

重イオン核融合反応： 多自由度系における量子トンネル現象と 超重元素の合成

萩野浩一

東北大学大学院理学研究科



TOHOKU
UNIVERSITY

1. 重イオン核融合反応:何が面白いのか?
2. 結合チャンネル法
3. 残された課題
4. 今後の展望:超重元素合成反応

重イオン核融合反応に関するレビュー論文:

K. Hagino and N. Takigawa, Prog. Theo. Phys.128 ('12)1061.

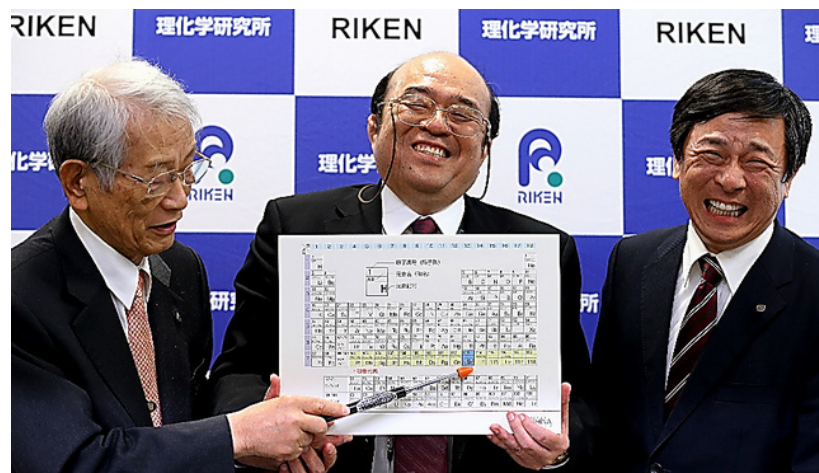
重イオン核融合反応： 多自由度系における量子トンネル現象と 超重元素の合成

萩野浩一

東北大学大学院理学研究科



TOHOKU
UNIVERSITY



113番元素

ニホニウム Nh

2016年11月

超重元素の物理

→ これまで以上の注目

理論：

精度よく断面積を予言しようという機運

重イオン核融合反応： 多自由度系における量子トンネル現象と 超重元素の合成

萩野浩一

東北大学大学院理学研究科



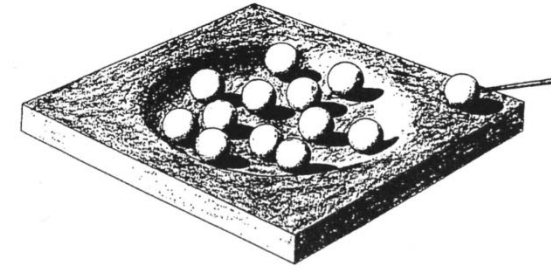
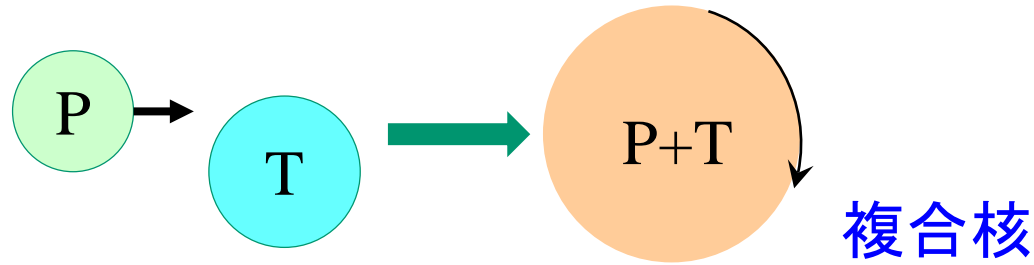
TOHOKU
UNIVERSITY

1. 重イオン核融合反応:何が面白いのか?
2. 結合チャンネル法
3. 残された課題
4. 今後の展望:超重元素合成反応

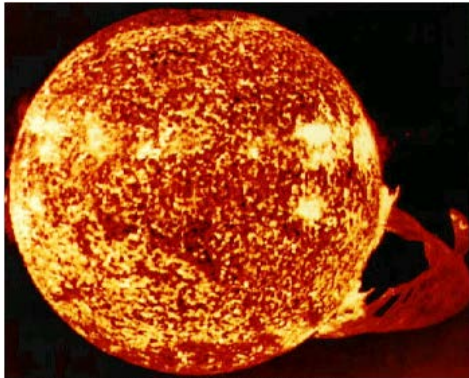
重イオン核融合反応に関するレビュー論文:

K. Hagino and N. Takigawa, Prog. Theo. Phys.128 ('12)1061.

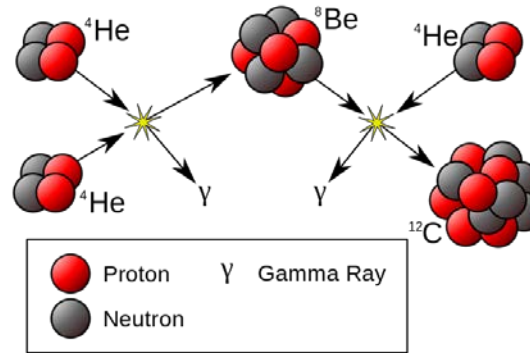
核融合反応： 複合核生成反応



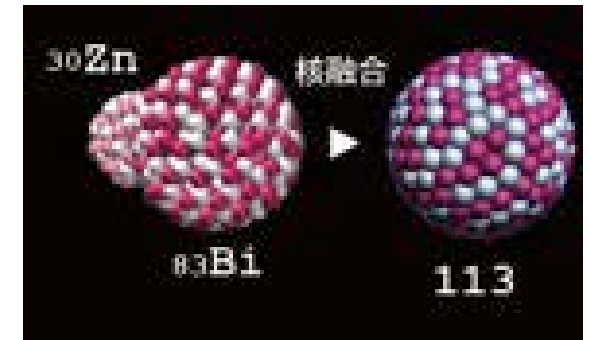
cf. Bohr '36



恒星のエネルギー源 (Bethe '39)



元素合成

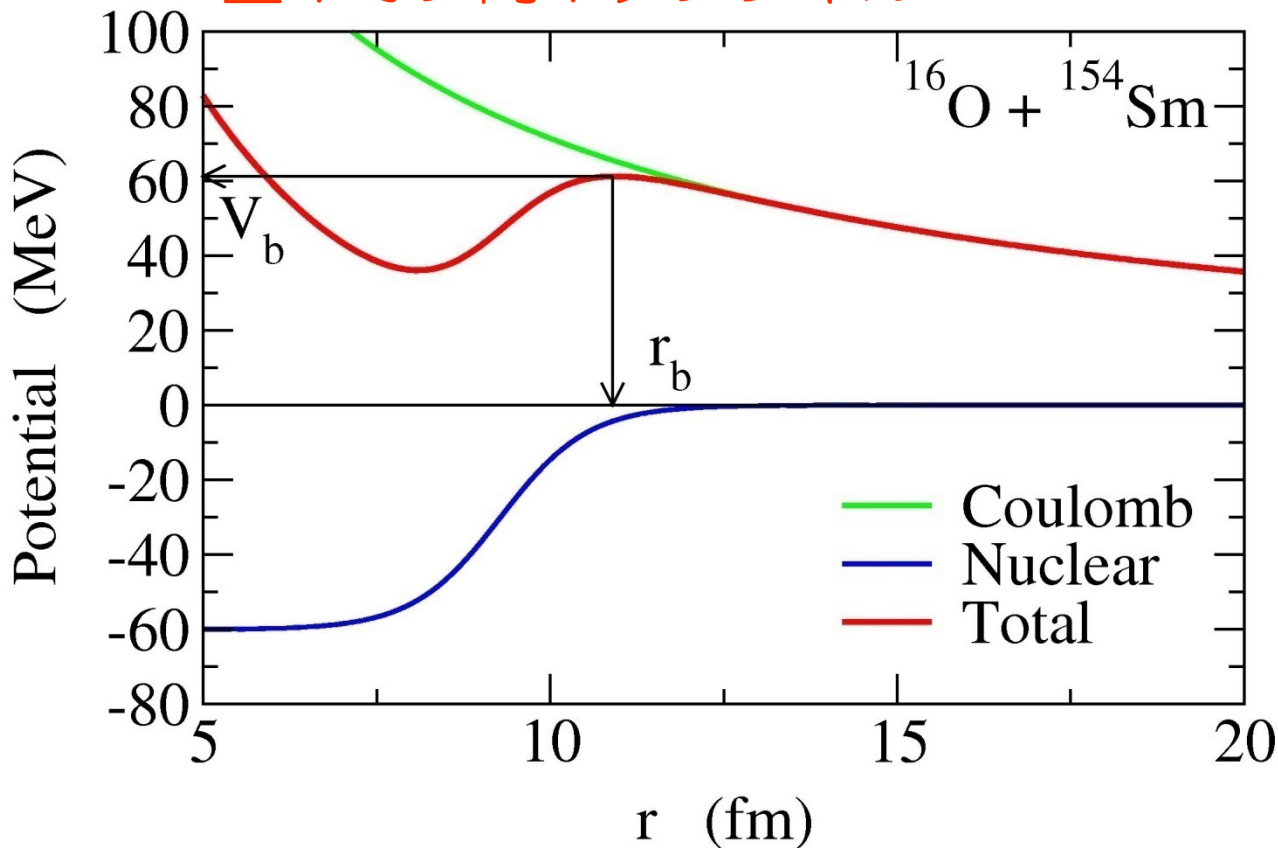


超重元素の合成

核融合・核反応: 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: 核物理における究極のゴールの一つ

重イオン間ポテンシャル



2つの力:

1. クーロン力
長距離斥力
2. 核力
短距離引力



両者の打ち消しあいによりポテンシャル障壁が形成
(クーロン障壁)

- クーロン障壁より高いエネルギー
- • クーロン障壁近傍のエネルギー (sub-barrier energies)
- 極低エネルギー (deep sub-barrier energies)

なぜ障壁近傍のエネルギーでの核融合に興味があるのか？

2つのわかりやすい理由:

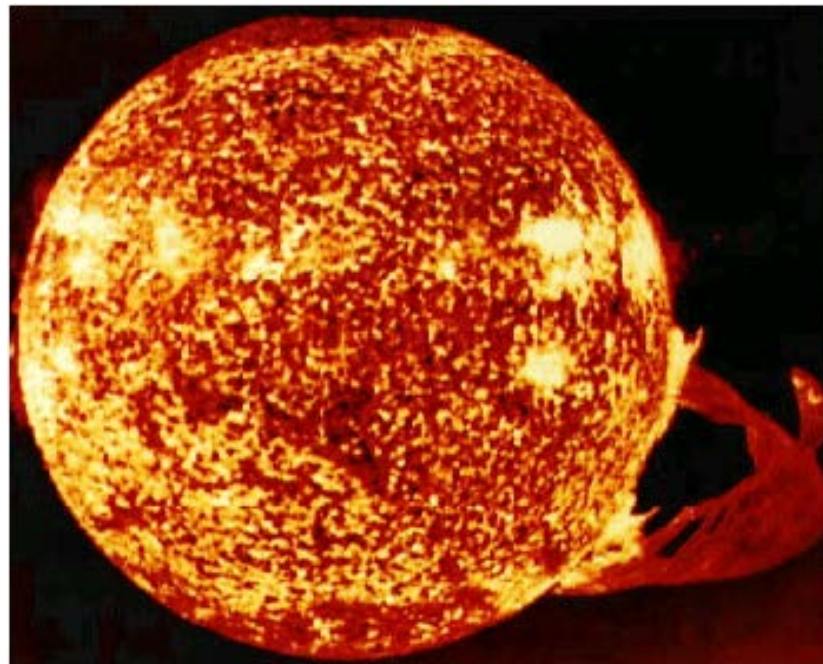


超重元素の物理

cf. $^{209}\text{Bi} (^{70}\text{Zn}, n) ^{278}\text{Nh}$

$V_B \sim 260 \text{ MeV}$

$E_{\text{cm}}^{(\text{exp})} \sim 262 \text{ MeV}$



天体核物理

(星の中での核融合反応)

cf. 実験データの外挿

なぜ障壁近傍のエネルギーでの核融合に興味があるのか？

2つのわかりやすい理由:

- ✓ 超重元素の物理
- ✓ 天体核物理

他の理由:

- ✓ 反応ダイナミクス

核反応と核構造の強い結合(結合チャンネル効果)

cf. 高エネルギー反応: 反応機構はより単純

- ✓ 多粒子系の量子トンネル現象

cf. ・多様な内部自由度

- 原子核の様々な形
- 様々な角運動量を持つ振動状態
- 様々なタイプの振動励起(巨大共鳴、低励起状態など)

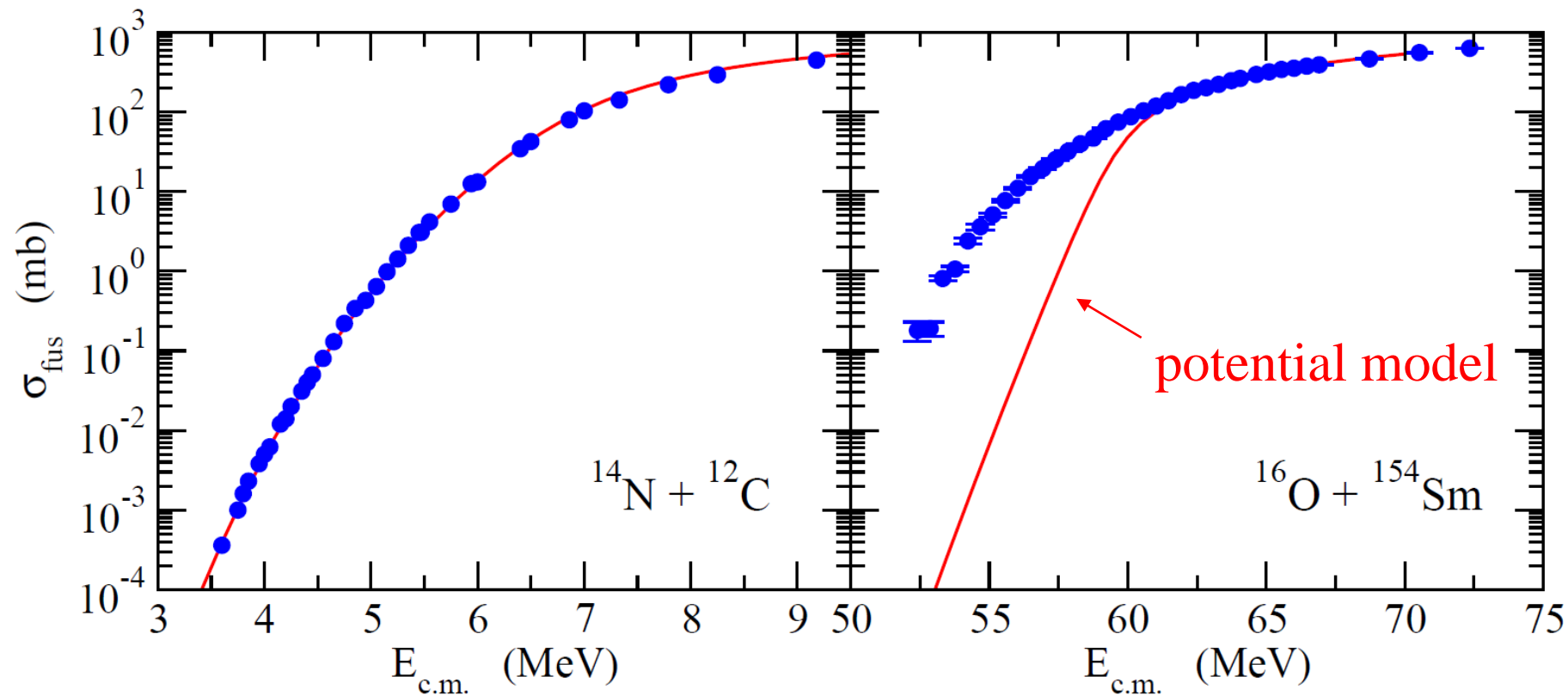
・ α 崩壊: エネルギーが固定されている

重イオン核融合反応 = 多自由度系・多粒子系での量子トンネル現象を理解する上で理想的な現象

核融合反応断面積の大きな増大

ポテンシャル模型: $V(r) +$ 吸収

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

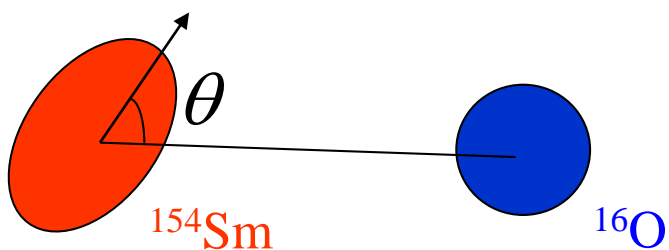
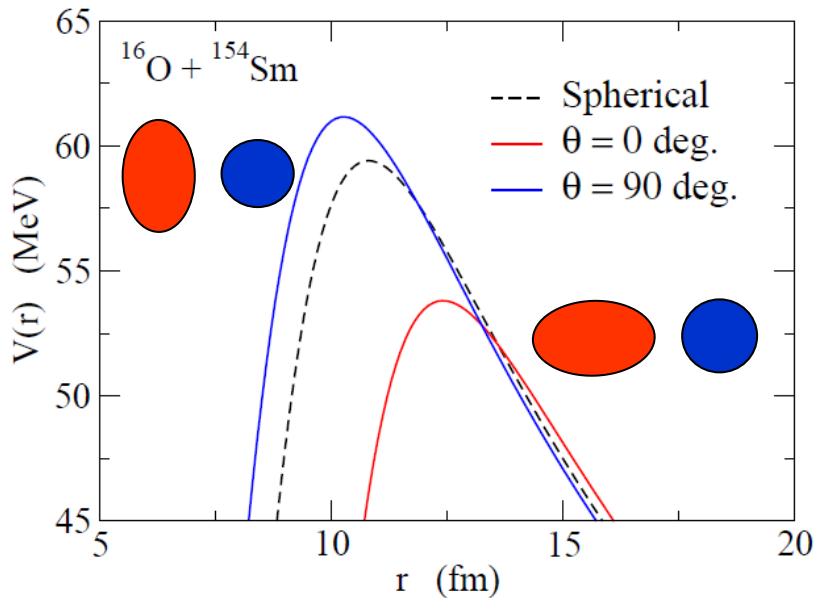


cf. 初期の実験:

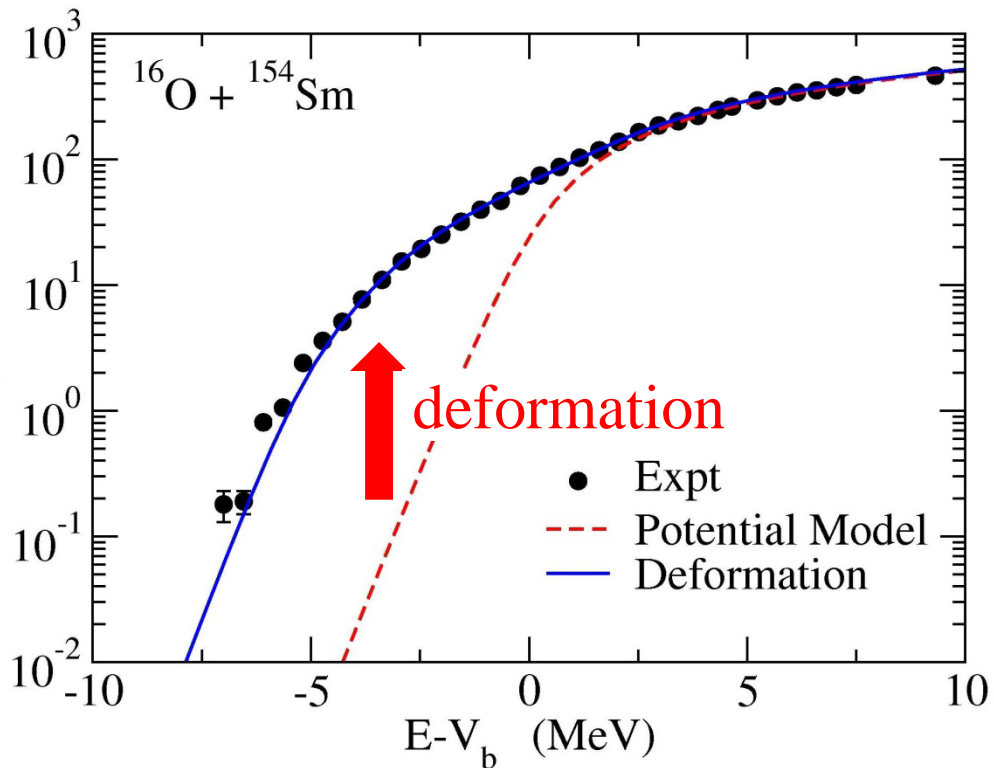
R.G. Stokstad et al., PRL41('78) 465

原子核の変形の効果

^{154}Sm : 典型的な変形核 ($\beta_2 \sim 0.3$)

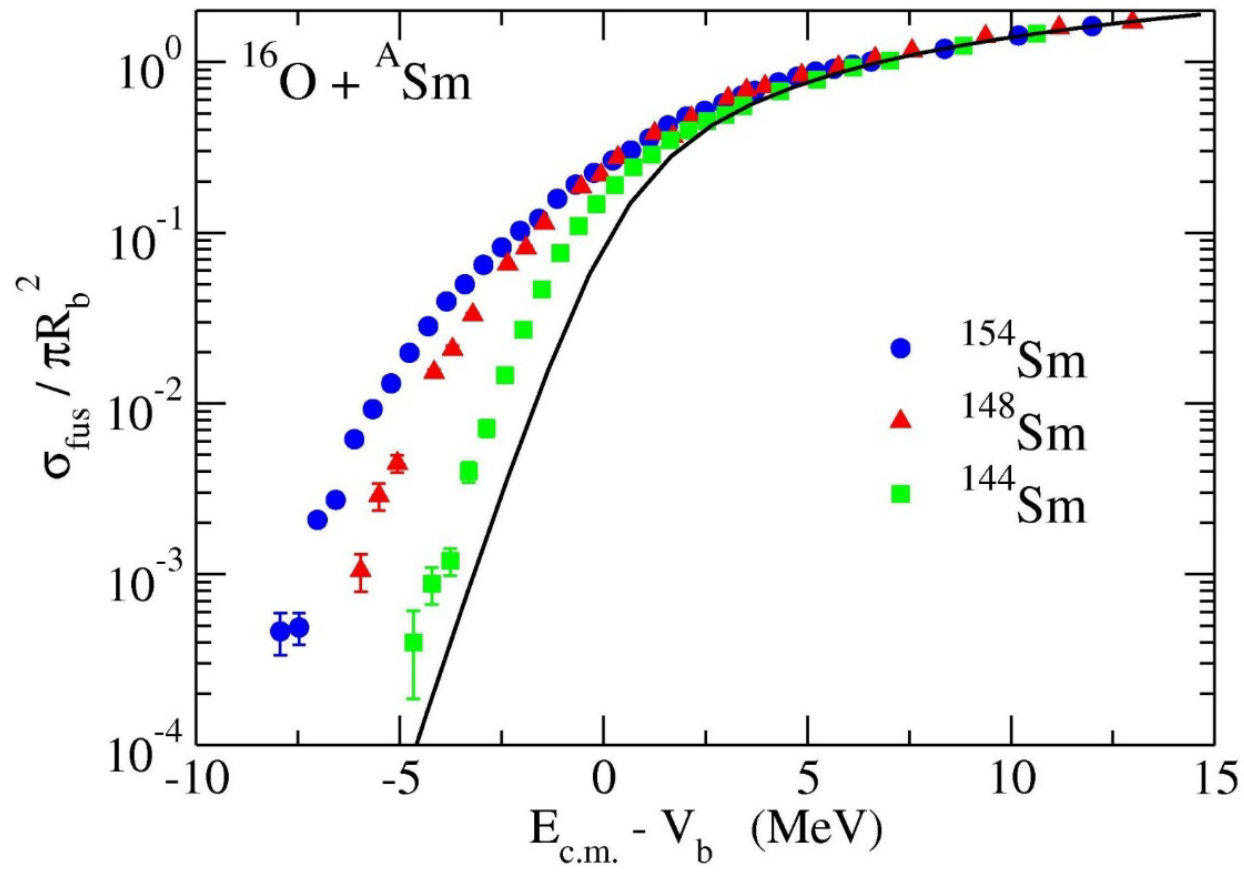


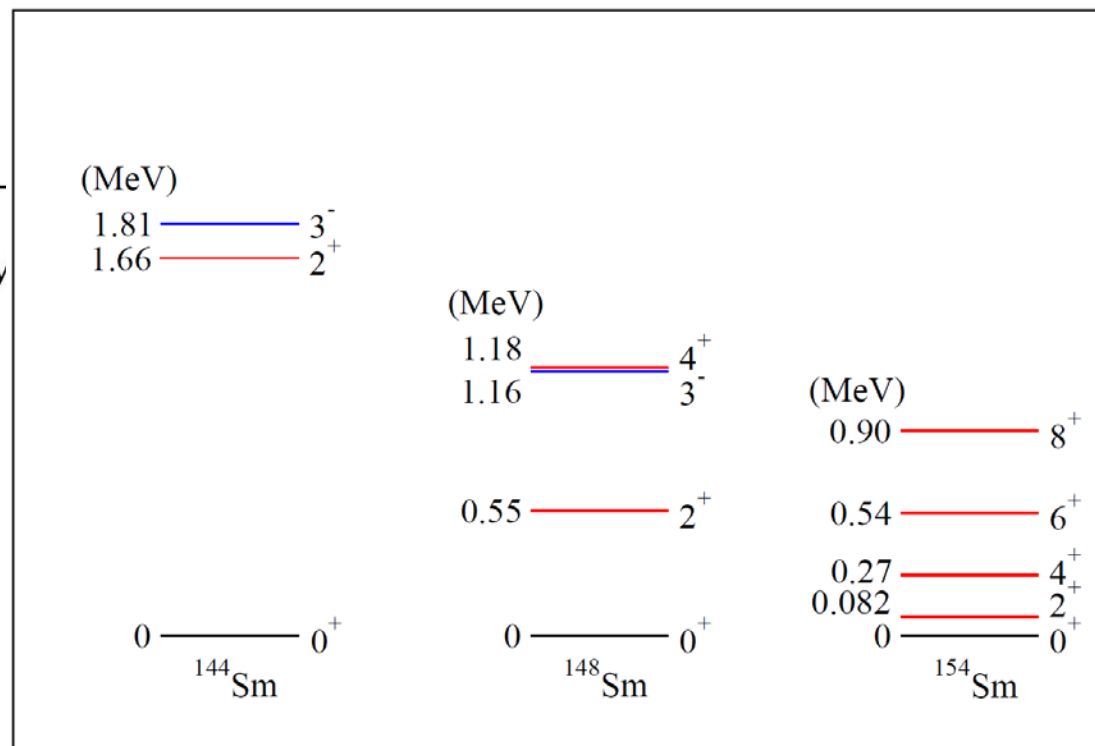
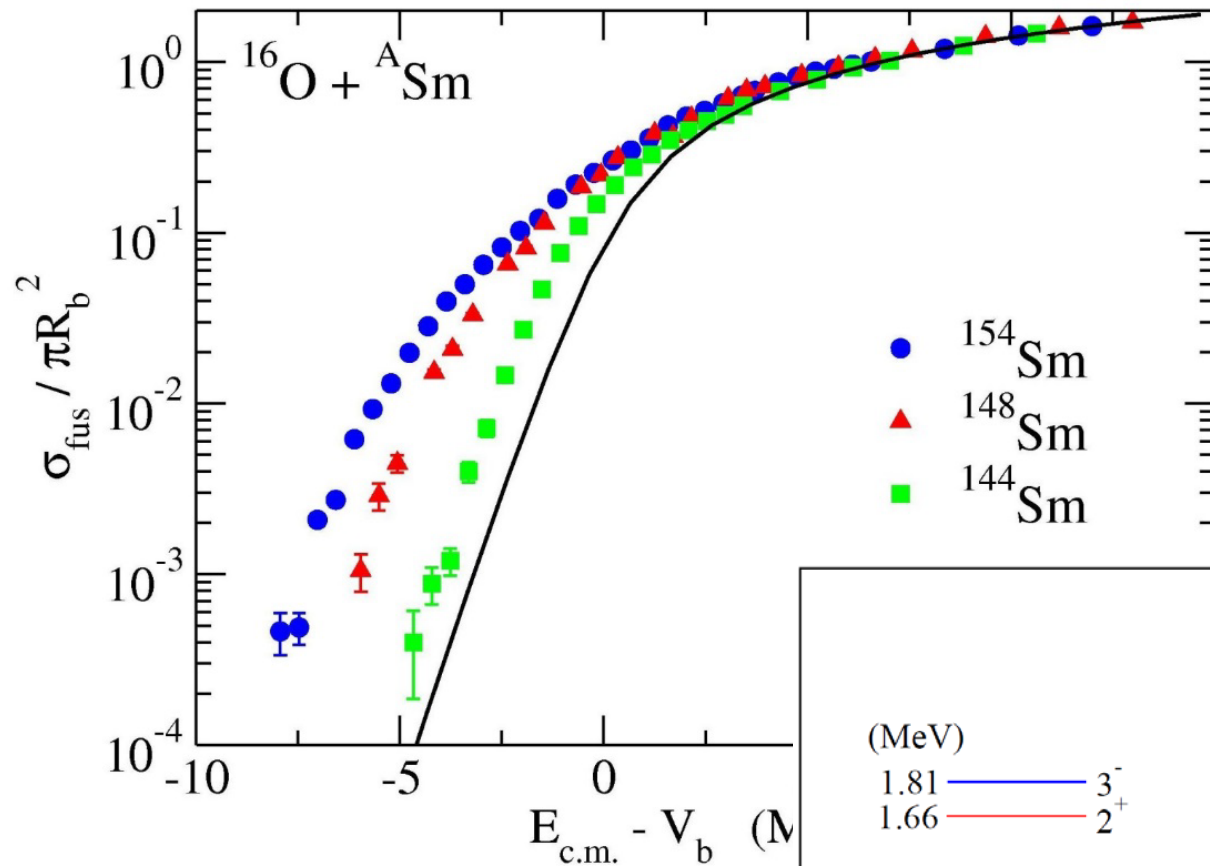
$$\sigma_{\text{fus}}(E) = \int_0^1 d(\cos \theta) \sigma_{\text{fus}}(E; \theta)$$



核融合反応: 核構造と核反応
の強い結びつき

coupling assisted tunneling



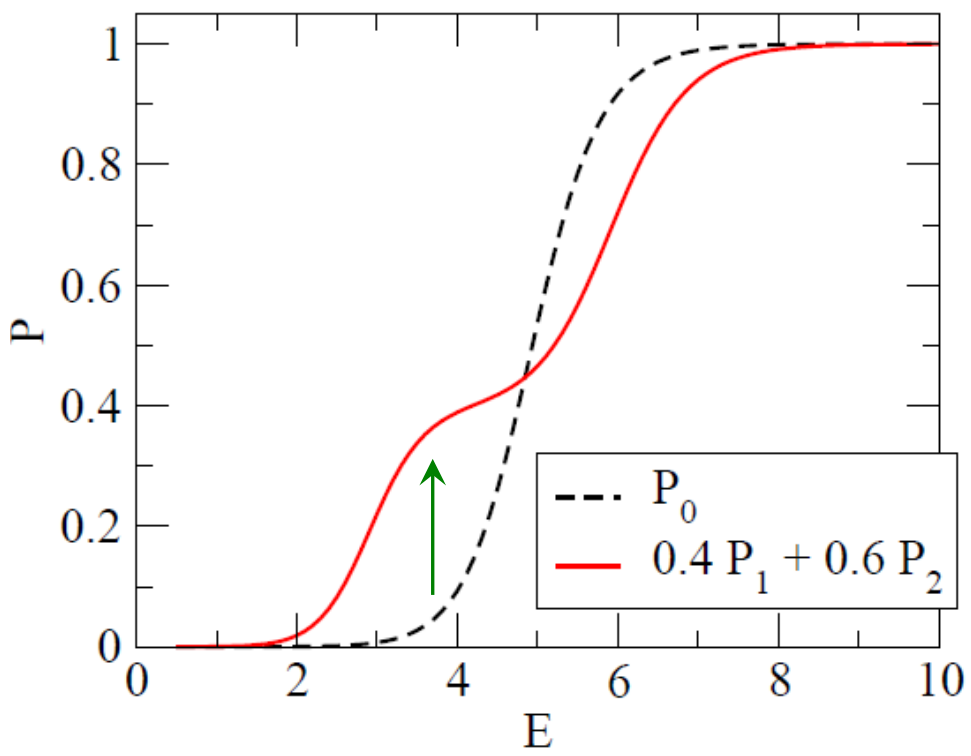
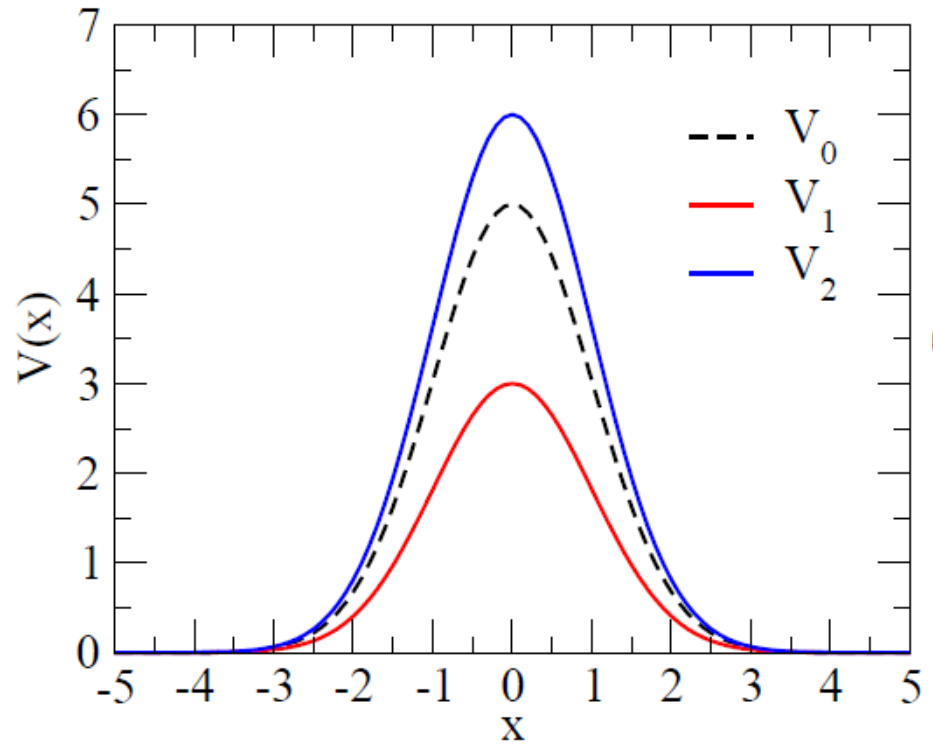


$E < V_b$ において
強い標的核依存性

→ 低励起集団運動
との結合が重要

トンネル確率の増大: 2ポテンシャル問題

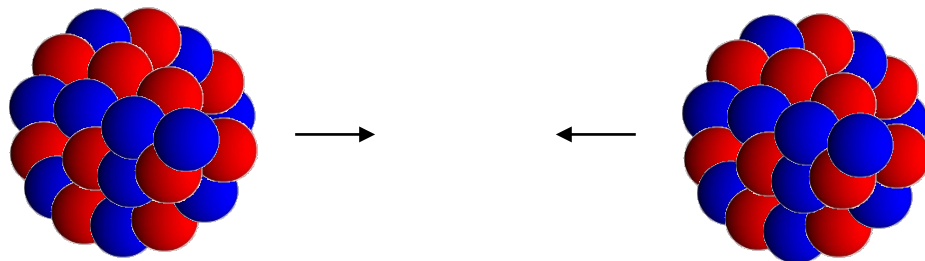
$$P(E) = P(E; V_0) \rightarrow w_1 P(E; V_1) + w_2 P(E; V_2)$$



cf. ノイマン-ウィグナーの定理 (準位反発)

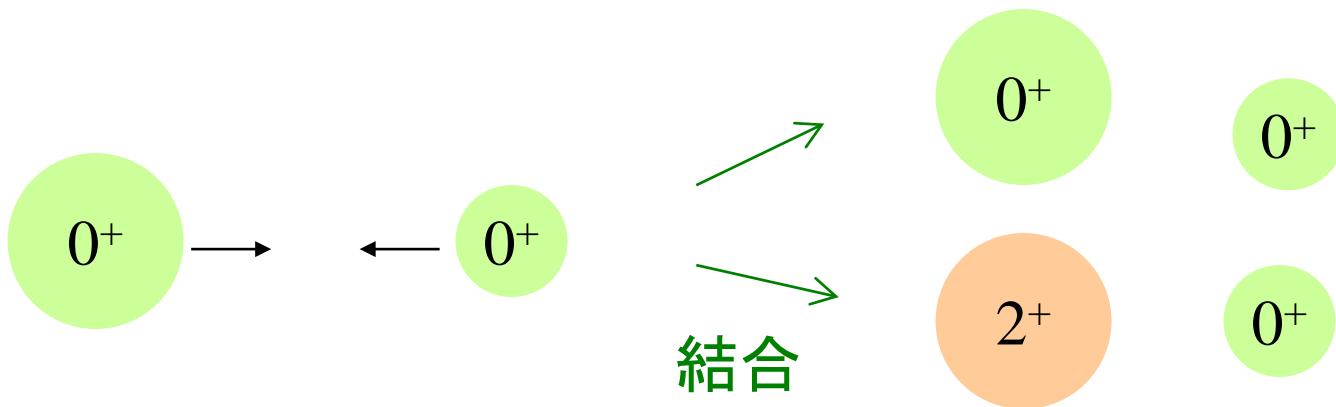
結合チャンネル法 : 内部励起を考慮した量子散乱理論

多体問題

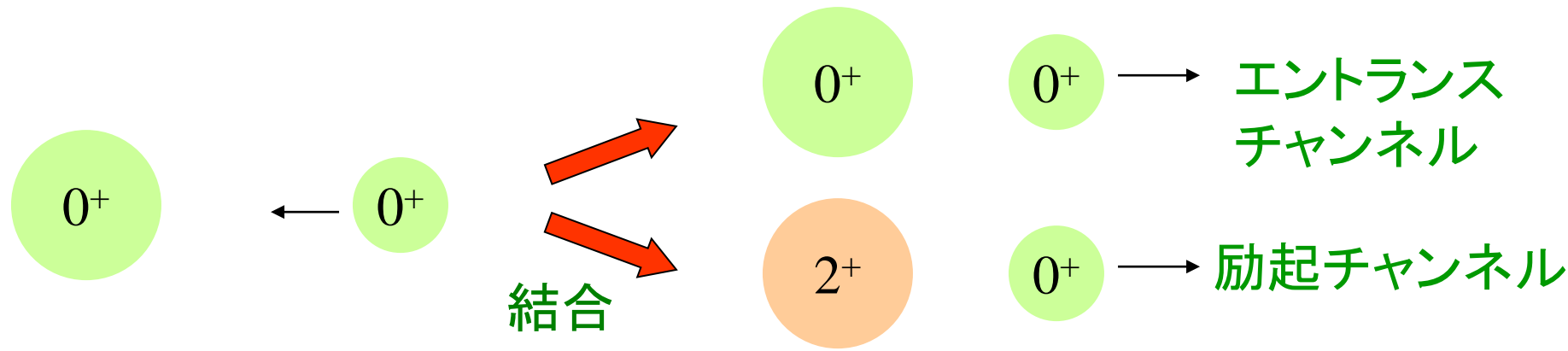


未だに超難問題
cf. 多粒子トンネルの記述

➡ 2体問題 + 原子核の励起 (結合チャンネルアプローチ)



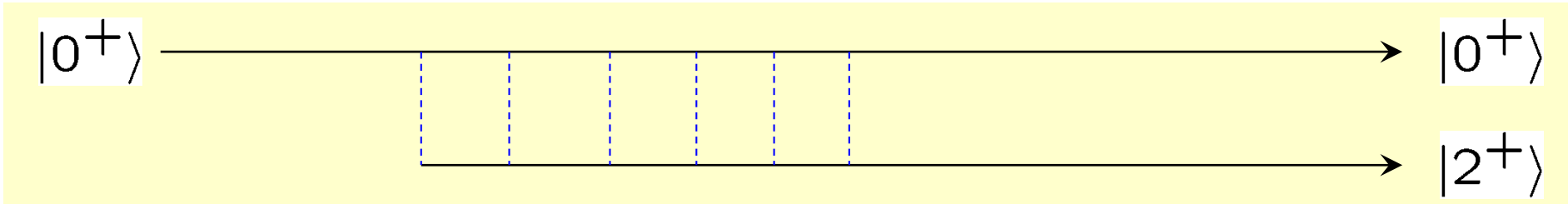
結合チャンネル法 : 内部励起を考慮した量子散乱理論



$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + V_0(r) + \epsilon_k - E \right] \psi_k(\mathbf{r}) + \sum_{k'} \langle \phi_k | V_{\text{coup}} | \phi_{k'} \rangle \psi_{k'}(\mathbf{r}) = 0$$

励起エネルギー

励起オペレーター



反応途中の励起・脱励起のダイナミクスをフル・オーダーで取り扱う

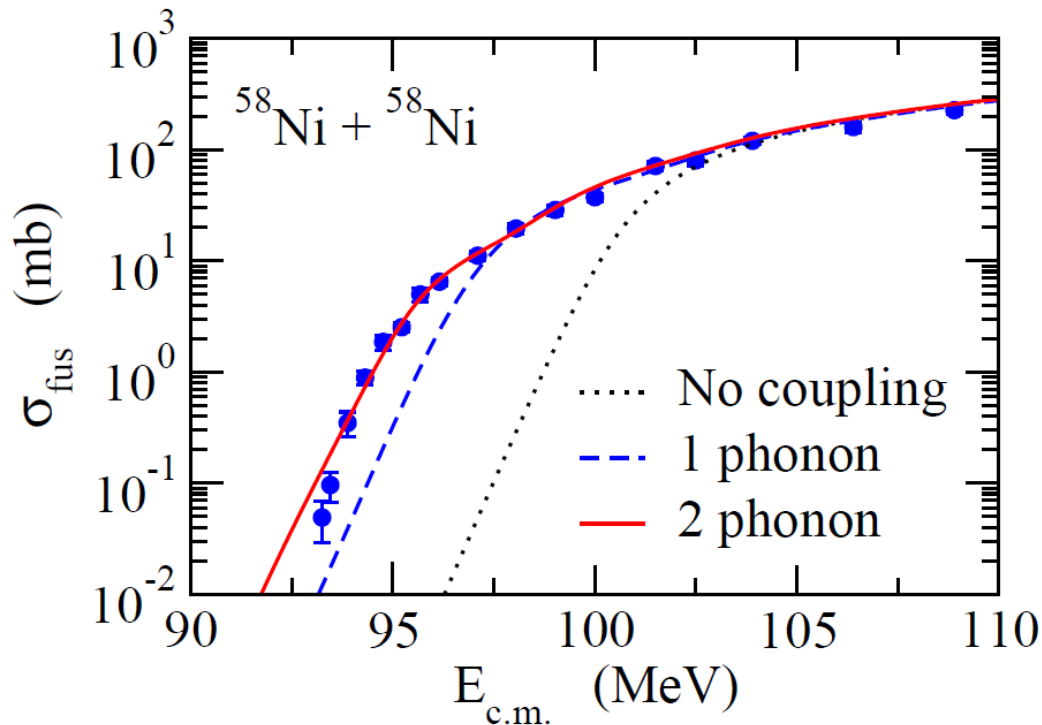
結合チャンネル計算のインプット

i) 核間ポテンシャル

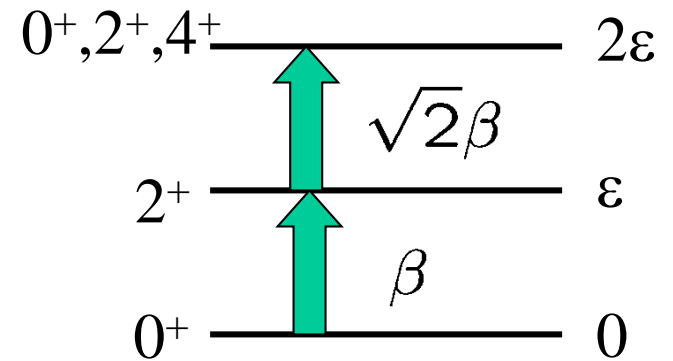
障壁より上のエネルギーの実験データにフィット

ii) 内部自由度

ほとんどの場合、(巨視的)集団運動模型
(回転剛体や調和振動子)

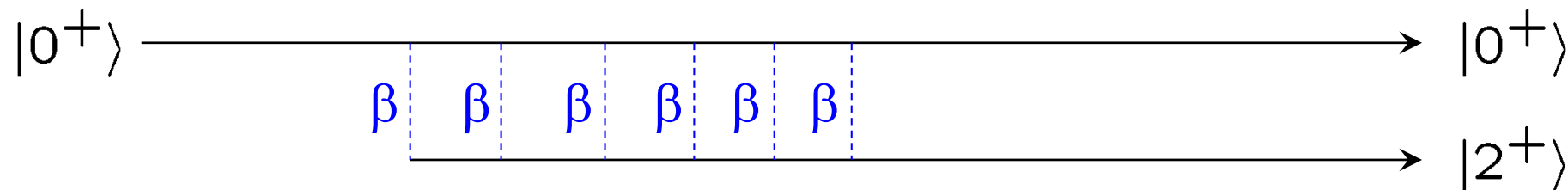


単純な調和振動子



結合チャンネル法: 重イオン核融合反応で標準的な方法

cf. *CCFULL* (K.H., N. Rowley, A.T. Kruppa, CPC123 ('99) 143)



反応途中の励起・脱励起のダイナミクスをフル・オーダーで取り扱う

$$V_{\text{coup}}(r) \sim -R\beta \frac{dV_N(r)}{dr}$$

しかしながら、ハミルトニアンは1次のみ → 矛盾

$$\langle \phi_n | V(r-x) | \phi_m \rangle \sim V(r) \delta_{n,m} - \frac{dV(r)}{dr} \langle \phi_n | x | \phi_m \rangle$$



$$\langle \phi_n | V(r-x) | \phi_m \rangle = \int \phi_n^*(x) \phi_m(x) V(r-x)$$

ハミルトニアンもフル・オーダーになるように改良

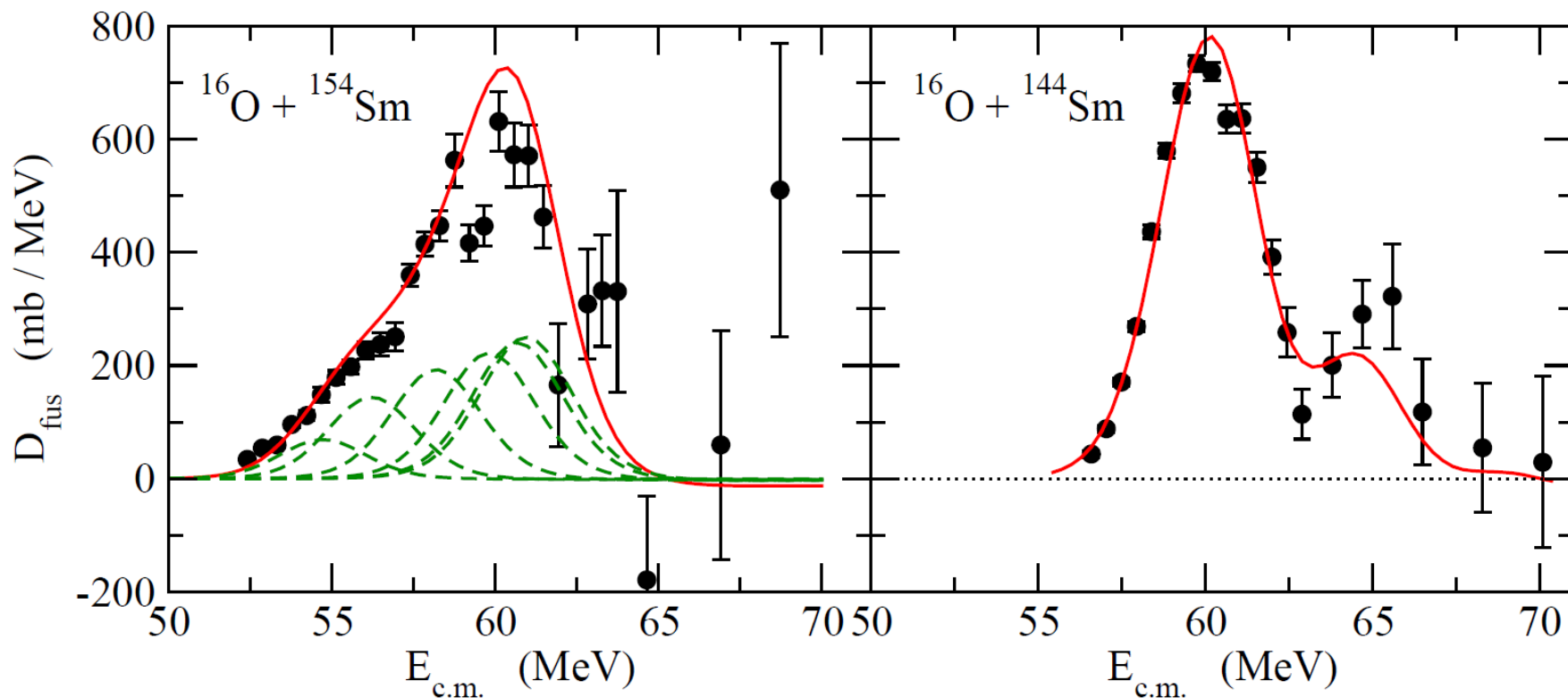
結合チャンネル法: 重イオン核融合反応で標準的な方法

cf. CCFULL (K.H., N. Rowley, A.T. Kruppa, CPC123 ('99) 143)

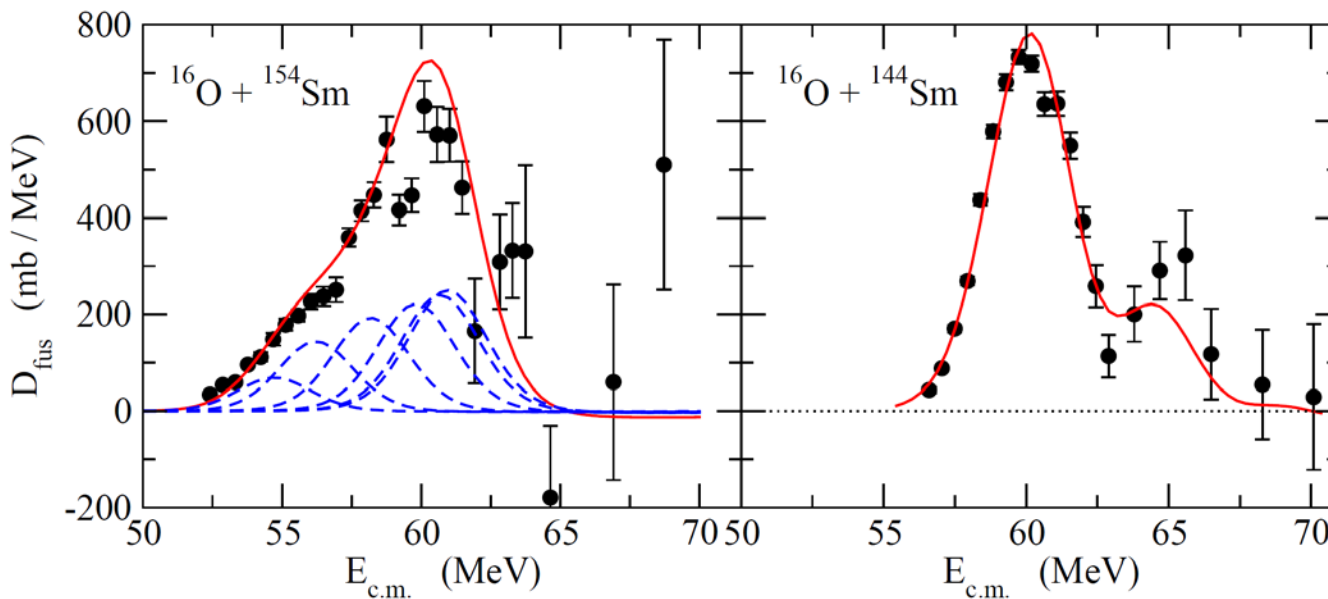
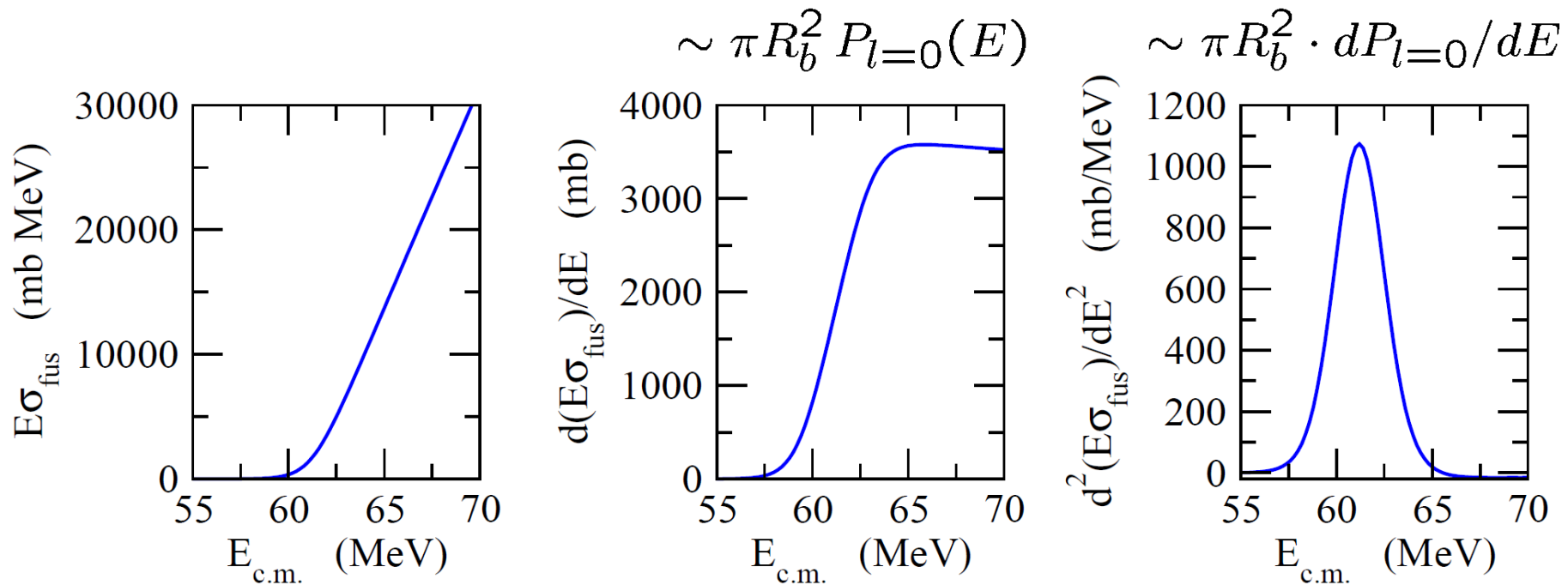
✓ 障壁分布 (Rowley, Satchler, Stelson, PLB254('91))

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

— c.c. calculations

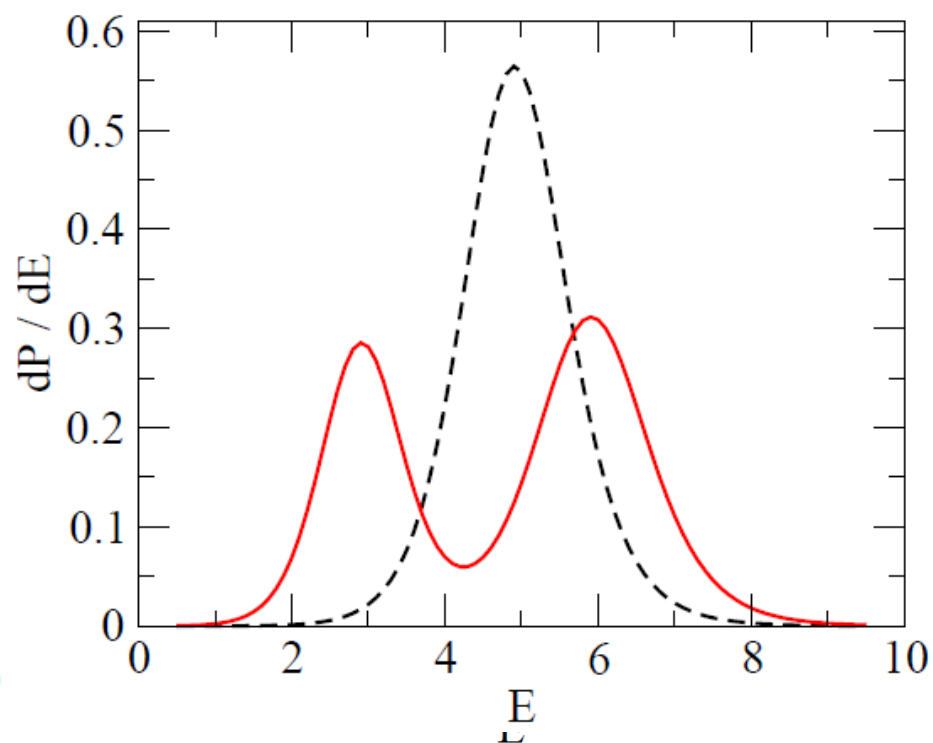
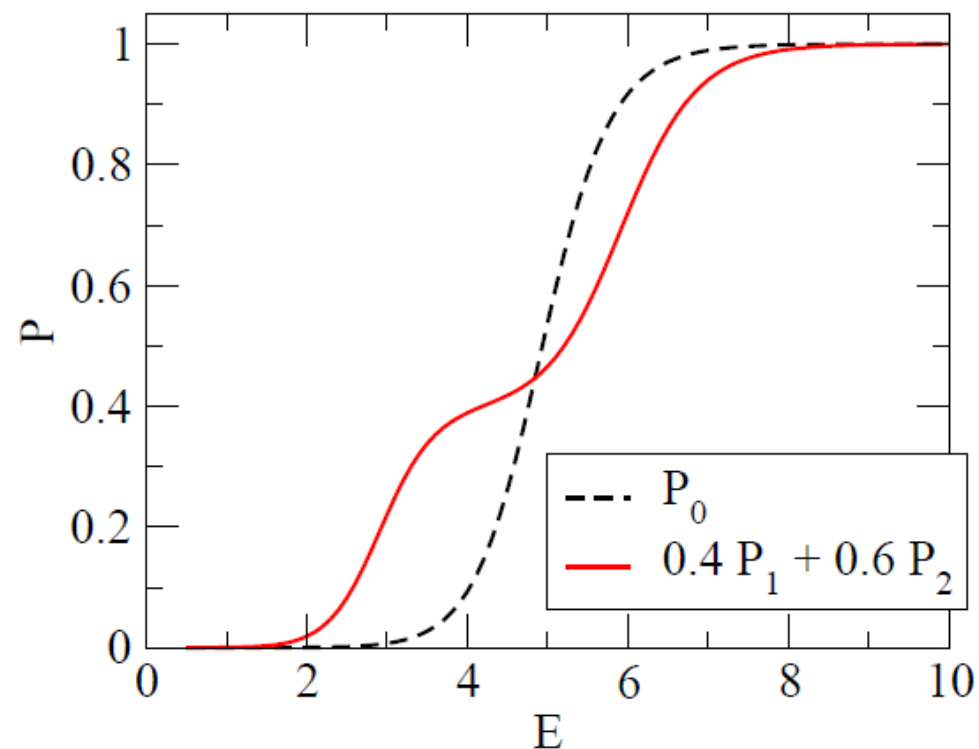


K.H., N. Takigawa, PTP128 ('12) 1061



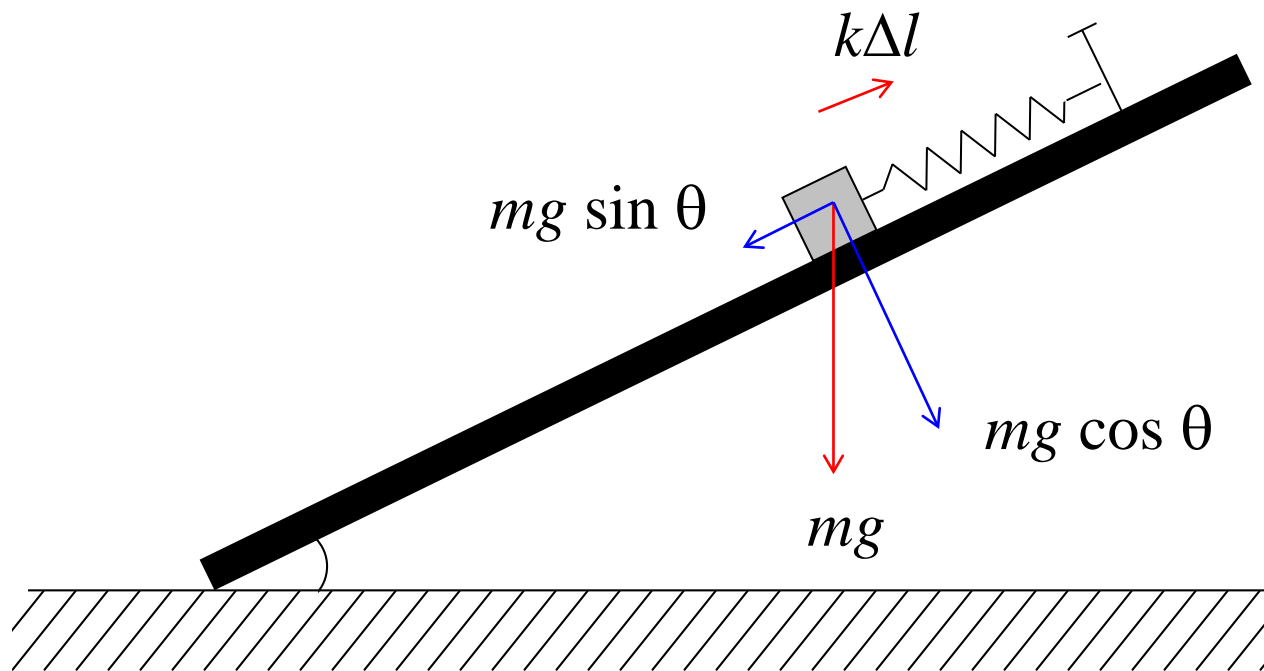
障壁分布:2ポテンシャル問題の場合

$$P(E) = P(E; V_0) \rightarrow w_1 P(E; V_1) + w_2 P(E; V_2)$$

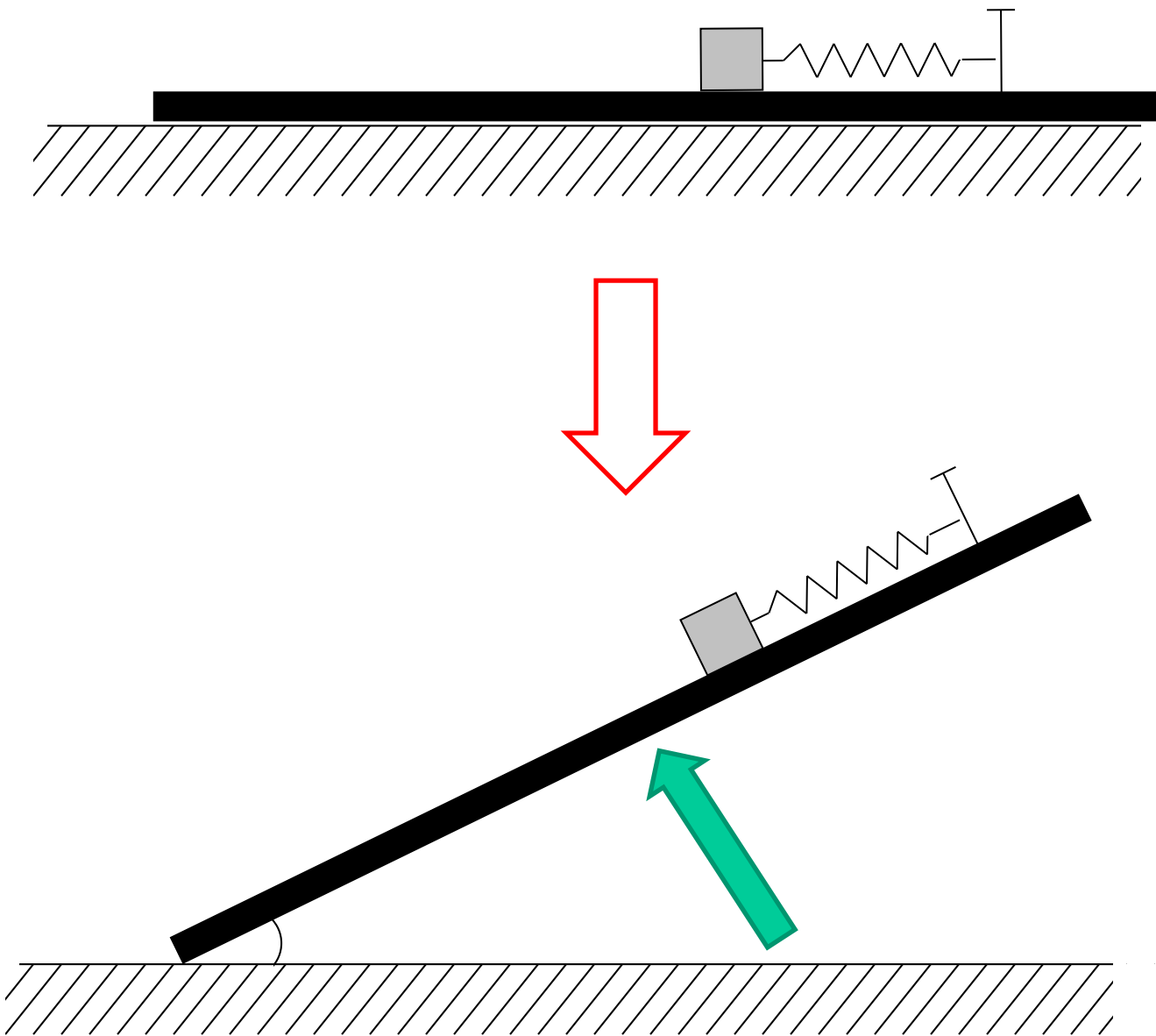


2つの時間スケールの比較

斜面上に置かれたバネの問題



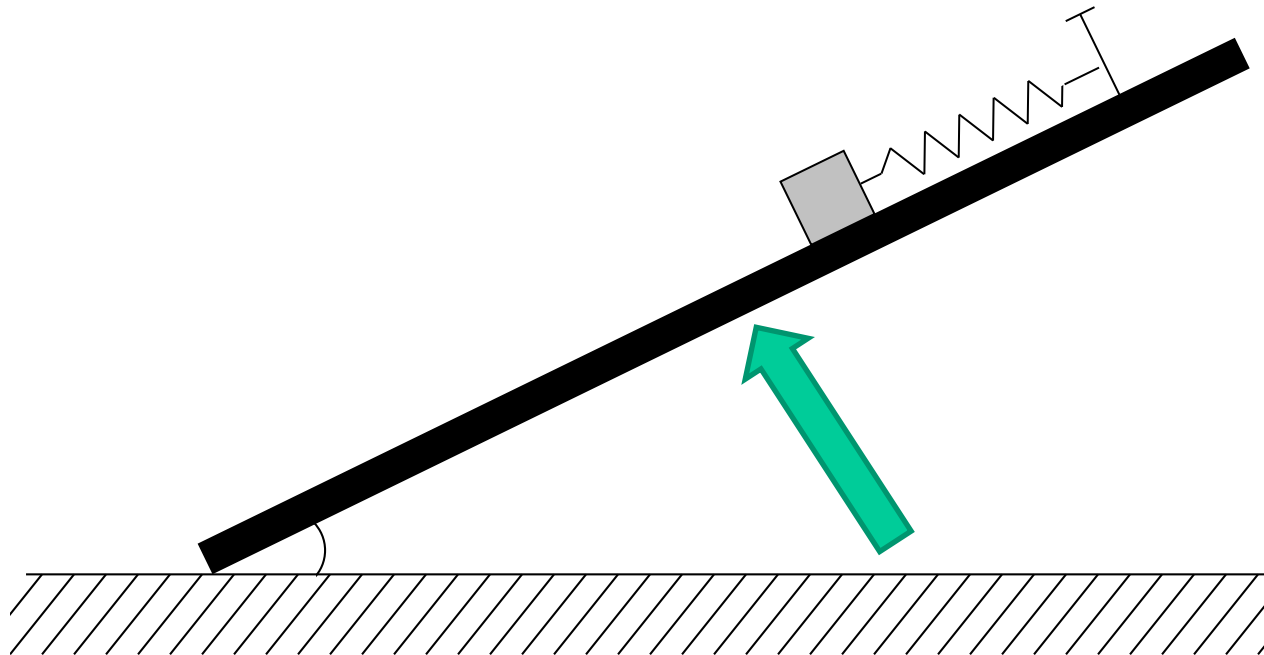
平衡の位置: $mg \sin \theta = k\Delta l \quad \rightarrow \quad \Delta l = mg \sin \theta / k$



i) ゆっくりと動かすと? ii) 瞬間的に動かすと?

2つの時間スケールの比較

類似の関連した問題：斜面上のバネ

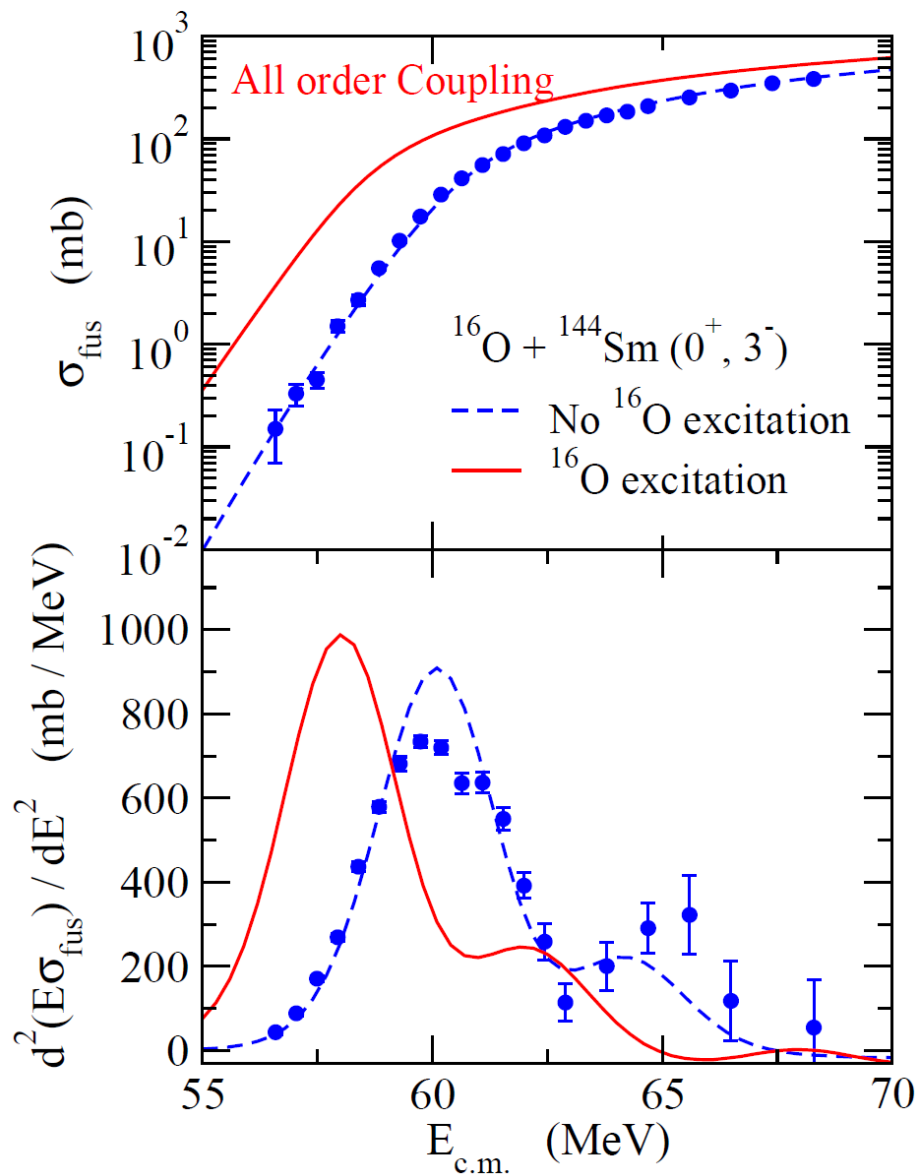


- i) ゆっくりと動かすと? ii) 瞬間的に動かすと?

初期の長さを保つ ($\Delta l = 0$) “瞬間極限”

常に各瞬間における平衡点 ($\Delta l = mg \sin \theta / k$) “断熱極限”

断熱的ポテンシャル繰り込み



$^{16}\text{O} + ^{144}\text{Sm}$

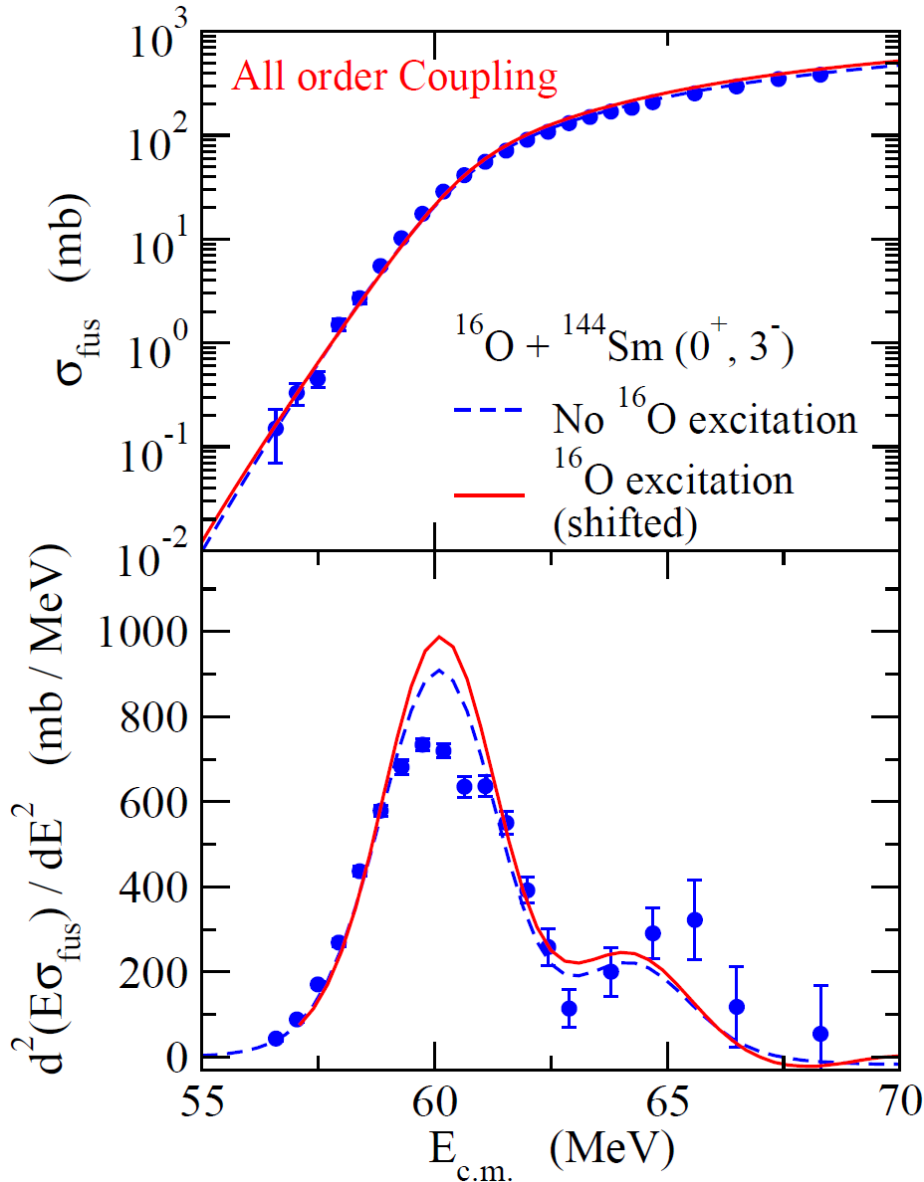
3^- ——— 6.13 MeV

3^- ——— 1.81 MeV

0^+ ———
 ^{16}O

0^+ ———
 ^{144}Sm

断熱的ポテンシャル繰り込み



- ✓ 高い励起状態との結合は断面積のエネルギー依存性を変えない
- ✓ ポテンシャルを実効的に変えるのみ
(断熱的ポテンシャル繰り込み)



結合チャンネル計算では
低励起状態のみ考えればよい。

更なる発展: 様々な核構造模型を用いた結合チャンネル計算

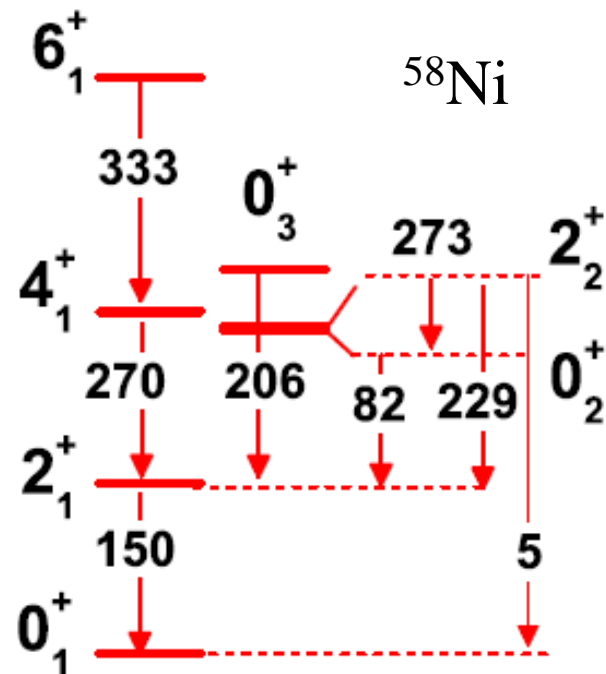
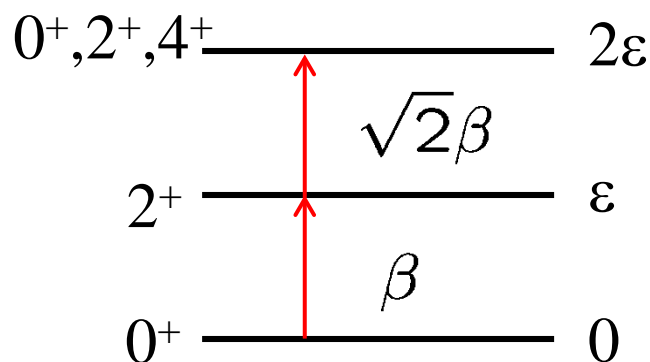
K.H. and J.M. Yao, PRC91('15) 064606

CCFULL

+ 核構造の微視的計算

(GCM, Shell Model, IBM.....)

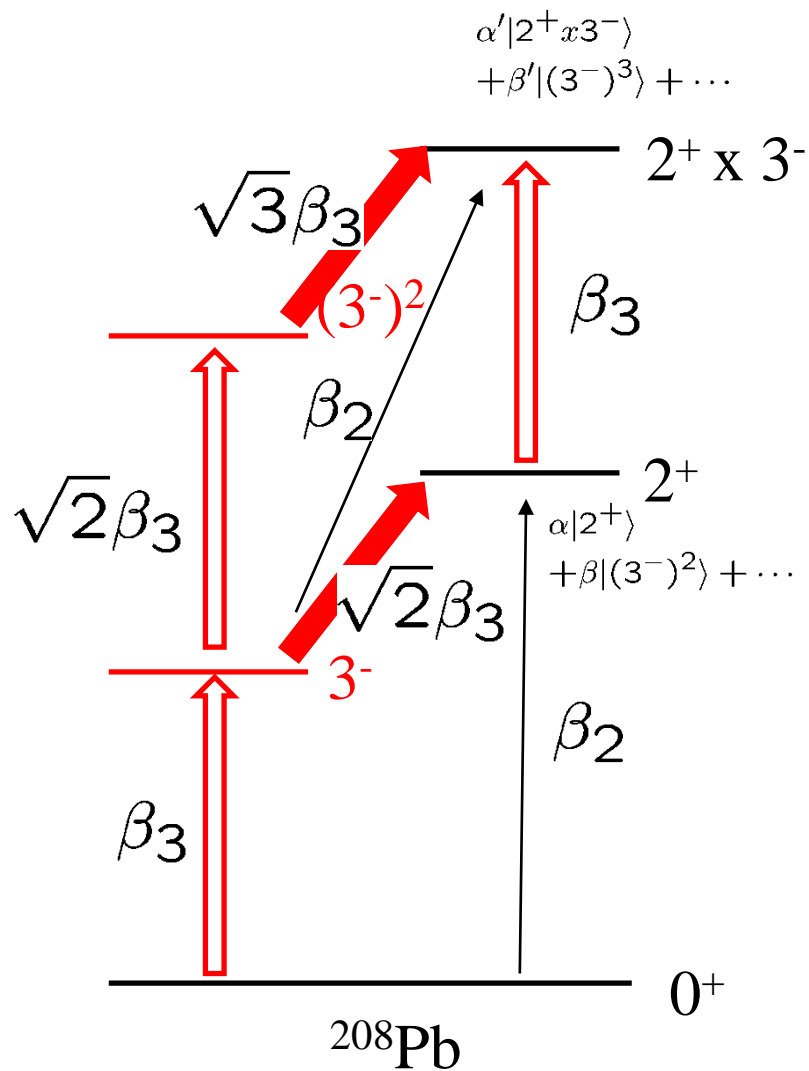
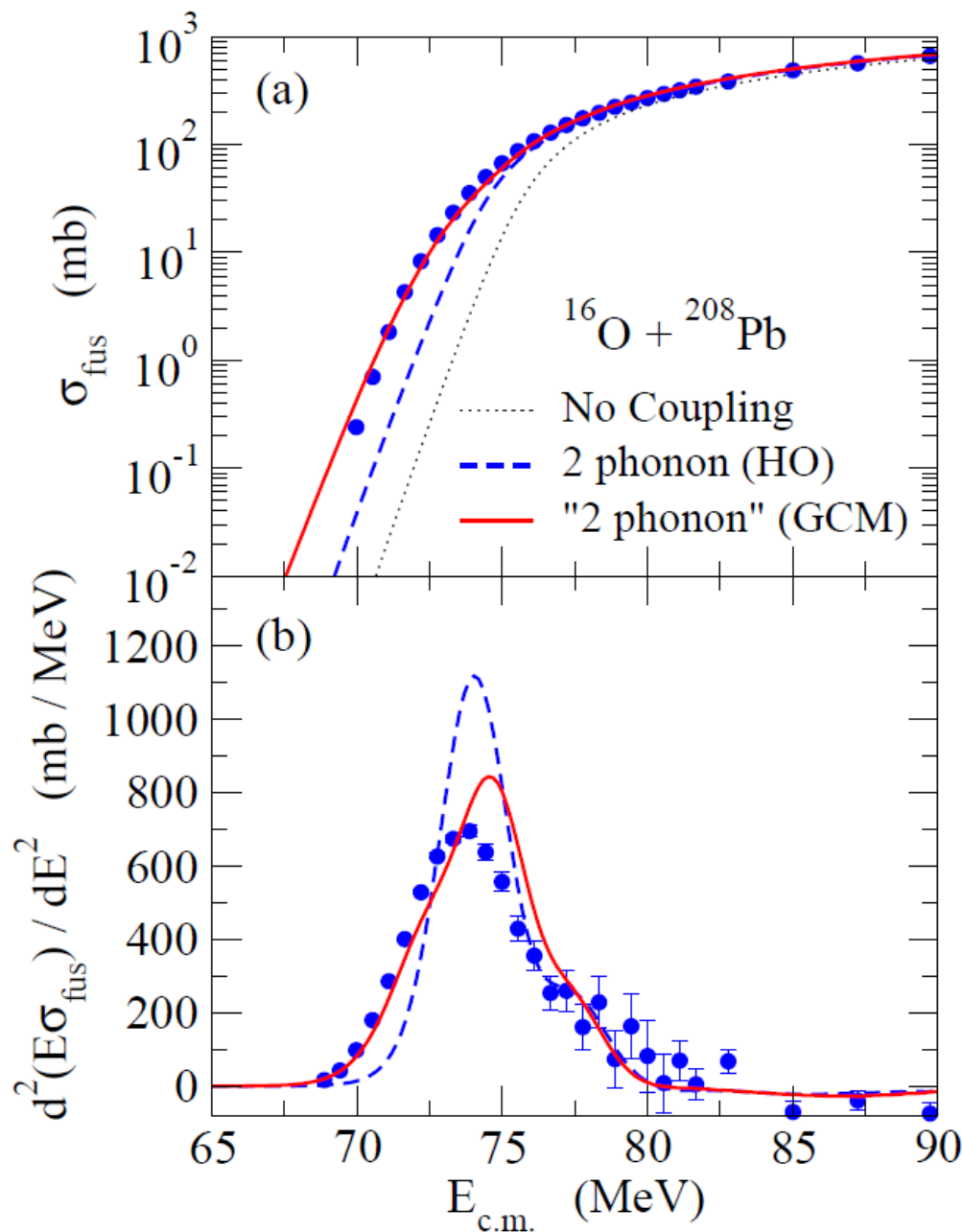
単純な調和振動子



relativistic MF + GCM

フォノン励起における非調和性

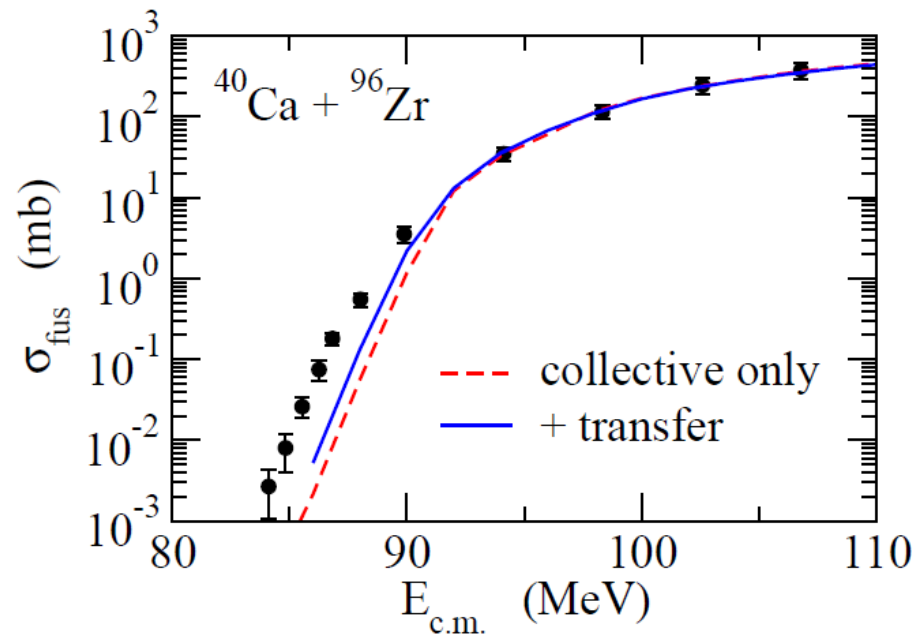
相対論的平均場理論+平均場の揺らぎ+結合チャンネル



J.M. Yao and K. Hagino,
PRC94 ('16) 11303(R)

残された課題

1. 核融合反応と(多核子)移行反応の競合



G. Scamps and K. Hagino,
PRC92 ('16) 054616



多核子移行過程を取り入れた
核融合反応の計算は発展途上

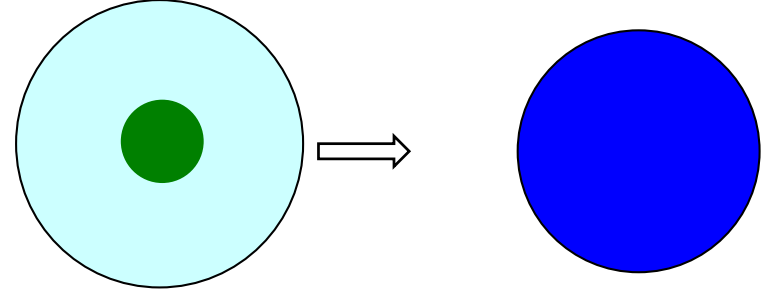
- ◆ 核融合と核子移行の断面積を同時に再現できるのか?
- ◆ 対移行反応の反応メカニズム?

cf. 中性子過剰核の対相関

K. Hagino and H. Sagawa,
PRC72 ('05) 044321

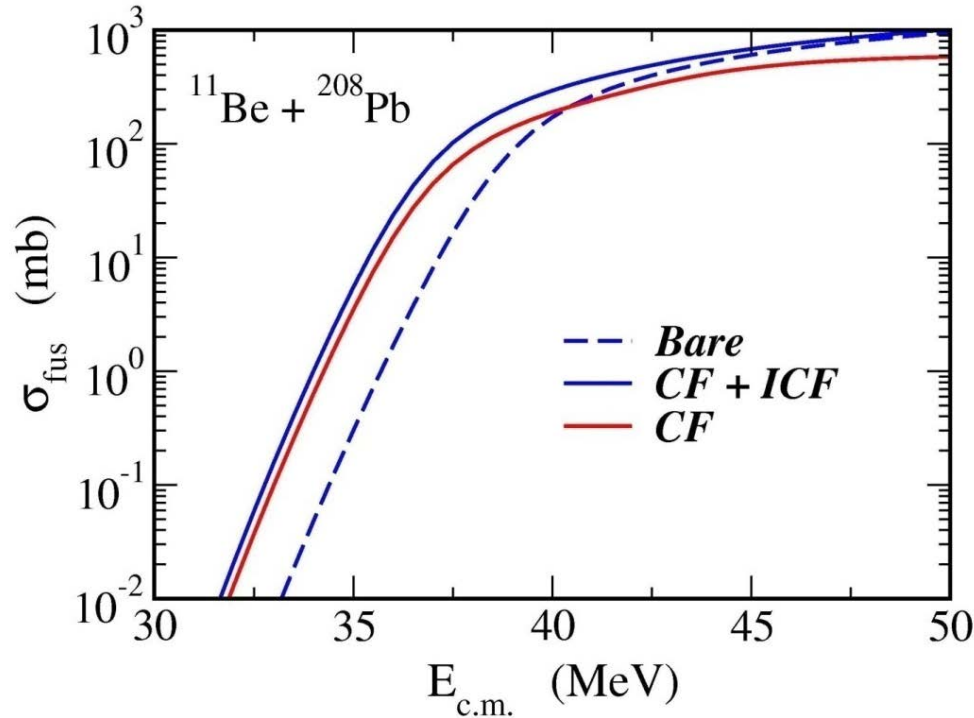
- 結合チャンネル法
- 時間依存 Hartree-Fock (TDHF)

残された課題

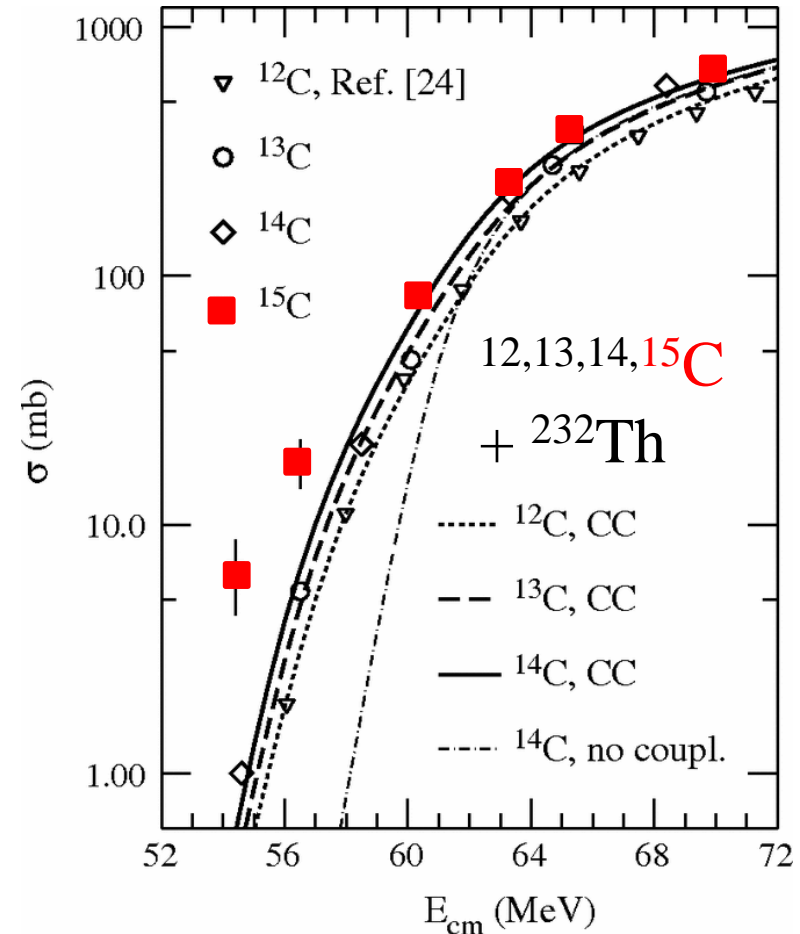


2. ハロー核の核融合反応

分解チャンネルのみを考慮した計算



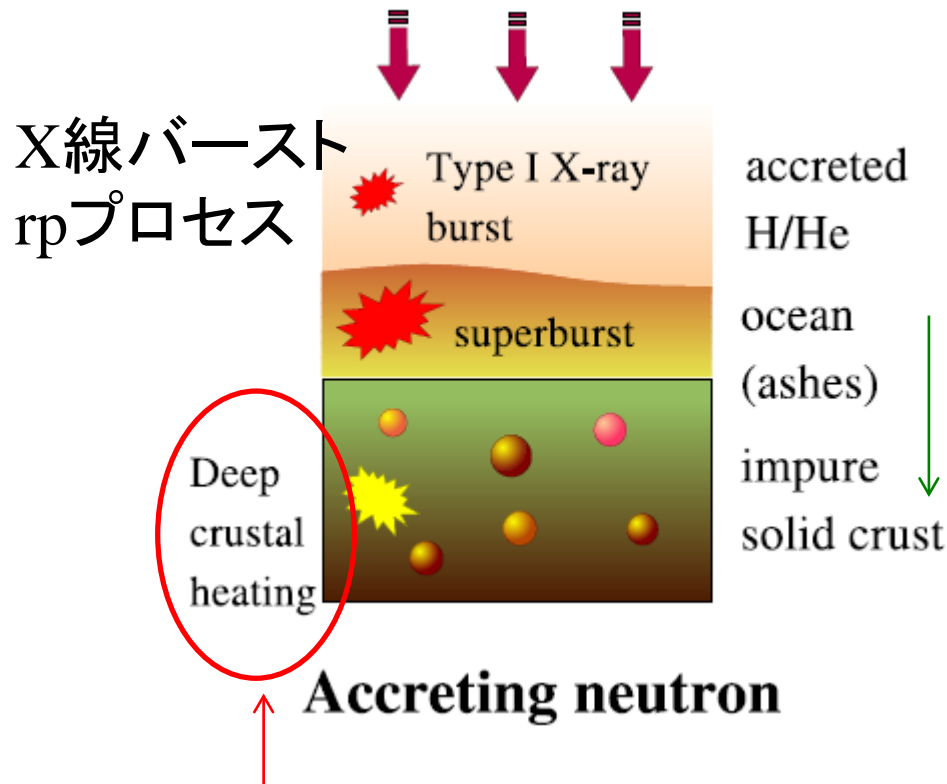
K. Hagino, A. Vitturi, C.H. Dasso,
and S.M. Lenzi, Phys. Rev. C61 ('00) 037602



M. Alcorta et al., PRL106('11)

→ 分解と核子移行を同時に取り入れた拡張が必要

質量降着を伴う中性子星で起こる 中性子過剰核の核融合反応



Zが十分小さくなると
中性子過剰核の核融合反応



電子捕獲



徐々に中性子過剰核へ

→ X線連星の静穏期
におけるX線の起源

N. Chamel and P. Haensel,
Living Rev. Relativity, 11 ('08) 10.

現象論的アプローチから微視的模型へ

巨視的(現象論的)

集団模型による結合チャンネル計算

微視的核構造計算を
インプットとする
結合チャンネル計算

- * Hagino-Yao
- * Ichikawa-Matsuyanagi

TDHFをベースにした
インプットを用いた
結合チャンネル計算

- * Umar (DC-TDHF)
- * Washiyama-Lacroix

TDHF シミュレーション

- * Simenel
- * Sekizawa
- * Washiyama
- * Iwata-Otsuka など

第一原理的

(しかし、トンネルは記述できない)

微視的

現象論的アプローチから微視的模型へ

TDHF シミュレーション

- * Simenel
- * Sekizawa
- * Washiyama
- * Iwata-Otsuka など

第一原理的

(しかし、トンネルは記述できない)

➤「平均場を超えた取り扱い」

原子核構造: GCM $|\Psi\rangle = \int dq f(q) |\Phi_q\rangle$

時間に依存した GCM? $|\Psi(t)\rangle = \int dq f(q, t) |\Phi_q(t)\rangle$

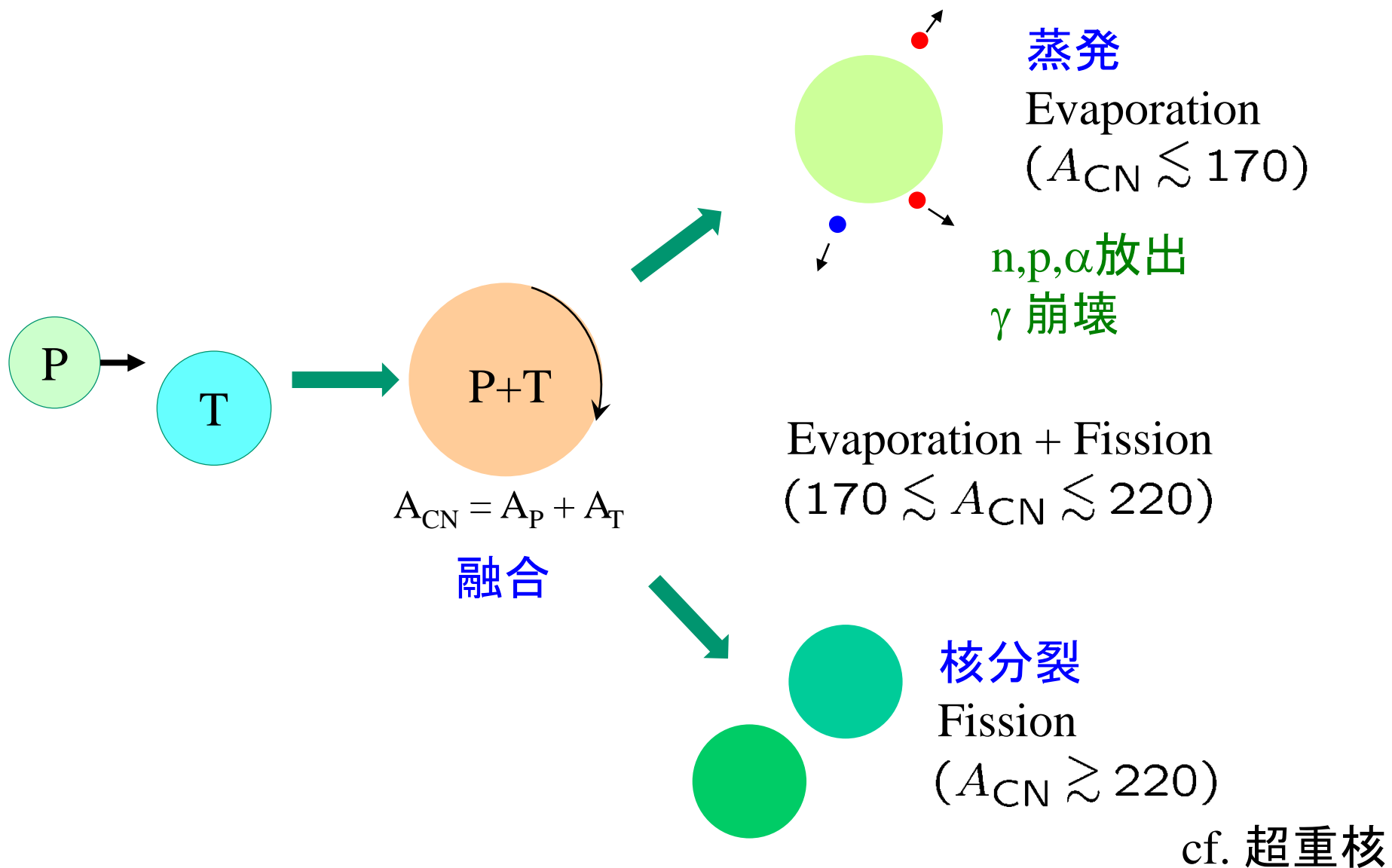
→ 多体系のトンネル現象

cf. “Quantum tunneling using entangled classical trajectories”

A. Donoso and C.C. Martens, PRL87 ('01) 223202

今後の展望: 超重元素合成反応

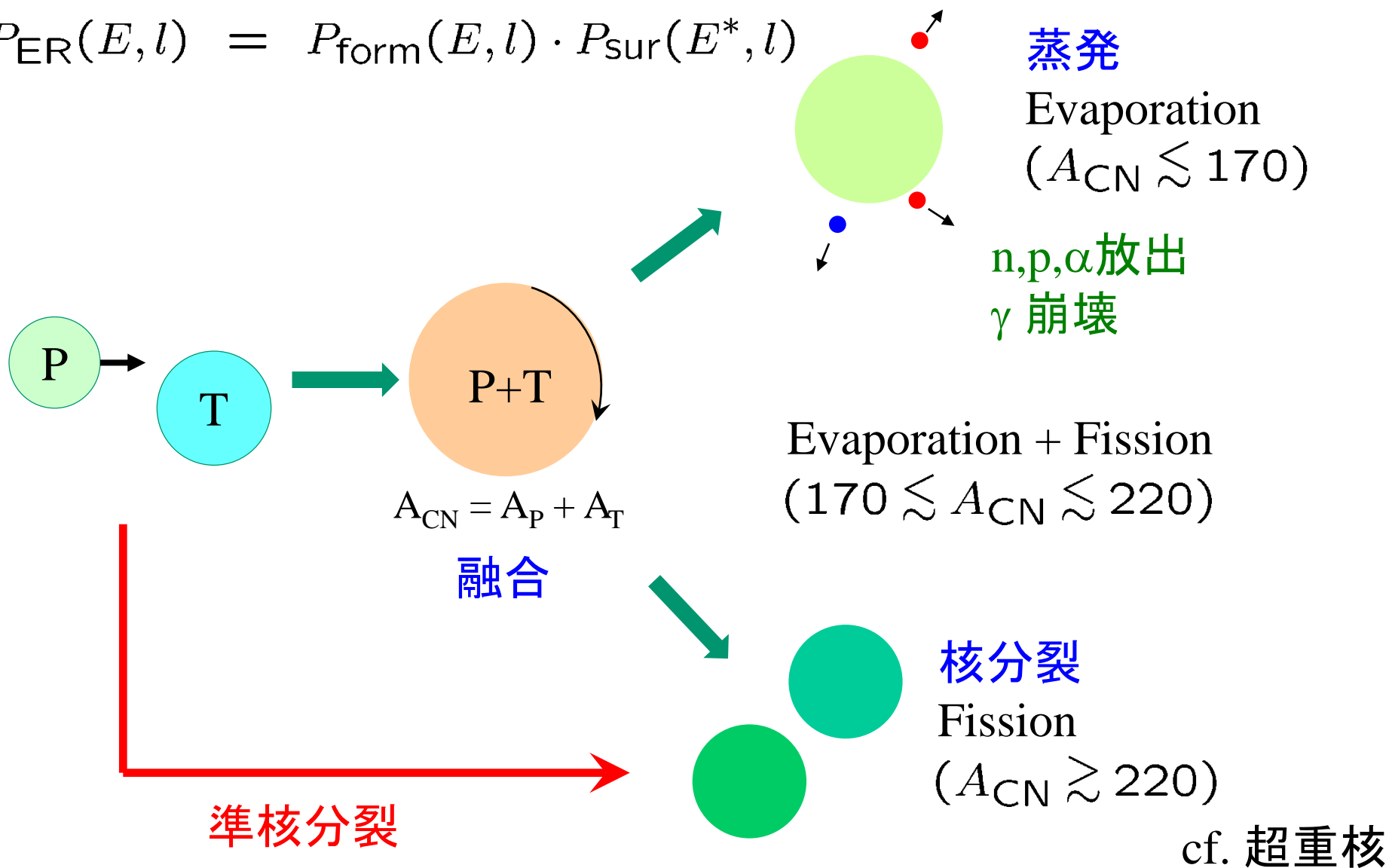
$$P_{\text{fus}}(E, l) = P_{\text{form}}(E, l)$$



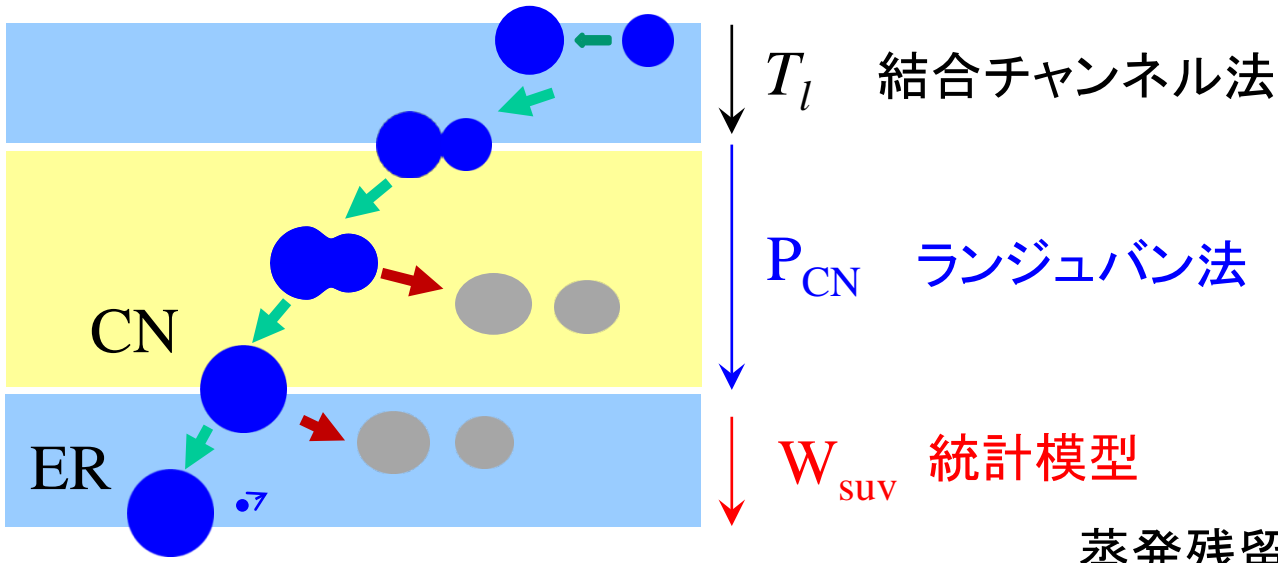
今後の展望: 超重元素合成反応

$$P_{\text{fus}}(E, l) = P_{\text{form}}(E, l)$$

$$P_{\text{ER}}(E, l) = P_{\text{form}}(E, l) \cdot P_{\text{sur}}(E^*, l)$$



今後の展望：超重元素合成反応

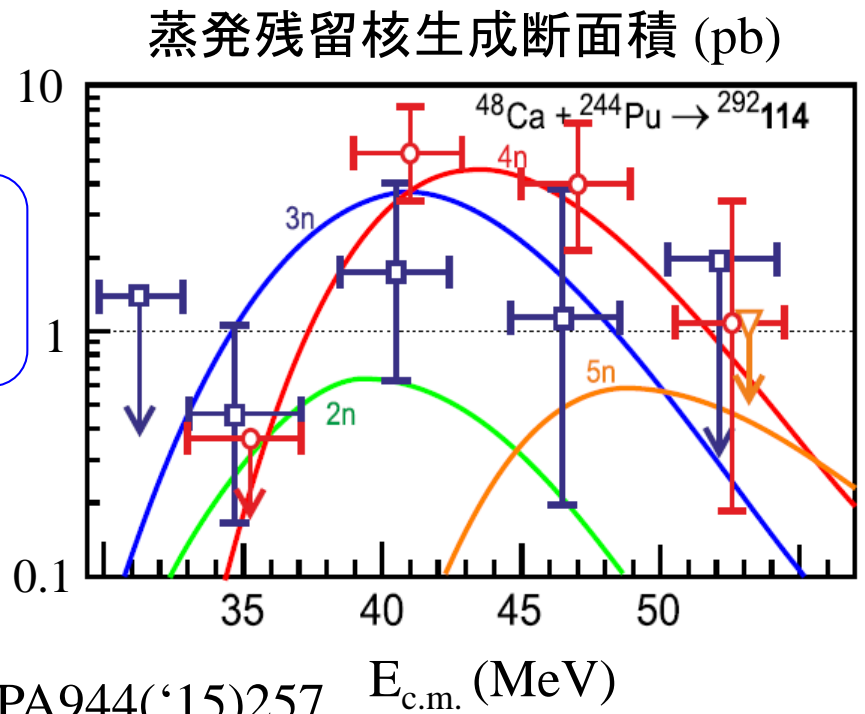


113 Nh nihonium	115 Mc moscovium
117 Ts tennessine	118 Og oganesson

CN=複合核、ER=蒸発残留核

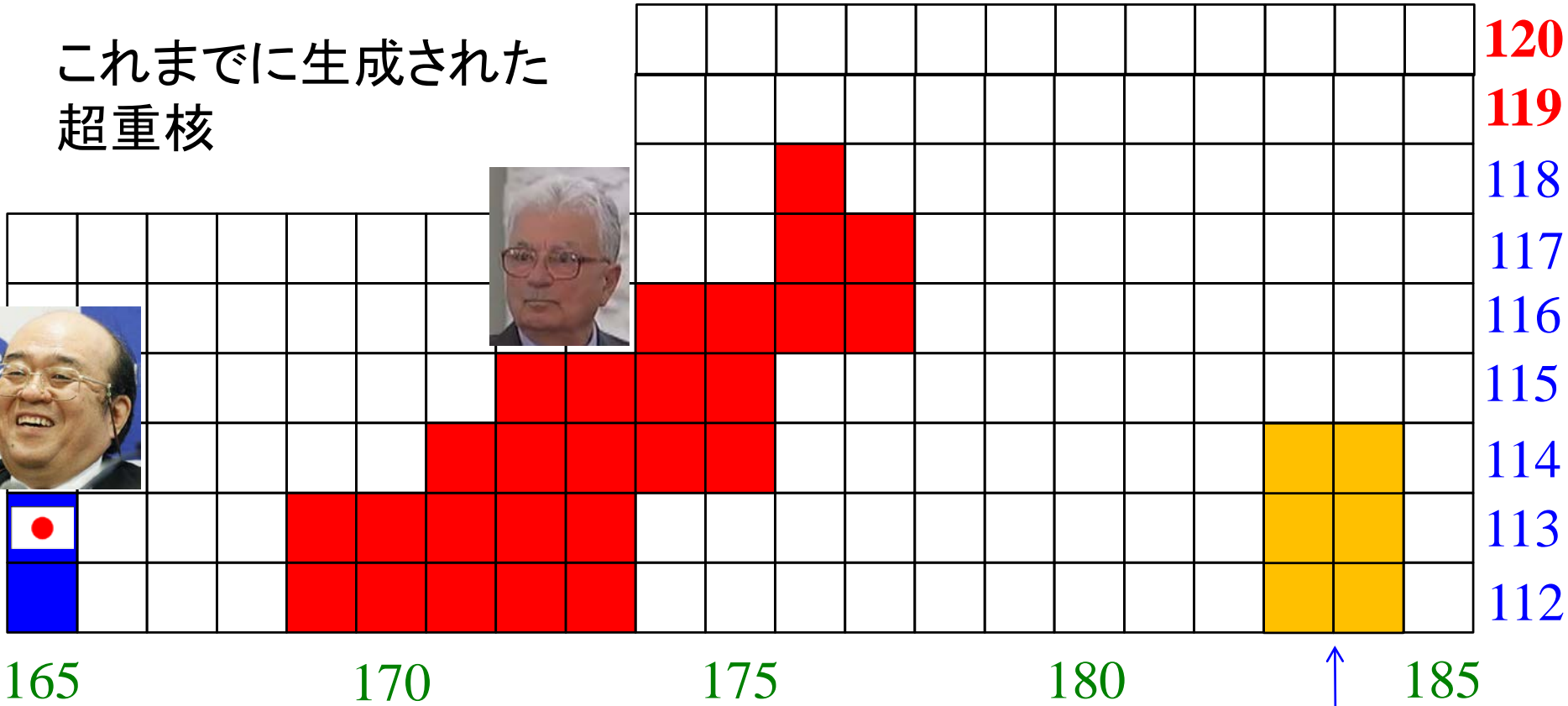
$$\sigma_{ER}(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1) T_l(E) \times P_{CN}(E, l) W_{suv}(E^*, l)$$

cf. P_{CN} に対する実験データなし
→ 大きな不定性



今後の研究の方向性

これまでに生成された
超重核



➤ Z=119 及び 120 核に向けて

安定の島?

^{48}Ca 入射核 \rightarrow $^{50}_{22}\text{Ti}$, $^{51}_{23}\text{V}$, $^{54}_{24}\text{Cr}$ 入射核を用いた熱い核融合反応

➤ 安定の島に向けて

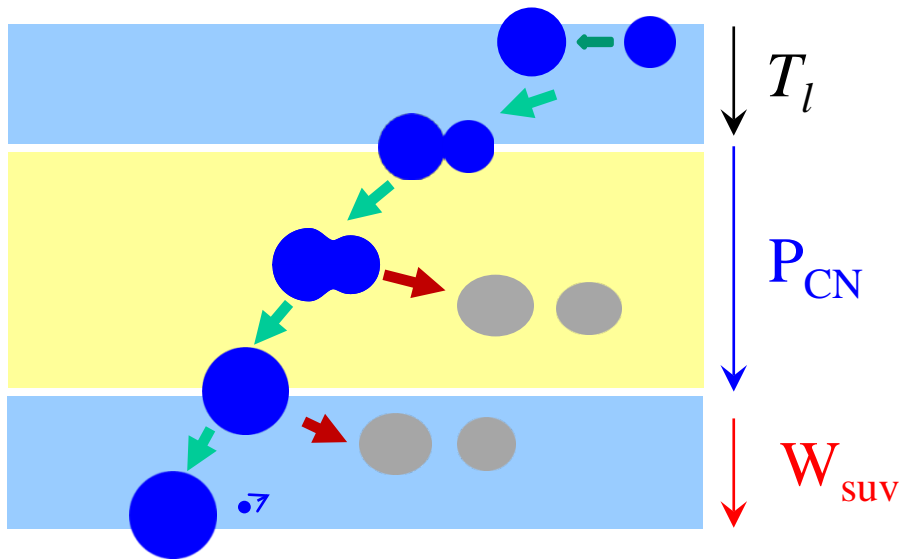
中性子過剰核ビームを用いた実験が必要不可欠

今後の研究の方向性－1

➤ Z=119 及び 120 核に向けて

^{48}Ca 入射核 → $^{50}_{22}\text{Ti}$, $^{51}_{23}\text{V}$, $^{54}_{24}\text{Cr}$ 入射核 + 変形標的核を用いた
熱い核融合反応

超重元素合成反応に対する変形の効果の正しい理解が必要



- ✓ 第一ステップ
 σ_{cap} からどのように T_l を引き出すか
- ✓ 第二ステップ
 P_{CN} に対する変形効果?

σ_{cap} の測定より容易な準弾性散乱の解析から T_l を引き出す

複数の障壁による準弾性散乱
データのフィッティング

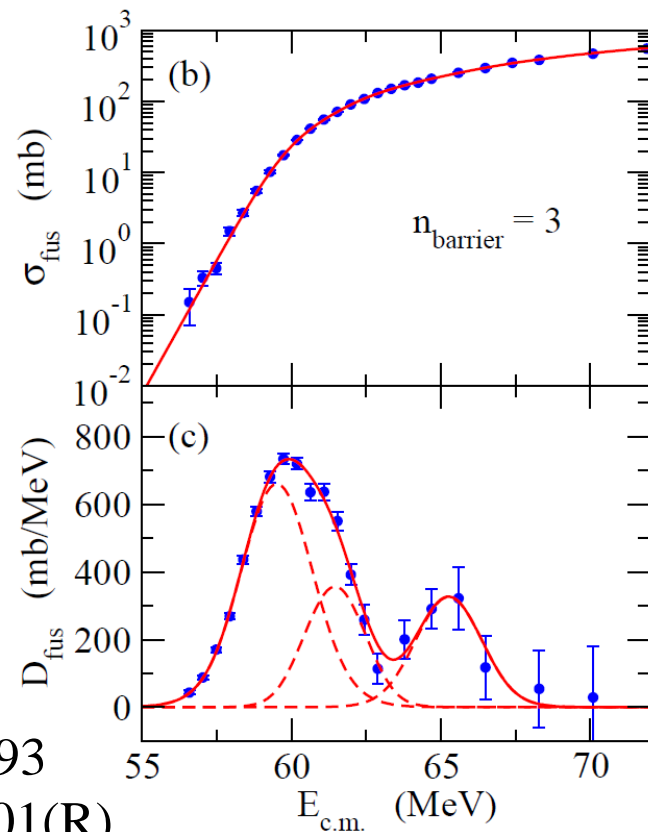
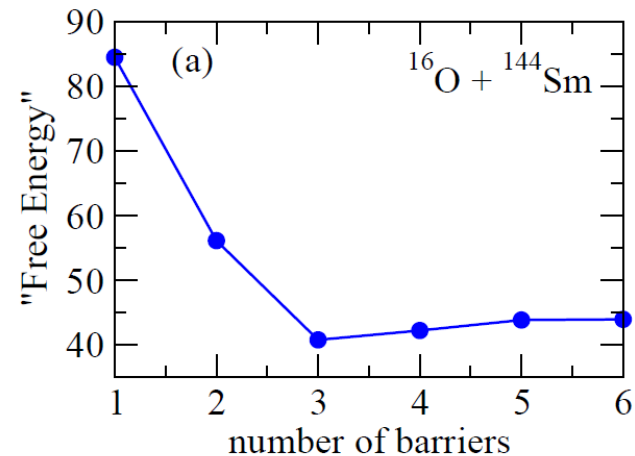
$$\sigma = \sum_{k=1}^N w_k \sigma(E; V_k(r))$$

✓ ベイズ統計を使うと障壁の
数を決めることができる



準弾性散乱断面積から部分波 l の
透過確率 T_l にマッピング可能

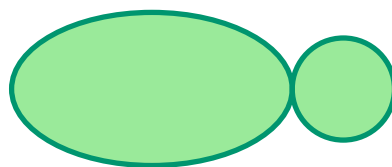
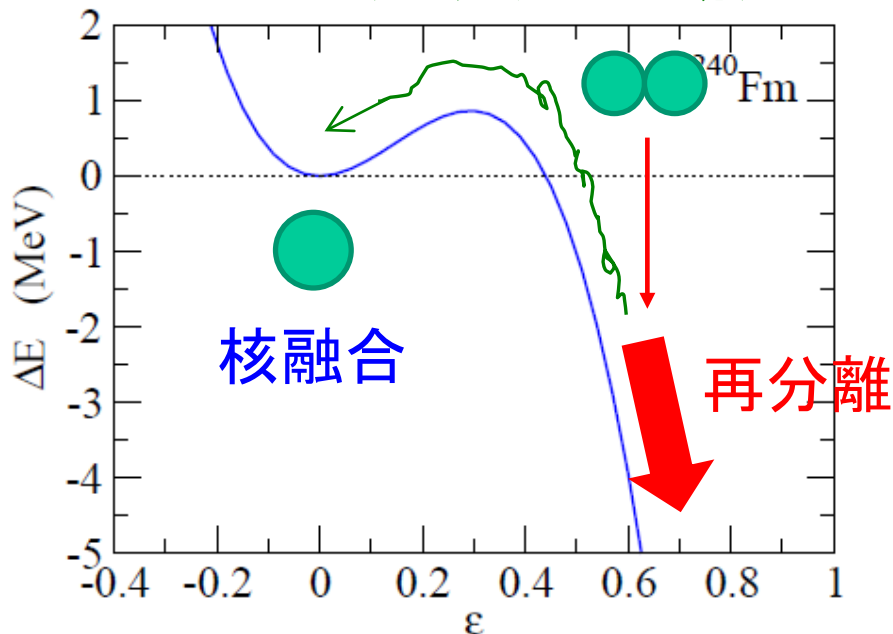
$$T_l = \sum_{k=1}^N w_k T_l(E; V_k(r))$$



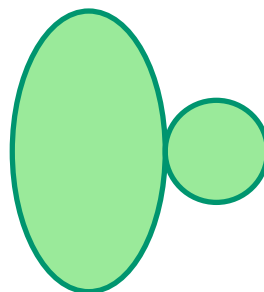
変形核の核融合反応

熱的拡散

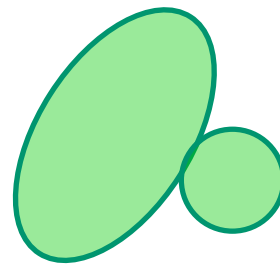
→ ランジュバン法
(ブラウン運動)



接触点が遠い
→ 準核分裂



接触点が近い
→ 複合核生成
に有利



➤ どのように複合核になっていくのか?
(途中の形状はどうなっているのか?)

➤ 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：結合チャンネル法とランジュバン法の接続

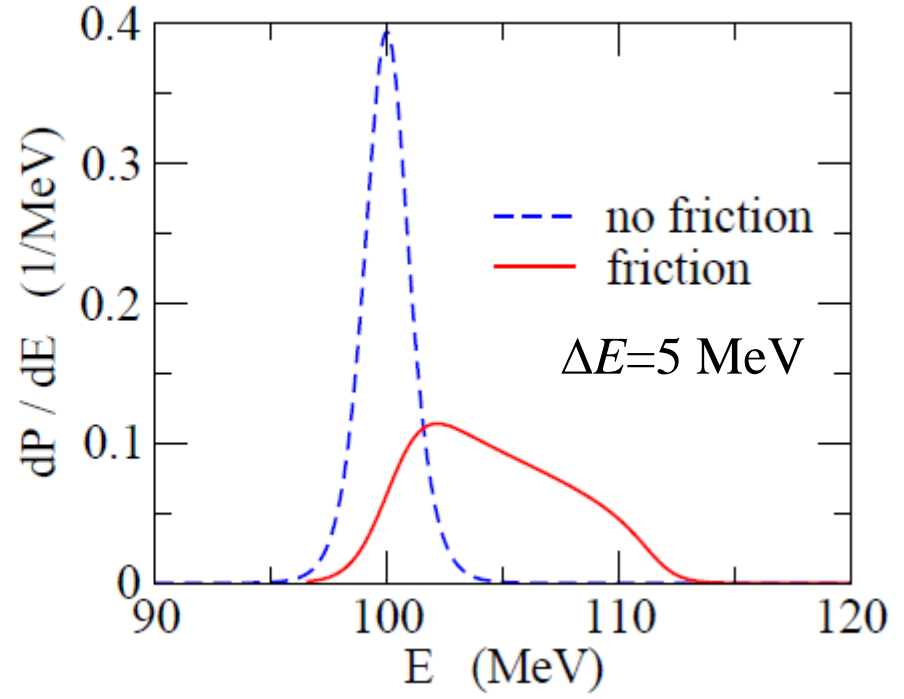
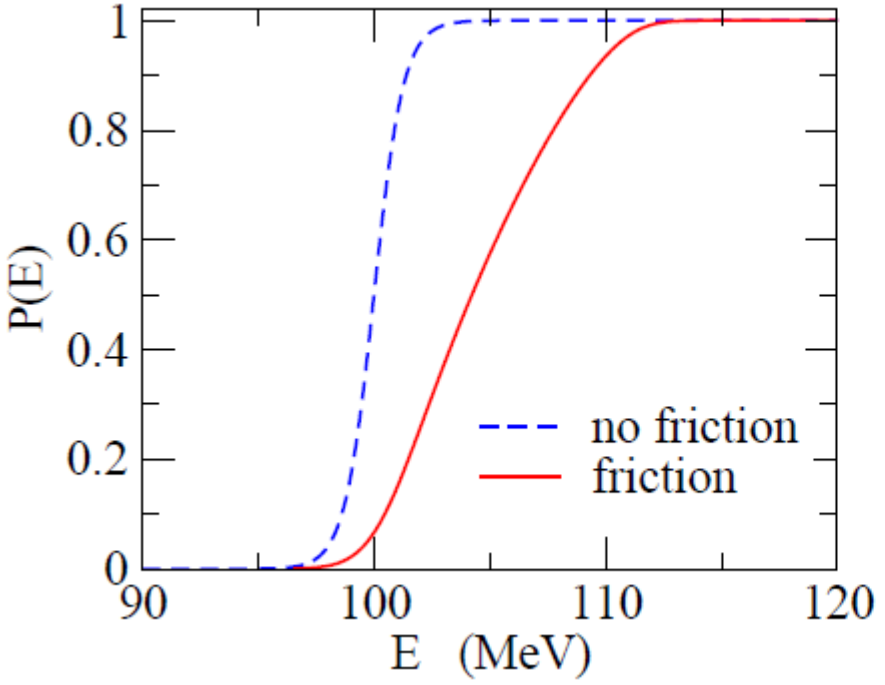
Kanai(金井)モデル： E. Kanai, PTP 3 (1948) 440

$$H = \frac{p^2}{2m} + V(x) \rightarrow \frac{1}{2m} e^{-\alpha t} \pi^2 + e^{\alpha t} V(x) \quad (\pi = e^{\alpha t} p)$$



$$i\hbar\dot{\pi} = [\pi, H] \rightarrow \dot{p} = -V'(x) - \alpha p$$

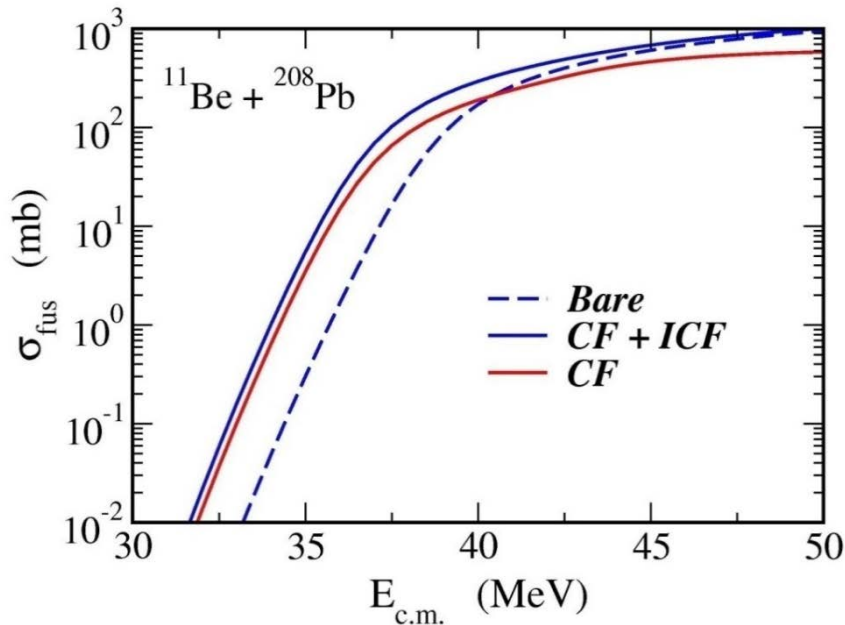
time-dep. wave packet method



今後の研究の方向性-2

➤ 安定の島に向けて

中性子過剰核ビームを用いた
実験が必要不可欠



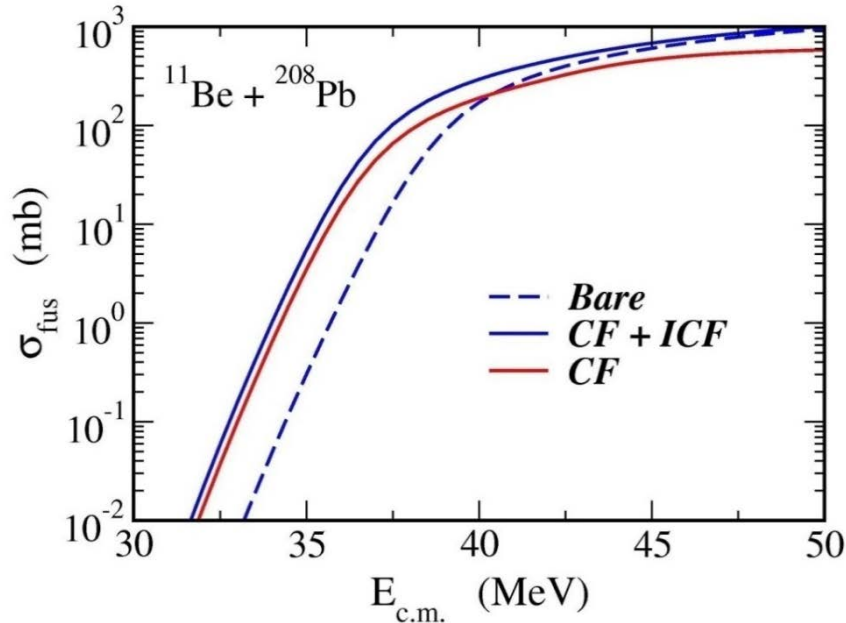
K. Hagino, A. Vitturi, C.H. Dasso,
and S.M. Lenzi, Phys. Rev. C61 ('00) 037602

反応機構の理解(分解、核子移行、融合)

今後の研究の方向性-2

➤ 安定の島に向けて

中性子過剰核ビームを用いた
実験が必要不可欠

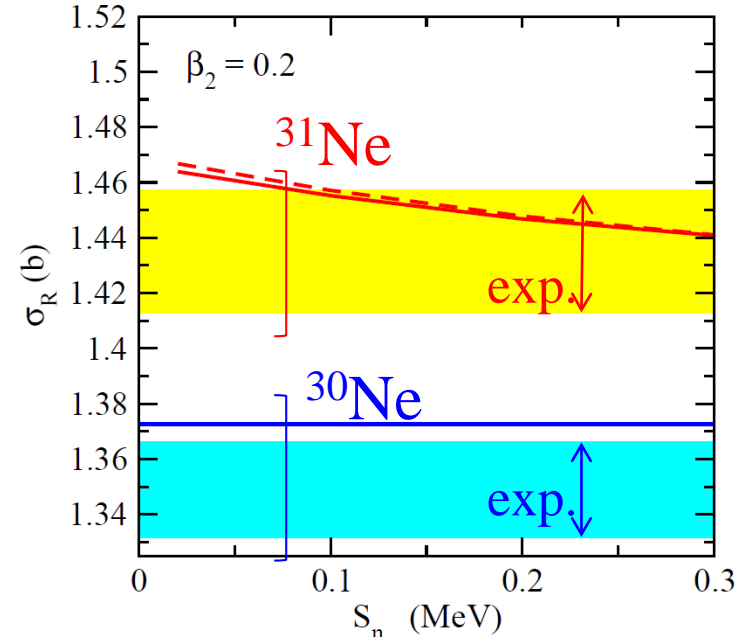


K. Hagino, A. Vitturi, C.H. Dasso,
and S.M. Lenzi, Phys. Rev. C61 ('00) 037602

反応機構の理解(分解、核子移行、融合)

中性子過剰核を軸にした超重核の物理の探究の可能性

中性子過剰核の構造の理解 も重要



Y. Urata, K. Hagino, and H. Sagawa,
PRC86('12) 044613

まとめ

クーロン障壁近傍における重イオン核融合反応

- ✓ 核反応と核構造の強いつながり
- ✓ 種々の内部自由度を持つ系の量子トンネル現象
- ✓ 結合チャンネル法の発展: 半微視的結合チャンネル法

残された課題

- ✓ ハロー核の核融合反応(分解と核子移行過程の影響)
- ✓ 低エネルギー核融合反応の微視的理解?
 - 多核子移行反応
- ✓ 多粒子系のトンネル現象をどのように理解する?

今後の展望: 超重元素合成反応

- ✓ より重い超重元素 ($Z=119, 120$) に向けて
- ✓ 安定の島に向けて

中性子過剰核を軸にした超重核の物理の探究

FUSION20

November 16-20, 2020

Shizuoka, Japan

Kouichi Hagino (co-chair) Tohoku University

Katsuhisa Nishio (co-chair) JAEA

