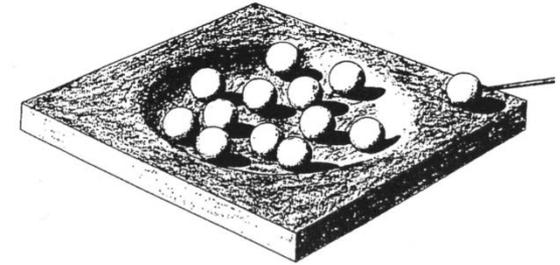
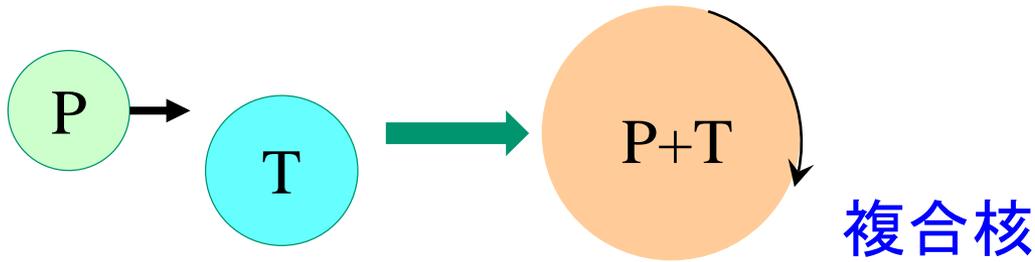


複合核反応の微視的理解に向けて

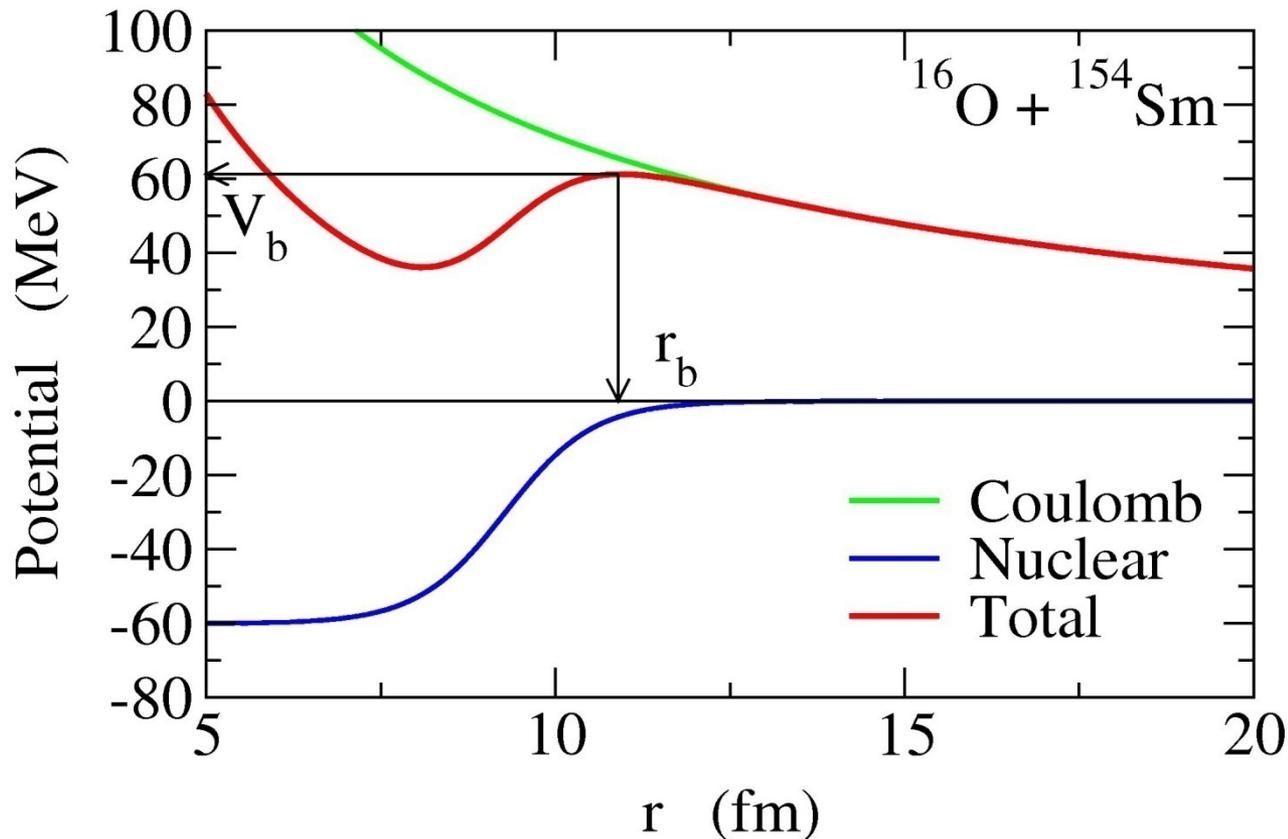
萩野浩一
京都大学

1. イントロダクション: 核融合反応
2. 超重核生成反応
3. 理論的課題
4. 微視的理解に向けて
5. パリティ非保存と量子ウォーク
6. まとめ

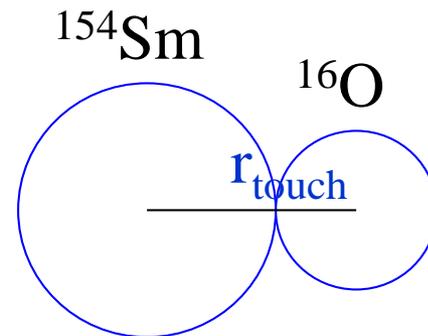
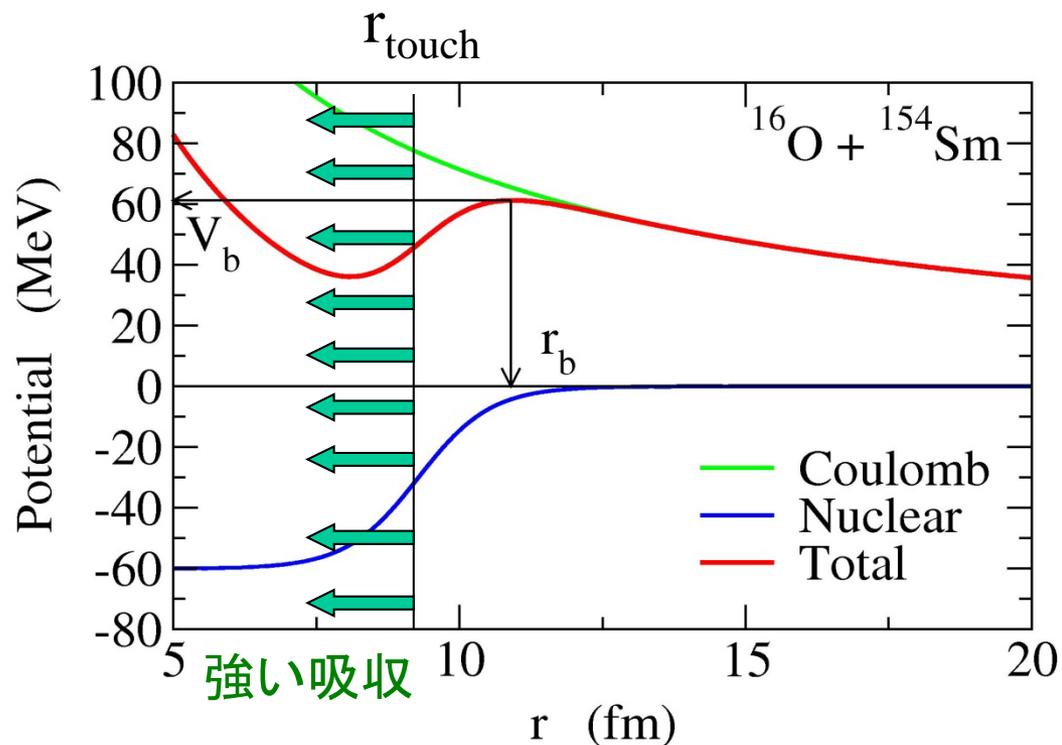
核融合反応：複合核生成反応



cf. Bohr '36



中重核領域における重イオン核融合反応



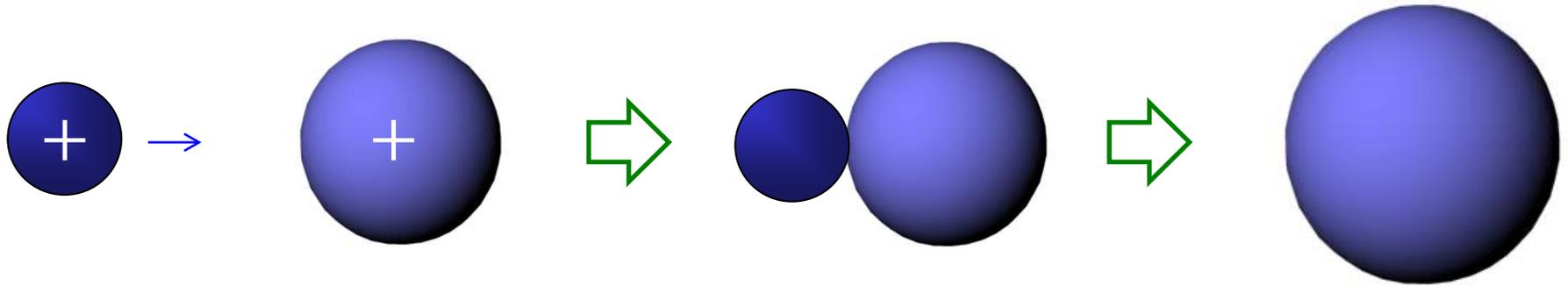
一度接触すると自動的に
複合核を形成
(強吸収の仮定)

- ✓ 吸収ポテンシャル
- ✓ 内向波境界条件 (IWBC)

$$\sigma_{\text{fus}} \sim \sigma_{\text{abs}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1) (1 - |S_l|^2) = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1) P_l$$

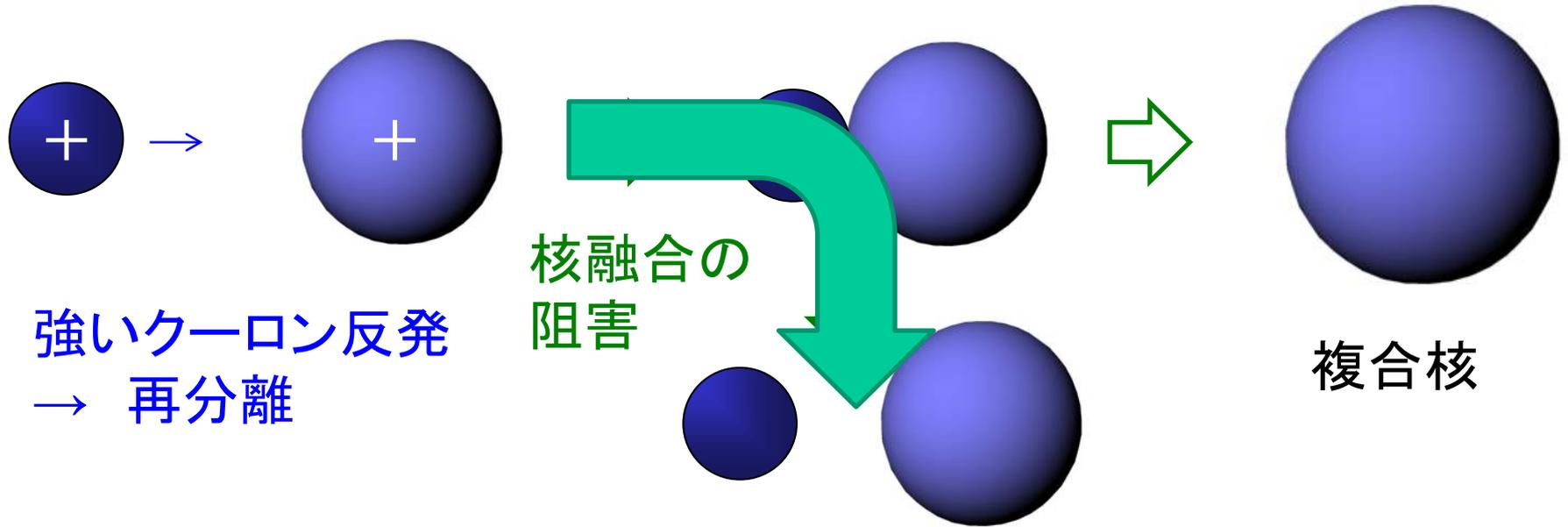
複合核形成の過程は陽に取り扱わない(くてよい)

中重核領域における重イオン核融合反応

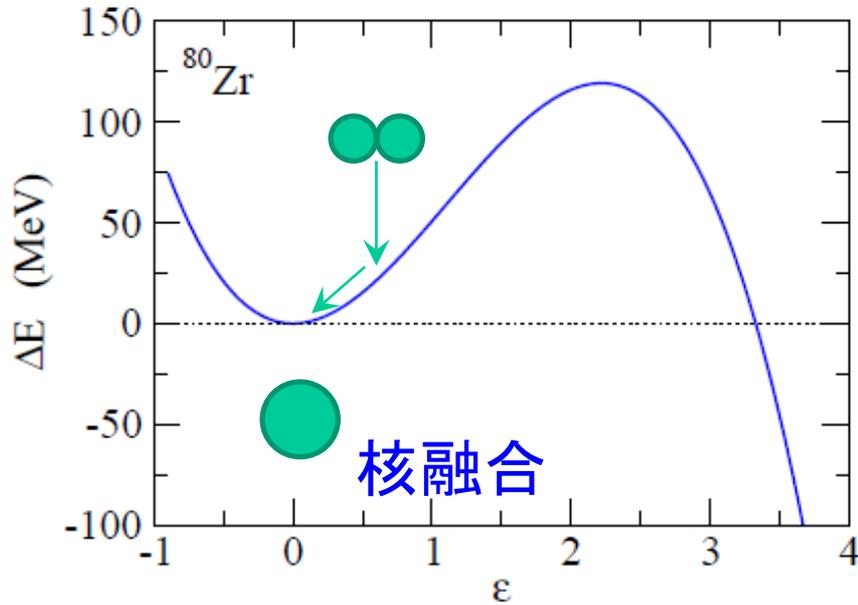


複合核

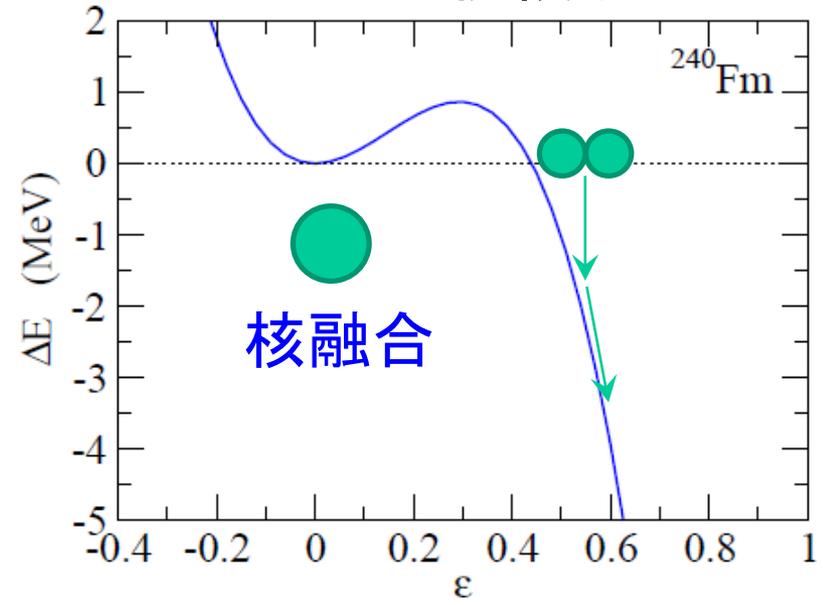
超重核領域における重イオン核融合反応



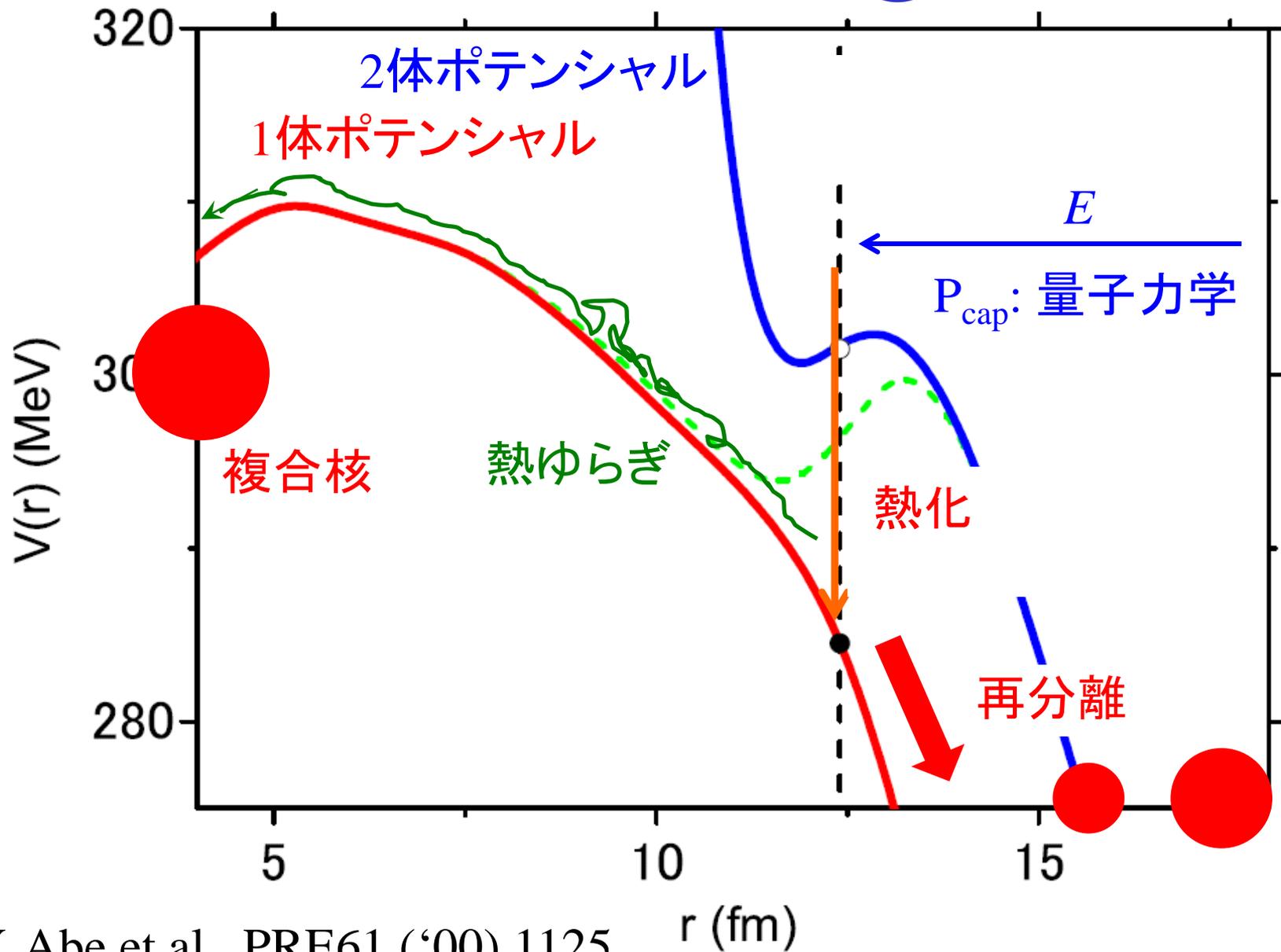
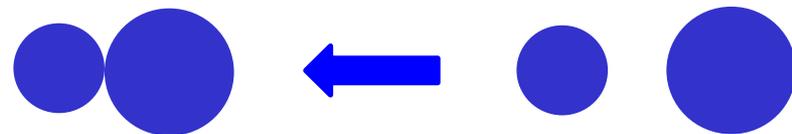
軽～中重核領域



超重核領域

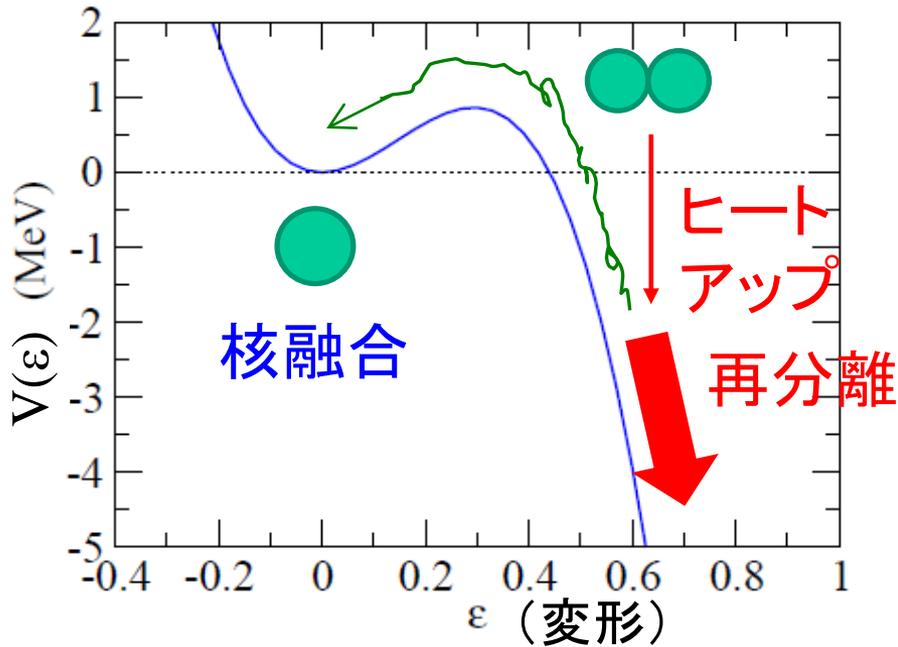


超重核生成反応



cf. Y. Abe et al., PRE61 ('00) 1125

ランジュバン法



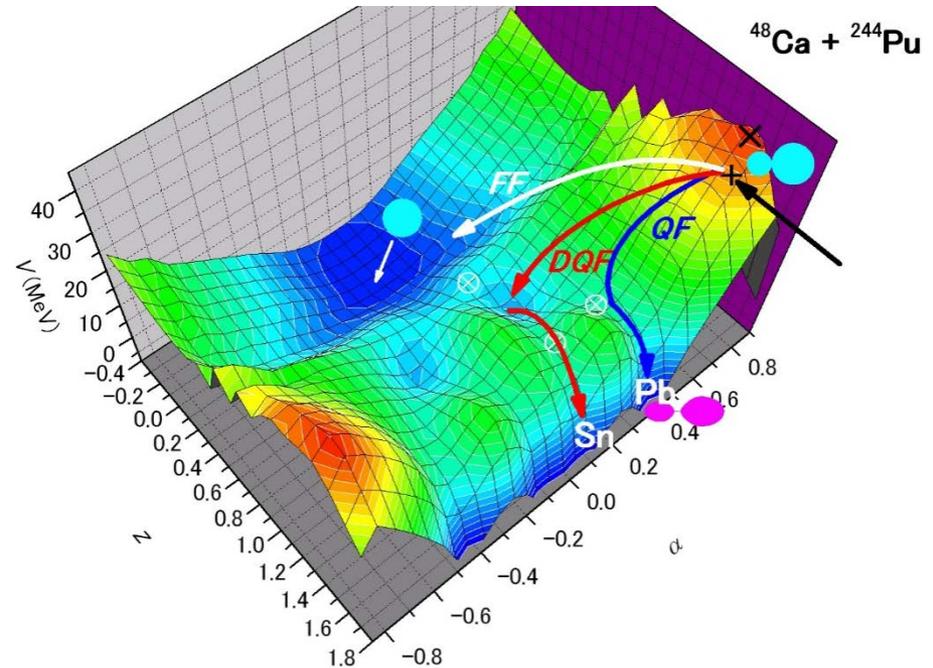
熱的拡散

→ ランジュバン法
(ブラウン運動)

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

多次元化

- ・フラグメント間距離
- ・フラグメントの変形
- ・2つのフラグメントの質量非対称度



- ✓ 和田、阿部、Boilley、Shen
- ✓ 有友、太田
- ✓ 千葉

CORENet プロジェクト: Quantum dynamics for superheavy elements

参加者: 萩野(京大)、時枝(東北大D3)、鷺山(九大)、
緒方(RCNP)、嶋(RCNP)、阿部(RCNP)

期間: 2019年9月～2021年3月(1年半)

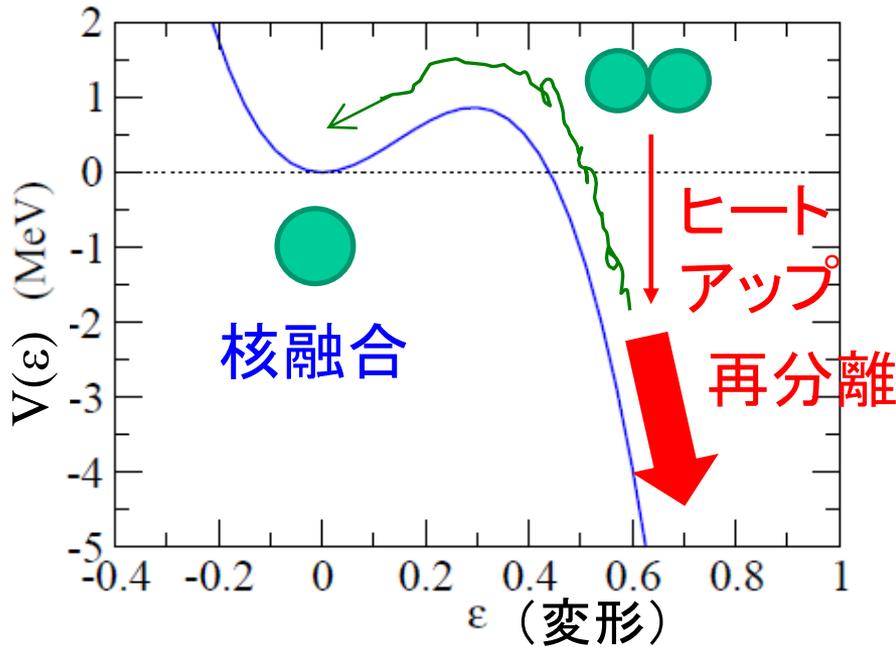
目的:

- 超重元素生成反応理論の現在のスタンダード:
古典ランジュバン法
 - 量子効果は効かないのか?
 - どのように量子効果を入れていくのか?
- 第一ステージの量子性はどのように失われていくのか?
→デコヒーレンス理論?

方法:

3～4ヶ月に一度程度集まって議論する。

理論物理学としての課題



ランジュバン方程式

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

理論物理学としての課題

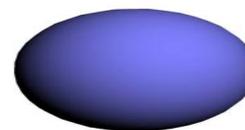
- ✓どのように熱化するのか?メカニズムは?
- ✓そもそも、「熱平衡」を仮定していいのか?
- ✓マルコフ過程で本当にいいのか?
- ✓量子効果?
- ✓量子系から古典系へデコヒーレンス?

→ 微視的模型?

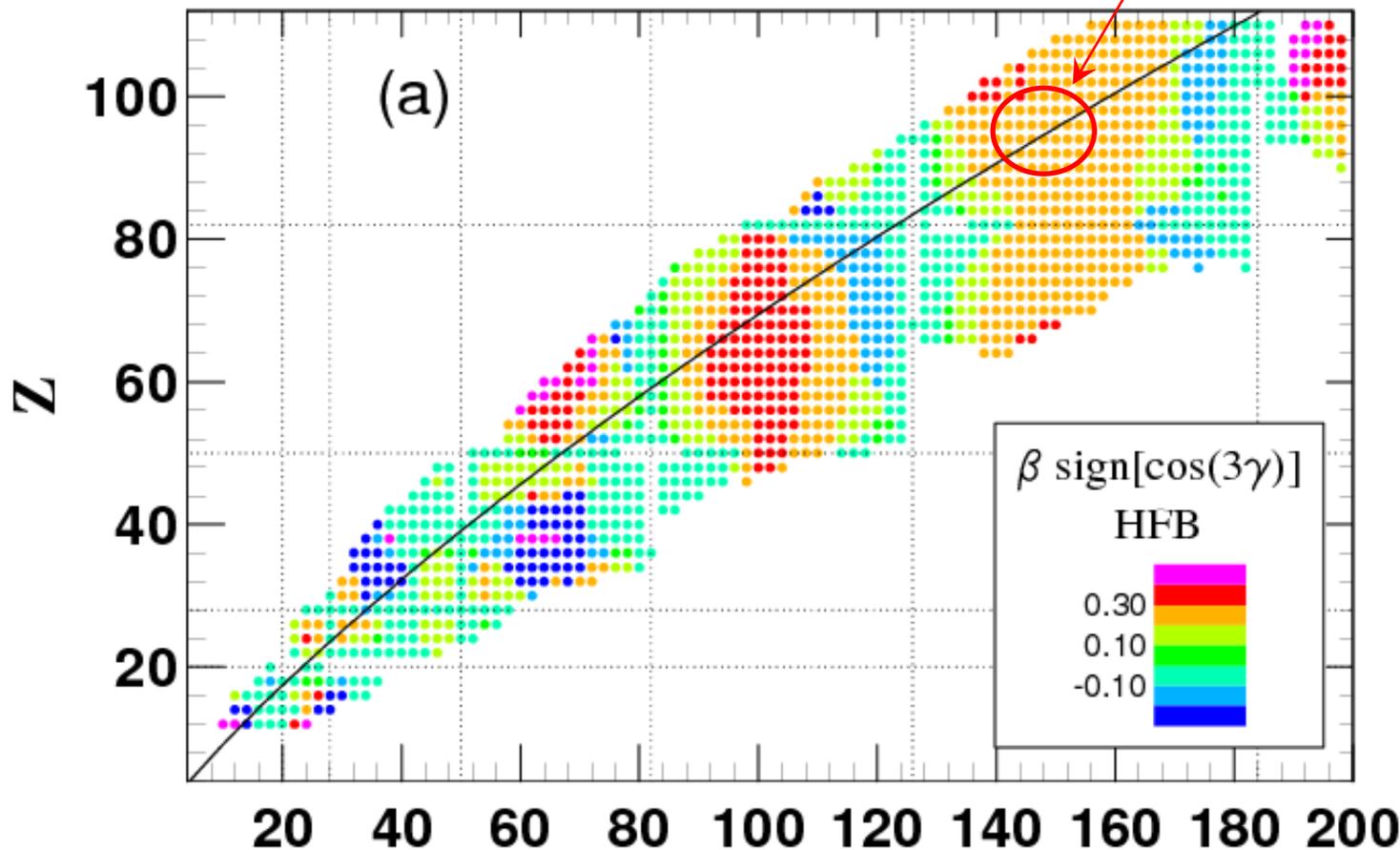
→ 量子開放系の物理

超重核生成反応と標的核の変形

熱い核融合： ^{48}Ca 入射核 + 変形標的核



actinides



複合核形成過程に対する標的核
の核変形の効果?

N

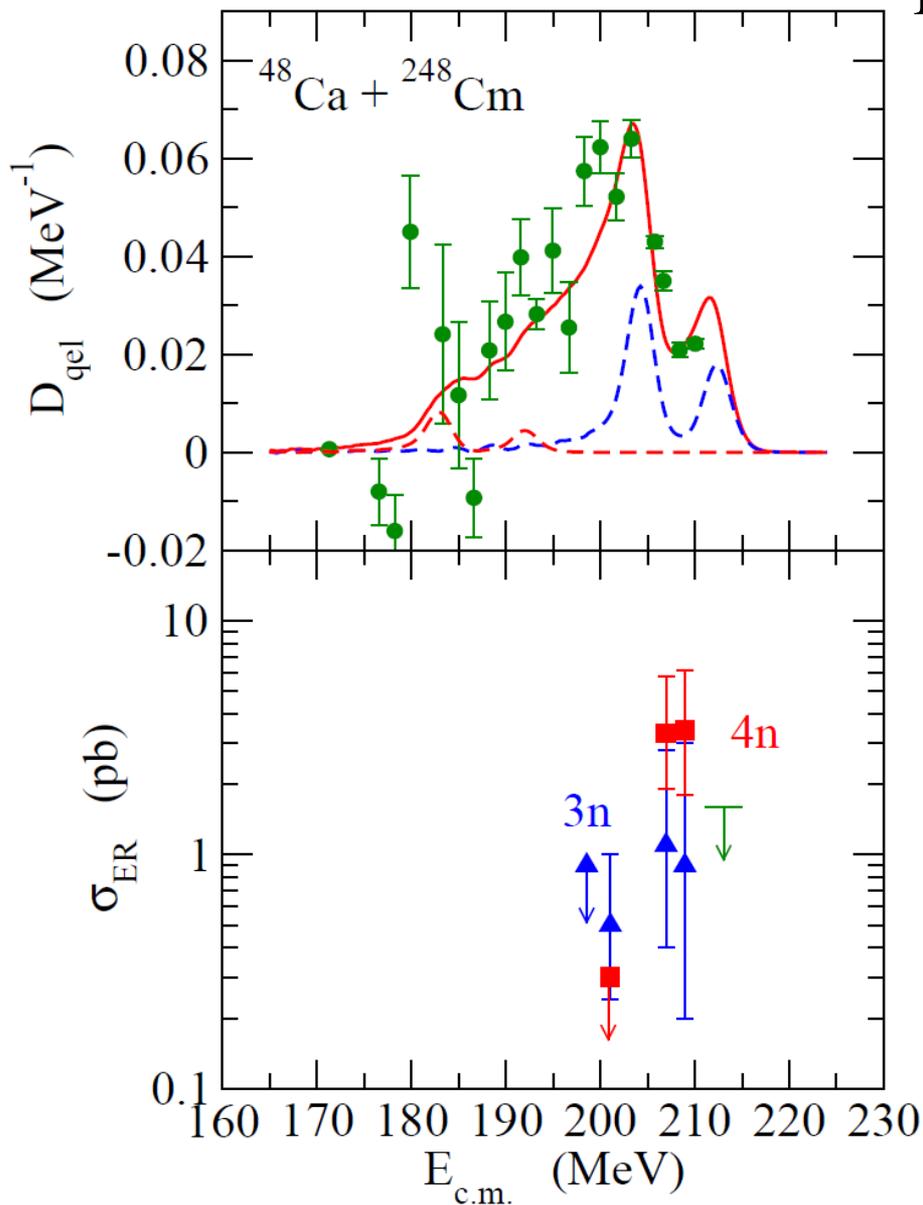
Gogny-D1S HFB calculation

J.-P. Delaroche et al.,
PRC81 ('10) 014303

超重核領域における障壁分布測定



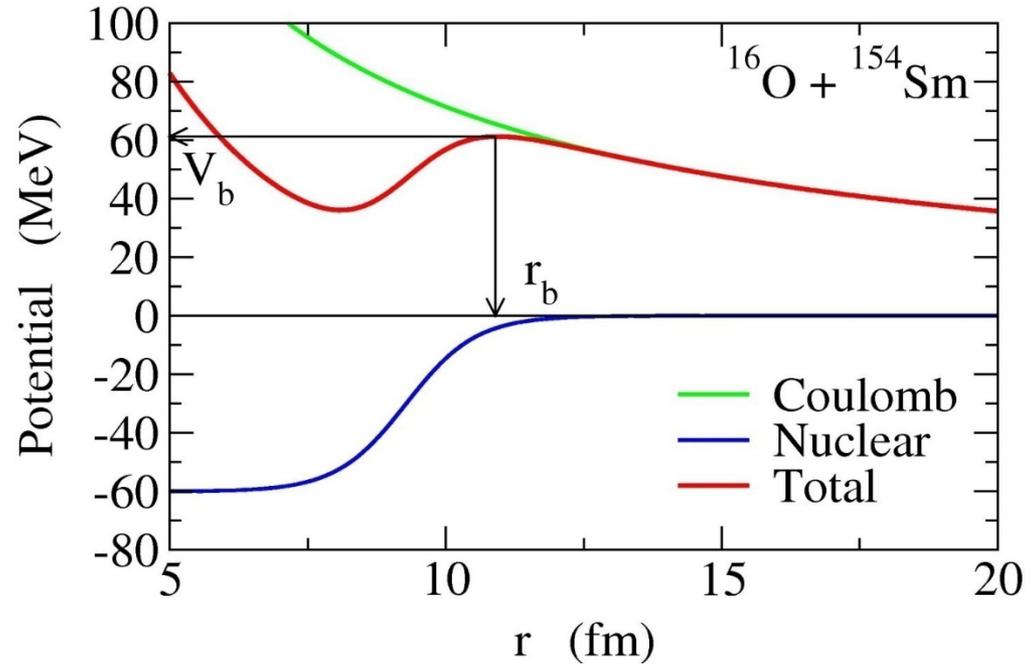
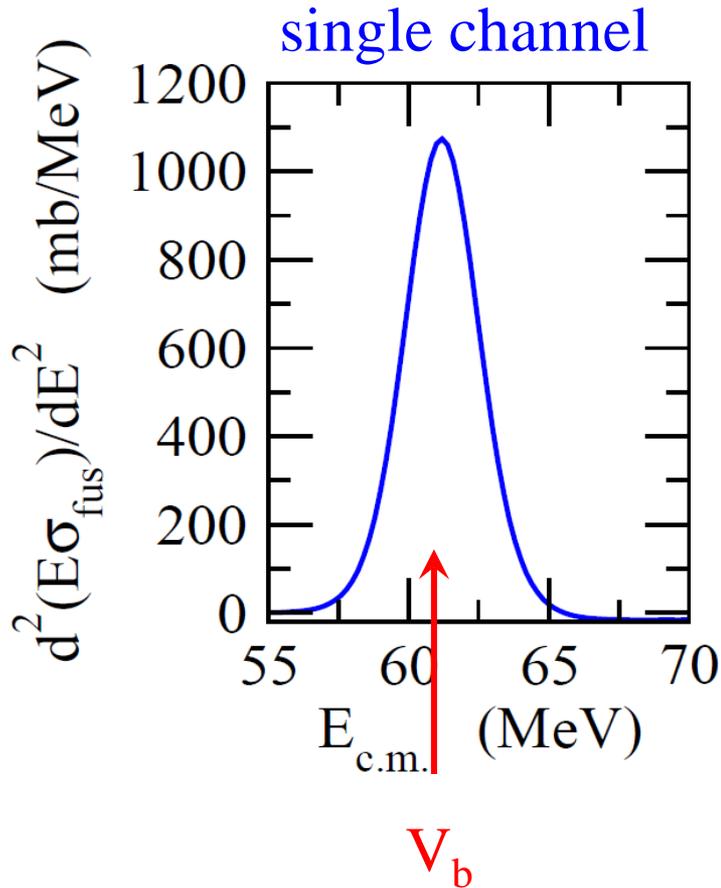
T. Tanaka, ..., K.H., et al.,
JPSJ 87 ('18) 014201
PRL124 ('20) 052502



capture barrier distribution

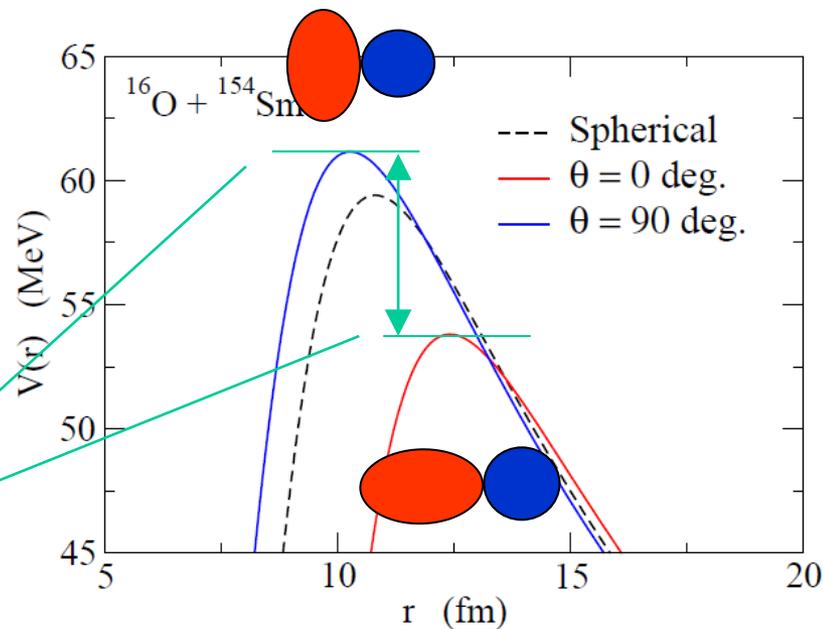
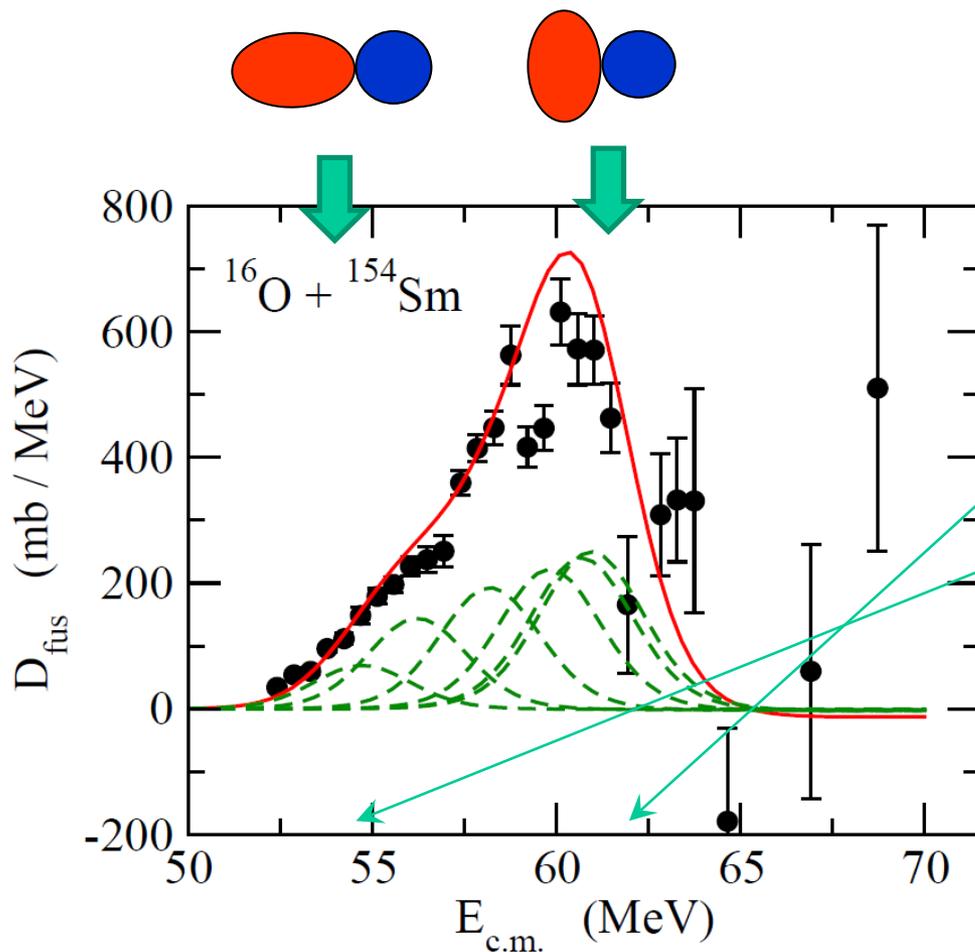
✓ 障壁分布 (Rowley, Satchler, Stelson, PLB254('91))

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



✓ 障壁分布 (Rowley, Satchler, Stelson, PLB254('91))

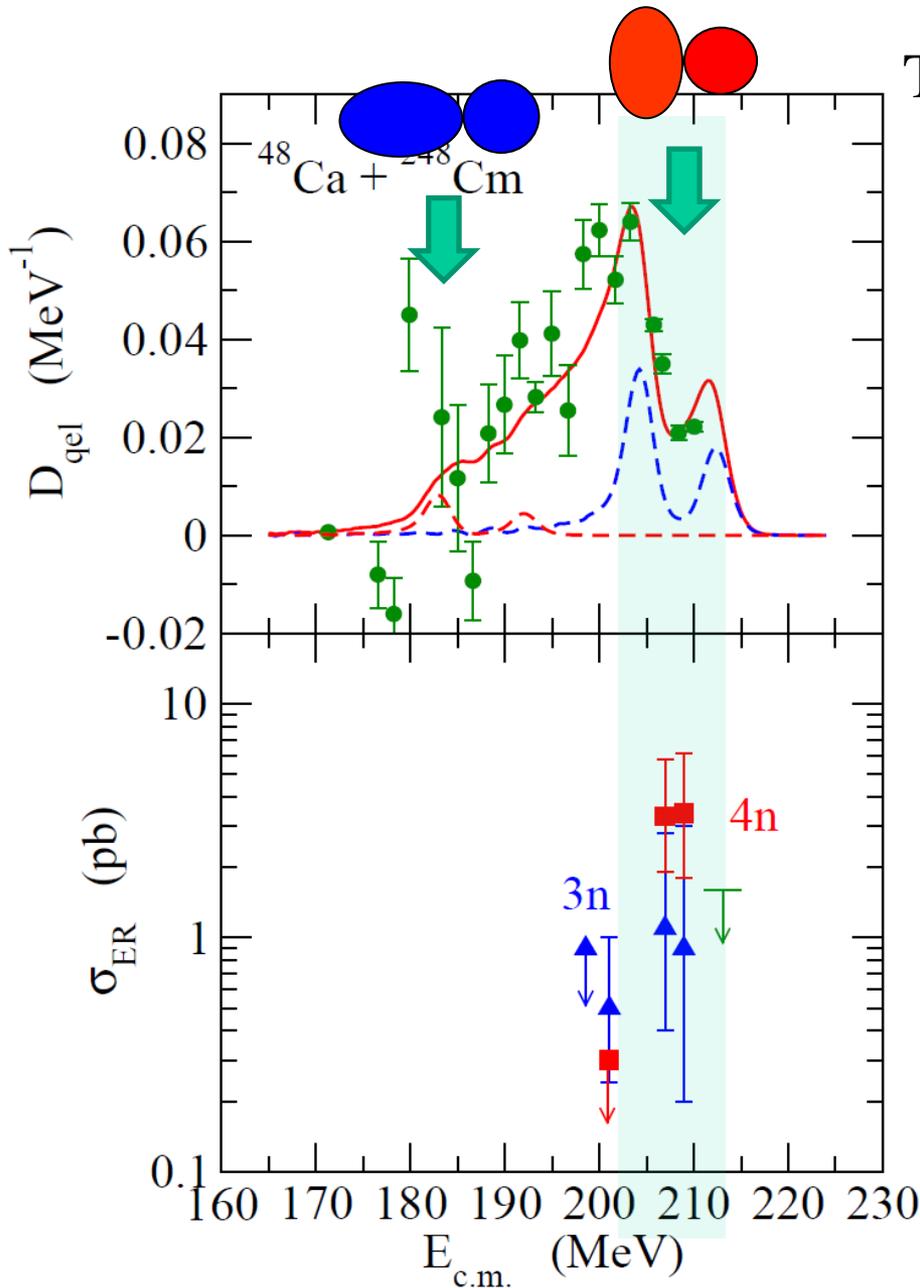
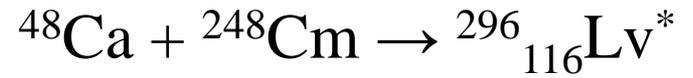
$$D_{\text{fus}}(E) = \frac{d^2(E\sigma_{\text{fus}})}{dE^2}$$



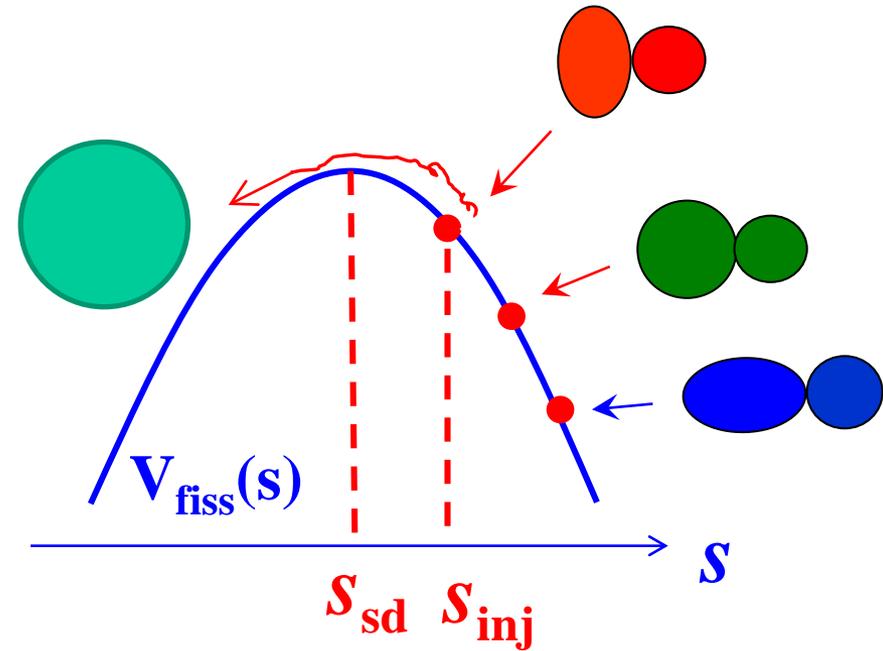
Data: J.R. Leigh et al.,
PRC52 ('95) 3151

can be used to identify
the side/tip collisions

超重核領域における障壁分布測定



T. Tanaka, ..., K.H., et al.,
 JPSJ 87 ('18) 014201
 PRL124 ('20) 052502

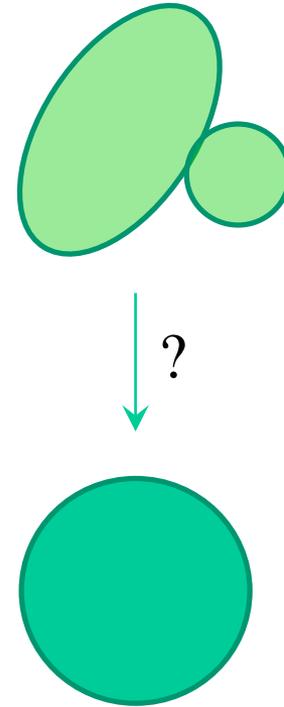
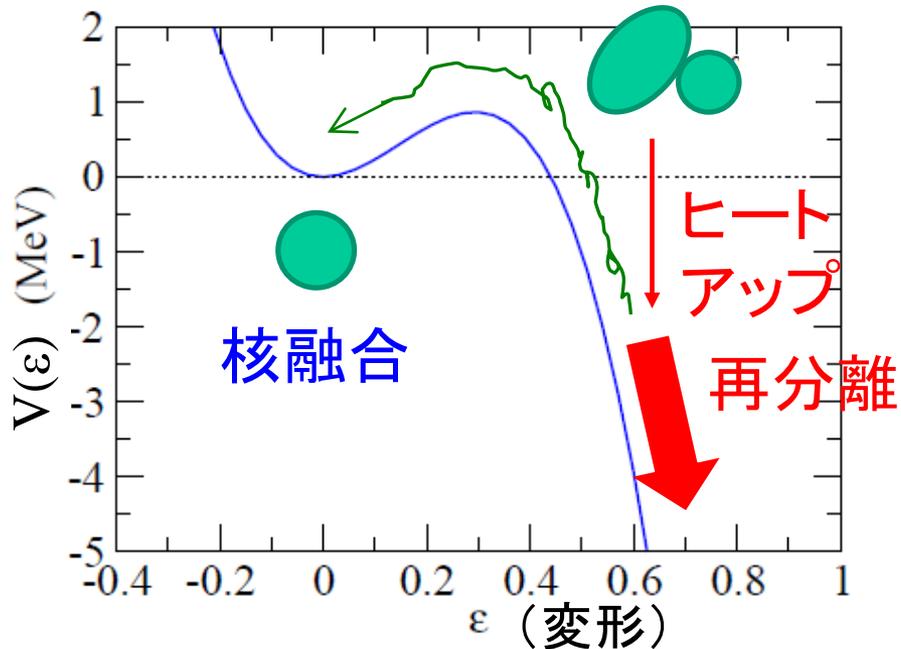


K. Hagino, PRC98 ('18) 014607

少なくとも接触直後までは標的核の変形度を固定して考えてもよさそう

超重核生成反応と標的核の変形

変形の効果



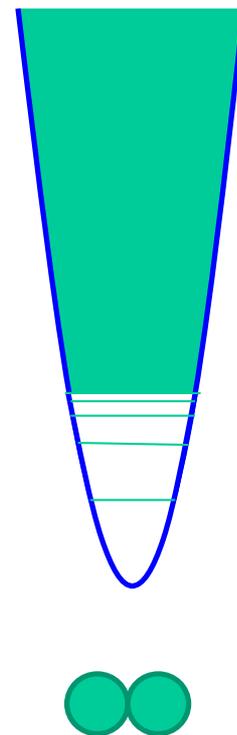
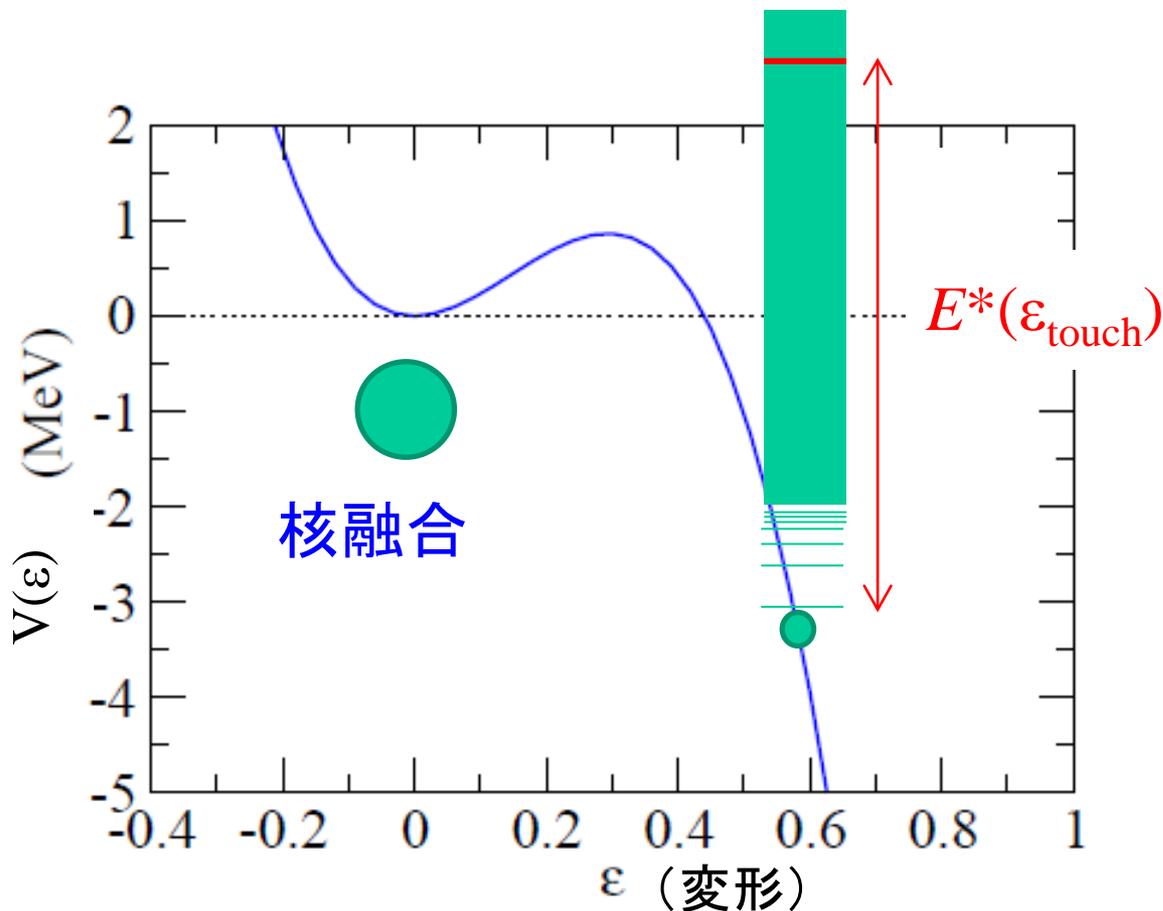
未解決の問題

- どのように形状が進化して複合核になっていくのか?
- 変形: 量子効果
ヒート・アップの過程でどのように変形が小さくなっていくのか?

摩擦の量子論

超重元素生成反応理論の微視的理解に向けて

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

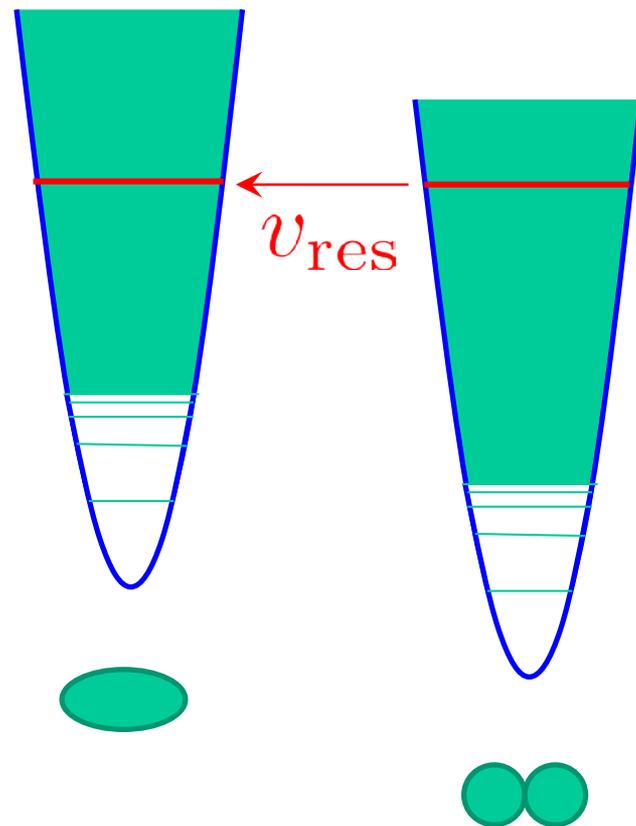
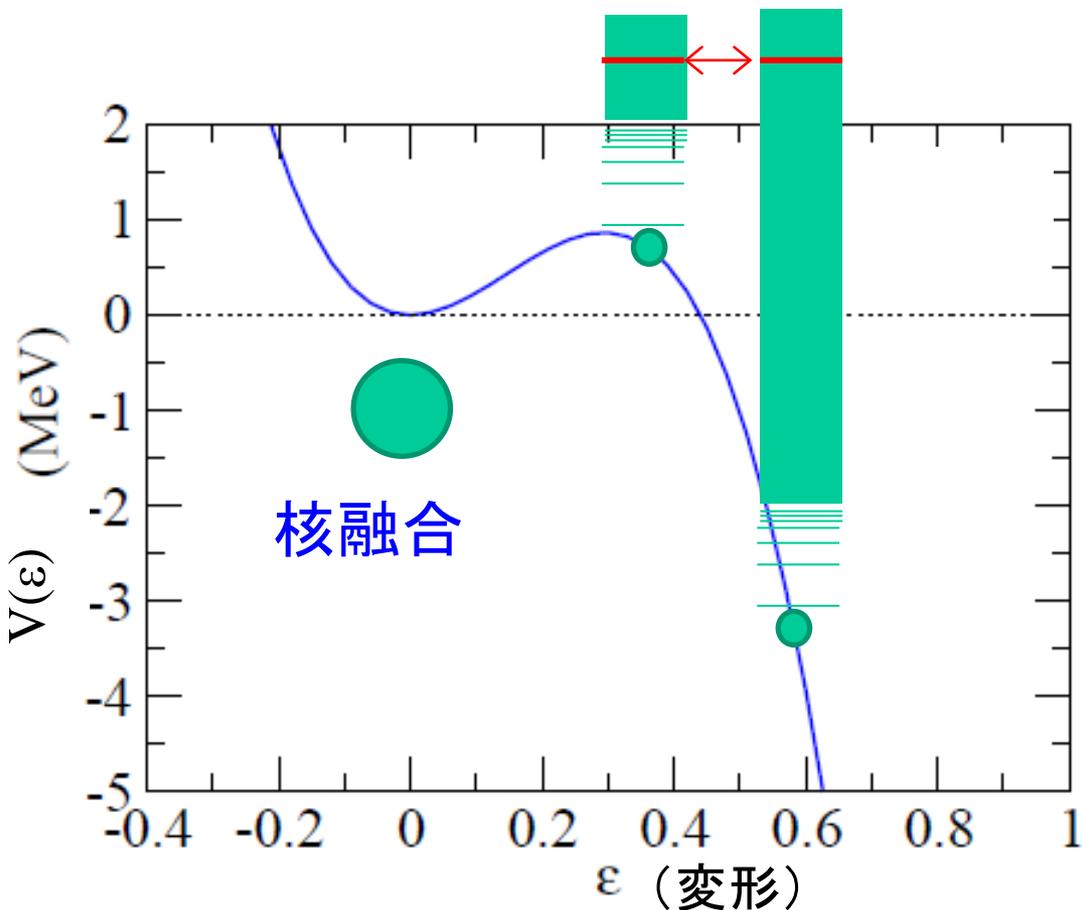


形を決めたときの平均場
ポテンシャルでの準位

超重元素生成反応理論の微視的理解に向けて

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

残留相互作用

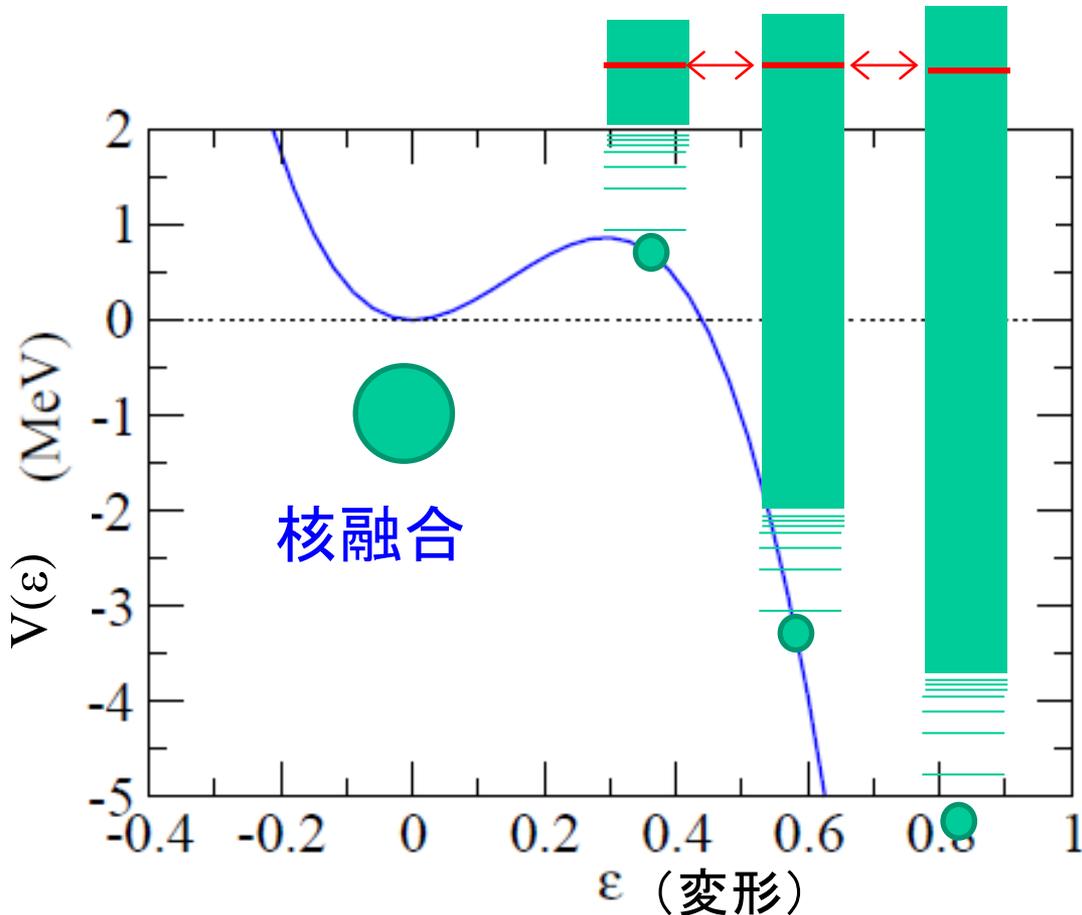


$$D = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_f |\langle i | v_{\text{res}} | f \rangle|^2 \times \delta(E_f - E_i)$$

超重元素生成反応理論の微視的理解に向けて

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

残留相互作用



- ✓ B.W. Bush, G.F. Bertsch, and B.A. Brown, Phys. Rev. C45 ('92) 1709
- ✓ D. Cha and G.F. Bertsch, Phys. Rev. C46 ('92) 306

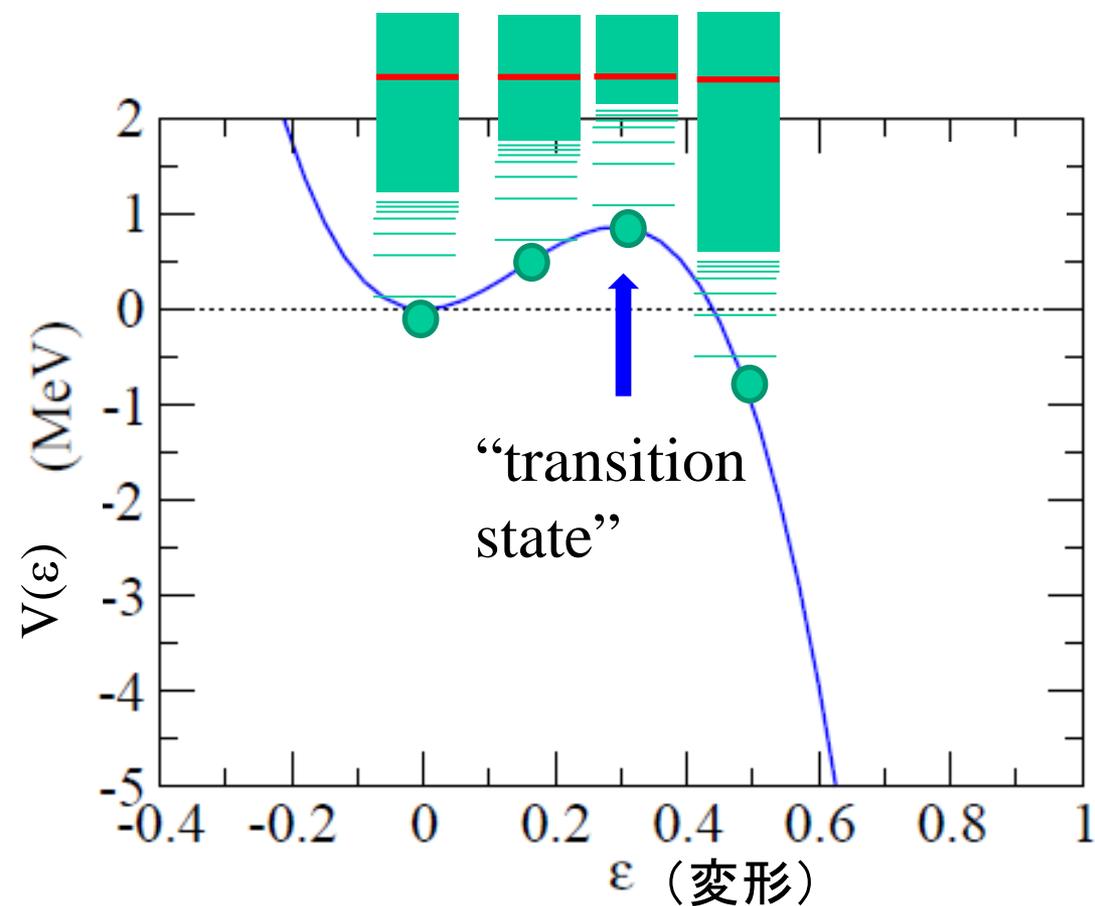
スモルコフスキー方程式

$$\dot{P} = \frac{D}{T} \frac{\partial}{\partial \beta} \left(- \frac{\partial V}{\partial \beta} P \right) + D \frac{\partial^2 P}{\partial \beta^2}$$

$$D = \frac{2\pi}{\hbar} (\Delta\beta)^2 \sum_f |\langle i | v_{\text{res}} | f \rangle|^2 \times \delta(E_f - E_i)$$

誘起核分裂の微視的理解に向けて

K. Hagino and G.F. Bertsch, an ongoing work



誘起核分裂への適用



生成座標法 + 殻模型による
核分裂の記述

cf. 自発核分裂に対する
殻模型アプローチ

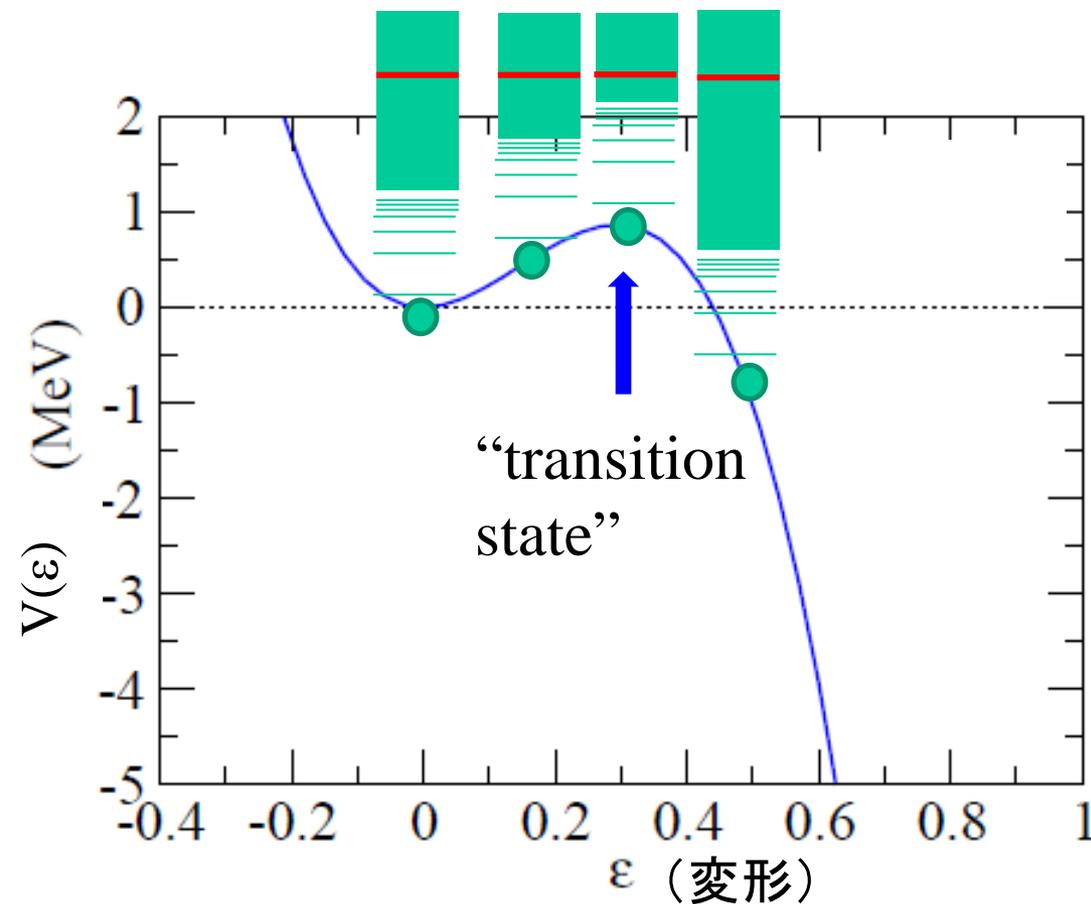
K.H. and G.F. Bertsch,
Phys. Rev. C101 ('20) 064317
Phys. Rev. C102 ('20) 024316

誘起核分裂の微視的理解に向けて

K. Hagino and G.F. Bertsch, an ongoing work

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

(Bohr-Wheeler)



transition state theory
の妥当性?

誘起核分裂の微視的理解に向けて

K. Hagino and G.F. Bertsch, an ongoing work

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

(Bohr-Wheeler)

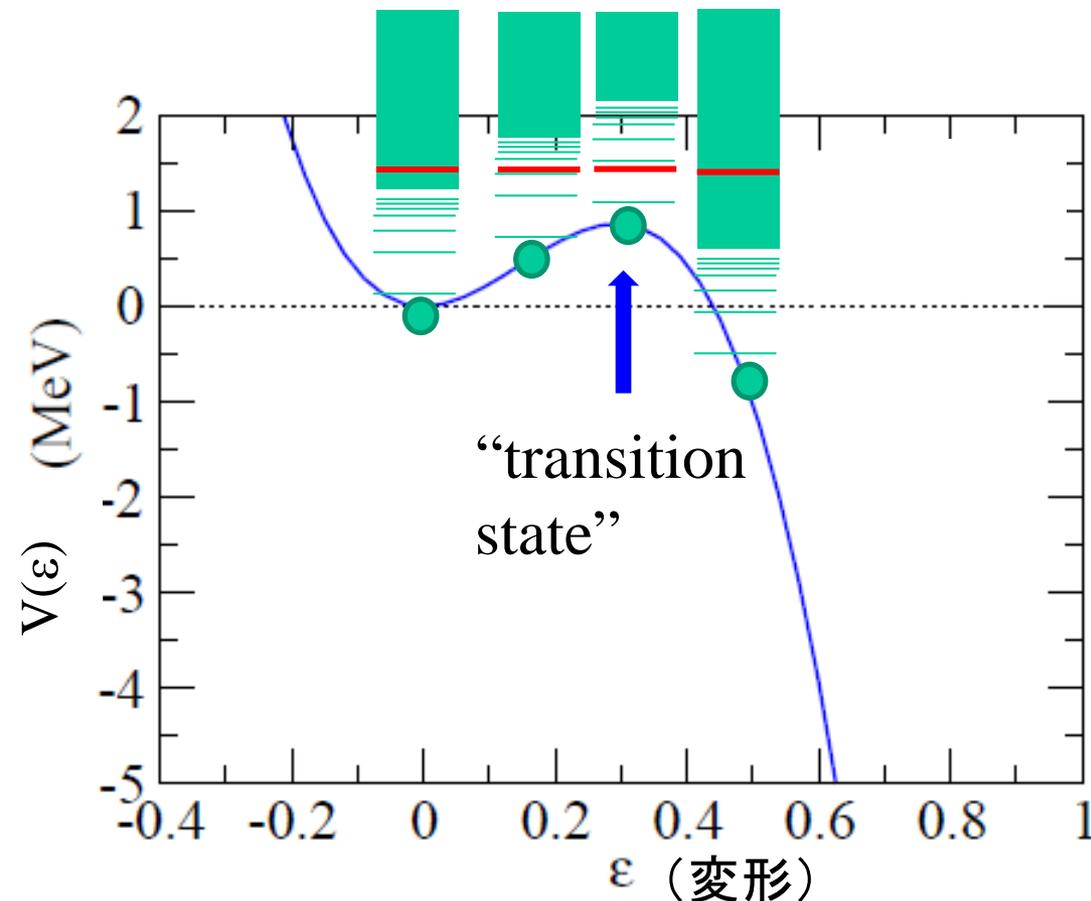
transition state theory
の妥当性?

cf. 熱中性子吸収による
 ^{236}U の核分裂

$$E^* = 6.3 \text{ MeV},$$

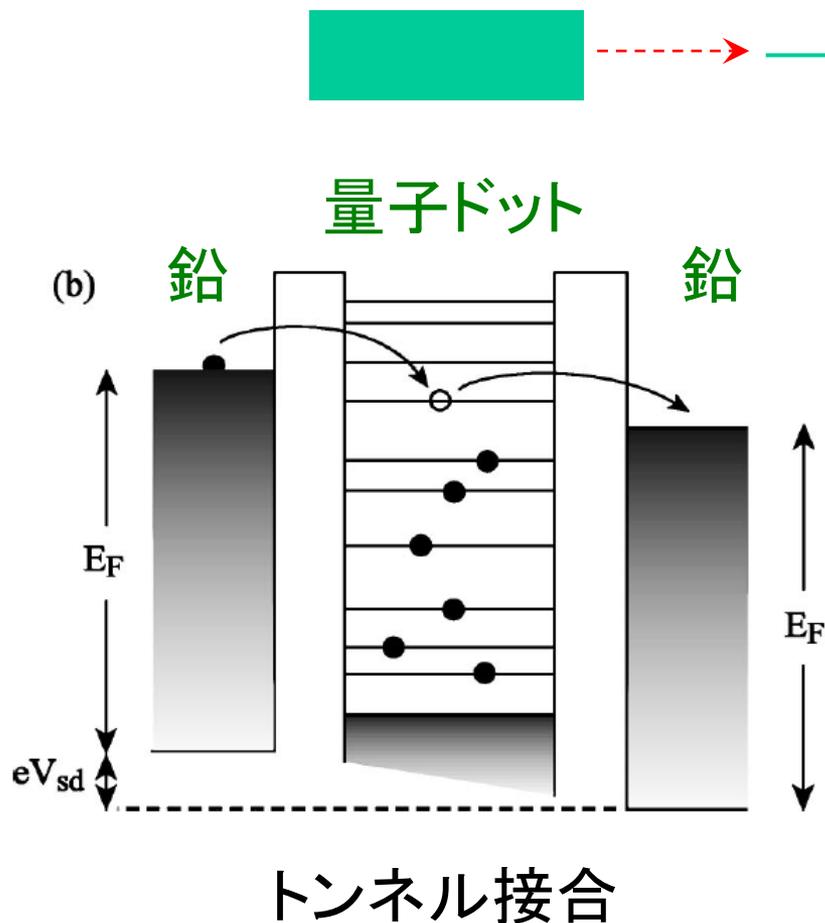
$$B_f \sim 5.7 \text{ MeV}$$

どのくらい E^* が大きければ
BW公式はよくなるのか?



誘起核分裂の微視的理解に向けて

K. Hagino and G.F. Bertsch, an ongoing work



ランダウアー公式

$$T = \frac{\Gamma_R \Gamma_L}{E^2 + (\Gamma_R + \Gamma_L)^2 / 4}$$

G.F. Bertsch,

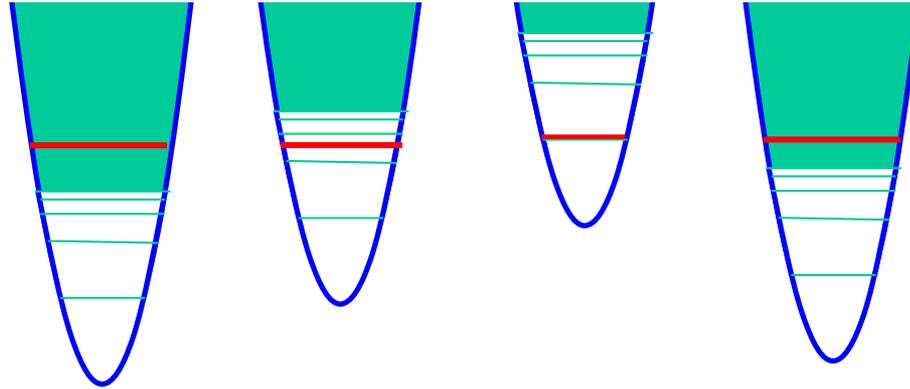
J. Phys. Cond. Matt. 3 ('91) 373
arXiv:1407.1899 (nucl-th)

G.F. Bertsch and J.M. Mehlhaff,
EPJ Web of Conf. 122 ('16) 01001

Y. Alhassid, RMP72 ('00) 895

誘起核分裂の微視的理解に向けて

K. Hagino and G.F. Bertsch, an ongoing work



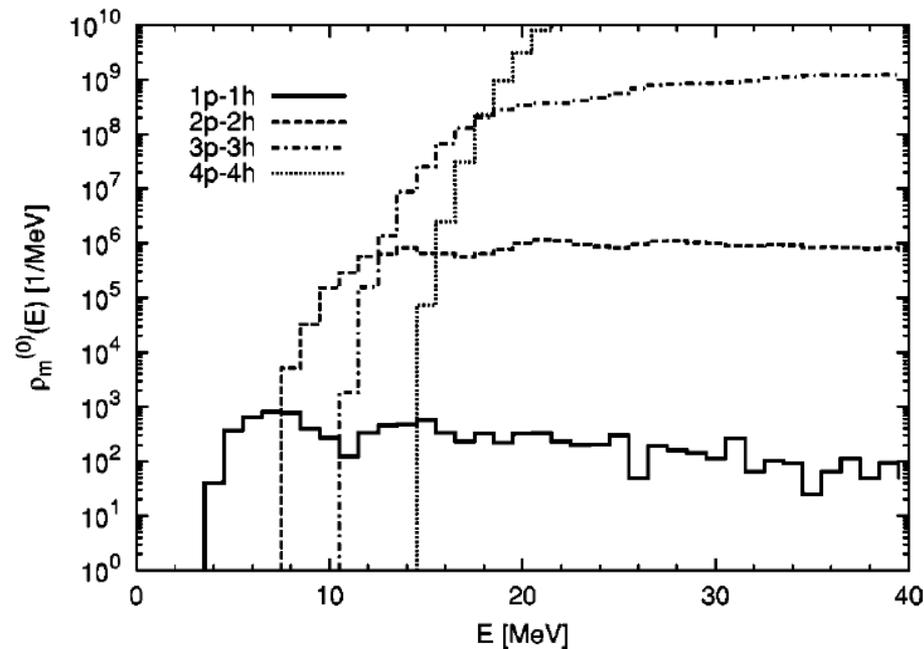
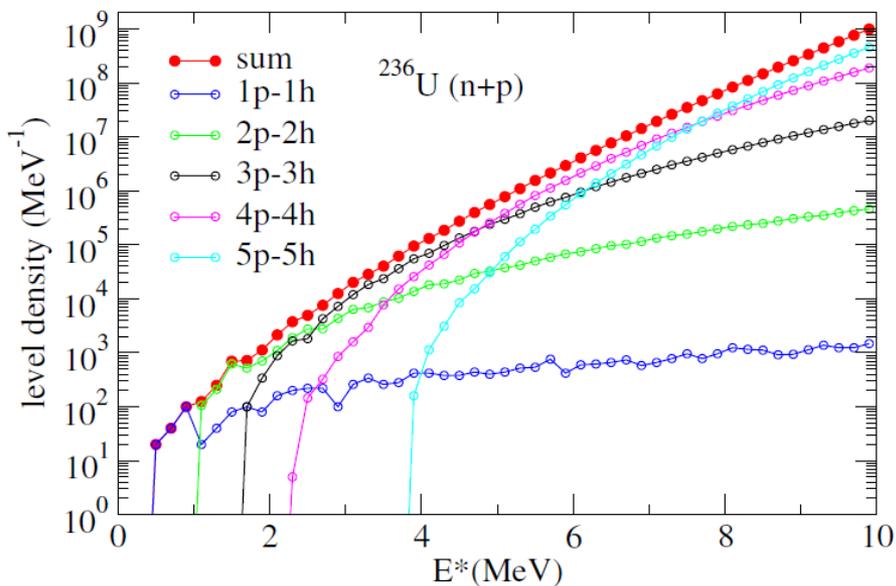
- ✓ どのくらいの E^* から複合核とみなしてよいか?
- ✓ どのくらいの E^* から統計的手法を用いてよいのか?

→準位密度

誘起核分裂の微視的理解に向けて

準位密度

deformed Woods-Saxon potential



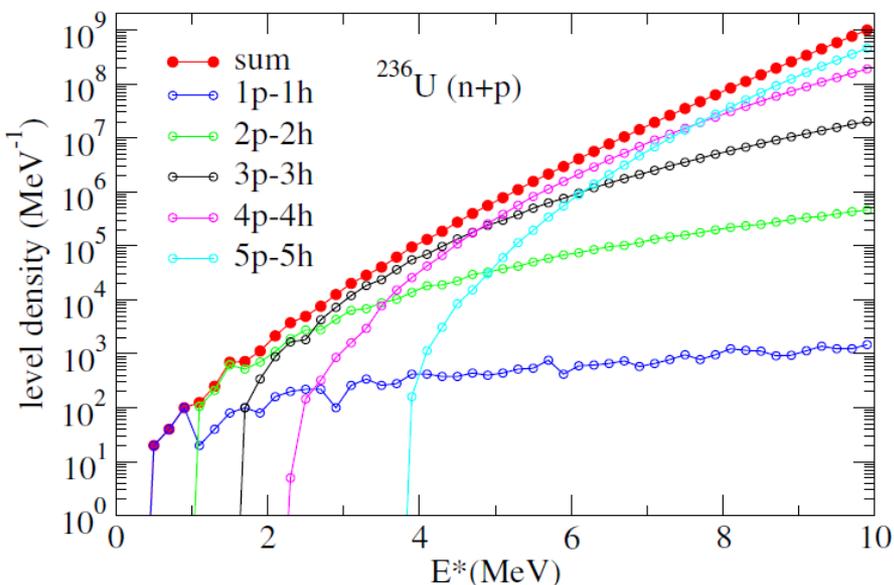
cf. T. Kawano and S. Yoshida,
PRC64 ('01) 024603

^{208}Pb

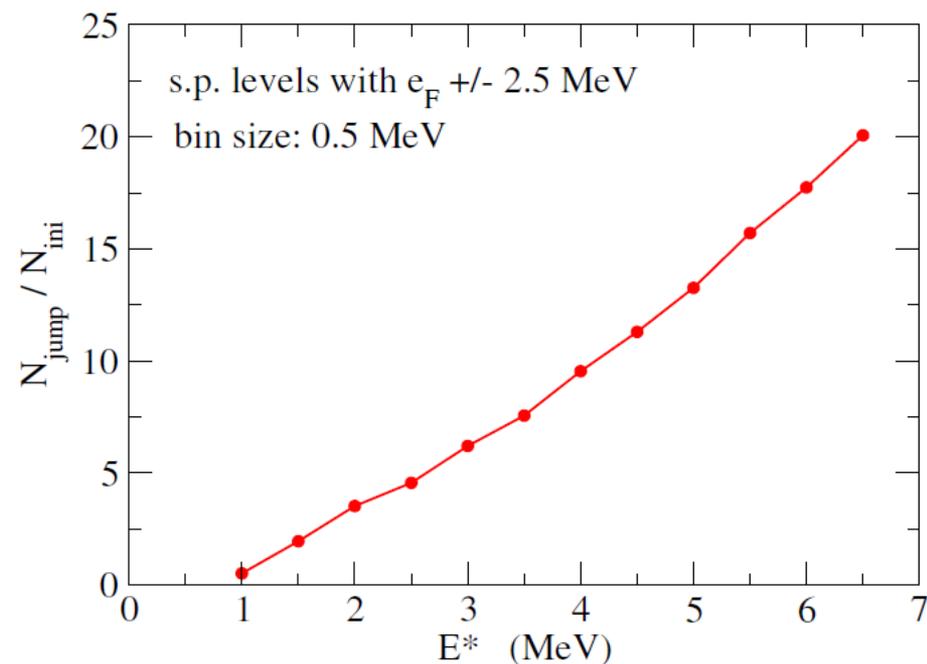
誘起核分裂の微視的理解に向けて

準位密度

deformed Woods-Saxon potential



終状態の数



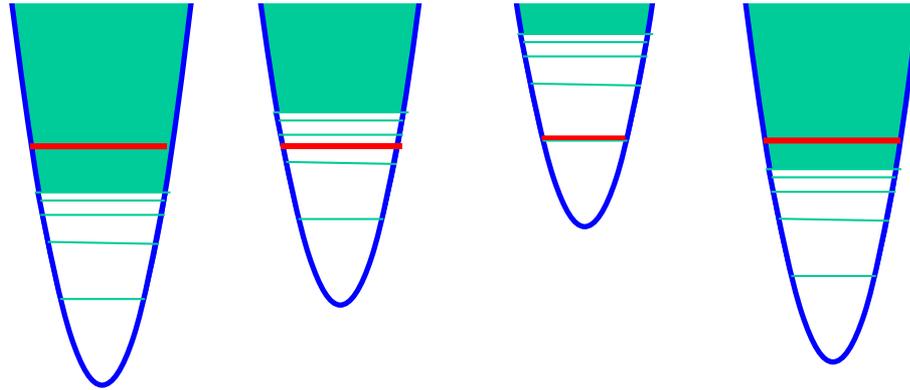
複合核描像: $\frac{\bar{v}}{d_f} \geq 1$

$\bar{v} \sim 2.81 \times 10^{-2}$ MeV \leftarrow delta int. with WS wave functions

$\Rightarrow \frac{1}{d_f} \sim 35.6$ (MeV $^{-1}$) = 17.8/0.5 (MeV $^{-1}$) $\Rightarrow E^* \geq 6$ (MeV)

誘起核分裂の微視的理解に向けて

K. Hagino and G.F. Bertsch, an ongoing work



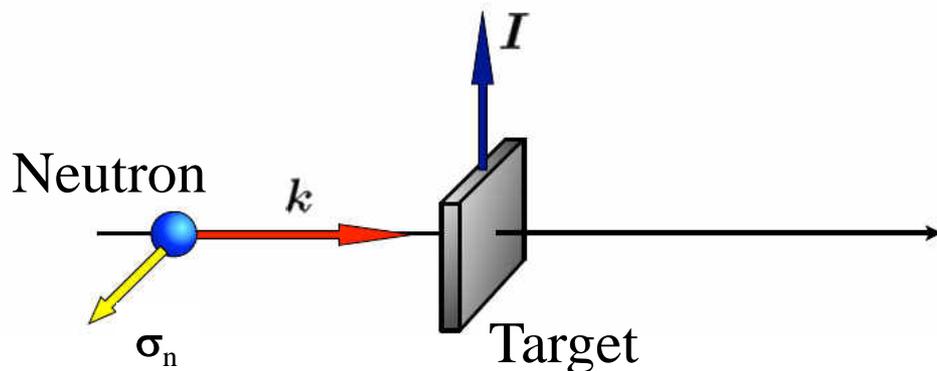
- ✓ どのくらいの E^* から複合核とみなしてよいか?
- ✓ どのくらいの E^* から統計的手法を用いてよいのか?

→準位密度

- ✓ 模型空間をどのように truncate するのか?
- ✓ 非直交性の問題をどう取り扱うか?

などなど

パリティ非保存と量子ウォーク

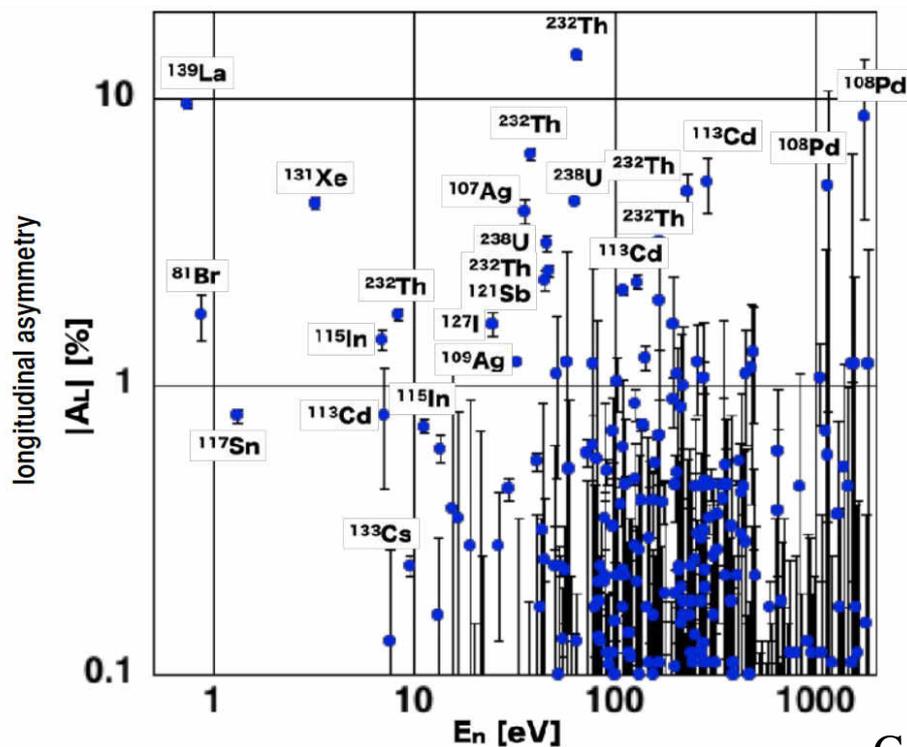


スライド: 嶋さん@COREnet

scattering amplitude:

$$\delta = A + B\sigma_n \cdot \mathbf{I} + \underline{C\sigma_n \cdot \mathbf{k}}$$

Parity-odd



PV $\sim 10^{-7}$ in bare
nucleon-nucleon interaction



PV ~ 0.1 (max)
in compound nuclei

--- amplified by $\sim 10^6$!!

パリティ非保存と量子ウォーク

Z. Zimboras et al., Sci. Rep. 3 ('13) 2361

OPEN

Quantum Transport Enhancement by Time-Reversal Symmetry Breaking

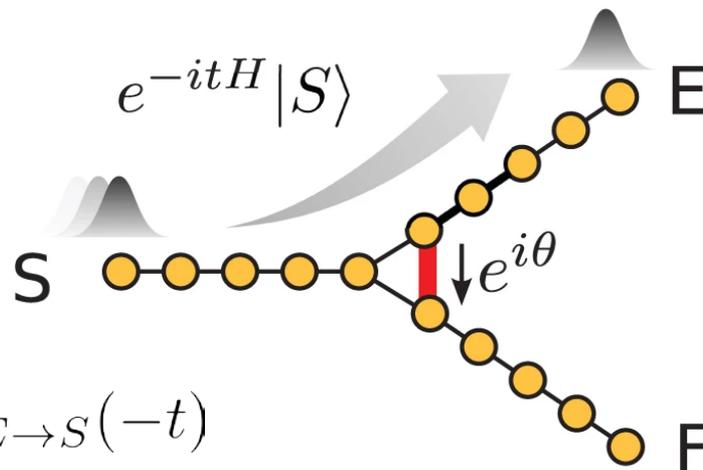
SUBJECT AREAS:

QUANTUM
INFORMATION

Zoltán Zimborás^{1,2}, Mauro Faccin¹, Zoltán Kádár¹, James D. Whitfield^{1,2}, Ben P. Lanyon⁴ & Jacob Biamonte^{1,2}

$$H_{QW} = \sum_{n,m}^{sites} J_{nm} (|n\rangle\langle m| + |m\rangle\langle n|).$$

$$\longrightarrow H_{CQW} = \sum_{n,m} J_{nm} e^{i\theta_{nm}} |n\rangle\langle m| + J_{nm} e^{-i\theta_{nm}} |m\rangle\langle n|.$$



$$P_{E \rightarrow E}(t) \neq P_{E \rightarrow S}(-t)$$

パリティ非保存と量子ウォーク

Z. Zimboras et al., Sci. Rep. 3 ('13) 2361

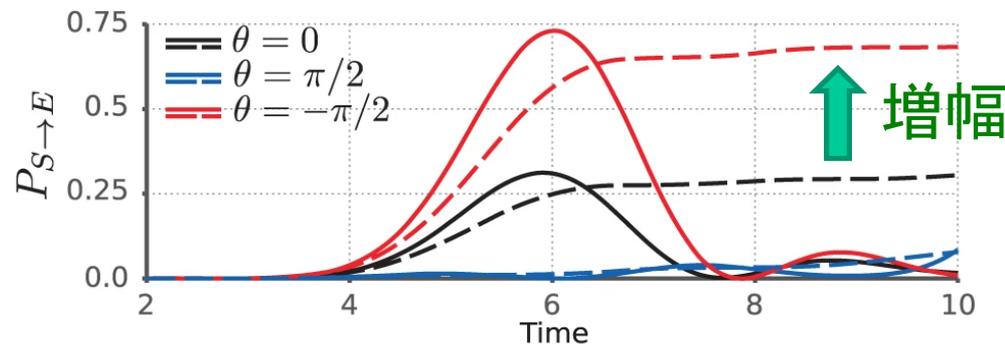
OPEN

Quantum Transport Enhancement by Time-Reversal Symmetry Breaking

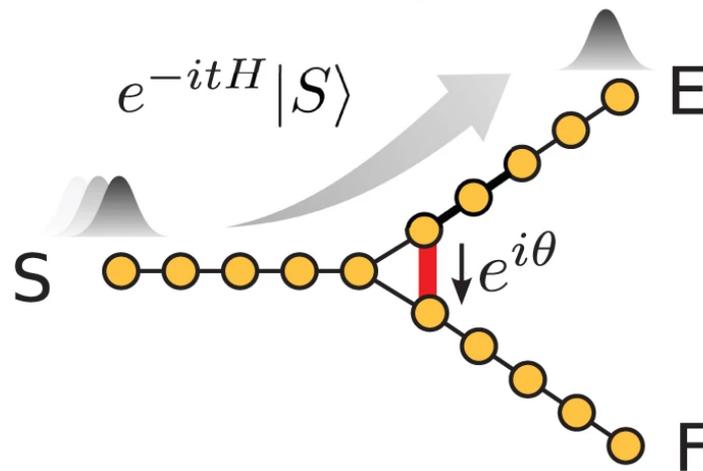
SUBJECT AREAS:

QUANTUM INFORMATION

Zoltán Zimborás^{1,2}, Mauro Faccin¹, Zoltán Kádár¹, James D. Whitfield^{1,2}, Ben P. Lanyon⁴ & Jacob Biamonte^{1,2}



— sink なし
- - - sink あり



まとめ

核融合反応＝複合核形成反応

✓ 中重核領域における核融合反応

→複合核形成を陽に取り扱わなくてよい

✓ 超重核生成反応→複合核形成のダイナミクス

ランジュバン方程式による記述

- 熱化のメカニズム？熱平衡？
- 非マルコフ性？
- 量子効果？
- 変形の効果？

✓ 微視的理解に向けて→殻模型的な新たな理論手法を構築中

✓ 量子ウォークと対称性の破れの増幅

検討の価値あり？