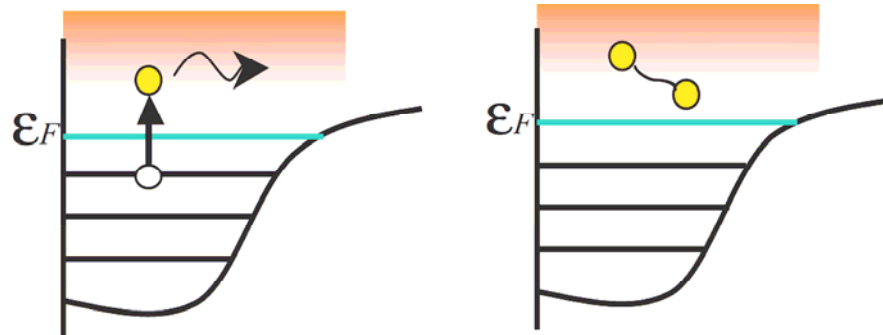
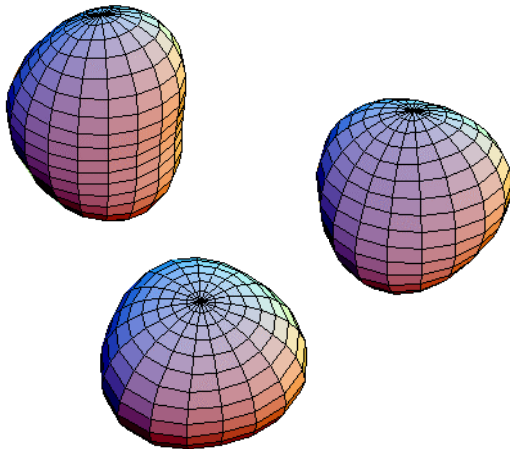


# 不安定核の集団現象に対する微視的アプローチ

不安定核の新しい(変形)シェル構造と新しい対相関のもとで  
新しい集団励起モードが形成されるだろうか

弱束縛系において  
集団性(コヒーレンス)が生み出される  
微視的メカニズムを  
基礎に立ち戻って考えてみよう。

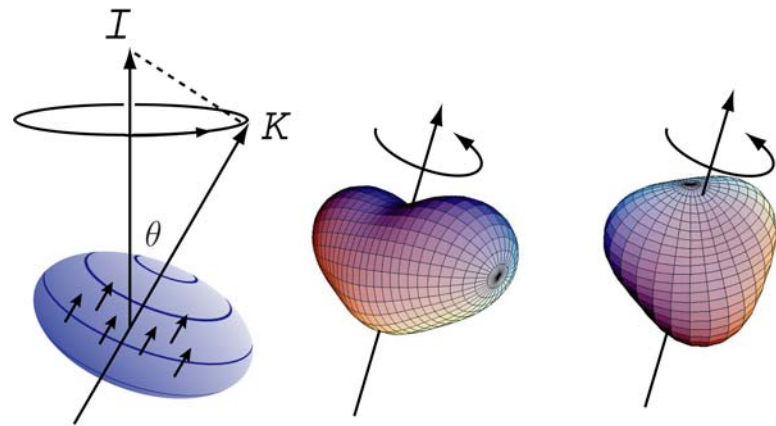


# 1. Introduction

- a 歴史
- b シェル構造と対相関

# 2. 高スピン超変形核における新しい集団モード

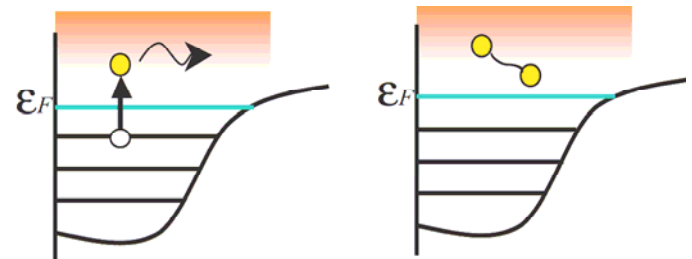
- a ソフト8重極振動モード
- b Wobbling と Precession



# 3. 理研RIBFで発見が期待される新しい集団モード

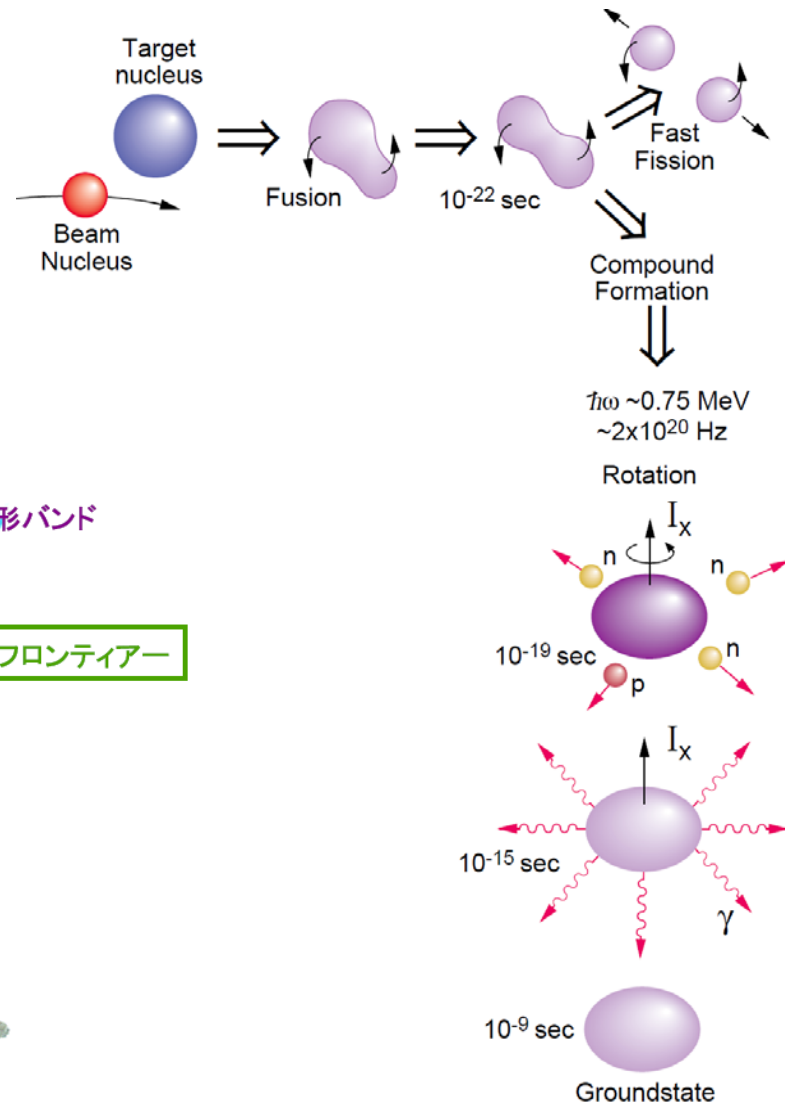
- a  $A=30-100$  の  $N=Z$  核近傍で期待されるエキゾチック変形状態
- b 中性子ドリップ線近傍で新しい型の集団励起モードが形成されるか

# 4. まとめ

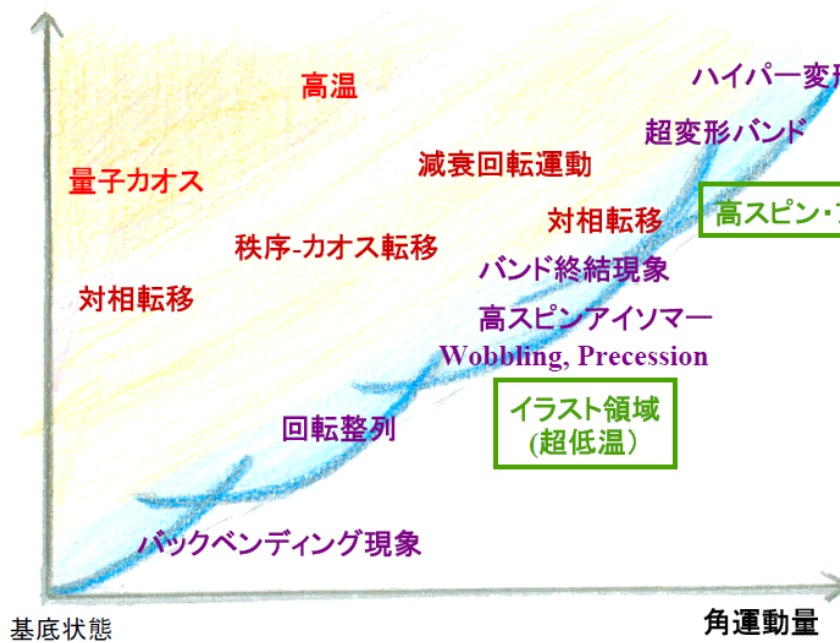


## 1970年代以降、

- 安定核どうしの衝突によって、高い励起状態、高スピン状態など極限状況の原子核を研究する道がひらけた。
- このなかで、**回転系準粒子シェルモデルが確立した。**

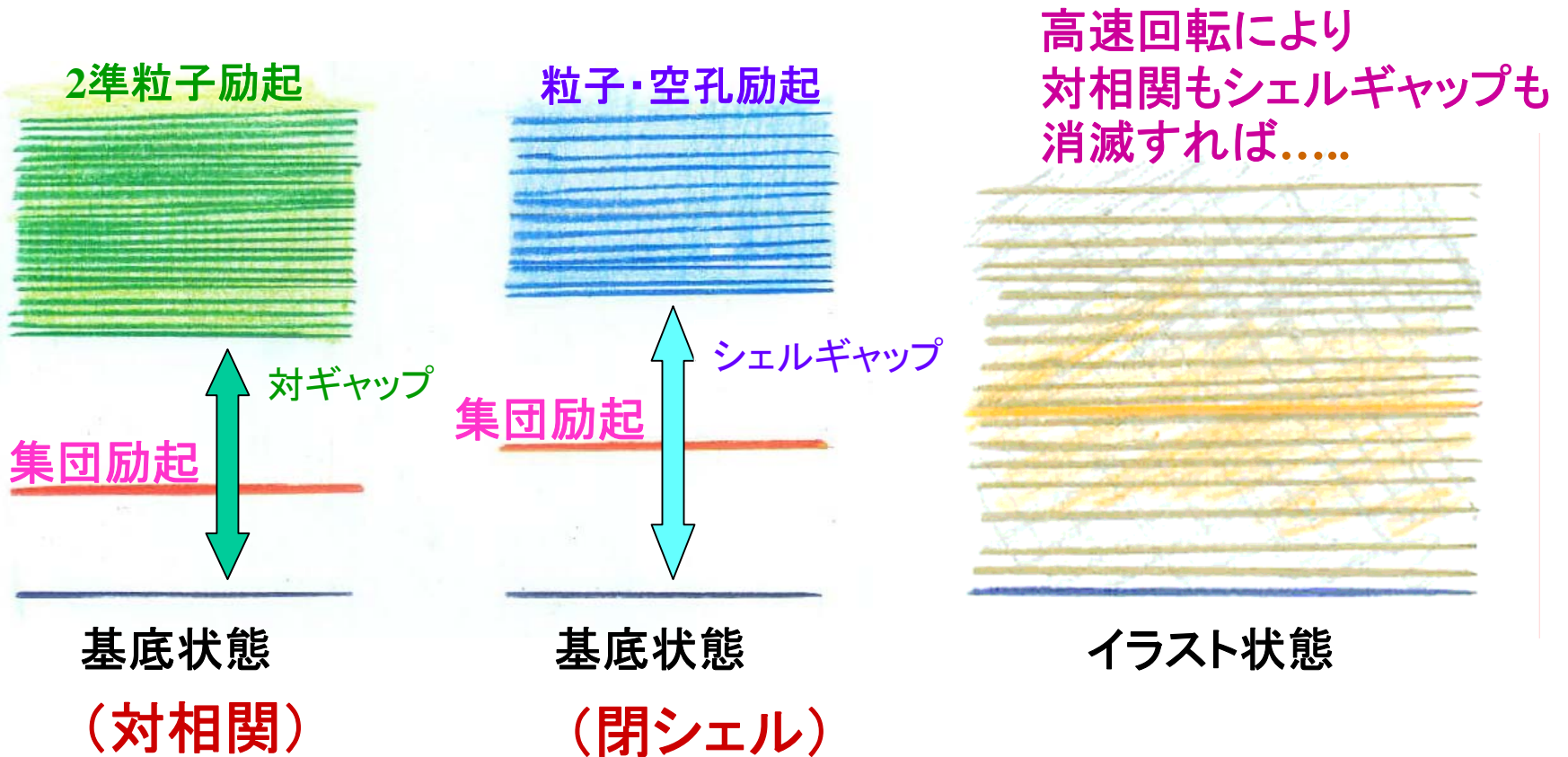


励起エネルギー

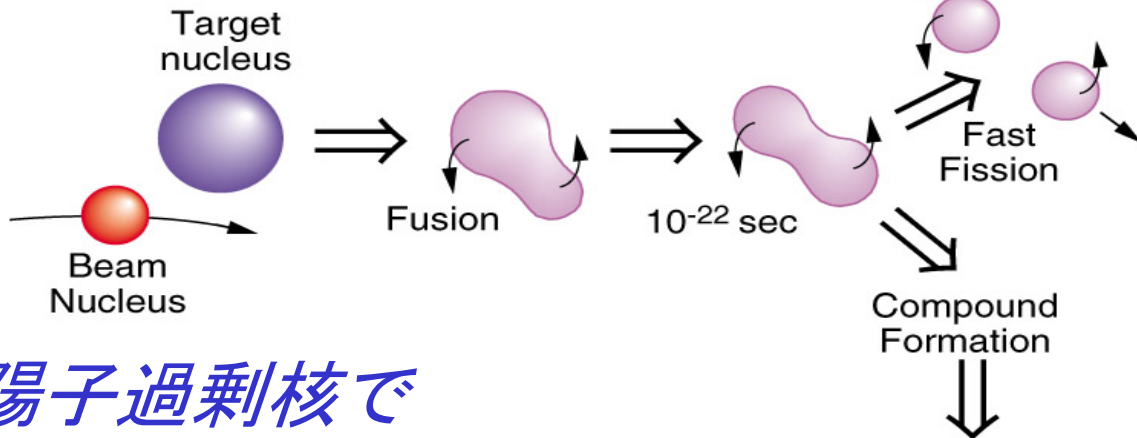


## 1970年代-1980年代

高スピンスペクトルはすべて回転系での準粒子励起によって説明でき、  
低振動数の集団振動モードは高スピんで消滅しているように見えた



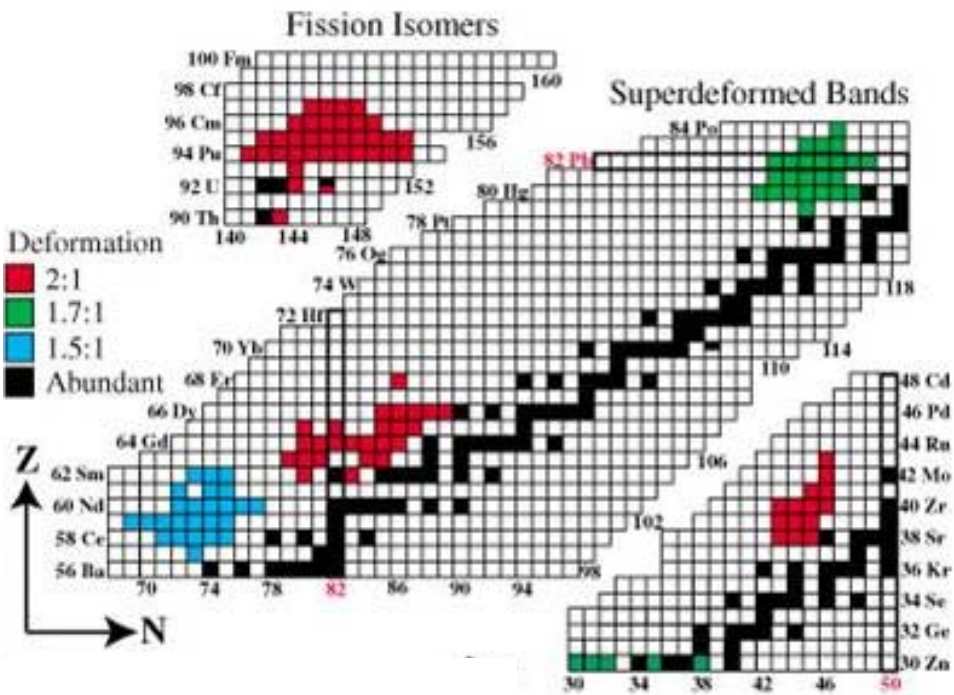
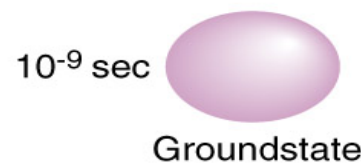
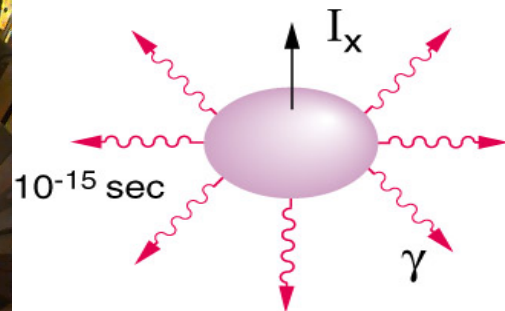
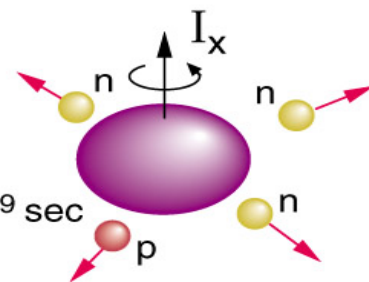
# インビーム $\gamma$ 分光の進展



多くの陽子過剰核で  
超変形状態が見つかった

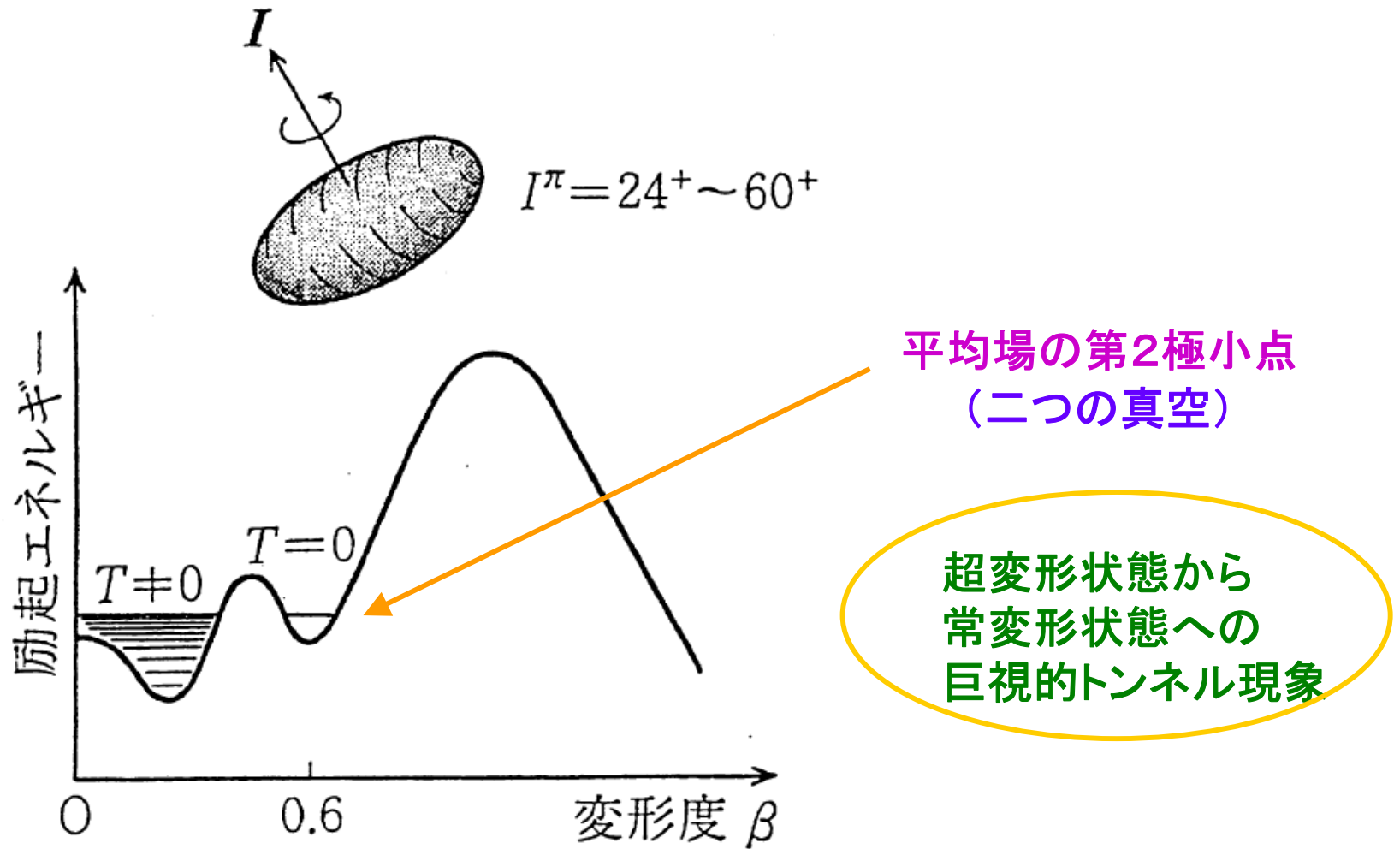
$\hbar\omega \sim 0.75$  MeV  
 $\sim 2 \times 10^{20}$  Hz

Rotation



Large gamma-ray detector arrays

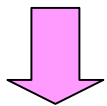
# 高速回転する超変形状態





# 調和振動子ポテンシャル

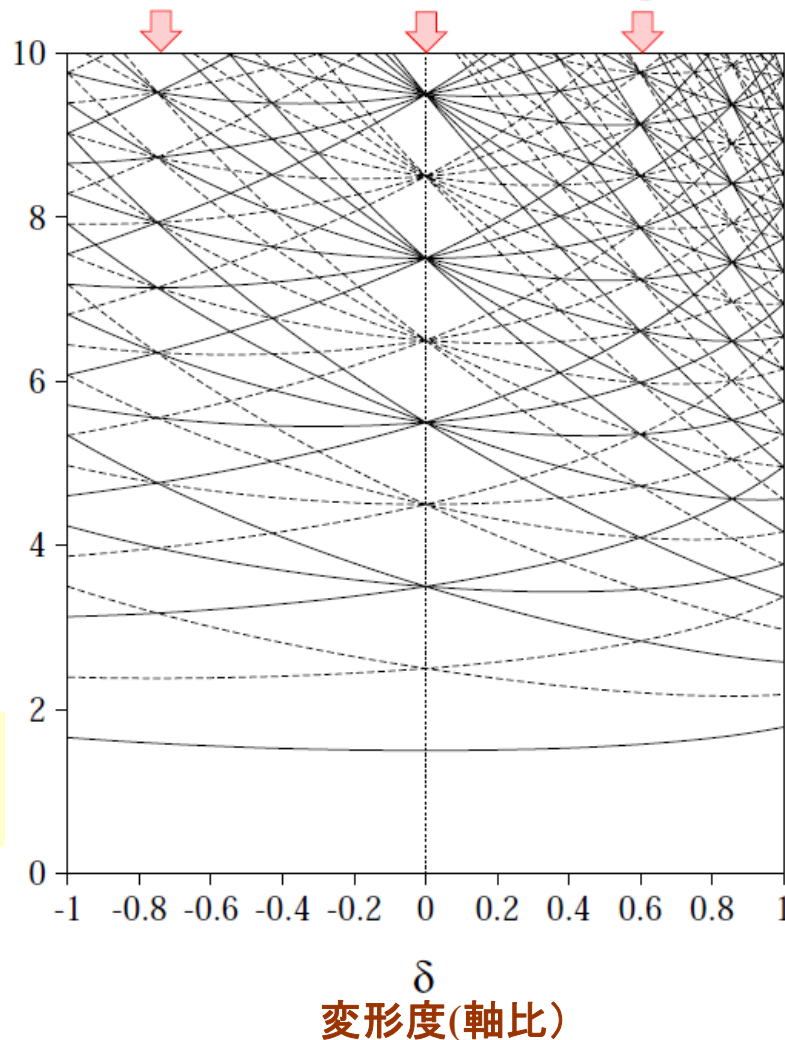
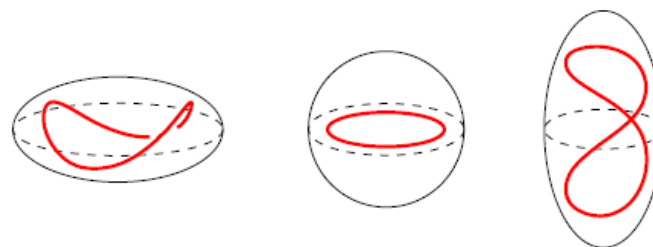
軸比2:1のとき  
8の字型の周期軌道ができる



準位が縮退する

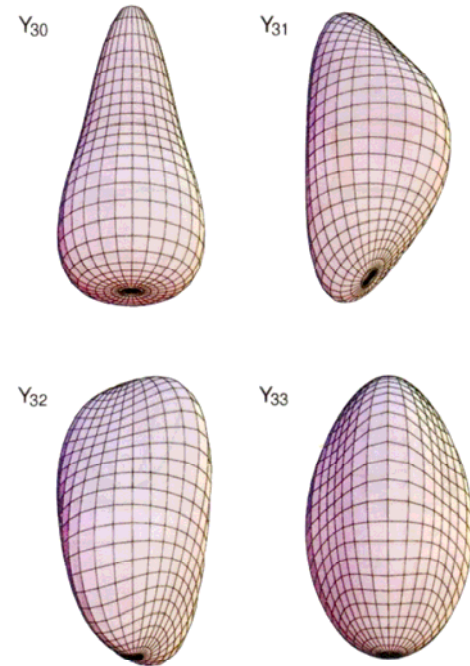
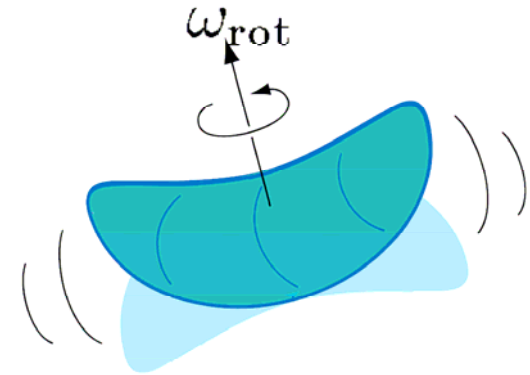
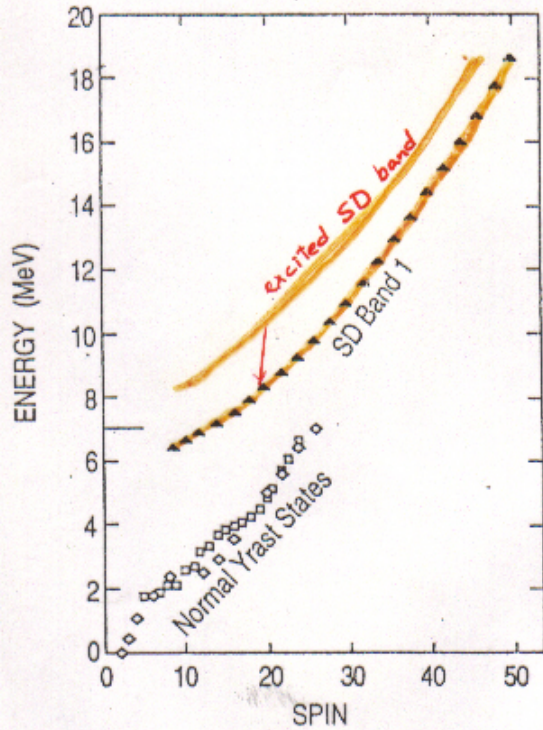
超変形シェル構造の形成

同じ主殻に正パリティと負パリティの  
準位が縮退する !!



# 超変形イラスト状態の上に形成される新しい集団励起モードの探求

Search for New Collective Modes  
built on SD High-Spin States

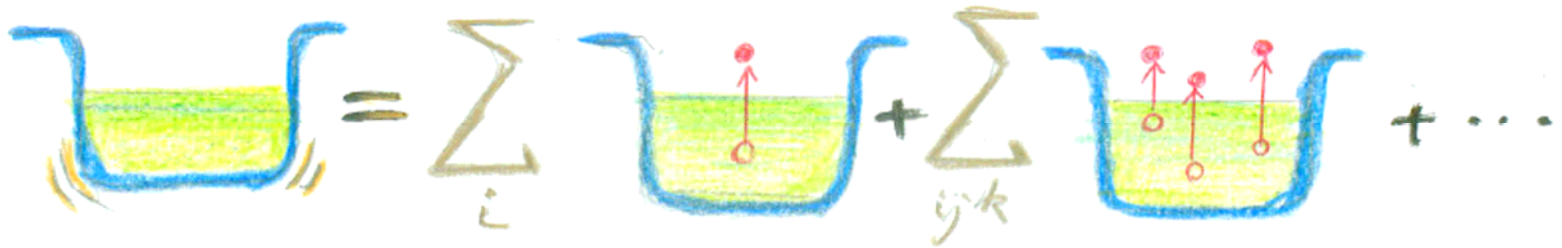




# 振動する平均場

## 集団振動の微視的理論(準粒子RPA)

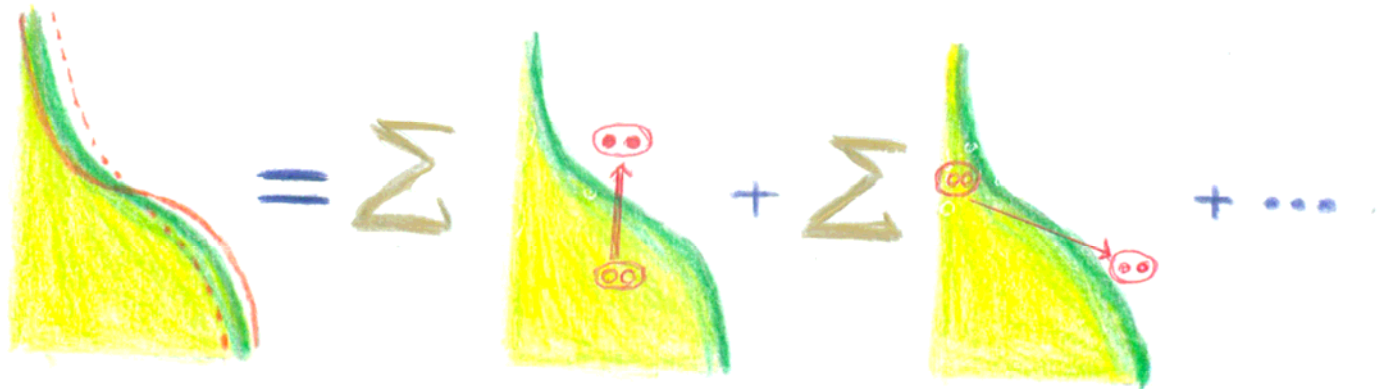
### 表面の形の振動



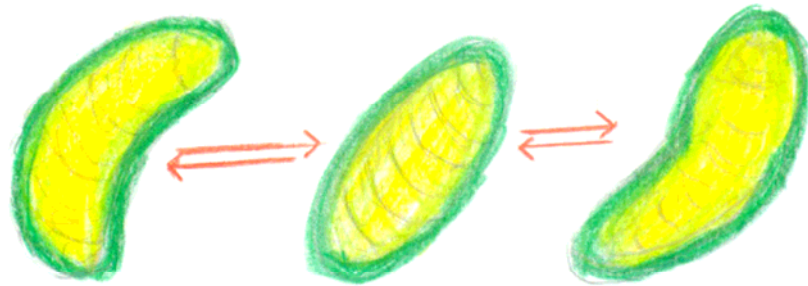
ポテンシャルの振動 ~ 粒子-空孔励起のコヒーレントな重ねあわせ

豊かなシェル構造をもつ平均場は膨大な自由度を内包している

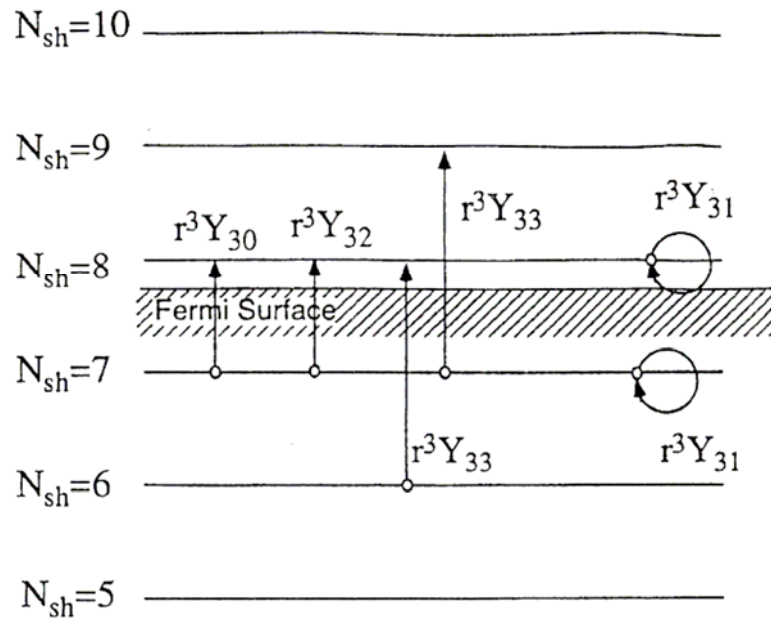
### 核子ペアーの分布の振動



# バナナ変形(Y31)モードは超変形のソフトモード



原子核のソフトモードは  
シェル構造と対相関に  
極めて敏感な  
有限量子系に特有な  
励起モードである

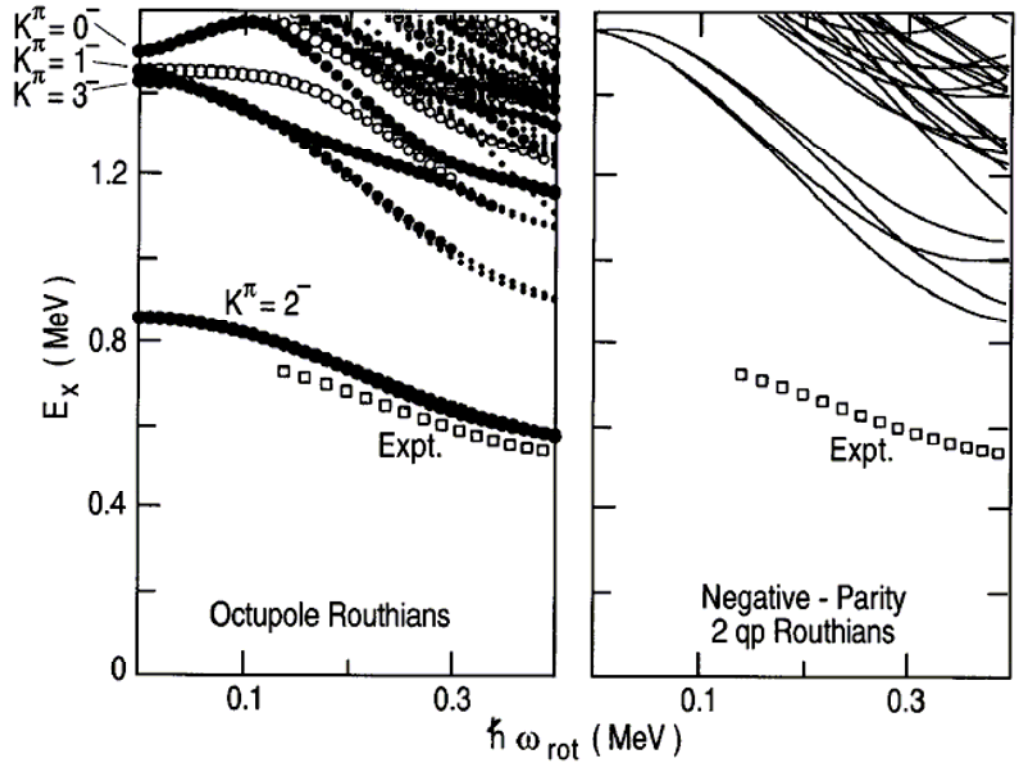
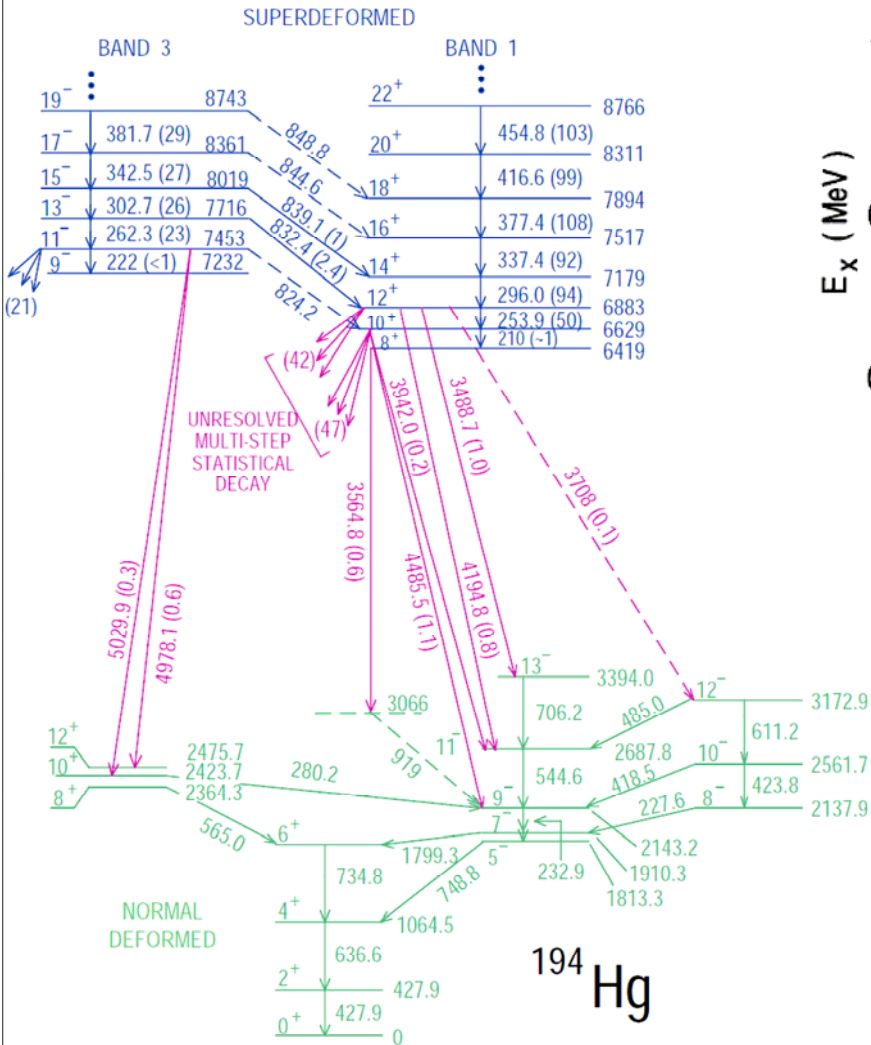
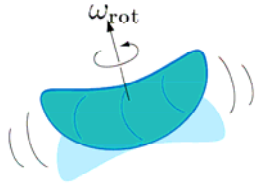


平均場が超変形すると  
異なったパリティをもつ  
球形での主殻が混合する



超変形すると負パリティのモードが  
励起され易くなる

# 超変形状態の上のソフトOctupole振動モード

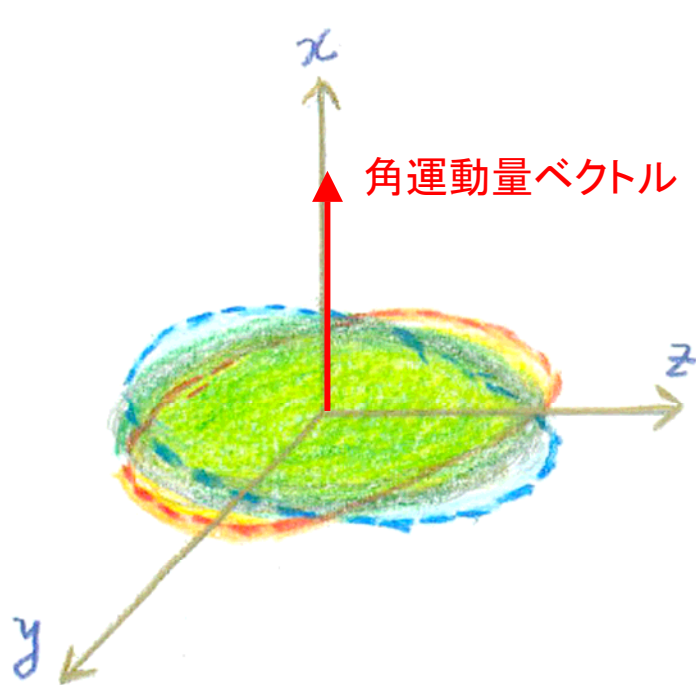


理論: T. Nakatsukasa et al.,  
Phys. Rev. C 53 (1996) 2213

回転系での準粒子RPA

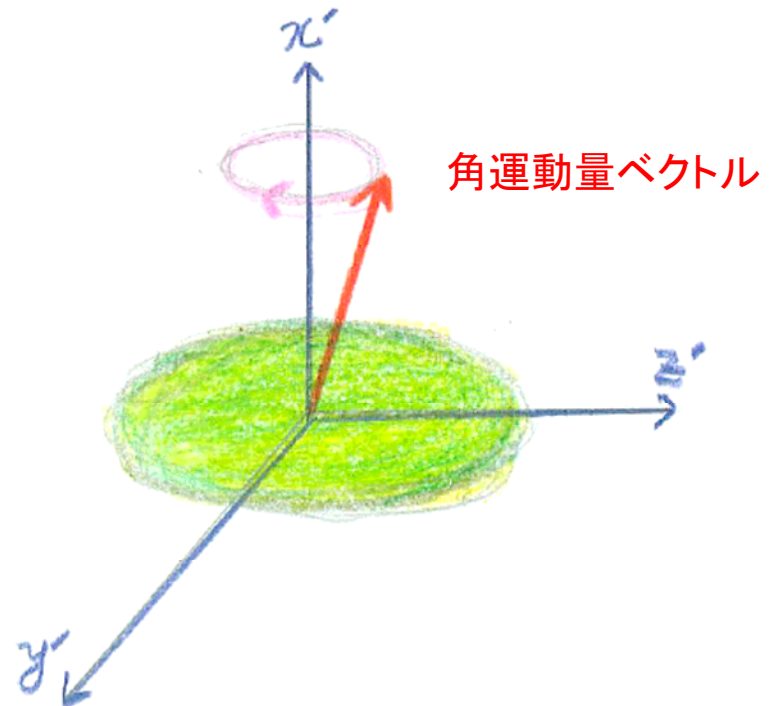
実験: G. Hackman et al.,  
Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 4100

# Wobbling Motion の2つの描像



一様回転する座標系からみると  
形が振動しているように見える

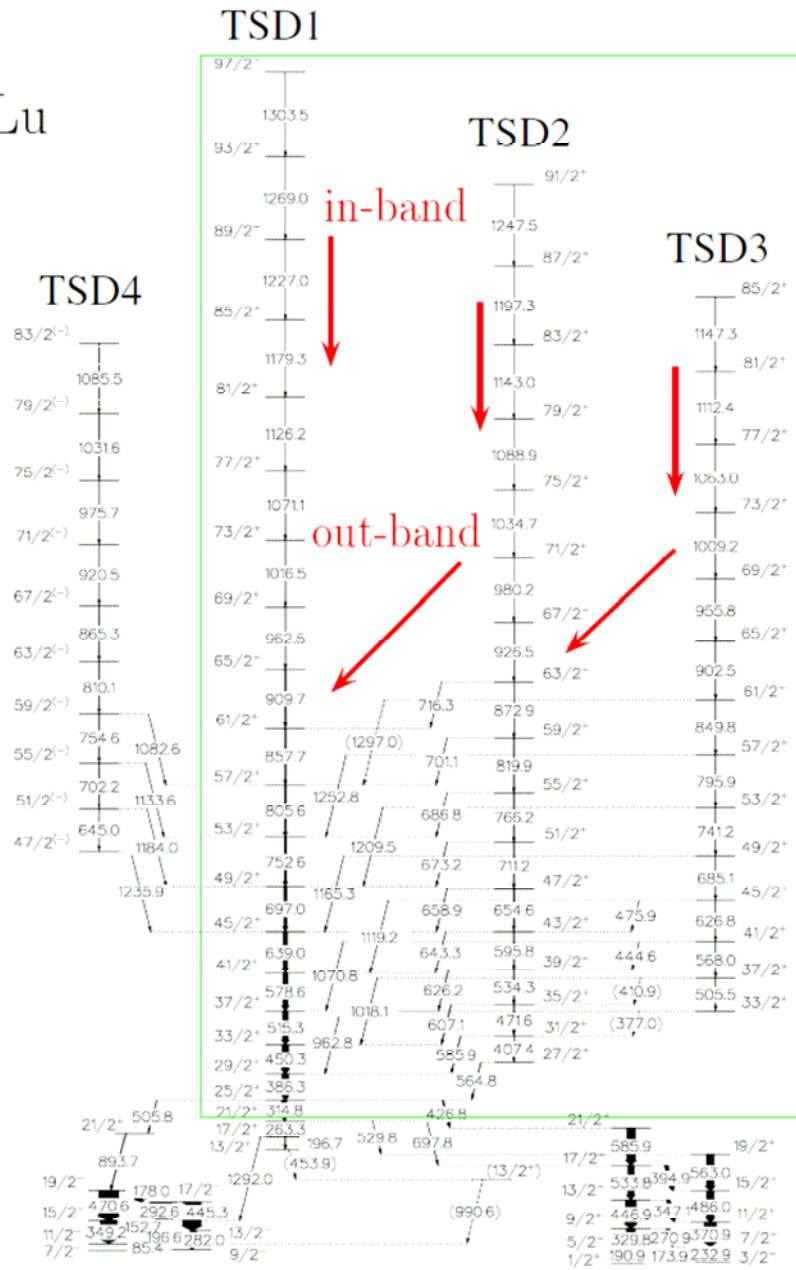
(角運動量ベクトルの方向をx軸と定義)



原子核の  
主軸に固定された座標系から見ると  
角運動量ベクトルが周期運動  
しているように見える

非軸対称な原子核

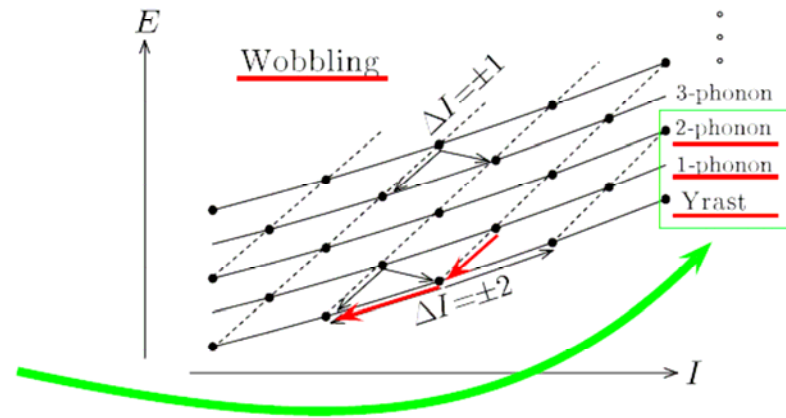
$^{163}\text{Lu}$



## Wobbling Spectra

D. R. Jensen et al., Eur. Phys. J. **A19** (2004), 173

First identified by  
Ødegård et al. (2001)





# Wobbling Motionの振動数

$$H = \frac{I_x^2}{2\mathcal{J}_x} + \frac{I_y^2}{2\mathcal{J}_y} + \frac{I_z^2}{2\mathcal{J}_z}$$



for  $I_x \gg I_y, I_z$

$$E(n, I) = \frac{I(I+1)}{2\mathcal{J}_x} + \hbar\omega\left(n + \frac{1}{2}\right), \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

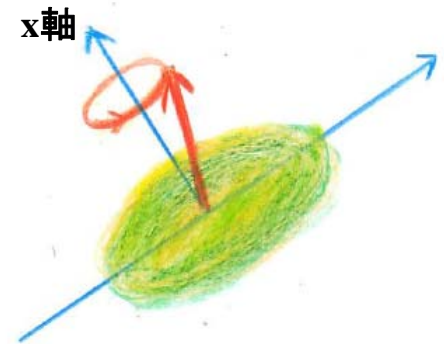
$$\hbar\omega = I \sqrt{\left(\frac{1}{\mathcal{J}_y} - \frac{1}{\mathcal{J}_x}\right)\left(\frac{1}{\mathcal{J}_z} - \frac{1}{\mathcal{J}_x}\right)}$$

このモードが存在するためには  $\mathcal{J}_x \geq \mathcal{J}_y, \mathcal{J}_x$  が必要

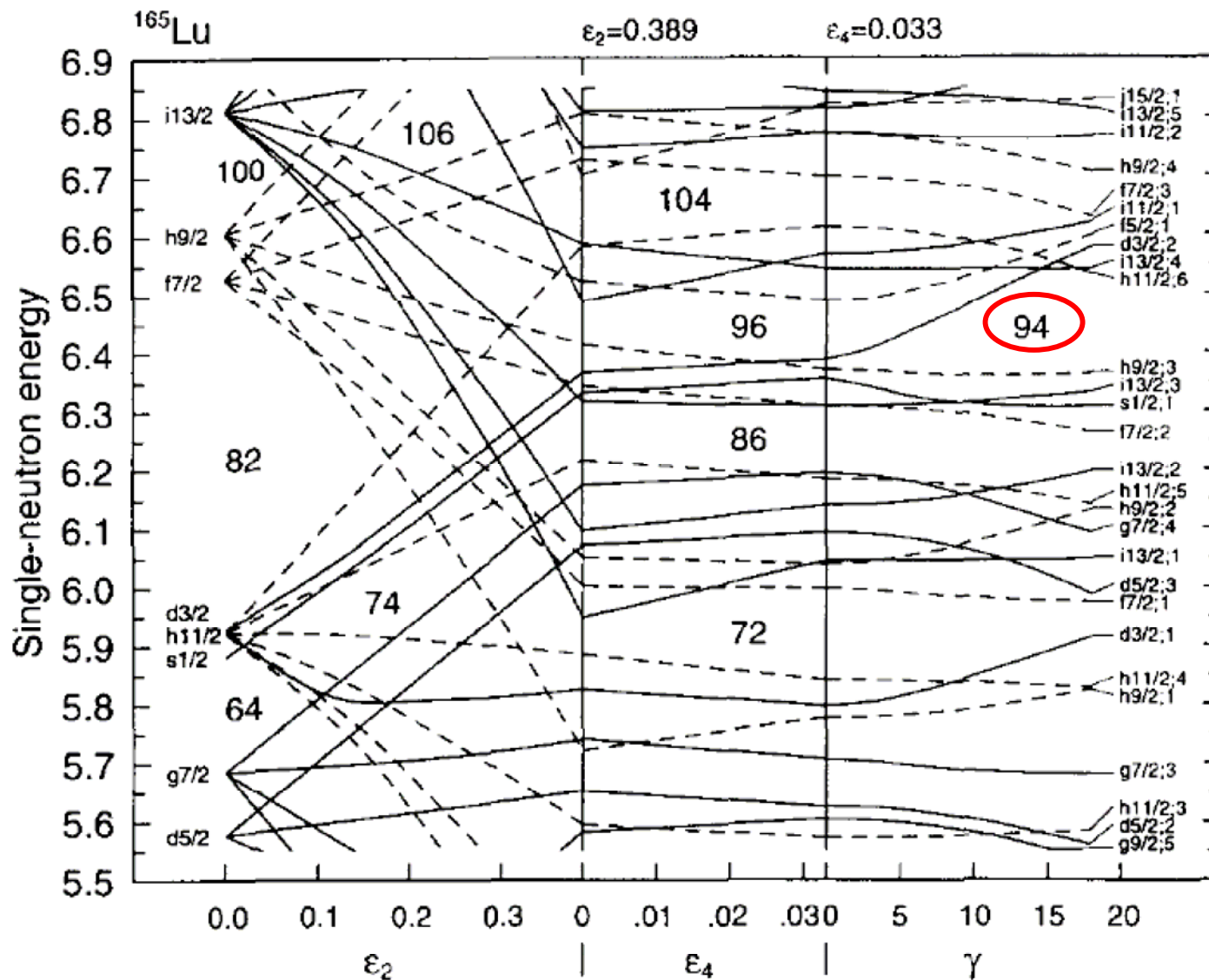
3つの主軸まわりの慣性モーメント  $\mathcal{J}_x, \mathcal{J}_y, \mathcal{J}_z$   
を回転系RPAを用いて微視的に計算できる

M. Matsuzaki et al., Phys. Rev. C 69 (2004) 034325

小路君の講演: 22pSC-13



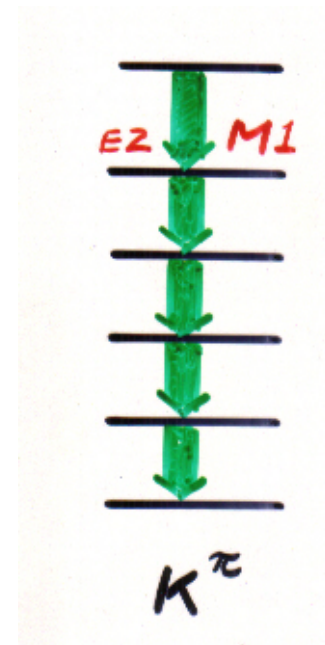
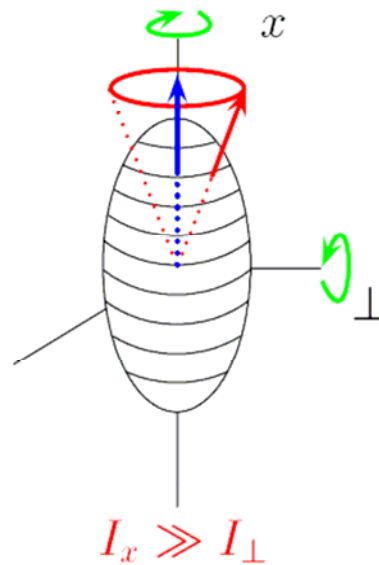
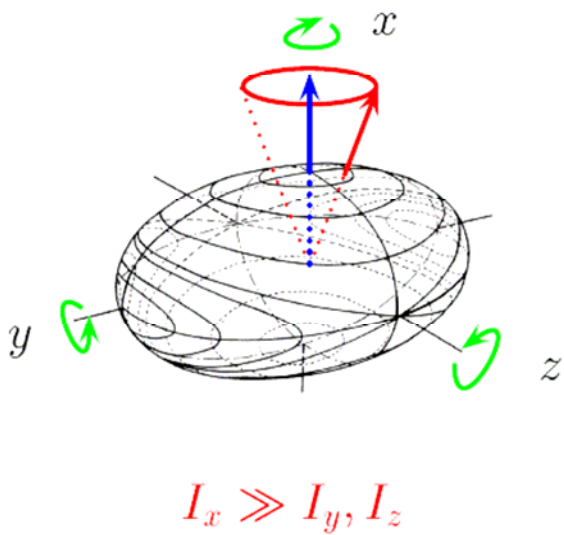
# 非軸対称4重極変形に関する魔法の数



軸対称変形  $\beta$

非軸対称変形  $\gamma$

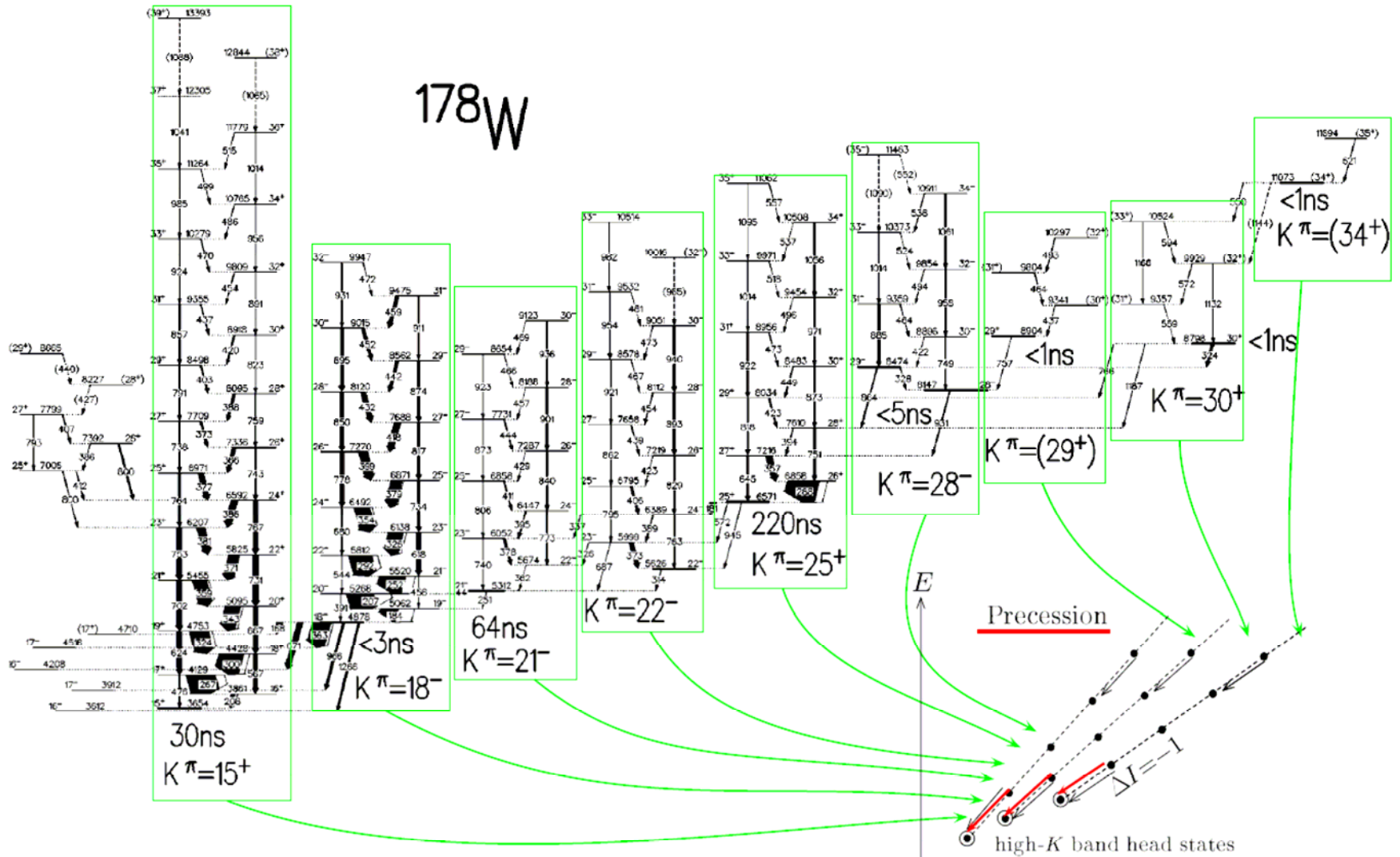
# Wobbling と Precession



High-K アイソマーの上に立つ回転バンド

# Precession Spectra

D. M. Cullen et al., Phys. Rev. **C60** (1990), 064301.



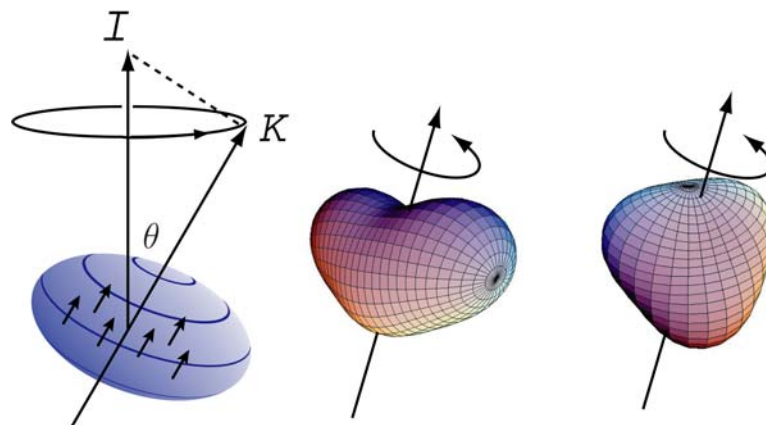
high- $K$  rotational bands: known for many years

# 1. Introduction

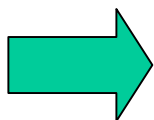
- a 歴史
- b シェル構造と対相関

# 2. 高スピンの超変形核における新しい集団モード

- a ソフト8重極振動モード
- b Wobbling と Precession

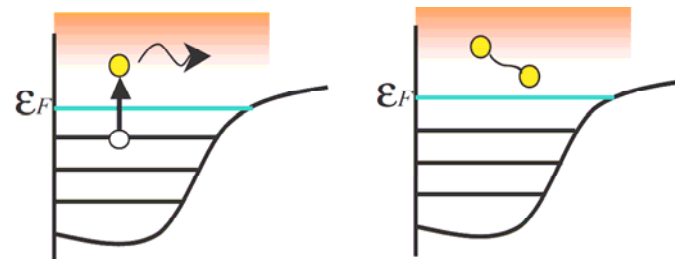


# 3. 理研RIBFで発見が期待される新しい集団モード



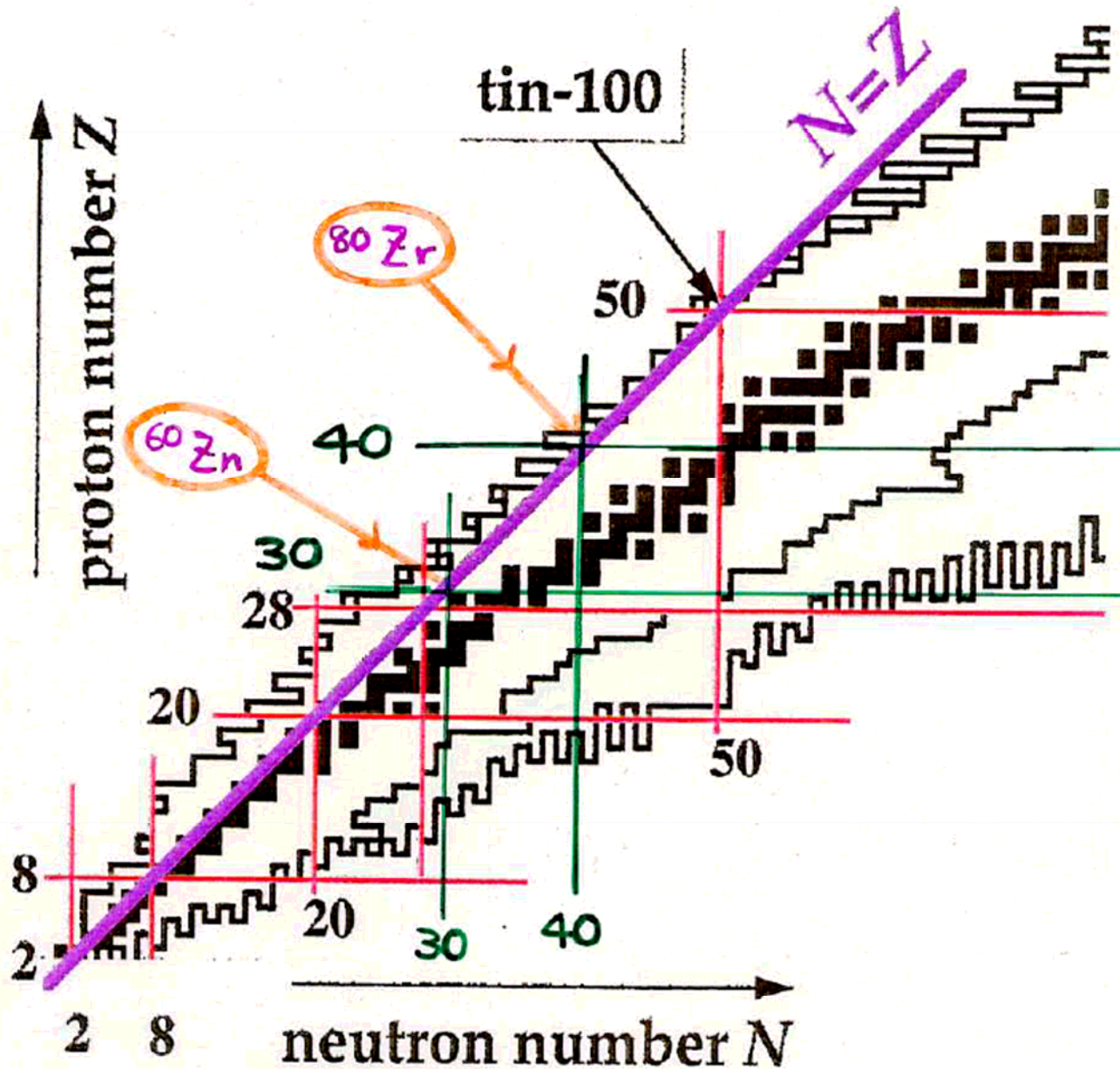
- a  $A=30-100$  の  $N=Z$  核近傍で期待されるエキゾチック変形状態
- b 中性子ドリップ線近傍で新しい型の集団励起モードが形成されるか

# 4. まとめ

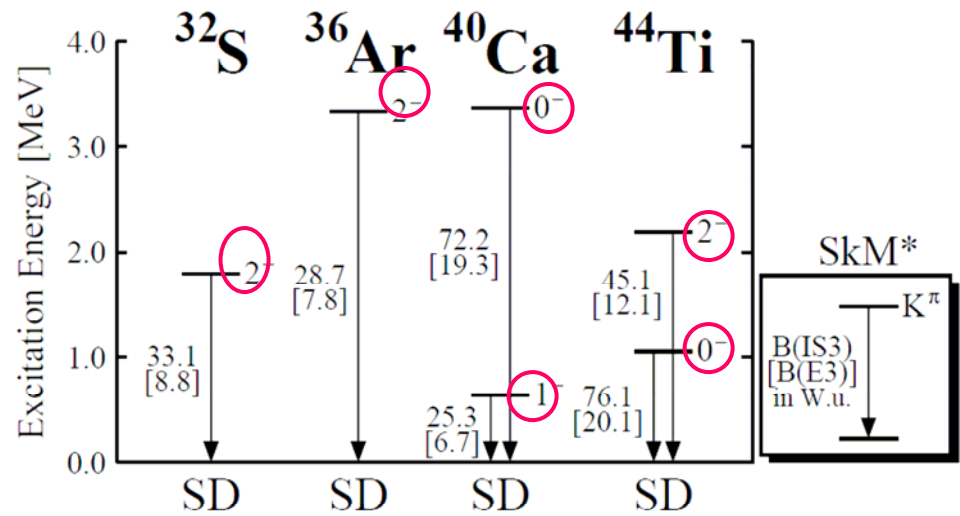
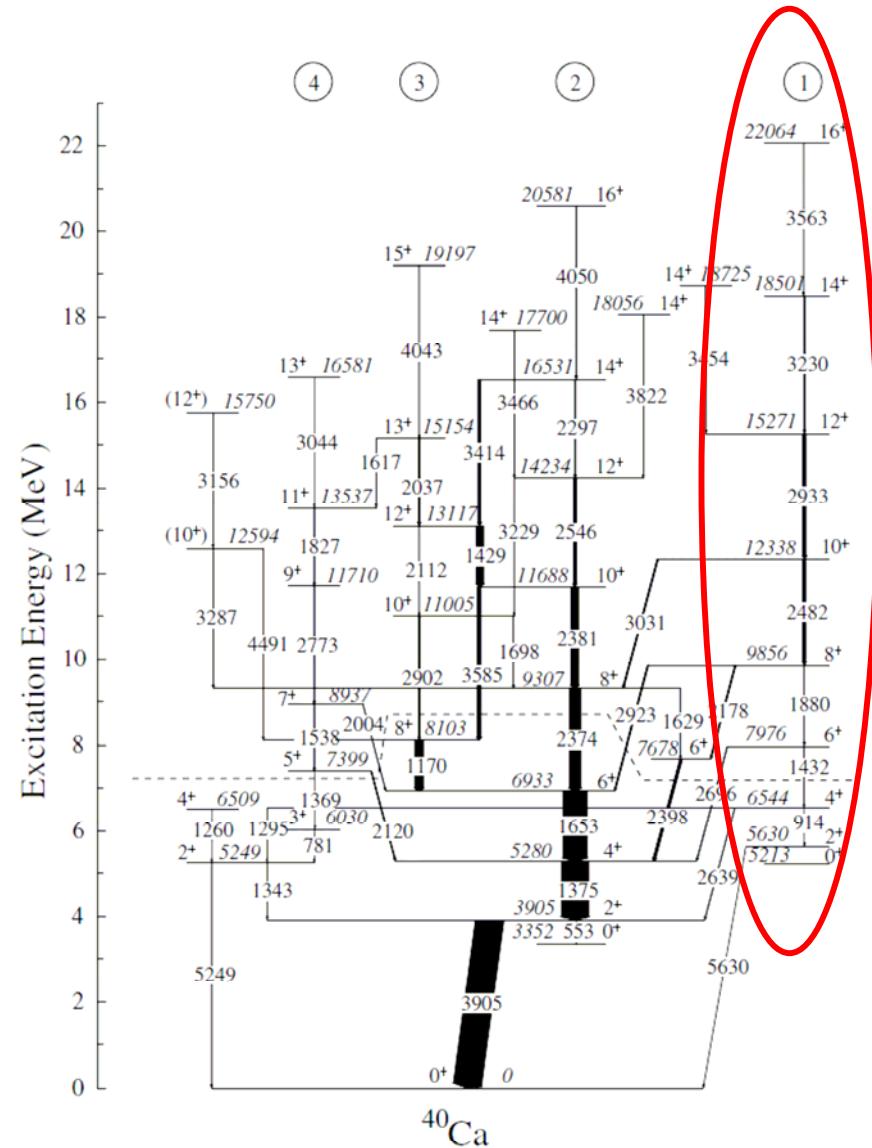
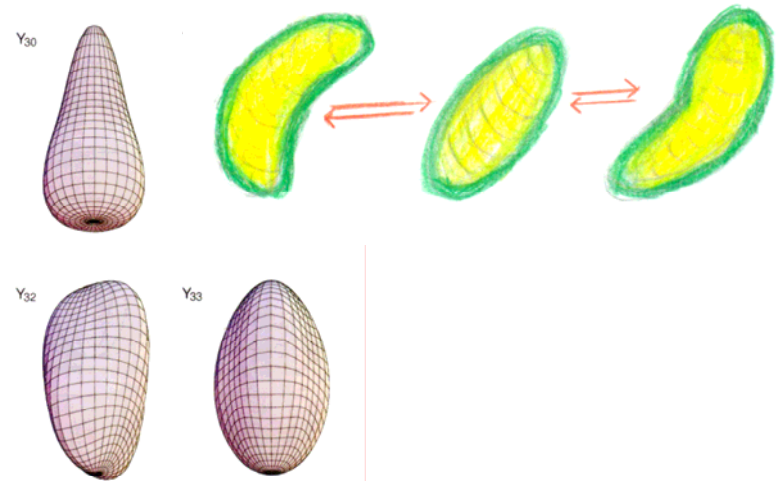




N=Zでは陽子と中性子の変形シェル効果がコヒーレントに効くだろう



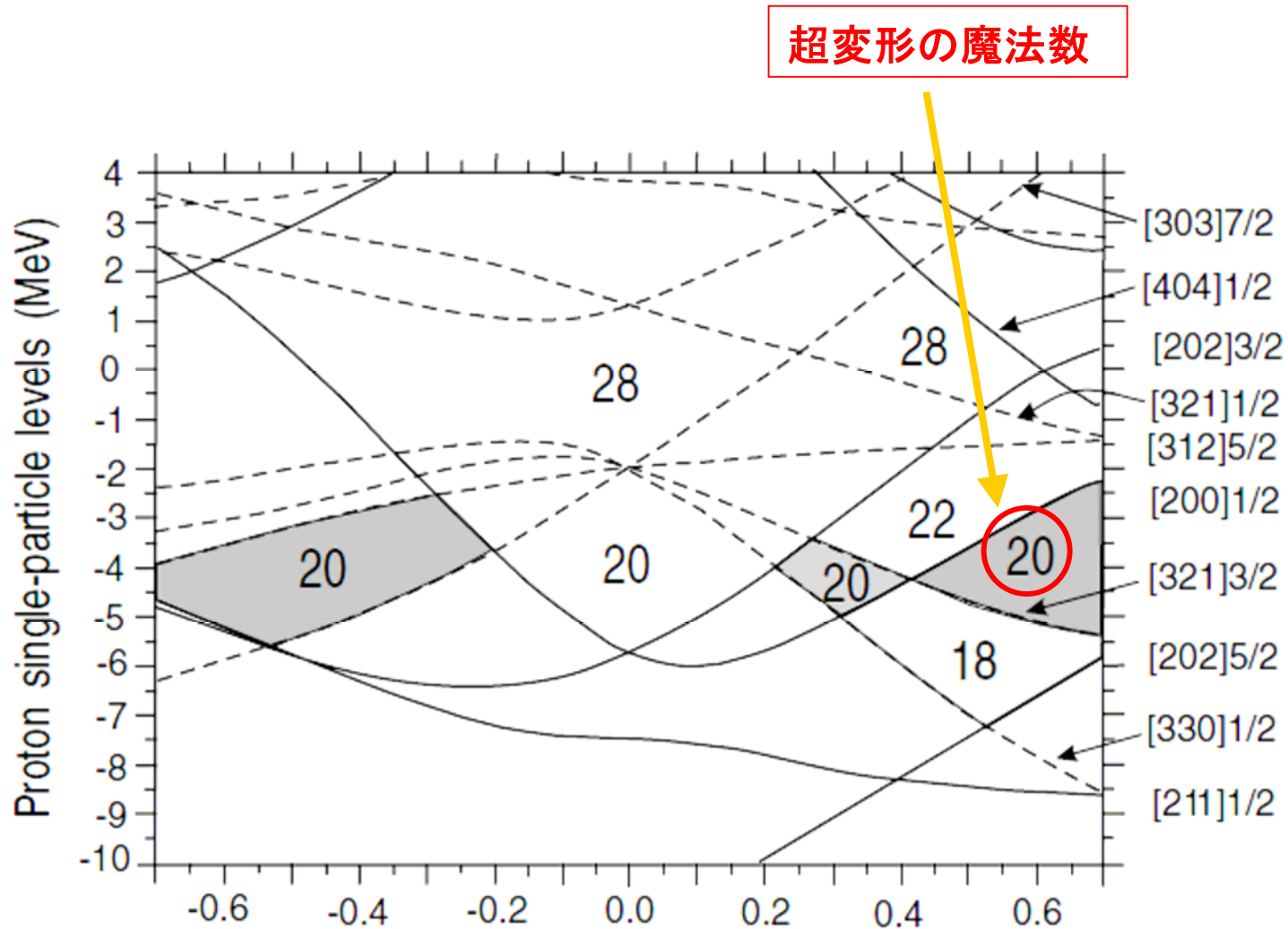
# Ca領域の超変形状態からのソフトOctupole振動励起



Skyrme HF + 混合表示 RPA計算

T. Inakura et al., Nucl. Phys. A 768 (2006) 61

# $^{40}\text{Ca}$ 近傍の1粒子エネルギーの変形依存性



$^{64}\text{Ge}$

$^{68}\text{Se}$

$^{72}\text{Kr}$

$^{76}\text{Sr}$

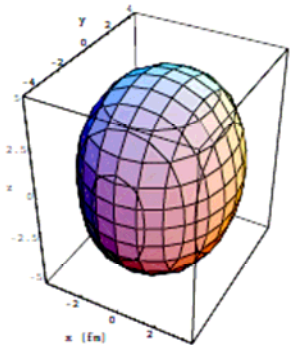
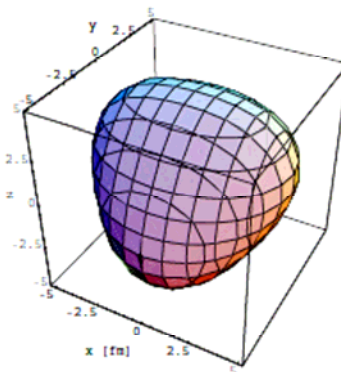
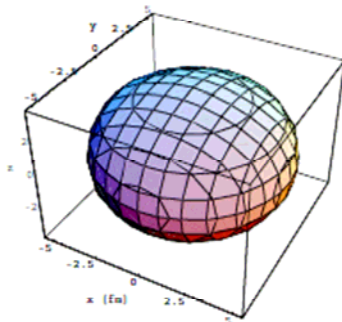
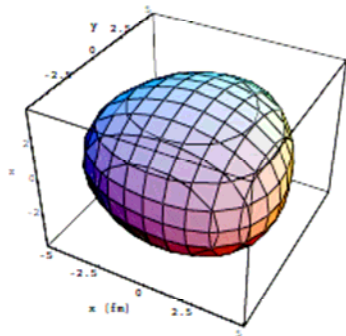
$^{80}\text{Zr}$

triangular (g.s.)

oblate (g.s.)

tetrahedral

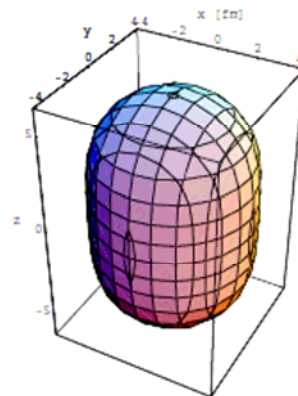
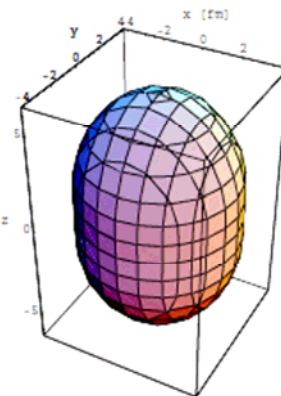
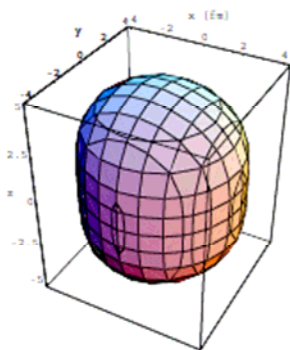
triaxial (g.s.)



prolate

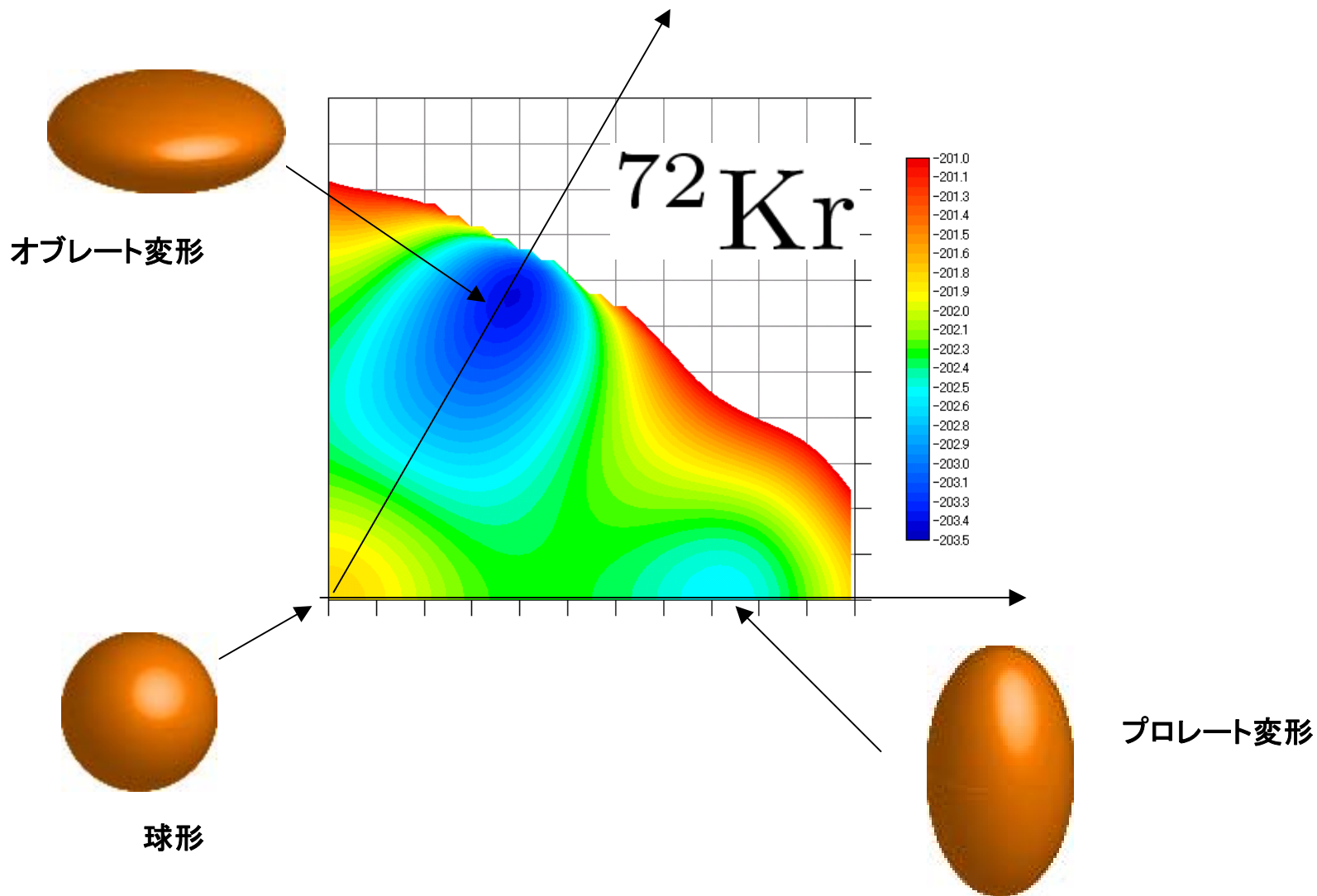
prolate (g.s.)

prolate (g.s.)



# 複数の真空(平均場)の間の巨視的トンネル現象

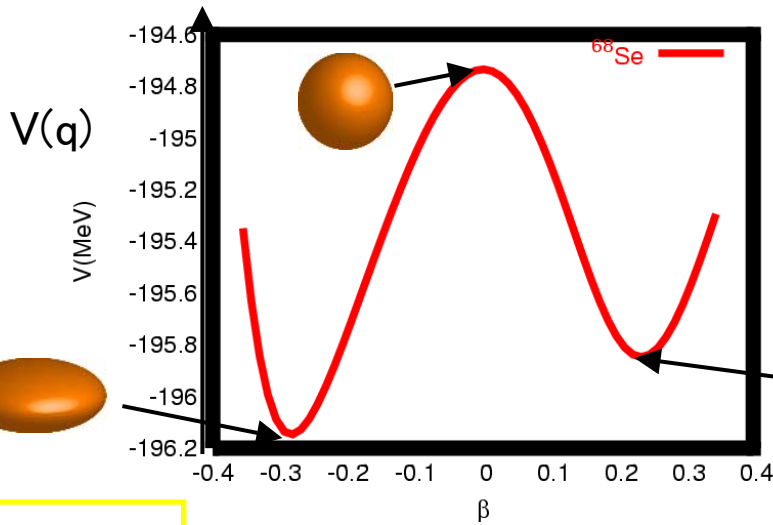
## オブレート・プロレート変形共存現象





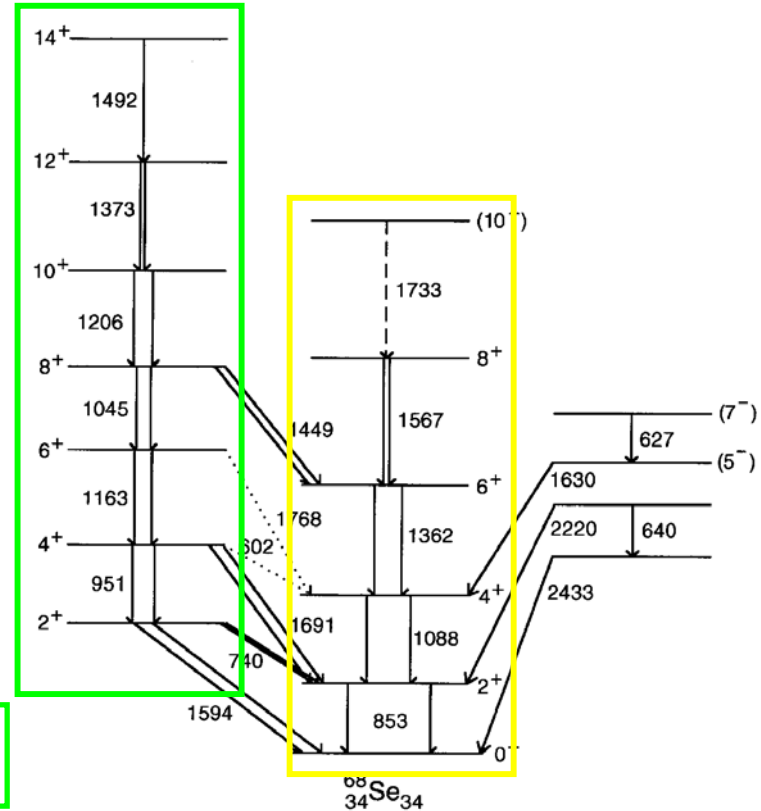
# Oblate 変形とProlate変形の共存現象

$^{68}\text{Se}$



oblate

prolate



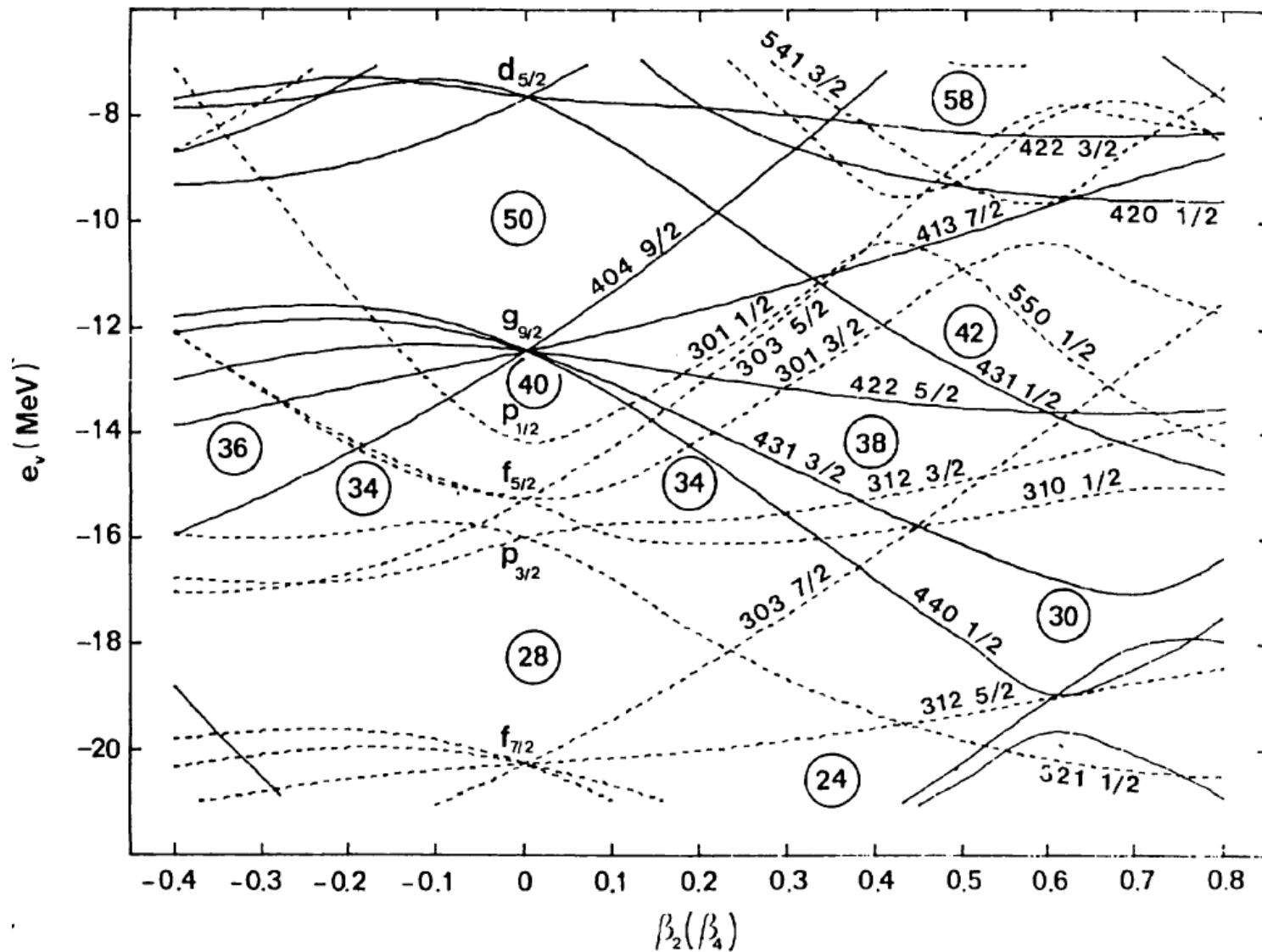
大振幅集団運動の微視的理論

Adiabatic Self-consistent Collective Coordinate (ASCC) Method



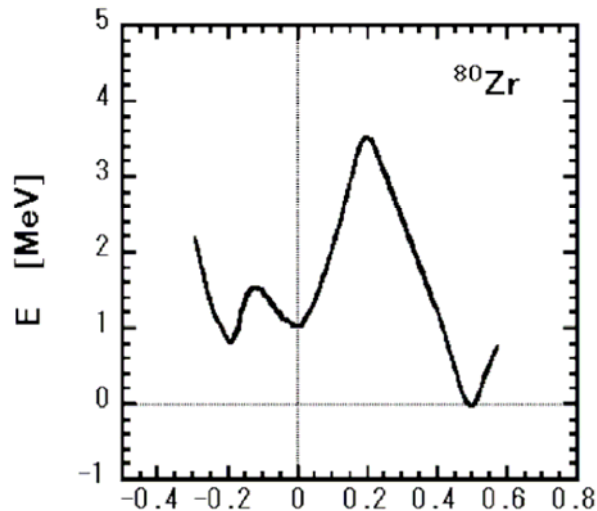
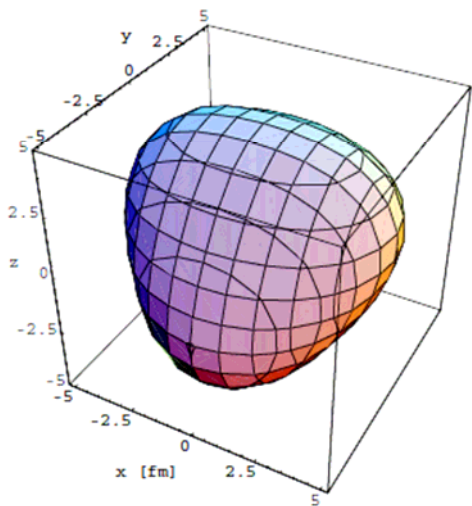
日野原君の講演: 22pSC-7

# 変形魔法数



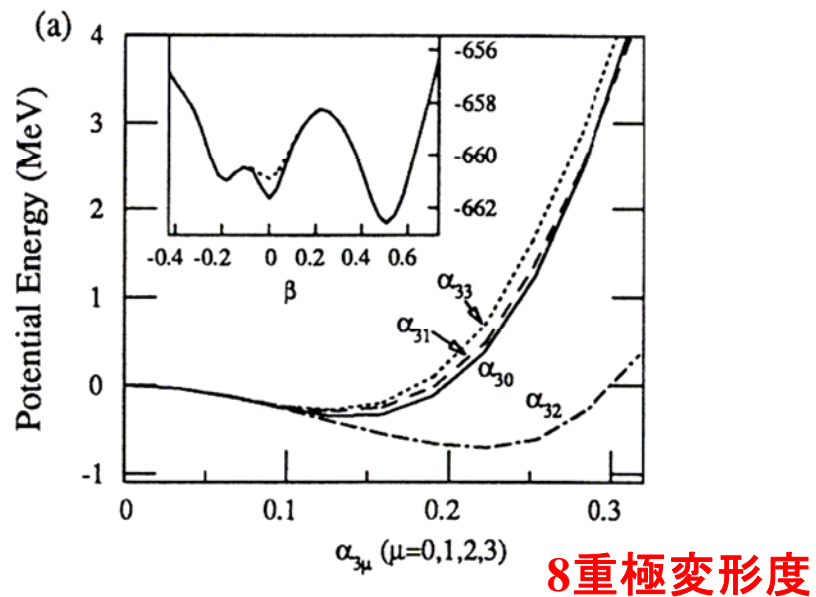
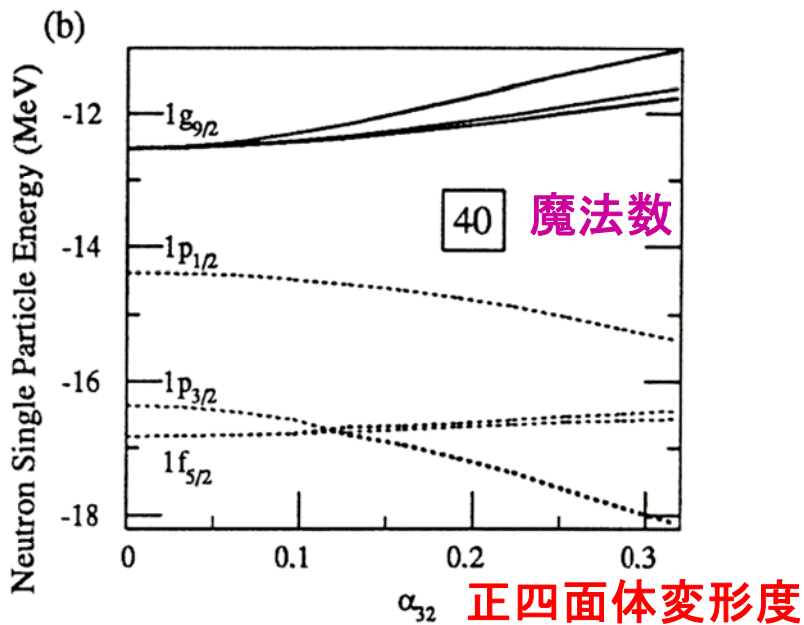
$^{80}\text{Zr}$

正四面体 tetrahedral 变形



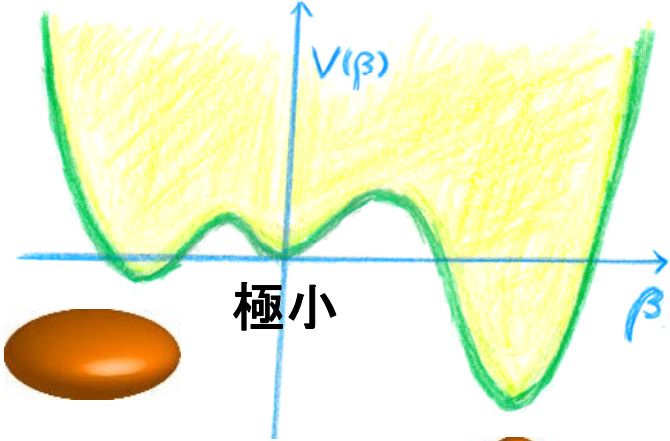
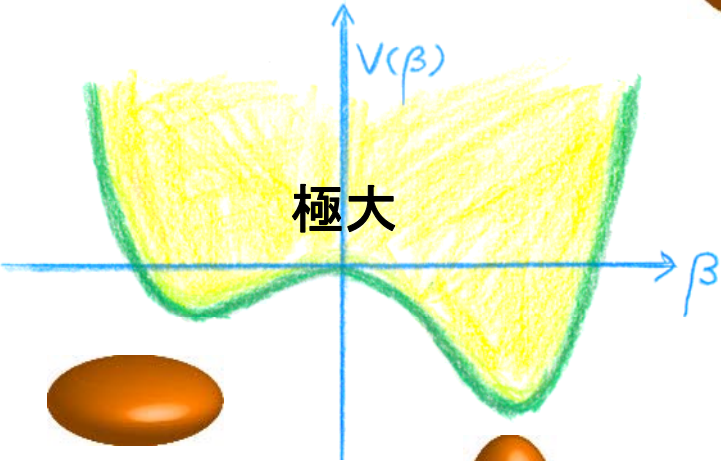
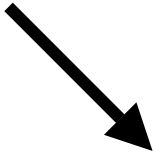
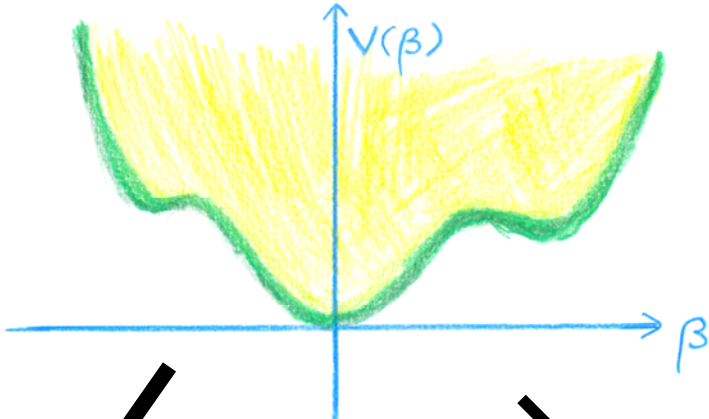
$\beta_2$  (Axial Symm.) 4重極变形度

M. Yamagami et al. Nucl. Phys. A 693 (2001) 579



S. Takami et al. Phys. Lett. B 431 (1998) 242

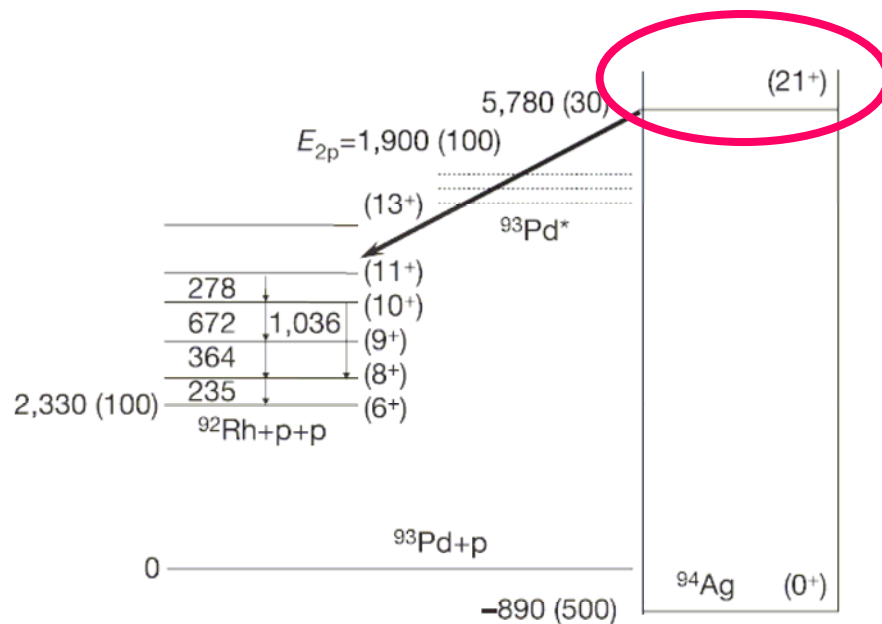
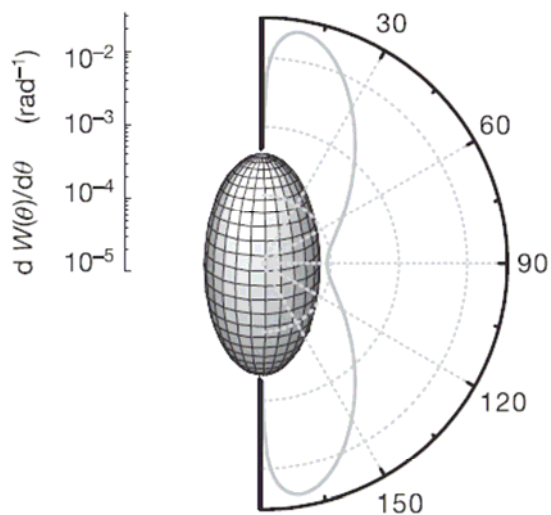
# 變形共存現象



## LETTERS

# Proton-proton correlations observed in two-proton radioactivity of $^{94}\text{Ag}$

Ivan Mukha<sup>1,2,3†</sup>, Ernst Roeckl<sup>1</sup>, Leonid Batist<sup>4</sup>, Andrey Blazhev<sup>1,5</sup>, Joachim Döring<sup>1</sup>, Hubert Grawe<sup>1</sup>, Leonid Grigorenko<sup>6</sup>, Mark Huyse<sup>2</sup>, Zenon Janas<sup>7</sup>, Reinhard Kirchner<sup>1</sup>, Marco La Commara<sup>8</sup>, Chiara Mazzocchi<sup>1</sup>, Sam L. Tabor<sup>9</sup> & Piet Van Duppen<sup>2</sup>

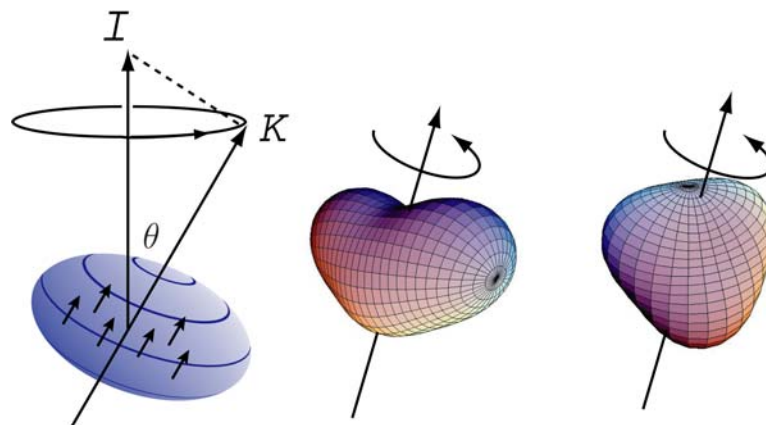


# 1. Introduction

- a 歴史
- b シェル構造と対相関

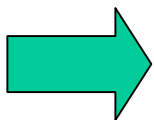
# 2. 高スピンの超変形核における新しい集団モード

- a ソフト8重極振動モード
- b Wobbling と Precession

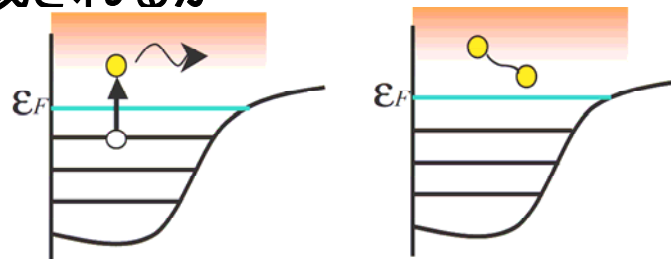


# 3. 理研RIBFで発見が期待される新しい集団モード

- a  $A=30-100$  の  $N=Z$  核近傍で期待されるエキゾチック変形状態
- b 中性子ドリップ線近傍で新しい型の集団励起モードが形成されるか

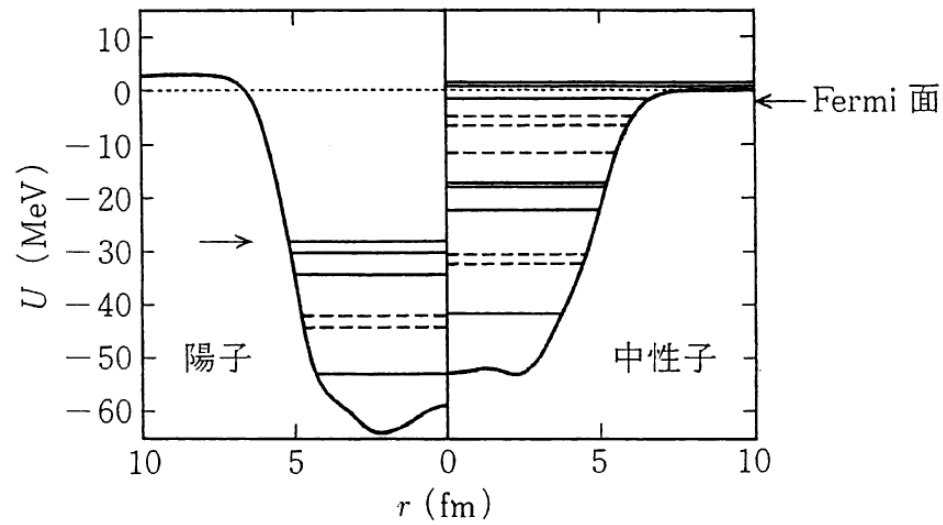
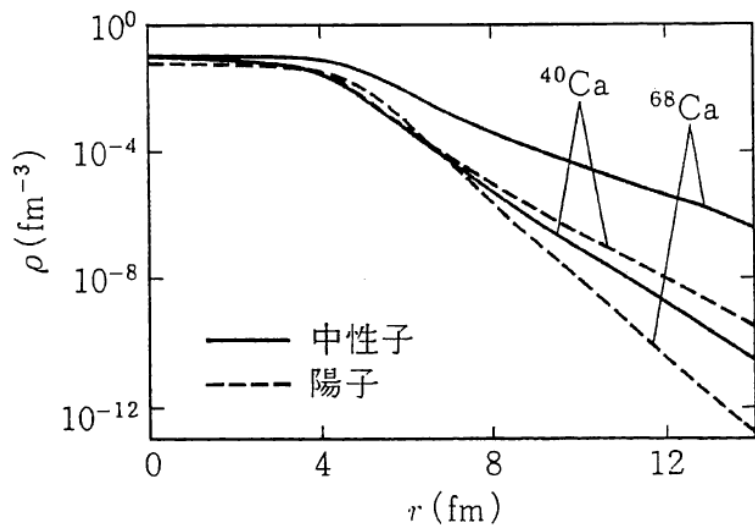
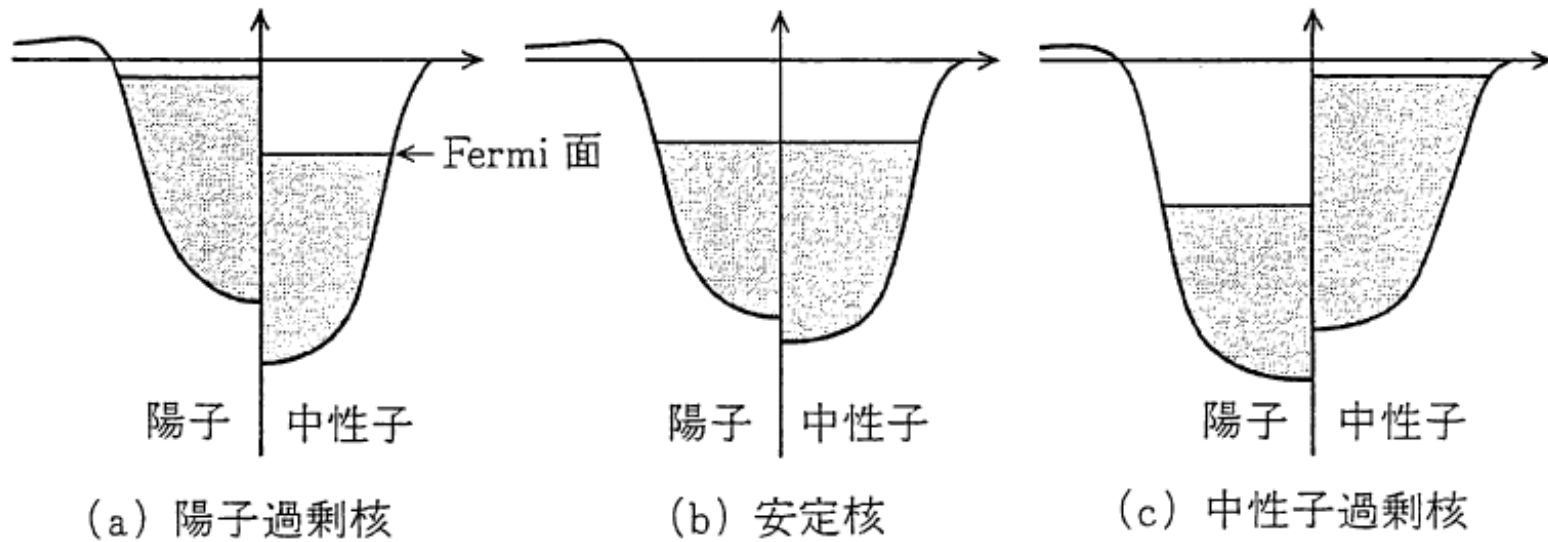


# 4. まとめ

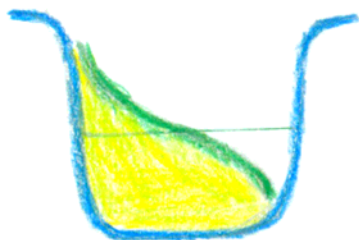
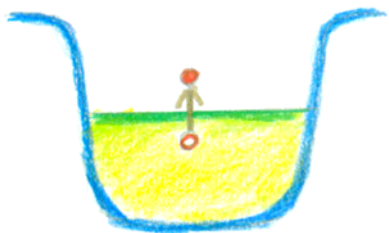




# 不安定核の平均場の特徴



## 安定核



## 不安定核



ドリップ線近傍では連続状態への粒子-空孔励起  
(2準粒子励起)によって集団モードを作らなくてはならない



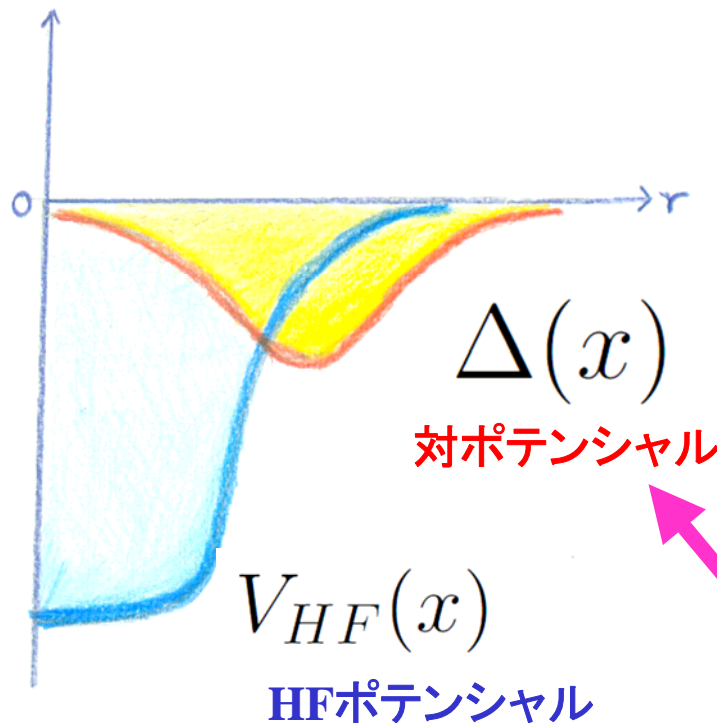
ドリップ線近傍ではBCS理論は破綻する



# BCS準粒子と異なる 新しい準粒子描像

## Hartree-Fock-Bogoluibov平均場

$$\begin{pmatrix} t + V_{HF}(x) - \lambda & \Delta(x) \\ -\Delta^*(x) & -t - V_{HF}(x) + \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u(x) \\ v(x) \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} u(x) \\ v(x) \end{pmatrix}$$



$E > |\lambda|$  の準粒子波動関数は

上成分	$u(x)$	非局在
下成分	$v(x)$	局在

密度分布の表面より外に  
広がっている!!

# ドリップ線に近づくにつれて.....

シナリオ1

対相関は弱くなりソフトモードの集団性も弱まる

シナリオ2

対相関は強くなりソフトモードの集団性は高くなる

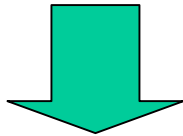
## 新しい研究テーマ



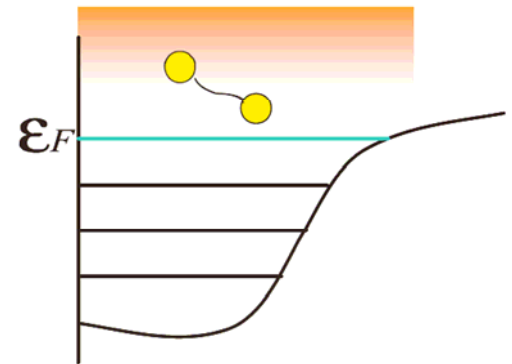
弱束縛状態、共鳴状態、(非共鳴)連続状態が生成する対相関とは



対相関の密度依存性



豊かな空間構造が形成される可能性



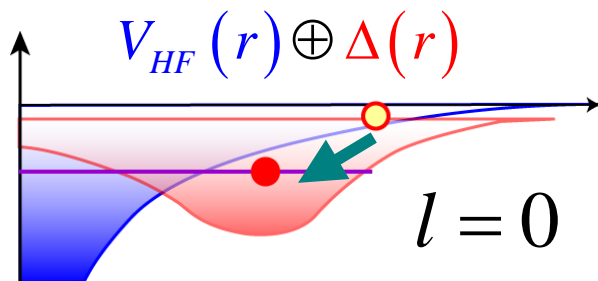
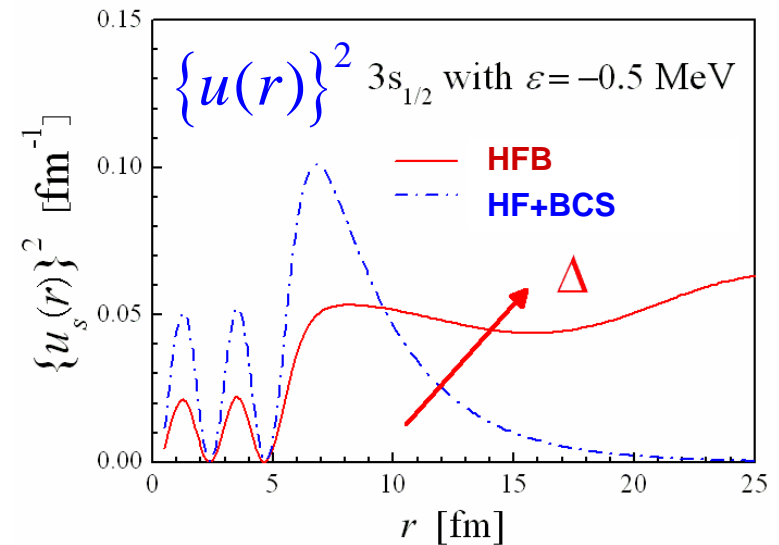
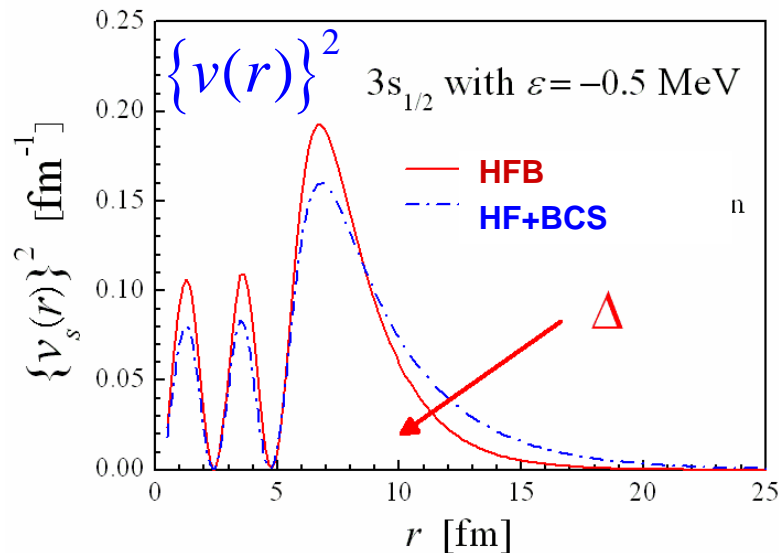
# 弱束縛系での準粒子波動関数

$$|\lambda_{Fermi}| \leq E_k \quad \Rightarrow$$

$$u(E_k, \vec{r}) \rightarrow \sin(\alpha_k r + \delta_k) / r$$

$$v(E_k, \vec{r}) \rightarrow \exp(-\beta_k r) / r$$

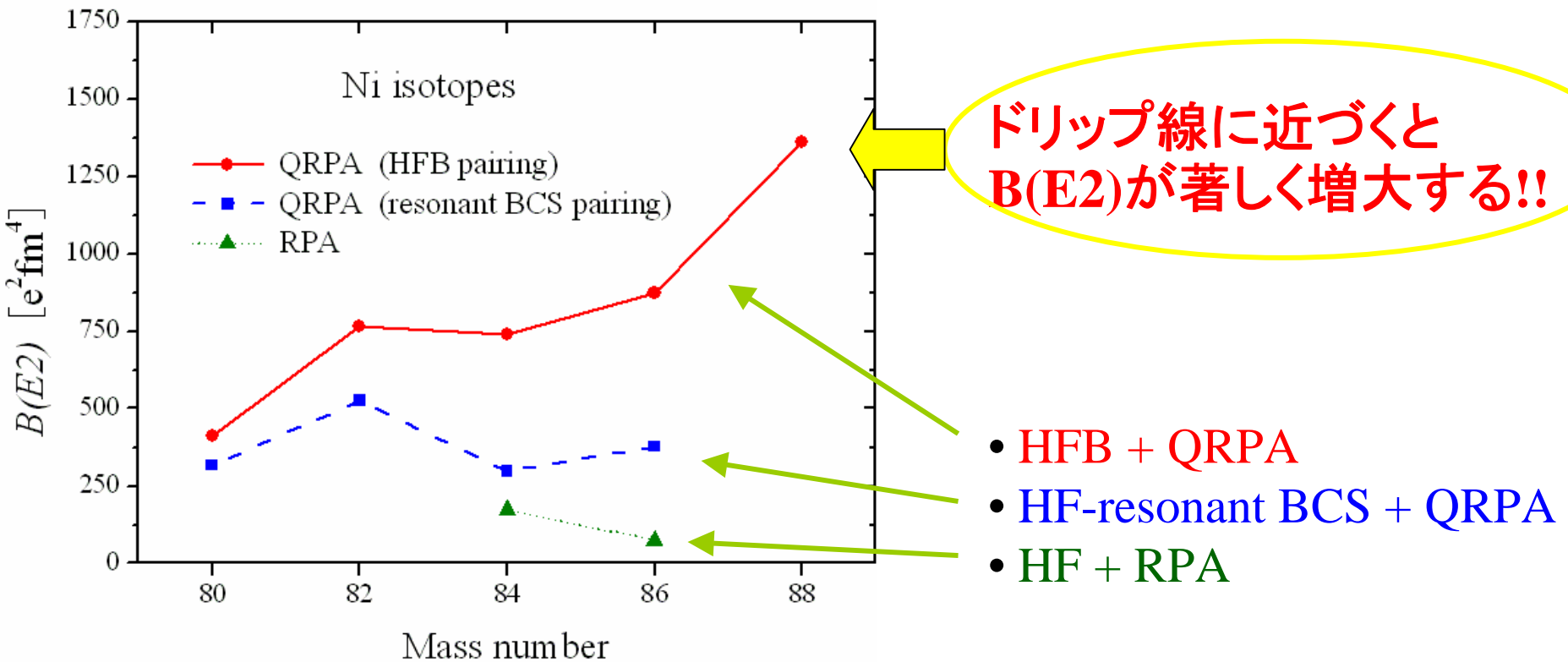
e.g.,  $3s_{1/2}$  state at  $\varepsilon^{HF} = -0.5$  MeV



**Pairing anti-halo effect**

K. Bennaceur, et al., Phys. Lett. 496B, 154 (2000)

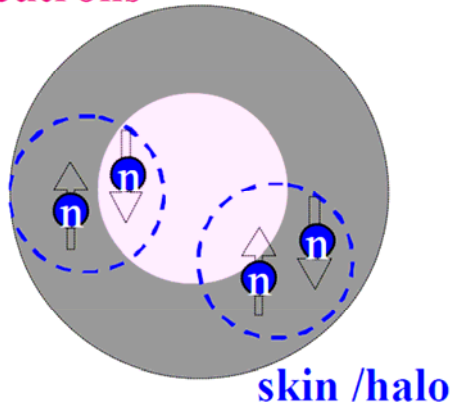
# 中性子過剰 Ni の第1励起2+状態



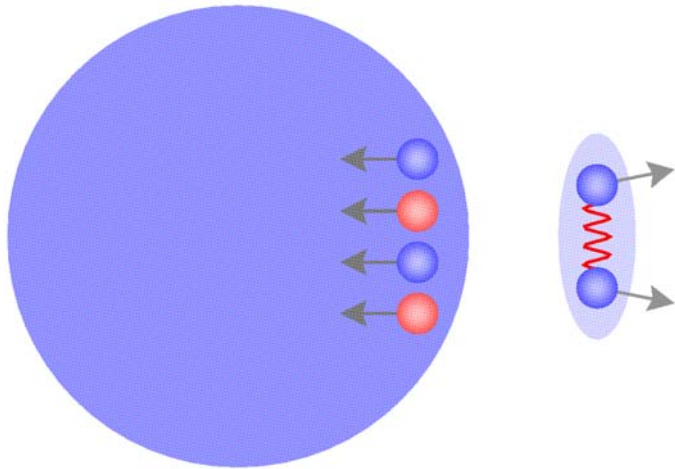
M. Yamagami, Phys. Rev. C72, 064308 (2005)



## Di-neutrons



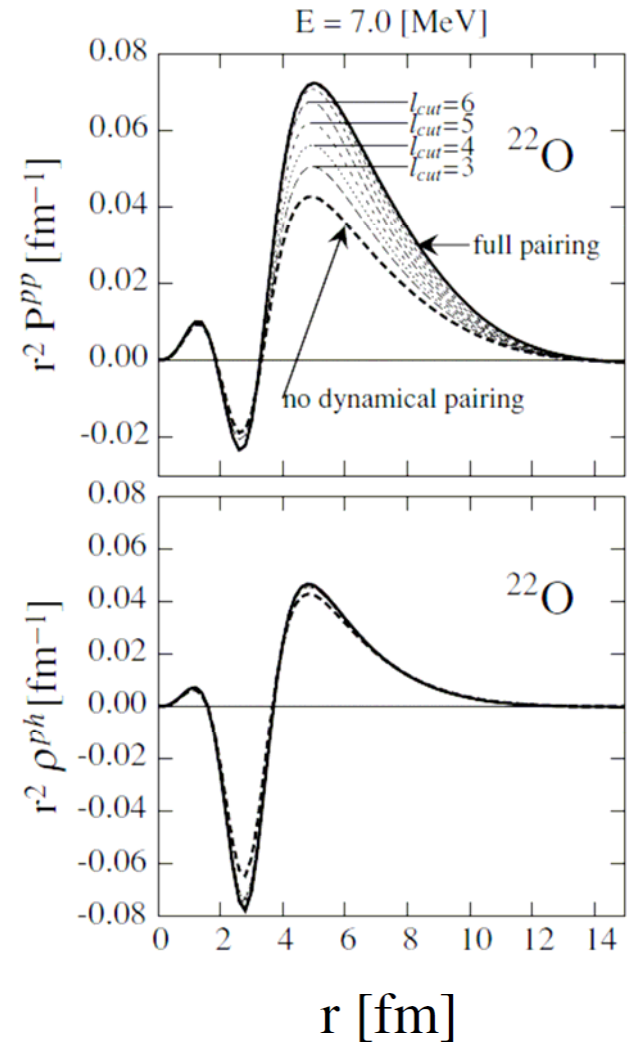
## Di-neutron mode



M. Matsuo, K. Mizuyama, Y. Serizawa  
 Phys. Rev. C 71 (2005) 064326

## 核子ペアー遷移密度

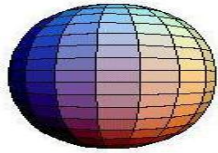
$$P^{pp}(\mathbf{r}) = \langle n | \psi^\dagger(\mathbf{r}, \uparrow) \psi^\dagger(\mathbf{r}, \downarrow) | 0 \rangle$$



# 変形した弱束縛系

$^{40}\text{Mg}$  region

$N=28$



N RIBF

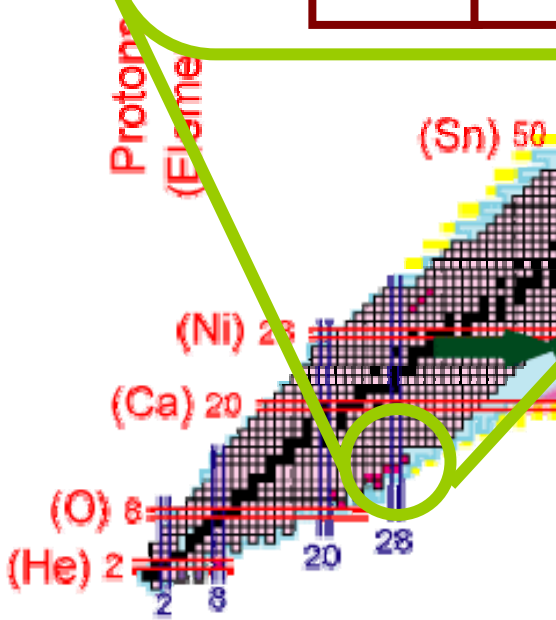
$Z=12$

$^{36}\text{Mg}$

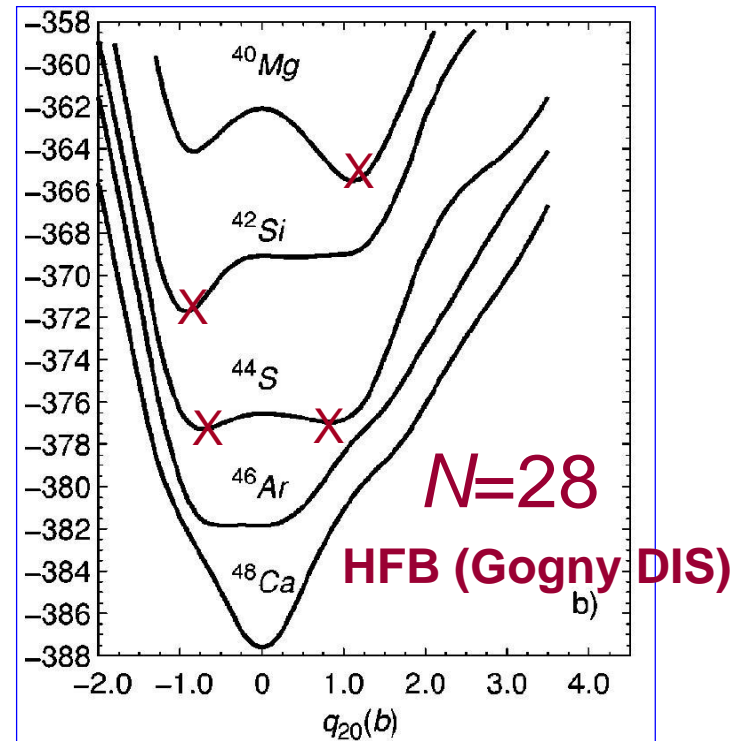
$^{38}\text{Mg}$

$^{40}\text{Mg}$

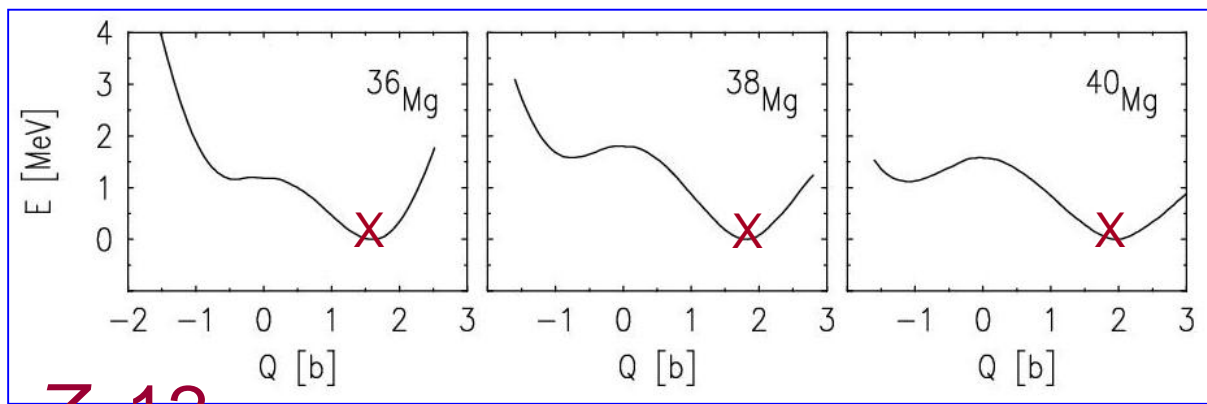
$^{44}\text{S}$
$^{42}\text{Si}$
$^{40}\text{Mg}$



Stable (Stability line)



R.Rodriguez-Guzman, J.L.Egido, L.M.Robledo  
Phys. Rev. C65, 024304 (2002)

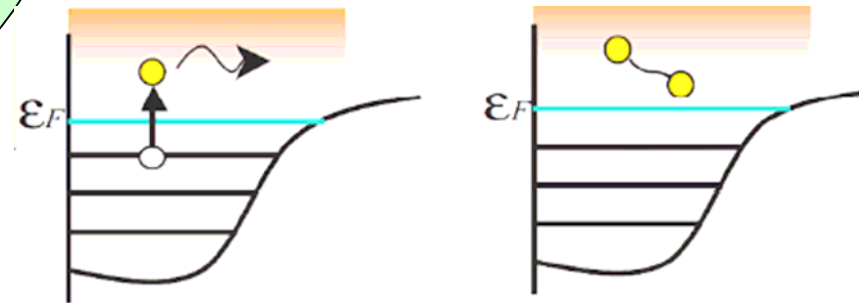
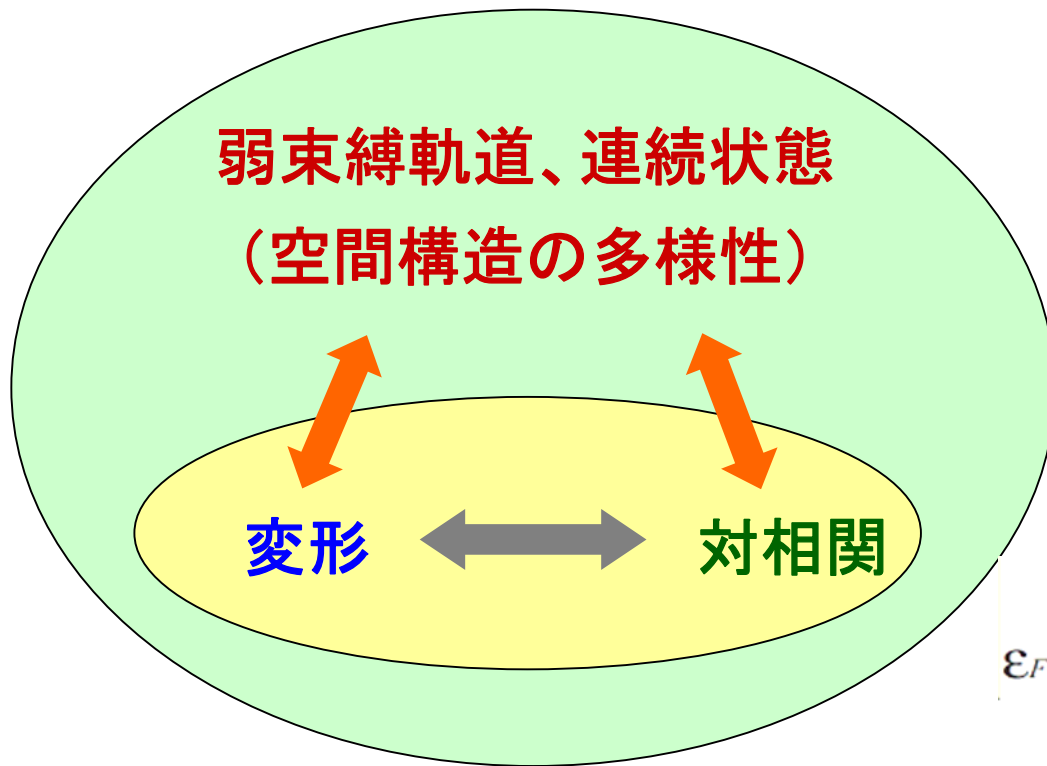


$Z=12$

HFB (Skyrme SIII)

J.Terasaki, H.Flocard, P.-H.Heenen, P.Bonche  
Nucl.Phys. A621, 706 (1997)

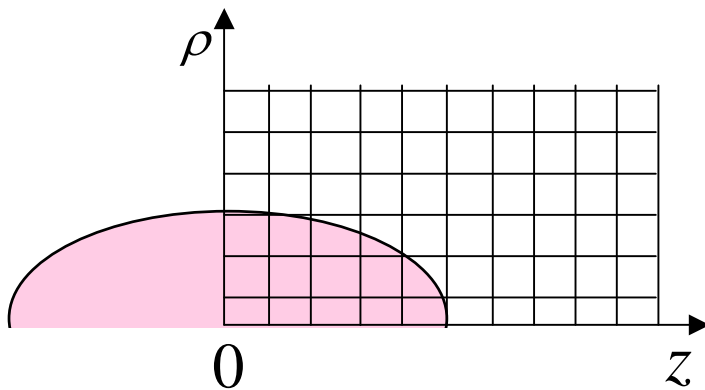
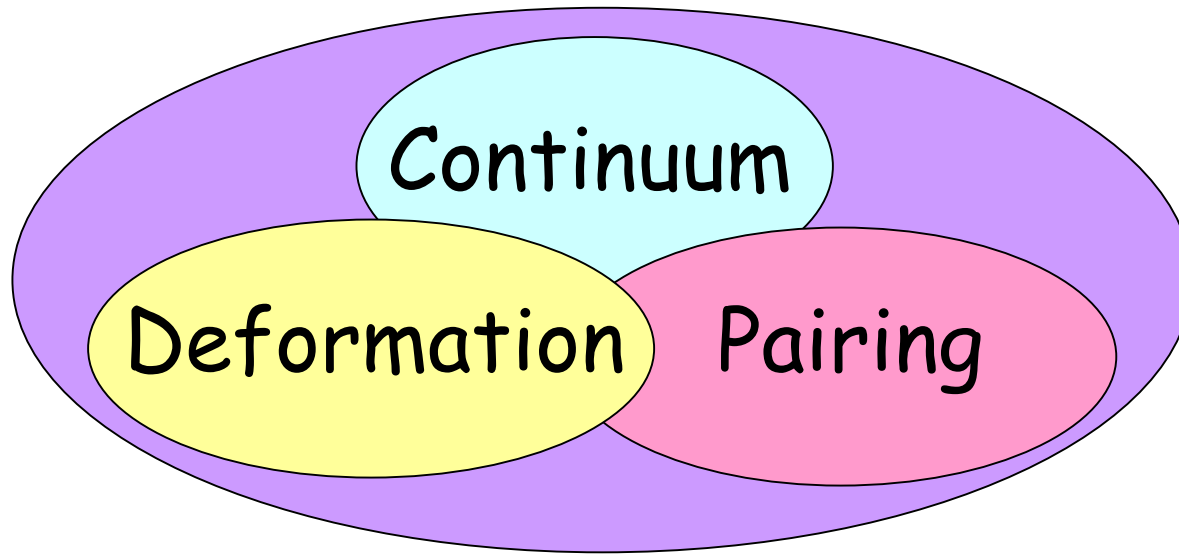
# 変形した弱束縛系における集団モード



束縛状態(局在)と連続状態(非局在)の統一的な  
取り扱いは、全く新しい多体理論のチャレンジ！

# HFB+QRPAによる微視的アプローチ

対相関、変形、連続状態への励起の統一的記述にむけて



近年のBreak through

**Continuum Quasiparticle RPA**

**M. Matsuo, Nucl. Phys. A 696(2001)371**

**吸収境界条件TDHF**

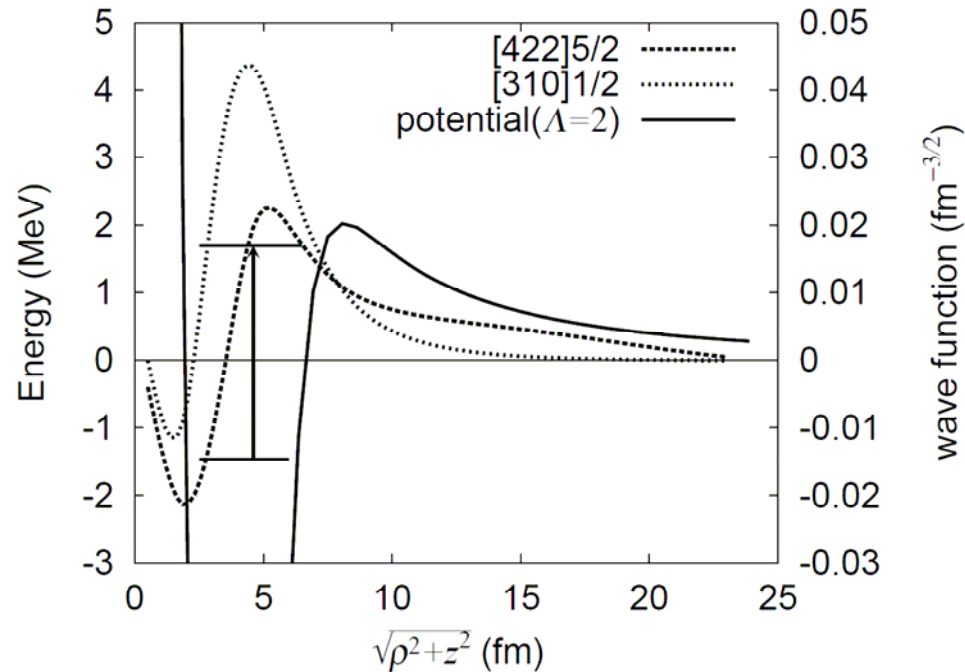
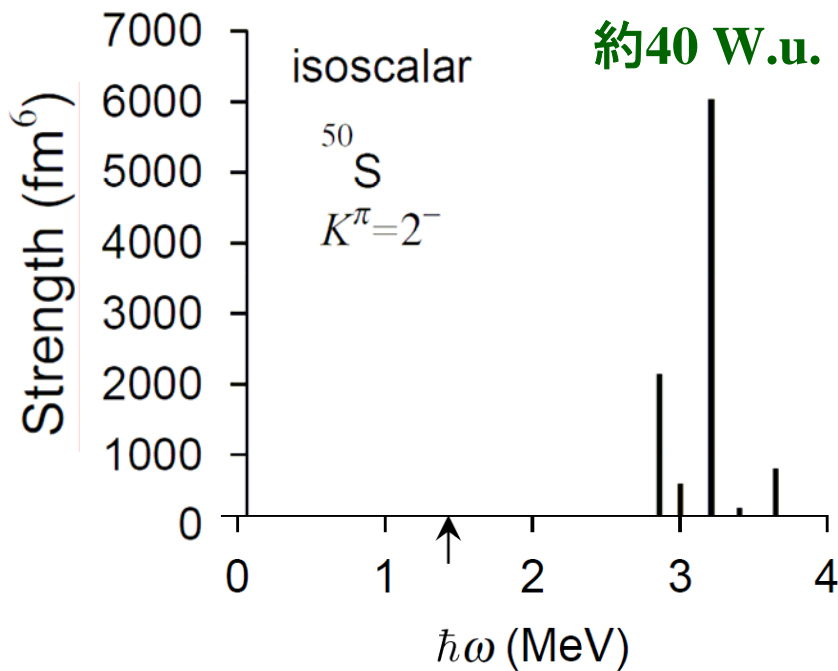
**T. Nakatsukasa, K. Yabana,**

**J. Chem. Phys. 114(2001)2550**

3次元座標空間で直接HFB方程式を解く

中性子ドリップ線近傍では1粒子励起でも極めて大きい遷移強度をもつことがある

### 超変形状態からのOctupole励起



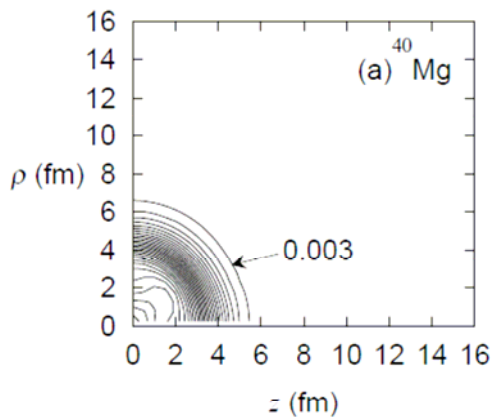
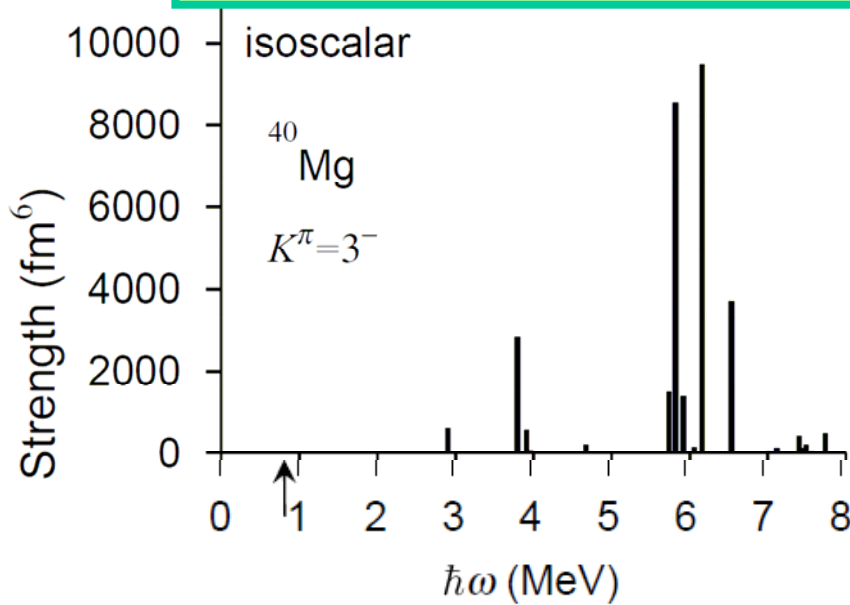
弱束縛状態から共鳴状態への励起

RPA計算: K. Yoshida et al.

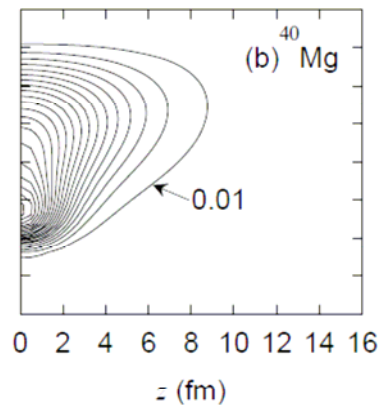
# 40Mg オブレート変形状態の上のOctupole励起

RPA計算: K. Yoshida et al.

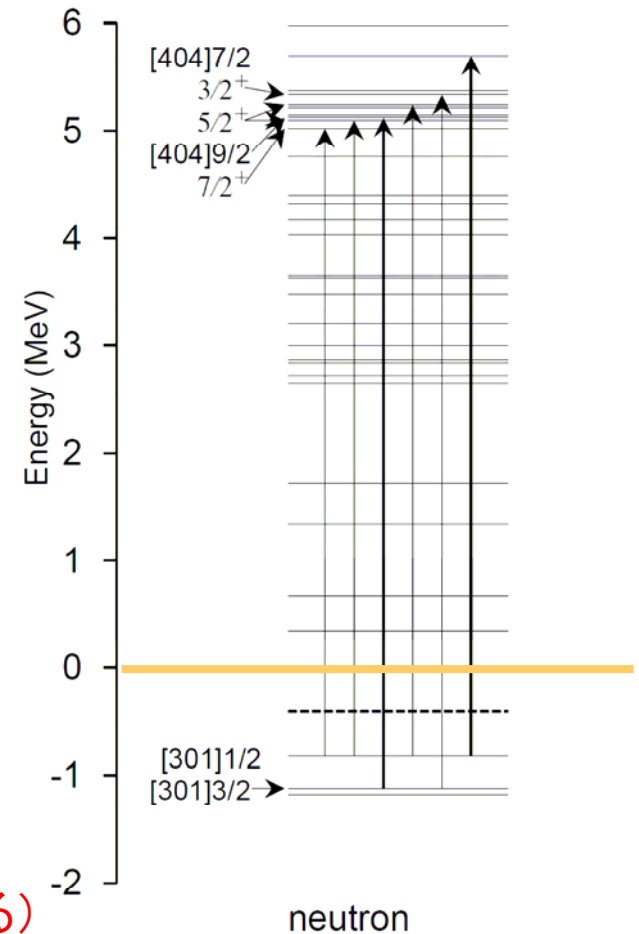
弱束縛状態から共鳴状態への励起



中性子密度分布



遷移密度分布  
 (空間的に大きく広がっている)

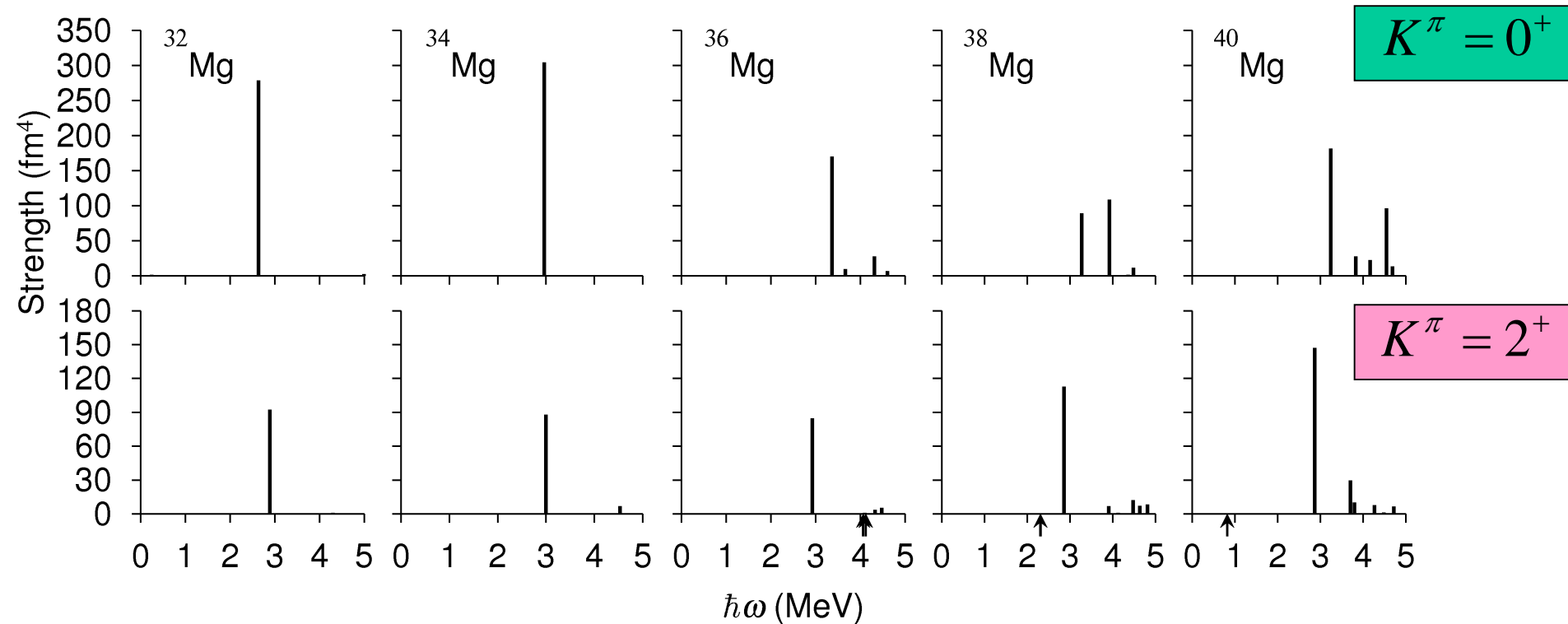




# K=0とK=2モードの4重極遷移強度 (n-rich Mg isotopes)

(1W.u.=6 - 8fm<sup>4</sup>)

$$\beta_2 \approx 0.3$$



励起エネルギー

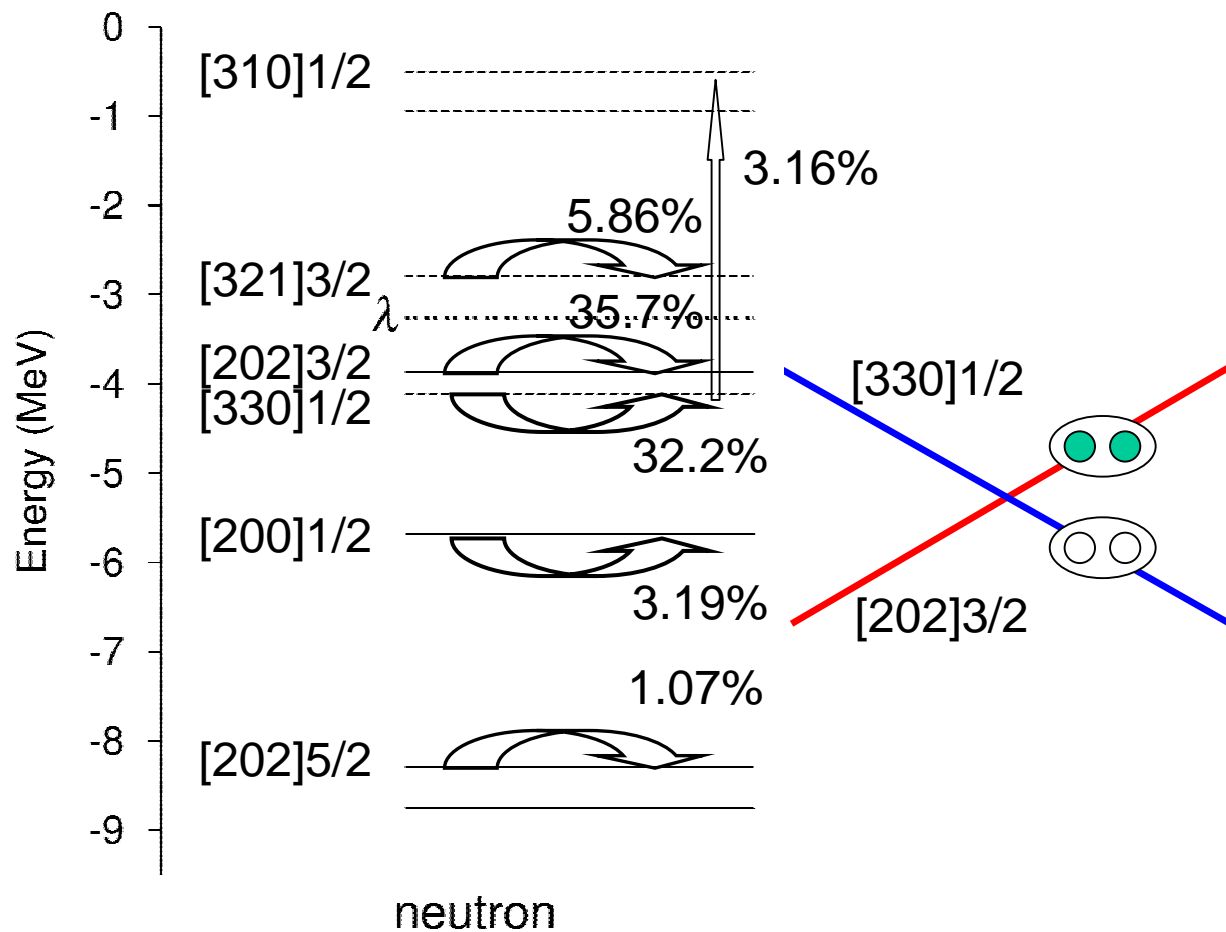
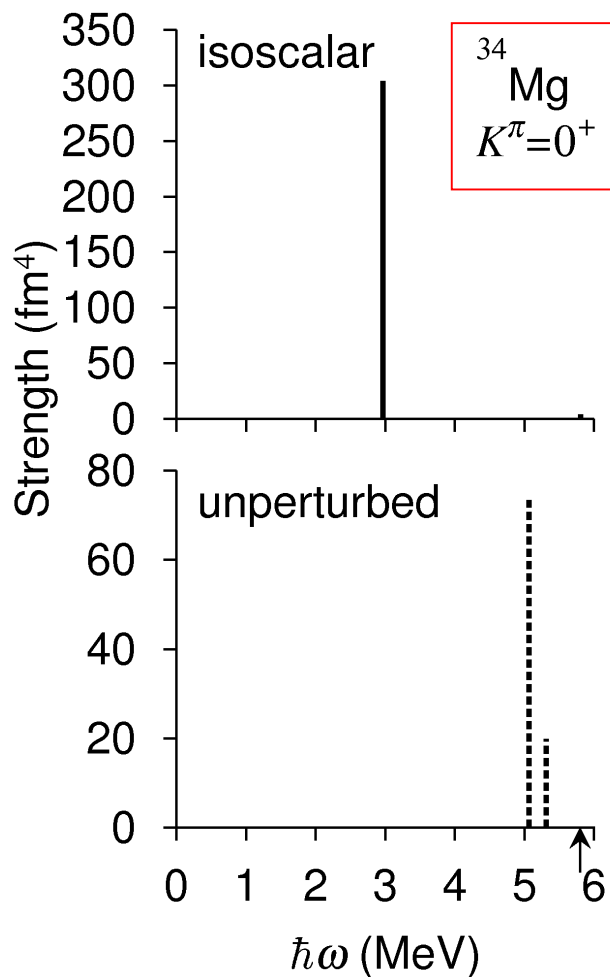
準粒子RPA計算: K. Yoshida et al.

→ 吉田君の講演: 22aSD-8

# $K=0^+$ 励起モードの集団性を生み出す微視的機構

準粒子RPA計算: K. Yoshida et al.

$$\beta_2 = 0.3$$



# 中性子ペアー密度の四重極ゆらぎ

基底状態

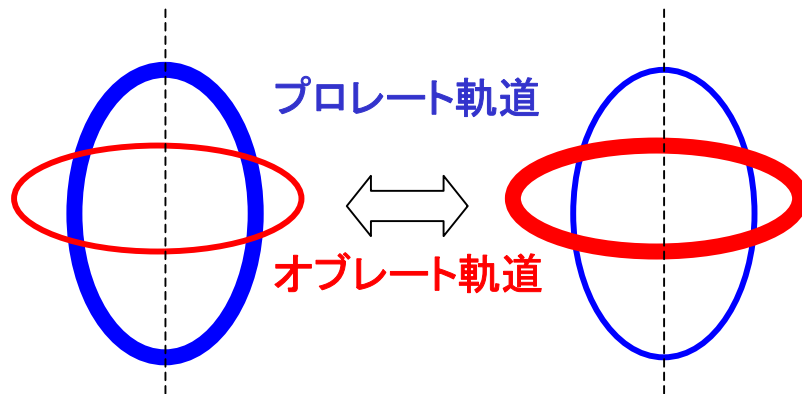
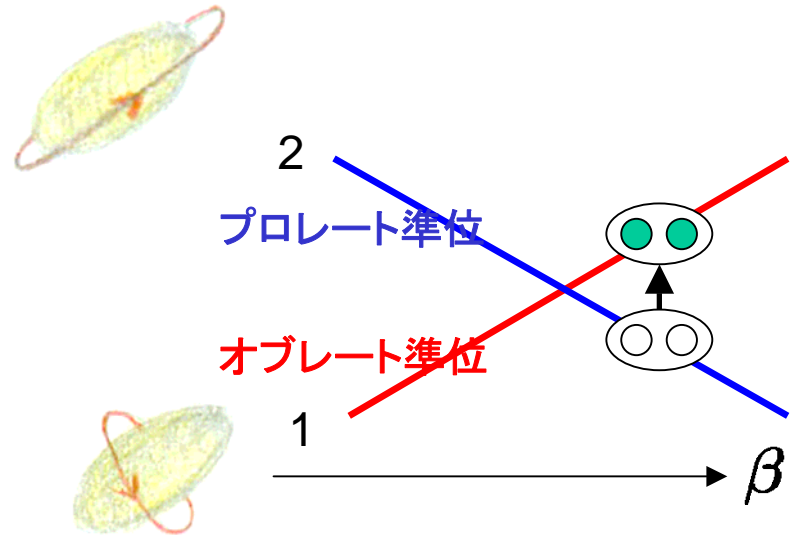
$$|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} (a |v_1 \bar{v}_1\rangle + b |v_2 \bar{v}_2\rangle)$$

励起状態

$$|0'\rangle = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} (-b |v_1 \bar{v}_1\rangle + a |v_2 \bar{v}_2\rangle)$$

遷移行列要素

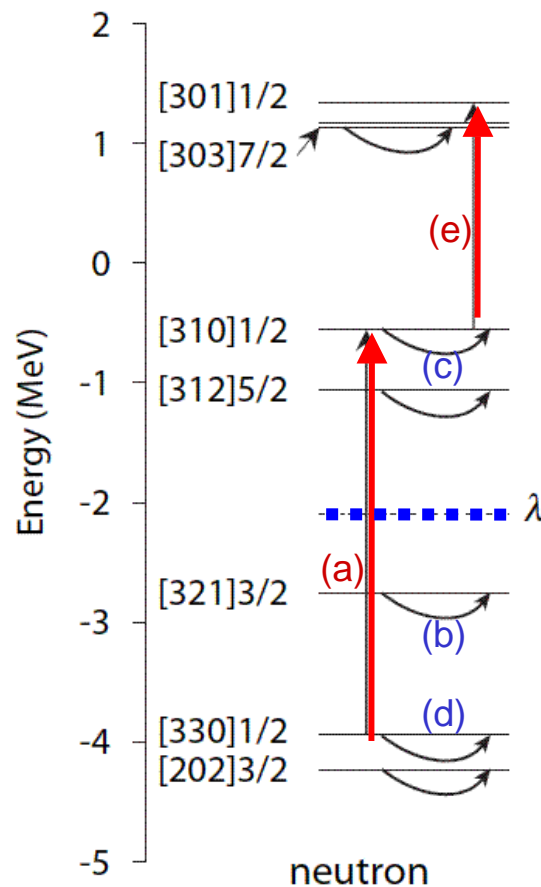
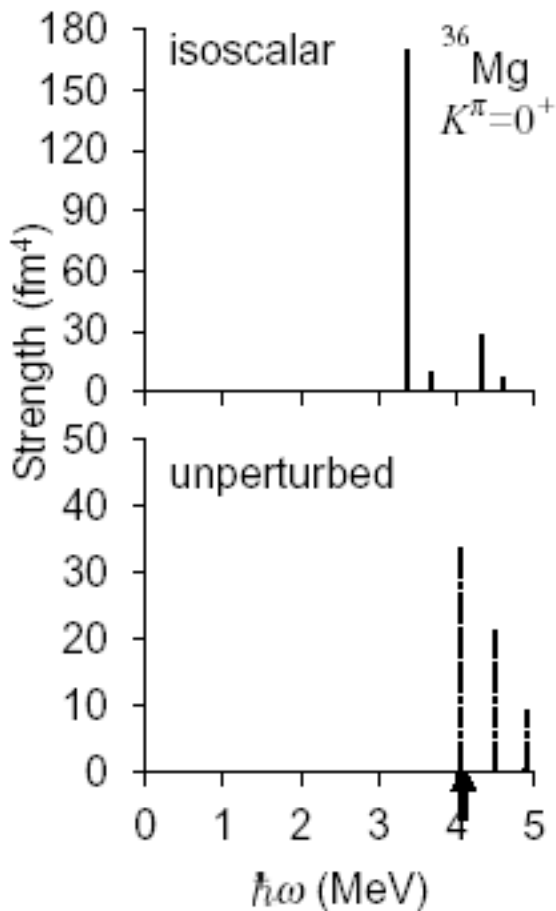
$$\longrightarrow \langle 0' | r^2 Y_{20} | 0 \rangle = \frac{2ab}{a^2 + b^2} \left\{ \langle v_2 | r^2 Y_{20} | v_2 \rangle - \langle v_1 | r^2 Y_{20} | v_1 \rangle \right\}$$



逆符号のときコヒーレントとなる

(Bohr-Mottelson)

# More exotic soft $K=0^+$ mode in $^{36}\text{Mg}$



$$\langle K^\pi = 0_2^+ | r^2 Y_{20} | 0_{gs}^+ \rangle = \sum_{\alpha, \beta} M_{20}^{\alpha, \beta}$$

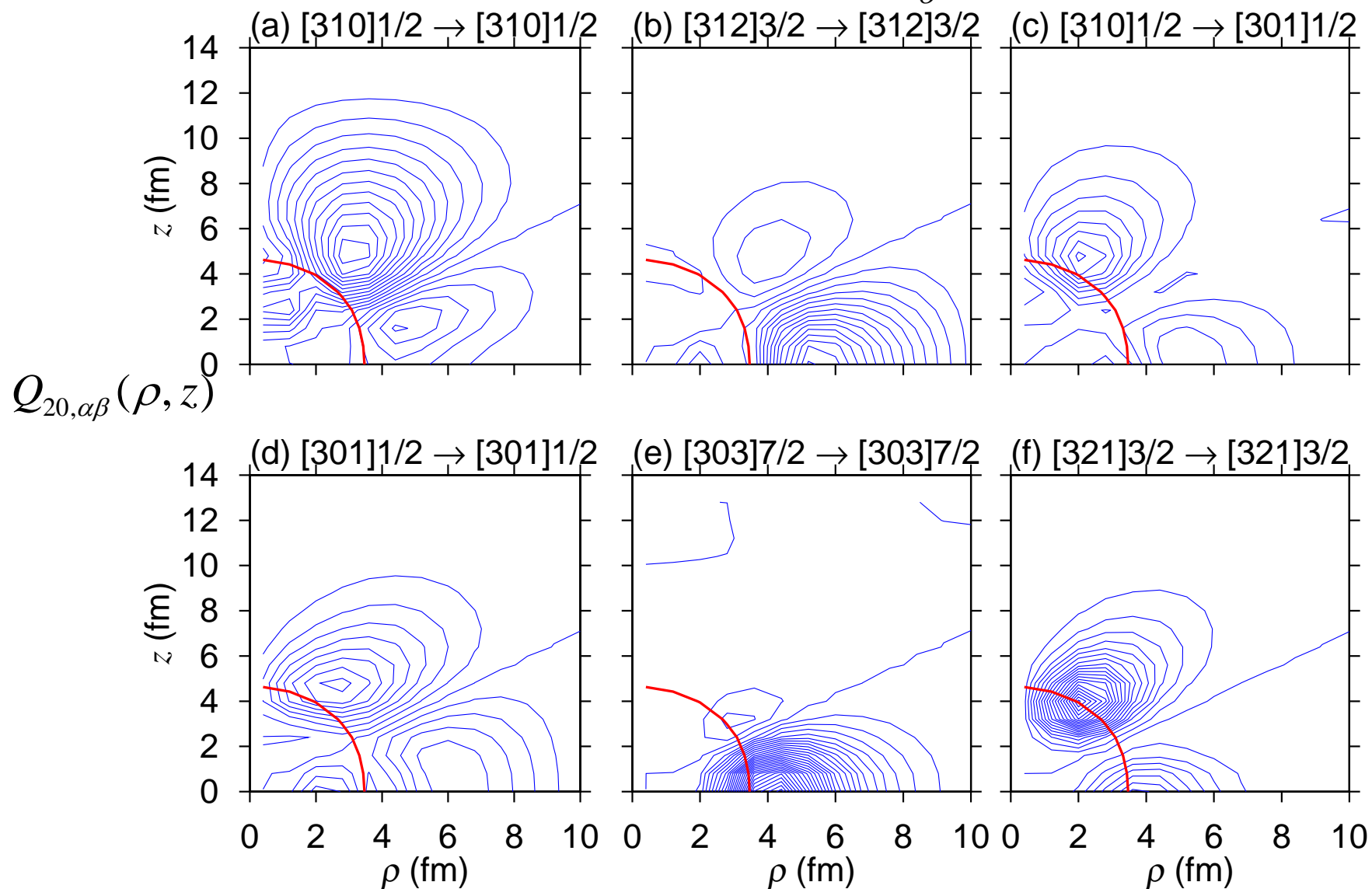
Configurations  $M_{20}^{\alpha, \beta}$  [ $\text{fm}^2$ ]

(a)	$[310]1/2, [330]1/2$	-2.11
(b)	$([321]3/2)^2$	-1.61
(c)	$([310]1/2)^2$	-1.58
(d)	$([330]1/2)^2$	-1.50
(e)	$[301]1/2, [310]1/2$	-0.51
	...	
	$[N, n_3, \Lambda]\Omega$	

調和振動子ポテンシャルの選択則はことごとく破れている!!

# 2準粒子励起の空間的構造 ( $^{40}\text{Mg}$ )

$$\langle \alpha\beta | \hat{Q}_{20} | 0 \rangle \equiv \int d\rho dz Q_{20,\alpha\beta}(\rho, z) \quad \hat{Q}_{20} = \sum_{\sigma} \int d\mathbf{r} r^2 Y_{20} \psi^{\dagger}(\mathbf{r}, \sigma) \psi(\mathbf{r}, \sigma)$$



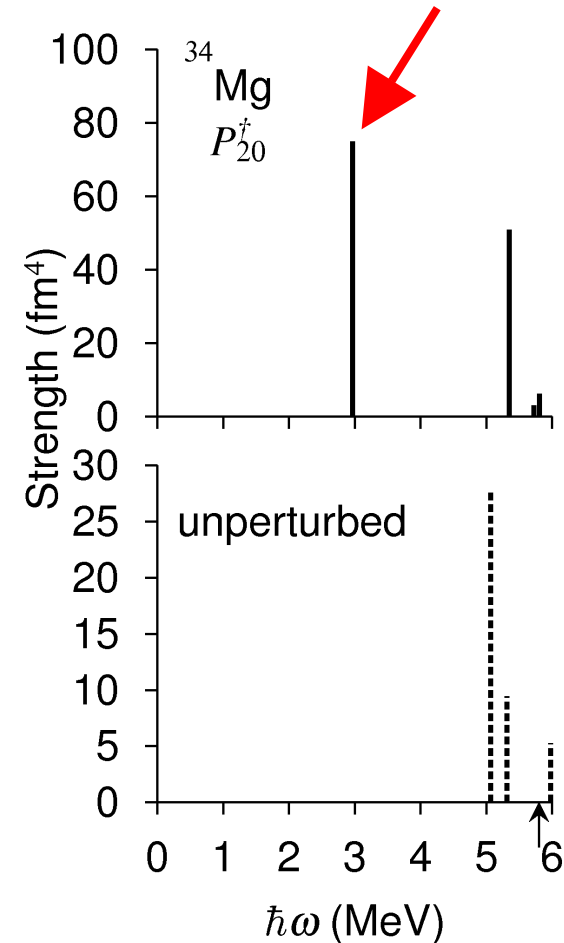
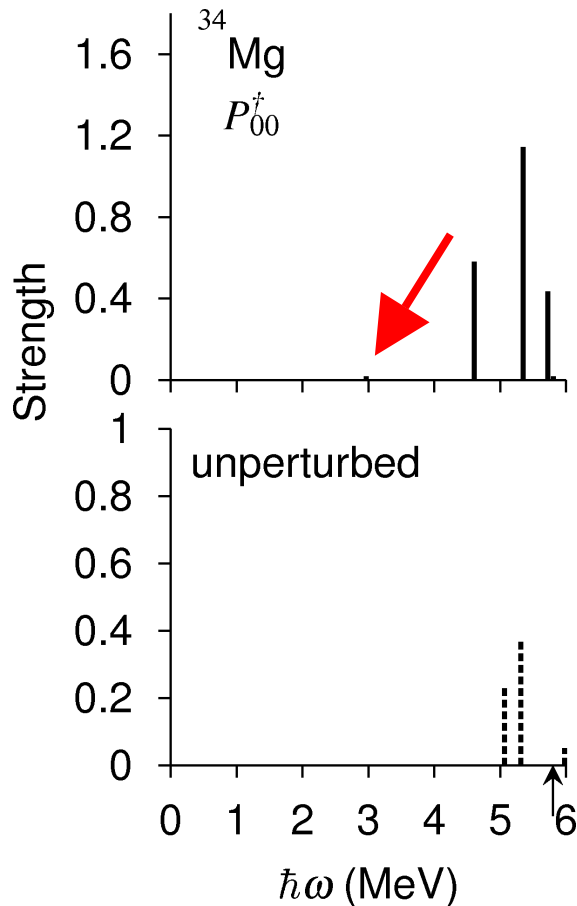
# 4重極ペア—遷移強度の異常な増大

Monopole pairing

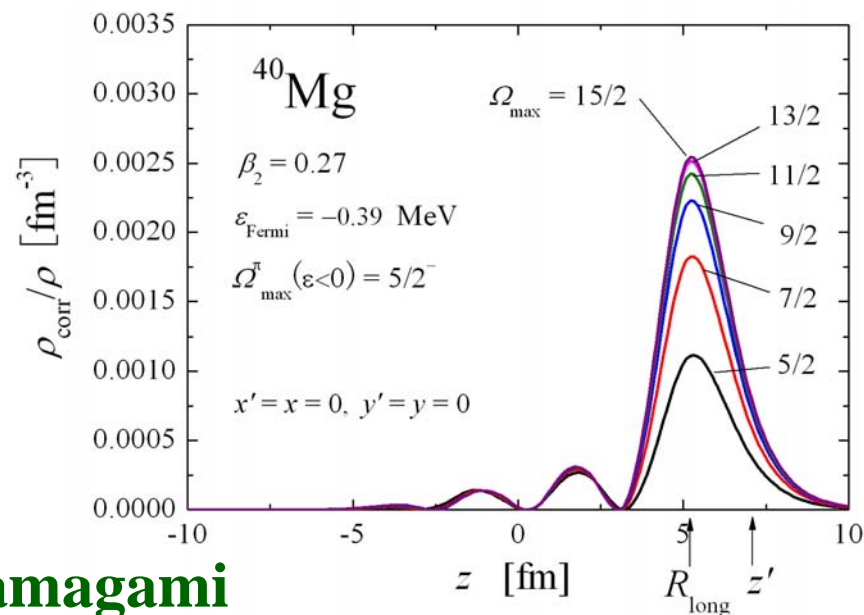
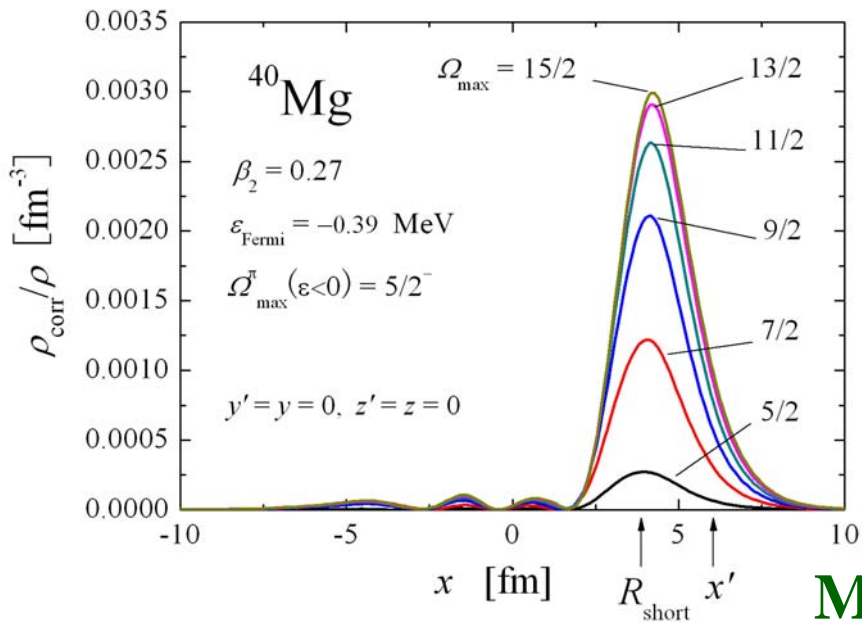
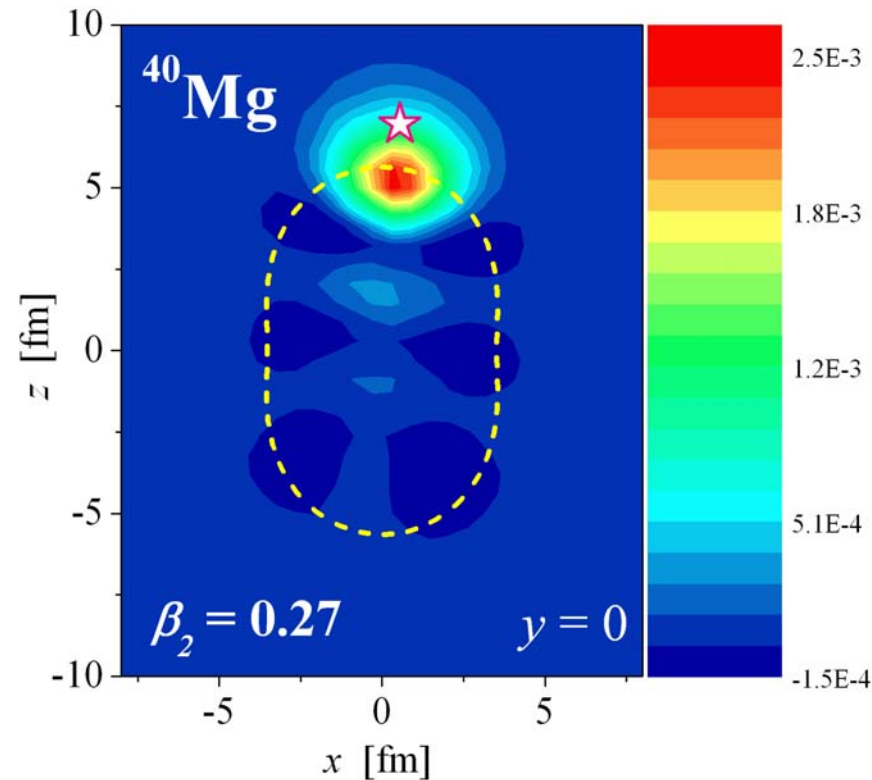
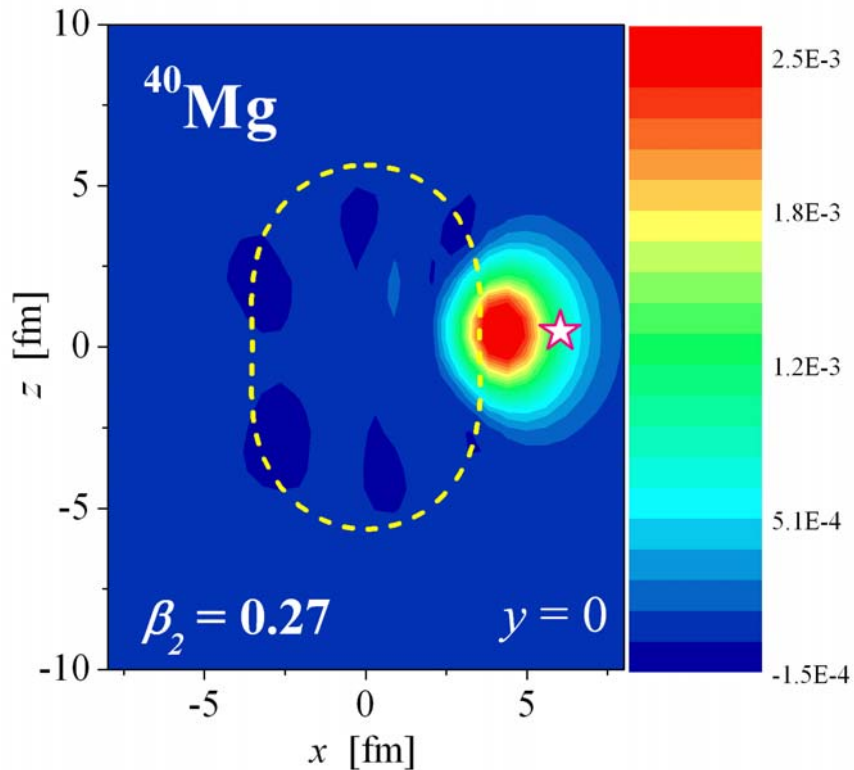
$$P_{00}^+ = \int d\mathbf{r} \psi^+(\mathbf{r}, \uparrow) \psi^+(\mathbf{r}, \downarrow)$$

Quadrupole pairing

$$P_{20}^+ = \int d\mathbf{r} r^2 Y_{20}(\hat{\mathbf{r}}) \psi^+(\mathbf{r}, \uparrow) \psi^+(\mathbf{r}, \downarrow)$$



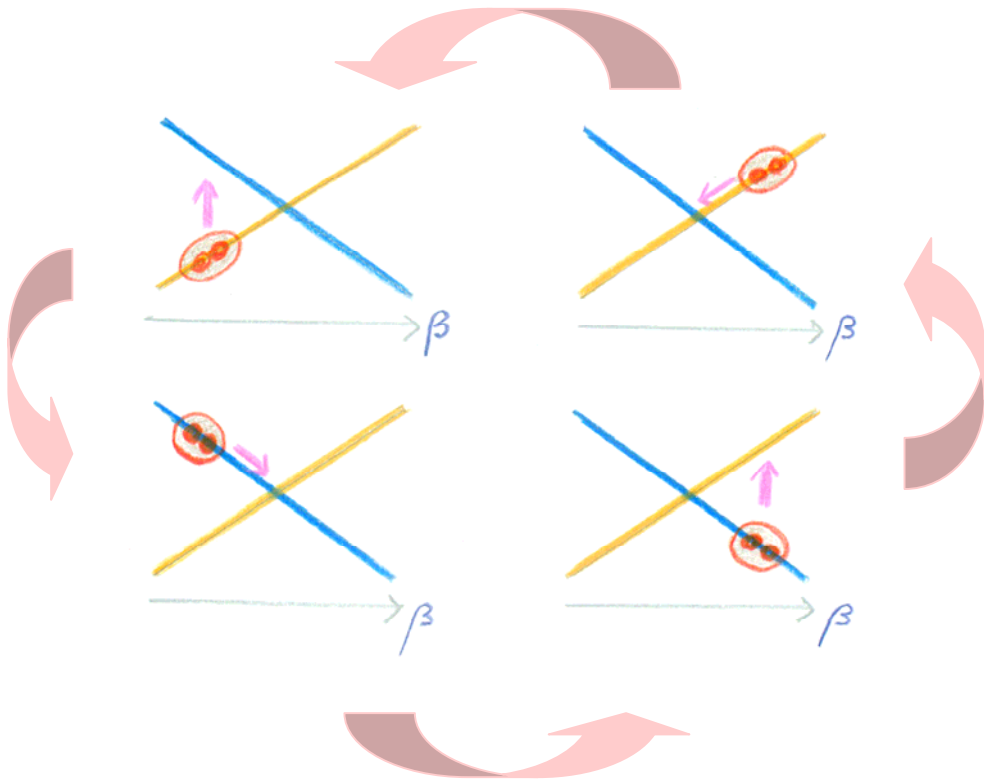




**M. Yamagami**

# ペア密度の4重極振動

ペア密度揺らぎと4重極変形揺らぎがカップルするメカニズム

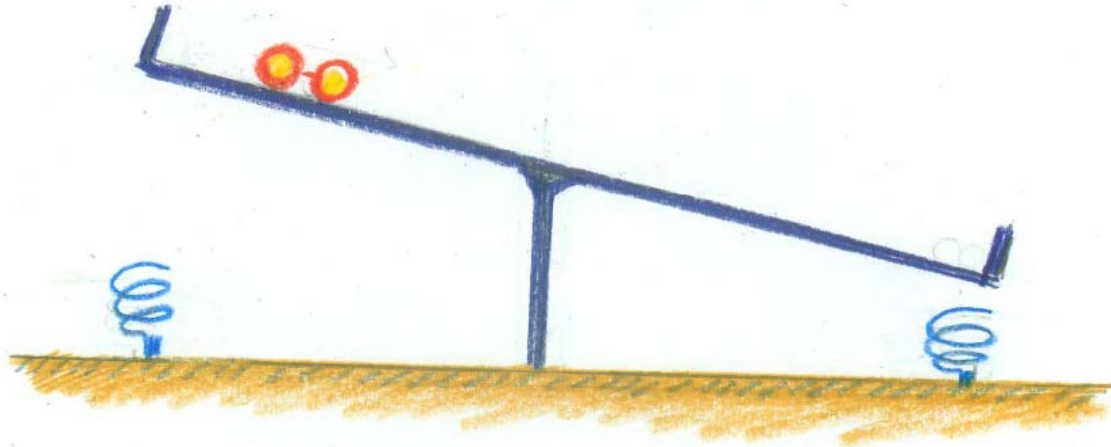


BCS描像



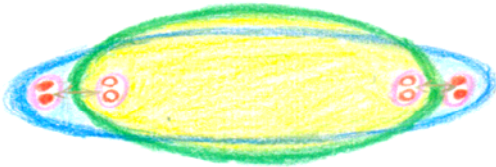
Di-neutron描像





# 変形したドリップ線近傍核でのソフトモード？

## K=0 ペアモード



## K=2 ペアモード



Progress of Theoretical Physics, Vol. 13, No. 5, May 1955

## Elementary Theory of Quantum-Mechanical Collective Motion of Particles, I

Sin-itiro TOMONAGA

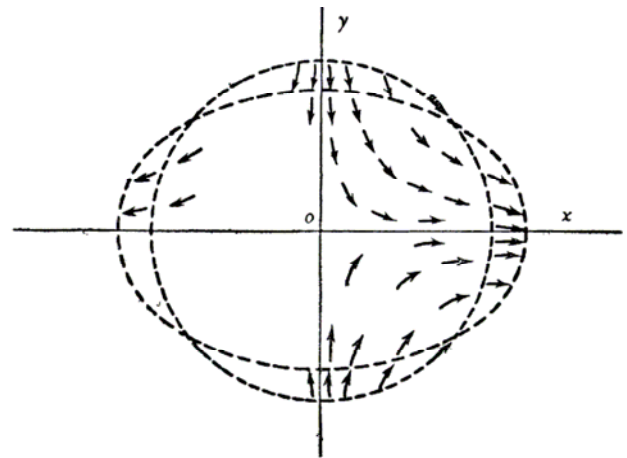


Fig. 1

The displacement field corresponding to this potential is represented in Fig. 1 : the displacement of the  $n$ -th particle is given by

$$\begin{cases} \delta x_n = \varepsilon x_n, \\ \delta y_n = -\varepsilon y_n, \end{cases} \quad (2.3)$$

so that each particle is displaced along a hyperbola whose asymptotes are  $x$  and  $y$  axes, the circular boundary of the system being deformed into an elliptical one.

流れの実体とコヒーレンスを生み出すメカニズムが本質的に異なる!!

# 要点のまとめ

## 陽子過剰 $N=Z$ 近傍

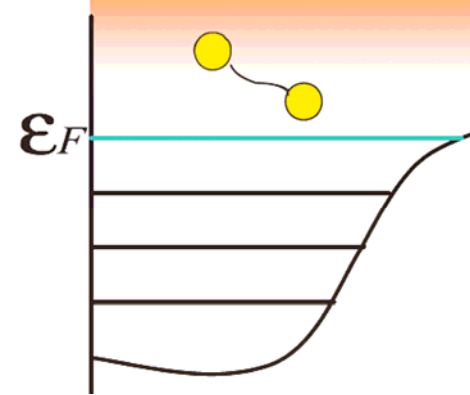
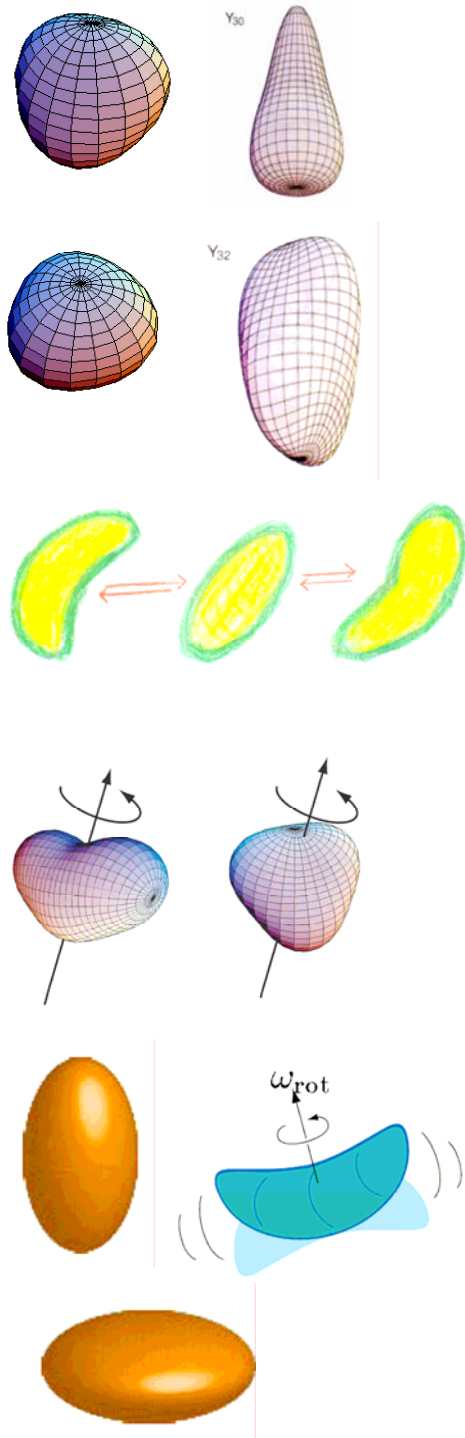
さまざまな**変形シェル構造**  
→ **多様なソフト振動モードと回転モード**  
Superdeformation (SD),  
Hyperdeformation(HD), Triaxial SD,  
Pear(Y30), Banana(Y31),  
Tetrahedral(Y32), Triangular(Y33),  
High-K isomer, Wobbling, Precession, ...

## 中性子ドリップ線近傍

連続状態への励起,  
**豊かな空間的構造をもった対相関**  
→ **Di-neutron mode (Matsuo et al.);**  
対場の揺らぎに伴う新しい集団励起モード,  
新しい性格の $K=0, K=2$  励起モード, ...

## 新しい理論の構築

Symmetry-unrestricted  
Continuum HFB+QRPA,  
回転系QRPA,  
SCC and ASCC methods



*Di-neutron mode*

