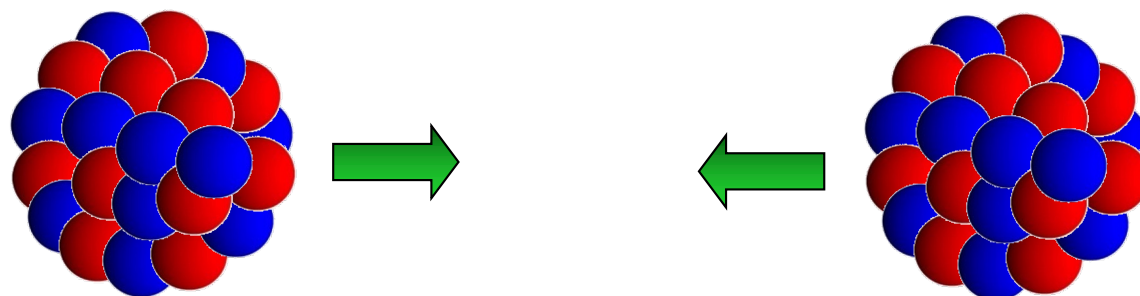


低エネルギー重イオン反応理論 の将来展望

萩野浩一

京都大学大学院理学研究科



1. はじめに
2. (HI, αxn) 反応: 野村メカニズム
3. 超重元素合成反応理論と残された課題
4. 重イオン反応の複雑性: 拡張された野村メカニズム?
5. まとめ

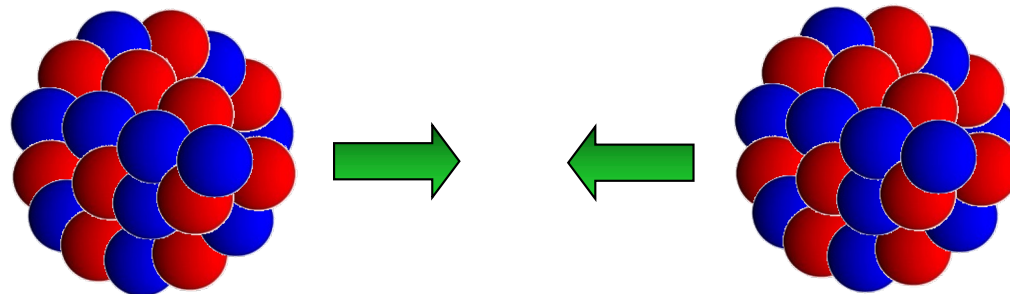
はじめに: 低エネルギー核反応物理のめざすもの

原子核反応

原子核は複合粒子

→ 豊富な反応様式

- 弾性散乱
- 非弾性散乱
- 核子移行反応
- 核融合反応
-



→ 核構造と核反応の織り成す様々なインタープレイ

- 原子核の大きさ、形、励起など

原子核反応物理のゴール

- 豊富な反応プロセスを統一的に記述/理解する

結合チャンネル法



野村亨さん

はじめに: 低エネルギー核反応物理のめざすもの

RIBF-UEC/理研 共催研究会

「不安定核物理 この10年とこれから」

2004年6月15日～17日(理研・大河内ホール)

RIBF稼働を間近に控え、レビュー講演と議論に重点を置いた研究会

低エネルギー重イオン反応の理解に向けて ～不安定核ビームと超重核合成反応～

萩野浩一 (東北大理)

1. この10年間の歴史

- 不安定核ビームは超重核合成反応に有利か？
- 分解過程の動的効果？
- 不安定核を用いた核融合反応の実験の現状

2. 残された課題

- 完全核融合と不完全核融合の分離
- (多核子) 移行過程の取り扱い
- スキン核の融合反応

3. 将来の方向性

- 低エネルギー核反応の微視的模型
- 準弾性反応を用いた不安定核の構造の研究
- 不安定核を用いた反応に対する Quasi-fission

議論: 「不安定核ビームは超重核合成反応に有利か？」

はじめに: 低エネルギー核反応物理のめざすもの

低エネルギー重イオン反応の理解に向けて ～不安定核ビームと超重核合成反応～

萩野浩一（東北大理）

1. この10年間の歴史

- ・不安定核ビームは超重核合成反応に有利か？
- ・分解過程の動的効果？
- ・不安定核を用いた核融合反応の実験の現状

2. 残された課題

- ・完全核融合と不完全核融合の分離
- ・(多核子) 移行過程の取り扱い
- ・スキン核の融合反応

3. 将来の方向性

- ・低エネルギー核反応の微視的模型
- ・準弾性反応を用いた不安定核の構造の研究
- ・不安定核を用いた反応に対する Quasi-fission

議論: 「不安定核ビームは超重核合成反応に有利か？」

➡ 野村さんの逆鱗に触れる(若手への叱咤激励)

当時のスライドを振り返ってみると、確かに自分の超重核生成反応への理解が浅かった(若気の至り)。

(HI, αxn) 反応

野村亨さん: (HI, αxn) の有効性を逸早く指摘した

- ✓ Proc. of Lanzhou 1990, Proc. of Niigata 1991
- ✓ Proc. of Tours Sympo. II, 1994
- ✓ Hyperfine Interaction 103, 33 (1996)
- ✓ 日本物理学会誌 2005年9月号



$$\sigma_{xn} \sim \sigma_{CN} \left(\frac{\Gamma_n}{\Gamma_f} \right)^x, \quad \sigma_{\alpha yn} \sim \sigma_{\alpha} \left(\frac{\Gamma_n}{\Gamma_f} \right)^y$$

α 粒子は大きなエネルギーを持ち去る $\rightarrow y \sim x-2$

α 粒子放出が複合核からの蒸発過程だとすると。。。

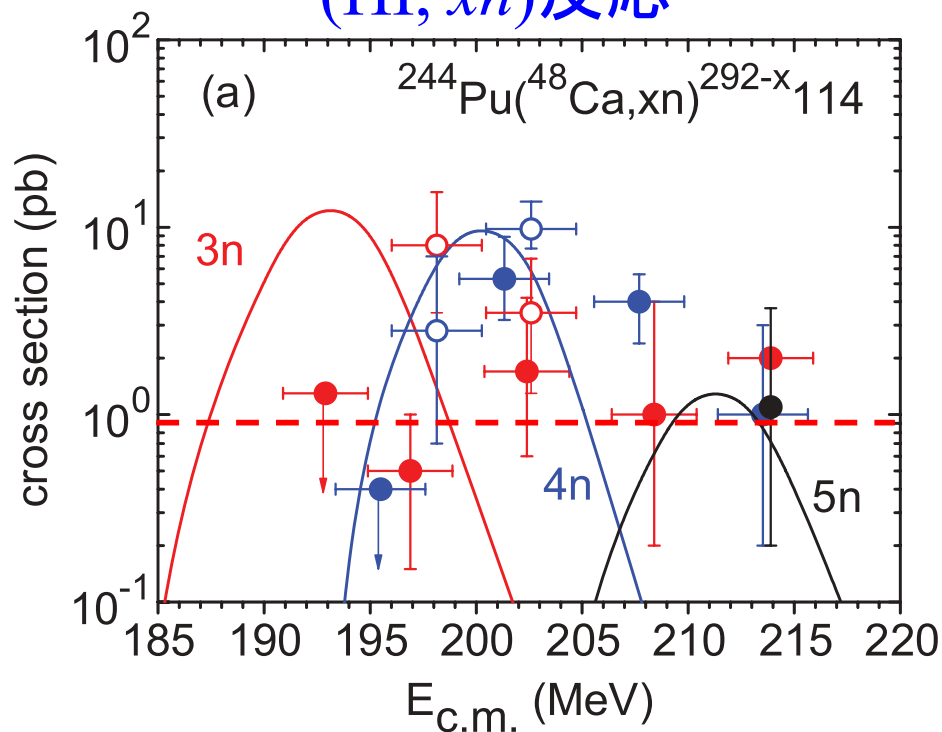
$$\sigma_{\alpha yn} \sim \sigma_{\alpha} \left(\frac{\Gamma_n}{\Gamma_f} \right)^y \sim \sigma_{CN} \left(\frac{\Gamma_{\alpha}}{\Gamma_f} \right) \left(\frac{\Gamma_n}{\Gamma_f} \right)^{x-2}$$

$$\rightarrow \left(\frac{\Gamma_{\alpha}}{\Gamma_f} \right) > \left(\frac{\Gamma_n}{\Gamma_f} \right)^2 \quad \text{なら} \quad \sigma_{\alpha yn} > \sigma_{xn}$$

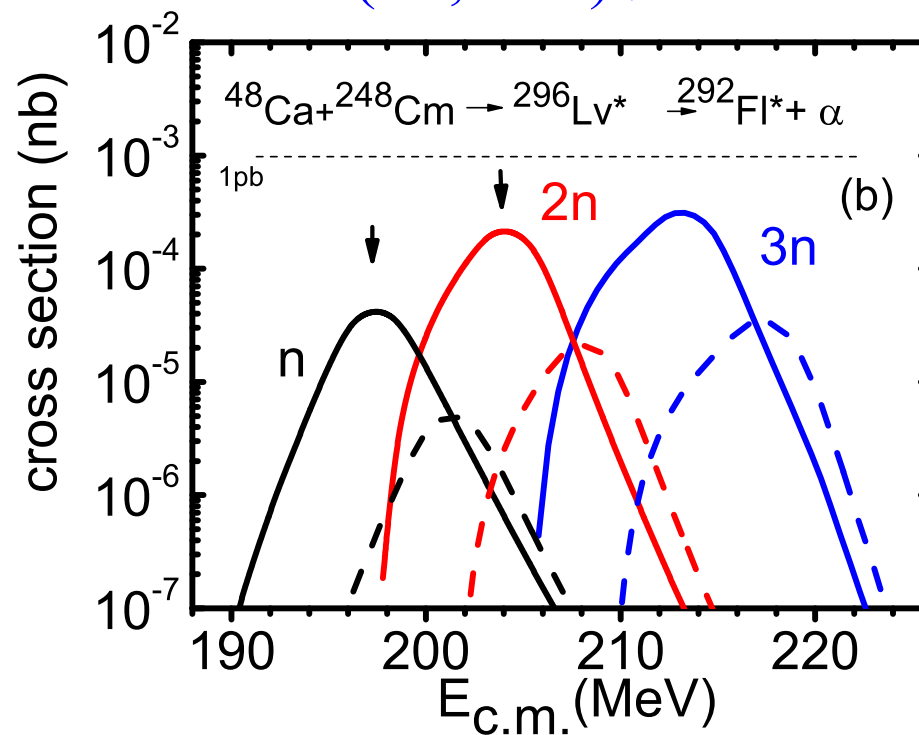
最近になっていくつかの統計模型計算が行われるようになった:

(例) F1 (Z=114)生成反応

(HI, xn)反応



(HI, αxn)反応



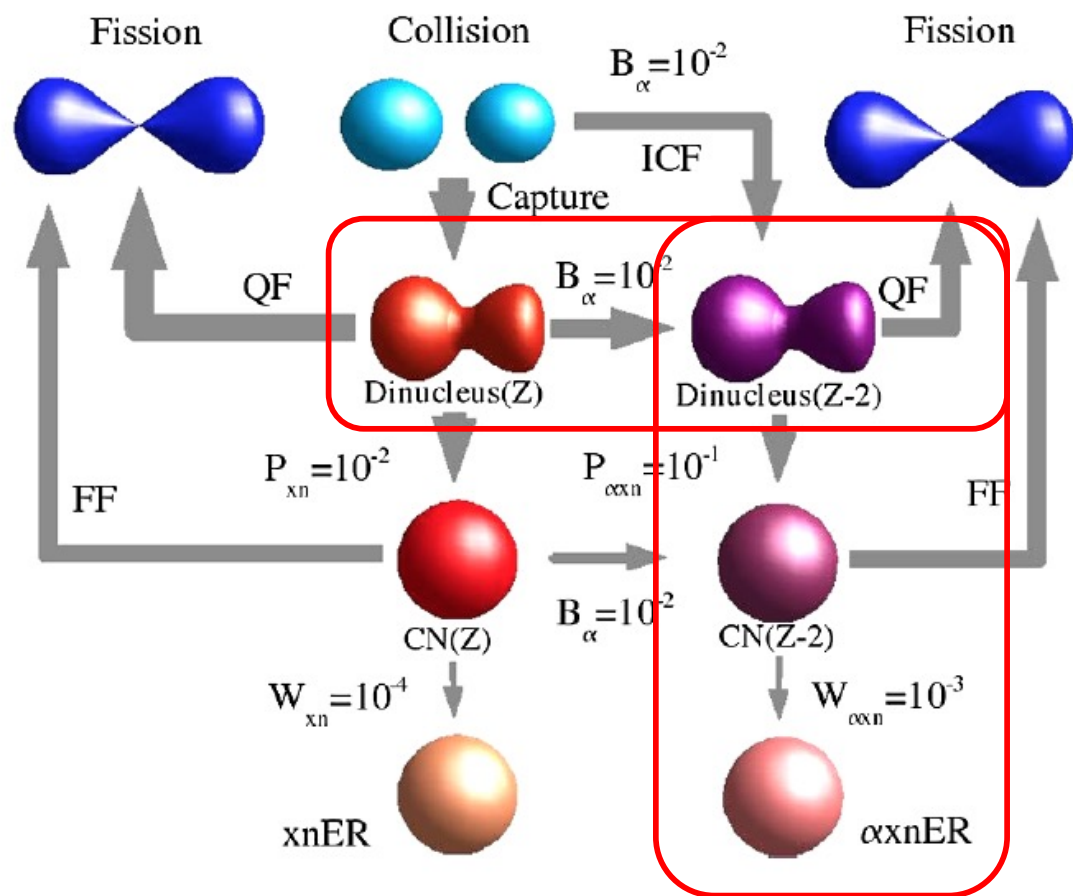
K. Siwek-Wilczynska, T. Cap, M. Kowal, PRC99, 054603 (2019)

see also, J. Hong, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, PLB764, 42 (2017)

PRC94, 044606 (2016).

(HI, αxn) 反応

α 粒子放出は前平衡過程からかもしれない。
 (まだきちんと検討されていない。今後の課題。)



- P_{CN} と W_{sur} で1桁ずつ稼げたとすると $B_{\alpha} = 10^{-2}$ でも (HI, xn) と (HI, αxn) は同程度の確率

- 蒸発過程だけだと寄与は小
- 分解過程も寄与する (次のスライドで)

図: D.J. Hinde and M. Dasgupta, PLB622, 23 (2005)

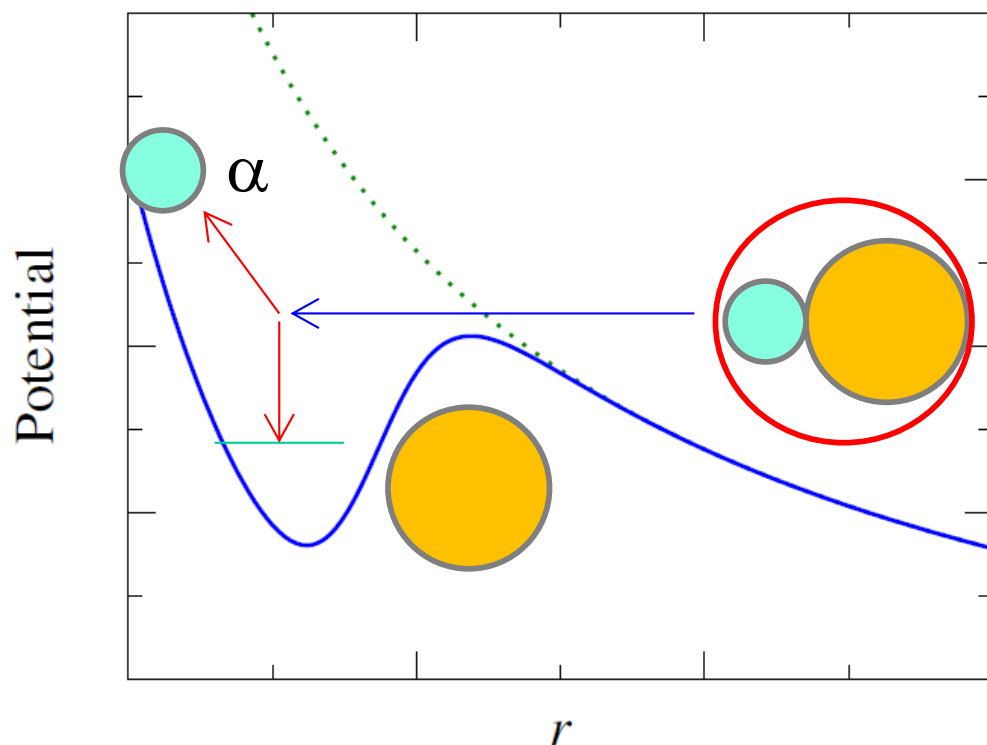
超重元素同定の問題はあるが、反応ダイナミクスとしては興味深い

(HI, αxn) 反応

α 粒子放出は前平衡過程からかもしれない。

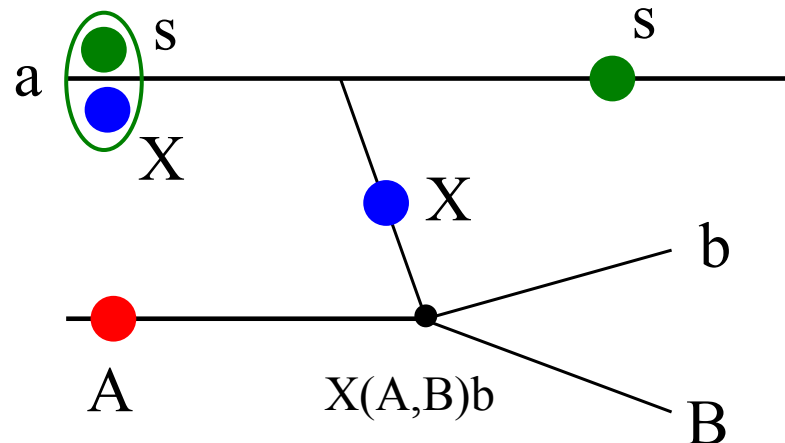
久保野さんと議論していること(2018.6~)

$A = \alpha + A'$ のような構造を持った場合



- クーロン障壁後に分解
- α 粒子を放出
- 残りが標的核と融合
- α 粒子がエネルギーを持ち去ることにより冷たい複合核を形成

(要検討)

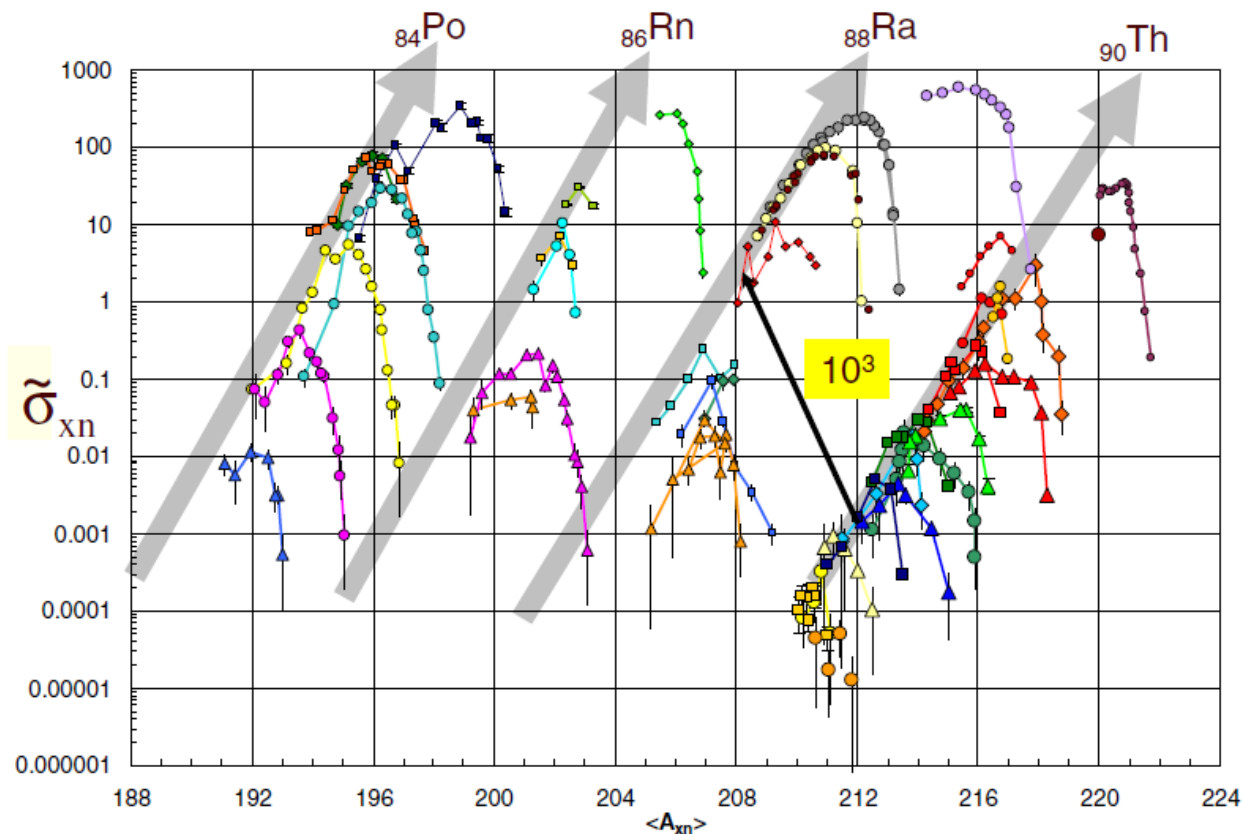


cf. 天体核反応におけるトロイの木馬法

例) $^{10}\text{B}(d, ^7\text{Be}\alpha)n$ for $^{10}\text{B}(p, \alpha)^7\text{Be}$

(HI, αxn) 反応

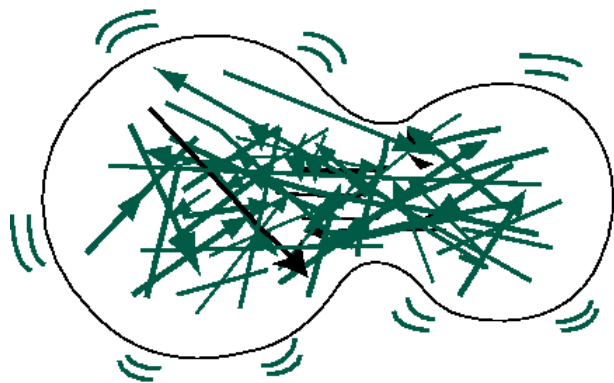
$$\tilde{\sigma}_{xn} \equiv \sum_l (2l + 1) T_l P_{CN}(E^*, l) W_{xn}(E^*, l)$$



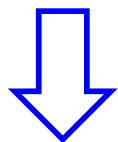
D.J. Hinde and M. Dasgupta,
Nucl. Phys. A787, 176c (2007).

反応の初期で α 粒子の放出があると3ケタくらい断面積が増幅する(?)
(ただし、何と何を比較するのかという問題はある)

超重元素合成反応と超重元素の物理



原子核=核子多体系

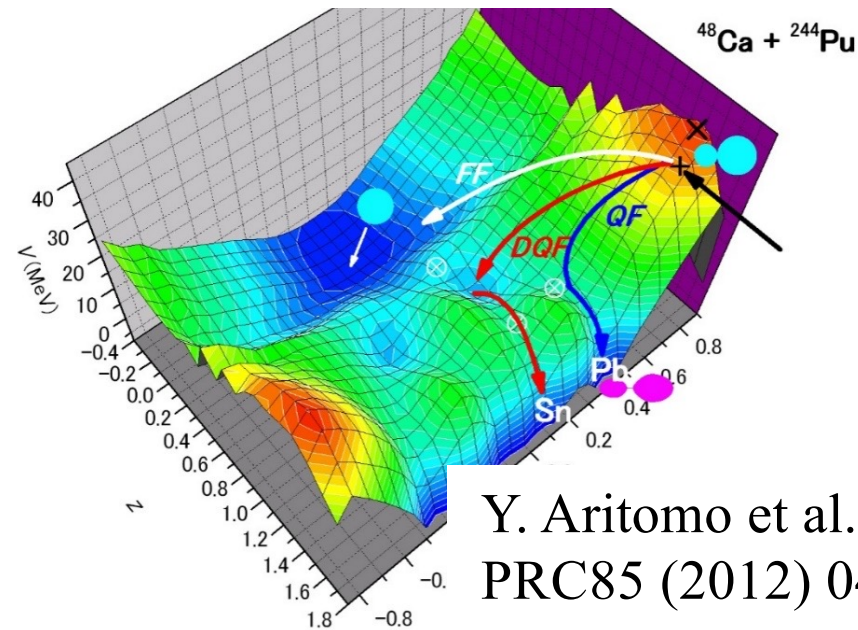


原子核の内部自由度:「環境」
「内的環境自由度」

→量子開放系の物理

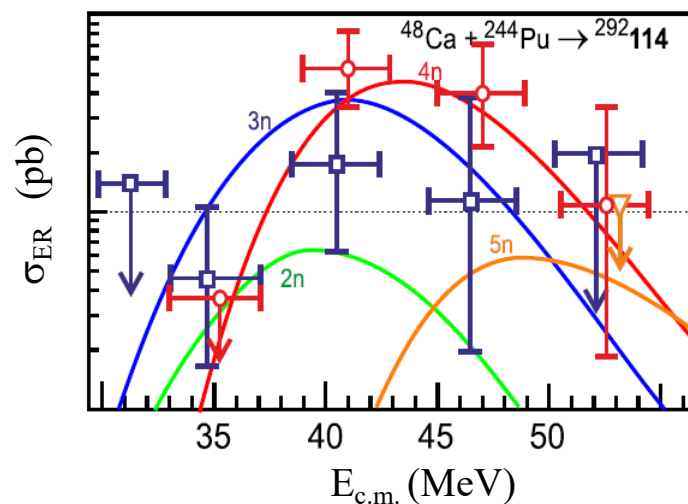
cf. (古典)ランジュバン方程式

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



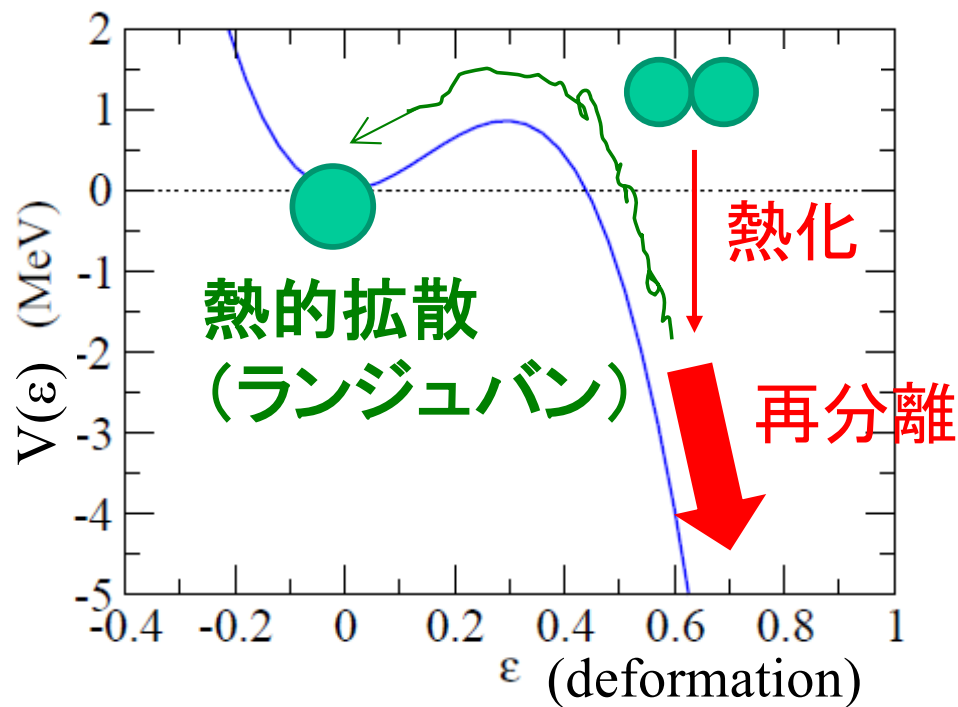
Y. Aritomo et al.,
PRC85 (2012) 044614

➤ 現象論的には成功



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

超重元素合成反応と超重元素の物理



✓ どのように熱化するのか?

「摩擦の量子論」

✓ 非マルコフ効果?

✓ 拡散に対する量子補正?

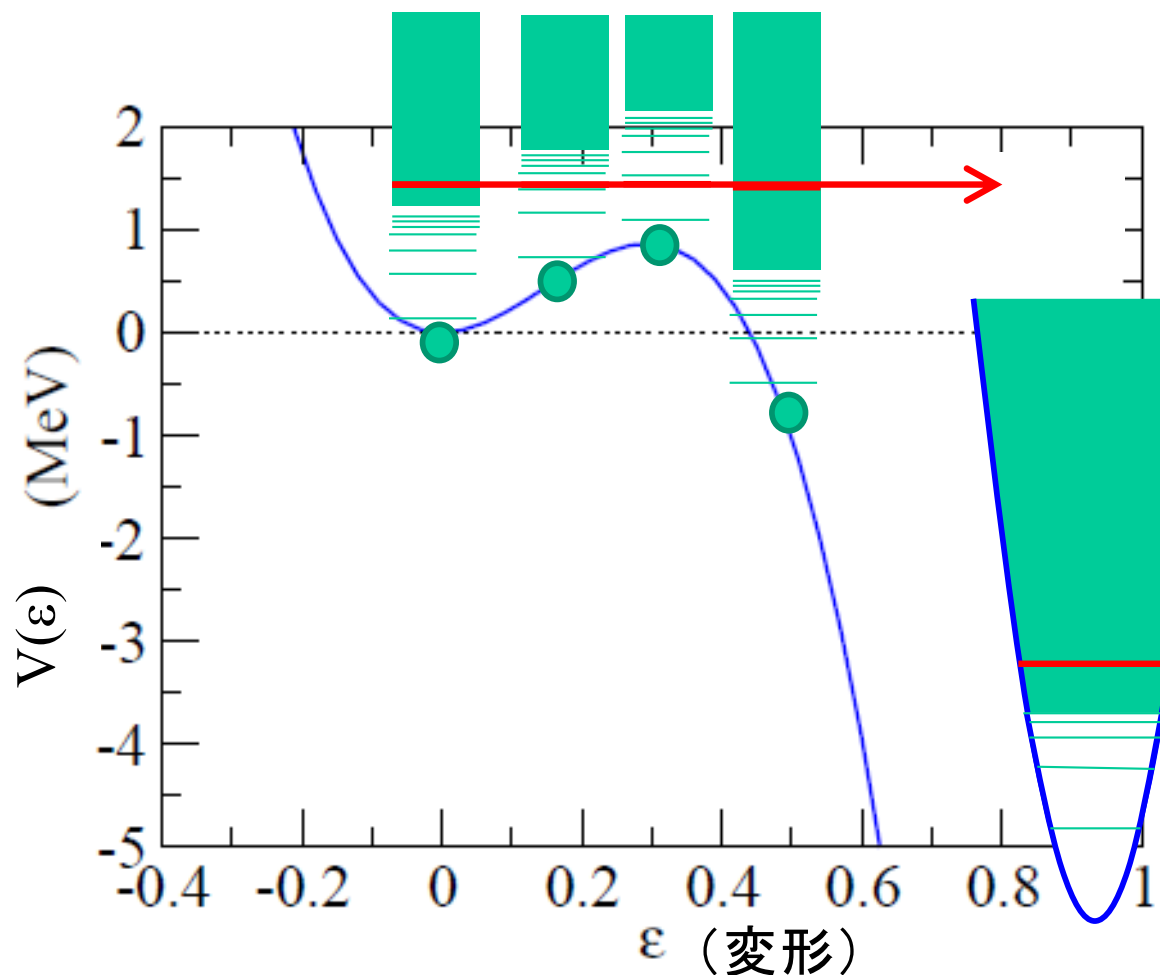
cf. (古典)ランジュバン方程式

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

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).



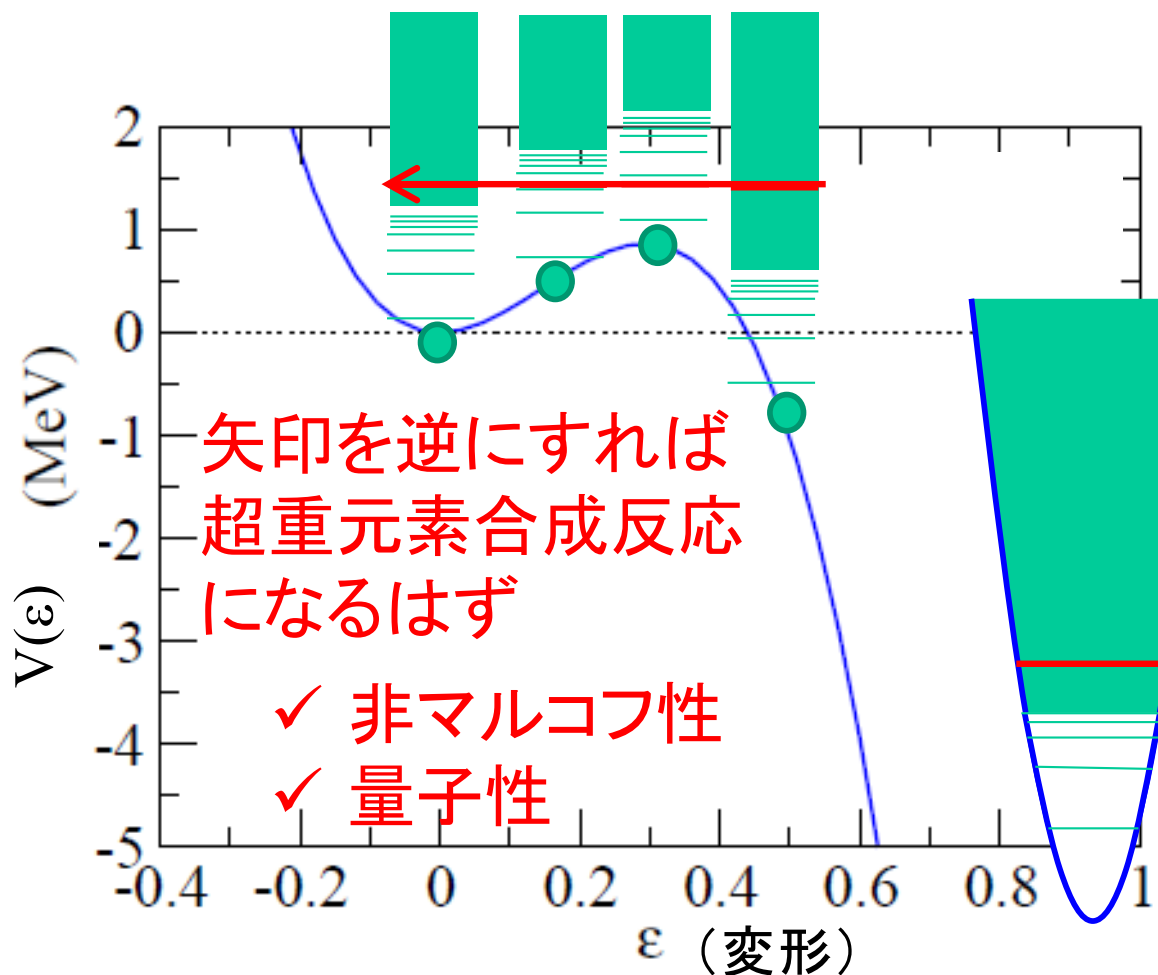
残留相互作用による
ホッピング

非平衡グリーン関数法 (Datta公式)

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

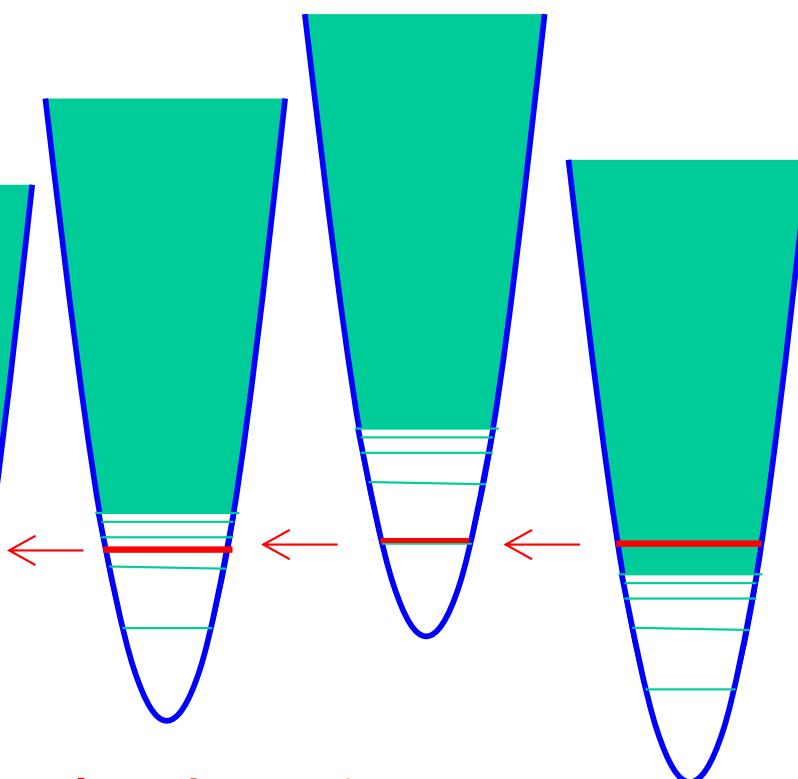
超重元素合成反応と超重元素の物理

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



矢印を逆にすれば
超重元素合成反応
になるはず

- ✓ 非マルコフ性
- ✓ 量子性

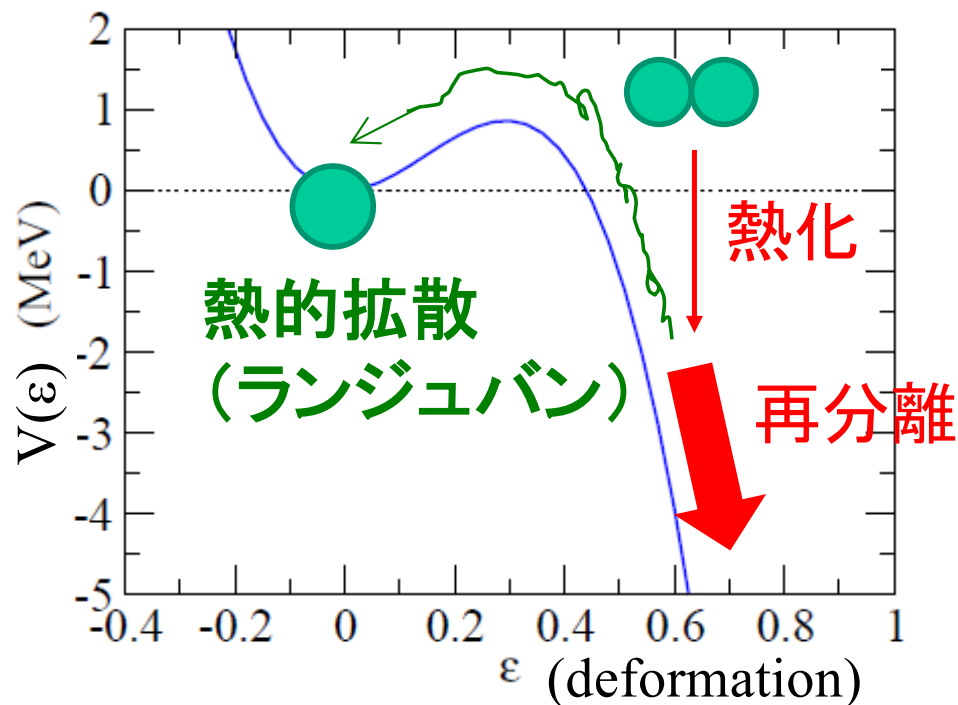


残留相互作用による
ホッピング

非平衡グリーン関数法 (Datta公式)

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

超重元素合成反応と超重元素の物理



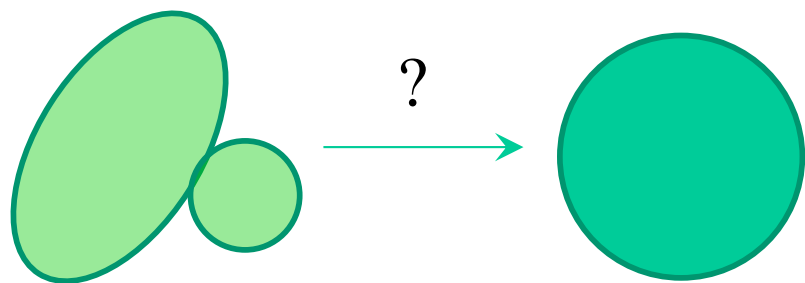
✓ どのように熱化するのか?

「摩擦の量子論」

✓ 非マルコフ効果?

✓ 拡散に対する量子補正?

もう一つのギモン



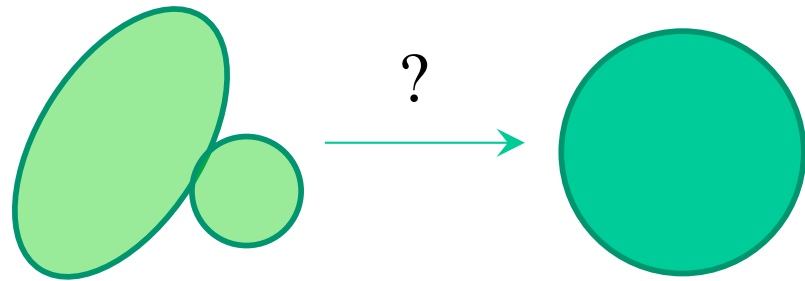
変形: 量子効果

→ 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

超重元素合成反応と超重元素の物理



変形:量子効果

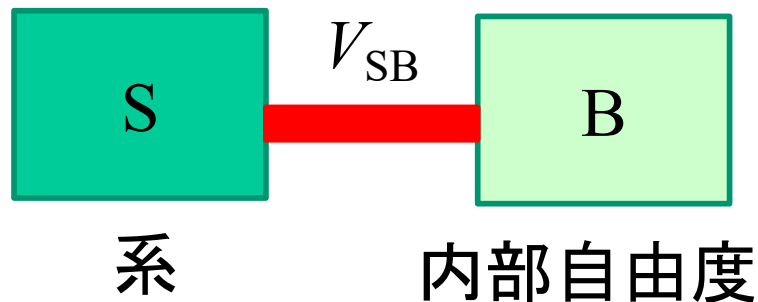
→熱い核では消失

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

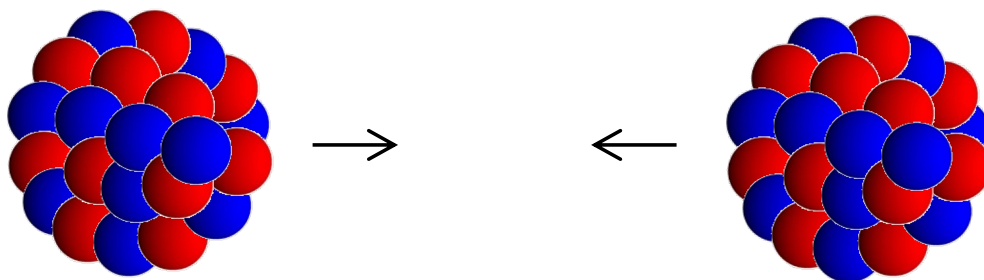


各時刻ごとに内部状態がわかる

-
- ・ 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

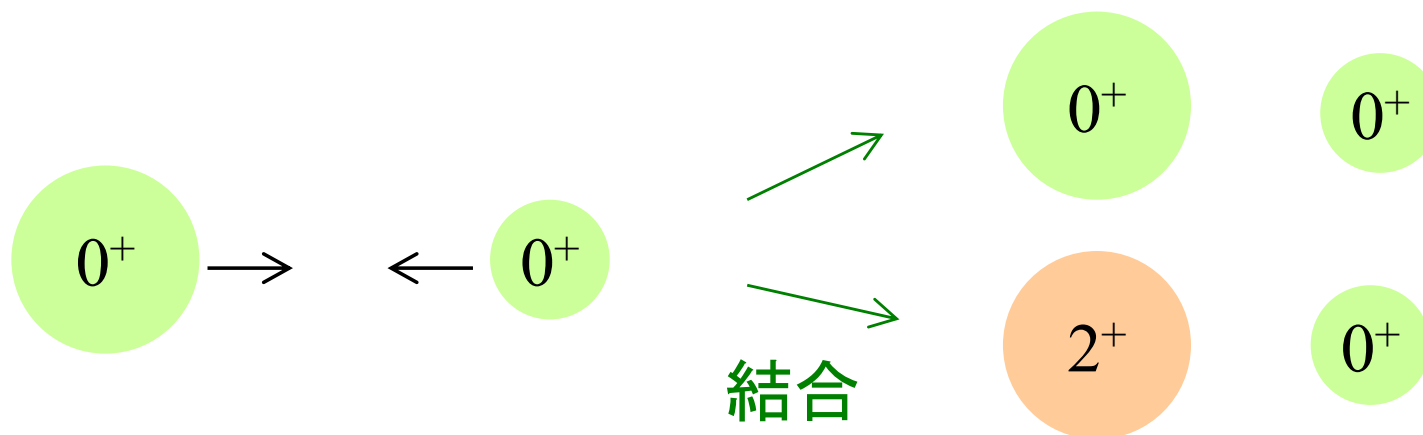
重イオン反応の複雑性

多体問題



低エネルギー領域では未だに超難問題
cf. 多粒子トンネルの記述

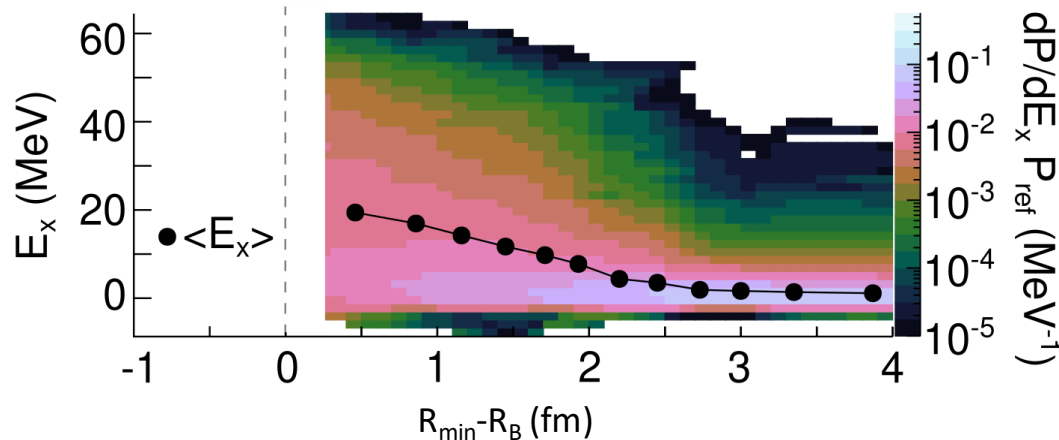
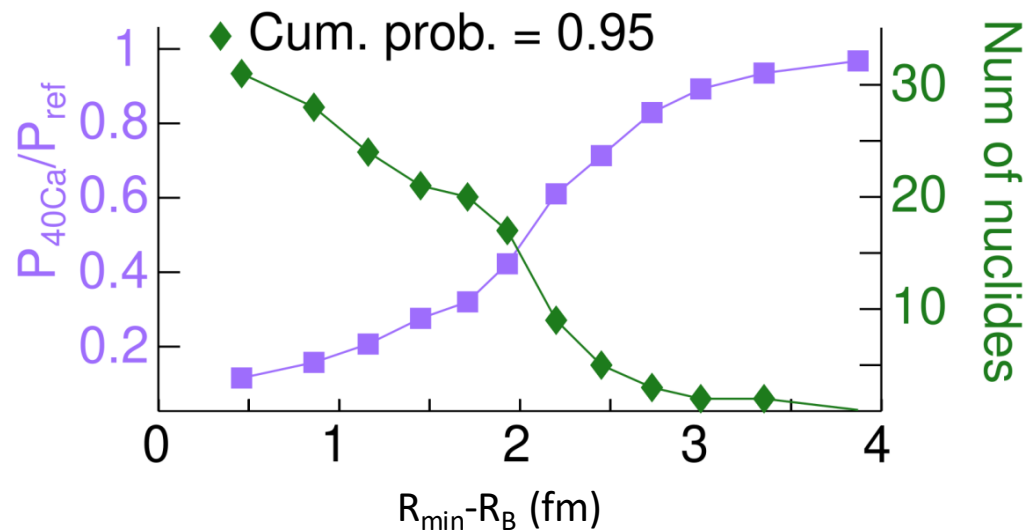
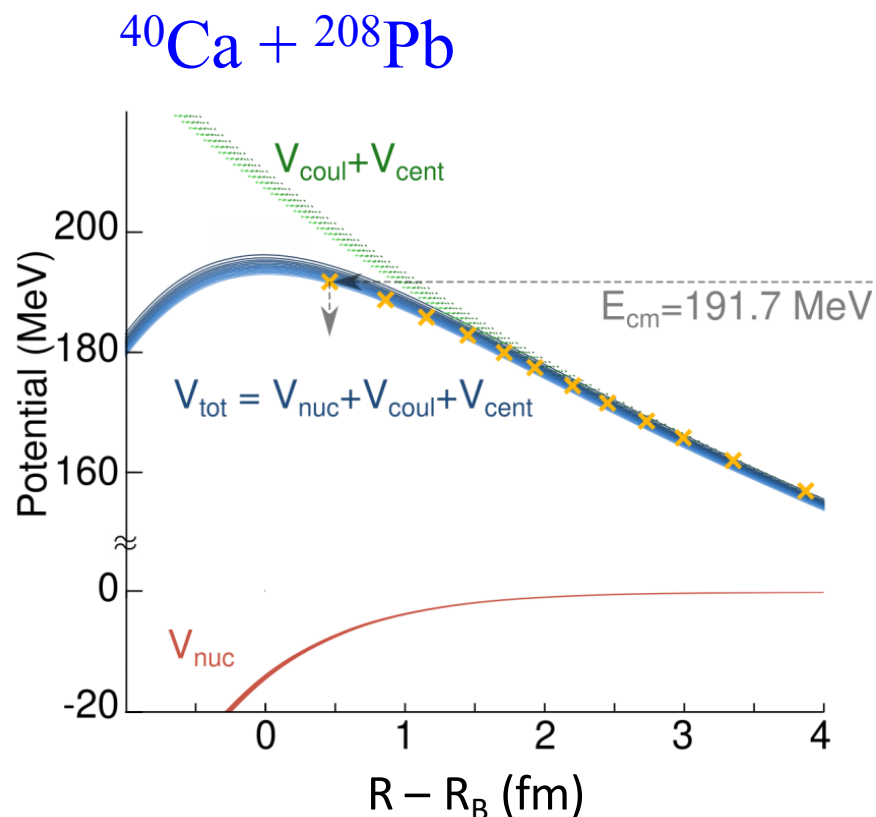
➡ 少数の励起チャンネルを取り入れた2体問題
(結合チャンネル・アプローチ)



重イオン反応の複雑性

現実はずっと複雑かもしれない。。。

K.J. Cook (ANU) et al., Nature Communications 14, 7988 (2023)



エネルギーを変えて

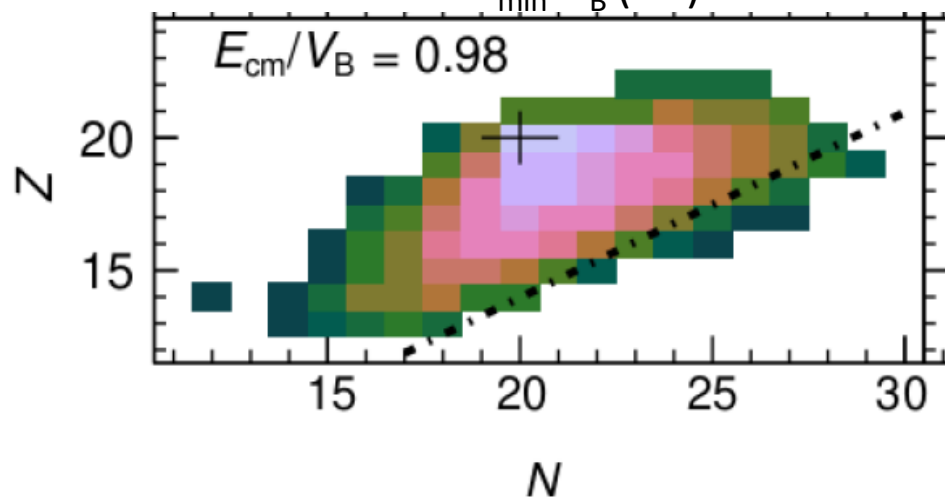
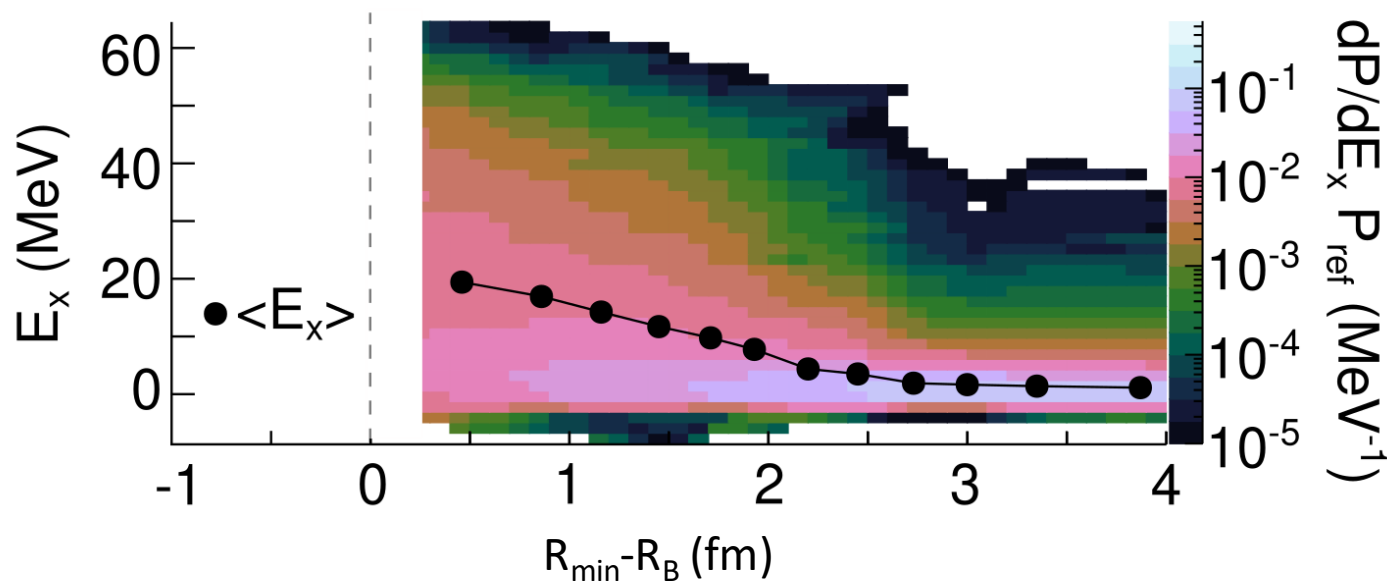
$\theta_{\text{lab}} = 115$ 度の後方散乱のフラックスを測定

重イオン反応の複雑性

現実はまだ複雑かもしれない。。。

K.J. Cook (ANU) et al., Nature Communications 14, 7988 (2023)

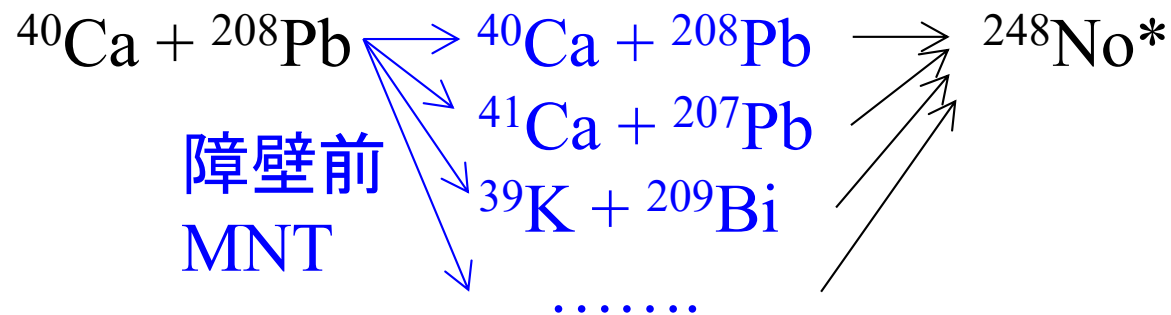
$^{40}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$



障壁に到達する前に多核子
移行反応が大きい確率で
起きている。
→ 深部非弾性散乱 (の前兆)

重イオン反応の複雑性: 拡張された野村メカニズム?

超重元素生成反応に対する示唆



$$\sigma_{\text{CN}} \sim \sum_k w_k \underbrace{\sigma_{\text{cap}}(Z_k, N_k, E_k^*)}_{\text{TDHF+Projection?}} \underbrace{P_{\text{CN}}(Z_k, N_k, E_k^*)}_{\text{ランジュバン?}}$$

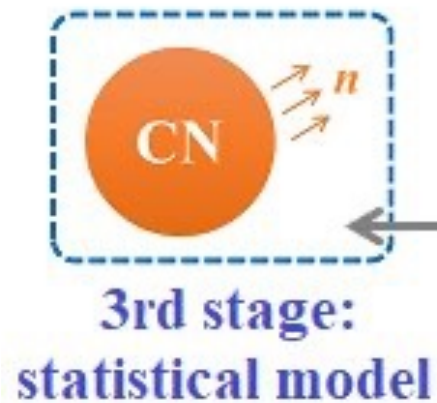
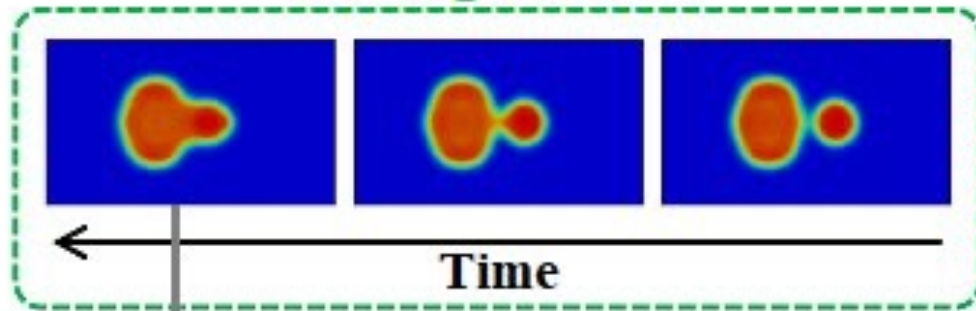
超重元素反応のハイブリッドモデル: TDHF + Langevin アプローチ

K. Sekizawa and K.H., PRC99 (2019) 051602(R)



時間に依存する
密度汎関数理論

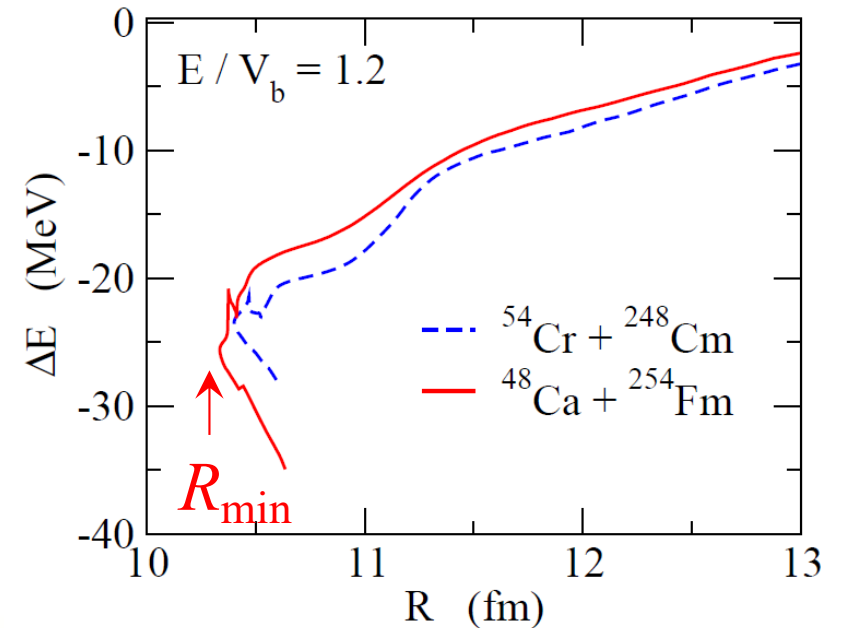
1st stage: TDHF



統計力学的手法

2nd stage:
Langevin model

ランジュバン方程式



断面積の反応系依存性

超重元素反応のハイブリッドモデル: TDHF + Langevin アプローチ

K. Sekizawa and K.H., PRC99 (2019) 051602(R)



^{48}Ca はどのような意味で特別なのか?

System	CN	E^* (MeV)	R_{\min} (fm)	P_{CN} ($\times 10^4$)	W_{sur} ($\times 10^9$)	$P_{\text{CN}} W_{\text{sur}}$ ($\times 10^{13}$)
$^{48}\text{Ca} + ^{254}\text{Fm}$	$^{302}_{120}$	29.0	12.93	1.72	176	302
$^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$	$^{302}_{120}$	33.2	13.09	1.89	1.31	2.47
$^{51}\text{V} + ^{249}\text{Bk}$	$^{300}_{120}$	37.0	12.94	3.95	0.117	0.461
$^{48}\text{Ca} + ^{257}\text{Fm}$	$^{305}_{120}$	30.5	12.94	2.49	0.729	1.82

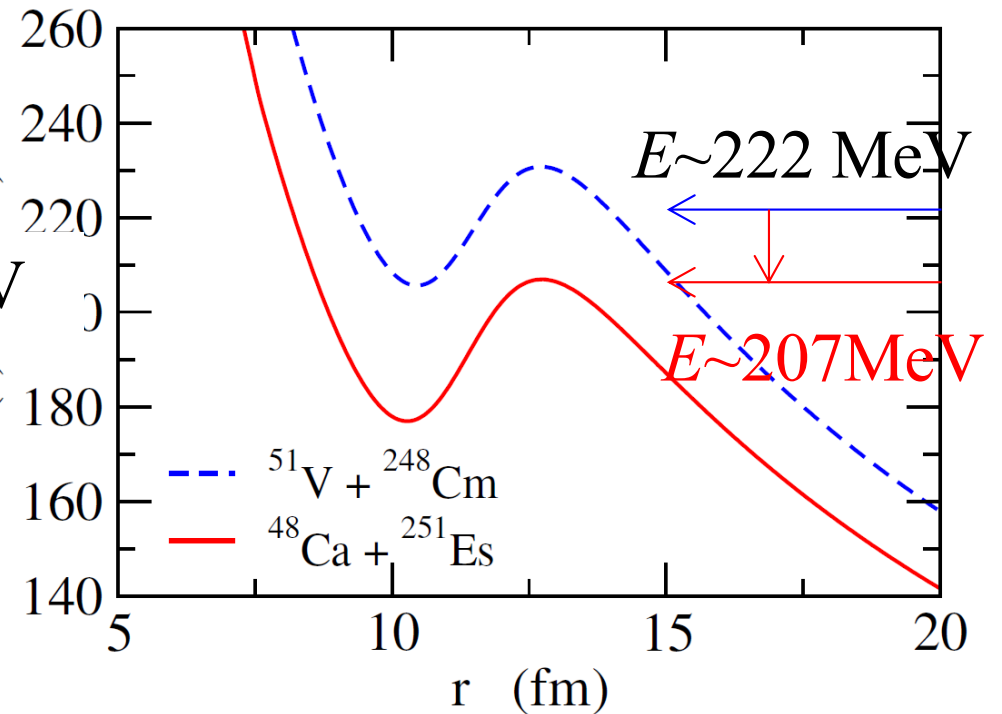
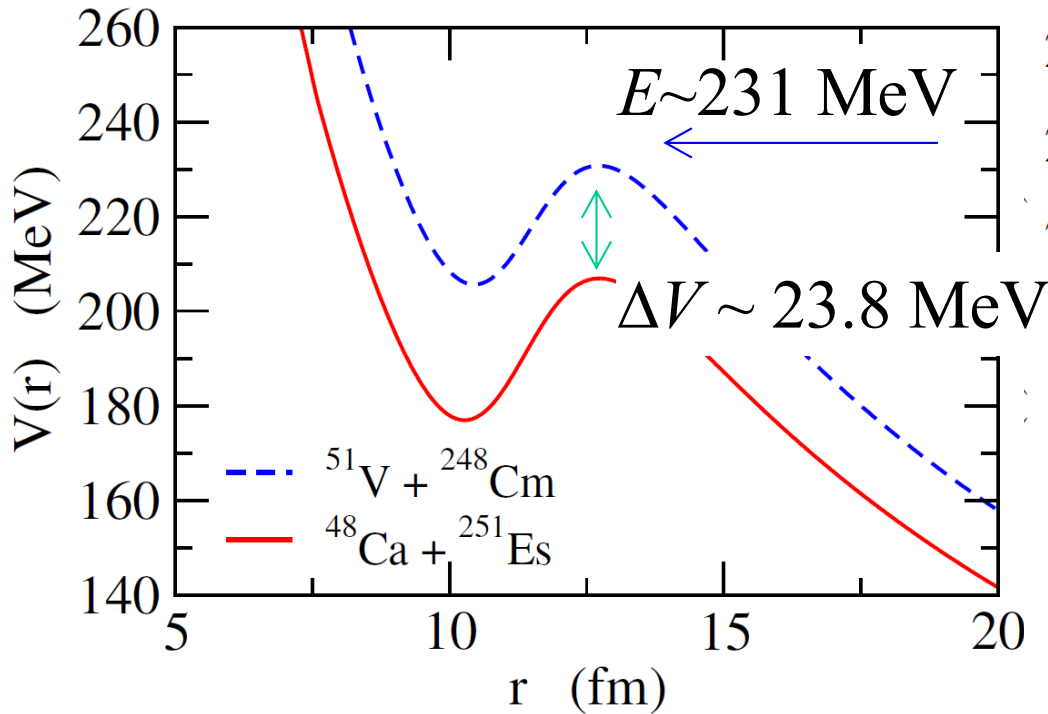
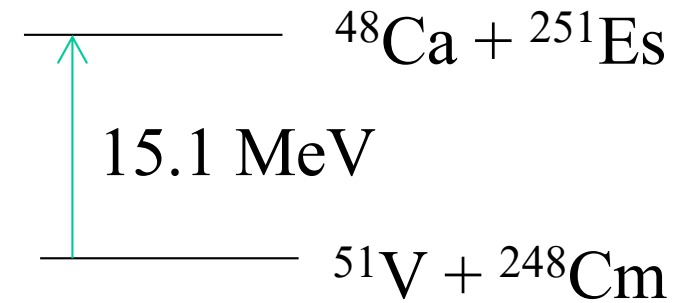
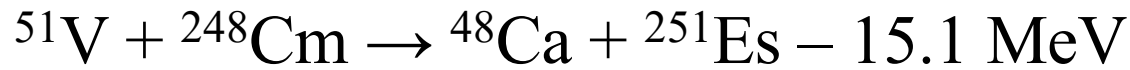
$$P_{\text{ER}} = P_{\text{cap}} \cdot P_{\text{CN}} \cdot W_{\text{sur}}$$

同じくらいの P_{CN}

2桁の違い

- ✓ エントランスチャンネルでは ^{48}Ca はあまり特別ではない
- ✓ 主に生き残り確率で ^{48}Ca は2桁ほど有利になっている

例) $^{51}\text{V} + ^{248}\text{Cm}$ 反応



$\Delta E \sim 9 \text{ MeV}$ くらい (実際には結合のためにもう少し大きい)

$\rightarrow P_{\text{tr}} > \Gamma_n / \Gamma_f$ であればこのメカニズムは有利になる (かもしれない)

「拡張された野村メカニズム」

まとめ

➤ (HI, αxn) 反応 ← 野村亨さん

- 実験的にも理論的にもまだ十分検討されていない
- 蒸発過程
- 前平衡過程、トロイの木馬機構

➤ 量子開放系としての超重元素合成反応

- 標的核の変形はヒートアップとともにどのように変化するか?
- 非平衡グリーン関数法 (誘起核分裂の問題)

➤ 重イオン反応の複雑性: 「拡張された野村メカニズム?」

- クーロン障壁に至る前の多核子移行反応
- 移行反応により質量非対称性が高い系へ移行すると?
- TDHF + ランジュバン法?

