

^{10}Be におけるトロイダル モードの出現

京都大学

四方 悠貴

共同研究者

延与 佳子, 森田 皓之

Contents

◆ Introduction

- low-energy dipole(LED)の特徴とその励起モード
- 最近の実験結果 (200)
- Isoscalar dipoleとcluster structureの関係

◆ Formulation

- cluster model + GCM
- dipole operators
- toroidal dipole operator

◆ Results

- transition strengths of each dipole operator
- intrinsic structures of excitation states
- excitation modes

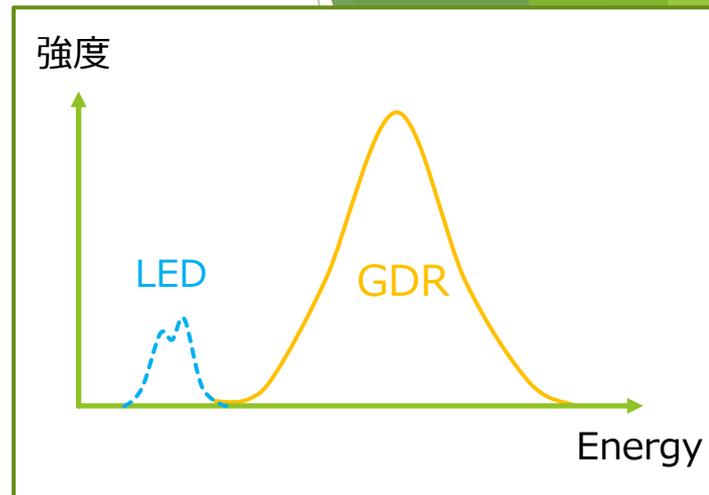
Introduction

- ▶ low-energy dipole(LED)の特徴とその励起モード
- ▶ 最近の実験結果 (200)
- ▶ Isoscalar dipoleとcluster structureの関係

LEDの特徴と励起モード

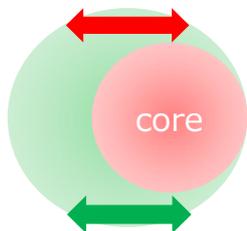
特徴

- low-energy dipole (LED) は giant dipole resonance (GDR) より下の領域に出現。
- 昔から一部の原子核において LED は見つかったが、近年の RI beam の発展により、中性子過剰核などでLEDが多数見つかかり注目を集めている。
- LED は様々な特徴を示し、多様な励起モードを持つ可能性も指摘されている。

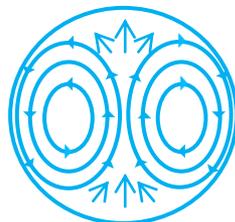


LED(candidates)

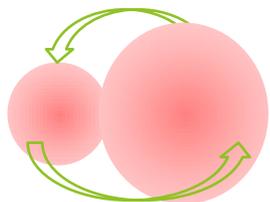
“pygmy mode”



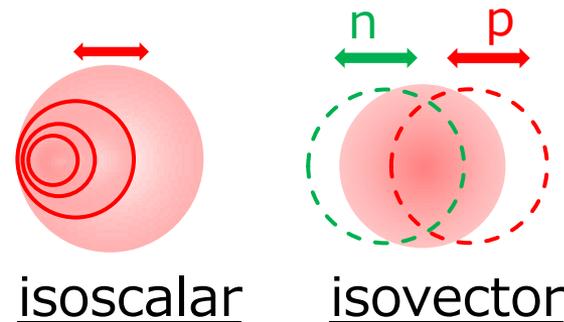
“toroidal mode”



“cluster mode”



GDR

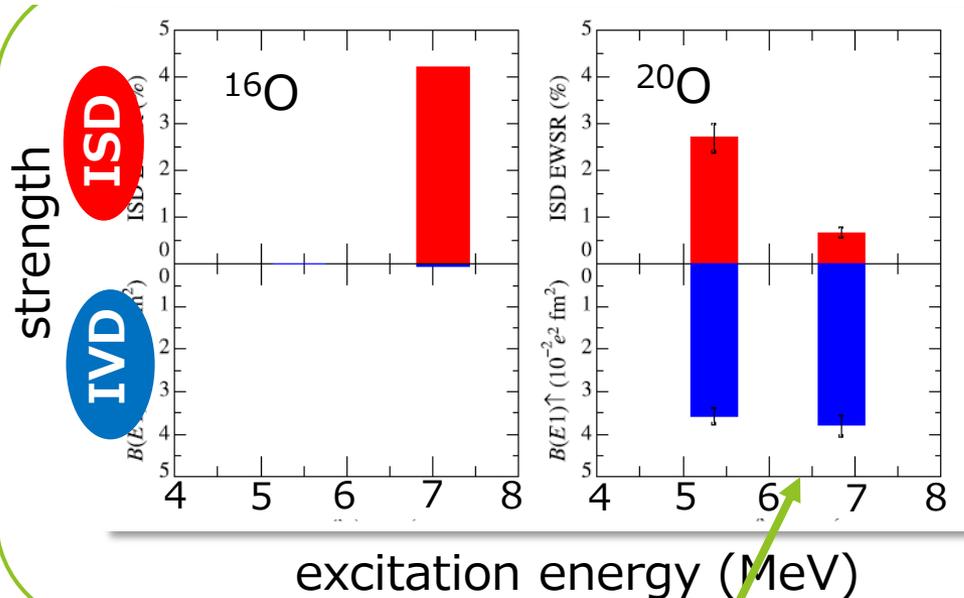


LED がどのような励起モードを持つのか
ということがここ最近注目を集めている話題！

最近の実験結果

N. Nakatsuka *et al.*, Phys. Lett. B **768** (2017) 387–392

最近測定された²⁰OのLED



- ◆ ¹⁶Oでは強い IS LED を持つ。
- ◆ ²⁰Oでは強い LED を持つ2つの状態が得られた。



- IS and IV strong
- IV dominant

様々な特徴！！
→異なる励起モード？

1₂のみ再現？

RPA calculation

interaction	E (MeV)	ISD EWSR(%)	B(E1)
SkI2	6.51	0.43	3.49 × 10 ⁻²

1₁ は平均場模型で記述するのが困難な状態？

IS dipoleとCluster structureの関係

Y. Chiba, *et al.*, Phys. Rev. C **93**, 034319 (2016)

Chiba らによって、Isoscalar dipole 遷移は cluster structure の probe になり得る事が解析的に示された。

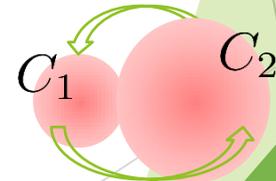
◆ ISD operator

$$M^{ISD}(\mu) = \sum_{i=1}^A (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{c.m.})^2 \mathcal{Y}_{1\mu}(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{c.m.}), \quad \mathcal{Y}_{1\mu}(\mathbf{r}) = r Y_{1\mu}(\hat{\mathbf{r}})$$


$$M^{ISD}(\mu) = \frac{5}{3} \left(\frac{C_2}{A} \sum_{i \in C_1} \xi_i^2 - \frac{C_1}{A} \sum_{i \in C_2} \xi_i^2 \right) \mathcal{Y}_{1\mu}(\mathbf{r}) - \frac{C_1 C_2 (C_1 - C_2)}{A^2} r^2 \mathcal{Y}_{1\mu}(\mathbf{r}) + \dots$$

式変形によって、cluster 相対運動を励起する項を含んでいることを発見 !!

$\xi_i = \mathbf{r}_i - \mathbf{R}_{C_1}$: クラスタ内核子の内部座標
 \mathbf{r} : クラスタ間の相対座標



実際、励起状態が純粋な cluster 状態と仮定すると、ISD 強度は強い強度を持つ事が示された。

Our purpose and motivation

本研究の目的

LEDの励起モードをcluster structureの観点から明らかにする！

⇒ $^{10}\text{Be}(2\alpha + 2n)$ のIV and IS LEDを研究。

^{10}Be 研究のmotivation

- 先行研究では ^{10}Be のlow-energy states は $^6\text{He} + \alpha$ model で良く記述出来ていた。
Y. Ogawa, Nucl. Phys. A **673**, 122 (2000)
Y. Kanada-En'yo, T. Suhara, Phys. Rev. C **85**, 024303 (2012) etc.
- AMDによる計算で ^{10}Be に IV(IS) LED の出現が预言されていたが、その励起モードや出現機構についてはあまり言及されていなかった。
Y. Kanada-En'yo, Phys. Rev. C **93**, 024322 (2016)



$^6\text{He} + \alpha$ cluster model を用いて ^{10}Be LED の励起モードを研究

Formulation

- ▶ cluster model + GCM
- ▶ dipole operators
- ▶ toroidal dipole operator

- ▶ cluster model with GCM
→ to obtain the ground and excited(1^-) states of ^{10}Be
- ▶ transition strengths of different dipole op.
→ to investigate properties of 1^- states.

Cluster model wave function

模型関数として、Brink-Brochの波動関数を用いる。

$$\Phi(\sigma; D) = \mathcal{A} [\Phi_{6\text{He}}^\sigma(\mathbf{S}_1) \Phi_\alpha(\mathbf{S}_2)]$$

σ : a configuration of ${}^6\text{He}$
 D : distance between clusters

◆ single particle w. f.

$$\phi_i = \psi_i(\mathbf{r}) \chi_i \xi_i$$

space
 $\psi_i(\mathbf{r}, \mathbf{S}_k) = \exp \left[-\nu \left(\mathbf{r} - \frac{\mathbf{S}_k}{\sqrt{\nu}} \right)^2 \right], (k = 1, 2)$

spin
 χ_i

isospin
 $\xi_i = \textit{proton or neutron}$

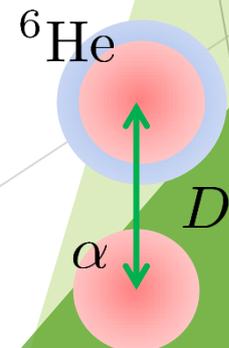
◆ each cluster w. f.

$$\Phi_{C_k}(\mathbf{S}_k) = \mathcal{A} [\phi_1(\mathbf{S}_k) \phi_2(\mathbf{S}_k) \cdots \phi_{C_1}(\mathbf{S}_k)]$$

${}^6\text{He}$ と α はそれぞれ調和振動子殻模型の、
 $(0s)^4 (0p)^2$ と $(0s)^4$ で近似する。

$$\mathbf{S}_1 = \left(0, 0, \frac{2}{5} D \right) \quad \mathbf{S}_2 = \left(0, 0, -\frac{3}{5} D \right)$$

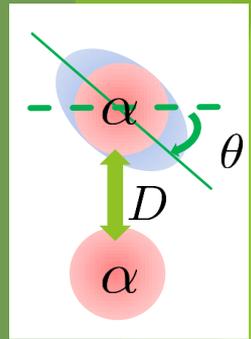
➡ 重心が原点に来るように配置



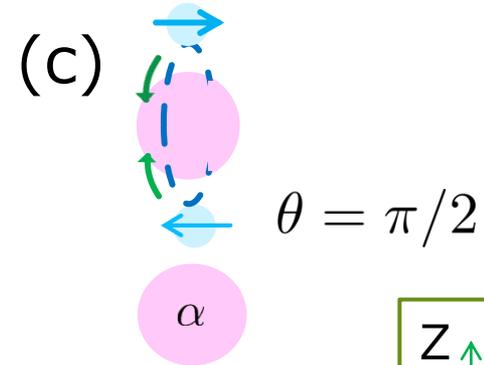
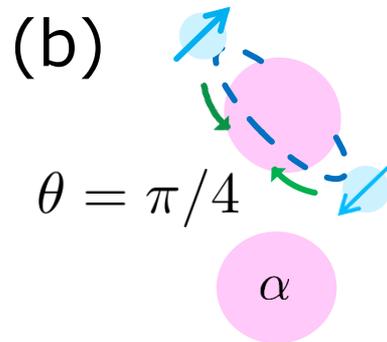
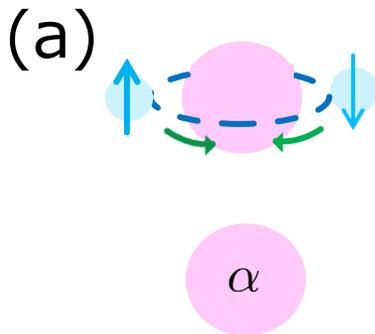
base configurations of ${}^6\text{He}$

We include these 6 configurations in order to include p^2 model space for two valence neutrons in ${}^6\text{He}$.

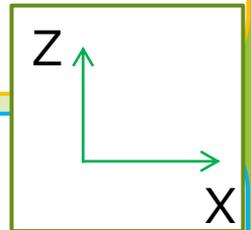
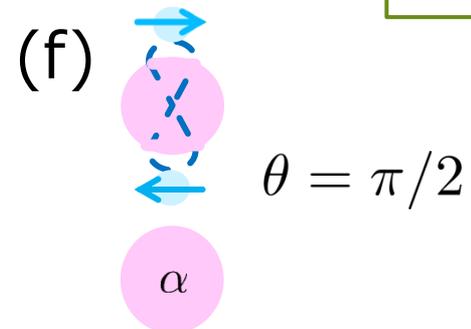
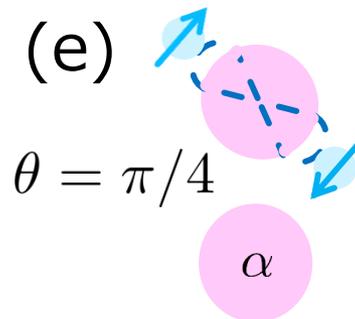
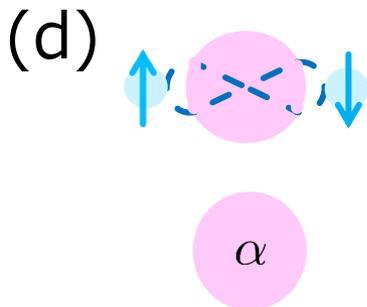
$$\Phi_{6\text{He}}^\sigma(\mathcal{S}_1): \sigma = (\text{a}) \sim (\text{f})$$



➤ $(p_{3/2})^2$ configurations : $|p_{(+)}, n \uparrow\rangle |p_{(-)}, n \downarrow\rangle$



➤ 2 valence neutron's total spin $S_{nn}=0$: $|p_x, n \uparrow\rangle |p_x, n \downarrow\rangle$



GCM and Hamiltonian

GCM wave function

$$|\Psi_M^{J\pm}\rangle = \sum_{D,\sigma} \sum_K c_{D,\sigma,K} P_{MK}^{J\pm} |\Phi(\sigma; D)\rangle$$

係数 $c_{D,\sigma,K}$ は norm と hamiltonian を対角化することによって得られる。
重ね合わせの際、用いた base は

$$\begin{cases} D = 1, 2, 3, \dots, 8 \text{ fm} \\ \sigma = a, b, c, \dots, f \end{cases} \quad \text{の } 8 \times 6 = 48 \text{ base を用いた。}$$

effective interaction

$$H = -\frac{\hbar^2}{2M} \sum_{i=1}^A \nabla_i^2 - T_G + \sum_{i<j} (v_{ij}^{\text{central}} + v_{ij}^{\text{Coulomb}} + v_{ij}^{\text{LS}})$$

◆ central force : Volkov No.2

$$b = h = 0.125, m = 0.60$$

A. B. Volkov, Nucl. Phys. **74**, 33 (1965)

◆ spin-orbit interaction : G3RS
(two range gaussian form)

$$u_I = -u_{II} = u_{ls} = 1600 \text{ MeV}$$

R. Tamagaki, Prog. Theor. Phys. **39**, 91 (1968)

Toroidal dipole operator

- ◆ ordinary dipole operators are E1 and isoscalar dipole operators.



$$\begin{cases} M_{E1}(\mu) = \int d^3r \rho_{IV}(\vec{r}) r Y_{1\mu}(\hat{r}) \\ M_{IS}(\mu) = \int d^3r \rho(\vec{r}) r^3 Y_{1\mu}(\hat{r}) \end{cases}$$

- ◆ new type of dipole operator is considered. (measure of nuclear vorticity)
→ **Toroidal dipole (TD) operator**

$$M_{TD}(\mu) = \frac{-1}{10\sqrt{2}c} \int d\vec{r} (\hat{\nabla} \times \vec{j}_{nucl}(\vec{r})) \cdot r^3 \vec{Y}_{11\mu}(\hat{r})$$

J. Kvasil *et al.*, Phys. Rev. C **84**, 034303 (2011)

$$\vec{Y}_{jL\mu}(\hat{r}) = \sum_{\alpha,\beta} \langle L\alpha, 1\beta | j\mu \rangle Y_{L\alpha}(\hat{r}) \vec{e}_\beta \quad \vec{e}_\beta : \text{unit vector in spherical basis} \\ (\beta = 0, \pm 1)$$

$$\rho_{IV}(r) = \frac{N}{A} \rho_p(r) - \frac{Z}{A} \rho_n(r)$$



遷移強度 $B(0^+ \rightarrow 1^-) = |\langle 1^- || M_D || 0^+ \rangle|^2$

Results

- ▶ transition strengths of each dipole operator
- ▶ intrinsic structures of excitation states
- ▶ excitation modes

Y. Kanada-En'yo, Y. S, Phys. Rev. C **95** 064319(2017)

E1 and ISD modes

calculated energy weighted sum
(EWS) に対する割合を plot

$$\text{EWS}(E1) = 63 \text{ (MeV fm}^2\text{)}$$

$$\text{EWS}(\text{ISD}) = 13 \times 10^3 \text{ (MeV fm}^6\text{)}$$

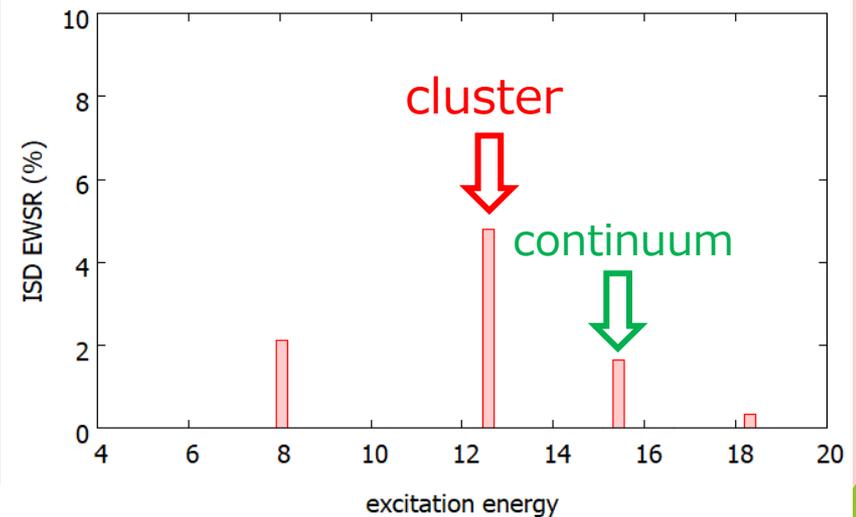
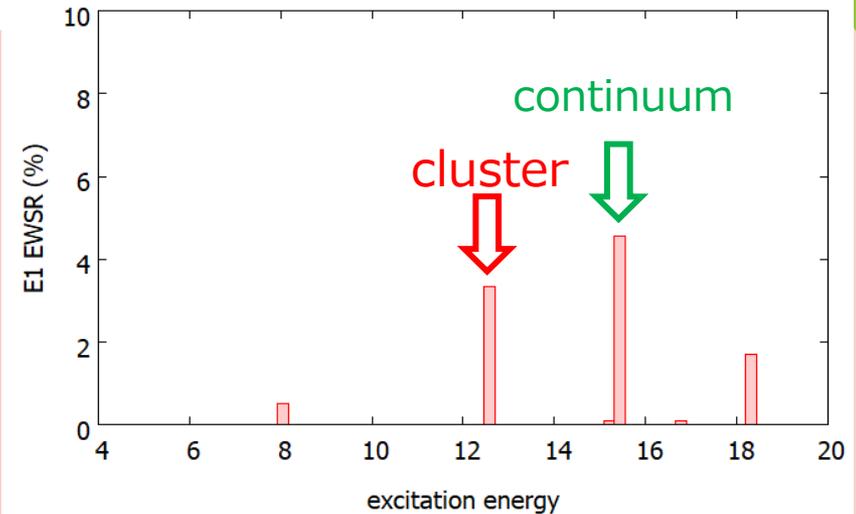
Y. Kanada-En'yo, Phys. Rev. C **93**, 024322 (2016)



その結果、特徴的な二つの強度が得られた。

- ◆ 12.58 MeV : IS and E1 strong(**red**)
- ◆ 15.43 MeV : E1 strong(**green**)

後述の解析で、それぞれ
red : cluster 励起
green : continuum への励起
であることがわかった。

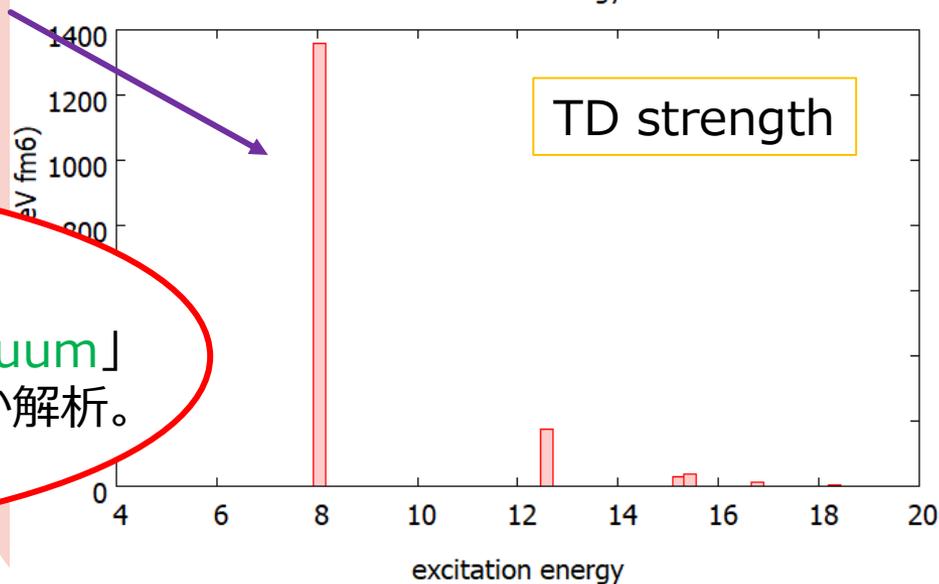
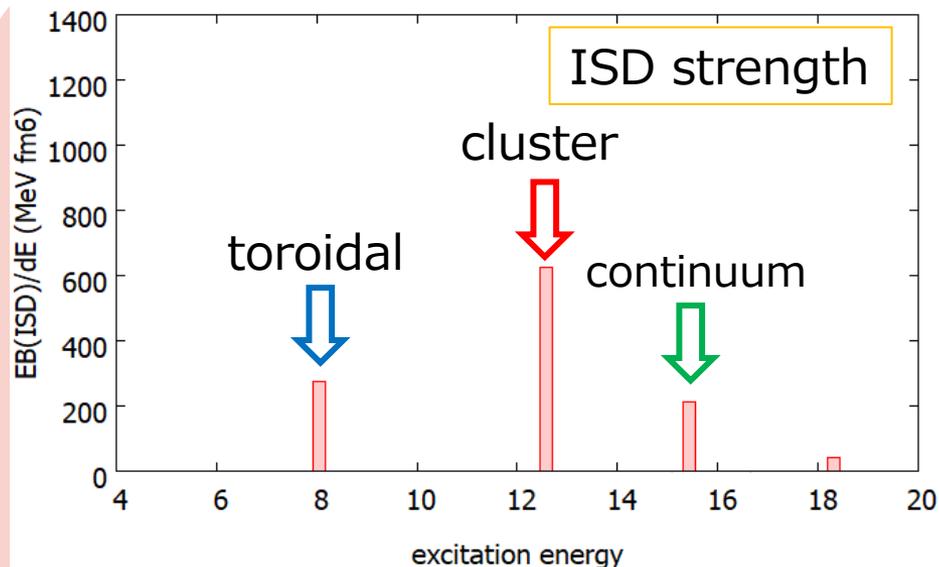


Toroidal strength in LED

Toroidal dipole operator による transition strengthを見る。

1_1^- は TD operator によって 非常に強く enhanced!!

特徴的な強度を持つ3つの状態
「toroidal」, 「cluster」, 「continuum」
がどのような励起モードを持つのか解析。

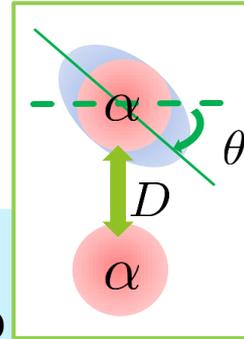


analysis of cluster and continuum

GCMによって得られた状態波動関数とbase波動関数との squared overlapを計算し、状態を解析。

ground state

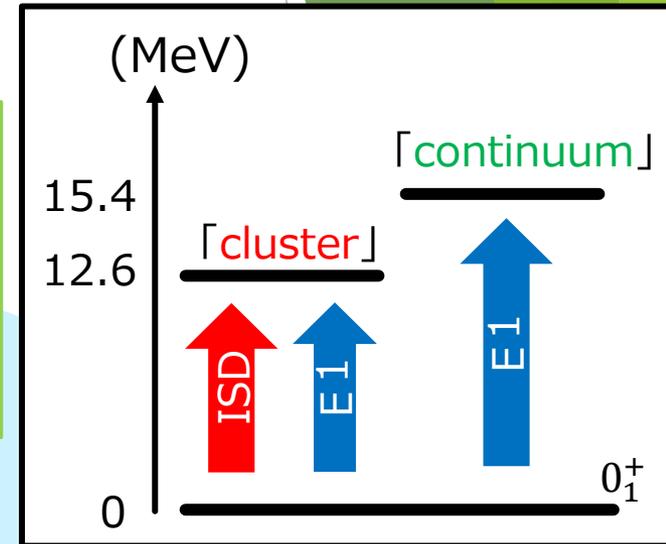
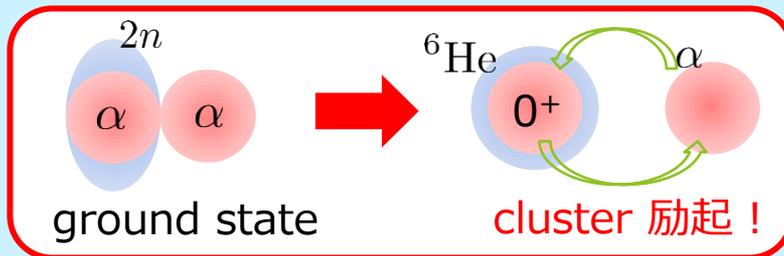
- $D = 3 \text{ fm}$ かつ $\theta = 0$ で最大のoverlap



cluster

- $D = 6 \text{ fm}$ で最大の overlap
- さらに、全ての θ でほぼ同じ overlap

➡ ${}^6\text{He}$ が 0^+ を組み、cluster が発達した状態



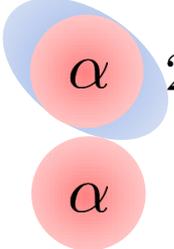
continuum

- $D = 8 \text{ fm}$ 以上に広がっていくような振る舞い。

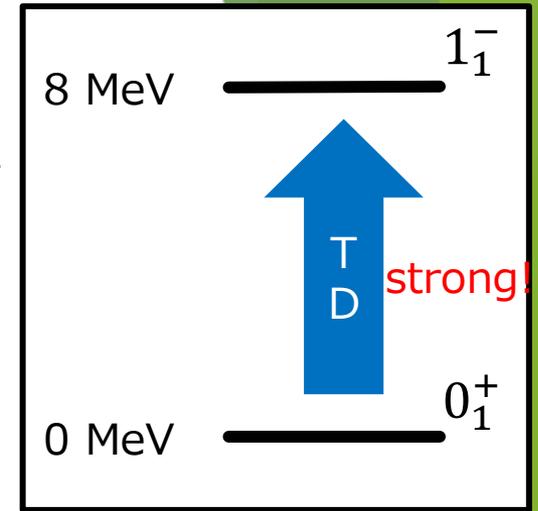
➡ cluster 崩壊を起こす連続状態 (continuum) への遷移と考えられる。

Toroidal current in 1_1^-

同様に TD strength の強かった「toroidal」状態も解析



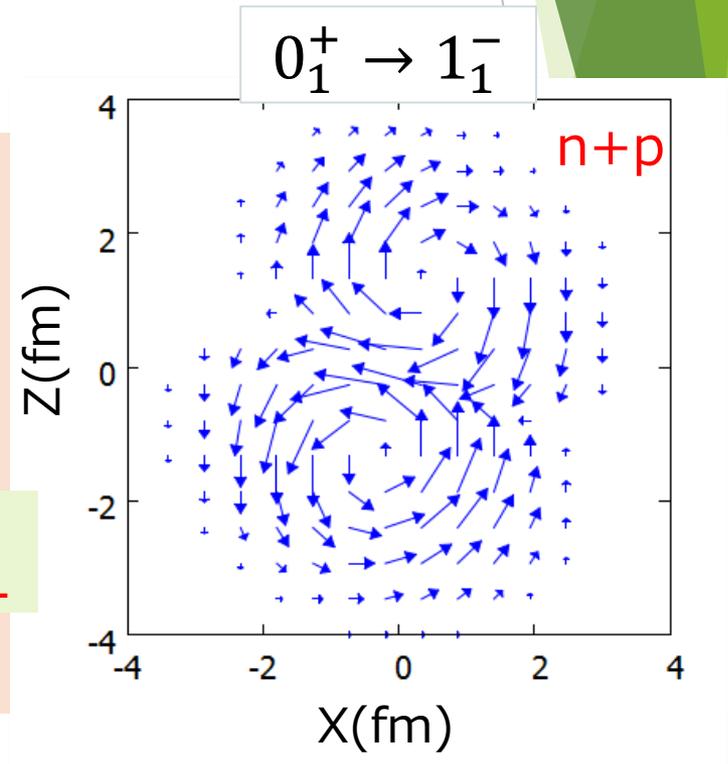
$\theta = \pi/4$
 $D = 4 \text{ fm}$
の状態 で最大の overlap



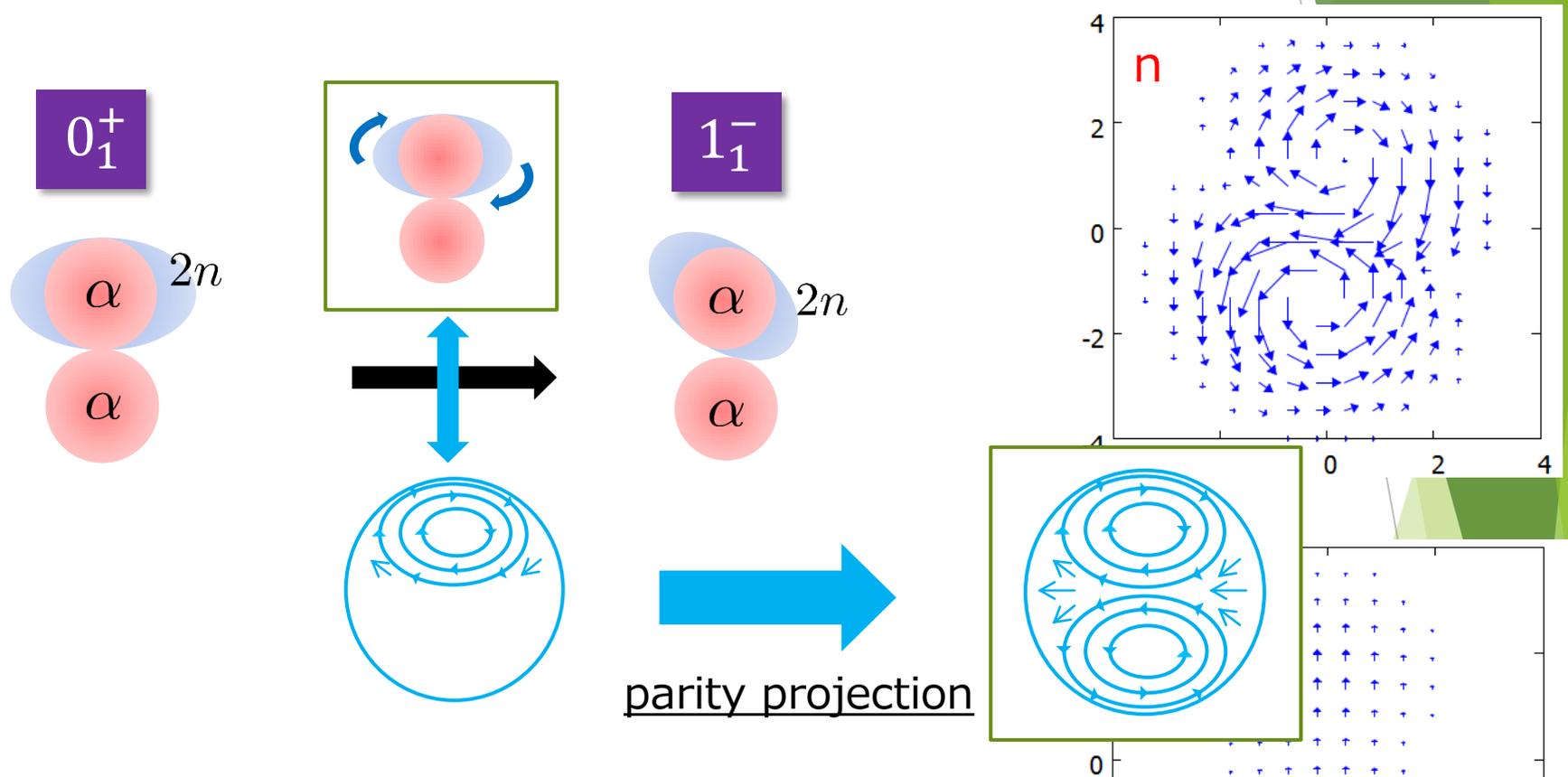
さらに、励起モードの解析のために transition current density を計算。

$$\delta \mathbf{j} = \langle f | \mathbf{j}_{nucl} | i \rangle$$

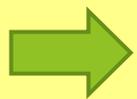
Toroidal mode appears!!



Mechanism of toroidal mode



rotation of ${}^6\text{He}$ cluster (or surface neutron flow)



Toroidal mode appears!!

Summary

- ▶ クラスタモデルを用いて ^{10}Be のLEDを研究。
- ▶ 遷移強度を計算した結果、3つの強いLED強度をもつ状態が得られた。
- ▶ ISD and E1の強い状態はcluster相対運動による励起。
- ▶ TD opにより強くenhanceされた状態への励起モードはToroidal mode
- ▶ Toroidal modeは変形したクラスタが回転することにより現れることを明らかにした。