

図 1-1 電子散乱によって測定した原子核の電荷分布.
(B. Frois and C. N. Papanicolas: Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 37(1987)133 による.)

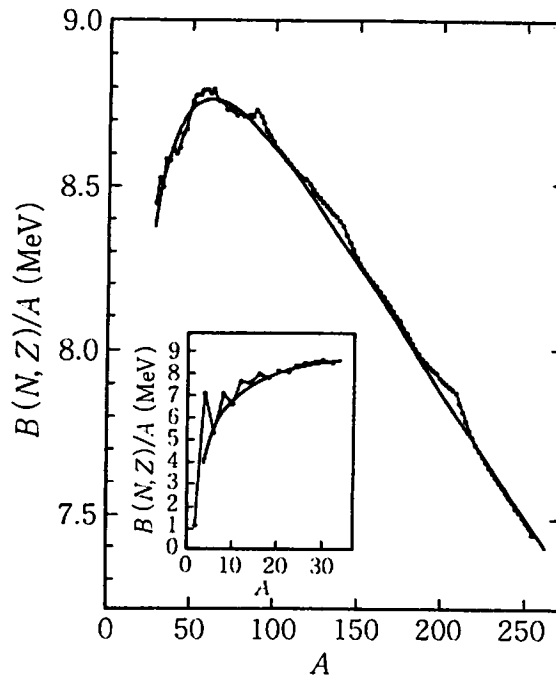


図 1-2 1核子当たりの結合エネルギー. 滑らかな曲線は式(1.5)の B_{micro} を無視したもの. (巻末文献[I-1]による.)

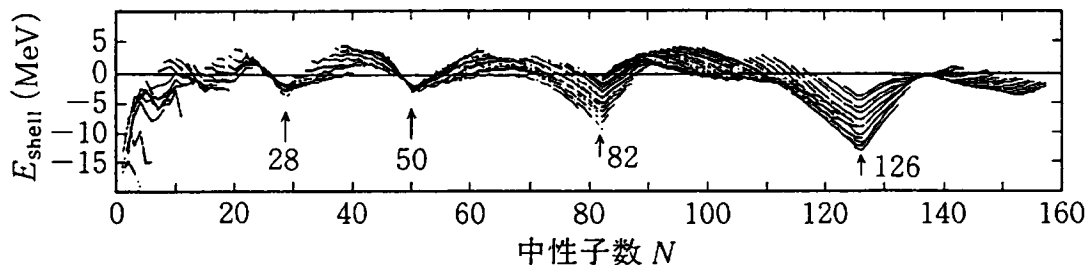


図1-3 殻構造エネルギー E_{shell} の N 依存性. 折れ線は個々のアイソトープを示す. (W. D. Myers and W. J. Swiatecki: Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 32(1982) 309による.)

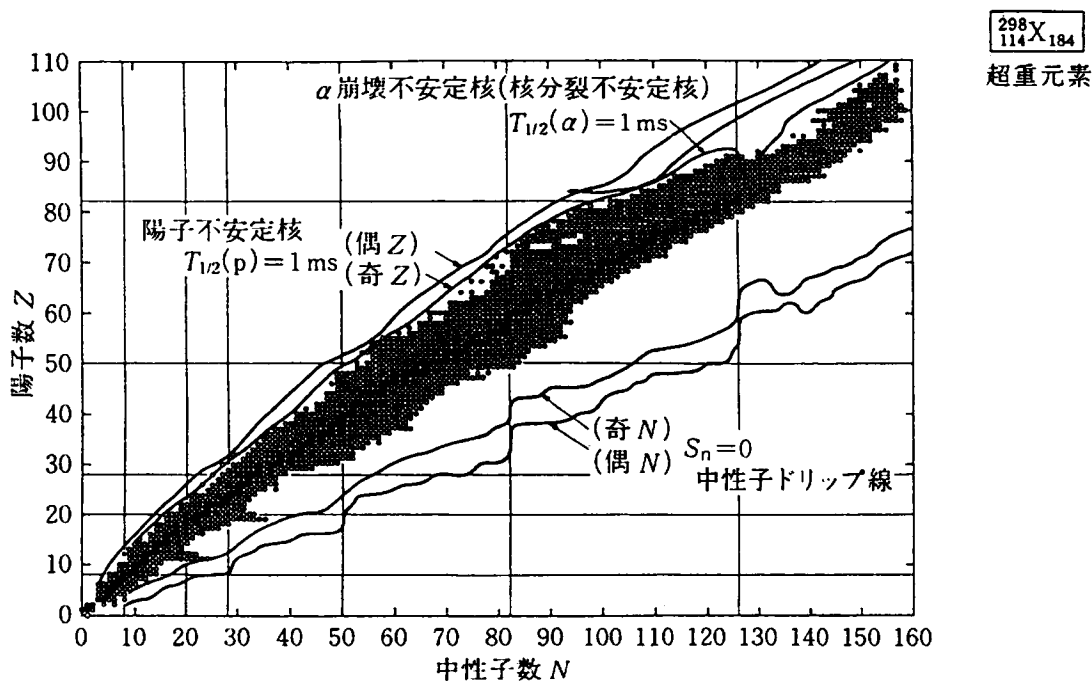


図1-4 (N, Z) 平面での原子核の存在領域. 黒丸が安定核, 白丸がこれまでに知られている不安定核を示す. 中性子ドリップ線 ($S_n = 0$) および陽子放出の半減期 $T_{1/2}(p)$ が 1 ms となる境界線が示されている. 参考までに, 理論的に予想される超重元素 $^{298}_{114}\text{X}_{184}$ も示されている. (Y. Yoshizawa, T. Horiguchi and M. Yamada: Chart of The Nuclides 1984, (Japanese Nuclear Data Committee and Nuclear Data Center (JAERI), 1984) に基づく.)

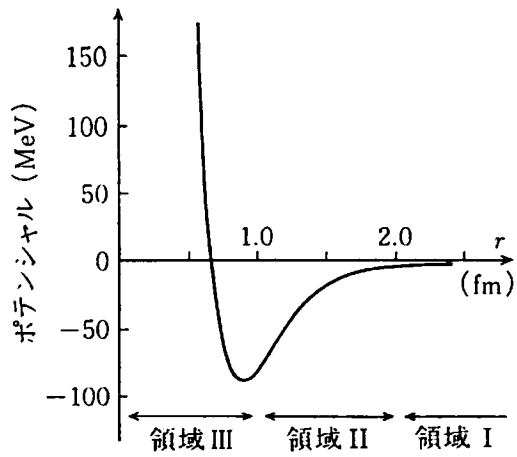


図1-5 核力ポテンシャルの概念図. 2核子の相対角運動量 $L=0$, 合成スピン $S=0$ の状態に対するもの.

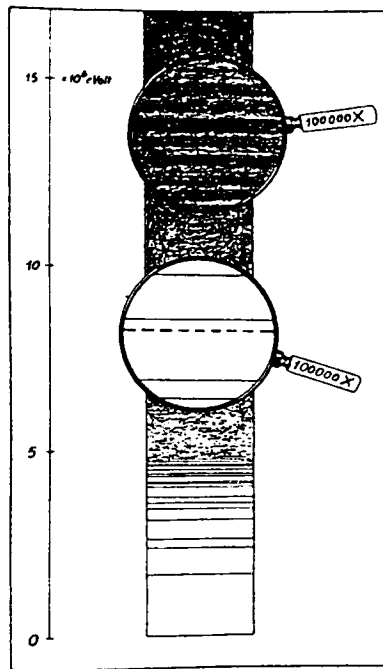


図1-6 励起準位の分布. エネルギーの単位は $10^6 \text{ eV} = \text{MeV}$. Niels Bohr の講演で使われたもの. (Nature 137(1936)351 による.)

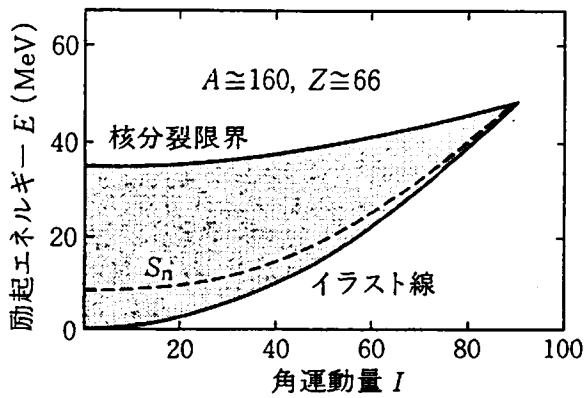


図 1-7 (E, I) 平面での原子核の存在領域. $A \cong 160$, $Z \cong 66$ の原子核に対する回転液滴モデルによる理論計算. 破線は中性子放出が可能となる境界を示す. (S. Cohen, F. Plasil and W. J. Swiatecki: Ann. of Phys. 82(1974)557 に基づく.)

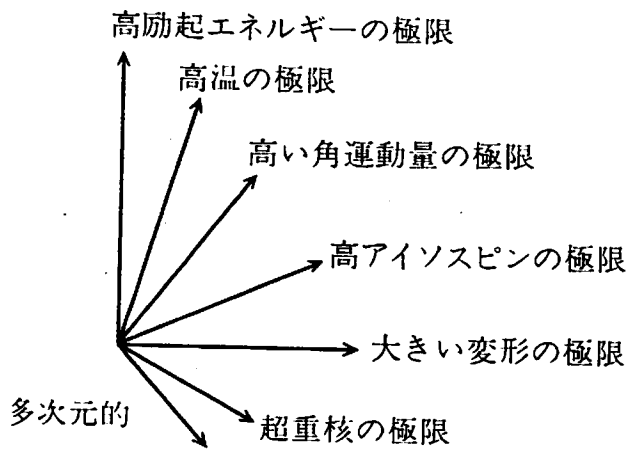
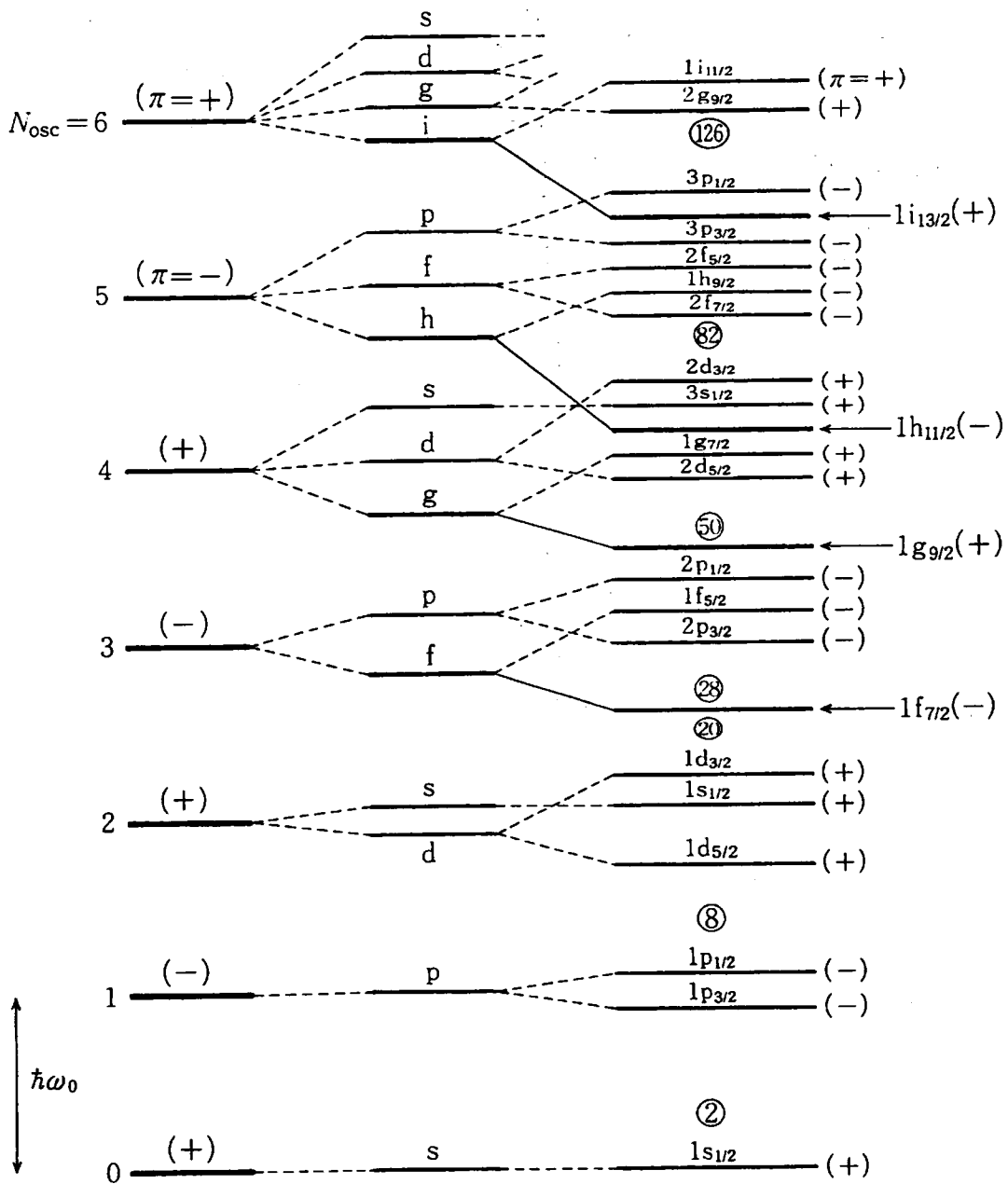


図 1-8 原子核研究の多次元性.



調和振動子 Woods-Saxon ($l \cdot s$)ポテンシャル
 ポテンシャル ポテンシャル の効果を含む

図 2-1 j - j 結合殻モデルの 1 粒子エネルギー準位(概念図). Woods-Saxon ポテンシャルに ($l \cdot s$) 項がつけ加わって, 魔法数 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 が得られる. 記号 s, p, d, f, g, h, i は $l=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ を示し, 例えば $1h_{11/2}$ は $n=1, l=5, j=11/2$ を表わす. これらの準位を下から詰めたときの核子の累計数は, 各準位の縮退度 $2j+1$ から計算できる.

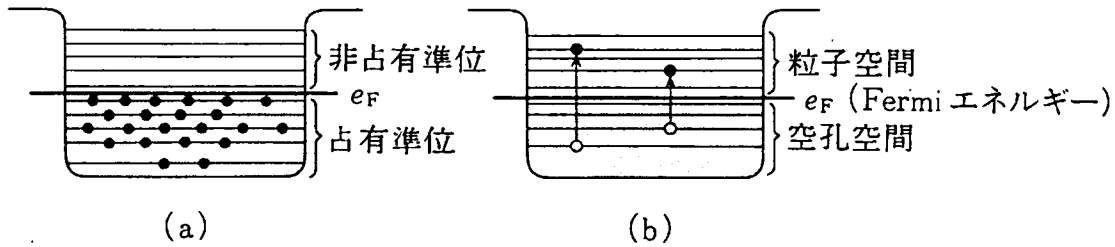


図 2-2 殻モデルにおける粒子-空孔励起(概念図).

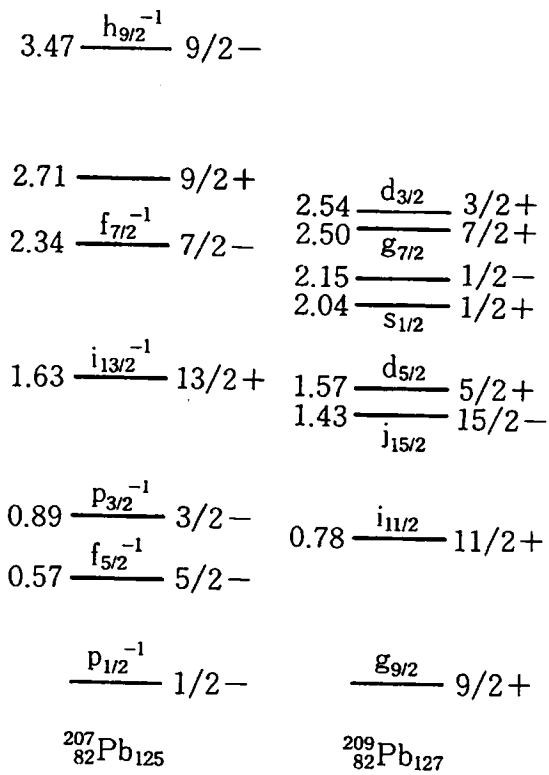


図 2-3 ^{207}Pb と ^{209}Pb の低励起スペクトル. 各準位の右側に角運動量とパリティ, 左側に励起エネルギー (MeV) が示されている. $p_{1/2}^{-1}$, $g_{9/2}$ などの記号は, $j-j$ 結合殻モデルでの解釈を示す.

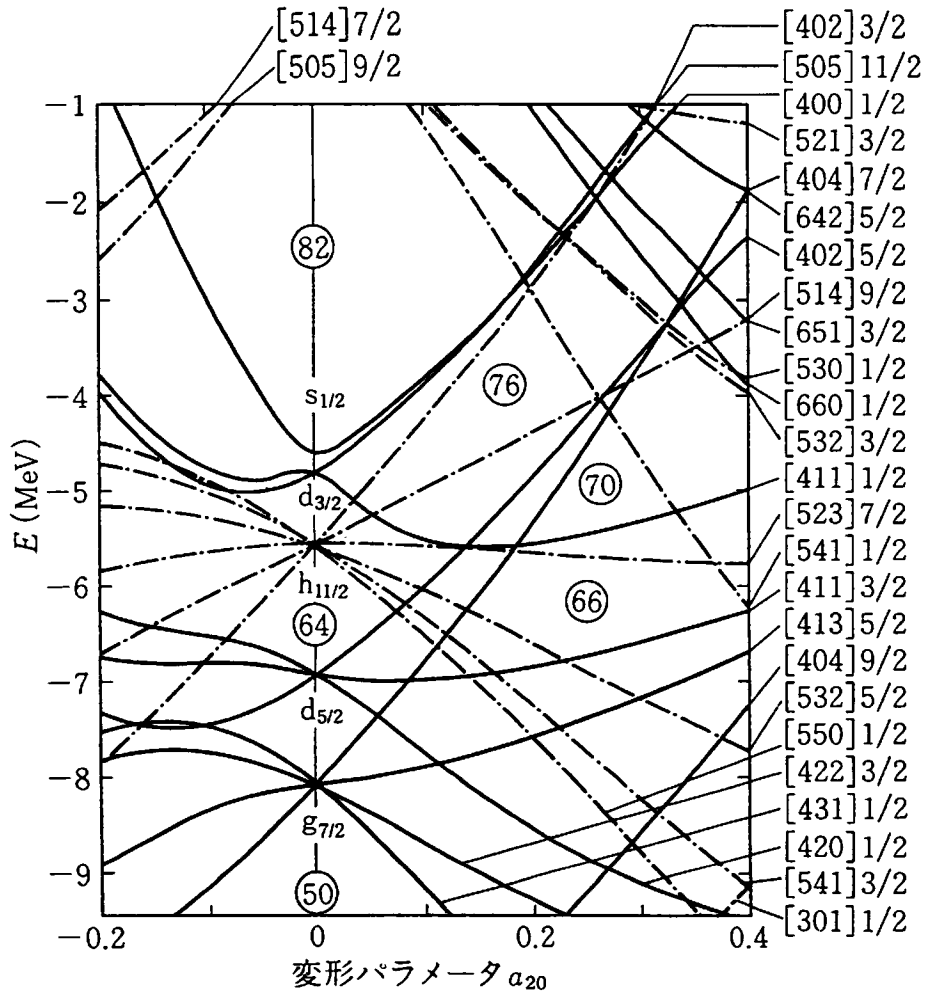


図 2-4 変形殻モデルの 1 粒子エネルギー準位. $50 < Z < 82$ 領域の陽子に対する計算例. 実線は偶パリティ, 一点鎖線は奇パリティの準位, 各準位につけられた数字の組は漸近量子数 $[N_{osc}, n_3, \Lambda] \Omega$ を示す. (W. Nazarewicz, M. A. Riley and J. D. Garrett: Nucl. Phys. A512(1990)61 による.)

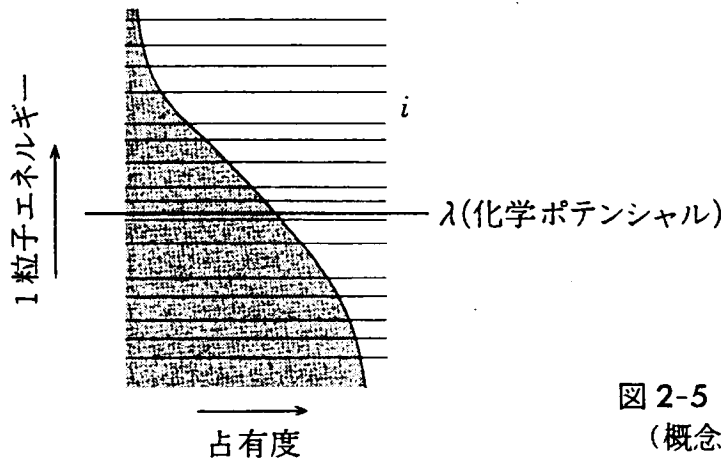


図 2-5 準粒子に対する真空 (概念図).

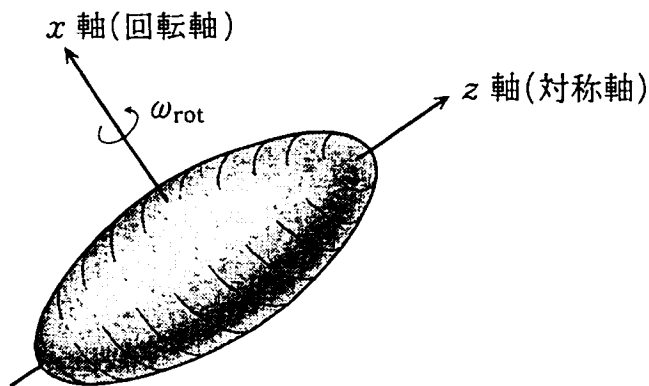


図 2-6 プロレート変形核の一様回転(概念図).

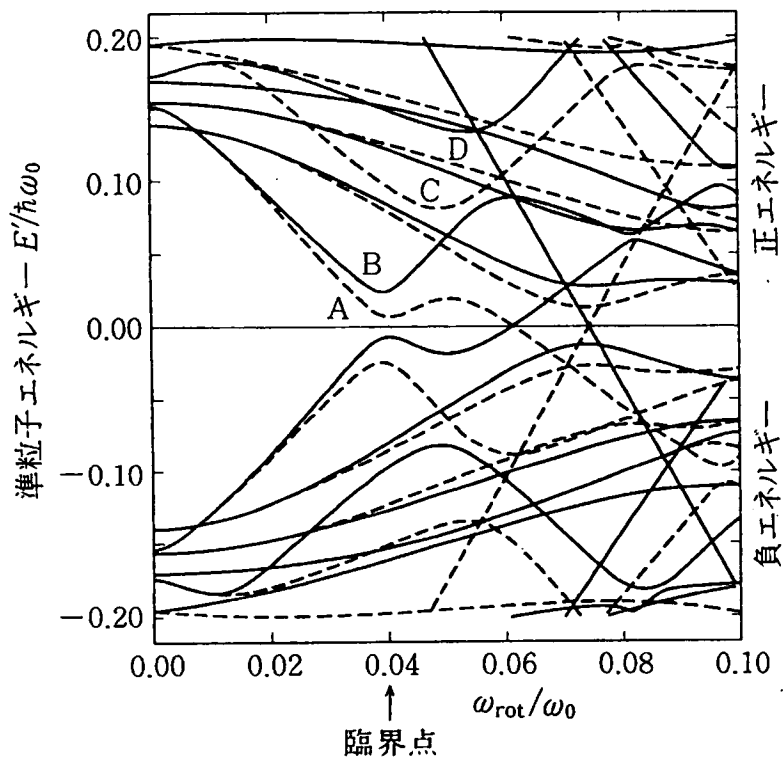


図 2-7 回転座標系での準粒子スペクトルの角速度依存性. Nilsson ポテンシャル($\delta=0.27$), $\Delta=1.0$ MeV を用いた ^{164}Er に対する計算値. 記号 A, B, C, D は中性子の $i_{13/2}$ 軌道に関する準粒子状態を示す. 準粒子エネルギーは $\hbar\omega_0$, 角速度は ω_0 ($\delta=0$) を単位として描かれている.

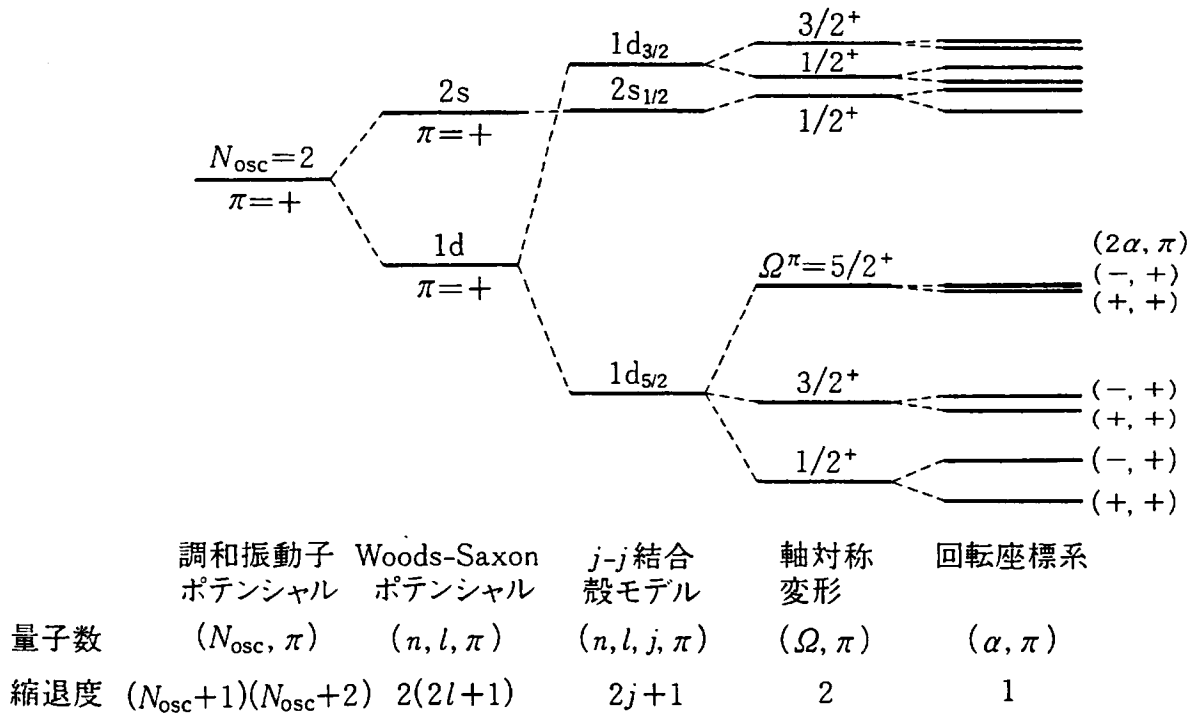


図 2-8 異なる平均ポテンシャルに対するエネルギー準位の比較(概念図). Ω は角運動量の対称軸成分, α はシグネチャー量子数を表わす.

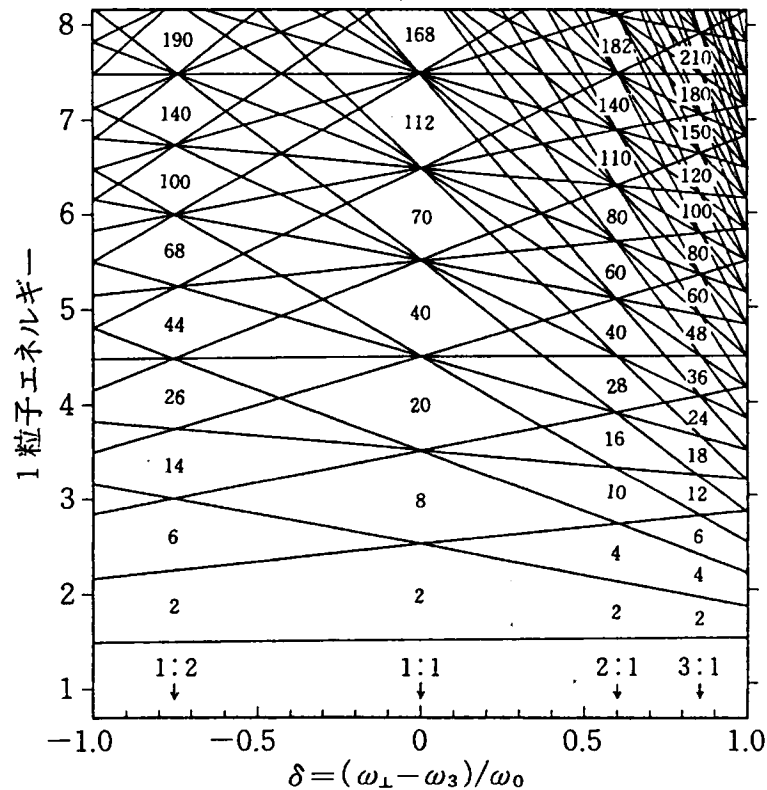


図 2-9 軸対称調和振動子ポテンシャルの1粒子エネルギー準位. エネルギーは $\hbar\omega_0(\delta)$ を単位として, 変形度 $\delta = (\omega_{\perp} - \omega_3) / \omega_0$ の関数として描かれている. 図中の矢印は $\omega_{\perp} : \omega_3$ が整数比となる変形度を示す. 変形魔法数が示されている(固有スピンに関する縮退度 2 を数えている). (巻末文献[1-42]による.)

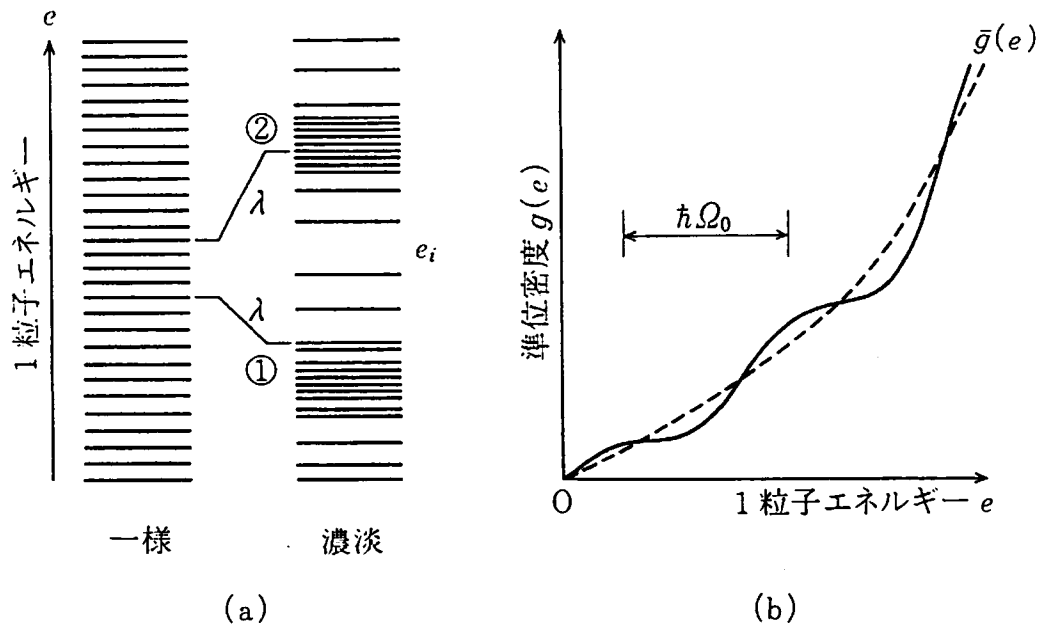


図 2-10 殻構造の概念図.

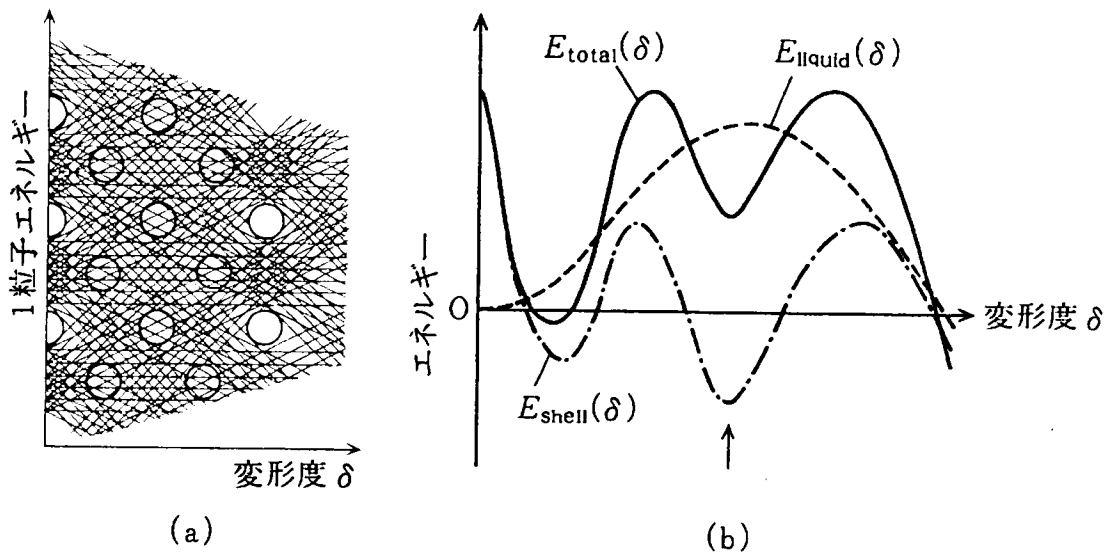


図 2-11 (a) 変形ポテンシャル内の 1 粒子エネルギー準位の分布. 円で囲んだ領域に Fermi 面があると殻構造エネルギー E_{shell} が大きくなる(概念図). (V.M. Strutinsky: Nucl. Phys. A122(1968)1 による.)
 (b) E_{shell} , E_{liquid} および全エネルギー E_{total} の変形度 δ 依存性(概念図).

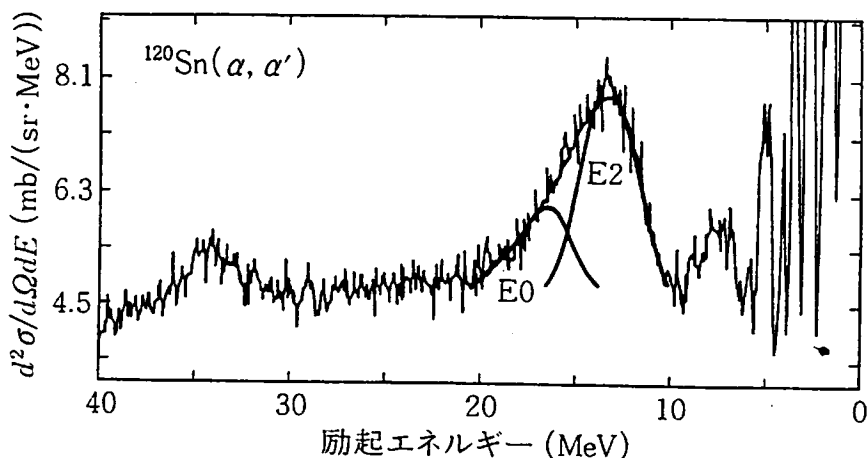


図 3-1 α 粒子の非弾性散乱による ^{120}Sn の巨大共鳴励起の微分断面積. 励起エネルギー 13 MeV 近傍のピークがアイソスカラー型 4 重極振動モードの励起に対応する. (F. E. Bertrand *et al.*: Phys. Rev. C22 (1980)1832 による.)

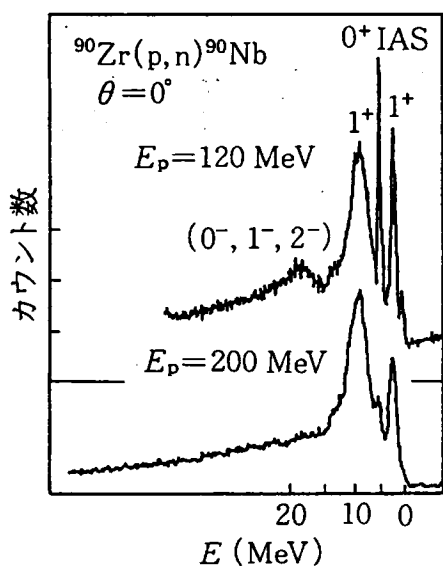


図 3-2 120 MeV および 200 MeV の陽子を用いた $^{90}\text{Zr}(p, n)^{90}\text{Nb}$ の陽子を用いた $^{90}\text{Zr}(p, n)^{90}\text{Nb}$ 反応による中性子のスペクトル. 横軸は ^{90}Nb の励起エネルギー E を示す. $E \cong 10$ MeV のピークが巨大 GT 共鳴. 双極子型スピンのアイソスピンの振動による $I^\pi = 0^-, 1^-, 2^-$ 状態は 120 MeV 陽子の場合にのみ見えている. 記号 IAS はアイソバリックアナログ状態を表わす. (C. Gaarde: Nucl. Phys. A396(1983)127c による.)

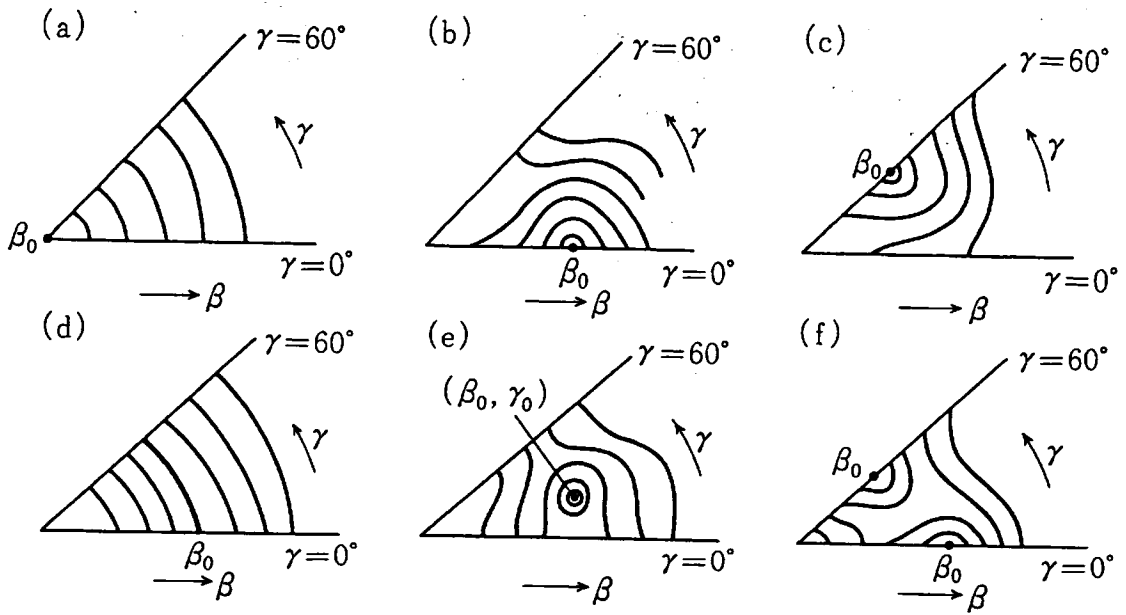


図3-5 ポテンシャル $V(\beta, \gamma)$ の概念図. 黒丸は極小点, 実線は等ポテンシャル線を示す. ただし(d)の場合には極小点は存在せず, 太い実線がポテンシャルの谷を表わしている.

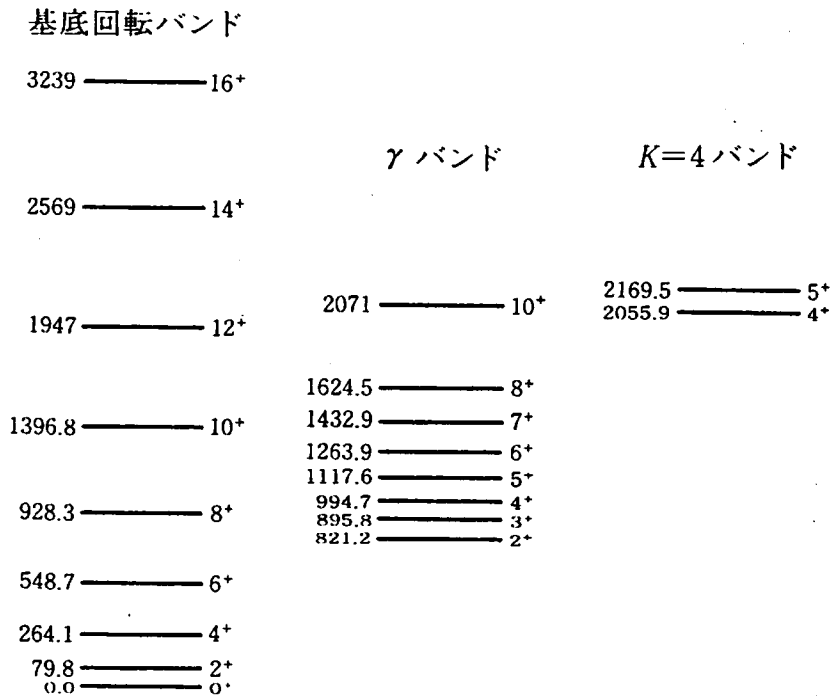


図3-6 Coulomb 励起による ^{168}Er の低い励起スペクトル. 各準位の角運動量とパリティ I^π , および励起エネルギー (keV) が示されている. $K=4$ バンドは γ 振動が2個励起された ($n_\gamma=2$) 回転バンドと推定されるが, (3.29)式では無視された非調和効果のため, その励起エネルギーは $2\hbar\omega_\gamma$ より高い. (M. Oshima *et al.* の実験および W. F. Davidson and W. R. Dixon: J. of Phys. G17(1991)1683 に基づく.)

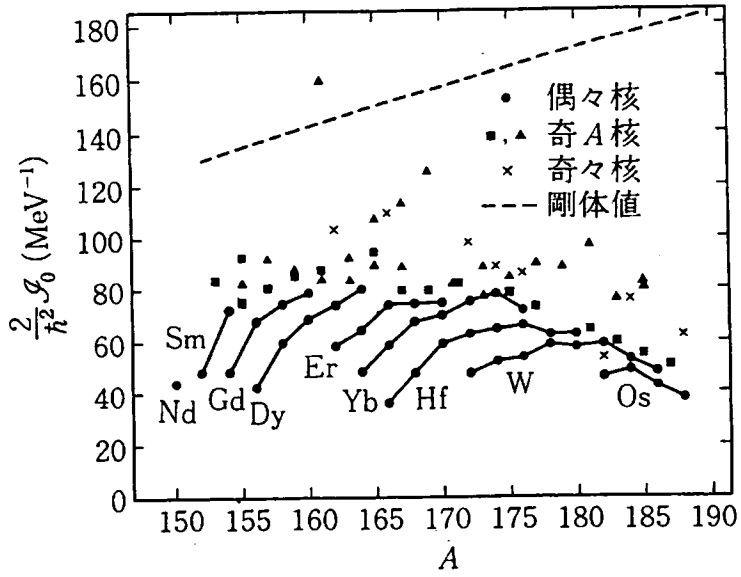


図 3-7 $150 \leq A \leq 190$ 領域の基底回転バンドの慣性モーメント I_0 . (巻末文献[1-1]による.)

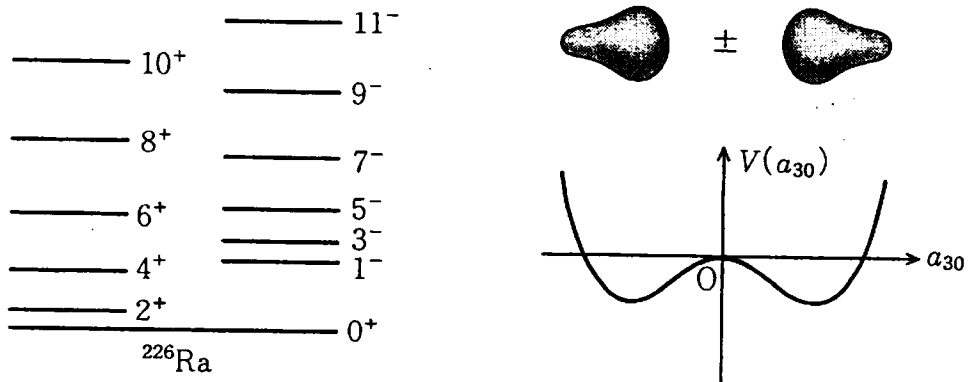


図 3-8 ^{226}Ra のパリティ 2 重項.

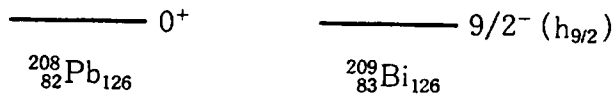
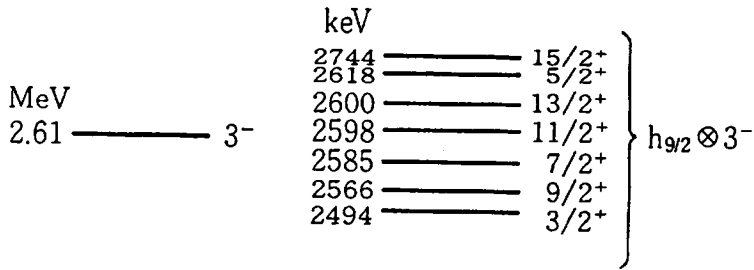


図 3-9 ^{209}Bi の粒子-振動 7 重項. ^{208}Pb の 8 重極振動と $h_{9/2}$ 軌道の陽子とからなる. 振動の角運動量 $\lambda=3$ と陽子の角運動量 $9/2$ を合成すると, 全角運動量・パリティ $I^\pi=3/2^+, 5/2^+, \dots, 15/2^+$ の 7 重項ができる. 粒子-振動結合がなければ, これらは縮退する. (7 重項のエネルギー分離は実際よりも大きく描かれている.)

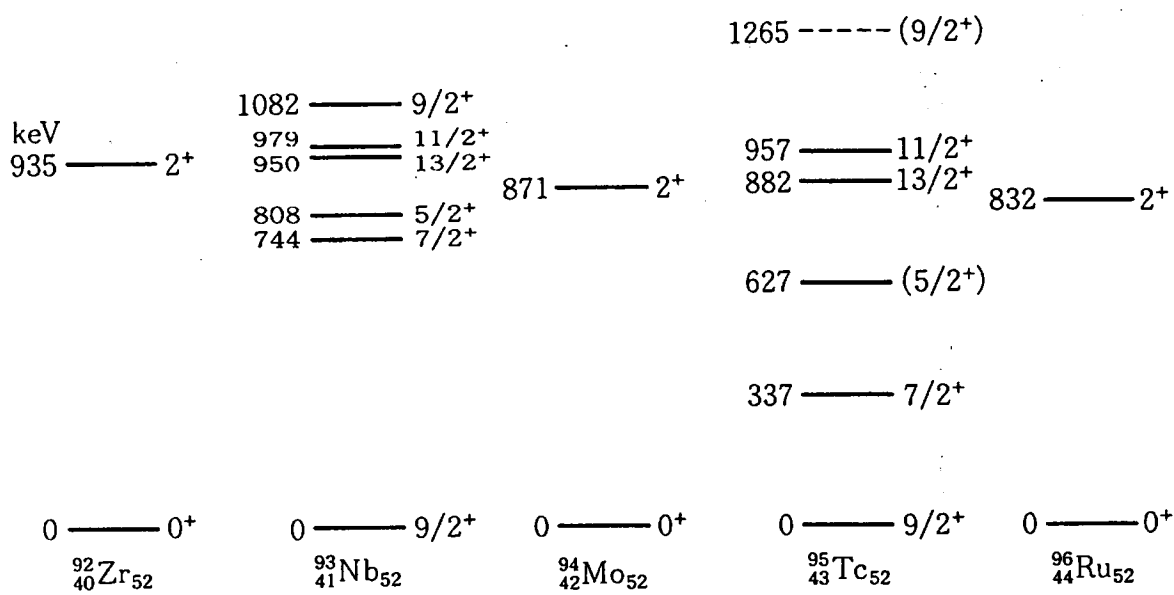


図 3-10 ^{93}Nb と ^{95}Tc における準粒子-4 重極振動 5 重項. 偶々核 ^{92}Zr , ^{94}Mo , ^{96}Ru の 4 重極振動 ($\lambda^\pi=2^+$) と $g_{9/2}$ 軌道の準粒子から奇 A 核の 5 重項 ($I^\pi=5/2^+, 7/2^+, \dots, 13/2^+$) がつくられる. (T. Shibata, T. Itahashi and T. Wakatsuki: Nucl. Phys. A237 (1975)382 による.)

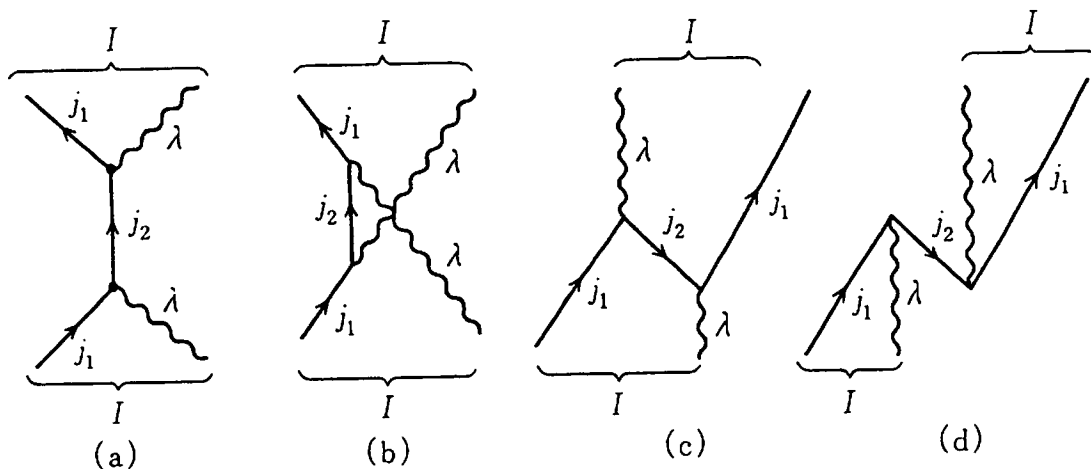


図 3-11 粒子-振動結合の2次のダイアグラム. 波線は表面振動モード(多重極度 λ), 上向き矢印つきの実線は粒子, 下向き矢印つきの実線は空孔を表わす. 粒子の角運動量 j_1 と振動の角運動量 λ を合成して全角運動量 I をつくる.

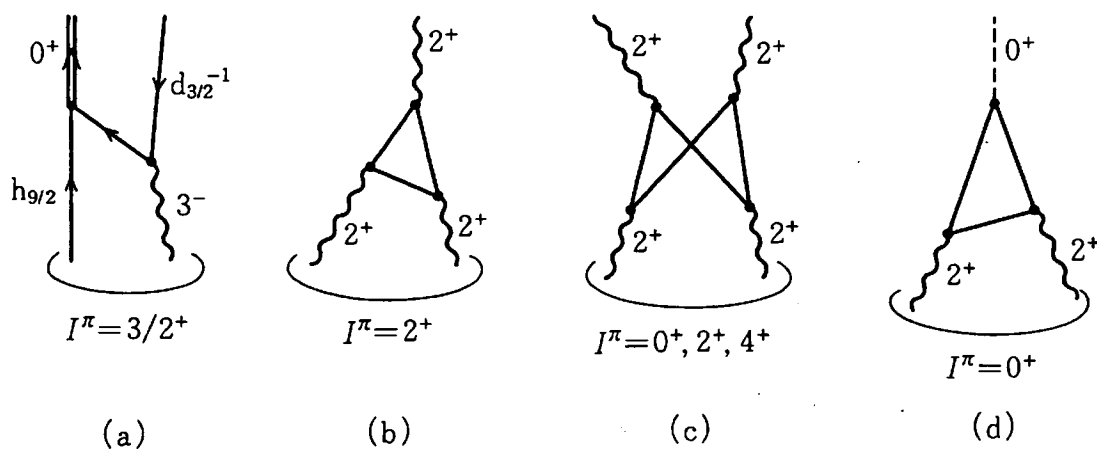


図 3-12 粒子-振動結合の高次のダイアグラム. (a) 図 3-9 の7重項の中の $3/2^+$ 状態が $d_{3/2}^{-1}$ 軌道の空孔と対振動モードに変化する過程. (b) 4重極振動モードが1個励起された状態(1フォノン状態)と2個励起された状態(2フォノン状態)の混合. 波線は4重極振動モード, 実線は準粒子を表わす. (c) 4重極振動の2フォノン状態における Pauli 原理に由来する非調和効果. 振動モードの構成要素である準粒子が2つのモードの間で交換される. (d) $I^\pi=0^+$ の2フォノン状態と超伝導相での対振動モード(破線)の結合.

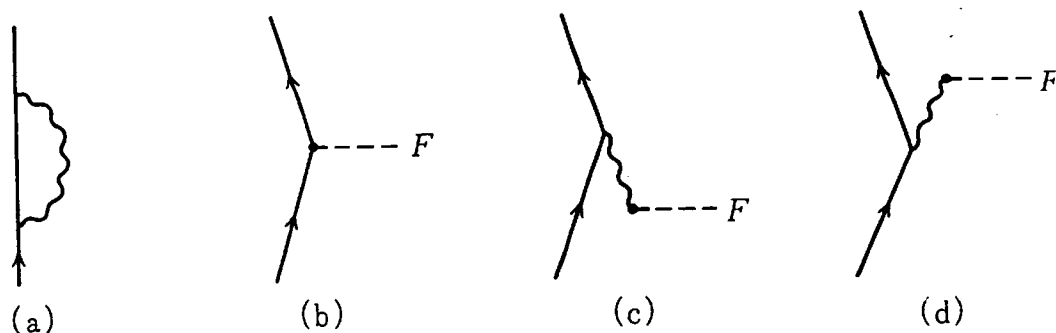


図 3-13 振動モードの着物を着た粒子(a)に対する外場 F の作用(b)~(d).

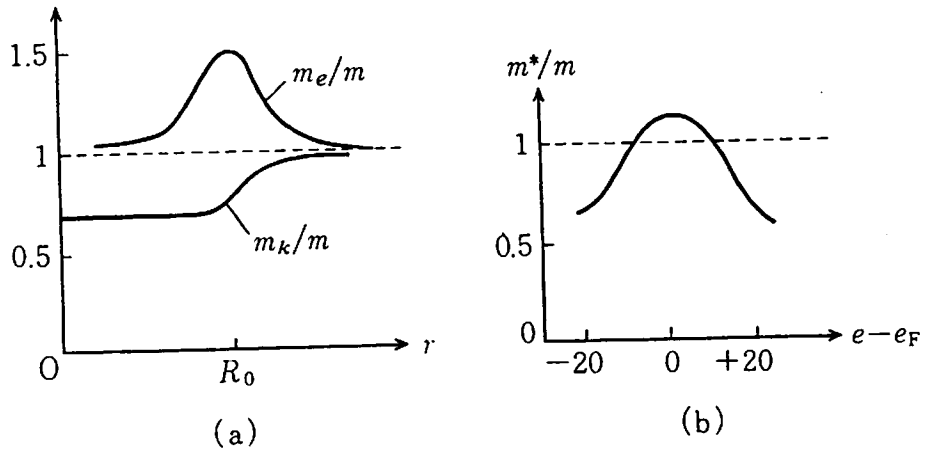


図 3-14 (a) 有効質量 m_k と m_e の動径依存性(概念図). R_0 は核半径. (b) 有効質量 m^* のエネルギー依存性(概念図). e_F は Fermi エネルギー.

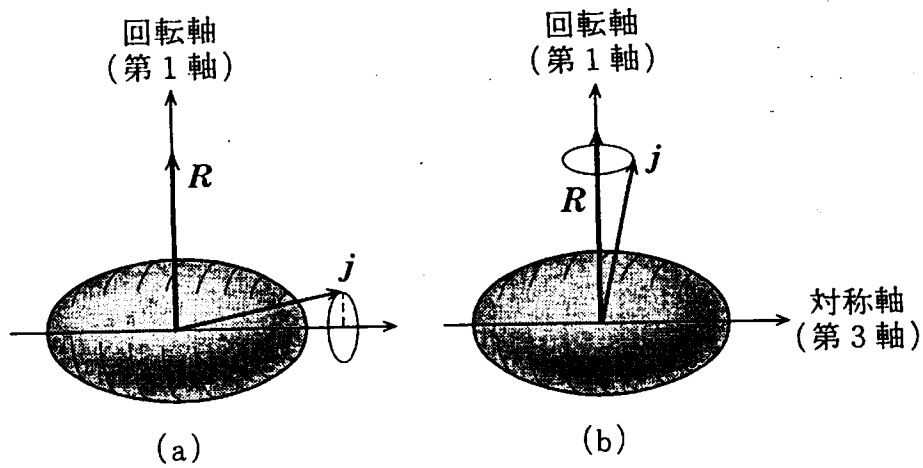


図 3-15 強結合(a)と回転整列(b)(固有座標系から見た概念図).

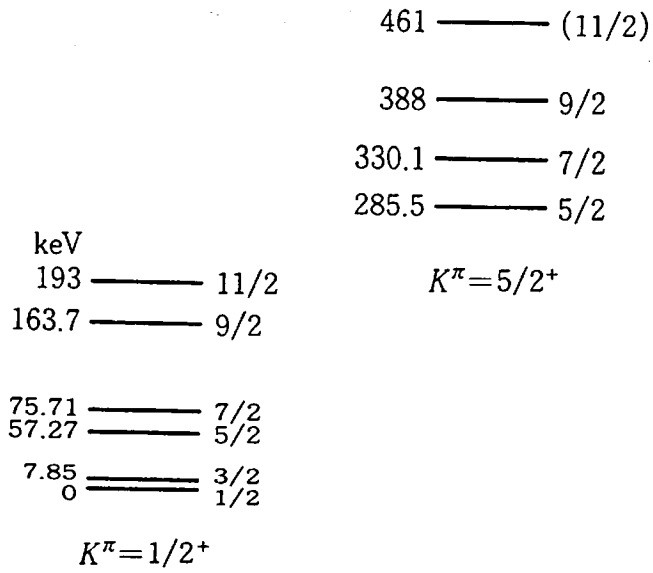


図 3-16 ^{239}Pu の $K^\pi=1/2^+$ および $K^\pi=5/2^+$ 回転バンド. 各準位の右側に角運動量 I , 左側に励起エネルギー (keV) を示す. $K^\pi=1/2^+$ 回転バンドの a は $a \approx -0.58$ である.

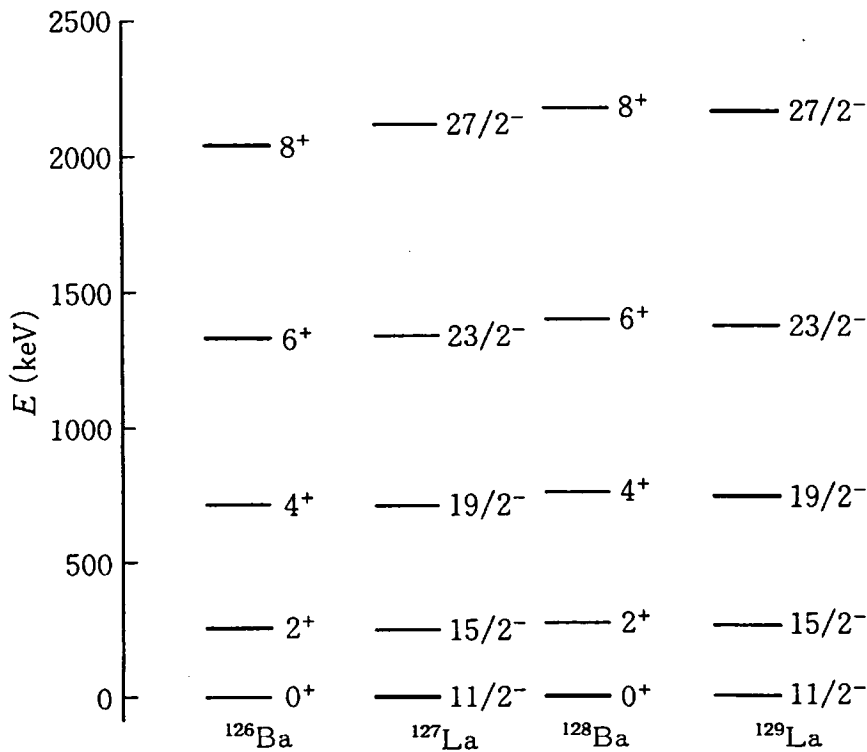
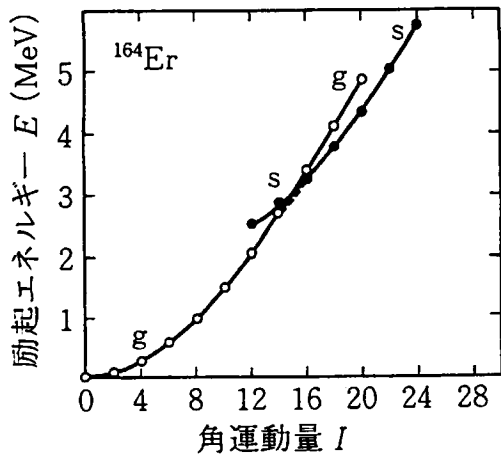
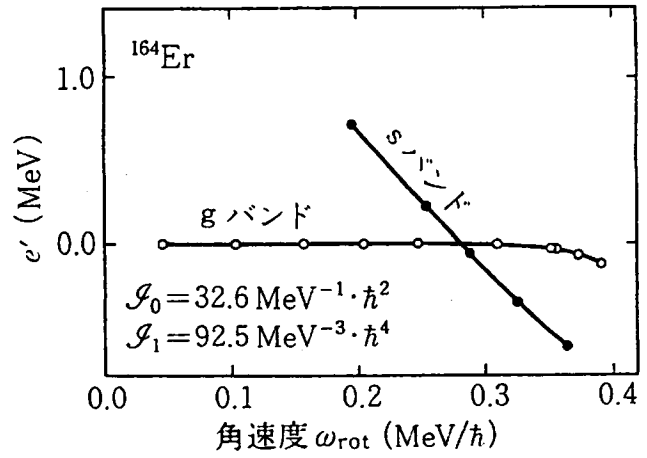


図 3-17 $^{127,129}\text{La}$ の回転整列バンド. (F. S. Stephens, R. M. Diamond, J. R. Leigh, T. Kammuri and K. Nakai: Phys. Rev. Lett. 29(1972)438 に基づく.)



(a)



(b)

図3-18 (a) ^{164}Er のイラストスペクトル. g バンドの準位を白丸, s バンドの準位を黒丸で示す. (b) 回転座標系での s バンドの励起エネルギー e_s' の角速度依存性.

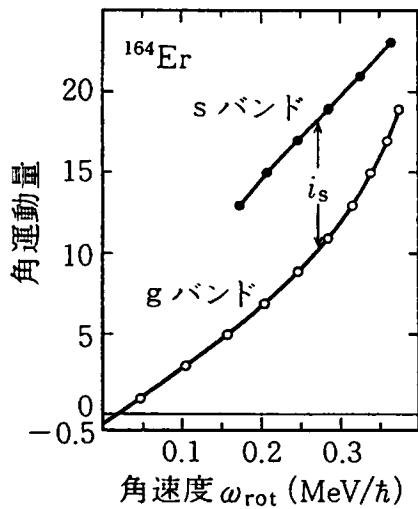


図3-19 ^{164}Er の g バンドの角運動量(白丸)と s バンドの角運動量(黒丸)の ω_{rot} 依存性.

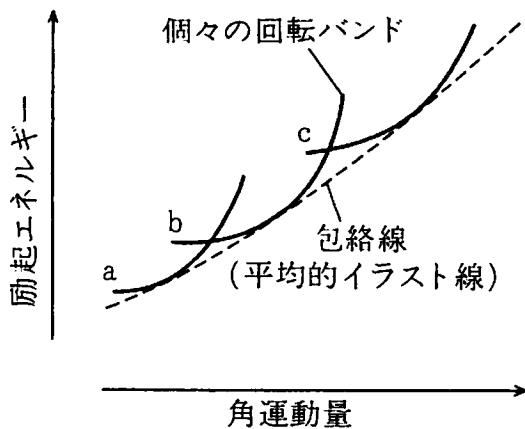


図3-20 高スピンの構造変化(概念図).

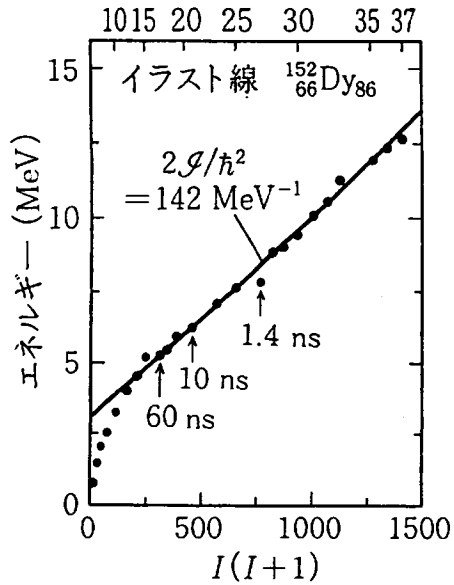
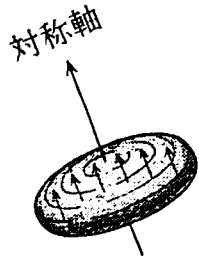


図 3-21 角運動量整列状態(概念図)と ^{152}Dy のイラストスペクトル. 黒丸が実験値. 矢印は高スピンイソマーとその寿命を示す. 実線は $I \geq 17$ での平均的イラスト線. 横軸は $I(I+1)$ であることに注意. (T. L. Khoo *et al.*: Phys. Rev. Lett. 41(1978)1027 による.)

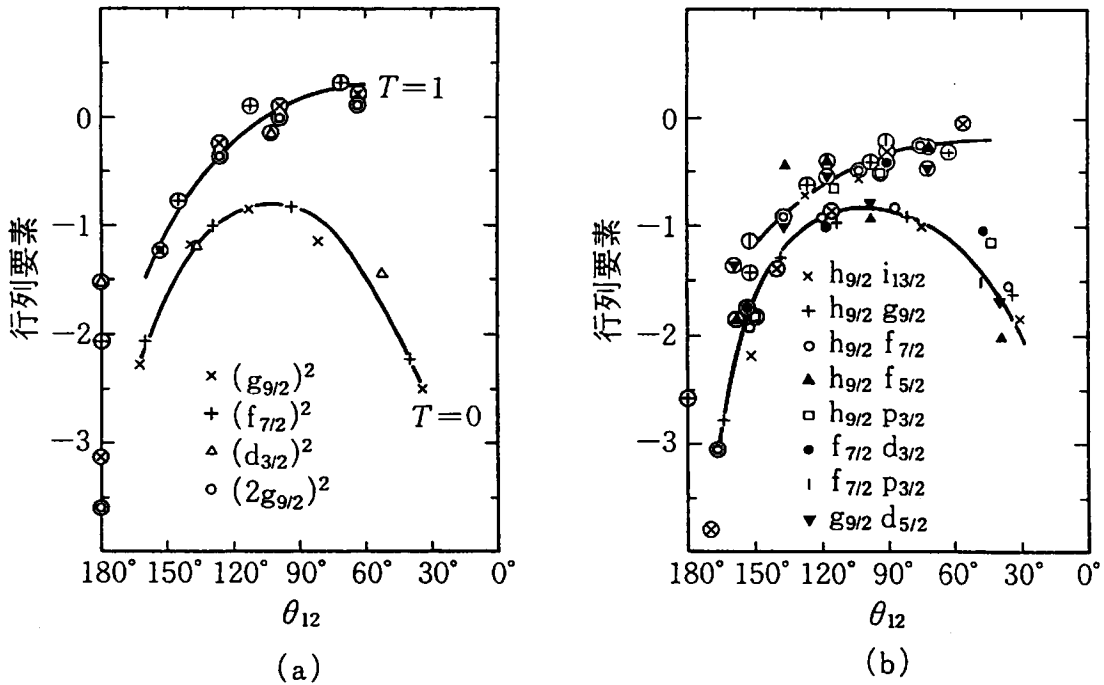


図 3-22 有効相互作用の行列要素 $\langle j_1 j_2 I | V | j_1 j_2 I \rangle$ の角度依存性. (a) $j_1 = j_2$ の場合のアイソスピン T による分類, (b) $j_1 \neq j_2$ の中性子-陽子相互作用. 上側(下側)の曲線は $j_1 + j_2 - I$ が奇数(偶数)の行列要素の平均的振舞いを示す. (J. P. Schiffer and W. W. True: Rev. Mod. Phys. 48(1976)191 および N. Anantaraman and J. P. Schiffer: Phys. Lett. 37B(1971) 229 による.)

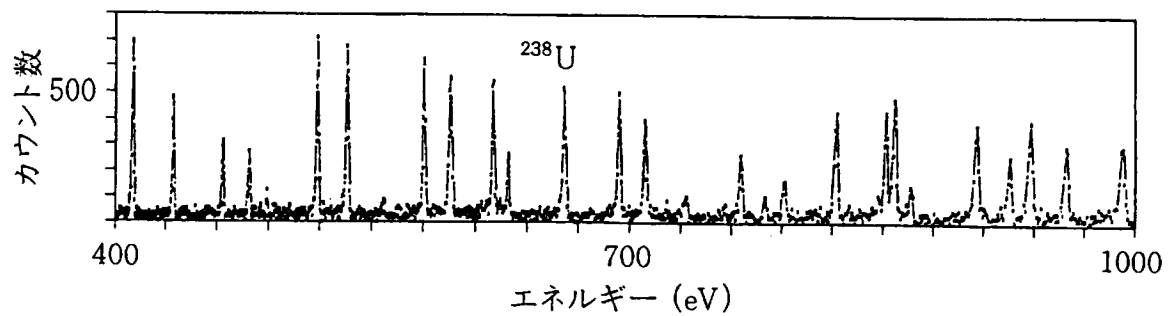


図 4-1 ^{238}U に対する中性子の共鳴準位. 横軸は中性子の運動エネルギー (eV) を示す. (F. Rahn *et al.*: Phys. Rev. C6(1972)1854 による.)

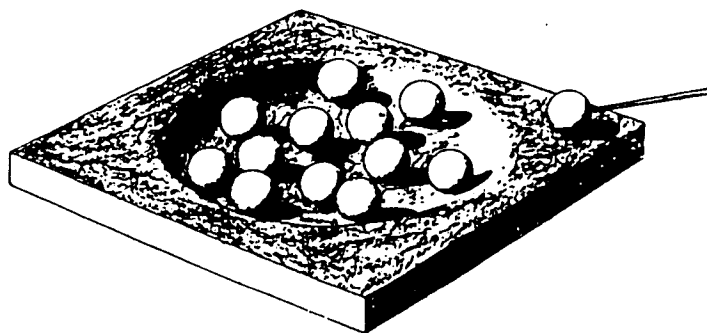


図 4-2 N. Bohr が複合核モデルのアイデアを説明するために用いたビリヤードの模型. (N. Bohr: Nature 137 (1936)351 による.)

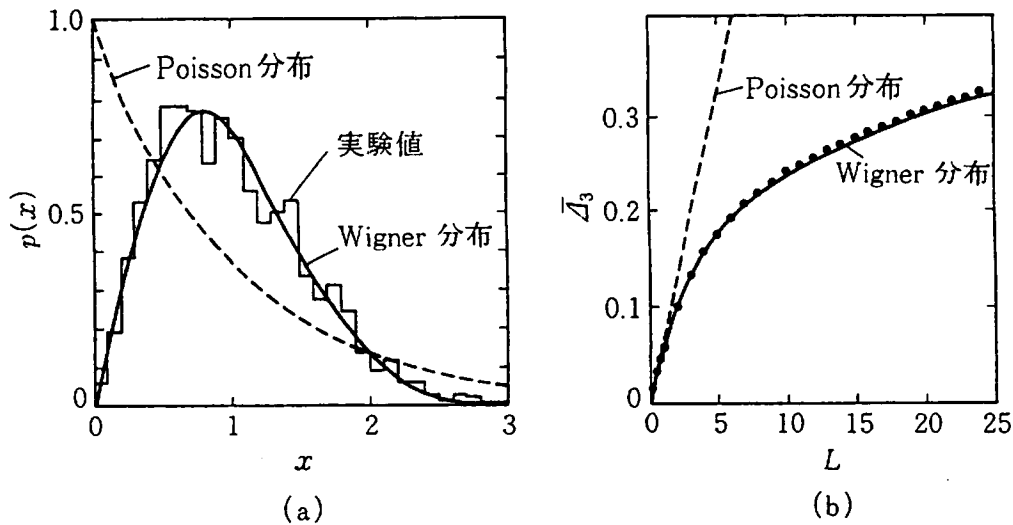


図 4-3 高励起状態の準位の統計. (a) 最近接準位間隔の分布. 横軸は(平均準位間隔で規格化した)準位間隔. (b) Δ_3 統計. 横軸は(平均準位間隔で規格化した)エネルギー幅 L . 実験データは黒丸で示されている. (巻末文献[1-88]による.)

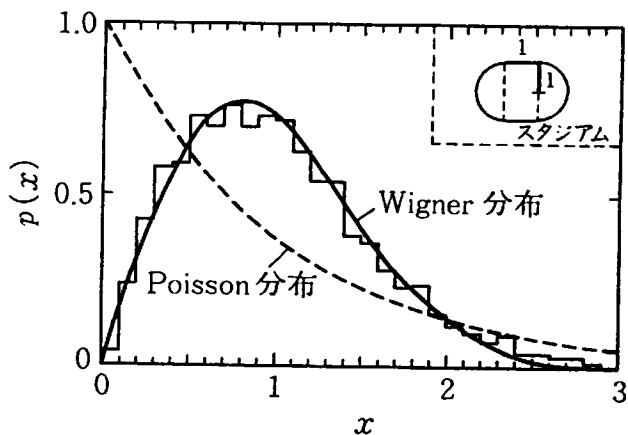


図 4-4 スタジアム型ビリヤード模型における最近接準位間隔の分布. ヒストグラムは図中右上に示したスタジアム内に閉じ込められた1個の粒子に対する Schrödinger 方程式の固有値分布から求めたもの. (巻末文献[1-88]による.)

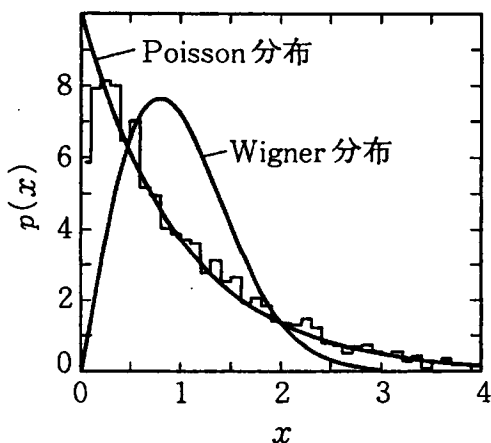


図 4-5 $A=155\sim 185$ の原子核のイラスト線から $1\sim 2$ MeV の励起エネルギー領域にある同じ I^π をもつ準位 2522 個の間隔分布(ヒストグラム). 比較のために Wigner 分布と Poisson 分布の曲線が示されている. (J. D. Garrett *et al.*: AIP Conference Proceedings 259(1992)p. 345 による.)

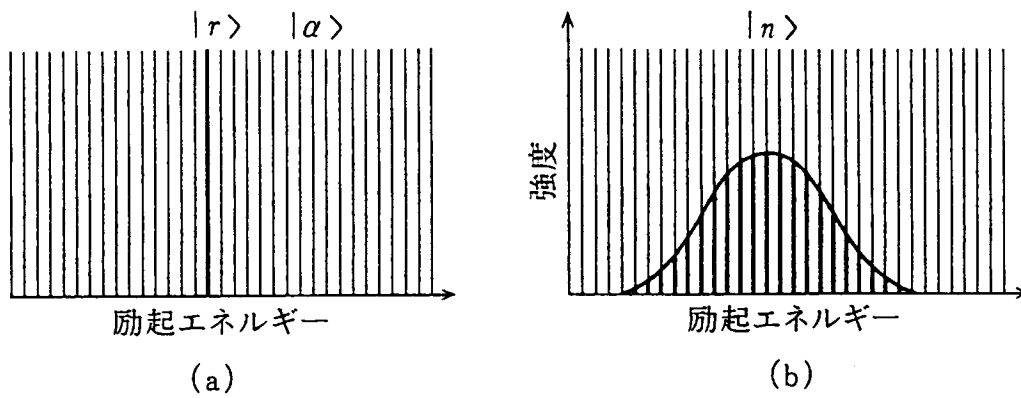


図 5-1 強度関数の概念図. 特別な状態 $|r\rangle$ が, 個性のない状態群 $\{|\alpha\rangle\}$ の中に埋め込まれている(a). 両者の結合により, 強度は(b)のように分布する.

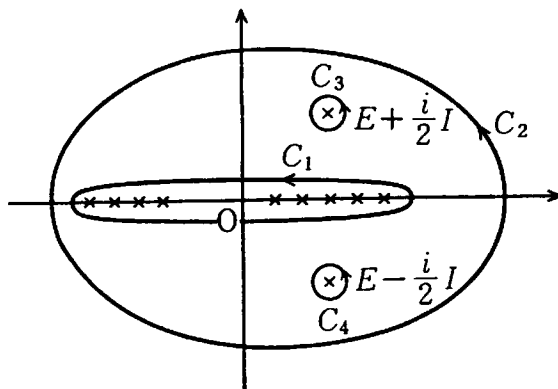


図 5-2 強度関数(5.8)の積分路.

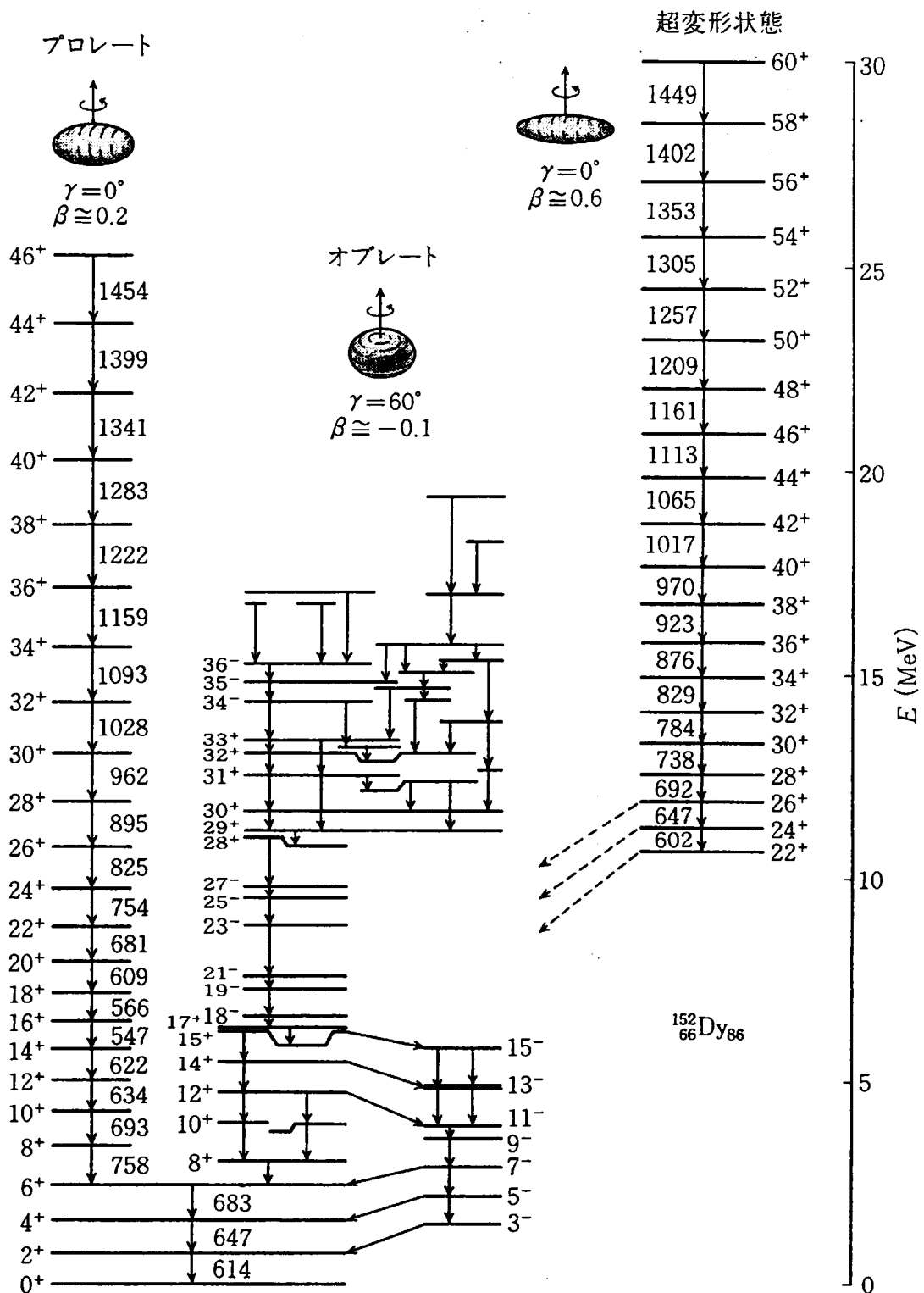


図 5-3 ^{152}Dy の励起スペクトル. 矢印の横の数字は E 2 遷移のガンマ線のエネルギー (keV) を示す. (J. F. Sharpey-Schafer: Prog. Part. Nucl. Phys. Vol. 28 (1992) p. 187 による.)

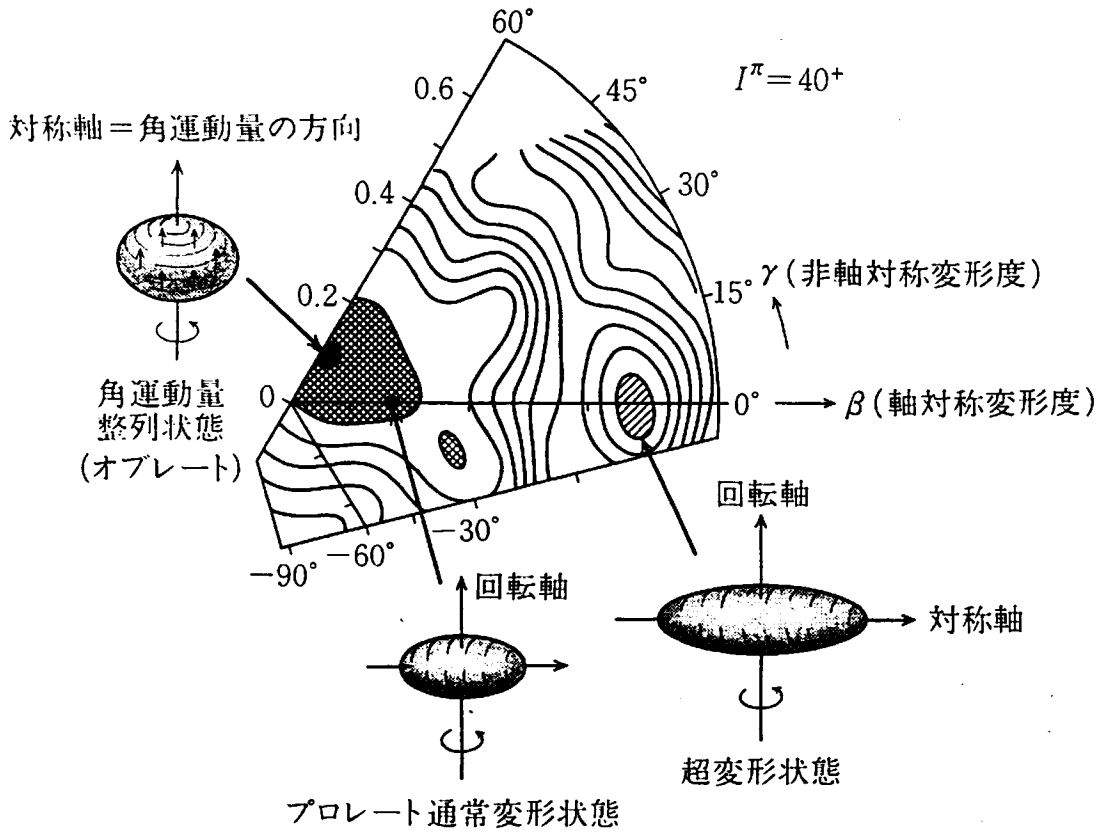


図 5-4 ^{152}Dy の $I^\pi = 40^+$ での変形ポテンシャルエネルギー曲面. ($\beta \approx 0.6, \gamma = 0^\circ$) の極小点が超変形状態に, ($\beta \approx 0.2, \gamma = 0^\circ$) がプロレート通常変形状態に, ($\beta \approx 0.1, \gamma = 60^\circ$) が角運動量整列状態に, それぞれ対応する. (I. Ragnarsson and S. Åberg: Phys. Lett. B180 (1986)191 の計算に基づく.)

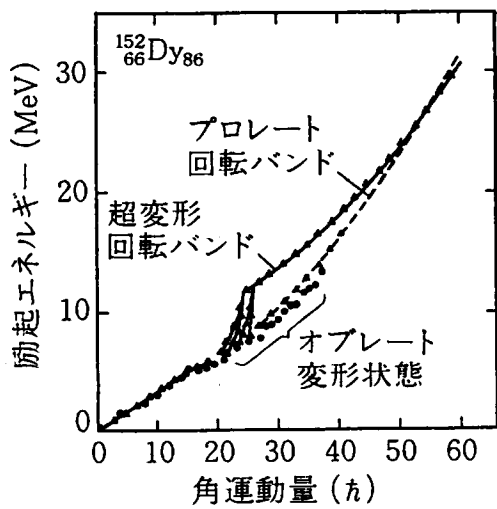


図 5-5 ^{152}Dy のイラスト近傍のスペクトル. (P. J. Twin et al.: Phys. Rev. Lett. 57 (1986)811 による.)

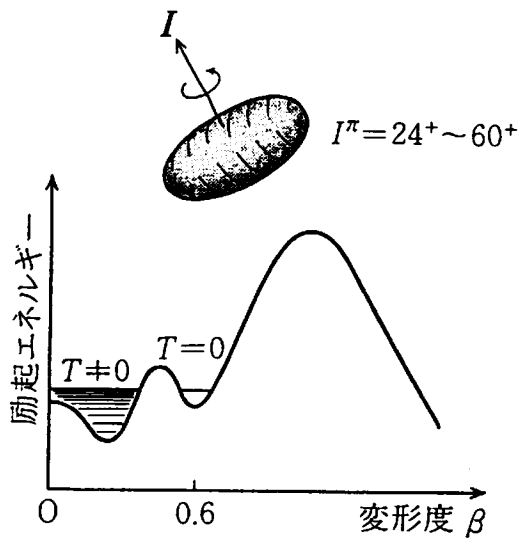


図 5-6 ^{152}Dy の変形ポテンシャルエネルギーの β 依存性(概念図). 図 5-4 の β 軸に沿ってのポテンシャル曲線に対応する.

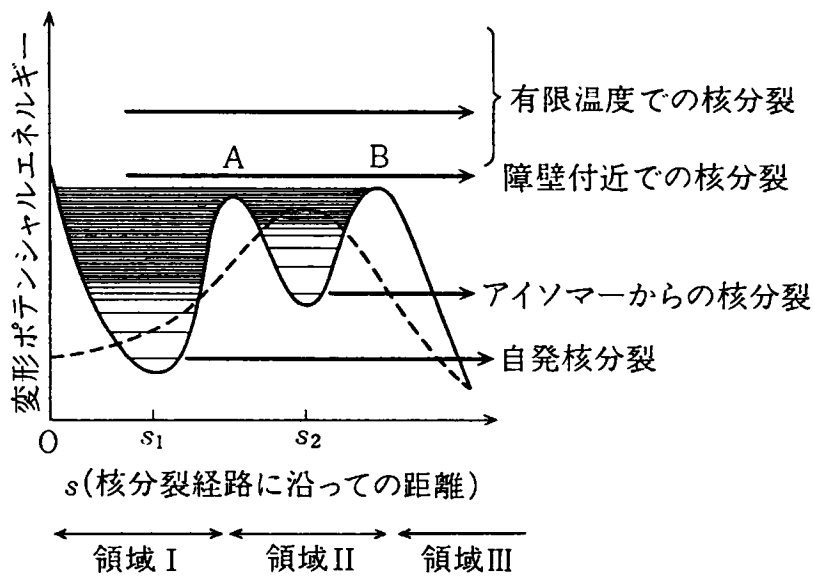


図 5-7 核分裂経路に沿っての変形ポテンシャルエネルギー(概念図). 分離点はもっと右側にある. 破線は液滴モデルのエネルギー. s_2 は第 2 極小点を示す.

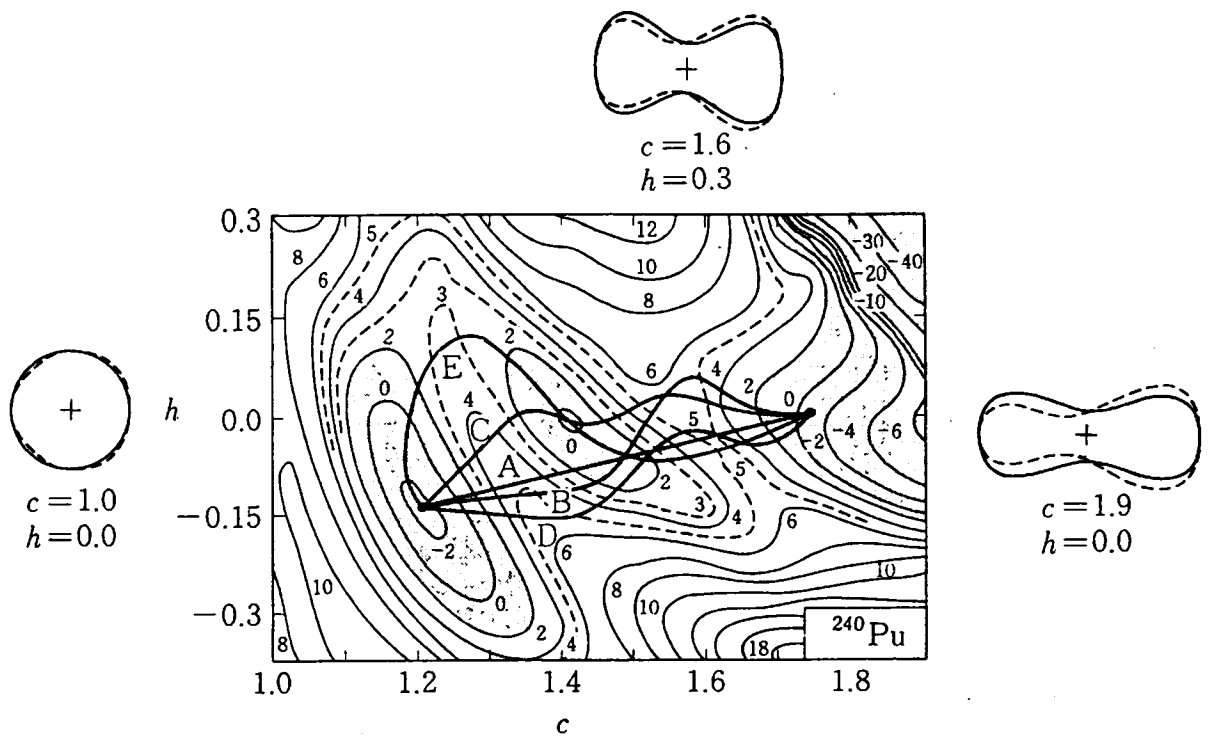


図 5-8 変形パラメータ (c, h) 空間における ^{240}Pu のポテンシャルエネルギー曲面. c は細長さ (elongation), h はくびれの形 (neck の厚さ) を表わすパラメータ. いくつかの (c, h) での形が実線で例示されている (参考として, これに空間反転非対称変形の自由度も考慮したときの形を破線で示す). 作用 S を最小にする経路は B , ポテンシャルの谷に沿う経路は E である. (巻末文献 [1-41] による.)

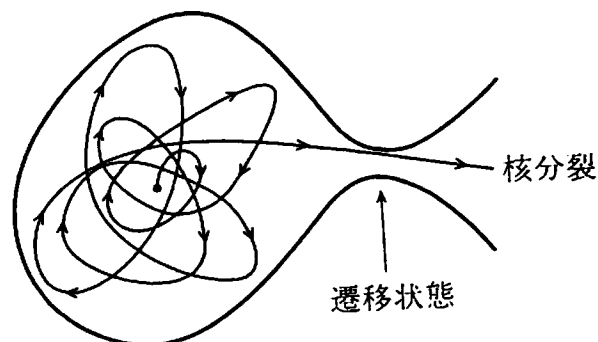


図 5-10 系の自由度を N とする. 系の代表点は $2N$ 次元位相空間内でトラジェクトリーを描く. これを核分裂自由度 (s, \dot{s}) からなる 2次元空間に射影したもの (概念図). Bohr-Wheeler の理論では遷移状態の内側ですべての自由度のあいだに統計平衡が成立していると仮定する. トラジェクトリーが偶然, 遷移状態を通過すると核分裂が起こる.

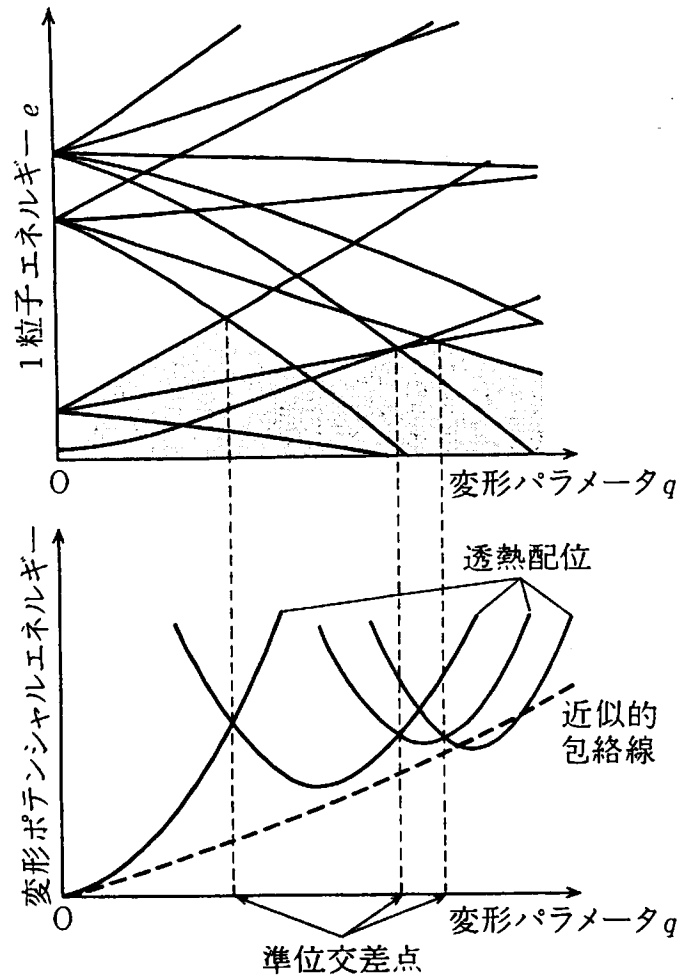


図 5-9 1 粒子エネルギーの変形依存性と準位交差(概念図). 集団ポテンシャル $V_{\text{coll}}(q)$ は各配位ごとに決まる透熱ポテンシャルの近似的包絡線に対応する.

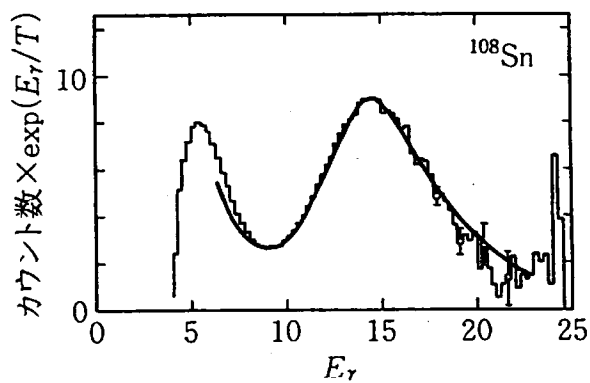


図 5-11 ^{16}O と ^{92}Mo の融合反応で作られた複合核 ^{108}Sn の励起状態 ($E \approx 60 \text{ MeV}$) から放出されたガンマ線のスペクトル. 横軸はガンマ線のエネルギー E_γ , 縦軸はカウント数に熱力学的因子 $\exp(E_\gamma/T)$, $T \approx 1.6 \text{ MeV}$ を掛けたもの. $E_\gamma \approx 15 \text{ MeV}$ 付近のピークが巨大双極共鳴に対応する. (J. J. Gaardhøje *et al.*: Phys. Rev. Lett. 53(1984)148 による.)

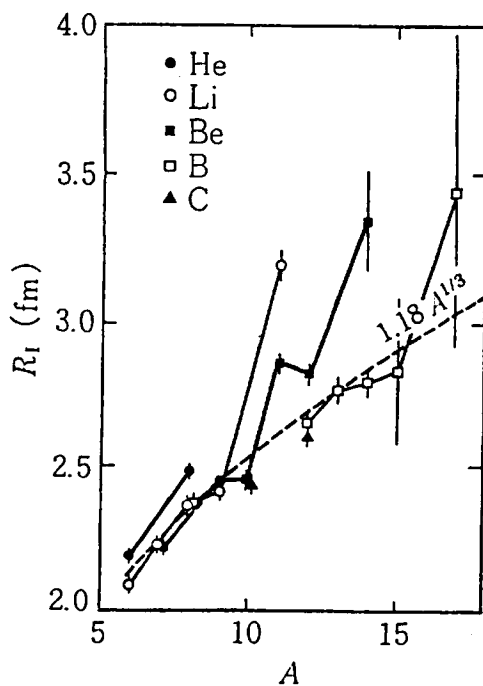


図 A-1 軽い核の相互作用半径. 中性子ドリップ線近傍の ^{11}Li , ^{14}Be , ^{17}B の半径が異常に大きい. (I. Tanihata: Nucl. Phys. A488(1988) 113c.)

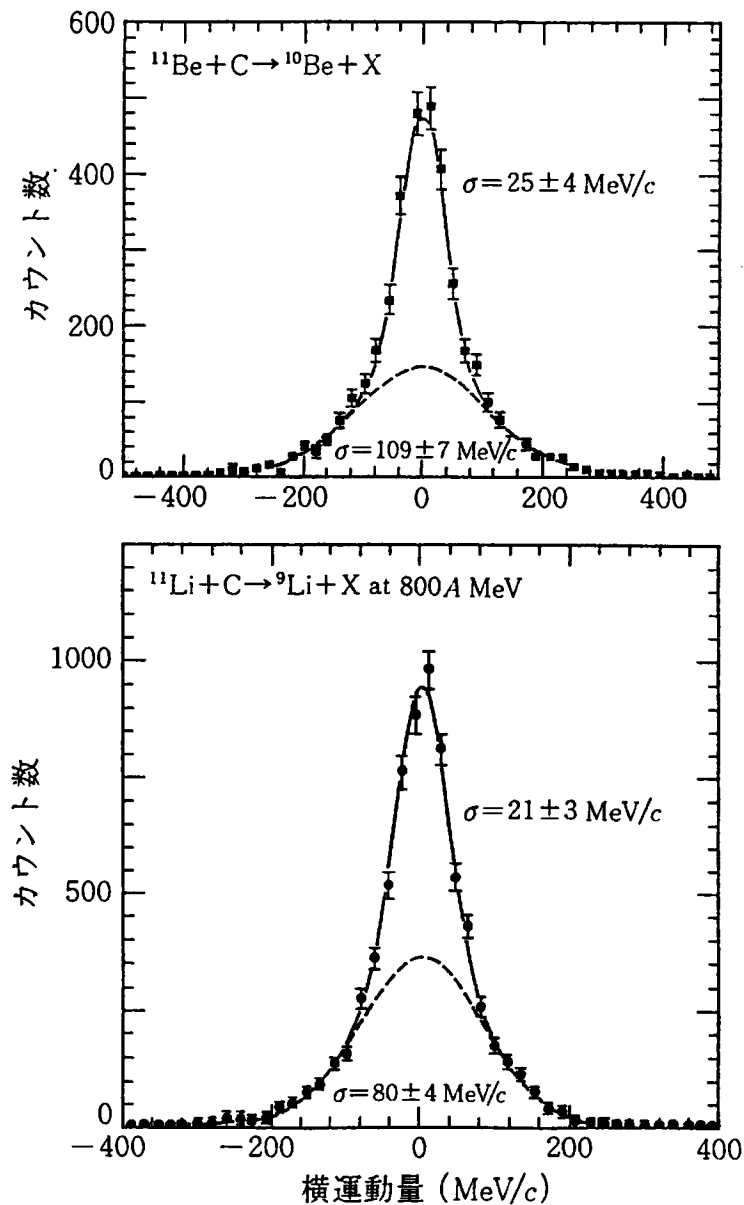


図 A-2 $^{11}\text{Be} + \text{C}$, $^{11}\text{Li} + \text{C}$ 衝突における芯の核 ^{10}Be , ^9Li の横運動量分布. (I. Tanihata: J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 22(1996)157.)

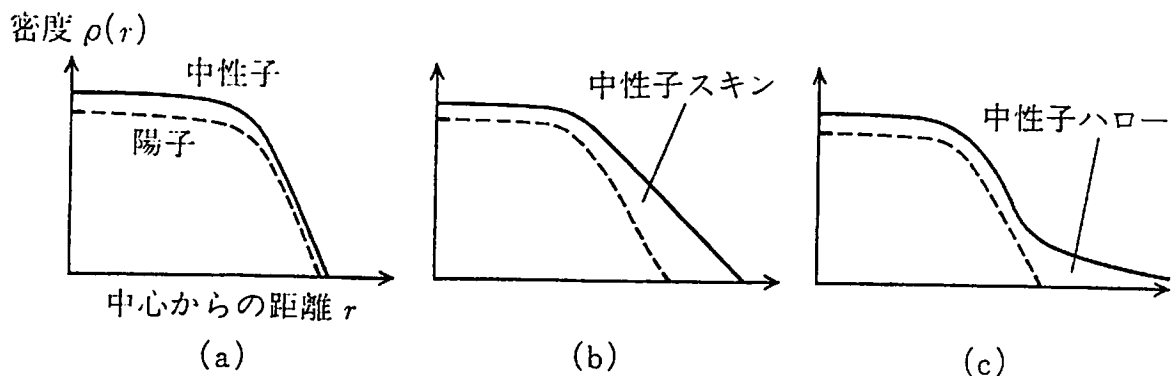


図 A-3 中性子ハローと中性子スキン(概念図). 実線は中性子の密度分布, 破線は陽子の密度分布を示す. (a)通常 of 安定核の場合, (b)中性子過剰核における中性子スキン, (c)中性子ドリフト線近傍核における中性子ハロー. 縦軸は log スケールで描かれている.

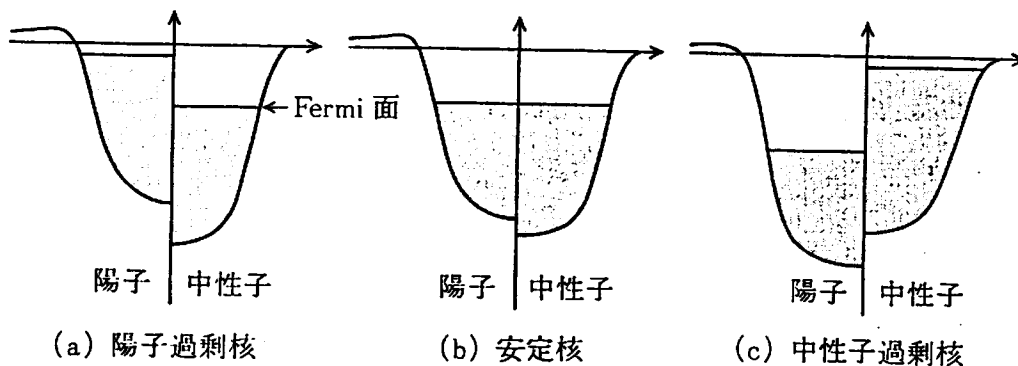


図 A-4 平均ポテンシャルと Fermi 面(概念図). 各図の左側に陽子, 右側に中性子に対する平均ポテンシャルが示されている. 安定核の場合(b), 陽子と中性子の Fermi エネルギーがほぼ等しいが, 陽子過剰核(a), 中性子過剰核(c)では両者が著しく異なることに注意しよう.

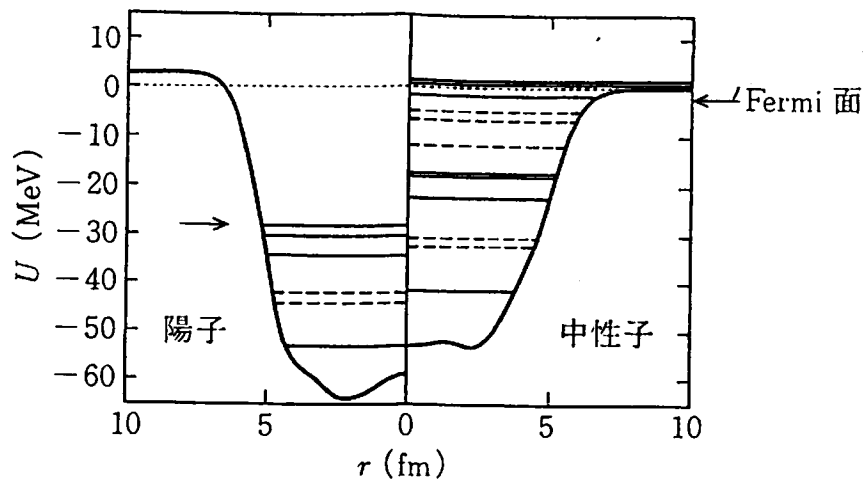


図 A-5 Skyrme 力を用いた Hartree-Fock 計算による $^{68}_{20}\text{Ca}_{48}$ の陽子と中性子に対する平均ポテンシャルと 1 粒子エネルギー準位. 左側に陽子, 右側に中性子に対する平均ポテンシャルが示されている. 実線は正パリティの, 破線は負パリティの準位を表わす. 2つの矢印は, それぞれ, 陽子と中性子の Fermi 面を示す. 正エネルギー領域に描かれた 2 本の実線は中性子の $s_{1/2}$ および $d_{5/2}$ 共鳴準位を表わす. (寺崎順氏の計算による.)

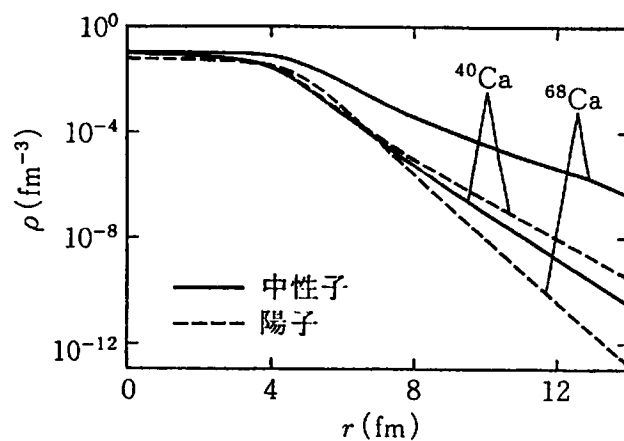


図 A-6 図 A-5 と同じ Hartree-Fock 計算による $^{68}_{20}\text{Ca}_{48}$ の陽子密度分布(破線)と中性子密度分布(実線). 比較のため, 安定核 $^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$ に対する計算結果も示されている.