

# 「現代の核構造論」ミニマム

## Chapter 1 現代的な核構造論への招待

- 1a 間違いだらけの原子核像
- 1b 核構造論の歴史

## Chapter 2 平均場近似とは何か

- 2a 真空とその励起モード
- 2b 対称性の自発的破れとその回復

## Chapter 3 高速回転する原子核

- 3a 超低温核物理学  
高スピントンティアー
- 3b 回転座標系での準粒子シェルモデル
- 3c 減衰する回転運動

## Chapter 4 超変形状態の発見

- 4a 変形シェル構造とは何か
- 4b 生成、構造、崩壊
- 4c Wobbling と Precession

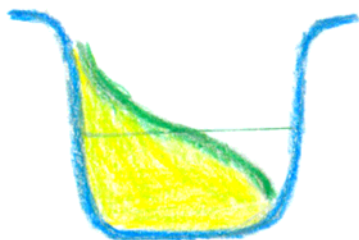
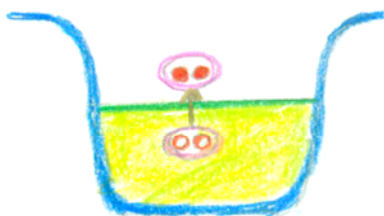
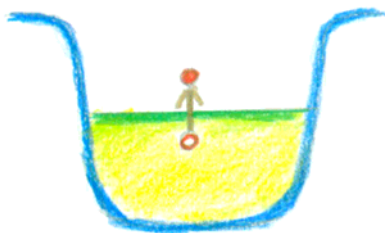
## Chapter 5 大振幅集団運動論

- 5a オブレート・プロレート変形共存現象
- 5b パリティ二重項とカイラル二重項

## Chapter 6 不安定核の集団励起モード

- 6a 新しい理論的課題
- 6b 期待される新しい集団現象

## 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



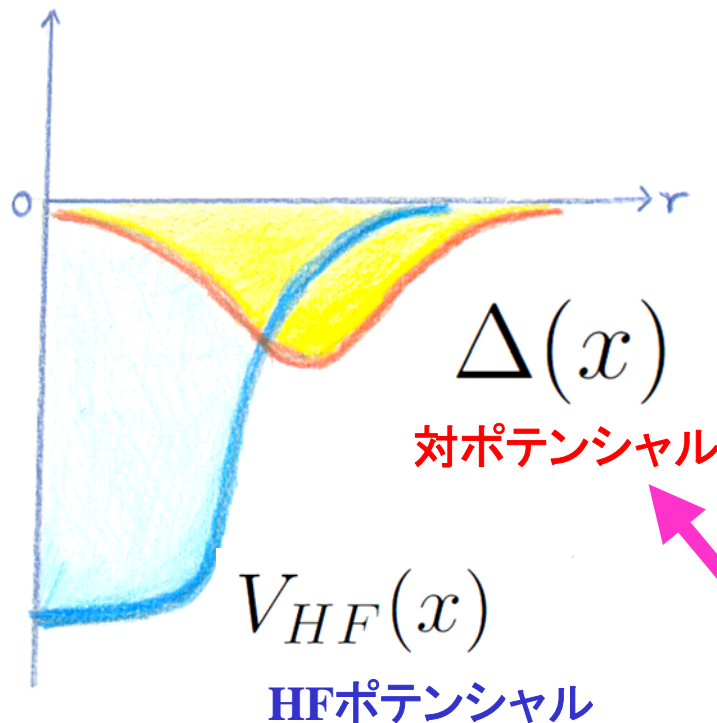
ドリップ線近傍ではBCS理論は破綻する



# 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

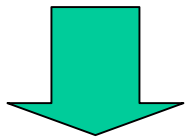
## 新しい研究テーマ



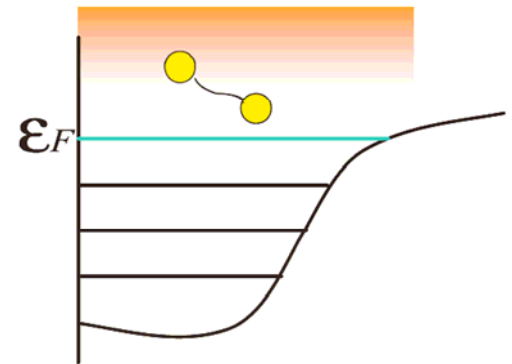
弱束縛状態、共鳴状態、(非共鳴)連続状態が生成する対相関とは



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



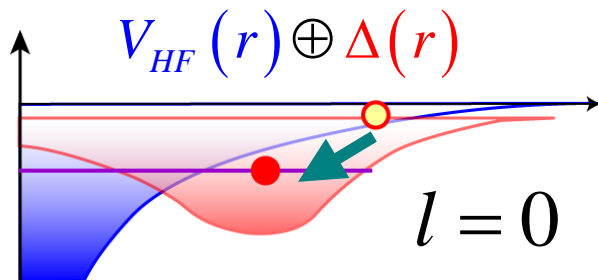
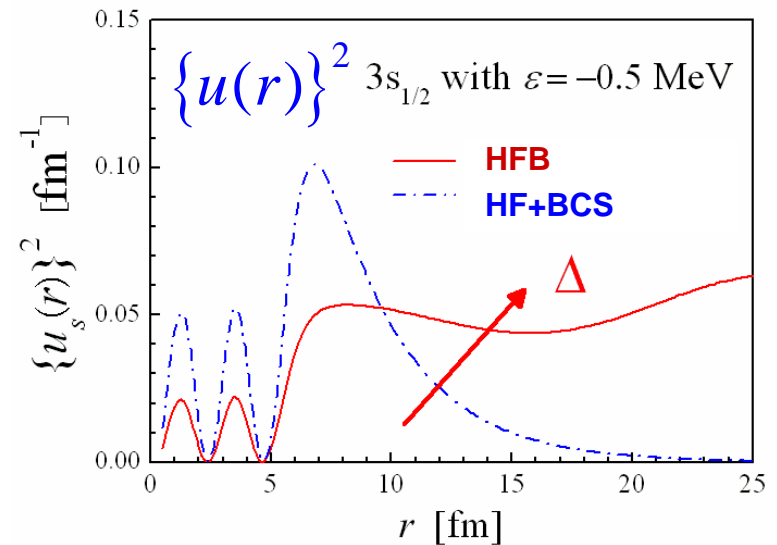
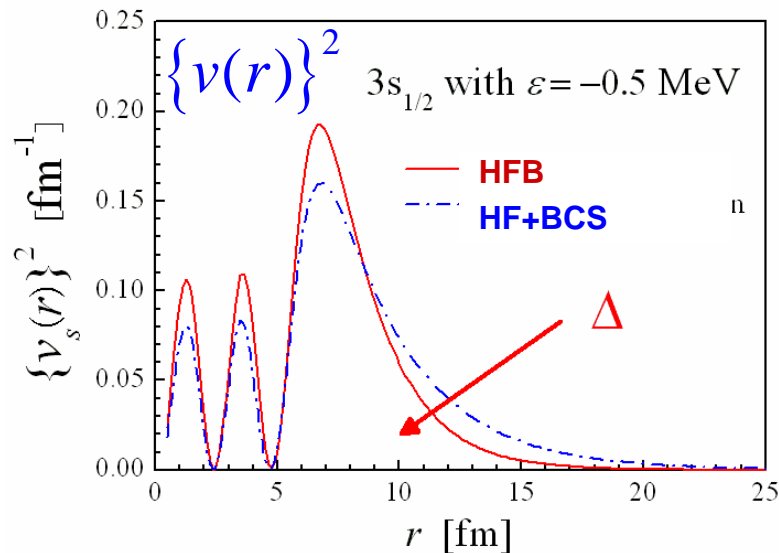
# 弱束縛系での準粒子波動関数

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

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

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

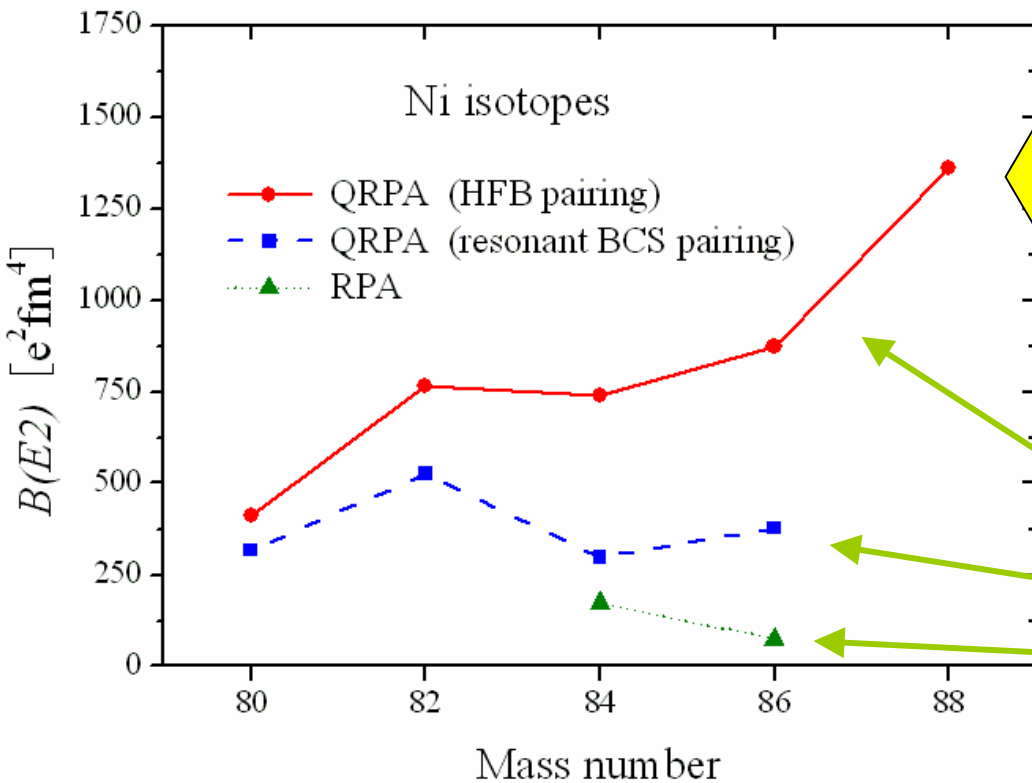
e.g.,  $3s_{1/2}$  state at  $\varepsilon^{HF} = -0.5$  MeV



**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



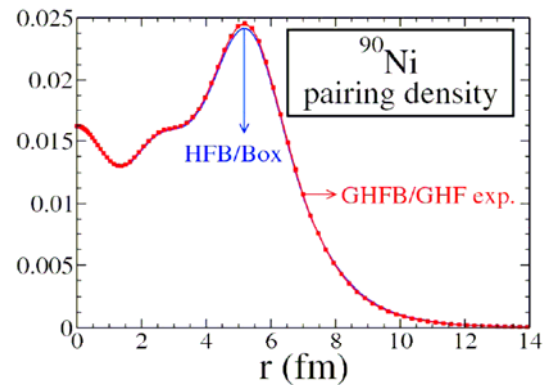
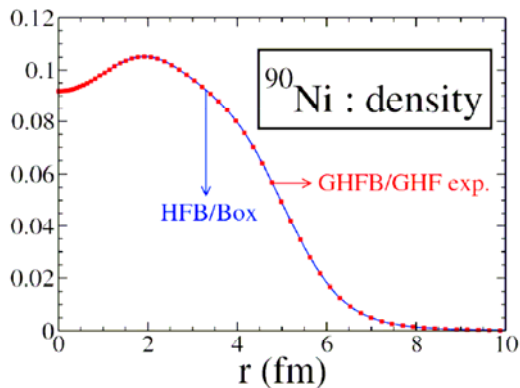
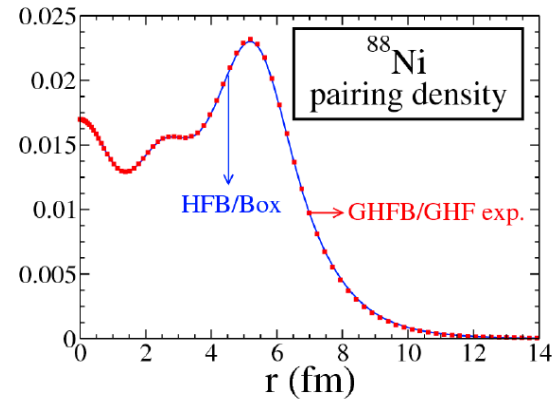
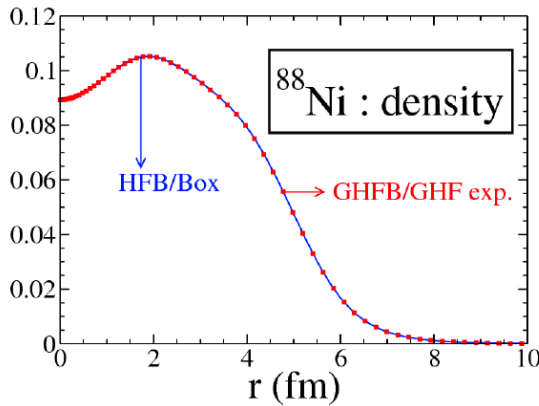
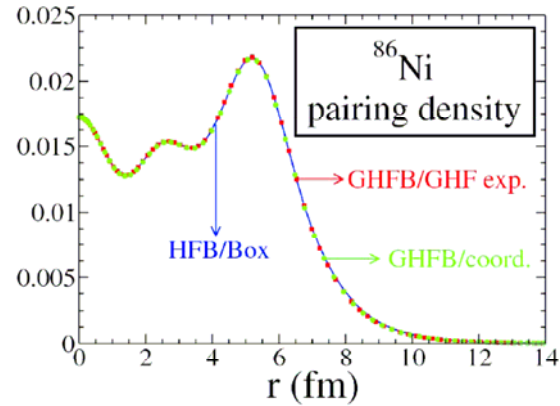
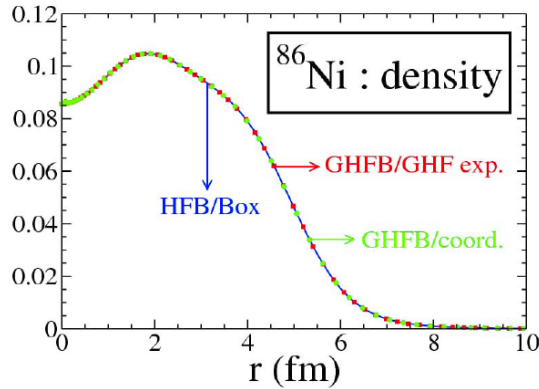
ドリップ線に近づくと  
B(E2)が著しく増大する!!

- HFB + QRPA
- HF-resonant BCS + QRPA
- HF + RPA

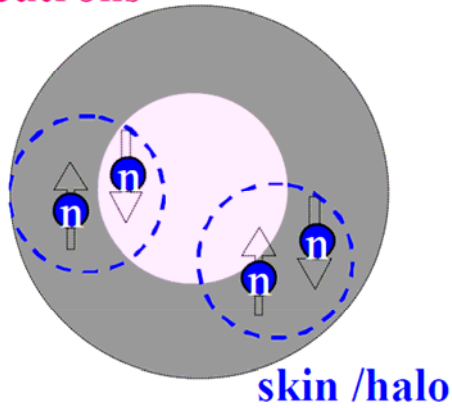
M. Yamagami, Phys. Rev. C72, 064308 (2005)

# Gamow-HFB と Box-HFB 計算結果の比較

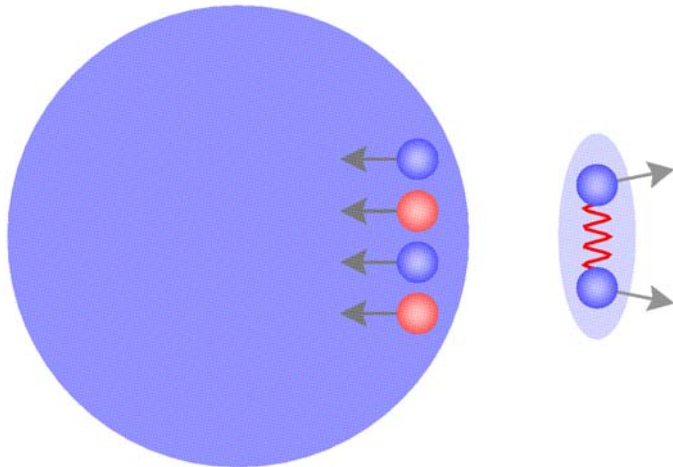
Calculated by Nicolas Michel



## Di-neutrons



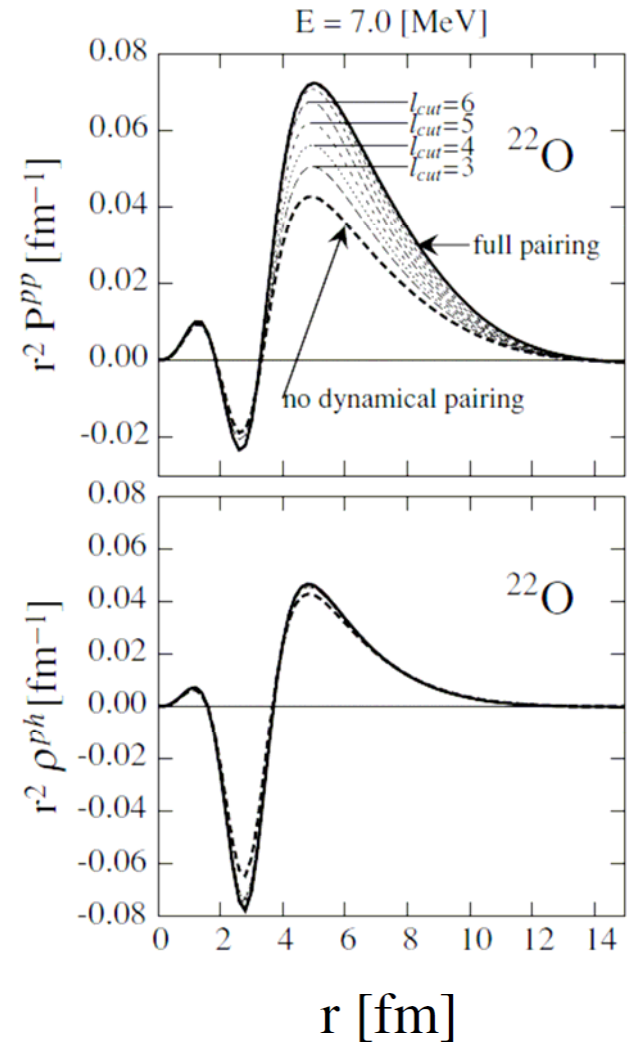
## Di-neutron mode



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

## 核子ペア—遷移密度

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

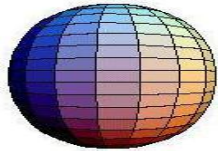




# 変形した弱束縛系

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

$N=28$



N RIBF

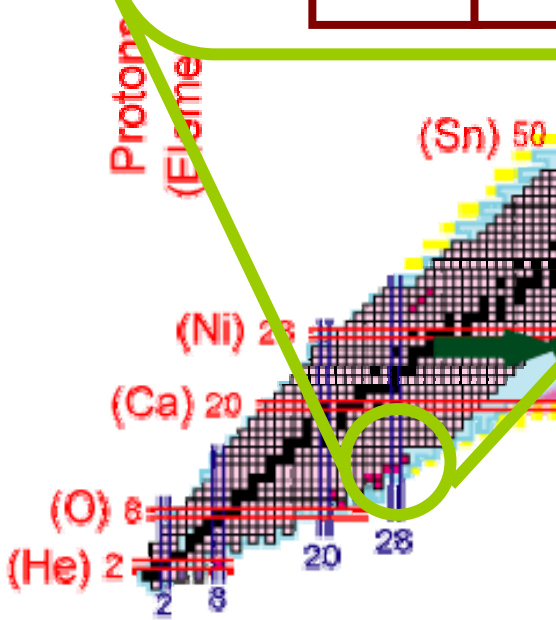
$Z=12$

$^{36}\text{Mg}$

$^{38}\text{Mg}$

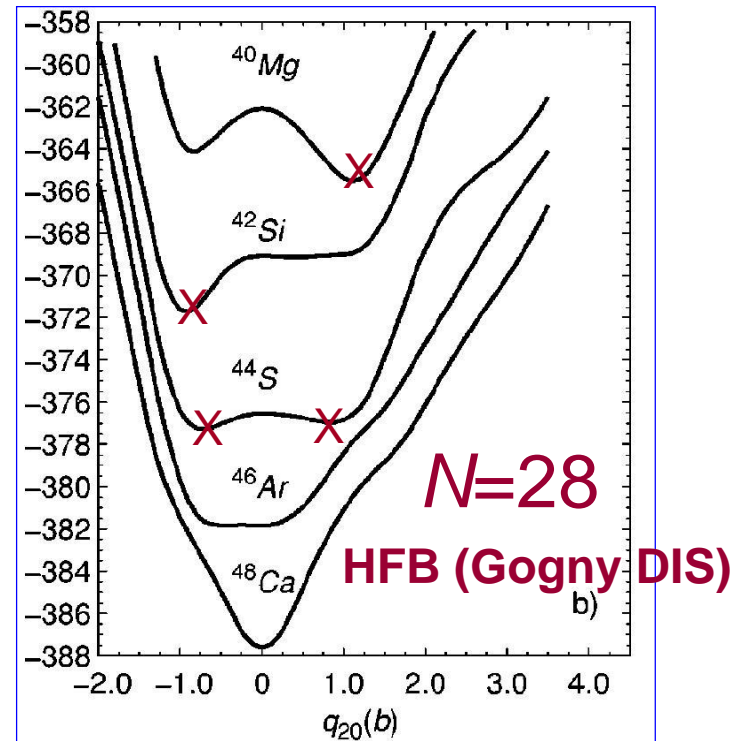
$^{40}\text{Mg}$

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

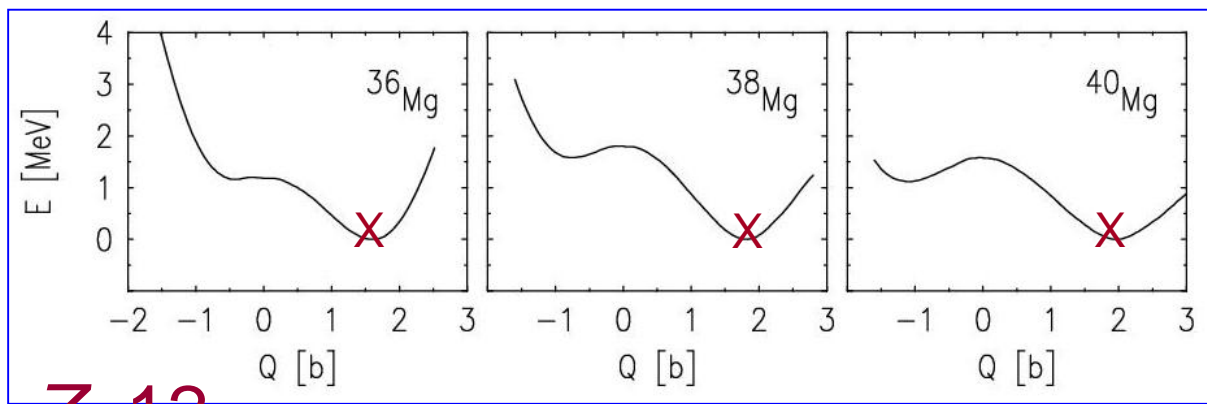


$Z=12$

HFB (Skyrme SIII)

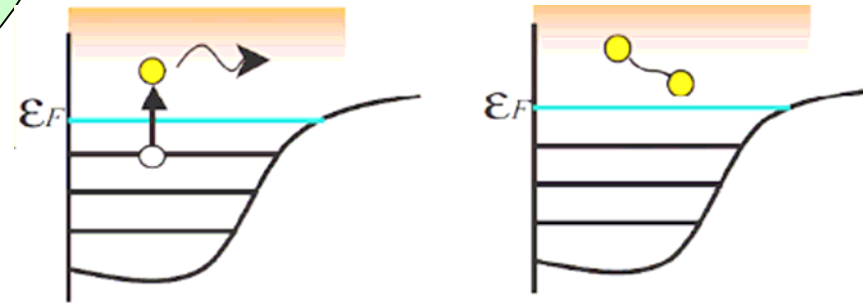
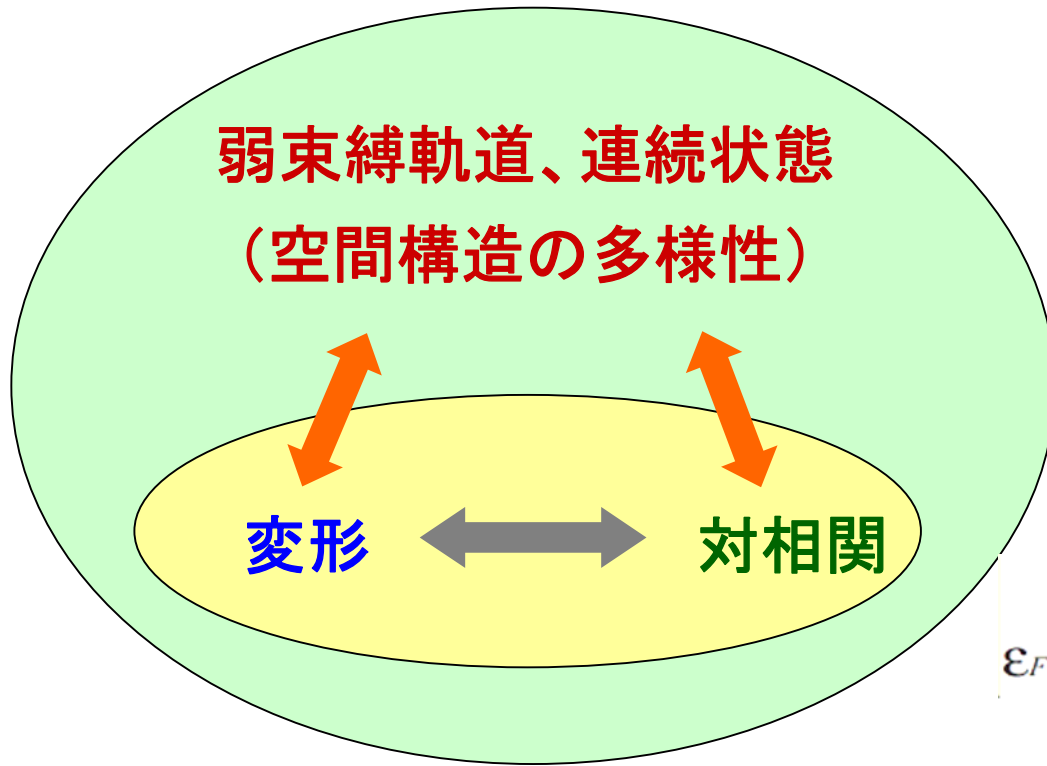


R.Rodriguez-Guzman, J.L.Egido, L.M.Robledo  
Phys. Rev. C65, 024304 (2002)



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

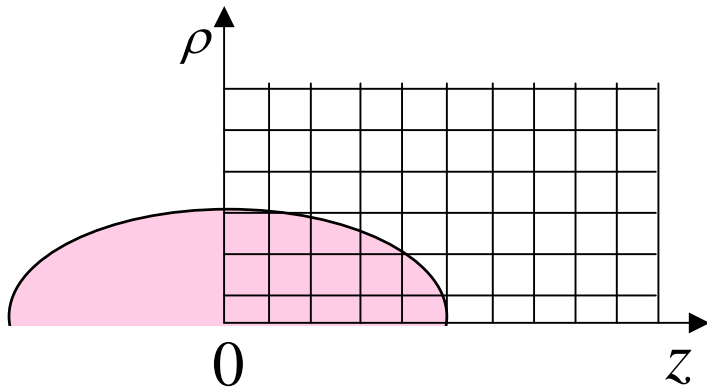
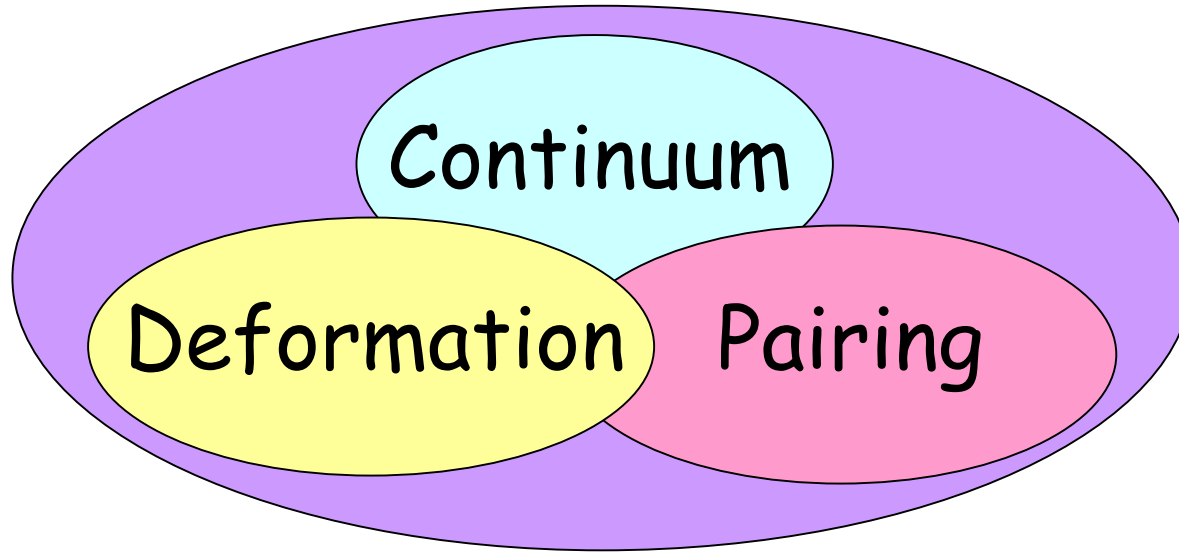
# 変形した弱束縛系における集団モード



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**

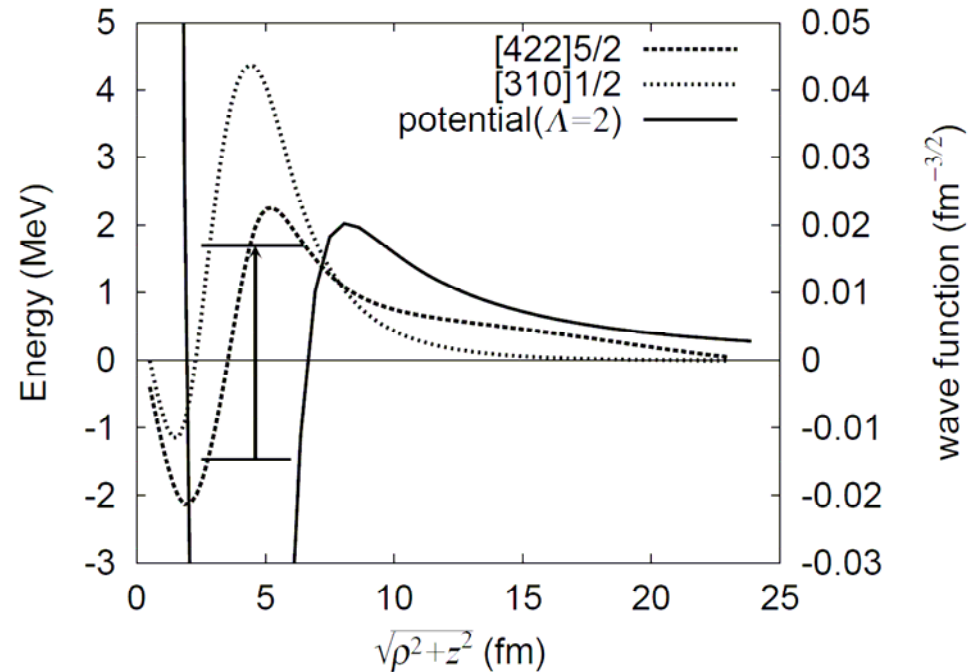
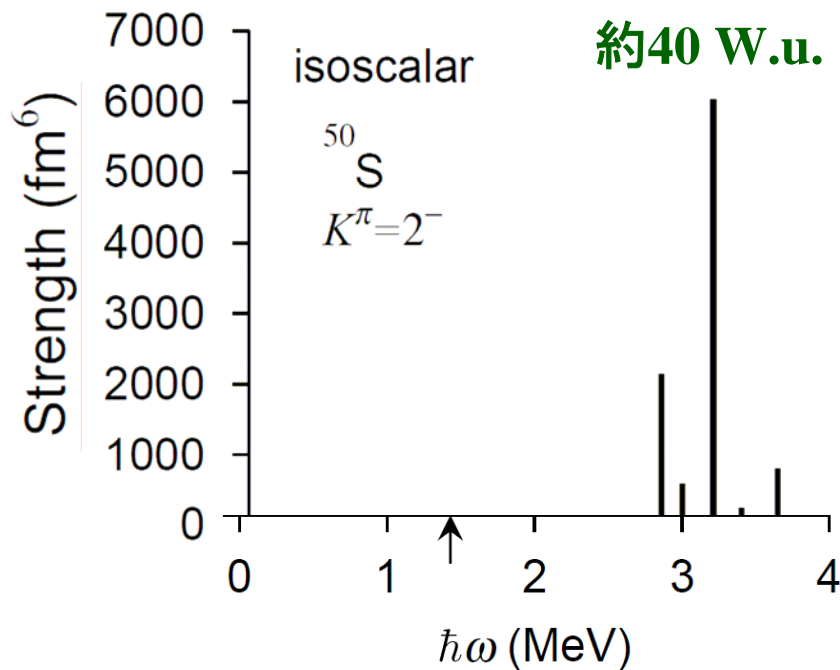
**T. Nakatsukasa, K. Yabana,**

**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



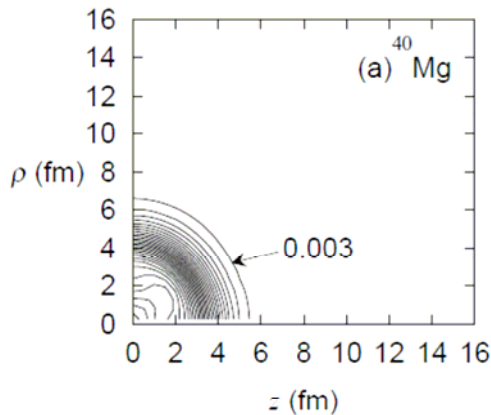
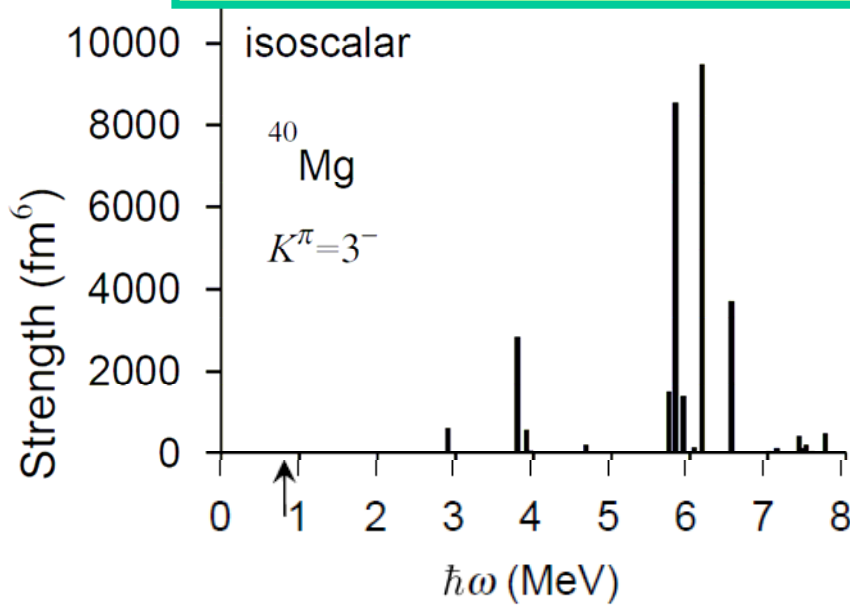
弱束縛状態から共鳴状態への励起

RPA計算: K. Yoshida et al.

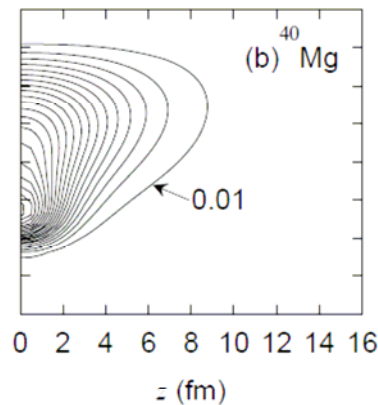
# 40Mg オブレート変形状態の上のOctupole励起

RPA計算: K. Yoshida et al.

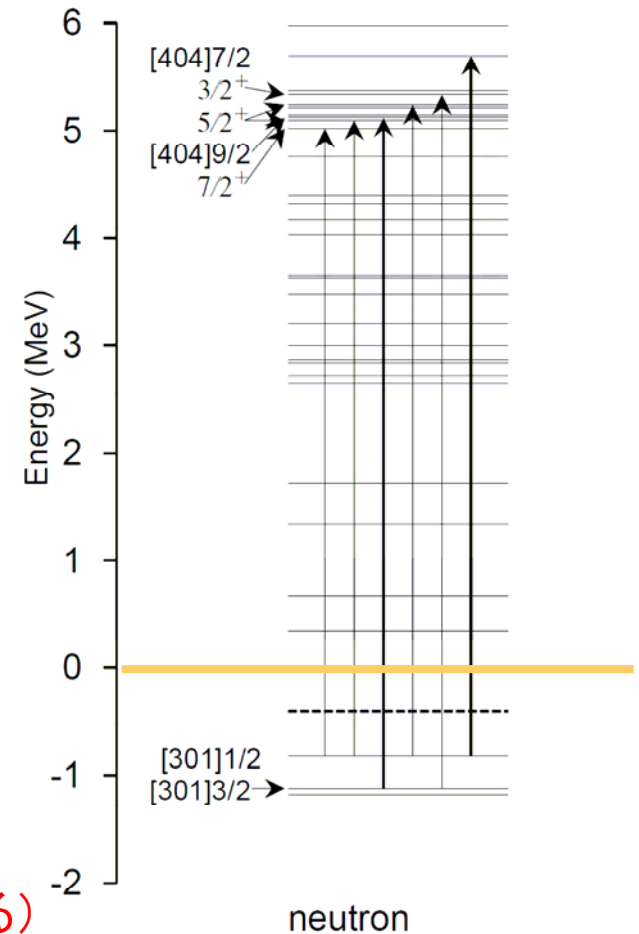
弱束縛状態から共鳴状態への励起



中性子密度分布



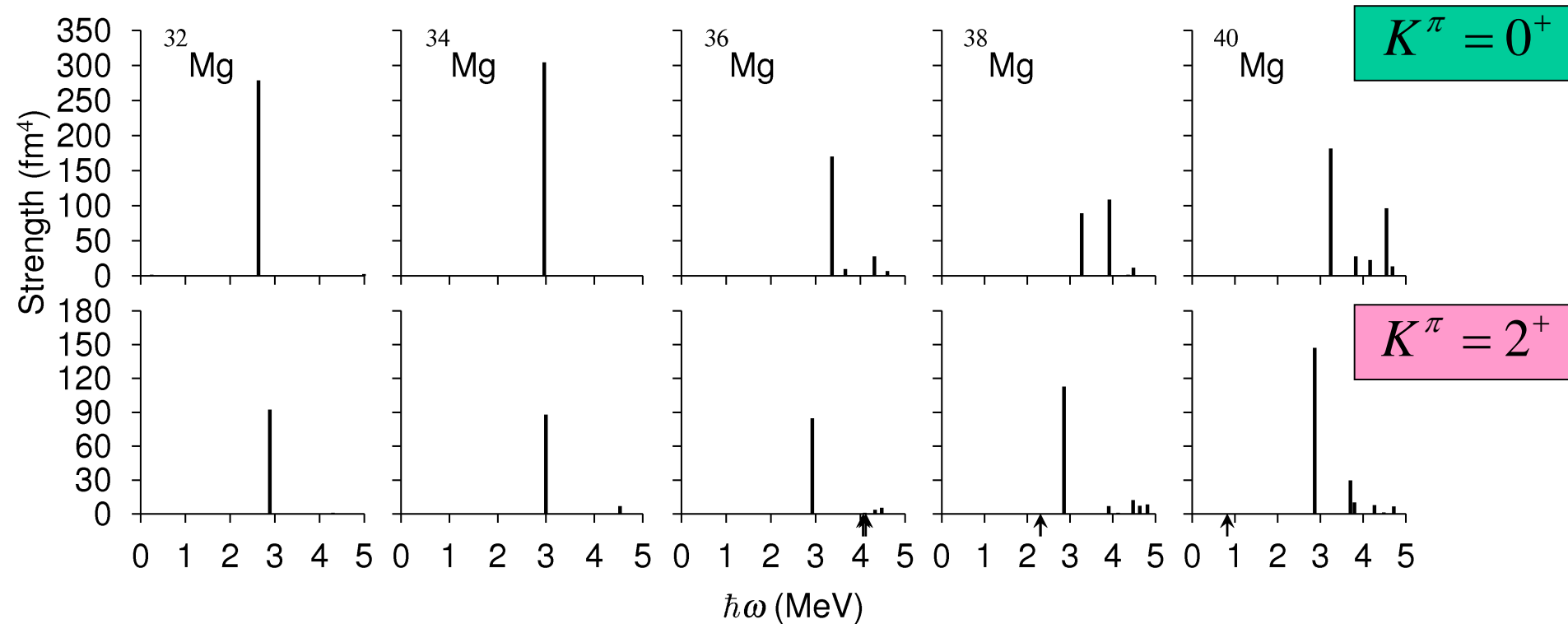
遷移密度分布  
(空間的に大きく広がっている)



# 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>)

$$\beta_2 \approx 0.3$$



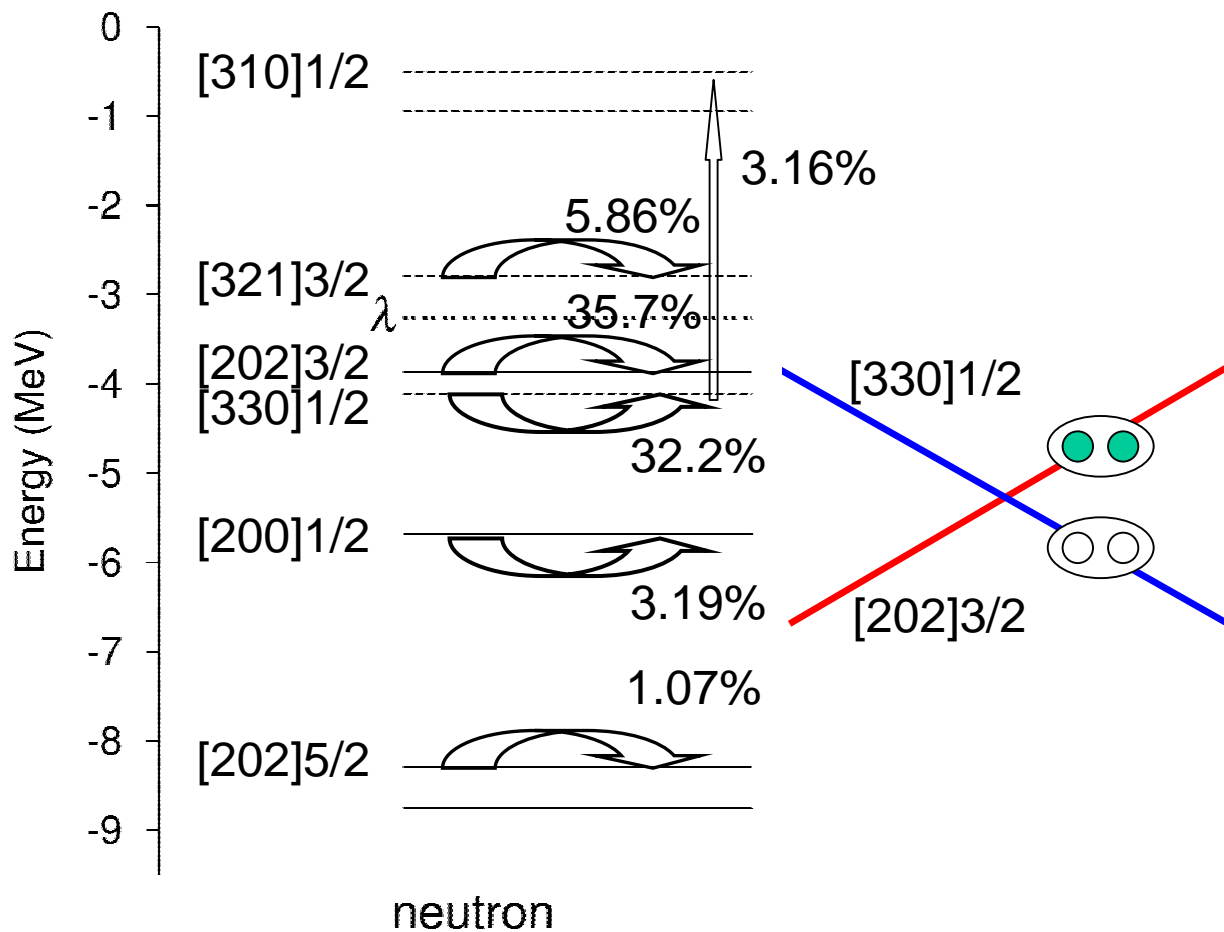
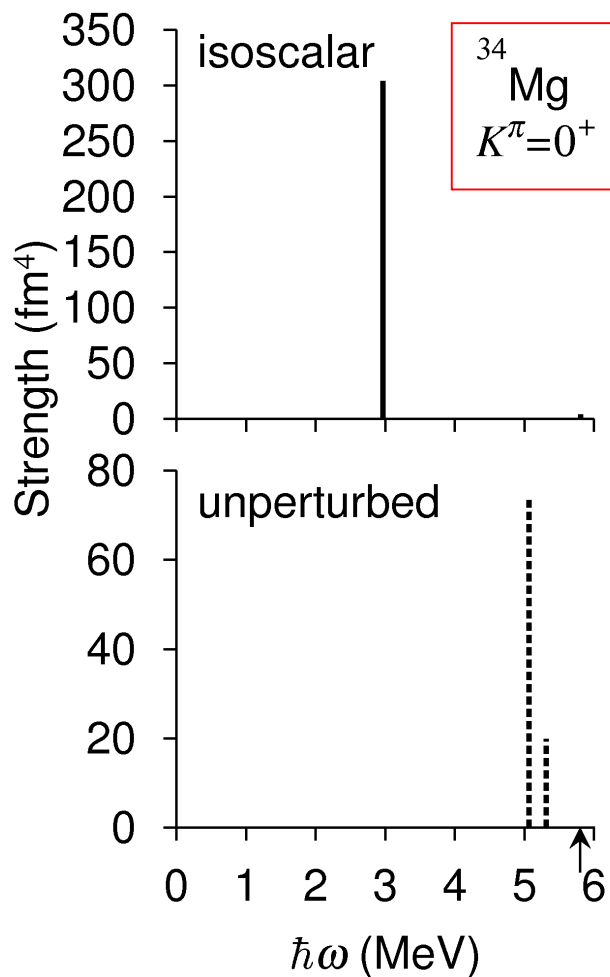
励起エネルギー

準粒子RPA計算: K. Yoshida et al.

# $K=0^+$ 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

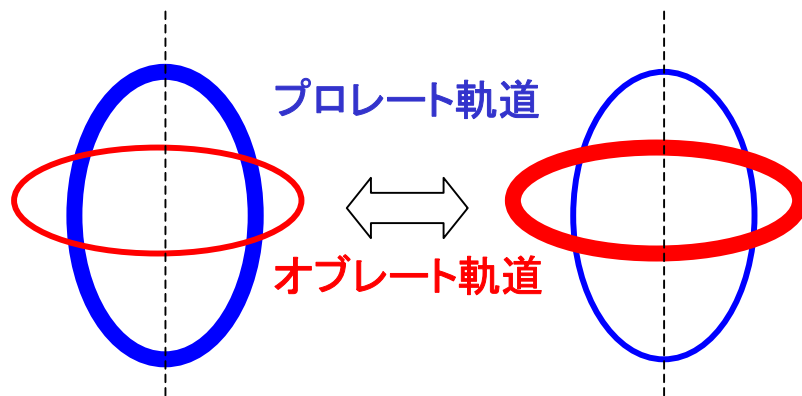
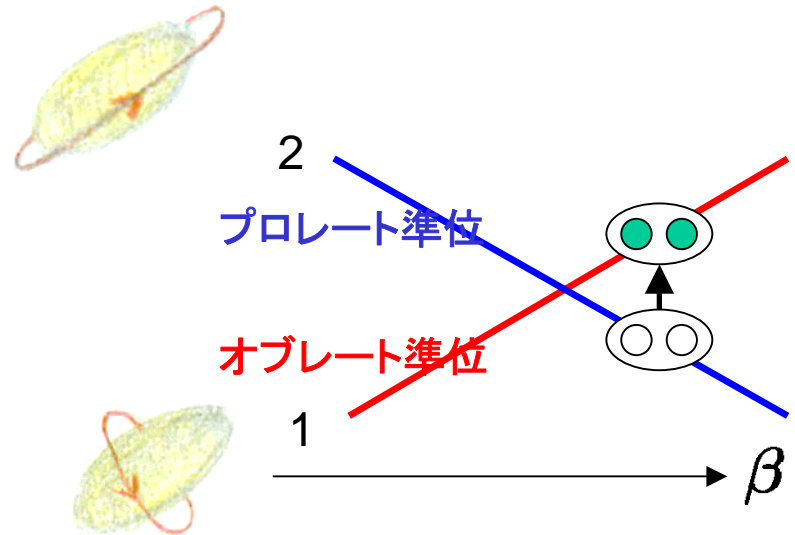
$$|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} (a |v_1 \bar{v}_1\rangle + b |v_2 \bar{v}_2\rangle)$$

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

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

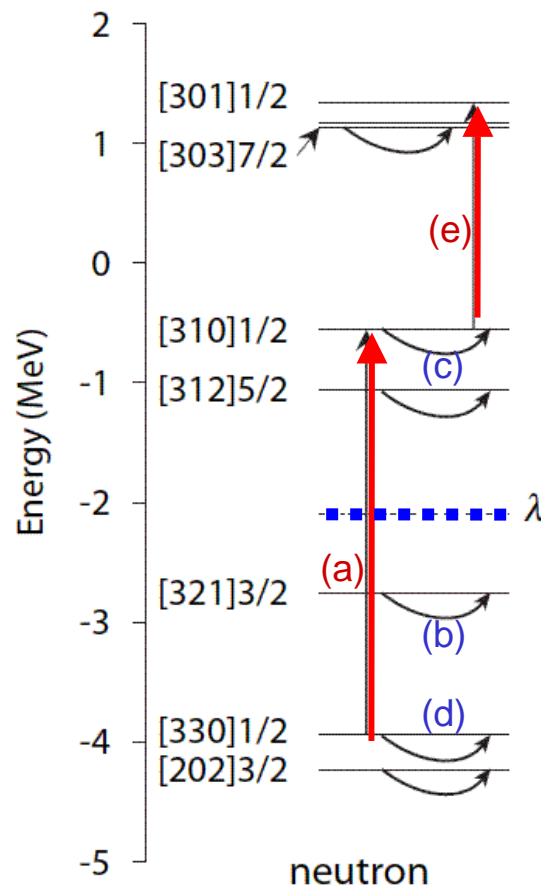
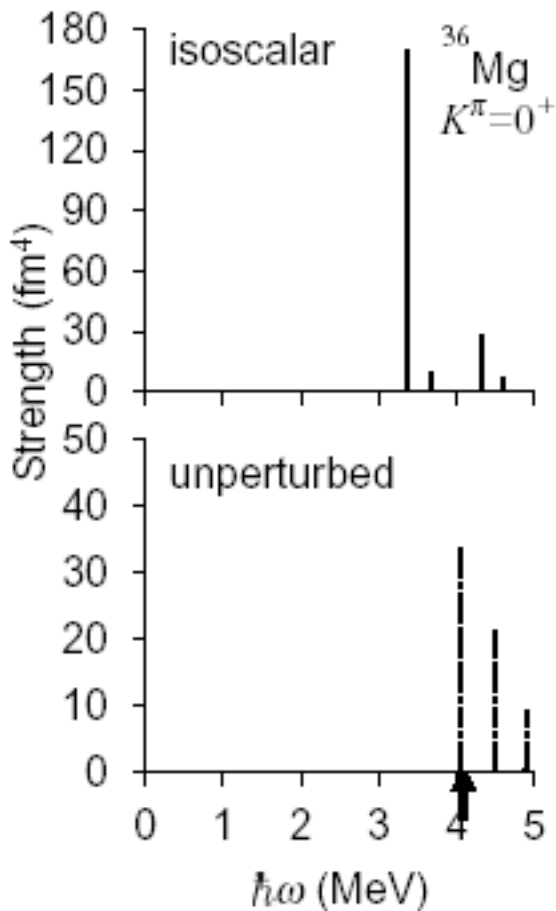


逆符号のときコヒーレントとなる

(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

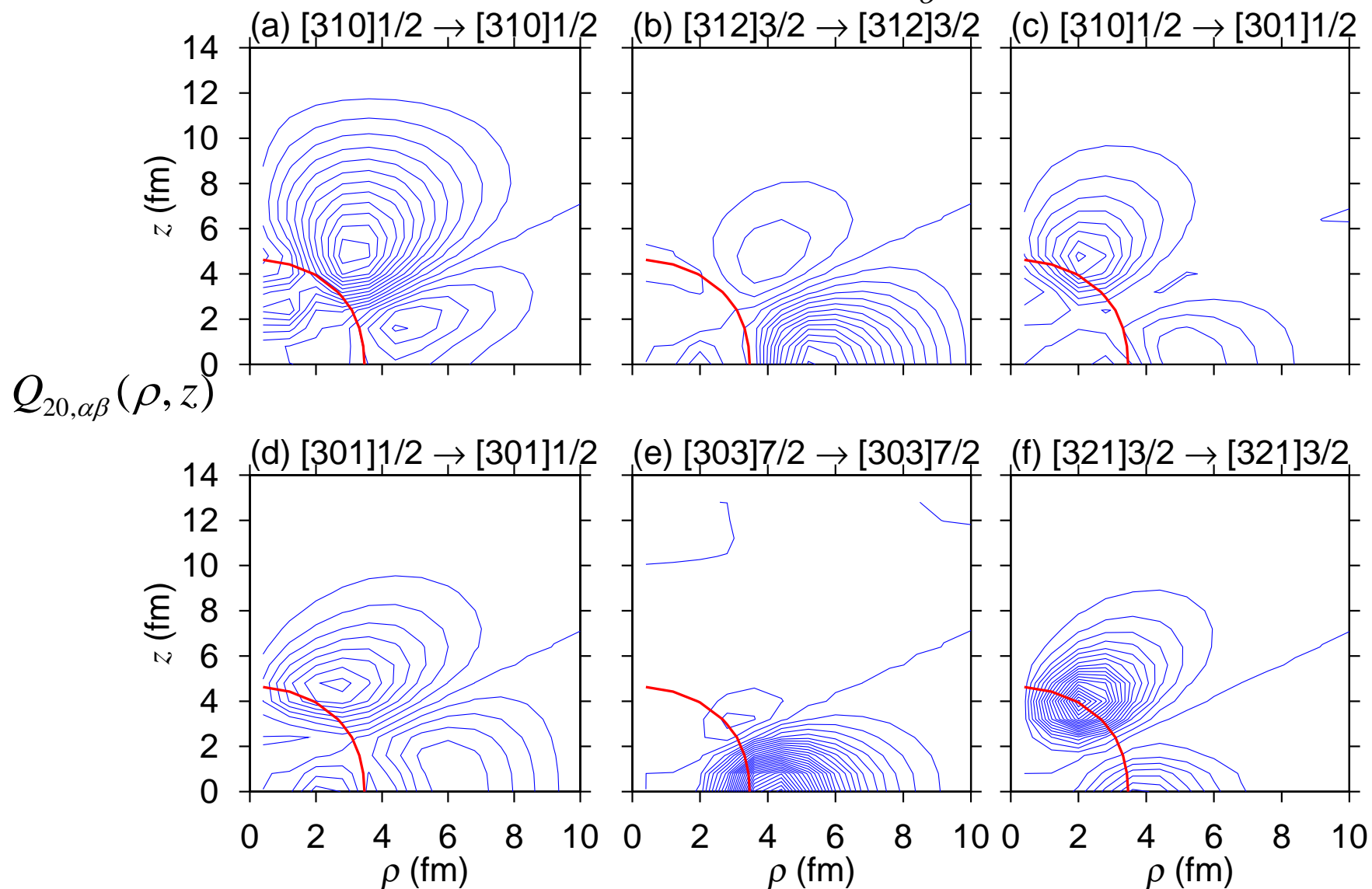
(e)  $[301]1/2, [310]1/2$  -0.51

...  
 $[N, n_3, \Lambda]\Omega$

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 ( $^{40}\text{Mg}$ )

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



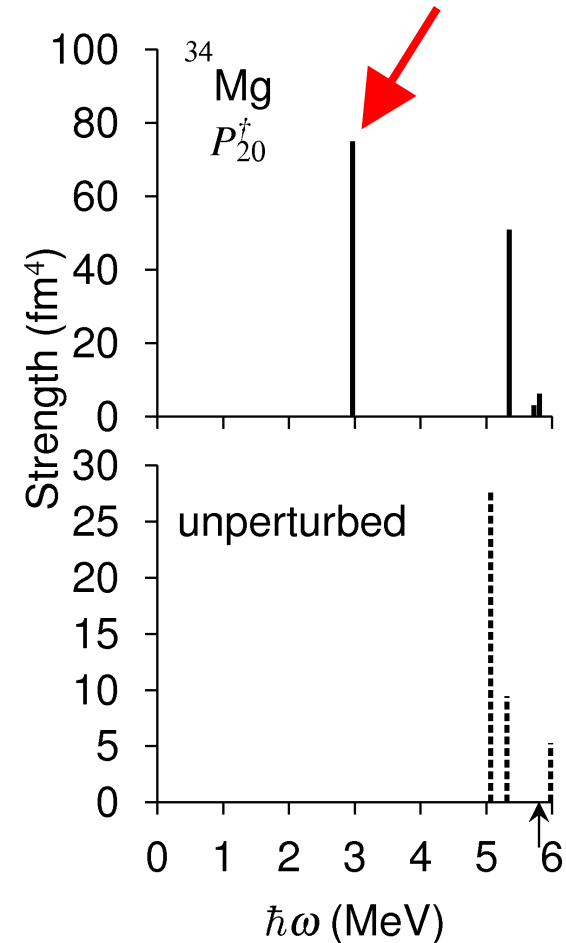
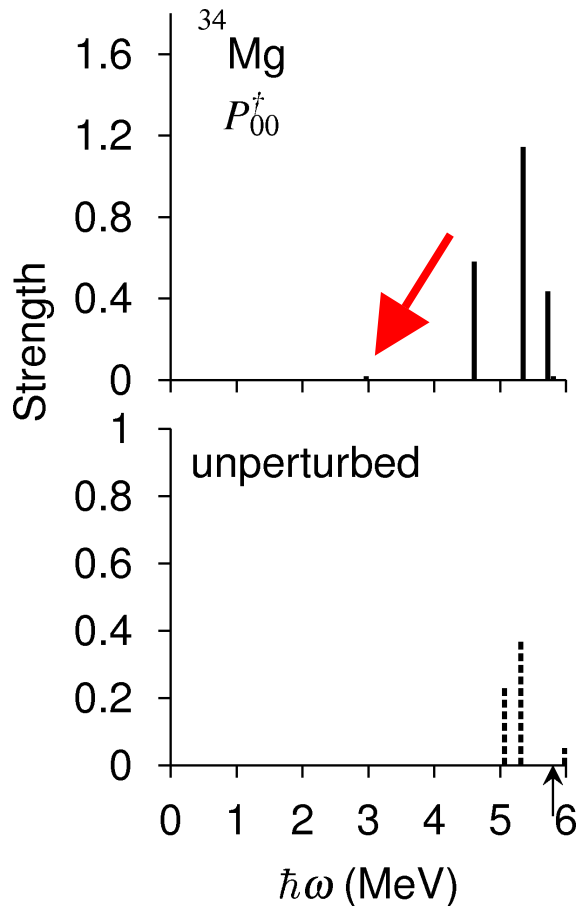
# 4重極ペア—遷移強度の異常な増大

Monopole pairing

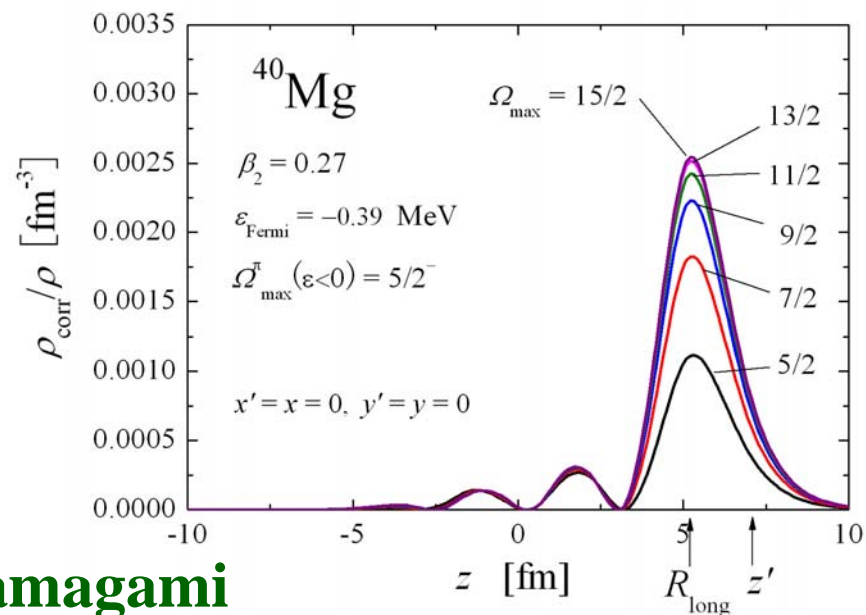
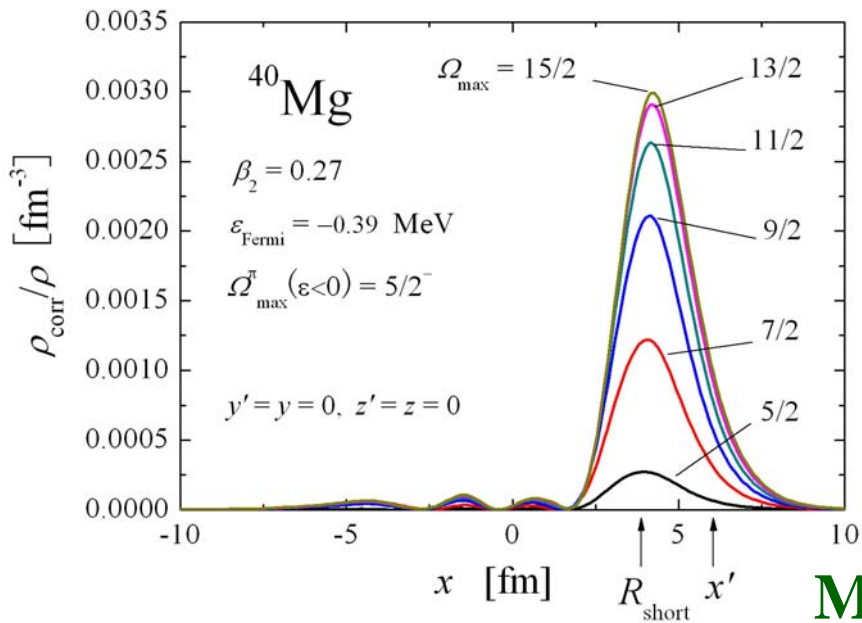
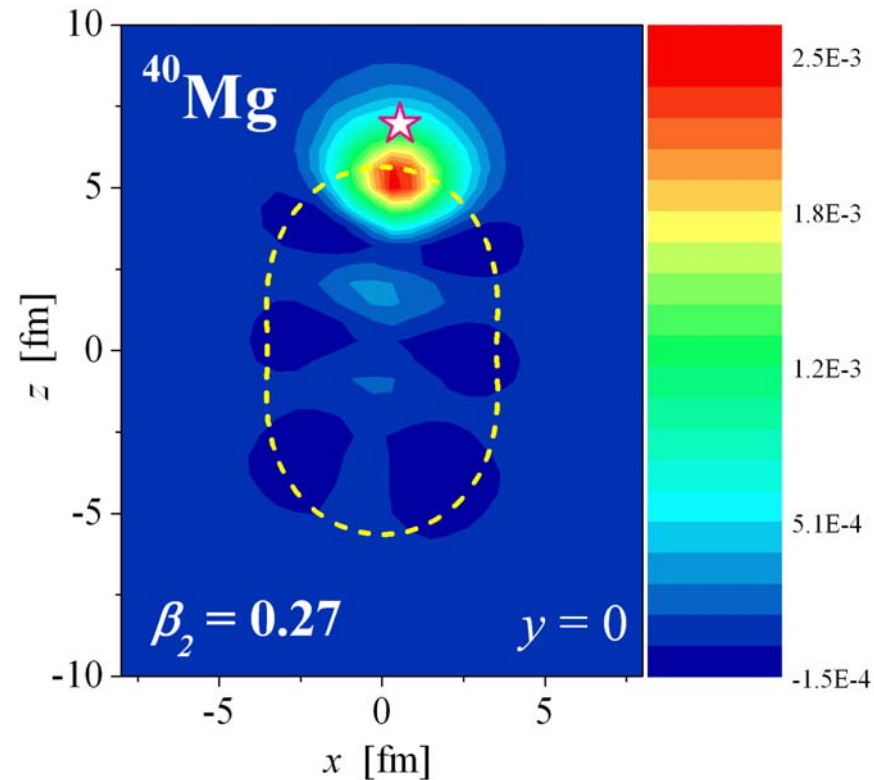
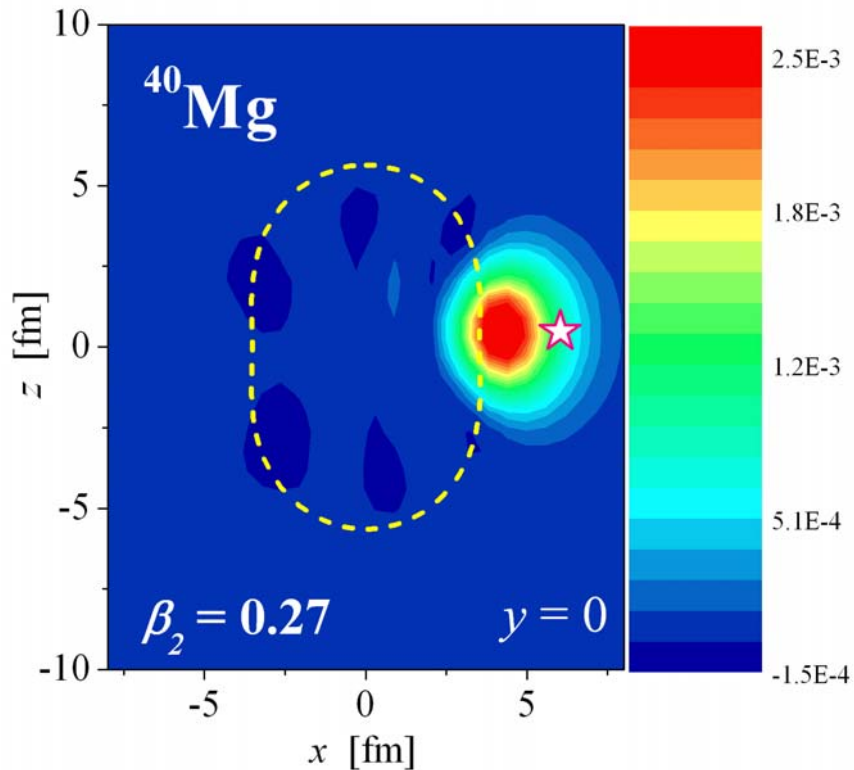
$$P_{00}^+ = \int d\mathbf{r} \psi^+(\mathbf{r}, \uparrow) \psi^+(\mathbf{r}, \downarrow)$$

Quadrupole pairing

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



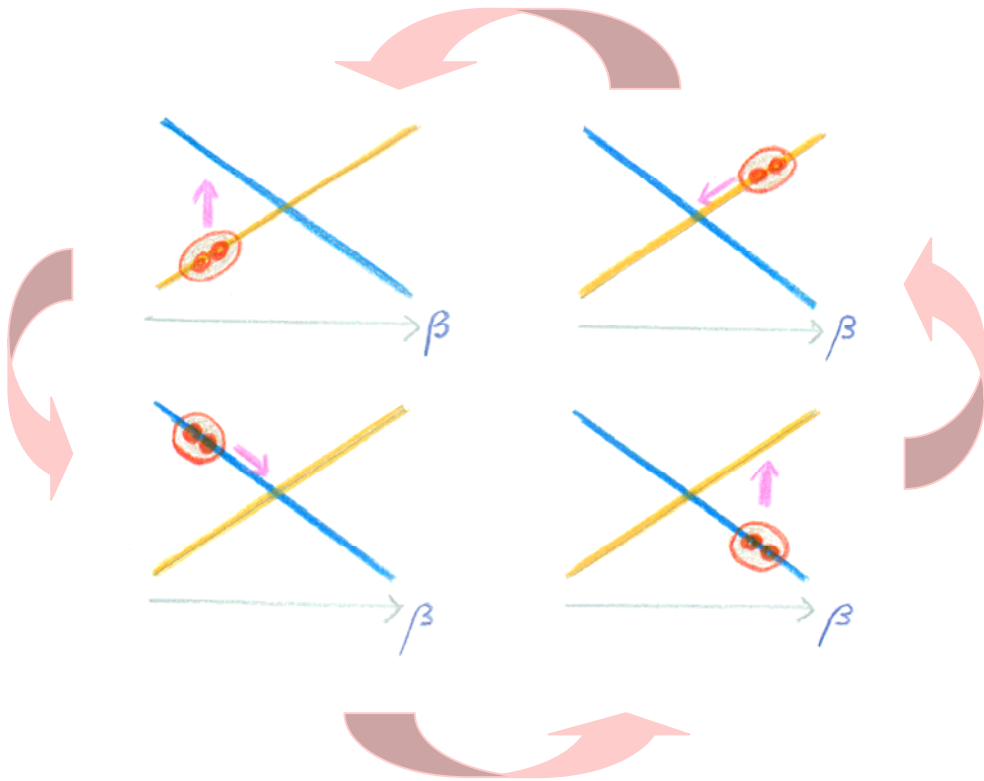
準粒子RPA計算: K. Yoshida et al.



**M. Yamagami**

# ペアー密度の4重極振動

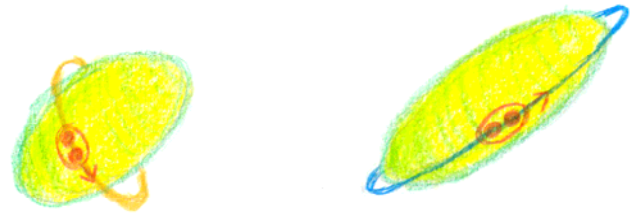
ペアー密度揺らぎと4重極変形揺らぎがカップルするメカニズム

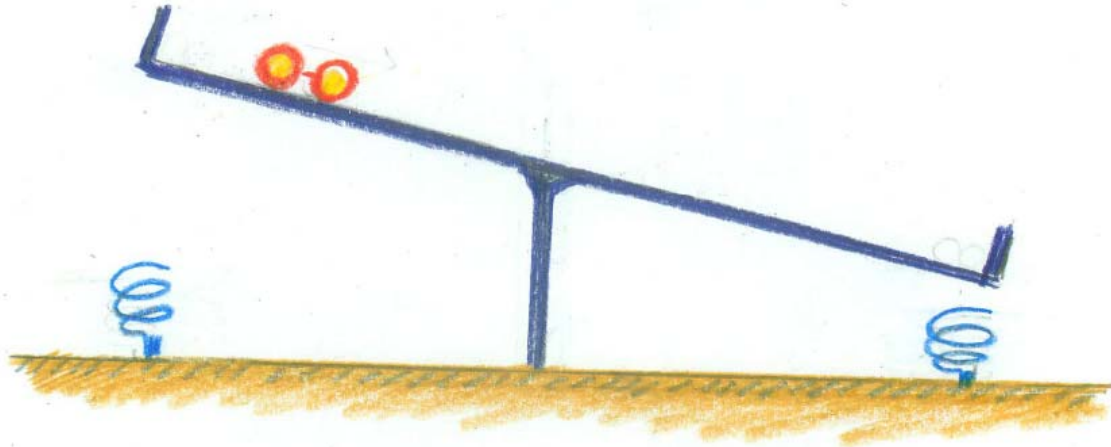


BCS描像

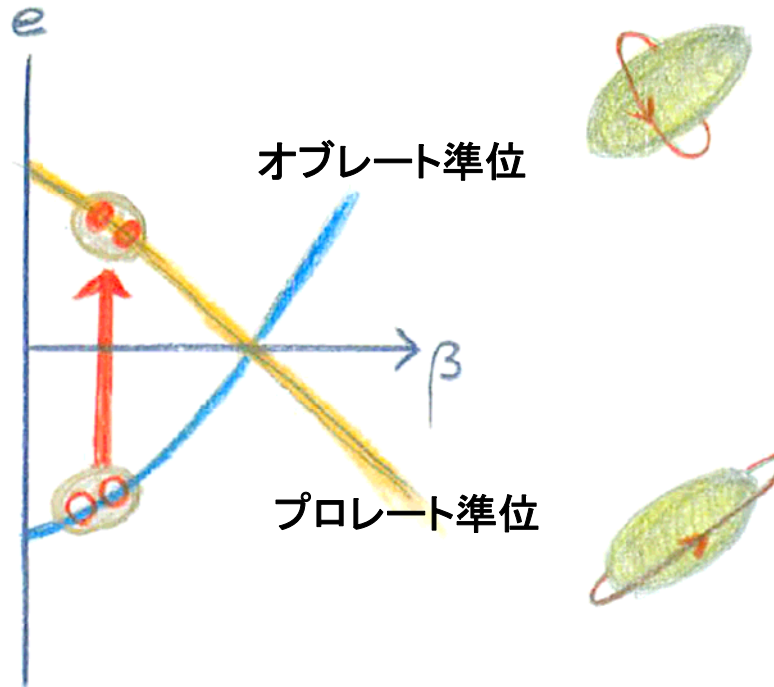


Di-neutron描像





# 閉殻が2p2h励起すると ..... 変形する



常識に反するようだが....

ひとたび、閉殻が励起すると  
対相関と四重極相関は  
コヒーレントに作用する

$$|K^\pi = 0_{\text{ground}}^+\rangle = \alpha|i\bar{i}\rangle + \beta|j\bar{j}\rangle,$$

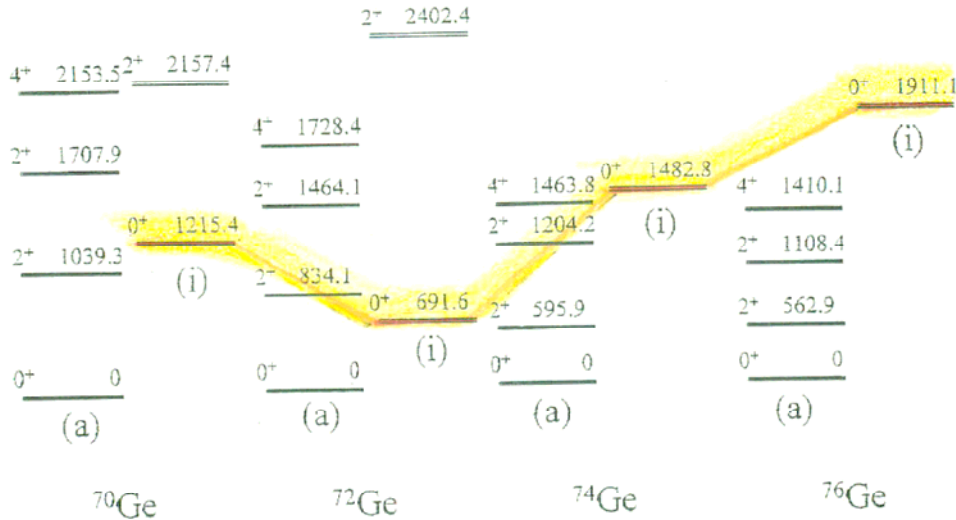
$$|K^\pi = 0_{\text{excited}}^+\rangle = -\beta|i\bar{i}\rangle + \alpha|j\bar{j}\rangle.$$

$$\langle K^\pi = 0_{\text{excited}}^+ | \sum_i (r^2 Y_{20})_i | K^\pi = 0_{\text{ground}}^+ \rangle = 2\alpha\beta (\langle j | r^2 Y_{20} | j \rangle - \langle i | r^2 Y_{20} | i \rangle)$$

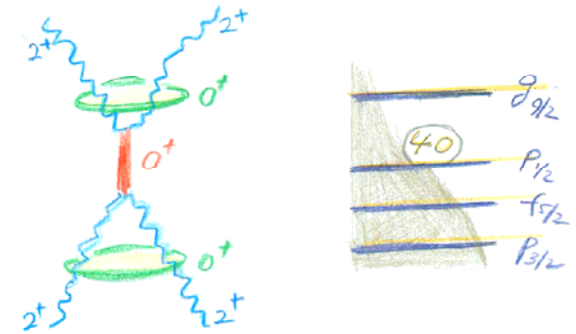
ペアーの空間構造の違い  $\longrightarrow$  四重極対相関も重要

# Mysterious $0^+$ states

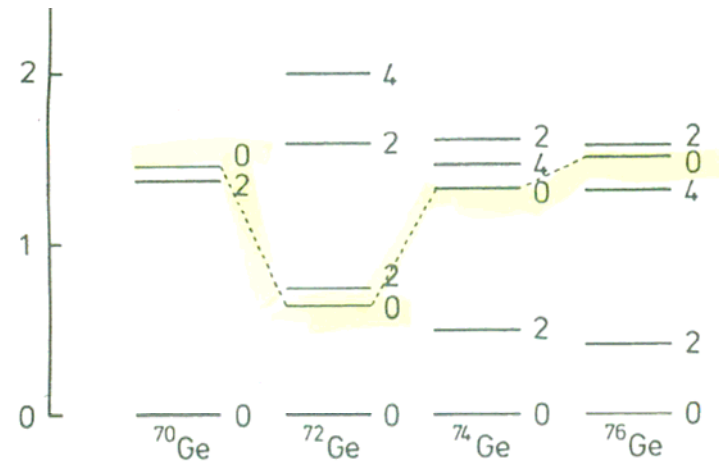
古くて新しい問題



四重極振動と対振動は強く結合する



M. Sugawara et al., Eur. Phys. J. A 16 (2003) 409



K. Takada and S. Tazaki, Nucl. Phys. A 448 (1986) 56

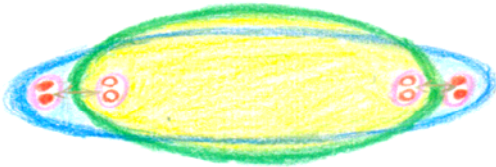


仁科・湯川・朝永



# 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

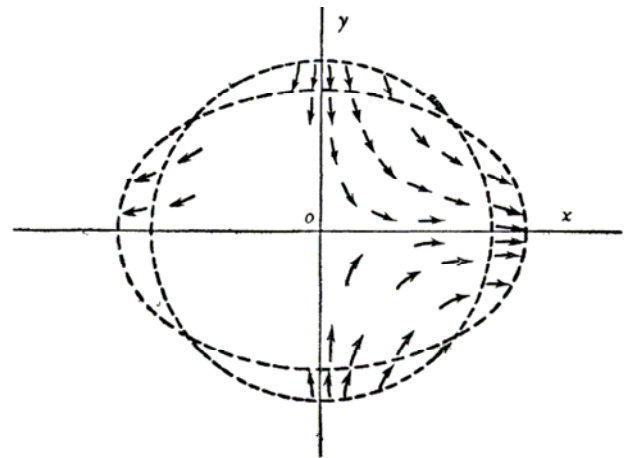


Fig. 1

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!!

## 対ポテンシャル（対凝縮の創る平均場）

$$\Delta(\mathbf{r}) = v_{\text{pair}}(\rho(\mathbf{r})) \langle \phi_0 | \psi_{\uparrow}^{\dagger}(\mathbf{r}) \psi_{\downarrow}^{\dagger}(\mathbf{r}) | \phi_0 \rangle$$

## 対ポテンシャルの時間変化（対場の集団励起）

$$\begin{aligned} \Delta(\mathbf{r}, t) &= v_{\text{pair},t}(\rho(\mathbf{r}, t)) \langle \phi_0(t) | \psi_{\uparrow}^{\dagger}(\mathbf{r}, t) \psi_{\downarrow}^{\dagger}(\mathbf{r}, t) | \phi_0(t) \rangle \\ &= |\Delta(\mathbf{r}, t)| e^{i\chi(\mathbf{r}, t)} \end{aligned}$$

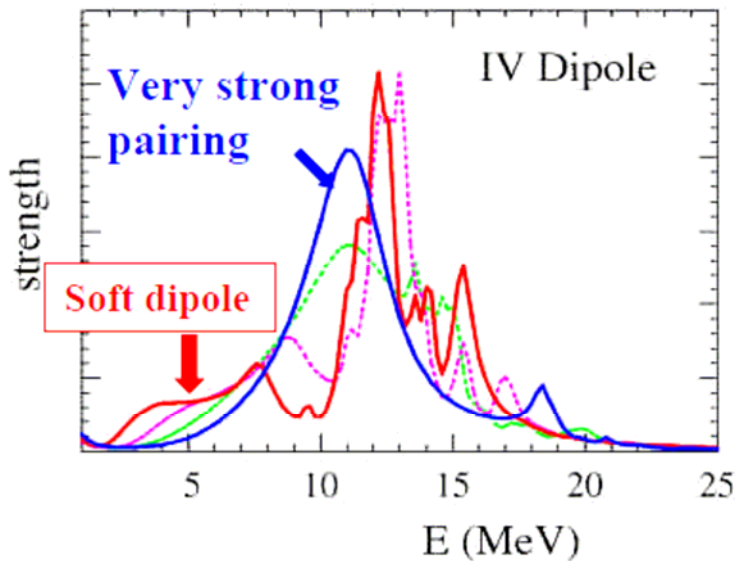
位相の時間,空間変化  
**Anderson-Bogoliubov モード**

破られたゲージ不変性を回復する  
Nambu-Goldstoneモードの一例

# Anderson-Bogoliubovモードとソフトダイ ニュートロンモードの関連:

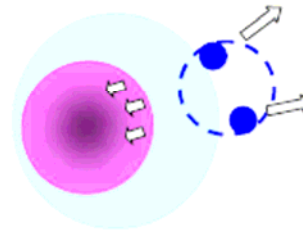
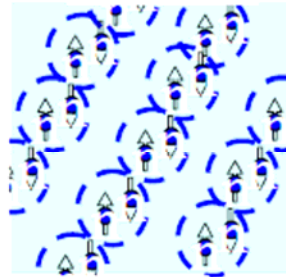
## 双極子応答の対相関依存性の分析

ドリップライン近傍核  $^{158}\text{Sn}$



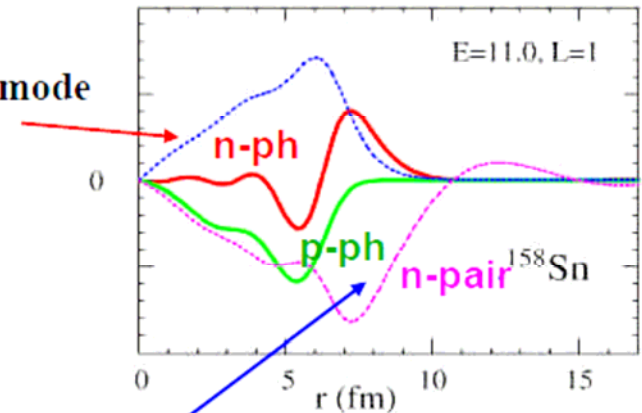
- $\Delta \sim 1-2$  MeV
- ⋯  $\Delta \sim 3$
- ⋯  $\Delta \sim 7$
- $\Delta \sim 15$

Anderson-Bogoliubov mode

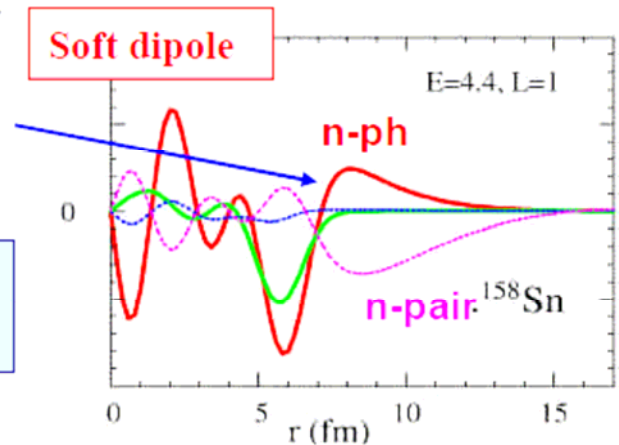


弱束縛の強結合ペアにと  
もなう新しい表面モード?

Very strong pairing  $\Delta \sim 15$  MeV



Normal pairing  $\Delta \sim 1-2$  MeV



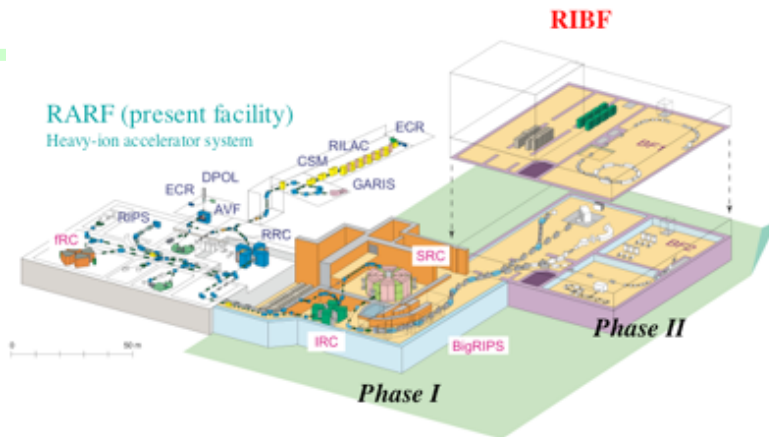
M. Matsuo, Y. Serizawa, K. Mizuyama,  
invited talk at COMEX, June 2006



# まとめ

## 理研RI ビームファクトリー稼動

新しい原子核画像の構築をめざした挑戦が始まる



不安定核は新しい核物理の世界を開くだけでなく  
有限量子系に対する多体問題の観点から  
理論物理として非常に価値あるチャレンジングな  
問題の宝庫である。