

原子核形状の理論研究と核分裂

萩野浩一

京都大学大学院理学研究科

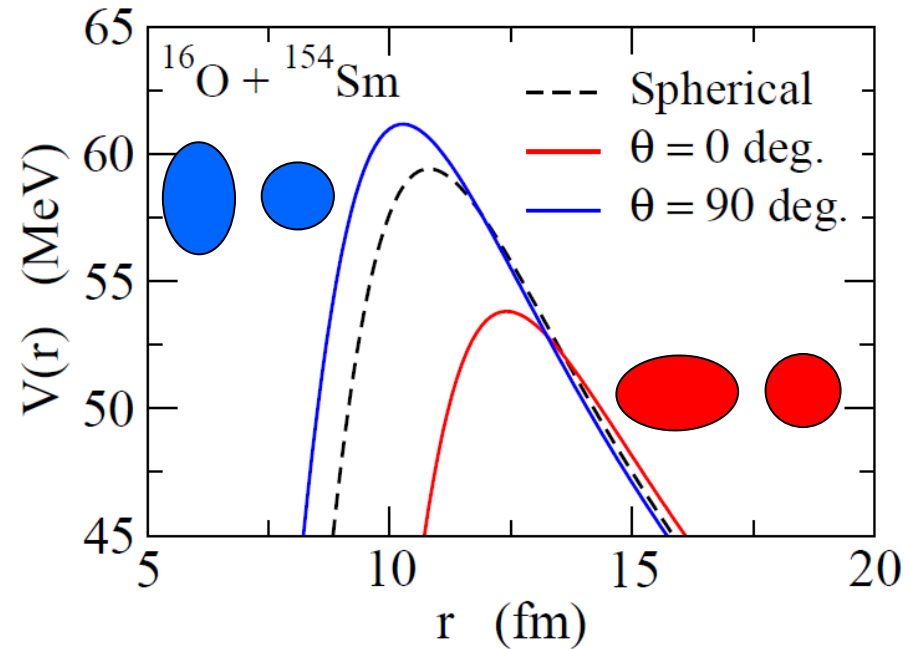
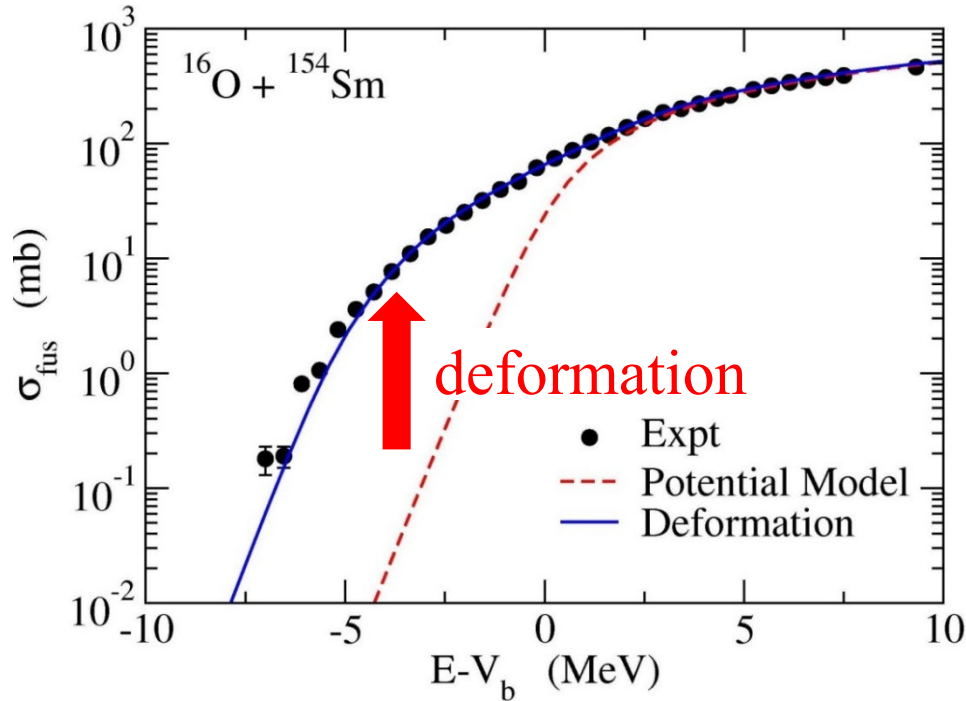


1. 変形核の反応断面積
: 低エネルギー核融合反応の観点から
2. 原子核の変形: 平均場近似と Beyond 平均場
3. 核分裂アイソマーについて
4. (話題提供) 核分裂反応に対する微視的アプローチ
5. まとめ

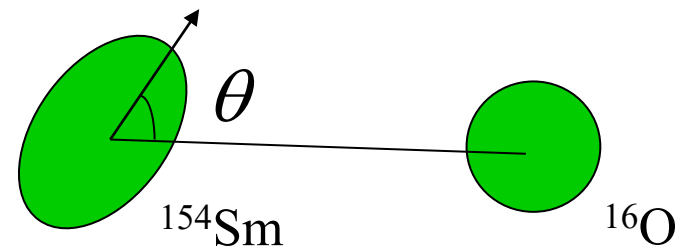
変形核の反応断面積

: 低エネルギー核融合反応の観点から

Sub-barrier 核融合反応断面積の増幅現象

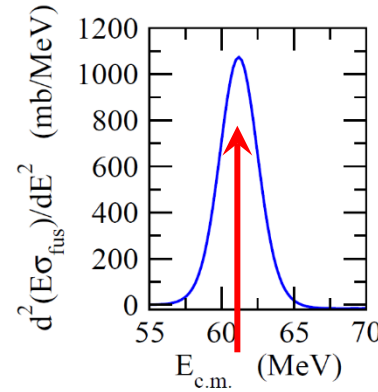


$$\sigma_{\text{fus}}(E) = \int_0^1 d(\cos \theta) \sigma_{\text{fus}}(E; \theta)$$

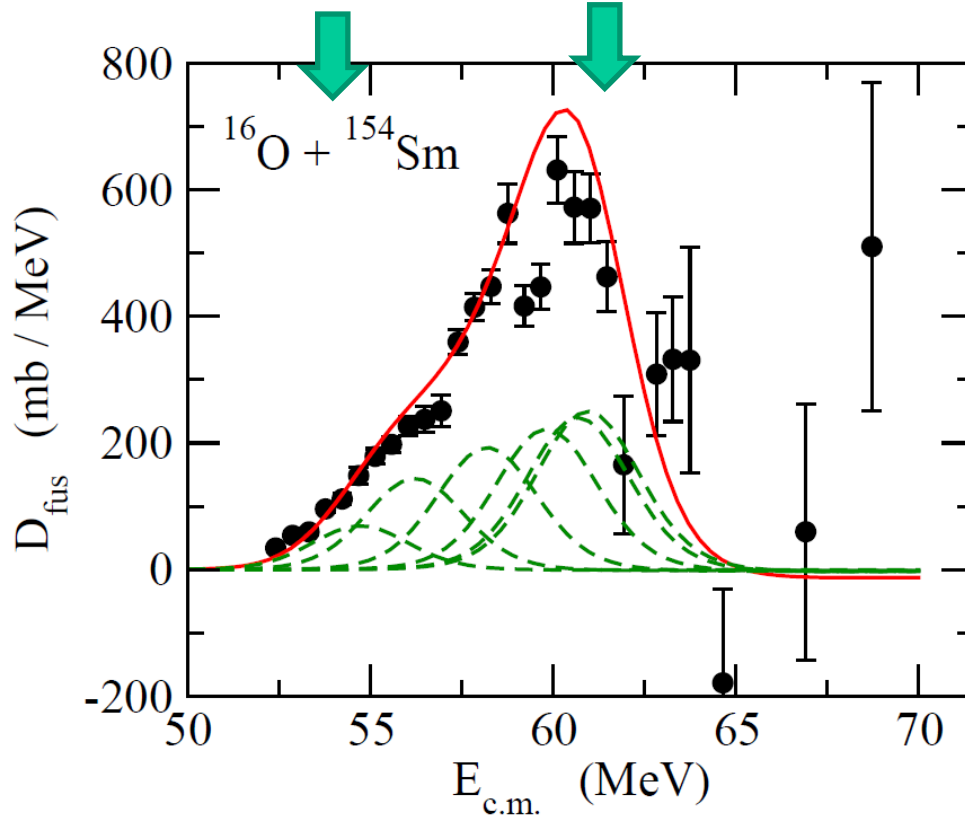
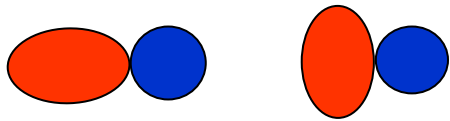


✓ Fusion barrier distribution (Rowley, Satchler, Stelson, PLB254('91))

$$D_{\text{fus}}(E) = \frac{d^2(E\sigma_{\text{fus}})}{dE^2}$$



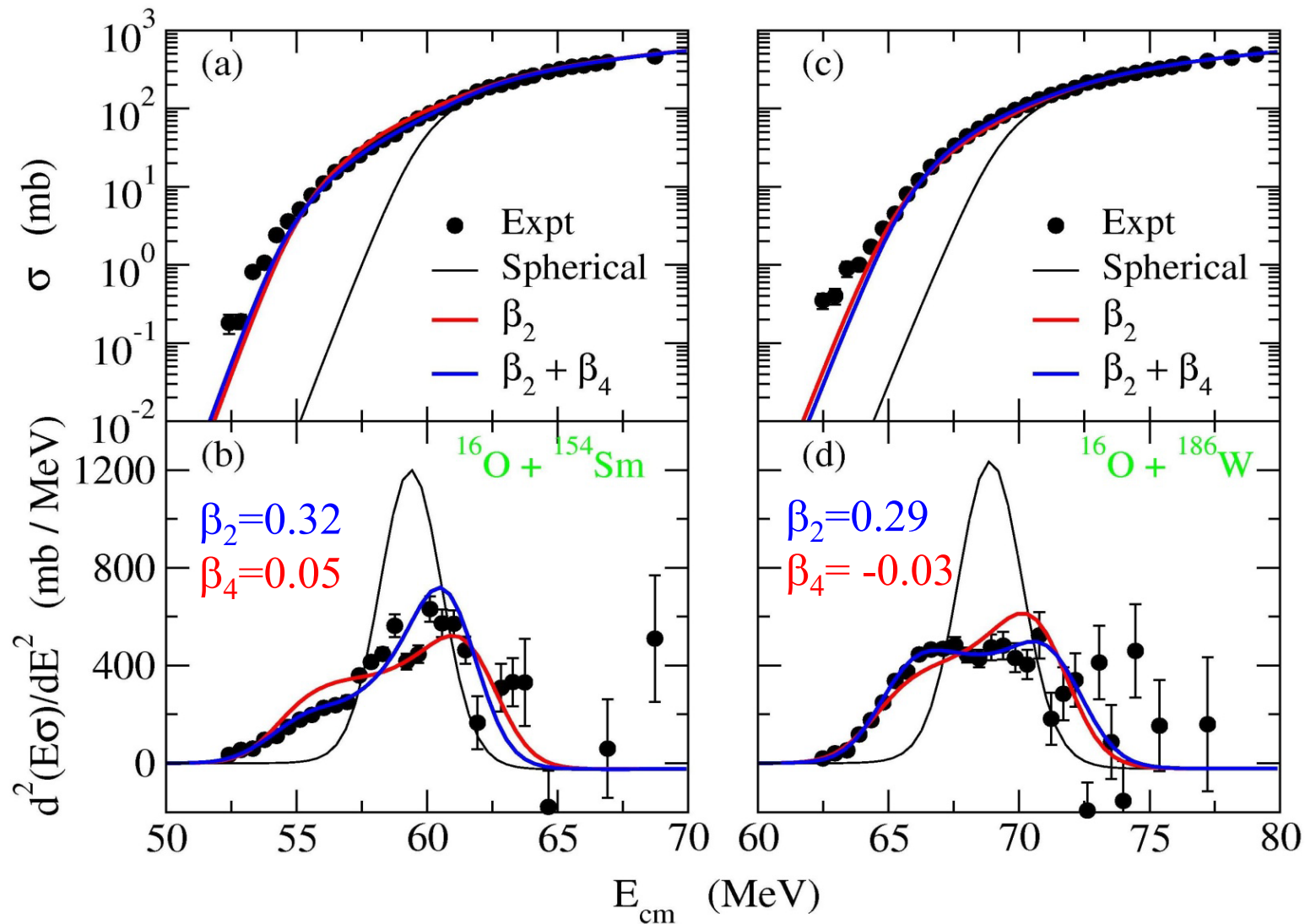
single channel



超重核生成反応への応用

- T. Tanaka et al.,
 JPSJ 87, 014201 ('18)
 PRL124, 052502 ('20)
 M. Tanaka et al.,
 JPSJ 91, 084201 ('22)

障壁分布と β_4 変形



アイソマーを意識した測定

PHYSICAL REVIEW C **68**, 044606 (2003)

Exploratory studies towards fusion with the 16^+ isomer of ^{178}Hf

D. J. Hinde,¹ N. Rowley,² M. Dasgupta,¹ R. D. Butt,¹ C. R. Morton,¹ and A. Mukherjee^{1,*}

¹*Department of Nuclear Physics, Research School of Physical Sciences and Engineering, Australian National University, Canberra, ACT 0200, Australia*

²*IReS, UMR7500, IN2P3-CNRS/ Université Louis Pasteur, BP28, F-67037, Strasbourg Cedex 2, France*

この論文での興味:

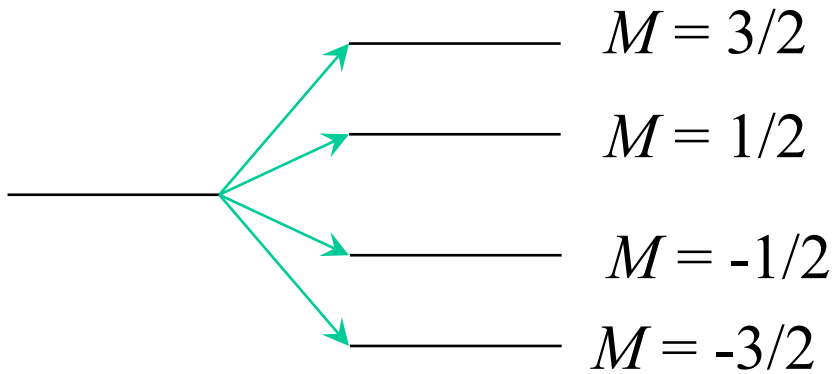
$^{16}\text{O} + ^{178}\text{Hf}(\text{g.s.})$ と $^{16}\text{O} + ^{178\text{m}}\text{Hf}(16^+; 2.447 \text{ MeV})$ で
核融合反応断面積はどのように異なるのか?

* 実際の測定は $^{16}\text{O} + ^{178}\text{Hf}(\text{g.s.})$ のみで、 $^{16}\text{O} + ^{178\text{m}}\text{Hf}(16^+)$ の測定は行われていない。

核融合反応における有限スピンの効果(偏極の効果)

K. Hagino and S. Sakaguchi, PRC100, 064614 (2019)

基底状態:有限のスピン



$$\sigma_{\text{fus}}(E) = \int_0^{\pi/2} \sin \theta d\theta \sigma_{\text{fus}}(\theta)$$

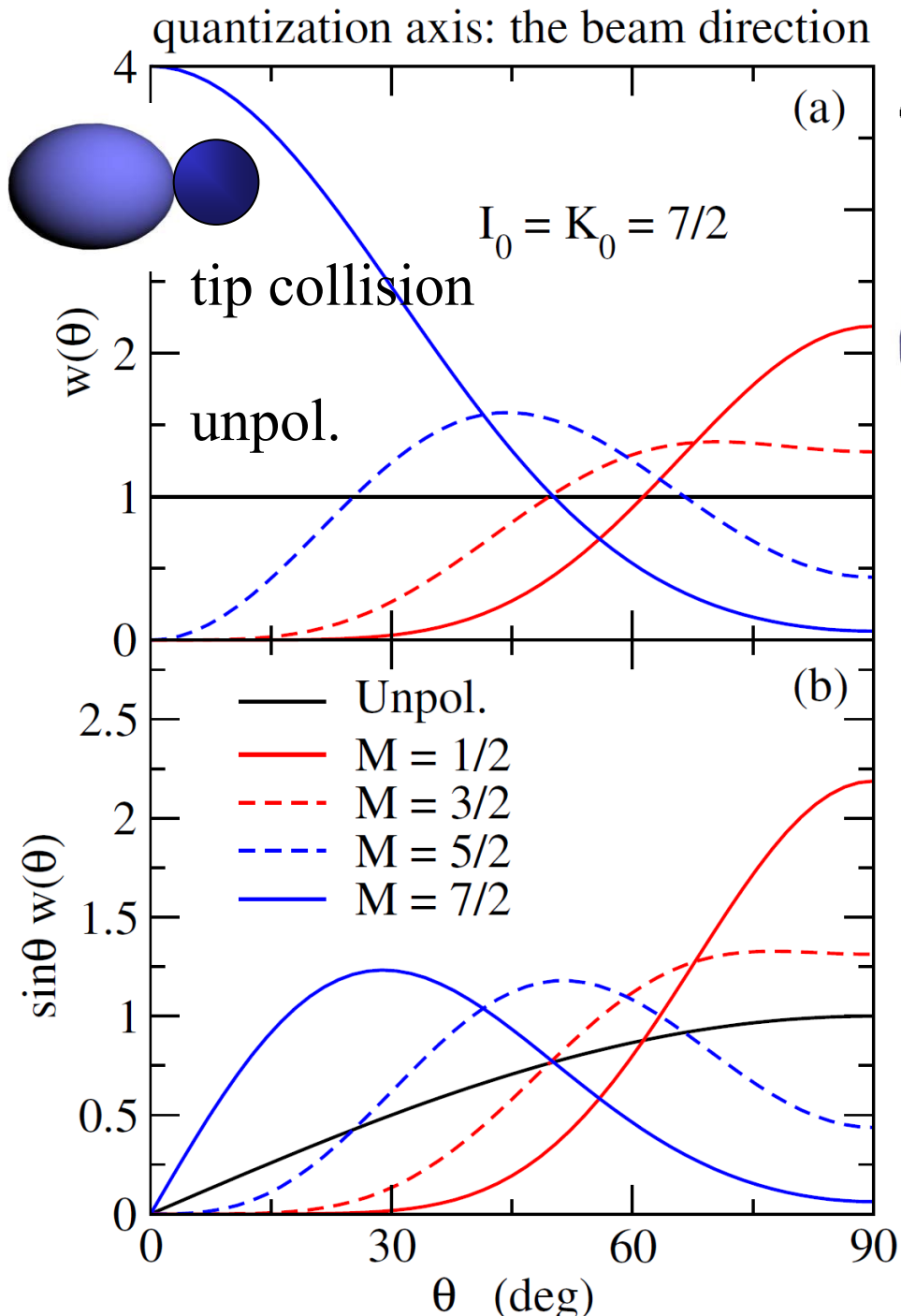


$$\sigma_{\text{fus}}^{(M)}(E) = \int_0^{\pi/2} \sin \theta d\theta w_M(\theta) \sigma_{\text{fus}}(\theta)$$

$$w_M(\theta) = \frac{2I_0 + 1}{2} \times (|d_{MK_0}^{I_0}(\theta)|^2 + |d_{M-K_0}^{I_0}(\theta)|^2)$$

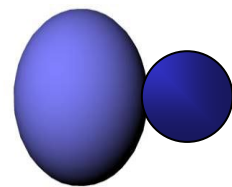
(note)

$$\sum_M |d_{MK}^{I_0}(\theta)|^2 = 1 \rightarrow \sigma_{\text{unpol}}(E) = \int_0^{\pi/2} \sin \theta d\theta \sigma_{\text{fus}}(\theta)$$

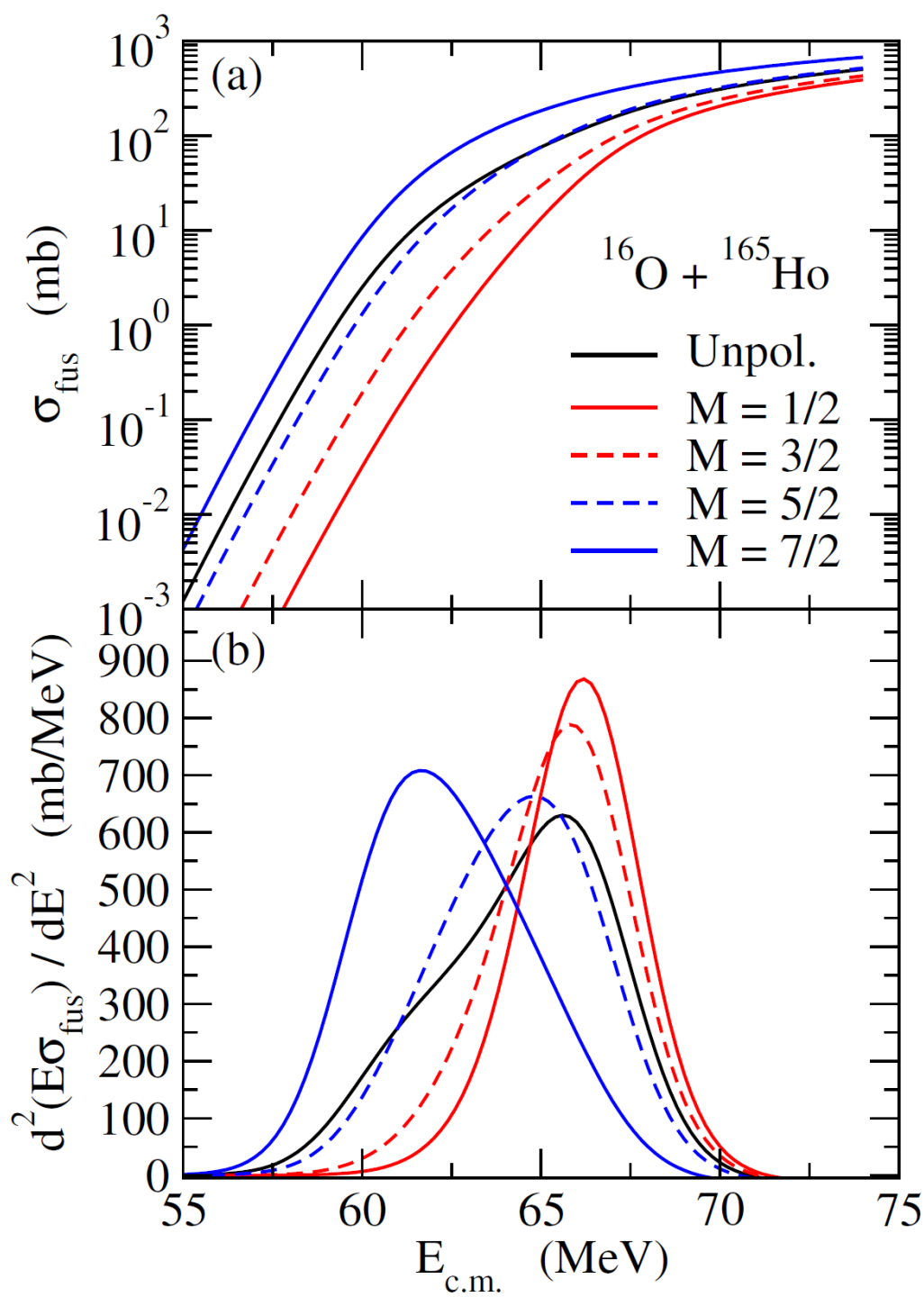


$$\sigma_{\text{fus}}^{(M)}(E) = \int_0^{\pi/2} \sin \theta d\theta w_M(\theta) \sigma_{\text{fus}}(\theta)$$

$$w_M(\theta) \sim |d_{MK_0}^{I_0}(\theta)|^2$$



side collision



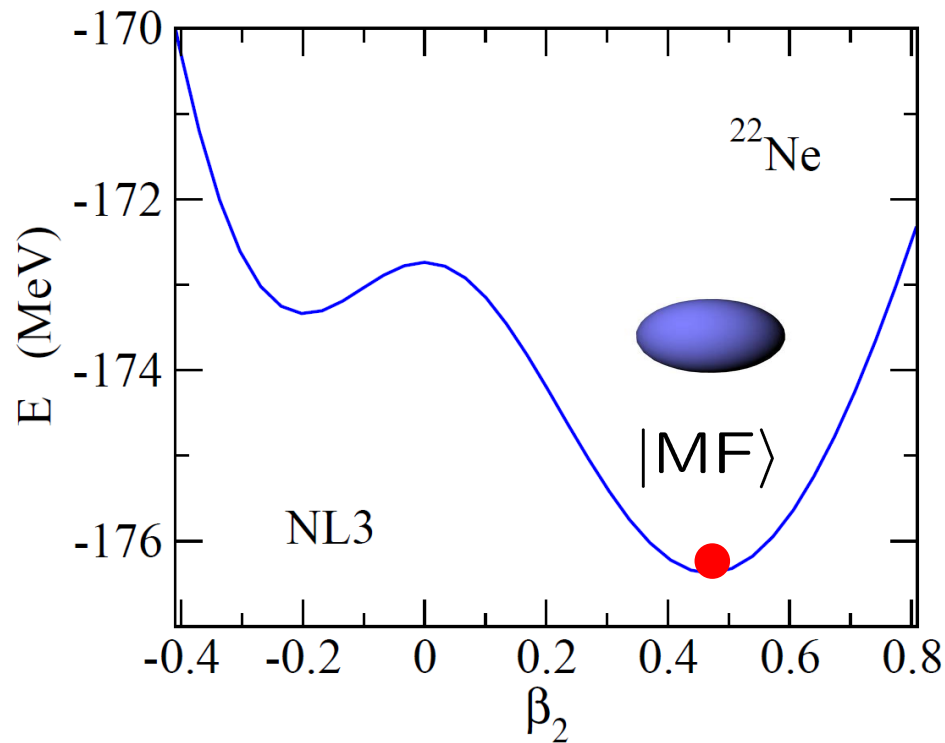
スピン偏極により、障壁分布の形が大きく変化する

K. Hagino and S. Sakaguchi,
PRC100, 064614 (2019)

原子核の形と平均場理論

平均場理論(密度汎関数法)

:NとZを与えたときに、最適な形が自動的に決定



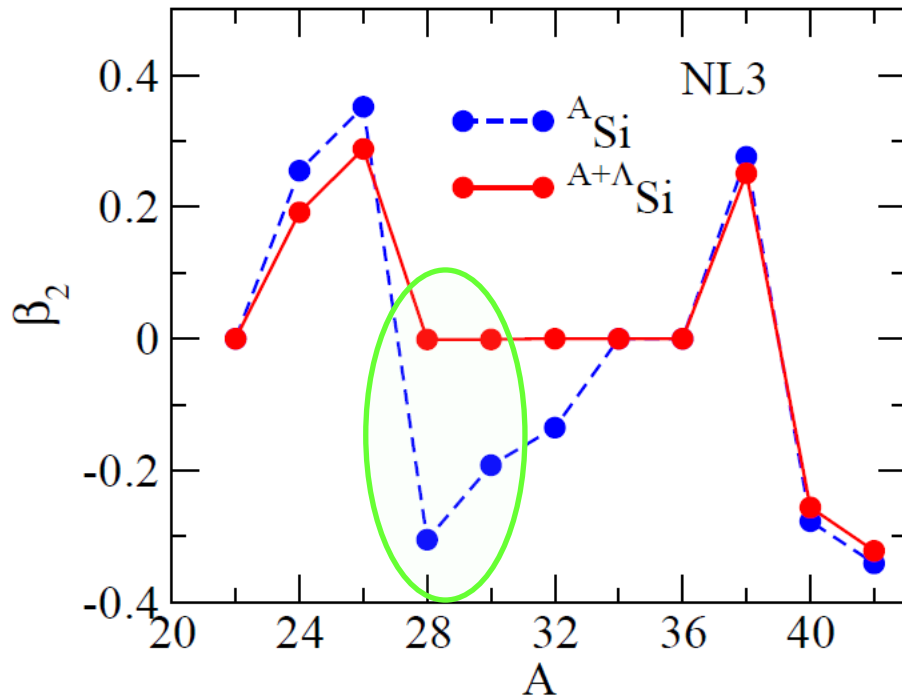
原子核の形状に対する直感的な記述

原子核の形と平均場理論

平均場理論(密度汎関数法)

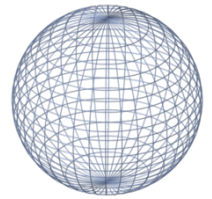
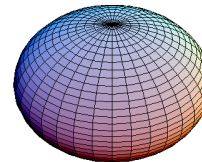
:NとZを与えたときに、最適な形が自動的に決定

Si isotopes



ハイパー核

${}^{28}\text{Si}$ (オブレート) \rightarrow ${}^{29}_{\Lambda}\text{Si}$ (球形)

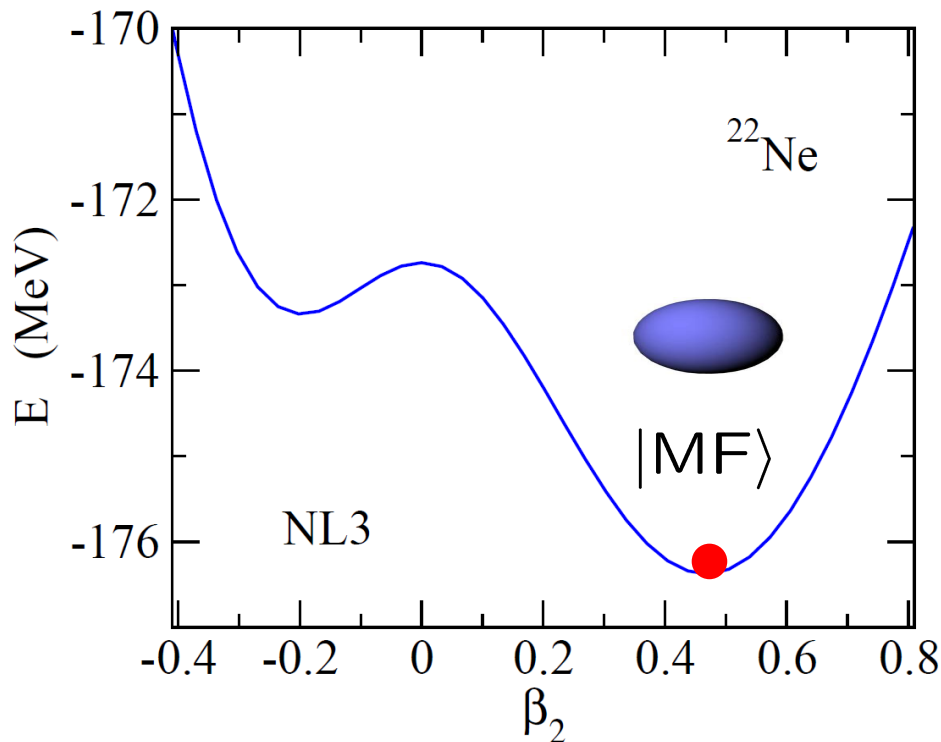


Λ 粒子の付加による形状の変化

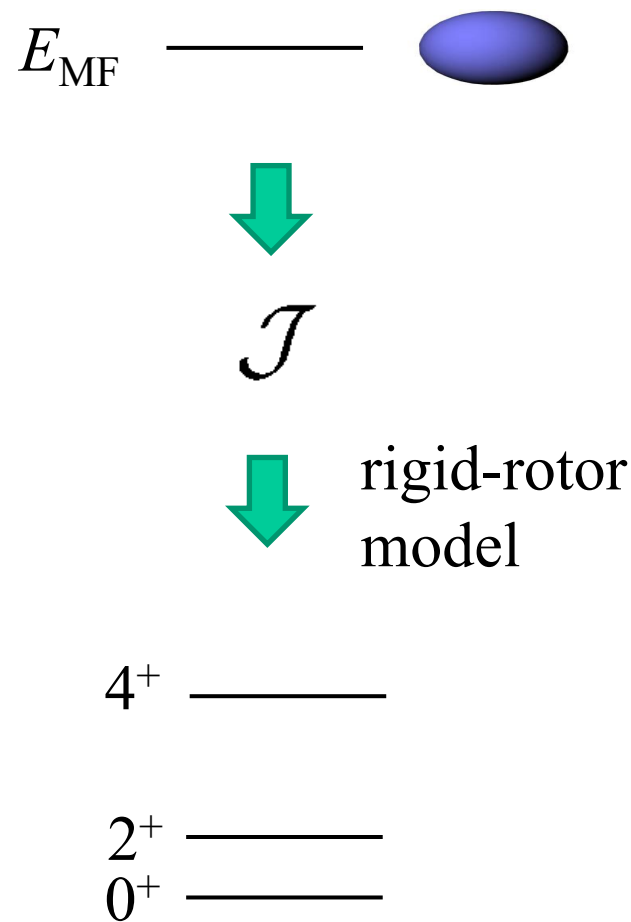
原子核の形と平均場理論

平均場理論の問題点

✓ スペクトルが計算できない



物体固定系での基底状態のみ

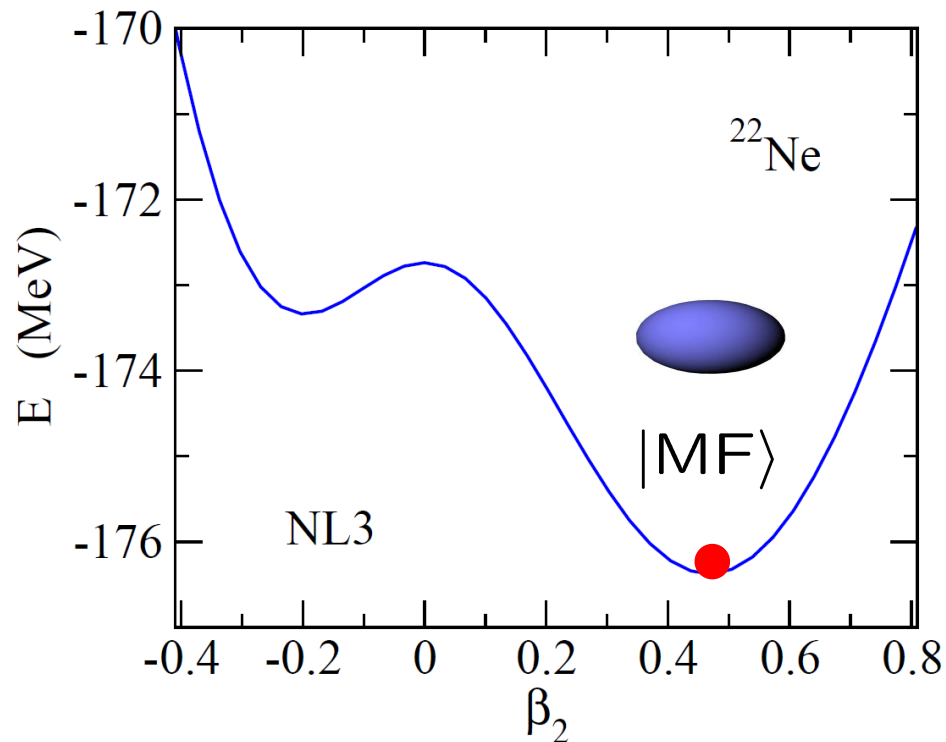


$$E_I = \frac{I(I+1)\hbar^2}{2\mathcal{J}}$$

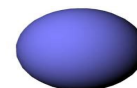
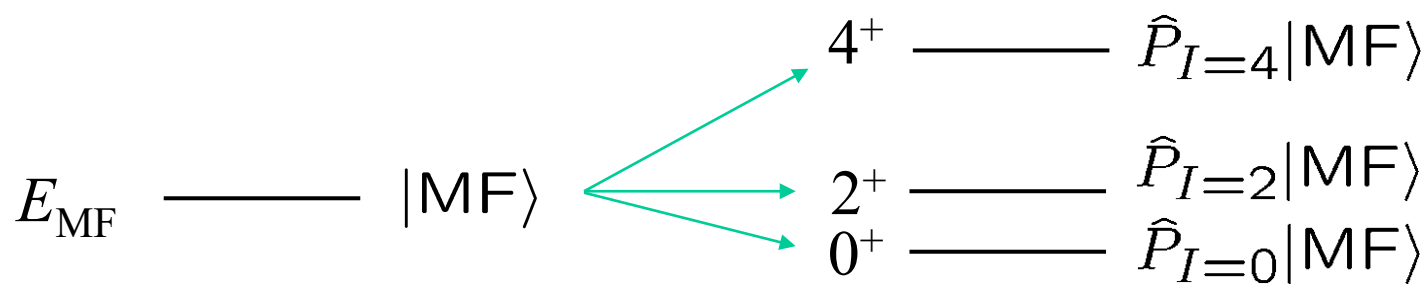
原子核の形と平均場理論

平均場理論の問題点

✓ スペクトルが計算できない



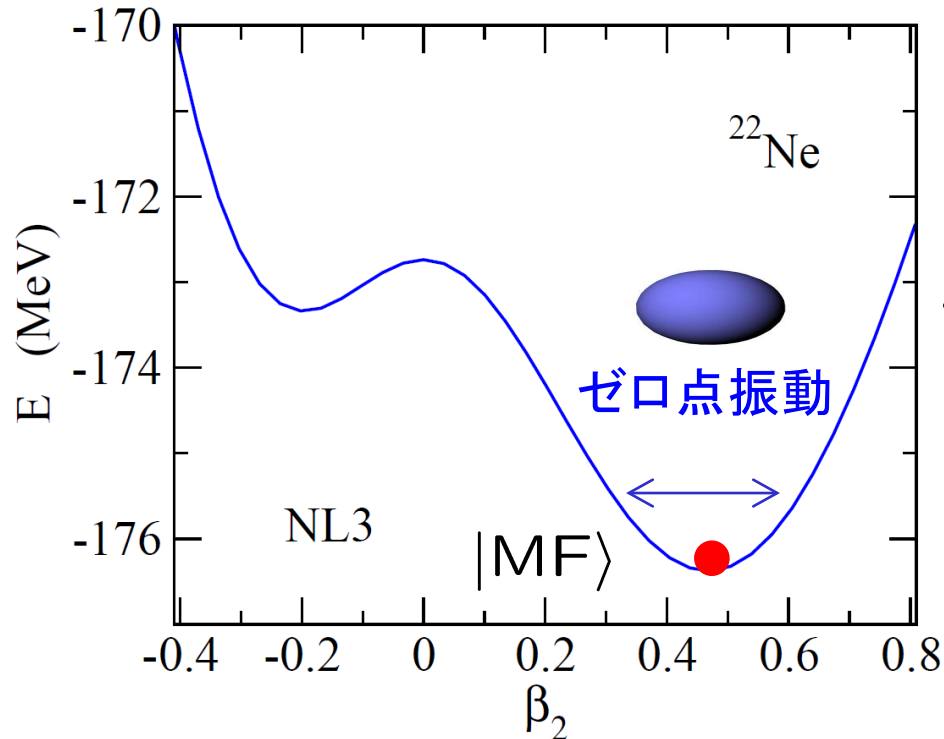
角運動量射影



原子核の形と平均場理論

平均場理論の問題点

- ✓ スペクトルが計算できない
- ✓ 形の量子揺らぎ



原子核の形は一つに決まらない

生成座標法

(Generator Coordinate Method)

$$|\Psi_{\text{GCM}}\rangle = \int dQ f(Q) |\Psi_Q\rangle$$

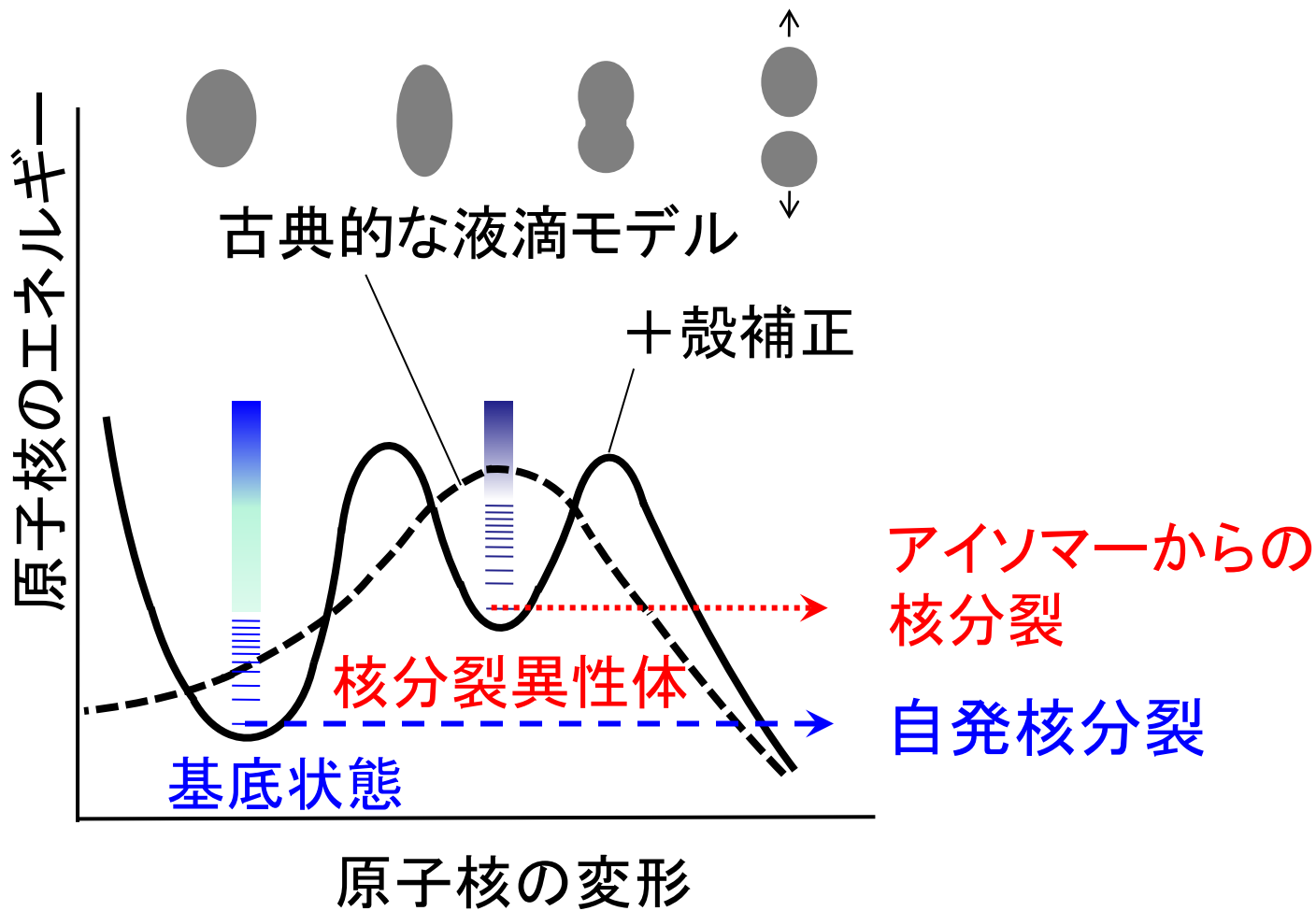
Hill-Wheeler 方程式

$$\int dQ \langle \Psi_{Q'} | H - E | \Psi_Q \rangle f(Q) = 0$$

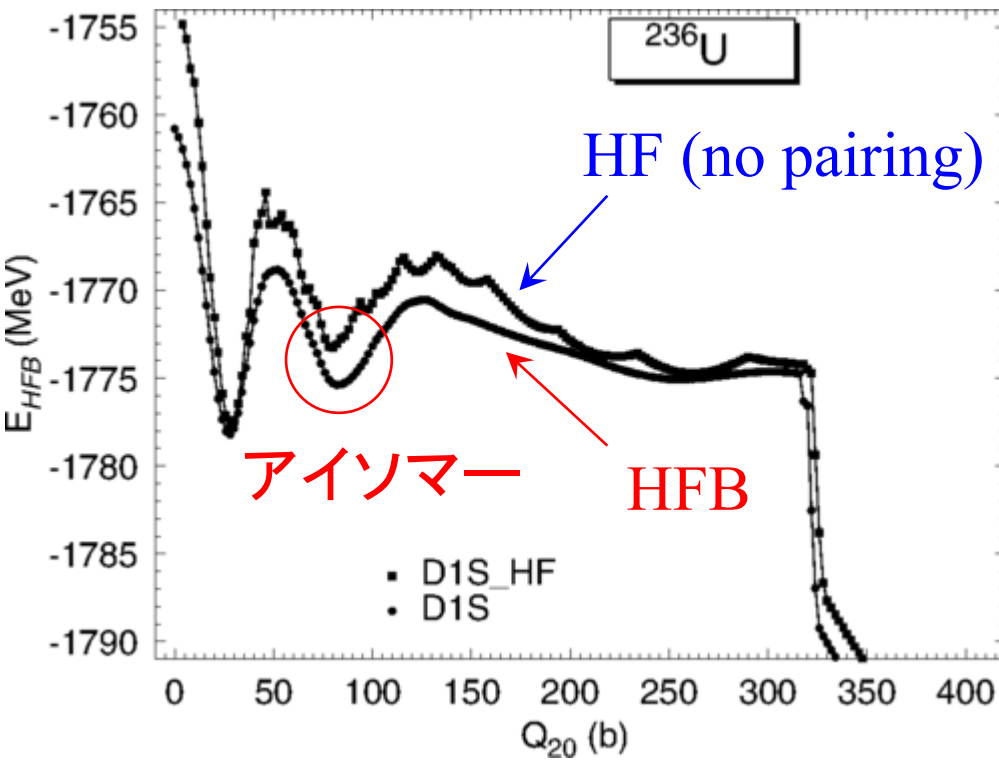
Beyond Mean-Field

$$\begin{aligned} |\Psi_{IM}\rangle \\ = \int dQ f(Q) \hat{P}_{MK}^I \hat{P}^N |\Psi_Q\rangle \end{aligned}$$

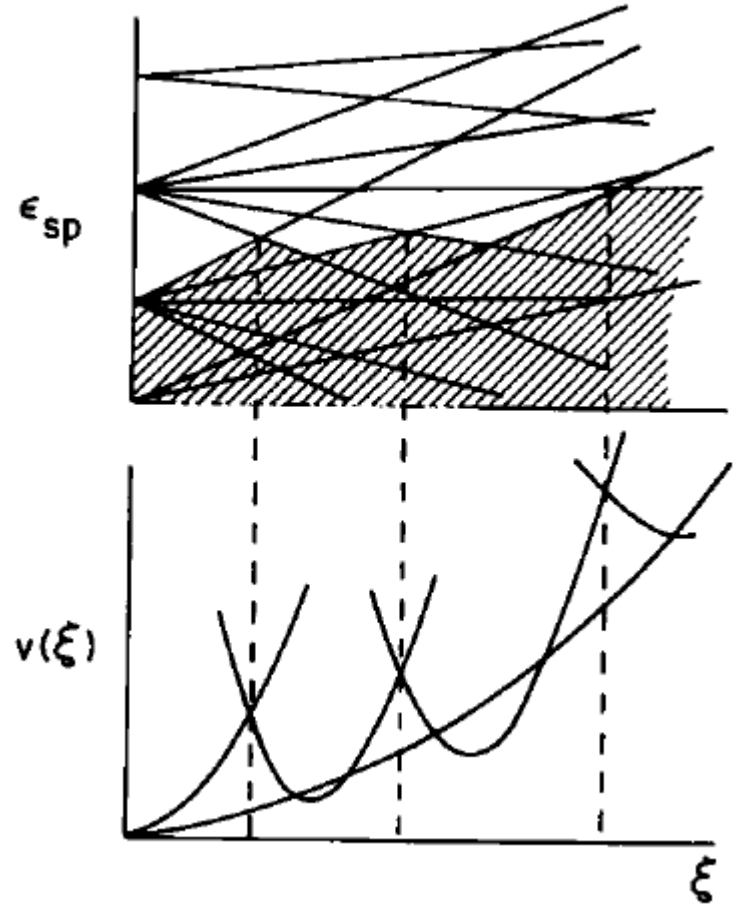
核分裂アイソマー



DFTによる核分裂障壁(と核分裂アイソマー)の記述

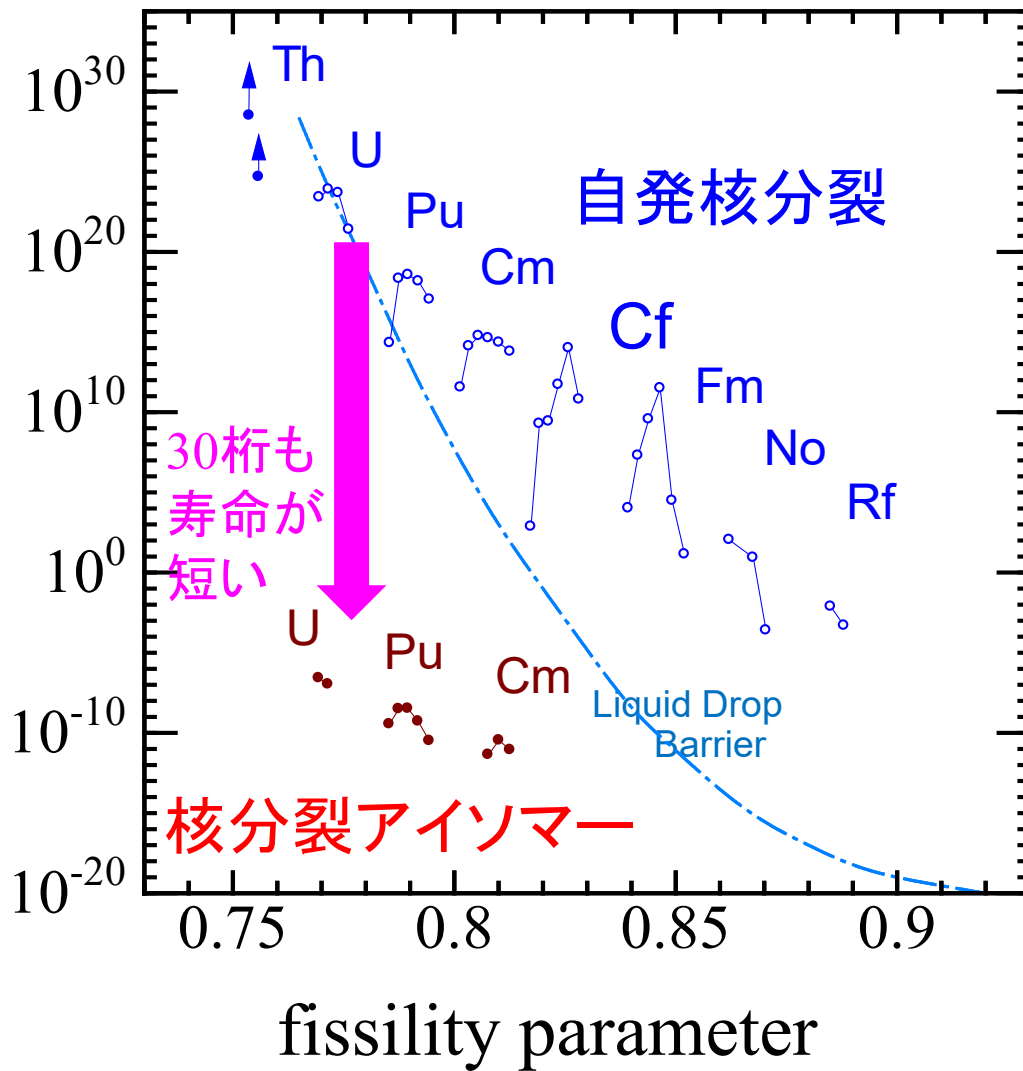


G.F. Bertsch, W. Younes, and L.M. Robledo,
 PRC97 (2018) 064619

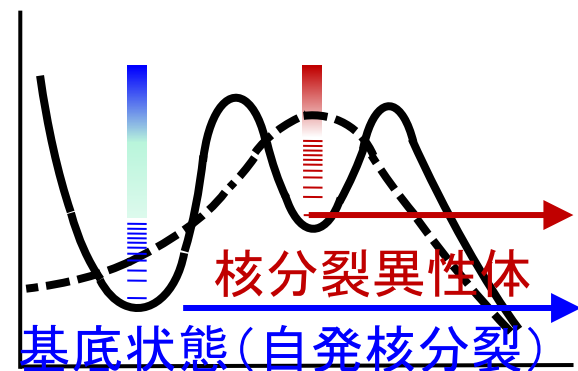


F. Barranco, G.F. Bertsch,
 R.A. Broglia, and E. Vigezzi,
 NPA512 ('90) 253

自発核分裂に対する半減期(秒)



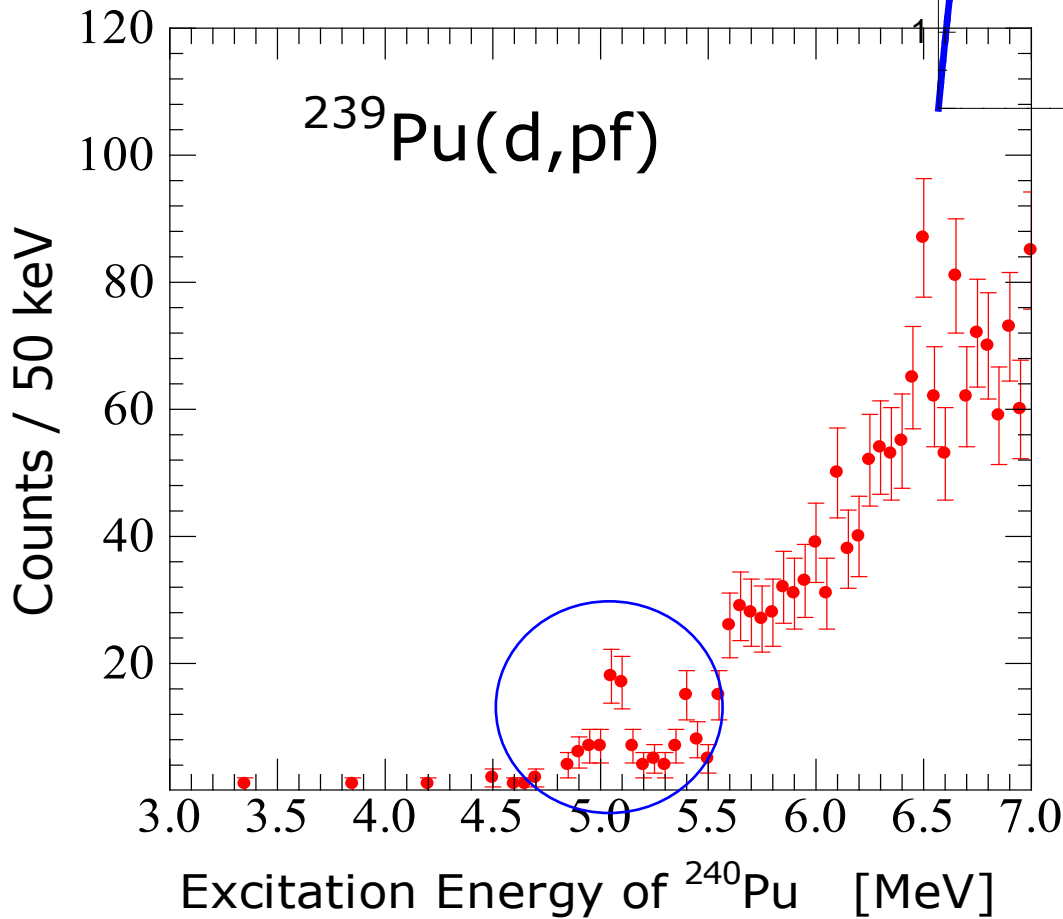
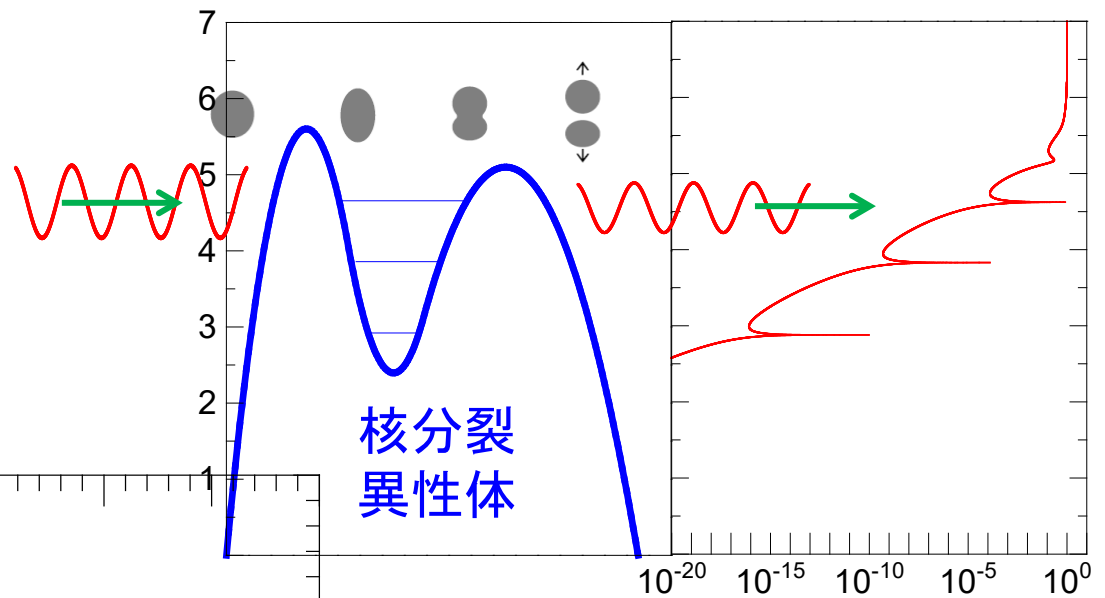
3170000000000000年
317年
1秒



スライド: 西尾勝久氏

核分裂アイソマー

核分裂反応



変形

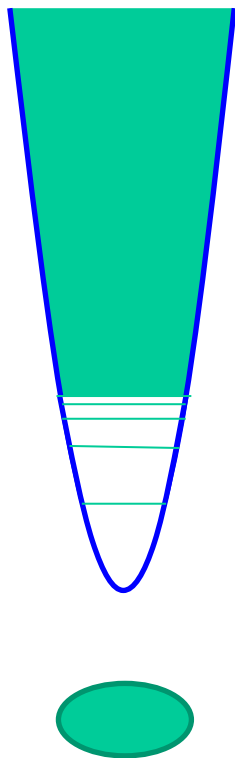
透過確率

スライド: 西尾勝久氏

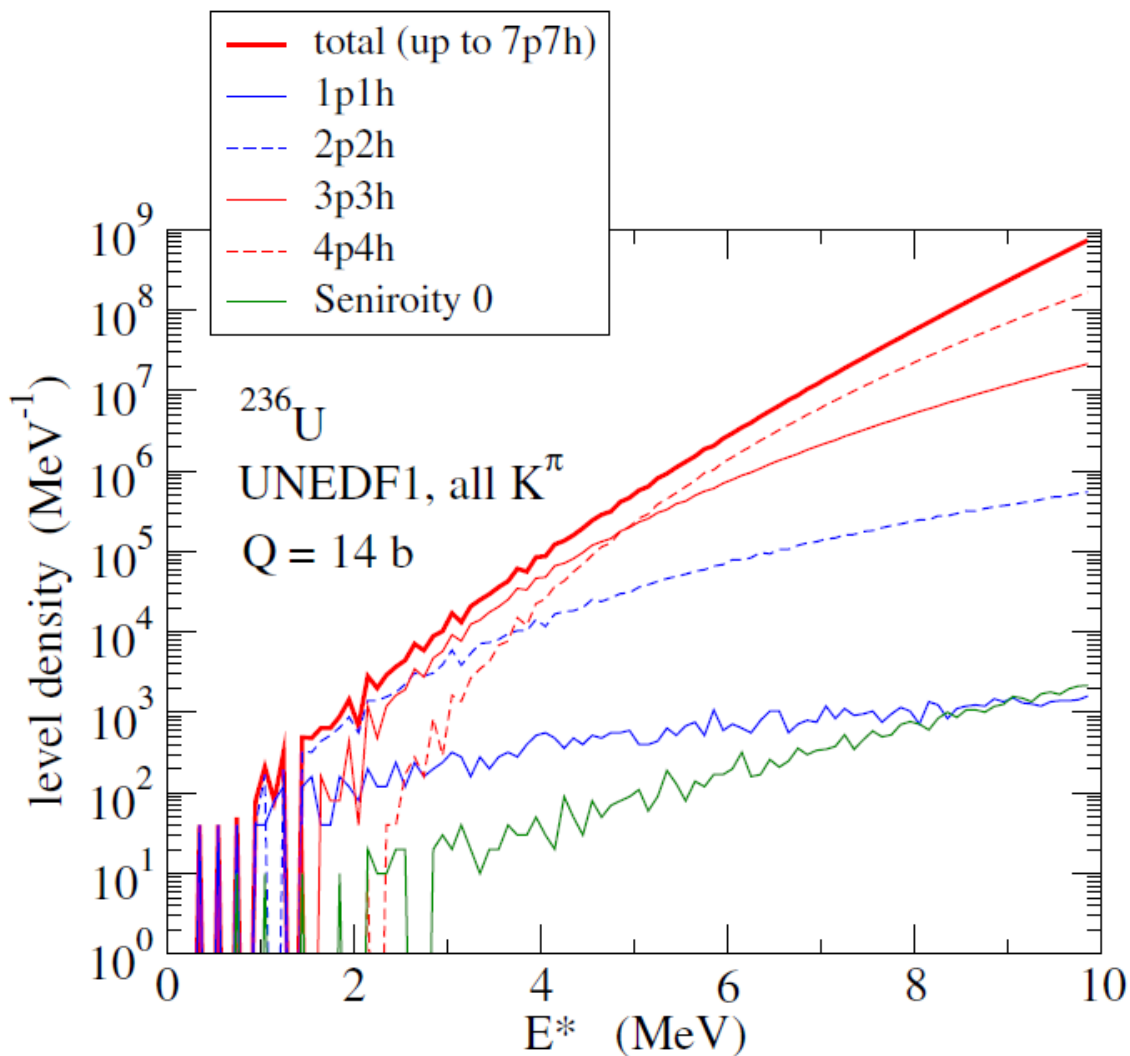
K. Nishio *et al.*,
PRC67, 014604 (2003)

(話題提供) 核分裂反応の微視的記述に向けて

K. Hagino and G.F. Bertsch, on going

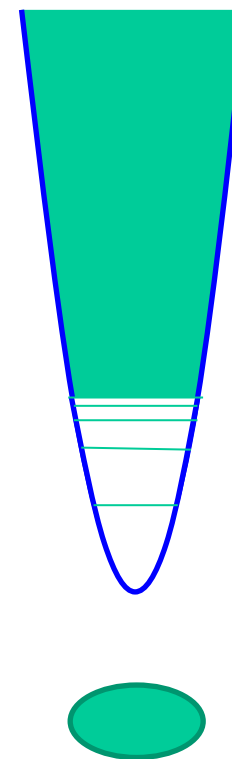
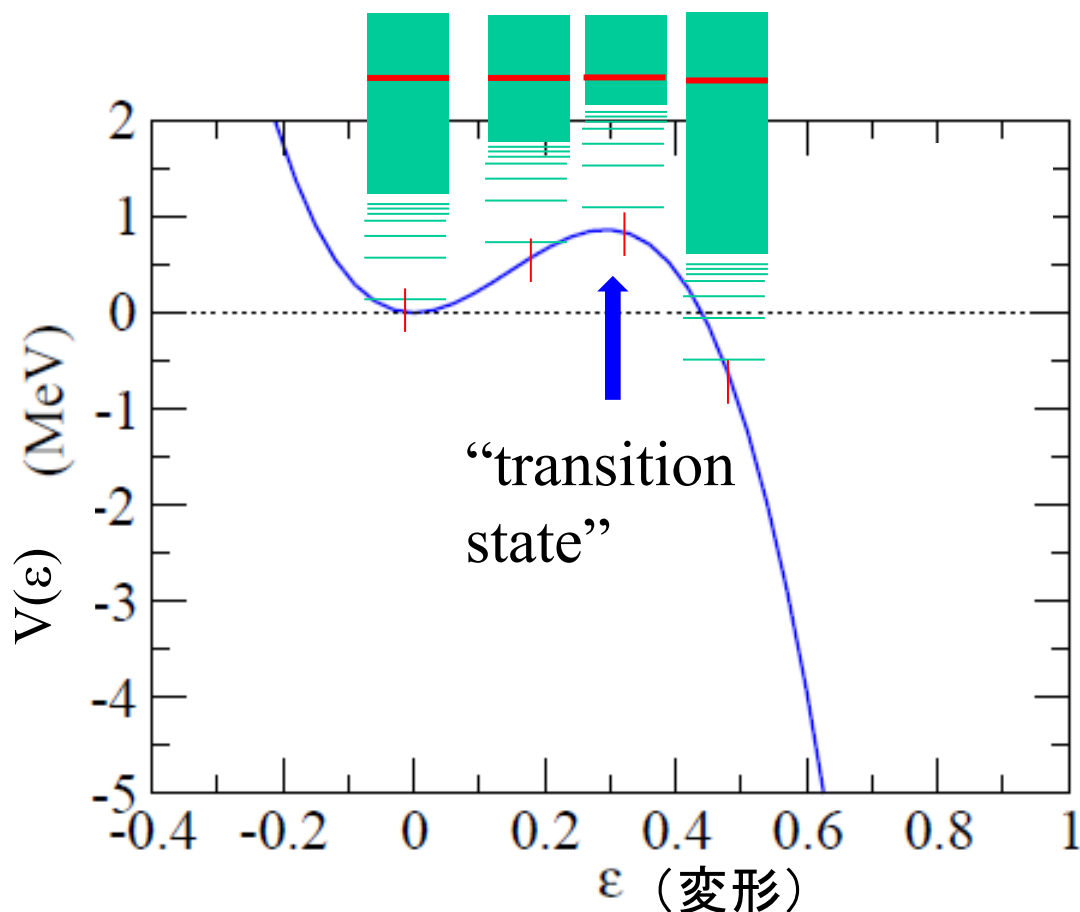


形を決めたときの平均場
ポテンシャルでの準位



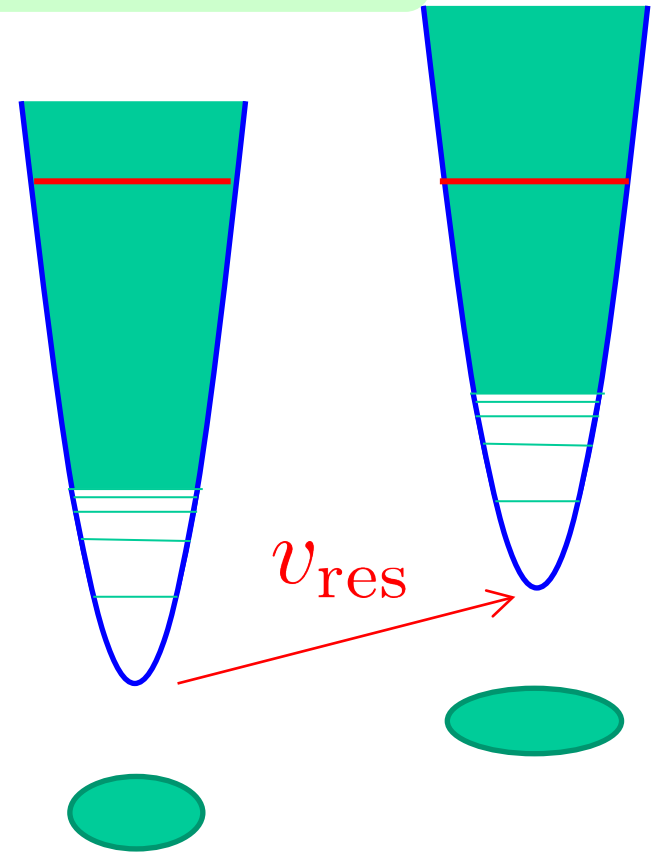
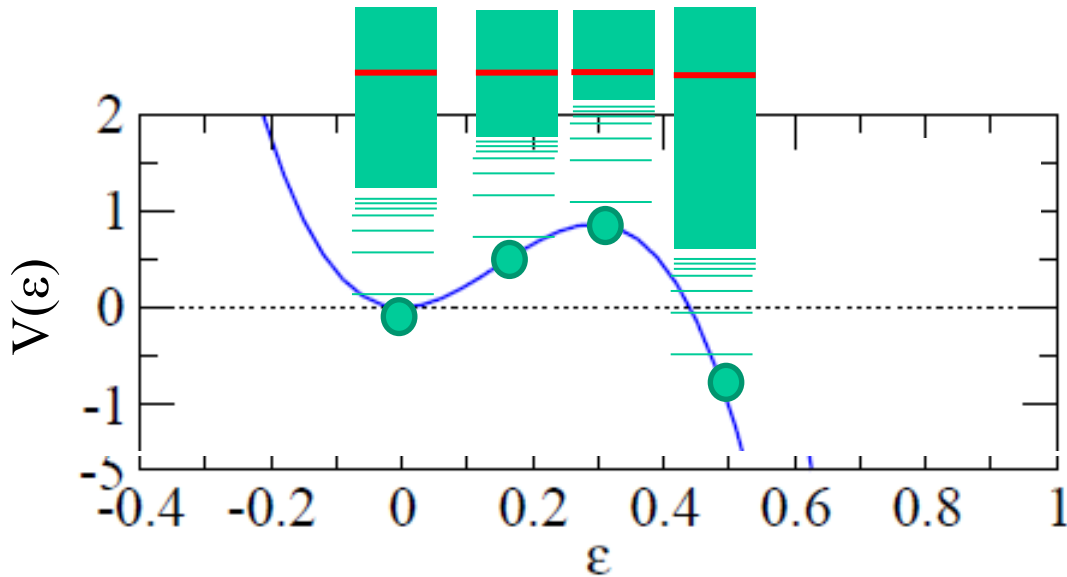
(話題提供) 核分裂反応の微視的記述に向けて

K. Hagino and G.F. Bertsch, on going



形を決めたときの平均場
ポテンシャルでの準位

(話題提供) 核分裂反応の微視的記述に向けて



Generator Coordinate Method (GCM)

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

→ CI approach

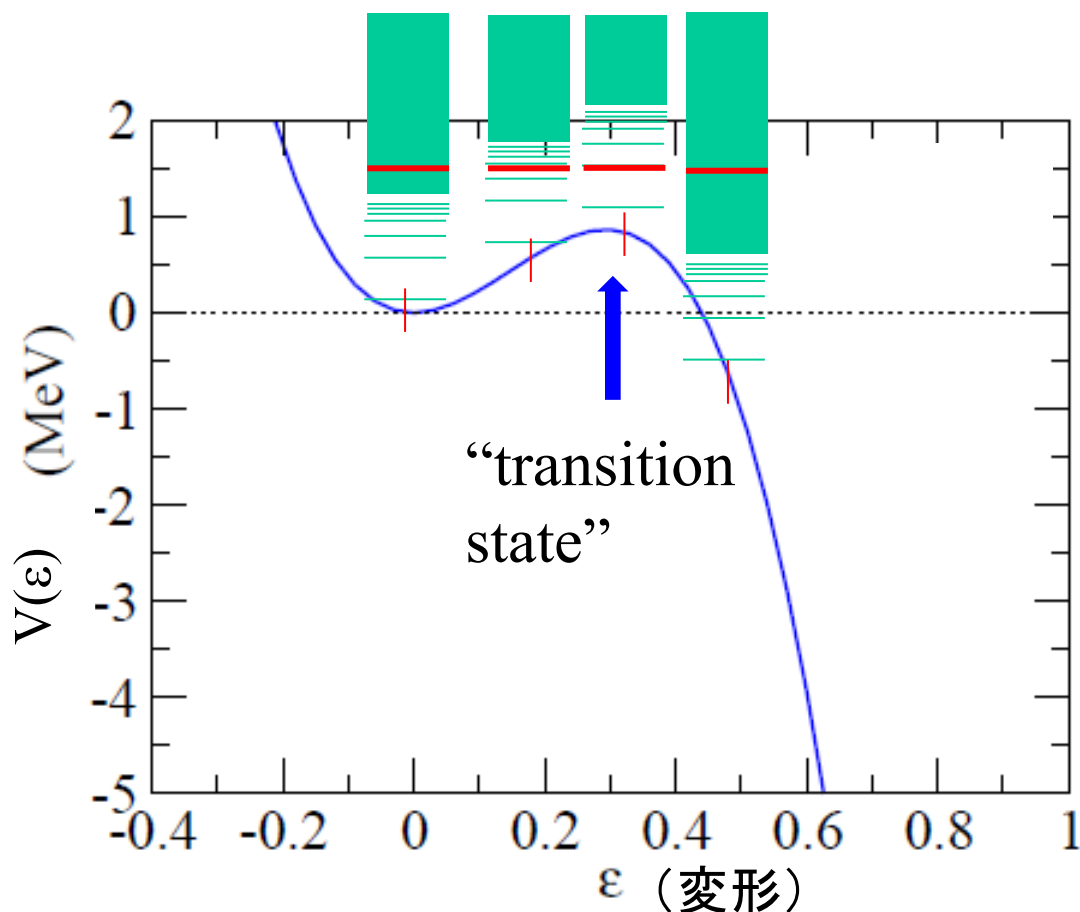
$$|\Psi\rangle = \int dQ \sum_i f_i(Q) |\Phi_Q(i)\rangle$$

残留相互作用による
ホッピング

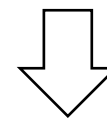
→ 核形状の発展

(話題提供) 核分裂反応の微視的記述に向けて

K. Hagino and G.F. Bertsch, on going

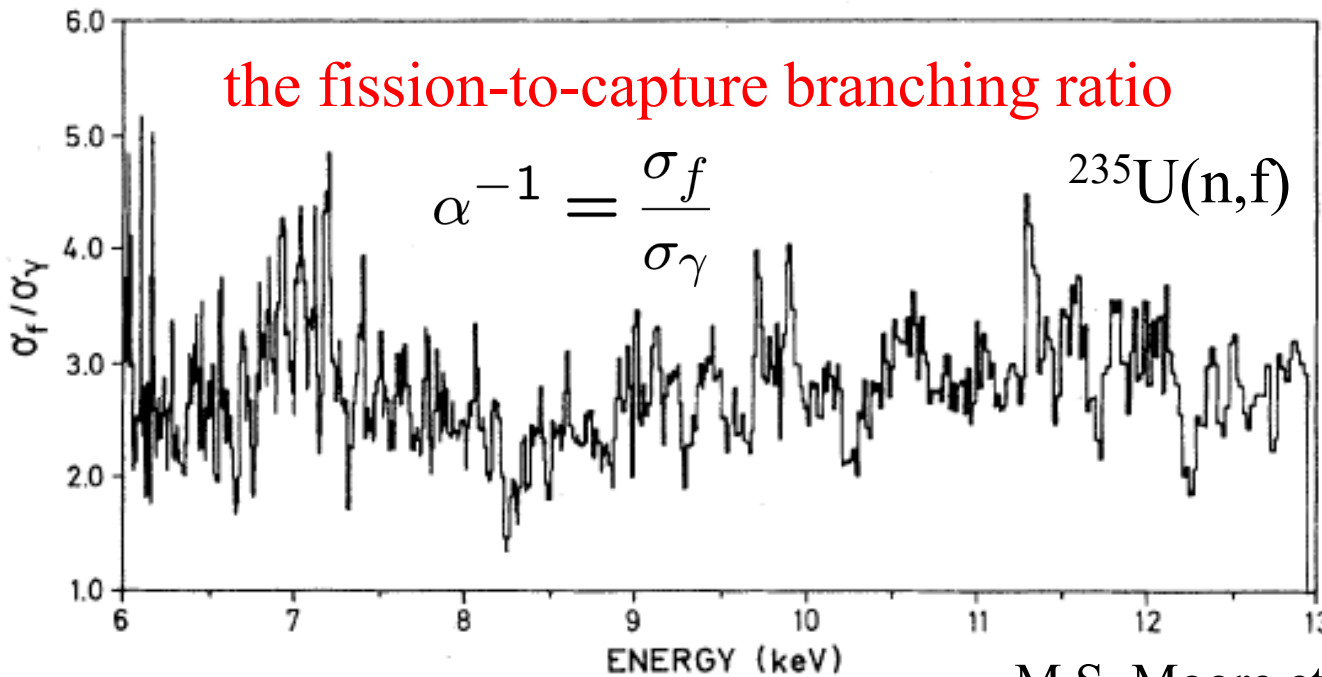
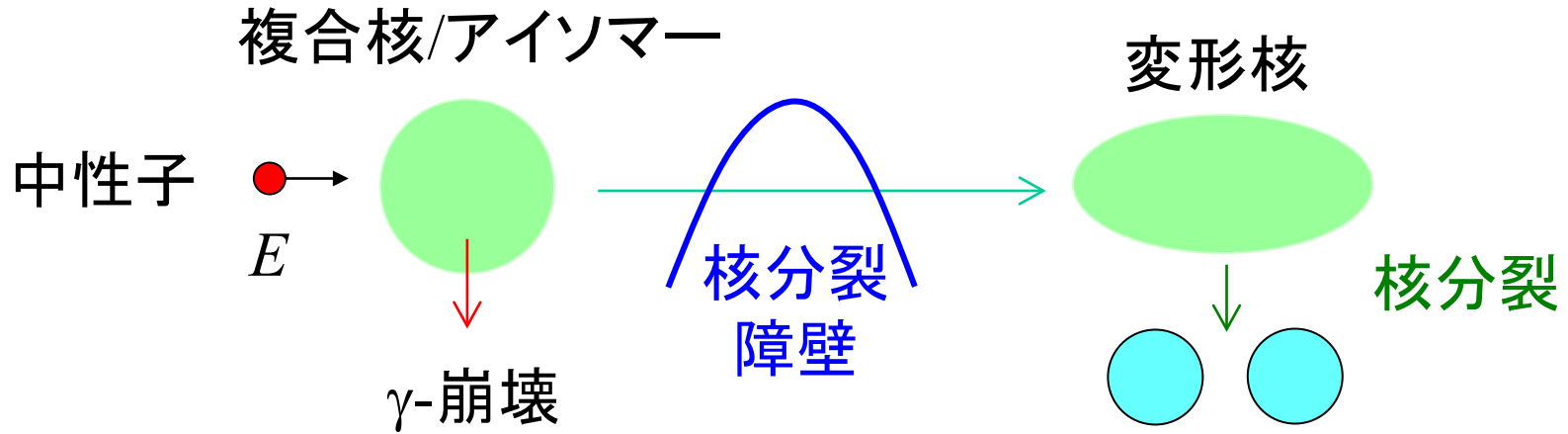


励起エネルギーが低い場合には準位密度がスカスカの領域を通る



- 統計模型の妥当性?
- 微視的記述の必要性

(話題提供) 核分裂反応の微視的記述に向けて

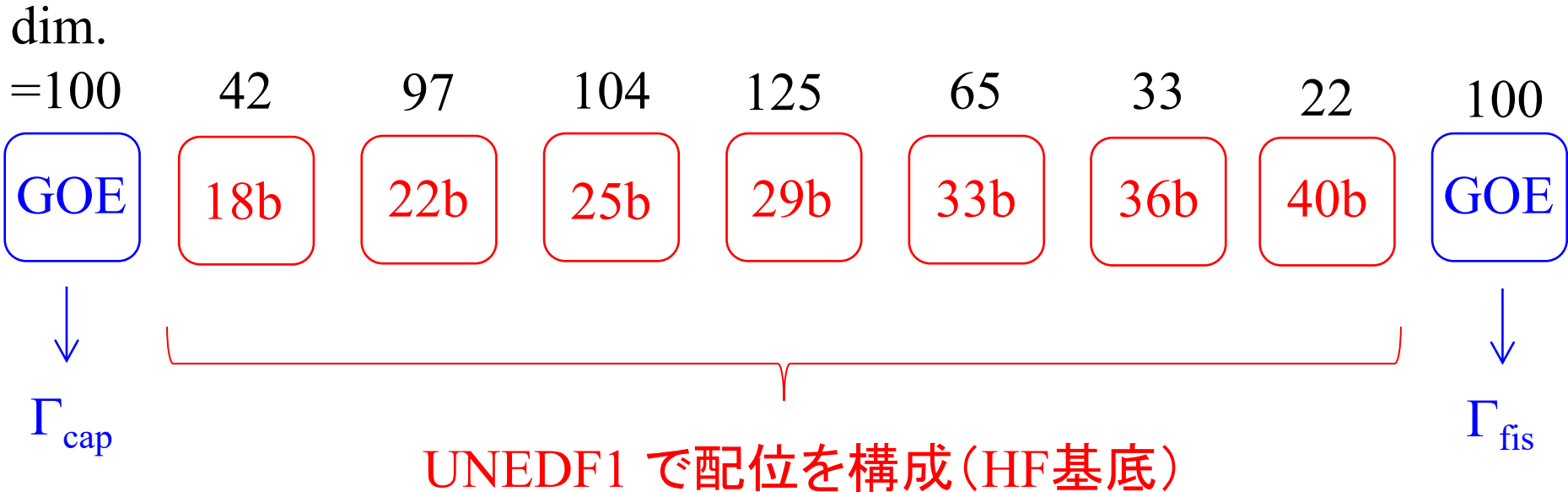


中間的な構造
に敏感な観測量

Skyrme HF (UNEDF1) + GCM を用いた準備的計算

K.H. and G.F. Bertsch, in preparation

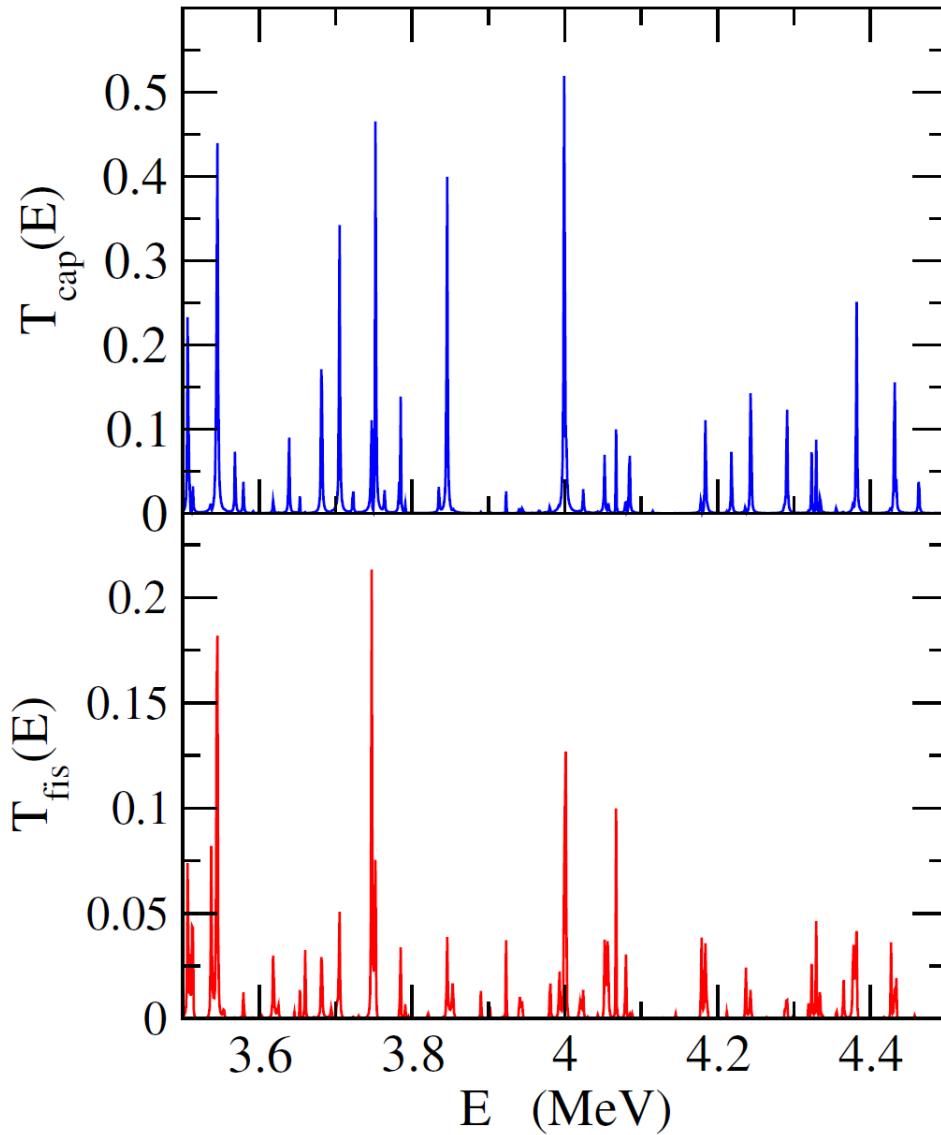
- ✓ ^{236}U : 4 MeV 以下の中性子の励起のみ
(中性子間のpairing 相互作用のみを考慮)
- ✓ 第一障壁近傍のダイナミクス
- ✓ 核分裂障壁は高さが 4 MeV になるように定数倍



Datta公式

$$T_c(E) \propto \sum_{i=c} |(H - EN)_{1i}^{-1}|^2 \Gamma_c \quad (\text{c} = \text{cap or fis})$$

$\Gamma_{\text{cap}}=0.00125$ MeV, $\Gamma_{\text{fis}}=0.00375$ MeV



(i) insensitivity property

Γ_{fis} (MeV)	α^{-1}
0.00375	0.466
0.0075	0.614
0.015	0.683
0.075	0.687

see also: G.F. Bertsch and K.H.,
JPSJ90 ('21) 11405

(ii) N_{GOE} dependence

$\Gamma_{\text{cap}} / \Gamma_{\text{cap}} = 6, 20$ ensembles

N_{GOE}	α^{-1}
100	0.407+/- 0.146
200	0.411+/- 0.151

$N_{\text{GOE}}=100$ is sufficient for CN

$$\rightarrow \alpha^{-1} = \frac{\int dE T_{\text{fis}}(E)}{\int dE T_{\text{cap}}(E)} = 0.466$$

K.H. and G.F. Bertsch, in preparation

まとめ

➤ 重イオン核融合反応とアイソマー

有限のスピン→偏極の効果

偏極により、 θ の重み関数が変わる

➤ 原子核の変形と密度汎関数法

平均場理論: 直感的ではあるが、形の量子ゆらぎが重要
となることがある

→生成座標法(GCM)

➤ 核分裂反応の微視的記述に向けて

模型空間を狭めた計算をしているところ

(将来) 模型空間を広げ、核分裂アイソマー

(2こぶ核分裂障壁) を取り入れた計算を行う

→大規模計算が必要