



対称エネルギー (Symmetry energy)

飯田 圭 (高知大学理学部)

熱統計力学の立場から原子核を論じるにあたり、核物質の性質を調べることは大変重要です。とはいえ、最も基本的な性質の一つである核物質の状態方程式ですら、核子間の強い相関のため不定性が高いのが現状です。核物質で起こりうる相状態を知るには、核力に基づく微視的アプローチとともに、現象論的アプローチも不可欠です。実際、核物質は、原子核の基底状態はもちろんのこと、重イオン同士の衝突、中性子星といった特異な環境においてもみられます。このような特異な環境下では、さまざまな密度、中性子過剰度をもった核物質が存在することになります。

以上の核物質系の性質を代表するのが、核子当りのエネルギー w です。陽子の電荷を忘れれば、一様かつバルクという仮想的な系を考えることができ、さらに、そのゼロ温度での表式を、核子数密度 n については飽和点のまわりに、また中性子過剰度 $\alpha \equiv (n_n - n_p)/n$ (n_n, n_p : 中性子 (陽子) 密度) についてはゼロのまわりに展開することができます。低次の数項は以下のようになります。

$$w(n, \alpha) = w_0 + \frac{K_0}{18n_0^2}(n - n_0)^2 + \left[S_0 + \frac{L}{3n_0}(n - n_0) \right] \alpha^2. \quad (1)$$

ここで、 w_0, n_0, K_0 は、それぞれ対称核物質 ($\alpha = 0$) の飽和エネルギー、飽和密度、非圧縮率、 S_0, L は、今回の話題の中心である「対称エネルギー」を特徴づけるパラメータです。

対称エネルギーとは、ある一定の n のもとで、対称核物質の状態から中性子過剰度を α だけ変化させたときに系が損するエネルギーを $\alpha^2 S(n)$ と表した場合、 $S(n)$ のことをいいます¹。すると、 S_0 と L は、 $S_0 = S(n_0)$ 、 $L = 3n_0 dS/dn|_{n=n_0}$ と表すことができます。核力による引力が中性子・陽子間でとりわけ強いこと、およびフェルミ縮退による運動エネルギーが $\alpha = 0$ で最小となることから、 $S(n)$ は正と考えられます。この微係数による通常の定義のかわりに、対称エネルギーを、中性子物質と対称核物質のエネルギー差 $w(n, 1) - w(n, 0)$ によって表す場合もあります。この定義は、とくに手の込んだ多体計算に対しては有効ですが、高密度領域を除けば、定量的に通常の定義とさほど変わらないケースが少なくありません。従って、中性子物質の $n = n_0$ における圧力を $n_0 L/3$ と概算してよさそうです。この事情を念頭におくと、各パラメータは図 1 に示すようなグラフ上の意味をもつことになります。

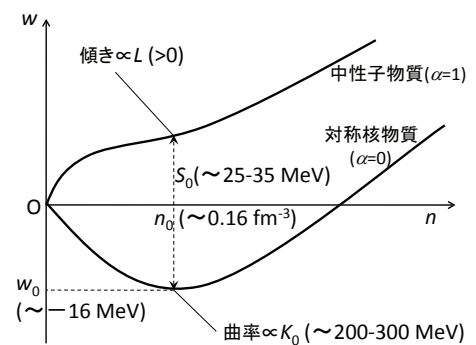


図 1: 一様核物質のエネルギーの概略。

¹式 (1) の右辺第 3 項がそれに当たります。非対称エネルギーといった方が物理的にはよりしっくりくるかもしれません。

$\partial w(n, \alpha)/\partial n = 0$ から決まる飽和点 (n_s, w_s) の α による変化を押えることは、現象との関わりを議論する上で重要です。式 (1) の展開が有効な範囲では、 $n_s = n_0 - (3n_0 L/K_0)\alpha^2$, $w_s = w_0 + S_0\alpha^2$ と与えられます。 $\alpha \neq 0$ においては、 L は飽和密度 n_s を、 S_0 は飽和エネルギー w_s を左右します。

次に、対称エネルギーと種々の現象との関わりを見ていきましょう。まず安定核ですが、その質量の実験値をよく再現する公式、つまり液滴モデルに基づくベータ・ワイゼッカーの質量公式 [1] に着目します。この質量公式中に現れる $(N - Z)^2/A$ の係数、即ち、体積対称エネルギー係数こそが、対称エネルギーの原型と言えましょう。実際、これは w_s 中の S_0 と直接関連します。なお、式 (1) の展開項のうち密度 n に依存しない項には、安定核の質量・電荷半径の実験データからかなりよい制限を与えることができます。しかし、安定核の中心付近のほぼ一様な領域で実現される密度は飽和密度 n_s に近い限られた範囲のものであるため、安定核の体積に比例するエネルギーから、対称エネルギーの密度依存性や非圧縮率を絞りこむのは困難です [2]。他方、 ^{208}Pb 等の中性子スキン厚が L を決める手がかりを与えると期待されていますが [3]、液滴モデルによれば、 L 依存性は表面对称エネルギー係数を通して現れるため、 L についての結論は表面の記述法に依存しそうです。

不安定核まで対象を広げると、対称エネルギーの密度依存性がよりよく決まるでしょう。特に、 n_s が小さいときにサイズが大きくなる傾向に着目すると、大きな α^2 に対してサイズを系統的に調べることにより、対称エネルギーの密度依存性の情報が引き出せそうです。サイズと直接関連する反応断面積の実験値に着目すると、限定されたデータの範囲で L が正であることはわかりますが、一体どのような値なのかはまだよく決まっていません。今後の不安定核実験に期待です。

重イオン衝突によって作られる核物質系は、衝突エネルギーや衝突核種により実現される密度・中性子過剰度をコントロールできるという特徴があります [3]。特にエネルギーにより、 n_0 以下・以上に及ぶいろいろな密度を実現できるのが魅力と言えます。さらに、必然的に高温にもなります。従って、対称エネルギーの温度依存性についての手がかりが得られそうですが、現実の低密度核物質系は仮想的な一様核物質と異なりクラスターを含むため、注意を要します。また、原子核の静的な性質に着目した場合に比べて、系統誤差が対称エネルギーの情報抽出に大きく影響しそうです。

対称核物質とは真逆の中性子物質から対称エネルギーにアプローチする場合には、中性子星が重要な対象となります。中性子星を文字通り「巨大な原子核」とみなすことができるかは、中性子星の質量次第です。実際、中心密度が $2n_0$ 程度以下であれば、基本的に天体は、電子により中性化された極端に中性子過剰な核物質によって構成されるでしょう。このような天体は太陽質量程度より軽く、その質量・半径間の関係が $(L^2 K_0)^{1/3}$ という単一の物質パラメータで特徴づけられる可能性が指摘されています [4]。軽い中性子星の確固たる観測的証拠、およびその半径の測定が待たれます。また、星殻を構成する極端に中性子過剰な原子核の性質も、対称エネルギーに依存します [2]。

このように対称エネルギーはいろいろな現象と密接にからみあいます。微視的なアプローチにおいても、量子モンテカルロ法を用いた第一原理計算が精力的に行われており、対称エネルギーが密度とともにいかに変化するかは、3体力の不定性の問題ともからめながら議論されています。実験・観測・計算があいまって L の値が絞られる日はそう遠くないかもしれません。

[1] 小浦寛之、原子核研究 55, (2010) 53.

[2] K. Iida and K. Oyamatsu, arXiv:1309.1592.

[3] C.J. Horowitz *et al.*, arXiv:1401.5839.

[4] H. Sotani *et al.*, arXiv:1401.0161.