

# 核子自由度に基づく 誘起核分裂の微視的記述に向けて

萩野浩一

京都大学大学院理学研究科



G.F. Bertsch (Seattle)

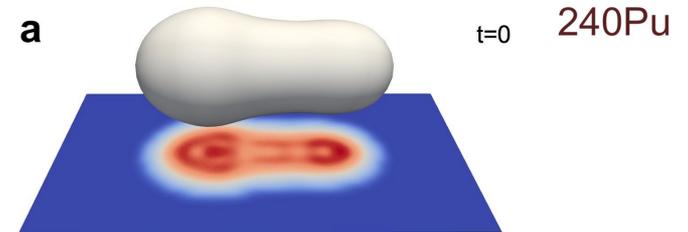
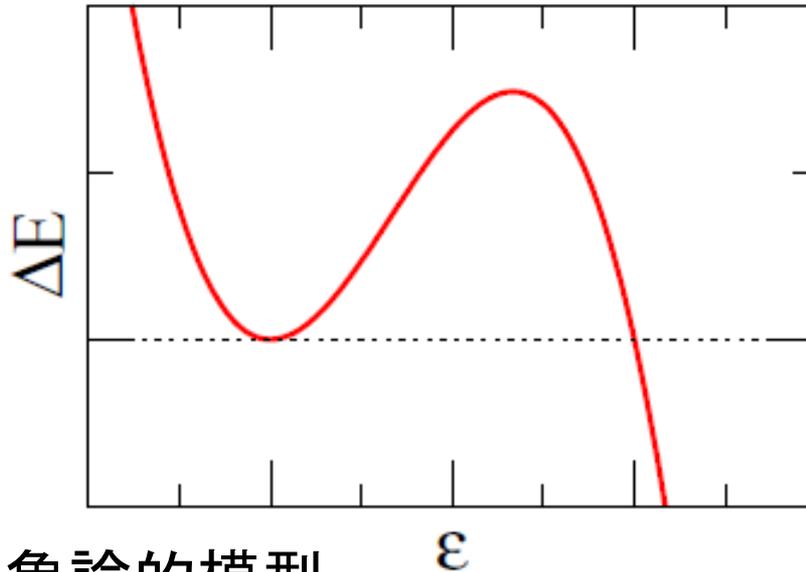
鵜沢浩太郎(京大D1)

1. r-process と中性子過剰核の核分裂
2. 微視的アプローチの必要性
3. 殻模型を使って核分裂を記述できないか？
4. まとめ

# はじめに: 核分裂現象

## ➤ 液滴模型

表面エネルギーとクーロンエネルギーの競合 → 核分裂障壁

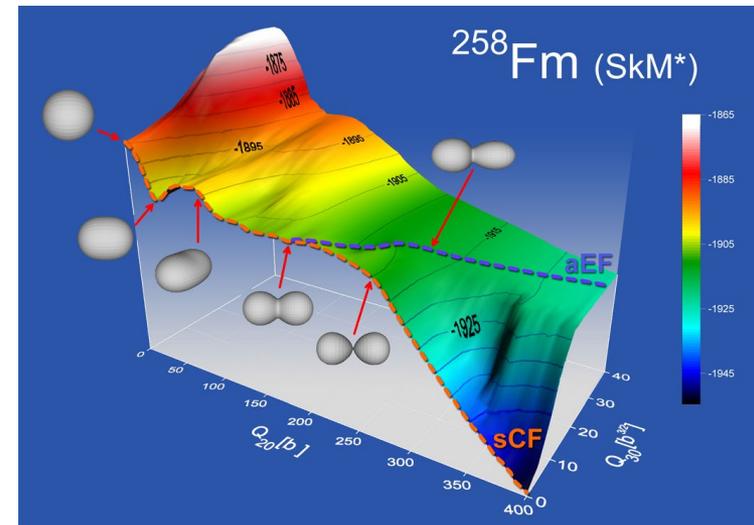


- ✓ 現象論的模型
- ✓ 統計模型

## ➤ 多核子系のハミルトニアンに基づく微視的理解

→ まだまだこれから

- ✓ 原子核形状の大きな変化



A. Staszczak, A. Baran, J. Dobaczewski, and W. Nazarewicz, PRC80 ('09) 014309

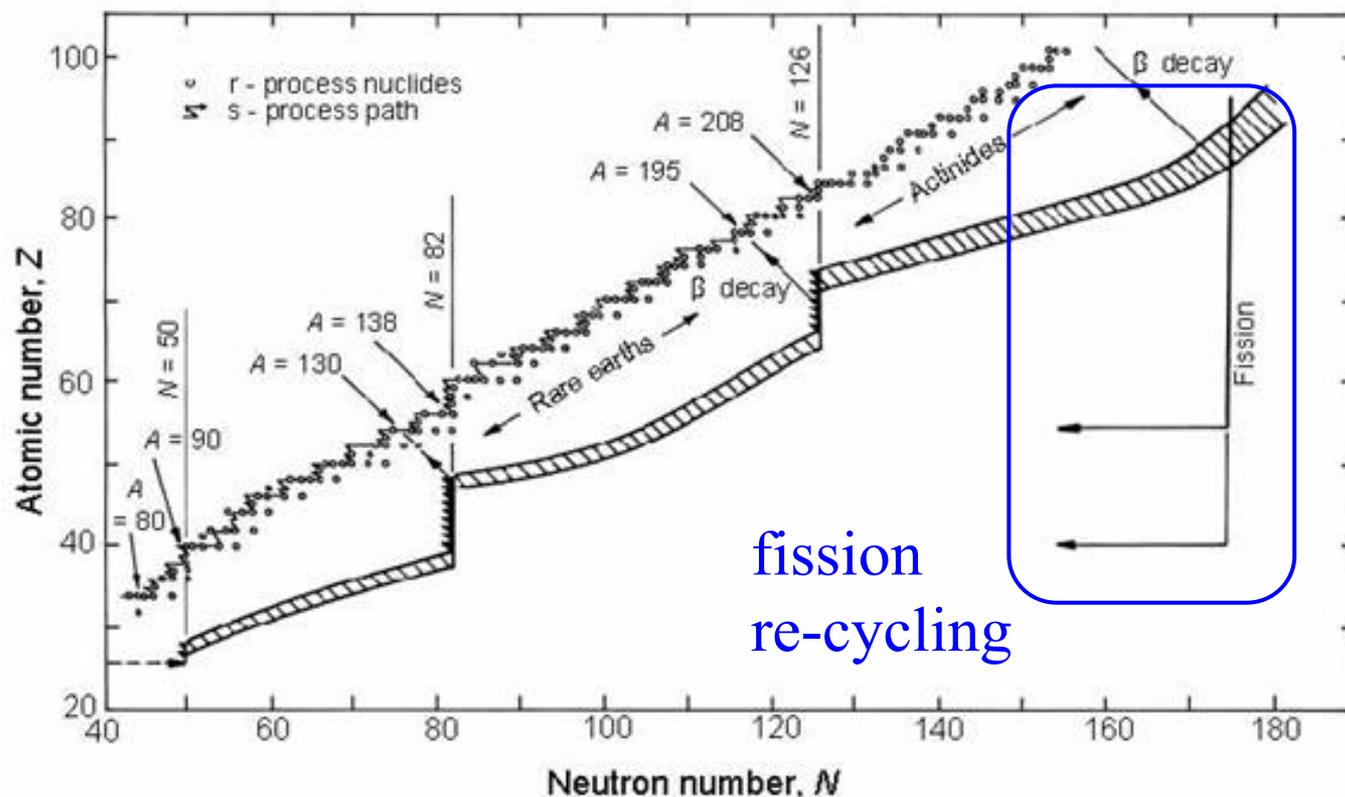
# rプロセスと核分裂

## ➤ 中性子過剰核の核分裂

- ✓ 中性子誘起核分裂
- ✓  $\beta$ 遅延核分裂
- ✓ 自発核分裂

## ➤ 重要な物理量

- ✓ 質量分布
- ✓ 電荷分布
- ✓ 崩壊分岐比  
(捕獲、核分裂、 $\beta$ 崩壊)



# rプロセスと核分裂

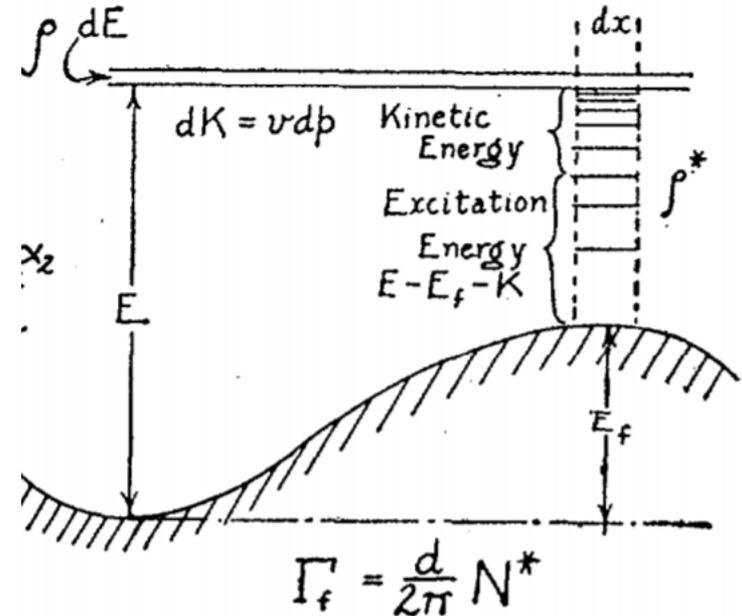
## ➤ 中性子過剰核の核分裂

- ✓ 中性子誘起核分裂
- ✓  $\beta$ 遅延核分裂
- ✓ 自発核分裂

## ➤ 重要な物理量

- ✓ 質量分布
- ✓ 電荷分布
- ✓ 崩壊分岐比  
(捕獲、核分裂、 $\beta$ 崩壊)

- ✓ low  $E^*$
- ✓ low  $\rho(E^*)$



N. Bohr and J.A. Wheeler,  
Phys. Rev. 56, 426 (1939)

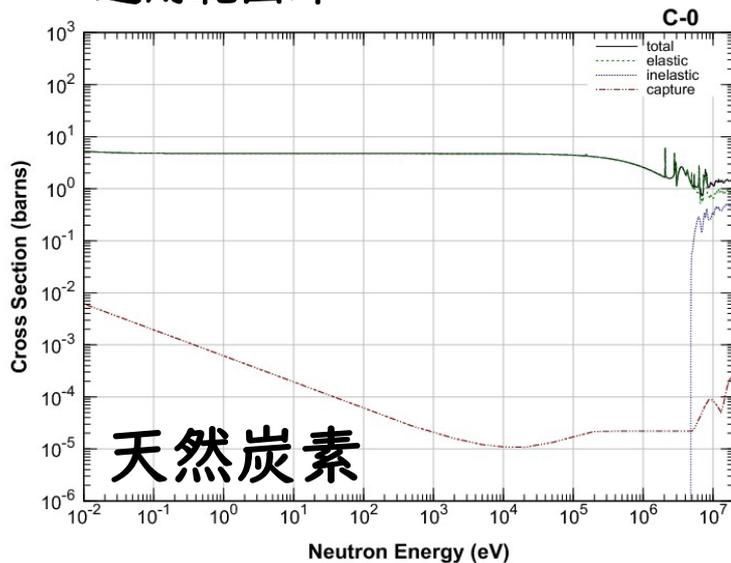
→ 統計模型の妥当性?  
ランジュバン法の妥当性?

## ➤ 微視的アプローチが必須

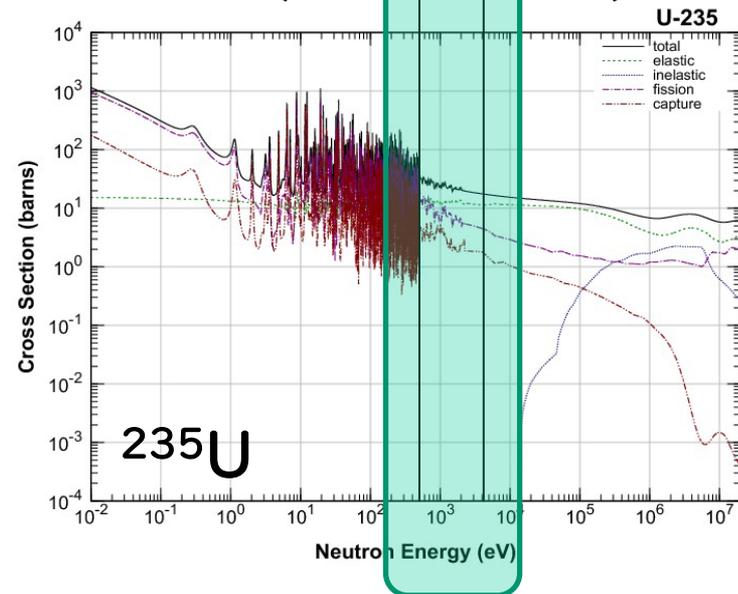
- ✓ 多体系のハミルトニアンとどうつなぐ?

# Hauser-Feshbach 統計モデルは共鳴が十分に多いエネルギー領域でなければ正しい記述ができない

このエネルギー範囲では、  
Hauser-Feshbachモデルは  
適用範囲外

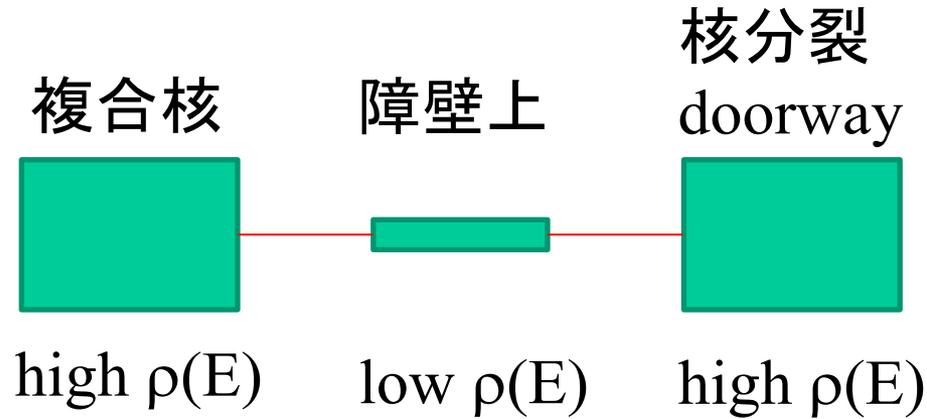
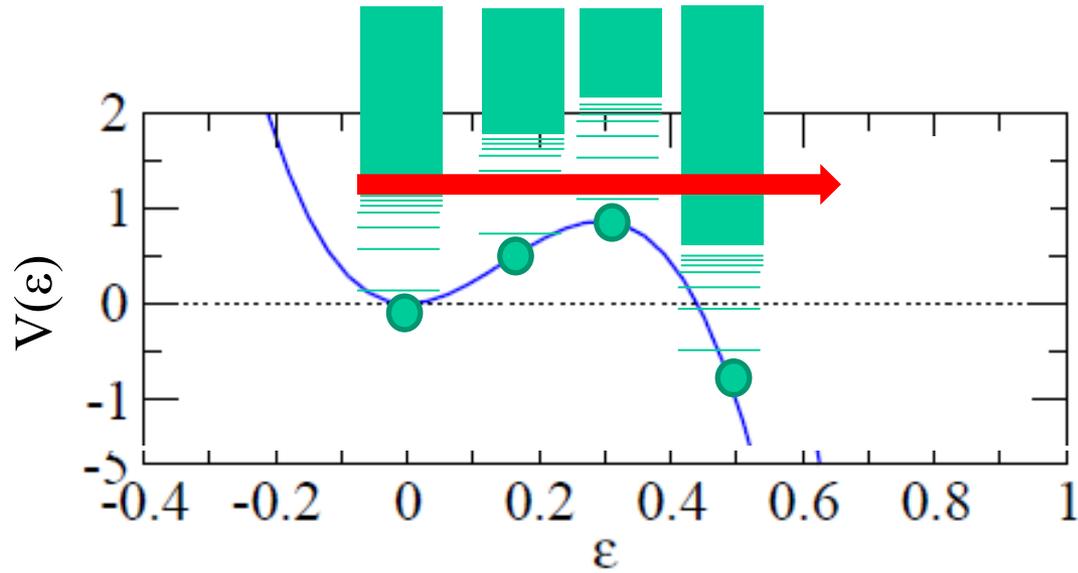


Hauser-Feshbach モデルの適用範囲外 ← → Hauser-Feshbach  
モデルの適用範囲



この領域を理解したい  
→ 多体ハミルトニアンに基づく記述  
が必要

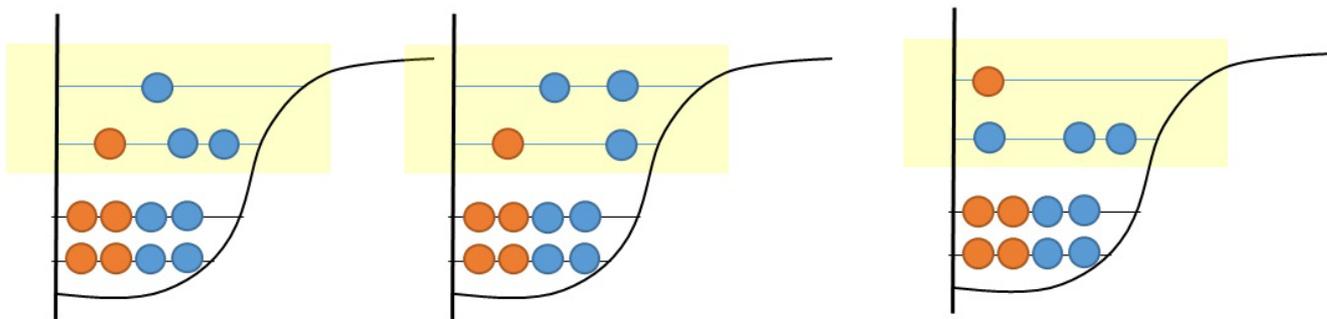
# barrier-top fission



離散準位を取り扱う必要がある

# 殻模型の可能性?

殻模型



$$|\Psi\rangle = v_1|m_1\rangle + v_2|m_2\rangle + v_3|m_3\rangle + \dots$$

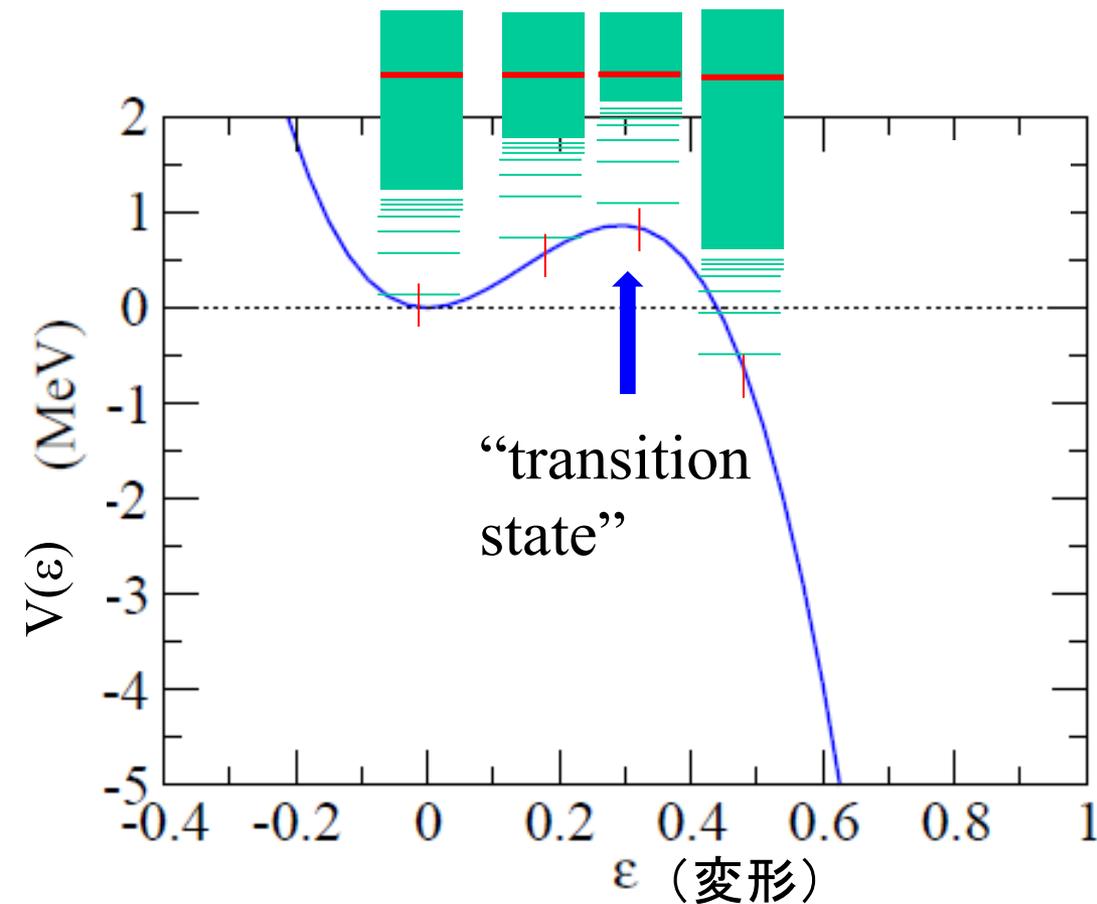
図: 清水則孝氏

平均場ポテンシャル中の多粒子多空孔配位  
→ 残留相互作用による混合

同様のアプローチを核分裂でできないか?

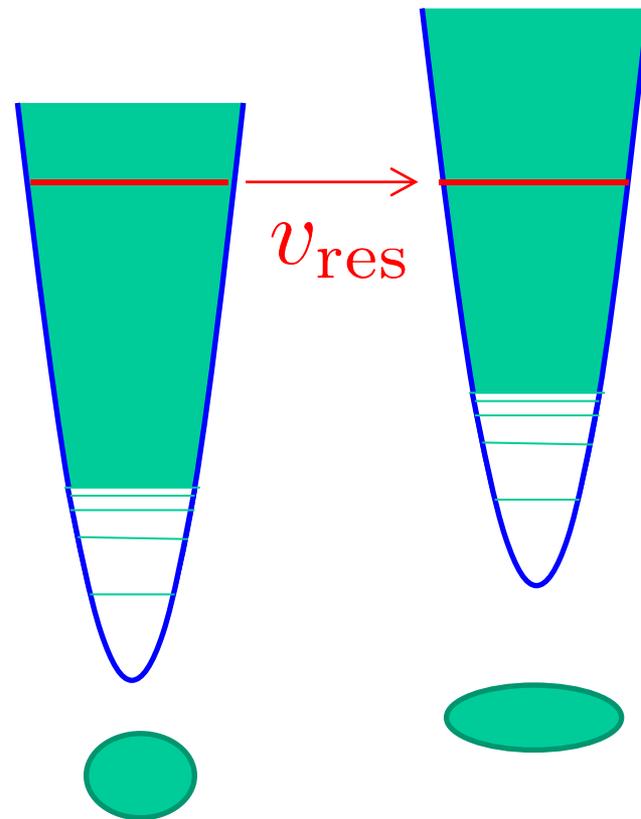
→ 反応理論との親和性がよい

# 殻模型の可能性?



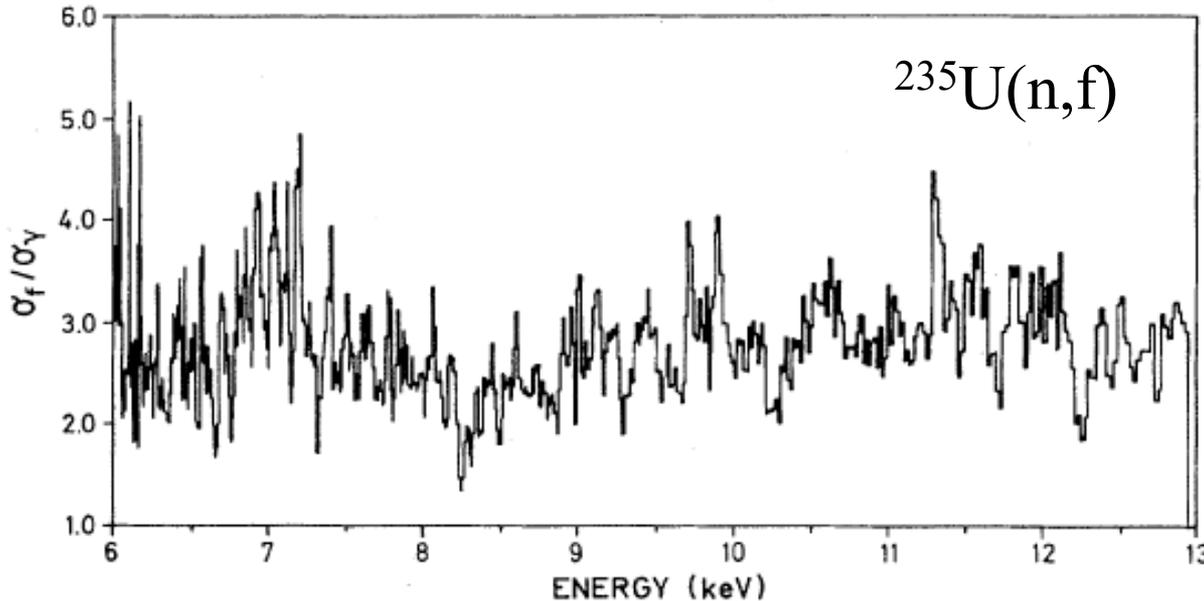
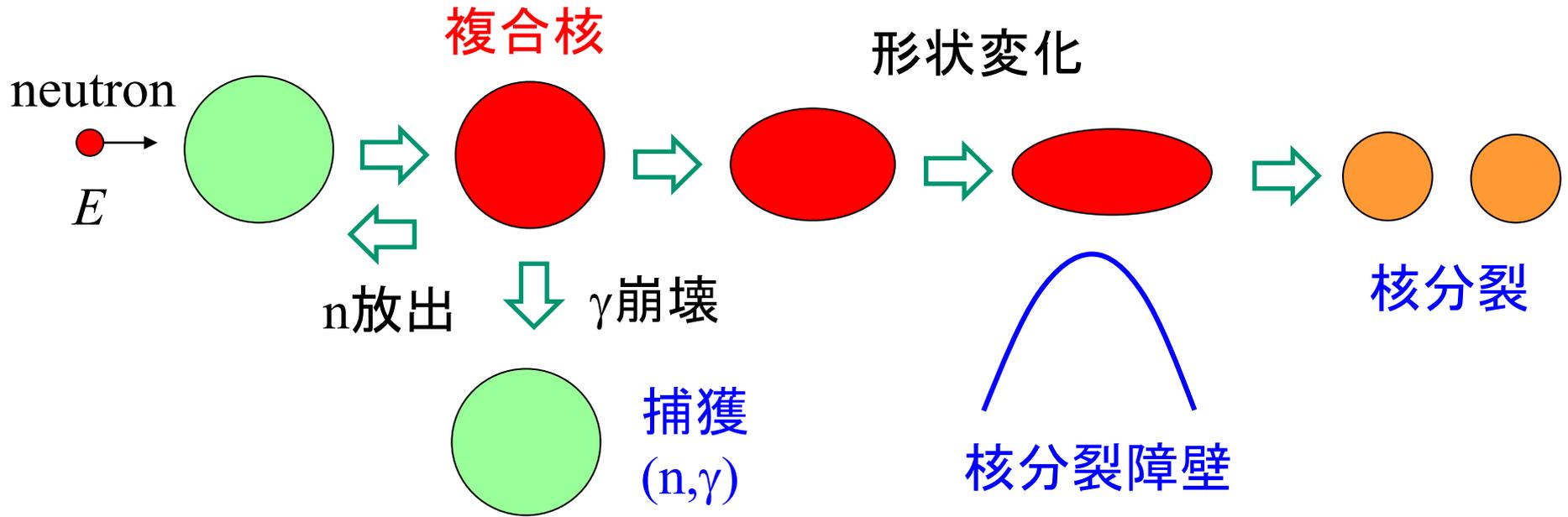
$$|\Psi\rangle = \int dQ \sum_i f_i(Q) |\Phi_Q(i)\rangle$$

励起状態を取り入れたGCM



- 形を決めたときの平均場ポテンシャルでの準位による配位 (非直交)
- 残留相互作用によるホッピング → 形状変化

# どういふ問題を考えるか



## 核分裂と捕獲の分岐比

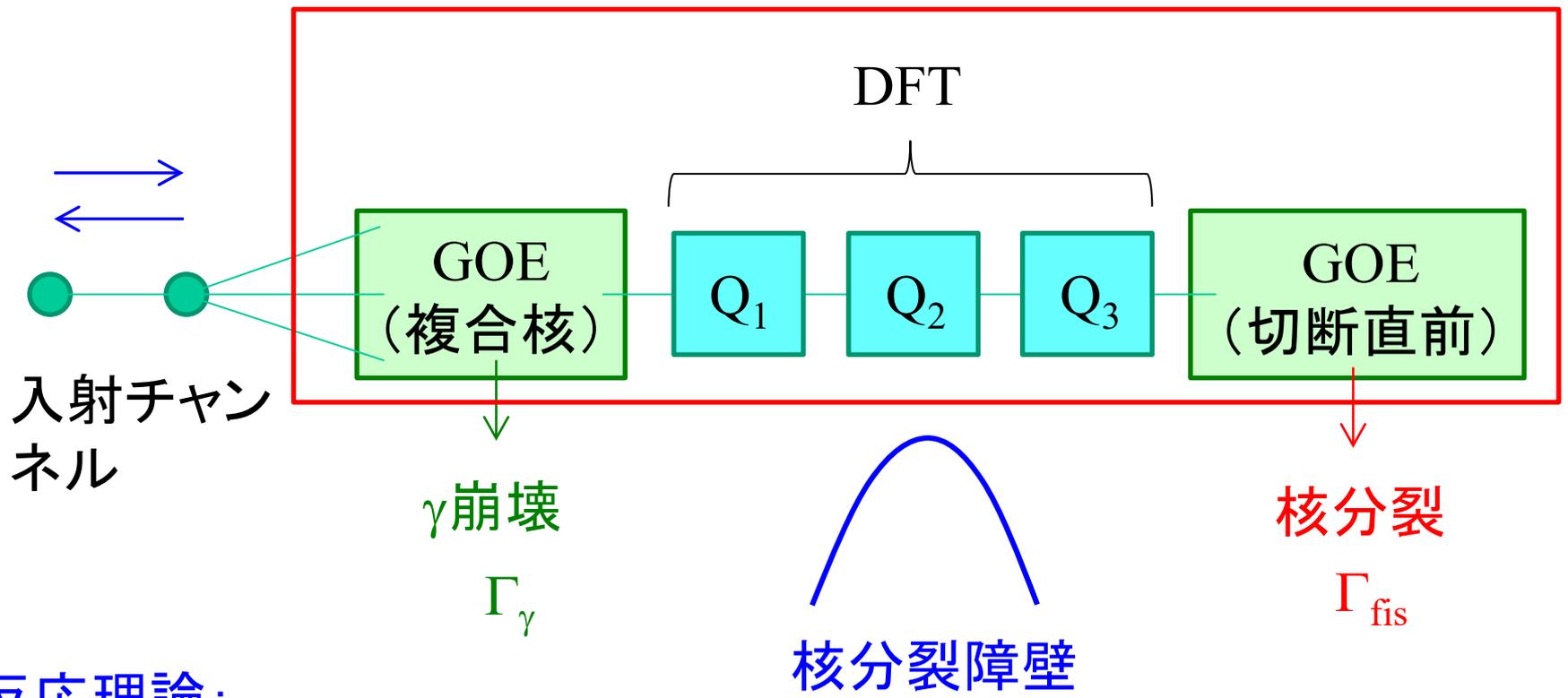
$$\alpha^{-1} = \frac{\sigma_f}{\sigma_\gamma}$$

中間的な構造  
に敏感な観測量

M.S. Moore et al.,  
PRC30 ('84) 214

# どういう問題を考えるか

$H$



反応理論:

$$T_{\text{fis}} = \text{Tr}[\Gamma_{\text{in}} G(E) \Gamma_{\text{fis}} G^\dagger(E)]$$
$$T_{\text{cap}} = \text{Tr}[\Gamma_{\text{in}} G(E) \Gamma_{\gamma} G^\dagger(E)]$$

「Datta 公式」

$$G(E) = [H - i\Gamma/2 - EO]^{-1}$$

# Skyrme Hartree-Fock 法による計算

G.F. Bertsch and K.H., arXiv: 2302.00572 (nucl-th)

種々の簡単化:

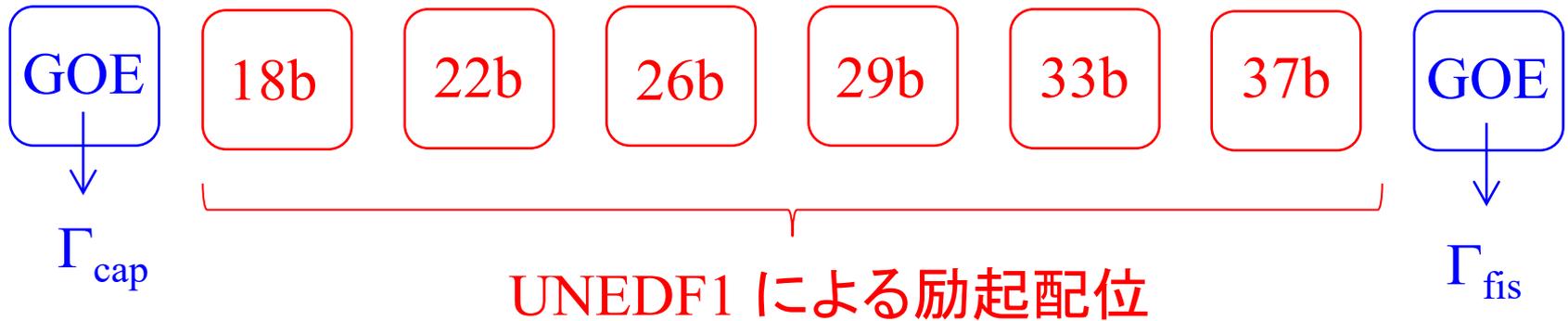
- ✓  $^{236}\text{U}$ : 4 MeVまでの中性子励起配位のみを考慮
- ✓ 第一障壁近傍のダイナミクス: 軸対称を考える
- ✓ seniority ゼロの配位のみを考慮:  $(K, -K)$  が占有
- ✓ 核分裂障壁は 4 MeV にスケールする



714次元のハミルトニアン行列(隣接する配位のみが結合)

# Skyrme Hartree-Fock 法による計算

G.F. Bertsch and K.H., arXiv: 2302.00572 (nucl-th)



✓ overlap:  $\langle \Psi_\mu(Q) | \Psi_\mu(Q') \rangle \sim e^{-(\Delta\zeta)^2} \sim e^{-1}$

✓ pairing:  $v_{\text{pair}} = -GP^\dagger P$

G ← Q=14 b で  $^{236}\text{U}$  の  $E_{0+}^*$  を再現するように決定

✓ diabatic:

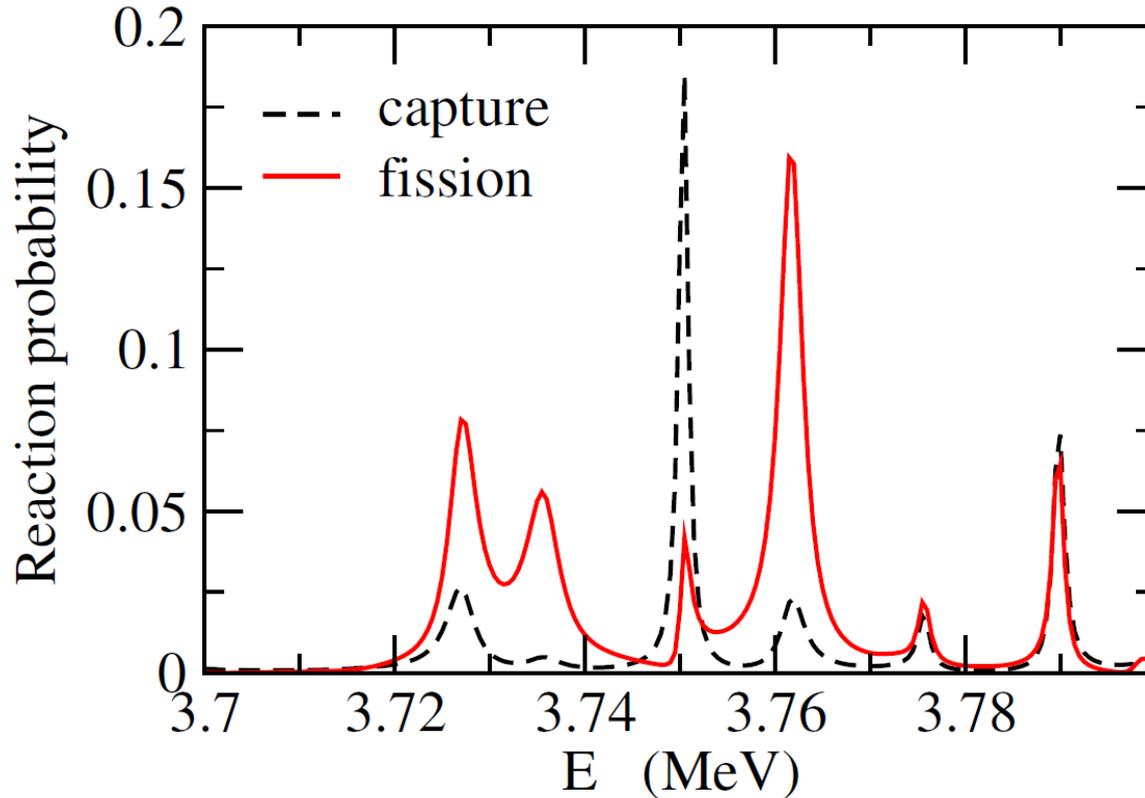
$$\langle \Psi_\mu(Q) | H | \Psi_\mu(Q') \rangle \sim \langle \Psi_\mu(Q) | \Psi_\mu(Q') \rangle \left( \frac{E_\mu(Q) + E_\mu(Q')}{2} - h_2(\Delta\zeta)^2 \right)$$

$h_2 = 1.5 \text{ MeV} \leftarrow \text{DFTによる平均値}$

✓  $\Gamma_{\text{cap}}$ : 実験データ ( $N_{\text{GOE}}$  に応じてスケール)、  $\Gamma_{\text{fis}}$ : insensitivity

$$T_{\text{fis}}(E) = \text{Tr}[\Gamma_{\text{in}}G(E)\Gamma_{\text{fis}}G^\dagger(E)]$$

$$T_{\text{cap}}(E) = \text{Tr}[\Gamma_{\text{in}}G(E)\Gamma_{\gamma}G^\dagger(E)]$$



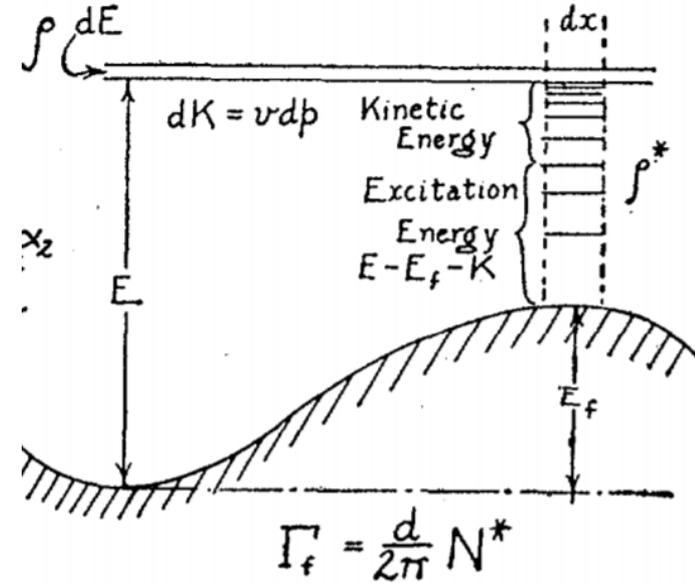
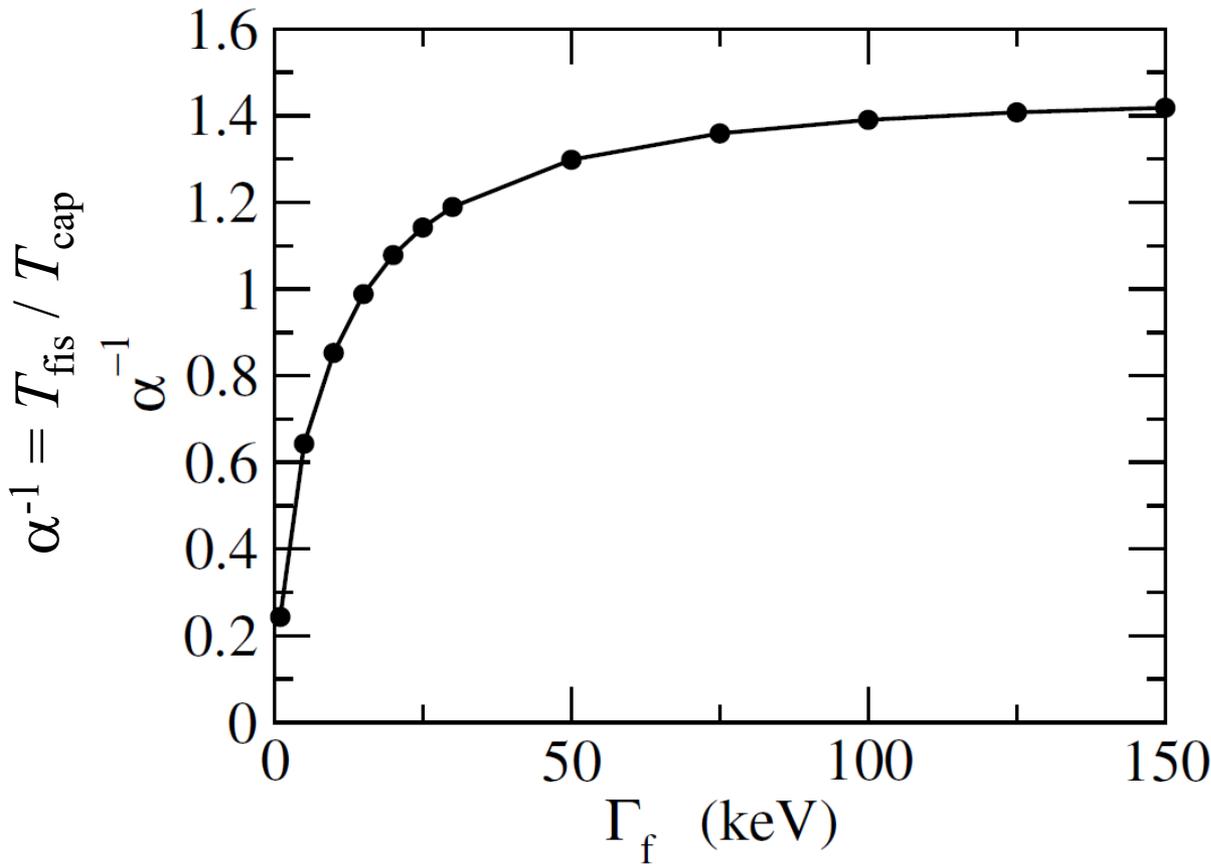
$$\begin{aligned}\Gamma_{\text{in}} &= 0.01 \text{ MeV} \\ \Gamma_{\text{cap}} &= 0.00125 \text{ MeV} \\ \Gamma_{\text{fis}} &= 0.015 \text{ MeV}\end{aligned}$$

$$\alpha^{-1} = \frac{\int_{\Delta E} T_{\text{fis}}(E')dE'}{\int_{\Delta E} T_{\text{cap}}(E')dE'}$$

$$\Delta E = 0.5 \text{ MeV}$$

# insensitivity property

$E = 3.5 \text{ MeV}$



- ・崩壊分岐比は  $\Gamma_f$  にほとんど依らない → TSTの仮定を微視的に再現
- ・ただし、崩壊チャンネルは多くの励起配位を經由  
→ TST の考えとは大分違う

## sensitivity test

$$h_2 \rightarrow 2h_2$$

$$G_{\text{pair}} = 0.2 \text{ MeV}$$

$$h_2 = 0.3 \text{ MeV}$$

$$\rightarrow \alpha^{-1} = 1.10$$

基本セット

$$G_{\text{pair}} = 0.2 \text{ MeV}$$

$$h_2 = 0.15 \text{ MeV}$$

$$\rightarrow \alpha^{-1} = 0.95$$

$$G_{\text{pair}} \rightarrow G_{\text{pair}}/2$$

$$G_{\text{pair}} = 0.1 \text{ MeV}$$

$$h_2 = 0.15 \text{ MeV}$$

$$\rightarrow \alpha^{-1} = 0.37$$

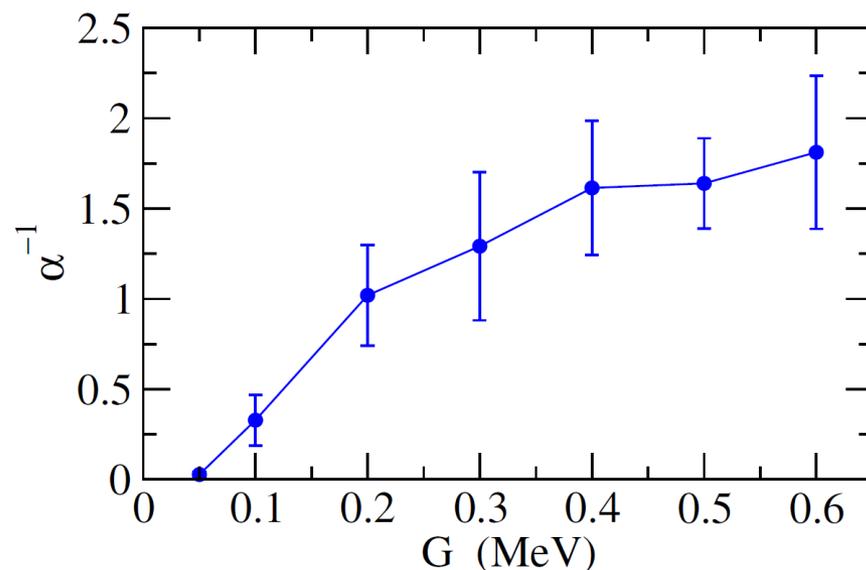
$$h_2 \rightarrow 0$$

$$G_{\text{pair}} = 0.2 \text{ MeV}$$

$$h_2 = 0.0 \text{ MeV}$$

$$\rightarrow \alpha^{-1} = 0.13$$

cf.  $\alpha^{-1}_{\text{exp}} \sim 3.0$



- 自発核分裂ほどではないが、対相関に敏感
- $h_2$ の効果は無視できないが、ある程度大きい値にとれば依存性は小さい

# まとめ

## r-プロセス: 中性子過剰核の核分裂

low  $E^*$ , low  $\rho(E^*)$ に対応できる(微視的)アプローチが必要

➡ 殻模型 + GCMの手法を開発中

Skyrme 力を用いた  $^{236}\text{U}$  の誘起核分裂  
に適用

- ✓ 中性子励起のみ
- ✓ 対相関と透過基底間遷移のみ
- ✓ 4 MeV で打ち切り

→ 対相関の重要性

今後の課題: 対が壊れる配位も含める → pn 間の残留相互作用

次のトークで議論(鵜沢君)

ただし、大次元の計算が必要になる ( $\sim 10^6$ 次元)

