1/2$) の一核子当たりのエネルギー $E_{\text{sym}}(n)$ (n は核子数密度) は、核力の飽和性により、飽和密度 n_0 (約 0.16 fm^{-3}) で最小値 E_0 (約 -16 MeV) となります。一方、2核子散乱実験データや重陽子の性質を良く再現するように作られたいわゆる modern な2体核力ポテンシャルを用いて、非相対論的量子多体計算により $E_{\text{sym}}(n)$ を求めると、その最小点は用いる2体核力モデルや多体計算手法の違いによって、 (n, E_{sym}) 平面で帯状に分布します。この帯を Coester band と呼びますが、経験的な飽和点 (n_0, E_0) は Coester band から外れます。つまり、核力の飽和性を定量的に説明するためには2体核力だけでは不十分であり、3体核力が必要です。そしてその効果は低密度領域では引力的で、また高密度領域では斥力的であることが期待されます。

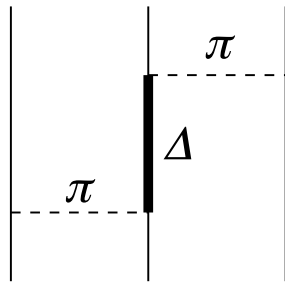


図 1: 藤田・宮沢型 3体核力

低密度の対称核物質において3体核力が引力的に寄与をすることは、少数核子系で見られる3体核力の効果と矛盾しません。実際、modern な2体核力ポテンシャルのみを用いて ${}^3\text{H}$ の結合エネルギーを計算すると、それは実験値 (8.48 MeV) に比べ1割近く小さくなり、この結果は核力モデルに依りません。よって引力的な3体核力の存在が必要であることが分かります。さらに Green's Function Monte Carlo (GFMC) 法による、 ${}^{12}\text{C}$ に至る多くの少数核子系の束縛状態の第一原理計算 [4] から、それらのエネルギー実験値を説明するために引力的な3体核力が必要であることが知られています。

この3体核力の引力的寄与の候補は、1957年に藤田・宮沢 (FM) によって提唱された 2π 交換型3体核力 [5] です。これは図1に示す通り、2つの π 中間子の交換によって生じますが、その中間状態において1つの核子が Δ へと励起します。よって、この力は1つの π 中間子の交換による2体核力の繰り返しでは表現出来ない3体核力です。Urbana グループによって提案された3体核力ポテンシャルの一つ UIX は、この FM 型 2π 交換項と状態依存性の無い現象論的斥力項から成り、modern な2体核力ポテンシャルとして AV18 [6] を用いたときに、 ${}^3\text{H}$ と ${}^4\text{He}$ の結合エネルギー実験値を良く再現し、さらに核物質飽和密度の経験値を再現するように、各項の強度が調整されています。

現実的核力ポテンシャルから出発した一様核物質の状態方程式 (EOS) の代表例として、Akmal, Pandharipande, Ravenhall (APR) の EOS があります [7]。彼らは2体核力 AV18 と3体核力 UIX か

ら出発し、Variational Chain Summation 法によって、 $E_{\text{sym}}(n)$ および中性子物質 ($x = 0$) の一粒子当たりのエネルギー $E_{\text{neu}}(n)$ を求めました。その結果からも分かりますが、中性子物質において FM 型 2π 交換項は斥力的に働き¹、よって 3 体核力は $E_{\text{neu}}(n)$ を上昇させます。このように、3 体核力は対称エネルギー S_0 やその密度勾配に関する係数 L [8] にも大きく影響します。

さらに、 x が小さい中性子星内部物質の EOS も、3 体核力に大きく依存します。例えば APR によれば、2 体核力のみ (AV18) を考慮して計算された核物質 EOS で支えられる中性子星の最大質量は、相対論的 boost 補正も考慮して $1.80 M_{\odot}$ (M_{\odot} は太陽質量) であり、近年発見された 2 つの重い中性子星の質量 ($2M_{\odot}$) [9] を説明出来ません。一方で 3 体核力 UIX まで考慮すると中性子星の最大質量は $2.20M_{\odot}$ となり、観測結果との矛盾は解消されます。

ただし、3 体核力ポテンシャルの不定性は小さくありません。まず少数核子系に対する GFMC 計算によると、UIX ポテンシャルでは引力の効果が不十分です。そこで UIX における FM 型 2π 交換項 (P 波型) に加えて、S 波型 2π 交換項や 3π 交換項等を考慮するように拡張された Illinois(IL) モデル (最新版は IL7[10]) が提案され、それにより ^{12}C までの軽い核のエネルギー固有値等が定量的に説明できるようになりました [4]。ところが中性子物質に対する Auxiliary field diffusion Monte Carlo (AFDMC) 計算によれば、IL7 型 3 体核力は $E_{\text{neu}}(n)$ を減少させてしまい、中性子星質量観測データの説明は困難です [11]。一方で文献 [12] では、妥当な対称エネルギー S_0 が得られるようにパラメータを再調整した IL 型 3 体核力ポテンシャルを用いた $E_{\text{neu}}(n)$ の AFDMC 計算により、質量が $1.4M_{\odot}$ の中性子星の半径 $R_{1.4}$ が S_0 (32-34 MeV) と共に 10-13 km と変化すること、また S_0 を固定しても 3 体核力パラメータの不定性により $R_{1.4}$ は 1 km ほど変化することが報告されています。

なお上記の議論では、中性子星内部でのハイペロン混合やクォーク相の出現の可能性を無視していましたが、それらを考慮した場合、上述の重い中性子星の説明が困難であることが指摘されています。ただしハイペロンに働く相互作用の不定性から、ハイペロン混合による中性子星物質の軟化の程度も不確実性が大きく、さらにはハイペロンを含む 3 体バリオン力も論じられています。バリオン間力を決定するための実験的研究に加え、格子 QCD に基づき理論的に (3 体核力を含む) バリオン間力を決定する研究 [13] が、これらの問題の解決に大きく寄与することが期待されます。

[1] 関口仁子, 日本物理学会誌 **70** (2015) 912, 原子核研究 **53** (2008) 27.

[2] B. S. Pudliner et al., Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 4396.

[3] H.-W. Hammer et al., Rev. Mod. Phys. **85** (2013) 197.

[4] J. Carlson et al., Rev. Mod. Phys. **87** (2015) 1067.

[5] J. Fujita and H. Miyazawa, Prog. Theor. Phys. **17** (1957) 360.

[6] R. B. Wiringa et al., Phys. Rev. **C51** (1995) 38.

[7] A. Akmal et al., Phys. Rev. **C58** (1998) 1804.

[8] 飯田圭, 原子核研究 **58** (2014) 12.

[9] P. B. Demorest et al., Nature **467** (2010) 1081, J. Antoniadis et al., Science **340** (2013) 1233232.

[10] S. C. Pieper, AIP Conf. Proc. **1011** (2008) 143.

[11] P. Maris et al., Phys. Rev. **C87** (2013) 054318.

[12] S. Gandolfi et al., Phys. Rev. **C85** (2012) 032801(R).

[13] 土井琢身, 原子核研究 **58** (2013) 109.

¹APR によると高密度核物質では π^0 中間子凝縮が起こり、その相では FM 型 2π 交換項の寄与は負になります。