

殻構造 (Shell structure)

在田 謙一郎 (名古屋工業大学大学院工学研究科)

有限量子系の最も興味深い特徴の一つは、量子揺らぎに起因する多様な構造変化です。原子番号の一つ違う原子が全く異なる化学的性質を有するように、原子核においても、エネルギー、変形、励起機構などさまざまな性質が、陽子数・中性子数に対する鋭敏な依存性を有しています。この量子揺らぎには核子の平均場中の独立粒子運動を量子化した一粒子スペクトルの揺らぎ構造、すなわち殻構造が本質的な役割を果たしています。一般に一粒子エネルギースペクトルは一様な分布をもたず、準位密度の高いところと低いところが振動的なパターンを織りなしています。準位が集まった部分は「殻 (シェル)」、準位が全くない部分は「空隙 (ギャップ)」と呼ばれ、シェルとギャップが交互に現れて殻構造を作っています。

このような殻構造の規則性や揺らぎの大小は、半古典論 (semiclassical theory) の手法を通して、対応する古典系での古典軌道の性質と関連付けて理解することができます [1]。経路積分の停留位近似に基づく半古典近似は、量子準位密度を、対応する古典系における周期軌道の寄与の和に表します。「トレース公式」の名で有名なこの公式を用いると、短い数本の周期軌道を調べるだけで、殻効果の解析に必要な大局的殻構造を導き出すことができます。「超変形」と呼ばれる長軸と短軸の比がおおよそ 2:1 の巨大変形状態の実現は、長軸方向と短軸方向への振動数比が 2:1 の周期軌道の発生による強い殻構造形成に起源を持つことが知られています。また、ナトリウムクラスターの質量分布に見られるスーパーシェル構造 (殻効果の強いところと弱いところが周期的に現れる構造) を、Woods-Saxon ポテンシャル中の正三角形軌道と正四角形軌道の干渉効果として説明した仕事 [2] や、原子核基底状態変形のプロレート優勢の問題を、周期軌道に沿った作用積分のプロレート側とオブレート側との非対称性から説明した仕事 [3] など多くの研究者の興味を喚起しました。

ある周期軌道による殻効果の大小は、系の対称性や軌道の安定性 (初期値をずらした軌道が元の軌道からどれだけ離れにくい) によって決まります。周期軌道の安定性は平均場の変形に対する強い依存性を有しており、変形度のわずかな変化により各軌道の寄与の相対的な強度が大きく変化します。このことが殻構造の変形に対する鋭敏な振舞の起源であると解釈することができます。系の連続対称性は、その対称変換の方向への古典周期軌道の縮退 (等しい作用積分をもつ周期軌道が連続的に存在すること) を引き起こし、それらが準位密度に対してコヒーレントな寄与を与えることにより強い殻効果をもたらします。対称性がない非可積分系においては、周期軌道の分岐 (変形度などのパラメータが変化する過程である周期軌道から別の周期軌道が発生する現象) が重要な役割を果たします。分岐点近傍では、複数の周期軌道が接近してそのまわりの位相空間に局所的な動力学的対称性が生じ、その対称変換の方向に連続的に存在する準周期軌道が準位密度に対してコヒーレントに寄与する結果、大きな揺らぎ構造がもたらされるのです。この変形殻構造形成機構は、原子核のエキゾチック変形の起源として本質的な役割を果たしています。

[1] 在田謙一郎、松柳研一、日本物理学会誌 57 (2002) 37.

[2] H. Nishioka, K. Hansen, B. R. Mottelson, Phys. Rev. B 42 (1990) 9377.

[3] H. Frisk, Nucl. Phys. A 511 (1990) 309.