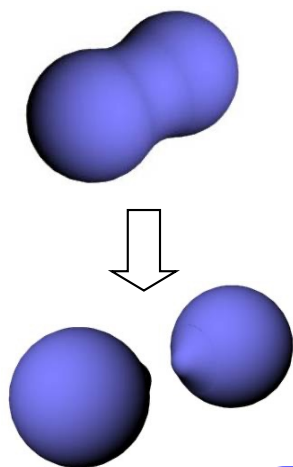


量子開放系としての原子核における 非平衡ダイナミクス



萩野浩一（京都大学）



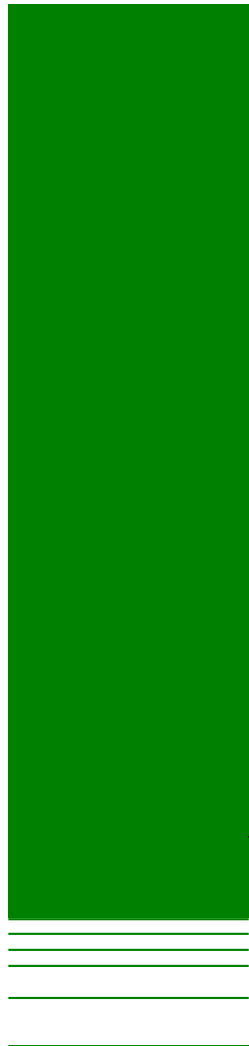
1. はじめに: 量子開放系としての原子核
2. 超重元素生成反応
3. 誘起核分裂と非平衡グリーン関数法
4. まとめ

日本物理学会2024年春季大会 2024年3月18日～21日、オンライン
シンポジウム「極限非平衡現象から探る宇宙における物質と構造の創生」

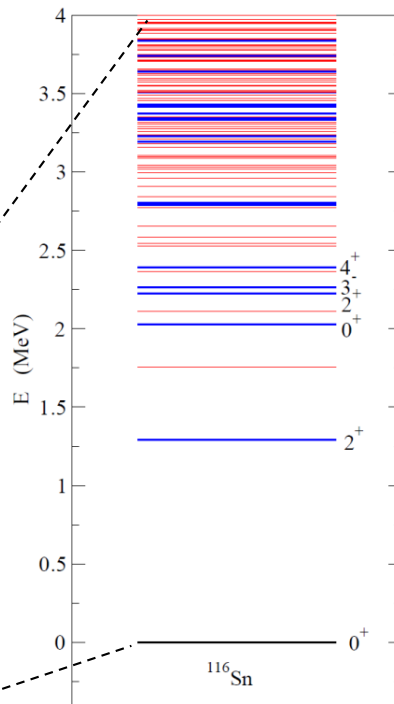
はじめに: 量子開放系としての原子核

原子核: 孤立系 → 通常の意味では外界との接触はなし (閉じた系)

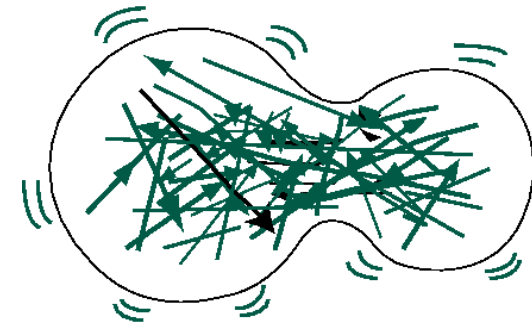
E^*



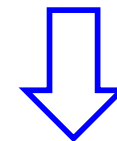
$$\rho(E) \sim e^{2\sqrt{aE^*}}$$



原子核のスペクトル



核反応の途中で原子核が複雑に励起



原子核の内部自由度: 「環境」
「内的環境自由度」

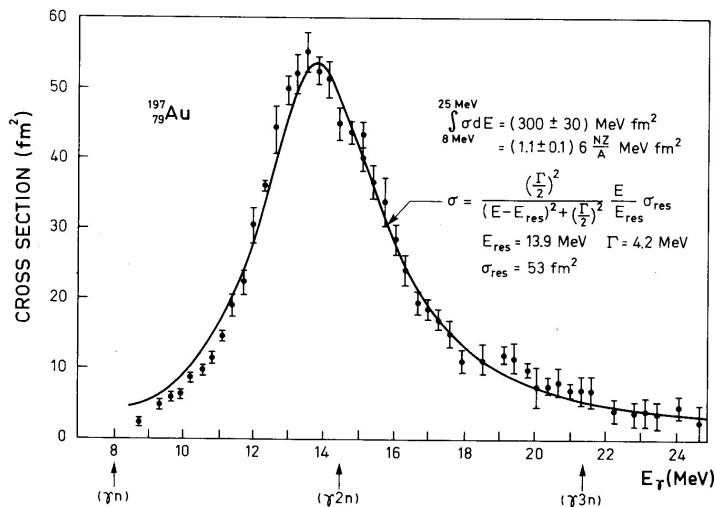
→ 量子開放系の物理

はじめに: 量子開放系としての原子核

原子核における摩擦(粘性)現象の例

cf. 吉田思郎、日本物理学会誌 31 (1976) 607.

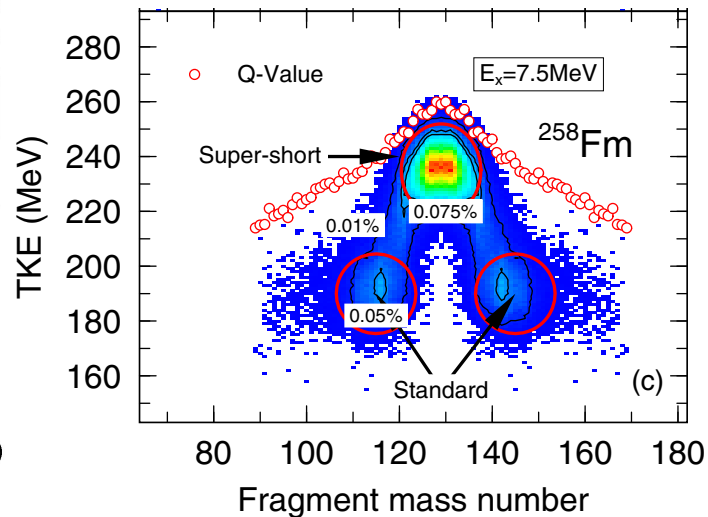
□ 巨大共鳴の幅



このトーク:

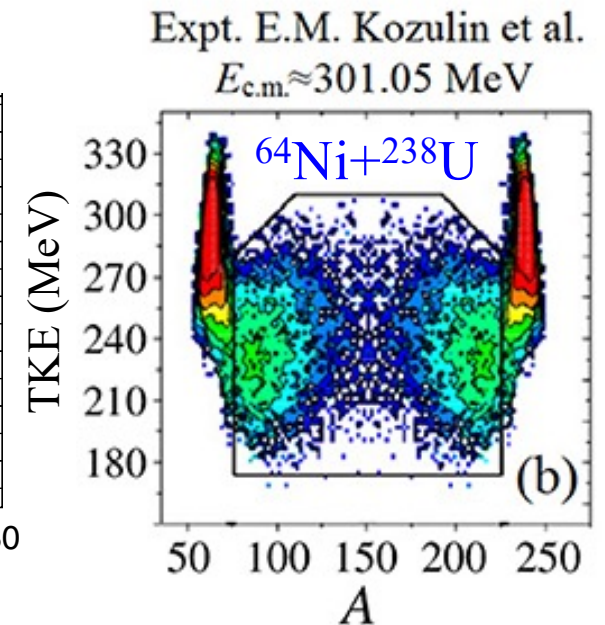
- ✓ 超重元素生成反応
- ✓ 誘起核分裂

□ 核分裂



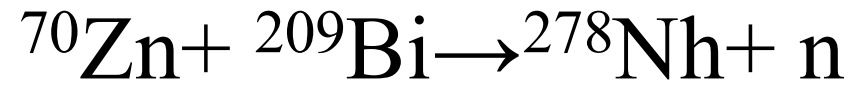
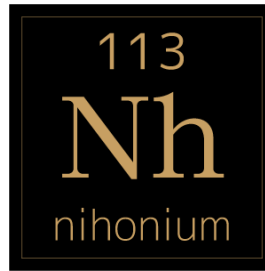
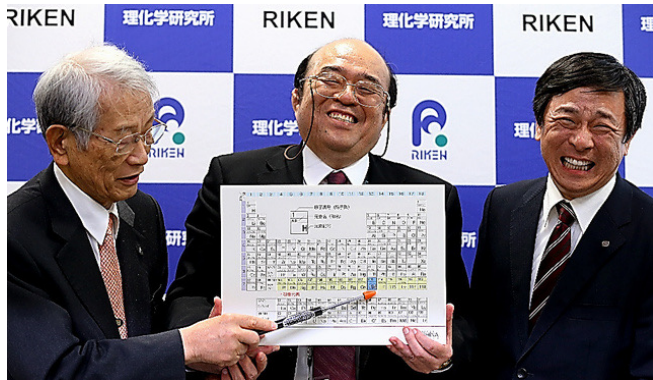
C. Ishizuka et al.,
PRC96 ('17) 064616

□ 重イオン深部非弾性散乱

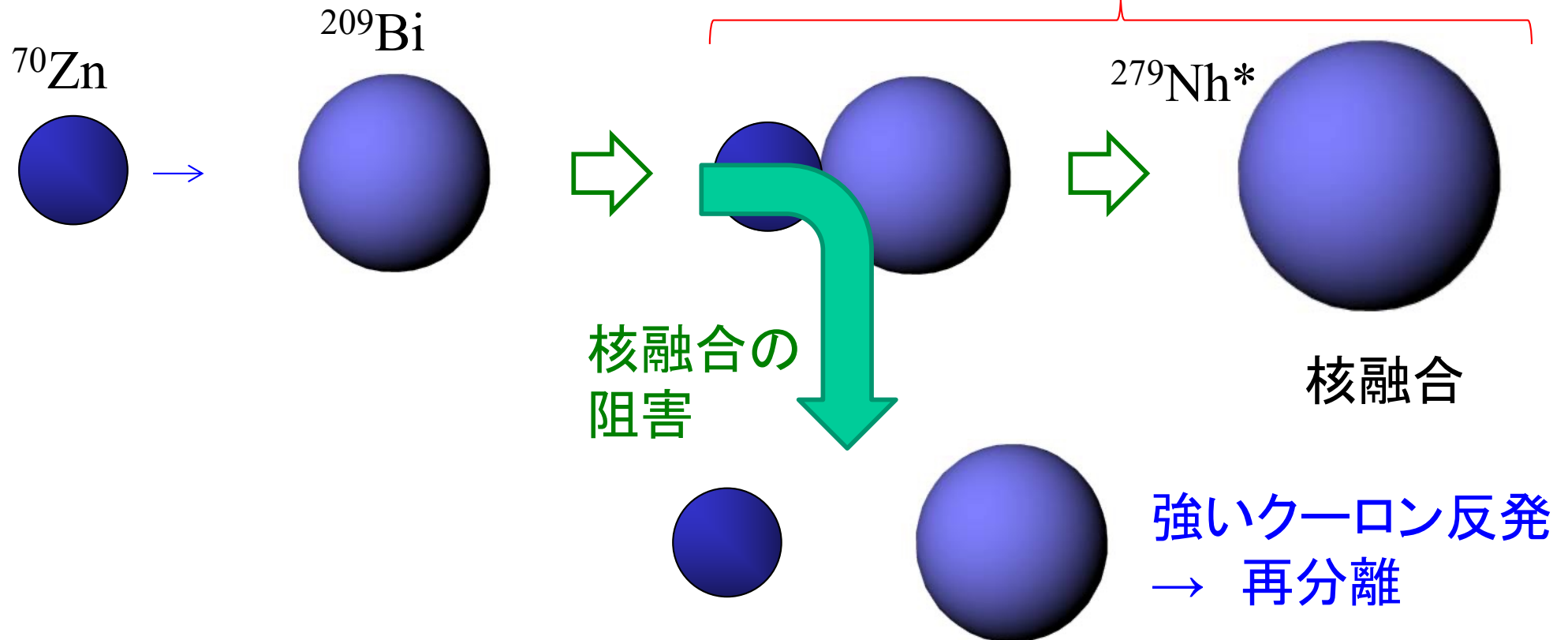


A figure from:
K. Sekizawa,
Front. Phys. 7 (2019)

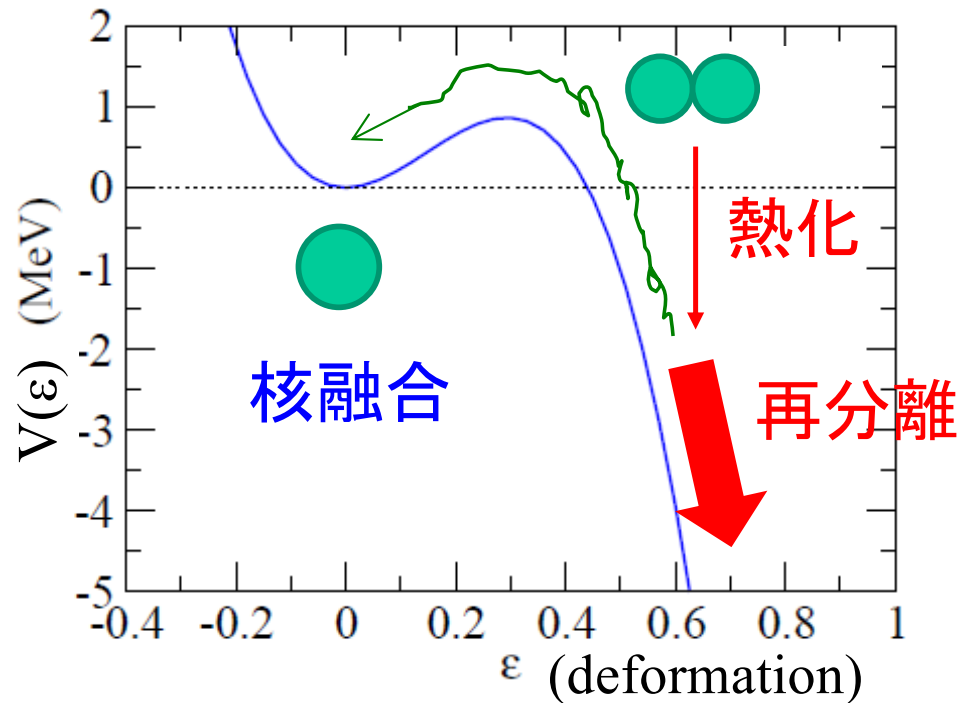
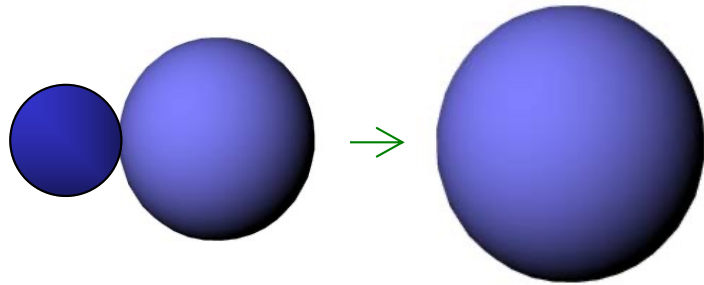
超重元素生成反応



原子核形状の発展

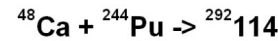


超重元素生成反応

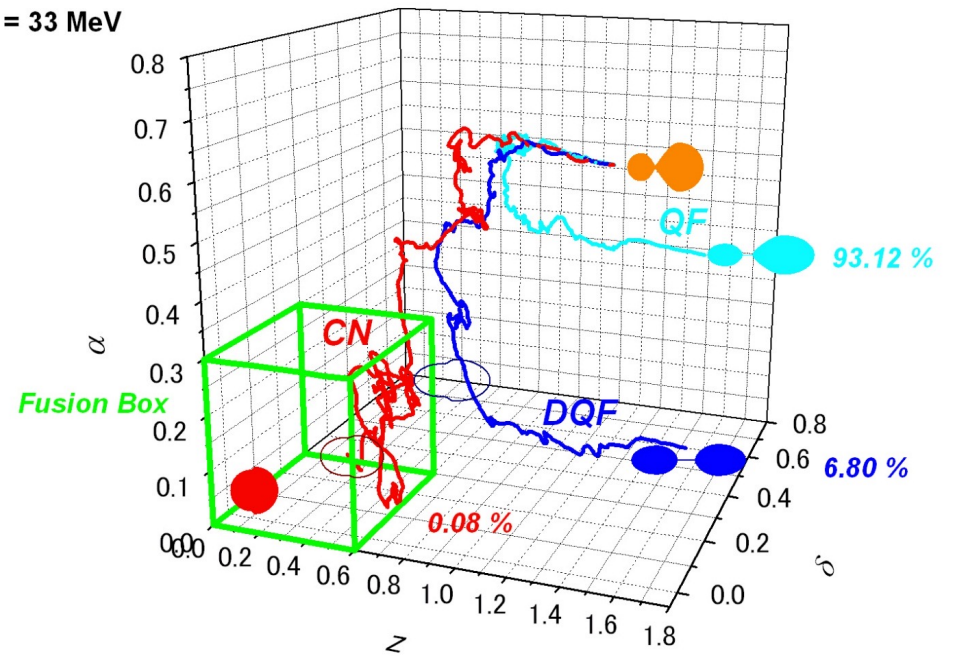


多次元化

- q: 核間距離
- 変形
- フラグメントの質量



$E^* = 33 \text{ MeV}$



a figure from Y. Aritomo

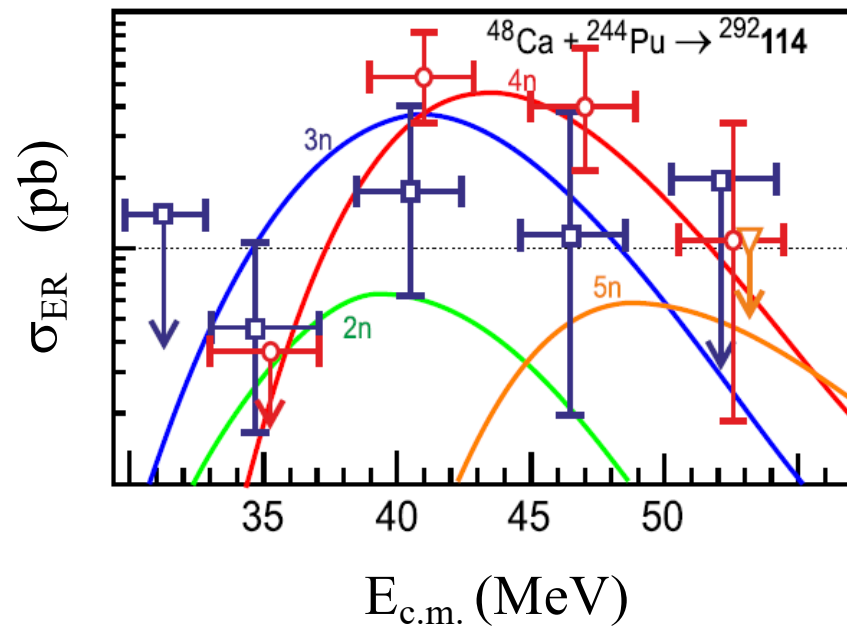
熱的拡散 → (古典的)ランジュバン法

$$m \frac{d^2q}{dt^2} = -\frac{dV(q)}{dq} - \gamma \frac{dq}{dt} + R(t)$$

- ✓ Abe, Wada et al.
- ✓ Aritomo, Ohta et al.
- ✓ Chiba, Ishizuka et al. : 5D

超重元素生成反応

ランジュバン法:
現象論的には成功

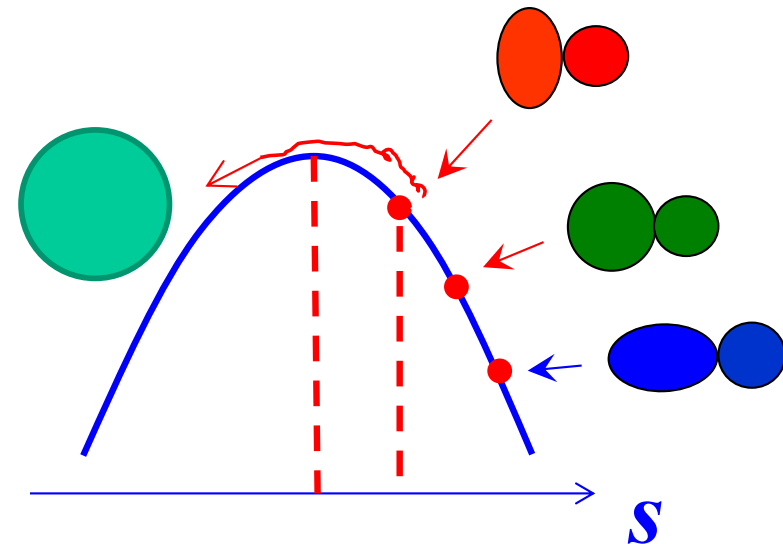
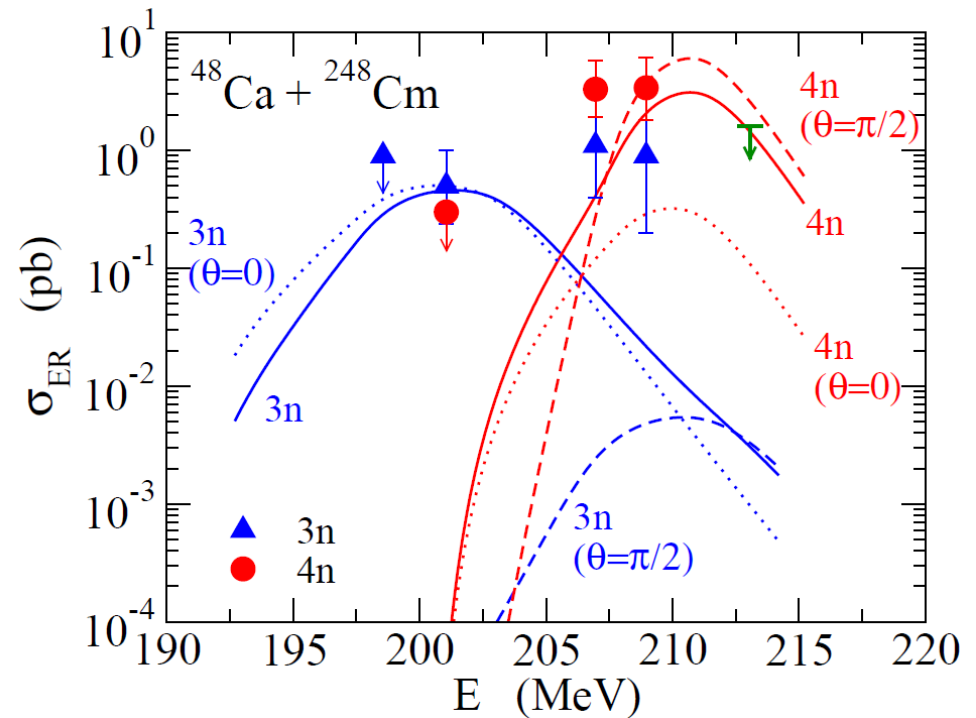


V.I. Zagrebaev and W. Greiner (2015)

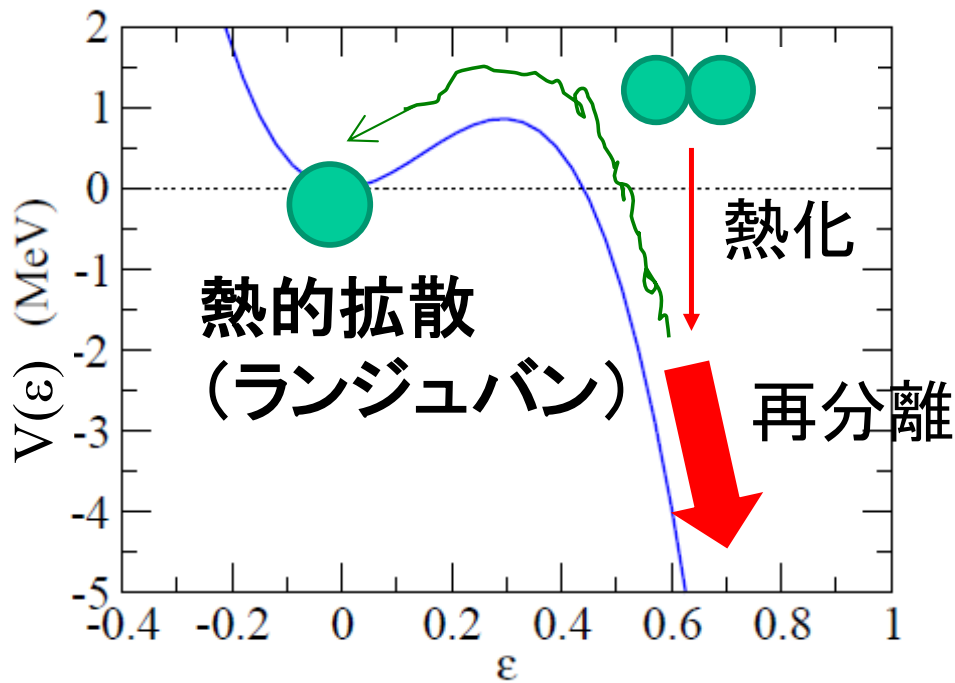
少なくとも接触直後までは
変形度を固定して考えてもよさそう

標的核の変形が果たす役割の議論

K. Hagino, PRC98 ('18) 014607



超重元素生成反応: 理論的課題



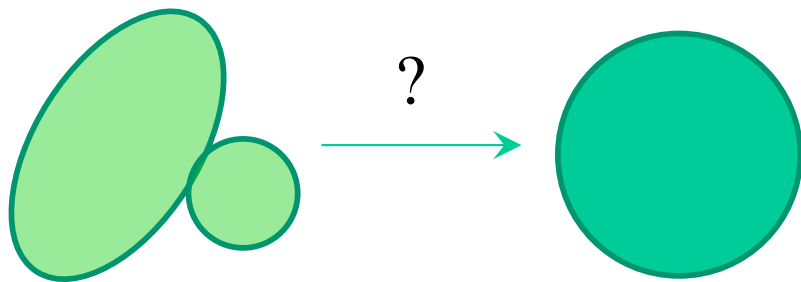
$$m \frac{d^2 q}{dt^2} = -\frac{dV(q)}{dq} - \gamma \frac{dq}{dt} + R(t)$$

ランジュバン法は一見成功しているように見えるが:

- ✓ どのように熱化するのか?
- ✓ 非マルコフ効果 cf. QGP
- ✓ 拡散に対する量子補正?

→「量子開放系の物理 / 摩擦の量子論」

もう一つのギモン



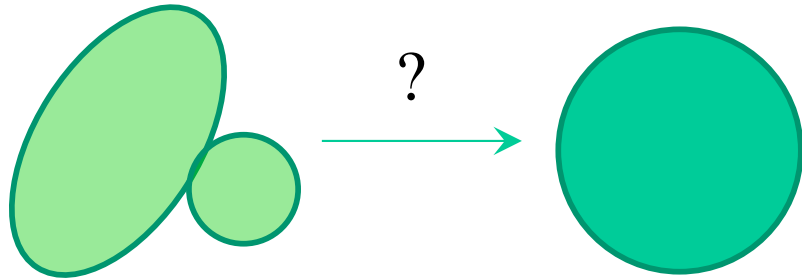
変形: 量子効果

→ 熱い核では消失

熱化の過程で標的核の変形はどのように(どの程度)消失するのか?

反応前(冷) → 複合核(熱) への過程を連続的に記述することが必要

超重元素生成反応：理論的課題



変形：量子効果

→熱い核では消失

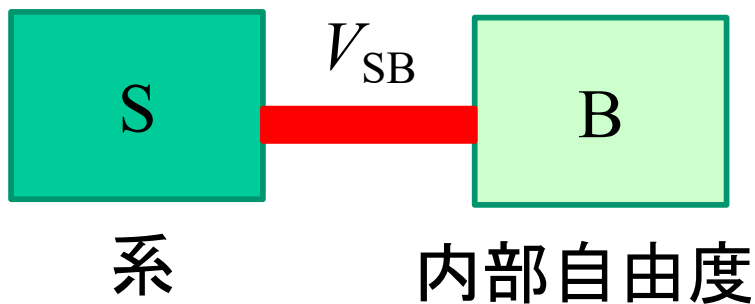
熱化の過程で標的核の変形はどのように(どの程度)消失するのか？

反応前(冷)→複合核(熱)への過程を連続的に記述することが必要

系＋環境のハミルトニアンをそのまま解く

M. Tokieda and K.Hagino,

- Ann. of Phys. 412 (2020) 168005.
- Front. in Phys. 8 (2020) 8.



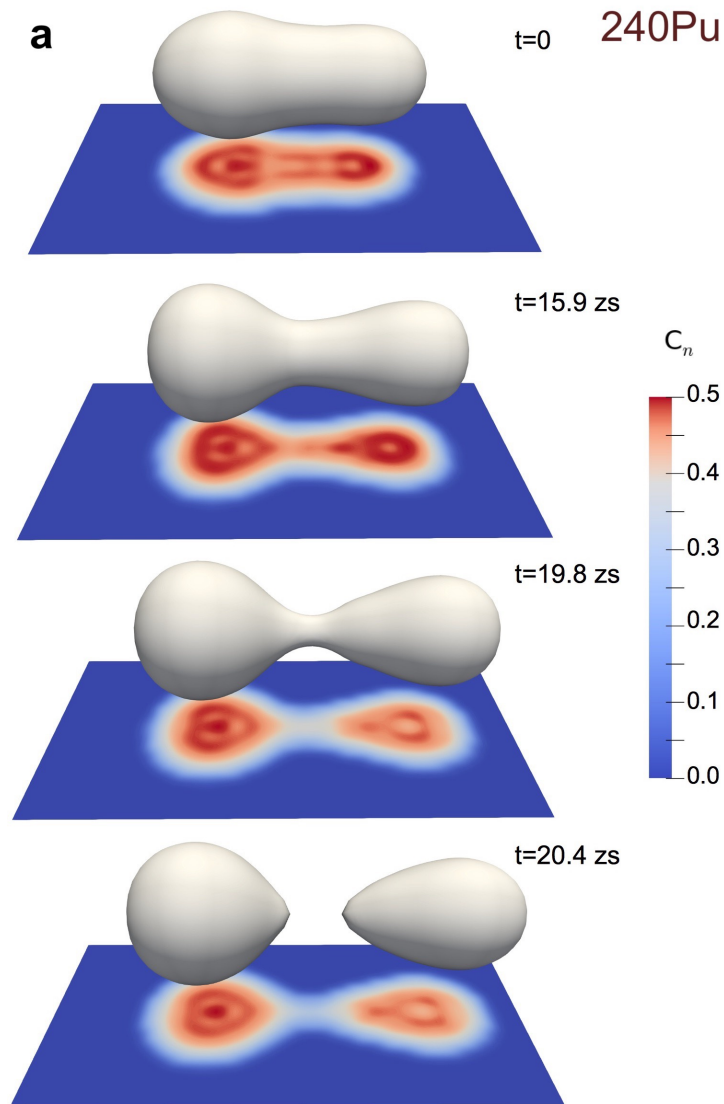
各時刻ごとに内部状態がわかる

-
- ・ エネルギー輸送の議論が容易になる。
 - ・ 熱化の様子を追うことができる。

超重元素生成反応への適用はまだこれから

誘起核分裂と非平衡グリーン関数法

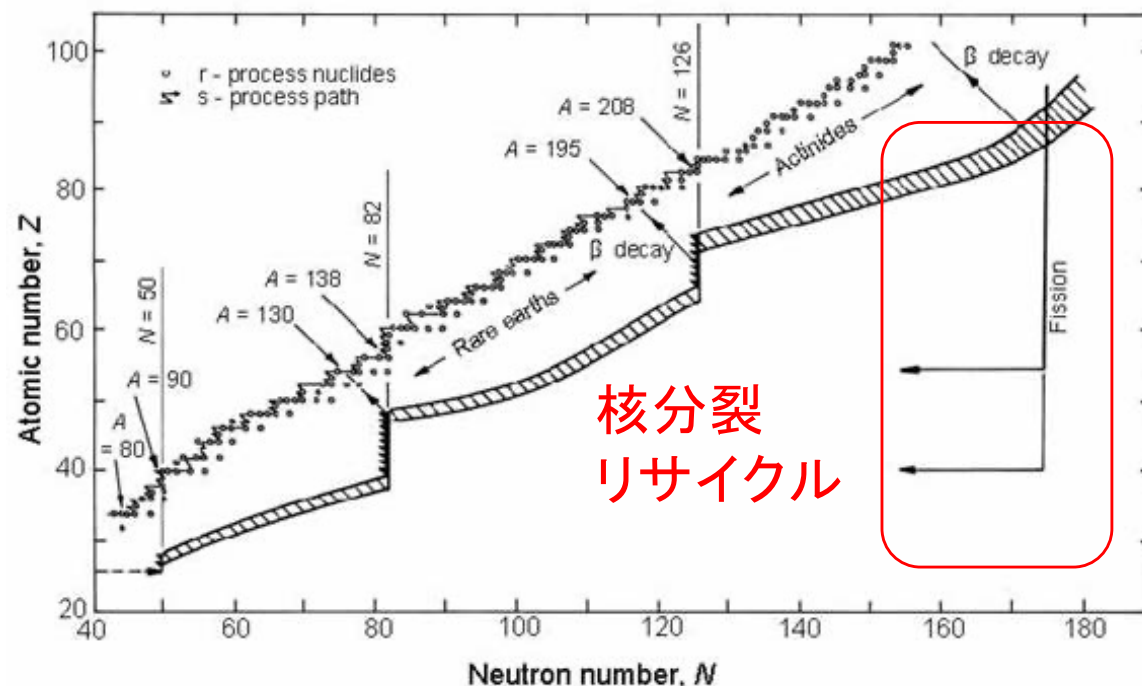
核分裂



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

➤ 核物理の様々な現象で重要:

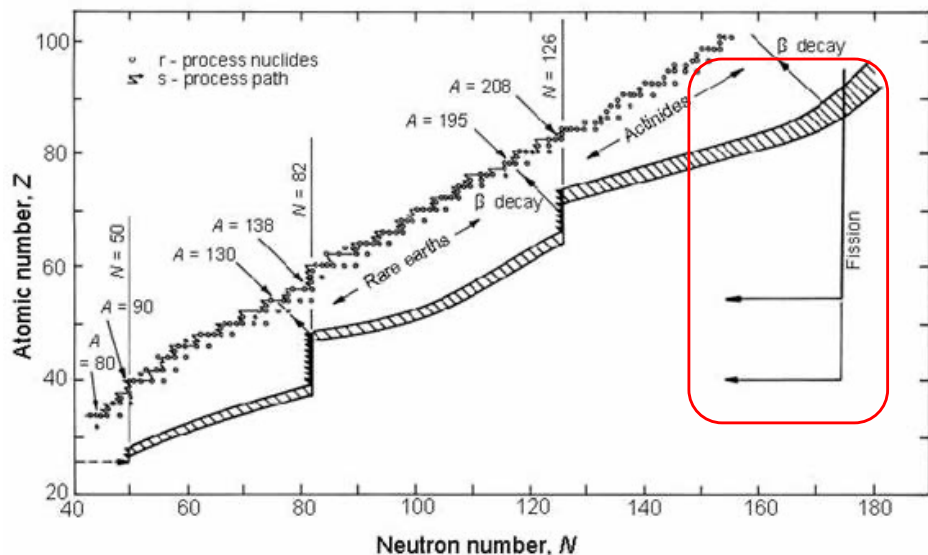
- エネルギー生成
- 超重元素
- r-プロセス元素合成
- 中性子過剰核の生成



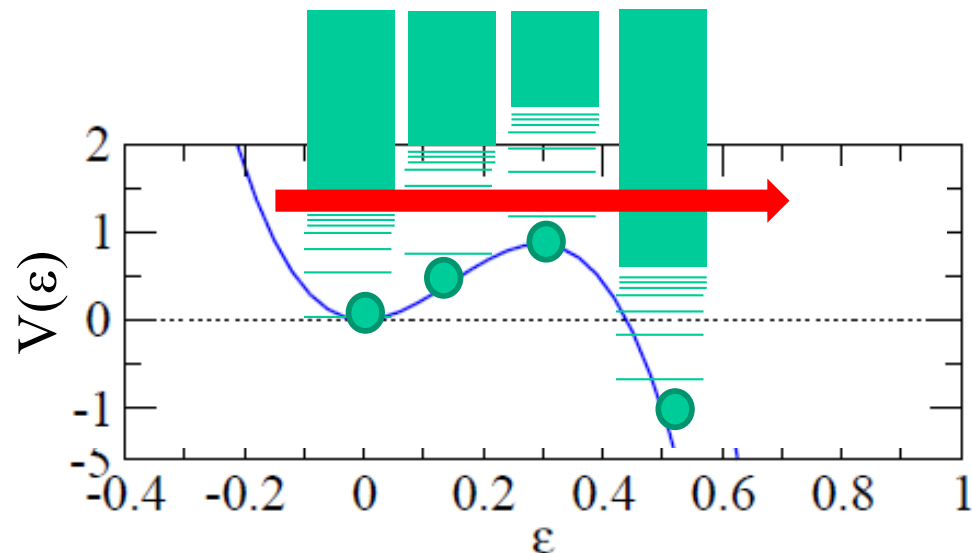
核分裂: 原子核の形状が大きく変化
→ 微視的理解はまだ発展途上

なぜ微視的理論が重要か?

➤ r-プロセス元素合成



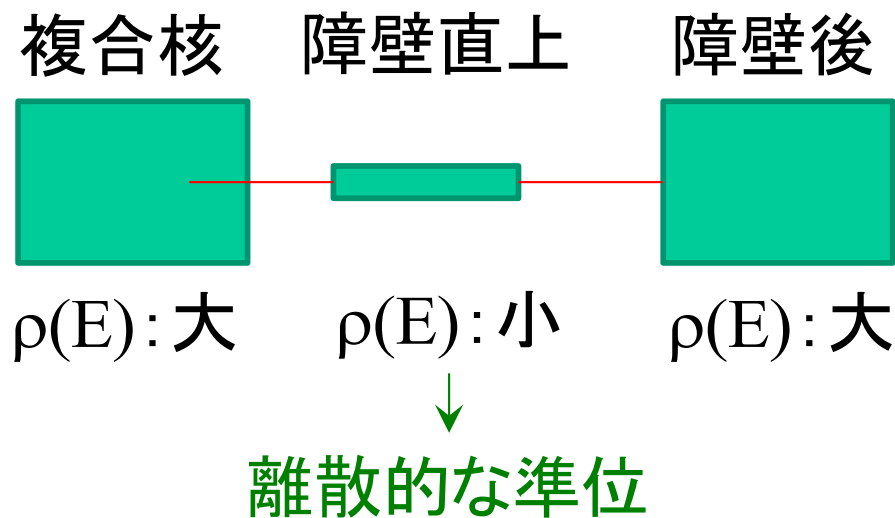
➤ バリア・トップ核分裂



中性子過剰核の(中性子誘起)核分裂

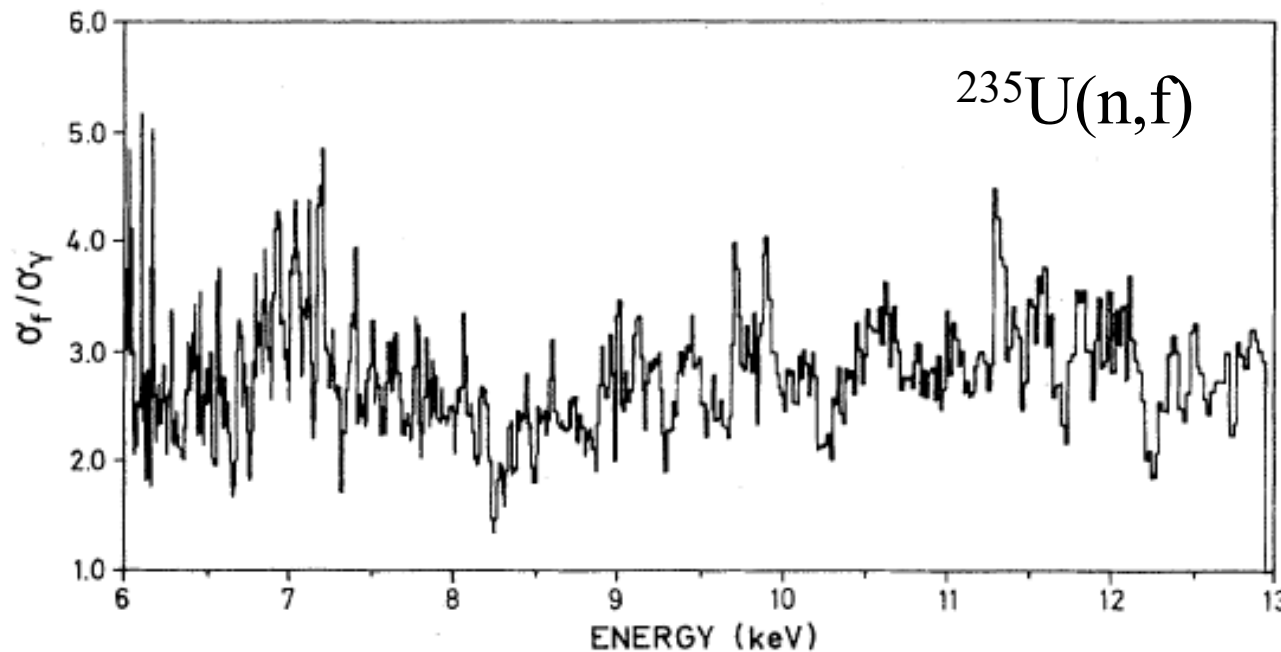
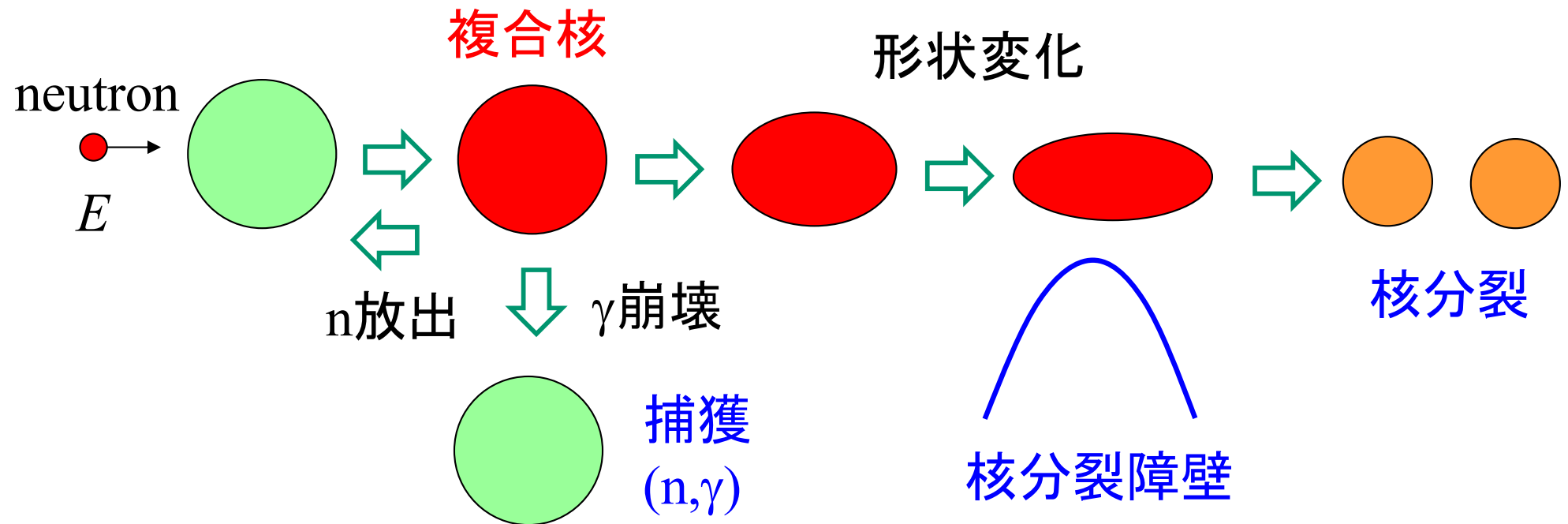
→ E^* : 小、 $\rho(E^*)$: 小

- ✓ 統計模型の妥当性?
- ✓ ランジュバン法の妥当性?



多体ハミルトニアンとどうつなげばいいのか?

どういふ問題を考えるか



核分裂と捕獲の分岐比

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

*** r-プロセスでも重要な物理量**

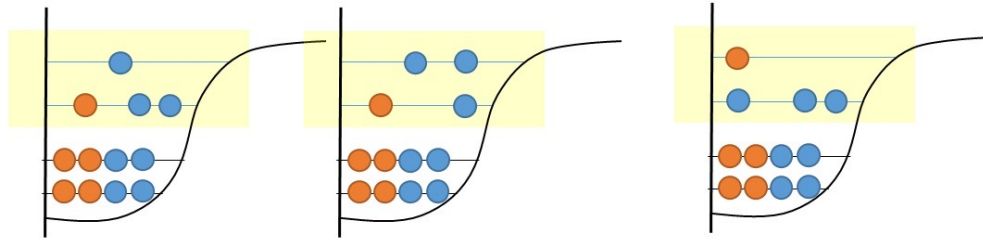
M.S. Moore et al.,
PRC30 ('84) 214

殻模型の可能性?

G.F. Bertsch and K.H.,
PRC105 ('22) 034618
K. Uzawa and K.H.,
PRC108 ('23) 024319.

核分裂に対して
同様のアプローチ?

殻模型

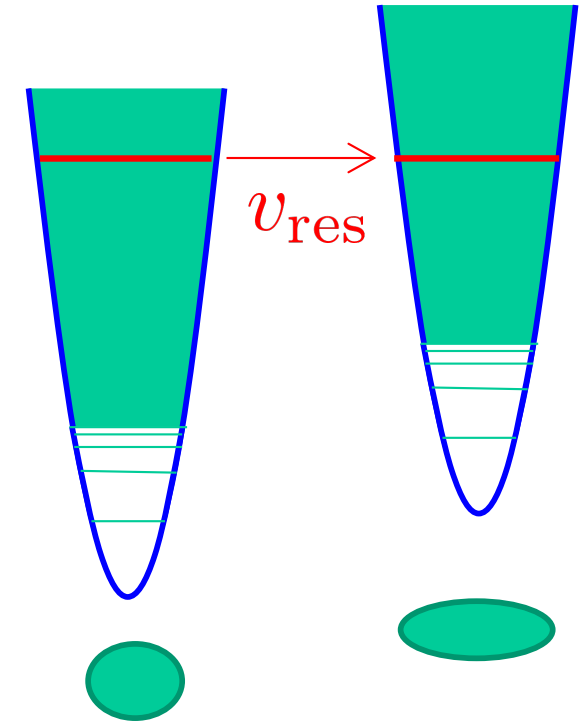


$$|\Psi\rangle = v_1|m_1\rangle + v_2|m_2\rangle + v_3|m_3\rangle + \dots$$

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



- それぞれの核形状で異なるポテンシャル
- 形状ごとに多粒子多空孔配位
- 残留相互作用による配位間のホッピング
→ 形状変化

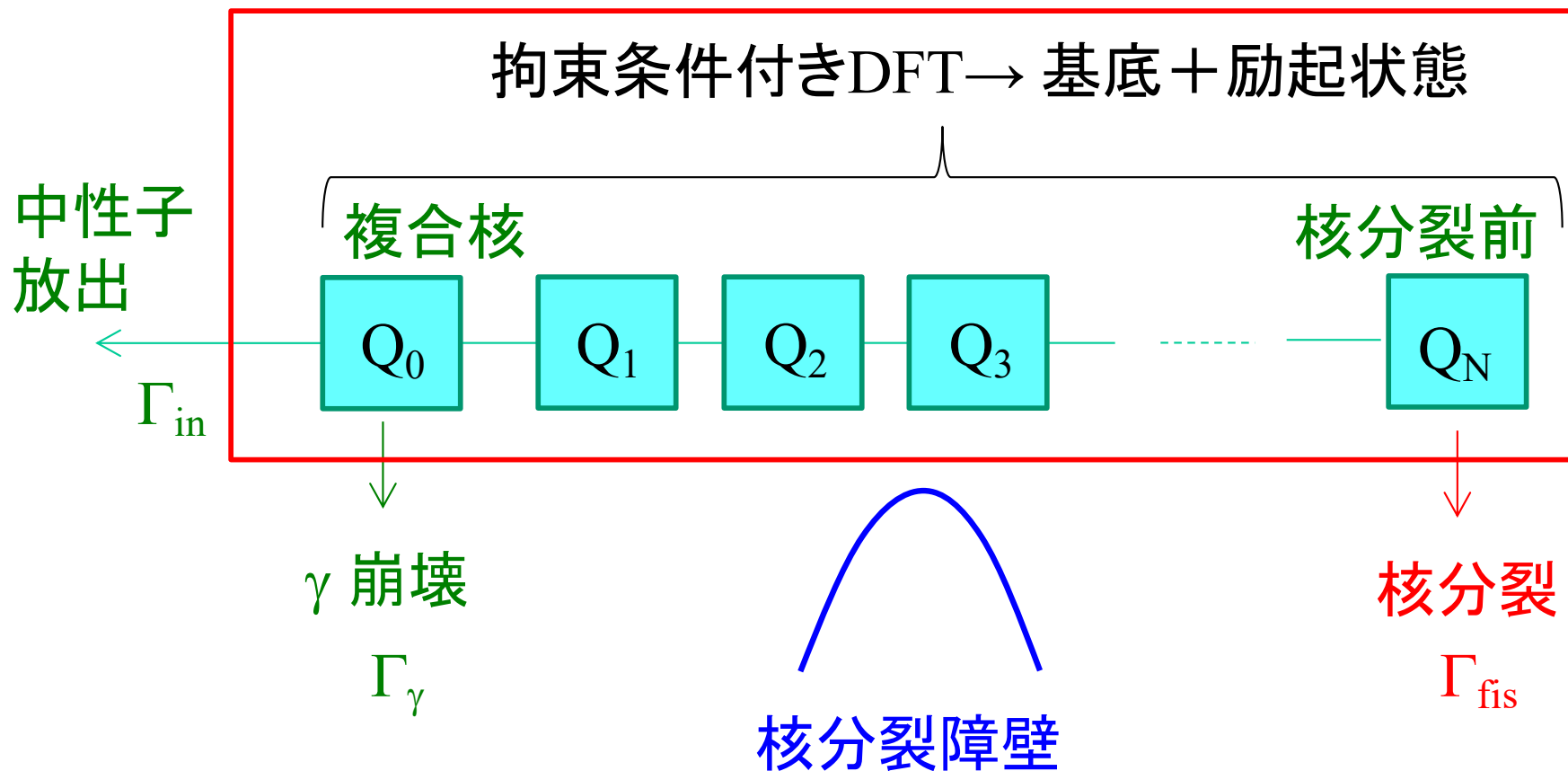
^{236}U 原子核の低エネルギー核分裂への適用

G.F. Bertsch and K.H., Phys. Rev. C107, 044615 (2023).

K. Uzawa, K.H., and G.F. Bertsch, arXiv:2403.04255.

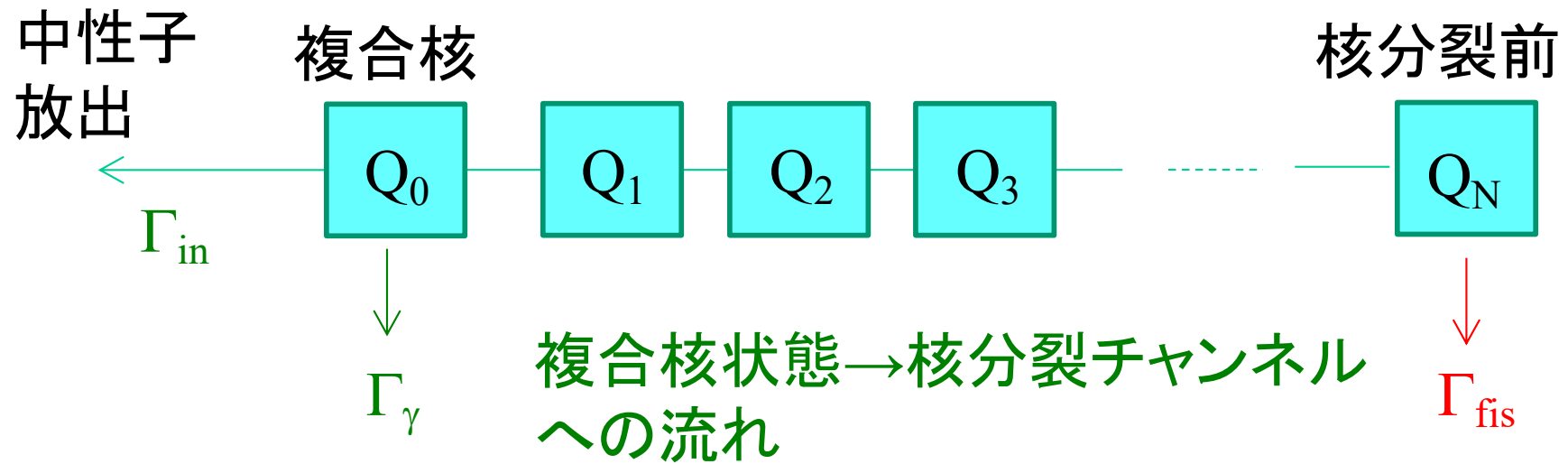
鵜沢浩太郎、20aU2-3

仮定: Q_{20} を集団座標として核分裂が起きる→ Q_{20} を離散化 H

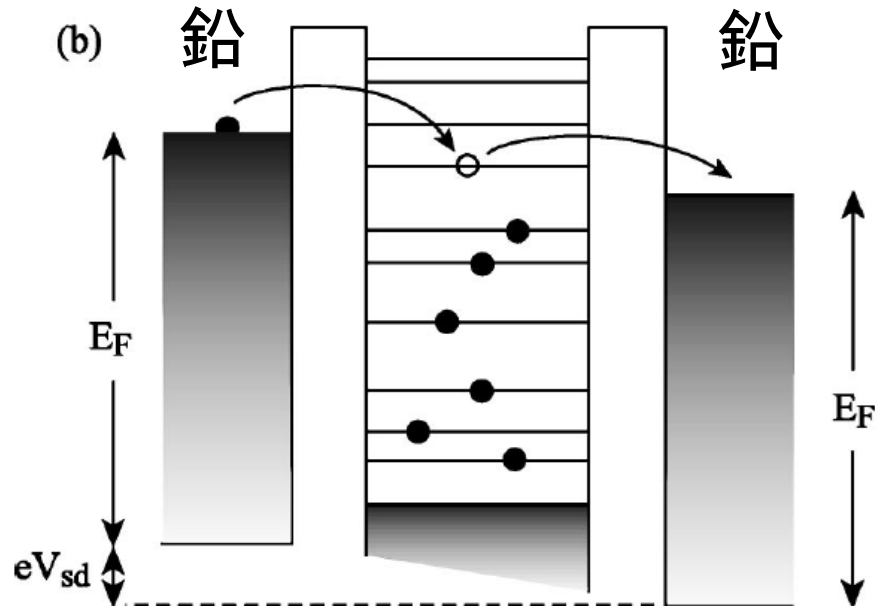


Q_0 から Q_N へのフロー(ホッピング)を計算する

物性における電子輸送の問題との類似性



量子ドットなどの
ナノデバイス



どちらも非平衡動力学

鉛電極の間に電圧をかけると
電流が流れる

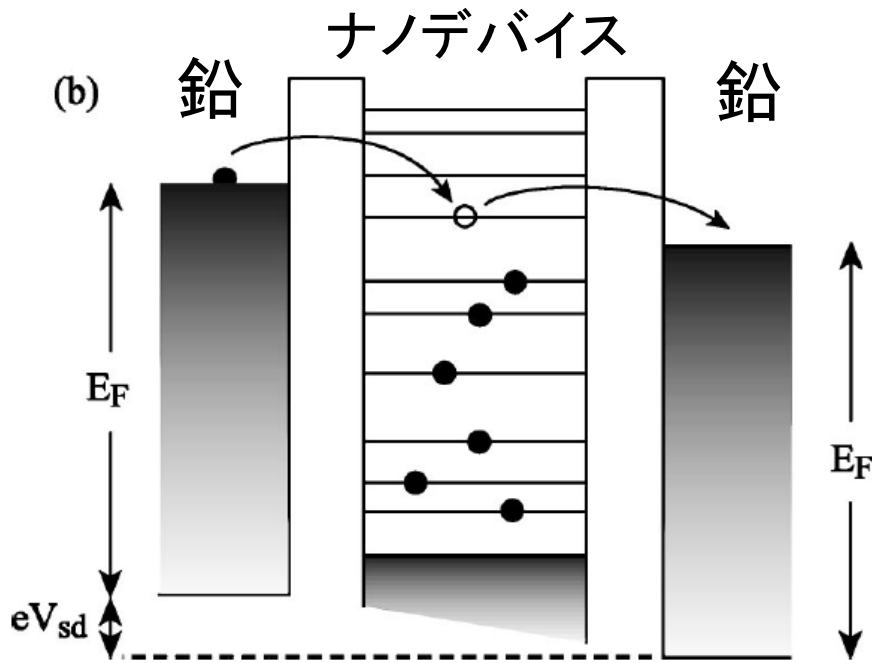
Y. Alhassid, RMP72, 895 (2000).

非平衡グリーン関数法

P.S. Samle et al., PRB64, 201403 (2001).

非平衡グリーン関数: $G(E) = \left(H - i \sum_i \Gamma_i/2 - E1 \right)^{-1}$

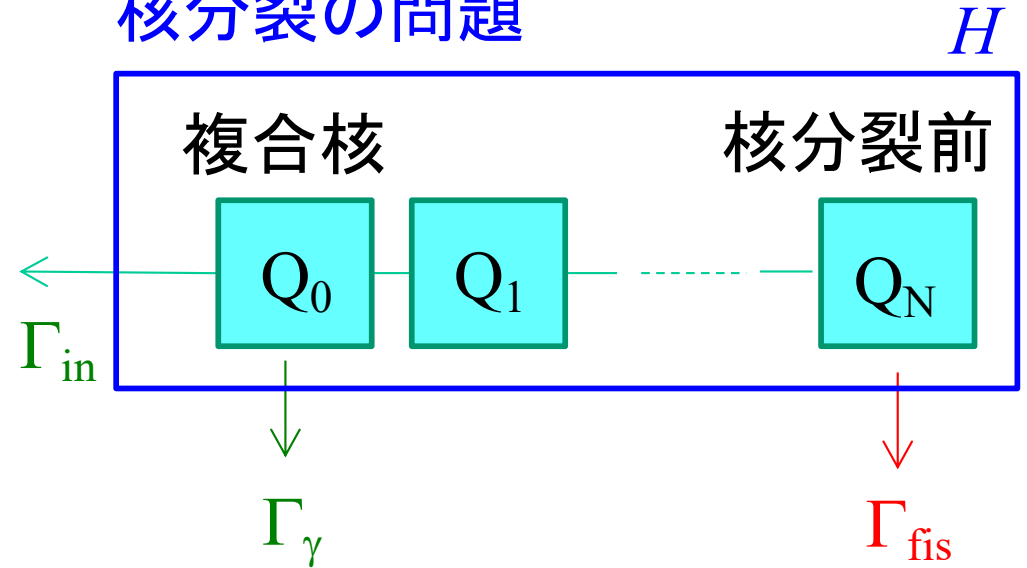
透過係数 (Datta公式): $T_{i \rightarrow j} = \text{Tr}[\Gamma_i G \Gamma_j G^\dagger]$



$$I = \frac{e}{h} \int dE T(E) (f_1(E) - f_2(E))$$

$$f_k(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - \mu_k)/k_B T}}$$

核分裂の問題

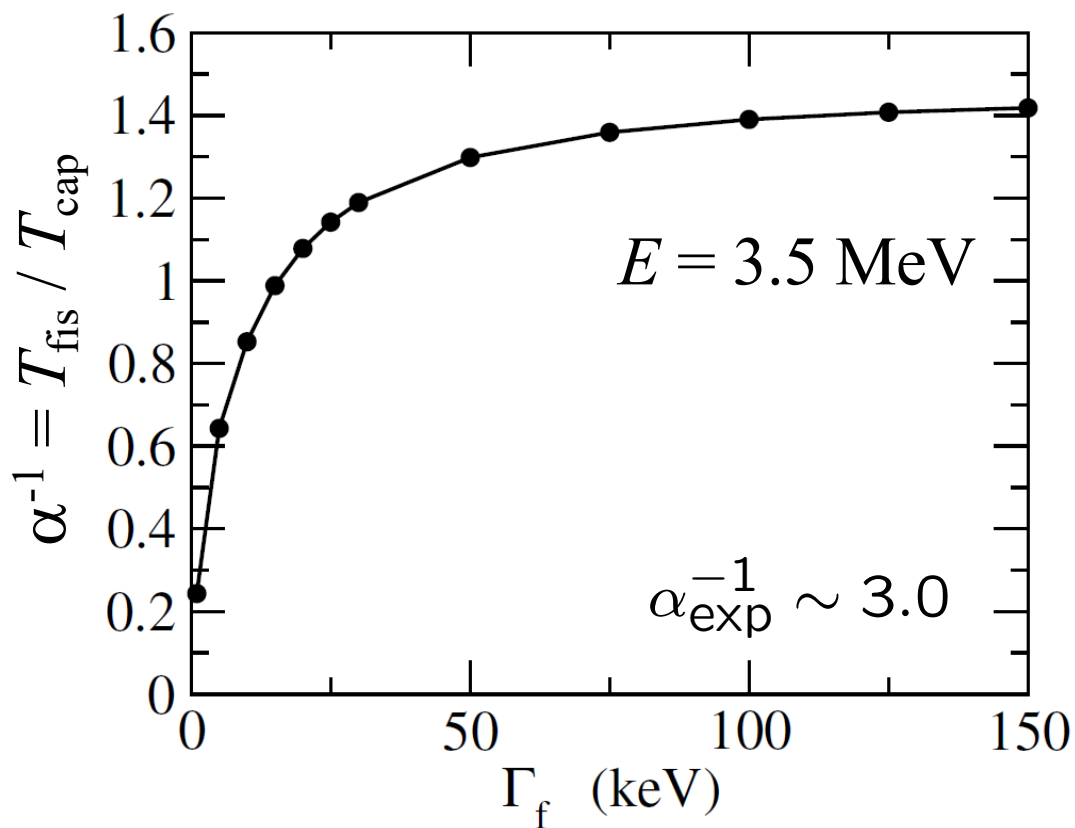


$$G(E) = \left(H - i \sum_i \Gamma_i/2 - N E \right)^{-1}$$

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

$$T_{\text{in,cap}} = \text{Tr}[\Gamma_{\text{in}} G \Gamma_{\text{cap}} G^\dagger]$$

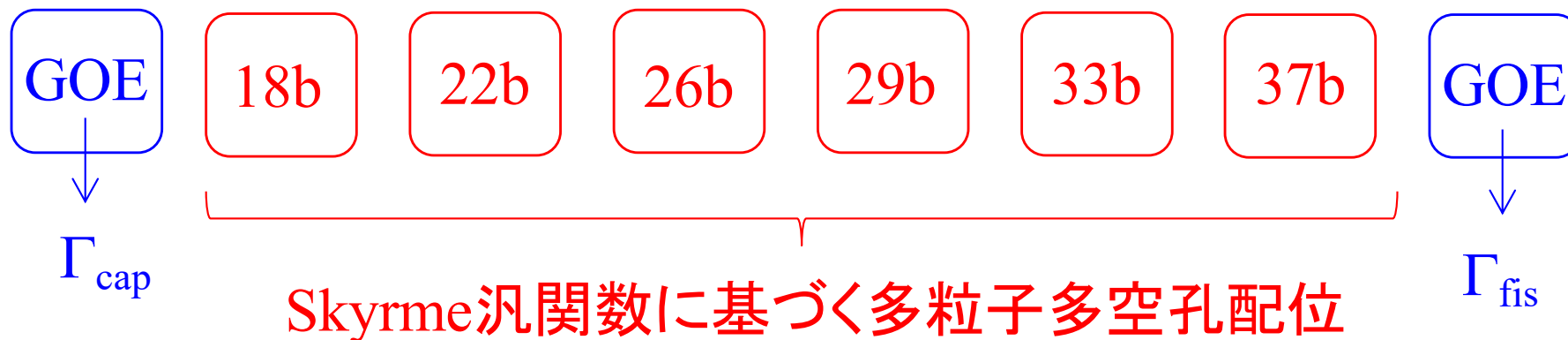
^{236}U 原子核の低エネルギー核分裂への適用



G.F. Bertsch and K.H.,
Phys. Rev. C107, 044615 (2023)

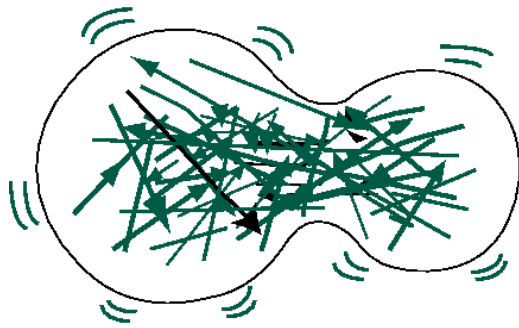
分岐比は Γ_f に依らない
 cf. 遷移状態理論:
 核分裂は障壁における
 ダイナミックスのみで決まる
 → 遷移状態理論の仮定を
 微視的模型で初めて実現!

cf. 解析的な議論:
 K.H. and G.F. Bertsch,
 arXiv: 2310.09537 (2023)



まとめ

量子開放系としての原子核における非平衡ダイナミクス



原子核の内部自由度→内的環境の自由度

→ 原子核: 他の系にないユニークな性質

➤ 超重元素生成反応

ランジュバン法が現象論的には成功

理論的な課題:

- ✓ どのように熱化するのか?
- ✓ 非マルコフ効果?
- ✓ 拡散に対する量子補正?
- ✓ 核変形の時間変化?

→量子開放系の物理

➤ 誘起核分裂

低エネルギーで適用可能な
微視的理論の必要性

cf. r-プロセス元素合成

殻模型+

非平衡グリーン関数法を開発中

物性の量子輸送の問題と類似

非平衡グリーン関数法を
超重元素生成反応に適用すると?