

炭素同位体における 直鎖クラスター状態と アルファ崩壊幅

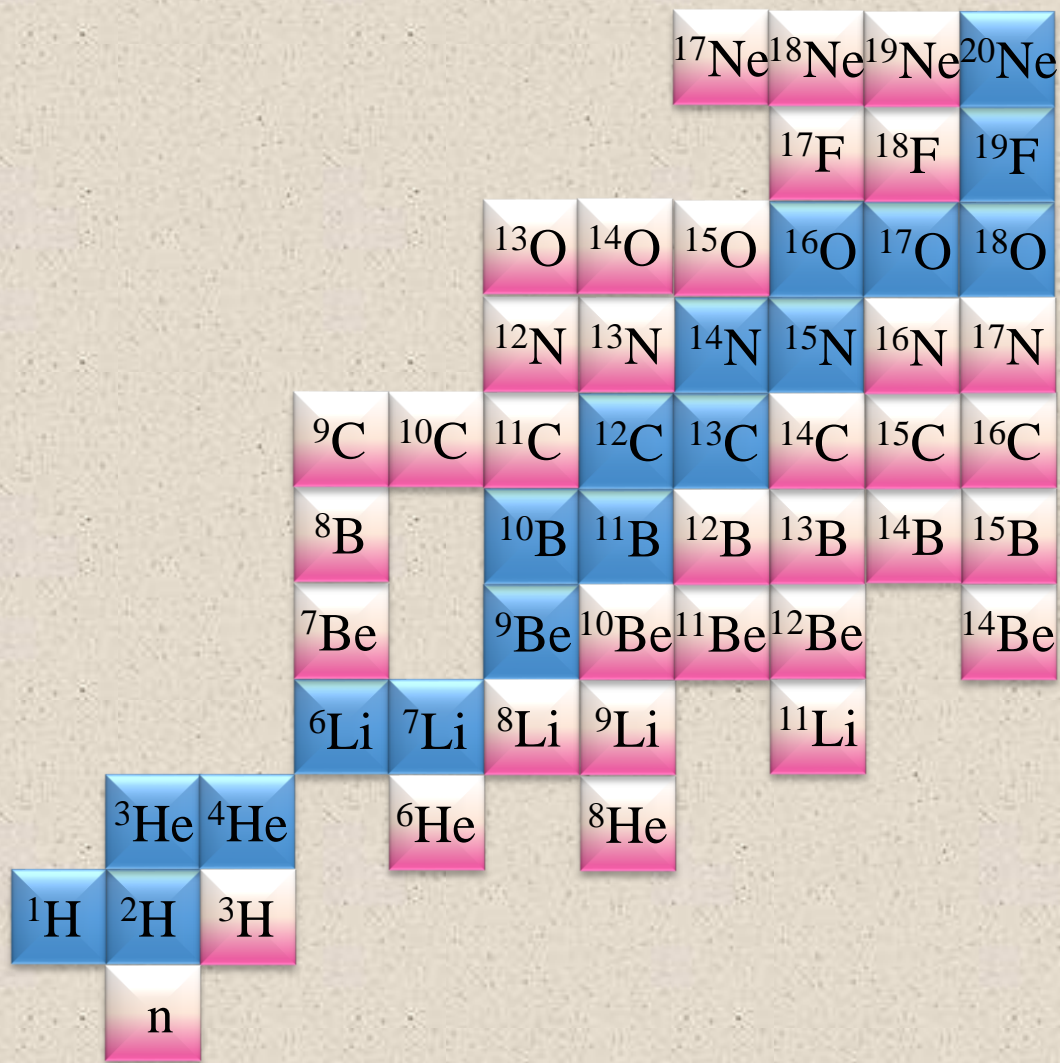
馬場 智之、木村 真明

北海道大学理学院

宇宙理学専攻

原子核理論研究室

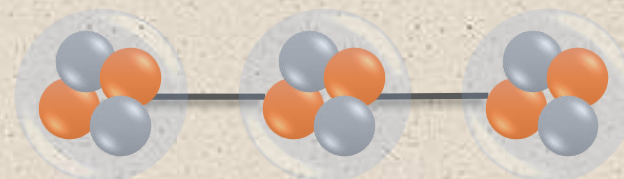
エキゾチックな核構造



直鎖クラスター構造とは

初め、 ^{12}C においてその存在が提唱される

Morinaga, Phys. Rev. **101**, 254 (1956).



α 粒子が直線上に並んだ構造

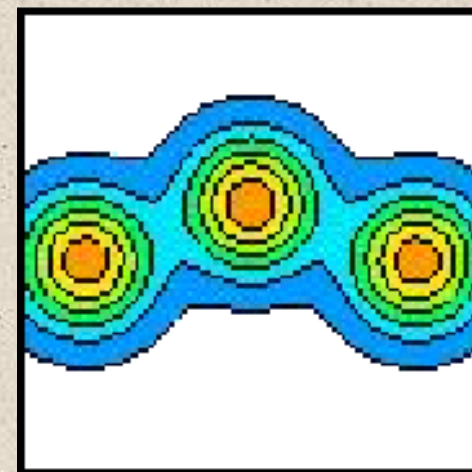


現在、 ^{12}C では bending motion に対して不安定であると予測される

Y. Kanada-En'yo, Phys. Rev. Lett. **81**, 5291 (1998).

M. Chernykh *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 032501 (2007).

T. Suhara and Y. Kanada En'yo, Prog. Theor. Phys. **123**, 303 (2010).



^{12}C の密度分布

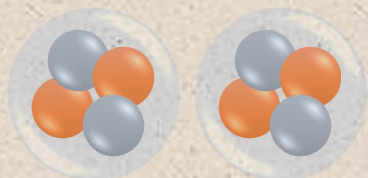
余剰中性子による安定化

余剰中性子が”糊”の役割をすることで直鎖クラスター構造が安定化する可能性が示唆される

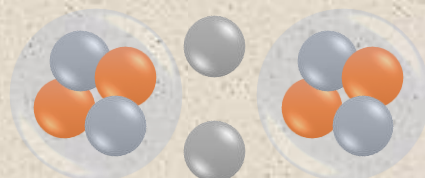
例) Be同位体(2α)

N. Itagaki and S. Okabe, Phys. Rev. C **61**, 044306 (2000).

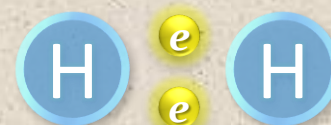
^8Be : 不安定



^{10}Be : 安定



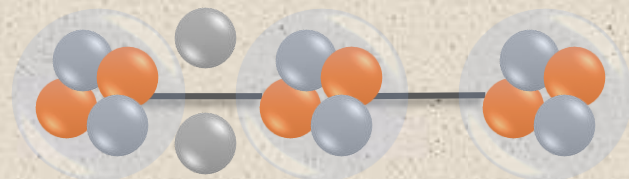
共有結合と類似



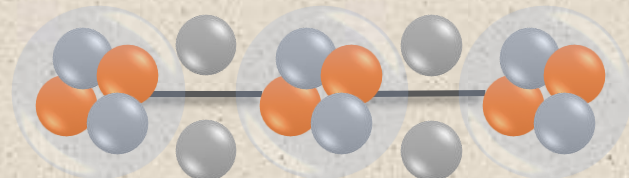
H_2 分子

この考えは当然、C同位体(3α)に拡張され、実際、 ^{14}C や ^{16}C においてその存在可能性が議論されている

^{14}C



^{16}C

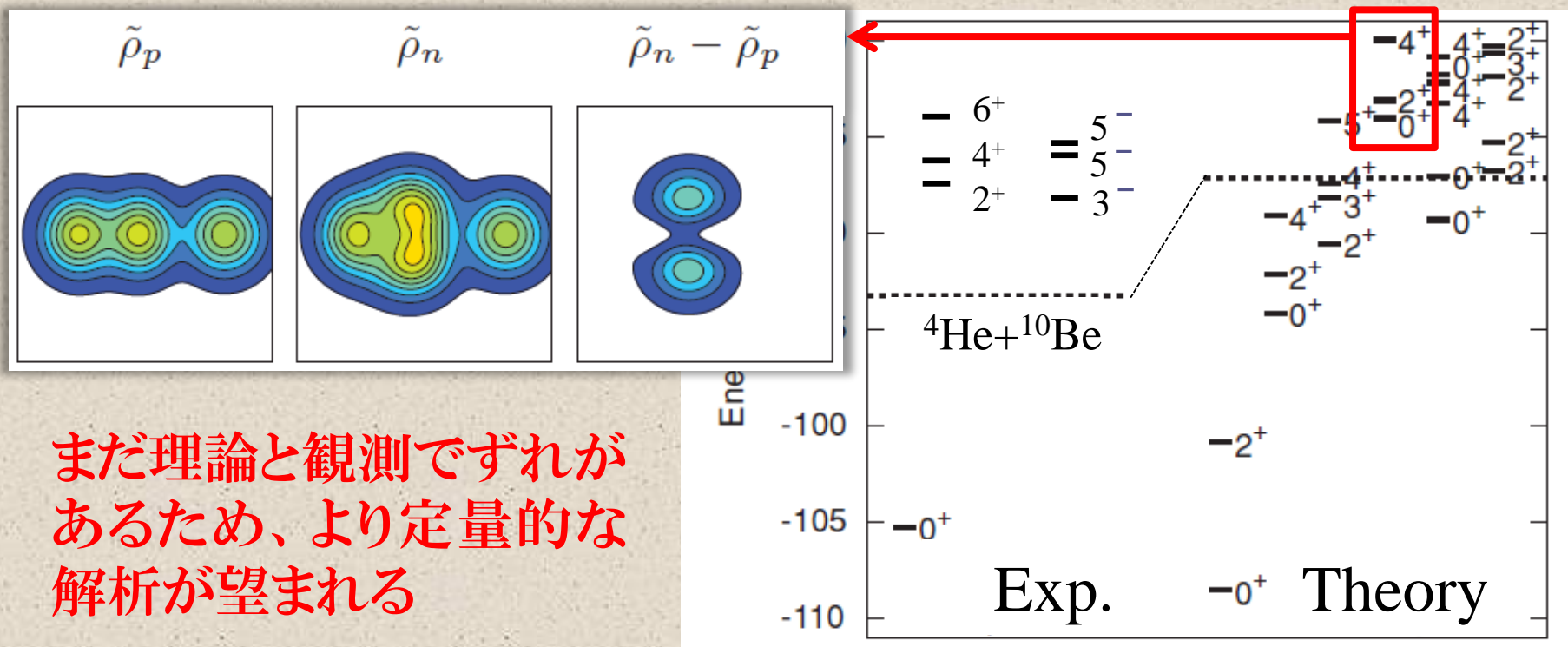


直鎖クラスター状態を探る実験

最近、直鎖クラスター構造の候補となりうる共鳴状態が ^{14}C や ^{16}C において相次いで観測されている

M. Freer *et al.*, Phys. Rev. C **90**, 054324 (2014).

A. Fritsch *et al.*, Phys. Rev. C **93**, 014321 (2016).



まだ理論と観測でずれがあるため、より定量的な解析が望まれる

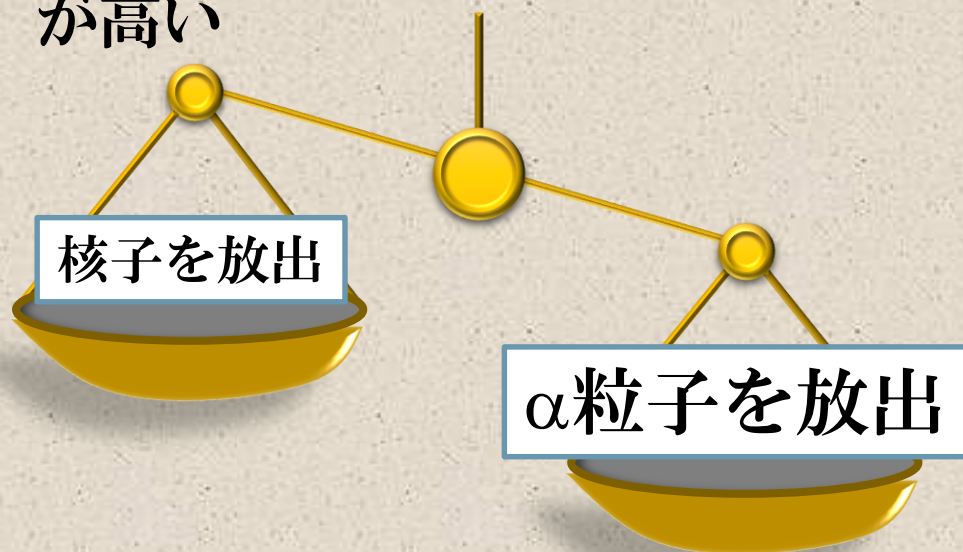
T. Suhara and Y. Kanada-En'yo, Phys. Rev. C **82**, 044301 (2010).

クラスター状態の指標

^{14}C の実験では**アルファ崩壊幅**も測定されている

M. Freer *et al.*, Phys. Rev. C **90**, 054324 (2014).

アルファ粒子から成るクラスター状態はアルファ崩壊を起こす確率が高い



E_x (MeV)	J^π	Γ (keV)	γ (MeV ^{1/2})
17.30	3 ⁻	590	0.42
17.99	2 ⁺	760	0.36
18.22	4 ⁺	200	0.27
18.83	5 ⁻	500	0.61
19.69	5 ⁻	100	0.21
20.80	6 ⁺	300	0.48

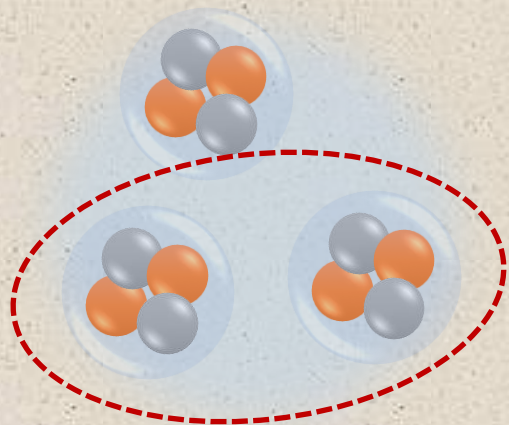
アルファ崩壊幅を計算し実験と比較することで、アルファ粒子から成るクラスター状態を特定できる

直鎖クラスター状態の指標

クラスター構造は崩壊パターンを反映する

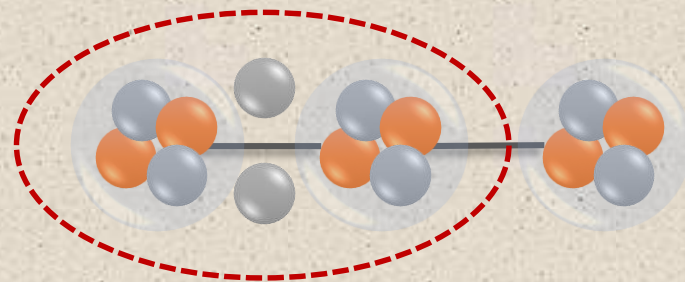
Y. Suzuki, H. Horiuchi, and K. Ikeda, Prog. Theor. Phys. Vol 47, No. 5 (1972).

ガ散的クラスター構造
(弱結合状態)



Beの 0^+ に崩壊する

直鎖クラスター構造
(強結合状態)



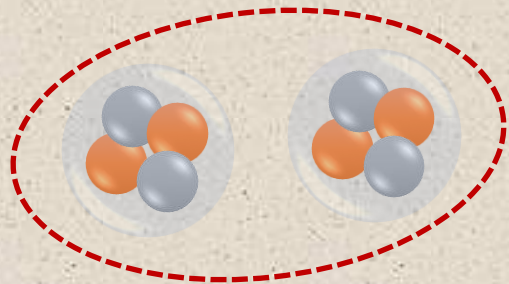
Beの 2^+ に崩壊する

直鎖クラスター状態の指標

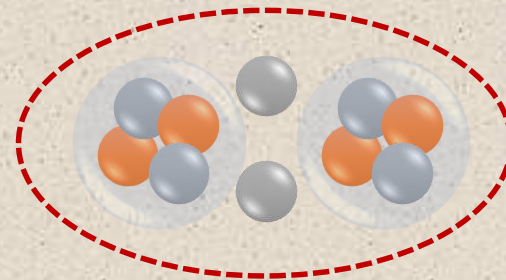
クラスター構造は崩壊パターンを反映する

Y. Suzuki, H. Horiuchi, and K. Ikeda, Prog. Theor. Phys. Vol 47, No. 5 (1972).

ガスのクラスター構造
(弱結合状態)



直鎖クラスター構造
(強結合状態)



崩壊後のBeの角運動量を調べれば、直鎖クラスター状態を他のクラスター状態と区別できるのではないか

本研究の目的

^{14}C において直鎖クラスター構造の存在可能性を検証

- ① より定量性のある有効相互作用を用いて ^{14}C の直鎖クラスター状態の励起エネルギーを精密に求め、実験との対応を調べる
- ② 直鎖クラスター状態のアルファ崩壊幅を計算し、観測されたアルファ崩壊幅と比較する
- ③ ^{14}C の直鎖クラスター状態が ^{10}Be の 2^+ へ崩壊するか調べ、直鎖クラスター構造の指標となりうるか検証する

反対称化分子動力学

ハミルトニアン

$$\hat{H} = \sum_i \hat{t}_i - \hat{t}_{\text{cm}} + \sum_{i < j} \hat{v}_{ij}^{\text{NN}} + \sum_{i < j} \hat{v}_{ij}^{\text{Coulomb}}$$

Gogny D1S 相互作用

$$\hat{v}_{ij}^{\text{NN}} = v_C + v_{LS} + v_{\text{den}}$$

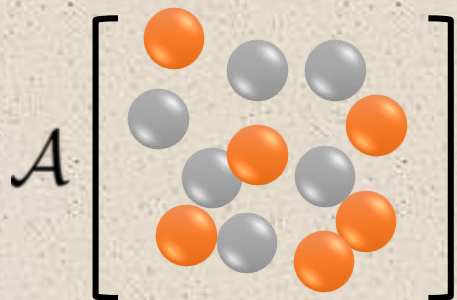
波動関数

$$\Phi_{\text{int}} = \frac{1}{\sqrt{A!}} \det \begin{bmatrix} \varphi_1(\vec{r}_1) & \cdots & \varphi_1(\vec{r}_A) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_A(\vec{r}_1) & \cdots & \varphi_A(\vec{r}_A) \end{bmatrix}$$

$$\varphi_i(\vec{r}) = \phi_i(\vec{r}) \otimes \chi_i \otimes \tau_i$$

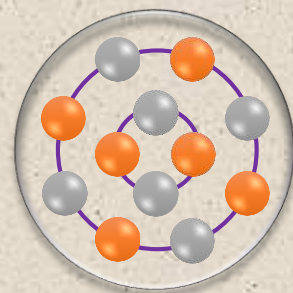
$$\phi_i(\vec{r}) = \left(\frac{2\nu}{\pi}\right)^{3/4} \exp\left[-\nu\left(\vec{r} - \frac{\vec{Z}_i}{\sqrt{\nu}}\right)^2\right]$$

1. 変分計算



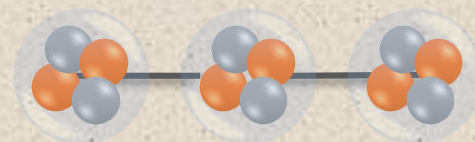
核子の運動を表すガウス波束

変分



殻構造

構造を仮定しない



クラスター構造

反対称化分子動力学

2. 角運動量射影

変分計算で得られた波動関数を角運動量の固有状態へ射影する

$$\Phi_{MK}^{J\pi} = \hat{P}_{MK}^J \Phi^\pi$$

$$\hat{P}_{MK}^J = \frac{2J+1}{8\pi^2} \int d\Omega D_{MK}^{J*}(\Omega) \hat{R}(\Omega)$$

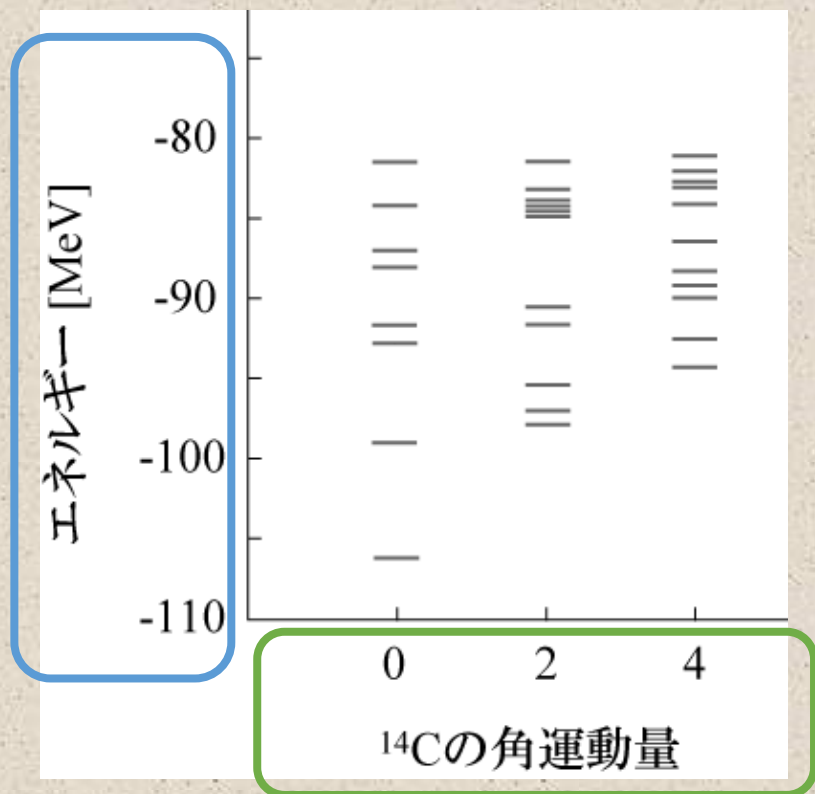
3. 生成座標法

波動関数を重ね合わせ、Schrödinger方程式を解くことで、 ^{14}C のエネルギー固有値と固有関数を得る

$$\Psi_{Mn}^{J\pi} = \sum_i c_{Kin}^{J\pi} \Phi_{MK}^{J\pi}$$

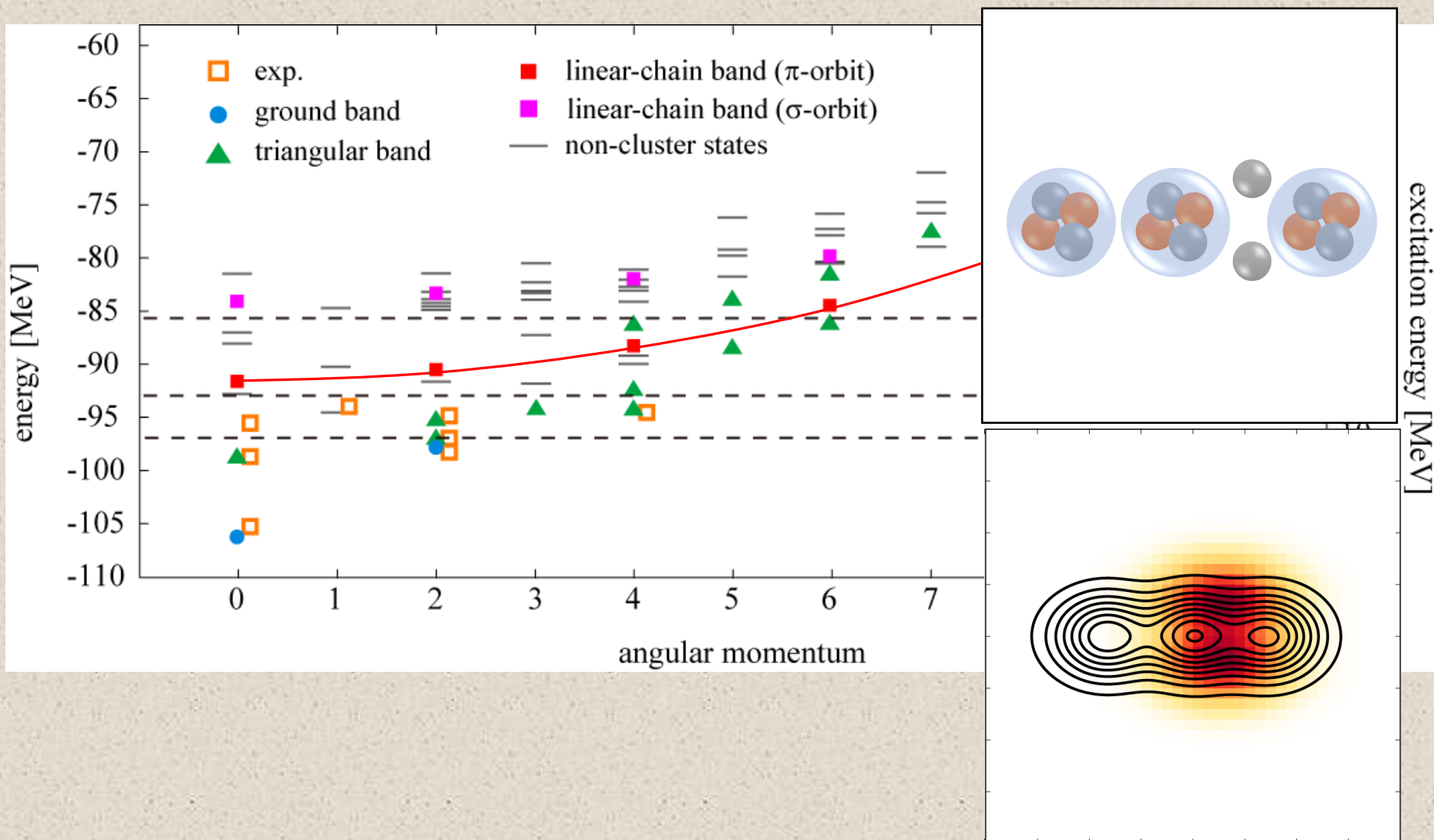
$$\hat{H}\Psi_{Mn}^{J\pi} = E_n \Psi_{Mn}^{J\pi}$$

③

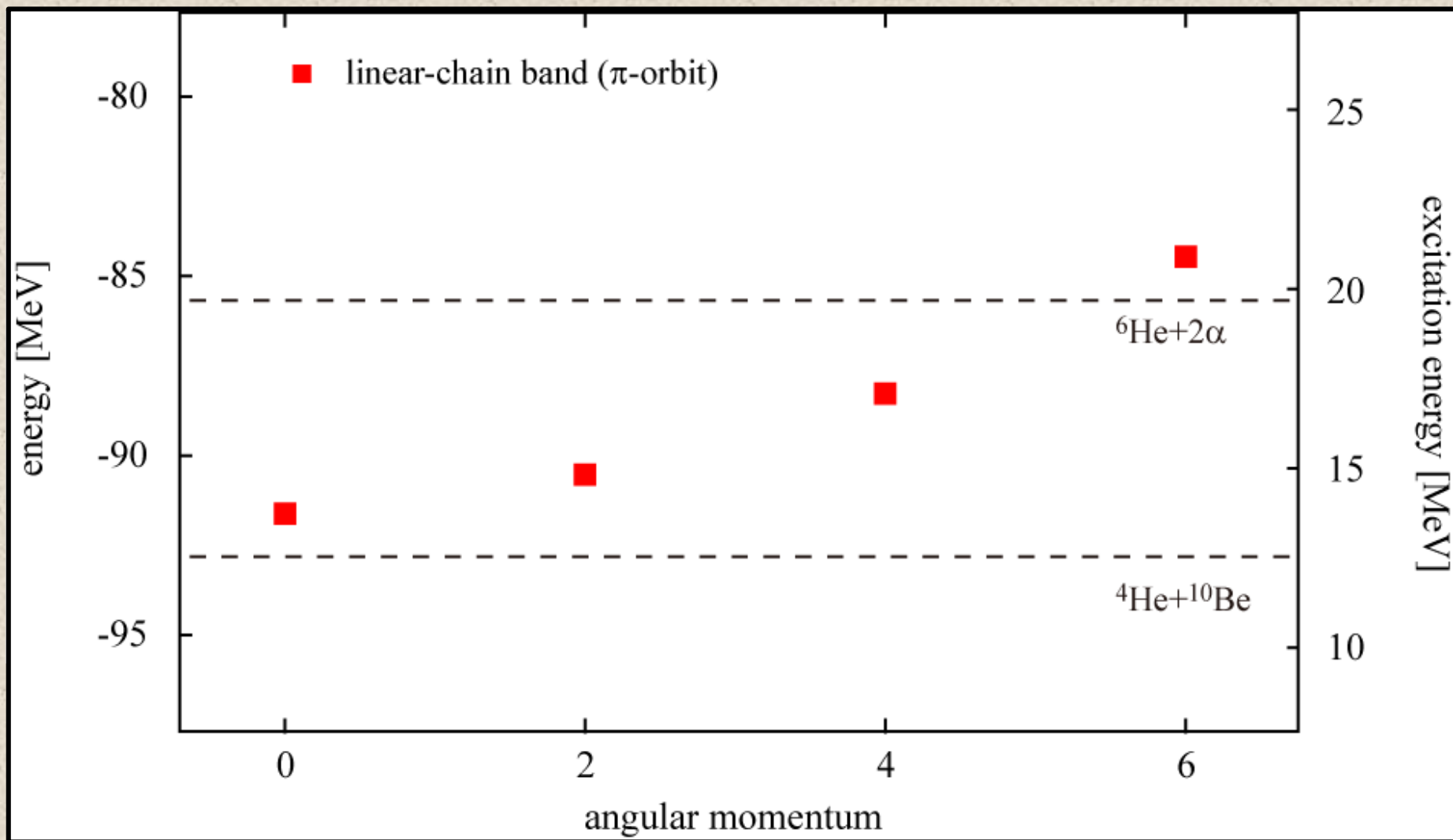


②

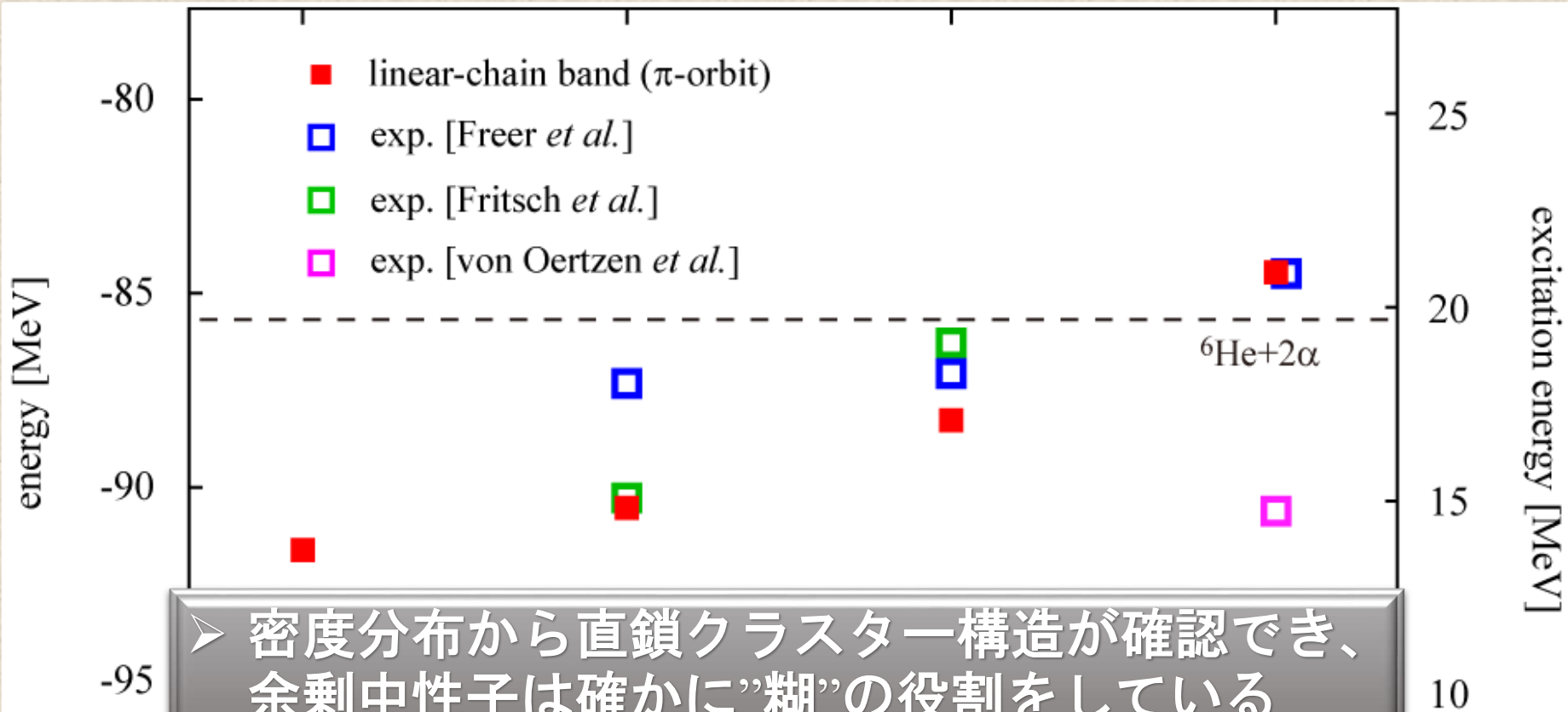
^{14}C のエネルギースペクトル



^{14}C のエネルギースペクトル

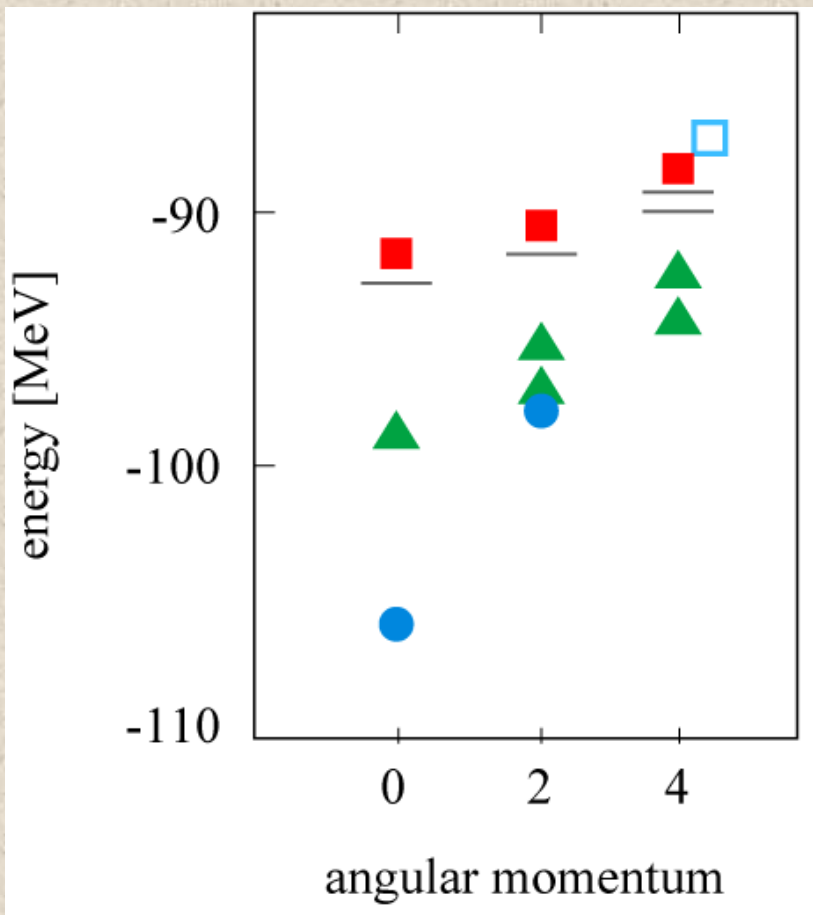


^{14}C のエネルギースペクトル



- 密度分布から直鎖クラスター構造が確認でき、余剰中性子は確かに”糊”の役割をしている
- 観測された共鳴状態は直鎖クラスター状態と励起エネルギーが非常に近く、やはり有力な候補と考えられる

$^{14}\text{C}(4^+)$ のアルファ崩壊換算幅



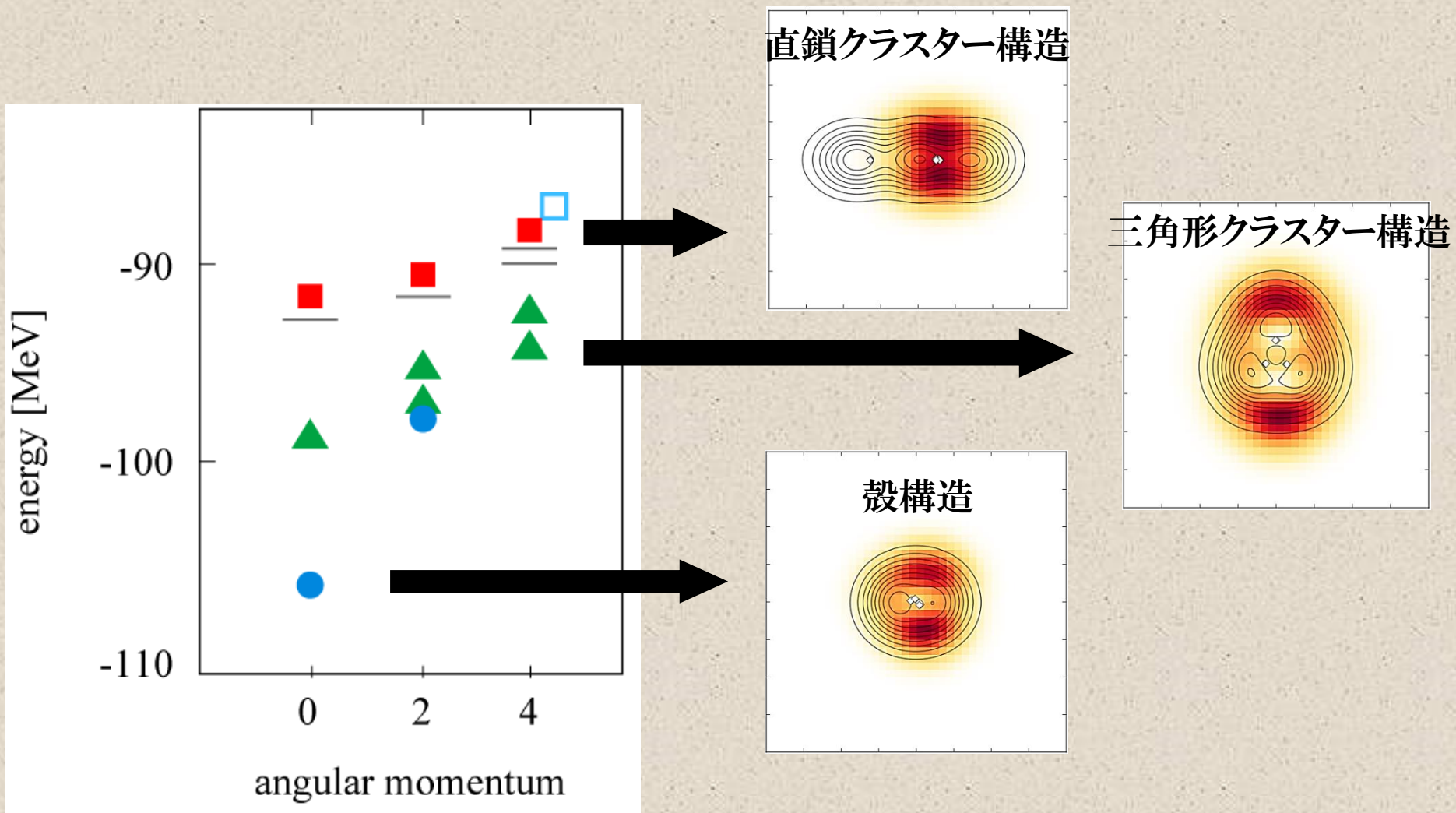
アルファ崩壊換算幅

$$\gamma_{\alpha}^2(a) = \frac{\hbar}{2\mu a} |ay_l(a)|^2$$

換算幅振幅

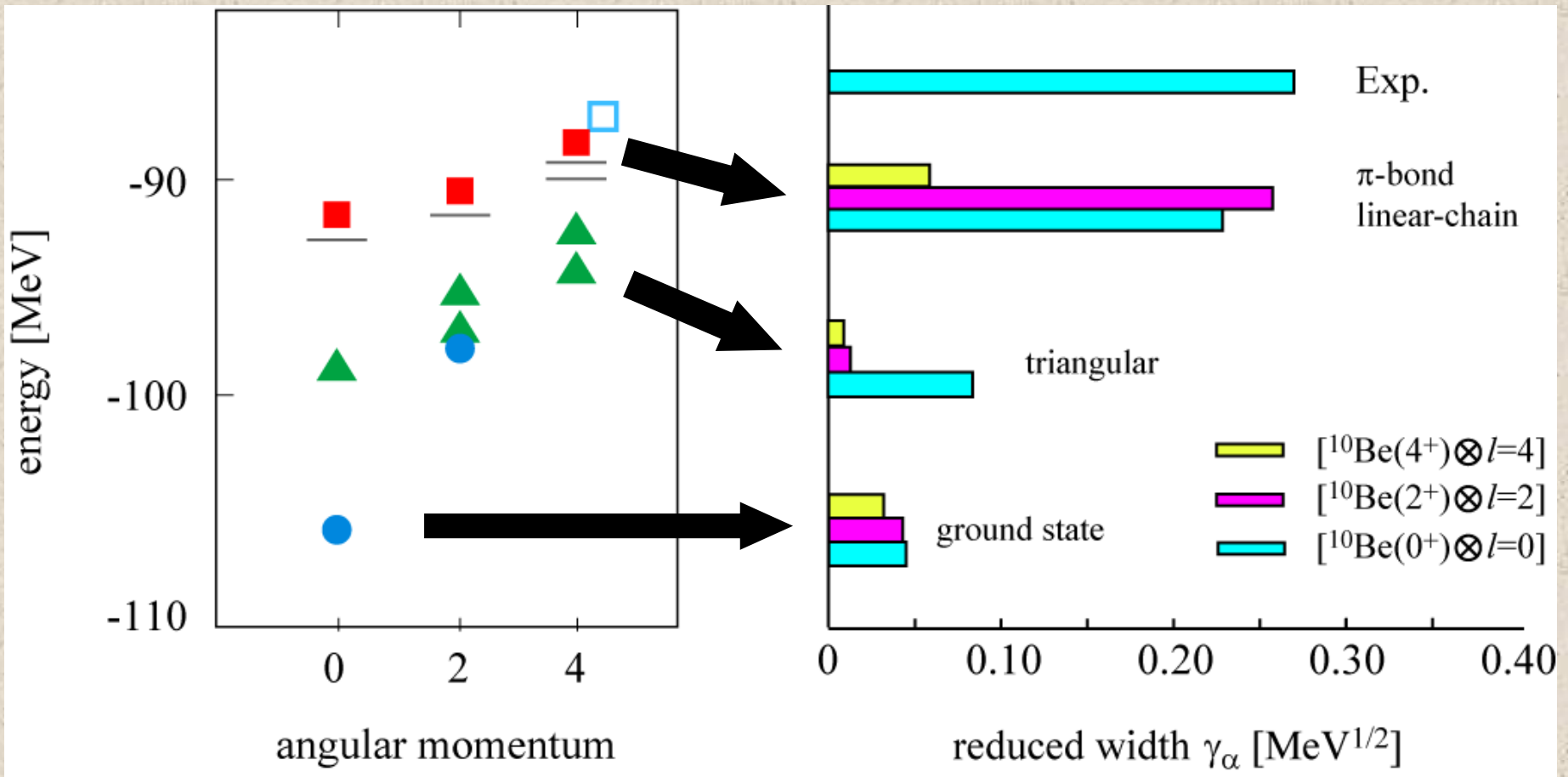
$$ay_l(a) = a \sqrt{\frac{A!}{A_1! A_2!}} \langle Y_{l0}(\mathbf{a}) \phi(\text{He}) \phi(\text{Be}) | \Psi \rangle$$

$^{14}\text{C}(4^+)$ のアルファ崩壊換算幅



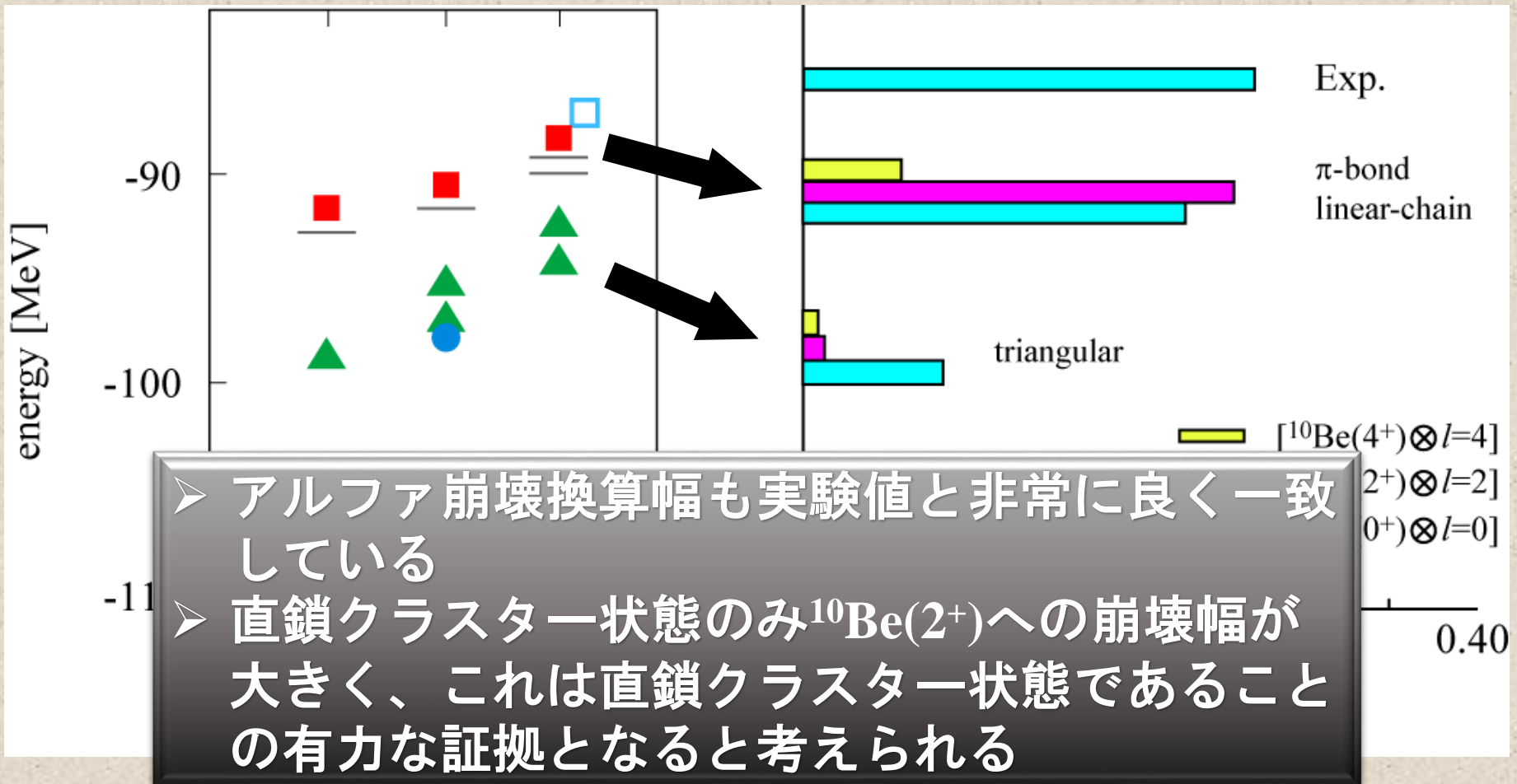
$^{14}\text{C}(4^+)$ のアルファ崩壊換算幅

(チャンネル半径：5.2 fm)



$^{14}\text{C}(4^+)$ のアルファ崩壊換算幅

(チャンネル半径：5.2 fm)



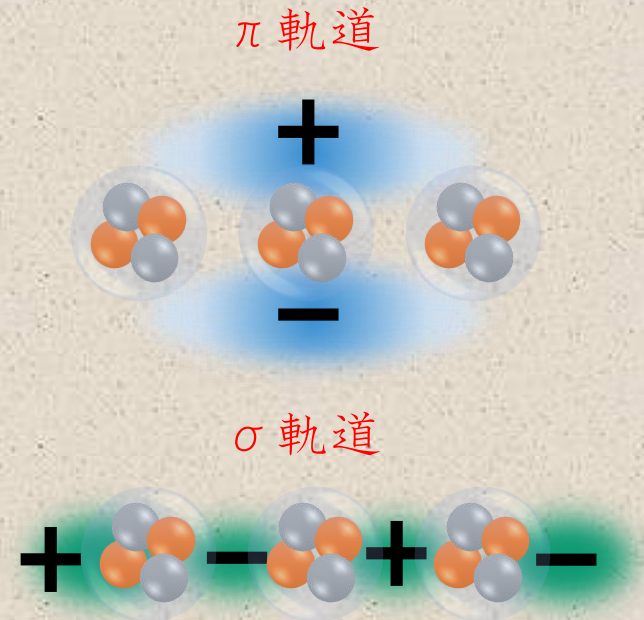
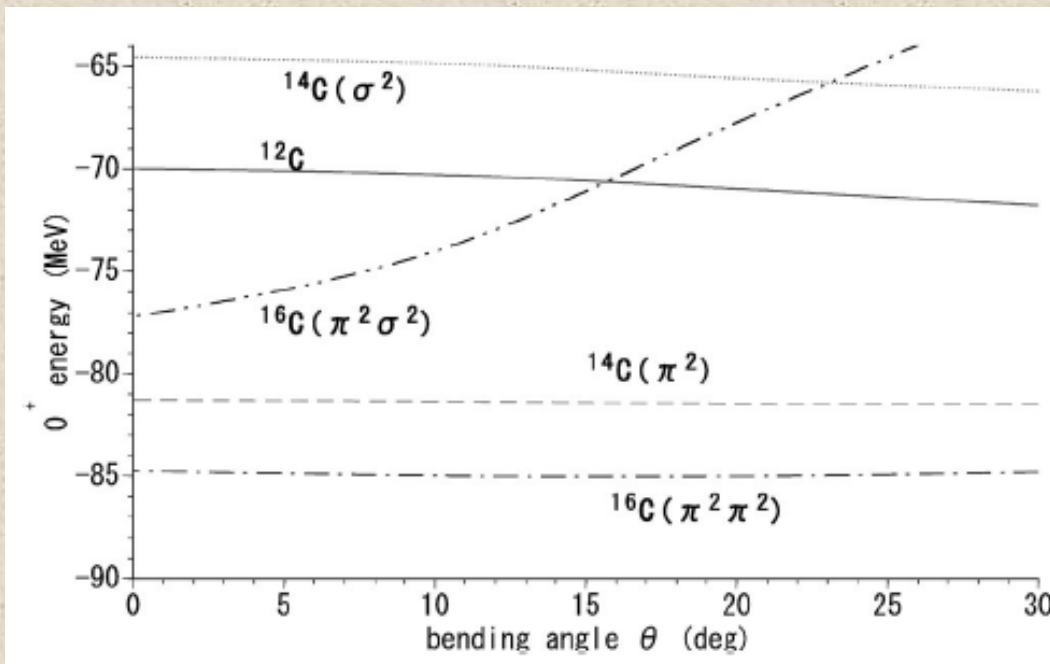
まとめ

- ① 反対称化分子動力学を用いて、 ^{14}C の直鎖クラスター構造の励起エネルギーとアルファ崩壊幅を求めた
- ② 励起エネルギー、アルファ崩壊幅ともに実験と非常に良い一致を示した
- ③ 特に、そのアルファ崩壊幅は ^{10}Be が 2^+ のときにより大きく、このことは直鎖クラスター構造である有力な証拠となりうる

^{16}C の直鎖クラスター構造

分子軌道模型

N. Itagaki, S. Okabe, K. Ikeda, and I. Tanihata, Phys. Rev. C **64**, 014301 (2001).

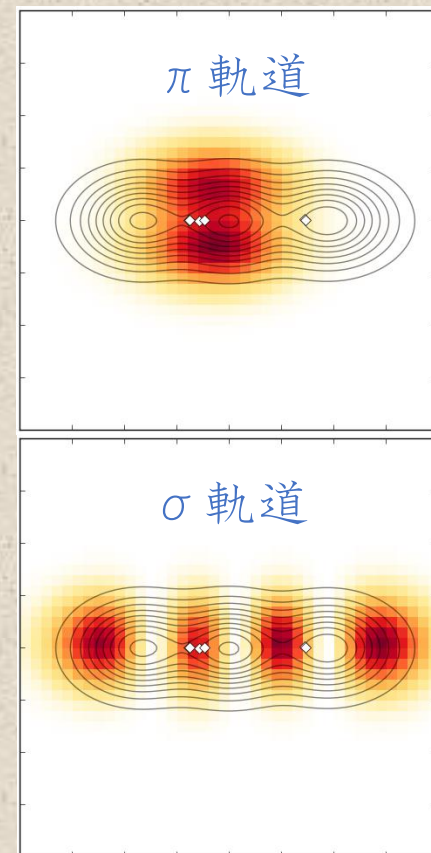
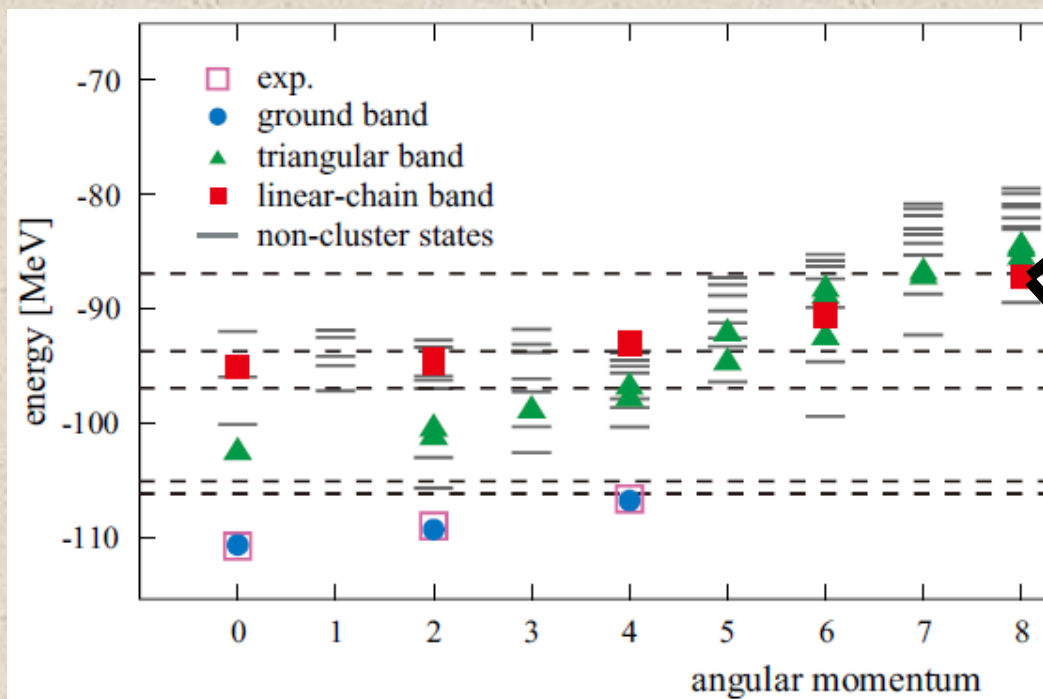


$^{16}\text{C}(\pi^2\sigma^2)$ のみbending motionに対して安定であるという示唆

^{16}C の直鎖クラスター構造

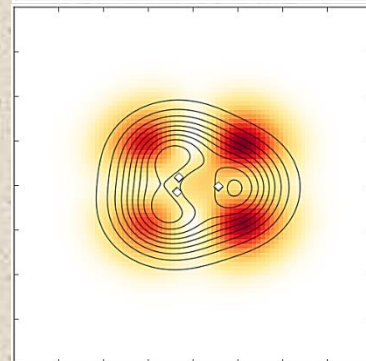
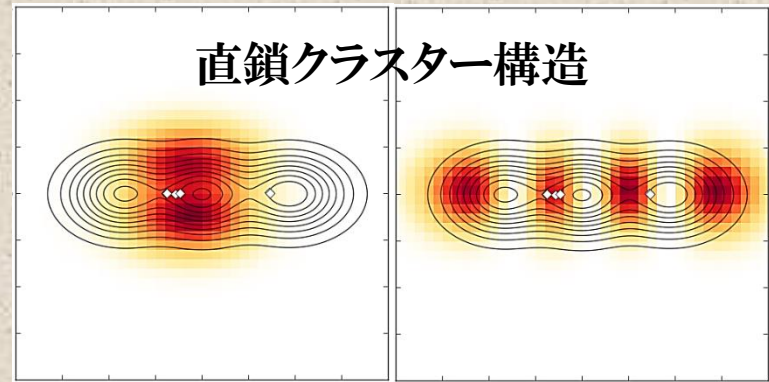
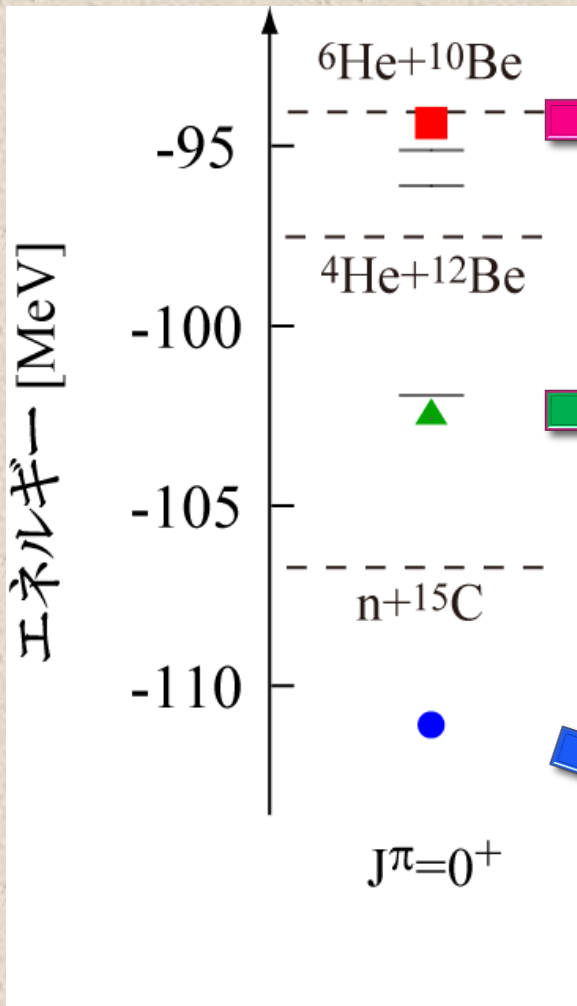
反対称化分子動力学

T.B., Y. Chiba, and M. Kimura, Phys. Rev. C **90**, 064319 (2014).

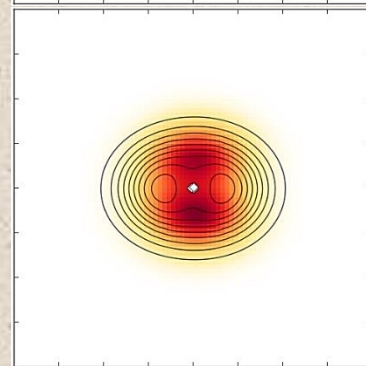


クラスター構造を仮定せず、 $^{16}\text{C}(\pi^2\sigma^2)$ の直鎖クラスター構造の存在を確かめた

$^{16}\text{C}(0^+)$ のアルファ崩壊換算幅

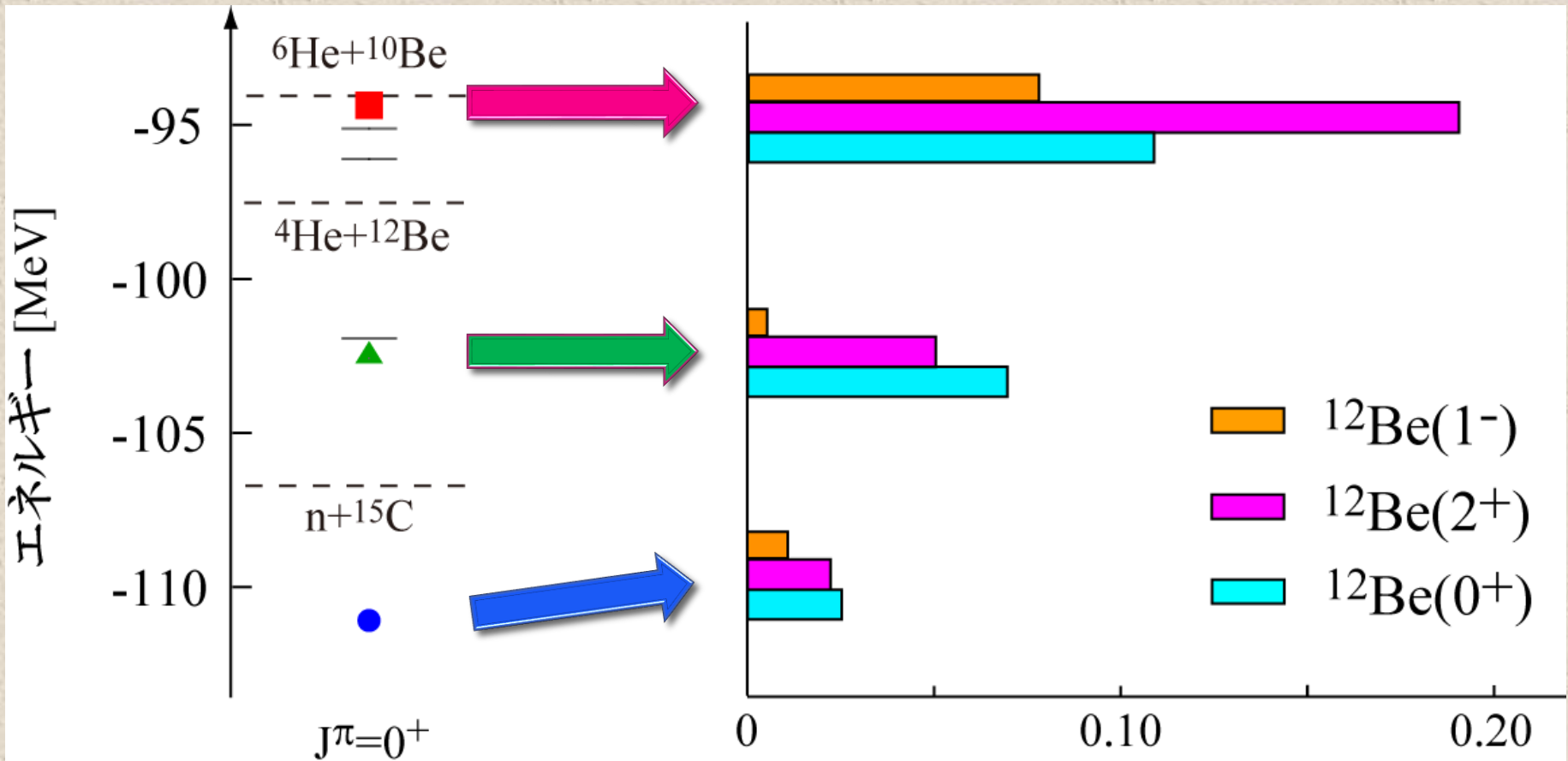


三角形クラスター構造



殻構造

$^{16}\text{C}(0^+)$ のアルファ崩壊換算幅



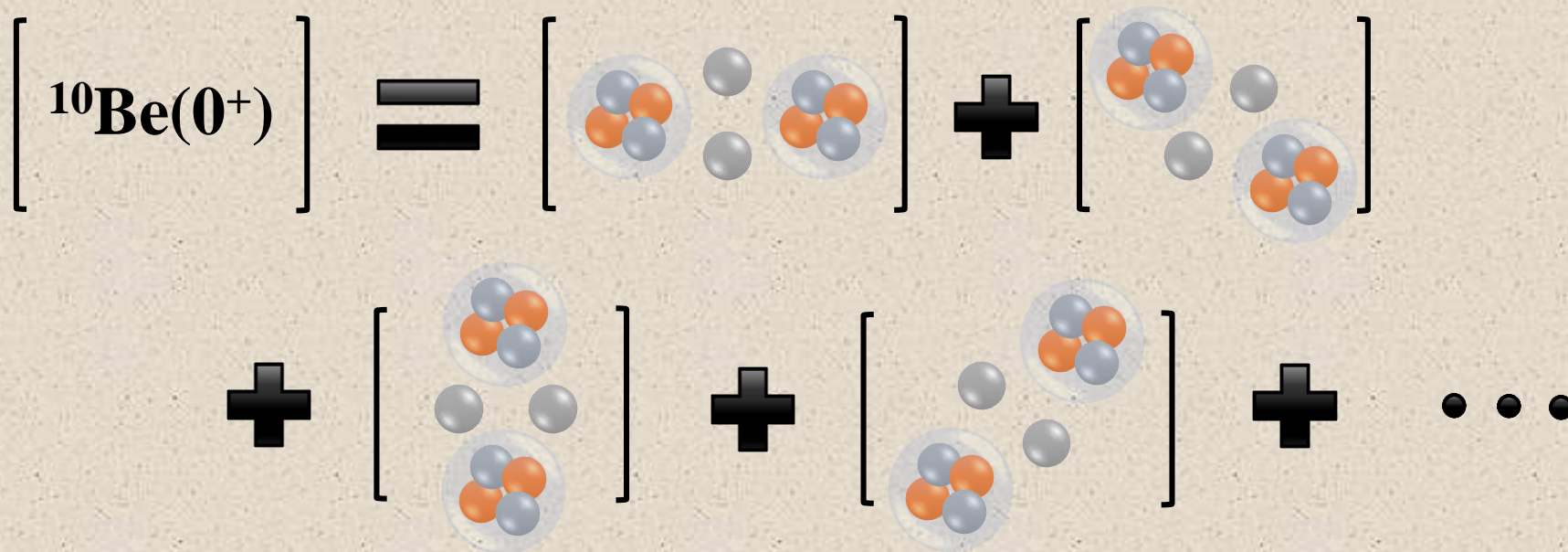
^{14}C と同じ傾向が見られ、直鎖クラスター状態のみ $^{12}\text{Be}(2^+)$ への崩壊幅が大きい

直鎖クラスター構造の指標

角運動量が $J=0$

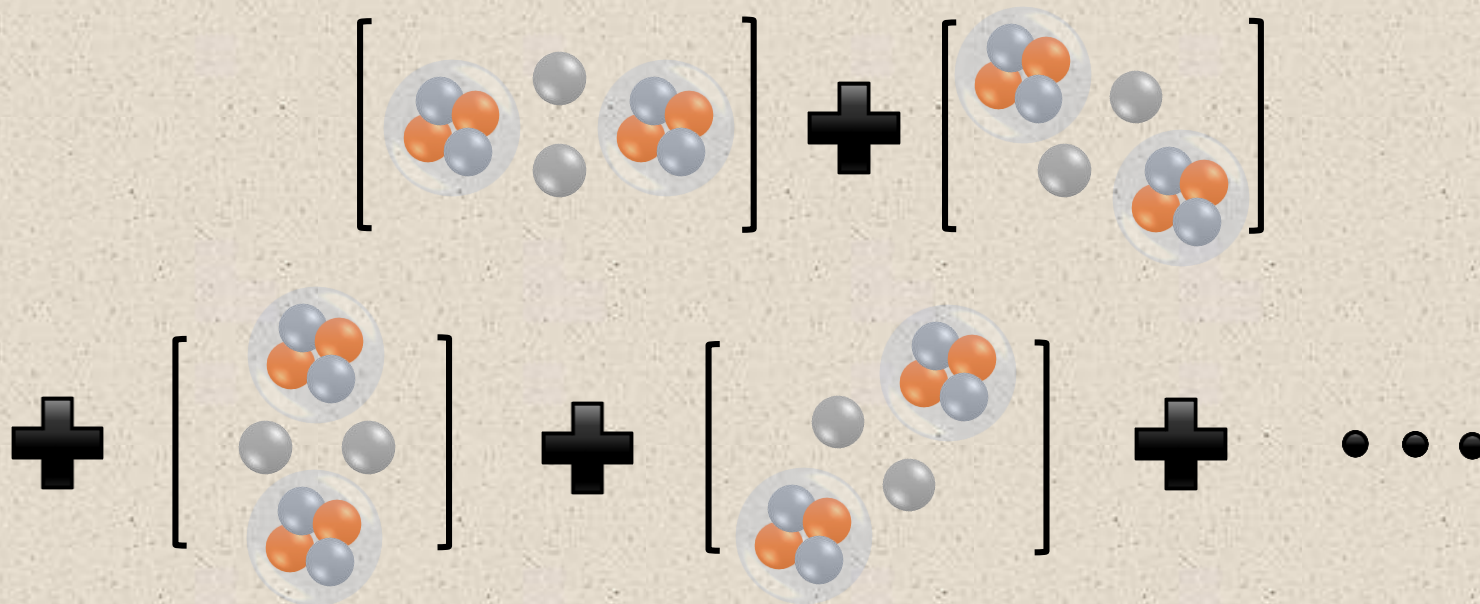


波動関数が球対称



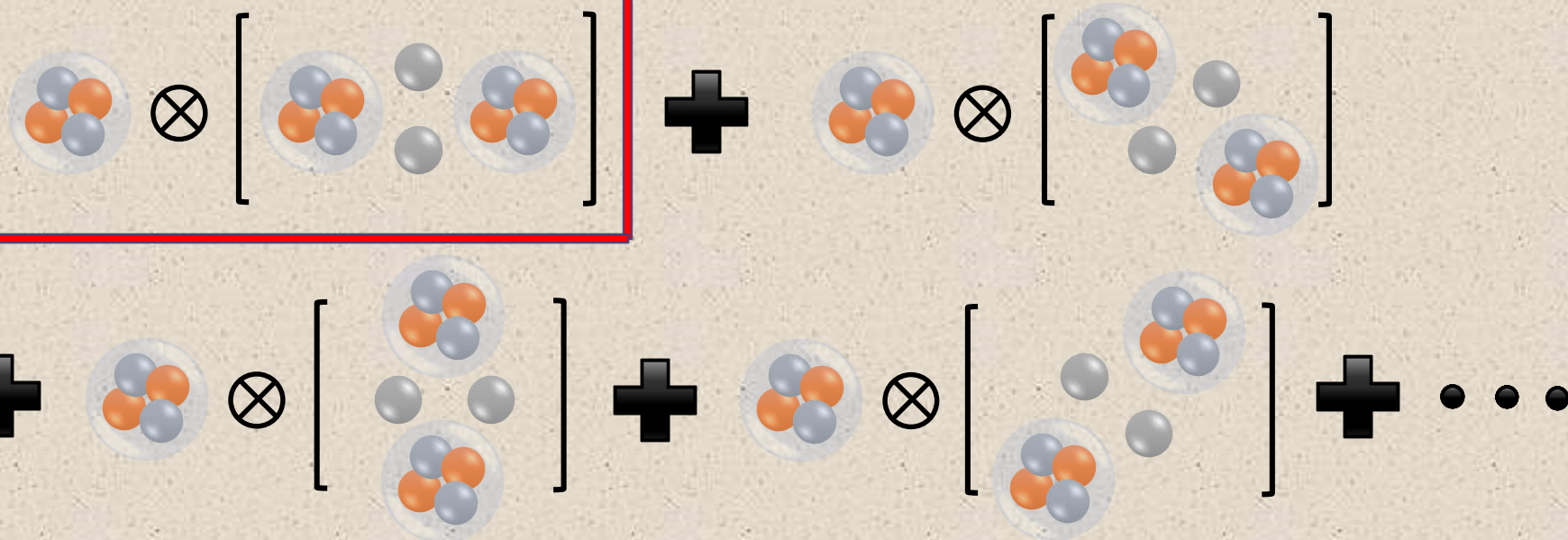
直鎖クラスター構造の指標

もし ^{14}C が ^{10}Be の 0^+ のみに崩壊するなら...



直鎖クラスター構造の指標

もし ^{14}C が ^{10}Be の 0^+ のみに崩壊するなら...



直鎖クラスター状態には
これらの項はない



$^{10}\text{Be}(0^+)$ だけでなく
 2^+ や 4^+ へも崩壊する