軽い核における
低エネルギー双極子励起

Y. S., Y. Kanad-En'yo, and H. Morita, arXiv:1902.10962

京都大学

四方 悠貴

共同研究者：延與佳子、森田皓之

Outline

Introduction

- Low-energy dipole(LED)とr-processの関係
- LED励起モードの候補
- Motivation and purpose

Formulation

- Cluster model with generator coordinate method(GCM)
- Dipole operators

Results and analysis

- LED in ^{10}Be
- Analysis for LED states
- vortical mode
- E1 and CD mode

Outline

Introduction

- Low-energy dipole(LED)とr-processの関係
- LED励起モードの候補
- Motivation and purpose

Formulation

- Cluster model with generator coordinate method(GCM)
- Dipole operators

Results and analysis

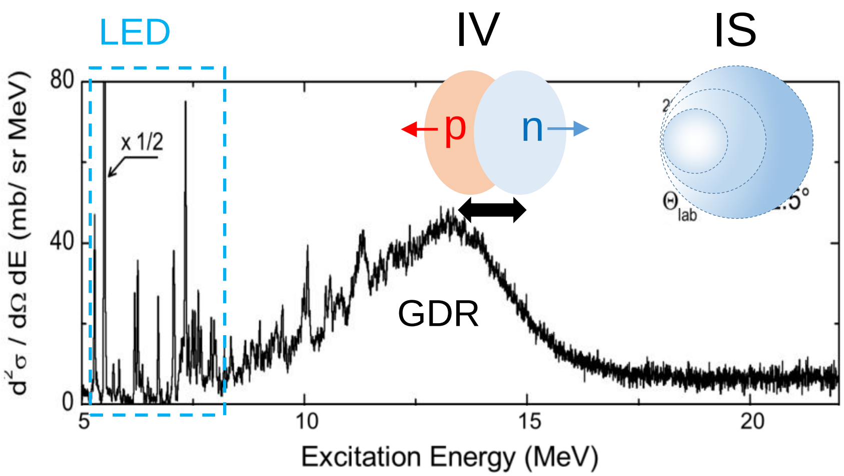
- LED in ^{10}Be
- Analysis for LED states
- vortical mode
- E1 and CD mode

Low-energy dipole (LED)

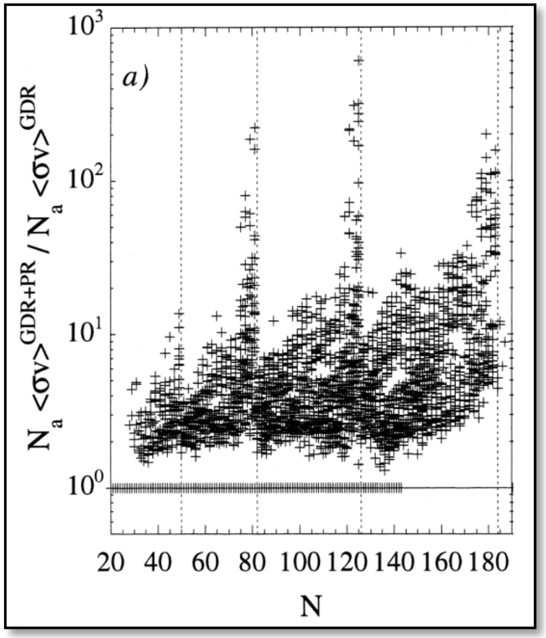
◆ Low-energy dipole (LED)

- 巨大共鳴 (GDR) よりも低いエネルギー領域に強い双極子励起強度の出現
- 中性子過剰核に多くみられるが、一部のN=Z核においても見つかっている。
- 中性子分離エネルギー付近に出現

➡ (n,γ)反応率に大きく影響



A. Tamii et al., Phys.Rev.Lett. 107 (2011) 062502



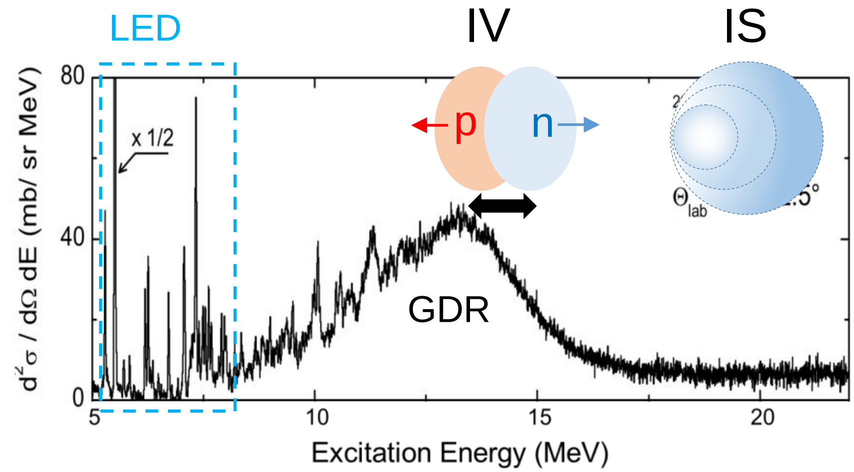
S. Goriely, Phys. Lett. B **436** (1998) 10-18

Low-energy dipole (LED)

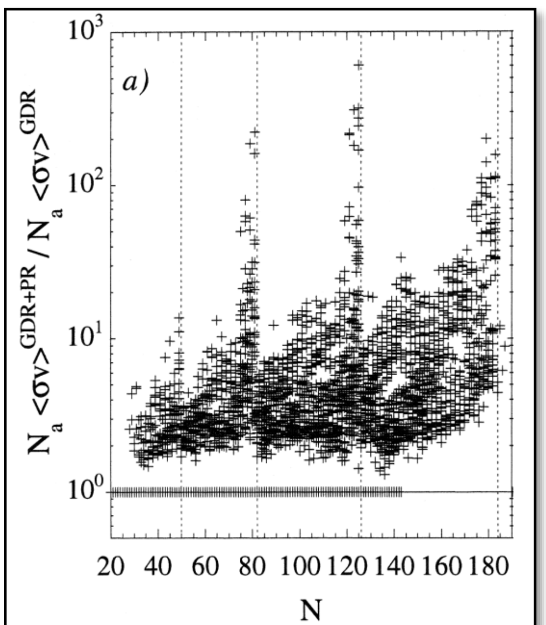
◆ Low-energy dipole (LED)

- 巨大共鳴 (GDR) よりも低いエネルギー領域に強い双極子励起強度の出現
- 中性子過剰核に多くみられるが、一部のN=Z核においても見つかっている。
- <u>中性子分離エネルギー付近に出現</u>

➡ (n,γ)反応率に大きく影響



A. Tamii et al., Phys.Rev.Lett. 107 (2011) 062502



S. Goriely, Phys. Lett. B **436** (1998) 10-18

多くのインプットは理論予測・外挿に頼っている

LEDの正確な予測が必要

⬍

未だに統一的な理解はなされていない

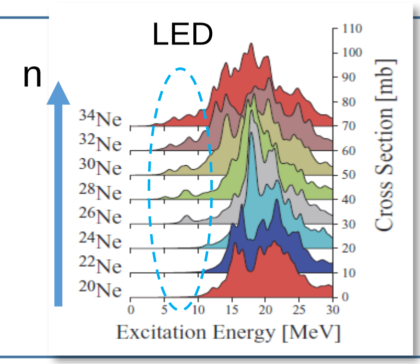
特にその励起モードは活発な議論の的

Features of LED excitations

1. Neutron excess

中性子過剰核では系統的にLED強度が見つかっている。

➡ **Neutron excess is one of the keyword !**

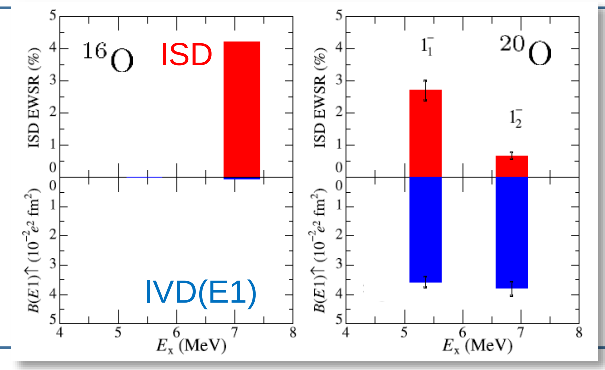


T. Inakura et al., PRC **84**, 021302(2011)

2. N=Z nuclei

中性子過剰核だけでなく、いくつかのN=Z核でもLEDが存在（特にisoscalar型）

➡ **中性子過剰核とは異なる励起モードの存在を示唆!**



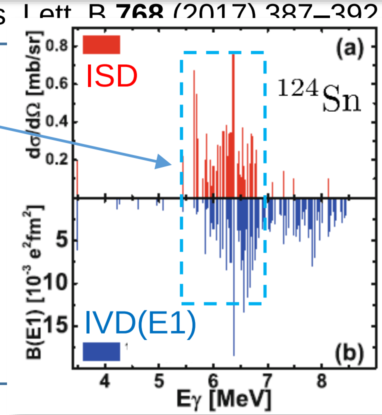
N. Nakatsuka et al., Phys. Lett. B **768** (2017) 387–392

3. Isospin dependence

低エネルギー領域の中でも、エネルギー領域に応じて異なる特徴を示す。

	lower	higher
isoscalar (IS)	strong	weak
isovector (IV)	strong	strong

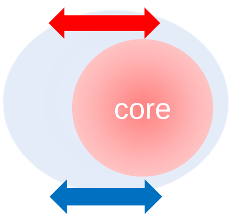
➡ **この二つの領域では励起モードが分離？**



J. Endres et al., PRC **85**, 064331 (2012).

Candidates of LED excitation modes

"pygmy mode"



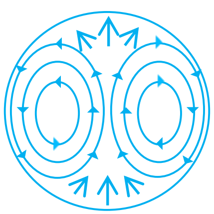
K. Ikeda, INS Report JHP-7 (in Japan) (1988).

- coreと余剰中性子の逆位相振動.
- coreと余剰中性子の振動によりIV strengthが生じる.
- Core motionによってISD strengthが生じる.

pygmy modeだけではLEDのすべての特徴は説明できない.

other candidates

"toroidal mode"



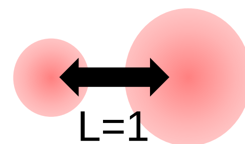
Fluid vortical mode

V. M. Dubovik et al.,
Sov. J. Part. Nucl. **5**, 318 (1974).

- IS・IV strengthsを生じる.
- N=Z nucleiにおいても出現できる.
- 近年では微視的な理論計算によってその存在が予測されている。

A. Repko et al., PRC **87**, 024305 (2013).

"cluster mode"



Excitation by clusters relative motion.

クラスター相対運動による励起がISD強度をenhanceする

$$M_{\rm ISD}(\mu) = \frac{5}{3}\left(\frac{C_2}{A}\sum_{i\in C_1}\xi_i^2 - \frac{C_1}{A}\sum_{i\in C_2}\xi_i^2\right)\mathcal{Y}_{1\mu}(\boldsymbol{r}) - \frac{C_1C_2(C_1-C_2)}{A^2}r^2\mathcal{Y}_{1\mu}(\boldsymbol{r}) + \cdots$$

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

Motivation and purpose

◆ motivation

これまでのLEDの研究はほとんどが平均場模型によるもの

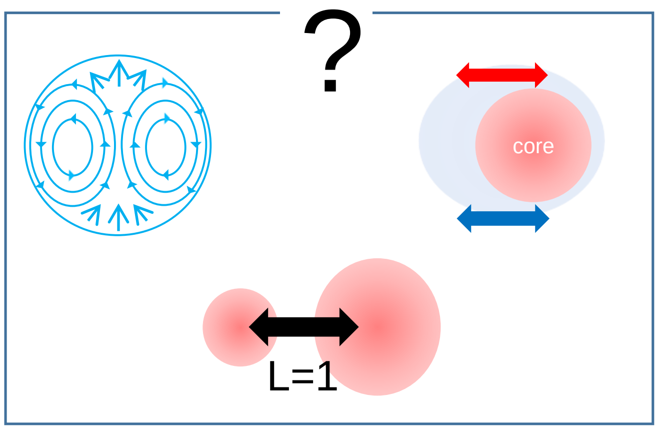
- 平均場模型でクラスター励起状態を記述することが得意ではない
- 軽い核ではクラスター励起状態が低エネルギー領域に出現

◆ Our purpose

軽い核におけるLED励起モードをクラスター構造の観点から明らかにする！！

We studied IS and IV LED in ^{10}Be which shows the cluster structure.
(2α + 2valence neutrons)

Outline



Introduction

- Low-energy dipole(LED)とr-processの関係
- LED励起モードの候補
- Motivation and purpose

Formulation

- Cluster model with generator coordinate method(GCM)
- Dipole operators

Results and analysis

- LED in ^{10}Be
- Analysis for the LED states
- Vortical mode
- E1 and CD mode

Cluster model + GCM

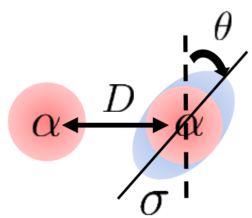
◆ 2 type of cluster model

$\alpha + {}^6\mathrm{He}$ model

$D = 1, 2, 3, \cdots, 8$ fm

$\theta = 0, \pi/4, \pi/2$

$\sigma : (p_{3/2})^2$ or $S_{nn} = 0$

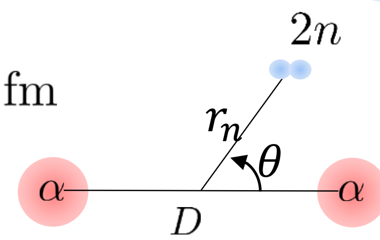


$\alpha + \alpha + 2n$ model

$r_n = 0.4, 1.4, \cdots, 5.4$ fm

$D = 2, 3, \cdots, 6$ fm

$\theta = 0, \pi/8, \cdots, \pi/2$



single particle w. f. : $\phi_i(\boldsymbol{S}) = \psi_i(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{S})\chi_i\xi_i, \;\; \psi_i(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{S}) = \exp\left[-\nu\left(\boldsymbol{r} - \frac{\boldsymbol{S}}{\sqrt{\nu}}\right)^2\right]$

Cluster w.f. :
$$\begin{cases} \Phi_\alpha(\boldsymbol{S}_1) = \mathcal{A}[\phi_{n\uparrow}(\boldsymbol{S}_1)\phi_{n\downarrow}(\boldsymbol{S}_1)\phi_{p\uparrow}(\boldsymbol{S}_1)\phi_{p\downarrow}(\boldsymbol{S}_1)] \\ \Phi_{^6\mathrm{He}}(\boldsymbol{S}_2) = \mathcal{A}[\phi_{n\uparrow}(\boldsymbol{S}_2)\phi_{n\downarrow}(\boldsymbol{S}_2)\phi_{p\uparrow}(\boldsymbol{S}_2)\phi_{p\downarrow}(\boldsymbol{S}_2)\phi^\sigma_n(\boldsymbol{S}_2)\phi^\sigma_n(\boldsymbol{S}_2)] \end{cases}$$

◆ the total wave function of ^{10}Be

$$\Phi^{J^\pi}_{^{10}\mathrm{Be}} = \sum_{\beta, K} c^J_K(\beta)\hat{P}^J_{MK}\hat{P}^\pi\Phi_{^{10}\mathrm{Be}}(\beta)$$

Cluster model functionをGCMによって重ね合わせることで
^{10}Beの状態を求める。

Hamiltonian and dipole operator

◆ Hamiltonian

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

central force :Volkov No.2

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

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

spin-orbit interaction : G3RS

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

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

◆ Dipole operators

- *E*1 operator

$$M_{E1}(\mu) = \int d^3r\ \rho_{IV}(\vec{r}) r Y_{1\mu}(\hat{\vec{r}}) \qquad \left(\rho_{IV}(r) = \frac{N}{A}\rho_p(r) - \frac{Z}{A}\rho_n(r)\right)$$

- Compressive dipole (CD) operator corresponding to ISD operator

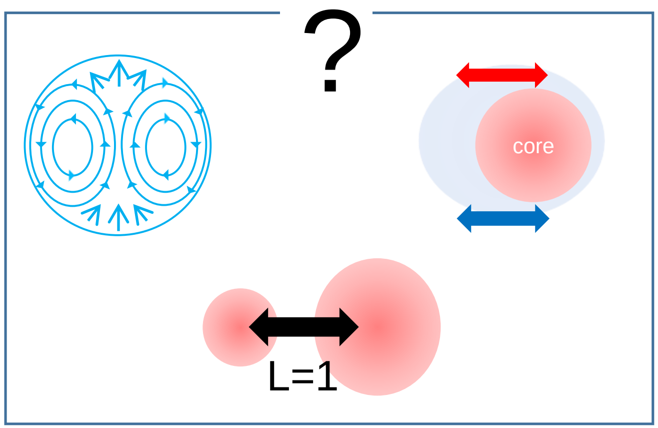
$$M_{\text{CD}}(\mu) = \frac{-1}{10\sqrt{2}c}\int d^3r\ \nabla\cdot\vec{j}_{nucl} r^3 Y_{1\mu} \quad \Longleftrightarrow \quad M_{\text{ISD}}(\mu) = \int d^3r\ \rho(\vec{r}) r^3 Y_{1\mu}(\hat{\vec{r}})$$

- Toroidal dipole (TD) operator・・・measure of vorticity.

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

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

Outline

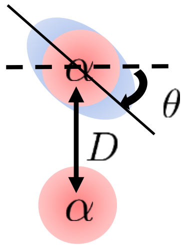


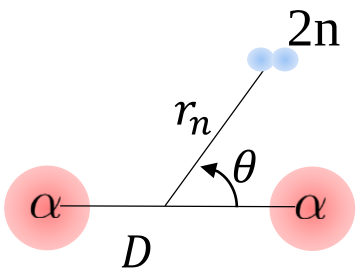
Introduction

- Low-energy dipole(LED)とr-processの関係
- LED励起モードの候補
- Motivation and purpose

Formulation

- Cluster model with generator coordinate method(GCM)
- Dipole operators



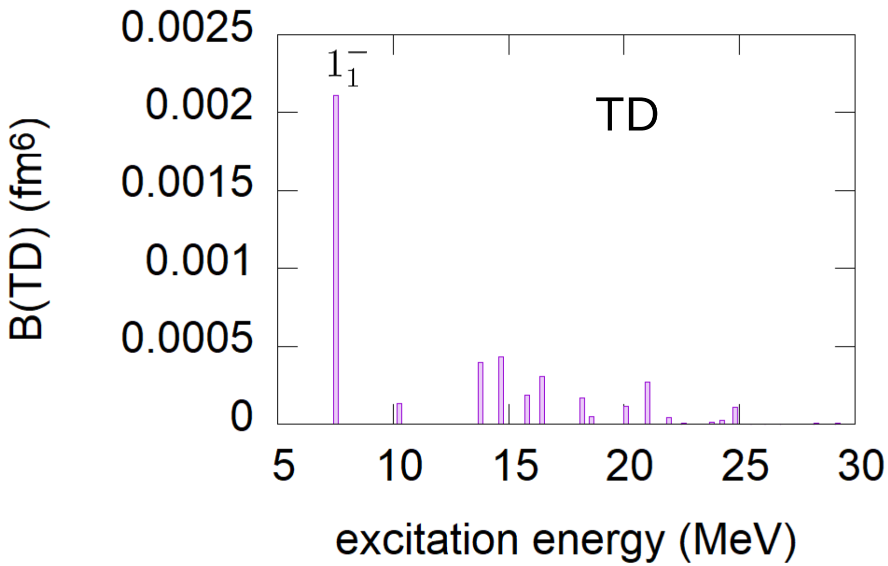


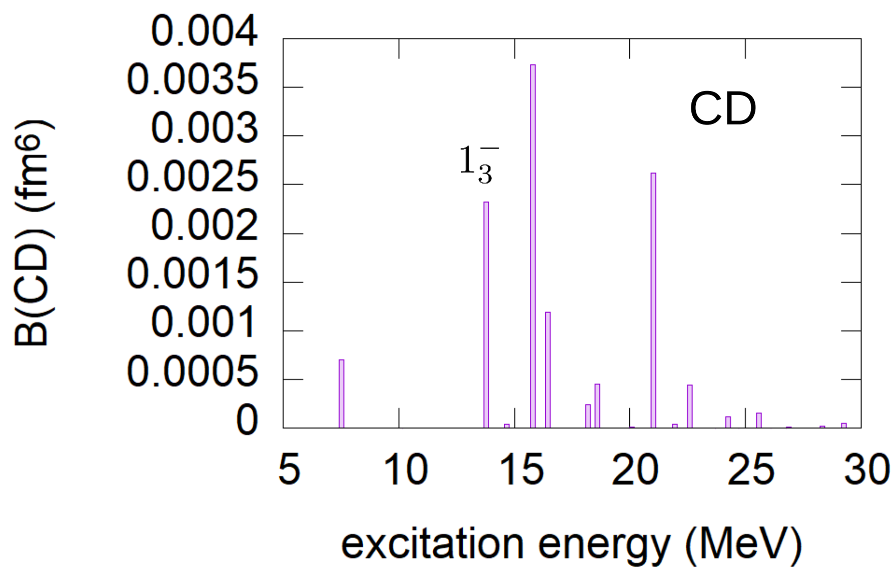
Results and analysis

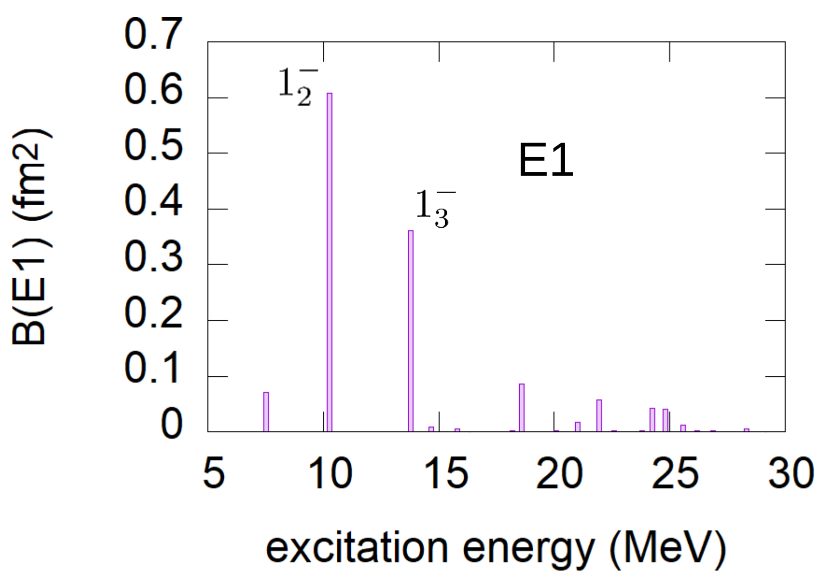
- LED in ^{10}Be
- Analysis for LED states
- Toroidal mode
- E1 and CD mode

Y. S., Y. Kanad-En'yo, and H. Morita, arXiv:1902.10962

Transition strengths in ^{10}Be





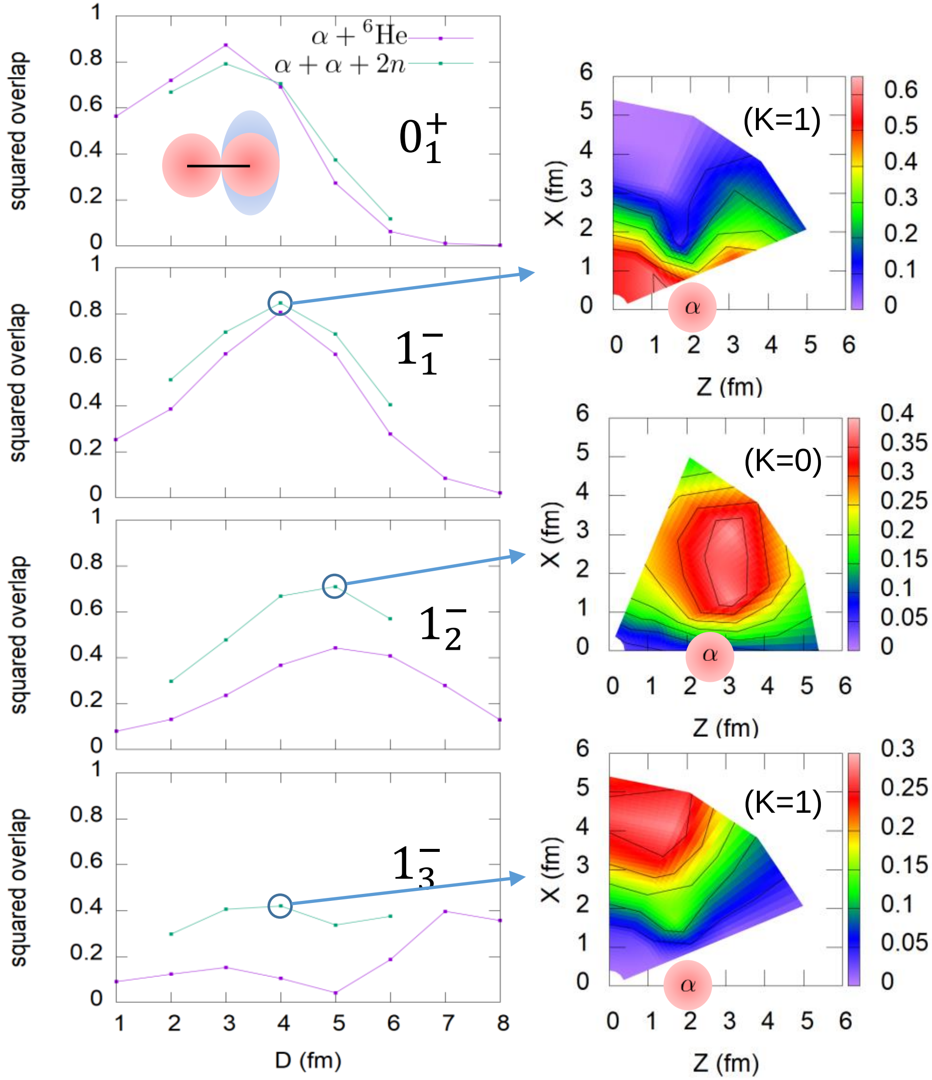


In low energy region of E < 15 MeV
CD : about 10 % of sum rule
E1 : about 33 % of TRK sum

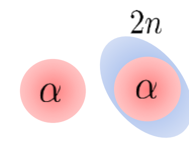
1^-_1 : strong TD
1^-_2 : strong E1
1^-_3 : strong E1 and CD
about 15~20 MeV : strong CD

Structures of LED states

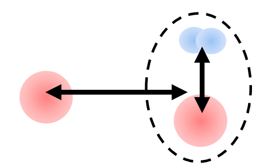
◆ α-α 距離Dのsubspaceとのoverlapと2n distribution



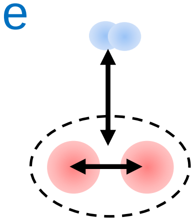
1_1^- : 2n clusterはα clusterの近くに分布し、傾いた⁶He clusterを形成。



1_2^- : α cluster励起で特徴づけられる。
2n clusterもαわずかに発達
→3-body dynamics

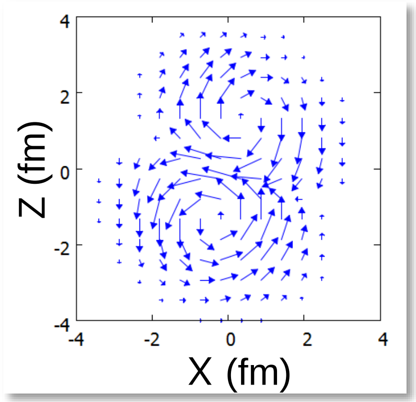


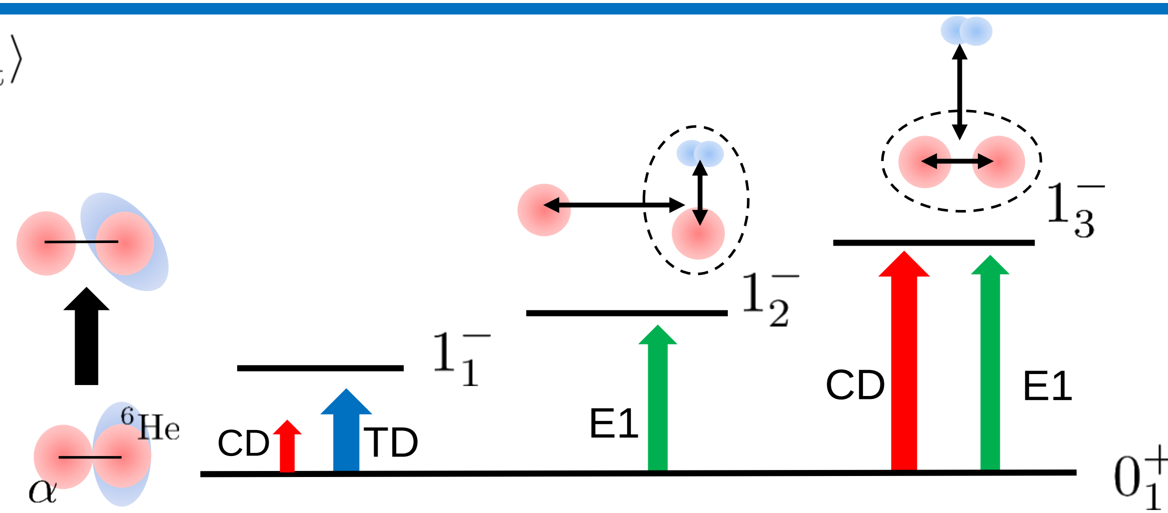
1_3^- : 2n clusterが非常に発達した状態。
→ 2n expansion mode



Excitation modes and Origin of strengths

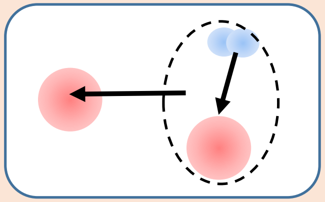
$$\delta \boldsymbol{j}(\boldsymbol{r}) = \langle 1^-_{\mathrm{int}} | \boldsymbol{j}_{\mathrm{nucl}}(\boldsymbol{r}) | 0^+_{\mathrm{int}} \rangle$$





- ✓ 変形した^{6}He clusterのvibrationによってvortical modeが生じる.
- ✓ わずかにCD強度を持つ.
- ✓ K=1 dominant.

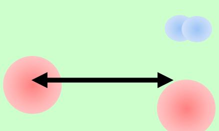
1^-_2 : 2つのmodeが逆位相で寄与



CD強度は打ち消し合い
強いE1遷移のみ生じる

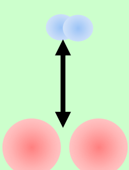
E1・CD強度には二つのmodeが大きく寄与

*α*発達モード



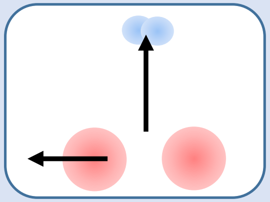
E1 : ×
CD : ○

2n発達モード



E1 : ○
CD : ○

1^-_3 : 2つのmodeが同位相で寄与



E1 ・CD共に
強い遷移が生じる

Summary and perspectives

まとめ

- クラスター模型を用いて^{10}BeにおけるLED励起モードを研究。
- In ^{10}Be, various LED strengths are found.
- voritcal mode appears. This mode is caused by rotation of deformed ^{6}He.
- 2n cluster expansion enhances E1 strengths.
- ^{10}Beにおける3体クラスターダイナミクスによるE1・CD強度への寄与を解明した

今後の課題

- クラスター構造を仮定しないAMD法を用いた解析
  →より正確なLED強度の再現（予測）に向けて
- O同位体への適用
- 系統的な計算・強度予測→R-process元素合成の見積もり