

Island of inversion核の励起状態に現れる
クラスター構造について

木村真明 (北大)

軽い安定核のクラスター構造

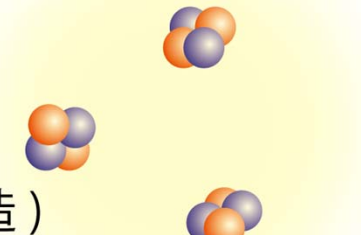
安定な $N=Z$ 核のクラスター構造

励起エネルギーによる核構造の変化

エネルギー・密度の飽和した状況下での構造変化

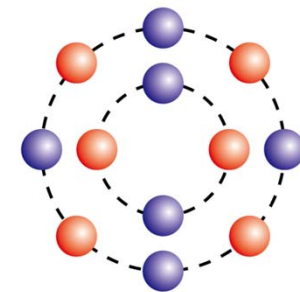
- 励起エネルギーを与えることで、核が複数のサブユニットに分割された状態が出現 (密度の飽和性が局所的には保たれる)
- サブユニットへの分解は閾値則に従う
K. Ikeda *et al.*, PTP. Suppl., Ex# 464 (1968).
- 閾値則は、結合エネルギーの飽和性に由来 (元を正せば飽和性をもたらず核力の性質に由来)
- サブユニット内の核子間相互作用、核子相関は強い
- サブユニット間の相互作用、相関は弱い
⇒ 3α , 4α Gas状態
A. Tohsaki, *et al.*, PRL 87, 192501 (2001).
Y. Funaki, *et al.*, PRL 101, 082502 (2008).

高励起状態
(クラスター構造)



閾値エネルギー

低励起状態
(殻構造)

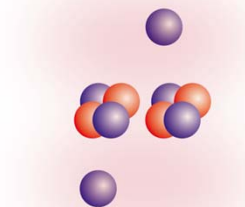
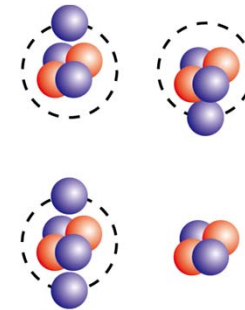


不安定核の励起状態に現われるクラスター構造

不安定核($N \neq Z$)のクラスター構造

励起エネルギー + 中性子の運動による核構造の変化
エネルギー・密度が飽和しない状況下での構造変化

- 余剰中性子の運動と、芯核の構造が結合
- 分子軌道状態
余剰中性子が、コアとなるクラスター芯の為す一体場中を運動
余剰中性子の軌道に応じて、芯核のクラスター構造が変化
余剰中性子と、芯核の結合は強い？
閾値則には従わない
- 原子軌道状態 (分子共鳴)
余剰中性子が、1つのクラスター芯の周りを運動
安定核のクラスター構造に近いイメージ
閾値則で説明できる？



分子軌道と原子軌道

分子軌道

余剰中性子の軌道を、芯となる原子核
(イオン)軌道の線形結合で表現

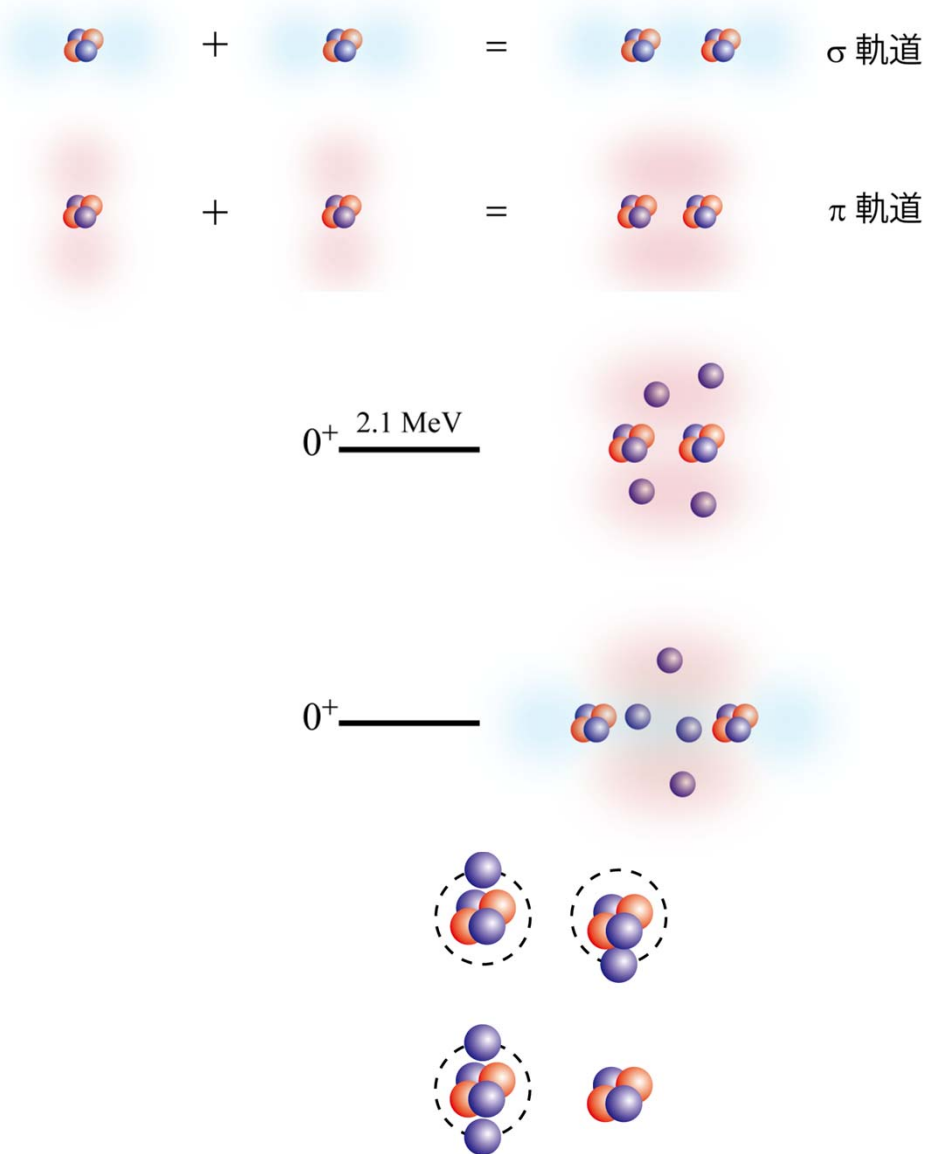
- 少数の分子軌道を考慮するだけで($\sigma+\pi$)、Be同位体の低励起スペクトルを見事に説明
- 余剰中性子が σ 軌道を占有した場合には、コア核のクラスターが発達
- 余剰中性子の配位、数に応じて構造が変化。場合によっては基底状態となる

原子軌道

余剰中性子の軌道が1つのクラスターの周りの軌道で記述される

- 高い閾値エネルギー
- 芯となるクラスター間の相対運動の励起モード
- 敷居値則で表現される？

Be同位体の場合には、低励起の分子軌道
高励起の原子軌道状態に至るまでの
理論的研究

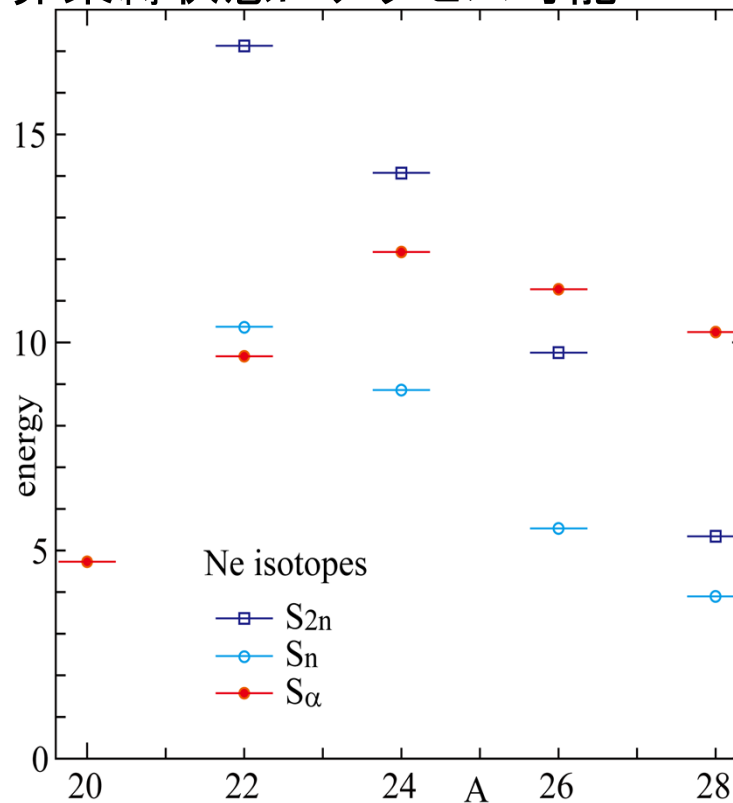


原子軌道

Island of Inversionの領域でクラスター構造は存在しうるのか

- Shell gapの減少・消失
- α 閾値が存在しない

SHARQA, SAMURAI等の検出器群により
励起状態、非束縛状態にアクセス可能



Theoretical Framework of Anti-symmetrized MD

A-body Hamiltonian

Gogny D1S effective interaction, Exact removal of spurious motion

$$\hat{H} = \sum_i^A \hat{t}_i - \hat{T}_g + \sum_{i<j}^A \hat{v}_{nn}(r_{ij}) + \sum_{i<j}^Z \hat{v}_C(r_{ij}), \quad \hat{v}_{nn} : \text{GognyD1S}$$

Variational wave function

Variational calculation after parity projection \Rightarrow Wave function for each parity

$$\Psi^\pi = \frac{1 + \pi \hat{P}_x}{2} \Psi_{\text{int}},$$

$$\Psi_{\text{int}} = \mathcal{A} \{ \varphi_1(\mathbf{r}_1), \varphi_1(\mathbf{r}_2), \dots, \varphi_A(\mathbf{r}_A) \}, \quad \varphi_i(\mathbf{r}_j) = \phi_i(\mathbf{r}_j) \chi_i \eta_i,$$

Single particle wave function is represented by a deformed Gaussian wave packet

$$\phi_i(\mathbf{r}_j) = \left(\frac{2^3 \det M}{\pi} \right)^{1/2} \exp \{ -(\mathbf{r}_i - \mathbf{Z}_j) \mathbf{M} (\mathbf{r}_i - \mathbf{Z}_j) \}$$

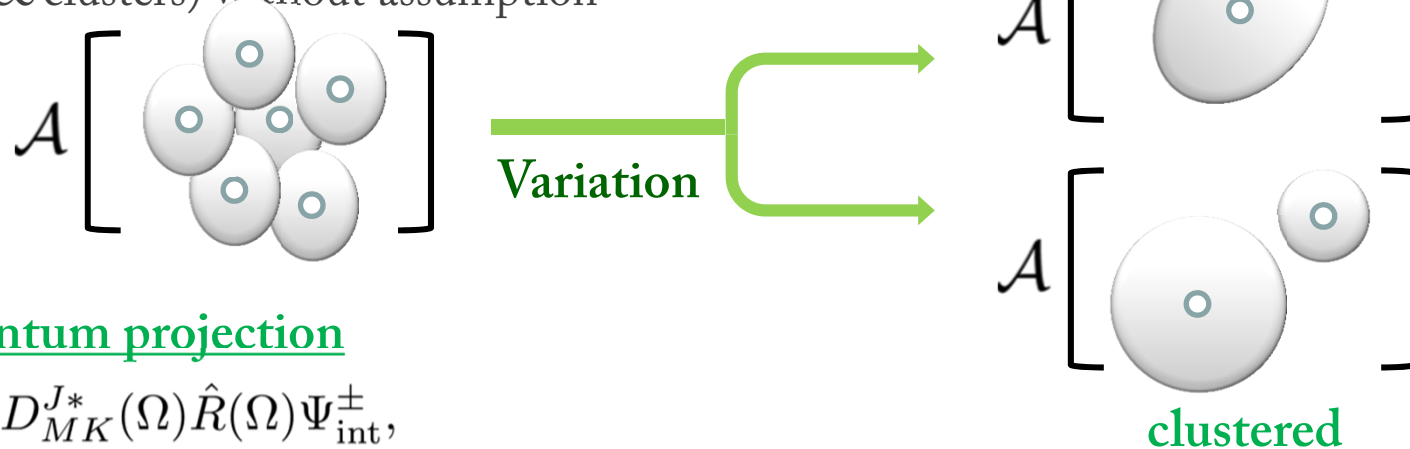
$$\chi_i = \alpha_i \chi_\uparrow + \beta_i \chi_\downarrow, \quad \eta_i = \text{proton or neutron}$$



Theoretical Framework of AMD

Illustration of wave function and variational calculation

AMD model wave function is flexible to describe various kinds of structure (shells & clusters) without assumption



Angular momentum projection

$$\Psi_{MK}^{J\pm} = \int d\Omega D_{MK}^{J*}(\Omega) \hat{R}(\Omega) \Psi_{\text{int}}^{\pm},$$

GCM: Configuration mixing between the states with different deformation and particle-hole configurations

$$\Psi_{\alpha}^{J\pm} = \sum_{iK} c_{ik} \Psi_{MK}^{J\pm}(\beta_i),$$

Hill-Wheeler eq. determines the wave function

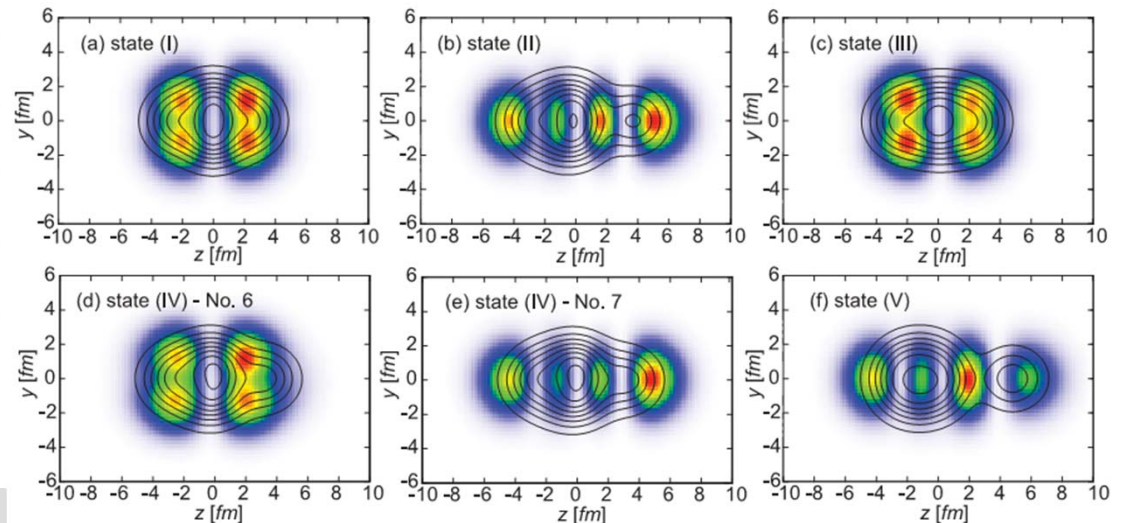
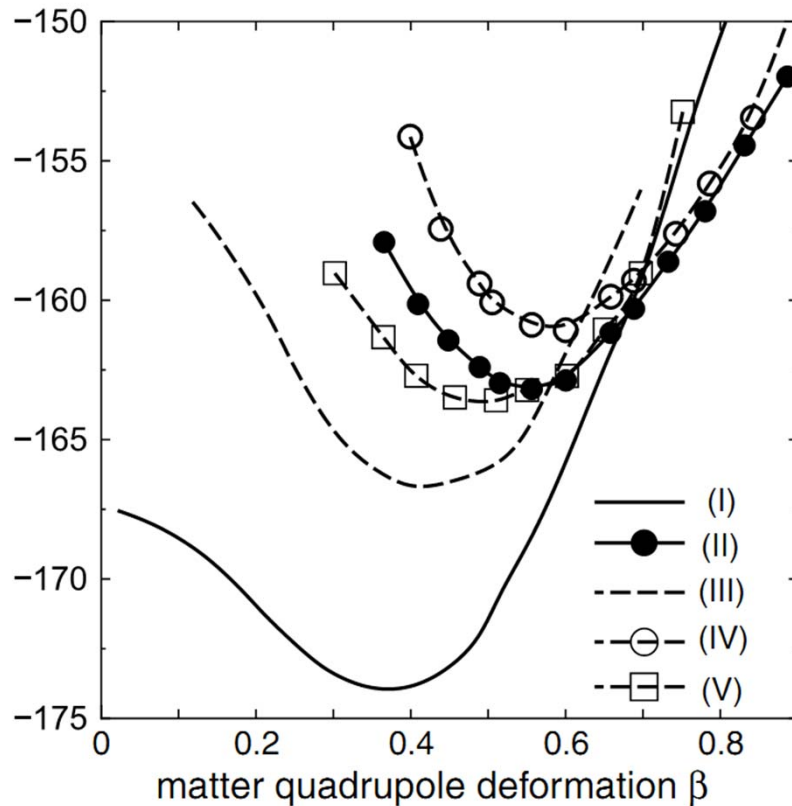
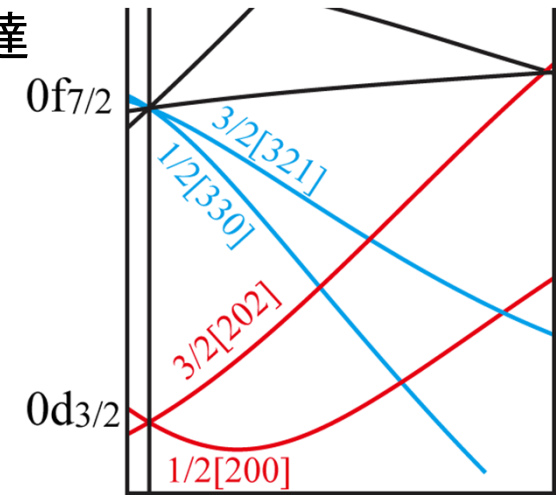
$$\sum_{jK'} H_{iKjK'} c_{jK',\alpha} = E_{\alpha} \sum_{jK'} N_{iKjK'} c_{jK',\alpha},$$

$$H_{iKjK'} = \langle \Psi_{MK}^{J\pm}(\beta_i) | \hat{H} | \Psi_{MK'}^{J\pm}(\beta_j) \rangle, \quad N_{iKjK'} = \langle \Psi_{MK}^{J\pm}(\beta_i) | \Psi_{MK'}^{J\pm}(\beta_j) \rangle$$

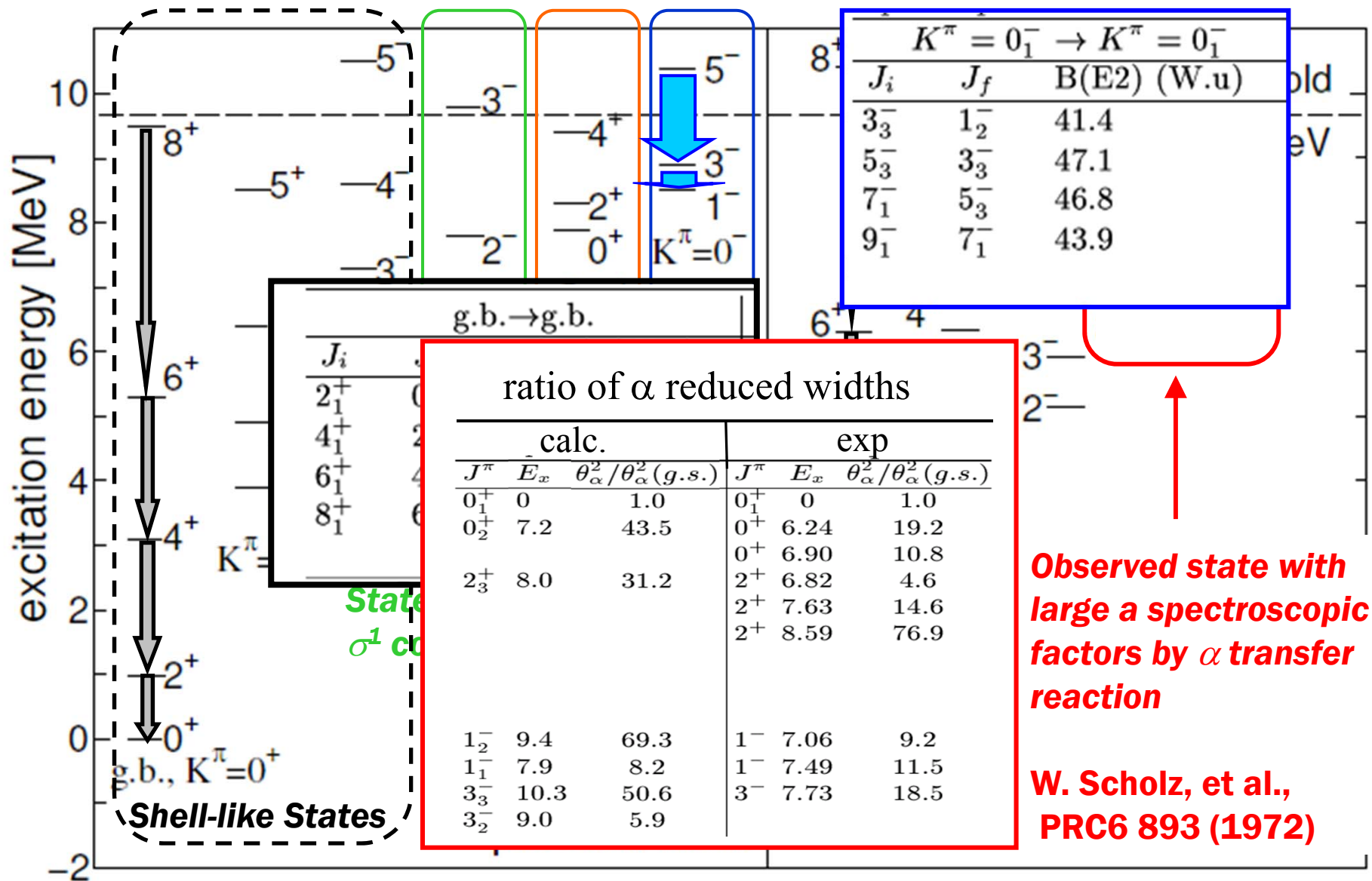


分子軌道と原子軌道 (^{22}Ne)

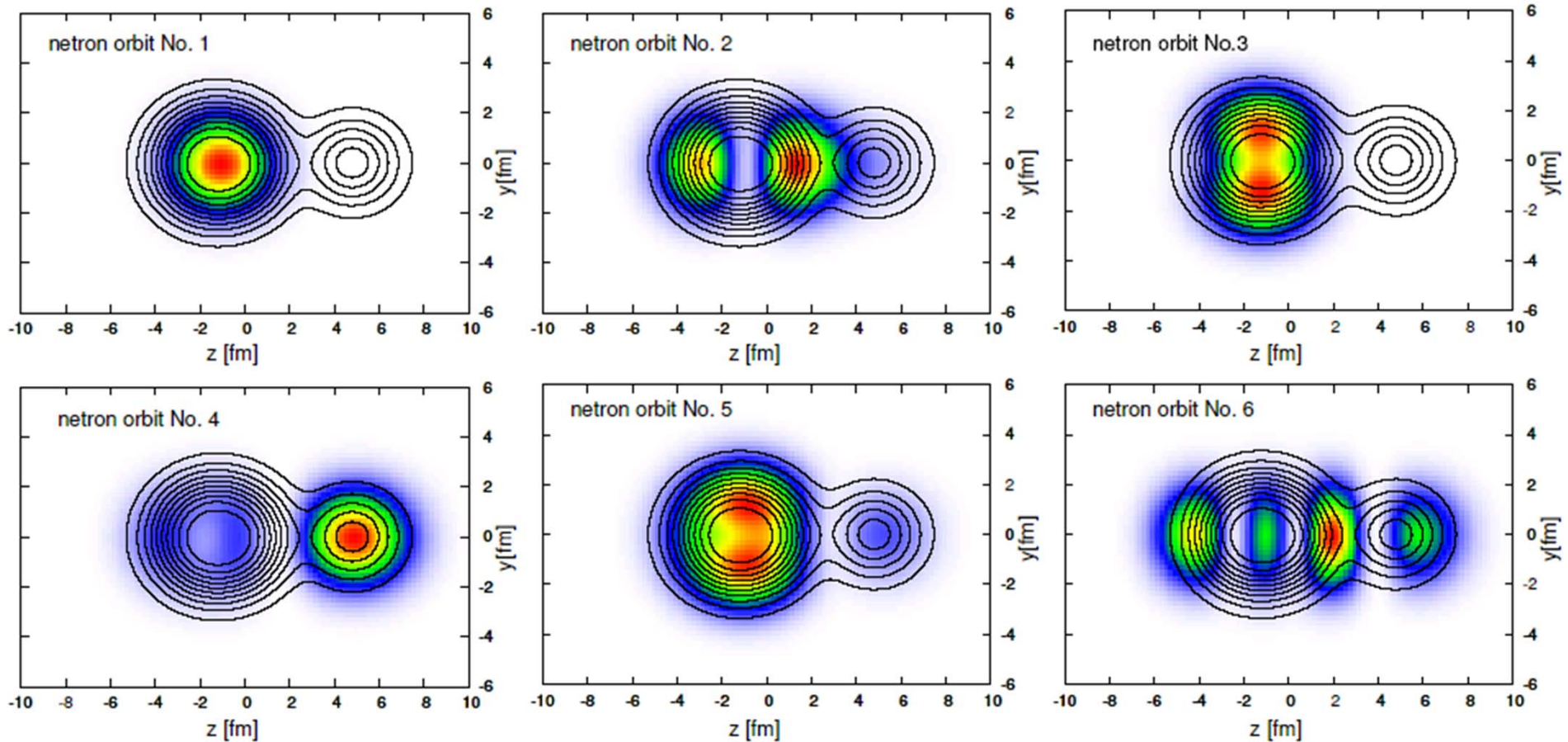
余剰中性子がpf-shellを占有すると、クラスター構造が発達
 占有されるpf-shellは α 粒子 16Oの周りの軌道の線形結合で
 定性的に記述できる



Low-Lying Level Scheme of ^{22}Ne



Neutron Orbitals in the State



- Two neutrons occupy each orbit.
- Orbit No.1 to 5 are the single particle orbitals within a and ^{16}O clusters.
- Last two neutrons orbit around the entire system.
- State (II) (positive parity) also has a quite similar single particle configuration.



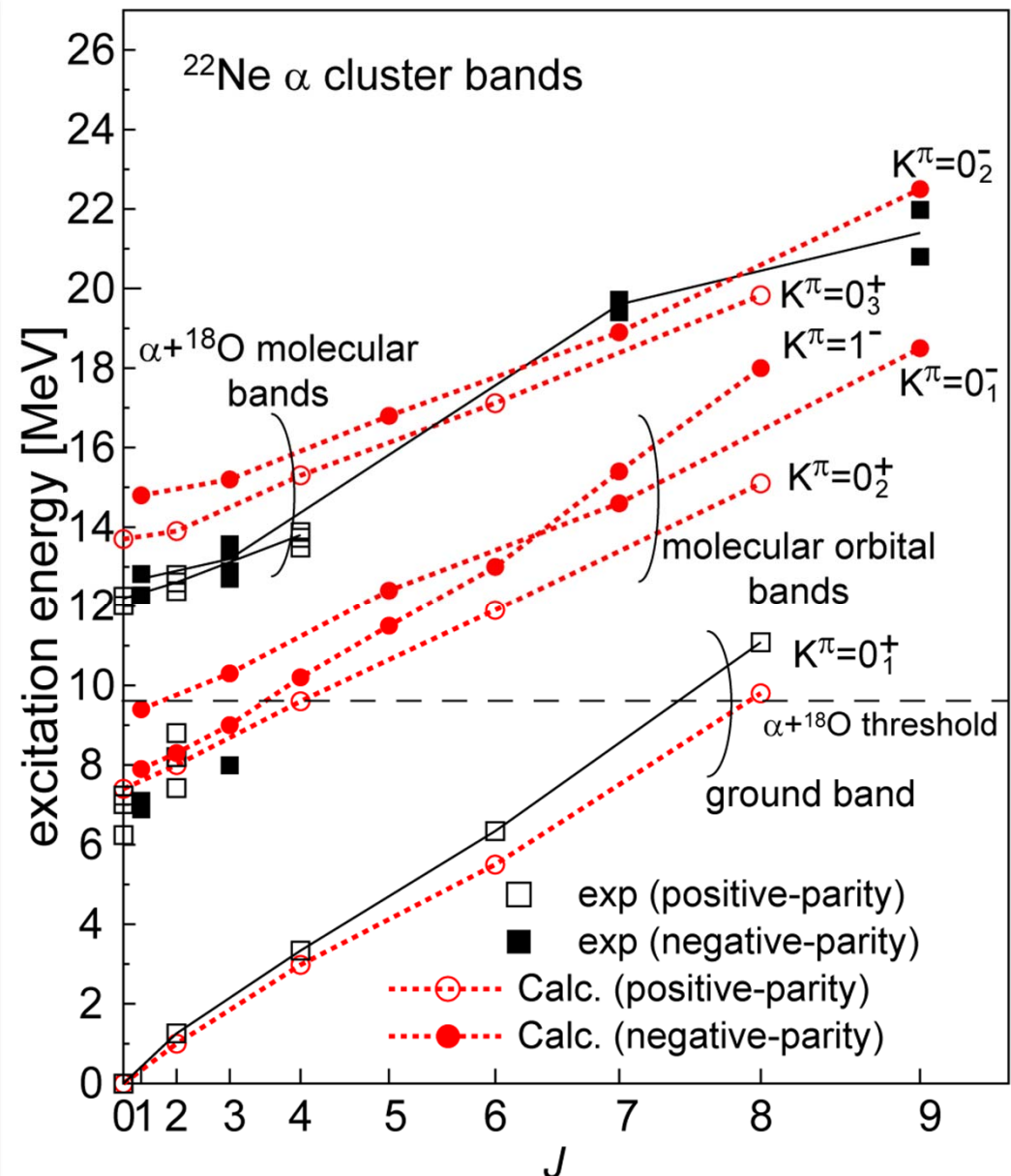
$\alpha+^{18}\text{O}$ Di-Molecule bands

- The $\alpha+^{18}\text{O}$ molecular bands above the $\alpha+^{18}\text{O}$ threshold energy have been observed.

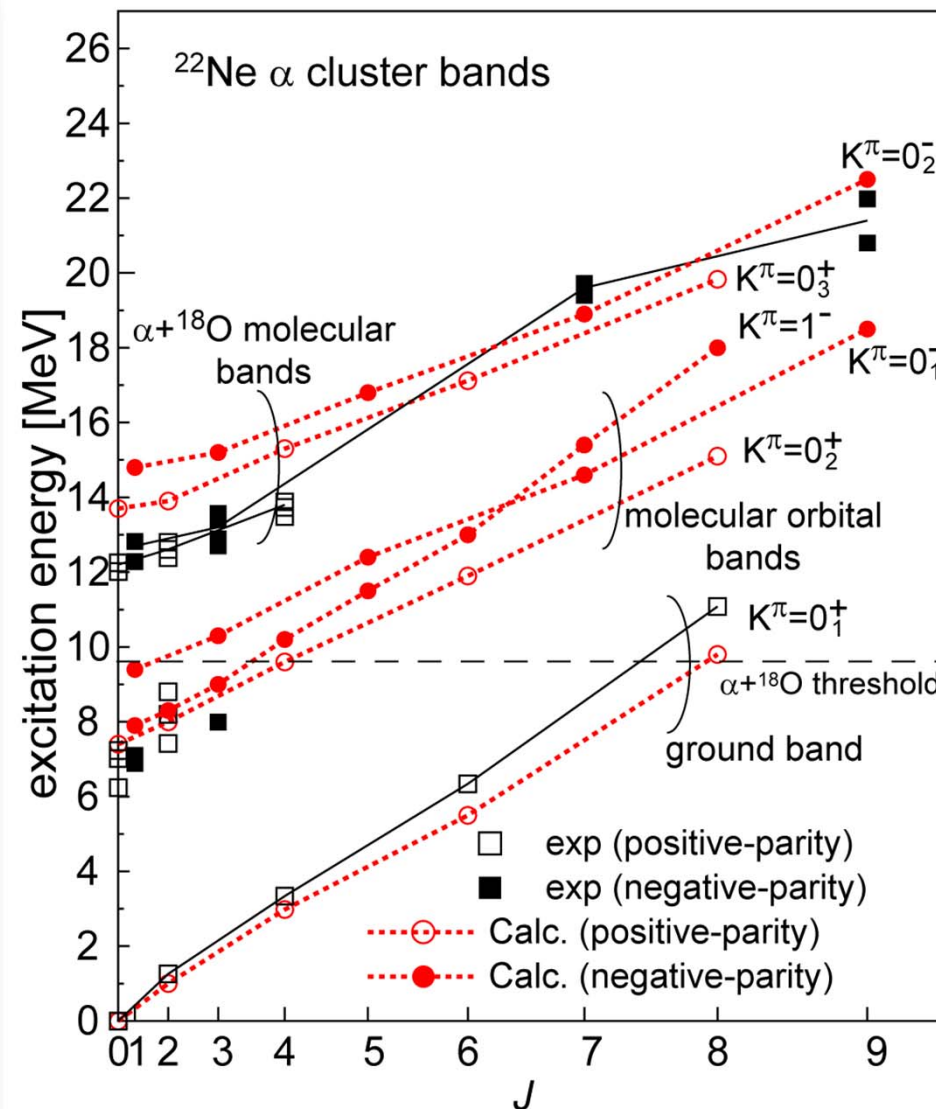
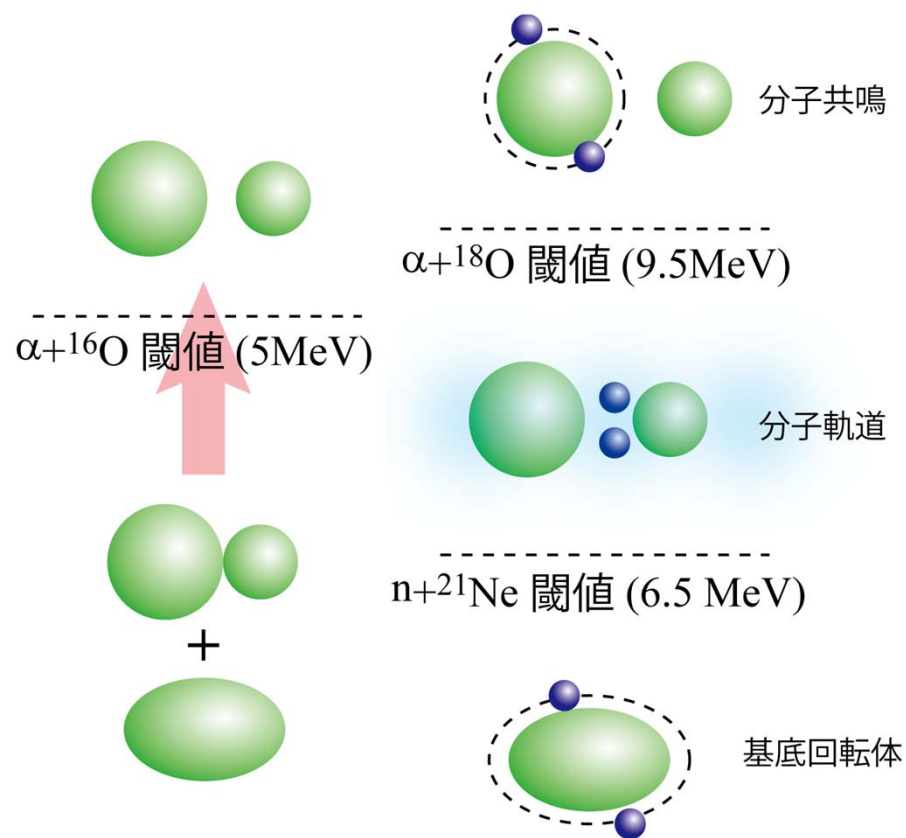
Rogachev, et al., PRC64 051302 (2001).
Goldberg, et al., PRC69 024602 (2004).

P. Descouvemont, et al., PRC38, 2397 (1988).
M. Dufour, et al., NPA726, 53 (2003)

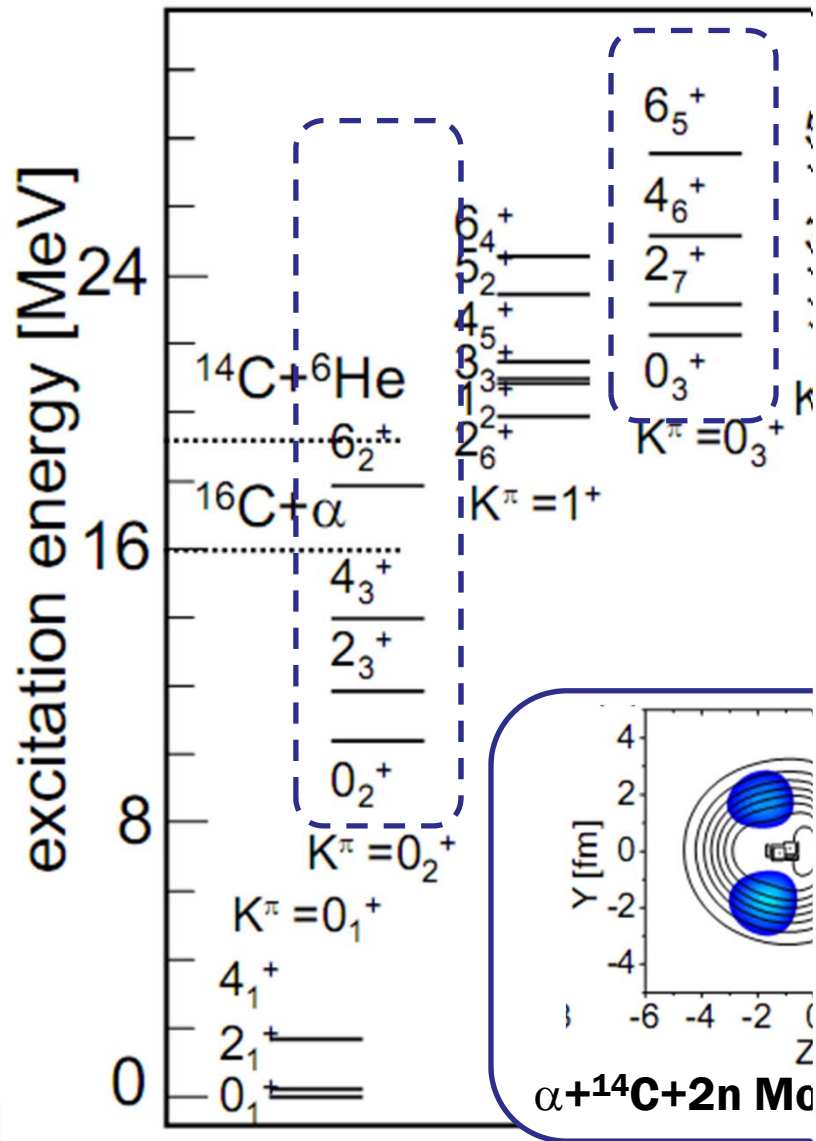
- What is the relation to the molecular-orbital bands?
- We include the $\alpha+^{18}\text{O}(0^+)$ cluster wave function (angular momentum projected Brink type w.f.) into the GCM basis wave function. ($^{18}\text{O}(2^+)$ etc are not included.)



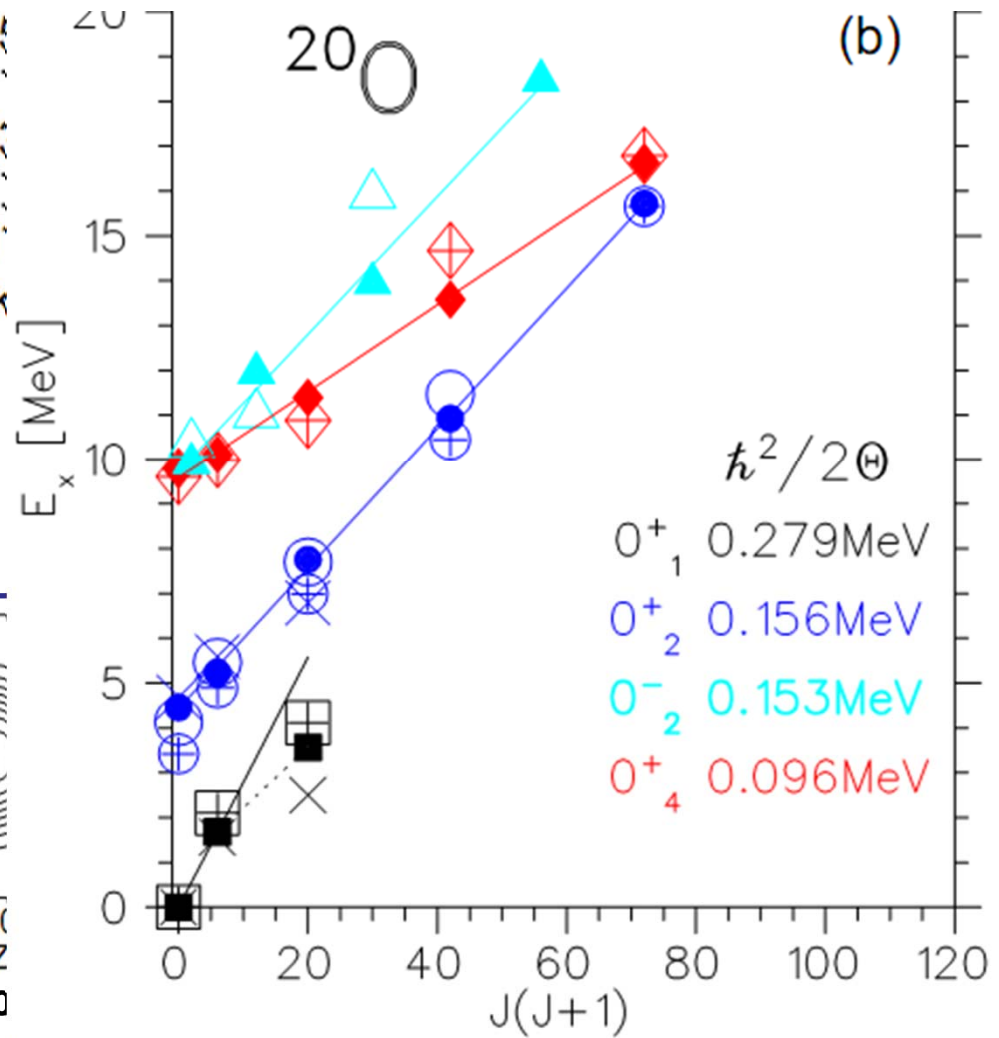
Clusters in ^{22}Ne



Molecular States of ^{20}O



T Dorsch, et.al., Journal of Physics C111 01 2039(2008).



低励起状態のスペクトロスコピー

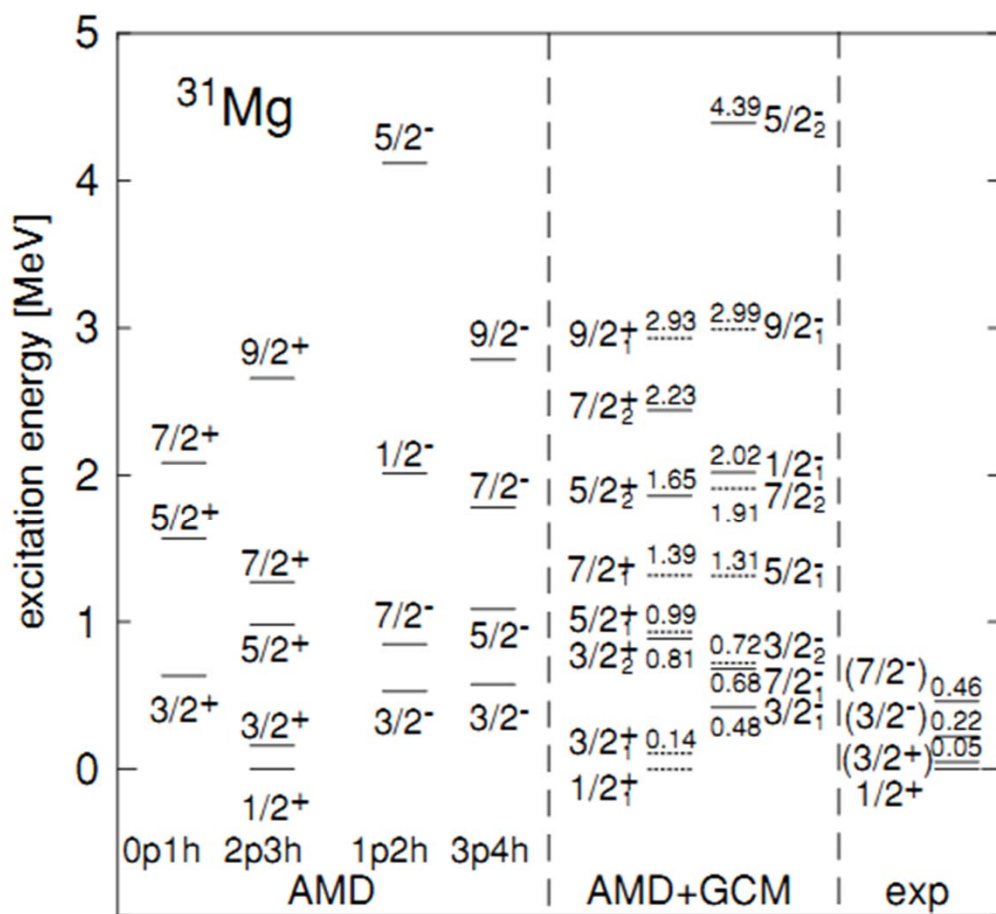


FIG. 3. Level scheme of ^{31}Mg obtained from the AMD wave functions at the energy minima and by the AMD+GCM calculation

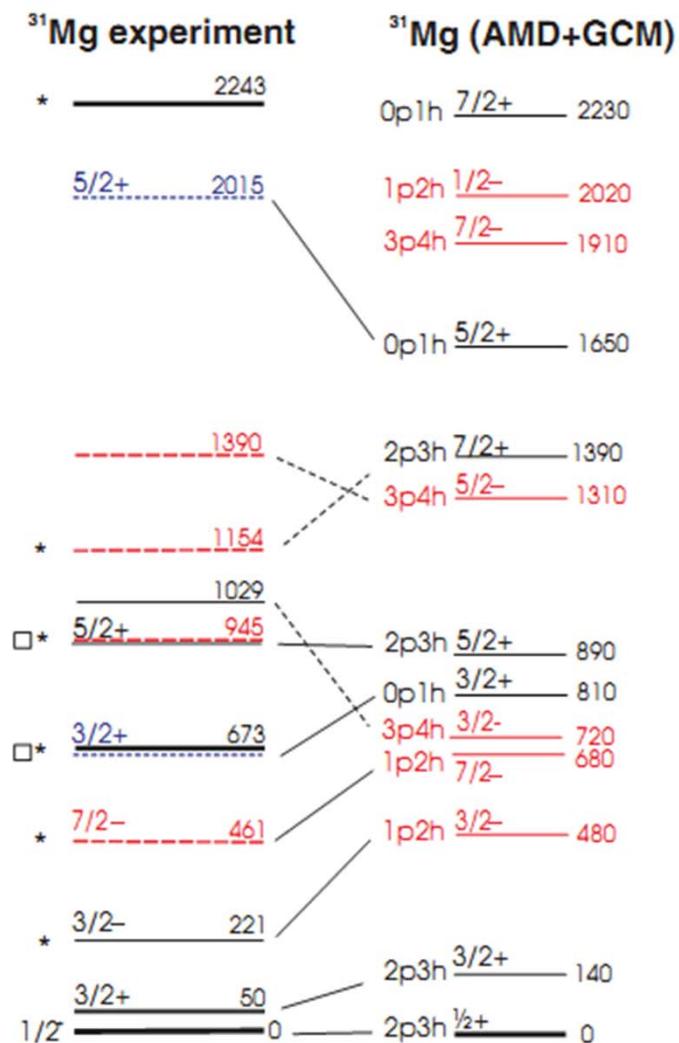
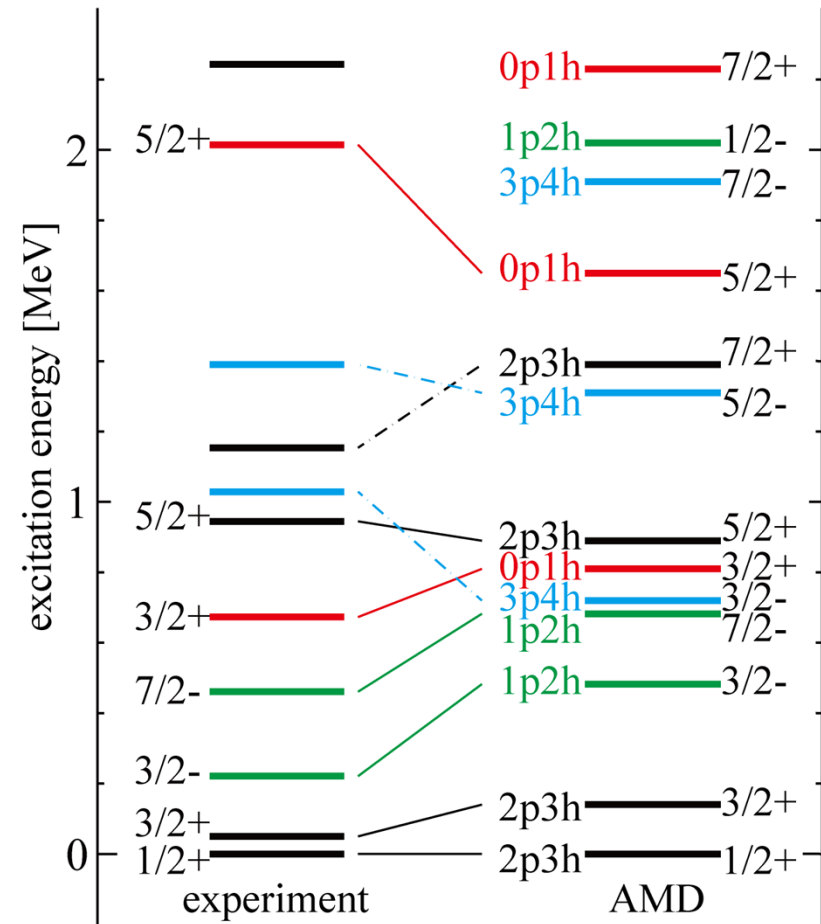
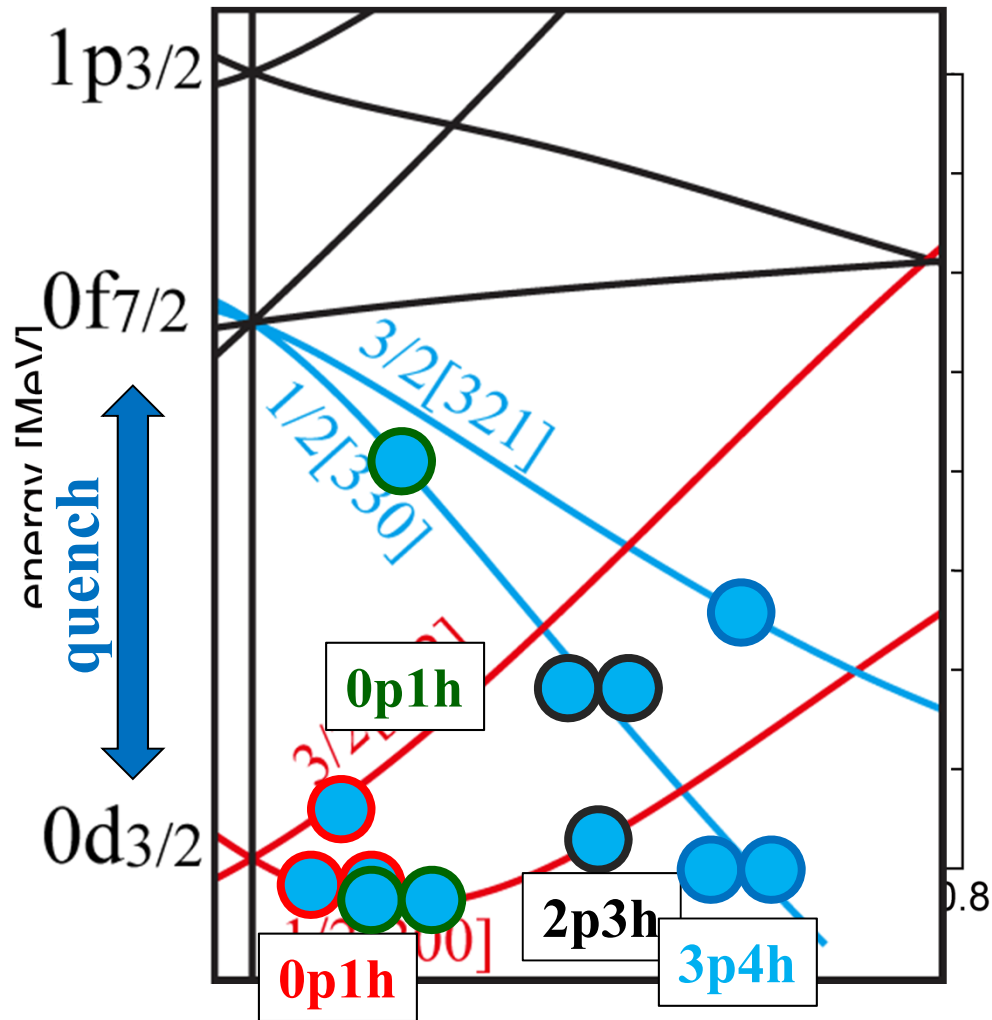


FIG. 1. (Color online) Revised level scheme of ^{31}Mg , with spin/parity assignments based on combining the results from different experiments and compared to an antisymmetrized-molecular-



Low-lying spectrum of ^{31}Mg



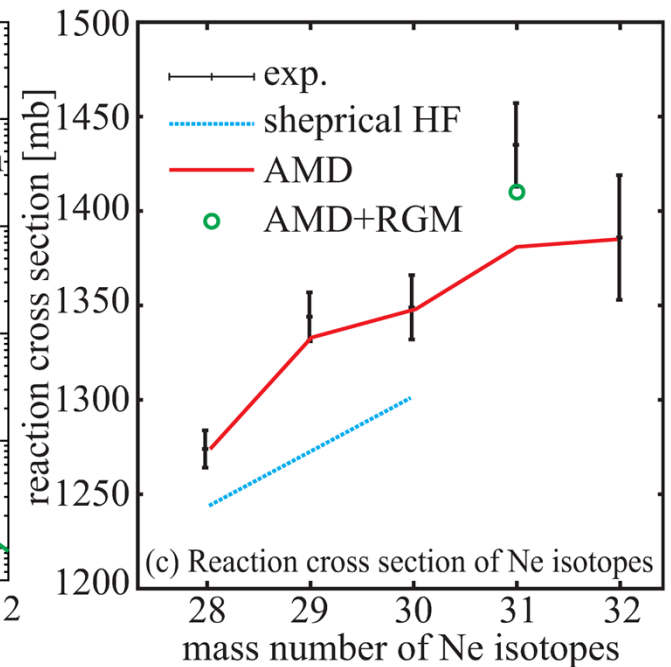
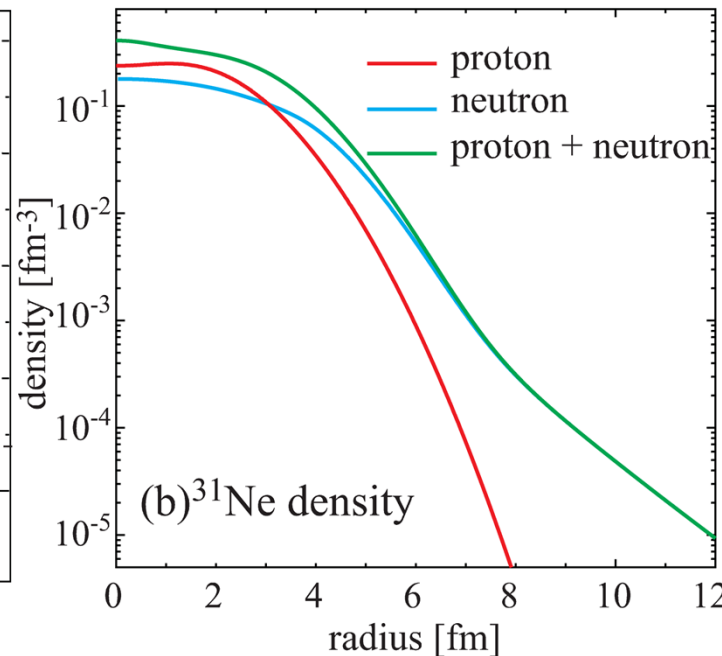
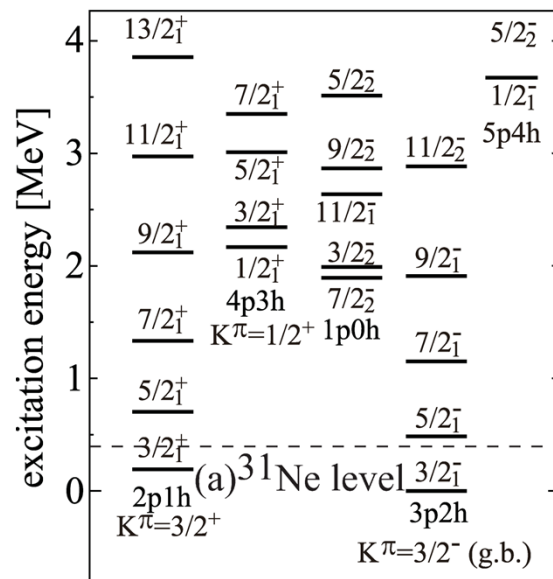
P-wave halo of ^{31}Ne

$$\Psi(^{31}\text{Ne}; 3/2_1^-) = \sum_{nJ\pi} \langle 3/2 \mu | jm, JM \rangle \mathcal{A} \{ \chi_{nj}(r) \Psi(^{30}\text{Ne}; J_n^\pi) \phi_n \}$$

Wave function of ^{30}Ne is AMD w.f., relative motion between ^{30}Ne and n is solved

All states below 10MeV of ^{30}Ne are included as the core wave function of ^{31}Ne

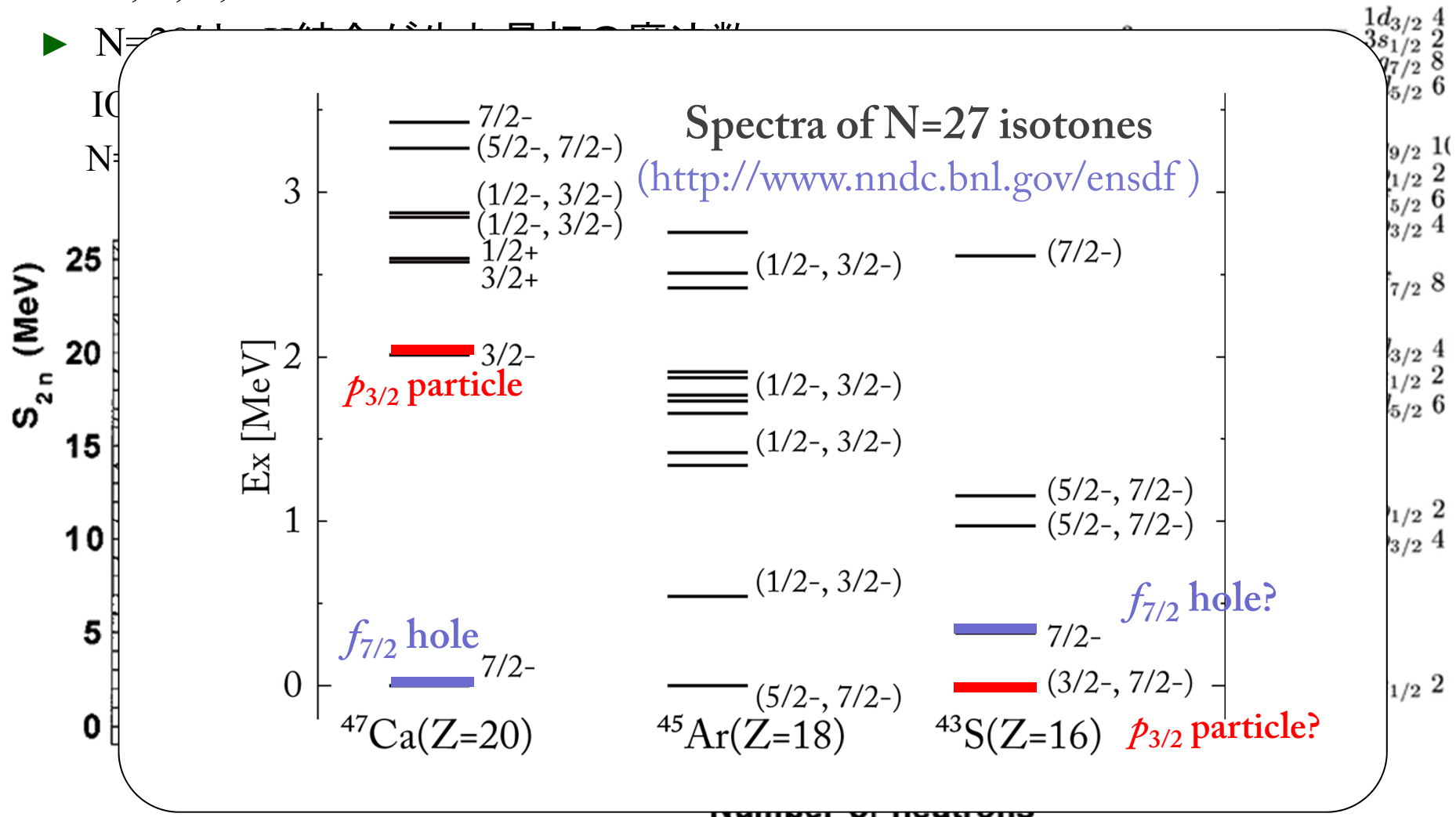
- ▶ AMD result shows particle ($\nu p3/2$) + rotor ($^{30}\text{Ne}(\text{g.s.})$) nature
- ▶ AMD + RGM tends to weak coupling between ^{30}Ne and neutron



N=28魔法数の消失

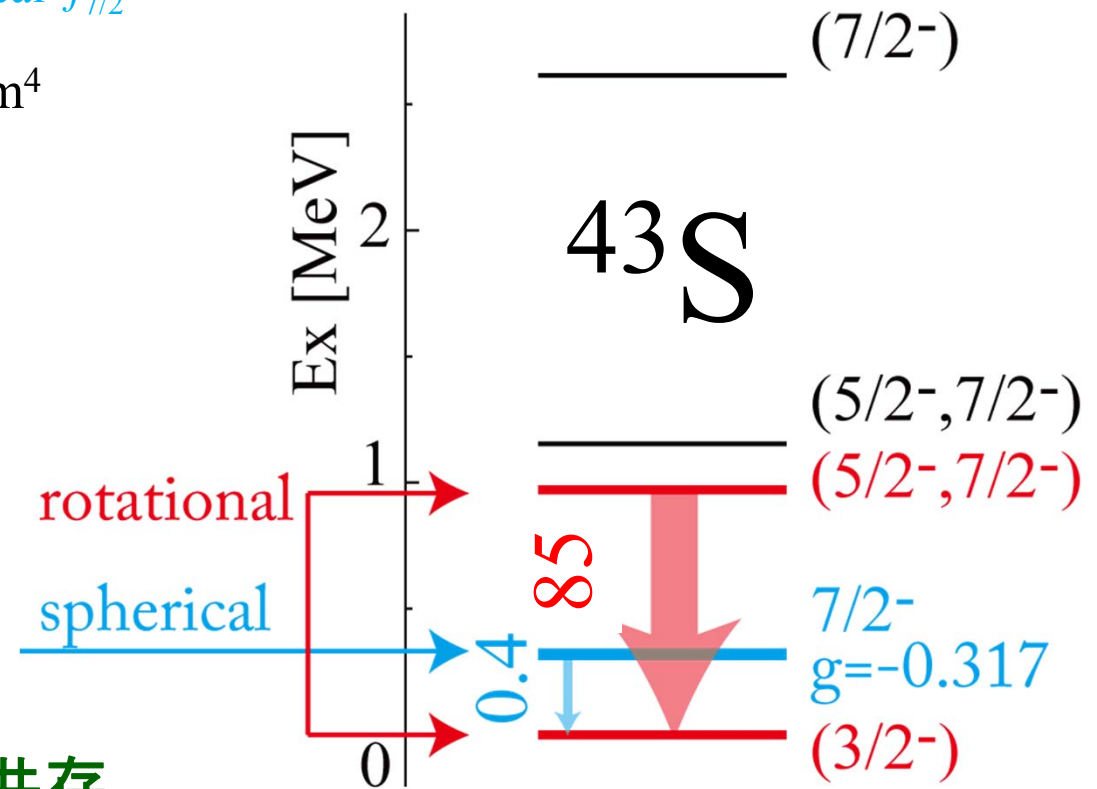
- ▶ Si, P, S, Cl 同位体で、明らかにN=28魔法数が消失

- ▶ N=28魔法数は、結合エネルギーが最も高くなる魔法数



^{43}S : 実験データ

- ▶ 5つの励起状態(no γ - γ coincidence)
- ▶ 319 keVに $7/2^-$ 状態, isomeric state
 $g = -0.317$ ($g_{\text{sch}} = -0.546$) \rightarrow spherical $f_{7/2}$
- ▶ $B(E2; 319\text{keV} \rightarrow \text{g.s.}) = 0.403\text{e}^2\text{fm}^4$
 非常に弱い
 hindrance factorより、g.s.は $(3/2^-)$
- ▶ $B(E2; 940\text{keV} \rightarrow \text{g.s.}) = 85\text{e}^2\text{fm}^4$
 強い, $(5/2^- \text{ or } 7/2^-)$
- ▶ SMとの比較により
 赤: $K=1/2^-$ の prolate band
 青: spherical $f_{7/2}$ state



Spherical & prolate の変形共存

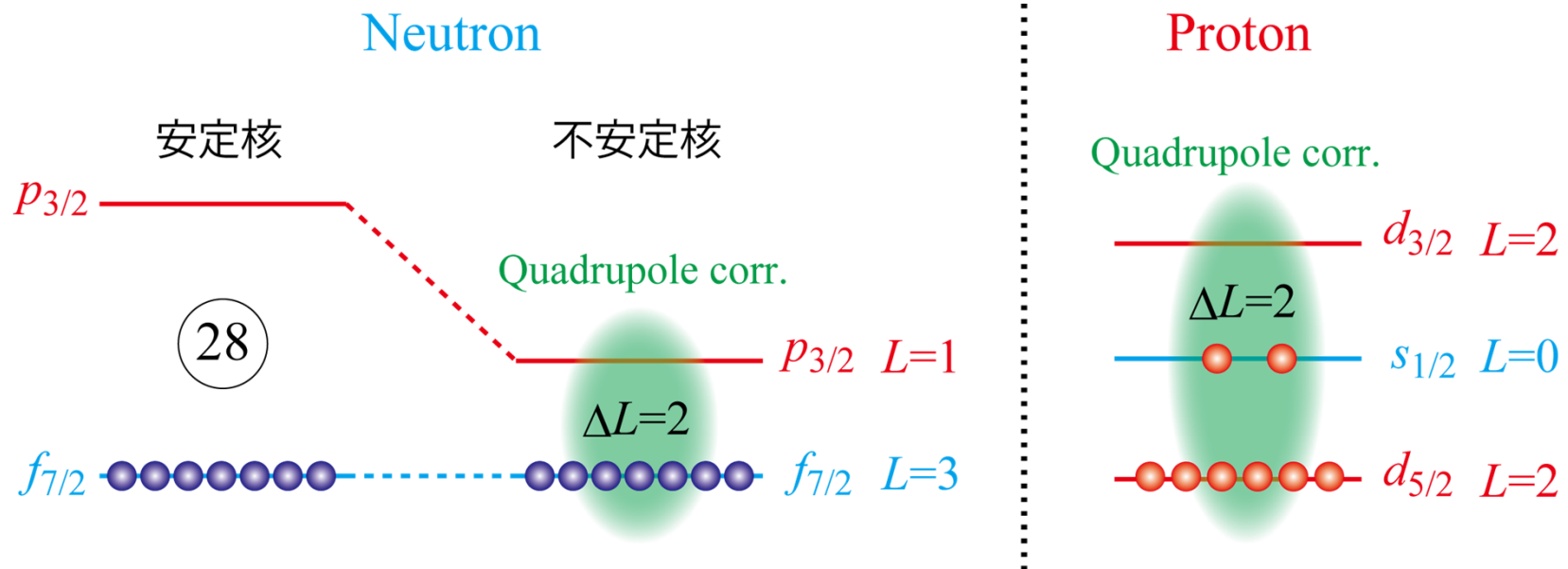
R. W. Ibbotson et al., PRC59, 642 (1999).
L. A. Riley, et al., PRC80, 037305 (2009).

F. Sarazin, et al., PRL 84, 5062 (2000).
L. Gaudefroy, et al., PRL102, 092501 (2009).



^{43}S : 4重極変形の活性化・変形共存

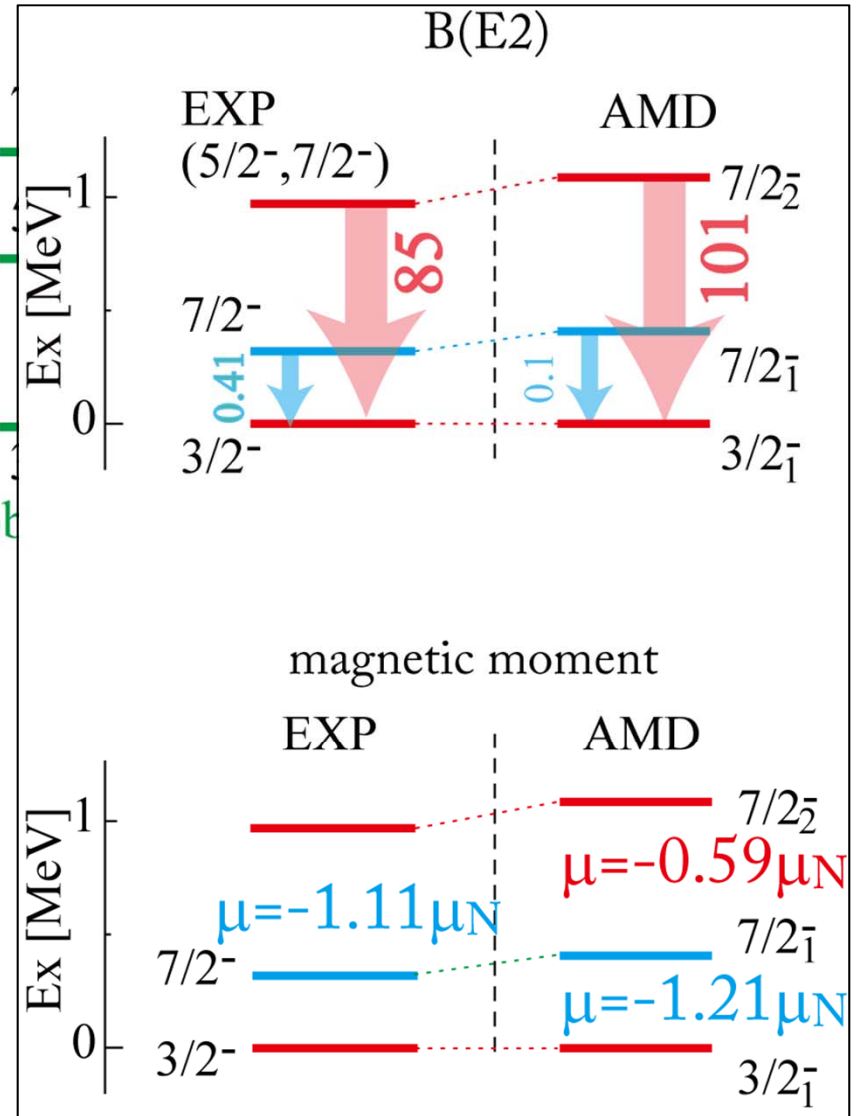
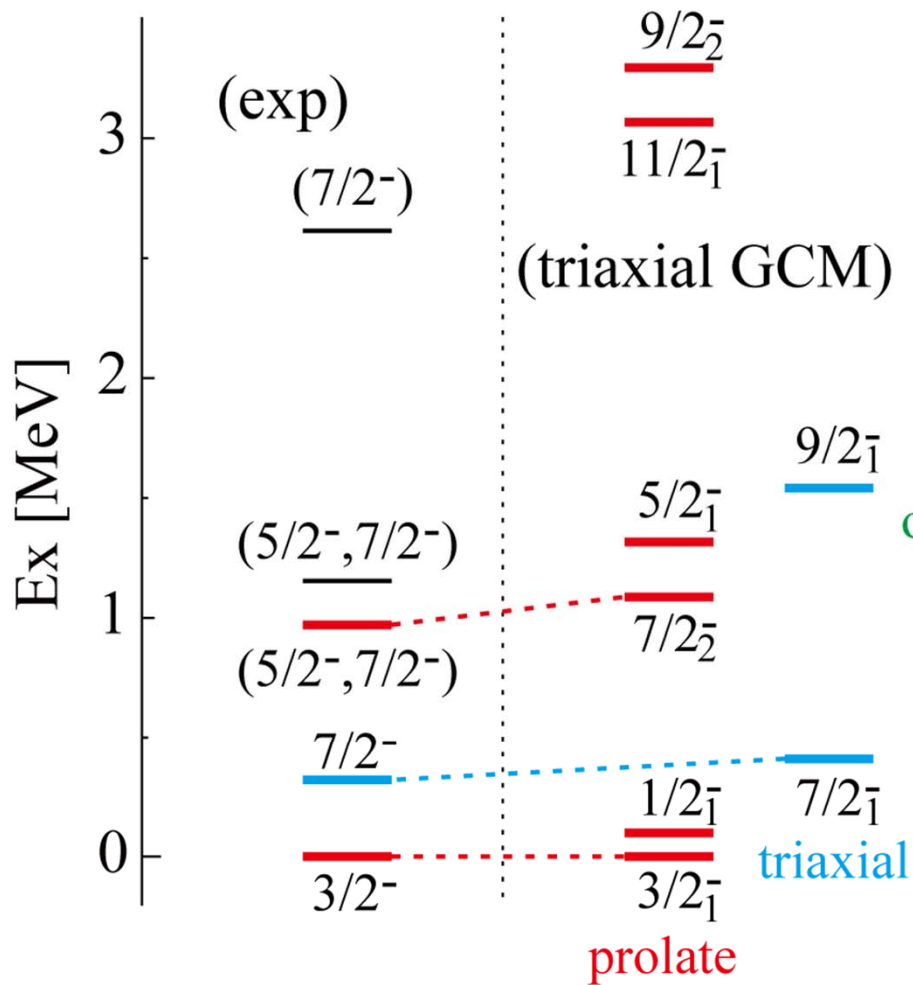
- ▶ N=28 shell gapが小さくなることで、陽子・中性子の4重極変形が活性化
- ▶ 様々な変形状態が、一斉に現れる可能性



- ▶ “Triple configuration coexistence in ^{44}S ”, *D. Santiago-Gonzales, PRC83, 061305(R) (2011)*.
0p0h (spherical), 1p1h (deformed), 2p2h (more deformed) の3つの変形共存
- ▶ γ 変形まで含めて、4重極変形の様相を詳しく知りたい
- ▶ 観測データは、どのように説明されるか？ 変形をpin downする観測量は？



Result: Spectrum of ^{43}S

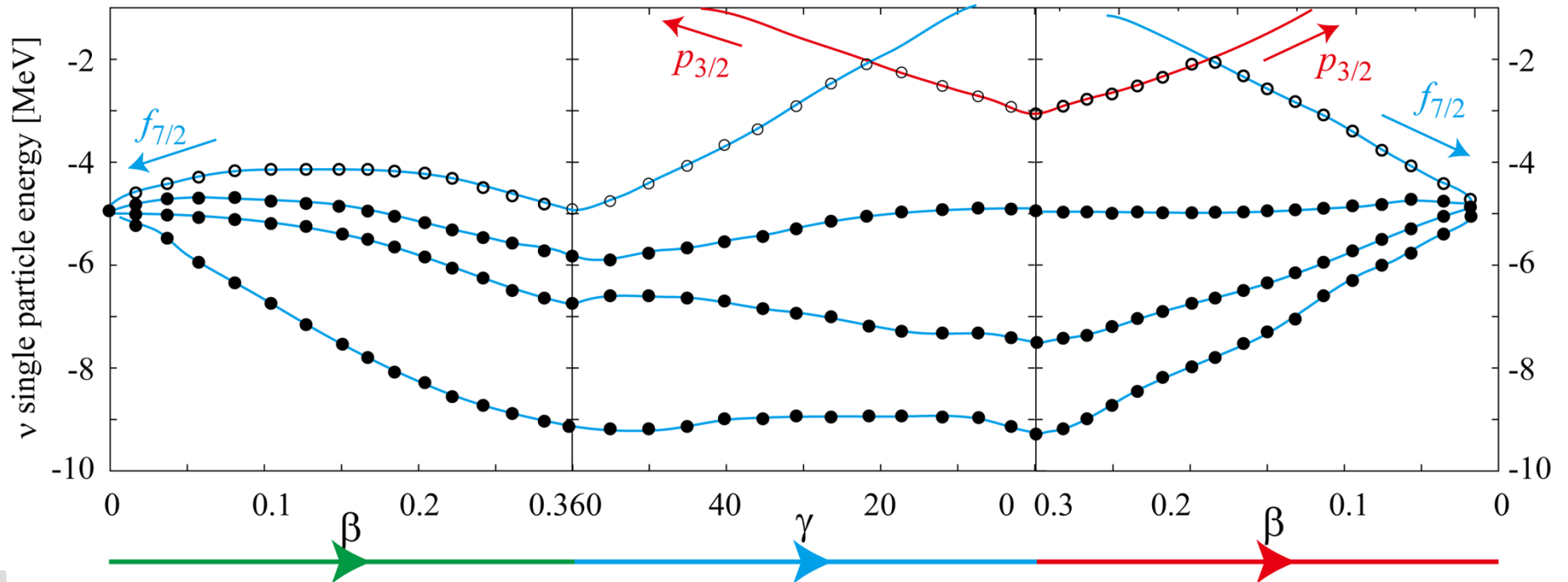
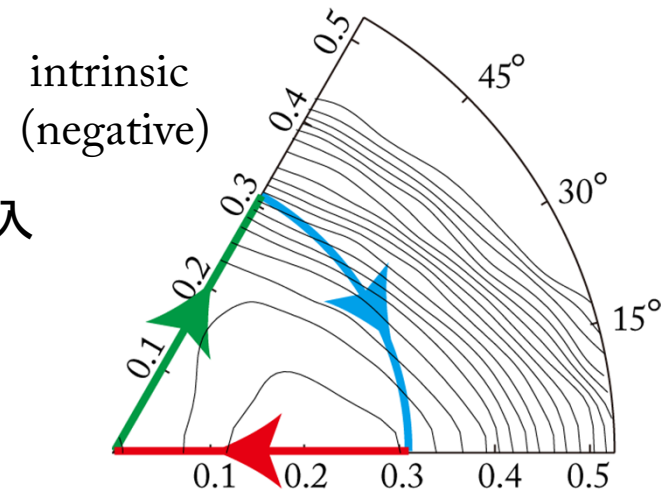


- ▶ Low-lyingのassignment
- ▶ Prolate, triaxial, oblateの変形共存



Discussions: β - γ 変形・一粒子軌道

- ▶ $\beta \sim 0.3$ 程度まで、 β 変形、 γ 変形共にソフトなエネルギー曲面
- ▶ $\beta = 0.2 \sim 0.3$, $\gamma = 0 \sim 30$ deg. 間では $p_{3/2}$ originの軌道が進入 (球形の基底で展開すれば、 $0p_{0h}$, $1p_{1h}$, $2p_{2h}$, ... の重ね合わせになっている)
- ▶ oblate側では、 $f_{7/2} - p_{3/2}$ のgapは十分に大きい



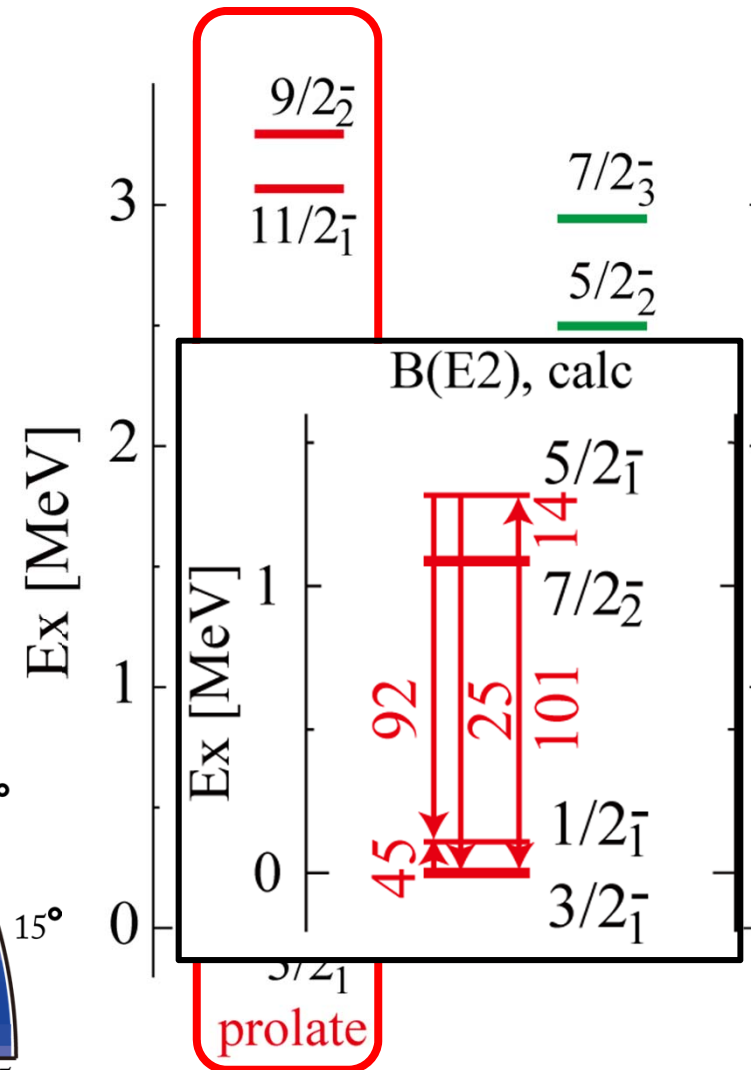
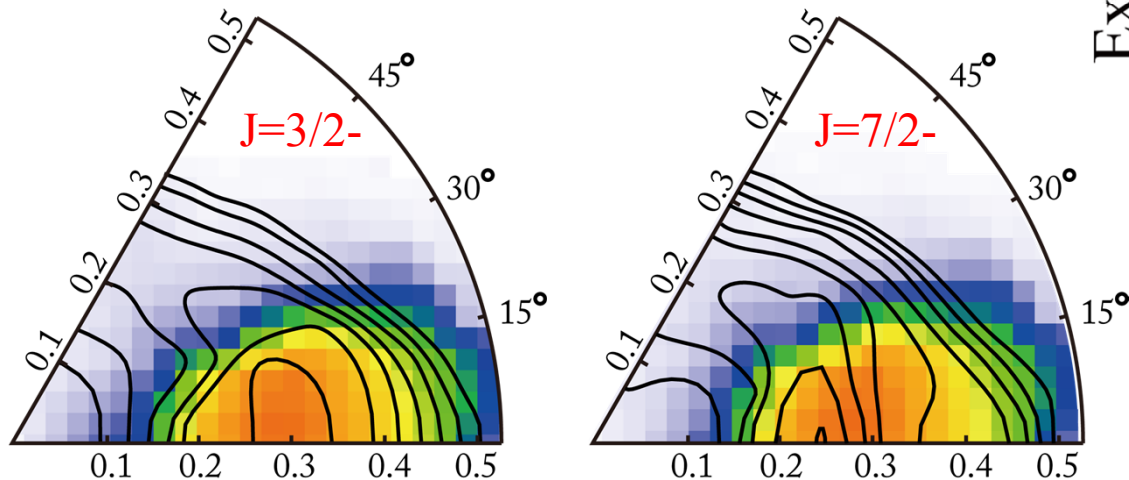
Discussions: Prolate band

Prolate band (ground band) with $K=1/2^-$

- ▶ prolate側 ($g=0$) に波動関数が局在
- ▶ $K=1/2^-$ の成分が主体 ($1p1h, f_{7/2} \rightarrow p_{3/2}$)
- ▶ $B(E2), B(M1)$ は、particle + rotor の特徴
 $^{42}\text{S}(\text{def}) \times (\text{vp}_{3/2})^1$

等高線: J射影後のエネルギー曲面
 色分布: 各々の状態の β - γ 平面上での分布

$$O_{n\alpha}^{J\pi}(\beta_i, \gamma_i) = |\langle \Phi_n^{J\pi}(\beta_i, \gamma_i) | \Phi_\alpha^{J\pi} \rangle|^2$$

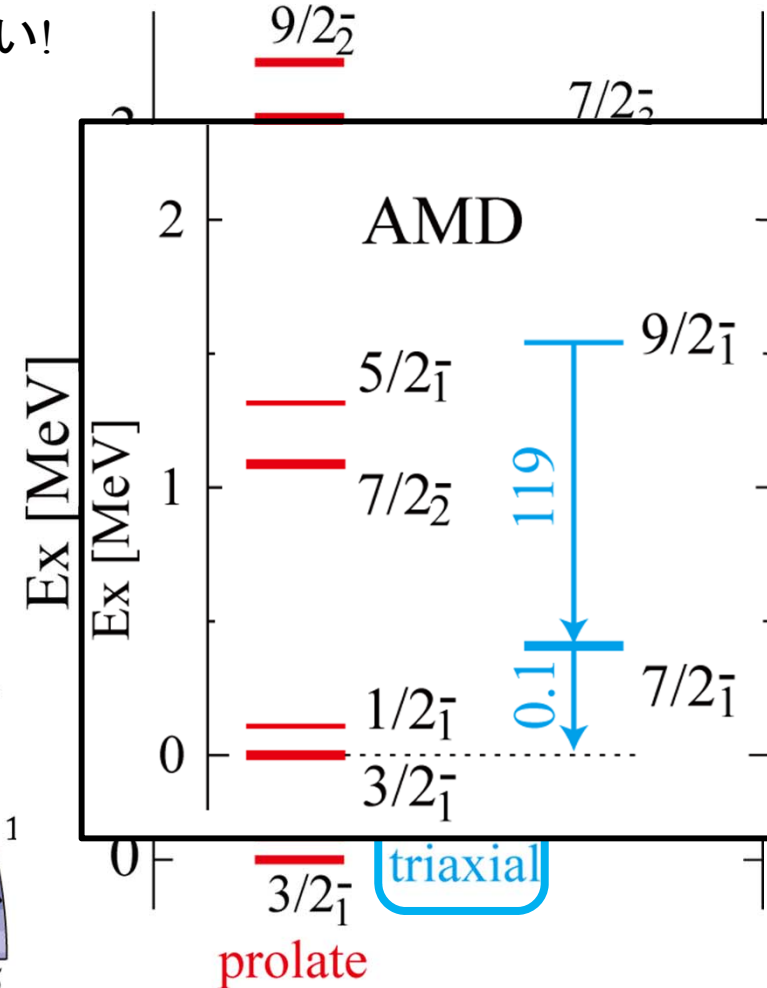
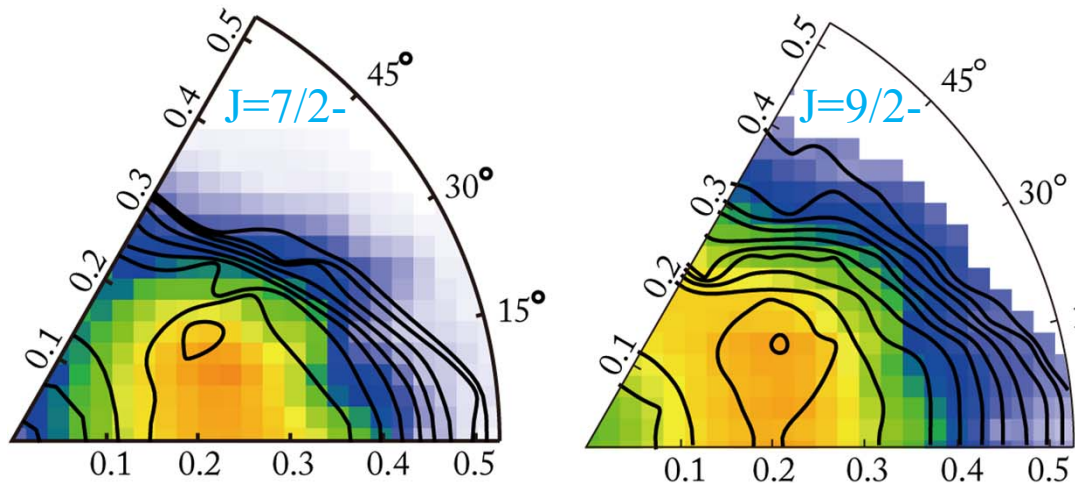


Discussions: Triaxial isomeric state at 319keV

Triaxial states ($7/2^-_1, 9/2^-_1$)

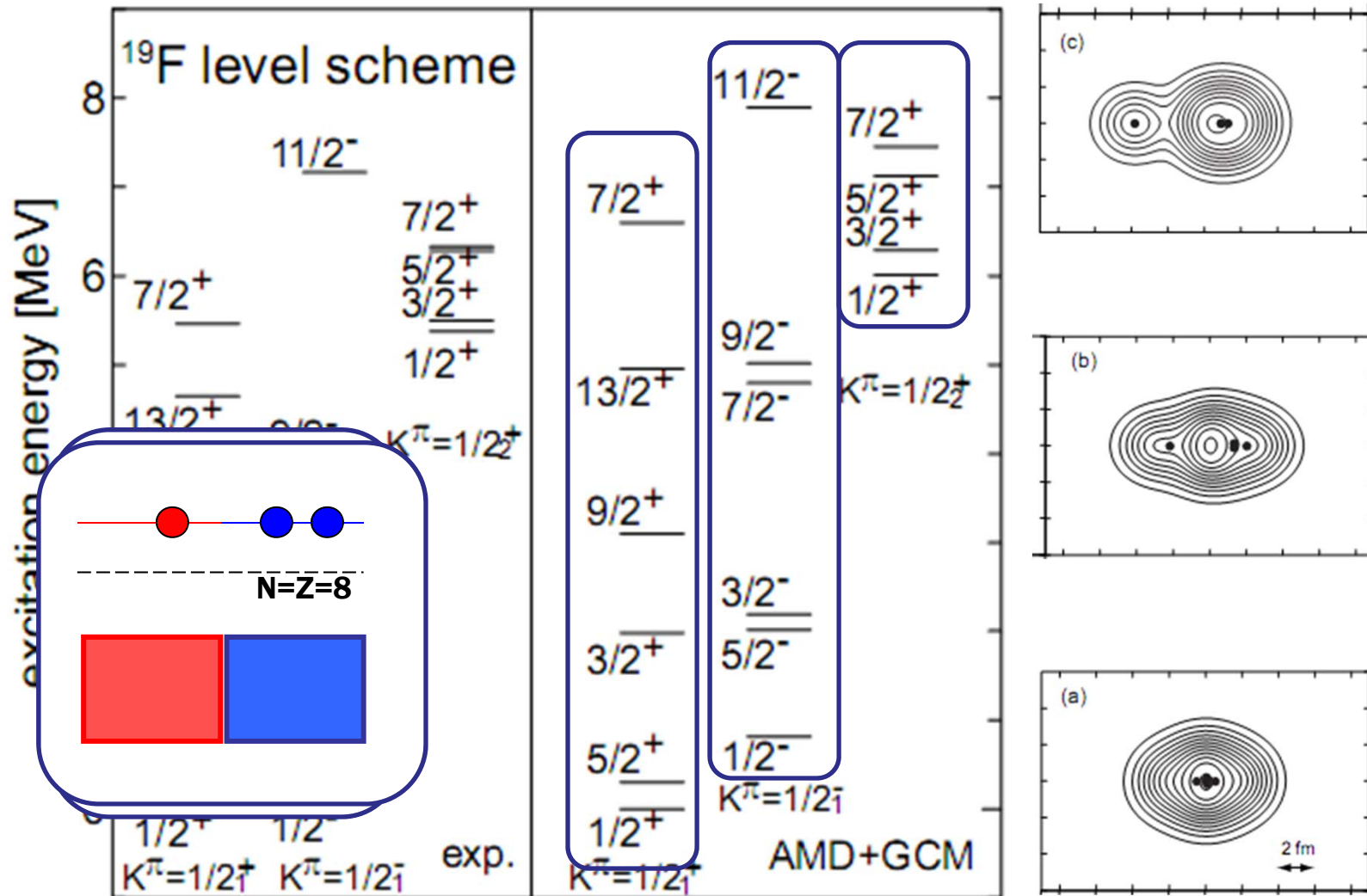
triaxial ($\gamma=30$ deg.) を中心に波動関数が分布(0p0h, 1p1h, 2p2h, ...の重ね合わせ)

- ▶ sphericalではないため、 $9/2^-_1 \rightarrow 7/2^-_1$ の遷移は強い!
- ▶ g.s. への遷移が弱いのは、次の2点に因る
 - (主成分となる)K量子数が大きく異なる
 - 変形が異なる
- ▶ $7/2^-_1$ のmagnetic momentは γ 変形にsensitiveでない
 ので、実験値はsphericalの根拠に必ずしも
 ならない ($\mu_{\text{exp}} = -1.11, \mu_{\text{tri}} = -1.21, \mu_{\text{sph}} = -1.34$)

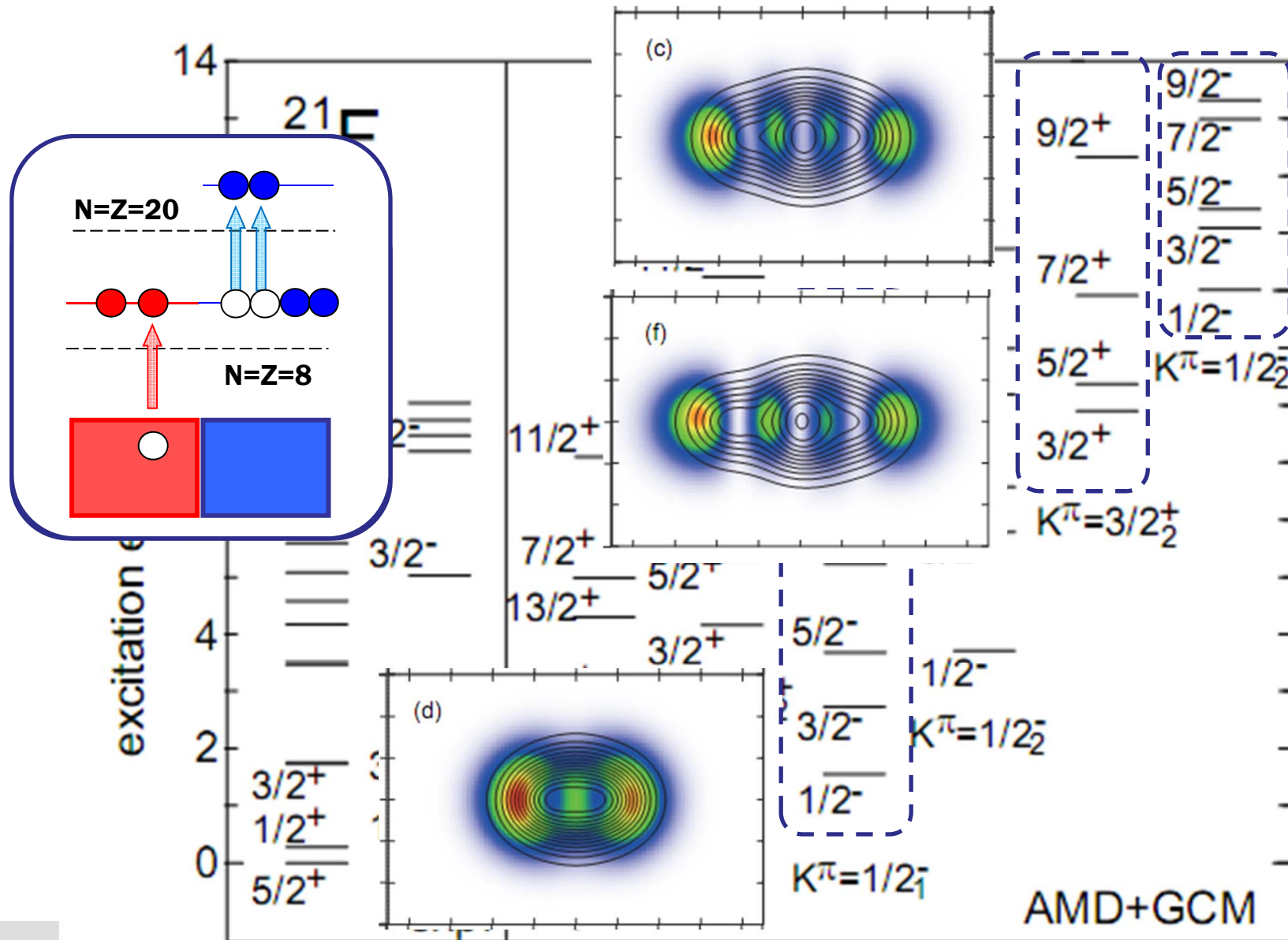


Molecular States of ^{19}F

A proton excitation causes strong a clustering



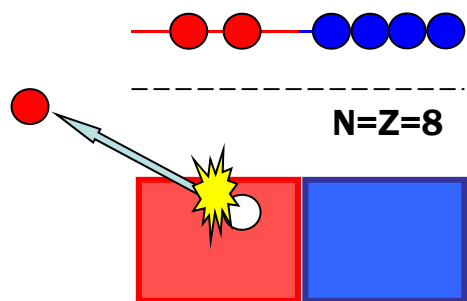
Molecular States of ^{21}F



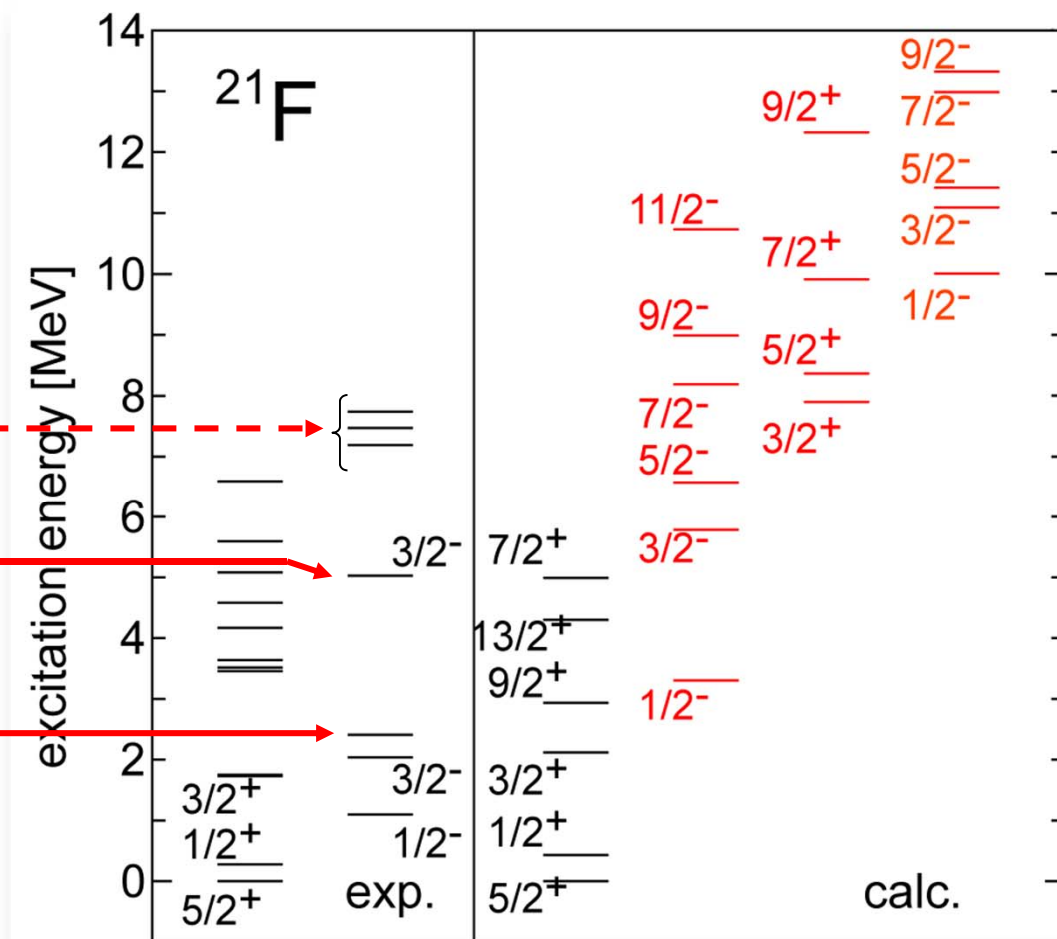
Results: Molecular-orbitals in ^{21}F

Populated directly by only
1p knockout from ^{22}Ne

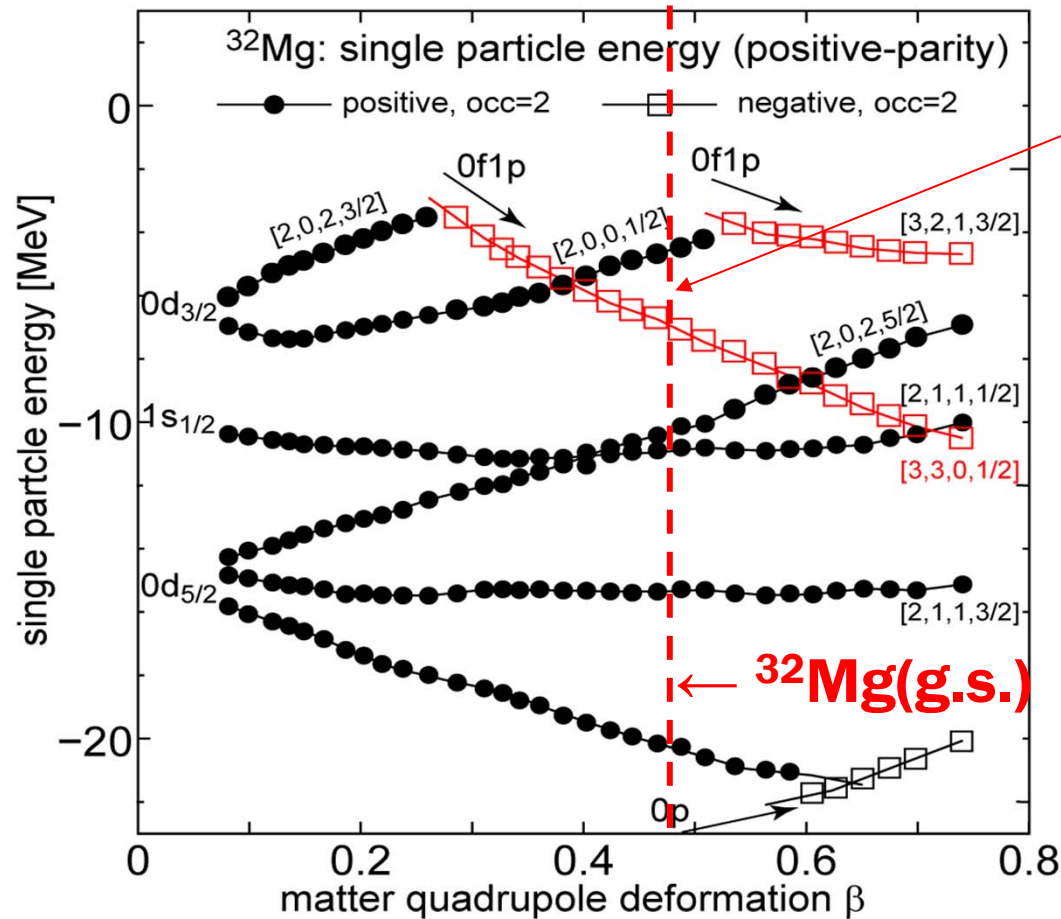
- G. Th. Kaschl, NPA155, 417 (1970).
- G. Mairle, et al., NPA363, 413 (1981).



They are the candidates of the
molecular states



Results: Evolution toward drip-line



Intruder orbital from pf-shell has large overlap with σ -orbital

The origin of the reduction of ex. energy

1. proton excitation from p to sd shell does not cost much energy due to strong a correlation.
2. It induces the strong deformation of system.
3. Strong deformation lowers s-orbital

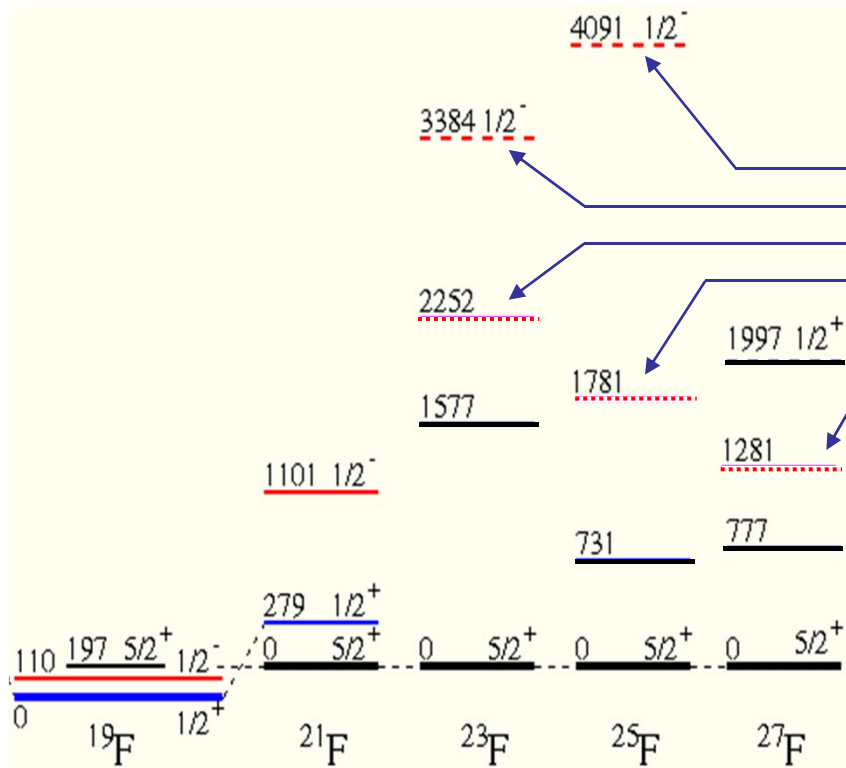


Molecular states with valence neutron in σ -orbital comes down.

- α cluster states with one or two neutrons in s-orbital come down rapidly.
- α cluster states with neutron $0h_{\omega}$ configuration monotonously go up.



Discussions: How to observe them

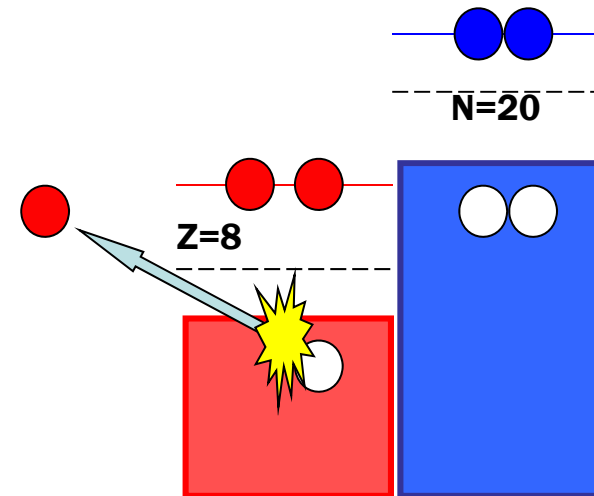


Low-lying states that are not described
psd and sdpf shell model are reported

• Z. Elekes, et al., PLB 599, 17 (2004).

$X(^{30}\text{Ne}, ^{29}\text{F}), X(^{28}\text{Ne}, ^{27}\text{F})$

- α and ^6He transfer on N isotopes
- 1p knockout from Ne isotopes



Summary

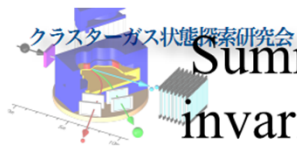
- Island of Inversion領域の高励起状態、非束縛状態の物理が現実的課題となりつつある
- Be同位体に類似の分子軌道が酸素、ネオンにも存在しそうである (幾つかの実験的傍証)
- 余剰中性子が特定のpf-shellを占有することで、クラスターの発達を促す
- その軌道は、Be同位体の σ 軌道に類似。同時にIsland of Inversionで主役となる軌道である
- Island of Inversion領域でのクラスター構造をF 同位体で検討
- Shell quenchによる、pf-shellのエネルギー低下、クラスターの発達による変形の増大が協同的に働き、クラスター状態が低励起状態に現れる可能性
- ^{28}Ne での $\alpha+^{24}\text{O}$ クラスター構造の検討 (原子軌道)



2: 励起状態のクラスター構造

N≠Z核のクラスター構造

SHARAQ, SAMRAI等の検出器群が動き始めることで、sd-shellでも高励起状態、共鳴状態の研究が実現する
励起状態に現れる様々なクラスター構造の研究が現実的な課題になる



Summary for experimental design of invariant mass measurement of $^{28}\text{Ne}^*$



- 1) α cluster resonance on ^{28}Ne
search for the resonance at α threshold energy at $E_x = 10.1$ MeV
for further description of cluster degree of freedom arise on n-rich nuclei
- 2) invariant mass measurement by detecting $^{24}\text{O} + \alpha$
Using SAMURAI spectrometer

Ne同位体の閾値を超える領域でのクラスター構造の研究が必要

確かに、 ^{26}Ne , ^{28}Ne の高励起状態に、クラスター状態が現れた記憶

