

## テーマ

# 原子核はなぜ変形するか

## 主旨

原子核の変形は「対称性の自発的破れ」の分かりやすい具体例である。  
素粒子論ではそれは現象論的に仮定されることが多いが、  
凝縮系や原子核では「対称性が破れるダイナミカルなメカニズム」に  
深く立ち入って実験的に調べることができる。  
特に原子核には自己束縛系に特有な面白さがある。  
これを理解することは核構造研究の醍醐味といえよう。  
この講義では「変形シェル構造の形成」をキーワードとして  
原子核が変形する一般的な法則性と  $Mg32$  領域の不安定核に特有な性質の  
絡み合いについて議論したい。  
Jahn-Teller effect との類似性と異質性にも触れる。

## スライド

### [Slide 1] 今日の主題 「原子核はなぜ変形するか」

- ・この問いは「対称性はなぜ自発的に破れるのか」という物理学の基本的問題の分かりやすい具体例である。
- ・原子核では「対称性が破れるダイナミカルなメカニズム」に深く立ち入って実験的に調べることができる。

### [Slide 2] 前口上 「原子核の平均場はとても柔らかい」

- ・原子核は密度の飽和性をもつ「量子液滴」だから容易に形を変える。
- ・「形」は平均場によって定義される。原子核の形とは「平均場の形」のこと。
- ・常に「形の量子ゆらぎ」がある。
- ・このことを前提として、「なぜその時間平均（平衡形）が変形するのか」について以下で議論する。
- ・あなたは原子核という量子物質に対してどのようなイメージ（描像）をもっていますか？

### [Slide 3] 結合エネルギーの変形度依存性（変形ポテンシャルエネルギー曲線）

- ・なぜ oblate や prolate 変形した極小点が出現するのか。
- ・「変形ポテンシャル面に極小点が見れるから」とか「強い proton-neutron 力のため」といった答えは説明になっていない。

- ・その理由を理解するためには「巨視的量子液滴モデル」を超えて変形した平均場のなかの一粒子運動に伴う「微視的な変形シェル構造」を分析する必要がある。

[Slide 4] 原子核の形は量子的に揺らいでいる

- ・「形の固有状態」というものはない。

[Slide 5] 多原子分子はなぜ変形するか (分子の形が多様な理由)

Jahn-Teller effect

- ・電子系のエネルギー準位が縮退しているとき  
原子核の幾何学的配置を変えて対称性を下げる。
- ・対称性を下げることによって縮退が解け  
よりエネルギーが低い状態となる。
- ・原子核の変形メカニズムとアナログス  
「対称性の自発的破れ」の具体例として共通
- ・ただし、重要な違いもある (self-consistent mean field, stronger nonlinearity, 回転対称性 vs 点群の離散的対称性など)
- ・このような一般的法則は相互作用の詳細にかかわらず成り立つ。

[Slide 6] 縮退を解く (一般的に成立する法則性)

- ・縮退のあるとき、対称性を破って縮退を解くことによってエネルギーが下がる。

[Slide 7] 第1回 RIBF 討論会 Plus! に参加して気づいたこと (私の印象)

- ・N=20 近傍の Ne, Mg と Si, S の違いを中性子の (spherical limit での) シェル構造の微妙な変化に注目して議論しているが、陽子の変形しやすさが Ne, Mg と Si, S で著しく異なっているというよく知られた事実を忘れていないか。
- ・「原子核の形は陽子と中性子のシェル構造エネルギーの競争/協力の微妙なバランスによって決まる」と言っても過言でないと思うのだが.....
- ・安定核で成り立っている変形メカニズム (平均場の変形に伴うシェル構造変化) を踏まえた上で、弱束縛中性子過剰核に特有な現象を探りたい。
- ・なぜ「2p2h 状態」と「0p0h 状態」の逆転が起こるのか。その理由は「平均場が変形する」「変形に伴って新しい変形シェル構造が形成される」という概念に基づけばもっと単純明快に理解できるのではないか。
- ・「魔法数の消滅」という言葉の意味がハッキリとは定義されておらず、人によって理解が異なっているのではないか。

[Slide 8] Nilsson diagram を眺めるだけでかなりのことが言える

- 最初に、Ne, Mg, Si, S 領域の Nilsson diagram (from Bohr-Mottelson, Vol.2) を見てみよう。  
この図をよく見ることによって沢山の物理を学ぶことができる。  
(豊富な物理を含んでいる)  
Z=10 はプロレート変形での魔法の数  
Z=14 はオブレート変形での魔法の数
- この基本的パターンは Hartree-Fock 計算でも相互作用の詳細にかかわらず一般的に成立している (詳細はもちろん相互作用に依存するが)。

[Slide 9] Single-j 近似ならこうなる

- 最初の核子はオブレート変形を好む。
- このことは、古典軌道が赤道面にあることから理解しやすい。

[Slide 10] 軸対称調和振動子ポテンシャルならこうなる

- 最初の核子はプロレート変形を好む。
- 対称軸方向に運動した方が運動エネルギーもポテンシャルエネルギーも得する。

[Slide 11] Single-j 近似と軸対称調和振動子近似の比較

- oblate-prolate asymmetry がある。
- single j-shell では shell の前半で oblate が好まれる。
- 軸対称 HO potential model では shell の前半で prolate が好まれる。

[Slide 12] Nilsson diagram を眺めるだけでかなりのことが言える (その2)

- 実は、超変形 (superdeformation) での魔法数になっている。

[Slide 13] 超変形(SD)魔法数 (軸対称調和振動子モデルによる)

- 超軸と短軸の長さの比が整数になるとき、新しい変形シェル構造が形成される。

[Slide 14] Ne と Si は超変形(SD)魔法数

- Z=10 は prolate SD magic number
- Z=14 は oblate SD magic number

[Slide 15] 40Ca の超変形状態 (井手口さん達の実験データ)

- spherical doubly magic nucleus である 40Ca といえどもわずかに励起エネルギー約 5MeV を与えるだけで超変形状態となる。

[Slide 16] 40Ca での deformed WS single-particle energy diagram

- 32Mg 領域の変形メカニズムと 40Ca の超変形状態を统一的に議論しよう。
- 40Ca 近傍の一粒子エネルギーの変形度依存性を見よう。  
N=20 は超変形魔法数でもある!

[Slide 17] 変形魔法数の競合は変形共存現象をもたらす

- Sr-Zr 領域での deformed WS single-particle energy diagram を眺めてみればオブレート変形とプロレート変形の魔法数が競合していることがわかる。

- ・実際、この領域で豊富な変形共存現象が起こっている。

[Slide 18] Ge, Se, Kr, Sr, Zr 領域で多様な形が予想されている

- ・oblate, prolate だけでなく triangular とか tetrahedral といったエキゾチックな変形状態があるかもしれない。
- 。このような状態はそれぞれの形に伴う変形魔法数に対応している。

[Slide 19] Nilsson diagram を眺めるだけでかなりのことが言える (その3)

- ・d5/2 と s1/2 の混合が重要

[Slide 20] 仲良し2人組

- ・(d5/2, s1/2), (f7/2, p3/2), (g9/2, d5/2), ... の比較
- ・これら  $\Delta I = 2$ , spin non-flip ペアア間の4重極行列要素は大きい。
- ・両者が混成して変形した平均場のなかの一粒子軌道が作られる。

[Slide 21] 弱束縛系での新しい特徴

- ・弱束縛になると軌道角運動量の小さい軌道が  
(大きい軌道と比べて) 相対的に下がってくる。  
(この理由は浜本さんの講義を聞いた後で再度議論して欲しい)

[Slide 22] Skyrme-HFB 計算の一例

- ・32Mg での Skyrme-HF single-particle energy diagram (Yamagami-Giai) の特徴
- ・弱束縛になると p3/2 と f7/2 が近似的に縮退してくる。

[Slide 23] 基本中の基本

- ・原子核の結合エネルギーは  
「巨視的エネルギー」と「微視的エネルギー」の和のかたちで書ける。
- ・「巨視的エネルギー」は量子液滴としての原子核 (液滴モデル) の大局的性質を表す。
- ・「微視的エネルギー」は「シェル構造エネルギー」と「対相関エネルギー」から成る。
- ・「シェル構造エネルギー」は陽子の寄与と中性子の寄与の和である。
- ・「シェル構造エネルギー」は、原子核の質量に対しては小さな補正項だから、  
「シェル補正エネルギー」とも呼ばれている。しかし、その「小さな」エネルギーが核構造の性質を決定する上では本質的な役割を演じるので、その起源を表す  
「シェル構造エネルギー」と呼ぶのがふさわしい (と私は考えている)。
- ・これらのエネルギーはすべて N, Z および変形パラメーターの関数である。
- ・「巨視的エネルギー」では変形しない。変形を起こすのは  
「シェル構造エネルギー」である。

[Slide 24] 核分裂アイソマーが出現する理由

- ・変形の増大とともにシェル構造が変化し、巨視的 (量子液滴) エネルギーの極大点、  
微視的シェル構造エネルギーの極小点近傍に  
変形ポテンシャル曲線の第2極小が現れる。
- ・ここにトラップされた状態が核分裂アイソマー

[Slide 25] 私はこういう風に理解している

- ・知りたいのは「何が変形を起こす **deriving force** か」ということ。  
そのためには、シェル構造エネルギーの中身を分析するのがよい。
- ・シェル構造エネルギーとは  
「シェル構造による結合エネルギーへの寄与」のこと。
- ・シェル構造エネルギーの変形度依存性を中性子と陽子の寄与に分けてプロットすれば色々なことが分かる。
- ・例1 中性子は変形を好むが陽子が球形を好む場合

[Slide 26] 私はこういう風に理解している (つづき)

- ・例2 中性子はプロレート変形を好むが陽子がオブレート変形を好む場合
- ・このような場合は  $\gamma$ -unstable (soft) となる可能性が高い。

[Slide 27] Wilet-Jean の  $\gamma$ -unstable モデルの変形ポテンシャル面

- ・Anderson-Nambu-Goldstone (ANG) モードと Higgs モードの説明によく使われる Wine-bottle 型になっている。
- ・ $\gamma$ -vibration が ANG モード,  $\beta$ -vibration が Higgs モードに対応する。

[Slide 28] 現実的な (定量的な) 数値計算の必要性

- ・以上は概念図であった。現実的な (定量的な) 数値計算による分析が望まれる。
- ・現在、市川隆敏さんが **macroscopic-microscopic model** 計算を行っている。  
(macroscopic part には **finite-range droplet model**,  
microscopic part には **folded-Yukawa single-particle potential** を用いている)
- ・シェル構造エネルギーの計算には改良された **Strutinsky 法** を用いている。  
すなわち, **Kruppa の方法 (Phys. Lett. B 431 (1998) 237)** を用いて  
連続状態の一粒子準位密度を考慮している。  
(弱束縛系の記述にはこの改良が必要)
- ・以下で、いくつかの計算例を紹介しよう。

[Slide 29] Nilsson diagram を眺めるだけでかなりのことが言える (その4)

- ・Folded-Yukawa single-particle potential での一粒子エネルギーダイアグラム  
(基本的パターンは Wood-Saxon potential の場合と同じ)

[Slide 30] 32Mg における陽子と中性子のシェル構造エネルギー

- ・明らかに陽子はプロレート変形を好む。
- ・中性子は球形と大きいプロレート変形で極小を示している。

[Slide 31] 34Si における陽子と中性子のシェル構造エネルギー

- ・明らかに陽子はオブレート変形を好む。
- ・中性子は球形と大きいプロレート変形で極小を示している。

[Slide 32] 32Mg と 34Si (N=20) の比較

- ・32Mg では陽子はプロレート変形を好むが,

34Si の陽子はオブレート変形を好む。

32Mg と 34Si の違いの主たる原因は「陽子の変形魔法数」にある。

[Slide 33] 32Mg と 34Si (N=20) の変形エネルギー曲線の比較

- ・シェル構造エネルギーと巨視的エネルギー(macroscopic part)を合計すると巨視的エネルギーが変形を妨げていることがよく分かる。

[Slide 34] 対相関の役割

- ・対相関は変形ポテンシャル曲線を滑らかにする。

[Slide 35] 34Mg と 36Si (N=22) のシェル構造エネルギーの比較

- ・陽子の寄与は N=20 とほぼ同じ。
- ・一方、中性子の寄与において N=20 で見えた球形での極小が消えている。

[Slide 36] 34Mg と 36Si (N=22) の変形エネルギー曲線の比較

- ・両者の違いの主因は陽子の寄与の違い。

[Slide 37] 準位交差問題

- ・変形した平均場での一粒子エネルギーの変形度依存性
- ・準位交差点の前後で 0p0h 状態と 2p2h 状態という言葉の意味が入れ替わる。
- ・0p0h とか 2p2h という概念は reference (真空) に相対的な概念である。

[Slide 38] 縮退を解く

- ・この概念を更に一般化しよう。

[Slide 39] 一般的法則

- ・フェルミ面が準位密度の高い位置にあると平均場の形を変化させて準位密度を低くする。
- ・原子核はフェルミ面近傍の準位密度が低くなるような形になりたがる。
- ・そうすることによって結合エネルギーが大きくなり、より安定になるから。

[Slide 40] シェル構造とは何か

- ・粗視化して見える一粒子スペクトルにおける疎密の振動パターン
- ・振動パターンは変形度の増大につれて変化する。

[Slide 41] 大局を見る眼 / 詳細を見る眼

- ・分解能を変える (ズーム in/out する) と違った姿が見える。
- ・離散的な一粒子エネルギー準位を滑らかにして準位密度という概念を導入し、そのエネルギー依存性を調べよう。
- ・すると、単調増大の周りの揺らぎ構造、つまり、準位密度の疎密の振動パターンが見えてくる。

[Slide 42] 超変形シェル構造の形成と古典周期軌道の関係

- ・軸対称調和振動子ポテンシャルでの Nilsson diagram を眺めてみよう。
- ・長軸と短軸の比が 2:1 のとき 8 の字型の周期軌道ができる。
- ・このことと 1 粒子準位の縮退が起こることが対応している。

- ・この対応関係を一般のポテンシャルに一般化することができる。

[Slide 43] シェル構造の半古典論 (この問題のより深い理解に興味がある人たちへ)

- ・変形シェル構造形成の起源を解明するために有用な「シェル構造の半古典論」という基礎理論がある。
- ・「量子スペクトル」と「古典周期軌道の集合」の間には驚くべき対応関係がある。
- ・「準位密度に対するトレース公式」は「すべての古典周期軌道に関する和によって量子スペクトルを導ける」ことを示している。

[Slide 44] 参考文献

- ・「原子核はなぜ変形するか」----この問題の奥は深い
- ・K. Arita, Phys. Rev. C 86 (2012) 034317, Periodic-orbit approach to nuclear shell structure ... (prolate-oblate asymmetry の起源についても議論されている)
- ・在田謙一郎, 松柳研一, 日本物理学会誌 57 (2002) No.1, p.37, 有限量子系のシェル構造と古典周期軌道 (主として超変形シェル構造の起源について議論している)

[Slide 45] 割愛する話 (今日は立ち入らないが)

- ・パリティ対称性を破る (8重極変形) 平均場に伴うシェル構造変化
- ・高速回転に伴うシェル構造変化 (回転系シェルモデル, 高スピン oblate isomer など)
- ・強調したいこと  
現代の核構造論では「対称性の自発的破れ (変形)」の考えを基礎にして「平均場と一粒子運動」の概念はもっともっと一般化されている。

[Slide 46] まとめ (今日伝えたいこと)

- ・変形 (回転対称性の自発的破れ) は平均場が「変形シェル構造」を形成することに起因する。
- ・原子核は, フェルミ面近傍の準位密度が低くなる形になろうとする。なぜなら, そのような形になることによって結合エネルギーが増えて安定化するから。
- ・ $N=20$  ( $N=22$ ) isotone の Ne, Mg と Si, S で変形しやすさが異なる。その主たる原因は「陽子の変形魔法数」に注目することによって理解できる。
- ・「陽子と中性子のシェル構造エネルギー」の競合と協力の微妙なバランスによって原子核の形が決まると言っても過言ではない。
- ・中性子ドリップ線に近づいた Ne, Mg isotopes では, 弱束縛効果のため「仲良し二人組」が近似的に縮退し変形を促進する。  
(この理由については浜本さんの講義を聞いてから再び議論したい)