

中性子スキンと原子核物質の状態方程式



民井 淳

大阪大学核物理研究センター



銭 廣 十 三

理化学研究所仁科加速器研究センター

温度、圧力、密度などは多粒子系の熱力学的平衡状態*を表す巨視的な物理量であり、状態量と呼ばれる。状態量の間には物質固有の関係式が成り立つ。特に力やエネルギーに対応する状態量を他の状態量で表した関係式を状態方程式と呼ぶ。理想気体の圧力(p)を密度(ρ)と温度(T)で表した理想気体の状態方程式 $p=k\rho T$ (k はボルツマン定数)はその一例である。中性子と陽子(核子と総称する)から成る有限系・無限系の物質である原子核物質(以下、核物質)は相互作用を及ぼしあう密度数億トン/ccの物質であるが、その核物質の平衡状態にも状態方程式が存在する。

核物質の状態方程式を決めることは原子核物理学の大きな目標の1つである。微視的な核子の自由度を平均化した巨視的性質としての状態方程式を決めることで、原子核の系統的性質と大部分が中性子によって成り立つ中性子星の性質を共通の土台で議論することができる。特に中性子星については、中性子が過剰となる環境の理解が重要である。例えばその質量と半径、内部構造、超新星爆発過程や残留中性子星の冷却過程、中性子連星系の性質、X線バースト・スーパーバースト、元素合成過程などを計算していく上で精密な状態方程式は欠かせず、その決定の意義は極めて大きい。

核物質は中性子と陽子の2つのフェルミ粒子から構成されるため、状態方程式は両者の密度の違い(非対称度)に依存する項を持つ。これを対称エネルギーと呼ぶ。近年特にこの対称エネルギーに関する研究が精力的に行われている。対称エネルギー項を詳しく知ることによって、自然界に存在する安定な原子核よりも中性子が多い中性子過剰核や陽子が多い陽子過剰核、質量と中性子

数が大きい領域に外挿して得られる超重核の性質をより精度よく予測できる。また、原子核同士の衝突過程の計算では陽子・中性子密度の非対称がどのように拡散するかという点についての基礎的な情報となる。

対称エネルギーの1次の密度依存性(傾きパラメータ)は、重い原子核の表面に存在すると考えられている中性子の皮(中性子スキン)の厚さに密接に関係するため、中性子スキン厚を測定することで引き出すことができると期待される。陽子の密度分布は良く知られているので、中性子の分布を決めるか、中性子と陽子の分布半径の差 δR_{np} を決定すれば良い。

原子核中の中性子の密度分布を決定するには、強・弱・電磁のいずれかの相互作用を用いる。鉛208核の中性子スキン厚の決定は、多くの実験で試みられている。弱い相互作用を利用したパリティ非保存非対称電子散乱(PREX)の測定は原理的な不定性は少ないものの、統計的な不定性が大きく $\delta R_{np}=0.33^{+0.16}_{-0.18}$ fmという結果が得られている。近年新たに、電磁相互作用を利用した電気双極応答の測定と、強い相互作用を利用した陽子弾性散乱を用いた測定が行われた。これらでは、PREXの結果を大きく上回る精度の結果が得られていて、前者からは 0.168 ± 0.022 fm、後者からは $0.211^{+0.026}_{-0.029}$ fmの値が得られた。これらの結果はほぼ誤差の範囲で一致している。このように様々な手法による、核物質の状態方程式決定へのアプローチは、より高い統計精度、系統的な研究を通して発展しつつある。

—Keywords—

中性子星：

中性子星は、半径 $\sim 10^4$ m、質量が太陽より重い程度で、中性子が主な成分である。太陽と比較して大きな質量を持つ恒星が進化し、超新星爆発を起こした後に残される。内部の構造は未解明である。

中性子スキン：

中性子スキンは、中性子過剰核の中性子密度が陽子密度に比べて半径の大きな分布を持つためにできる、原子核表面付近の層状中性子構造のこと。

* 系を長期間放置しても巨視的に見て何も変化を起こさない状態を平衡状態と呼ぶ。