

原子核のシェル構造と変形 (レビューの要旨)

京大理 松柳研一

1) 高速回転する超変形核(長軸と短軸の比が約2:1のプロレート変形核)の発見が核構造論に飛躍的な進展をもたらしたことはよく知られている。実際、超変形核のスペクトロスコピーは、高速回転する巨大変形ポテンシャル内部での核子の一粒子運動の性質について多くの知見をもたらした。この発見の主な原動力はガンマ線多重測定器システムの進歩にあったと言っても過言ではない。現在では、 $A \approx 150$ のGd, Dy領域、および $A \approx 190$ のHg領域に多くの超変形核が知られており、新しい世代のガンマ線多重測定器システムの建設によって、これらの超変形核の励起スペクトル構造を、通常変形核の低励起スペクトルと同様な精度で研究することが可能な時代を迎えつつある。

2) これまで知られていない奇妙な変形をした原子核としては、円盤状の形をしたオブレート型超変形核、軸対称性を破った超変形核、長軸と短軸の比が約3:1の軸対称ハイパー変形核、3軸の軸比が約3:2:1の非軸対称ハイパー変形核、空間反転対称性を破った8重極超変形核、軸対称性も空間反転対称性も同時に破ったバナナ状の形をした超変形核など、実に多様なエキゾチック変形が高速回転の高スピン状態で実現可能と理論的に示唆されている。異なるエキゾチック変形は質的に異なる励起スペクトルを示すので実験的に明確に区別できる。例えば、オブレート型超変形核のイラスト状態は、多数の核子の角運動量整列によって、大きい角運動量を形成するので、プロレート型超変形核のような見事な回転スペクトルを示さず、超高スピンのアイソマー(イラスト・トラップ)状態が出現する可能性が高い。

3) エキゾチックな変形核の高スピン・高励起スペクトルの探索は、核構造物理学の質的に新しい研究領域を拓くものと期待される。この分野における新しい現象の発見は、理論物理一般の観点からみても重要な意義を有する。よく知られているように、原子核の「変形」は現代物理の基本概念である「対称性の自発的破れ」によって起こる。エキゾチック変形の発見は、有限量子系としての原子核に、異なる種類の多様な対称性の破れが存在することを明らかにし、そのような「エキゾチックな対称性の破れ」が発生するメカニズムを理解するための貴重な情報を与えるであろう。同時に、この「破られた対称性を回復する新しい型の集団運動モード」の発見という、魅力的な研究分野を開拓することになる。

4) 現代の核構造論によれば、新しい型の「対称性の破れ」は「新しい型の変形シェル構造の形成」に伴って起こる現象と考えられる。シェル構造とは、(平均ポテンシャル内を運動する)核子の一粒子エネルギーの固有値分布に生じる規則的な振動パターンのことと一般的に定義されるが、このパターンは原子核の表面の形に極めて敏感であり、形が少し変化するだけで質的に異なったパターン(新しいシェ

ル構造)が形成され得る。こうして形成された新しい変形シェル構造の魔法数(エキゾチック変形の魔法数)に対応する中性子数、陽子数をもつ原子核(エキゾチック変形二重閉殻)では、結合エネルギーの利得が極大となるため、エキゾチック変形が実現する可能性が特に大きい。

5) エキゾチック変形の起こり易い陽子数、中性子数、角運動量の領域は、多くの場合、 β 安定線から遠く離れた不安定核の高スピン状態であると予想される。したがって、高速回転するエキゾチック変形核の実験的探索には、不安定核ビームと高分解能ガンマ線測定器システムの結合が必要である。

6) エキゾチック変形シェル構造の形成メカニズムの研究には、準位スペクトルに対する半古典論が有効である。Gutzwiller のトレース公式によると、準位密度は Thomas-Fermi 項と(エネルギーとともに振動する)振動項の和として表現され、振動項は古典周期軌道の寄与の総和で与えられる。ここで、準位スペクトル濃度の大局的な振動構造を決定するのは周期の短い軌道である(エネルギーと時間の不確定関係—在田君の報告参照)。こうして、シェル構造の研究はハミルトン力学系の非線形ダイナミクスの問題と結びつく。{参考文献 参照}

7) 任意の変形ポテンシャル内部の一粒子運動に対するハミルトニアンを、ポテンシャルの形に応じて、

- A) 可積分系、
- B) 非可積分・混合系、
- C) 非可積分・カオス系

と分類すると、これまで、A) と C) について、いろいろな研究が行われてきた。A) については、古くから有名な Balian-Bloch, Berry-Tabor をはじめとして、回転楕円体空洞ポテンシャルや 球対称 Woods-Saxon ポテンシャル内の一粒子軌道の分析、最近では、マイクロクラスターでの(2つの周期軌道の干渉によって起こる)スーパーシェル構造を議論した Nishioka-Hansen-Mottelson の仕事などが挙げられる。C) については、よく知られているように、この数年、量子カオスのモデルとして、種々のビリヤード・モデルが盛んに研究されている。一方、秩序運動とカオス運動の共存する、B) の非可積分・混合系については、まだあまり研究されていない。{参考文献 参照}

8) しかし、一般の変形ポテンシャルは、ほとんどの場合、カテゴリー B) に属する。つまり、エキゾチック変形シェル構造の形成機構を明らかにするためには、非可積分・混合系における周期軌道の性質を研究することが必要である。ところで、非可積分・混合系の主要な特徴は、ハミルトニアンのパラメータ(今の場合、変形パラメータ)が連続的に変化したとき、位相空間の構造が不連続的に変化し、これに伴って、周期軌道の分岐現象が起こることである。この古典ハミルトン系の分岐現象が量子スペクトルの大局的振動構造にどのように反映されだろうか。

つまり、周期軌道の分岐はシエル構造の成長と消滅にいかにかかわっていただろうか。
これを明らかにしてゆくことは、有限量子系の今後の極めて重要な研究課題のひとつといえよう。

項目7)、8)に関する参考文献

シエル構造の半古典論 (一般)

- V.M. Strutinsky and G. Magner: Sov. J. Part. Nucl. 7(1976)138
V.M. Strutinsky, A.G. Magner, S.R. Ofengenden and T. Dossing:
Z. Phys. A283(1977)269
R. Balian and C. Bloch: Ann. Phys. 69(1971)76
M.V. Berry and M. Tabor: Proc. Roy. Soc. Lond. A349(1976)101
M. C. Gutzwiller: "Chaos in Classical and Quantum Mechanics (Springer
Verlag, 1990)
A.M. Ozorio de Almeida: "Hamiltonian Systems: Chaos and Quantization
(Cambridge Univ. Press, 1988)
M. Tabor: "Chaos and Integrability in Nonlinear Dynamics
- An Introduction" (John Wiley and Sons, 1989)
M. Berry: in "Chaotic Behaviour of Deterministic Systems (Les
Houches, Session XXXVI, 1981), eds. G. Iooss, R.H.G. Helleman
and R. Stora (North-Holland, 1983) p.172

原子核の変形とStrutinskyの方法

- M. Brack, J. Damgaard, A.S. Jensen, H.C. Pauli, V.M. Strutinsky and
C.Y. Wong: Rev. Mod. Phys. 44(1972)320
I. Ragnarsson, S.G. Nilsson and R.K. Sheline: Phys. Rep. 45(1978)1
S. Aberg, H. Flocard and W. Nazarewicz:
Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 40(1990)439

Bifurcations of Periodic Orbits (古典論)

- M.A.M. de Aguiar, C.P. Malta, M. Baranger and K.T.R. Davies:
Ann. Phys. 180(1987)167

Arvieu, Frisk et al の論文

{Woods-Saxon-like spherical potential}

- J. Carbonell, F. Brut, R. Arvieu and J. Touchard: J. Phys. G11(1985)325

{ellipsoidal cavity}

R. Arvieu, F. Brut and J. Carbonell: Phys. Rev. A35(1987)2389

Y. Ayant and R. Arvieu: J. Phys. A20(1987)397

H. Frisk: Nucl. Phys. A511(1990)309

{rotating billiards}

H. Frisk and R. Arvieu: J. Phys. A22(1989)1765

{spin-orbit coupling}

H. Frisk and T. Guhr: Ann. Phys. 221(1993)229

Nishioka et al の論文

{supershells in metal clusters}

H. Nishioka, K. Hansen and B.R. Mottelson: Phys. Rev. B42(1990)9377

H. Nishioka: Z. Phys. D19(1991)19

{spheroidal cavity}

S. Okai, H. Nishioka and M. Ohta: Mem. Konan Univ., Sci.Ser.37(1990)29

H. Nishioka, M. Ohta and S. Okai: ibid 38(1991)1, 39(1992)67

Reflection-asymmetric deformed potentials のシェルの構造の半古典論

K. Arita: Prog. Theor. Phys. 90(1993)747

K. Arita and K. Matsuyanagi: Prog. Theor. Phys. 91(1994)723

K. Arita: Phys. Lett. B336(1994)279

K. Arita and K. Matsuyanagi: preprint KUNS 1339, Nucl Phys. A in press

W.D. Heiss, R.G. Nazmitdinov and S. Radu: Phys. Rev. Lett. 72(1994)2351

, Phys. Rev. B51(1995)1874

W.D. Heiss and R.G. Nazmitdinov: Phys. Rev. Lett. 73(1994)1235