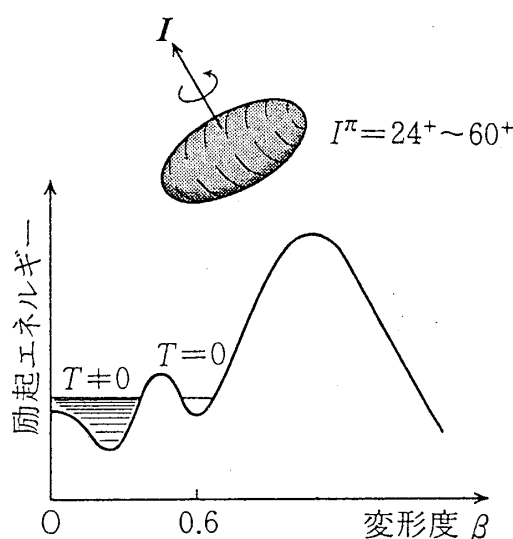


原子核における変形共存現象と大振幅集団運動

京都大学大学院理学研究科

松柳研一

1. 平均自由行程が系の空間的サイズより長い有限量子系をメソスコピック系と言うことにすれば、基底状態近傍の（より一般的に言えば、イラスト線近傍の）超低温状態にある原子核はメソスコピック系である。そこでは平均場描像が成り立っており、フェルミオン（核子）の一粒子運動に対する量子シェル効果が本質的な役割を演じている。シェル効果が劇的に現れる現象として、近年注目されているのは超変形状態である。



2. 超変形状態とは（準位密度の高い）高励起、高温状態の中に観測される、長軸と短軸の比がおよそ2:1の回転楕円体の形をした準安定状態である。それは、「カオスの中に埋め込まれた秩序状態」といえる。有限量子系としての原子核の「形」は平均ポテンシャルの形として定義されるが、この平均場は核子の集団が selfconsistent に形成したものであるから、大きく変形した超変形状態は 自発的対称性の破れ の典型例といえる。平均場近似で破られた回転対称性を回復する集団運動が原子核の回転運動であり、実際、超変形状態は平均場の高速回転に伴う見事な回転スペクトルを示す。このような超変形状態が（準位密度の高い）高温状態の中に個性を保って存在できる理由は、超変形状態が変形ポテンシャル曲面の極小点となっており、高温の複合核（カオス的）状態との間にあるポテンシャル障壁が両者の混合を妨げている為である。従って、なぜ超変形状態が存在するかを理解するためには、この極小点が形成されるメカニズムを調べる必要がある。変形ポテンシャル曲面の極小は結合エネルギーの極大に対応しているから、超変形によって新しい付加的な結合エネルギーが生じていることになる。これが超変形シェル構造に伴うシェルエネルギーといわれるものである。その起源、すなわち、超変形により新しいシェル構造が形成されるメカニズムについては、続く講演で在田さんが シェル構造の周期軌道理論 に基づいて議論される。

3. 変形ポテンシャル曲面に複数の極小点が現れ、それらがエネルギー的に競合する現象は（それぞれの極小が異なる形に対応しているので）「変形共存」と呼ばれているが、近年きわめて多くの原子核で観測されており、今や核構造において普遍的な現象と考えられる。例えば、 j - j 結合シェルモデルの魔法数を持ち、典型的な「球形核」として知られてきた Sn や Pb アイソトープでも、低励起状態に回転スペクトルが観測されている。超変形状態は秩序状態とカオス状態の共存であったが、ここでは2つ又は3つの秩序状態が共存/競合している。このような 異なった秩序状態の共存 とそれらの構造の間の 量子揺らぎ は、原子核だけでなく有限量子系に共通する基本的な性質と思われる。

4. 超低温の原子核の集団励起モードは極めてユニークで、シェル構造 と 対相関 が本質的な役割を果たしている。（ j - j 結合シェルモデルの閉殻を除いて）重い原子核の基底状態は（超伝導）BCS 状態として良く近似できる。また、変形に伴って変形シェル構造と変形魔法数が形成され、これが変形ポテンシャル曲面に複数の極小点が現れる理由となっている。変形共存などに伴う励起スペクトルの分析を通じて、絶対零度の有限量子系における集団現象と「相転移」（構造変化）の特質を理解することが核構造論の一つの目標である。そこでは集団運動に伴う巨視的（古典的）性質と一粒子運動に伴う微視的（量子的）性質の絡み合いや、異なる極小点（平衡点）をまたがる 集団運動の断熱性/透熱性 が基本的なテーマとなる。このような ミクロとマクロの共存 も有限量子系に共通する基本的な性質と思われる。

5. 平衡点の周りの振動として記述できない（複数の平衡点にまたがる）大振幅集団運動の理論は未だ初期的な段階にあり、変形共存現象を記述可能な大振幅集団運動の微視的理論の構築は今後の核構造論の大きな目標の一つといえる。この目標に向かって私たちが試みているのは、時間変化する平均場（selfconsistent field）のアイディアに基づくアプローチで、その出発点は時間依存 Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) 理論である。この理論は多自由度ハミルトン力学系の理論にマッピングできることが知られており、系の運動は大次元位相空間の中のトラジェクトリーを描く。しかし、この系が集団運動しているということは、系のすべての自由度の中のほんの少数の自由度（集団自由度）だけでこの運動が記述できることを意味している筈である。1980 年、丸森、益川、坂田、栗山は HFB 理論の大次元位相空間の中に（集団運動のトラジェクトリーが近似的に拘束されている）集団多様体 を抽出する基本方程式を導いた [1]。集団多様体は（非可積分ハミルトン力学系における近似的積分面としての）KAM トーラスとアナログな概念であり、集団座標が1つの場合は集団運動の経路（collective path）とも言い、核分裂現象での大次元変形パラメータ空間内の「分裂経路」や化学反応における「反応経路」に対応する。この理論は自己無撞着集団座標の方法（SCC 法）とよばれ、これまで平衡点の周りの非線形振動として記述できる現象などに適用され、その有効性が確かめられてきた [2]。しかし、平衡点が複数ある場合には基本方程式の従来の解法では限界があると考えられ、（その後チャンネル結合 SCC 法 [3] などの開発があったものの）未だ現実の変形共存現象には適用されていない。このような状況にあったが、ごく最近、松尾、中務らによって Adiabatic SCC 法とよばれる新しい解法が開発された [4]。この方法は従来の Adiabatic TDHF 理論

の困難を解決し、現実の原子核現象に適用が容易である。私たちは現在この方法を用いて、ごく最近の実験で発見された陽子過剰 $N = Z$ 核 ^{68}Se におけるオブレート回転バンドとプロレート回転バンドの共存現象を分析している。HFB 理論により微視的に計算した変形ポテンシャル曲面には確かに実験データに対応する 2 つの極小点を得られるが、両者を隔てる障壁は低く、量子揺らぎのため波動関数が各々の極小点に局在することは困難な様に見える。しかし、ダイナミクスにはポテンシャル面の性質だけでなく、集団ハミルトニアンに現れる質量パラメーターが重要である。質量は変形とともに変化する。特に、一粒子準位の交差領域に於ける運動の断熱性/透熱性を強く反映する。それはまた核子の対相関の強さに敏感に依存する。しかし、これらの効果を考慮して集団運動の質量を導く理論は未だ多くの基本的問題点を残している。私達はこの問題の解決が変形共存現象の理解の為に不可欠と考え、Adiabatic SCC 法に基づいて 集団運動の質量の微視的起源 を分析しているところである。

参考文献

- [1] T. Marumori, T. Maskawa, F. Sakata and A. Kuriyama,
Prog. Theor. Phys. 64 (1980),1294.
- [2] M. Matsuo, in New Trends in Nuclear Collective Dynamics,
ed. Y. Abe, H. Horiuchi and K. Matsuyanagi (Springer-Verlag, 1992), p.219.
- [3] T. Fukui, M. Matsuo and K. Matsuyanagi, Prog. Theor. Phys. 85 (1991),281.
- [4] M. Matsuo, T. Nakatsukasa and K. Matsuyanagi, Prog. Theor. Phys. 103 (2000),959.