

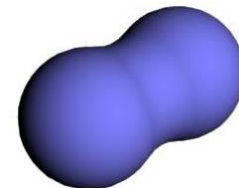
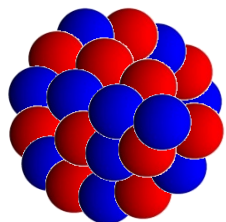
核分裂や超重元素生成反応は 微視的に記述できるのか？

萩野浩一

京都大学大学院理学研究科

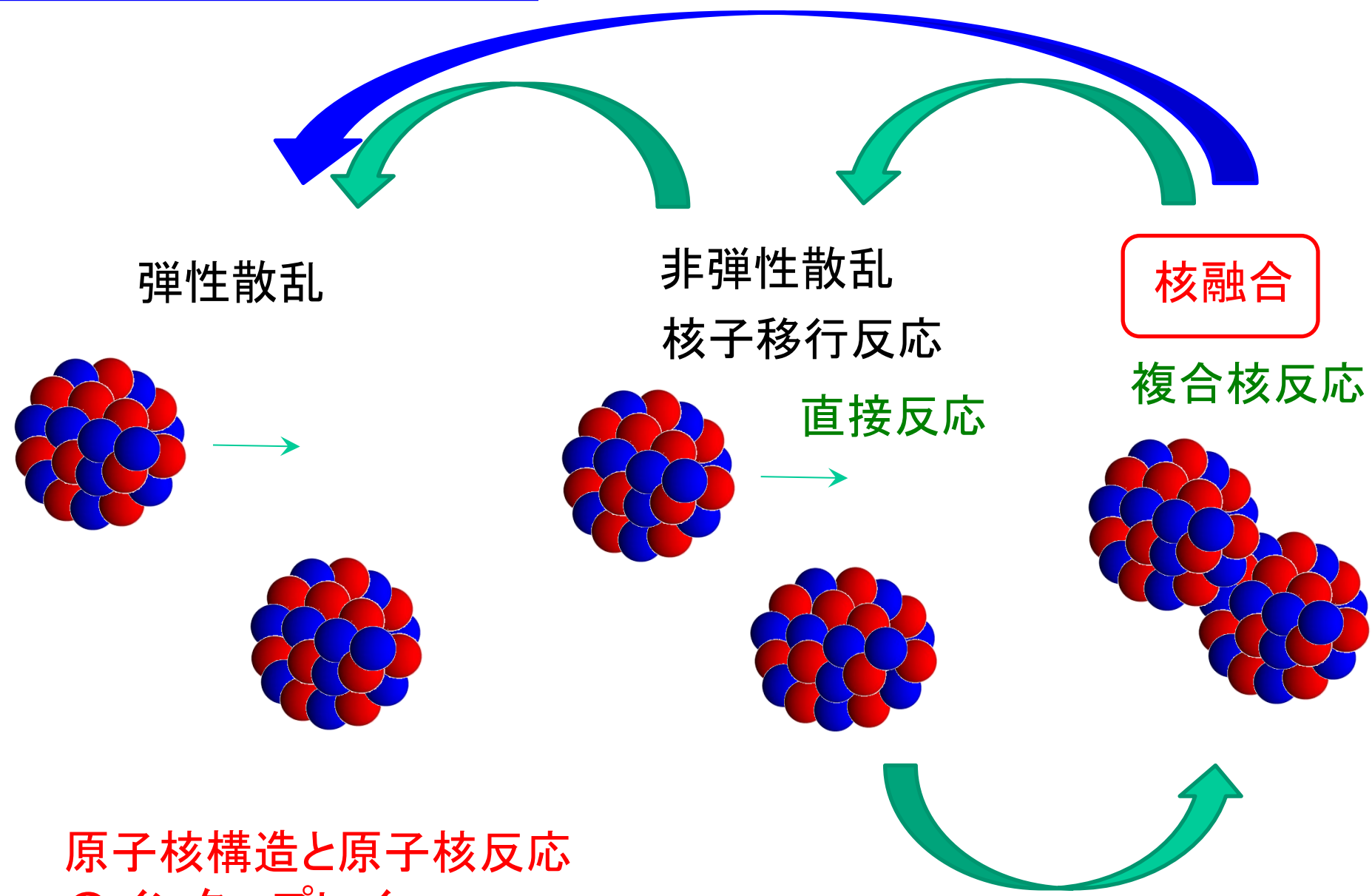
George F. Bertsch (U. Washington)

鵜沢浩太郎(京大)



1. はじめに: 核融合反応概観
2. 微視的模型と巨視的模型
3. 核分裂に対する微視的模型に向けて
4. コメント: 超重元素生成反応
5. まとめ

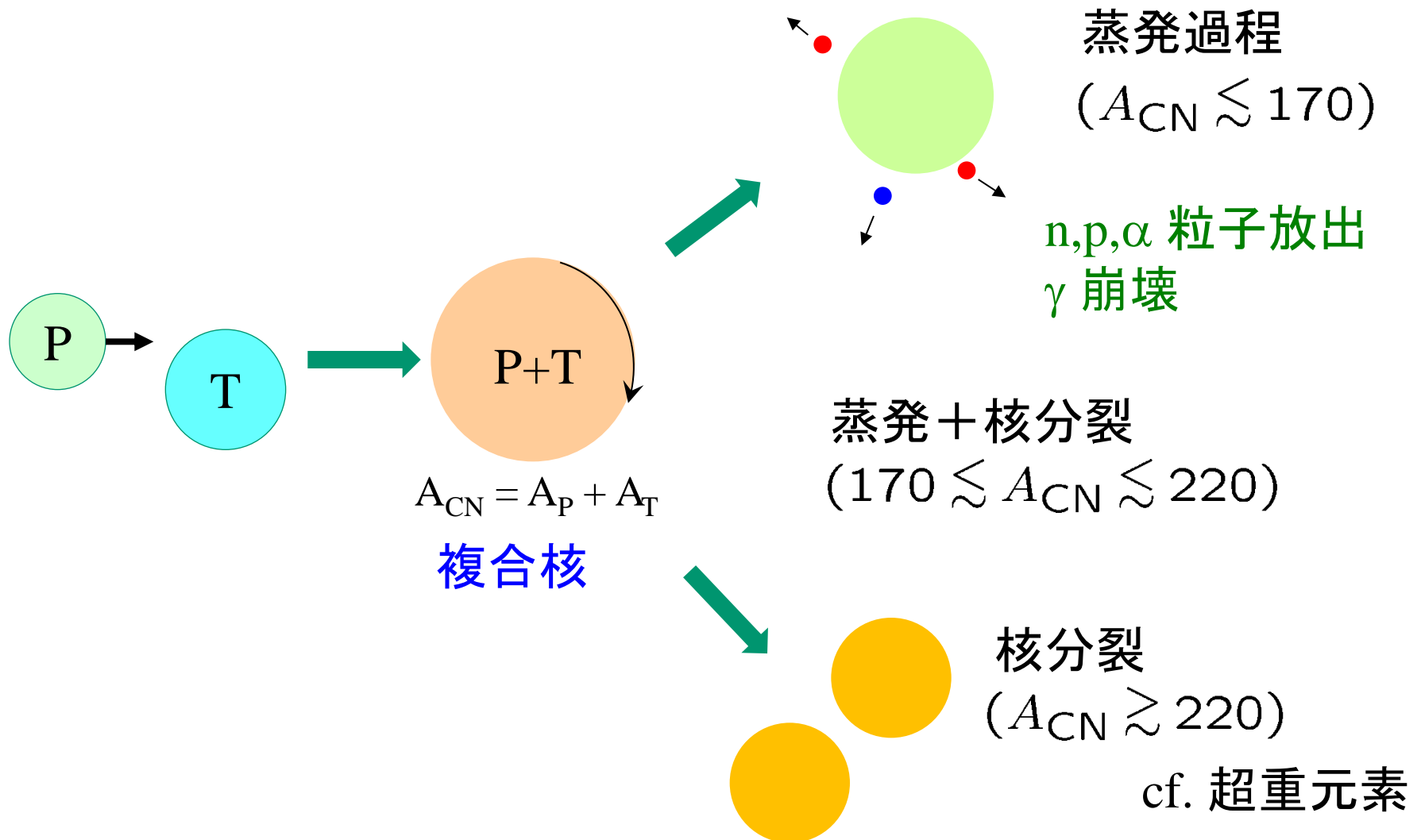
低エネルギー重イオン反応



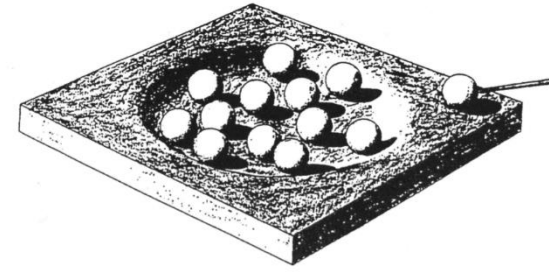
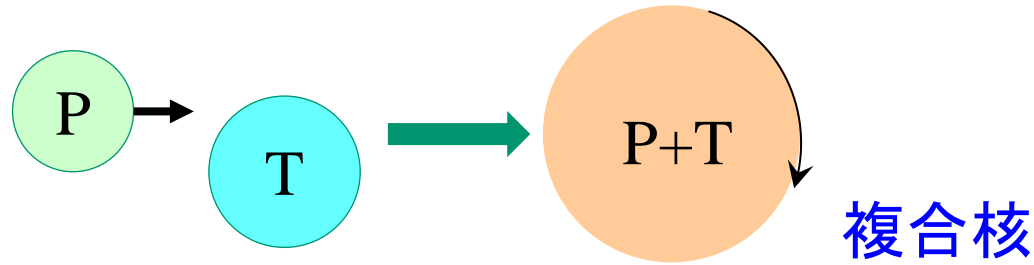
原子核構造と原子核反応
のインタープレイ

理解の橋をかけよう(緒方)

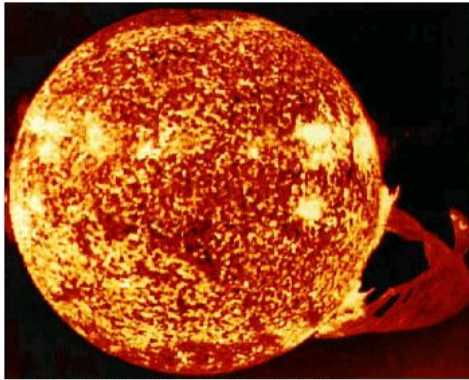
核融合反應：複合核生成反應



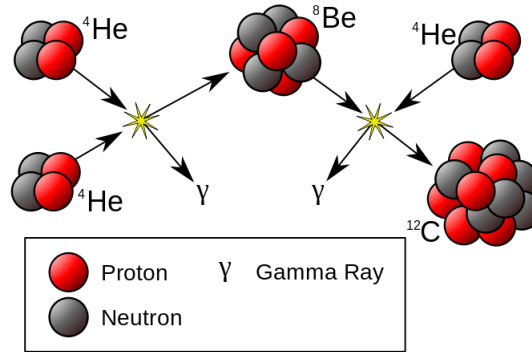
核融合反応： 複合核生成反応



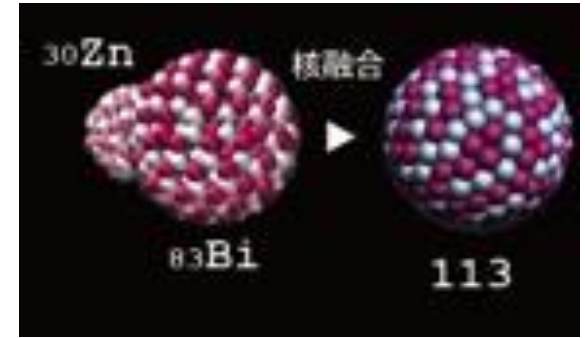
cf. N. Bohr '36



恒星のエネルギー源
(Bethe '39)



元素合成



超重元素の合成

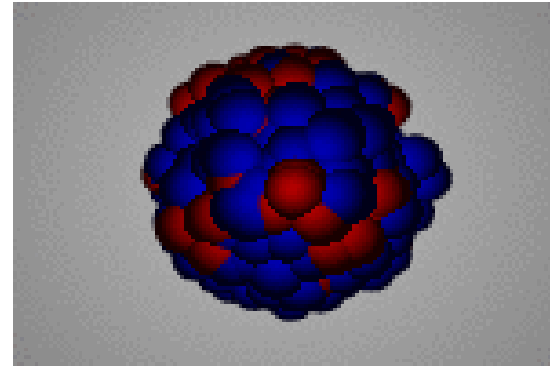
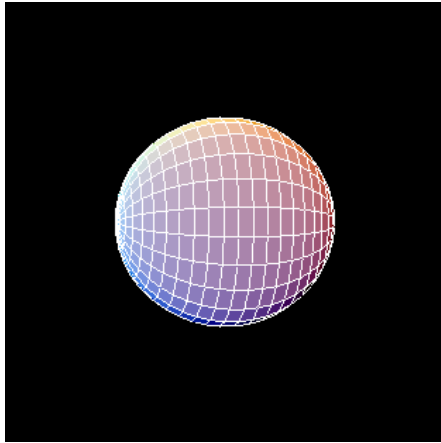
核融合・核分裂: 強い相互作用をする量子多体系の大振幅集団運動

← 微視的理解: 核物理学における究極の未解決問題の一つ

微視的模型と巨視的模型

巨視的(現象論的、経験的)

現象から重要な自由度を抽出し、その自由度に対する運動を現象論的に記述する



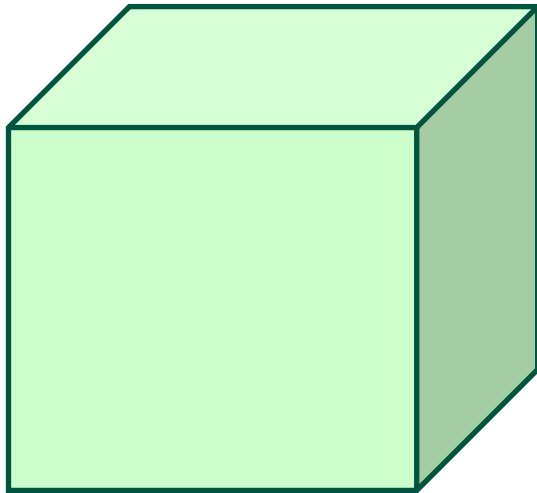
半微視的: 巨視的に現象を記述するが、運動のパラメータを微視的に決める。

粒子の運動を追うことで現象を記述する

微視的

微視的模型と巨視的模型

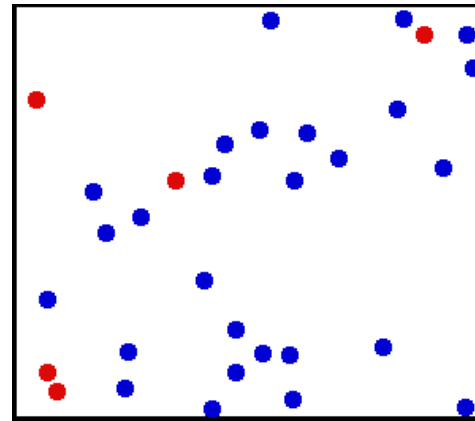
巨視的な見方



n モルの気体
体積 V
温度 T

圧力 $\rightarrow PV = nRT$

微視的な見方

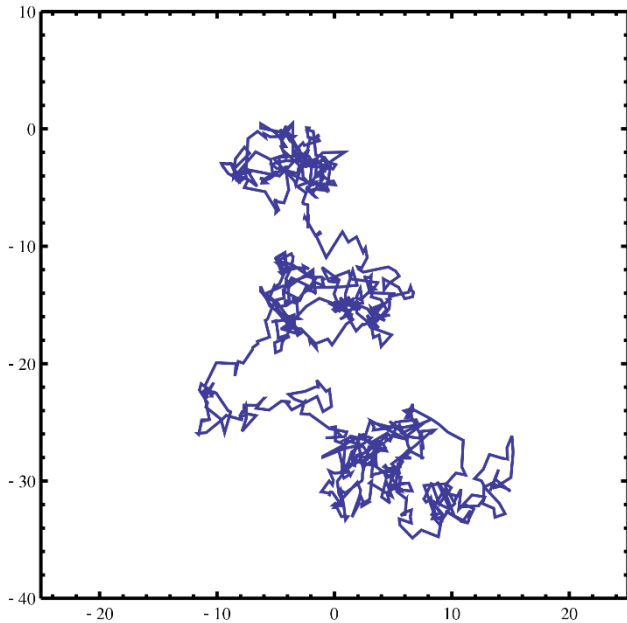


力積 $= 2mv_x$

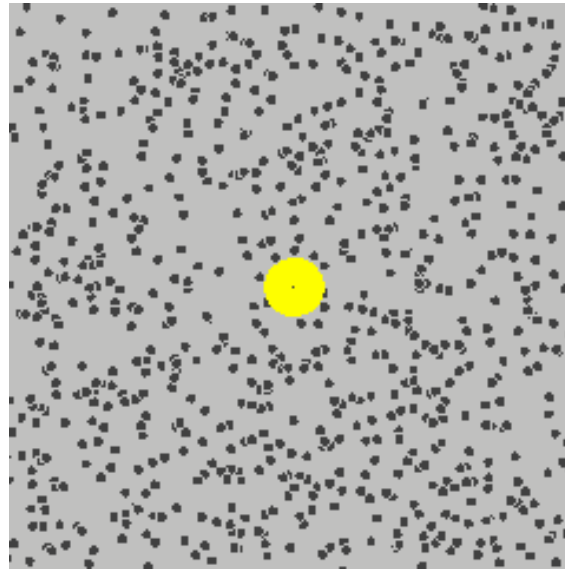
気体の分子運動論

微視的模型と巨視的模型

ブラウン運動



実際には



ランジュバン方程式

$$ma = F - \gamma v + R(t)$$

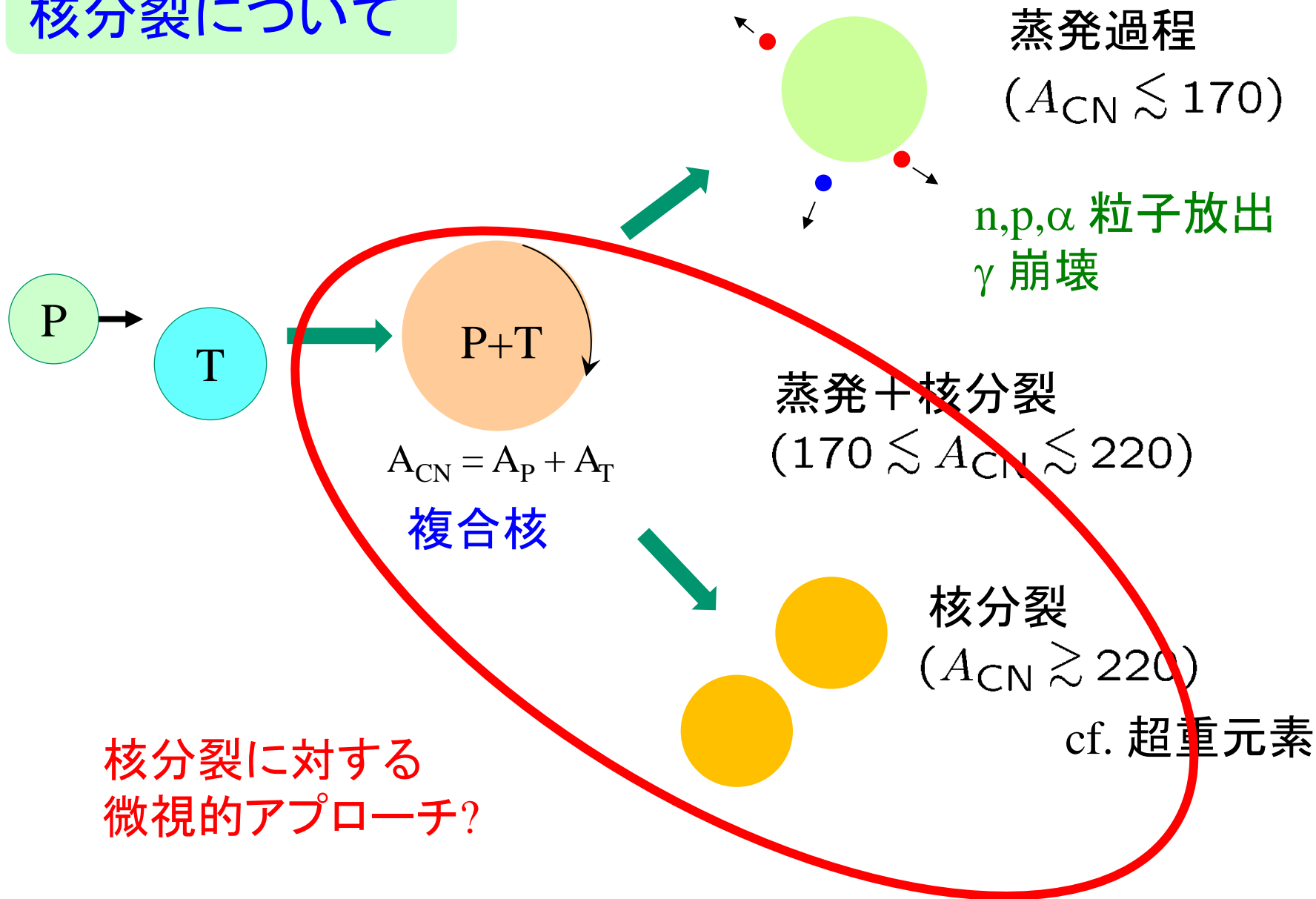
➡ 巨視的アプローチ

微粒子と原子を同等に扱う

➡ 微視的アプローチ

半微視的アプローチ: γ を微視的に決めてランジュバン方程式を解く

核分裂について



蒸発過程
($A_{CN} \lesssim 170$)

n,p, α 粒子放出
 γ 崩壊

蒸発+核分裂
($170 \lesssim A_{CN} \lesssim 220$)

核分裂
($A_{CN} \gtrsim 220$)

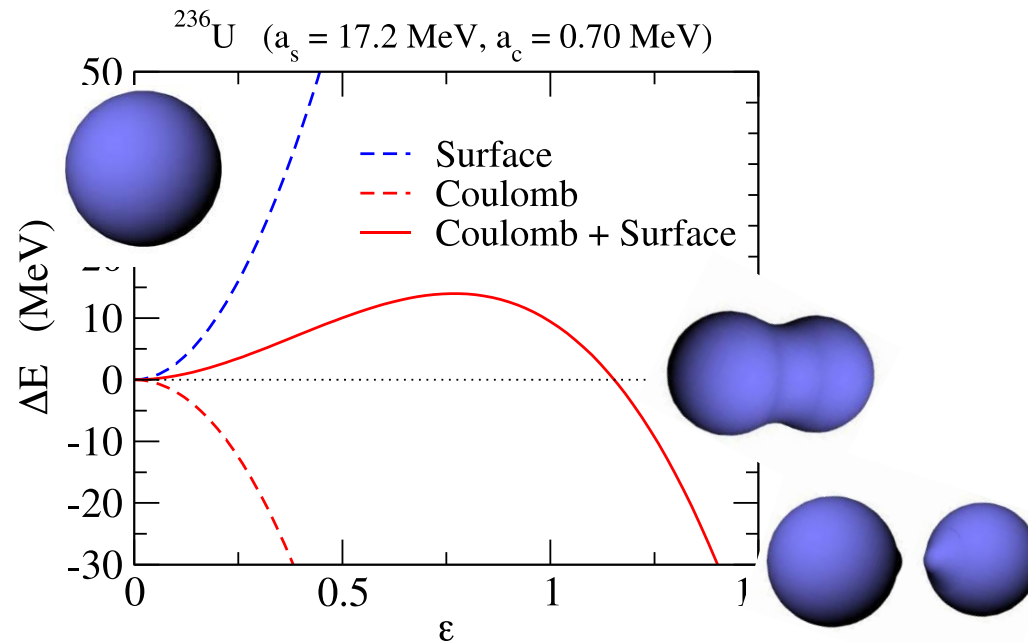
cf. 超重元素

$A_{CN} = A_P + A_T$
複合核

核分裂に対する
微視的アプローチ?

➤ 核分裂の巨視的理解:

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



➤ 核分裂の微視的理解:

原子核形状の大きな変化
→ 微視的記述: 程遠い

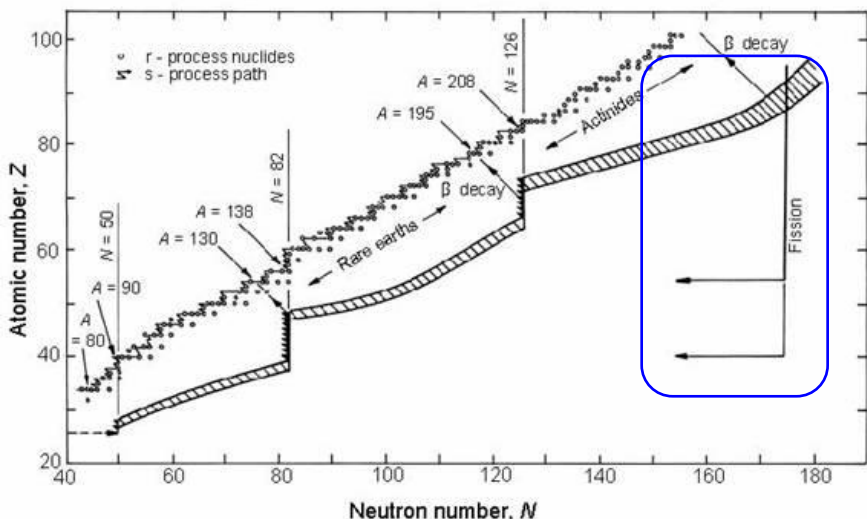
原子核物理の究極的課題

「(特に誘起核分裂)関与する自由度が多すぎて微視的に解くのは不可能(絶望的)」。。。。と思われがちだが、何とかできないか?

→今日のトークの主題

なぜ微視的アプローチが必要なのか？

➤ r-プロセス元素合成

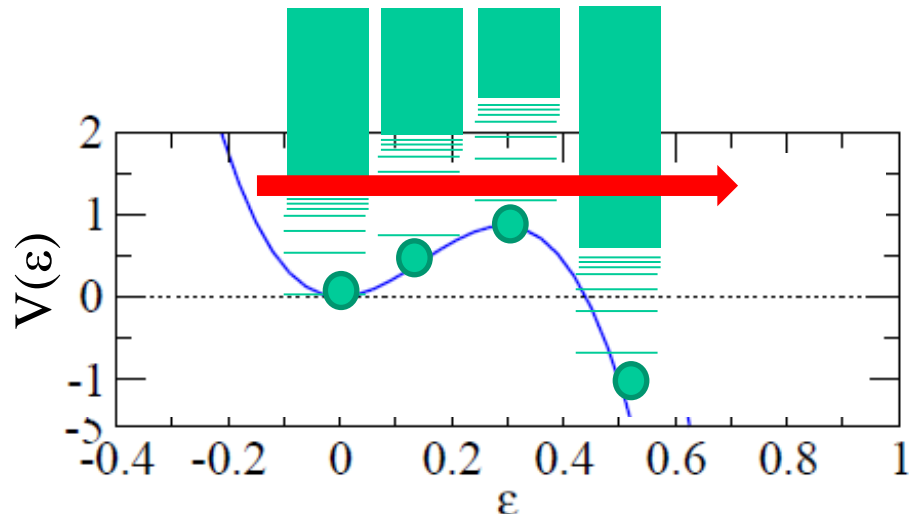


中性子過剰核の核分裂

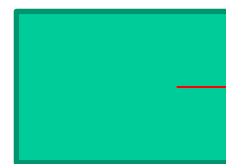
→ 低い E^* 、低い $\rho(E^*)$

- ✓ 統計モデルは妥当か？
- ✓ ランジュバンを使ってもいいのか？
- ✓ 経験に依らない記述が欲しい

➤ 障壁近傍の核分裂



複合核



高 $\rho(E)$

サドル
直上



低 $\rho(E)$



離散的な準位

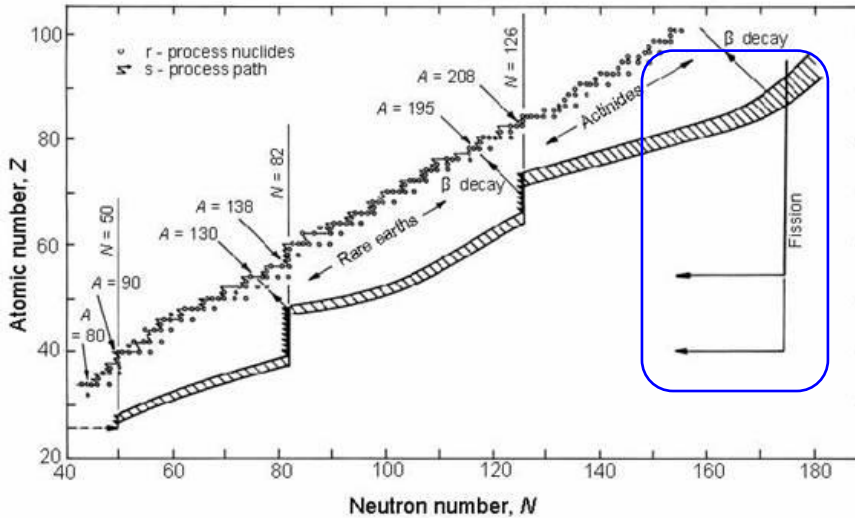
障壁通過後



高 $\rho(E)$

量子力学に基づく微視的な取り扱い→重要

r-プロセス元素合成における重要な「問い」

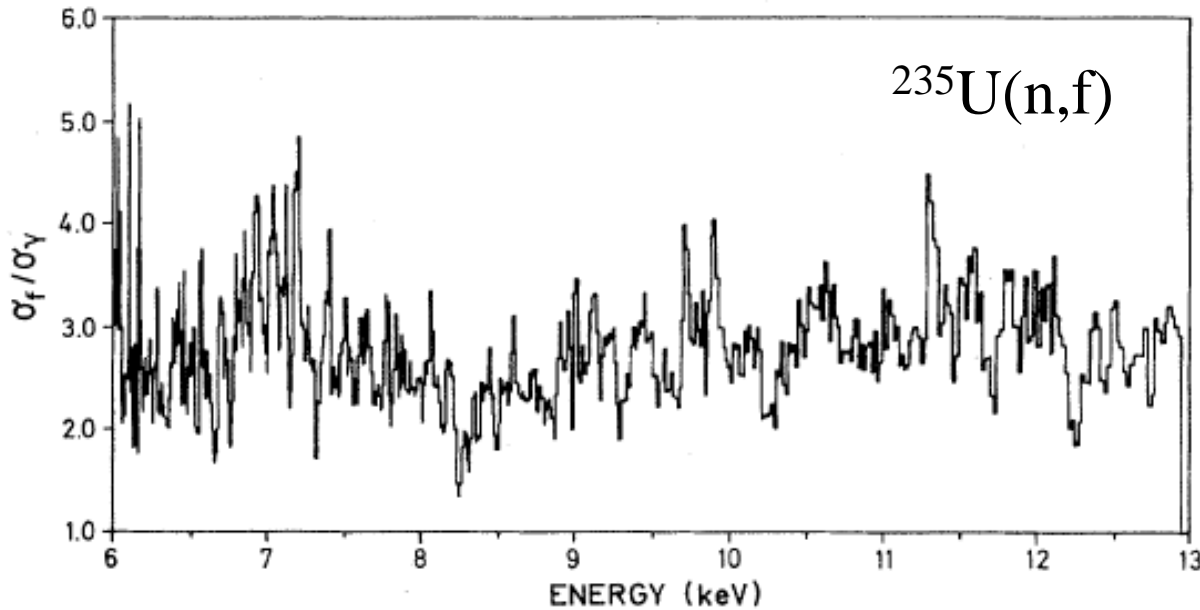
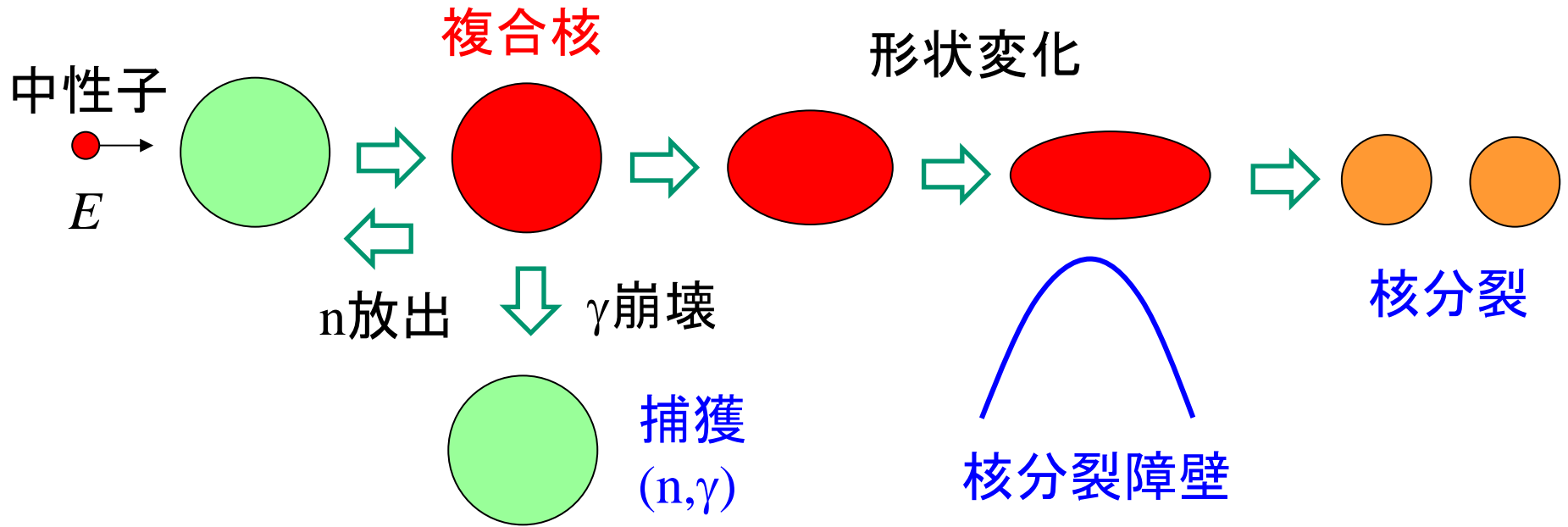


中性子過剰核の核分裂
→ 低い E^* 、低い $\rho(E^*)$

- 中性子過剰核になると核分裂障壁はどう変わる？
- 中性子誘起核分裂に対する対相関の果たす役割は？
- 捕獲過程と核分裂過程の分岐比は中性子過剰核ではどうなる？
(n,f) versus (n, γ)
- 中性子過剰核では核分裂とアルファ崩壊の競合はどうなる？

これらの問いを解き明かすためには、微視的アプローチが不可欠

どういう問題を考えるか



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**

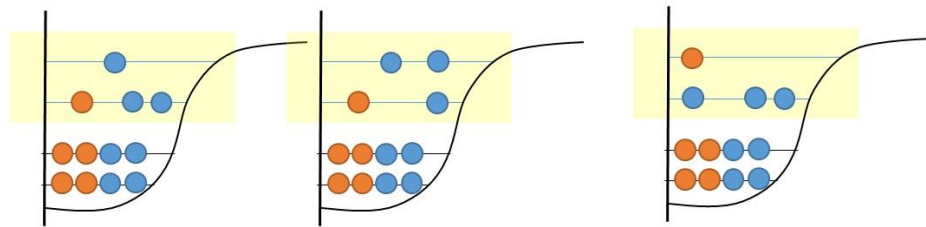
M.S. Moore et al.,
PRC30 ('84) 214

殻模型の可能性?

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

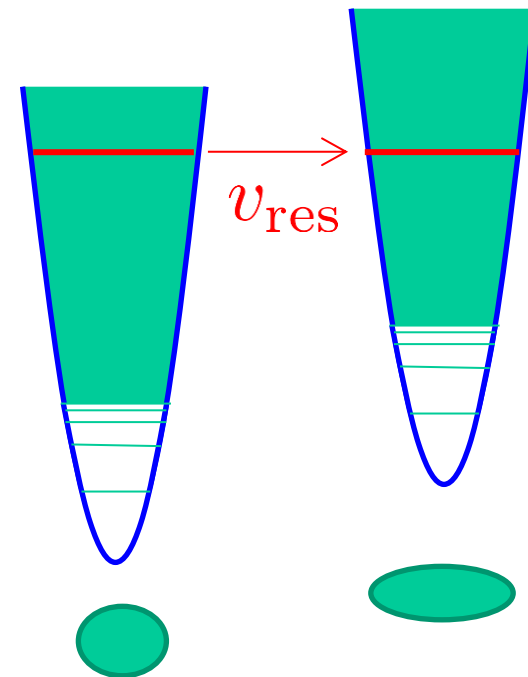
核分裂に対して
同様のアプローチ?

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

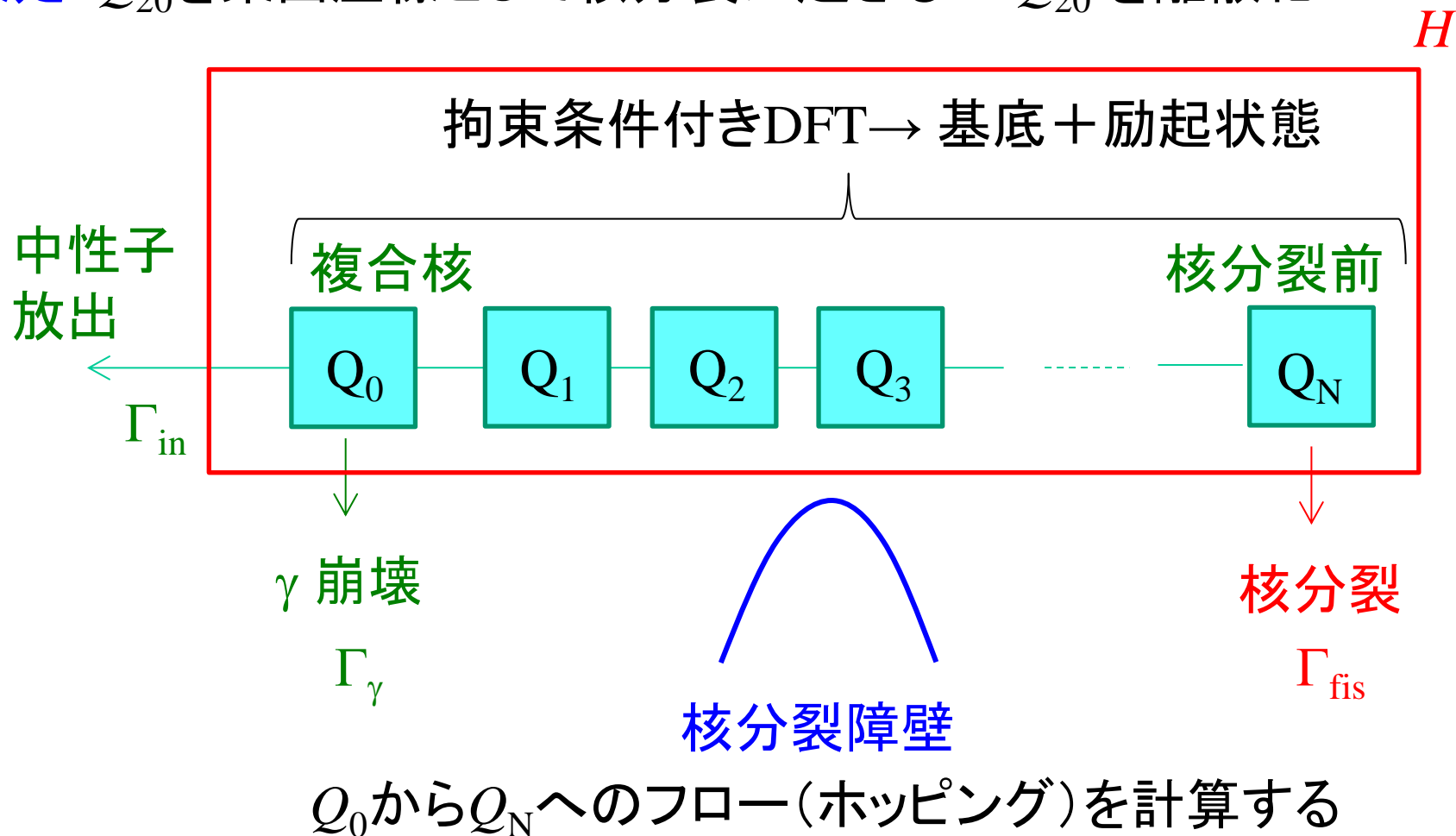
- それぞれの核形状で異なるポテンシャル
- 形状ごとに多粒子多空孔配位
- 残留相互作用による配位間のホッピング
→ 形状変化

^{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).

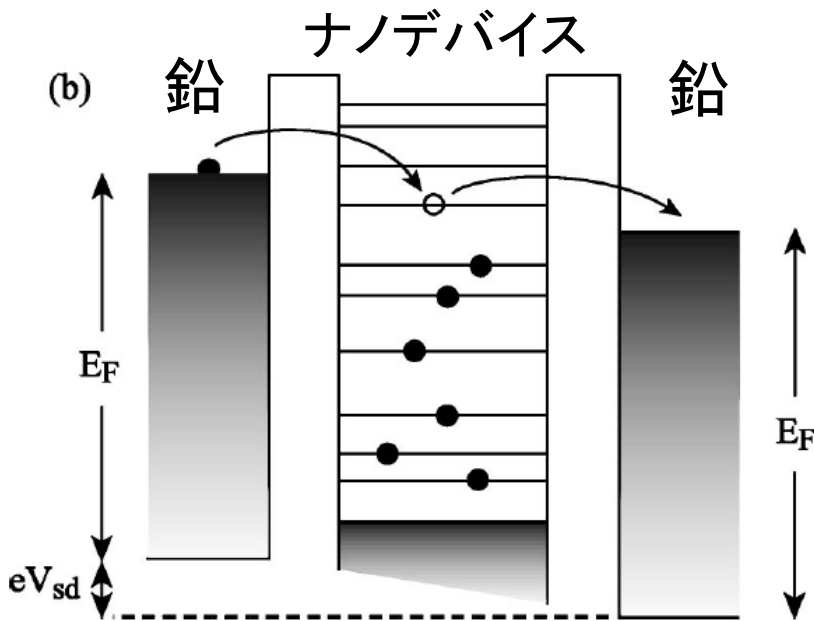
K. Uzawa and K.H., Phys. Rev. C110, 014321 (2024).

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



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

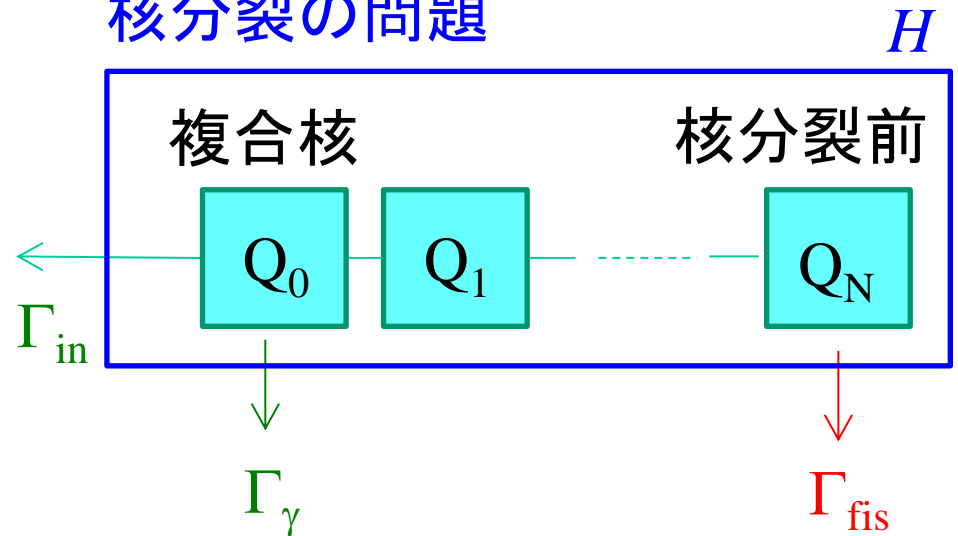
透過係数 (Datta公式): $T_{i \rightarrow j} = \text{Tr}[\Gamma_i G \Gamma_j G^\dagger]$



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

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

核分裂の問題



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

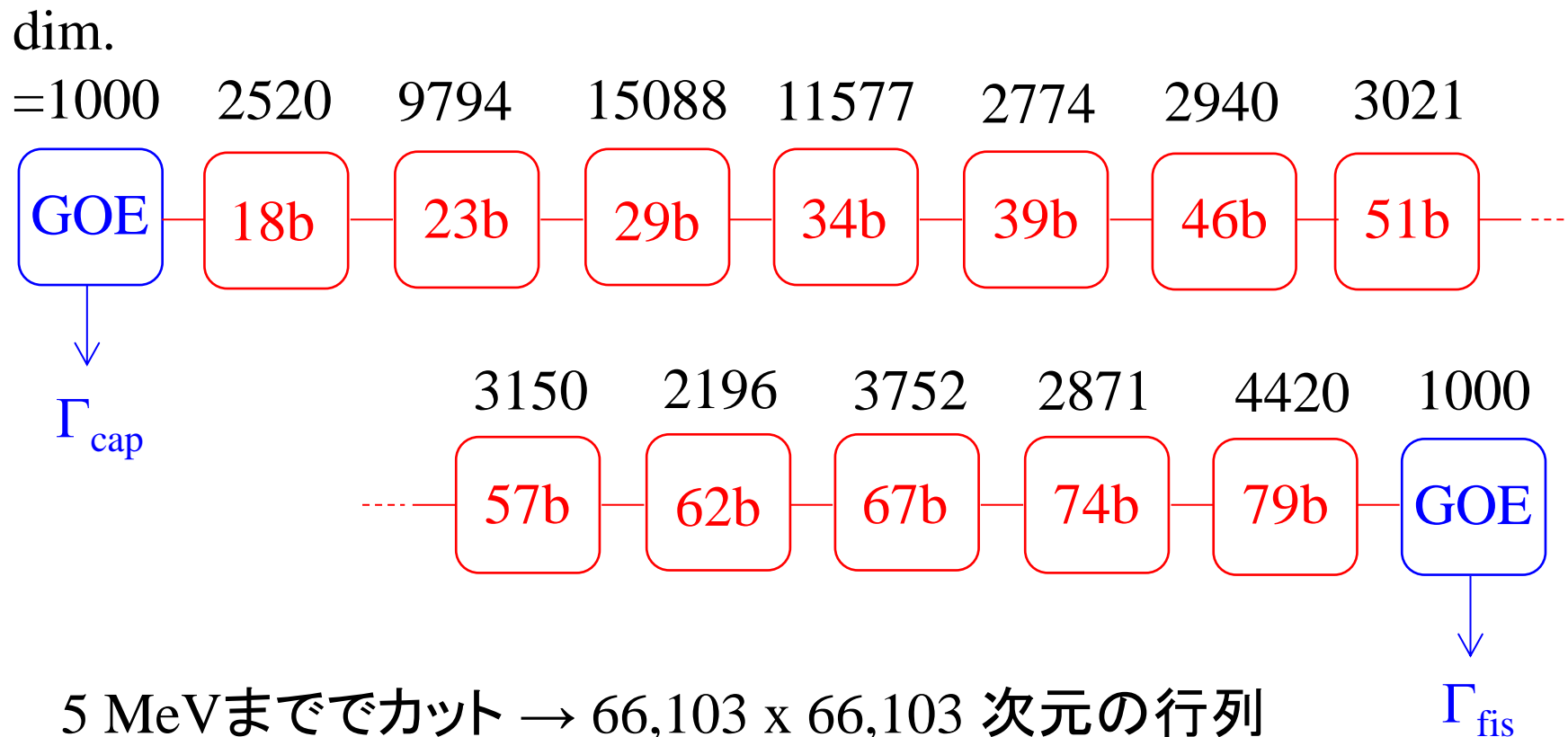
$$T_{in, fis} = \text{Tr}[\Gamma_{in} G \Gamma_{fis} G^\dagger]$$

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

^{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).

K. Uzawa and K.H., Phys. Rev. C110, 014321 (2024).



$$T_{CN \rightarrow \text{fis}} = \text{Tr}[\Gamma_n G \Gamma_{\text{fis}} G^\dagger]; \quad G = (H - NE)^{-1}$$

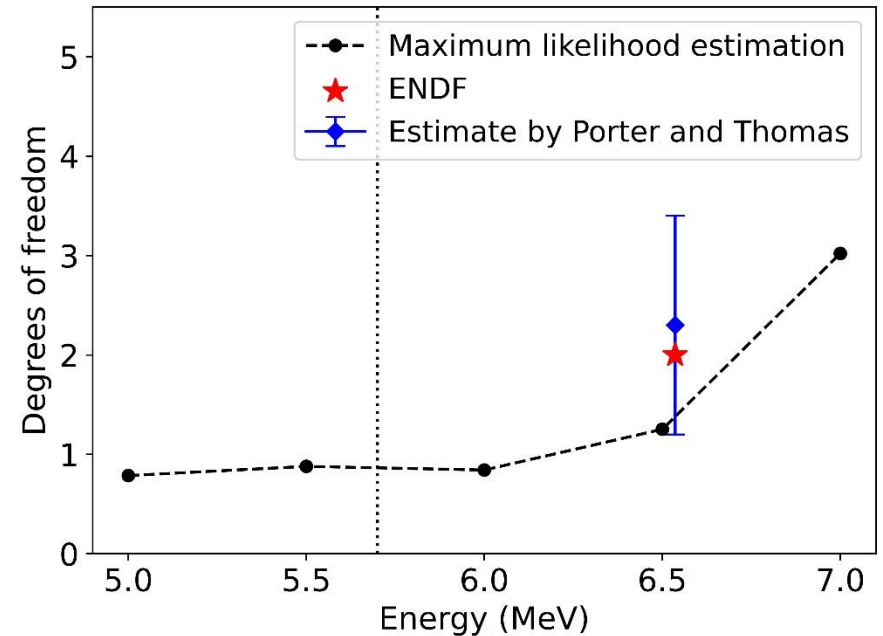
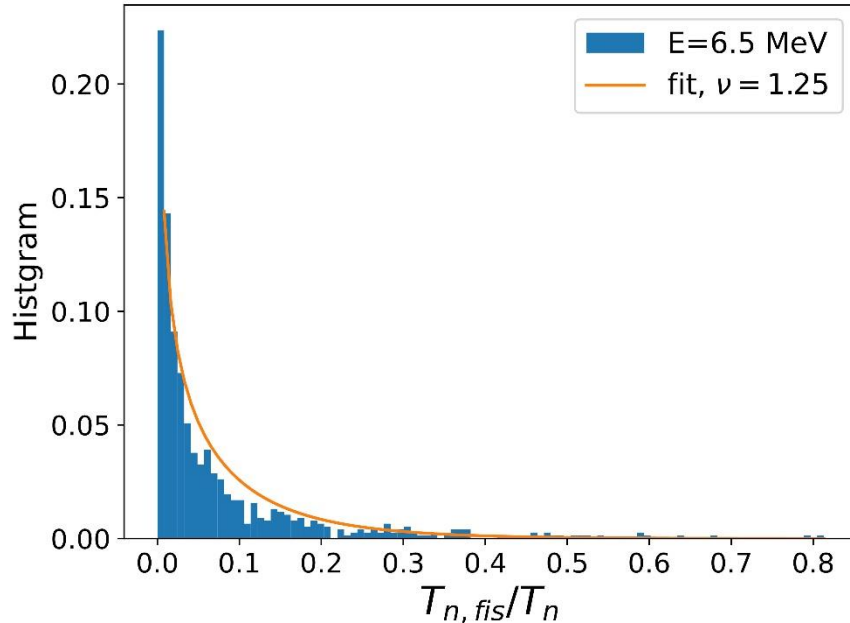
^{236}U 原子核の低エネルギー核分裂への適用

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

K. Uzawa and K.H., Phys. Rev. C110, 014321 (2024).

$$P_\nu(x) = \frac{\nu}{2\Gamma(\nu/2)} \left(\frac{\nu x}{2}\right)^{\nu/2-1} e^{-\nu x/2}$$

核分裂に関する自由度の数

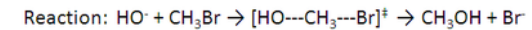
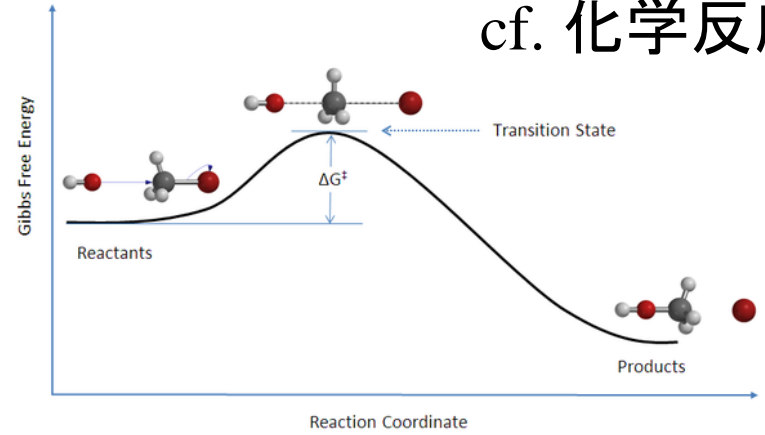
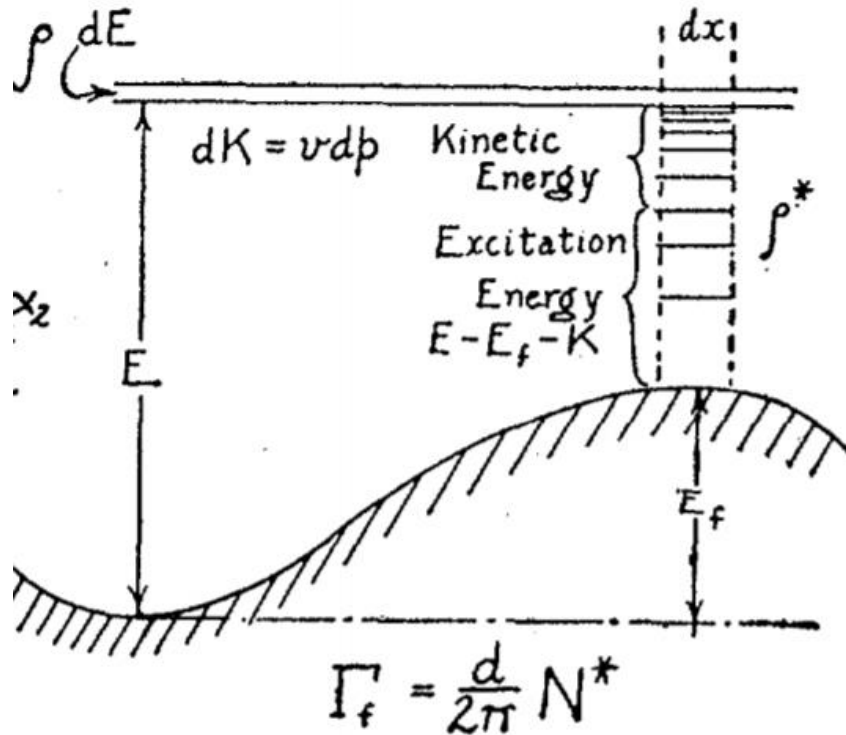


ほんの少数の自由度しか核分裂に関与していない ← 遷移状態理論

Bohr-Wheeler の式 (遷移状態理論)

$$\Gamma = \frac{\hbar\omega}{2\pi} e^{-\Delta V/k_B T}$$

cf. 化学反応



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

$$\Gamma_f = \frac{1}{2\pi \rho_{\text{gs}}(E^*)} \int_0^{E^* - B_f} \rho_{\text{sd}}(E^* - B_f - K) dK$$

障壁近傍の少数の状態しか核分裂に寄与しない

遷移状態理論で用いられる仮定を初めて微視的に確認できた！

超重元素生成反応について

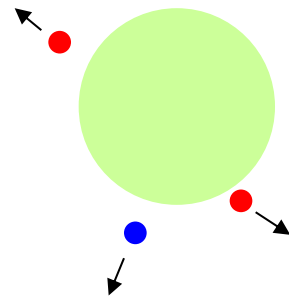
P

T

P+T

$$A_{CN} = A_P + A_T$$

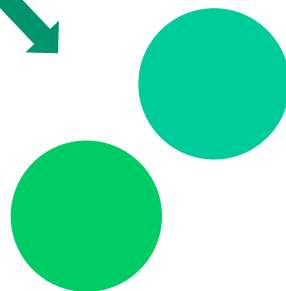
複合核



蒸発過程
($A_{CN} \lesssim 170$)

n, p, α 粒子放出
 γ 崩壊

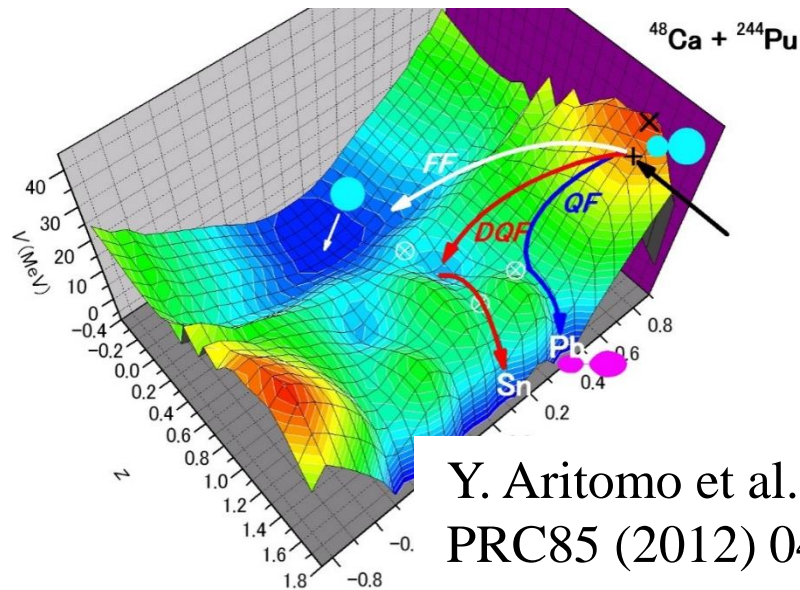
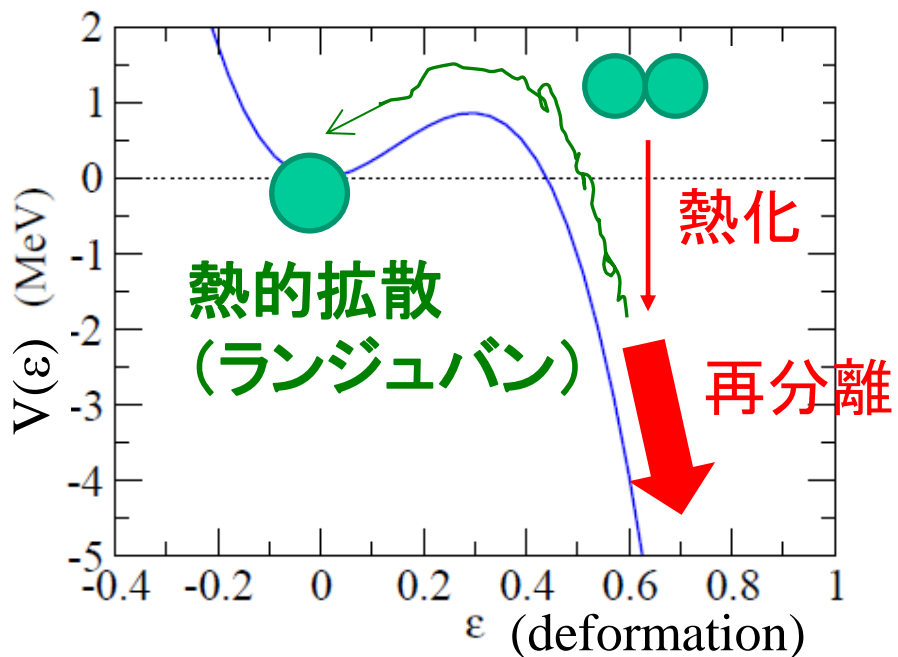
蒸発 + 核分裂
($170 \lesssim A_{CN} \lesssim 220$)



核分裂
($A_{CN} \gtrsim 220$)

cf. 超重元素

超重元素合成反応と超重元素の物理

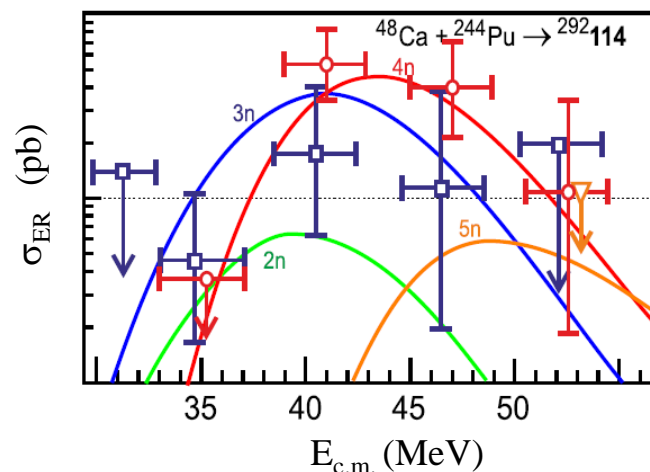


➤ 現象論的には成功

cf. (古典)ランジュバン方程式

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

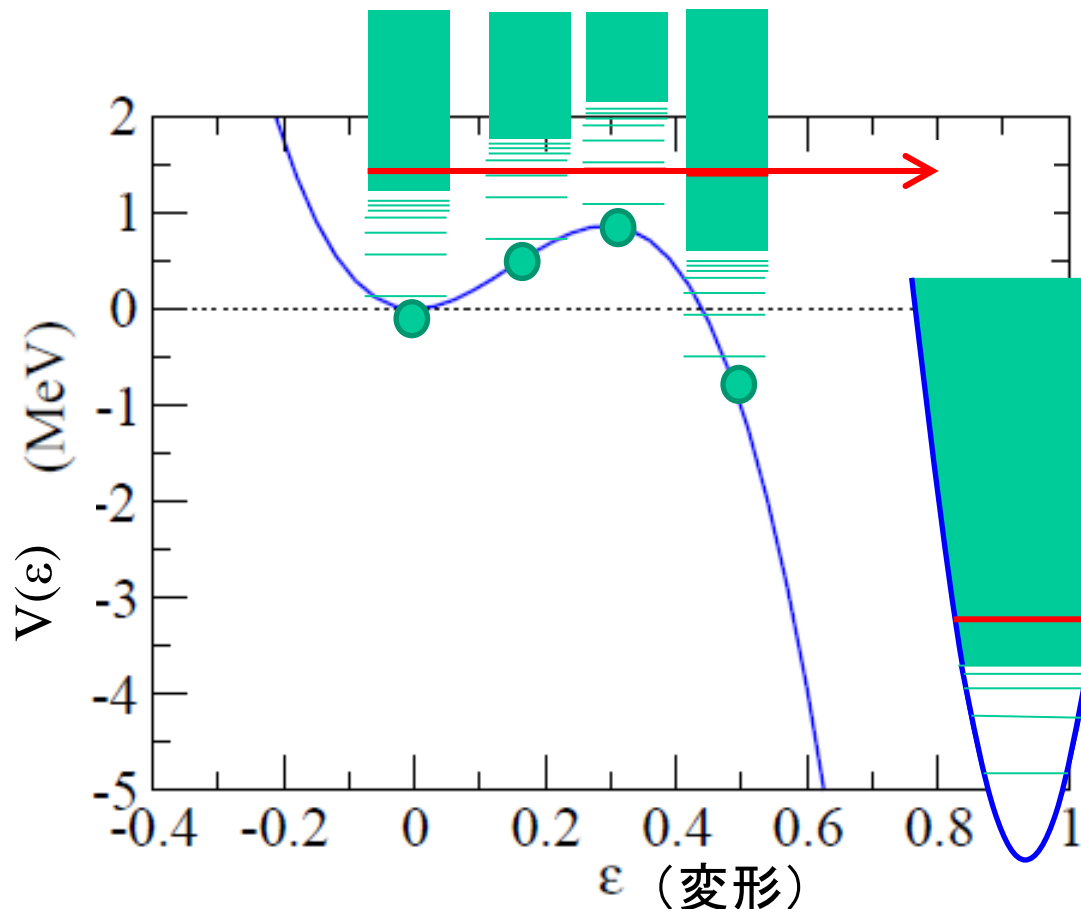
微視的に記述するのは絶望的か?



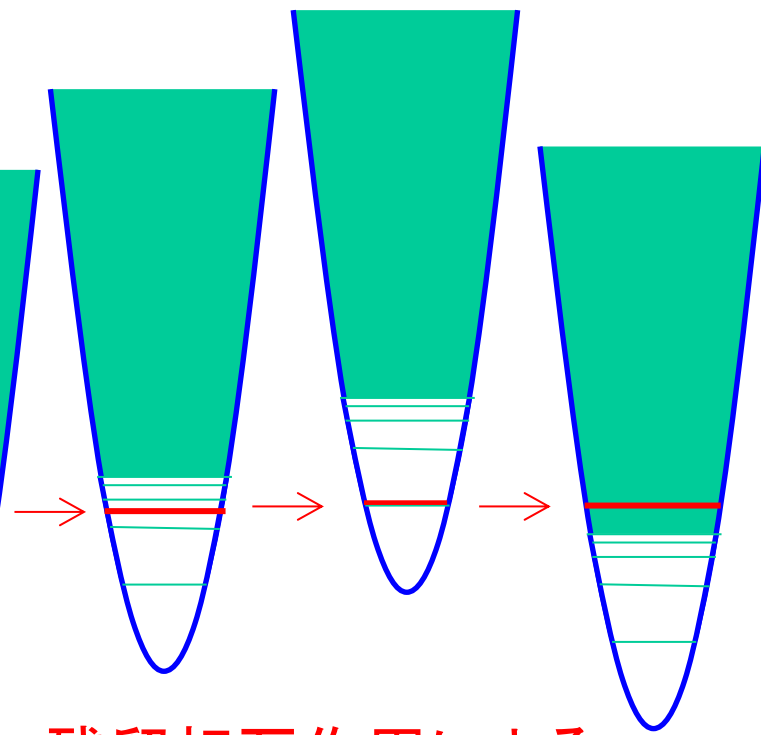
V.I. Zagrebaev and W. Greiner (2015)

超重元素合成反応と超重元素の物理

誘起核分裂に対する殻模型アプローチ



G.F. Bertsch and K.Hagino,
PRC107, 044615 (2023).



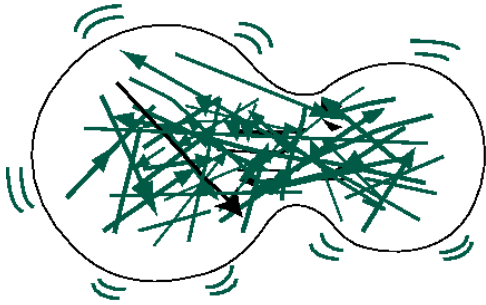
残留相互作用による
ホッピング

非平衡グリーン関数法 (Datta公式)

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

まとめ

核分裂や超重元素生成反応は微視的に記述できるのか？



簡単ではないかもしれないが、
少なくとも「絶望的」ということはないだろう
(特に低エネルギーでは)

➤ 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
や障壁トップでの核分裂

殻模型(配置間相互作用法)
+非平衡グリーン関数法を
用いた微視的理論を開発中

➤ 超重元素生成反応

微視的記述はcold fusion
などの低エネルギー反応
で重要となるかもしれない

殻模型(配置間相互作用法)
+非平衡グリーン関数法を
適用するとどうなるか?
→将来の課題