

sdシェル原子核表面での α クラスターの崩れ

京都大学原子核理論研究室 (M2) 吉田侑太
共同研究者: 延與佳子、小林史治

目次

○ INTRODUCTION

- α クラスター励起状態
- 研究目的

○ FRAMEWORK

- Brink model
- LS力による α クラスターの崩れ
- Hamiltonian

○ RESULTS

- $^{16}\text{O} + \alpha$ (^{20}Ne)
- $^{28}\text{Si} + \alpha$ (^{32}S)

○ SUMMARY

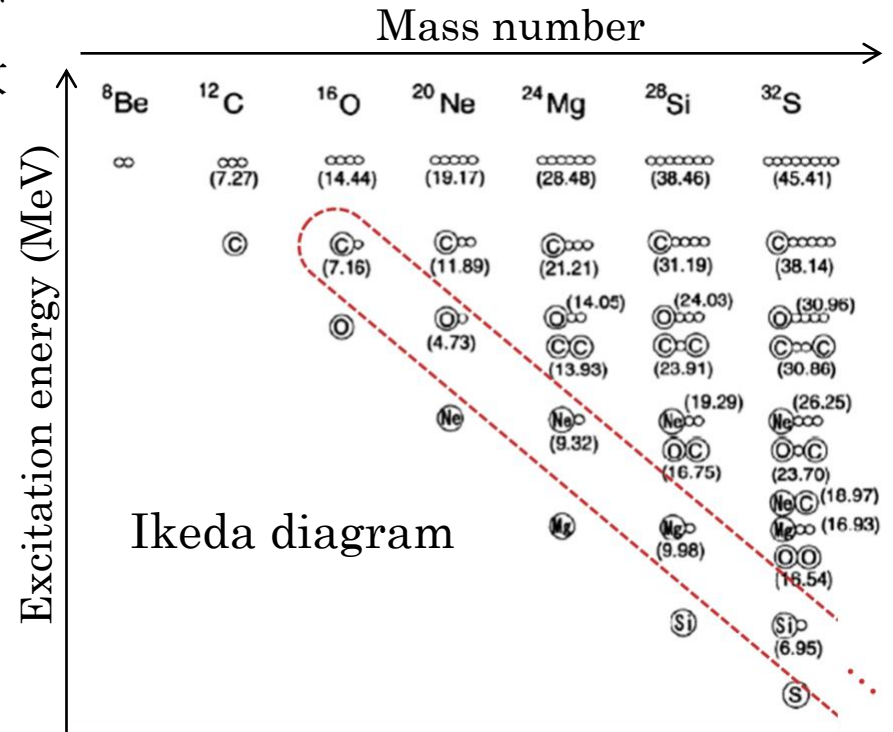
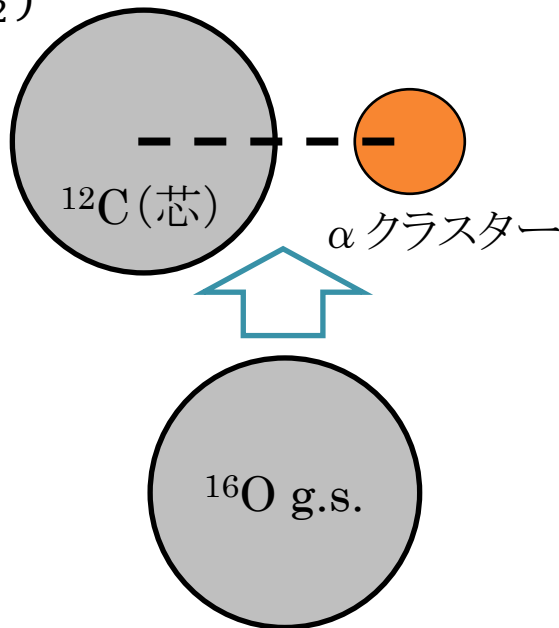
α クラスター励起状態

● α クラスター励起状態

原子核から α クラスターが一つ励起した状態

- Ikeda diagramのしきい値則において数 MeV の領域
- 殻模型的な基底状態から一つの α クラスターが励起したクラスター模型的な状態

例: $^{16}\text{O}(0_2^+)$

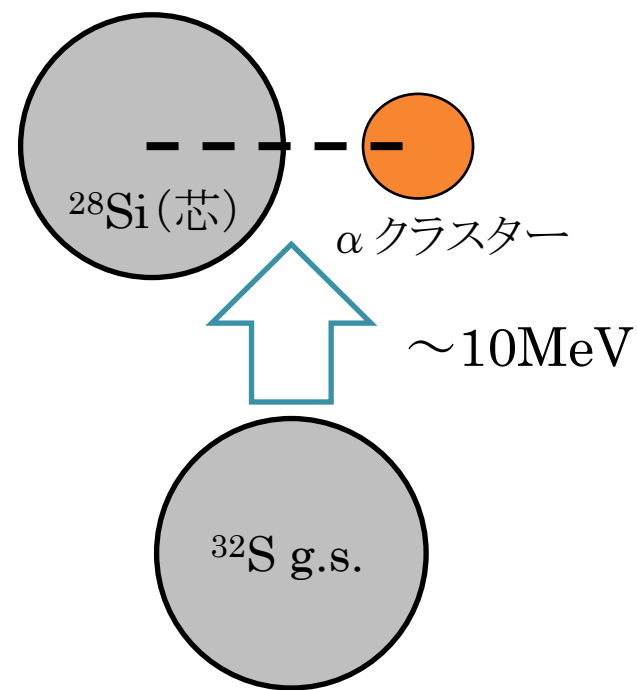
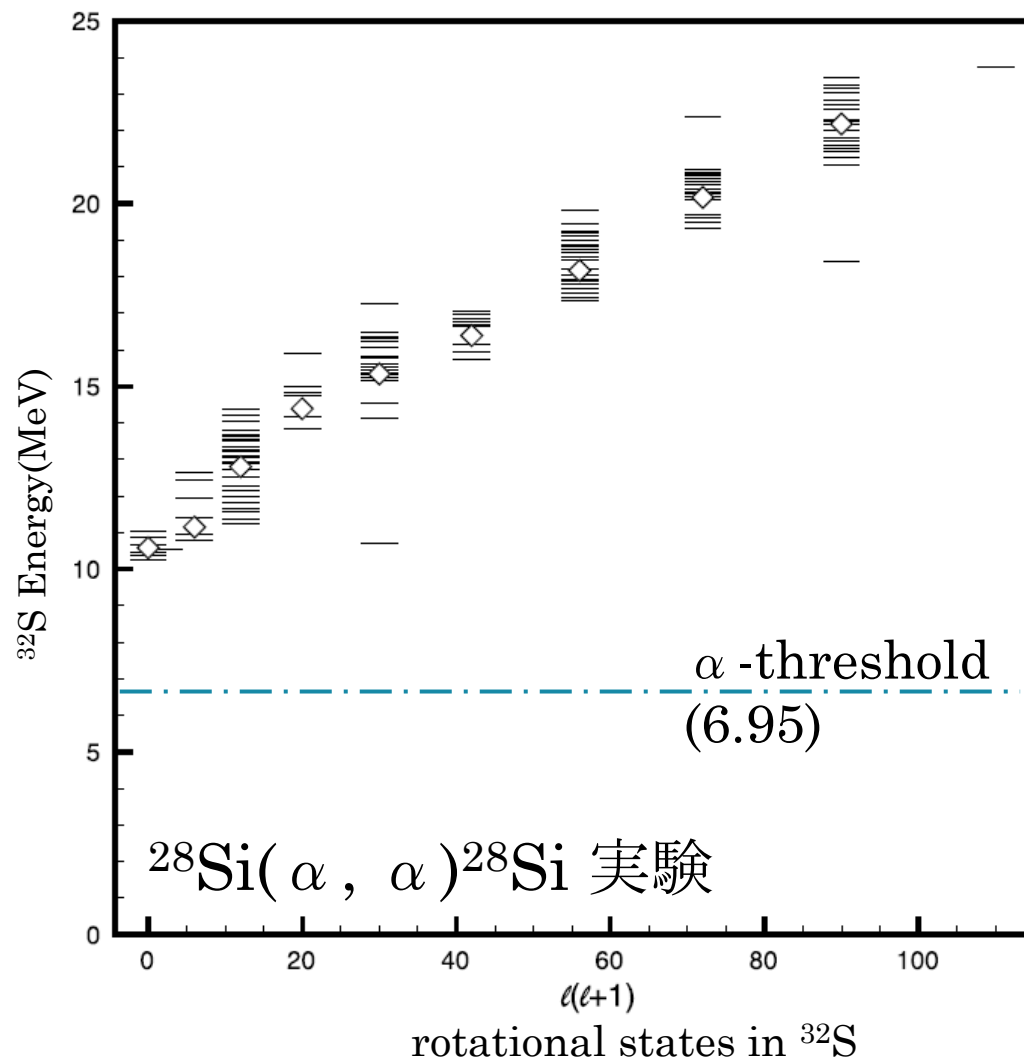


高田 健次郎、池田 清美・原子核構造論(朝倉書店)

α クラスタ励起状態

● ^{32}S の α クラスタ励起

T. Lönnroth, et al., Eur. Phys. J. A 46, 5–16 (2010)

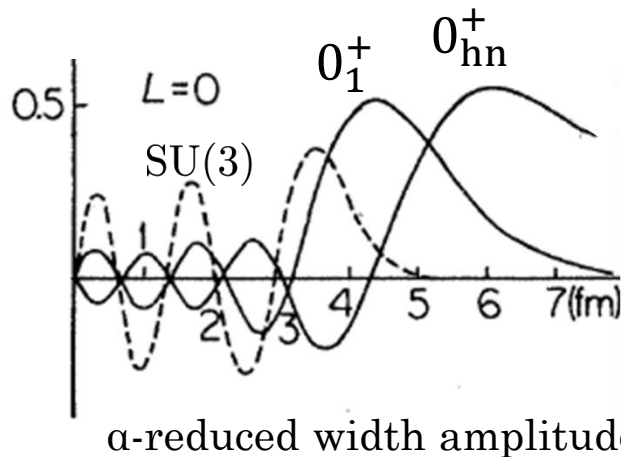


α クラスター励起状態

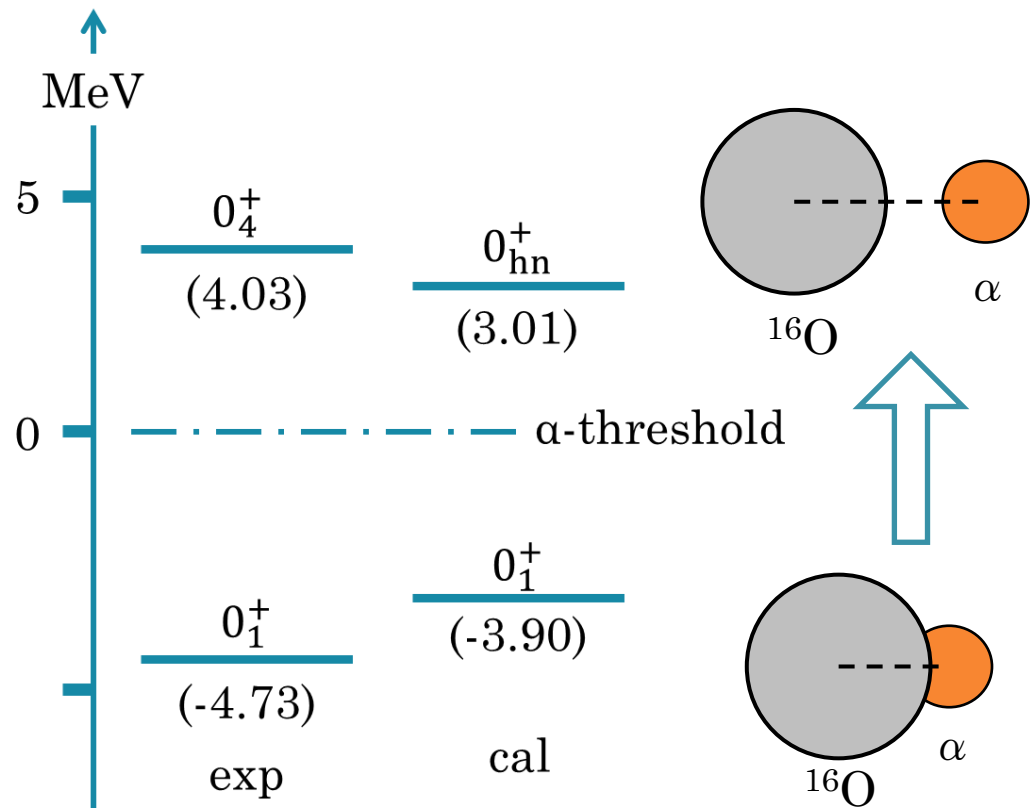
● ^{20}Ne の α クラスター状態

J. Hiura, F. Nemoto and H. Bando, Prog. Theor. Phys. Suppl. 52(1972) 173

基底状態における $^{16}\text{O} + \alpha$ のクラスターの状態とその相対運動による励起



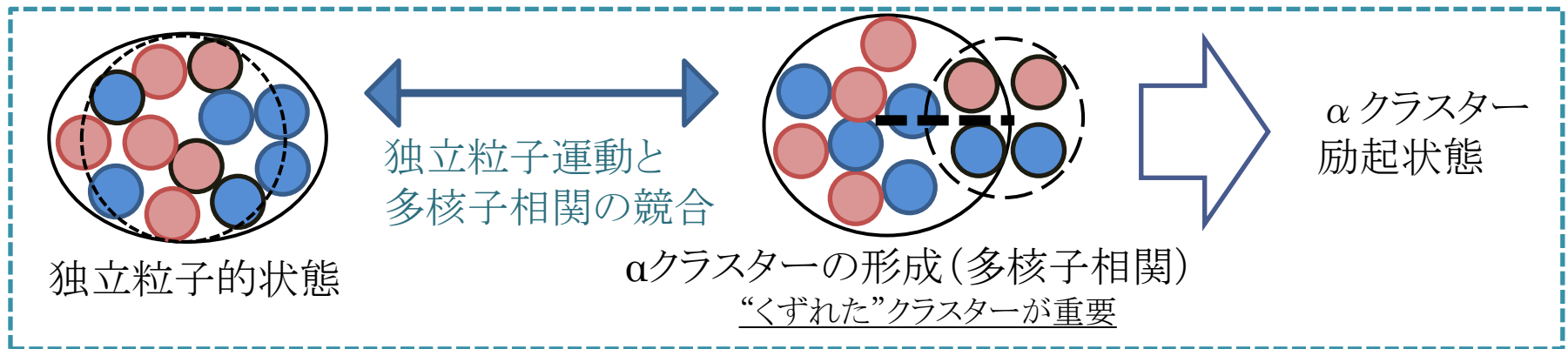
^{20}Ne の $^{16}\text{O} + \alpha$ 二体クラスター GCM 計算での 0^+ の α 換算振幅



Energy spectra

研究目的: α クラスター励起状態の系統的理解へ

α クラスターが原子核表面で形成されるにあたり、“崩れた” α クラスターと芯原子核の“構造変化”が重要である



従来のシンプルなクラスターモデルでは考えていなかった状態



板垣さん達の研究で非中心力であるLS力により崩れた α クラスター状態が議論されている
N. Itagaki, H. Masui, M. Ito, and S. Aoyama, Phys. Rev. C 71, 064307 (2005)



本研究は板垣らの手法に基づき崩れた (α 、芯原子核) クラスター状態を考慮し
原子核表面での崩れたクラスター状態を調べる

FRAMEWORK

○ Brink の α -cluster model

- 一核子波動関数 $\cdots \varphi_i \equiv \phi_i \chi_i \tau_i$

空間 $\phi_i(\mathbf{r}) = \left(\frac{2\nu}{\pi}\right)^{\frac{3}{4}} \exp\left[-\nu(\mathbf{r} - \mathbf{R}_i)^2\right]$

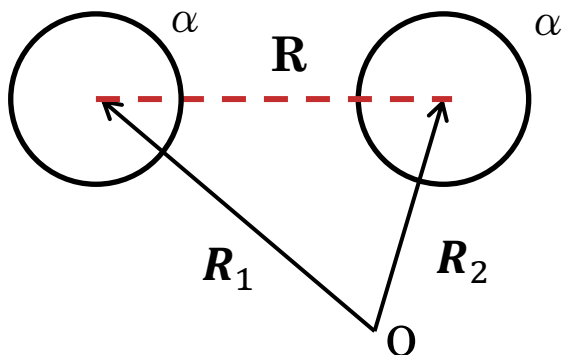
座標パラメーター R_i を中心とする調和振動子ポテンシャルに従う殻模型で記述される

スピン χ_i Up(\uparrow) Down(\downarrow)

アイソスピン τ_i Proton(p) or Neutron(n)

- 全系の波動関数 $\cdots \Phi \equiv \mathcal{A} [\varphi_{p\uparrow}(\mathbf{R}_1) \varphi_{p\downarrow}(\mathbf{R}_1) \varphi_{n\uparrow}(\mathbf{R}_1) \varphi_{n\downarrow}(\mathbf{R}_1) \varphi_{p\uparrow}(\mathbf{R}_2) \varphi_{p\downarrow}(\mathbf{R}_2) \varphi_{n\uparrow}(\mathbf{R}_2) \varphi_{n\downarrow}(\mathbf{R}_2)]$

* 全核子を反対称化



$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2$$

FRAMEWORK

○ 拡張した Brink model

N. Itagaki, H. Masui, M. Ito, and S. Aoyama,
Phys. Rev. C 71, 064307 (2005)

(α クラスターの崩れを取り入れた模型、板垣らの手法)

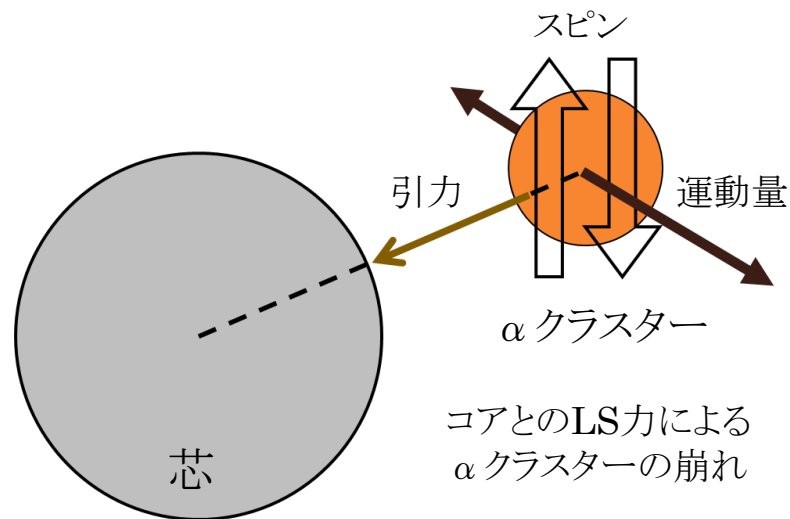
$$\hat{V}_{LS} = U_{LS}(\hat{r})(\hat{\mathbf{L}} \cdot \hat{\mathbf{S}})$$

核子がスピン(\mathbf{S})に平行な角運動量(\mathbf{L})を持っていればLS力は引力に働く
→核子の座標パラメーター \mathbf{R}_i に運動量として虚部を加える

崩れのパラメーターとして λ を導入

$$\mathbf{R}_i \rightarrow \tilde{\mathbf{R}}_i = \mathbf{R}_i + i\lambda \frac{(\mathbf{e}_{spin,i}) \times (\mathbf{e}_{R_i})}{\sqrt{\nu}}$$

$$\phi_i(\mathbf{r}) = \left(\frac{2\nu}{\pi}\right)^{\frac{3}{4}} \exp \left[-\nu \left(\mathbf{r} - \tilde{\mathbf{R}}_i \right)^2 \right]$$

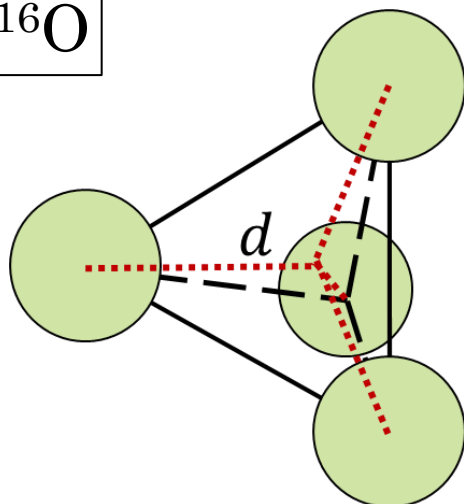


FRAMEWORK

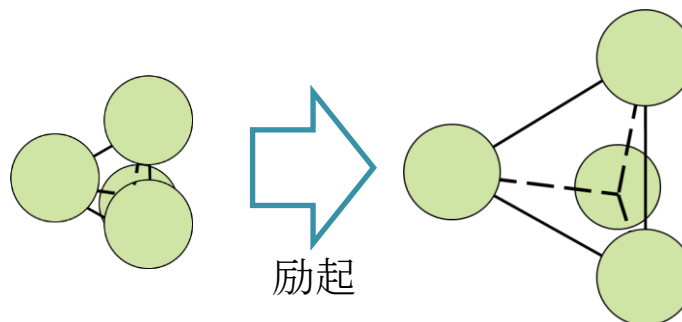
● 芯原子核の構造変化

芯原子核に対しても励起状態における構造変化を考える

^{16}O



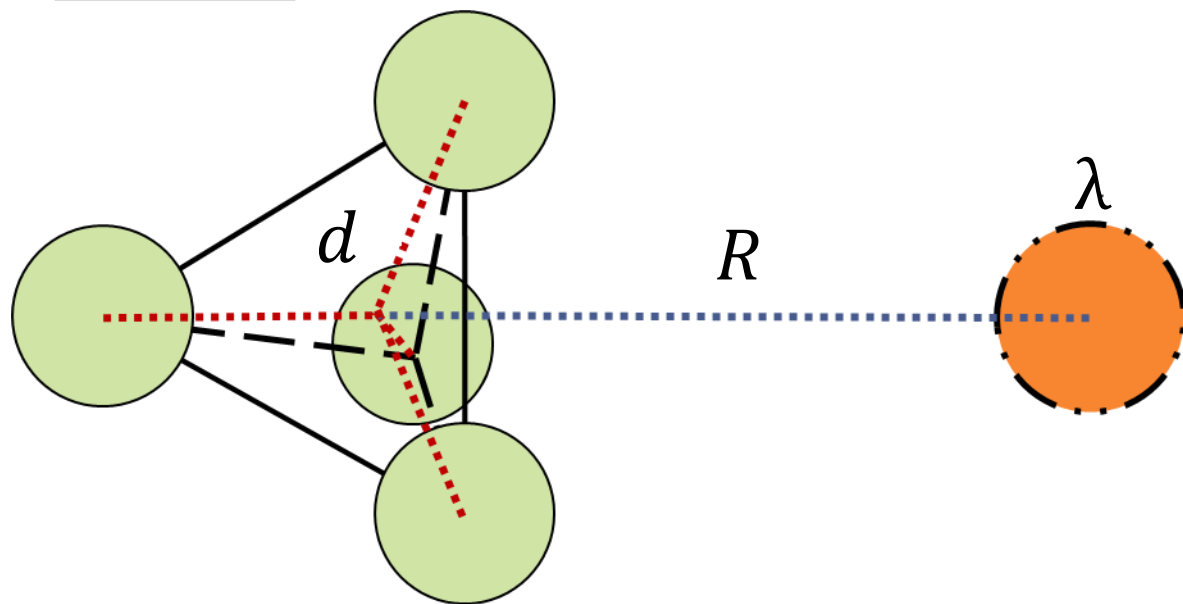
^{16}O では4つの α クラスター構造における breathing mode (励起状態における原子核の膨張)を考慮する



FRAMEWORK

○ ^{20}Ne のモデル・パラメーター

$^{16}\text{O} + \alpha$



パラメーター

λ ... α の崩れ

d ... ^{16}O の構造変化

R ... ^{16}O - α 間距離

^{20}Ne に対してクラスター間距離(R)に依存した α クラスターの崩れ、
芯原子核の構造変化を見る

RESULTS

Hamiltonian

$$\hat{H} = \hat{T} + \hat{V}_{nuclear} + \hat{V}_{coulomb} - \hat{T}_G$$

(有効核力 $\hat{V}_{nuclear} = \hat{V}_{central} + \hat{V}_{LS}$)

中心力... $\hat{V}_{central} = \sum_{i < j}^A \sum_{k=1}^2 v_k \exp \left[- \left(\frac{\hat{\mathbf{r}}_{ij}}{a_k} \right)^2 \right] (W + MP_{\sigma\tau})$

Volkov No.2, W=0.62, M=0.38

($v_1 = -60.65$ [MeV], $v_2 = 61.14$ [MeV], $a_1 = 1.80$ [fm], $a_2 = 1.01$ [fm])

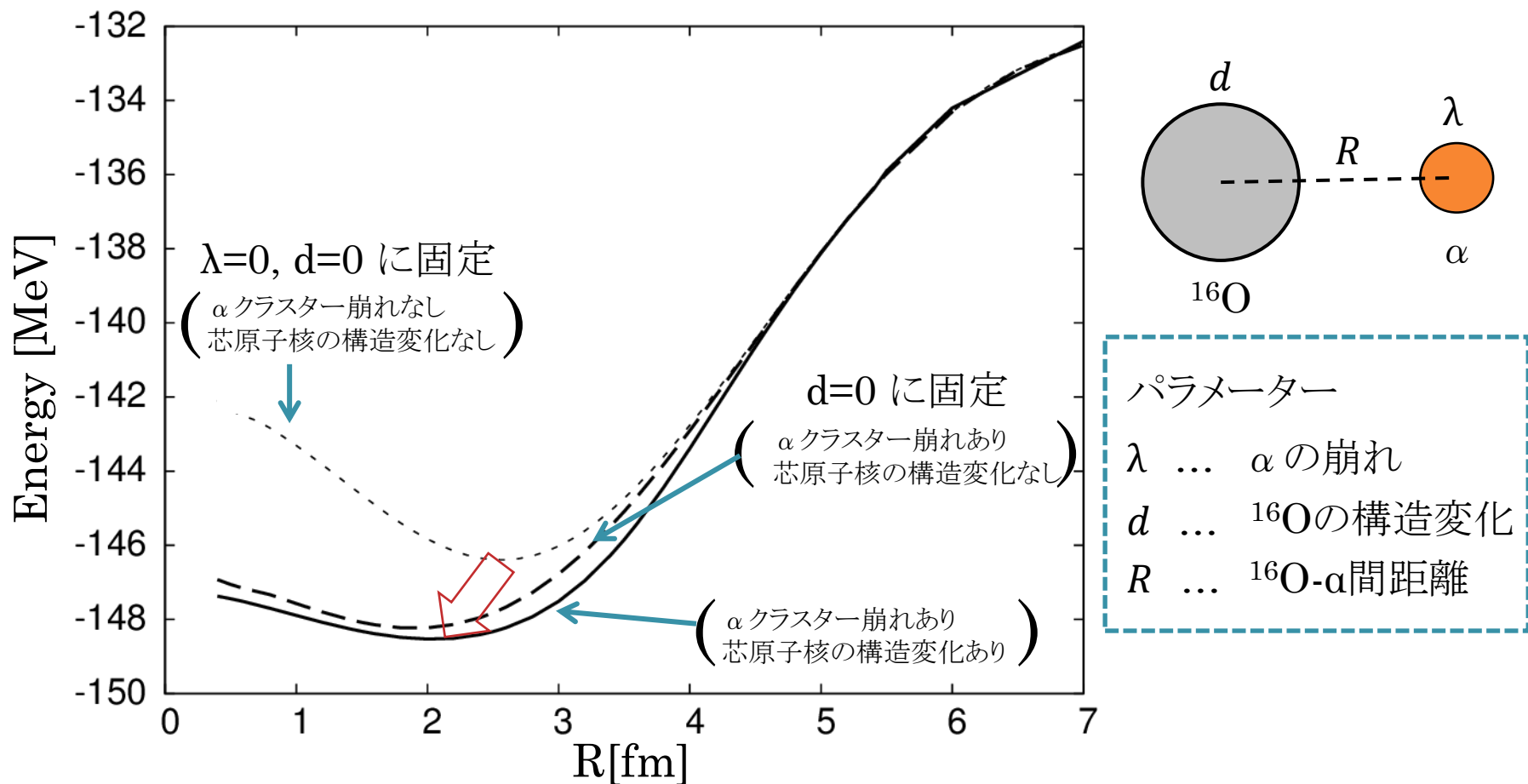
LS力... $\hat{V}_{LS} = \sum_{i < j}^A \sum_{k=1}^2 u_k \exp \left[- \left(\frac{\hat{\mathbf{r}}_{ij}}{b_k} \right)^2 \right] P(^3O) \hat{\mathbf{L}} \cdot \hat{\mathbf{S}}$

G3SR, $u_1 = -2000$ [MeV], $u_2 = 2000$ [MeV]

($b_1 = 0.48$ [fm], $b_2 = 0.60$ [fm])

$^{16}\text{O} + \alpha \ (^{20}\text{Ne})$

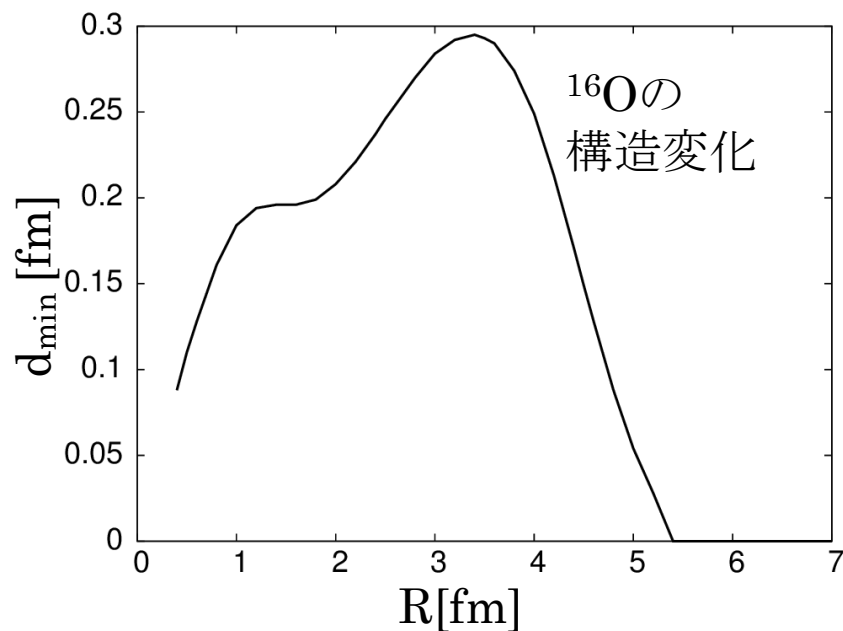
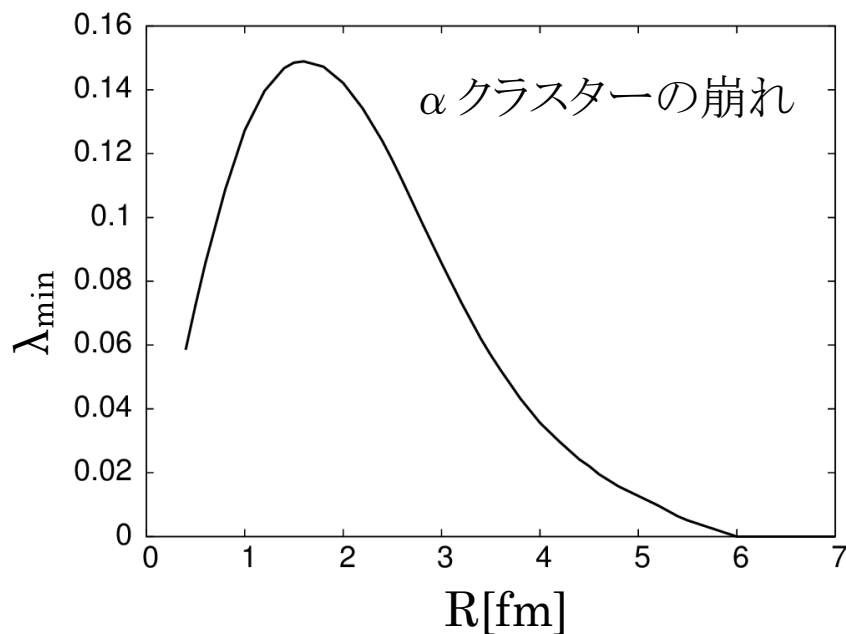
- α クラスターの崩れと ^{16}O の構造変化によるエネルギーへの寄与



板垣らの研究と同様の結果として α クラスターの崩れによりエネルギーは減少しエネルギー最少の R は小さくなる結果が得られた、一方でエネルギーに対する芯の変化は α の崩れに対し効果は少なかった。

$^{16}\text{O} + \alpha \ (^{20}\text{Ne})$

● ^{20}Ne における α クラスターの崩れと ^{16}O の構造変化



- $R < 5\text{fm}$ で α クラスターの崩れと芯構造の変化が両方起こる
- 芯構造の変化の方がより急激に起こる

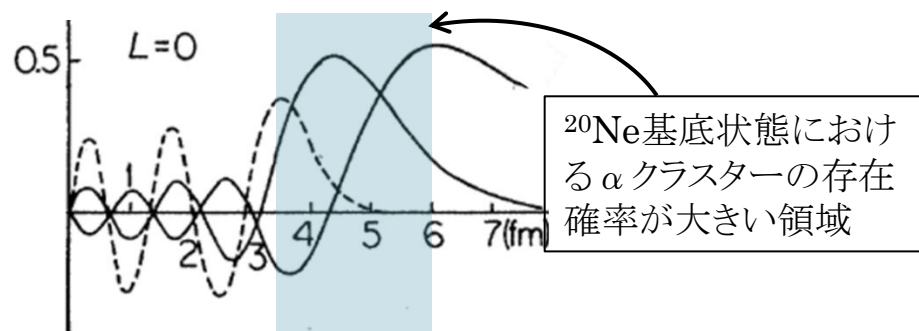
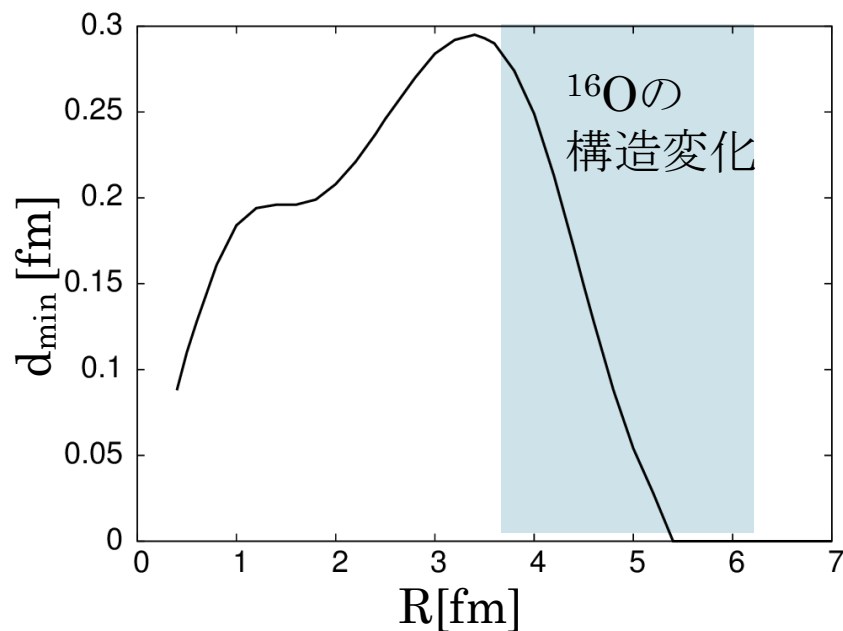
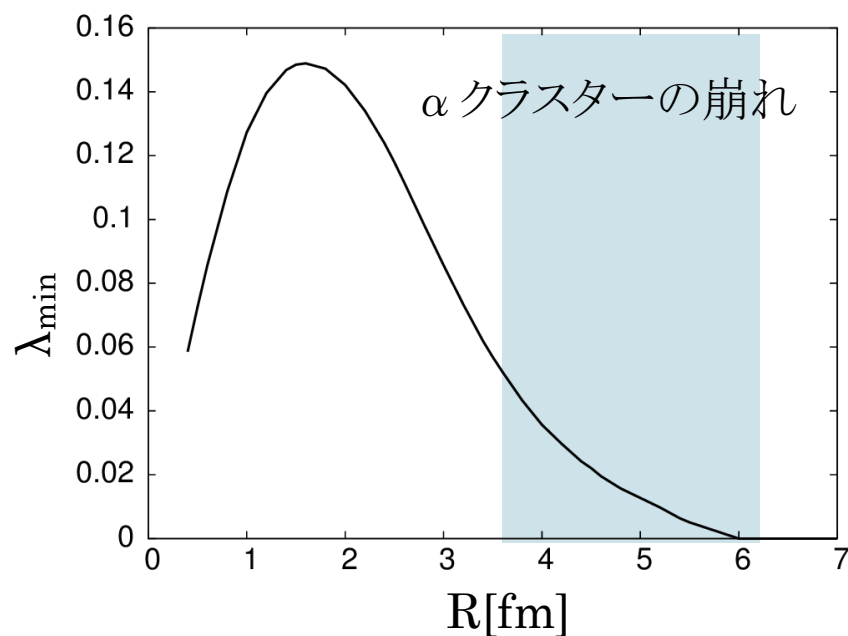
各 R に対し最小のエネルギーを与える状態の

λ_{\min} ... α クラスターの崩れ

d_{\min} ... 芯原子核の構造変化

$^{16}\text{O} + \alpha \ (^{20}\text{Ne})$

○ ^{20}Ne における α クラスターの崩れと ^{16}O の構造変化



各 R に対し最小のエネルギーを与える状態の

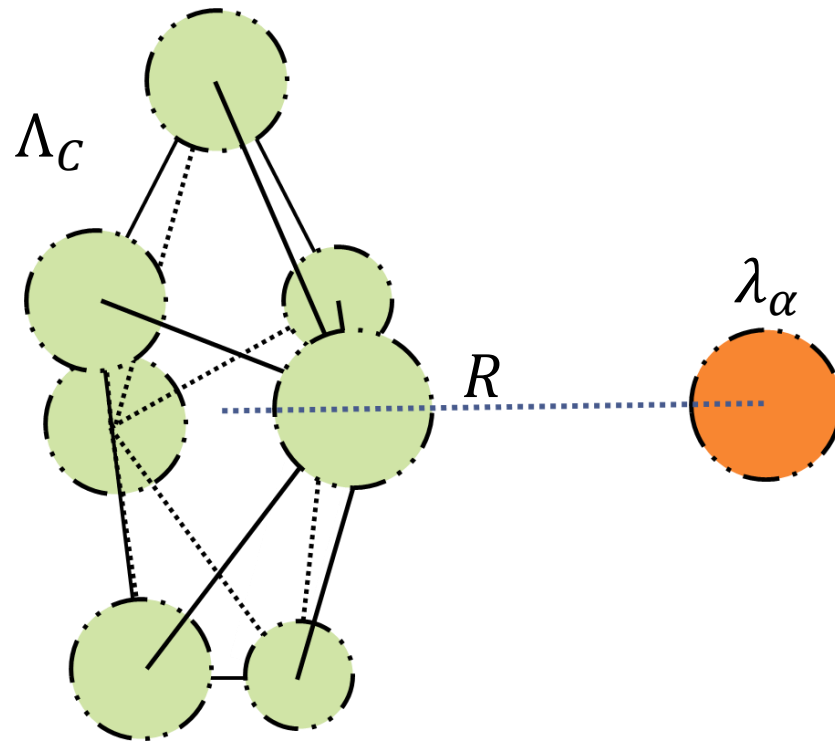
λ_{\min} ... α クラスターの崩れ

d_{\min} ... 芯原子核の構造変化

$^{28}\text{Si} + \alpha$ (^{32}S) : 途中経過

● ^{32}S のモデル・パラメーター

$^{28}\text{Si} + \alpha$



パラメーター

λ_α ... α の崩れ

Λ_C ... ^{28}Si の構造変化

R ... $^{28}\text{Si} - \alpha$ 間距離

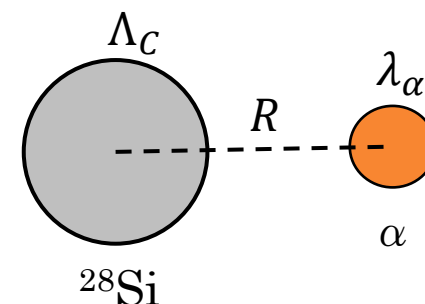
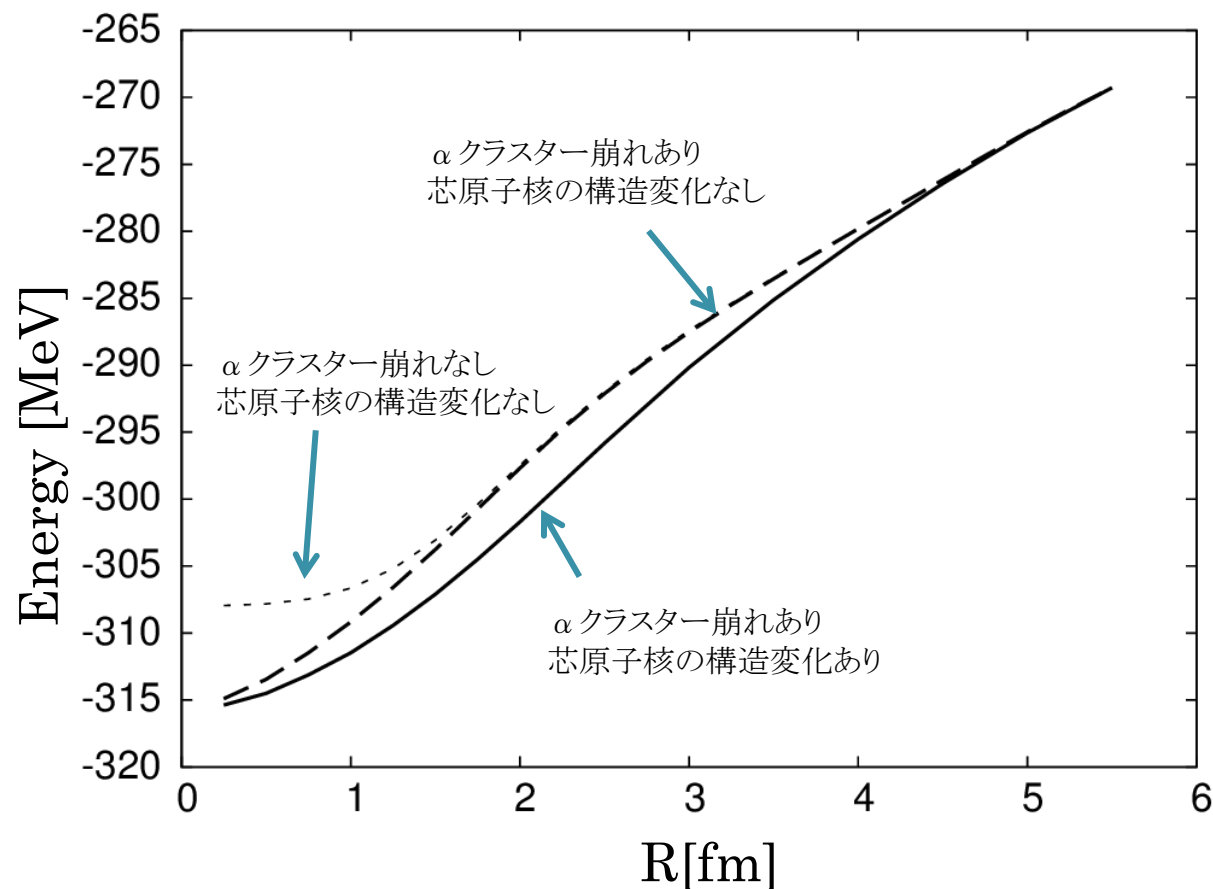
^{28}Si における α の座標は固定

$$\Lambda_C \rightarrow 1 : (0d_{5/2})^{12}$$

$$\Lambda_C \rightarrow 0 : (2,0,0)^4 (1,1,0)^4 (0,2,0)^4$$

$^{28}\text{Si} + \alpha$ (^{32}S) : 途中経過

- α クラスターの崩れと ^{28}Si の構造変化によるエネルギーへの寄与



パラメーター

λ_α ... α の崩れ

Λ_c ... ^{28}Si の構造変化

R ... ^{28}Si -α 間距離

^{32}S では ^{20}Ne の結果と違い芯原子核の構造変化によるエネルギーへの影響が大きく見え、α クラスターの崩れによるエネルギーの寄与は小さく見える

SUMMARY

- “崩れた”クラスターとして α クラスターの崩れと芯原子核の構造変化を考慮した拡張したBrink modelを用いて原子核表面における α クラスターと芯原子核の変化を調べた
- ^{20}Ne において、 α クラスターの崩れに加え ^{16}O 芯の構造変化が効くことがわかった
- ^{32}S では α クラスターの崩れの効果は弱く、 ^{28}Si 芯の構造変化がより重要になることが考えられる

Future work

- 今後・・・ sd-shellのクラスター励起状態の系統的理解に向け崩れを加えたモデルを(角運動量射影、状態の重ね合わせを行って)実際の基底・励起状態に対応させて議論したい
- 将来・・・ 中性子過剰核における α クラスター励起状態においてもd-constraint AMDの手法を用いるなどして、 α クラスター励起状態の系統的な研究を行いたい

参考論文

- T. Lönnroth, et al., Eur. Phys. J. A 46, 5–16 (2010)
- J. Hiura, F. Nemoto and H. Bando, Prog. Theor. Phys. Suppl. 52(1972) 173.
- N. Itagaki, H. Masui, M. Ito, and S. Aoyama, Phys. Rev. C 71, 064307 (2005).
- Simplified modeling of cluster-shell competition in ^{20}Ne and ^{24}Mg
N. Itagaki, J. Cseh, and M. Płoszajczak, Phys. Rev. C 83, 014302 (2011).
- Microscopic Study of Coexistence of Alpha-Cluster and Shell-Model Structure in the ^{40}Ca – ^{44}Ti Region
T. Sakuda, and S. Ohkubo Prog. Theor. Phys. Suppl. 132(1998).
- Structure of Intrinsic States of $K^\pi = 0^+$ Bands in ^{20}Ne
F. Nemoto, Y. Yamamoto, H. Horiuchi, Y. Suzuki, and K. Ikeda, Prog. Theor. Phys. 54(1974) 104.