

# 殻模型的手法による クラスター崩壊現象の新展開

萩野浩一  
京都大学大学院理学研究科



1. イントロダクション: クラスター崩壊現象
2. 対ホッピング模型
3. 新しい手法: GCM + 殻模型
4. まとめ

# Introduction: particle emission decays of unstable nuclei

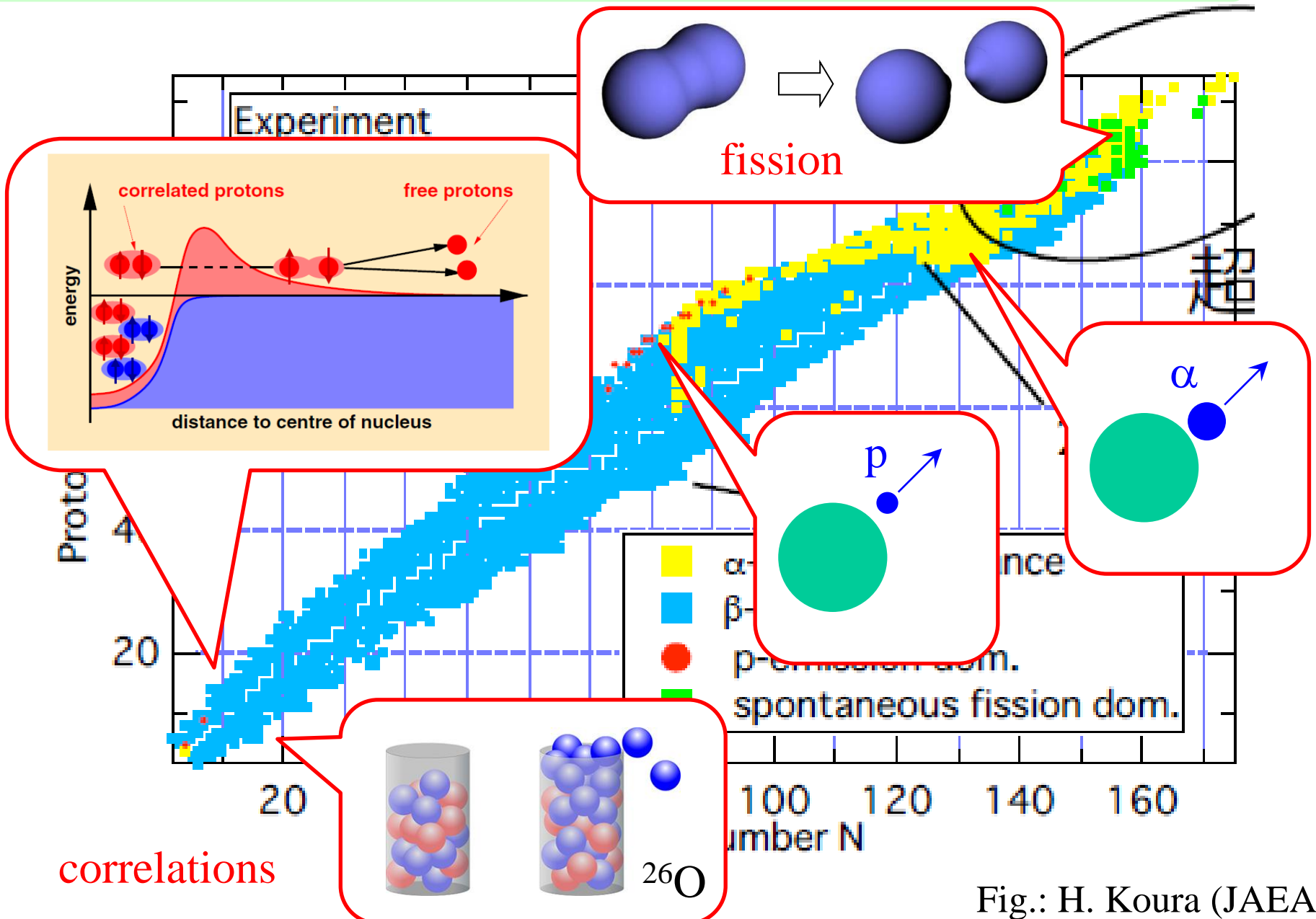
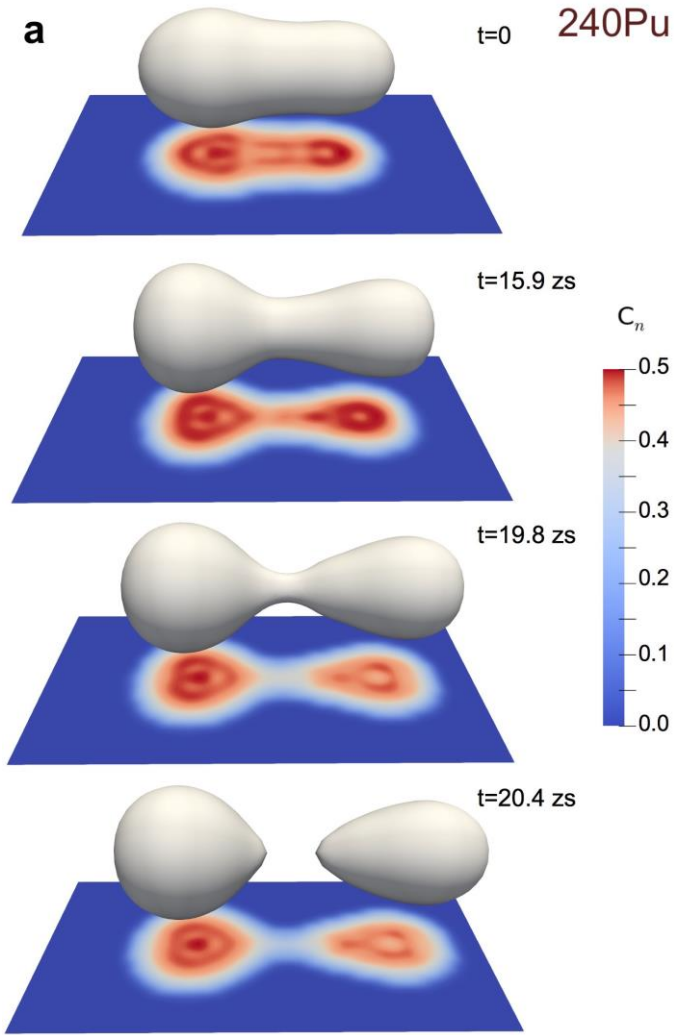


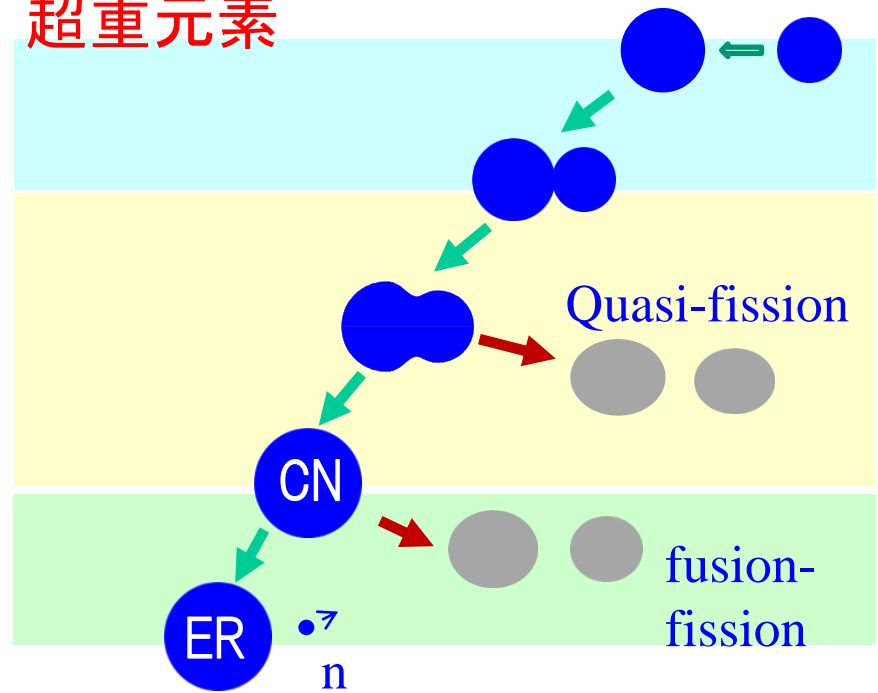
Fig.: H. Koura (JAEA)

# 核分裂の重要性

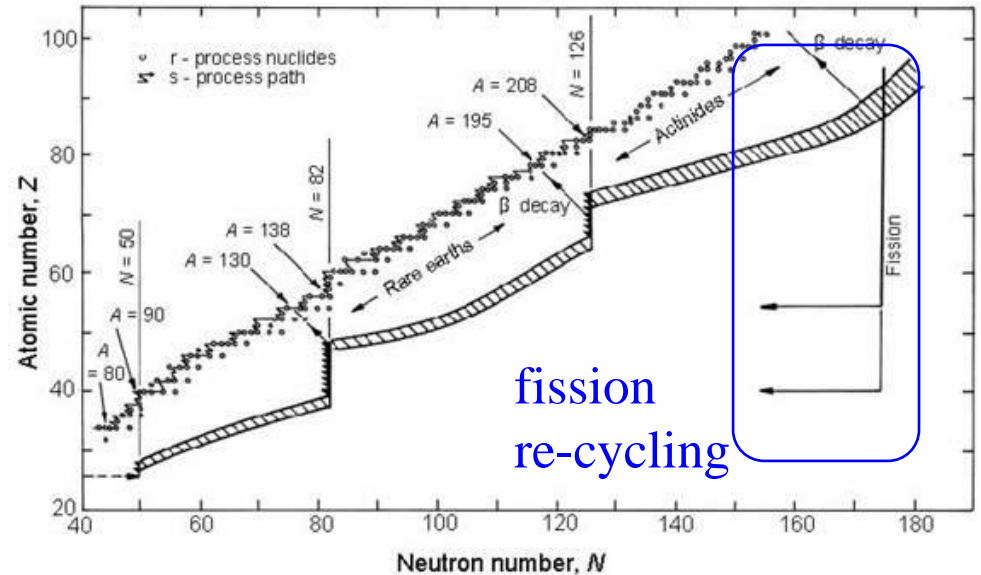


G. Scamps and C. Simenel,  
Nature 564 (2018) 382

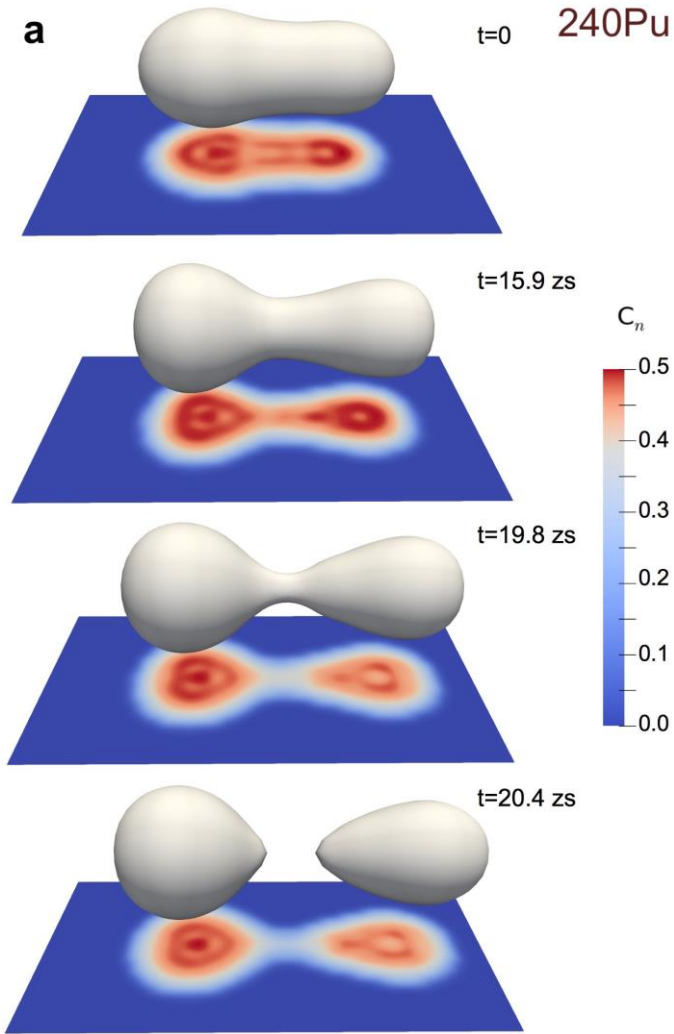
## 超重元素



## r-プロセス元素合成



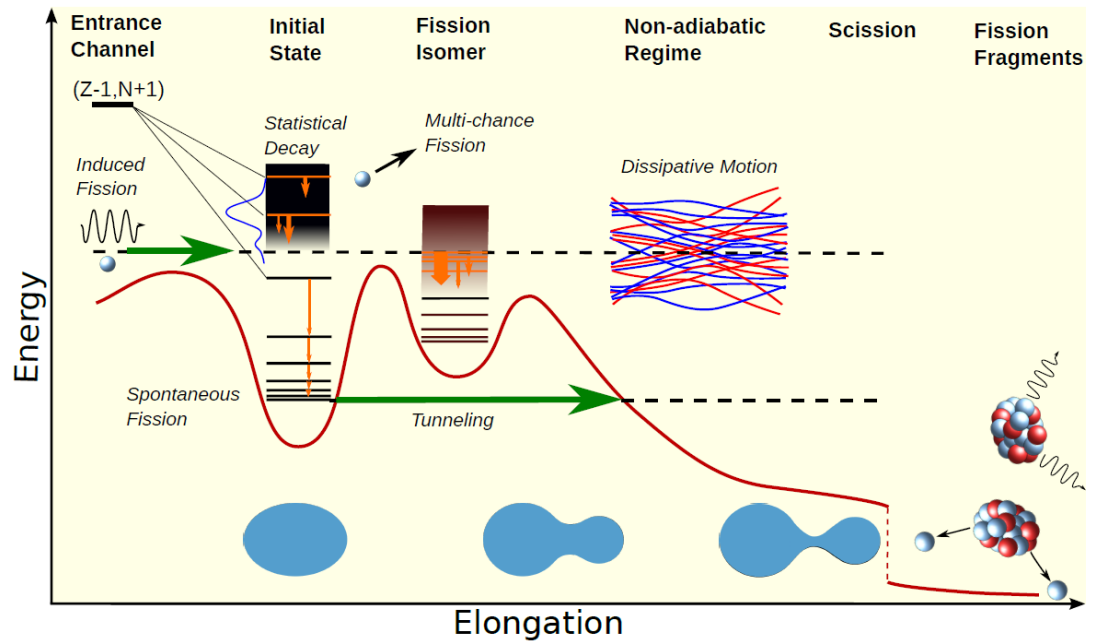
# 核分裂の微視的理解



G. Scamps and C. Simenel,  
Nature 564 (2018) 382

原子核の形状が大きく変化  
→ 微視的記述はまだ成功していない

原子核理論の残された難問の一つ

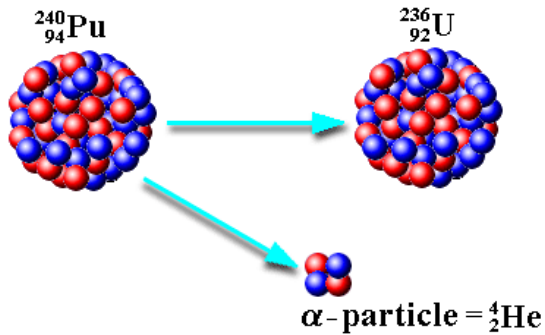


M. Bender et al.,  
J. of Phys. G47, 113002 (2020)

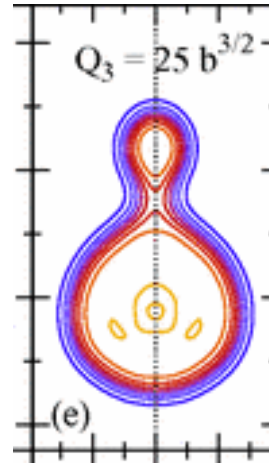
核分裂の微視的理解に向けた  
世界的な潮流ができつつある

# クラスター崩壊現象

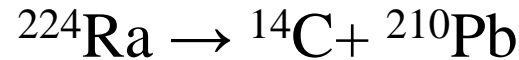
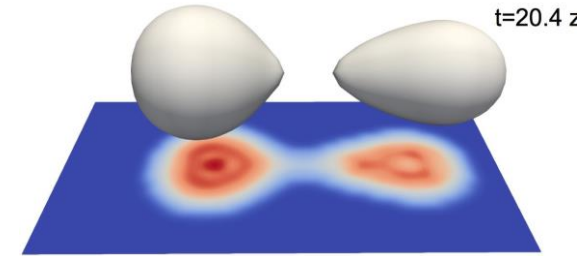
## α崩壊



## クラスター崩壊



## 核分裂



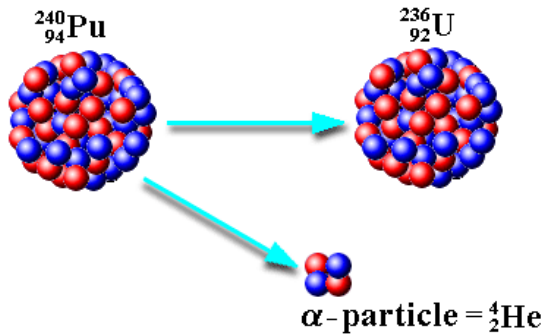
M. Warda and L.M. Robledo,  
PRC84, 044608 (2011)

- ✓ α崩壊と核分裂の中間に位置する現象 (非対称度の大きい核分裂)
- ✓ 1984年に Rose と Jones によって初めて観測 ( $^{223}\text{Ra} \rightarrow ^{14}\text{C} + ^{209}\text{Pb}$ )
- ✓ α崩壊との分岐比はとても小さい (“rare decay”)

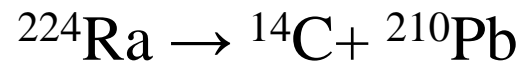
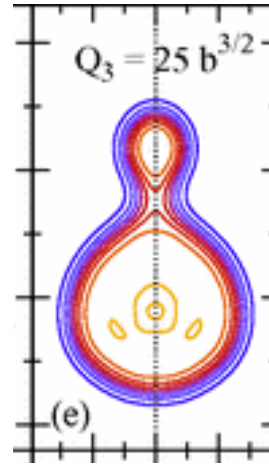
$^{223}\text{Ra}$  で  $8.9 \times 10^{-10}$ ,  $^{224}\text{Ra}$  では  $4.3 \times 10^{-11}$

# クラスター崩壊現象

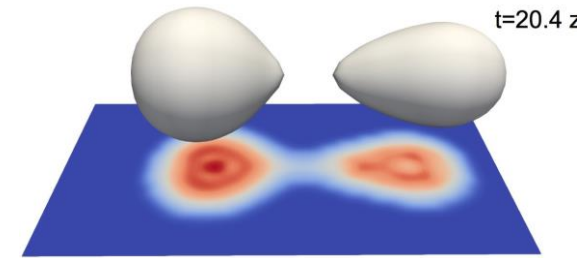
## α崩壊



## クラスター崩壊



## 核分裂



✓ 様々な原子核で見つかっている。



など複数のモードが競合する例も。

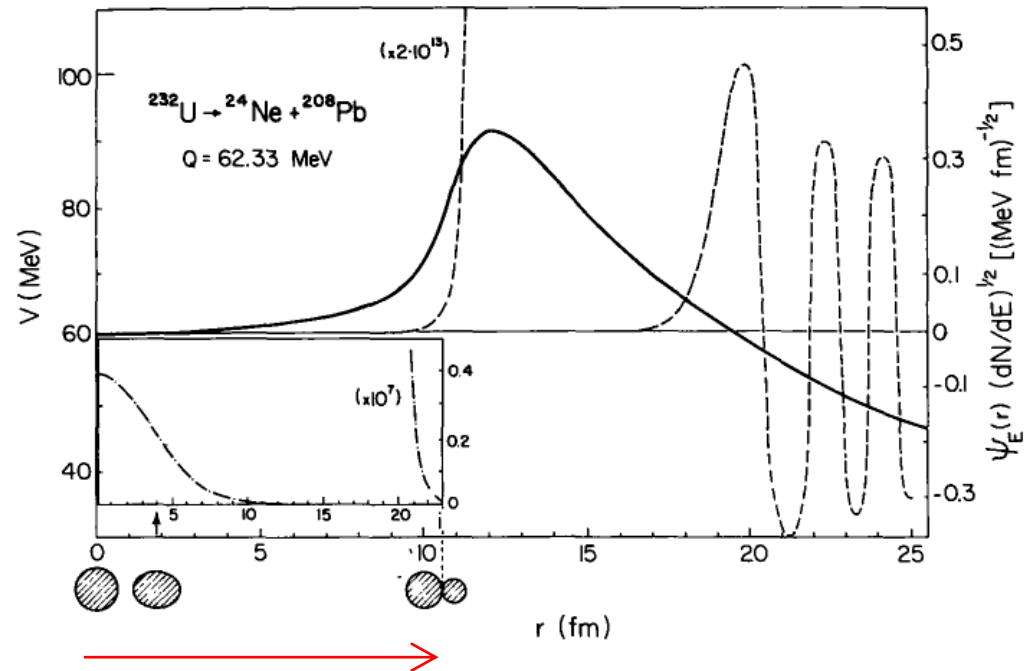
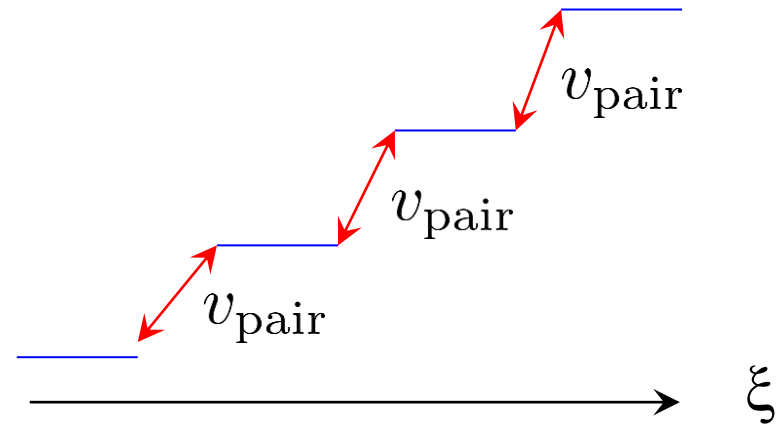
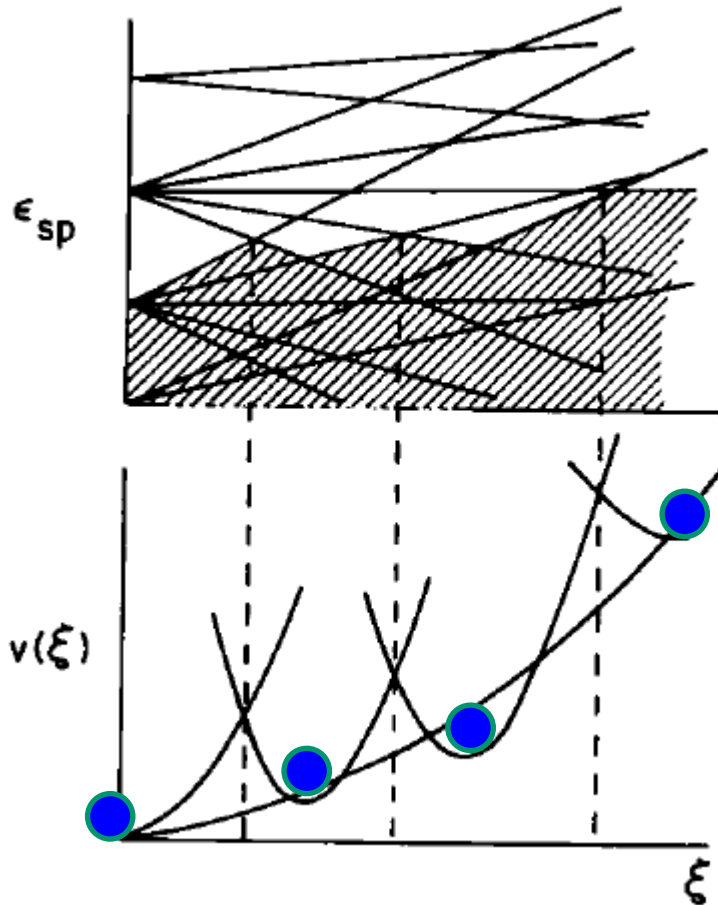
→ $^{208}\text{Pb}$  近傍の魔法数核を作る傾向がある。

✓ 超重元素では主要な崩壊モードになる可能性:  $^{294}\text{Og} \rightarrow ^{86}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$

Z. Mateson, Giuliani, Nazarewicz, Sadhukhan, Schunck, PRC99('19) 041304(R)

# 理論: 対ホッピング模型 (離散基底モデル)

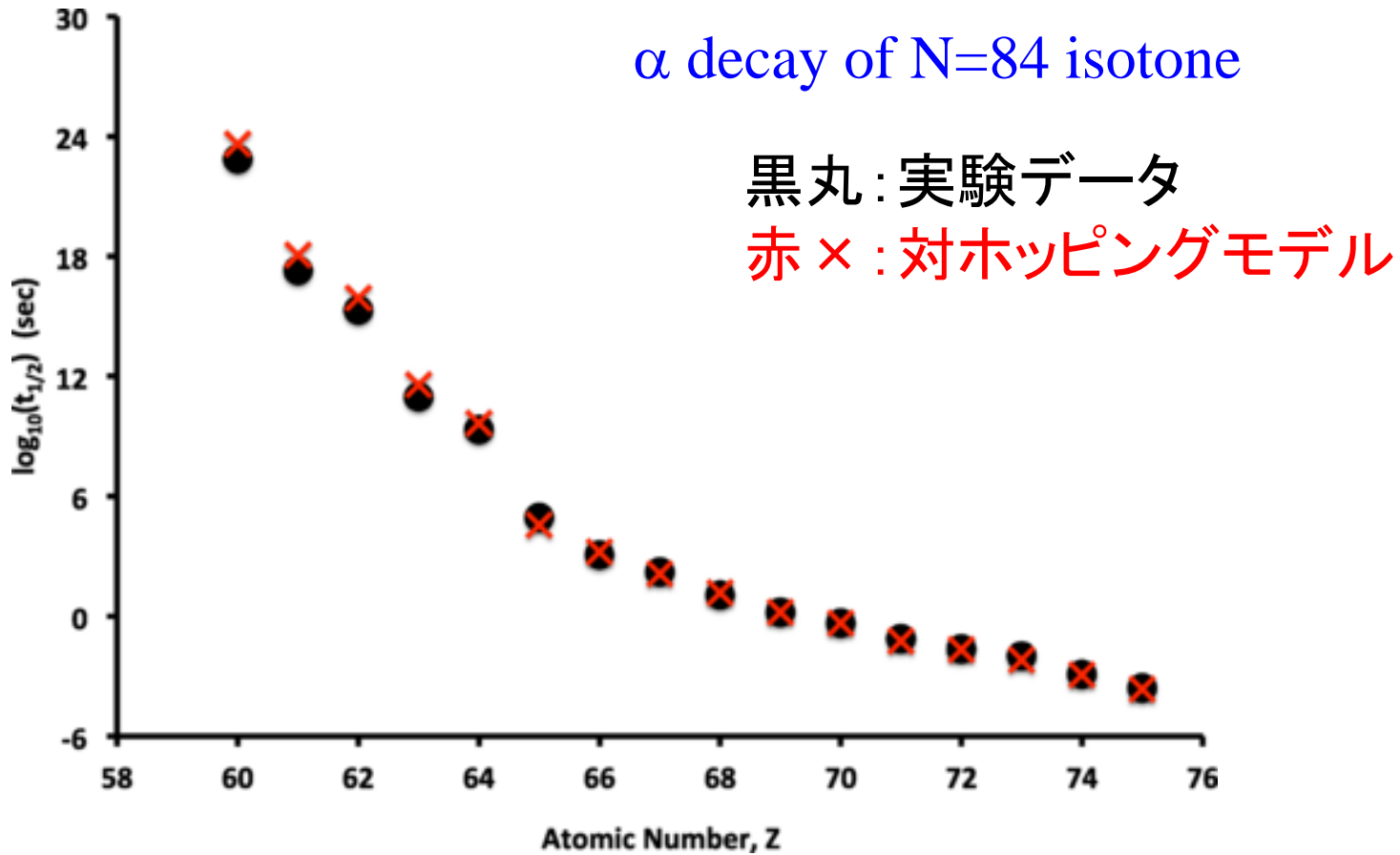
pair hopping model



F. Barranco, G.F. Bertsch,  
R.A. Broglia, and E. Vigezzi,  
NPA512 ('90) 253

# 理論: 対ホッピング模型 (離散基底モデル)

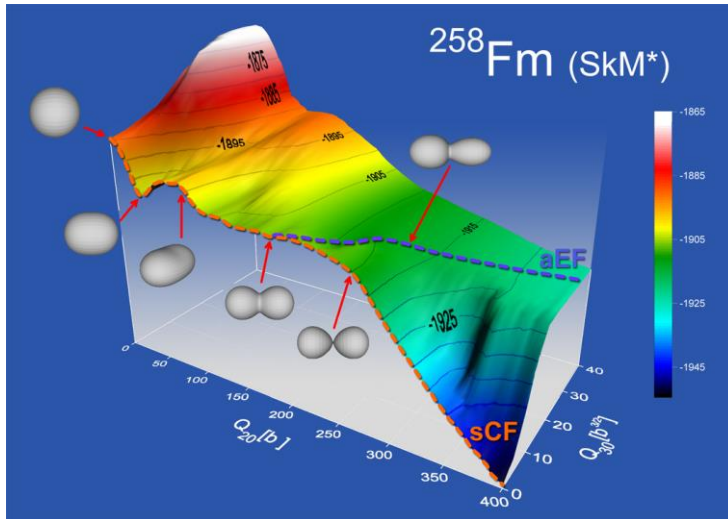
## 最近の計算例



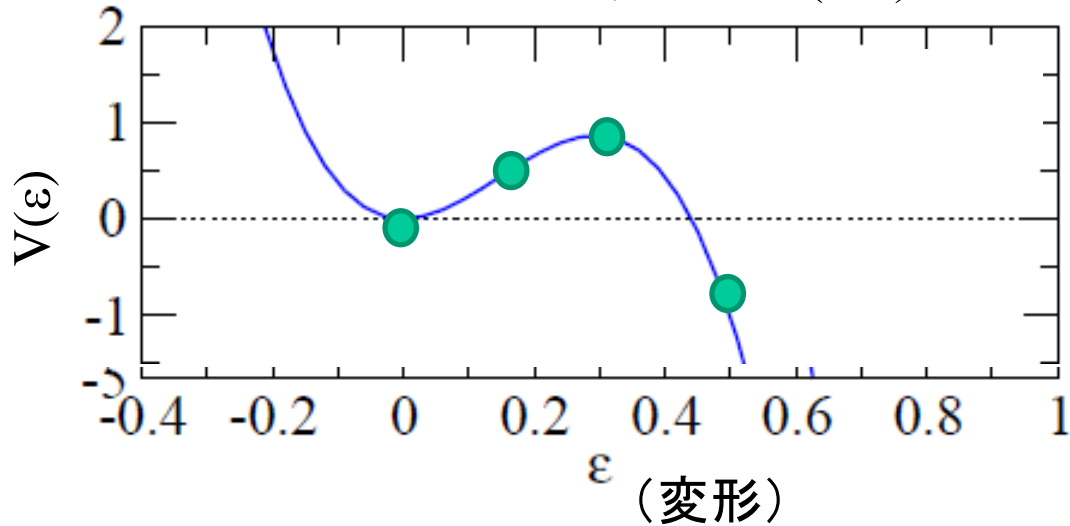
R.M. Clark et al., PRC99, 024325 (2019)



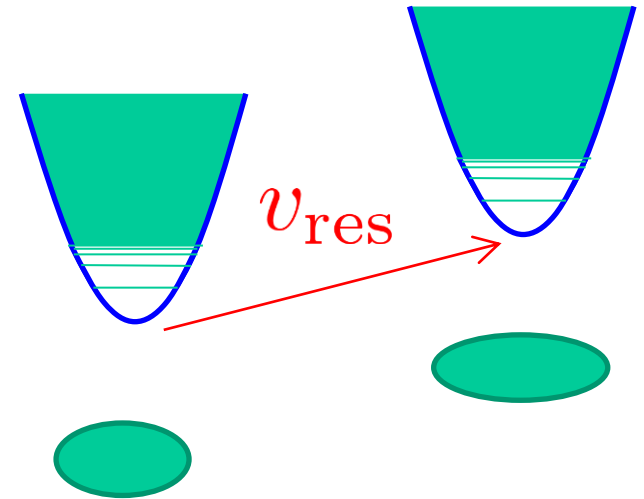
# Generator Coordinate Method



A. Staszczak et al., PRC80 ('09) 014309



$$|\Psi\rangle = \int dQ f(Q) |\Phi_Q\rangle$$

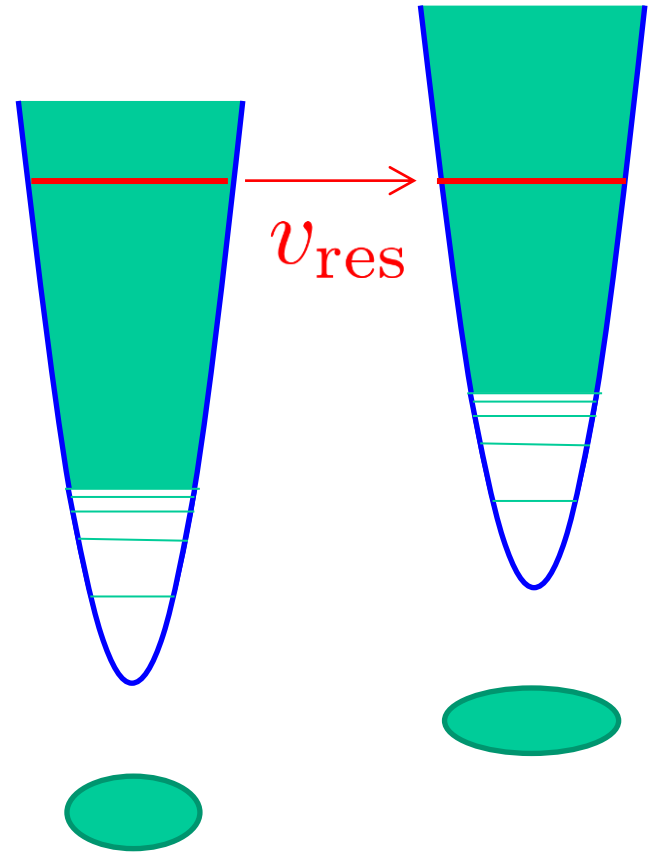
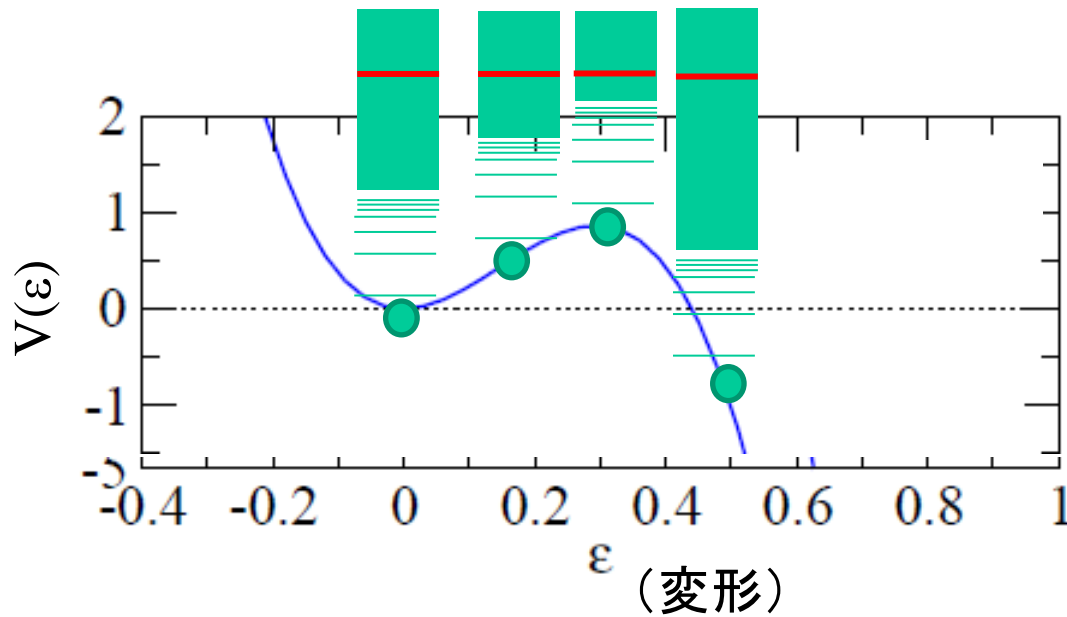


残留相互作用による  
多体配位間のホッピング

→原子核の形状進化を  
記述

# GCM+殻模型アプローチ

K.H. and G.F. Bertsch



Generator Coordinate Method (GCM)

$$|\Psi\rangle = \int dQ f(Q) |\Phi_Q\rangle$$

→ CI approach

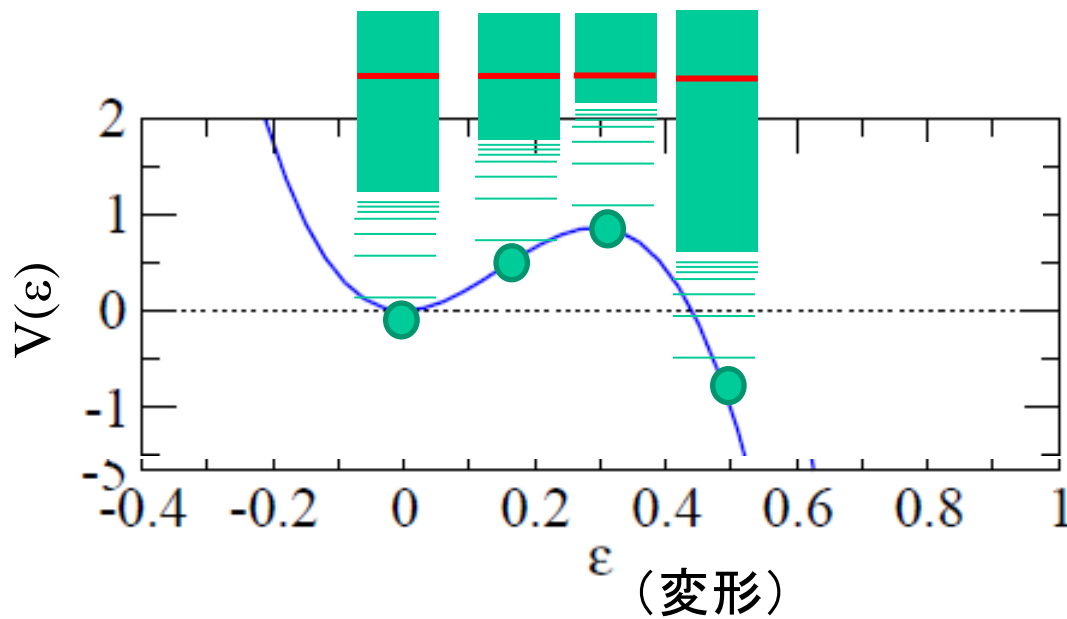
$$|\Psi\rangle = \int dQ \sum_i f_i(Q) |\Phi_Q(i)\rangle$$

残留相互作用による  
多体配位間のホッピング

→ 原子核の形状進化を  
記述

# GCM+殻模型アプローチ

K.H. and G.F. Bertsch

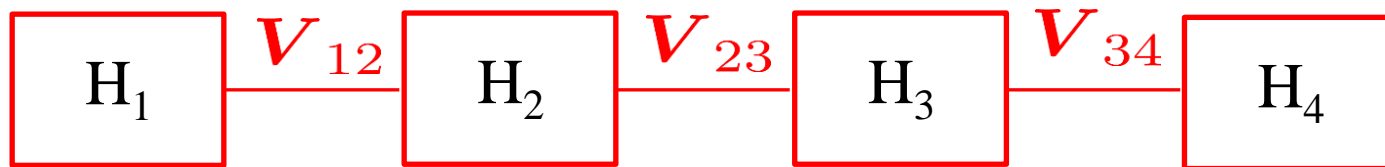


CI approach

$$|\Psi\rangle = \int dQ \sum_i f_i(Q) |\Phi_Q(i)\rangle$$

隣のQブロック同士のみ結合する:

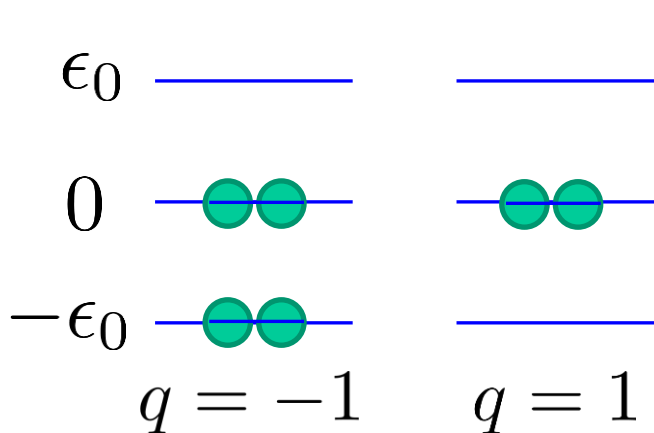
cf. 電子輸送の問題  
(物性)



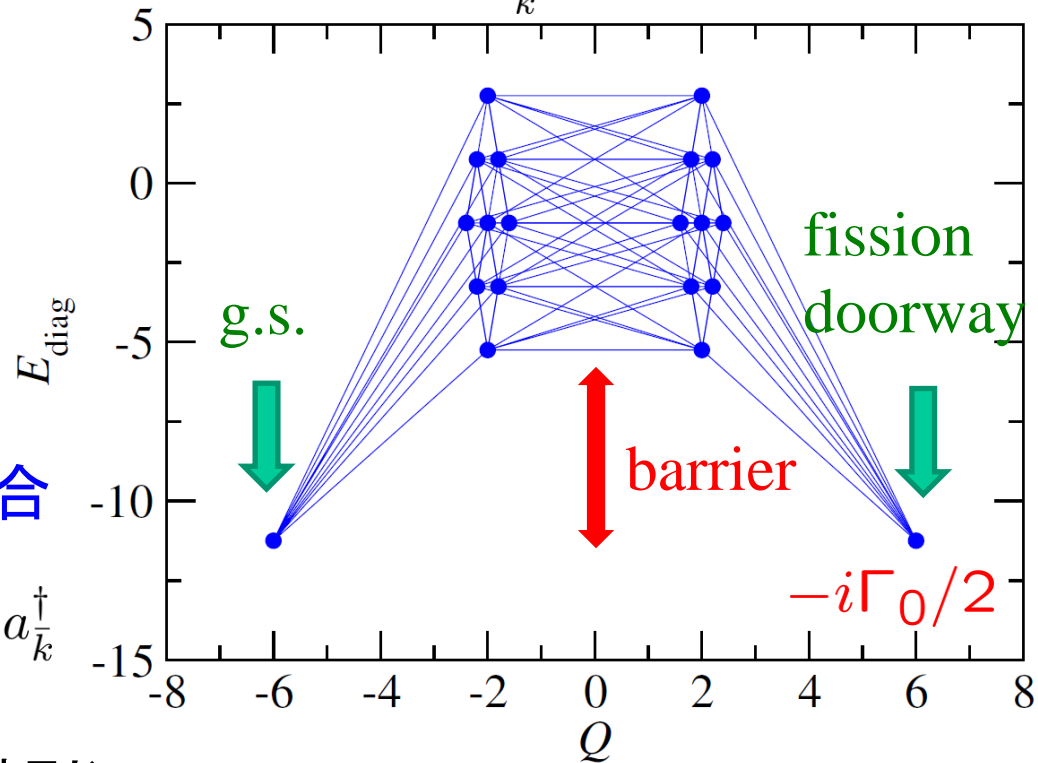
それぞれが  $N \times N$  の行列

# toy model による分析

K.H. and G.F. Bertsch,  
 PRC101 (2020) 064317  
 PRC102 (2020) 024316



$$\hat{H}_0 = \sum_k \epsilon_k \hat{n}_k + v_Q \hat{Q} \hat{Q}$$



配位同士は対相互作用で結合

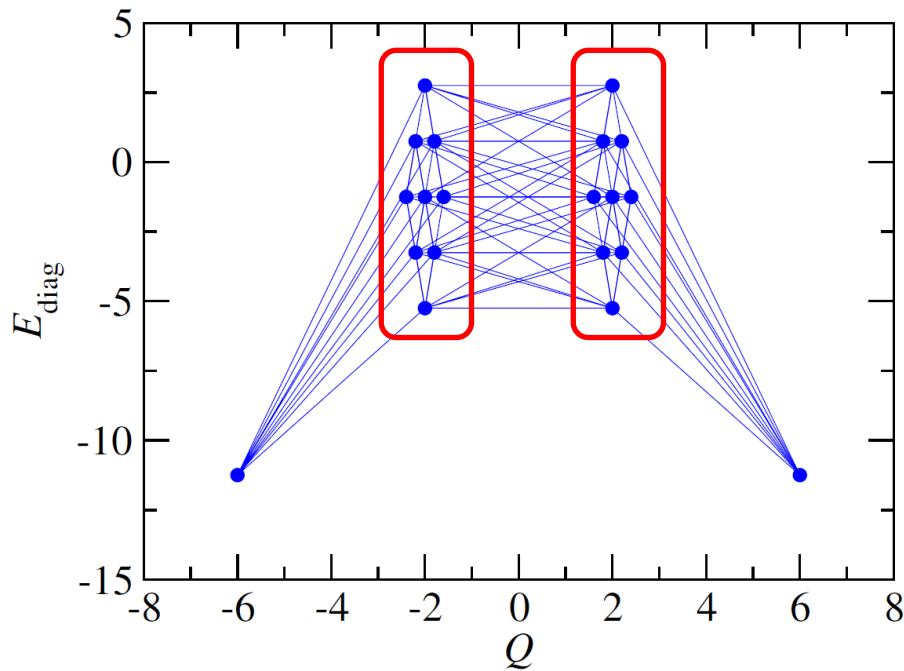
$$\hat{H} = H_0 - G \sum_{k,k'} \hat{P}_k^\dagger \hat{P}_{k'}; \quad \hat{P}_k^\dagger = a_k^\dagger a_{\bar{k}}^\dagger$$

ハミルトニアンの対角化(殻模型)

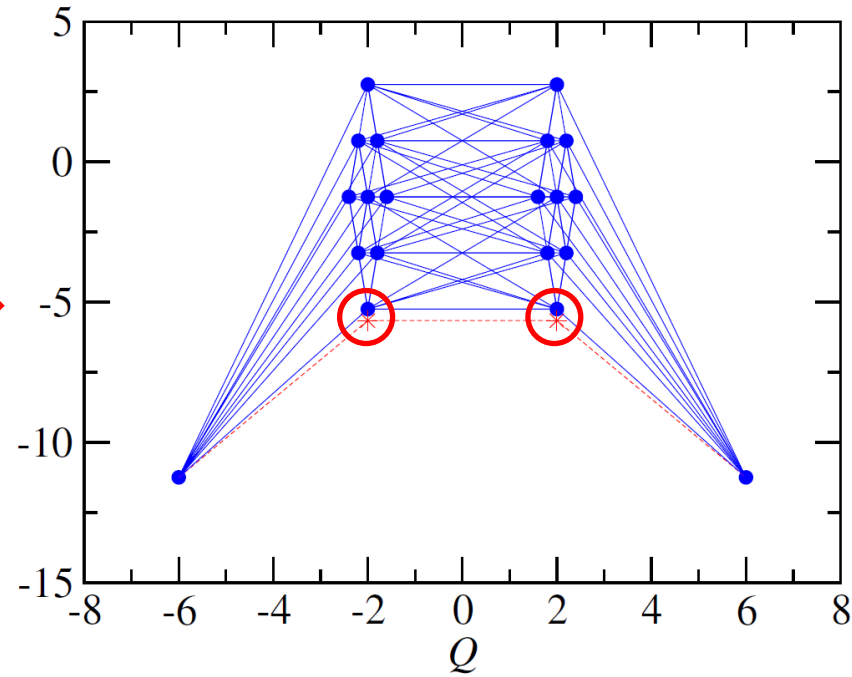
$$\rightarrow |\Psi_{\text{gs}}\rangle = \sum_{\alpha} C_{\alpha} |\phi_{\alpha}\rangle, \quad E_{\text{gs}} = E_R - i\Gamma/2$$

崩壊幅

# HF+BCS+GCMに相当する計算:



diagonalize within  
the same  $Q$



a reduction from 20x20  
to 4x4

この近似は崩壊幅を過小評価:

$$H \rightarrow H_{\text{eff}} = \begin{pmatrix} E'_g & v_{\text{eff}} \\ v_{\text{eff}} & E'_d \end{pmatrix}$$

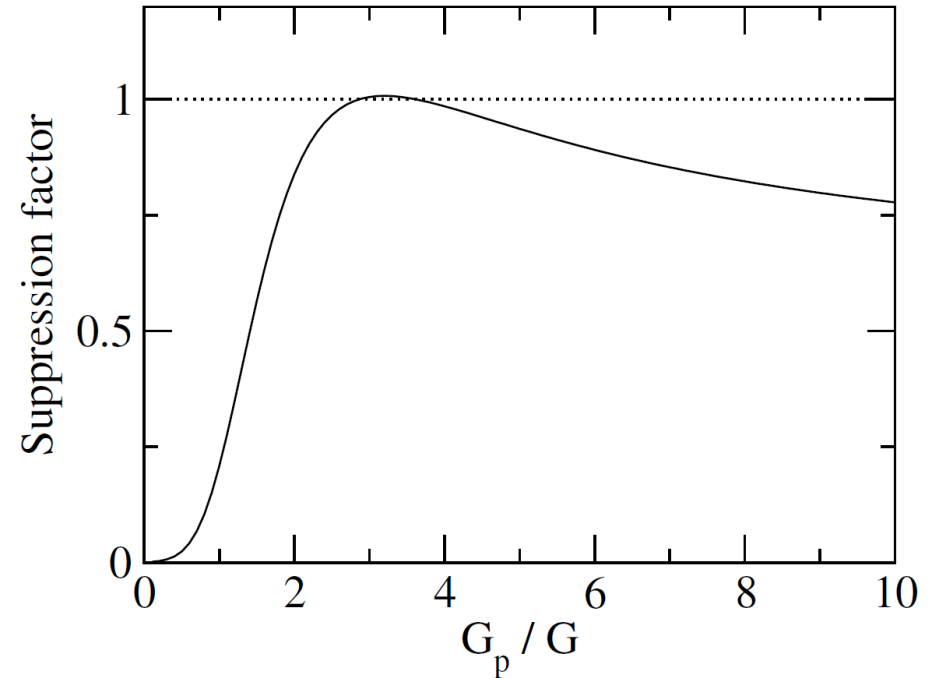
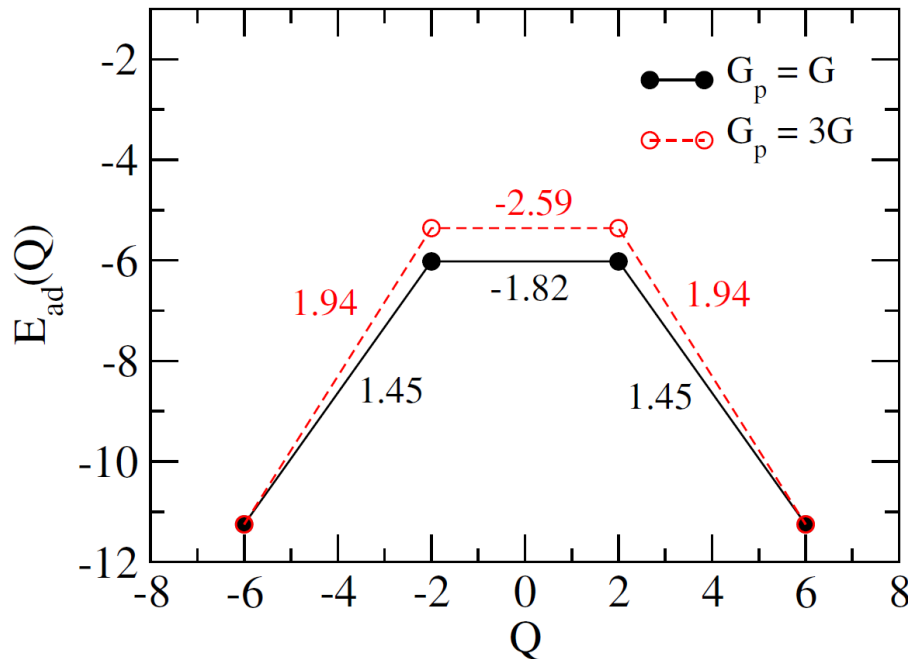
$$(v_{\text{eff}})_{\text{ad}}^2 \sim 0.209 (v_{\text{eff}})_{\text{exact}}^2$$

$$v_Q = -5/16, G = 0.691$$

# 最大結合近似

K.H. and G.F. Bertsch, PRC102 (2020) 024316

各 $Q$ ごとに対角化するときにはわざと $G$ を大きくして配位を作る  
→エネルギー的には最適化されないが、結合が大きくなる

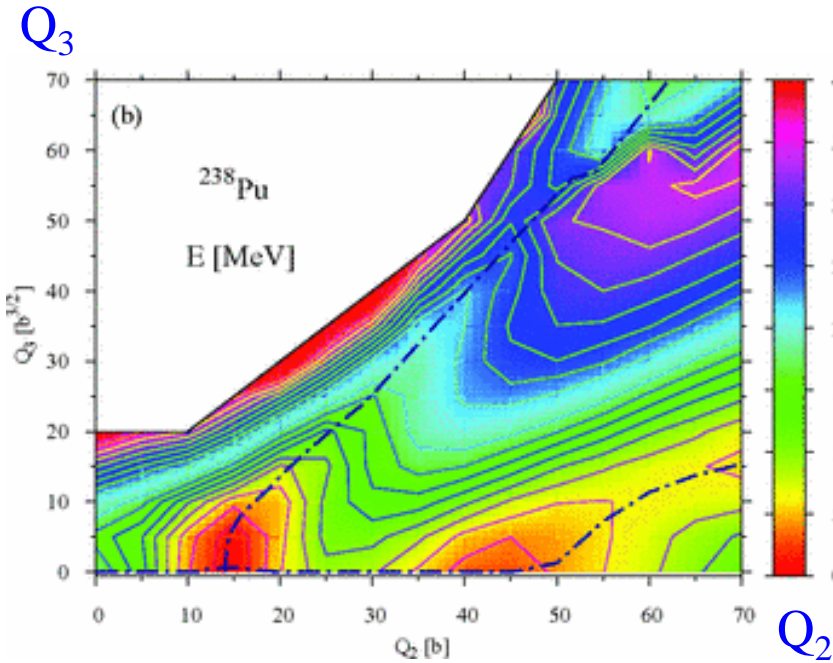


- barrier: heigher
  - coupling: stronger
- optimum  $G_p$

cf. R. Rodribeuz-Guzman  
and L.M. Robledo,  
PRC98, 034308 (2018)

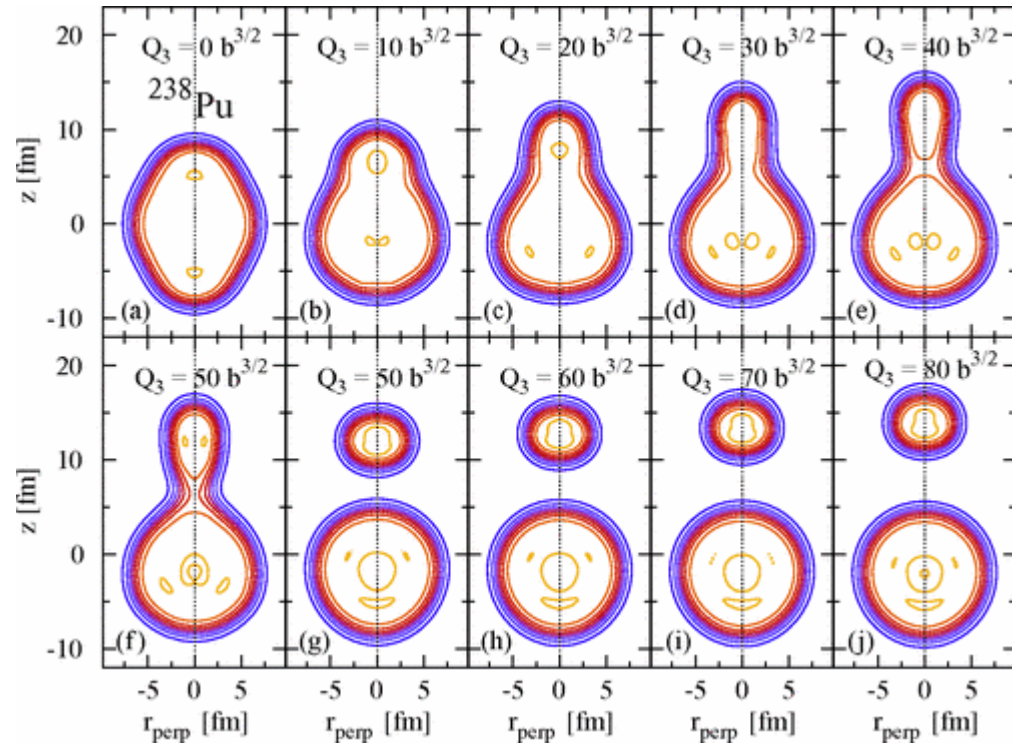
# 最大結合近似: より現実的な系(クラスター崩壊)への適用

Gogny D1S相互作用によるDFT計算: M. Warda and L.M. Robledo,  
Phys. Rev. C84, 044608 (2011)



$$\log[T_{1/2}^{\text{HFB}}(\text{s})] = 29.42$$

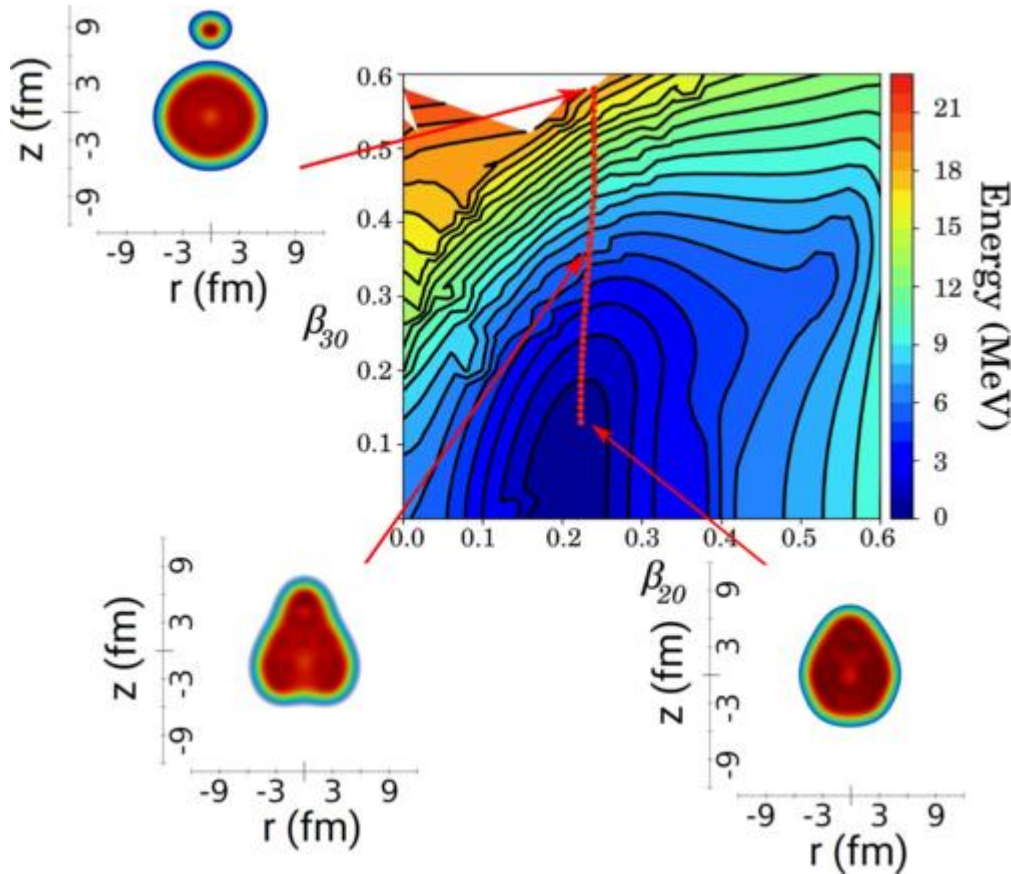
$$\log[T_{1/2}^{\text{exp}}(\text{s})] = 25.70$$



- ✓ CI法を使うとどうなるか?
- ✓ Lanczos法も使えるかもしれない

# 最大結合近似: より現実的な系(クラスター崩壊)への適用

$^{108}\text{Xe}$ の $\alpha$ 崩壊の例



京都でも8重極変形の拘束付きの Skyrme-HF計算を開始  
K. Uzawa, K. Yoshida, and K.H.

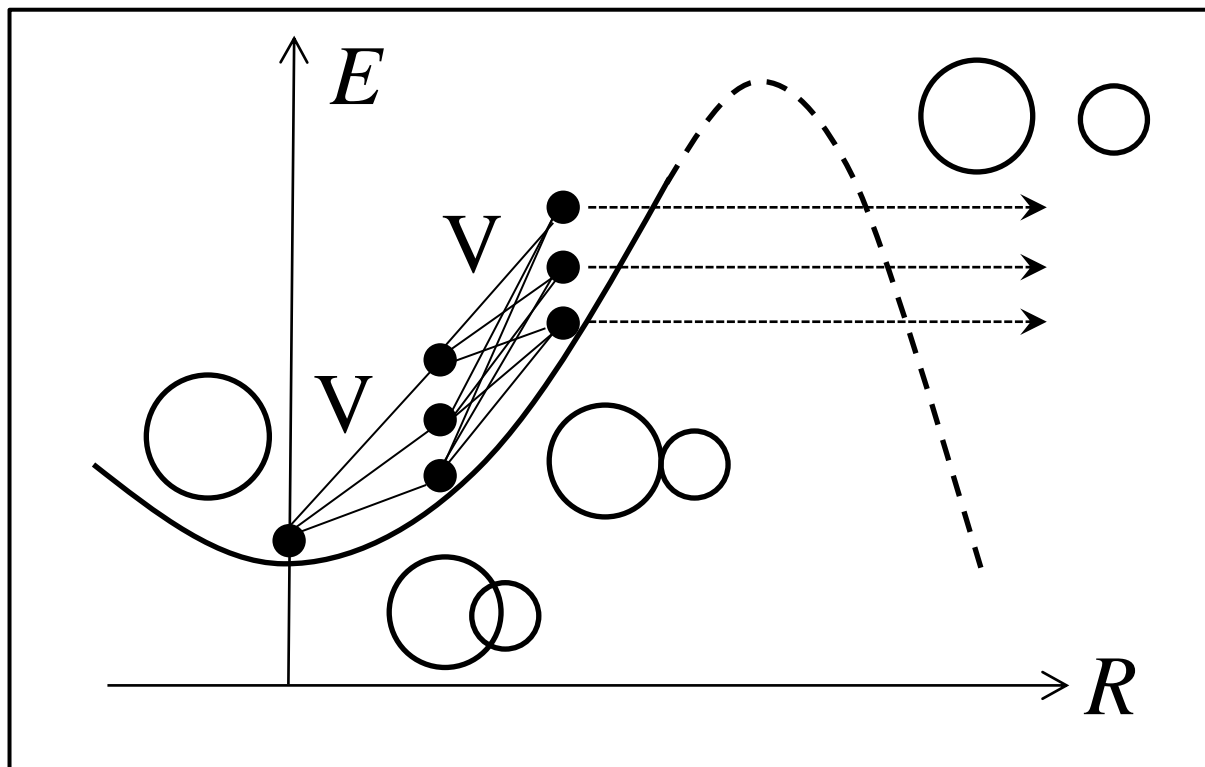


GCM+殻模型計算の基底関数となる



# まとめ

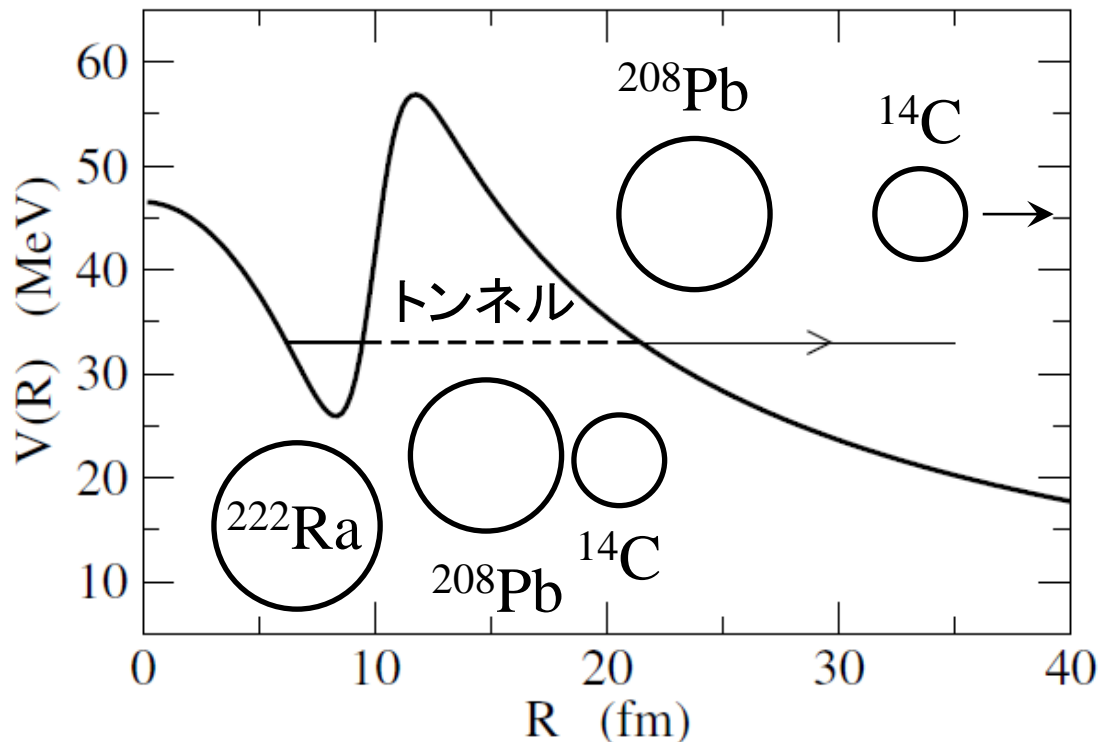
## GCM+殻模型アプローチを用いたクラスター崩壊現象の記述



1. 基底関数の生成 ← 8重極変形拘束によるDFT計算
2. 残留相互作用による配位間結合
3. 行列の対角化 (最大結合近似、Lanczos法など)
4. 連続状態への接続と共鳴幅の見積もり

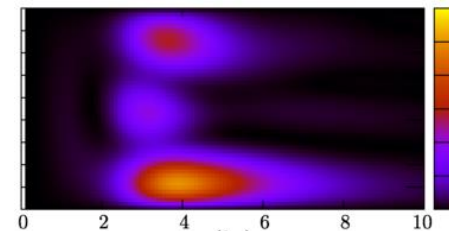
# まとめ

## GCM+殻模型アプローチを用いた クラスター崩壊現象の記述



クラスターはどのようなメカニズムで出現するのか?

- ✓ どのタイミングで出現?
- ✓ どのような種類のクラスター?



- ✓ 2n 崩壊、 $\alpha$ 崩壊などもまとめて理解する。最終的には核分裂も。

