

AMDによるハイパー核構造研究

井坂 政裕^A

Collaborators:

本間裕明^A, 木村真明^{A,B}, 土手昭伸^C, 大西明^D
北大理^A, 北大創成^B, KEK^C, 京大基研^D

研究の背景: ハイパー核構造研究の可能性

pシェルΛハイパー核の研究

- 少数体問題の精密解法^[1]
- ΛN相互作用とG-matrixによる有効相互作用^[2]
- γ線分光実験によるデータの蓄積^[3]
→ ΛN 有効相互作用の理解が進展

核構造研究

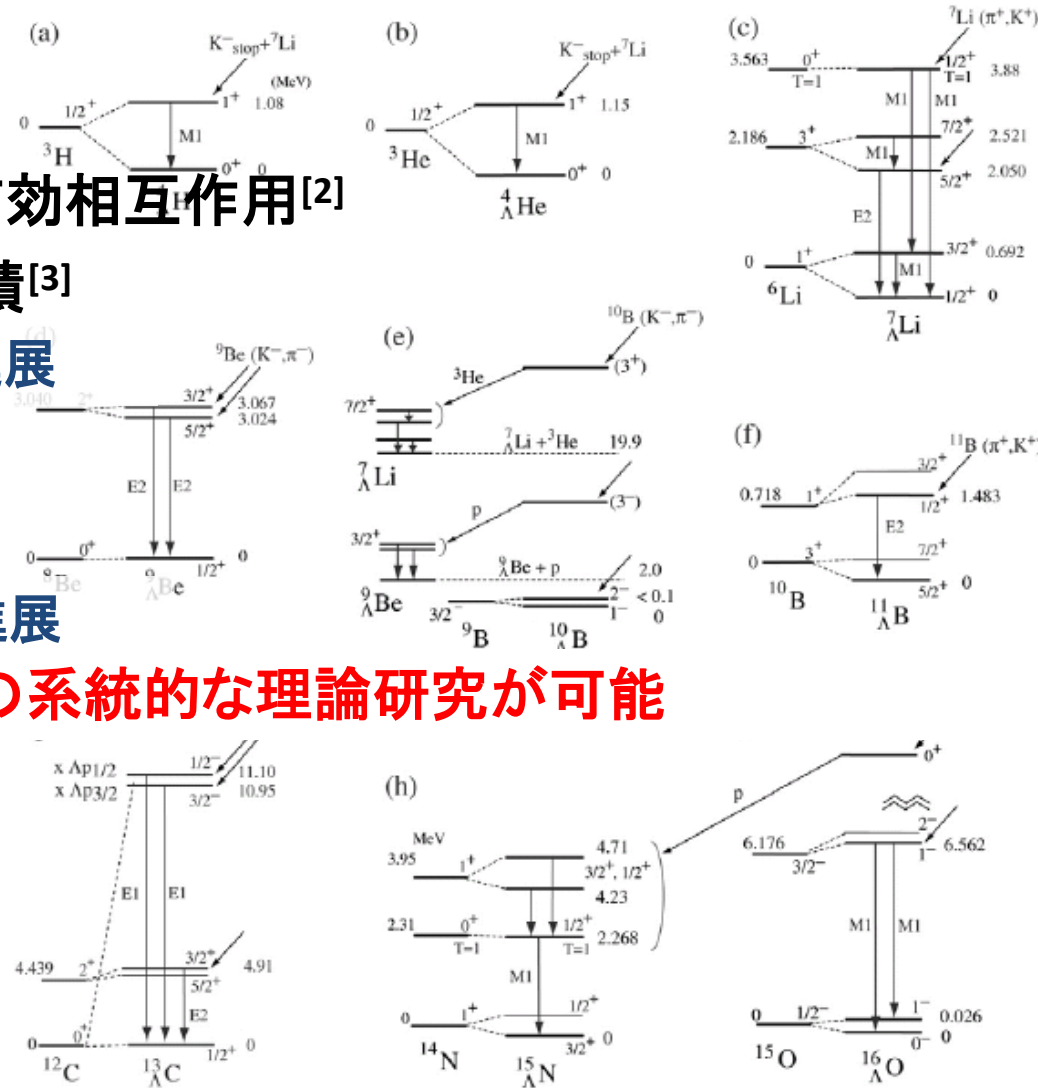
- AMD模型による核構造研究
→ 核多体系を扱う理論模型の進展

Λハイパー核構造の系統的な理論研究が可能

J-PARCやJLab等での実験

- 様々なΛハイパー核を生成
 - sdシェルΛハイパー核
 - 中性子過剰Λハイパー核 など

sdシェル領域や中性子過剰領域のハイパー核構造研究



[1] E. Hiyama, NPA **805** (2008), 190c,

[2] Y. Yamamoto, et al., PTP Suppl. **117** (1994), 361., [3] O. Hashimoto and H. Tamura, PPNP **57** (2006), 564.

p - sd シェル・中性子過剰 Λ ハイパー核構造

◆ 芯核の構造

- p シェル核: 発達したクラスター構造を持つ状態が多数存在
- sd シェル核: 基底・低励起状態に様々な構造が共存
 - シェル構造とクラスター構造
 - 非軸対称変形を含め、様々な変形
- 中性子過剰核: exoticなクラスター状態

- 芯核の構造によって Λ 粒子による構造変化が異なり、励起スペクトル、 $B(E2)$ 、変形度の変化に違いが現れるのではないかな？
- p 軌道の Λ 粒子による変形の変化は、 s 軌道の場合と異なるのではないかな？
- Exoticなクラスター状態に Λ 粒子が加わることで、大きな構造変化が期待できる

研究の主旨

◆ 研究目的

- ハイペロン(Λ 粒子)のもたらす核構造の変化を理論的に解明し、その変化を通して原子核の構造・性質を解明する

◆ 方針

- 近年のハイパー核物理・原子核物理の進展を踏まえて定量的で詳細なハイパー核の構造研究を行う
 - ΛN 有効相互作用の理解の進展
 - 核子多体系を記述する理論模型の発展
 - J-PARCやJLabでの実験

◆ 手法

- AMD模型をハイパー核に拡張
芯核のシェル構造・クラスター構造や変形を仮定せずに記述可能
- ΛN 有効相互作用(YNG等)

Theoretical framework: HyperAMD

We extended the AMD to hypernuclei

HyperAMD (Antisymmetrized Molecular Dynamics for hypernuclei)

◆ Hamiltonian

$$\hat{H} = \hat{T}_N + \hat{V}_{NN} + \hat{T}_\Lambda + \hat{V}_{\Lambda N} \quad \text{NN: Gogny D1S} \\ \Lambda\text{N: YNG interaction (Central force)}^{[1]}$$

◆ Wave function

● Nucleon part: Slater determinant

Spatial part of single particle w.f. is described as Gaussian packet

$$\varphi_N(\vec{r}) = \frac{1}{\sqrt{A!}} \det[\varphi_i(\vec{r}_j)] \\ \varphi_i(r) \propto \exp\left[-\sum_{\sigma=x,y,z} v_\sigma (r - Z_i)_\sigma^2\right] \chi_i \eta_i \quad \chi_i = \alpha_i \chi_\uparrow + \beta_i \chi_\downarrow$$

● Single particle w.f. of Λ hyperon:

Superposition of Gaussian packets

$$\varphi_\Lambda(r) = \sum c_m \varphi_m(r) \\ \varphi_m(r) \propto \exp\left[-\sum_{\sigma=x,y,z} \mu v_\sigma (r - z_m)_\sigma^2\right] \chi_m \quad \chi_m = a_m \chi_\uparrow + b_m \chi_\downarrow$$

● Total w.f.:

$$\psi(\vec{r}) = \sum_m c_m \varphi_m(r_\Lambda) \otimes \frac{1}{\sqrt{A!}} \det[\varphi_i(\vec{r}_j)]$$

Theoretical Framework (AMD^{[1],[2]})

◆ Procedure of the calculation

Variational Calculation

- Imaginary time development method
- Variational parameters: $X_i = Z_i, z_i, \alpha_i, \beta_i, a_i, b_i, v_i, c_i$

$$\frac{dX_i}{dt} = \frac{\kappa}{\hbar} \frac{\partial H^\pm}{\partial X_i^*} \quad \kappa < 0$$

Angular Momentum Projection

$$\left| \Phi_K^s; JM \right\rangle = \int d\Omega D_{MK}^{J*}(\Omega) R(\Omega) \left| \Phi^{s+} \right\rangle$$

Generator Coordinate Method(GCM)

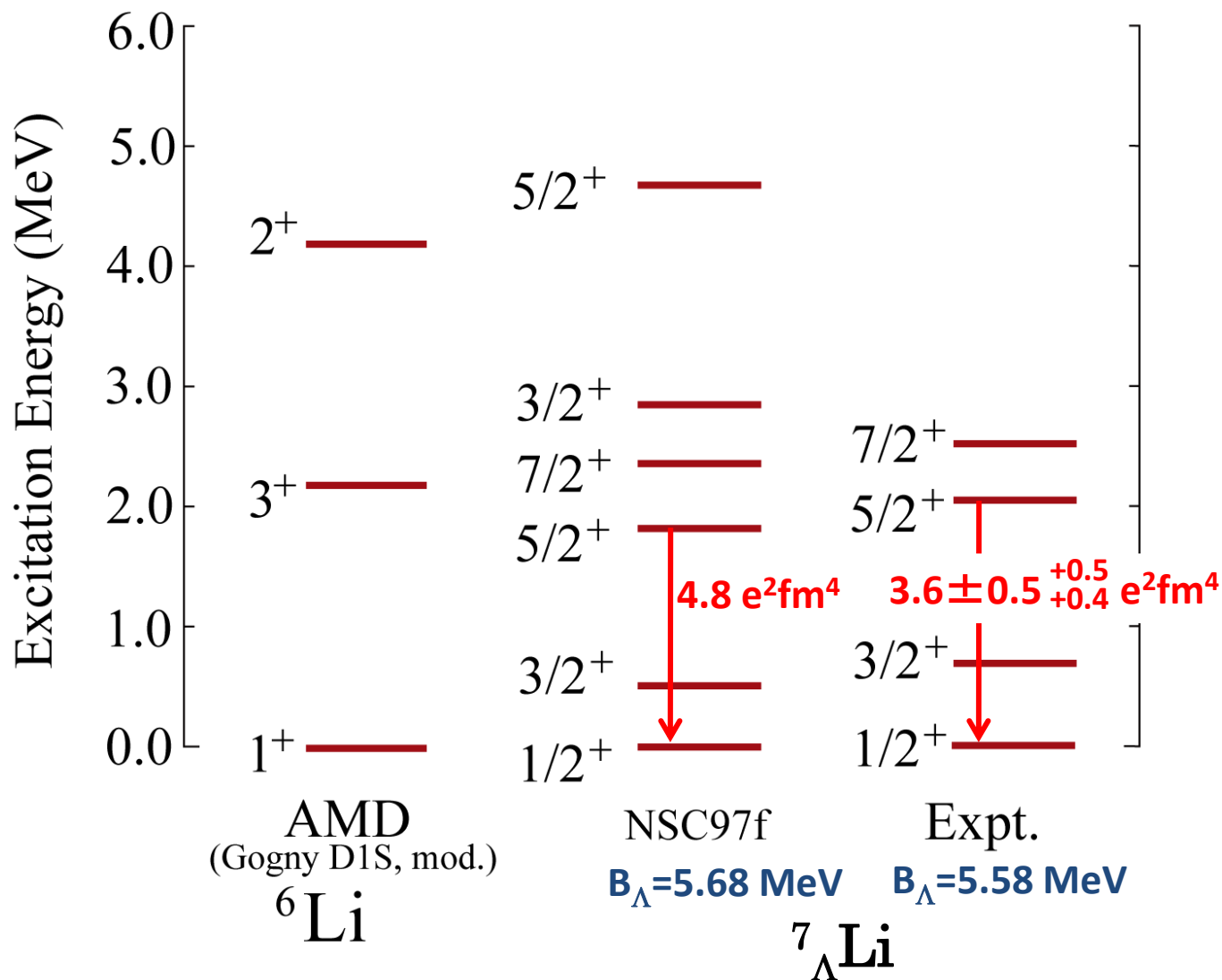
- Superposition of the w.f. with different configuration
- Diagonalization of $H_{sK,s'K'}^{J\pm}$ and $N_{sK,s'K'}^{J\pm}$

$$H_{sK,s'K'}^{J\pm} = \left\langle \Phi_K^s; J^\pm M \left| \hat{H} \right| \Phi_{K'}^{s'}; J^\pm M \right\rangle \quad \left| \Psi^{J\pm M} \right\rangle = \sum_{sK} g_{sK} \left| \Phi_K^s; J^\pm M \right\rangle$$
$$N_{sK,s'K'}^{J\pm} = \left\langle \Phi_K^s; J^\pm M \left| \Phi_{K'}^{s'}; J^\pm M \right\rangle$$

[1] Y. Kanada-En'yo, H. Horiuchi and A. Ono, Phys. Rev. C **52** (1995), 628.

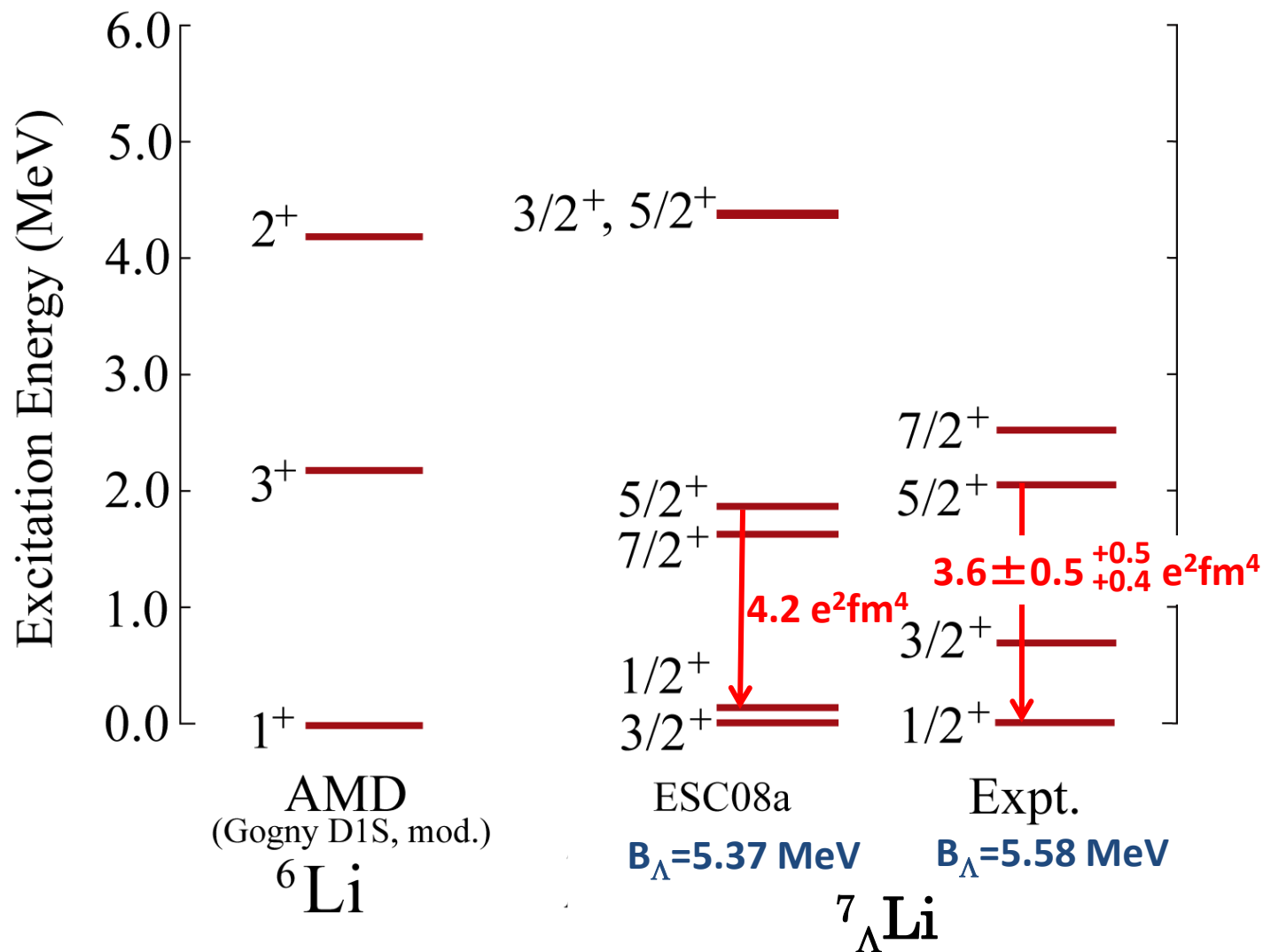
[2] H. Matsumiya, K. Tsubakihara, M. Kimura, A. Doté and A. Ohnishi, To be submitted

AMD模型の適用例(${}^7_{\Lambda}\text{Li}$)



- NSC97f相互作用, ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ の $B_{\Lambda}(\text{Expt.})$ を再現する k_F を採用 $k_F = 0.987 \text{ fm}^{-1}$

AMD模型の適用例(${}^7_{\Lambda}\text{Li}$)



● ESC08a interaction^[1]

[1] Y. Yamamoto, et al., PTPS 185, (2010) 72.

具体的課題(進行中を含む)

◆ p - sd シェル Λ ハイパー核

- シェル構造・クラスター構造により構造変化はどのように異なるか？

例: $^{21}_{\Lambda}\text{Ne}$

- Λ による原子核の変形の変化

– 軸対称変形・軸対称なクラスター構造

例: $^9_{\Lambda}\text{Be}$, $^{13}_{\Lambda}\text{C}$, $^{20}_{\Lambda}\text{Ne}$, $^{21}_{\Lambda}\text{Ne}$

– 三軸非対称変形

例: $^{25}_{\Lambda}\text{Mg}$

- Λ の軌道運動により原子核の変形を見る

例: $^{25}_{\Lambda}\text{Mg}$ ($^{24}\text{Mg} \otimes \Lambda p$)

◆ 中性子過剰 Λ ハイパー核

- Exoticなクラスター構造ではどのような構造変化が起こるのか？

例: $^{12}_{\Lambda}\text{Be}$ のparity reversion

Deformation change by Λ hyperon in p - sd shell Λ hypernuclei

目的

s 軌道と p 軌道の Λ 粒子が加わることで、原子核の変形がそれぞれどのように変化するのかを明らかにする

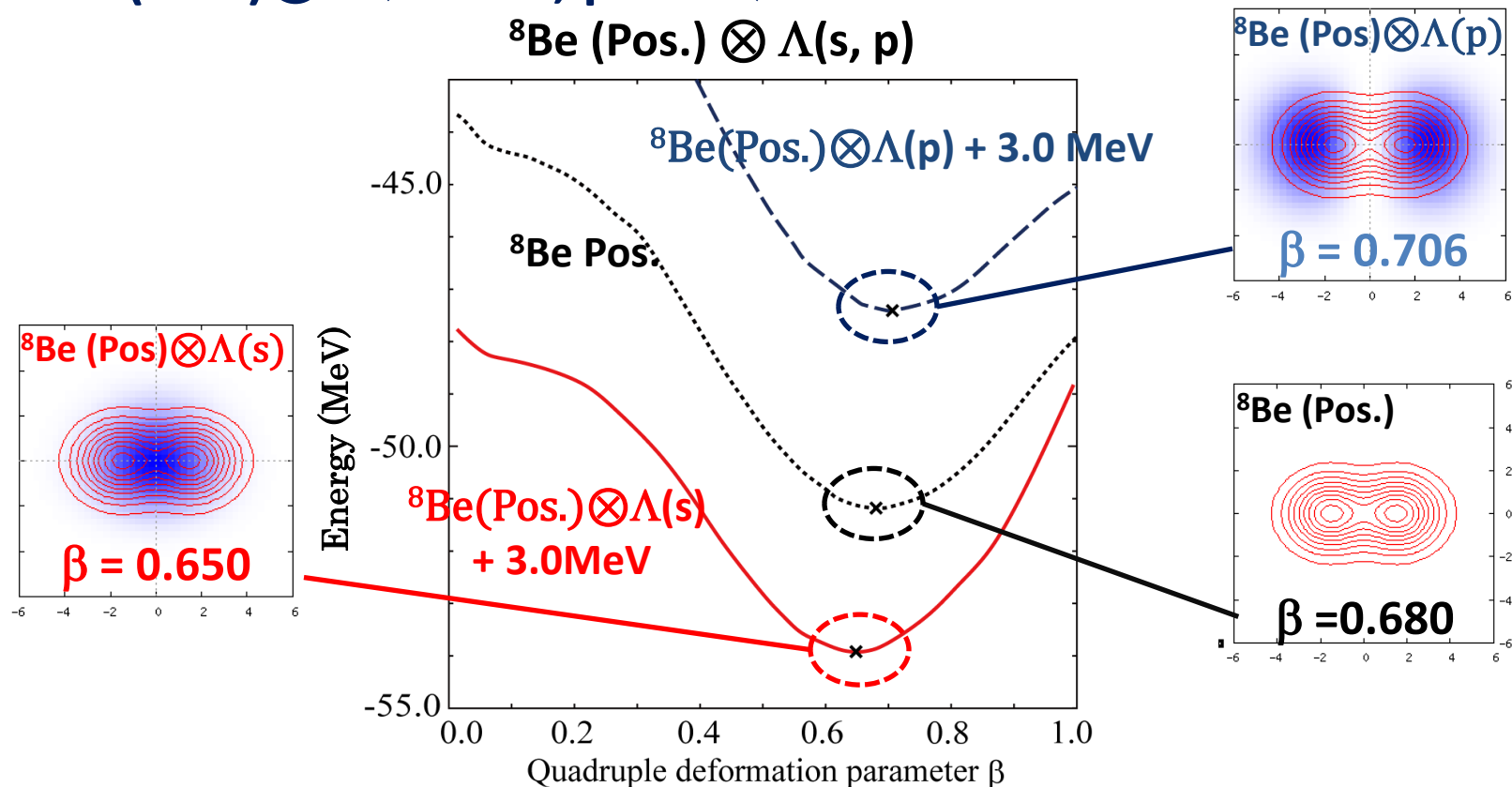
Example

${}^9_{\Lambda}\text{Be}$, ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$, ${}^{20}_{\Lambda}\text{Ne}$, ${}^{21}_{\Lambda}\text{Ne}$

M. Isaka, M. Kimura, A. Dote and A. Ohnishi, PRC**83** (2011), 044323.

Deformation change in ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$

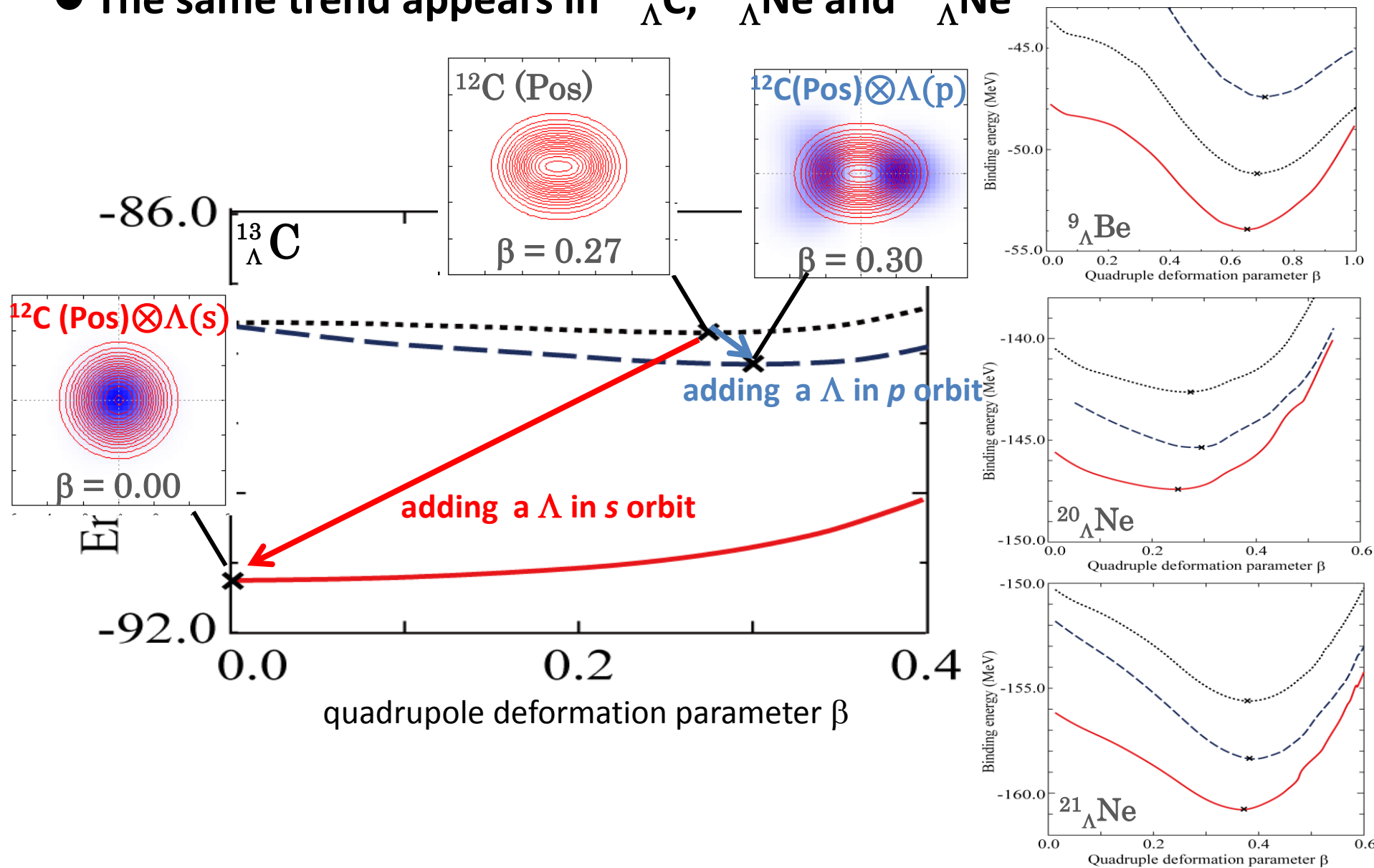
◆ ${}^8\text{Be}(\text{Pos.}) \otimes \Lambda$ (s orbit, p orbit)



- Λ in s orbit *reduces* the distance between 2α clusters
 —→ reduction of the deformation
- Λ in p orbit *enhances* the distance between 2α clusters
 —→ enhancement of the deformation

Deformation change in other light hypernuclei

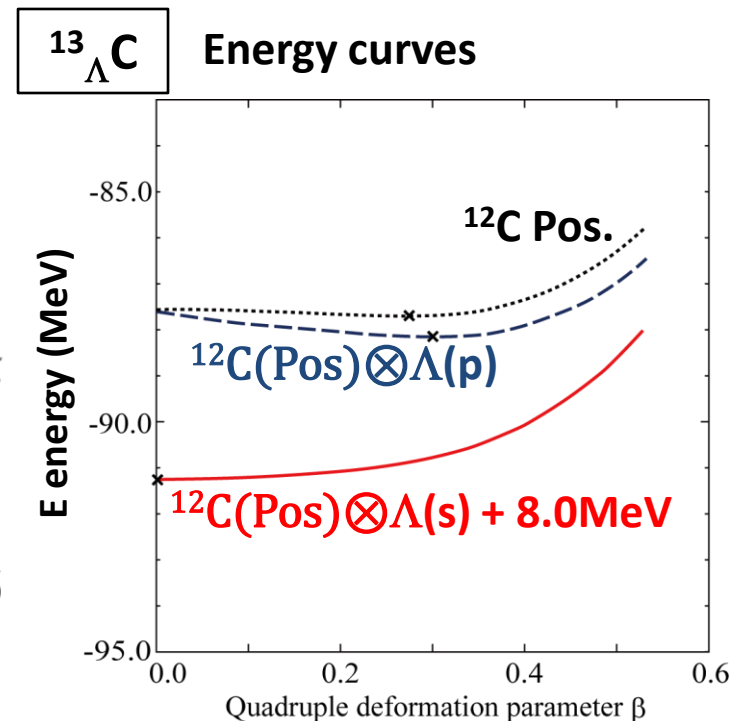
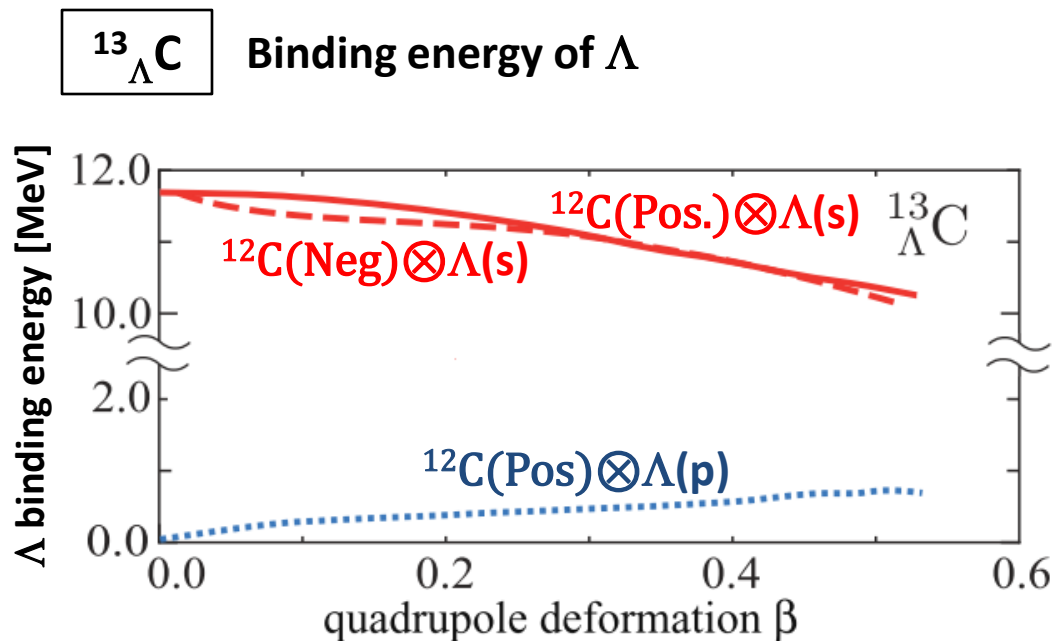
- The same trend appears in $^{13}_{\Lambda}\text{C}$, $^{20}_{\Lambda}\text{Ne}$ and $^{21}_{\Lambda}\text{Ne}$



Reason for the deformation change

◆ Binding Energy of Λ hyperon

- Λ hyperon in ***s* orbit** is deeply bound at **smaller deformation**
- Λ hyperon in ***p* orbit** is deeply bound at **larger deformation**



Λ hyperon in *p* orbit enhances the nuclear deformation, while Λ hyperon in *s* orbit reduces it

Parity reversion of the $^{12}_{\Lambda}\text{Be}$ ground state

目的

Λ 粒子によって、 ^{11}Be のparity-inverted ground stateがどのように変化するのかを明らかにする

Example

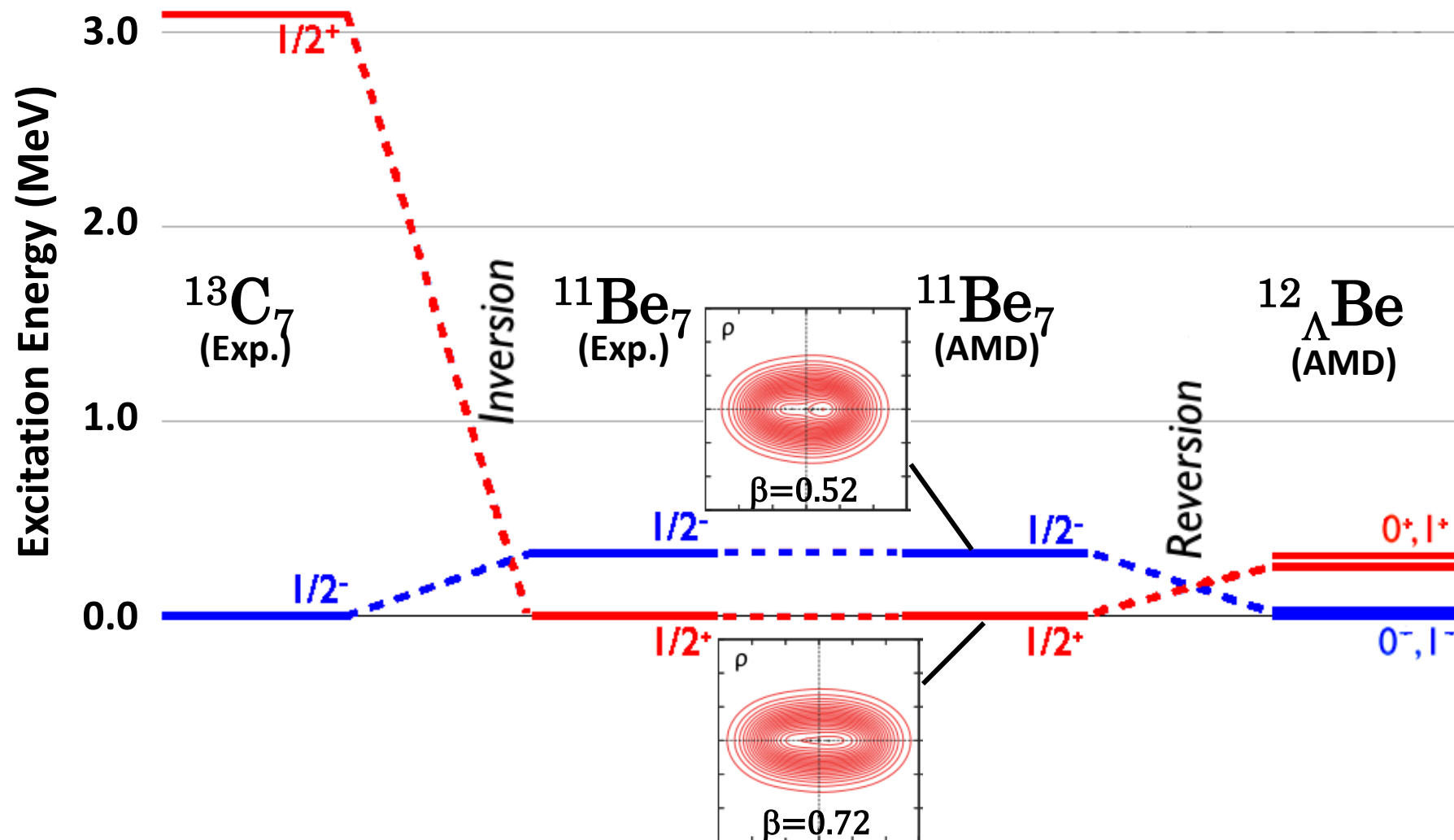
$^{12}_{\Lambda}\text{Be}$ の基底状態と第1励起状態
(ほぼ縮退した $1/2^+$ と $1/2^-$ 状態)

H. Homma, M. Isaka, and M. Kimura

Parity reversion of $^{12}_{\Lambda}\text{Be}$

◆ Ground state of $^{12}_{\Lambda}\text{Be}$

- The **parity reversion** of the $^{12}_{\Lambda}\text{Be}$ g.s. occurs by the Λ hyperon



Shell and cluster states of $^{21}_{\Lambda}\text{Ne}$

目的

Λ 粒子により、クラスター構造が**発達した回転帯**と**未発達な回転帯**では
 Λ 粒子の束縛エネルギーや**核半径の収縮**にどの程度の違いがあるか
明らかにする

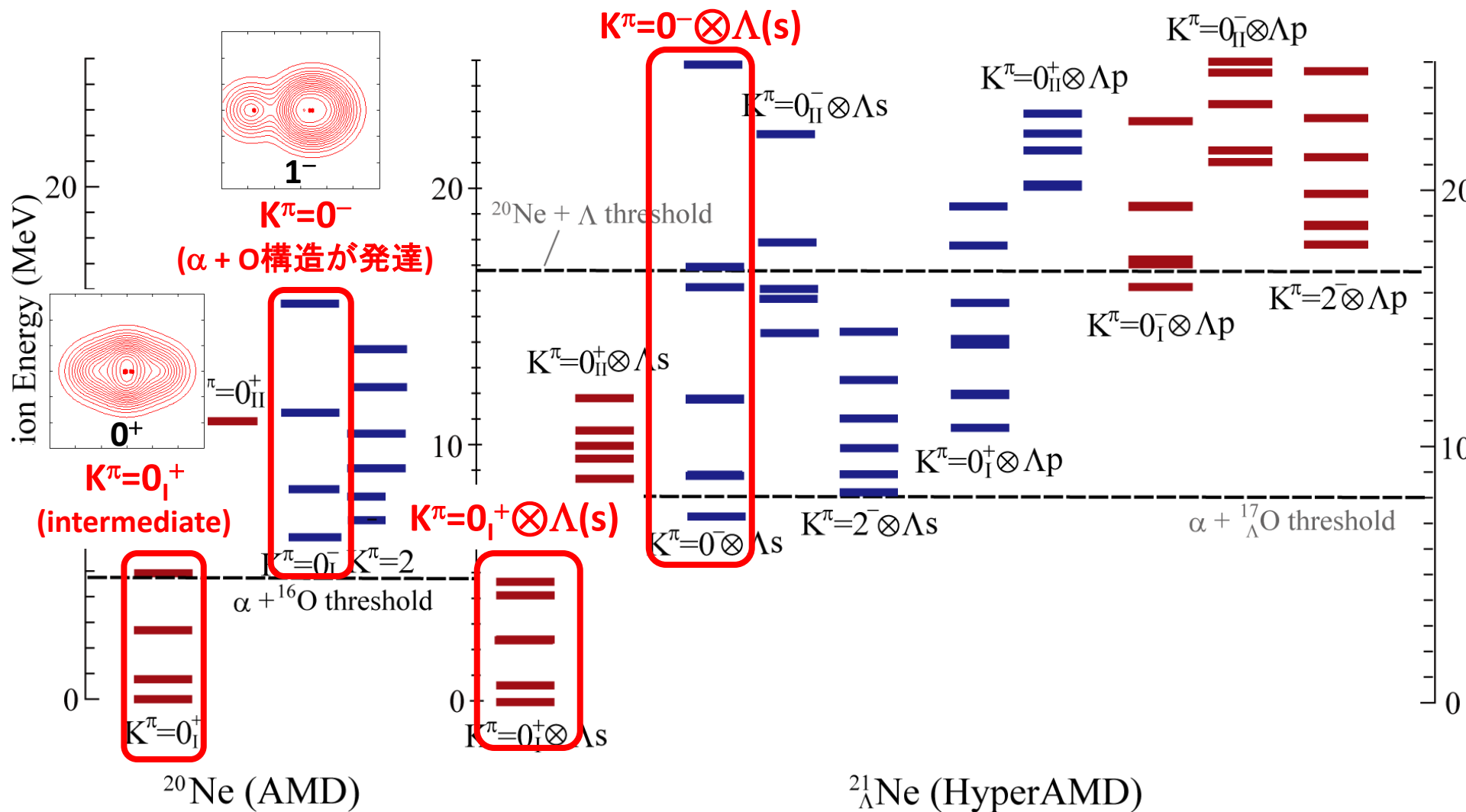
Example: $^{21}_{\Lambda}\text{Ne}$

$K^{\pi}=0_1^{+}$ バンド ... (シェルの構造) $\otimes \Lambda s$

$K^{\pi}=0^{-}$ バンド ... (発達した $\alpha + ^{16}\text{O}$ 構造) $\otimes \Lambda s$

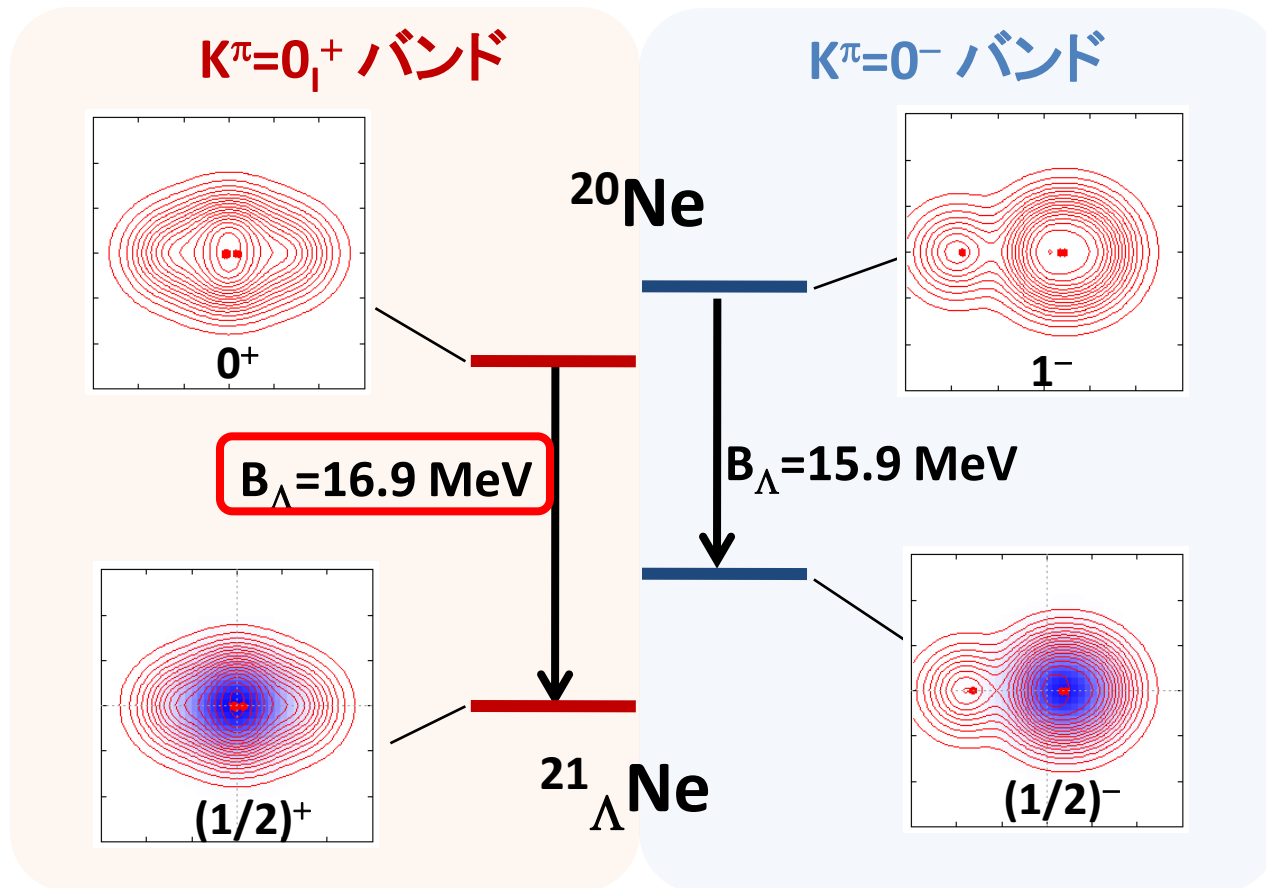
M. Isaka, M. Kimura, A. Dote and A. Ohnishi, PRC**83** (2011), 054304.

$^{21}_{\Lambda}\text{Ne}$ の励起スペクトル



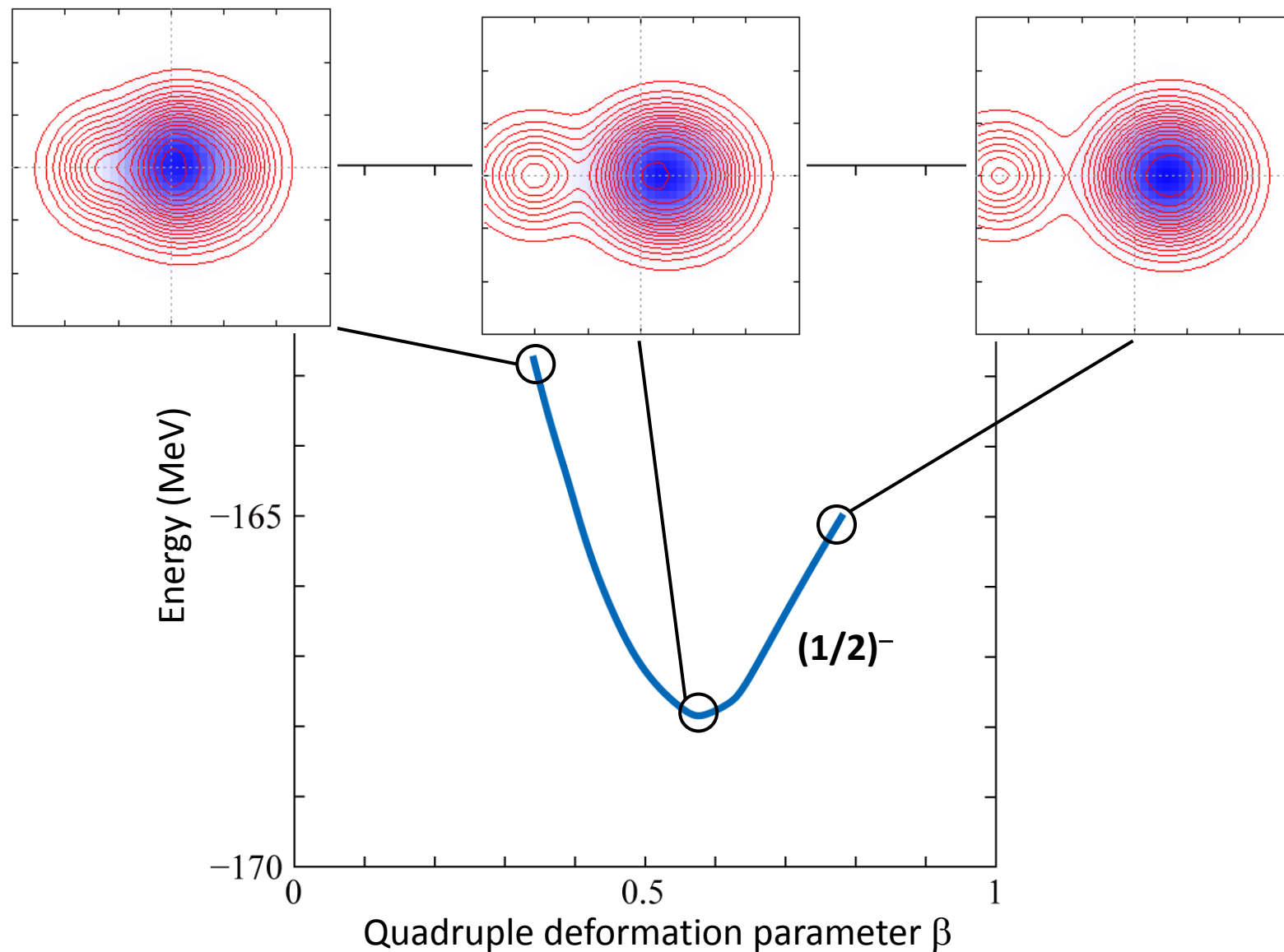
構造による違い： Λ 粒子の束縛エネルギー

- 発達した $\alpha + \text{O}$ 状態よりも、**クラスターが未発達な状態の方が深く束縛する**
- $\alpha + \text{O}$ クラスター状態では、 **Λ 粒子が O クラスター側に偏って存在**
→ **$\alpha + \text{O}$ 状態の束縛が浅くなる**



構造による違い： Λ 粒子の束縛エネルギー

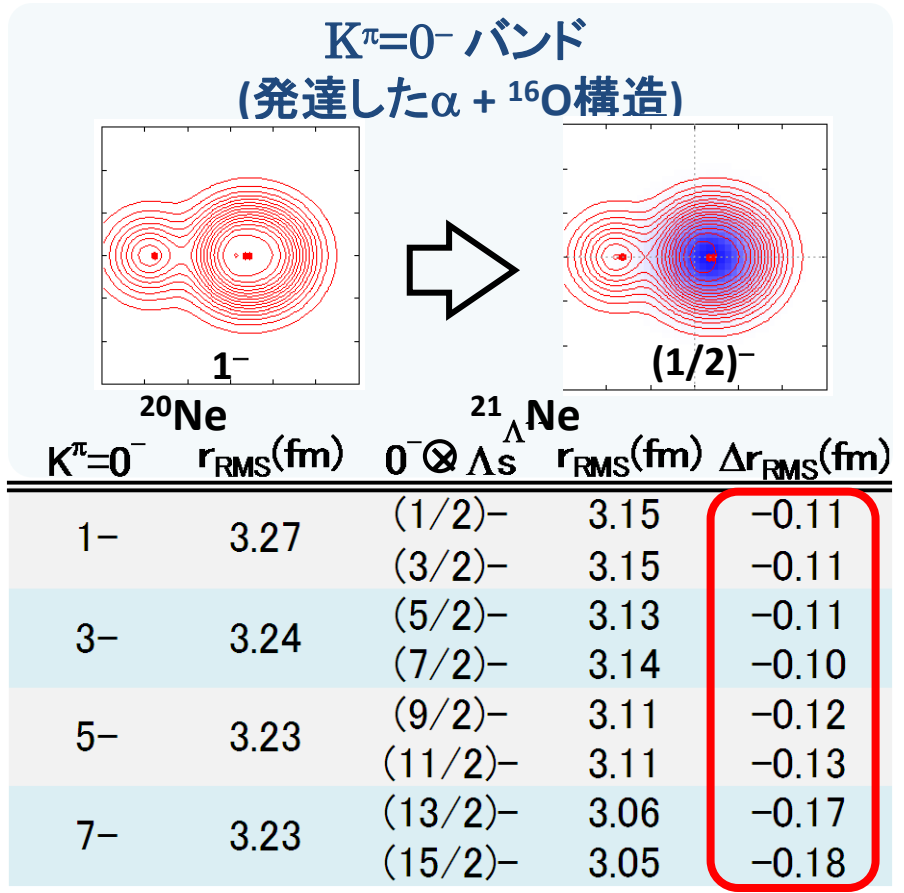
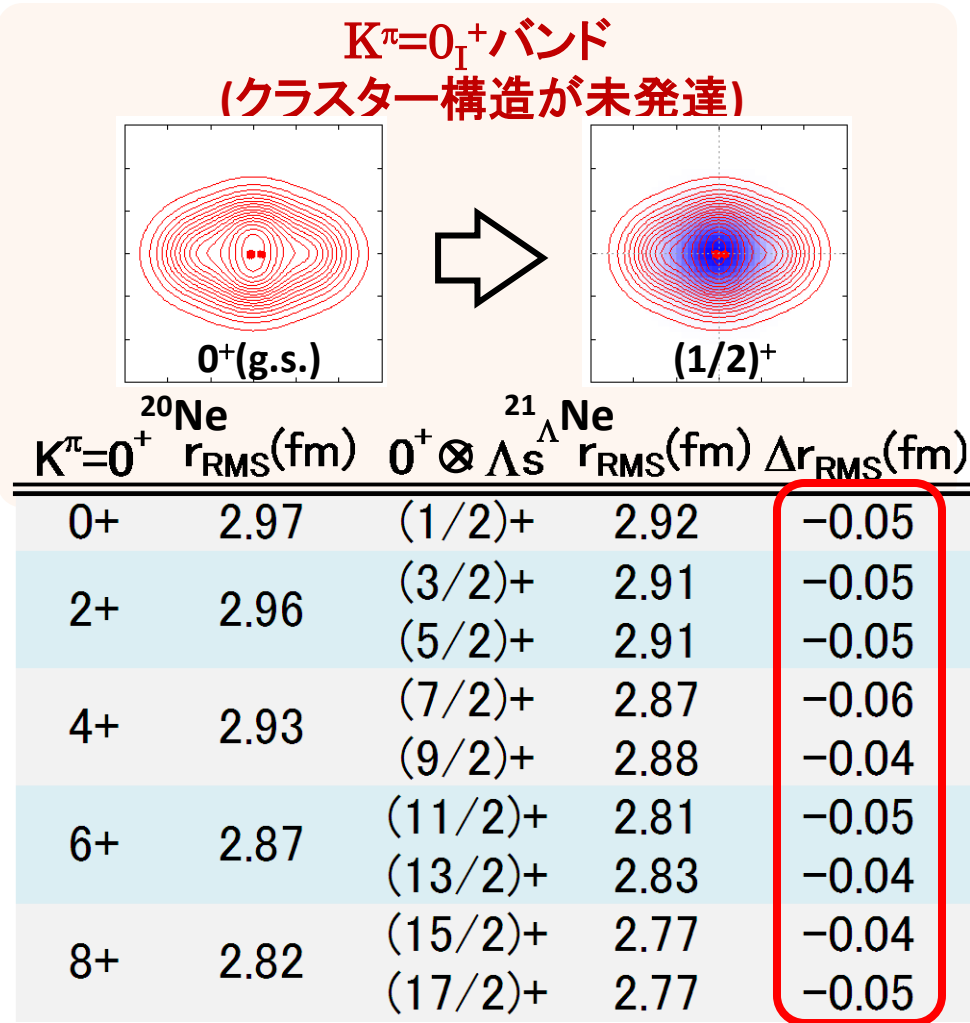
◆ $1^- \otimes \Lambda_s$ state



構造による違い: 核半径

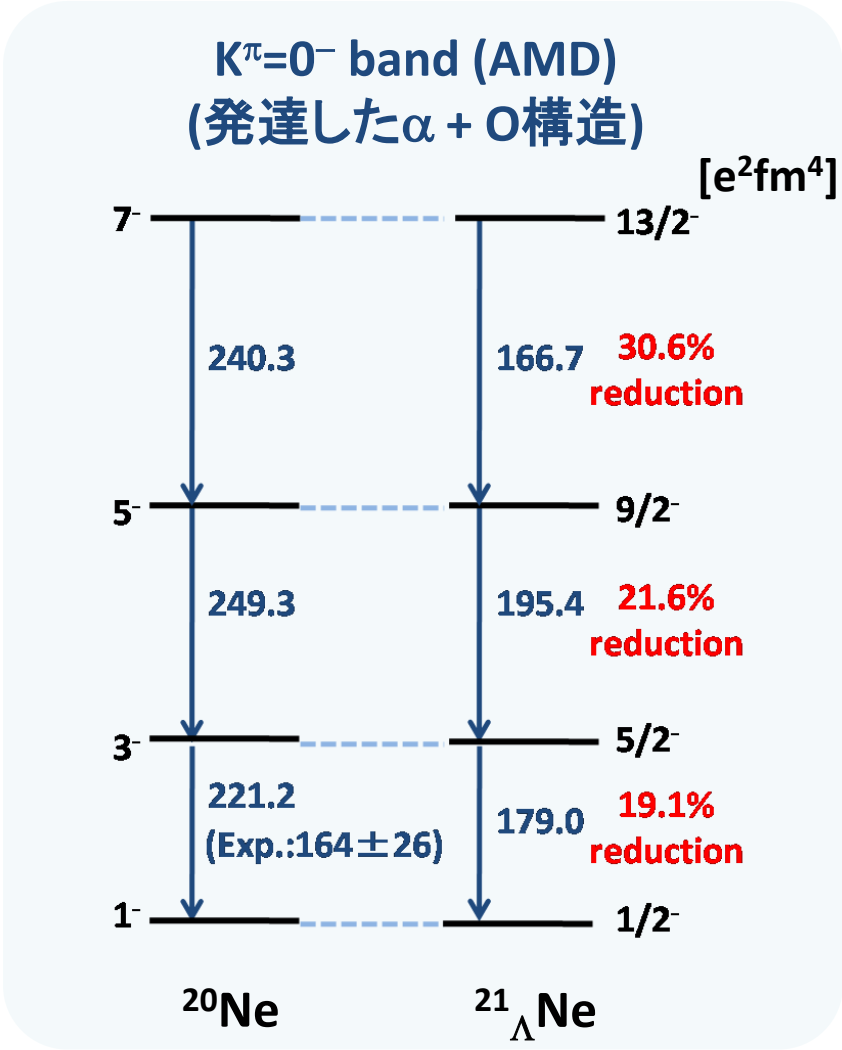
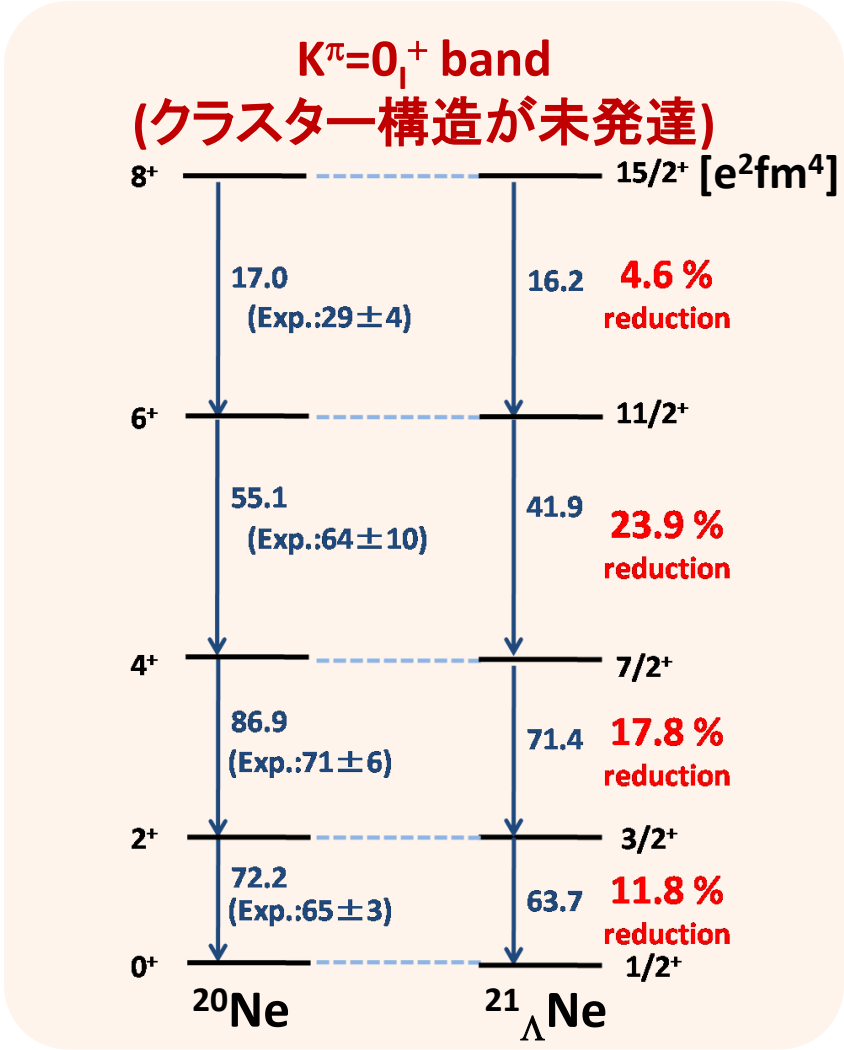
◆ 核子部分の平均自乗半径

- $\alpha + \text{O}$ 構造が発達した $K^\pi=0^-$ バンドの方がより平均自乗半径が小さくなる
→ 主にクラスター間距離の収縮から



構造による違い: B(E2) の変化

◆ intra-band B(E2) reduction



$K^\pi=0^-$ バンドの方がB(E2) reductionの程度が大きい

$^{25}_{\Lambda}\text{Mg}$ における三軸非対称変形の変化

目的

Λ 粒子によって、三軸非対称変形をした原子核の励起スペクトルや $B(E2)$ がどのように変化するかを明らかにする

Example: $^{25}_{\Lambda}\text{Mg}$

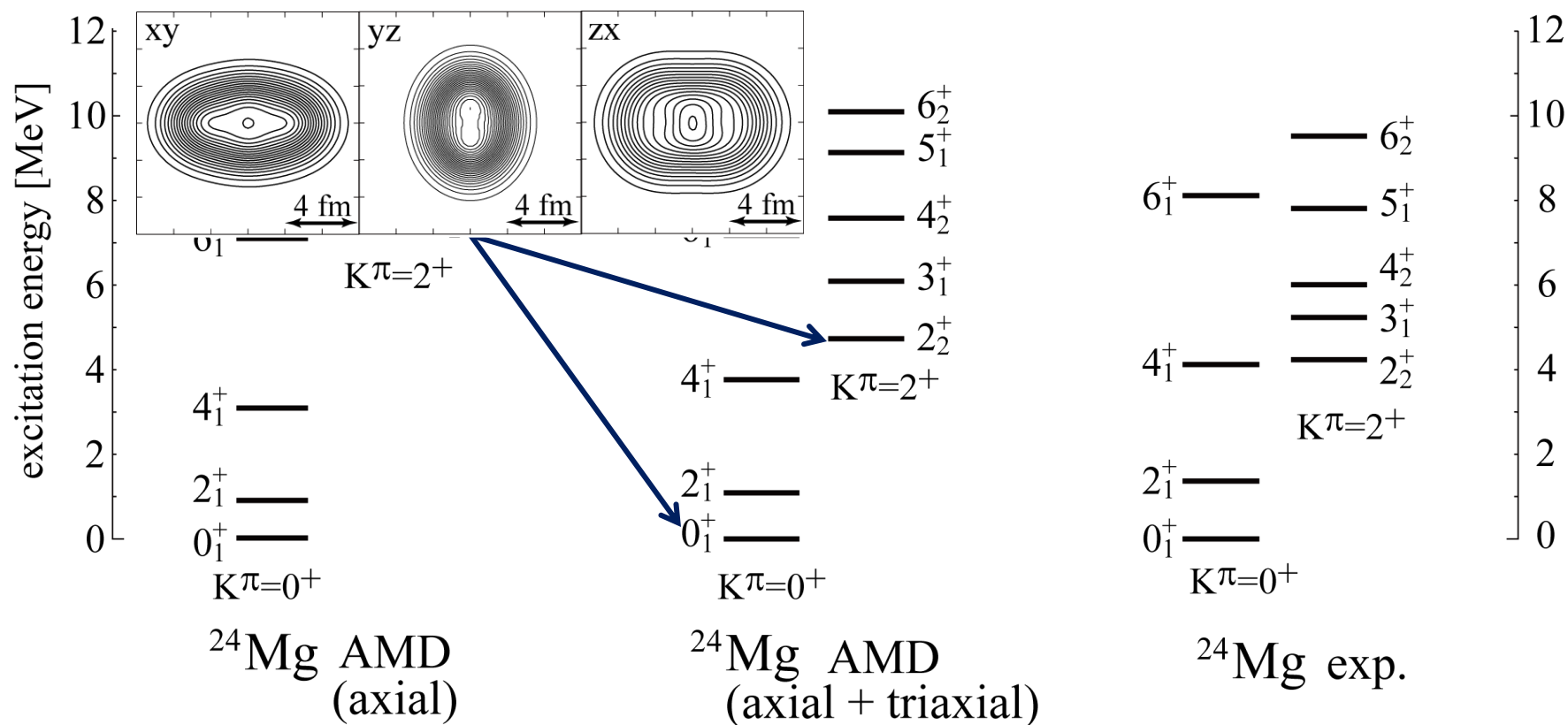
$K^{\pi}=0^{+}$ バンド ... (基底回転帯) $\otimes \Lambda s$

$K^{\pi}=2^{+}$ バンド ... (三軸非対称変形にsensitiveな回転帯) $\otimes \Lambda s$

M. Isaka, H. Homma, M. Kimura, A. Dote and A. Ohnishi, PRC in press

Structure of ^{24}Mg

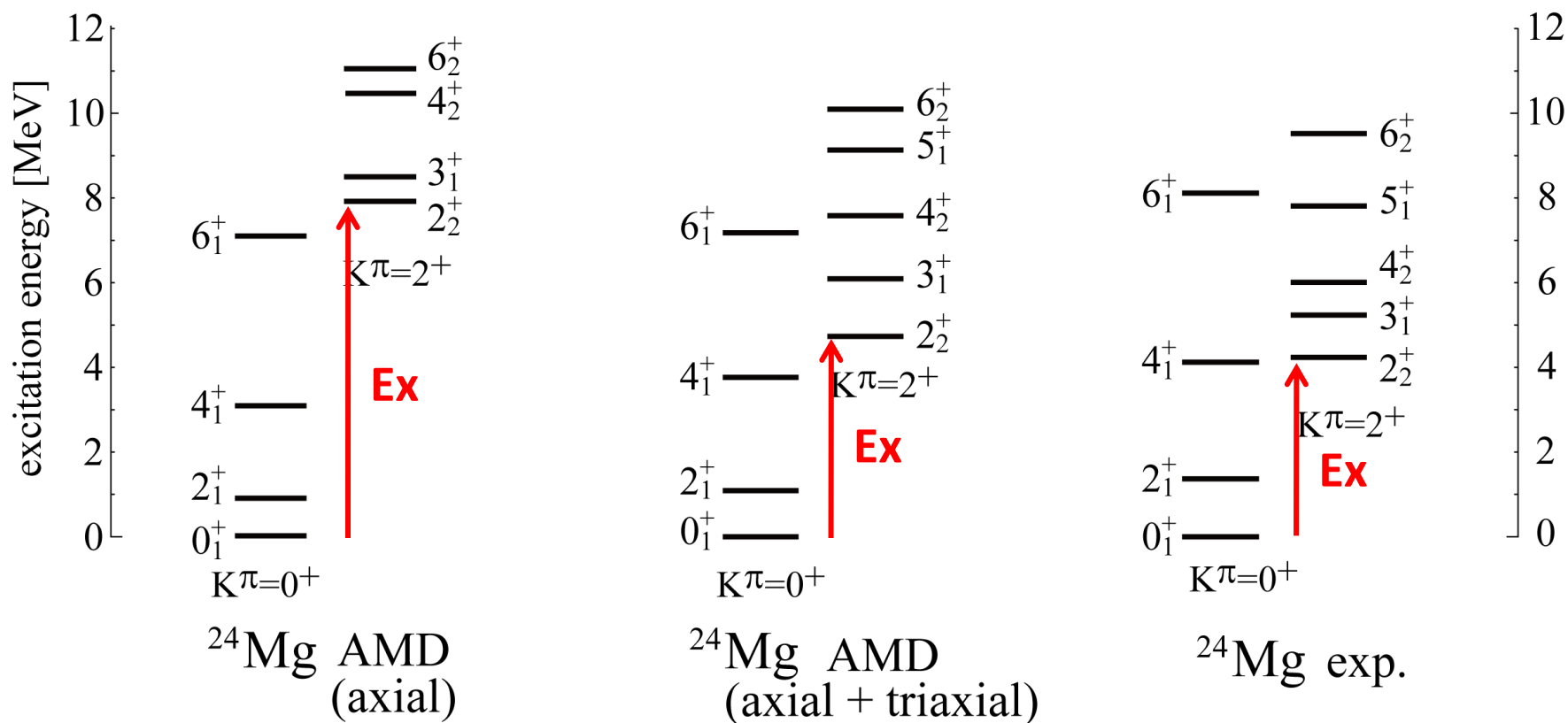
- Large deformation . . . Candidate of **triaxial deformed** nuclei
- Excitation energy of **$K\pi=2^+$ band** depends on the triaxial deformation ^[1,2]



How does the Λ hyperon affect and modify triaxial deformed nuclei ?

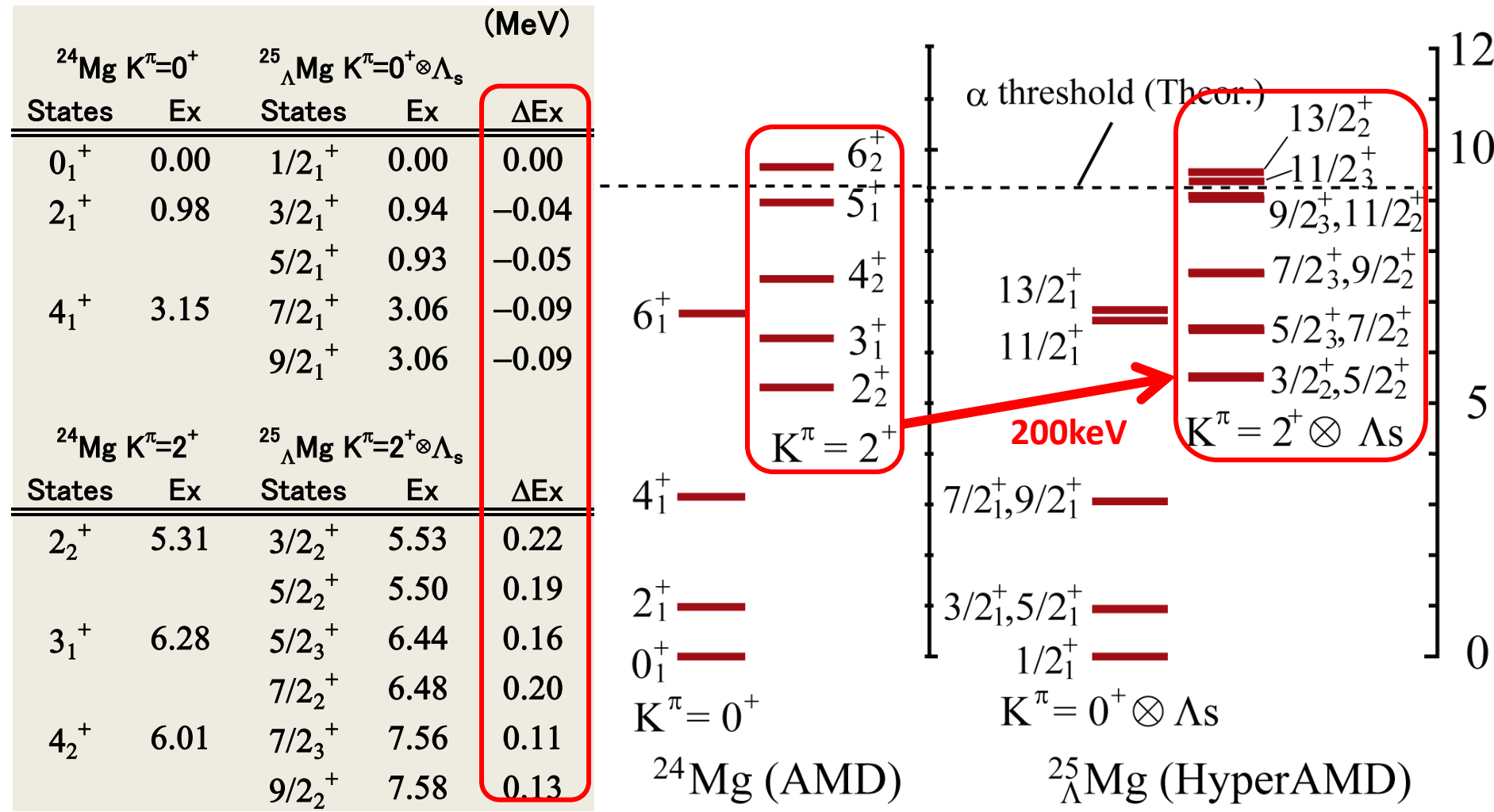
Structure of ^{24}Mg

- Large deformation . . . Candidate of **triaxial deformed** nuclei
- Excitation energy of **$K^\pi=2^+$ band** depends on the triaxial deformation ^[1,2]



How does the Λ hyperon affect and modify triaxial deformed nuclei ?

$^{25}_{\Lambda}\text{Mg}$ への適用例

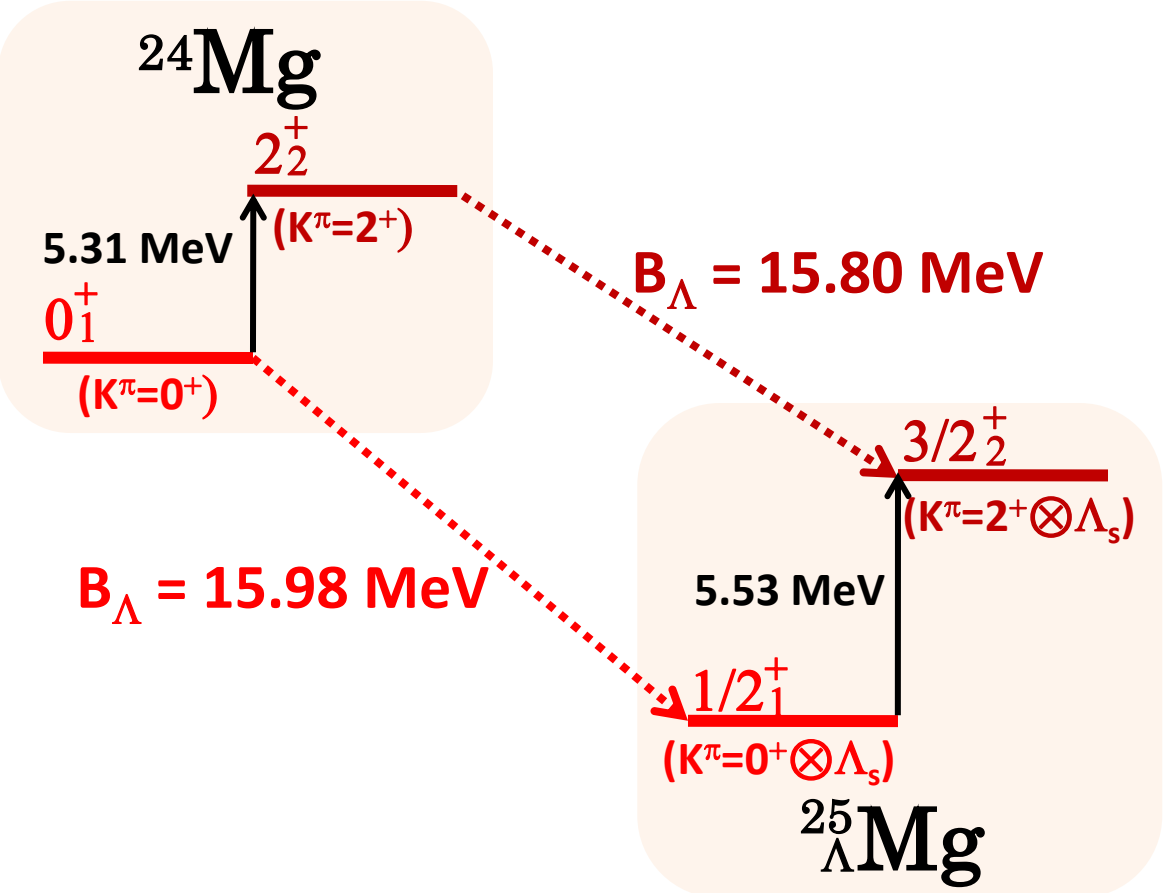


Excitation energy of $K^{\pi}=2^{+}\otimes\Lambda_s$ band is shifted up by about 200 keV

Results: Difference in Λ binding energy B_Λ

◆ Λ binding energy B_Λ

- B_Λ for the $K^\pi=0^+\otimes\Lambda_s$ band is larger than that for the $K^\pi=2^+\otimes\Lambda_s$ band
 → Energy shift of the $K^\pi=2^+\otimes\Lambda_s$ band

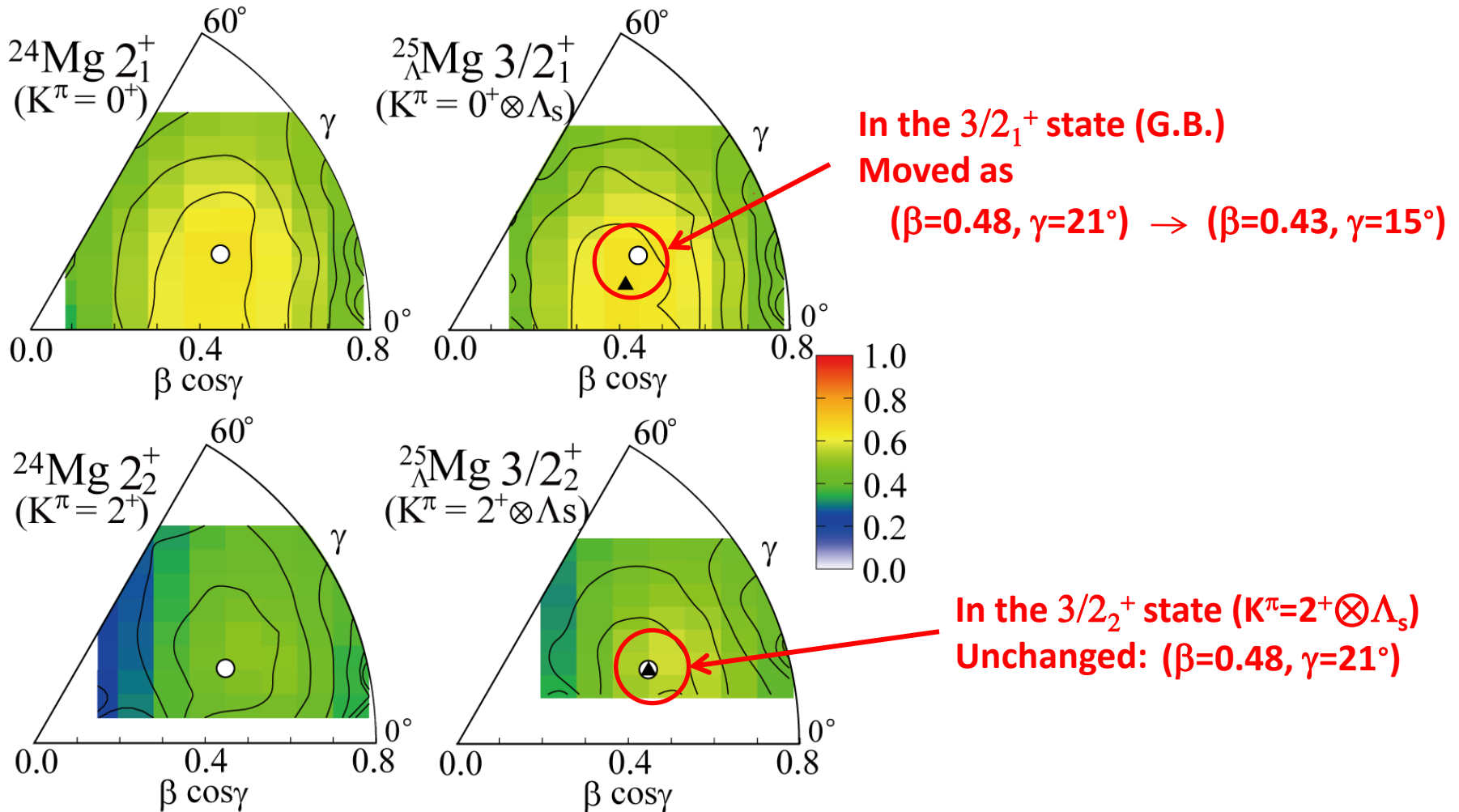


$K^\pi=0^+\otimes\Lambda_s$ band		
States	E (MeV)	B_Λ (MeV)
$1/2_1^+$	-213.83	15.98
$3/2_1^+$	-212.89	15.99
$5/2_1^+$	-212.89	15.99
$7/2_1^+$	-210.77	16.03
$9/2_1^+$	-210.76	16.04
$K^\pi=2^+\otimes\Lambda_s$ band		
States	E (MeV)	B_Λ (MeV)
$3/2_2^+$	-208.30	15.80
$5/2_2^+$	-208.33	15.79
$5/2_3^+$	-207.39	15.79
$7/2_2^+$	-207.35	15.79
$7/2_3^+$	-206.27	15.82
$9/2_2^+$	-206.25	15.82

Results: Deformation change by Λ hyperon

Changes of GCM overlap

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



- Λ hyperon **reduces the (β, γ) deformation in the $K^\pi=0^+ \otimes \Lambda_s$ band**, while the deformation of the $K^\pi=2^+ \otimes \Lambda_s$ band is almost unchanged

Summary and Future plans

◆ Summary

- Λ 粒子によって**芯核の構造がどのように変化する、励起スペクトルや $B(E2)$ 等の変化に影響を与えるのかを明らかにするため、AMD模型をハイパー核に拡張し p -sdシェル Λ ハイパー核に適用した。**
- Λ 粒子による変形の変化 (${}^9_{\Lambda}\text{Be}$, ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$, ${}^{20}_{\Lambda}\text{Ne}$, ${}^{21}_{\Lambda}\text{Ne}$)
 - s 軌道の Λ 粒子は変形を小さくするように作用するのに対し、 p 軌道の Λ 粒子は変形を大きくするように作用する
- シェル構造とクラスター構造による構造変化の違い (${}^{21}_{\Lambda}\text{Ne}$)
 - シェル的な状態の方がクラスター的な状態よりも Λ 粒子の**束縛エネルギー**が大きい(1MeV程度)
 - Λ 粒子によって、 $\alpha + \text{O}$ クラスター間の距離が縮み、 **$B(E2)$ の変化**として現れる
- 三軸非対称変形をした核における構造変化 (${}^{25}_{\Lambda}\text{Mg}$)
 - **基底回転帯と $K^{\pi}=2^{+}$ 回転帯で変形の変化が異なるため、 $K^{\pi}=2^{+} \otimes \Lambda_s$ 回転帯が 200keV程度 shifted up**
- ${}^{12}_{\Lambda}\text{Be}$: 中性子過剰核 ${}^{11}\text{Be}$ のparity-inverted ground state
 - Λ 粒子が加わることで、基底状態の**パリティの再逆転**が起こる