

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

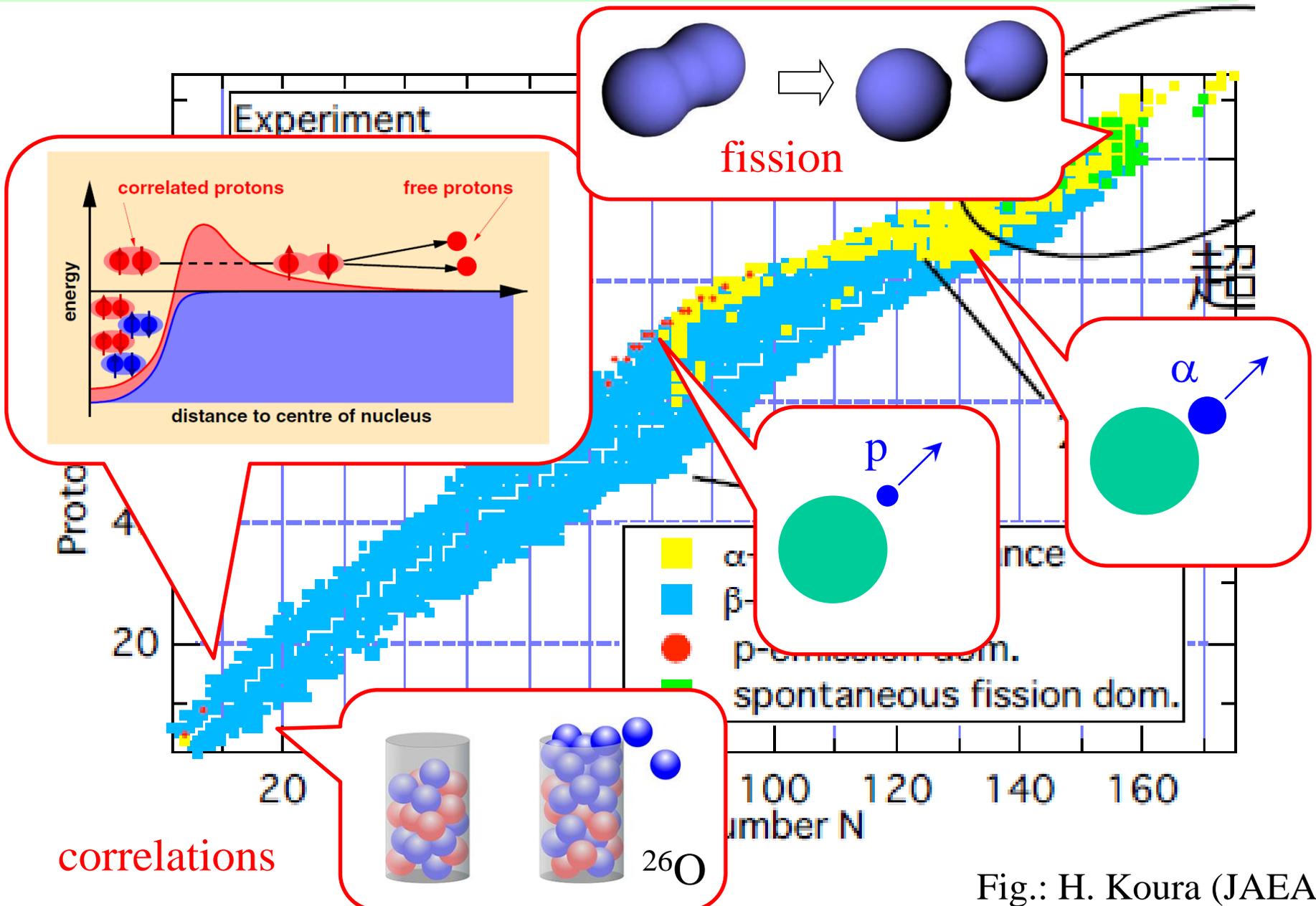
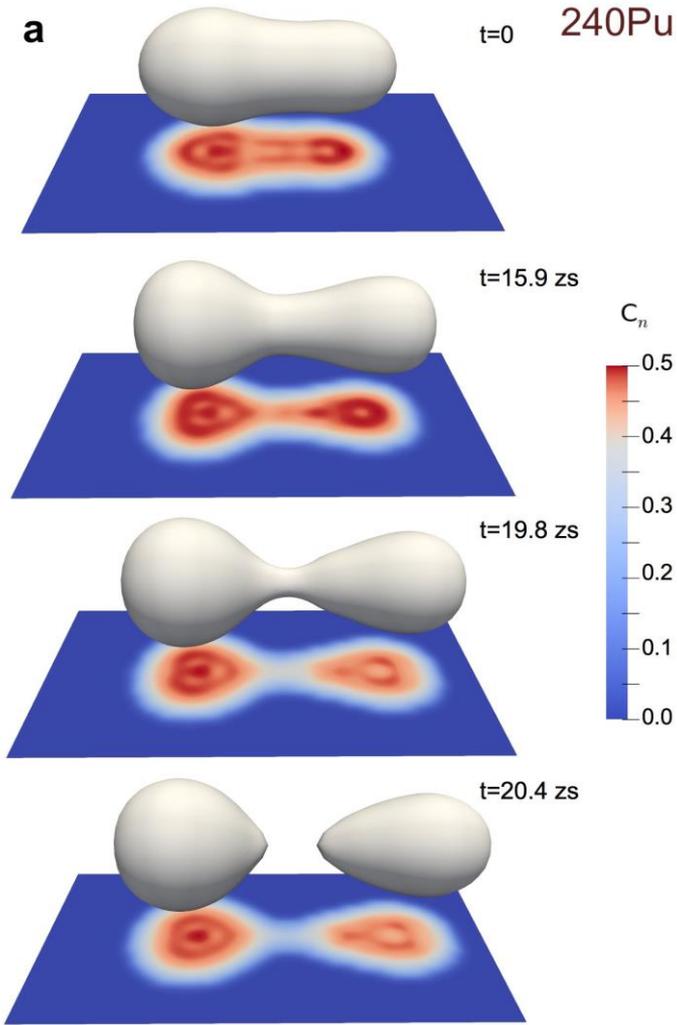


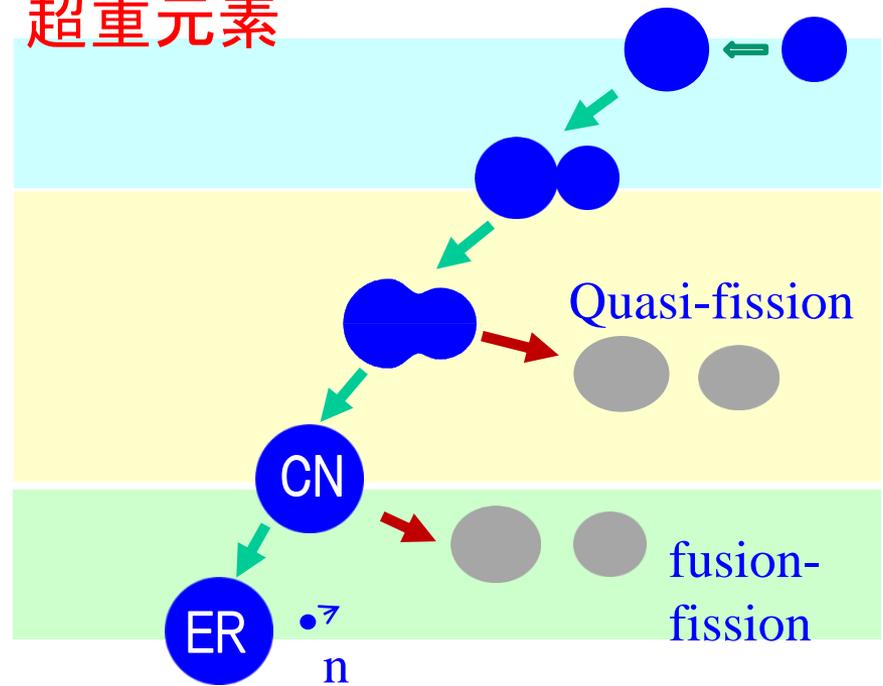
Fig.: H. Koura (JAEA)

核分裂の重要性

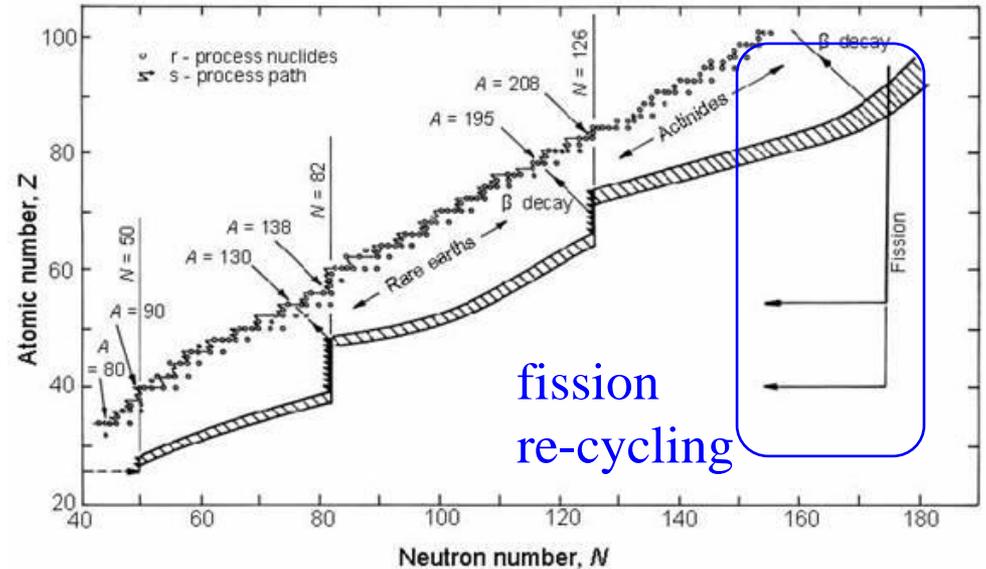


G. Scamps and C. Simenel,
Nature 564 (2018) 382

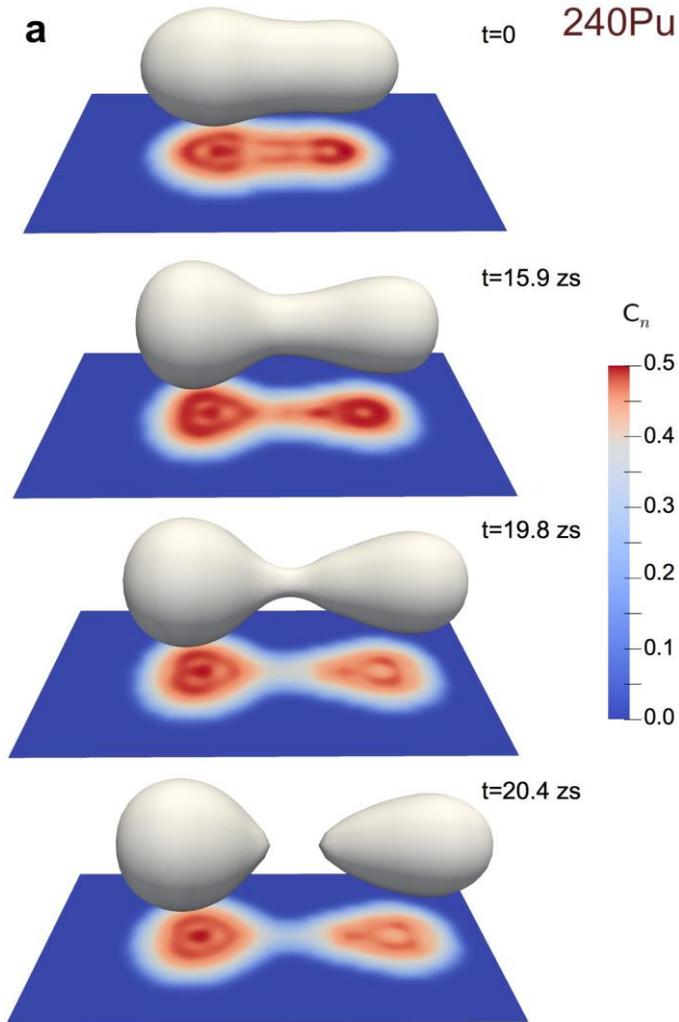
超重元素



r-プロセス元素合成



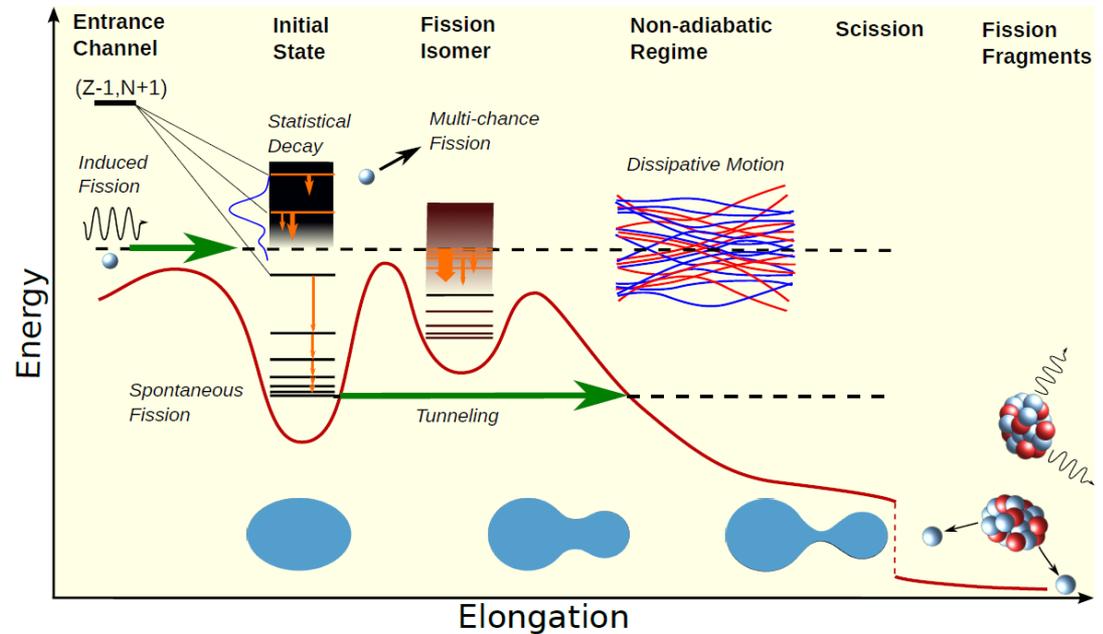
核分裂の微視的理解



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

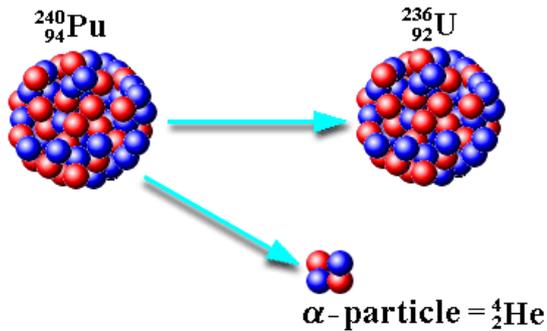


M. Bender et al.,
J. of Phys. G47, 113002 (2020)

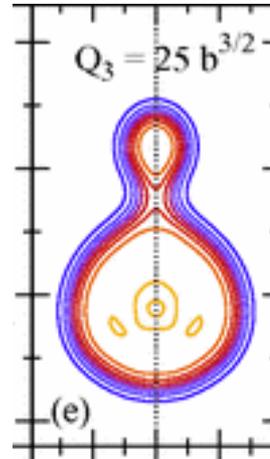
核分裂の微視的理解に向けた
世界的な潮流ができつつある

クラスター崩壊現象

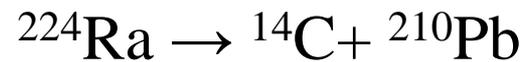
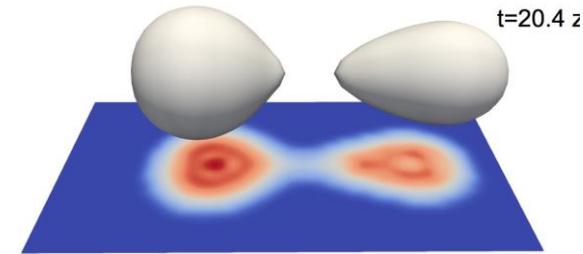
α崩壊



クラスター崩壊



核分裂



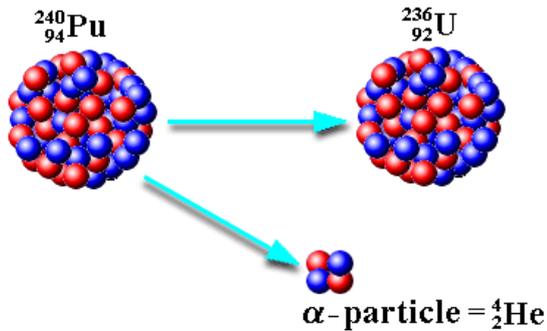
M. Warda and L.M. Robledo,
PRC84, 044608 (2011)

- ✓ 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”)

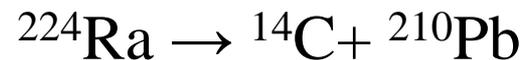
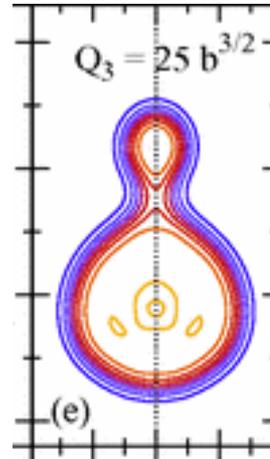
^{223}Ra で 8.9×10^{-10} , ^{224}Ra では 4.3×10^{-11}

クラスター崩壊現象

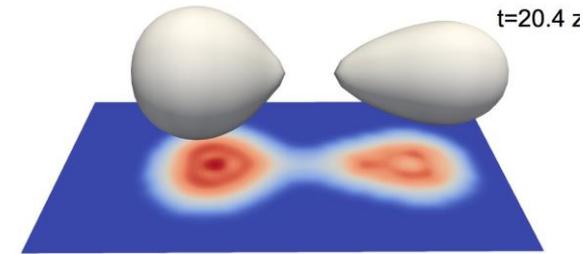
α崩壊



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。

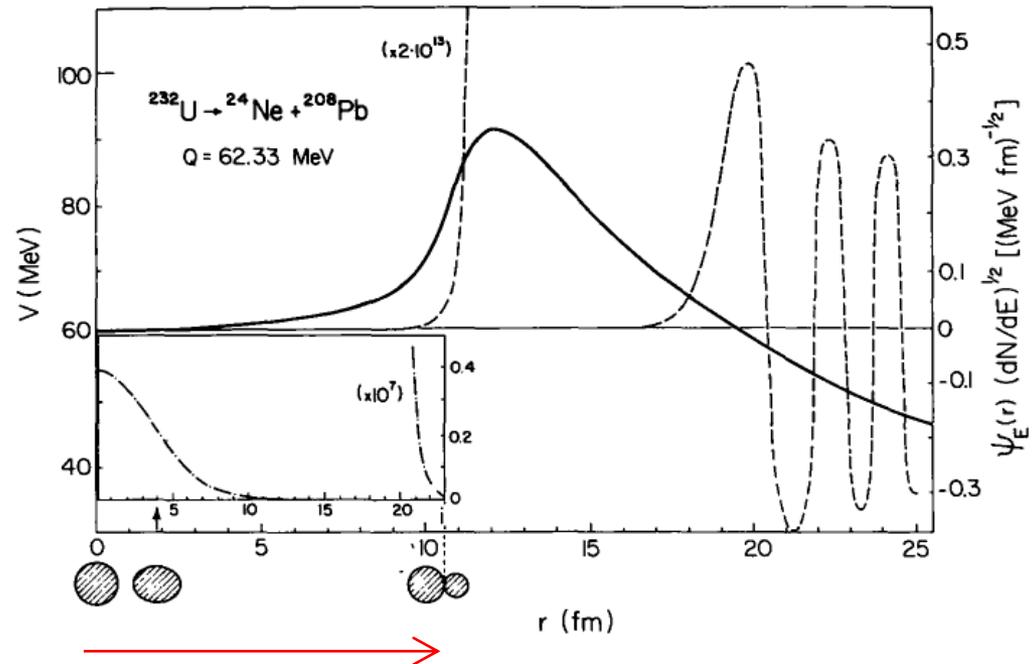
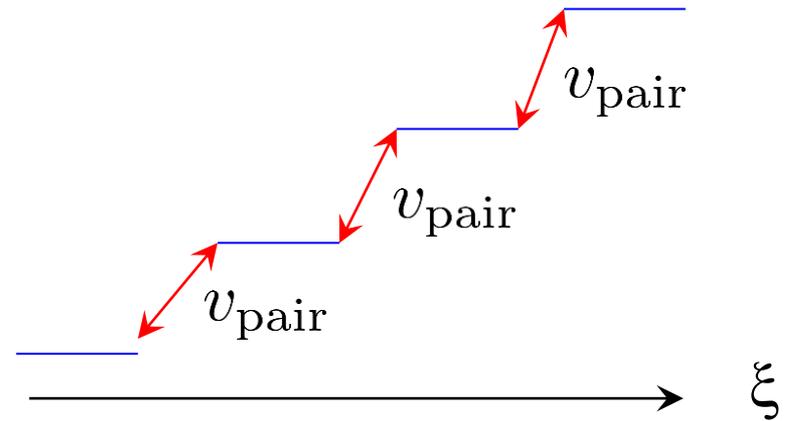
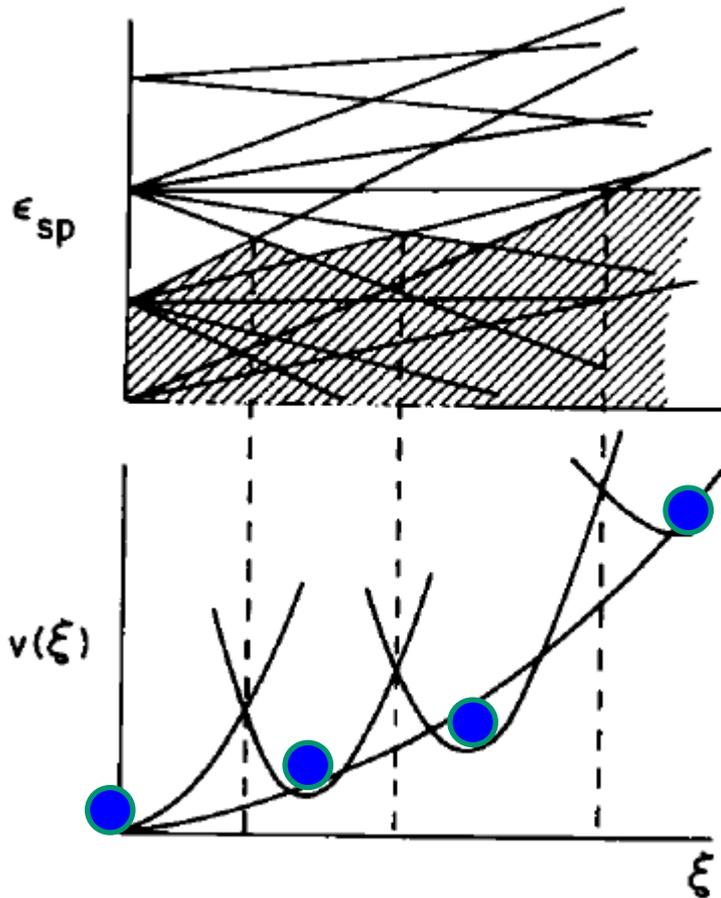
→ ^{208}Pb 近傍の魔法数核を作る傾向がある。

✓ 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)

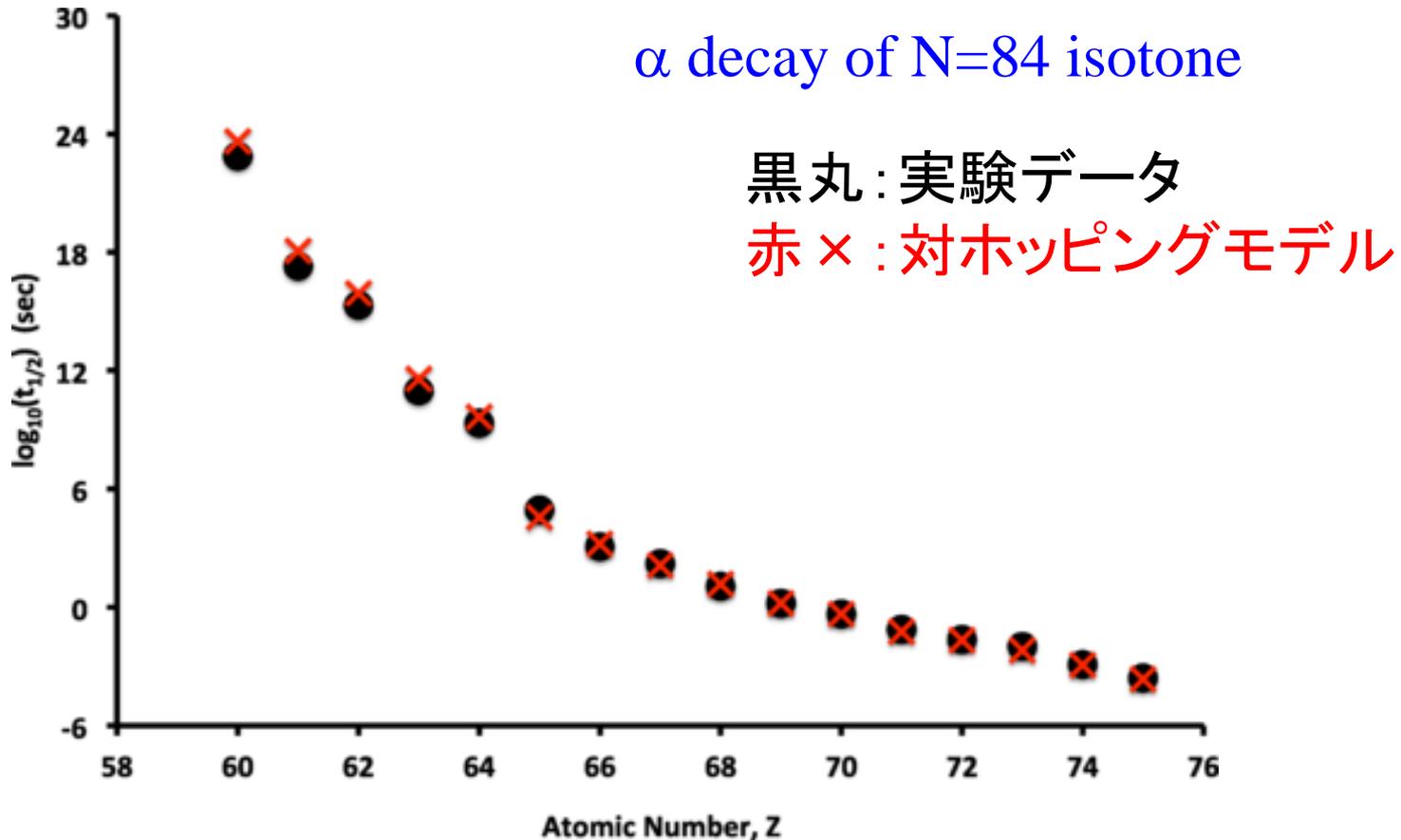
pair hopping model



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

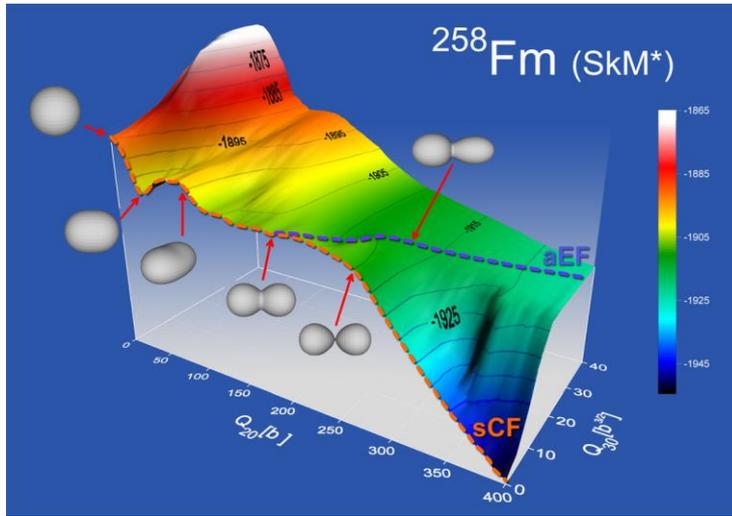
理論: 対ホッピング模型 (離散基底モデル)

最近の計算例

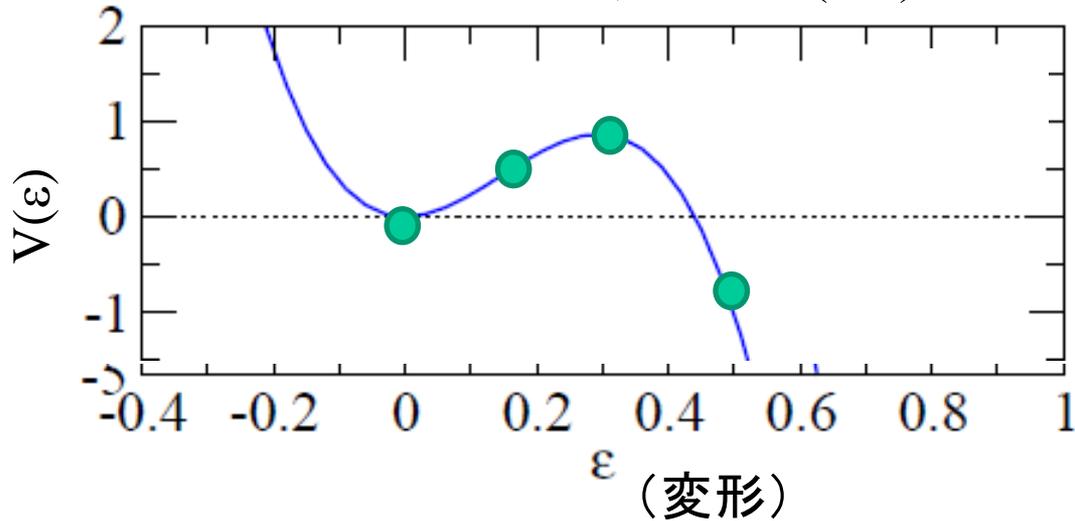


R.M. Clark et al., PRC99, 024325 (2019)

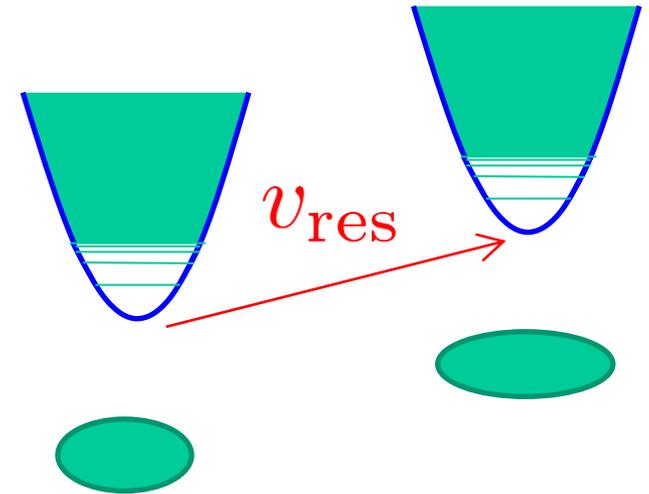
Generator Coordinate Method



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



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

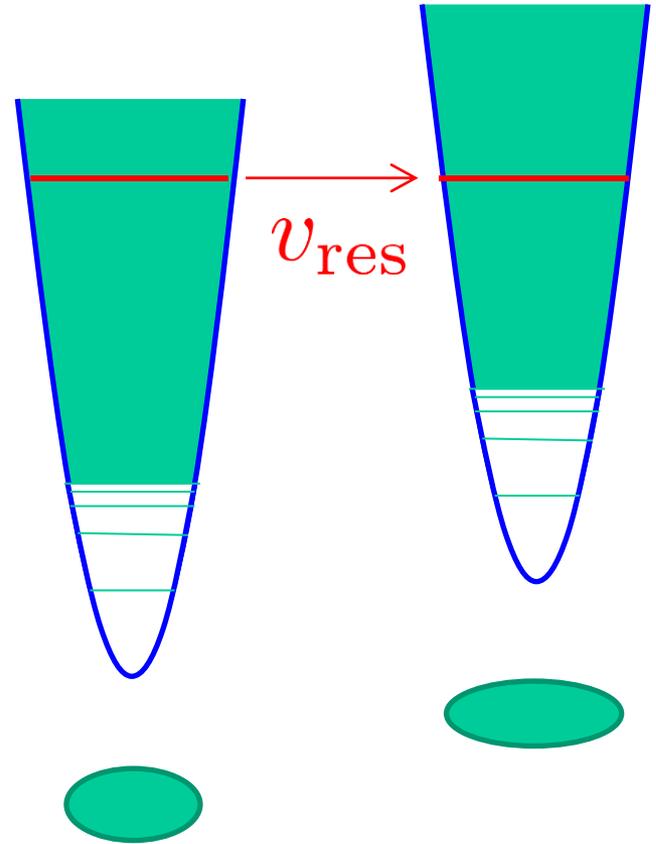
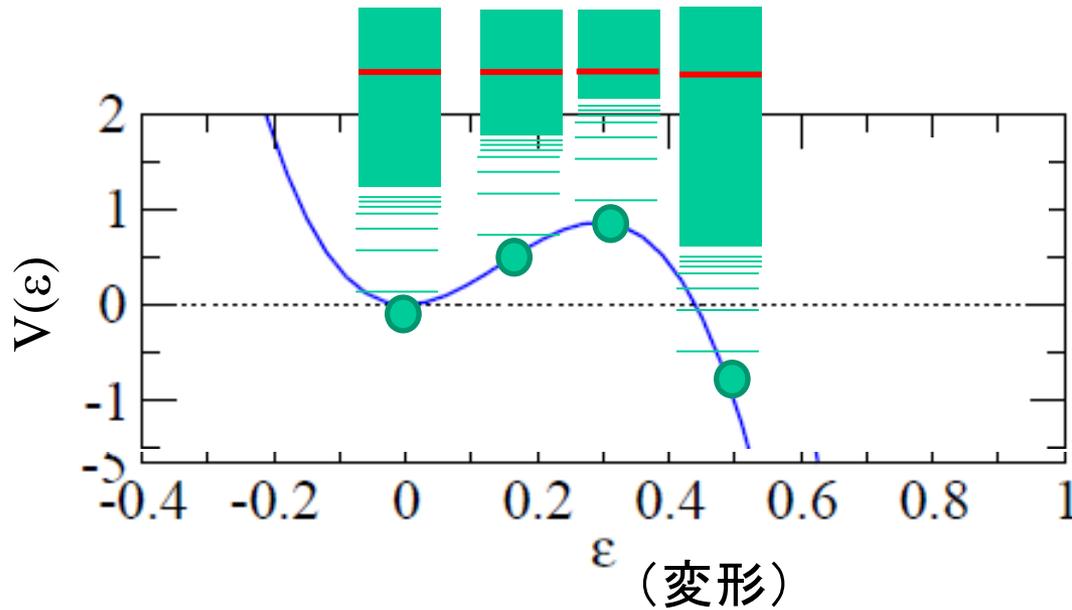


残留相互作用による
多体配位間のホッピング

→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

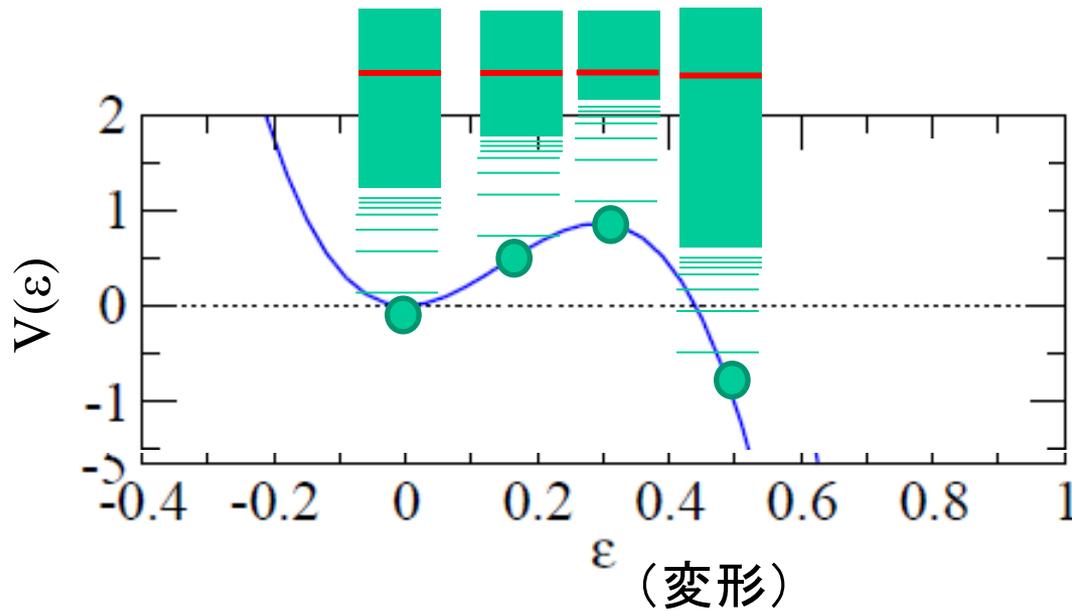
$$|\Psi\rangle = \int dQ \sum_i f_i(Q) |\Phi_Q(i)\rangle$$

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

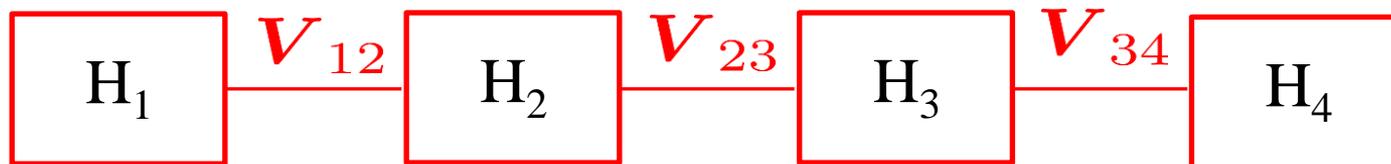


CI approach

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

隣のQブロック同士のみ結合する:

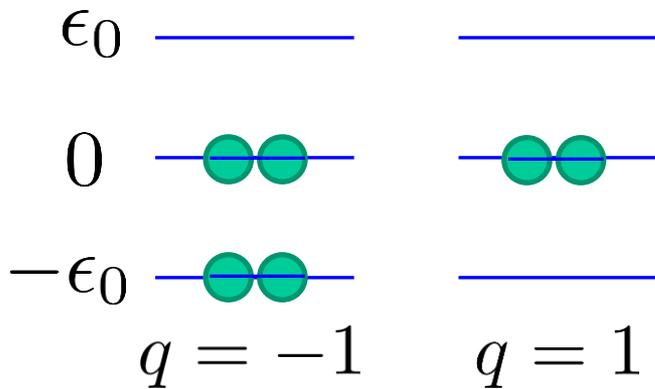
cf. 電子輸送の問題
(物性)



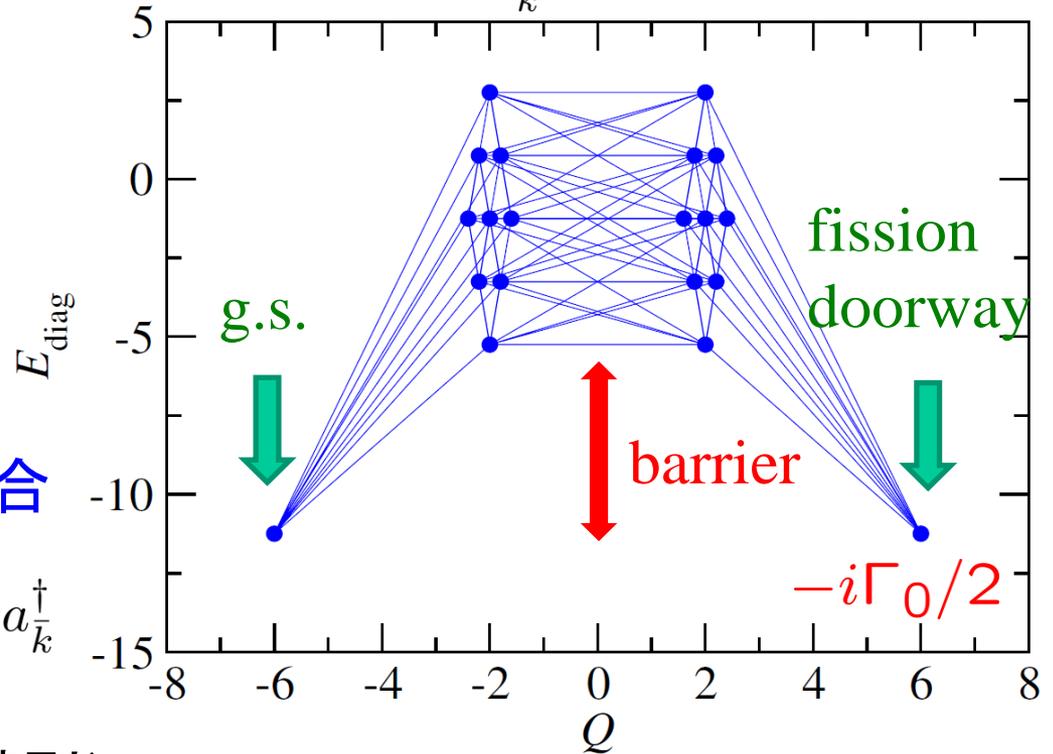
それぞれが $N \times N$ の行列

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

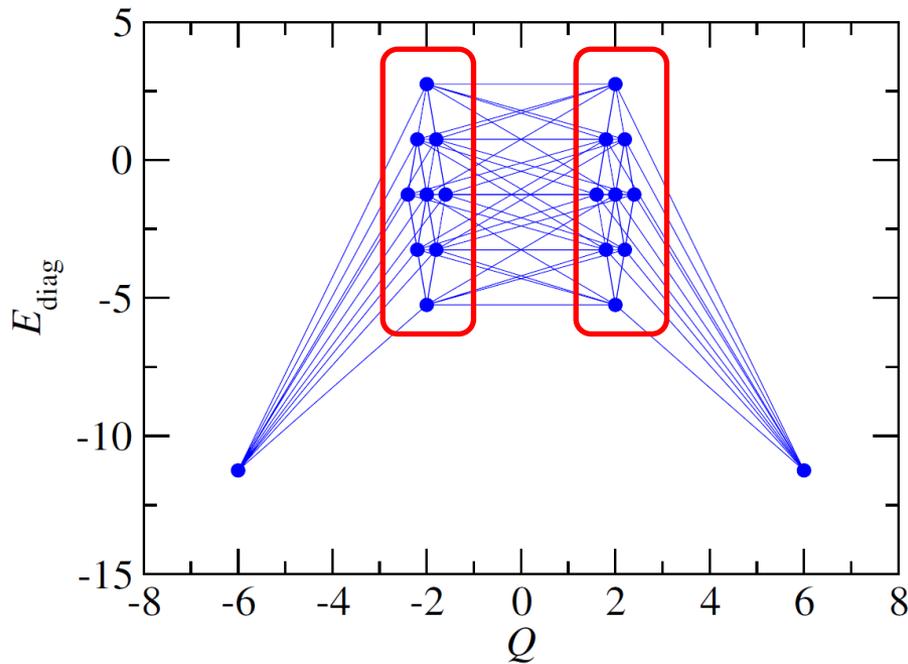
$$\hat{H} = H_0 - G \sum_{k,k'} \hat{P}_k^\dagger \hat{P}_{k'}; \quad \hat{P}_k^\dagger = a_k^\dagger a_{\bar{k}}^\dagger$$

ハミルトニアンの対角化(殻模型)

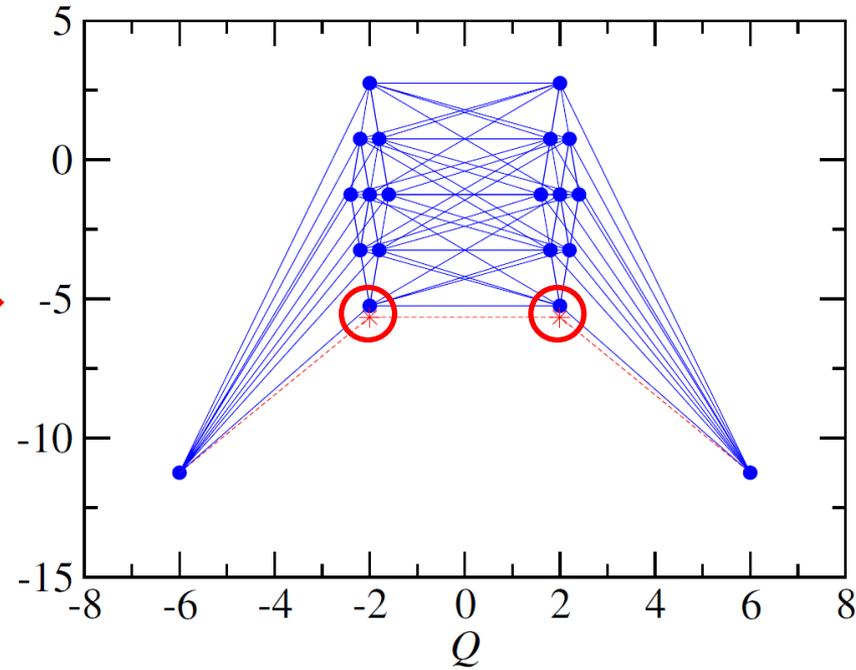
$$\rightarrow |\Psi_{\text{gs}}\rangle = \sum_{\alpha} C_{\alpha} |\phi_{\alpha}\rangle, \quad E_{\text{gs}} = E_R - i\Gamma/2$$

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:

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

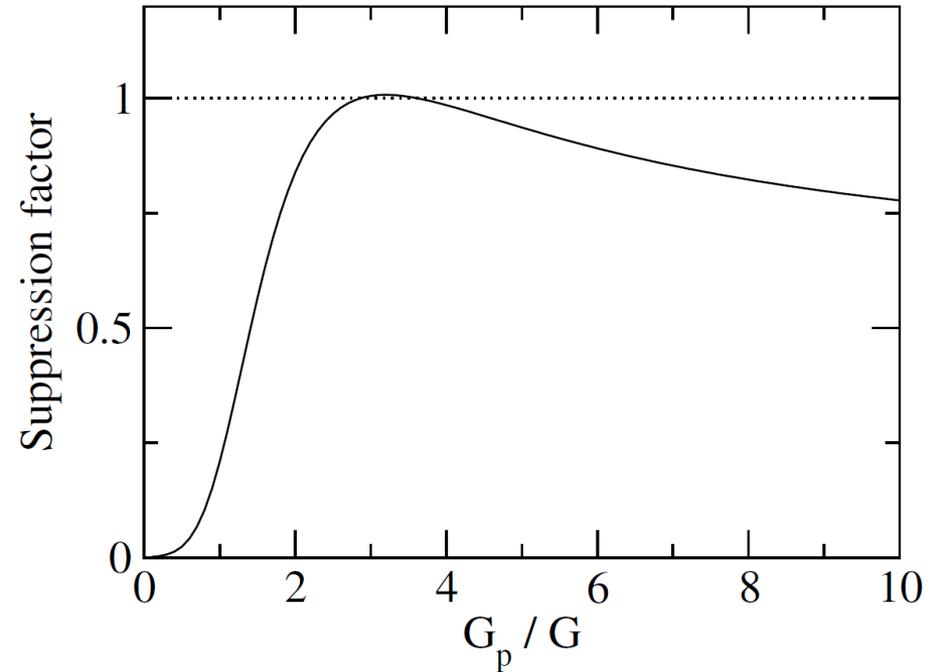
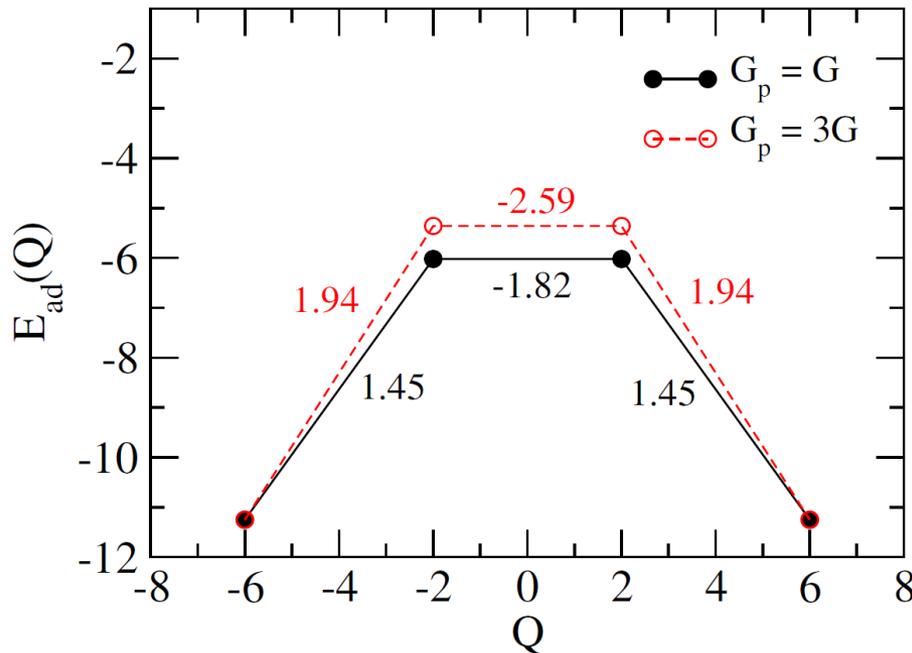
$$(v_{\text{eff}})_{\text{ad}}^2 \sim 0.209 (v_{\text{eff}})_{\text{exact}}^2$$

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

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

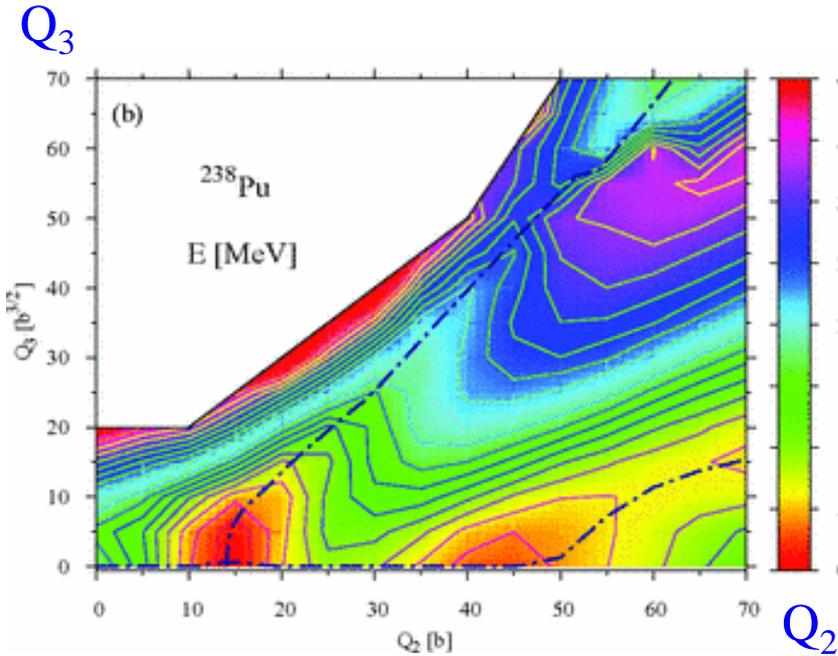


- barrier: heigher → optimum G_p
- coupling: stronger

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

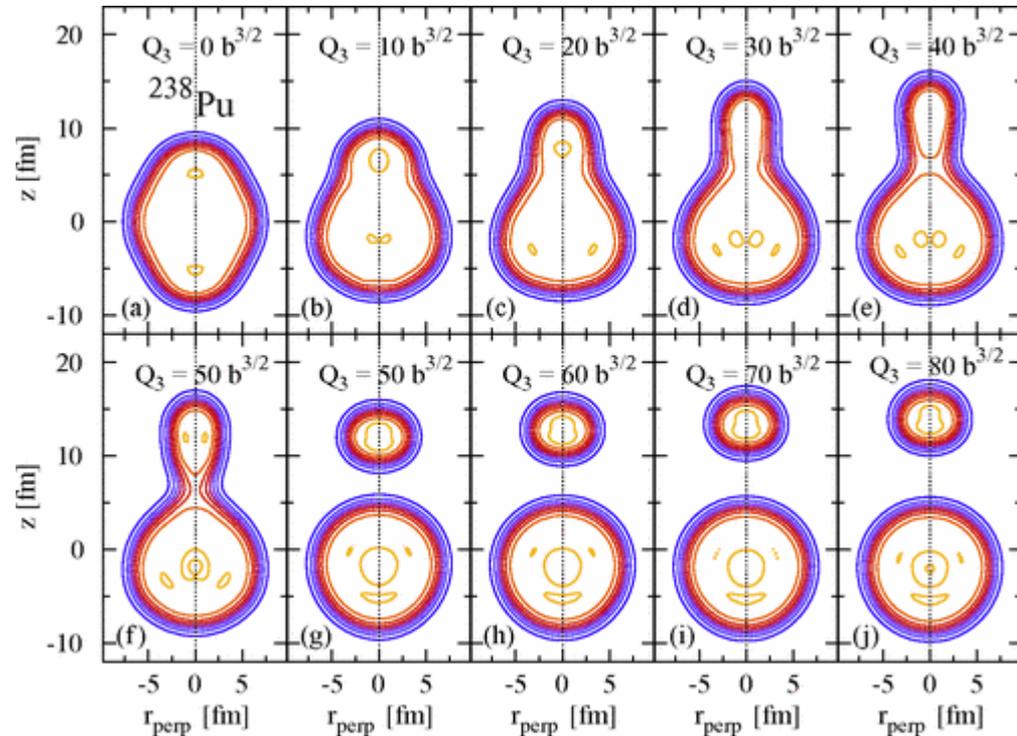
最大結合近似: より現実的な系(クラスター崩壊)への適用

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



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

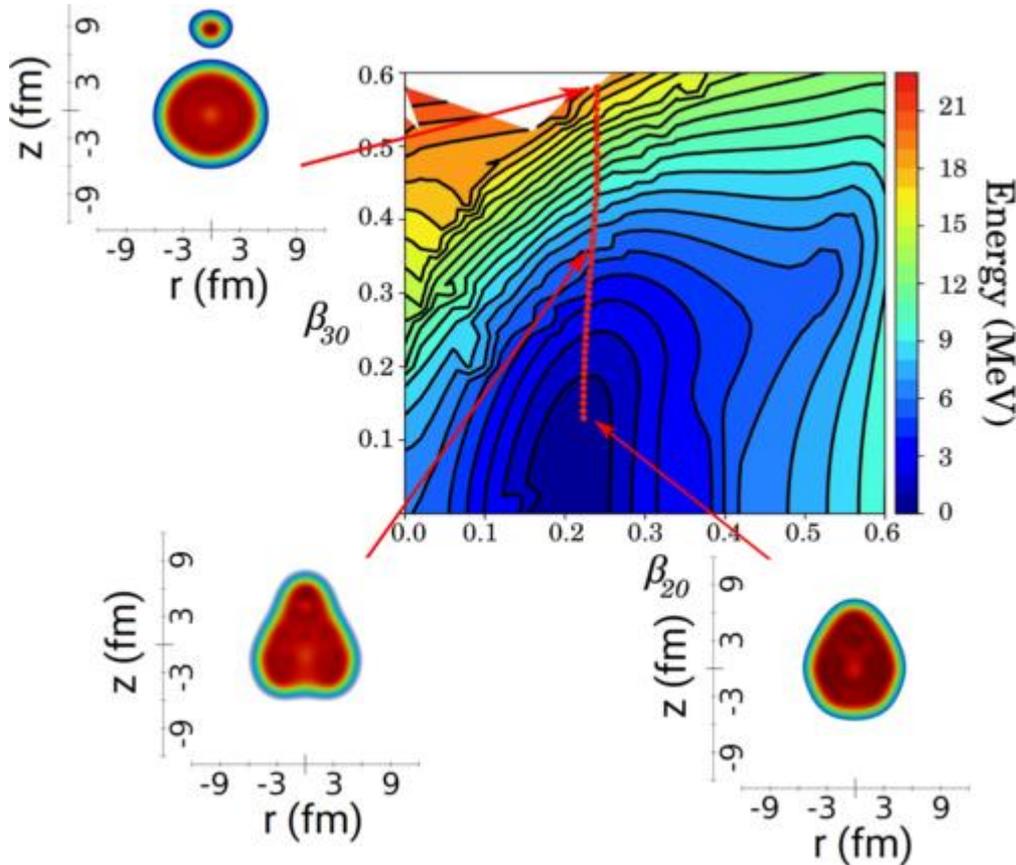
$$\log[T_{1/2}^{\text{exp}}(\text{s})] = 25.70$$



- ✓ 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}Xe の α 崩壊の例



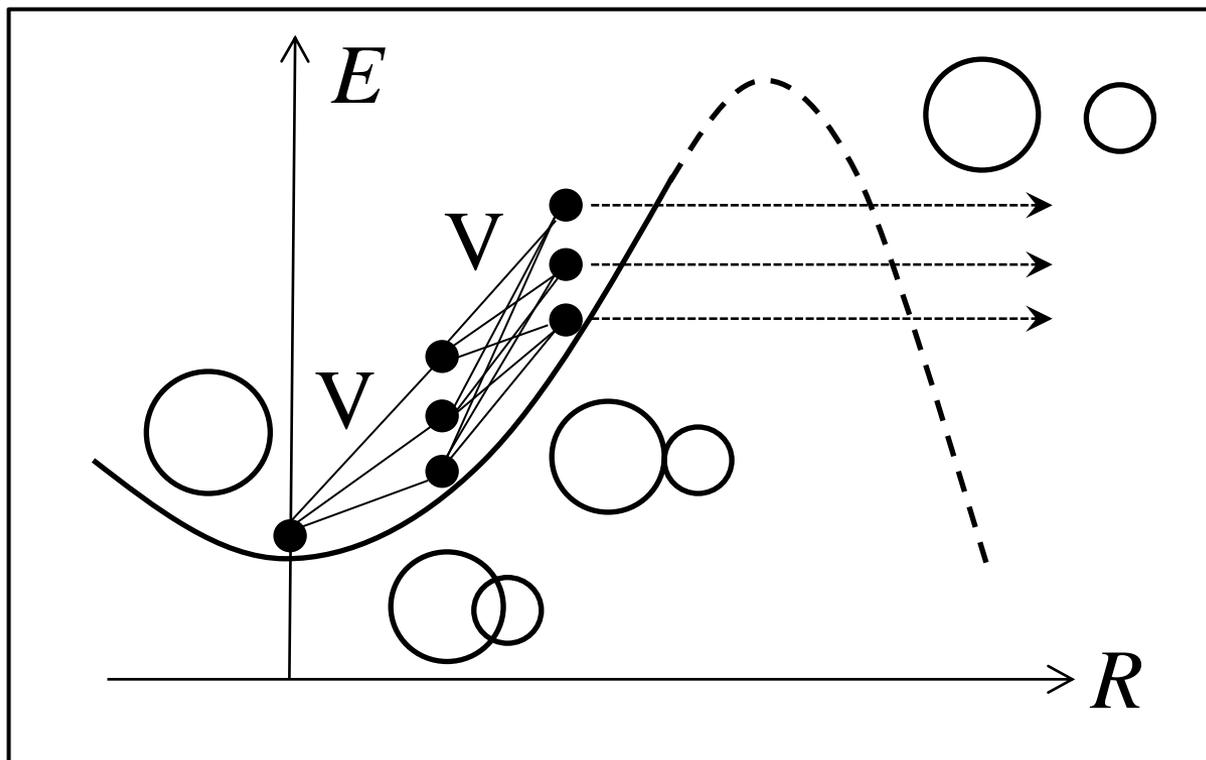
京都でも8重極変形の拘束付きの Skyrme-HF計算を開始
K. Uzawa, K. Yoshida, and K.H.



GCM+殻模型計算の基底関数となる

まとめ

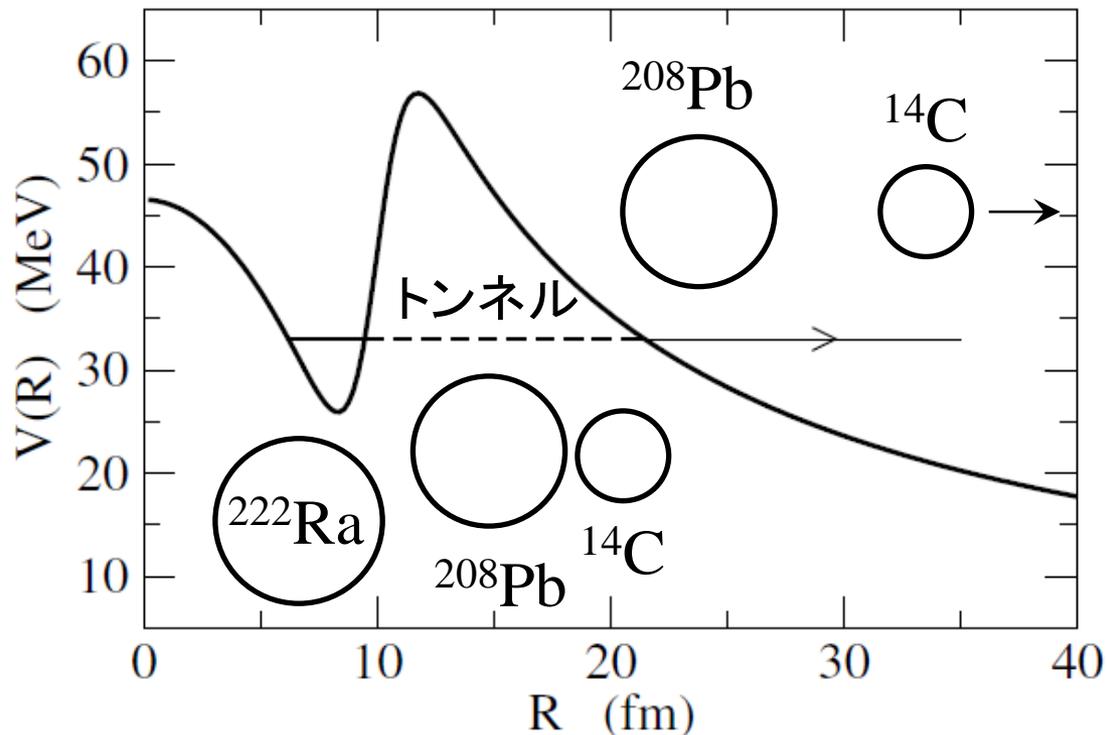
GCM+殻模型アプローチを用いたクラスター崩壊現象の記述



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

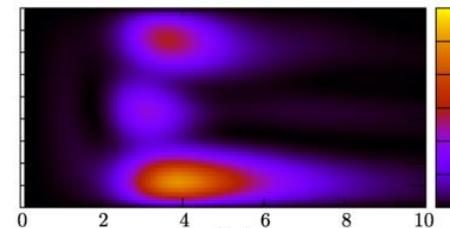
まとめ

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、 α 崩壊などもまとめて理解する。最終的には核分裂も。

