

拡張したAMDを用いた B、C同位体の構造研究

北大VBL 古立直也

北大創成 木村真明、KEK 土手昭伸

YITP 延与佳子

Introduction

ハロー構造における芯励起の重要性

● p shellハロー核におけるクラスター励起

${}^8\text{B}$: $\alpha + {}^3\text{He} + p$ 1陽子ハロー

- ${}^7\text{Be}^*$ ($J^\pi = 1/2^+$ at 429 keV) component has been determined to be 13 % by the measurements of γ -rays in coincidence with the one-proton removal reaction

● p-sd shellハロー核における芯励起

${}^{19}\text{C}$: ${}^{18}\text{C} + n$ 1中性子ハロー

${}^{17}\text{B}$: ${}^{15}\text{B} + n + n$ 2中性子ハロー

- ${}^{19}\text{C}$: Glauber model analysis of reaction cross section.

R. Kanungo et al. Nucl. Phys. A 677 (2000)

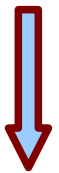
- ${}^{17}\text{B}$: Two neutron removal fragment from ${}^{17}\text{B}$ (${}^{15}\text{B}$) has been found to be in $5/2^-$ excited state.

R Kanungo et al. Phys. Lett. B608 (2005)

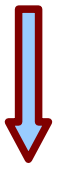
Introduction

● 芯励起を伴うハロー構造を研究するための理論模型を構築

Multiple-width Gaussian basis AMD (MAMD)

- 
- AMDの核子波動関数を改善
 - 波束幅の異なるガウス波束の重ね合わせ
 - - ・ 従来のAMDと同様芯励起を自然に記述
 - ・ 従来のAMDでは難しいハロー構造を記述

● ハロー構造記述におけるMAMDの有効性をテスト

- 
- He同位体の構造研究
 - 芯励起を伴わない $\alpha+xn$ 構造においてハロー構造がどのように記述されるかを議論

● 軽いハロー核の構造研究に適用

- ${}^8\text{B}$ 、 ${}^9\text{C}$ の構造研究
 - $\alpha+3\text{He}+p$ 、 $\alpha+3\text{He}+p+p$ 構造が期待されるこれらの核において芯励起を伴うハロー構造がどのように記述されるか議論
- ${}^{15}\text{C}$ の構造研究
 - $1/2^+$ 状態の逆転に注目
 - $1/2^+$ 状態におけるハロー構造とその芯核の構造を議論

- AMD wave function

$$\Phi_{int} = \frac{1}{\sqrt{A!}} \det[\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_A],$$

核子波動関数を拡張

- Ordinal AMD

$$\varphi_i(\mathbf{r}) = \phi_i(\mathbf{r}) \chi_i \tau_i \quad \phi_i(\mathbf{r}) = \exp \left[-\nu \left(\mathbf{r} - \frac{\mathbf{Z}_i}{\sqrt{\nu}} \right)^2 \right]$$

- MAMD

$$\varphi_i(\mathbf{r}) = \left(\sum_{\alpha} C_i^{\alpha} \phi_i^{\alpha}(\mathbf{r}) \chi_i^{\alpha} \tau_i \right) \quad \phi_i^{\alpha}(\mathbf{r}) = \exp \left[-\nu_i^{\alpha} \left(\mathbf{r} - \frac{\mathbf{Z}_i^{\alpha}}{\sqrt{\nu_i^{\alpha}}} \right)^2 \right]$$

- $|N-Z|$ 個の中性子(陽子)波動関数に対して $\alpha=2$
それ以外の核子波動関数に対して $\alpha=1$

■ Variational function

$$\Phi^{\pm} = P^{\pm} \Phi_{int} = \frac{(1 \pm P_x)}{2} \Phi_{int}$$

■ Hamiltonian

$$\hat{H} = \hat{T} + \hat{V}_{nucl} + \hat{V}_c - \hat{T}_g \quad \hat{V}_{nucl} ; \text{Volkov No.2+G3RS force}$$

■ Energy variation

$$E^{\pm} = \frac{\langle \Phi^{\pm} | \hat{H} | \Phi^{\pm} \rangle}{\langle \Phi^{\pm} | \Phi^{\pm} \rangle}$$

■ Angular momentum projection

$$\Phi_{MK}^{J\pm} = P_{MK}^J \Phi_{int}^{\pm}$$

■ GCM

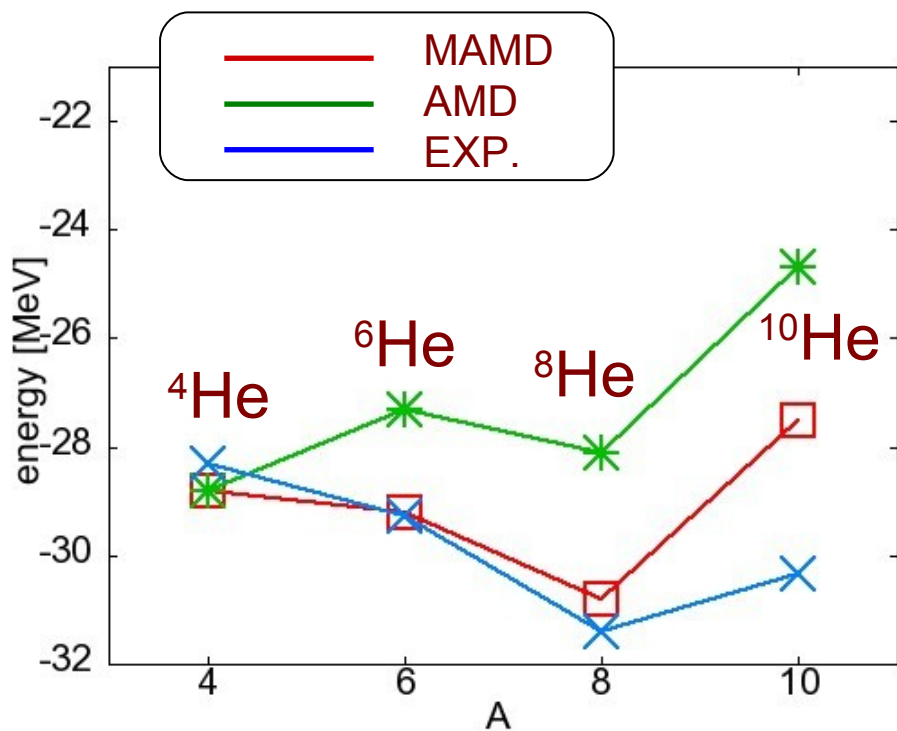
- Generator coordinate; proton and neutron radius

$$\Psi_n^{J\pm} = \sum_{ij} c_{ij}^n \Phi_{MK}^{J\pm}(r_i^p, r_j^n)$$

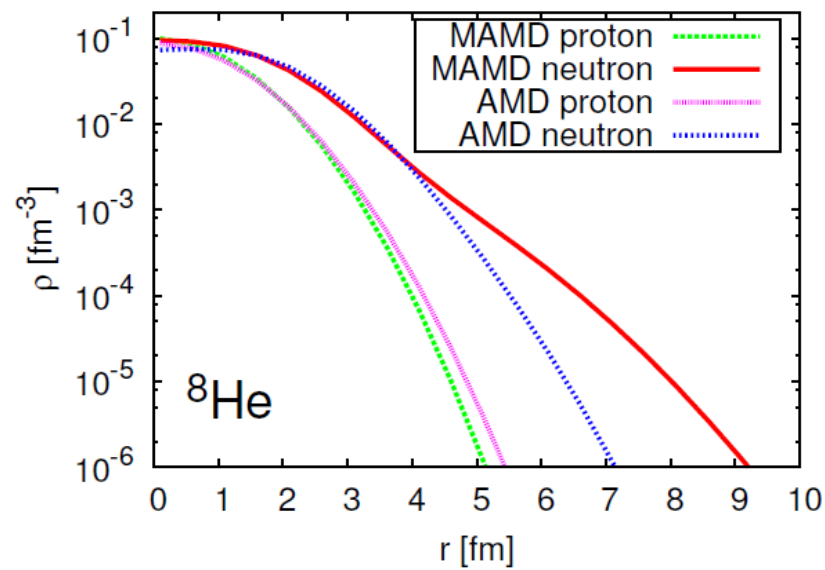
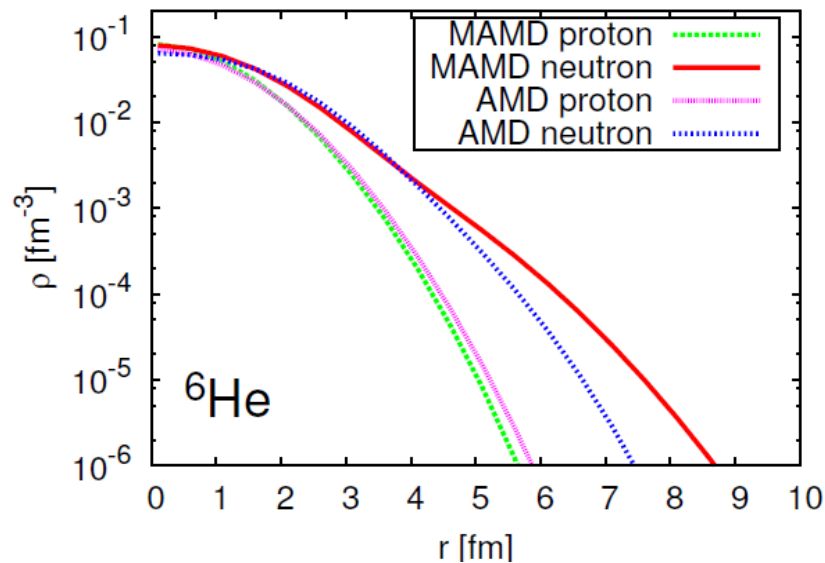
MAMDの有効性

Results

● He同位体結合エネルギー



● $^{6,8}\text{He}$ の密度分布



MAMDの有効性 ${}^6\text{He}$

- 中性子の空間的広がりの記述を改善
- 殻模型的構造の記述を改善

■ MAMDにおける ${}^6\text{He}$ の波動関数

$$\Phi_{int}^{(a)} = A[\varphi_\alpha(\mathbf{R}_c)\varphi_5\varphi_6],$$

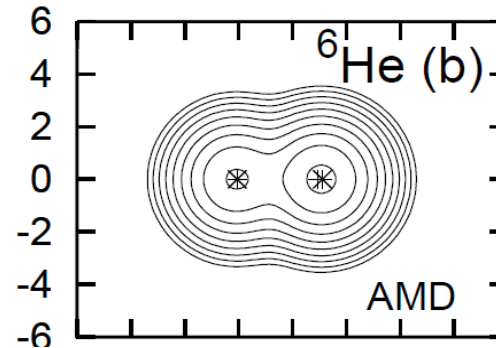
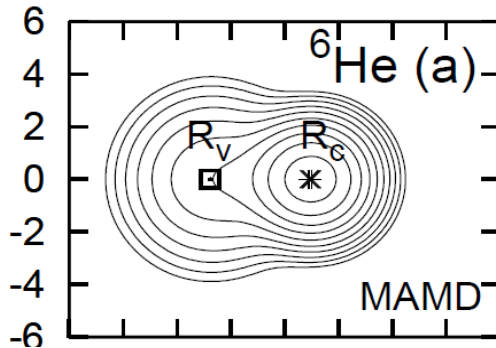
$$\varphi_\alpha \equiv \varphi_1\varphi_2\varphi_3\varphi_4, \quad \varphi_i = \phi_i(\mathbf{R}_c)\chi_i\tau_i \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

$$\varphi_{5,6} = (C_{5,6}^c \phi_{5,6}^c(\mathbf{R}_c)\chi_{5,6}^c + C_{5,6}^v \phi_{5,6}^v(\mathbf{R}_v)\chi_{5,6}^v)\tau_{5,6}$$

波束幅パラメータ: 1.39 fm

2.13 fm

(AMD: 1.54 [fm])



state	$\sqrt{\langle \hat{r}^2 \rangle}$ [fm]	B.E [MeV]	$\langle LS \rangle$ [MeV]	$\langle S^2 \rangle$
(a)	2.33	28.1	-2.5	0.14
(b)	2.25	25.1	-0.4	0.01

MAMDの有効性 ^8He

- 中性子の空間的広がりの記述を改善
- 殻模型的構造の記述を改善

■ MAMDにおける ^8He の波動関数

$$\Phi_{int}^{(a)} = A[\varphi_\alpha(\mathbf{R}_c)\varphi_5\varphi_6\varphi_7\varphi_8],$$

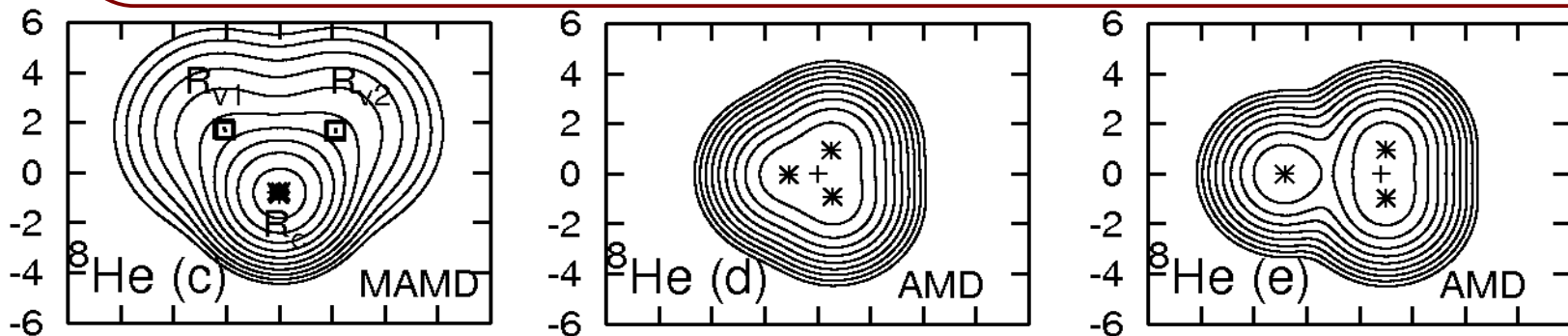
$$\varphi_{5,6} = (C_{5,6}^c \phi_{5,6}^c(\mathbf{R}_c)\chi_{5,6}^c + C_{5,6}^{v1} \phi_{5,6}^{v1}(\mathbf{R}_{v1})\chi_{5,6}^{v1})\tau_{5,6}$$

$$\varphi_{7,8} = (C_{7,8}^c \phi_{7,8}^c(\mathbf{R}_c)\chi_{7,8}^c + C_{7,8}^{v2} \phi_{7,8}^{v2}(\mathbf{R}_{v2})\chi_{7,8}^{v2})\tau_{7,8}.$$

波束幅パラメータ: 1.41 fm

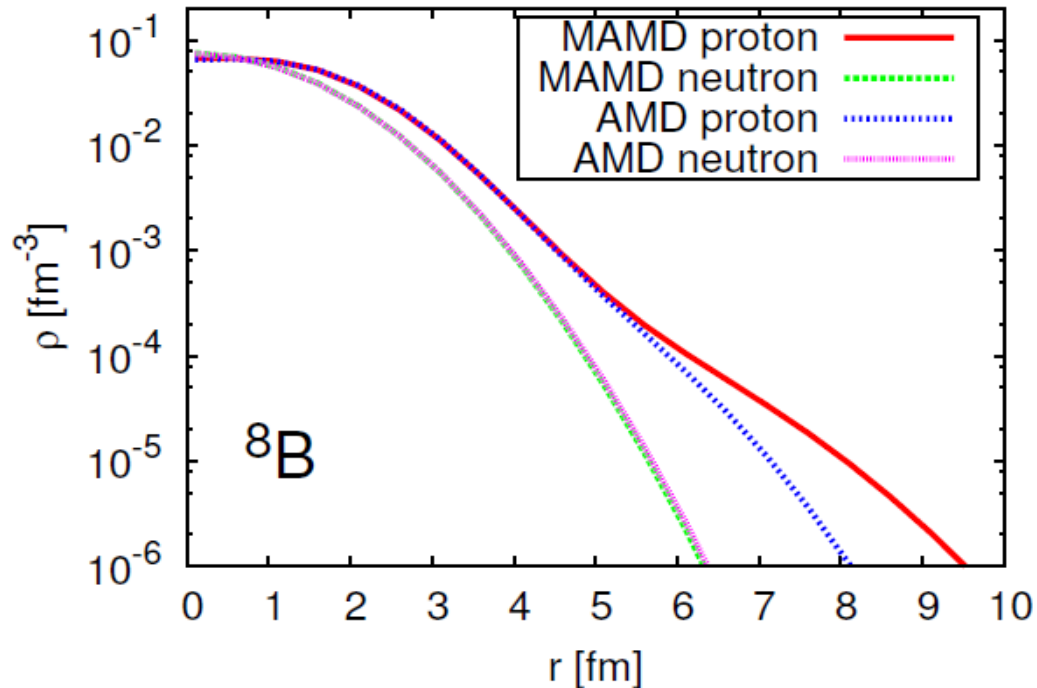
2.50 fm

(AMD: 1.54 [fm])



state	$\sqrt{\langle \hat{r}^2 \rangle}$ [fm]	B.E [MeV]	$\langle LS \rangle$ [MeV]	$\langle S^2 \rangle$
(c)	2.53	29.9	-9.7	0.74
(d)	2.19	24.5	-10.0	0.56
(e)	2.53	24.9	-2.9	0.17

^8B の計算結果



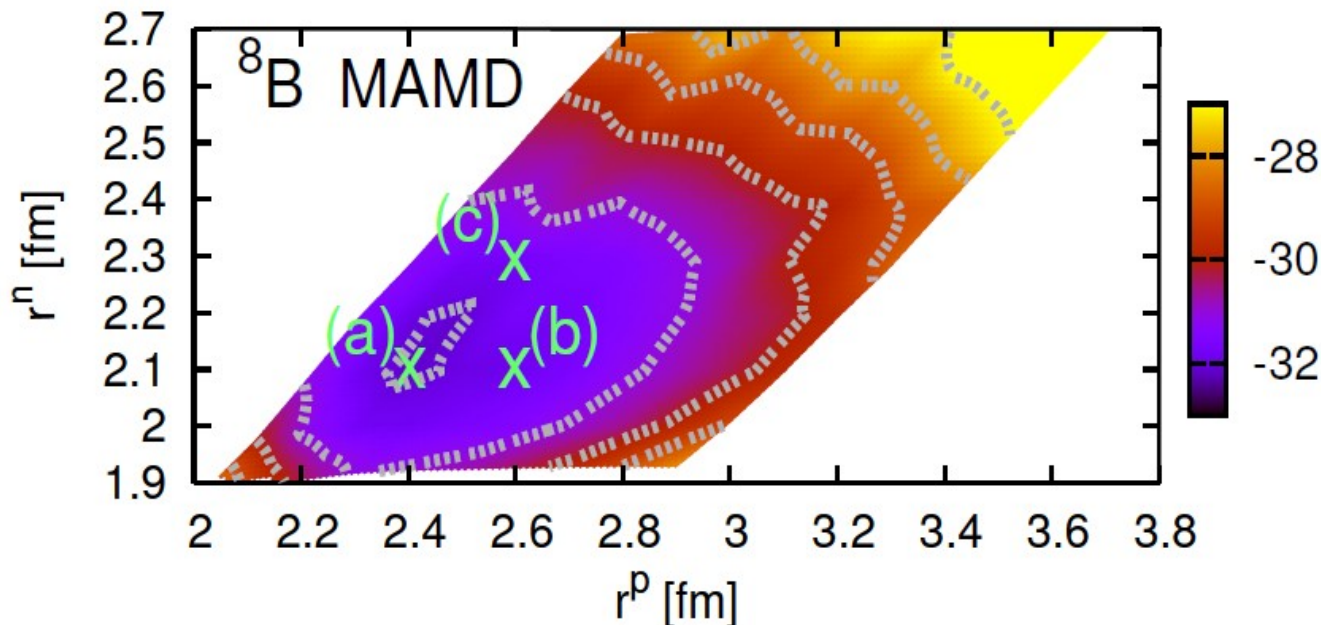
	E [MeV]	r_m [fm]	Q [e fm ²]	μ [μ_n]
(a)	-32.1	2.26	2.9	0.77
(b)	-31.8	2.35	2.2	0.72
(c)	-31.7	2.55	4.7	1.11
GCM	-35.7	2.50	4.3	0.95
Exp.	-37.38	2.55	6.45	1.04

GCM(50 bases);

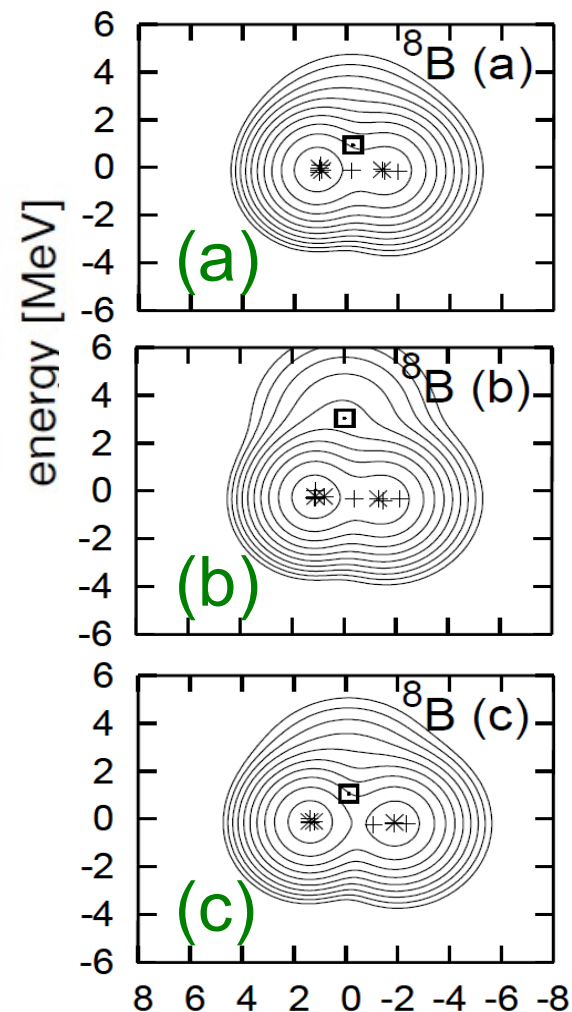
$$\Psi_n^{J\pm} = \sum_{ij} c_{ij}^n \Phi_{MK}^{J\pm}(r_i^p, r_j^n)$$

^8B の計算結果

Energy surface



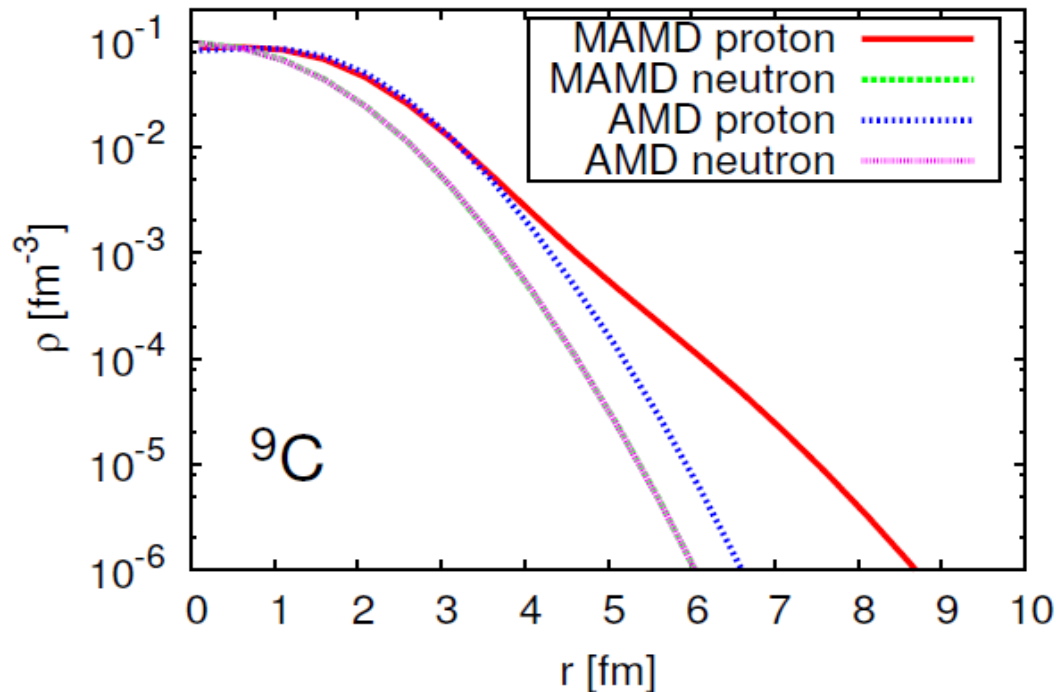
	E [MeV]	r_m [fm]	Q [e fm ²]	μ [μ_n]
(a)	-32.1	2.26	2.9	0.77
(b)	-31.8	2.35	2.2	0.72
(c)	-31.7	2.55	4.7	1.11
GCM	-35.7	2.50	4.3	0.95
Exp.	-37.38	2.55	6.45	1.04



GCM(50 bases);

$$\Psi_n^{J\pm} = \sum_{ij} c_{ij}^n \Phi_{MK}^{J\pm}(r_i^p, r_j^n)$$

^8B の計算結果



	E [MeV]	r_m [fm]	Q [e fm ²]	μ [μ_n]
(d)	-35.6	2.36	-2.7	-1.43
(e)	-34.7	2.21	-1.9	-1.94
(f)	-34.2	2.27	-2.5	-1.11
GCM	-39.2	2.40	-3.2	0.95
Exp.	-39.72	2.42		-1.39

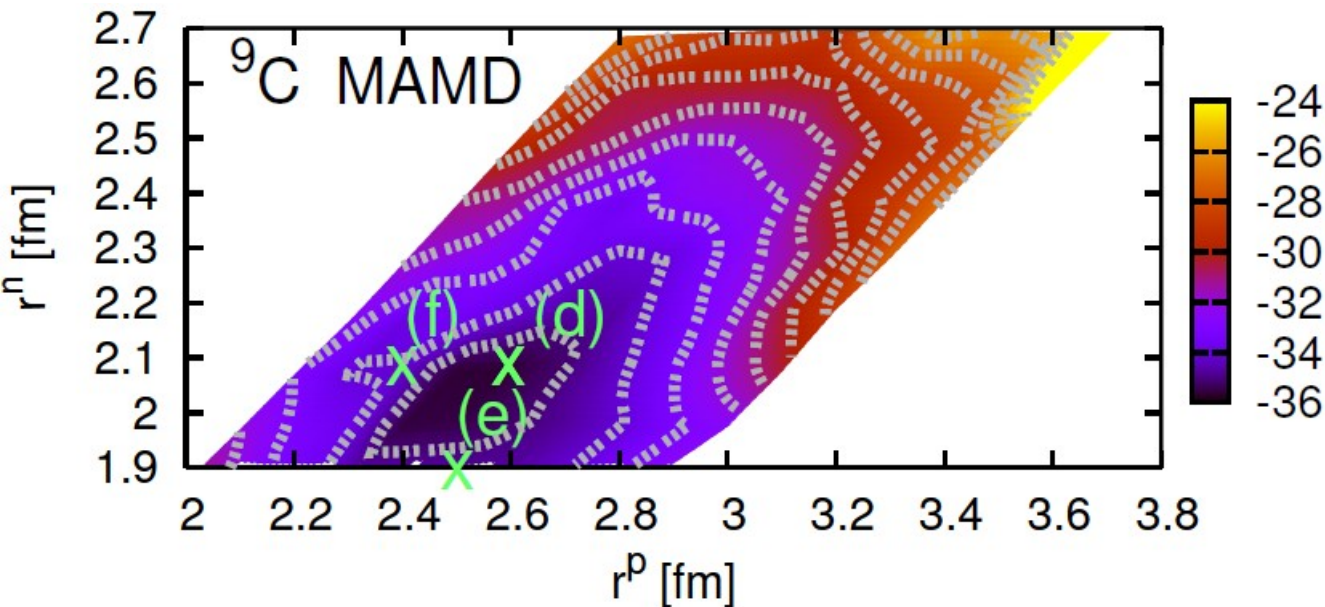
(Sch. -1.91)

GCM(50 bases);

$$\Psi_n^{J\pm} = \sum_{ij} c_{ij}^n \cdot \Phi_{MK}^{J\pm}(r_i^p, r_j^n)$$

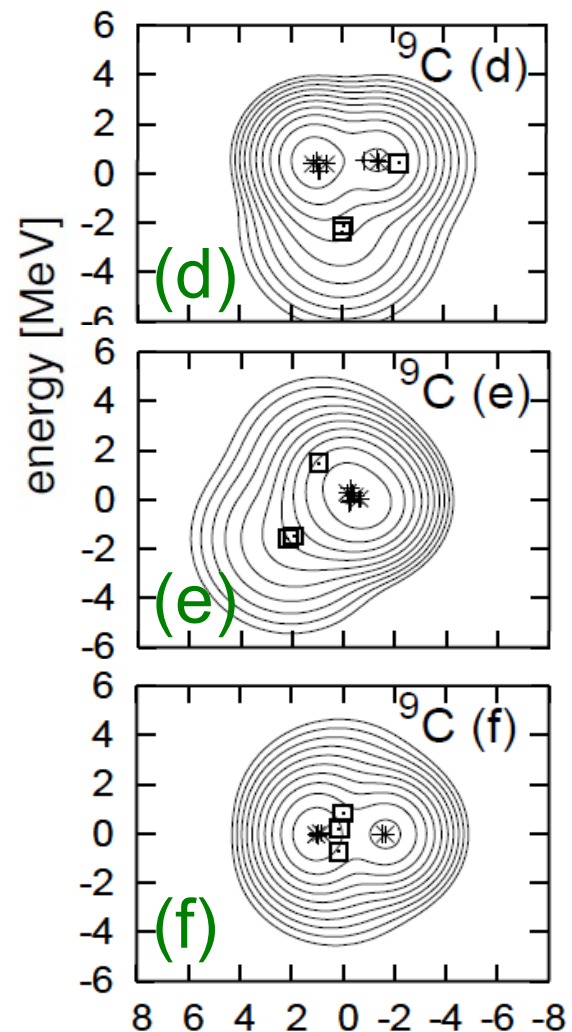
${}^9\text{C}$ の計算結果

Energy surface



	E [MeV]	r_m [fm]	Q [e fm ²]	μ [μ_n]
(d)	-35.6	2.36	-2.7	-1.43
(e)	-34.7	2.21	-1.9	-1.94
(f)	-34.2	2.27	-2.5	-1.11
GCM	-39.2	2.40	-3.2	-1.72
Exp.	-39.72	2.42		-1.39

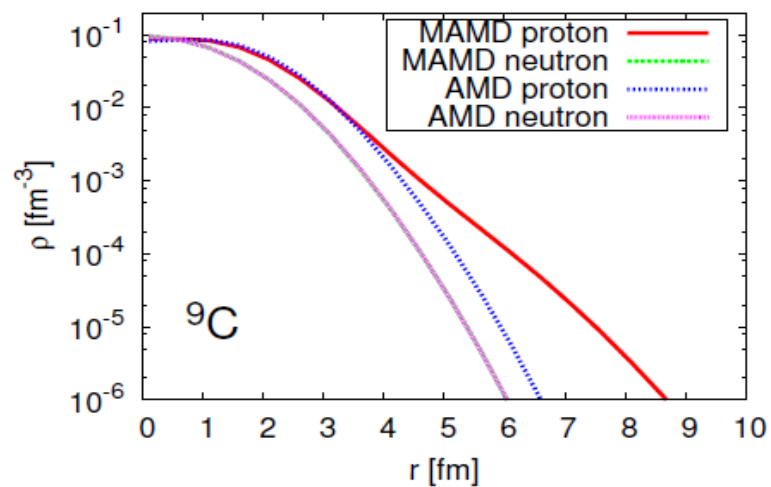
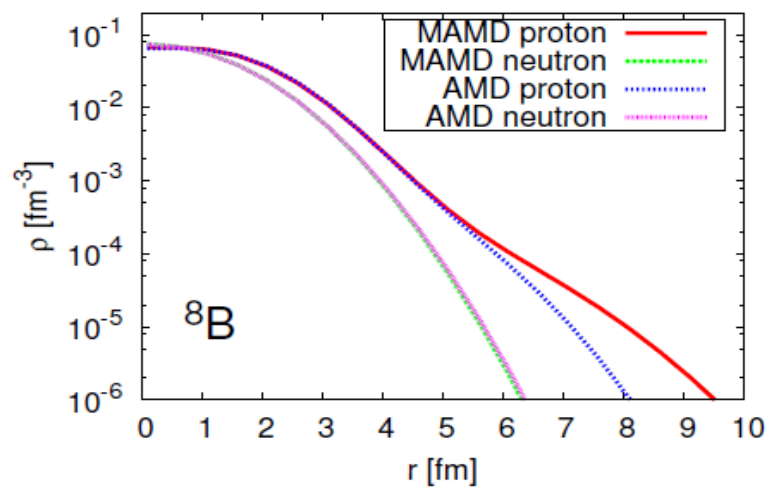
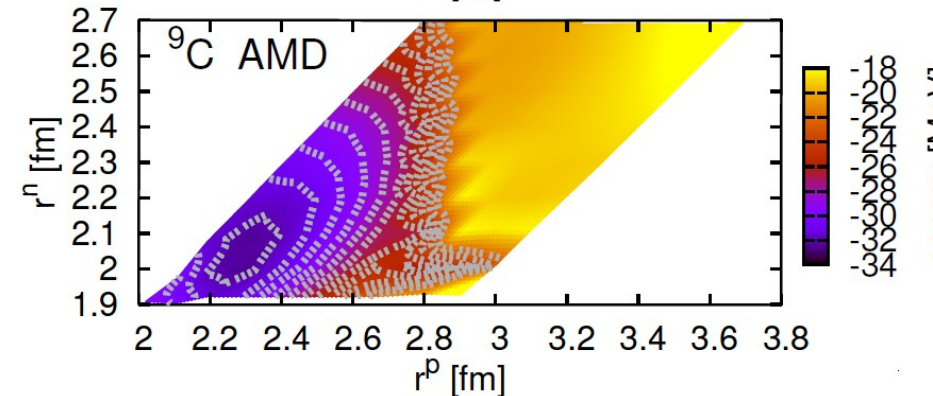
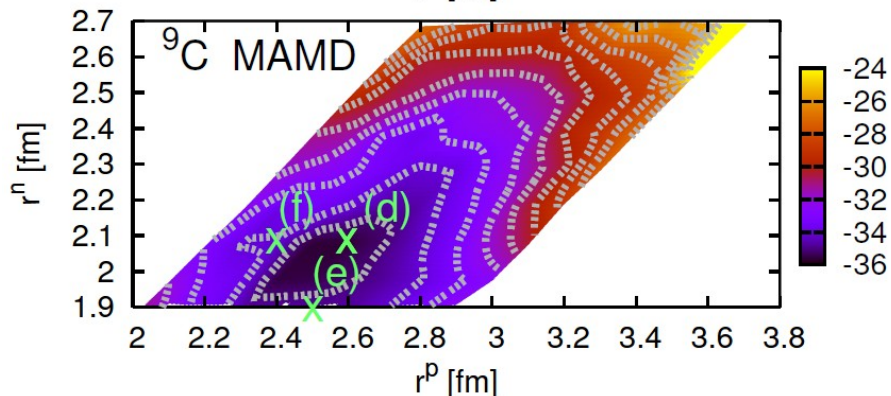
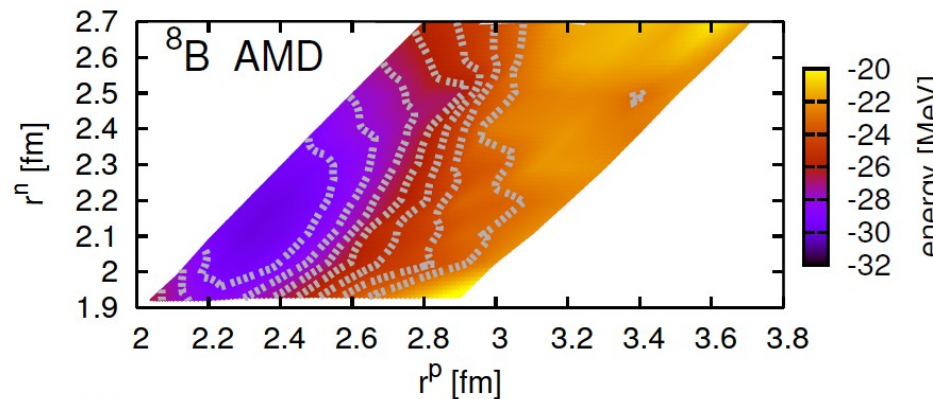
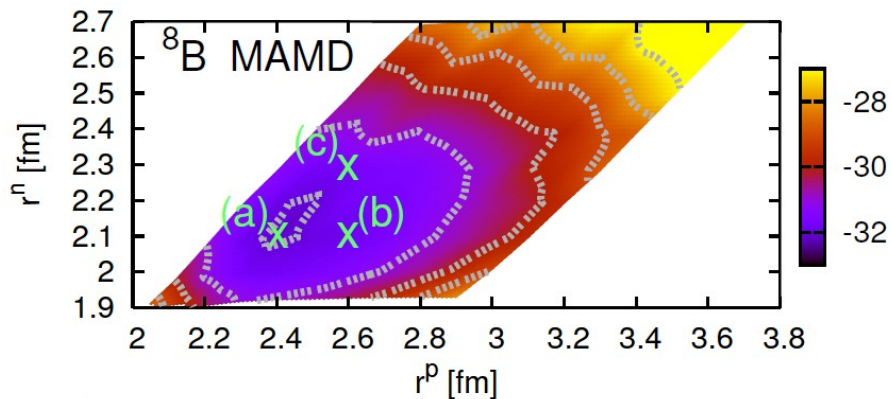
(Sch. -1.91)



GCM(50 bases);

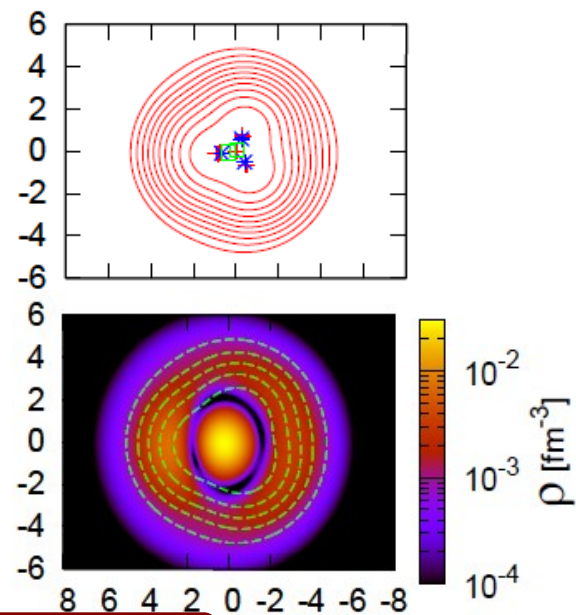
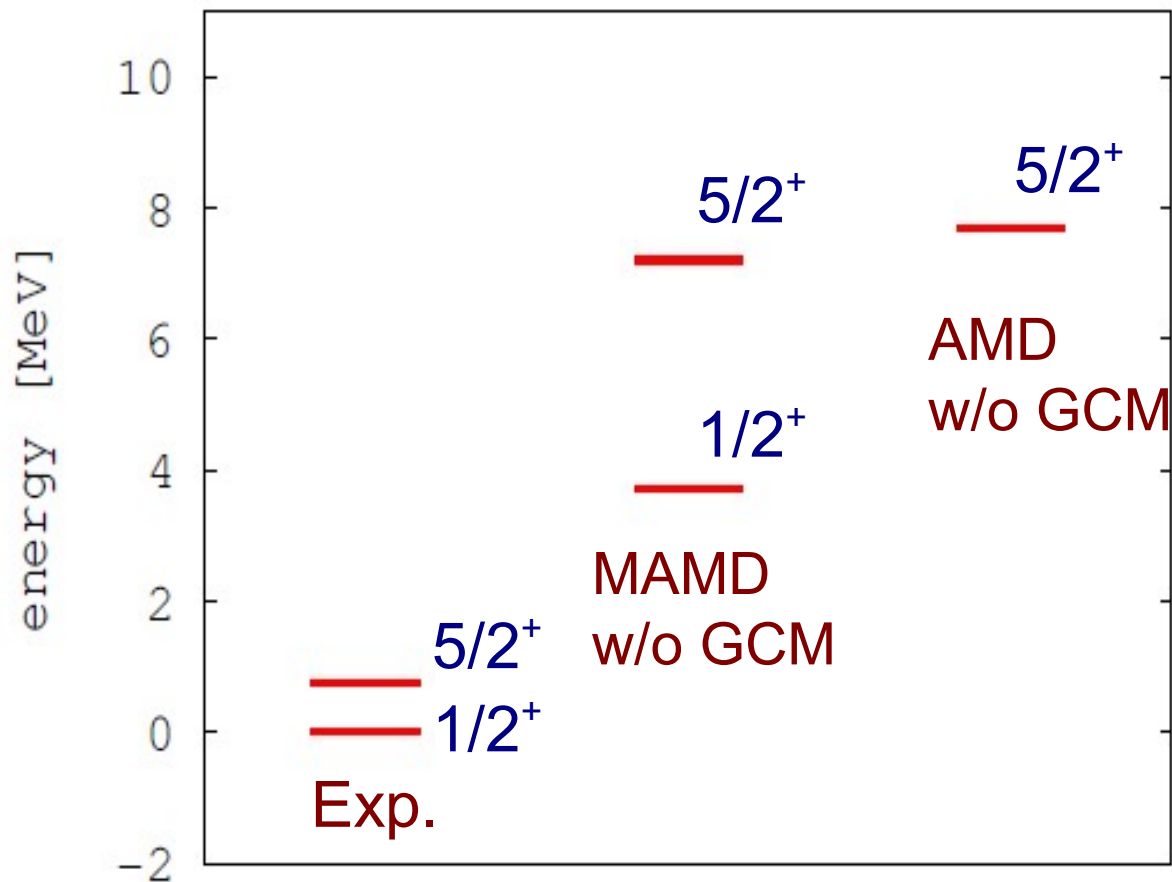
$$\Psi_n^{J\pm} = \sum_{ij} c_{ij}^n \Phi_{MK}^{J\pm}(r_i^p, r_j^n)$$

AMDの結果との比較



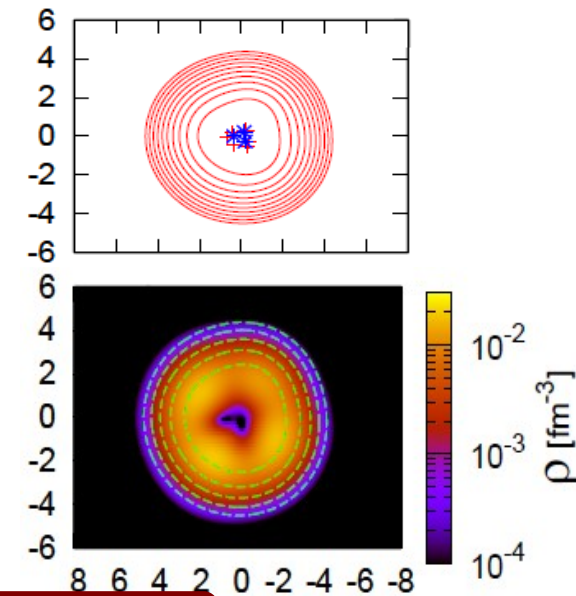
^{15}C に用いるeffective interaction

Volkov No.2 (M=0.60, B=H=0)
+G3RS force (u=900 MeV)



MAMD

最も緩く束縛した
1中性子の密度分布

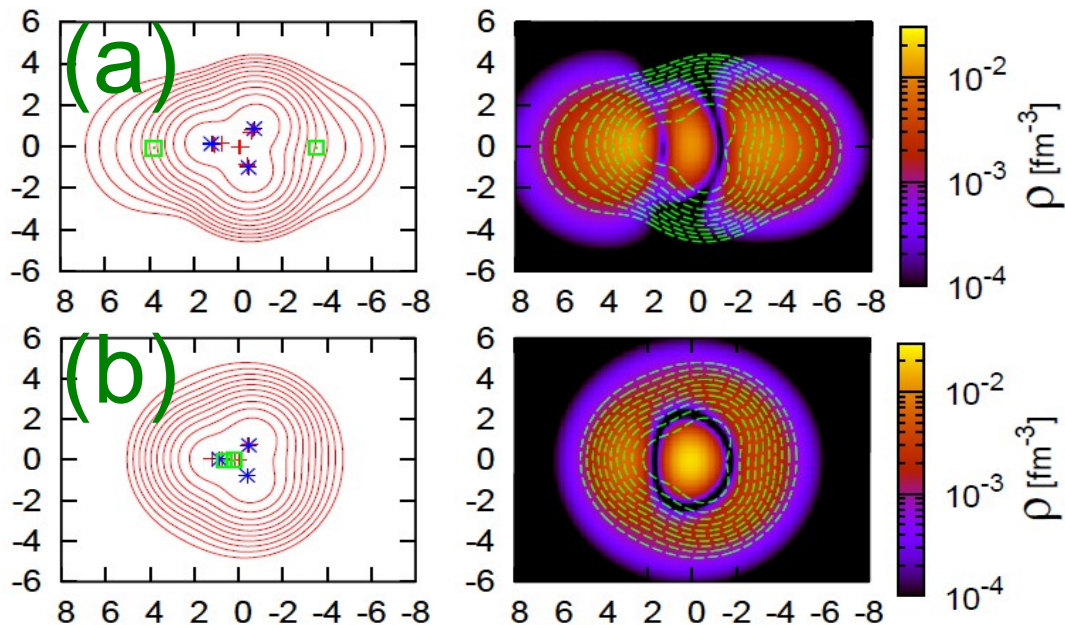


AMD

^{15}C の計算結果

$\beta_p = 0.39, \gamma_p = 0.96$ (oblate)
 $\beta_n = 0.32, \gamma_n = 0.13$ (prolate)

$\beta_p = 0.32, \gamma_p = 1.03$ (oblate)
 $\beta_n = 0.04$ (spherical)



	Energy [MeV]	r_m [fm]	r_p [fm]	r_n [fm]
(a) $1/2^+$	103.7	2.47	2.27	2.59
(b) $1/2^+$	102.9	2.38	2.19	2.50
GCM $1/2^+$	105.9	2.51	2.26	2.66
GCM $5/2^+$	105.4	2.41	2.26	2.51
Ex. $5/2^+$	0.5			
Exp. ($1/2^+$)	106.50	2.40 ⁽¹⁾ 2.50 ⁽²⁾		
Ex. $5/2^+$	0.74			

GCM; 30 bases
 $r^n = 2.1 \sim 2.5$ fm
 (0.1 fm間隔),
 $r^p = r^n + 0.1 \sim r^n + 0.6$ fm
 (0.1 fm間隔)

(1) A. Ozawa et al.,
 Nucl. Phys. A608 63(1996)

(2) A. Ozawa et al.,
 Nucl. Phys. A691 599(2001)

● He同位体においてMAMDの有効性を議論

- 中性子の空間的広がり、殻模型的構造の記述を改善
→ ${}^4, {}^6, {}^8\text{He}$ の結合エネルギー、半径を系統的に再現

● ${}^8\text{B}$ 、 ${}^9\text{C}$ 、 ${}^{15}\text{C}$ の構造研究—ハロー構造とその芯核の構造を議論

● ${}^8\text{B}$

- 芯核が $\alpha+{}^3\text{He}$ 構造を持ち、緩く束縛した $\alpha+3\text{He}+p$ 3体系となる。
- 電気四重極モーメントは α 、 ${}^3\text{He}$ クラスター間距離に敏感
1陽子ハローの発達は電気四重極モーメントの増加にはほとんど寄与しない。

● ${}^9\text{C}$

- 芯核における $\alpha+{}^3\text{He}$ クラスター構造と殻模型的構造の両方が ${}^9\text{C}$ の性質に重要
- 芯核におけるクラスター構造の発達が μ モーメントのSchmidt valueからのずれを説明

● ${}^{15}\text{C}$

- $1/2^+$ 状態の逆転を再現するようにeffective interactionを決め、結合エネルギー、半径、 $5/2^+$ 状態の励起エネルギーをよく再現
- 1中性子が $1s_{1/2}$ 軌道を占有する構造とprolate変形する構造の両方が重要
これらの構造は異なる芯核の変形を持つ