

低エネルギー領域でのクラスター形成とその極限としてのアルファ凝縮相形成

船木 靖郎 (関東学院大学理工)

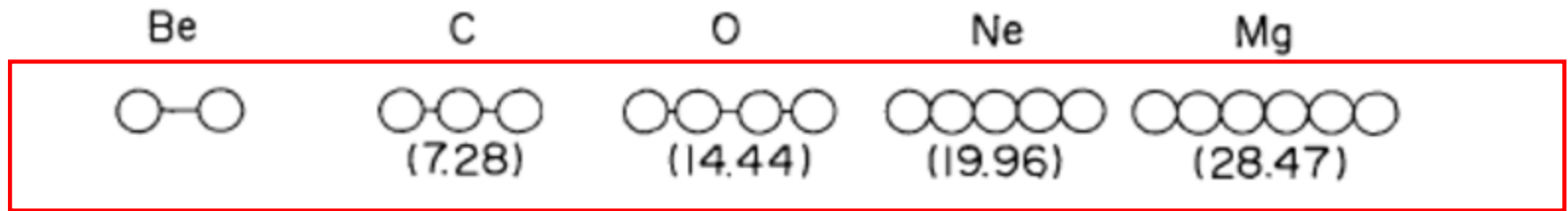
研究協力者

Bo Zhou (復旦大学)

山田 泰一 (関東学院大学理工)

第6回クラスター階層領域研究会,
オンライン開催, 2021年6月14日, 19日

Ikeda diagram (1968)

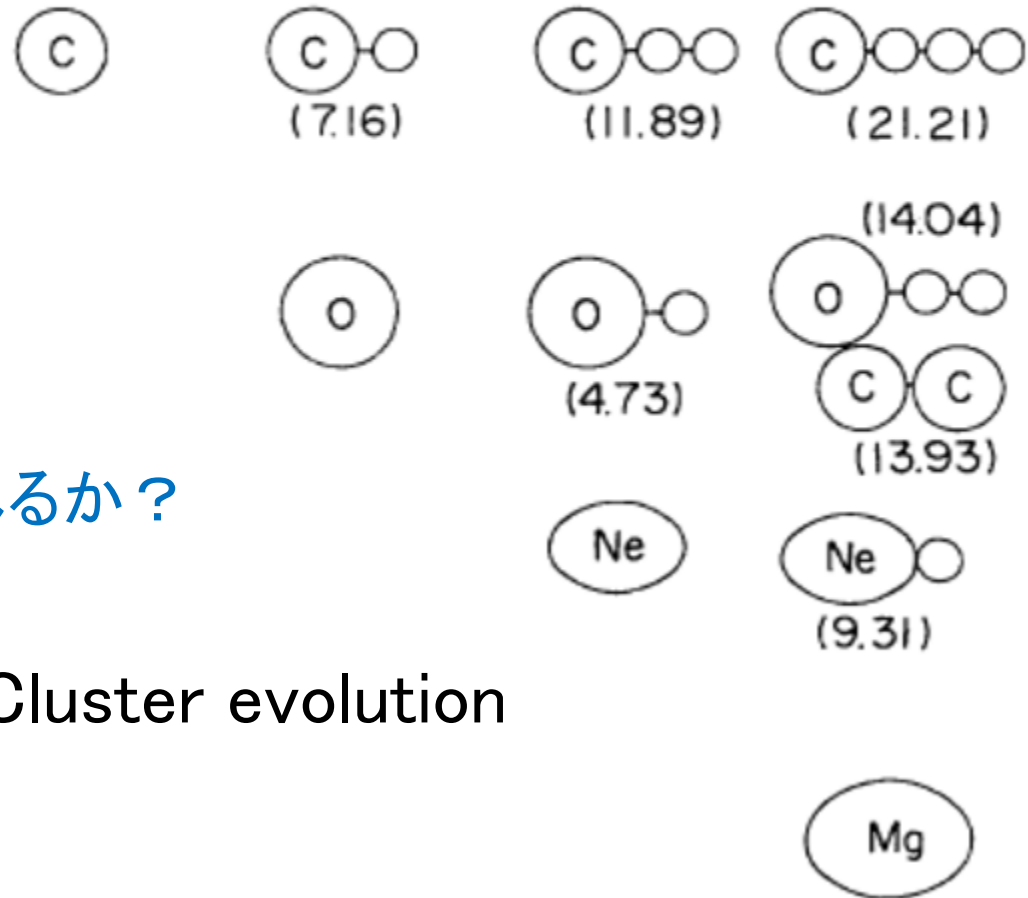


Extremely excited

(とはいえ ~ 1 MeV/A)

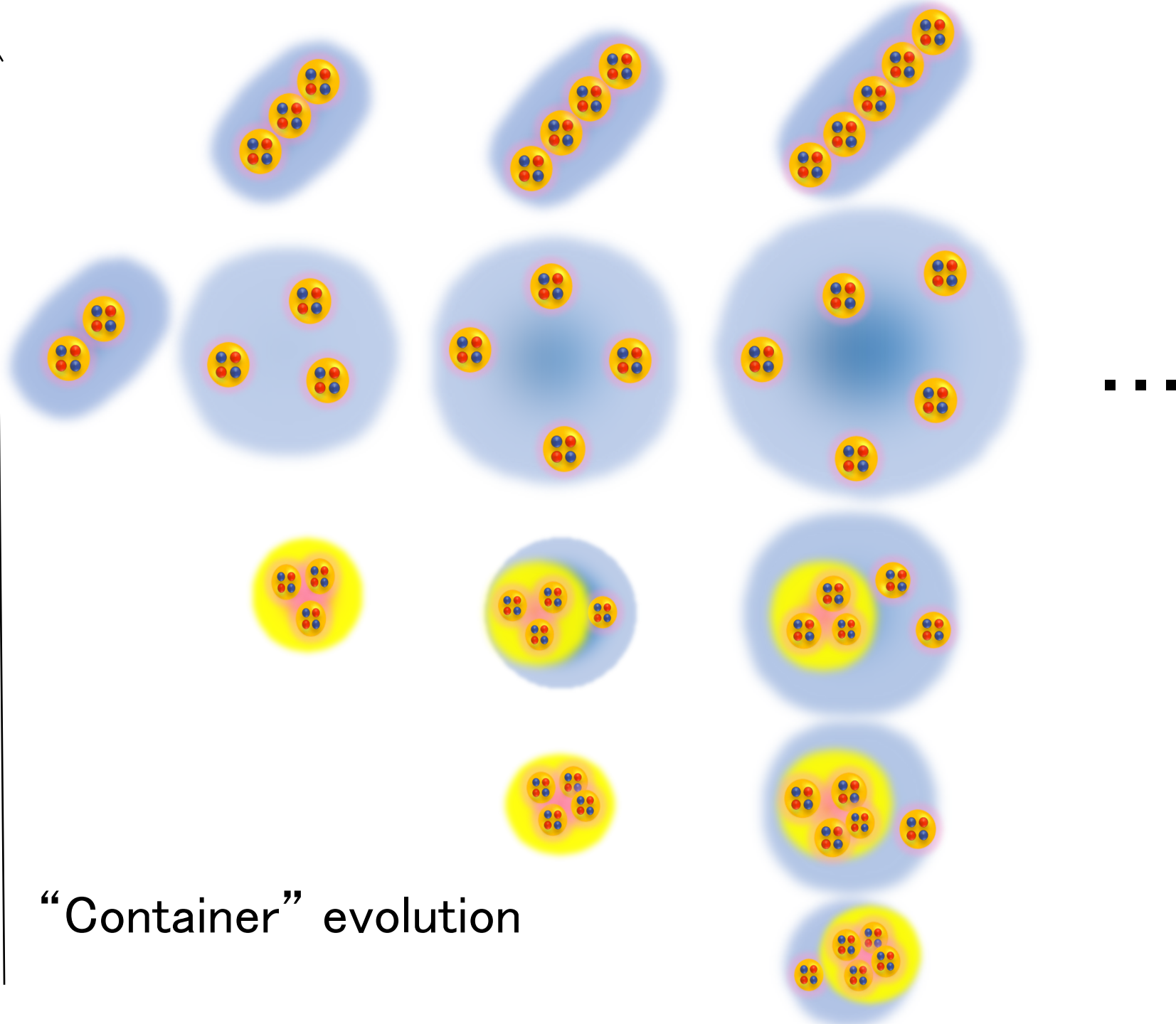
Alpha-cluster gas
condensate

どのように励起され、
クラスターが形成されるか？



Cluster evolution

E

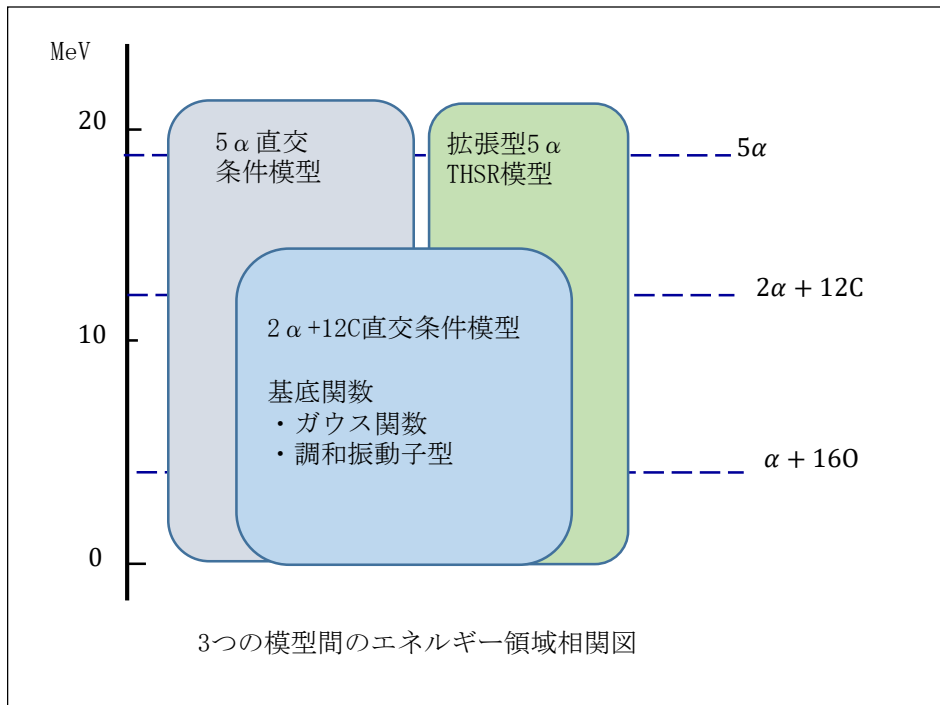
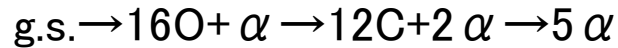


“Container” evolution

本研究プロジェクトの目的

12C, 16Oで明らかにした 3α 、 4α 凝縮状態に対する理論的予言を20Neでも同様に行う。

最終的には、基底状態から 5α 凝縮状態に至るクラスター形成発展のパスをしっかりと押さえること。



以下の3つの模型を基礎として調べる

- ・拡張型5 α THSR模型
- ・5 α 直交条件模型
- ・2 α +12C直交条件模型

本講演では

拡張型THSR模型(eTHSR)

16Oに現れるクラスター構造

拡張型THSR模型による ^{20}Ne の 5α cond.

直交条件模型による ^{20}Ne の低励起状態

本講演では

拡張型THSR模型(eTHSR)

16Oに現れるクラスター構造

拡張型THSR模型による ^{20}Ne の 5α cond.

直交条件模型による ^{20}Ne の低励起状態

4α extended THSR wave function

eTHSR: Y. F, PRC 97, 021304(R)(2018)

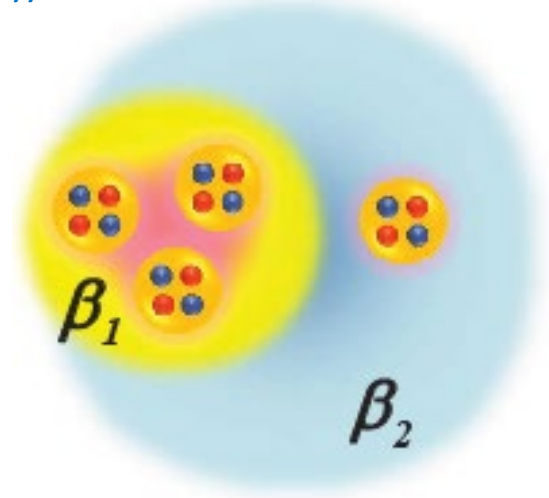
$$\Phi_\alpha(\boldsymbol{\beta}, b) = \exp\left(-2 \sum_k^{x,y,z} \frac{r_k^2}{b^2 + 2\beta_k^2}\right) \phi_\alpha(b)$$

$$\Phi_{16O}^{eTHSR}(\boldsymbol{\beta}_1, \boldsymbol{\beta}_2, b) = \Psi_G^{-1} \mathcal{A}\{\Phi_\alpha(\boldsymbol{\beta}_1, b)\Phi_\alpha(\boldsymbol{\beta}_1, b)\Phi_\alpha(\boldsymbol{\beta}_1, b)\Phi_\alpha(\boldsymbol{\beta}_2, b)\}$$

$(\boldsymbol{\beta}_1 = \boldsymbol{\beta}_2 : \text{original THSR(Tohsaki-Horiuchi-Schuck-Ropke)})$

A. Tohsaki+ PRL 87, 192501(2001),

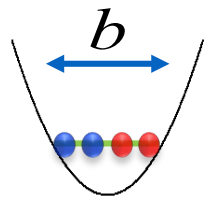
Ψ_G : Total center-of-mass w.f. to be eliminated



Internal w.f. of α particle

$b=1.44$ fm: fixed

$$\phi_\alpha(b) :=$$



$$\Phi_{\alpha}(\boldsymbol{\beta}, b) = \exp\left(-2 \sum_k^{x,y,z} \frac{r_k^2}{b^2 + 2\beta_k^2}\right) \phi_{\alpha}(b)$$

$$\Phi_{16_0}^{\text{eTHSR}}(\boldsymbol{\beta}_1, \boldsymbol{\beta}_2, b) = \Psi_G^{-1} \mathcal{A}\{\Phi_{\alpha}(\boldsymbol{\beta}_1, b)\Phi_{\alpha}(\boldsymbol{\beta}_1, b)\Phi_{\alpha}(\boldsymbol{\beta}_1, b)\Phi_{\alpha}(\boldsymbol{\beta}_2, b)\}$$

($\boldsymbol{\beta}_1 = \boldsymbol{\beta}_2$: original THSR(Tohsaki-Horiuchi-Schuck-Ropke))

A. Tohsaki+ PRL 87, 192501(2001),

Ψ_G : Total center-of-mass w.f. to be eliminated

Hill-Wheeler eq. or GCM (generator coordinate method)

$$\sum_{\boldsymbol{\beta}'_1, \boldsymbol{\beta}'_2} \left\langle \hat{P}_{MK}^J \Phi_{16_0}^{\text{eTHSR}}(\boldsymbol{\beta}_1, \boldsymbol{\beta}_2, b) \left| \hat{H} - E \right| \hat{P}_{MK}^J \Phi_{16_0}^{\text{eTHSR}}(\boldsymbol{\beta}'_1, \boldsymbol{\beta}'_2, b) \right\rangle f(\boldsymbol{\beta}'_1, \boldsymbol{\beta}'_2) = 0$$

\hat{P}_{MK}^J : Angular momentum projection operator

Hamiltonian (NN force: F1 force)

A. Tohsaki, PRC 49, 1814 (1994).

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \sum_i^{16} \nabla_i^2 - T_G + \sum_{i<j}^{16} (V_{ij}^{(N)} + V_{ij}^{(C)}) + \sum_{i<j<k}^{16} V_{ijk}^{(N)}$$

$\boldsymbol{\beta}_i = (\beta_{ix} = \beta_{iy}, \beta_{iz})$

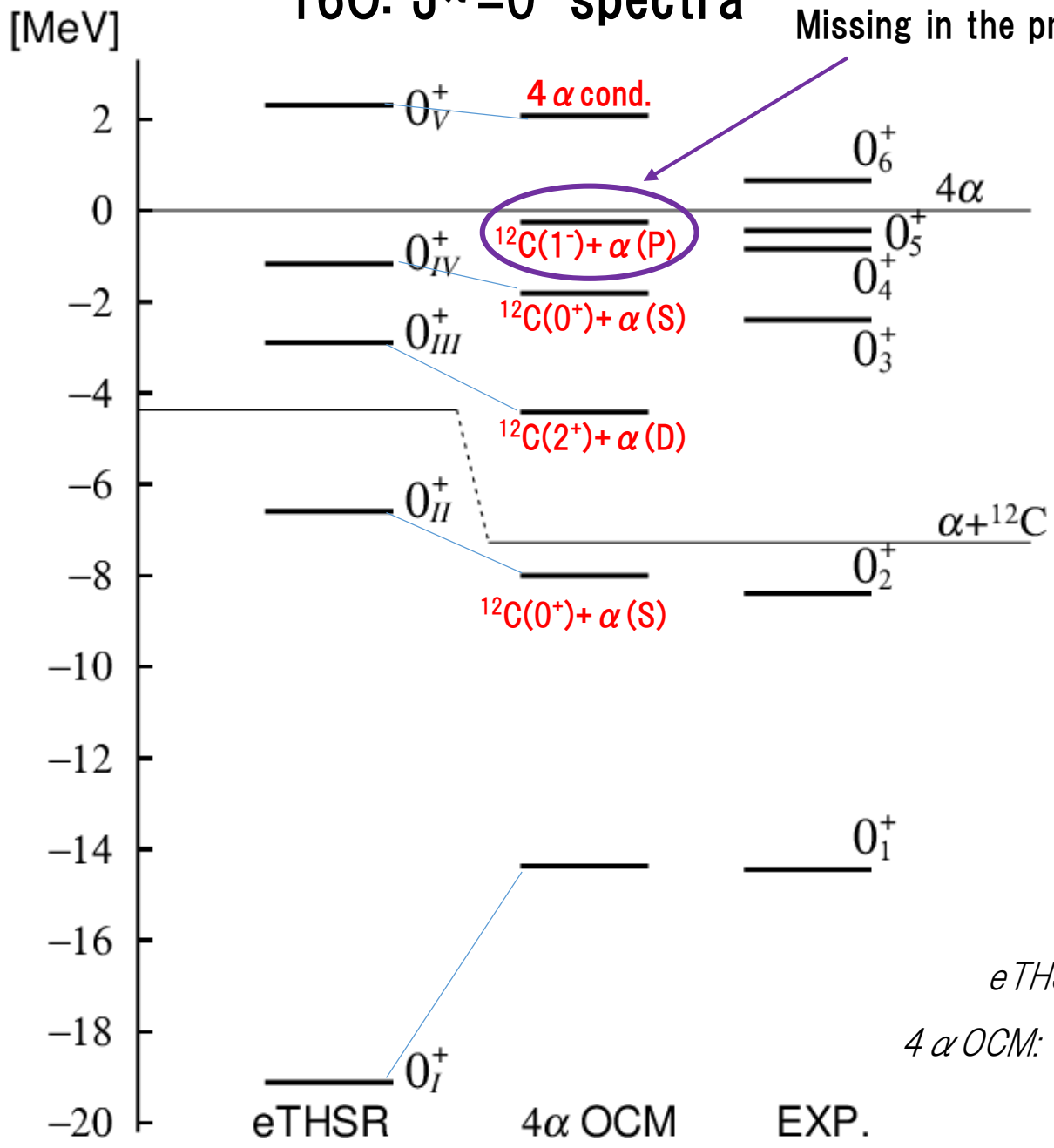
With (axially symmetric) deformation

Spurious continuum components are effectively eliminated by r^2 constraint method.

See Y. F.+ PTP 115, 115 (2006).

160: $J^\pi=0^+$ spectra

Missing in the present eTHSR



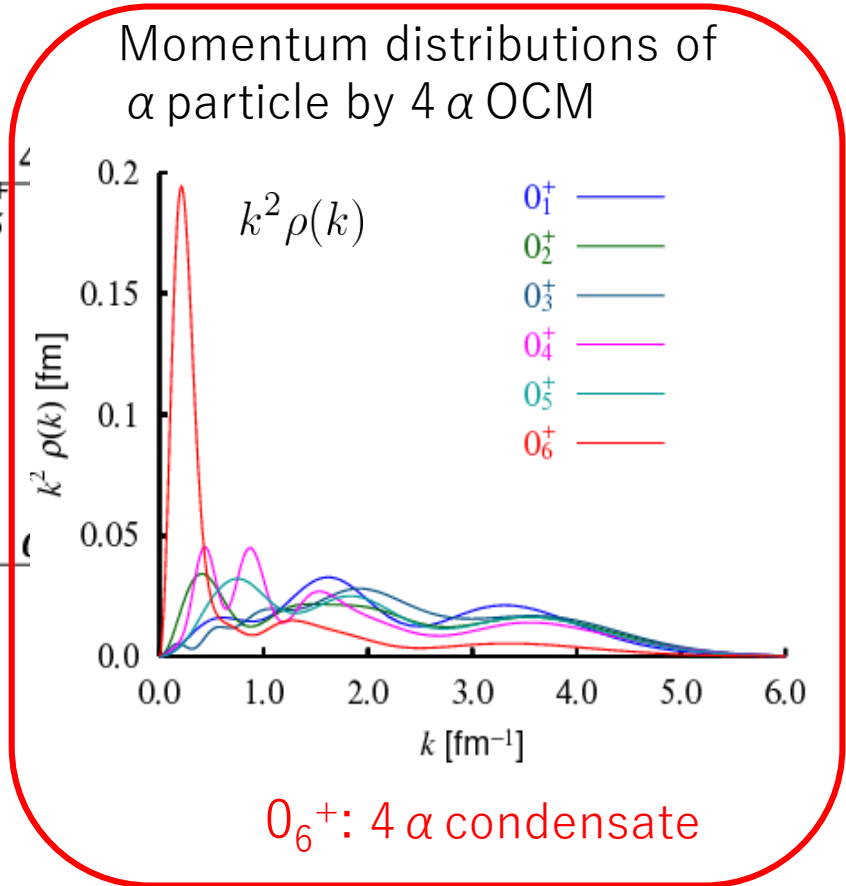
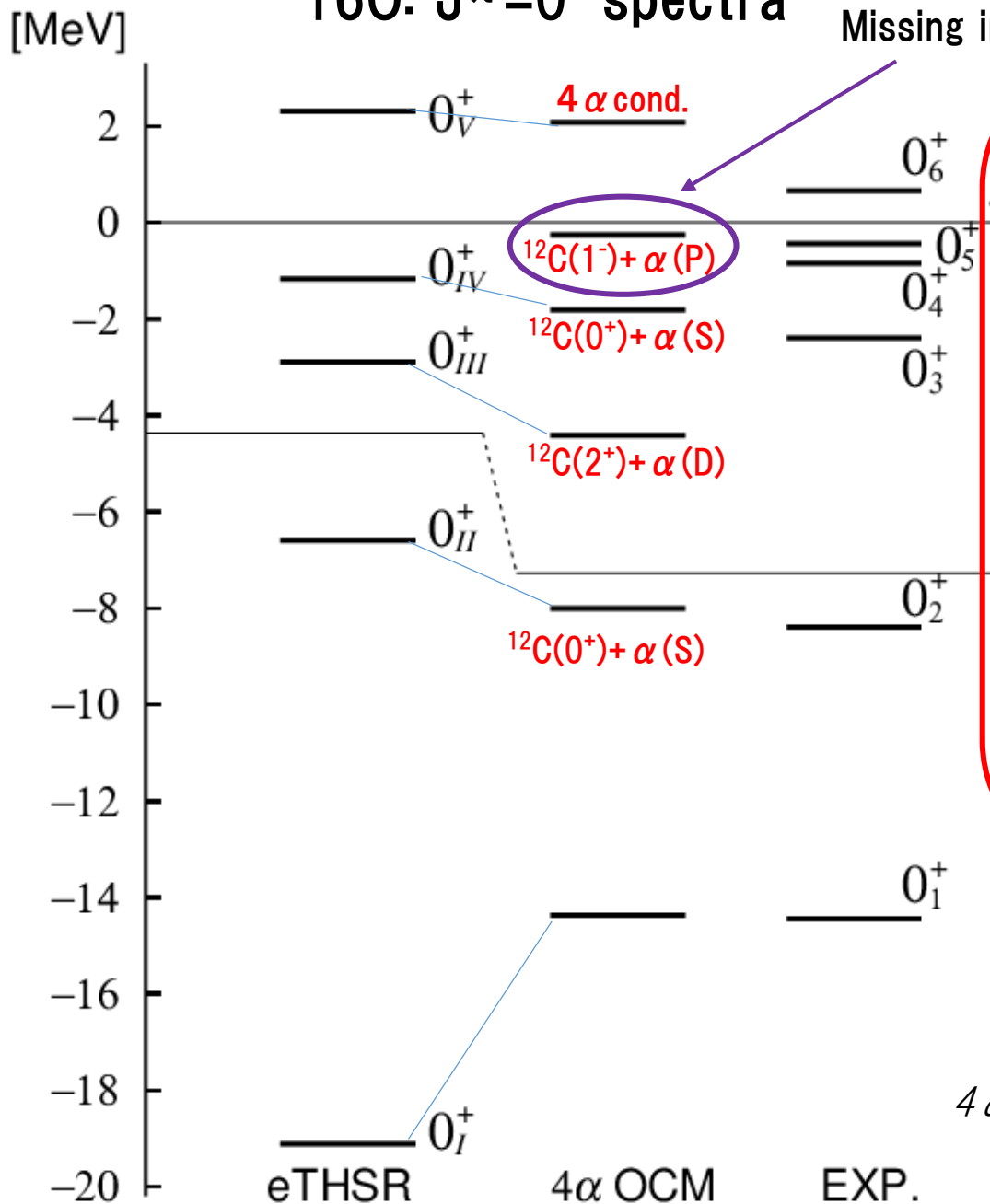
eTHSR: Y. F, PRC 97, 021304(R)(2018)

4α OCM: Y. F et al., PRL 101, 081502(2008)

0_4^+ state: T. Wakasa, et al. PLB 653, 173 (2007).

160: $J^\pi=0^+$ spectra

Missing in the present eTHSR



0_6^+ : 4α condensate

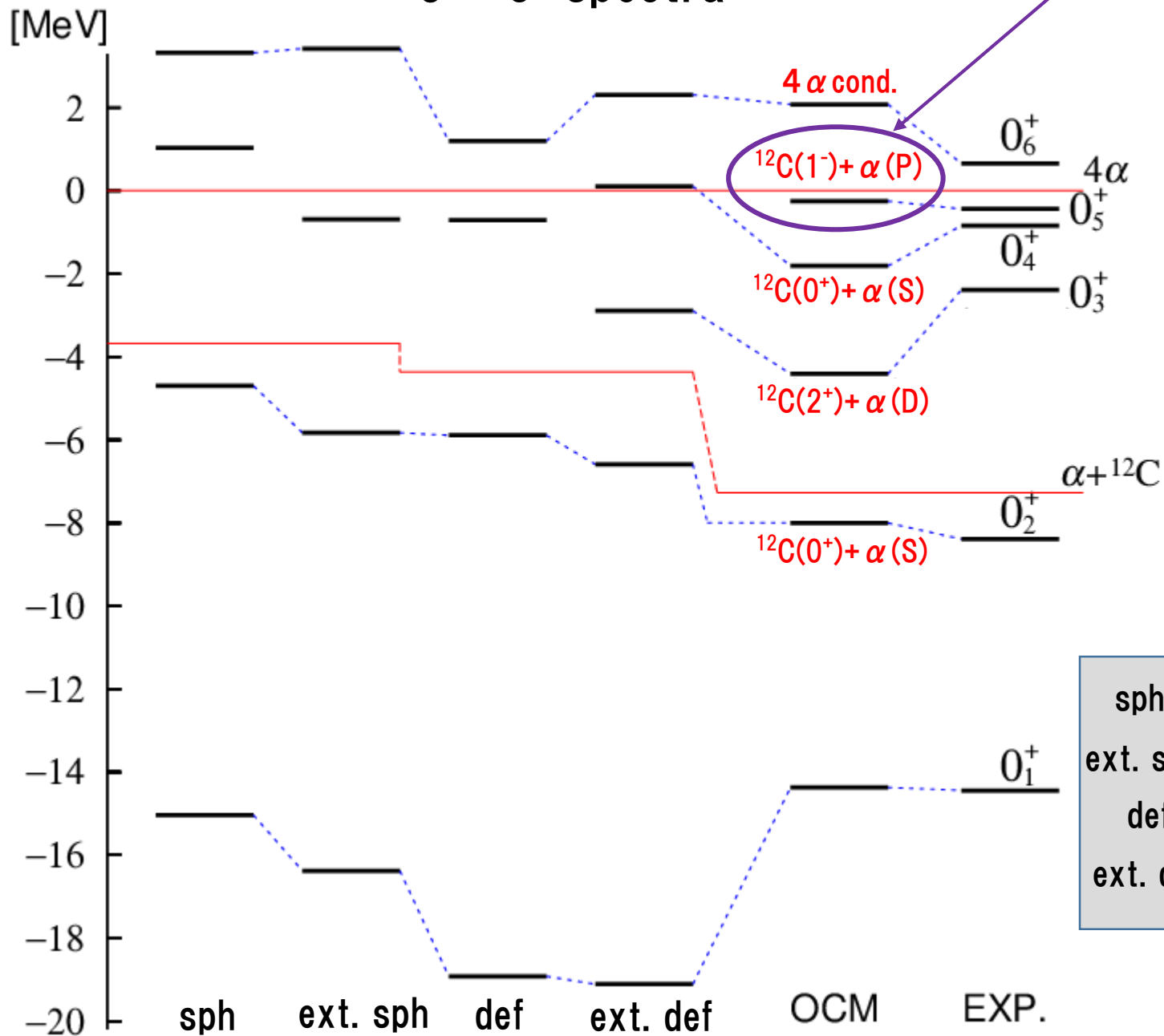
eTHSR: Y. F, PRC 97, 021304(R)(2018)

4 alpha OCM: Y. F et al., PRL 101, 081502(2008)

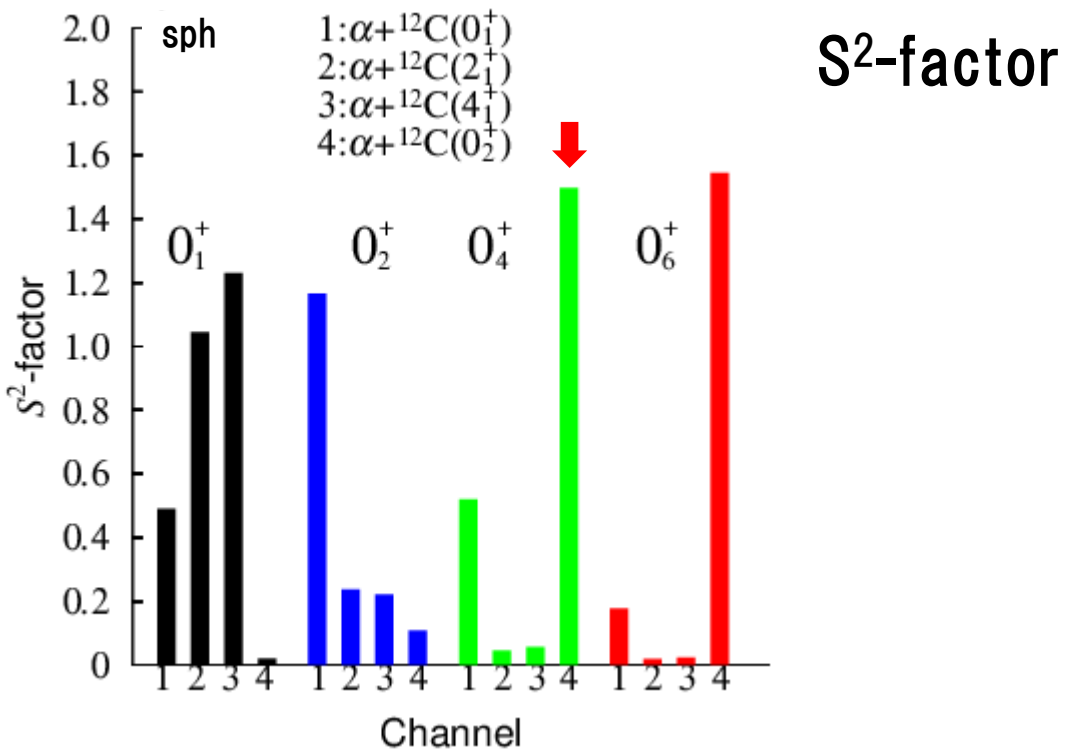
0_4^+ state: T. Wakasa, et al. PLB 653, 173 (2007).

$J^\pi = 0^+$ spectra

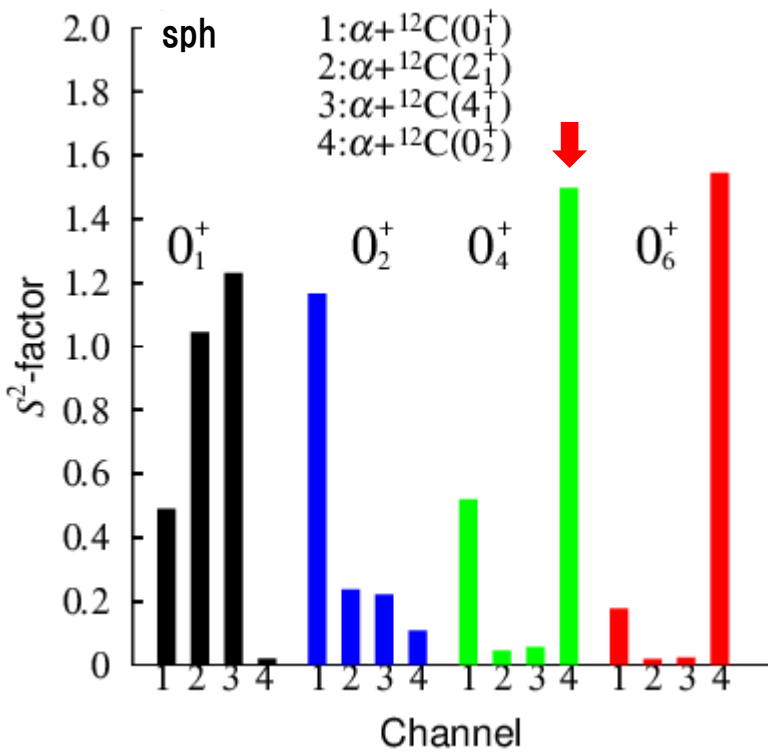
Missing in the present eTHSR



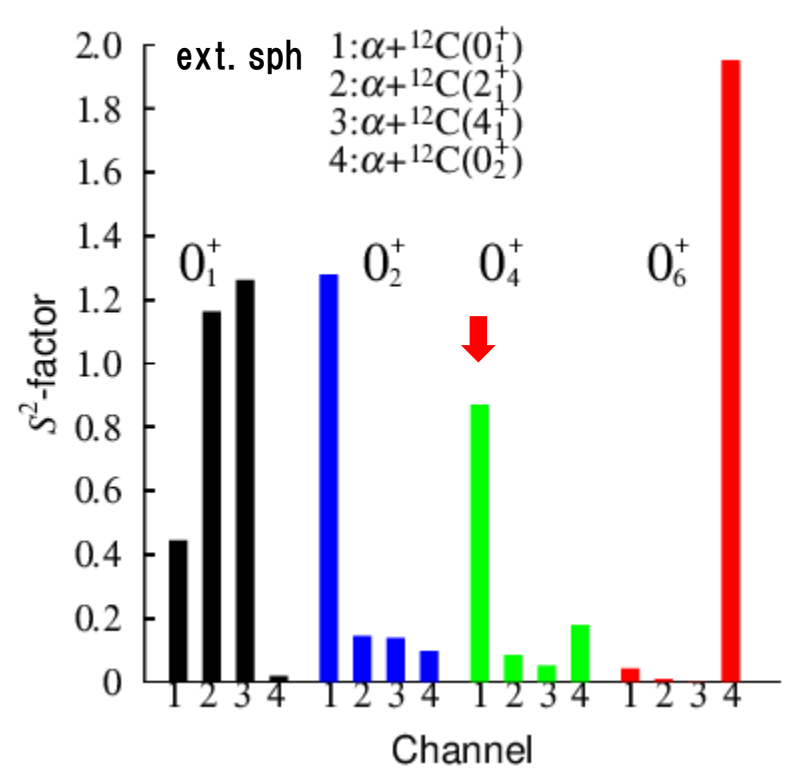
sph : one- β , spherical
 ext. sph : two- β , spherical
 def : one- β , deformed
 ext. def : two- β , deformed



04+ は ${}^{12}\text{C}(0_2^+) + \alpha$ の higher nodal (4 α cond.ではない)

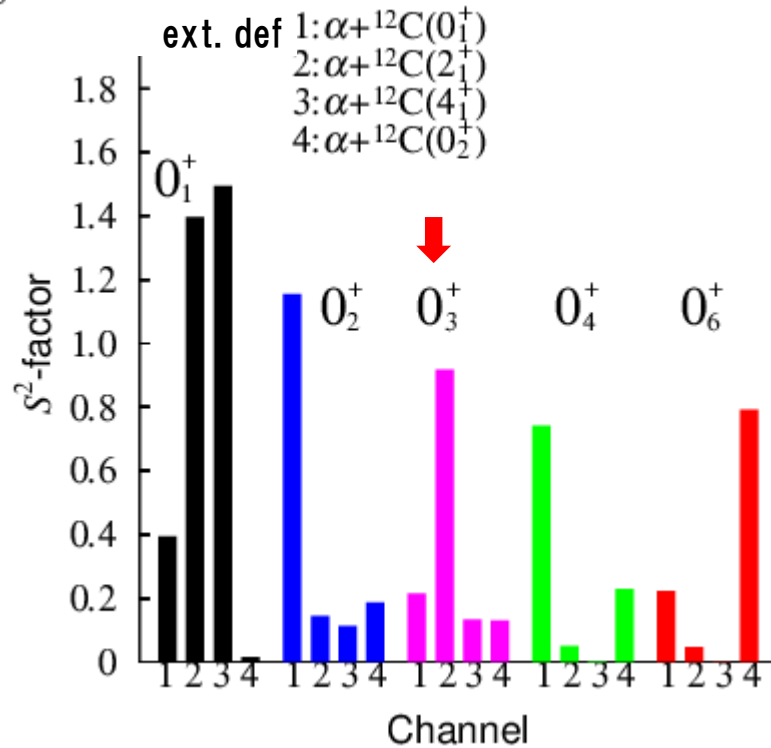
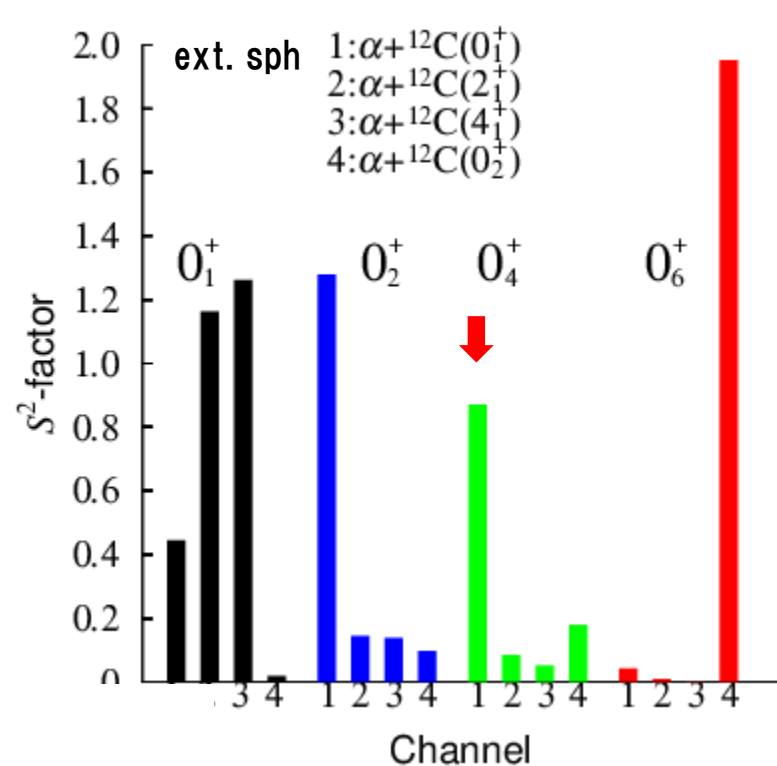
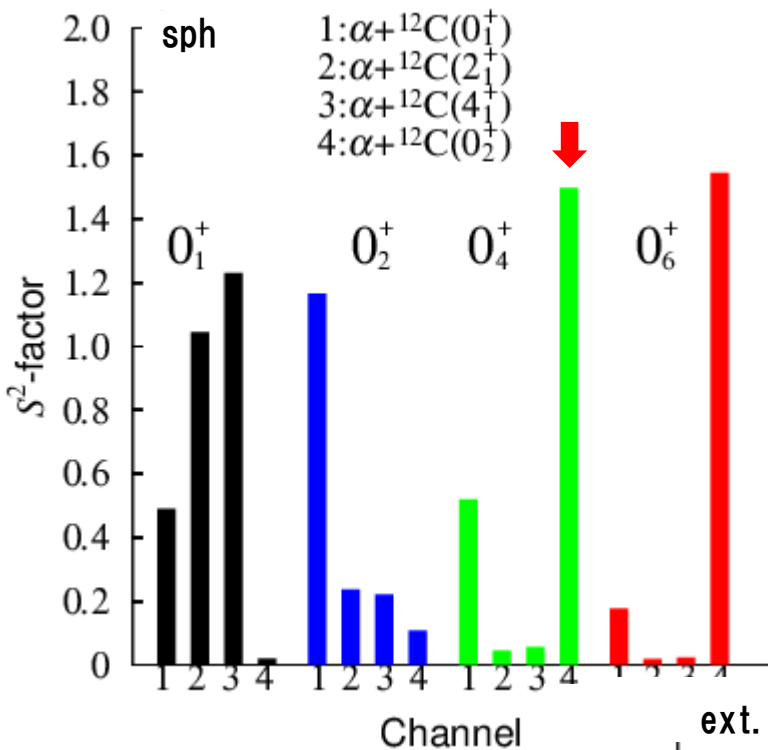


S^2 -factor



O_4^+ は ${}^{12}\text{C}(0^+) + \alpha$ の higher nodal (4 α cond.ではない) \rightarrow この構造が 2β の拡張によって正しく記述され

S²-factor



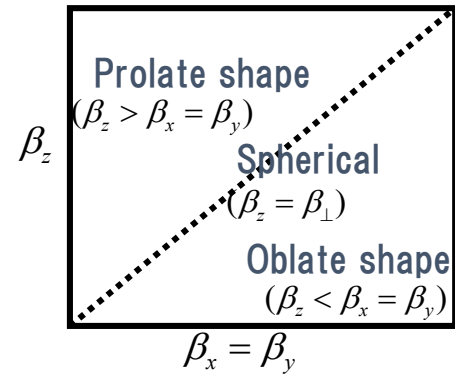
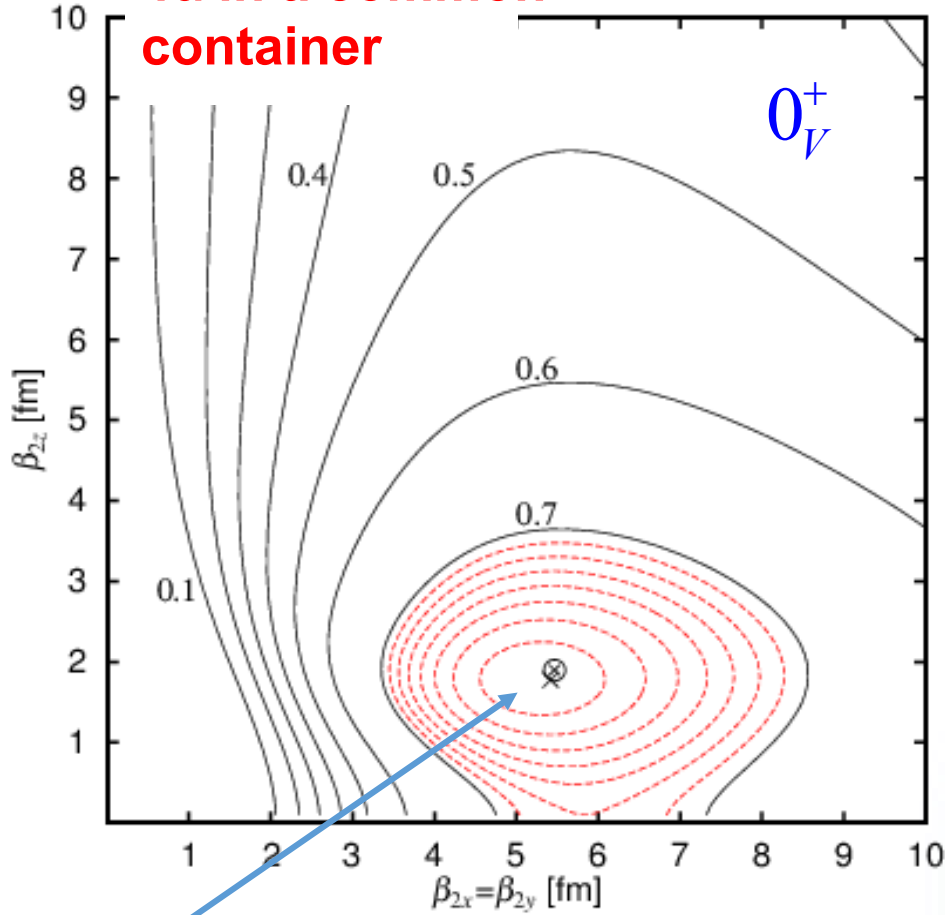
04+ は $^{12}\text{C}(0_+)+\alpha$ の higher

β の拡張によって正しく記述され

更に変形の導入で
 相対D-波の配位が含まれ
 $03+(^{12}\text{C}(2_+)+\alpha(D))$
 が正しく記述される

Squared overlap surface with single config. of eTHSR

4 α in a common container

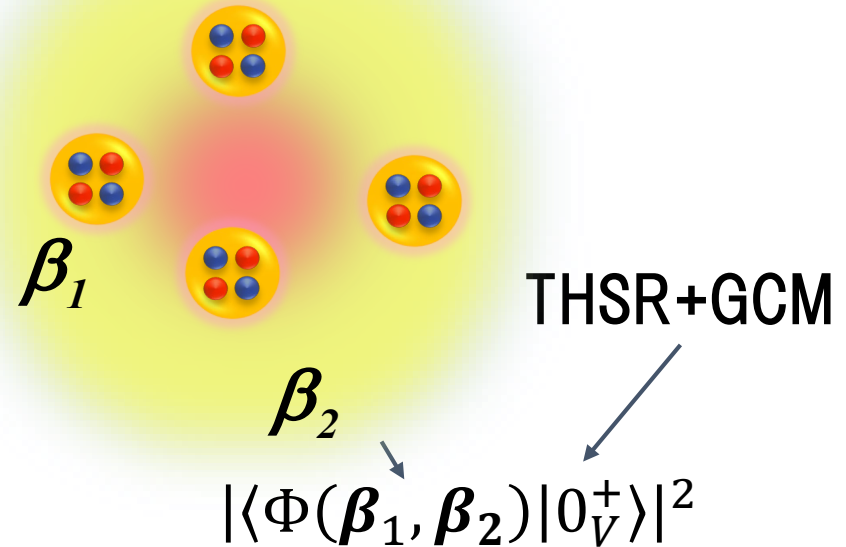


	Sq. overlap	$(\beta_{1x} = \beta_{1y}, \beta_{1z})$
$^{12}\text{C}(0_1^+)$	0.93	(1.9, 1.8fm)
$^{12}\text{C}(2_1^+)$	0.90	(1.9, 0.5fm)
$^{12}\text{C}(0_2^+)$	0.99	(5.6, 1.4fm)

$(\beta_{1x} = \beta_{1y}, \beta_{1z})$: fixed at \otimes
Container for 3 α

\times : maximum

For the fourth α



本講演では

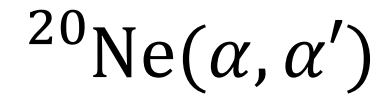
拡張型THSR模型(eTHSR)

16Oに現れるクラスター構造

拡張型THSR模型による ^{20}Ne の 5α cond.

直交条件模型による ^{20}Ne の低励起状態

5α cond. の候補 (この後の足立さんの講演)



$E_\alpha = 389 \text{ MeV}$



decay into several channels

The new states observed at

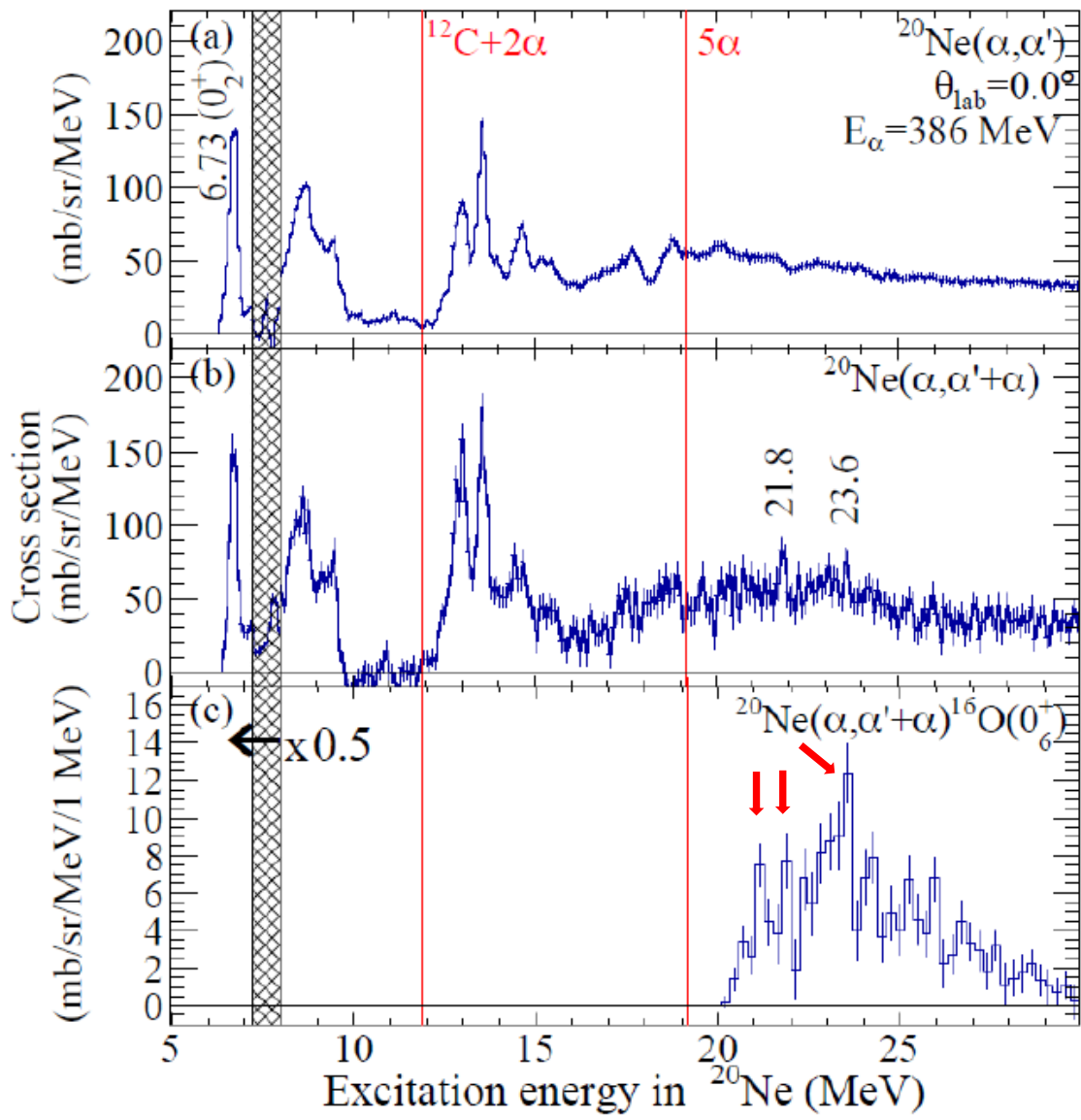
$E_x = 23.6, 21.8, 21.2 \text{ MeV}$

are strongly coupled to the $^{16}\text{O}(0_6^+)$ state.

$^{16}\text{O}(0_6^+)$ analog state



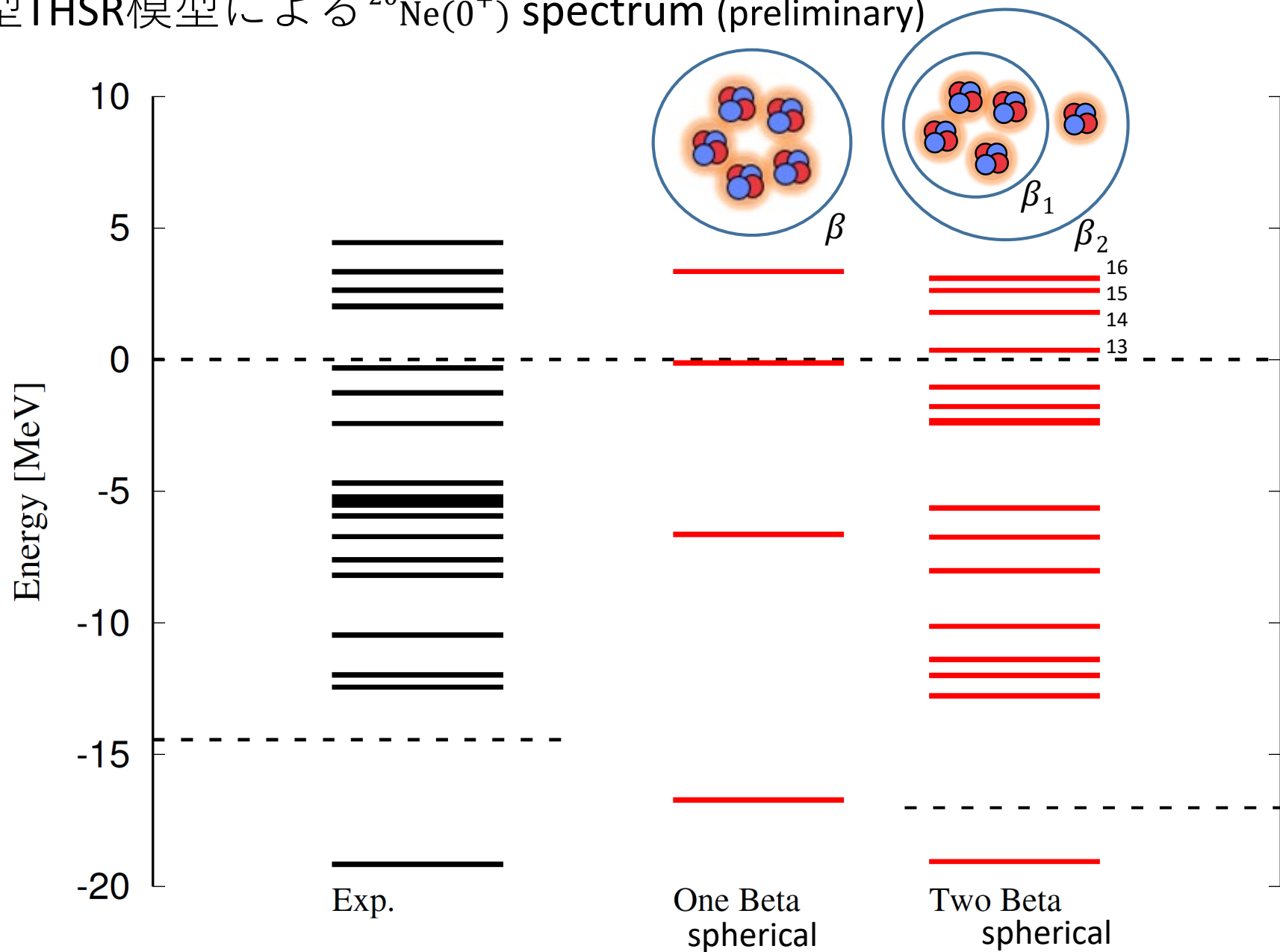
5α condensate



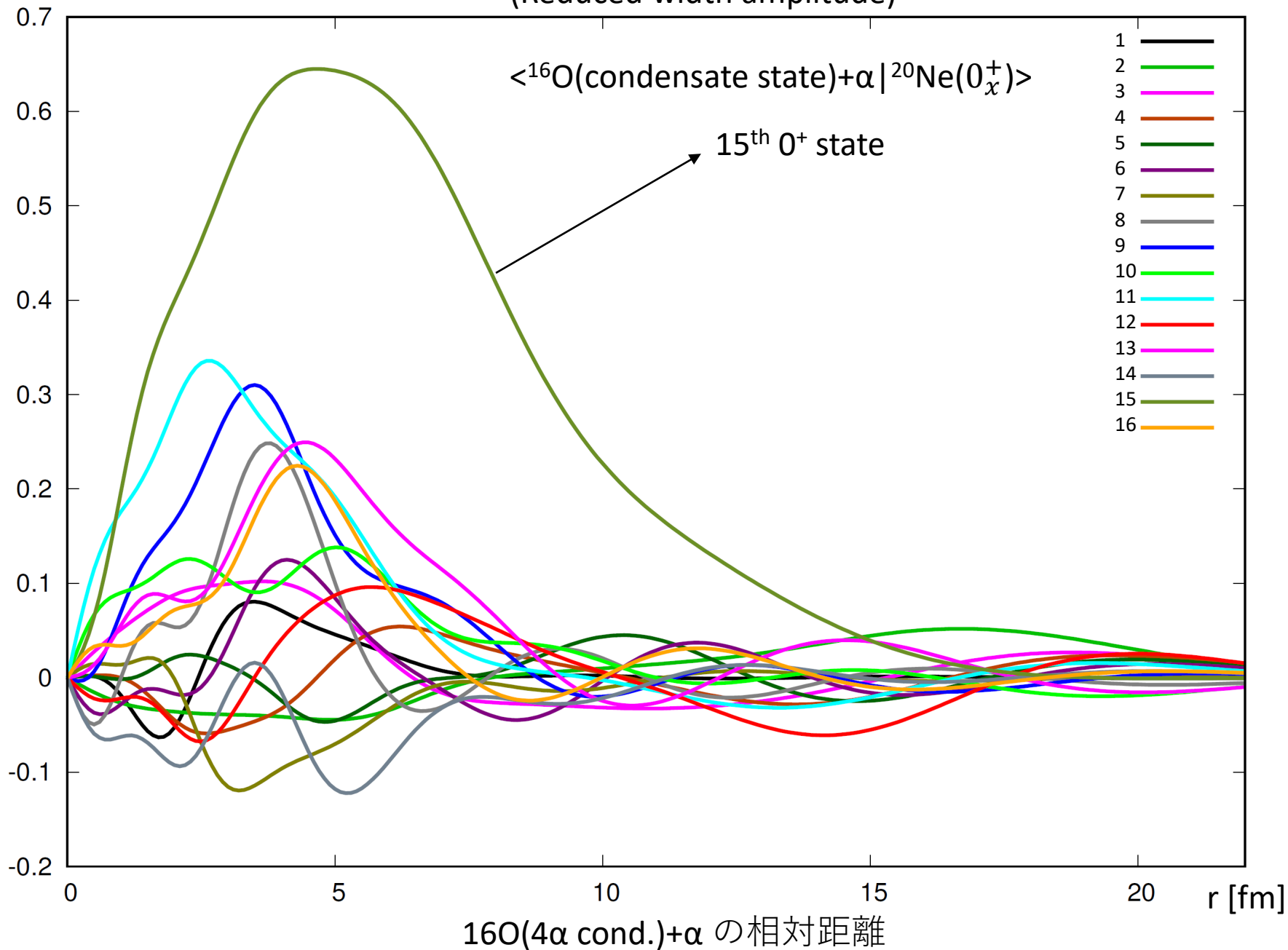
Adachi, Fujikawa, Kawabata et al.

S. Adachi et al., PLB819, 136411(2021).

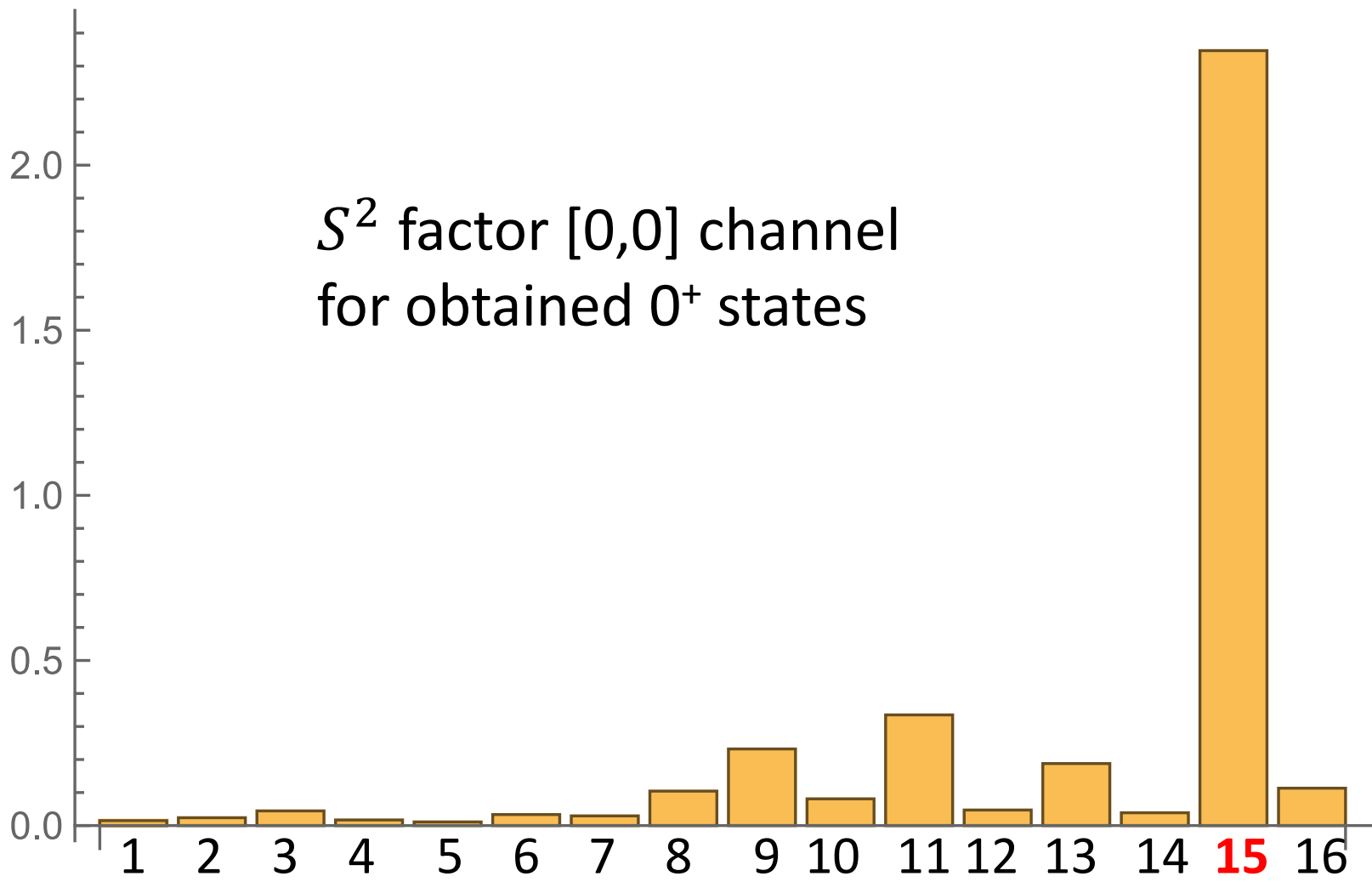
拡張型THSR模型による $^{20}\text{Ne}(0^+)$ spectrum (preliminary)



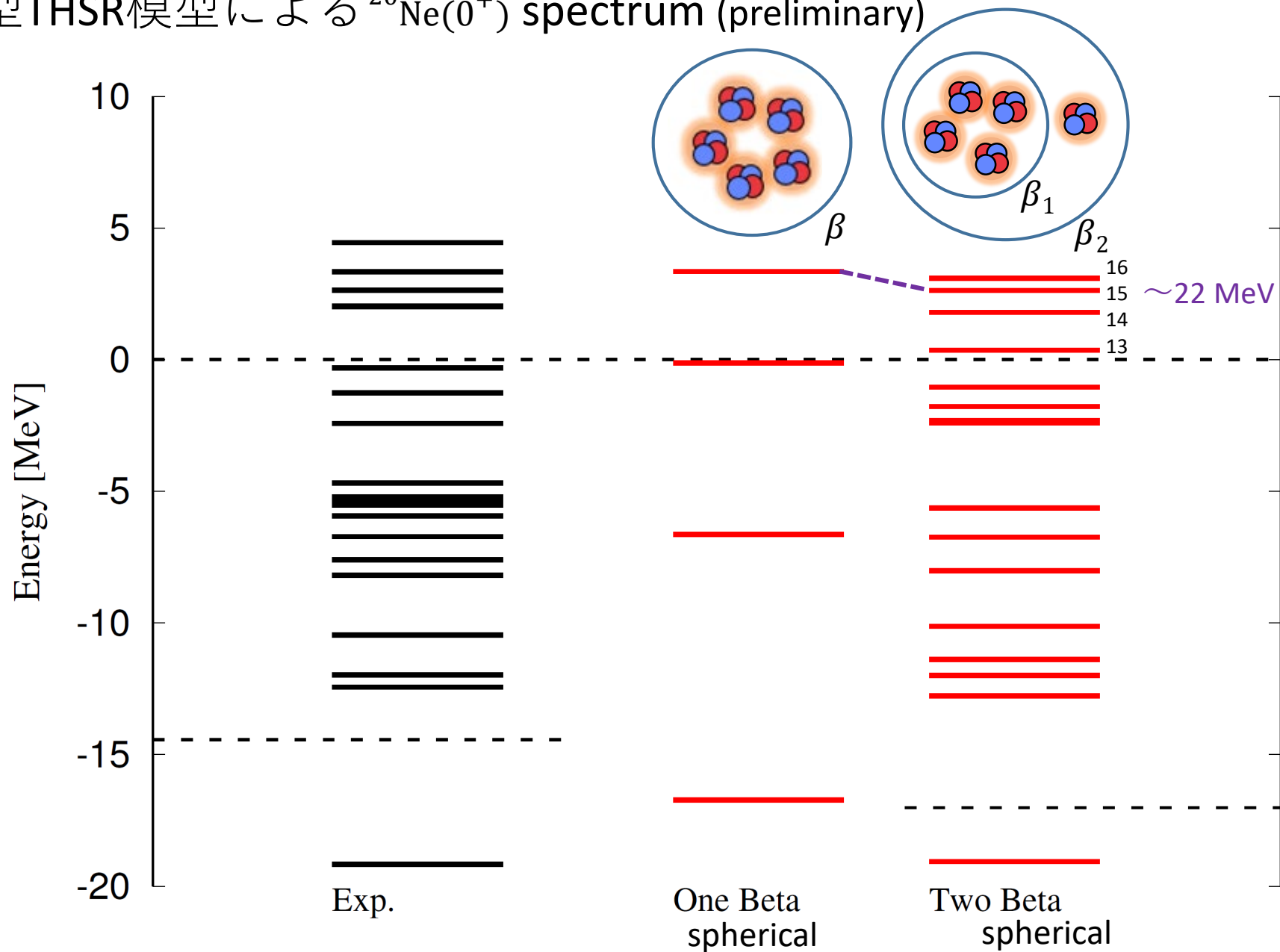
得られた状態の $^{16}\text{O}(4\alpha \text{ cond.})$ とのオーバーラップ関数
(Reduced width amplitude)



S^2 factor [0,0] channel
for obtained 0^+ states



拡張型THSR模型による $^{20}\text{Ne}(0^+)$ spectrum (preliminary)



本講演では

拡張型THSR模型(eTHSR)

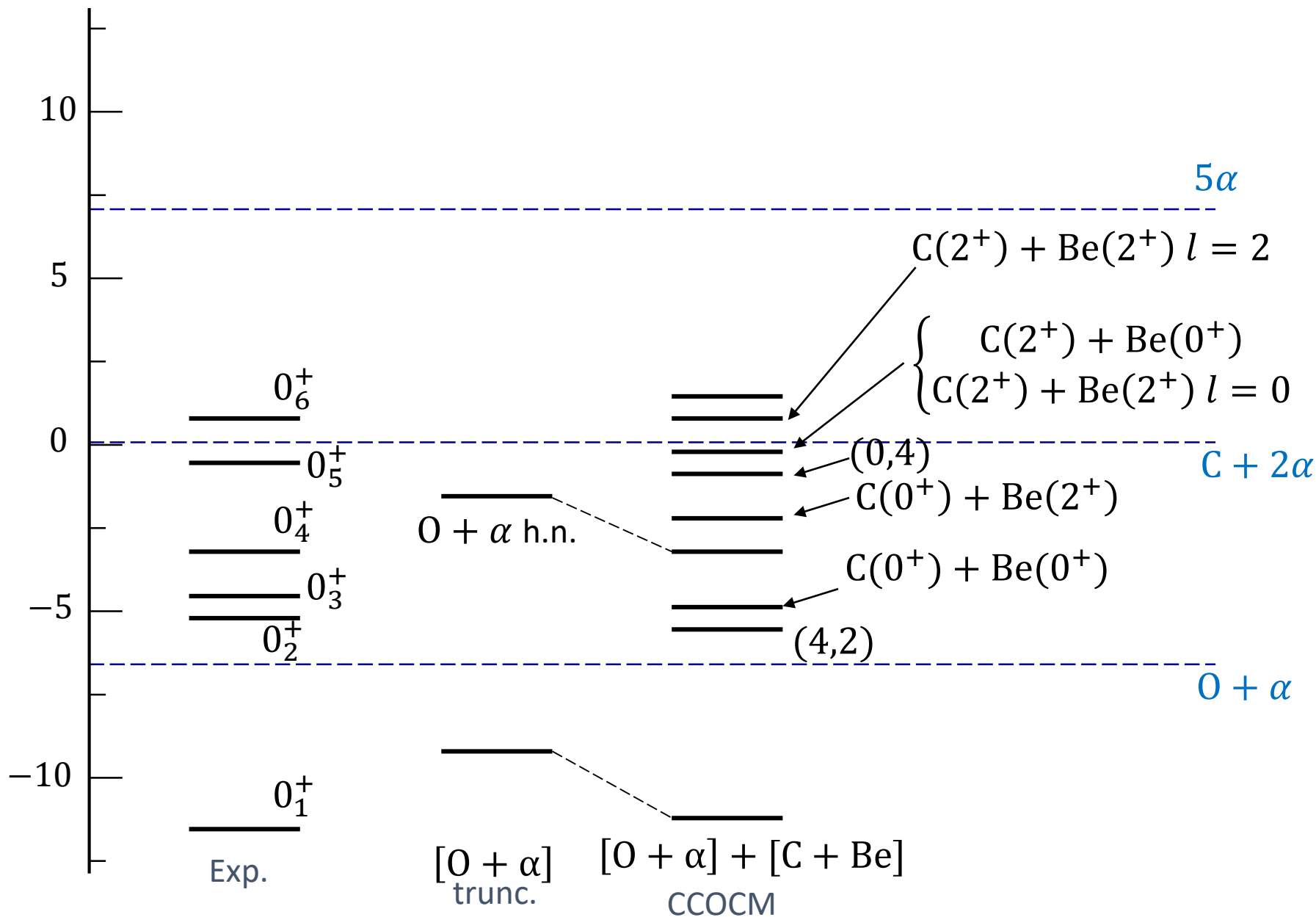
16Oに現れるクラスター構造

拡張型THSR模型による ^{20}Ne の 5α cond.

直交条件模型による ^{20}Ne の低励起状態

Energy spectra of $^{20}\text{Ne}(0^+)$

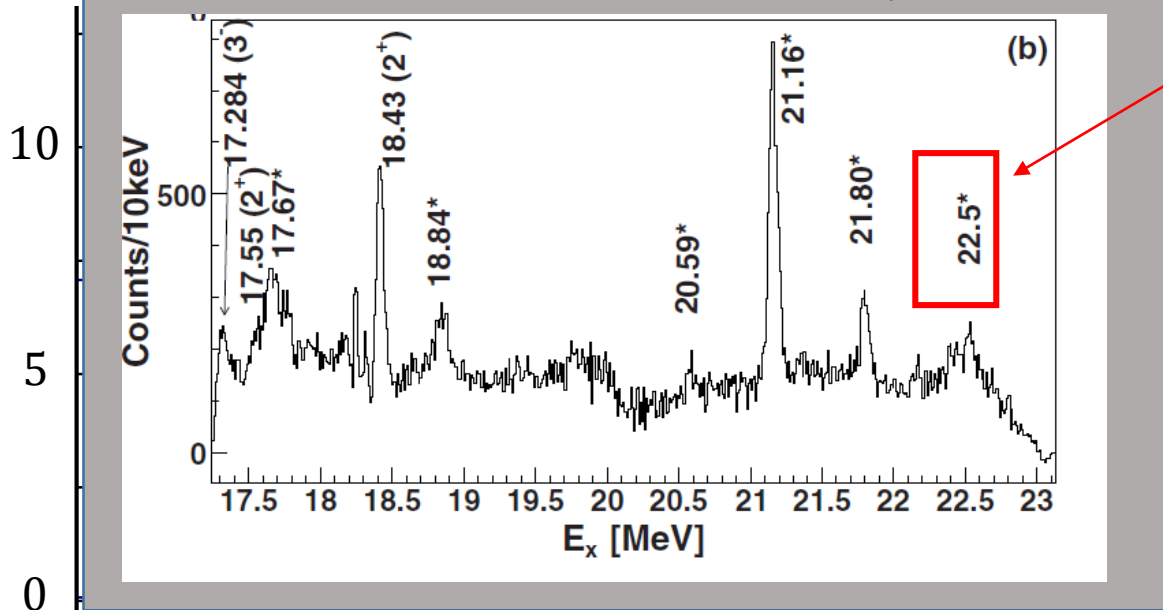
E [MeV]



Energy spectra of $^{20}\text{Ne}(0^+)$

E [MeV]

New states A. Swartz et al., PRC91(2015)



Difficult to describe by shell model

5-alpha cond. !?

5α

$\text{C}(2^+) + \text{Be}(2^+) l = 2$

$\left\{ \begin{array}{l} \text{C}(2^+) + \text{Be}(0^+) \\ \text{C}(2^+) + \text{Be}(2^+) l = 0 \end{array} \right.$

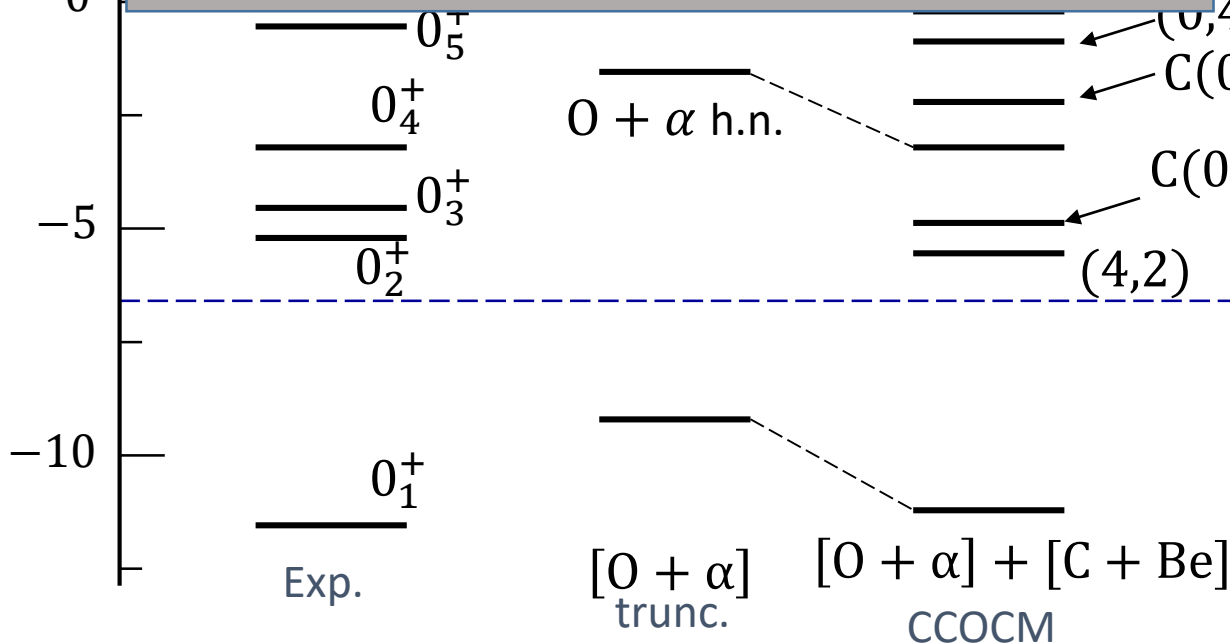
$\text{C} + 2\alpha$

$0 + \alpha$ h.n.

$\text{C}(0^+) + \text{Be}(0^+)$

$(4,2)$

$0 + \alpha$

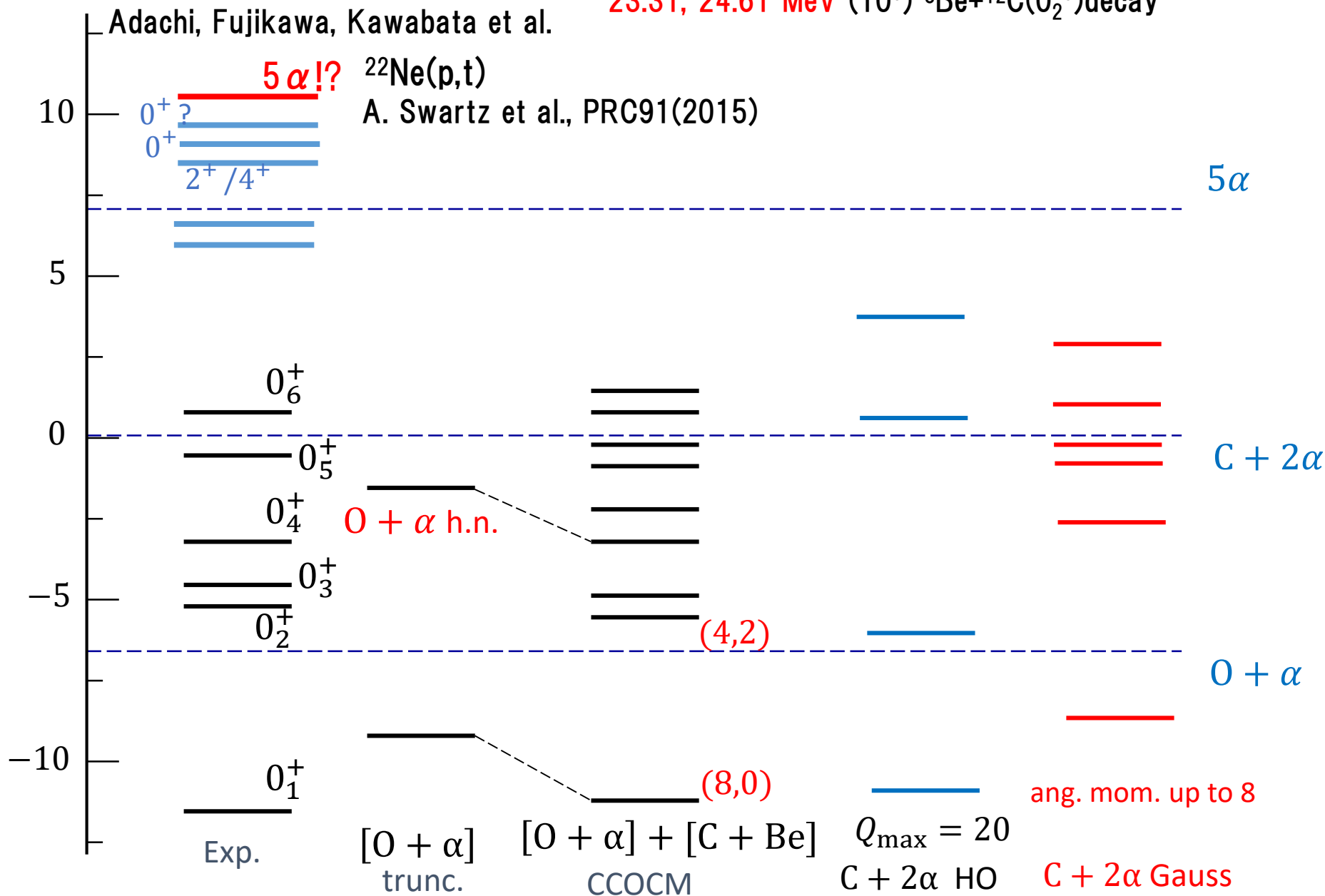


Energy spectra of $^{20}\text{Ne}(0^+)$

E [MeV]

M. Freer et al., PRC71(2005)

23.31, 24.61 MeV (10^+) $^8\text{Be}+^{12}\text{C}(0_2^+)$ decay



まとめと今後

拡張型THSR模型は16Oのクラスター形成発展を統一的にうまく記述する

同様の精度で20Neのクラスター形成発展を記述したい

拡張型THSR(1β 、 2β spherical)で 5α cond. が現れた(preliminary)

実験で見つかった候補とエネルギーは良く対応している

今後、

3β deformedが最終版

より低励起エネルギー領域を $12C+2\alpha$ 直交条件模型の結果と比較

5α 直交条件模型 (5α の5体フル計算)

