

原子核の対相関 ～ 副殻中での厳密解・近似解・数値解～

平成 21 年 2 月 6 日

中根 健佑

(学籍番号 04380371)

原子核は、強い力で結合した高密度の物体にもかかわらず、その構成粒子である陽子や中性子は基底状態付近ではほとんど衝突し散乱されることがない。ところが状況によっては、お互いに衝突して相互作用を及ぼす。また原子核のもつ結合力は短距離力であるにもかかわらず、協力して集団運動をする。このような不思議な性質を統一的に考えるために、様々なモデルが導入されてきたが、すべての性質、現象を説明できる概念は現在のところ存在していない。

対相関は、互いに時間反転の関係にある一対の二粒子状態にある 2 粒子間に強い引力が働いて発生する。ある温度以下で電気抵抗が零になる超伝導状態にある金属と類似した構造の波動関数で記述できる。

本論文では、第 1 章は原子核とは何か、大きさはどのくらいか、さらには原子核の結合エネルギーとは何か、ということの説明をした。また原子核の構造を記述する最も基本的なモデルである独立粒子モデルを取り上げ、単一粒子準位、魔法数、核子のペアリングに焦点を当てて説明した。

第 2 章は第 3 章の議論を理解するための準備として、フェルミ粒子の第二量子化表示ならびに、フェルミ粒子の 2 体および 4 体演算子の行列要素の評価方法を解説した。またフェルミ粒子の持つ粒子と空孔の対称性を議論し、粒子生成演算子を空孔消滅演算子と見、粒子消滅演算子を空孔生成演算子と見ることができることを説明した。

第 3 章では球形の原子核中で縮退した副殻が部分的に占有された場合に、図式的なハミルトニアンである対相互作用を仮定して、そのときに生じる対相関を複数の観点から調べた。

まず解析的厳密解の詳細な導出過程を記した。フェルミ粒子の多体系では、波動関数の反対称化により個々の粒子を区別することが原理的にできないにも拘らず、「角運動量 0 に組まない粒子対の個数」という意味をもつセニオリティ量子数で厳密な固有状態がラベルされるということが示された。さらには厳密解の別導出法としての準スピンモデルについても議論した。

次に、副殻の縮退がとれた場合について考察した。この場合の厳密解はもはや知られていないが、代わりに BCS 近似がよく使われる。この近似について、理論の紹介を行った。BCS 方程式は数値的に解く必要があるが、自分自身で数値解を求めることはしなかった。

最後に副殻の縮退がとれた場合の厳密な数値解を、C 言語でプログラムを自作して求めた。 $2j + 1$ 次元の二粒子状態空間に N 個のフェルミ粒子が入っている場合に、 N 体状態の完全系を張り、その完全系の任意の 2 つの基底状態間で、2 体および 4 体演算子からなる第二量子化表示のハミルトニアンの行列要素を計算し、得られた行列をライブラリプログラムを利用して数値的に対角化した。 $j = \frac{7}{2}$, $N = 4$ の場合の結果について検討を加えた。

縮退のとれ方として 2 つの場合を考えた。一つは原子核が四重極変形した場合である。この場合は、 $(m, -m)$ 対の縮退が保たれるので対相関は壊れにくく、エネルギーギャップも失われにくいことが分かった。もう一つは原子核が回転している場合である。この場合は、時間反転対称性の破れにより対相関が壊れやすく、エネルギーギャップは回転角速度の増加と共に速やかに減少することが示された。