

モンテカルロ殻模型で得られた 軽い原子核の密度分布

吉田亨

東大原子核科学研究センター(CNS)

共同研究者:

清水則孝(CNS)、阿部喬、大塚孝治(東大理)

HPCI戦略分野5全体シンポジウム

(2013/3/5-6)

@富士ソフトアキバプラザ6Fセミナールーム1

内容

イントロ：殻模型とクラスター構造

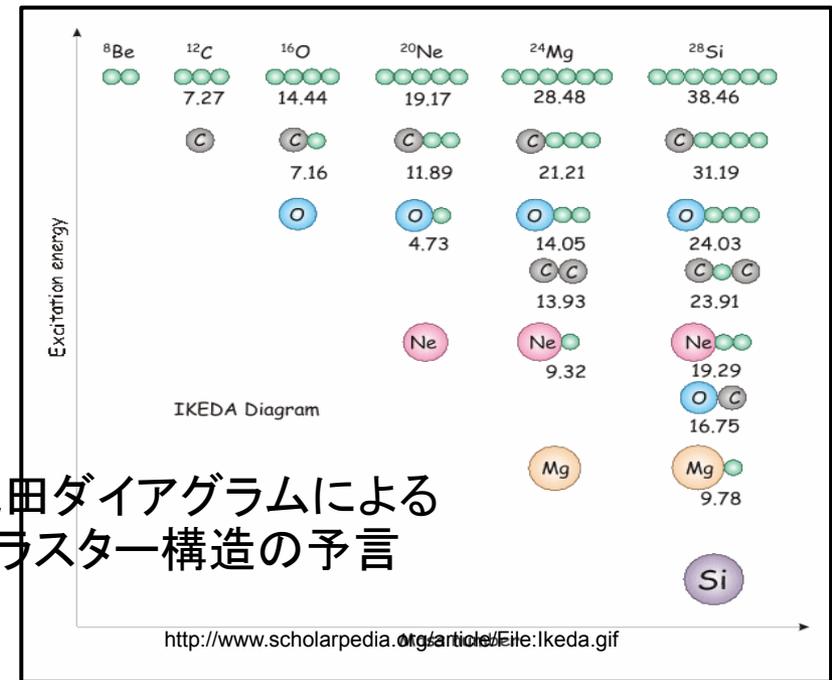
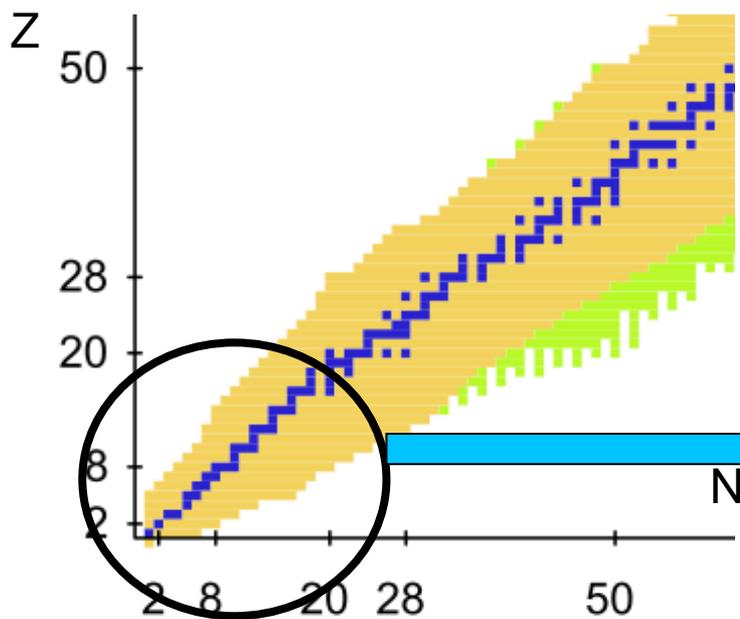
手法：MCSM+”intrinsic”な状態の抽出

結果：いくつかの核種についての密度

まとめと今後の課題

研究の目的

- ☑ モンテカルロ殻模型によって得られた波動関数の性質の分析を行う。
- ☑ 殻模型の核子間にどのような相関が現れているのかを密度から分析する手法の開発
 - ⇒ 特にクラスター構造を持つ可能性のある状態に着目する。 ${}^8\text{Be}$ 、 ${}^{10}\text{Be}$ 、 ${}^6\text{He}$ ・・・など



軽い領域での第一原理計算の進展 (核力 ~ 核構造)

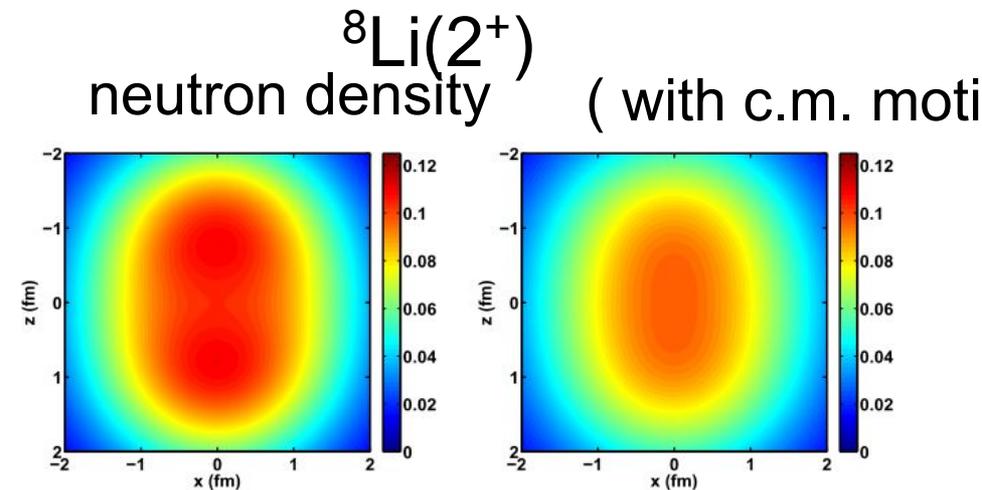
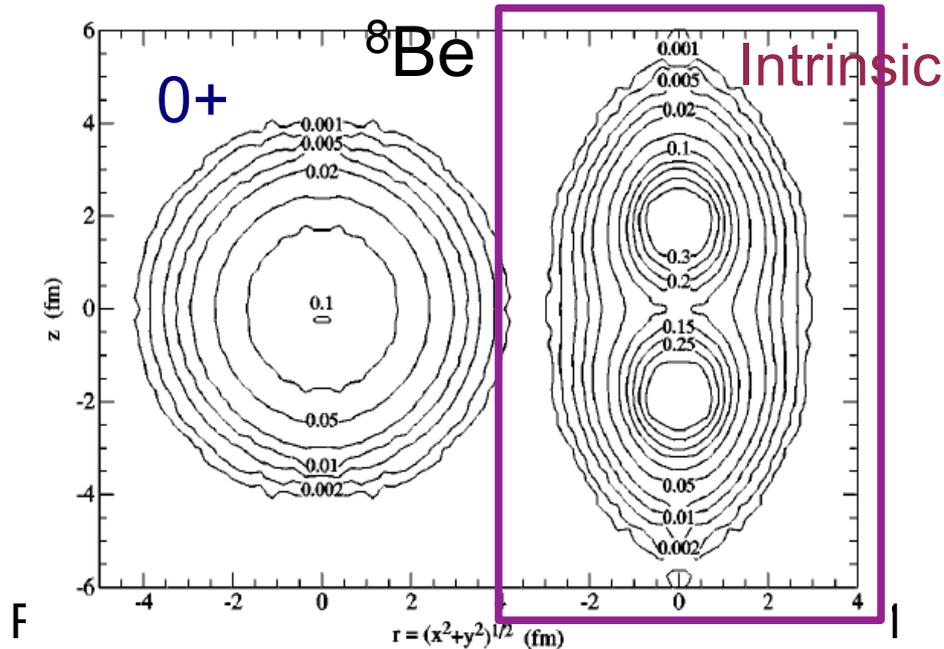


FIG. 12: (Color online) The $y = 0$ slice of the translationally-invariant neutron density (left) of the 2^+ gs of ${}^8\text{Li}$. The space-fixed density for the same state is on the right. These densities were calculated at $N_{\text{max}} = 12$ and $\hbar\Omega = 12.5$ MeV.

Ref. R.B. Wiringa, PRC62 (2000), 014001

Green Function Monte Carlo

C. Cockrell et al, arxiv: 1201.0724v2 [nucl-th]

No-core Full Config. (NCFC)

— GFMCでの ${}^8\text{Be}$ 原子核の2アルファ構造の再現

— 殻模型 (e.g. NCFC) では, “translational invariant density” の導入によってクラスターに代表される軽い核の構造の研究が行われている。殻模型の “intrinsicな” 状態としては GFMCでの物体固定座標系での密度を求める手法を利用する。

Next generation of Monte Carlo Shell Model (MCSM)

N_B : number of basis vectors (dimension)

N_p : number of (active) particles

N_{sp} : number of single-particle states

$$|\Psi(D)\rangle = \sum_{n=1}^{N_B} d_n P^{J,\Pi} |\phi(D^{(n)})\rangle$$

amplitude

Projection op.

$$|\phi(D^{(n)})\rangle = \prod_{\alpha=1}^{N_p} \left(\sum_{i=1}^{N_{sp}} c_i^\dagger D_{i\alpha}^{(n)} \right) |-\rangle$$

**N-th basis vector
(Slater determinant)**

$$E(D) = \langle \Psi(D) | H | \Psi(D) \rangle$$

Minimize $E(D)$ as a function of D utilizing qMC and conjugate gradient methods

Deformed single-particle state

Step 1 : quantum Monte Carlo type method

→ candidates of n-th basis vector (σ : set of random numbers)

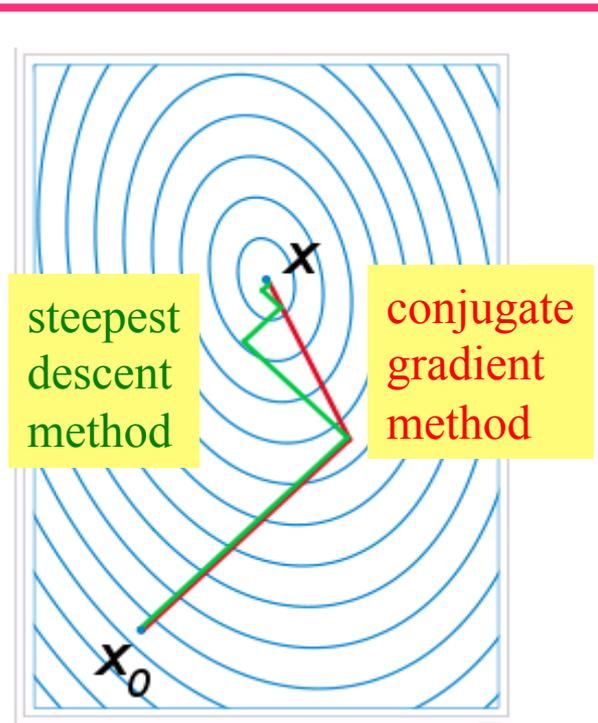
$$|\phi(\sigma)\rangle = \prod e^{\Delta\beta \cdot h(\sigma)} \cdot |\phi^{(0)}\rangle$$

“ σ ” can be represented by matrix D

Select the one with the lowest $E(D)$

Step 2 : polish D by means of the **conjugate gradient** method

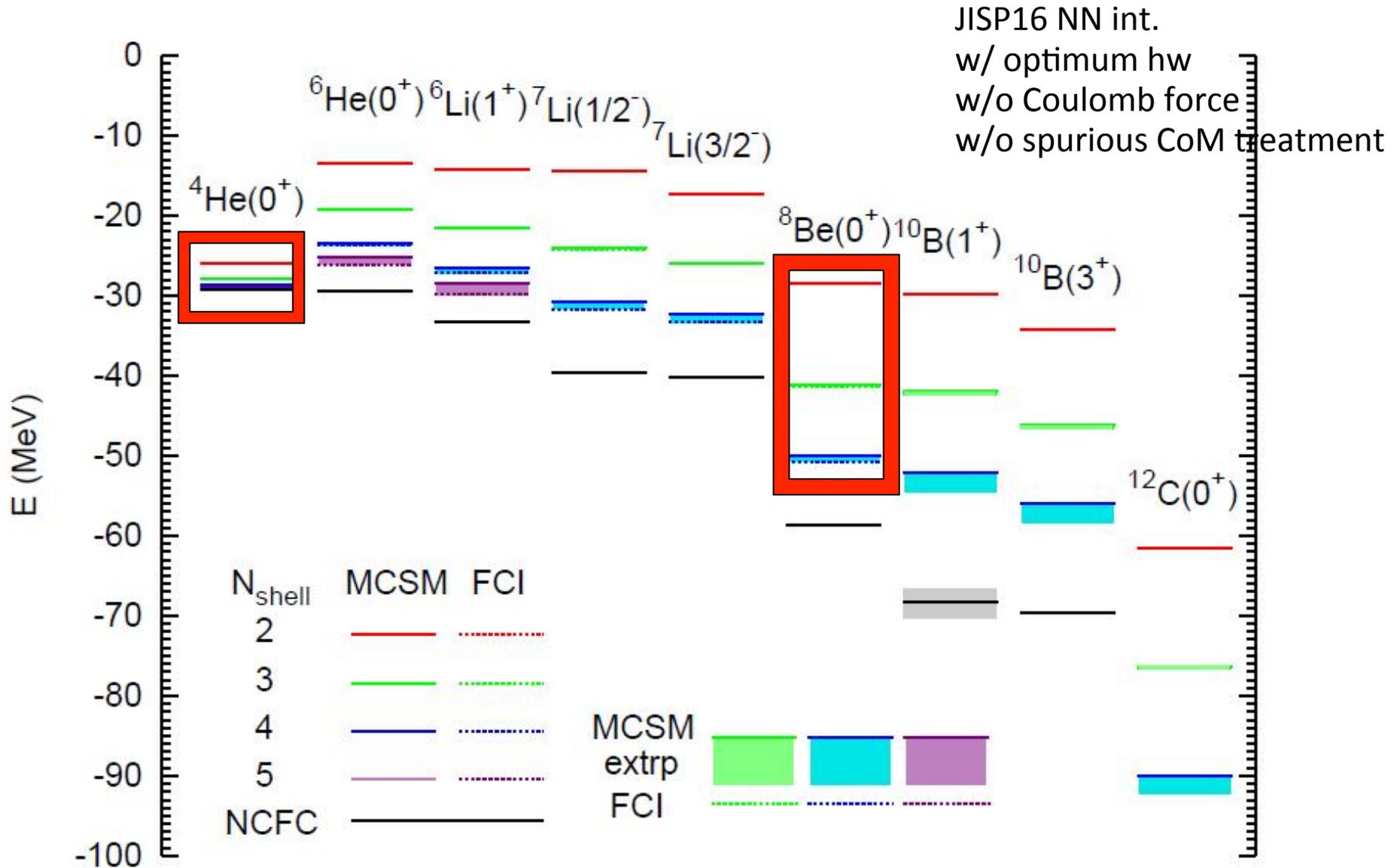
“variationally”.



steepest descent method

conjugate gradient method

Energies of the Light Nuclei

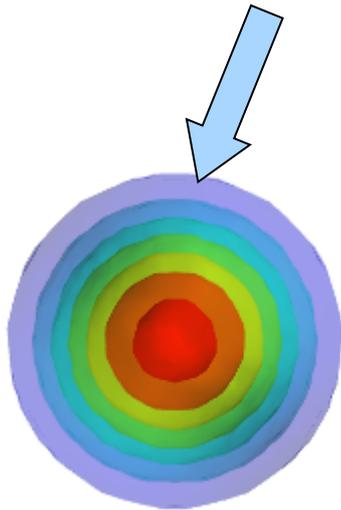


“intrinsicな”密度分布(例: ${}^8\text{Be}$)

$$|\Psi(\{r_i\})\rangle = \left| C_1 \begin{img alt="Density plot 1" data-bbox="255 145 312 245"} + C_2 \begin{img alt="Density plot 2" data-bbox="365 145 425 245"} + C_3 \begin{img alt="Density plot 3" data-bbox="475 145 542 245"} + \dots + C_{98} \begin{img alt="Density plot 98" data-bbox="600 220 668 325"} + C_{99} \begin{img alt="Density plot 99" data-bbox="725 220 792 325"} + C_{100} \begin{img alt="Density plot 100" data-bbox="850 220 918 325"} \right|$$

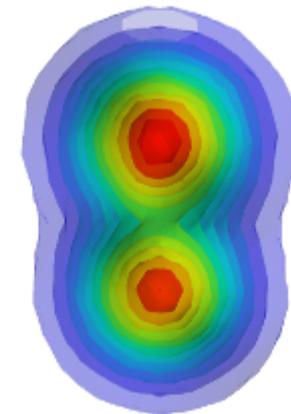
角運動量射影

$$\iiint d\Omega D^J(\Omega) \hat{R}(\Omega)$$



実験室系から見た
角運動量 $J=0$ の密度分布

角運動量射影された状態からの核子
相関の抽出、図示



物体固定系(intrinsic)
での密度分布?

GFMCを参考にし、
モンテカルロ基底の
適切な処理

基底関数の主軸を揃える操作の様子

主軸を揃える前

$$|\Psi(\{r_i\})\rangle = \left| C_1 \begin{array}{c} \text{[orbital 1]} \\ \text{[blue arrow]} \end{array} + C_2 \begin{array}{c} \text{[orbital 2]} \\ \text{[blue arrow]} \end{array} + C_3 \begin{array}{c} \text{[orbital 3]} \\ \text{[blue arrow]} \end{array} + \dots + C_{98} \begin{array}{c} \text{[orbital 98]} \\ \text{[blue arrow]} \end{array} + C_{99} \begin{array}{c} \text{[orbital 99]} \\ \text{[blue arrow]} \end{array} + C_{100} \begin{array}{c} \text{[orbital 100]} \\ \text{[blue arrow]} \end{array} \right\rangle$$

主軸を揃えた後

各基底での
Q-momentの対角化

$$|\Psi(\{r_i\})^{\text{int}}\rangle = \left| C_1 \begin{array}{c} \text{[aligned orbital 1]} \\ \text{[blue arrow]} \end{array} + C_2 \begin{array}{c} \text{[aligned orbital 2]} \\ \text{[blue arrow]} \end{array} + C_3 \begin{array}{c} \text{[aligned orbital 3]} \\ \text{[blue arrow]} \end{array} + \dots + C_{98} \begin{array}{c} \text{[aligned orbital 98]} \\ \text{[blue arrow]} \end{array} + C_{99} \begin{array}{c} \text{[aligned orbital 99]} \\ \text{[blue arrow]} \end{array} + C_{100} \begin{array}{c} \text{[aligned orbital 100]} \\ \text{[blue arrow]} \end{array} \right\rangle$$

$$\rho(\vec{r}) = \langle \Psi(\{r_i\})^{\text{int}} | \sum_i \delta(\vec{r} - r_i) | \Psi(\{r_i\})^{\text{int}} \rangle$$

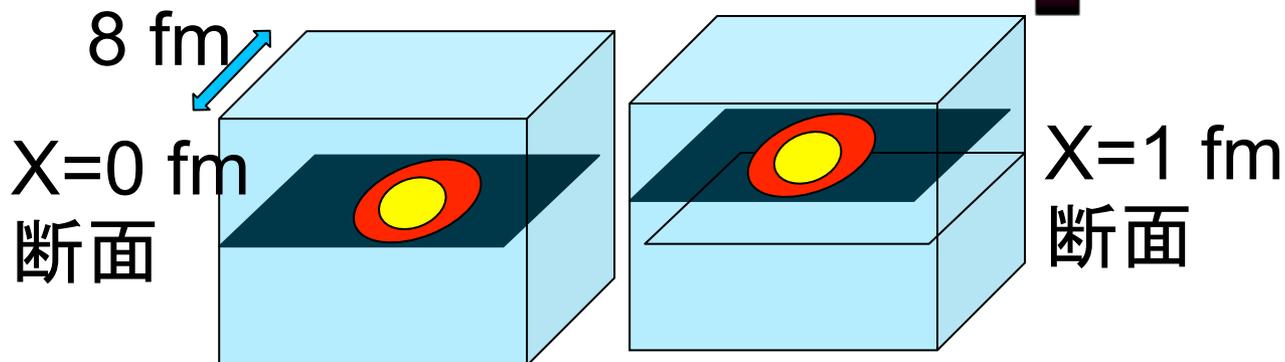
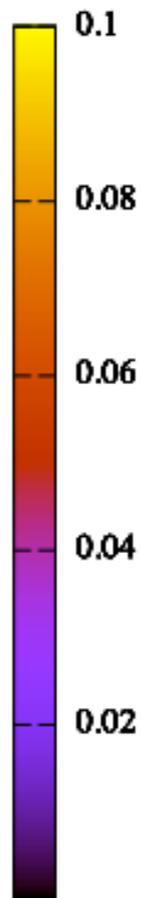
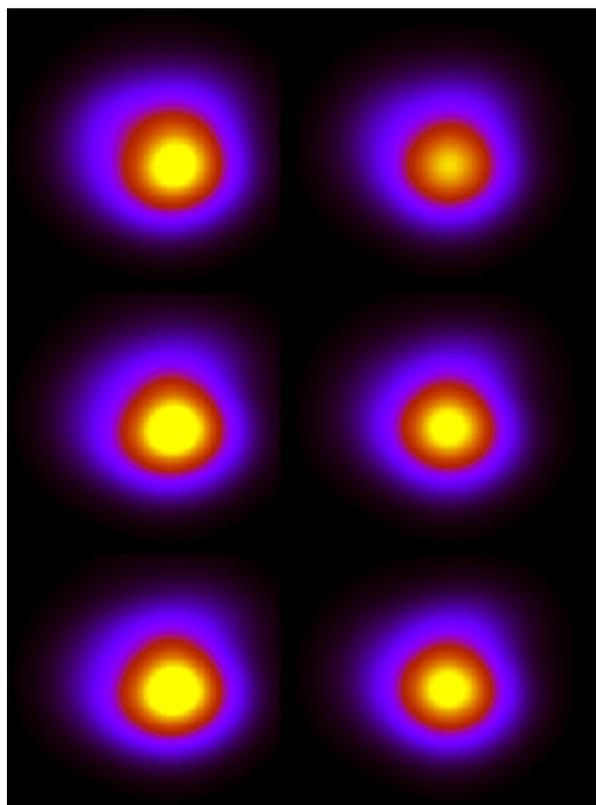
${}^4\text{He}(0^+)$: 主軸を揃える前のヘリウム原子核の構造

主軸を揃える前

100 基底

10 基底

1 基底



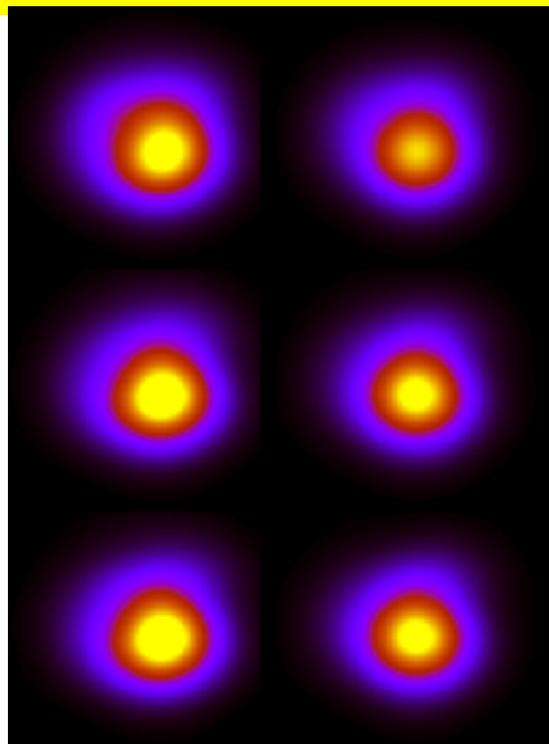
${}^4\text{He}(0^+)$: “intrinsic”な状態の主軸による違い

主軸を揃える前

100 基底

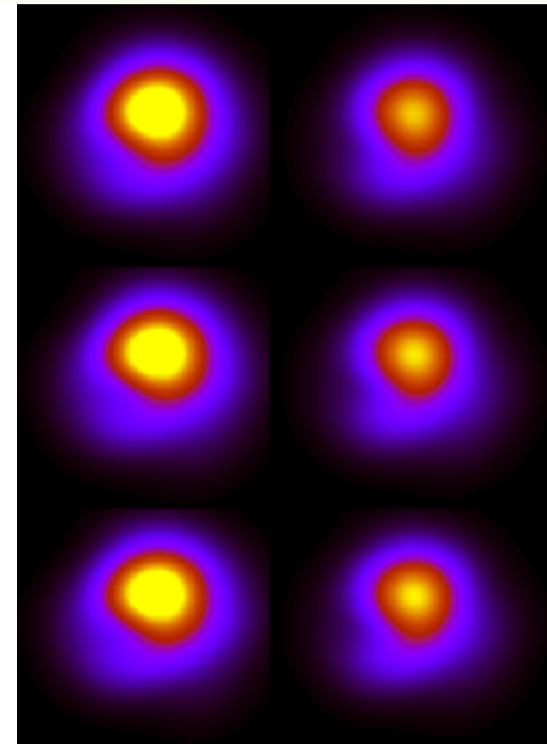
10 基底

1 基底



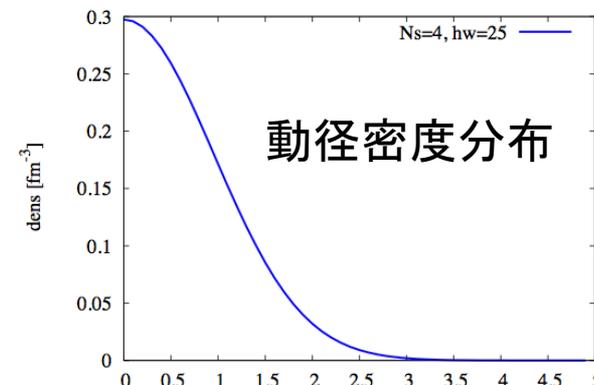
($hw=25\text{MeV}$, $nshell=4$)

主軸を揃える



($hw=25\text{MeV}$, $nshell=4$)

主軸をそろえても、丸い形状を保っている。
⇒ アルファ粒子の球状を反映している。



${}^8\text{Be}(0^+)$: “intrinsicな” 密度の主軸による影響

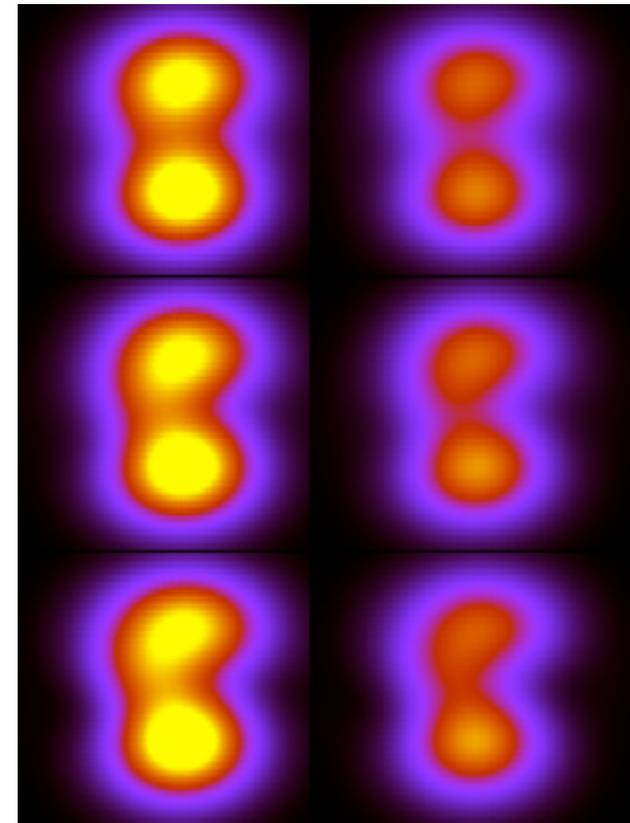
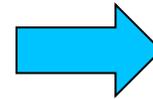
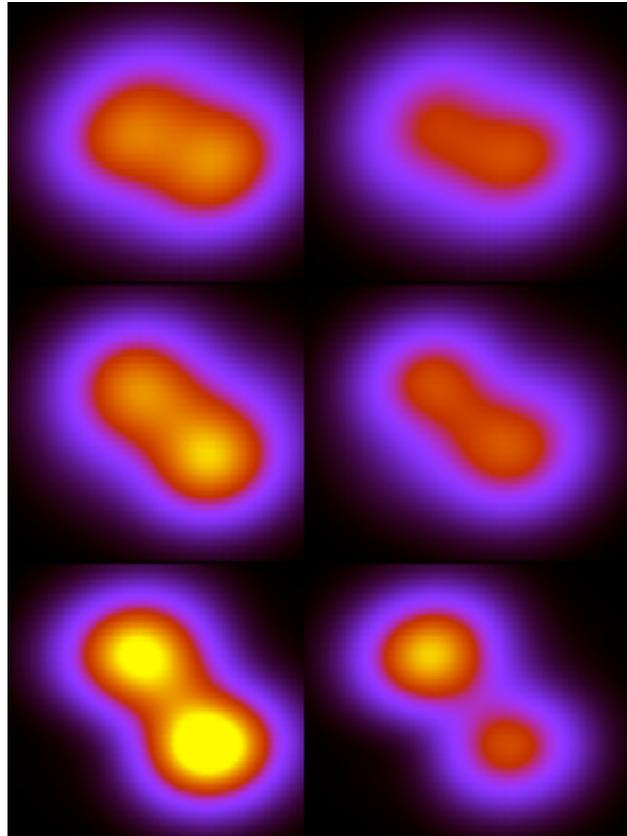
主軸を揃える前

主軸を揃える

100 基底

10 基底

1 基底



(hw=20MeV,nshell=4)

(hw=20MeV,nshell=4)

軸の回転の効果によりクラスター構造がより鮮明に見えている。

➡ 2アルファクラスター構造

[Ref: et al., T.Yoshida, ..., PTEP]

角運動量Jによる違い ${}^8\text{Be}(0^+/2^+)$

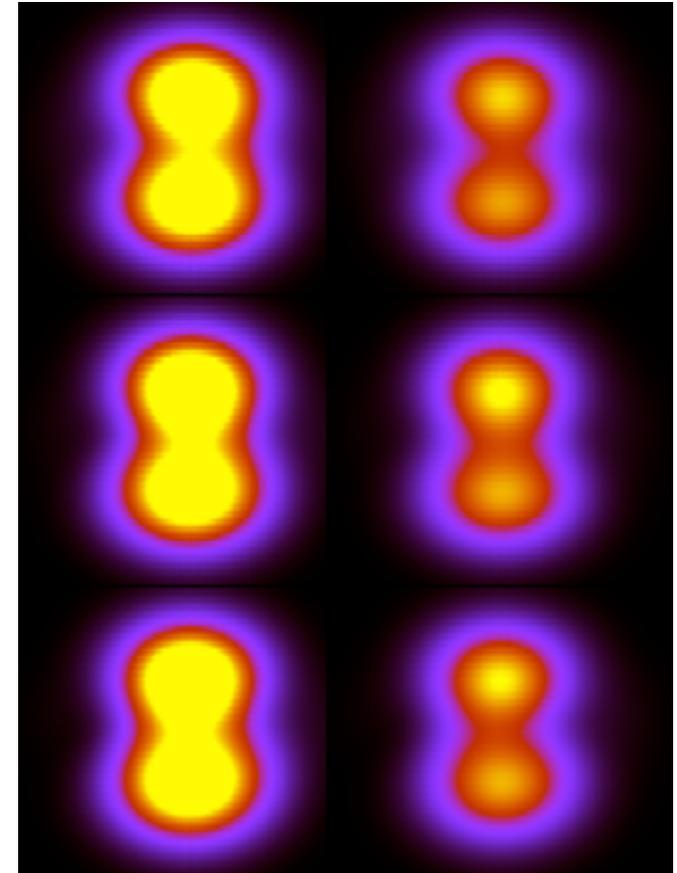
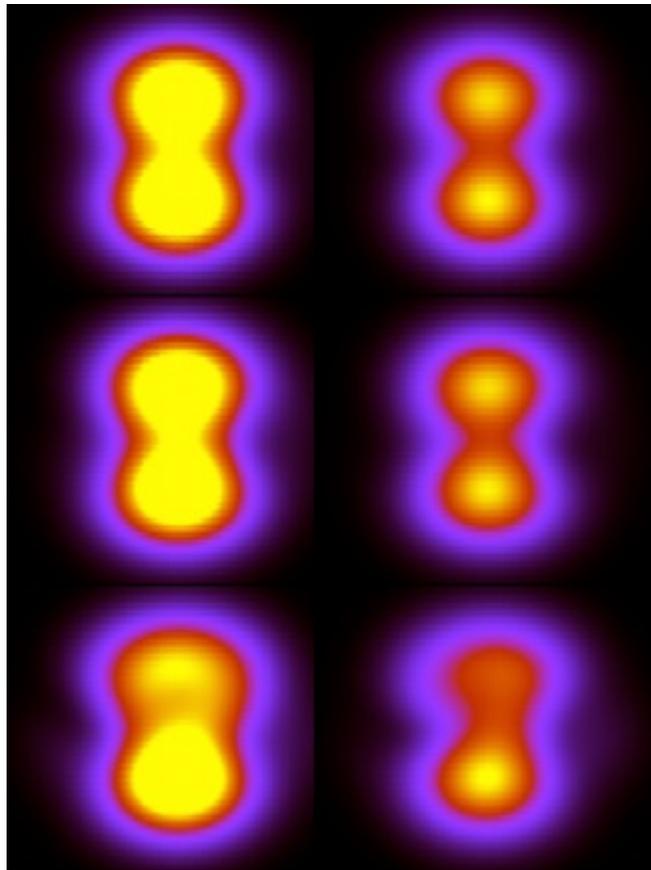
$J^\pi=0^+$ (E=-50.2 MeV,
hw=25MeV, nshell=4)

$J^\pi=2^+$ (E=-45.7 MeV),
hw=25MeV, nshell=4)

100 基底

10 基底

1 基底



角運動量をあげても構造に大きな変化は見当たらない。

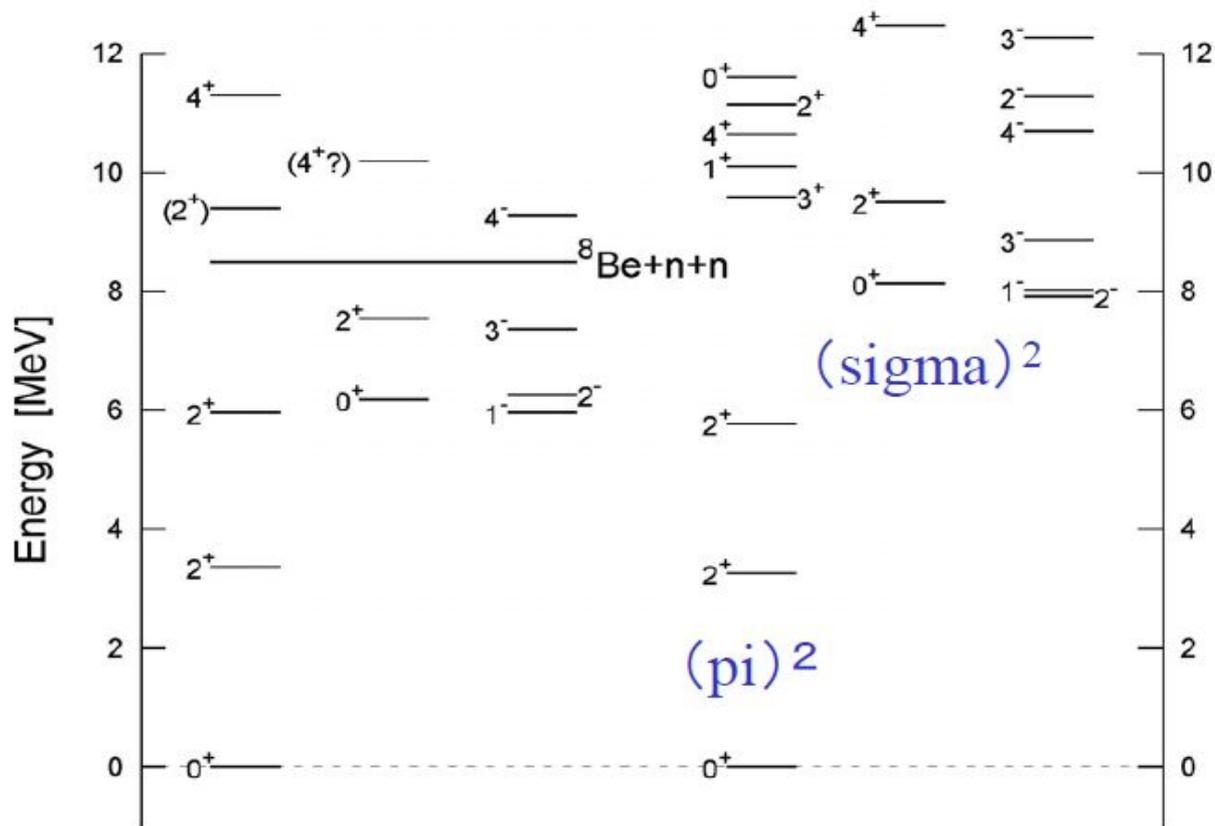
➡ 回転バンド (クラスター模型)

まとめと今後の予定

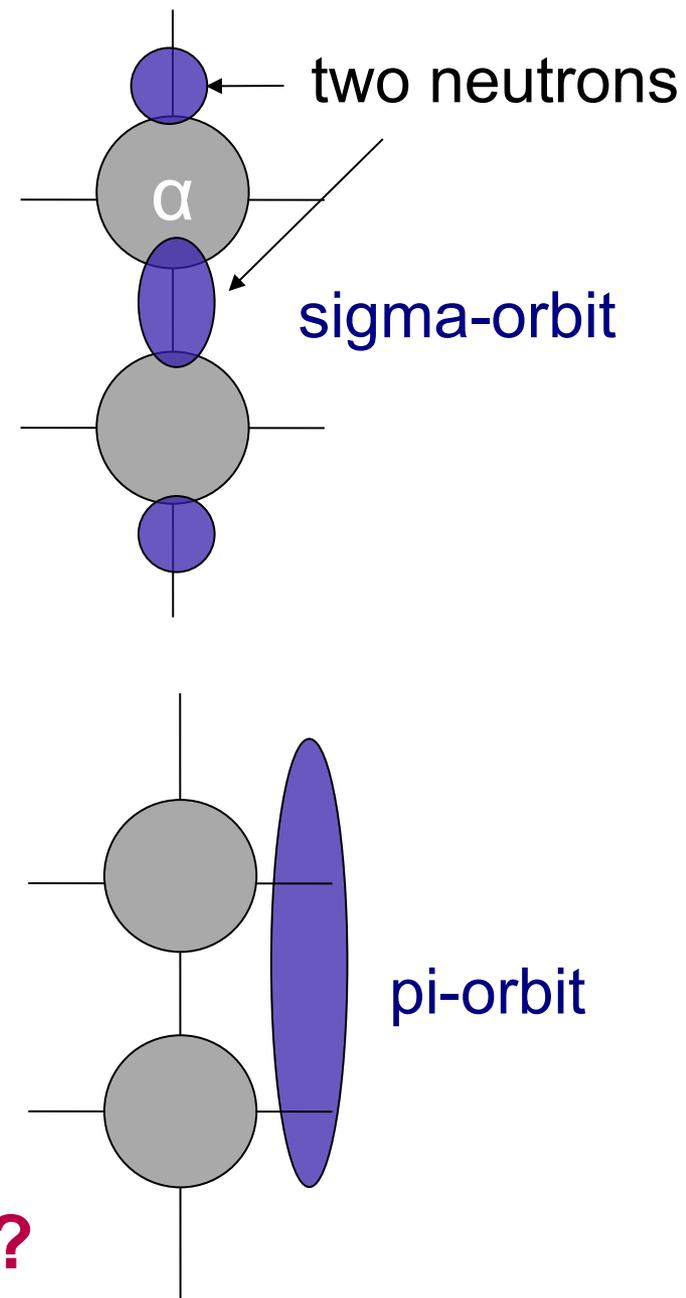
- ☑ モンテカルロ殻模型から得られた軽い原子核の波動関数の密度に関して分析を行った。
- ☑ Nshell=4の殻模型の模型空間で、はじめに ${}^8\text{Be}$ の性質をみた。クラスター構造を再現していることが明らかとなった。(cf. GFMC)
- ☑ その他の原子核の構造の分析。
Nshell=4、(5、6)やBe同位体の分析は今後の課題 (京やその他の大型計算機で計算中)
- ☑ Intrinsic状態として何が適しているかの議論を行っている。

^{10}Be ; クラスタモデル計算による予想

Calculation : Molecular orbit of 2 excess neutrons

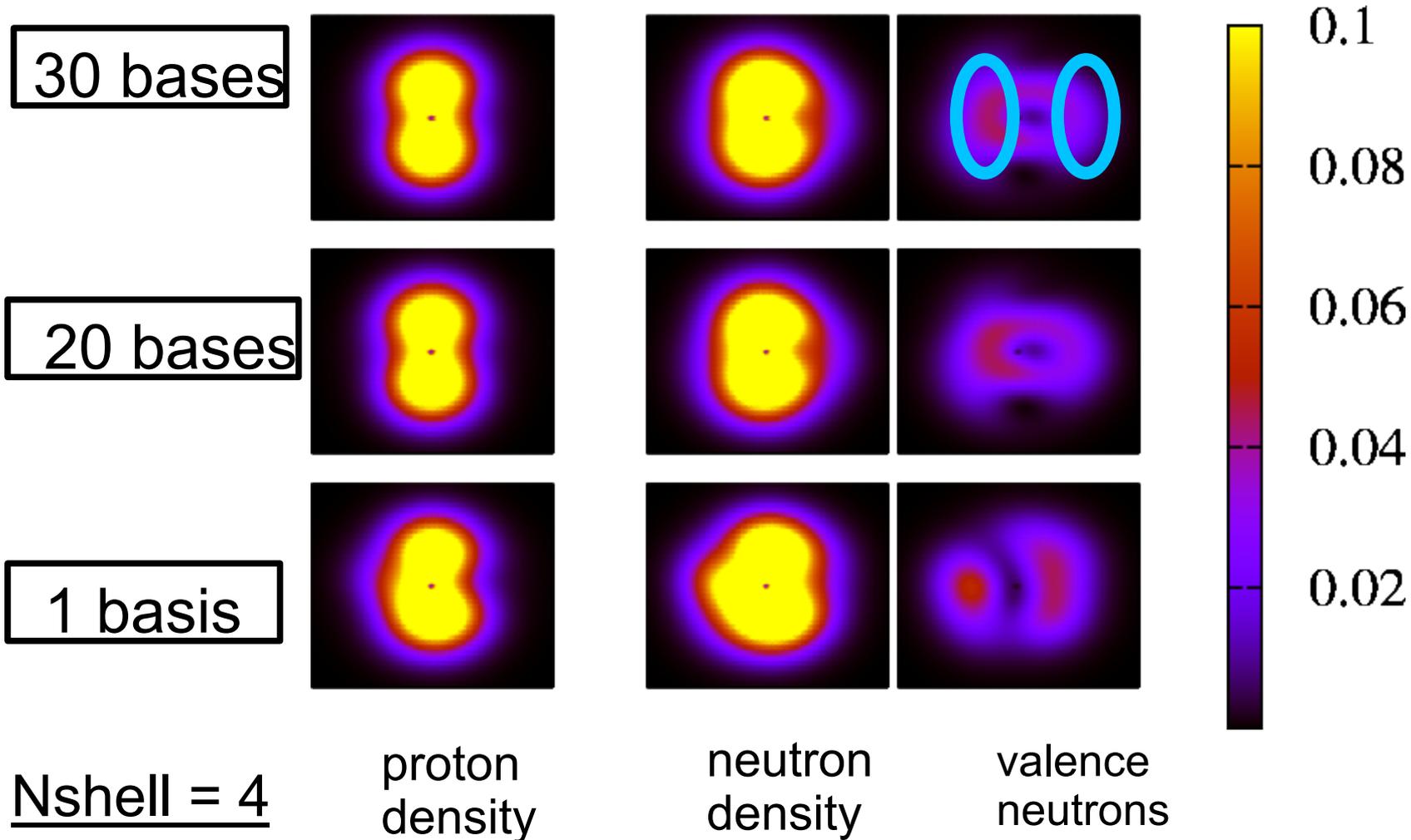


N. Itagaki and S. Okabe, PRC61 (2000)



モンテカルロ殻模型計算と対応しているか？

^{10}Be (0^+): モンテカルロ殻模型からの予想



2 アルファ+2 中性子 構造が発現。

➡ 従来からのクラスター模型計算と対応している。