

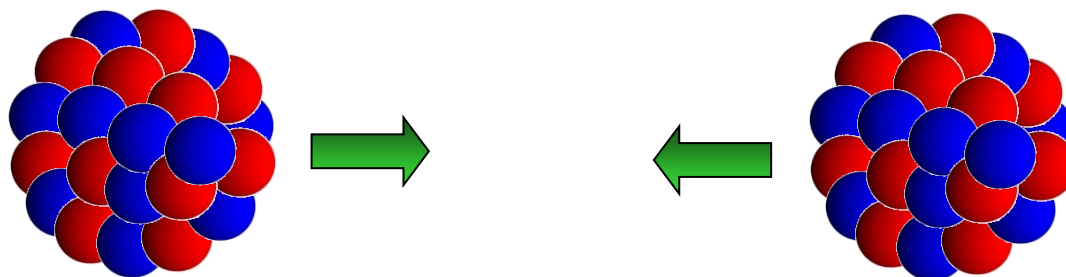
# 低エネルギー重イオン反応 と超重元素の物理

萩野浩一

東北大学大学院理学研究科



TOHOKU  
UNIVERSITY



1. 原子核反応の物理:概観
2. 重イオン核融合反応
3. 超重元素合成反応
4. まとめ

# はじめに: 低エネルギー原子核物理学のめざすもの

## □ 核子多体系としての原子核の振る舞い

← 核子間相互作用から理解する

### ➤ 静的な振る舞い: 原子核構造論

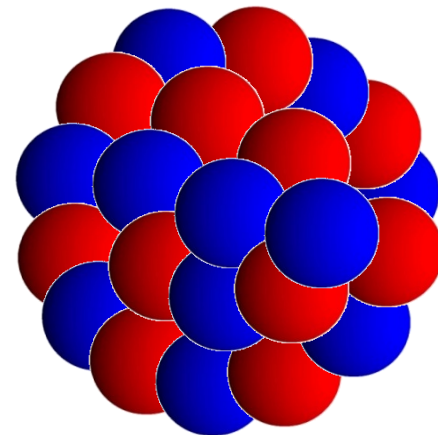
- ✓ 基底状態の性質  
(質量、大きさ、形など)
- ✓ 励起状態の性質

### ➤ ダイナミクス: 原子核反応論

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



# はじめに: 低エネルギー原子核物理学のめざすもの

## □ 核子多体系としての原子核の振る舞い

← 核子間相互作用から理解する

### ➤ 静的な振る舞い: 原子核構造論

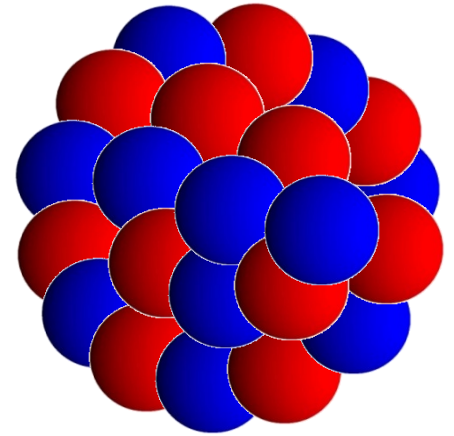
- ✓ 基底状態の性質  
(質量、大きさ、形など)
- ✓ 励起状態の性質

### ➤ ダイナミクス: 原子核反応論

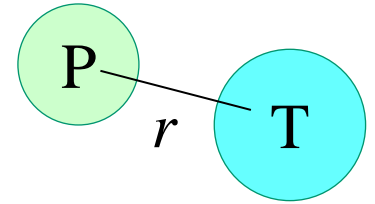
#### 原子核は複合粒子

- ✓ 豊富な反応様式
- ✓ 核構造と核反応  
の織り成す様々な  
インタープレイ

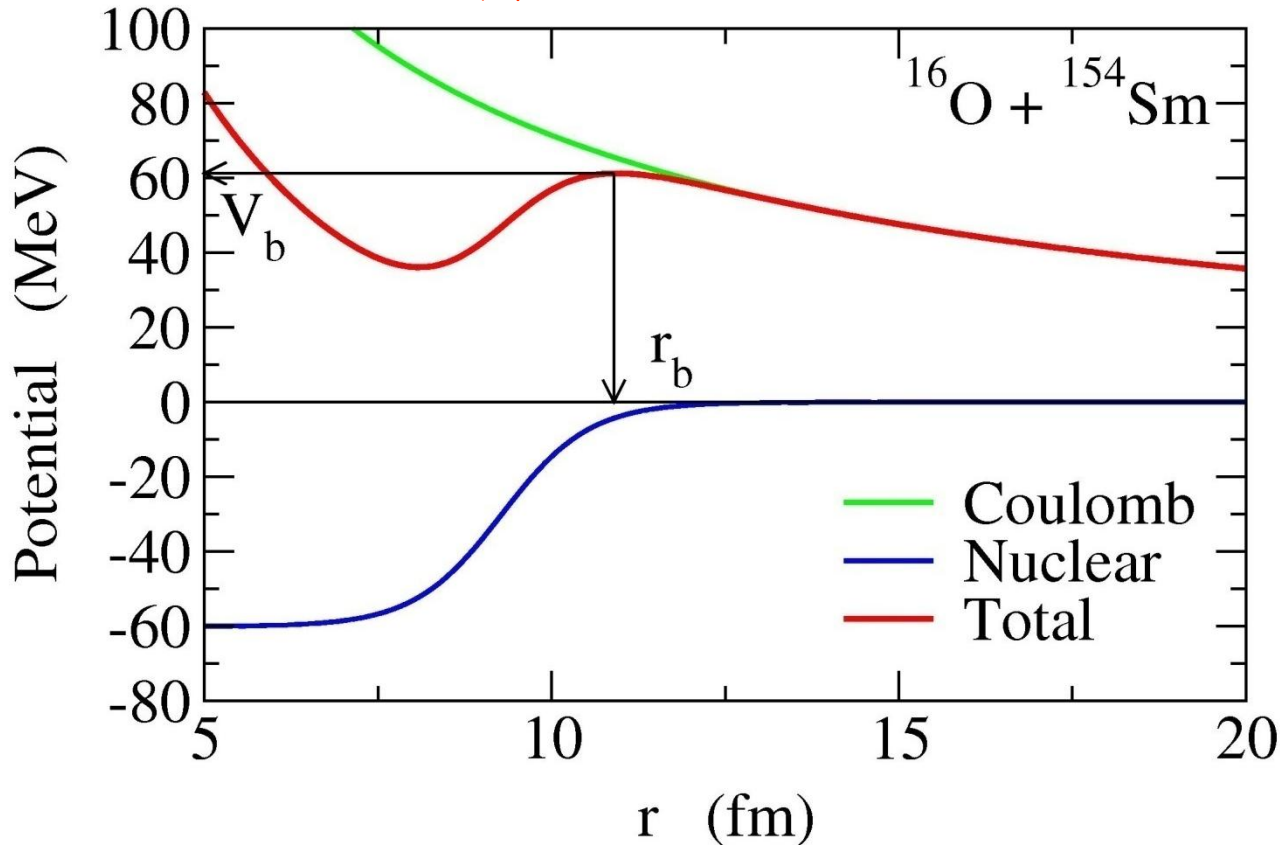
- 弾性散乱
- 非弾性散乱
- 核子移行反応
- 核融合反応



# クーロン障壁

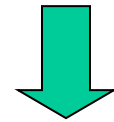


## クーロン障壁



2つの力:

1. クーロン力  
長距離斥力
2. 核力  
短距離引力



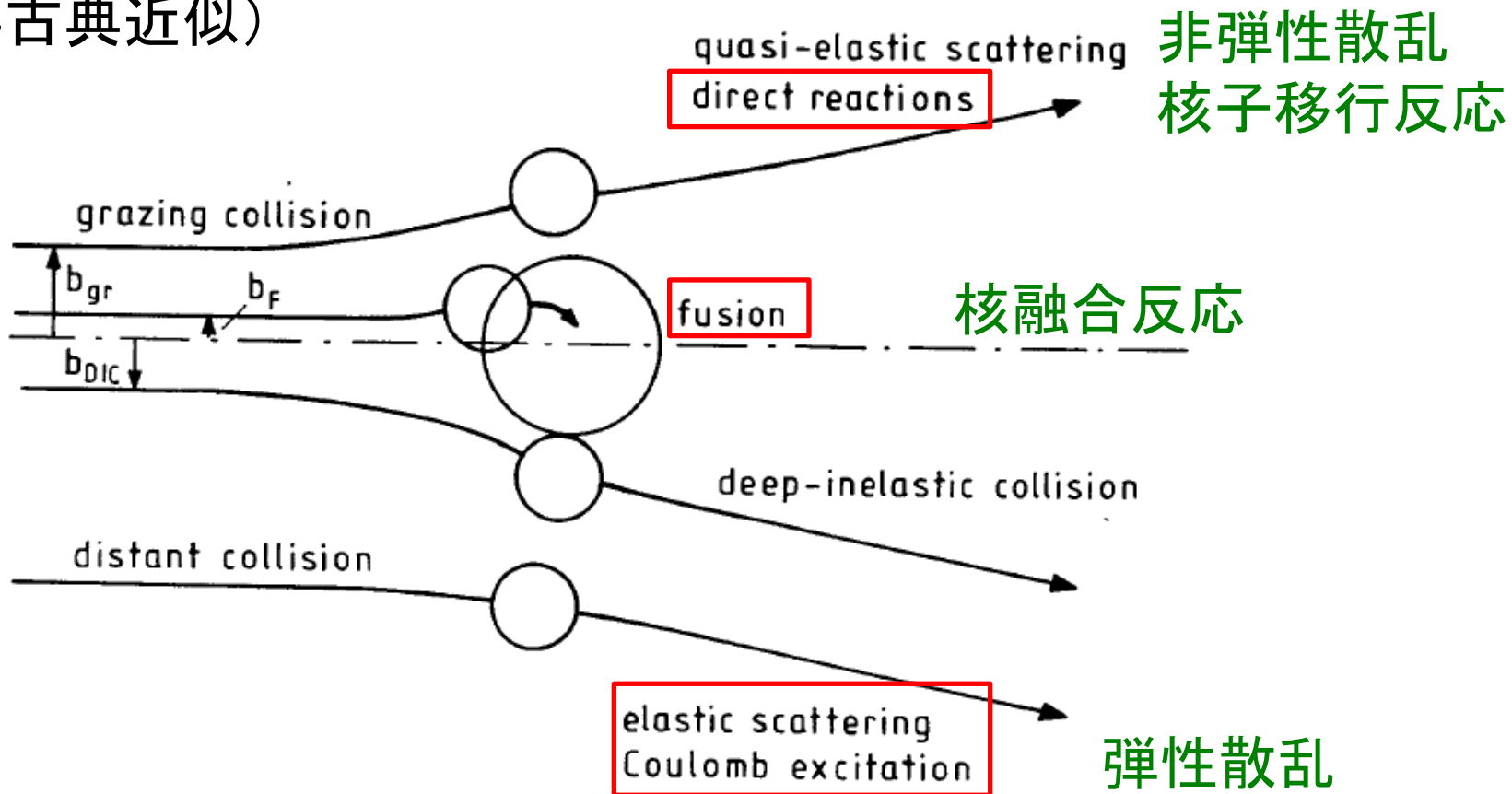
ポテンシャル障壁  
(クーロン障壁)

クーロン障壁の高さ→系のエネルギー・スケールを規定

# 低エネルギー重イオン反応：概観

クーロン障壁以上のエネルギーにおける重イオン反応

衝突係数により反応を分類  
(半古典近似)



“Theory of Nuclear Reactions” Frobrich and Lipperheide

## CDCC法の発展(弱束縛核の分解反応)

緒方、蓑茂、松本、渡辺、八尋など

## 微視的結合チャンネル法

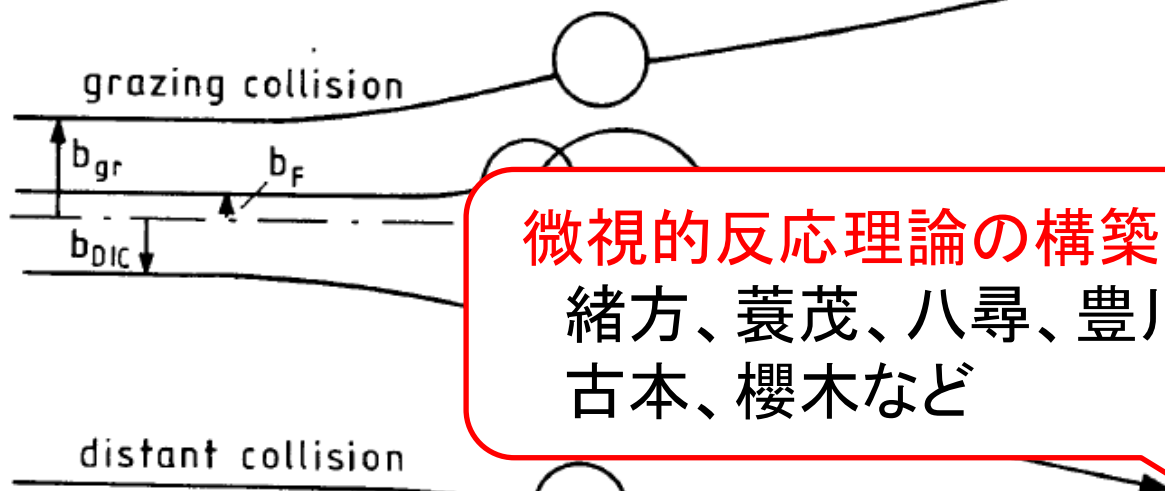
伊藤(誠)など

## TDHF法による多核子移行反応

関澤、矢花

直接反応

非弾性散乱  
核子移行反応



## 微視的反応理論の構築

緒方、蓑茂、八尋、豊川など  
古本、櫻木など

## 中間エネルギーにおける反応断面積

堀内、鈴木など(グラウバー模型)

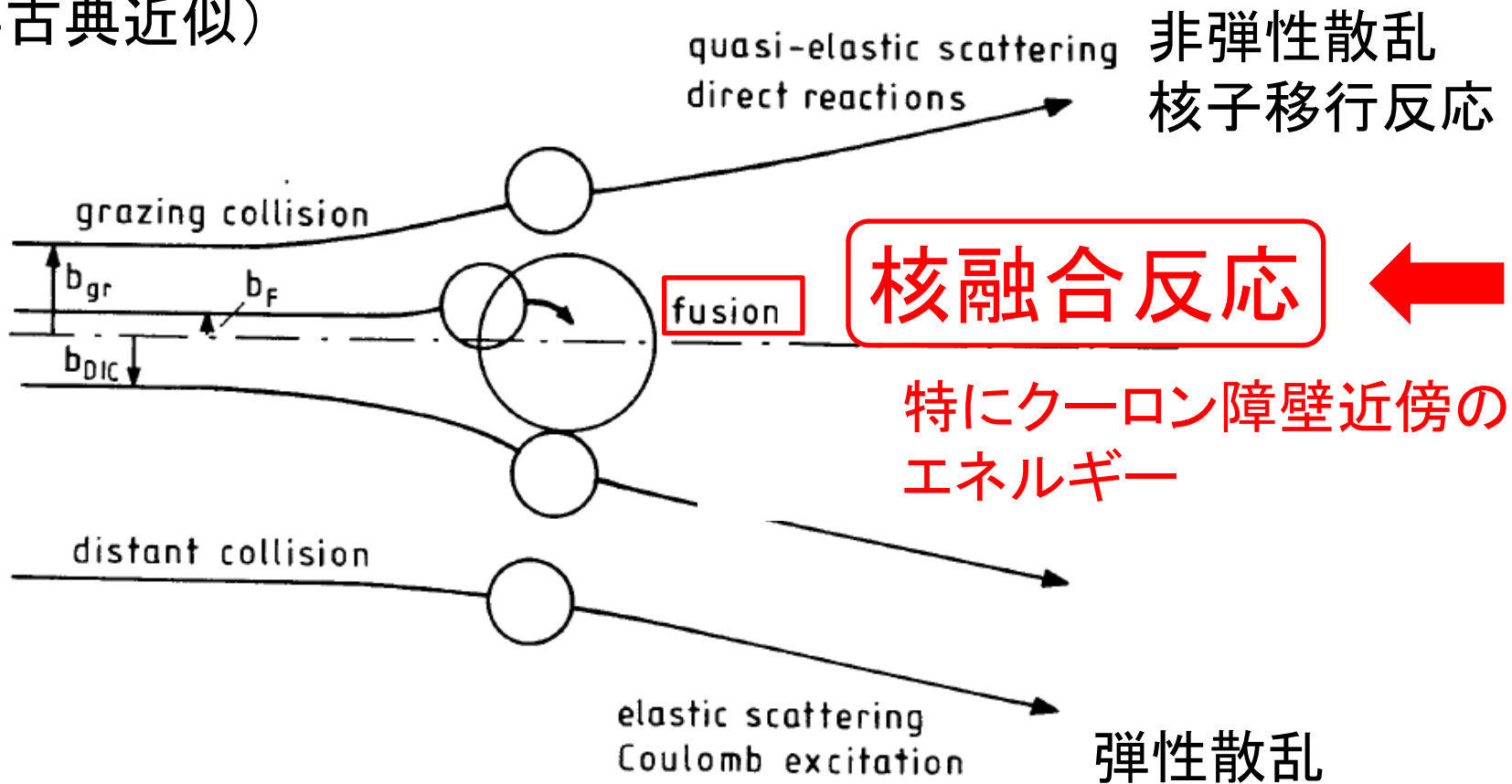
小濱、飯田、親松(黒玉模型)

弾性散乱

# 低エネルギー重イオン反応：概観

クーロン障壁以上のエネルギーにおける重イオン反応

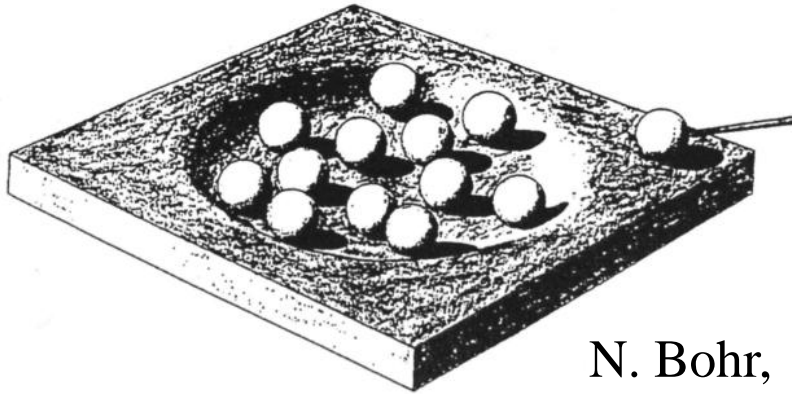
衝突係数により反応を分類  
(半古典近似)



# 核融合反応： 複合核生成反応

Niels Bohr (1936)

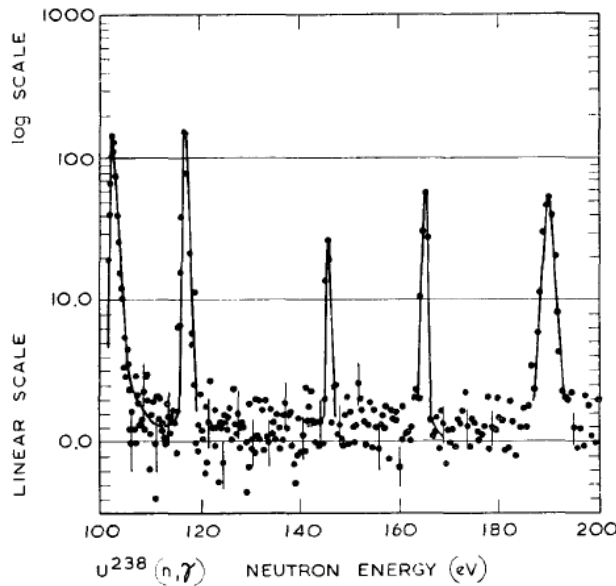
原子核による中性子の吸収 → 複合核



N. Bohr,  
Nature 137 ('36) 351



Wikipedia



cf. フェルミの実験 (1935)  
MeV スケールの原子核に eV スケールの幅の多数の共鳴状態

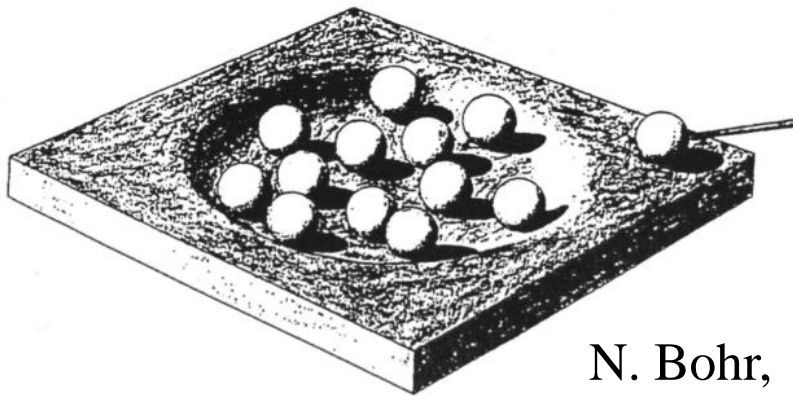
M. Asghar et al., Nucl. Phys. 85 ('66) 305



# 核融合反応： 複合核生成反応

Niels Bohr (1936)

原子核による中性子の吸収 → 複合核

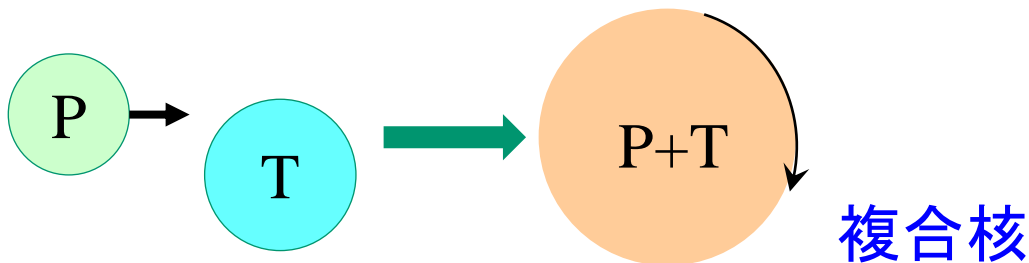


N. Bohr,  
Nature 137 ('36) 351

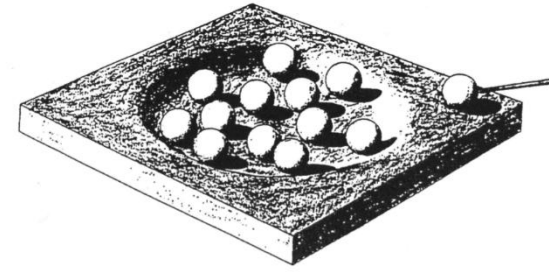
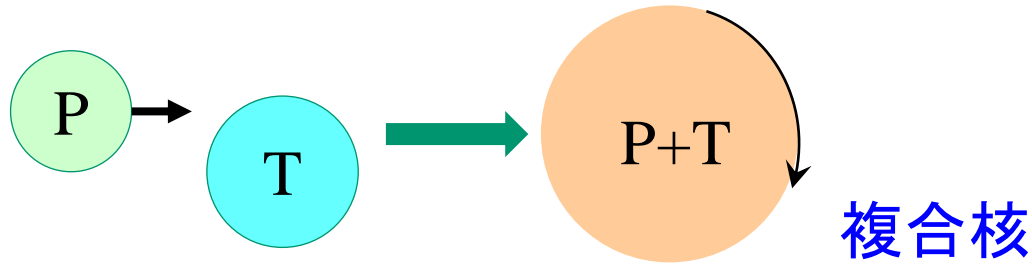


Wikipedia

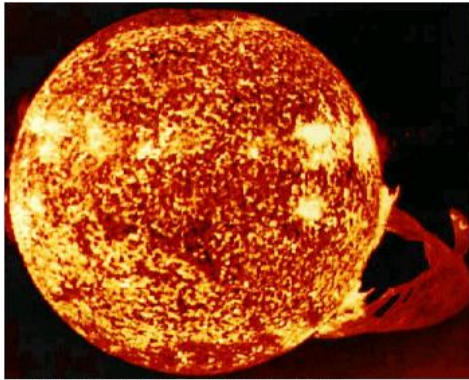
重イオン反応で複合核をつくる = 重イオン核融合反応



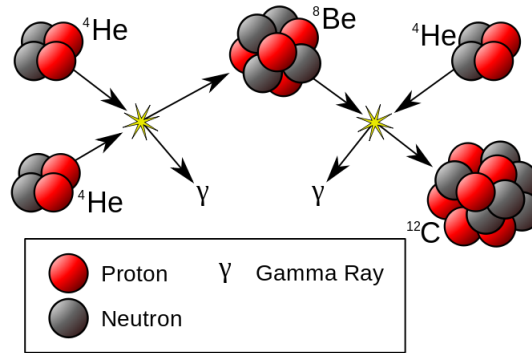
# 核融合反応： 複合核生成反応



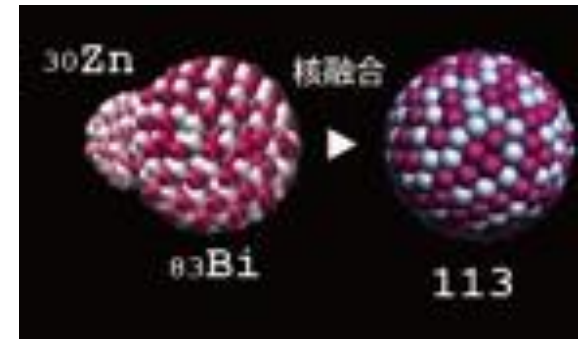
cf. N. Bohr '36



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: 核物理における究極の未解決問題の一つ

# 重イオン核融合反応と量子トンネル現象

## ✓ 反応ダイナミクス

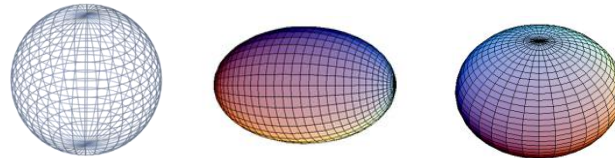
核反応と核構造の強い結合(結合チャンネル効果)

cf. 高エネルギー反応: 反応機構はより単純

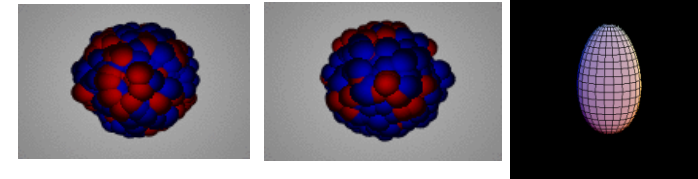
## ✓ 多粒子系の量子トンネル現象

cf. ・多様な内部自由度

- 原子核の様々な形



- 様々なタイプの表面振動励起



様々なモード、様々な速さ

# 重イオン核融合反応と量子トンネル現象

## ✓ 反応ダイナミクス

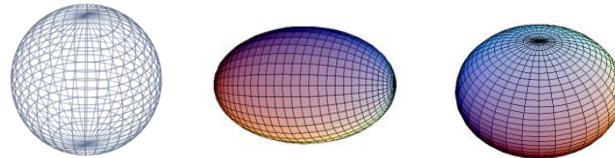
核反応と核構造の強い結合(結合チャンネル効果)

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



- 様々なタイプの表面振動励起

- 様々なタイプの核子移行(吸熱的、発熱的)

「環境」の自由度を割と自由に変えられる

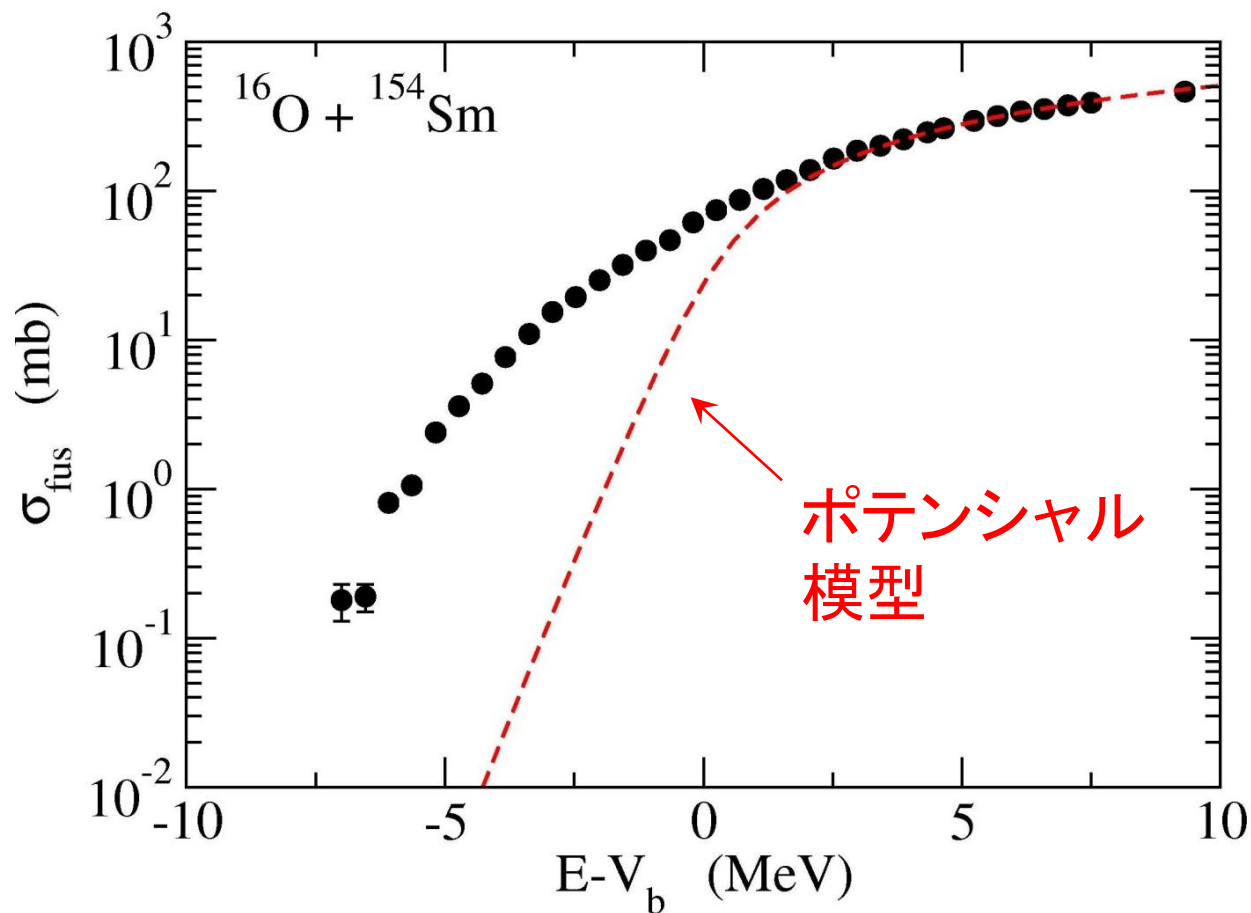
・エネルギーが可変 cf.  $\alpha$ 崩壊: エネルギーが固定されている

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

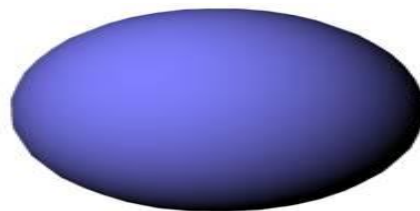
# 核融合反応断面積の大きな増大

ポテンシャル模型: 散乱核は構造を持たない球と仮定

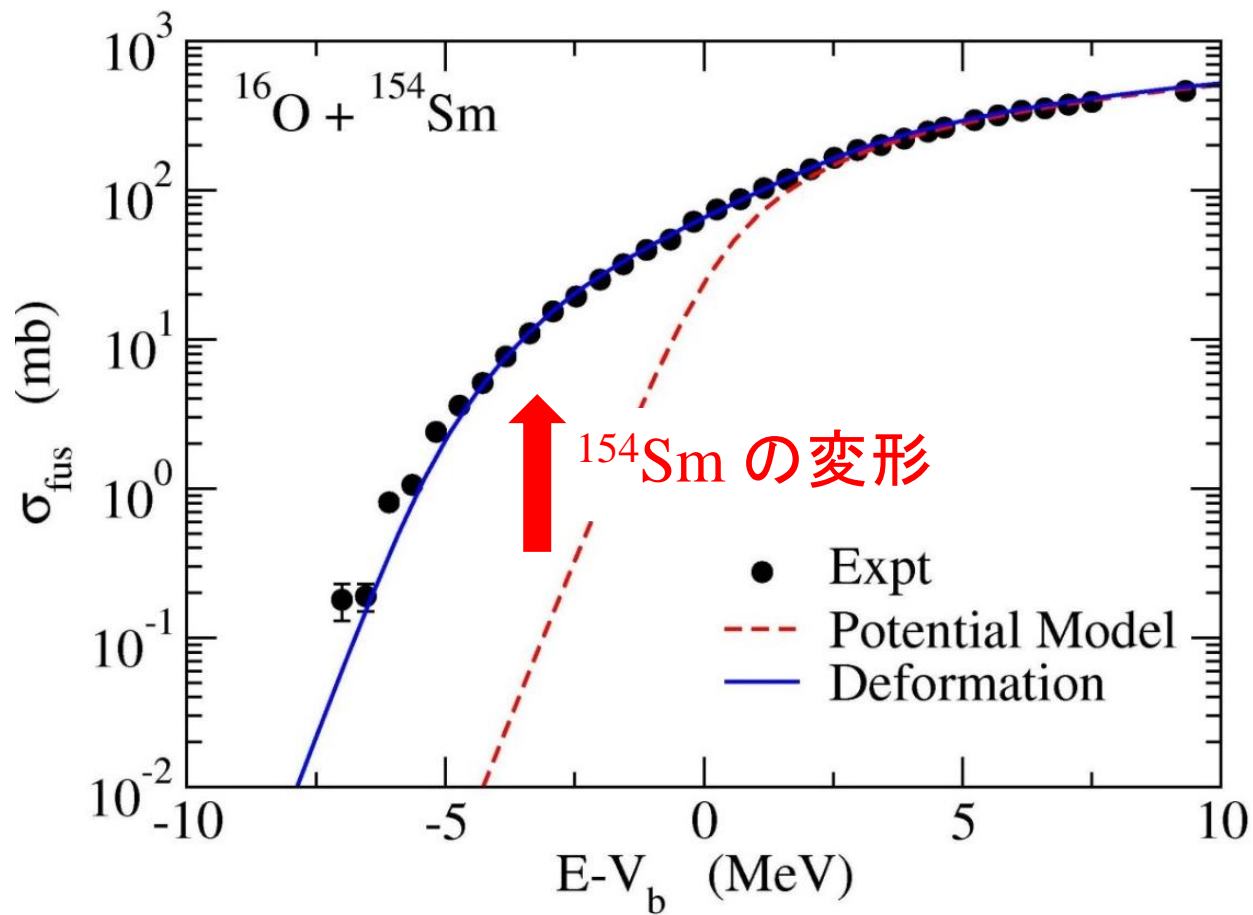
$$\sigma_{\text{fus}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1)(1 - |S_l|^2)$$



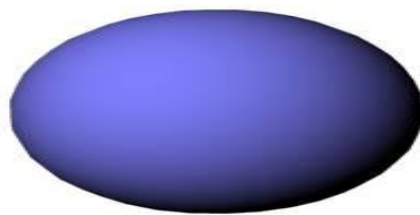
$^{154}\text{Sm}$  : 典型的な変形核



$^{154}\text{Sm}$

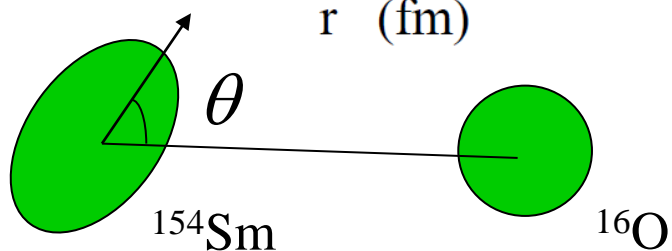
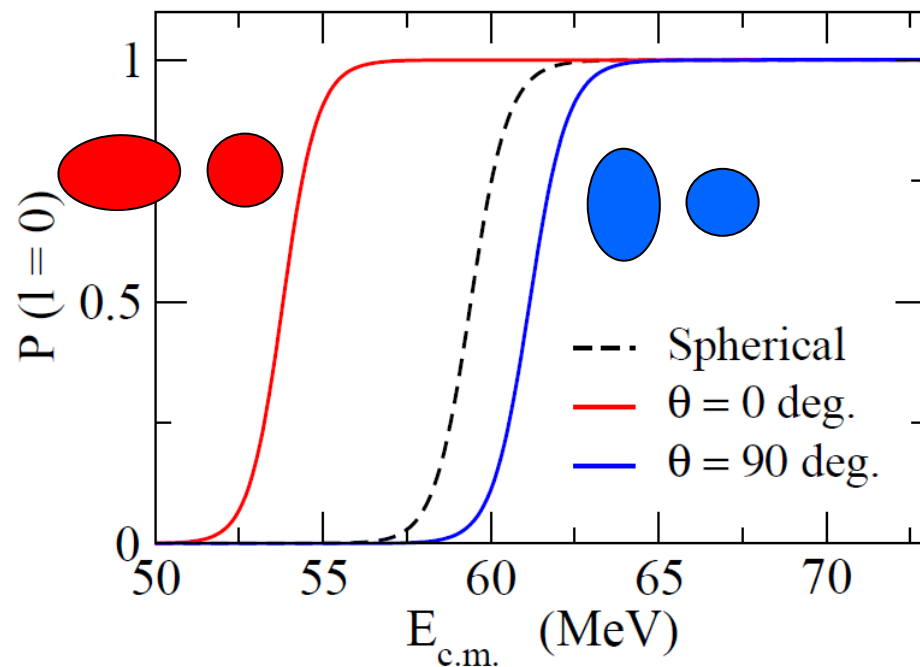
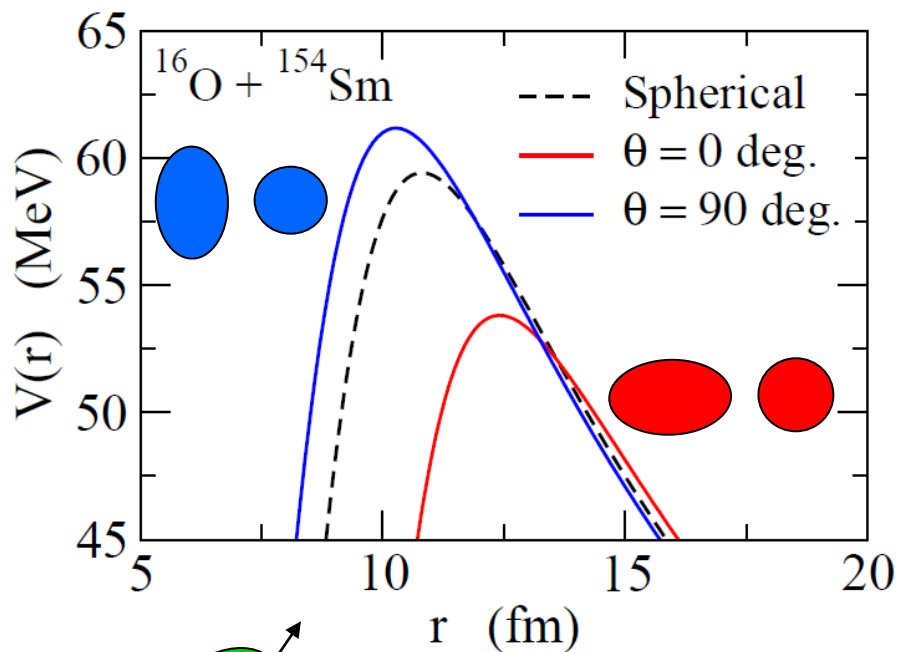


# 原子核の変形の効果



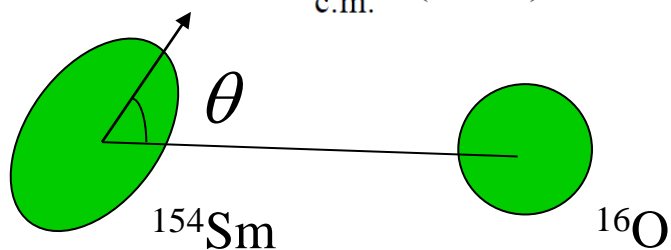
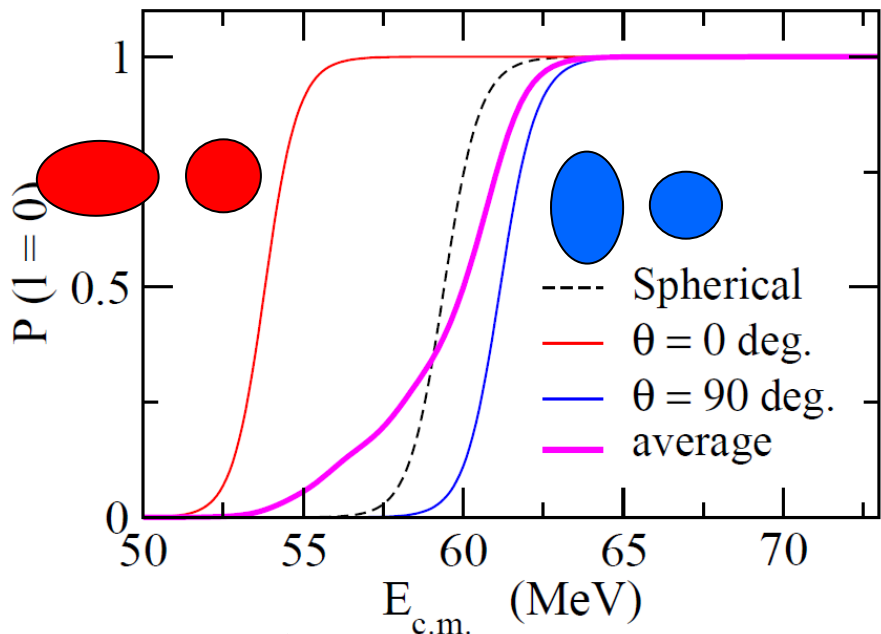
$^{154}\text{Sm}$

$^{154}\text{Sm}$  : 典型的な変形核

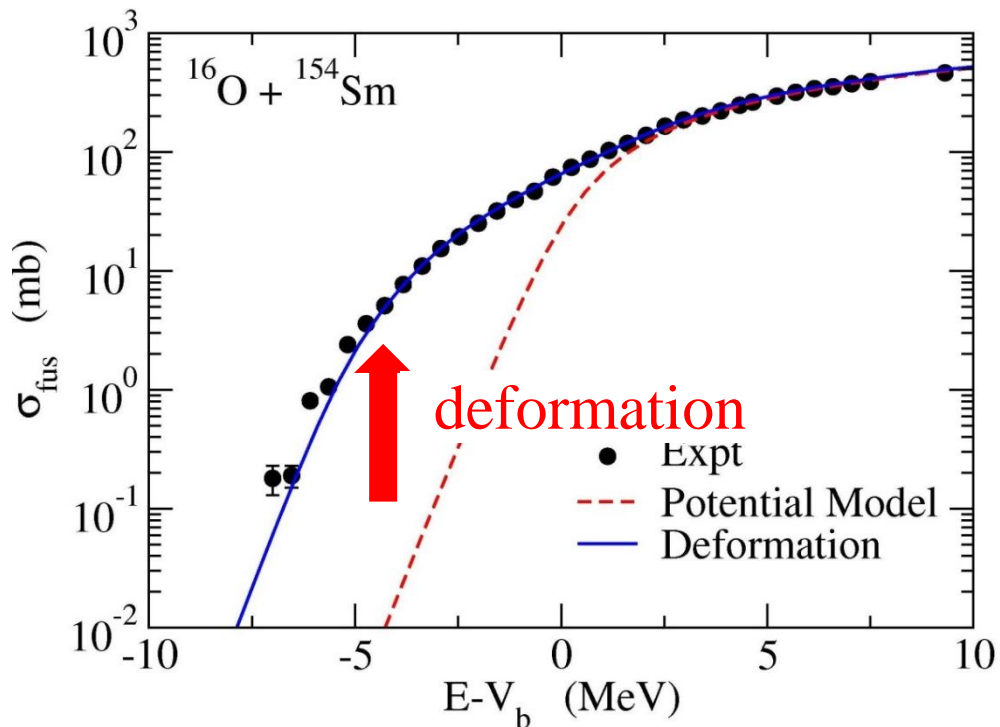


# 原子核の変形の効果

$^{154}\text{Sm}$  : 典型的な変形核



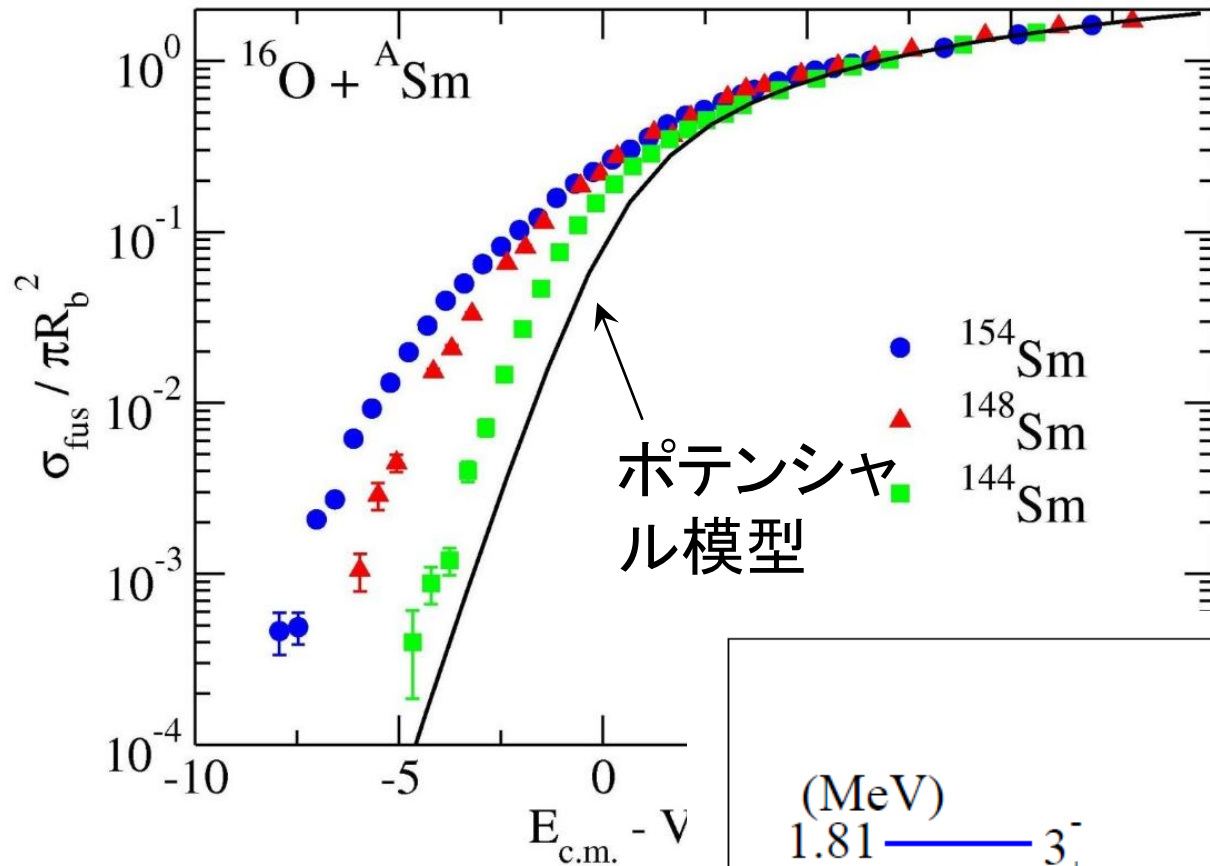
$$\sigma_{\text{fus}}(E) = \int_0^1 d(\cos \theta) \sigma_{\text{fus}}(E; \theta)$$



核融合反応: 核構造と核反応  
の強い結びつき

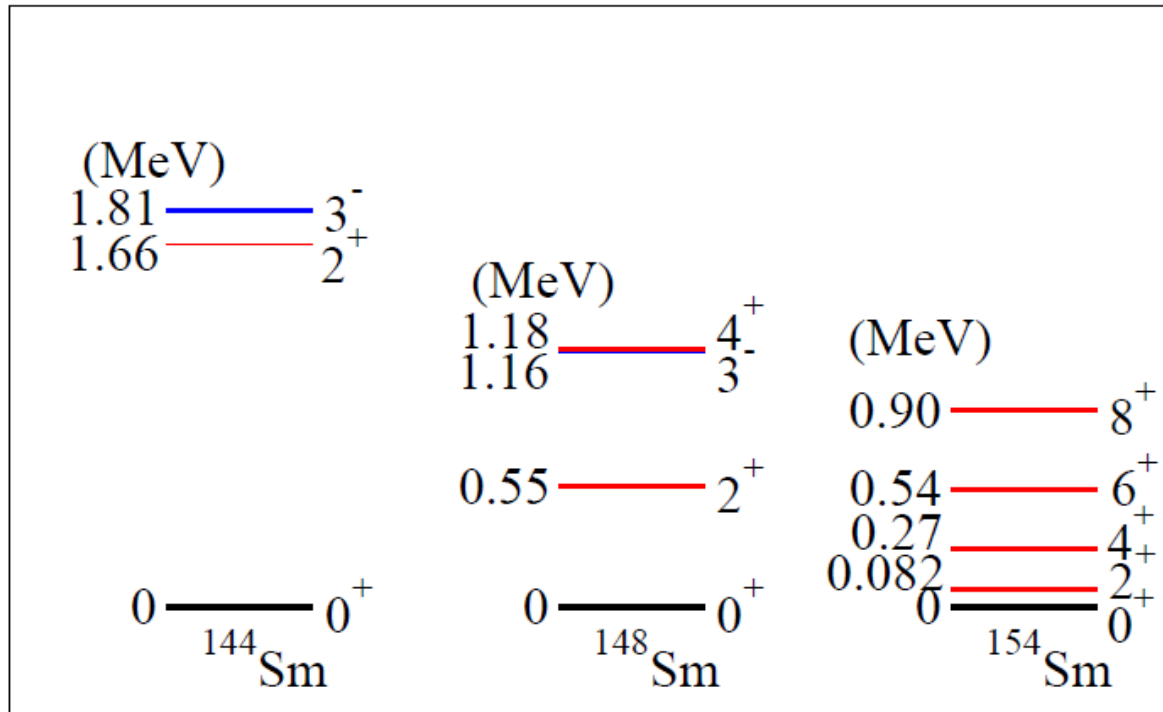
coupling assisted tunneling





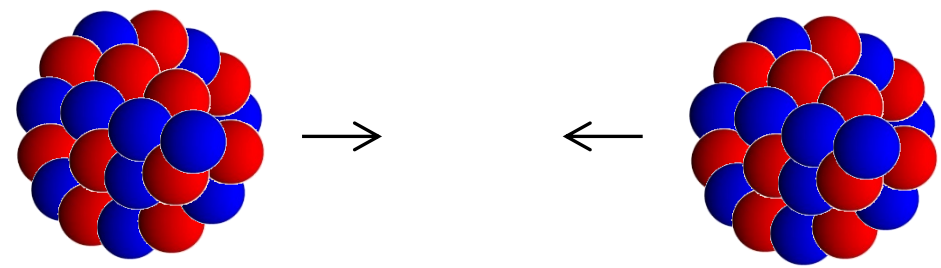
核融合断面積の増幅  
 :他の系でも一般的に

それぞれの原子核  
 のスペクトルと強い相関  
 → coupling assisted  
 tunneling



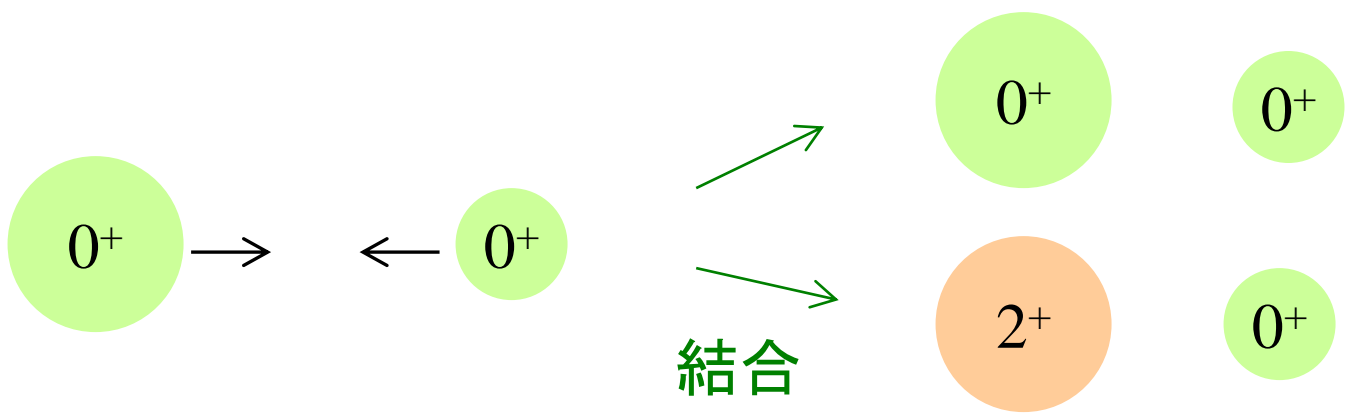
# 結合チャンネル法 : 内部励起を考慮した量子散乱理論

## 多体問題

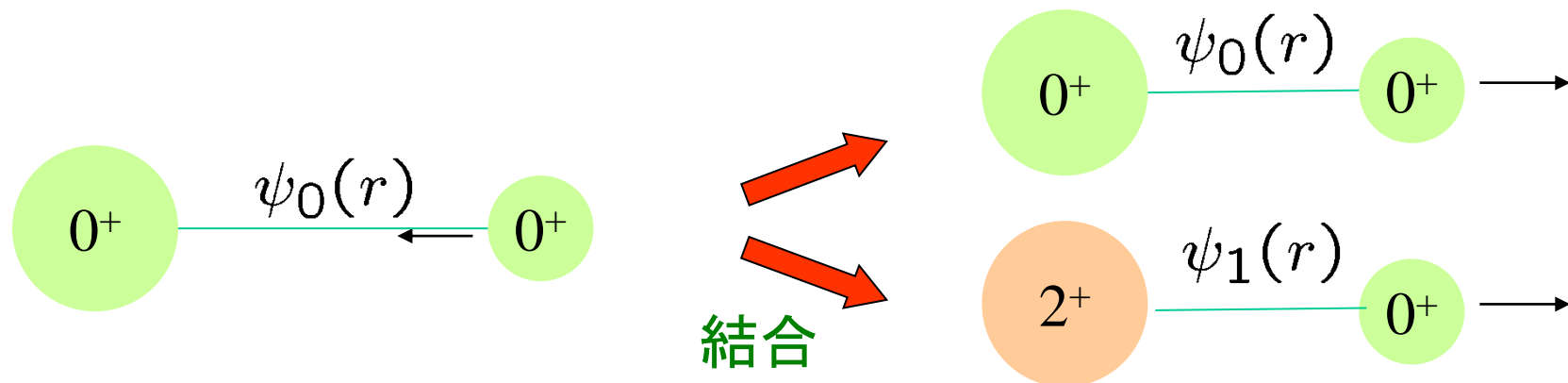


未だに超難問題  
cf. 多粒子トンネルの記述

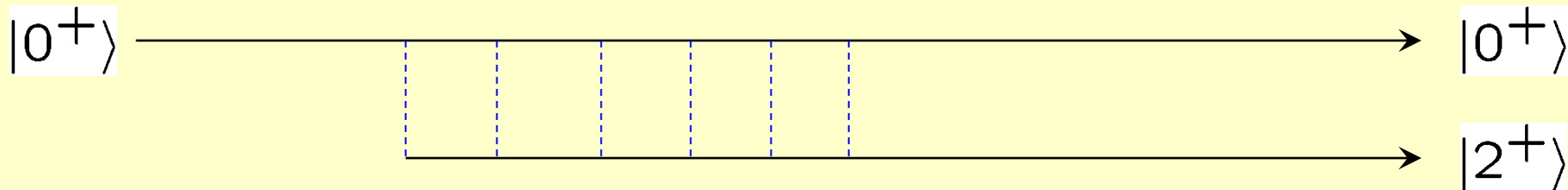
➡ 2体問題 + 原子核の励起 (結合チャンネル・アプローチ)



# 結合チャンネル法 : 内部励起を考慮した量子散乱理論



$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + \overleftarrow{V}(r) - \overleftarrow{E} \right] \overrightarrow{\psi}(r) = 0$$



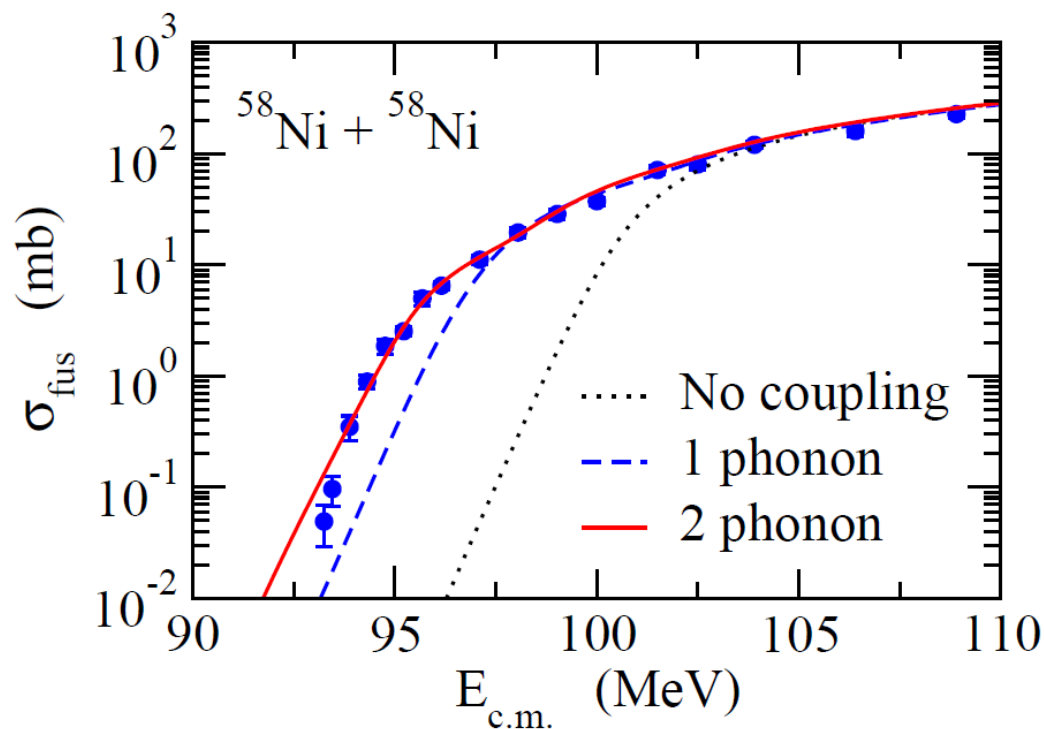
反応途中の励起・脱励起のダイナミクス(特に集団運動との結合)

- ✓ 非摂動的(フルオーダー)
- ✓ 非断熱的(励起エネルギー)

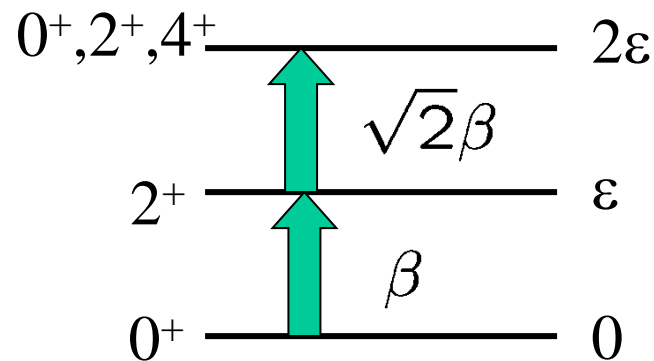
# 結合チャンネル計算のモデル化

- K.H., N. Rowley, A.T. Kruppa, CPC123 ('99) 143
- M. Zamrun, K.H., S. Mitsuoka, H. Ikezoe, PRC77 ('08) 034604
- T. Ichikawa, K.H., A. Iwamoto, PRL103 ('09) 202701

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



単純な調和振動子



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

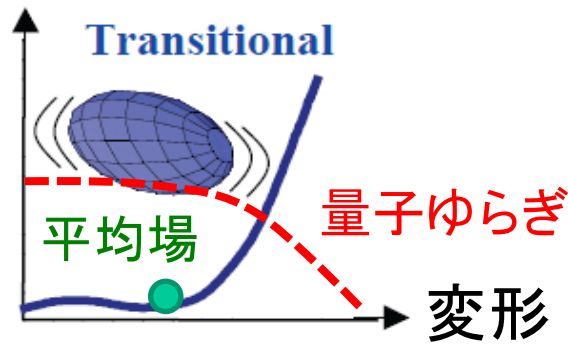
# 更なる発展: 核構造計算を用いた半微視的結合チャンネル計算

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

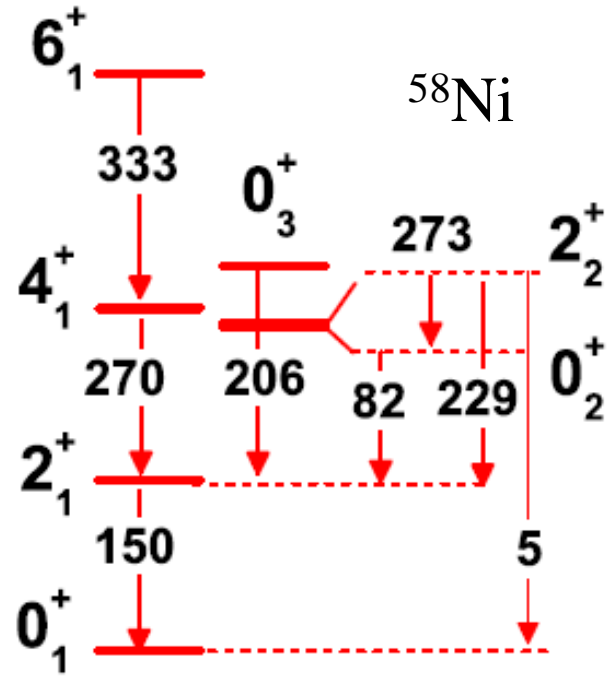
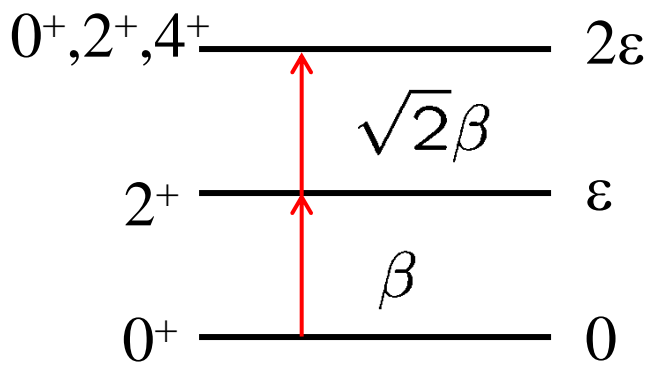
## 結合チャンネル

### + 核構造の微視的計算

(拡張された平均場、殻模型、相互作用するボゾン模型など)



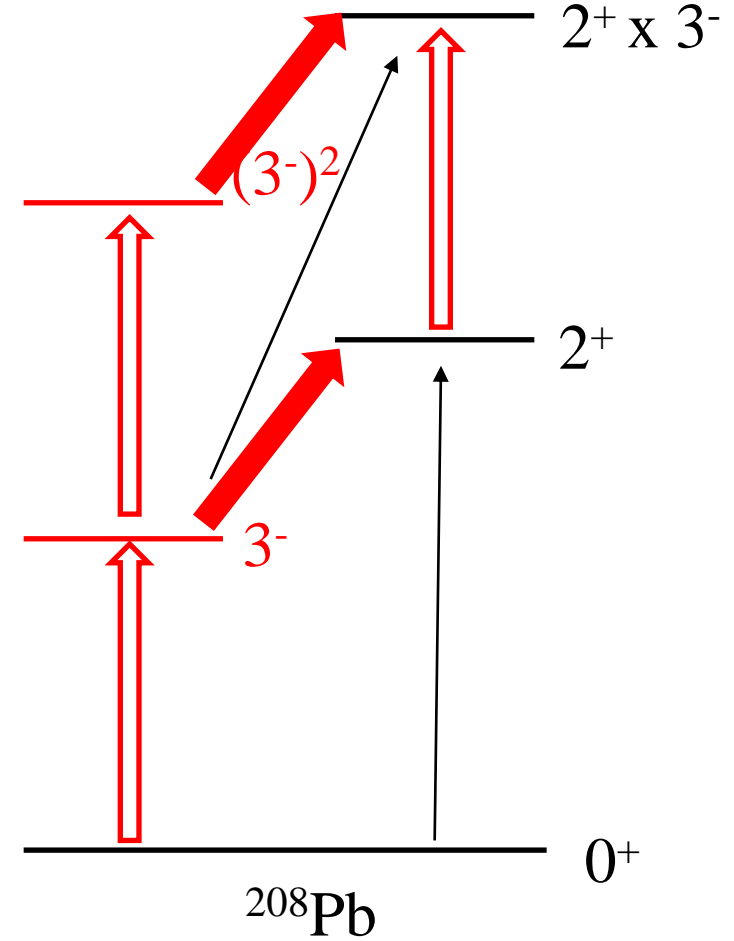
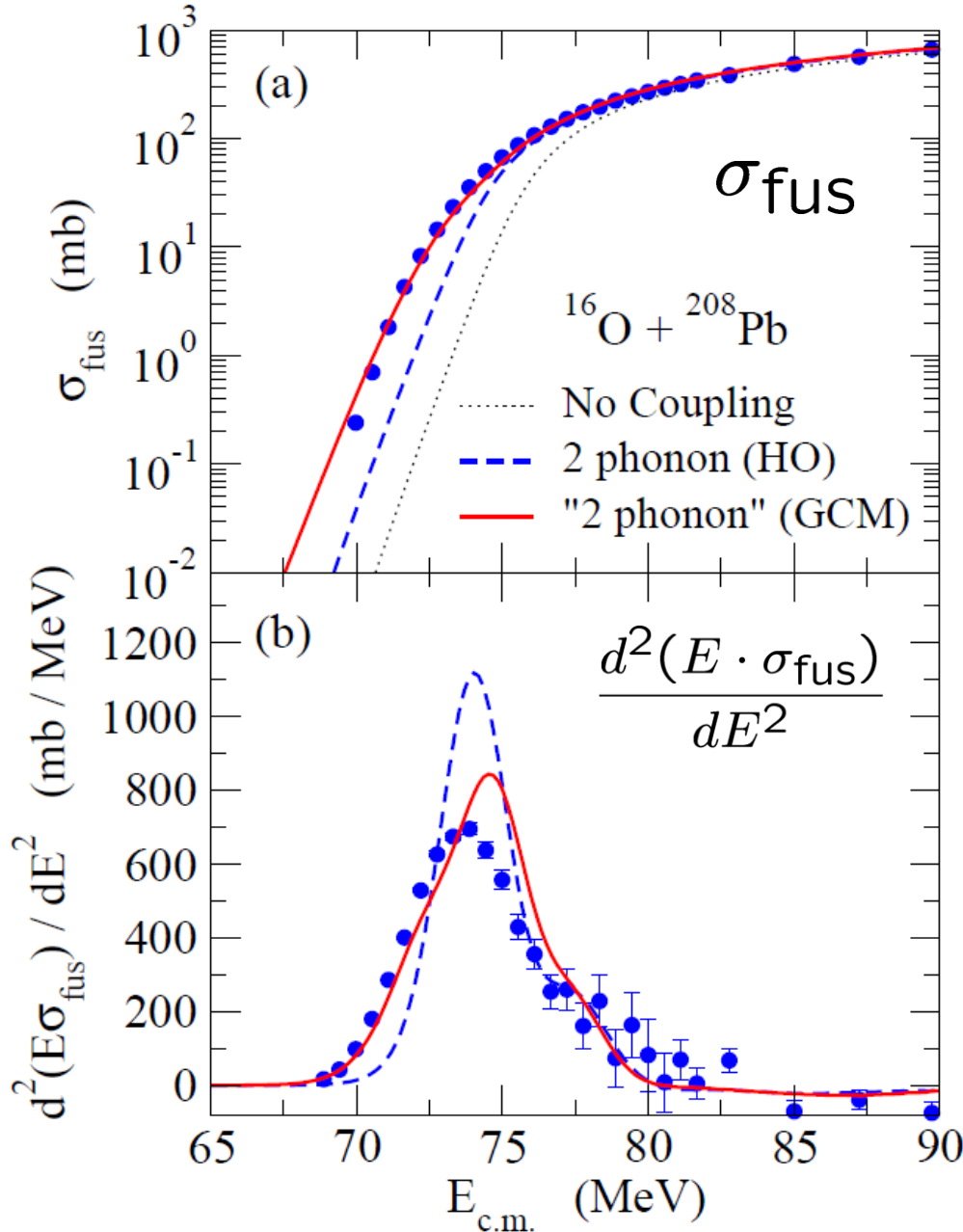
### 単純な調和振動子



フォノン励起における  
非調和性

相対論的平均場 + 量子ゆらぎ

# 相対論的平均場理論+平均場の量子ゆらぎ+結合チャンネル



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

# 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

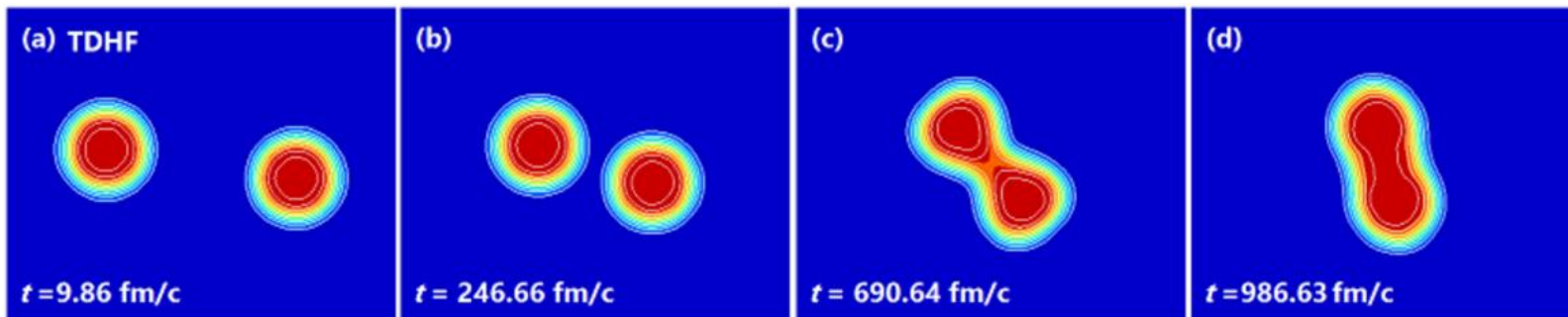
- \* Simenel
- \* Sekizawa, Yabana
- \* Washiyama
- \* Ebata, Nakatsukasa
- \* Iwata, Otsuka など

微視的

第一原理的(しかし、トンネルは記述できない)

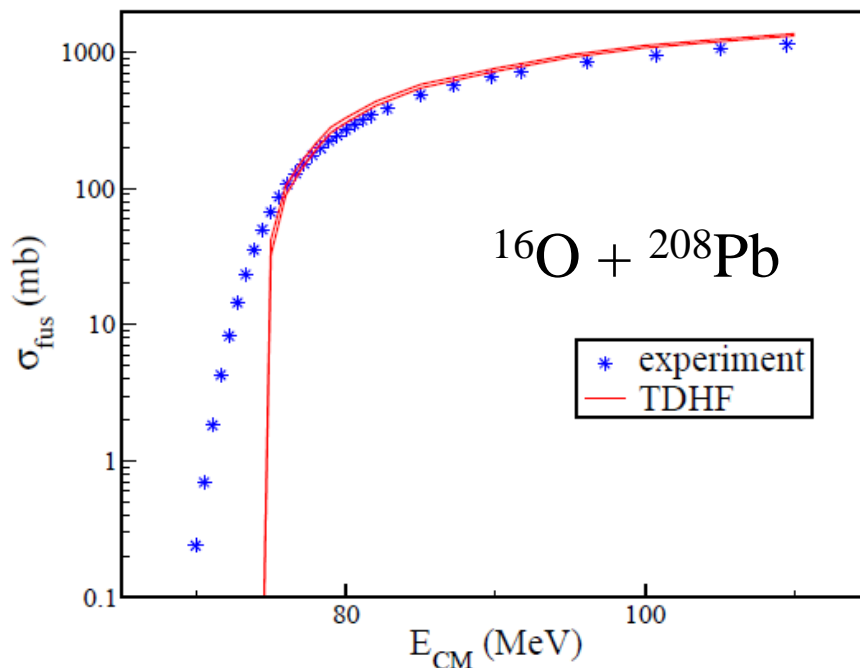
# TDHF シミュレーション

TDHF = Time Dependent Hartree-Fock



S. Ebata, T. Nakatsukasa, JPC Conf. Proc. 6 ('15) 020056

第一原理的、しかし、トンネルは記述できない



C. Simenel,  
EPJA48 ('12) 152



# 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

第一原理的、  
しかし、トンネルは記述できない

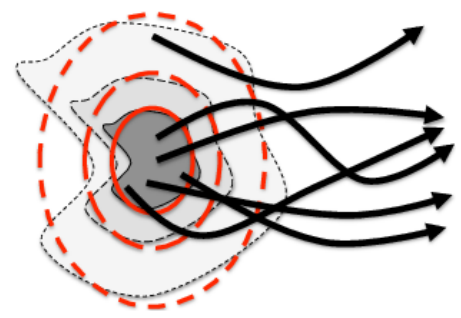
### ➤「平均場を超えた取り扱い」

- ✓ 集団ハミルトニアン of 構築と再量子化

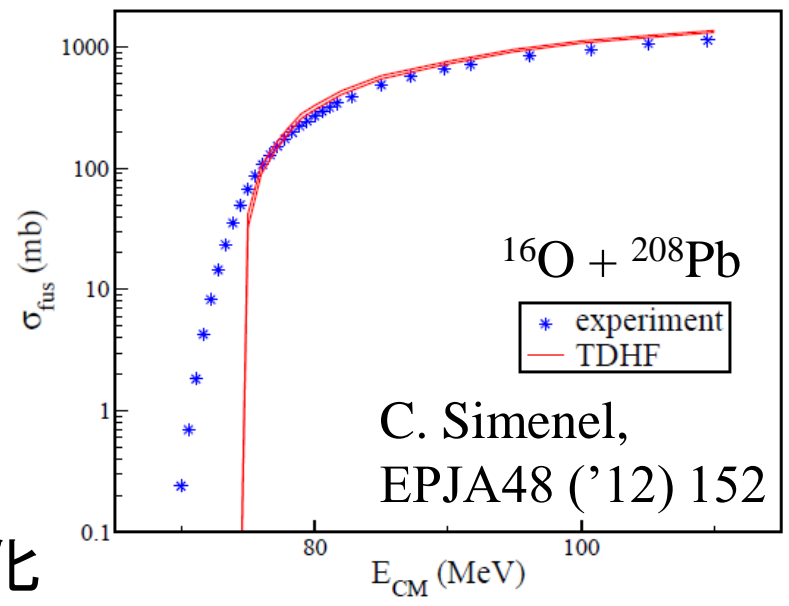
K. Wen and T. Nakatsukasa, PRC96 ('17) 014610

- ✓ 時間に依存した生成座標法

$$|\Psi(t)\rangle = \int dq f(q, t) |\Phi_q(t)\rangle$$



複数の「TDHF軌道 (Slater 行列式)」  
の重ね合わせとしてダイナミクスを記述



これからの課題

cf. Stochastic mean-field method  
B. Yilmaz et al.,  
PRC90 ('14) 054617

# 超重核合成のための核融合反応

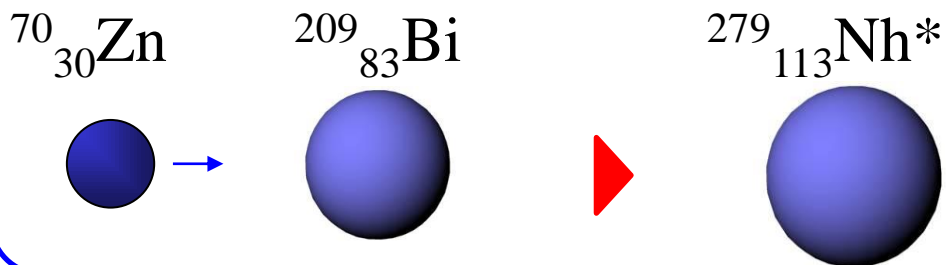
## 113番元素ニホニウム Nh

113 <b>Nh</b> nihonium	115 <b>Mc</b> moscovium
117 <b>Ts</b> tennessine	118 <b>Og</b> oganeson

2016年11月



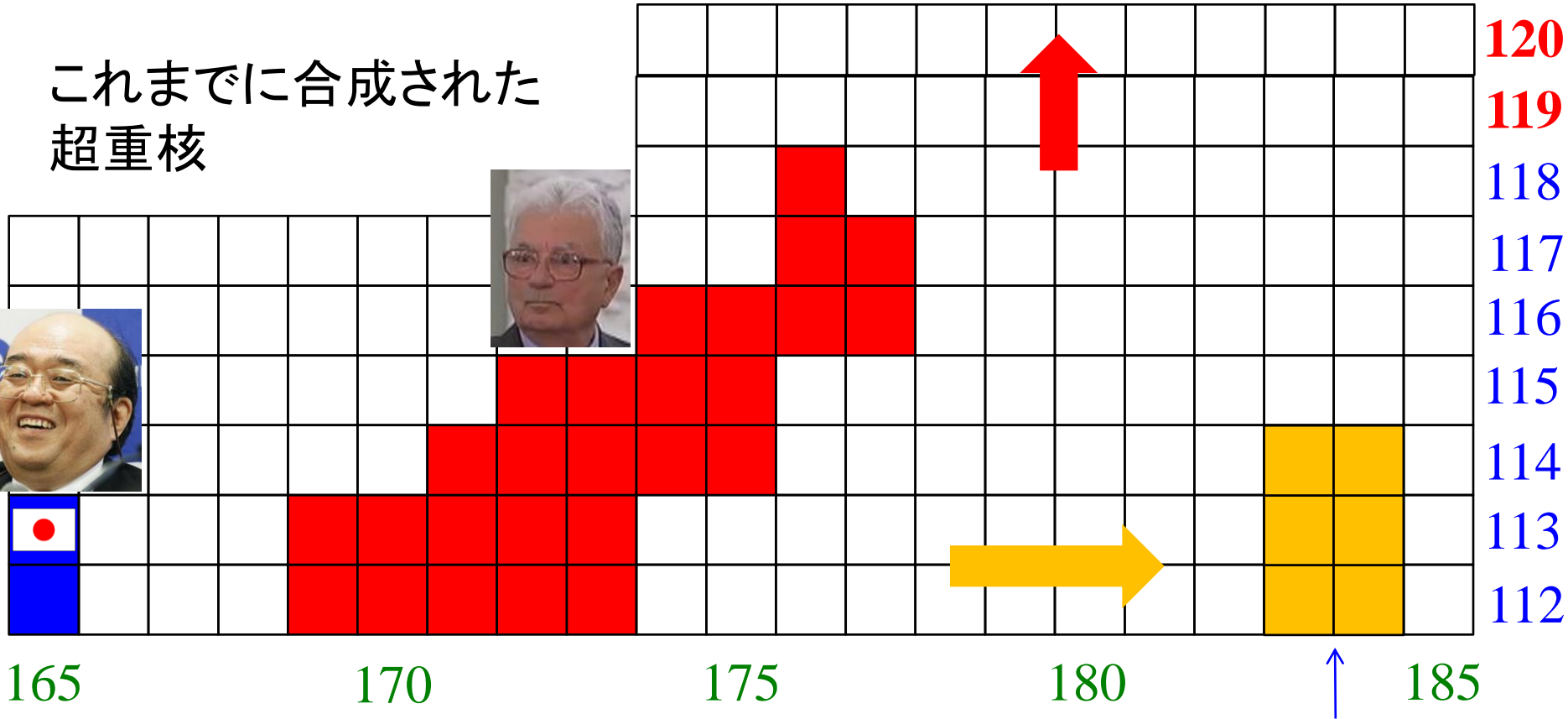
Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac*	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
				58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
				90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	



重イオン核融合反応

# これからの実験的課題

これまでに合成された  
超重核



➤ Z=119 及び 120 核に向けて

$^{48}\text{Ca}$  や  $^{50}_{22}\text{Ti}$  などの入射核を用いた熱い核融合反応

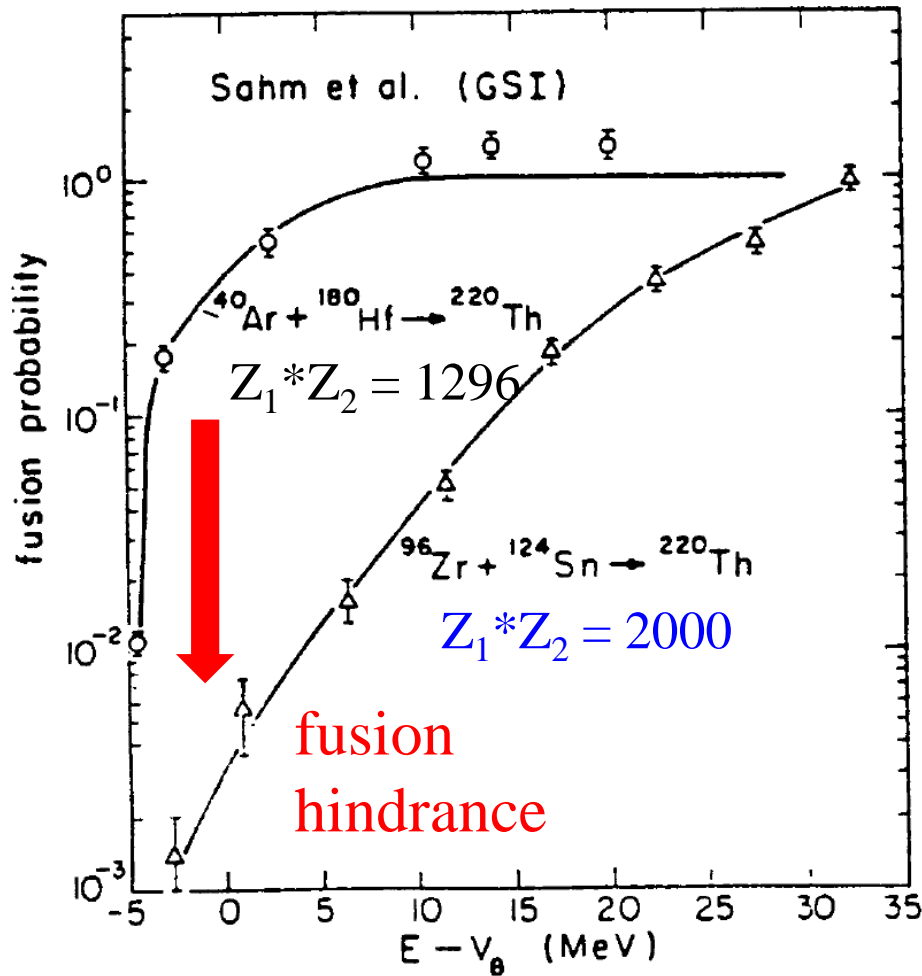
➤ 安定の島に向けて

中性子過剰核ビームを用いた実験が必要不可欠 → 反応機構?

安定の島?

# 超重核領域における核融合反応 ( $Z_P * Z_T > 1600 \sim 1800$ )

## 核融合阻害



## 超重元素

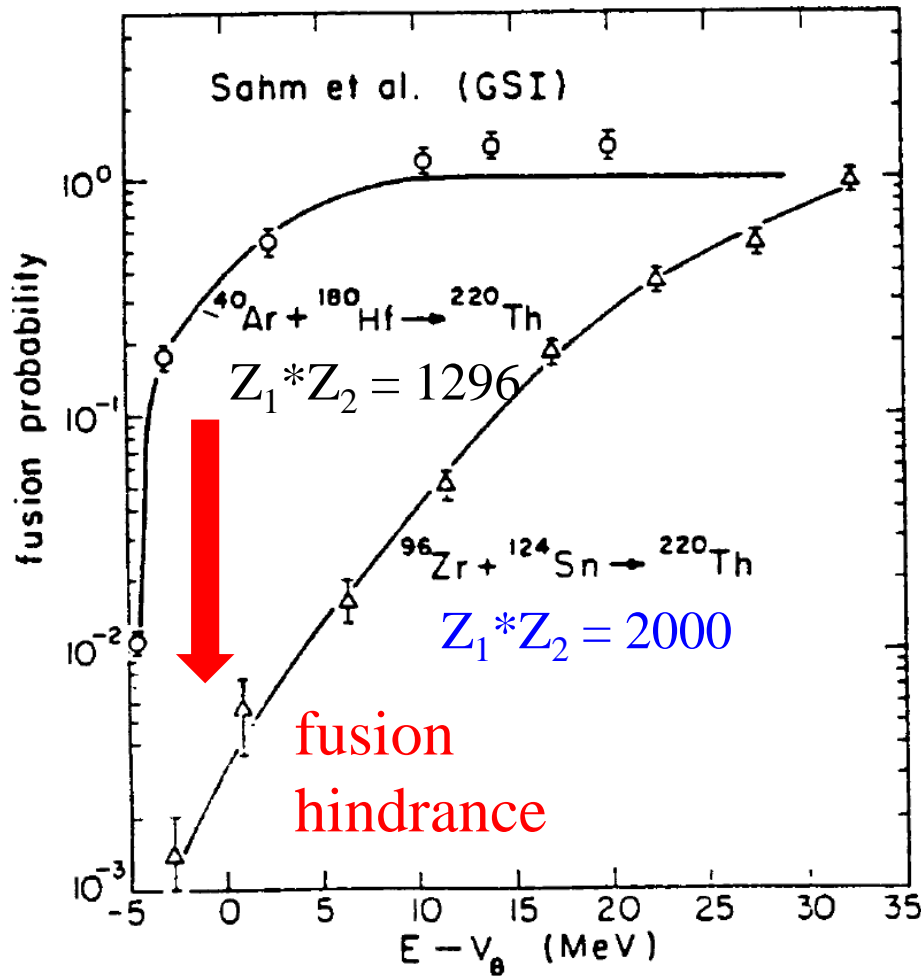
113 <b>Nh</b> nihonium	115 <b>Mc</b> moscovium
117 <b>Ts</b> tennessine	118 <b>Og</b> oganesson

重イオン核融合反応  
による合成

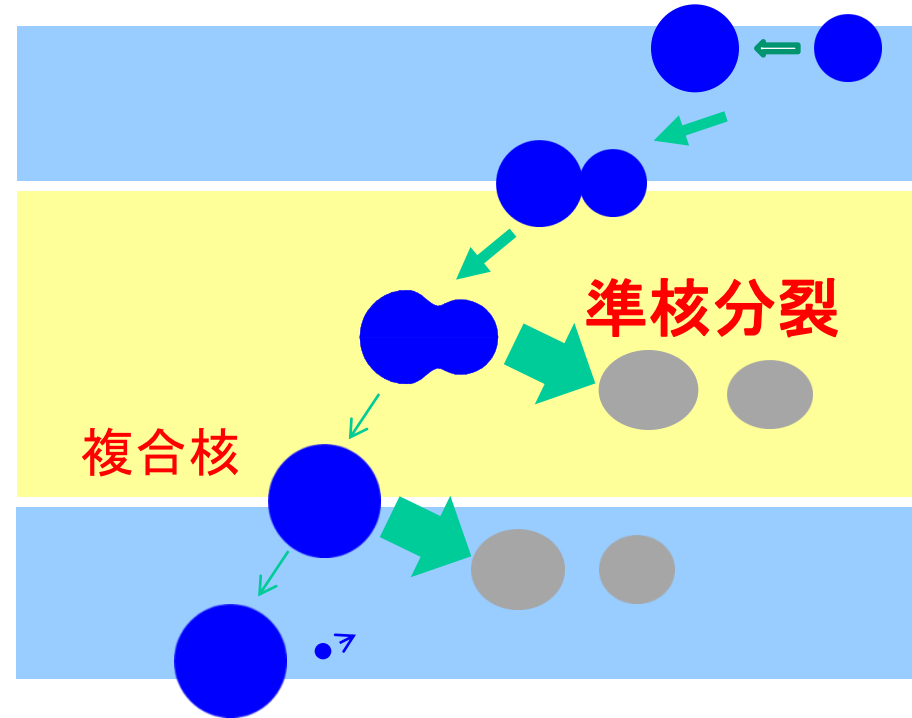
理論の課題：  
反応機構の理解

# 超重核領域における核融合反応 ( $Z_P * Z_T > 1600 \sim 1800$ )

## 核融合阻害



## 核融合阻害の現代的理解



強いクーロン反発  
 → 複合核を作る前に再分離

# 超重核領域における核融合反応 ( $Z_P * Z_T > 1600 \sim 1800$ )

超重元素の生成: 非常に稀な過程

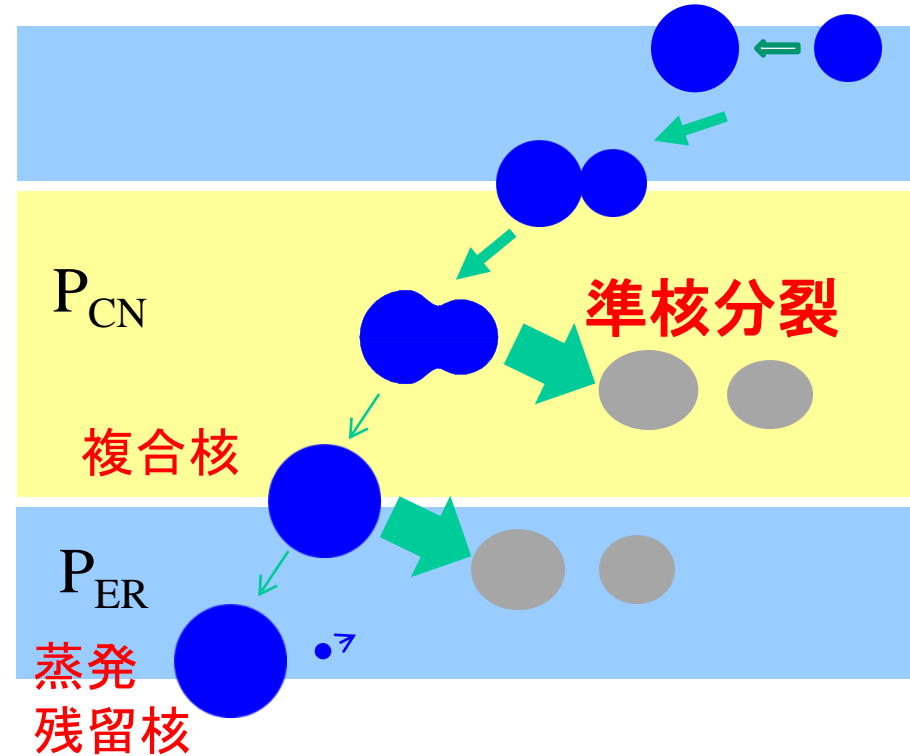
→ 大きな理論的不定性

- ✓  $P_{CN}$  に対する実験データがない
- ✓ 実験データは  $P_{ER}$  のみ

CN=複合核、ER=蒸発残留核

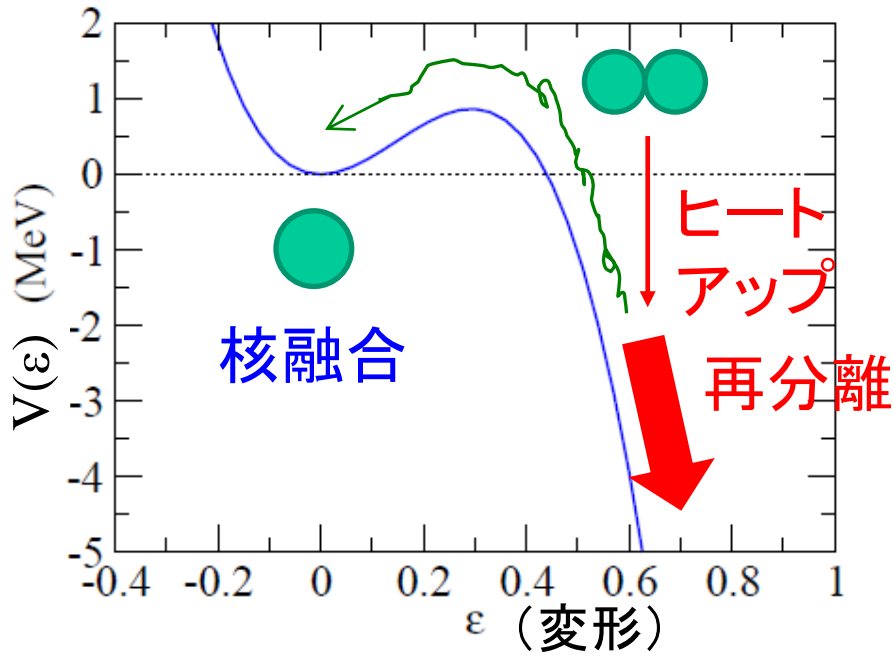
挑戦的課題:  
いかに理論的不定性を小さくして  
信頼できる理論予言が出来るか?

## 核融合障害の現代的理解



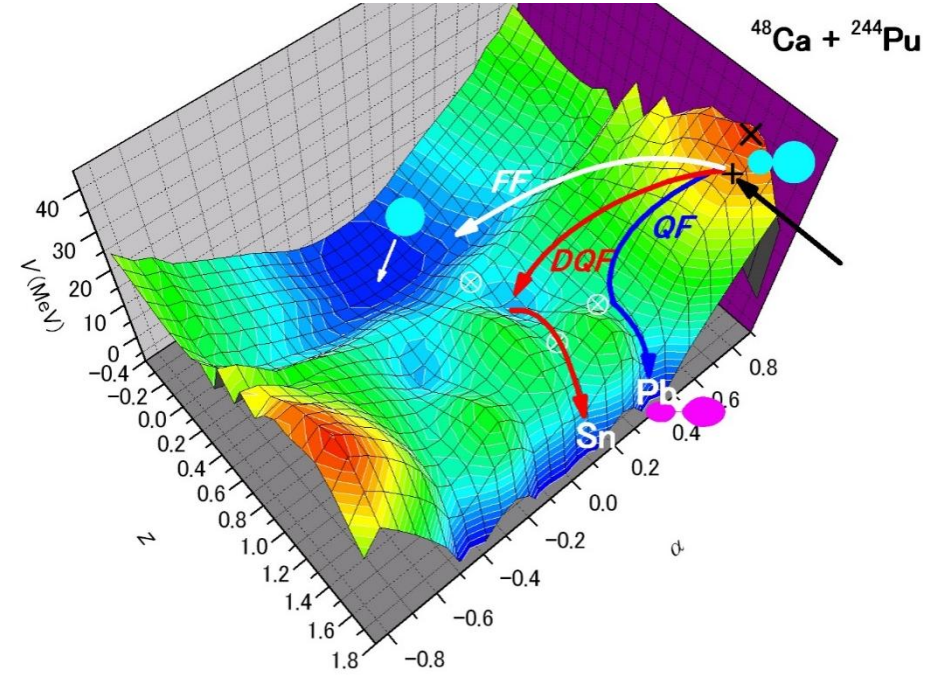
強いクーロン反発  
→ 複合核を作る前に再分離

# ランジュバン法



# 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



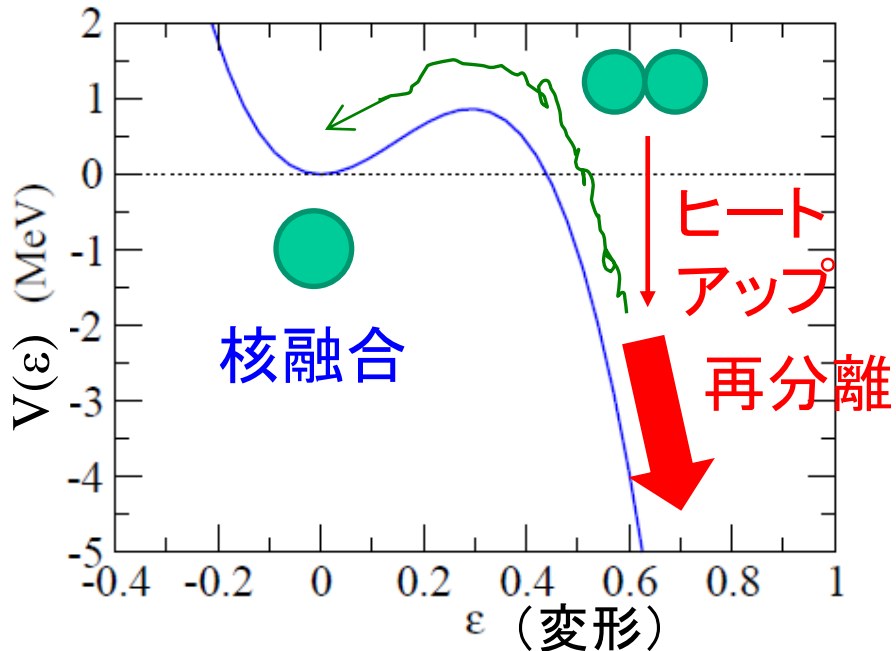
## 熱的拡散

→ ランジュバン法  
(ブラウン運動)

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

- ✓阿部、和田など
- ✓有友、太田など

# ランジュバン法



## ランジュバン方程式

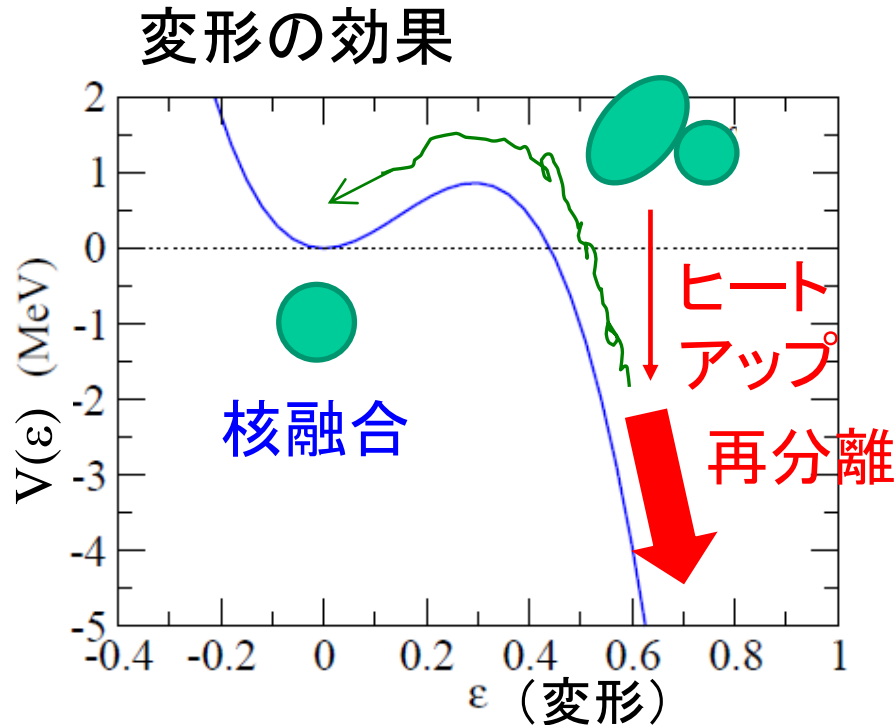
$$m \frac{d^2 q}{dt^2} = - \frac{dV(q)}{dq} - \gamma \frac{dq}{dt} + R(t)$$

## 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? → 微視的模型?
- ✓マルコフ過程で本当にいいのか?
- ✓量子効果はどの程度寄与するのか?
- ✓熱揺らぎと量子揺らぎを同時に取り入れたフォーマリズム?



# 熱い核融合： $^{48}\text{Ca}$ 入射核 + 変形標的核を用いた核融合反応



## 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

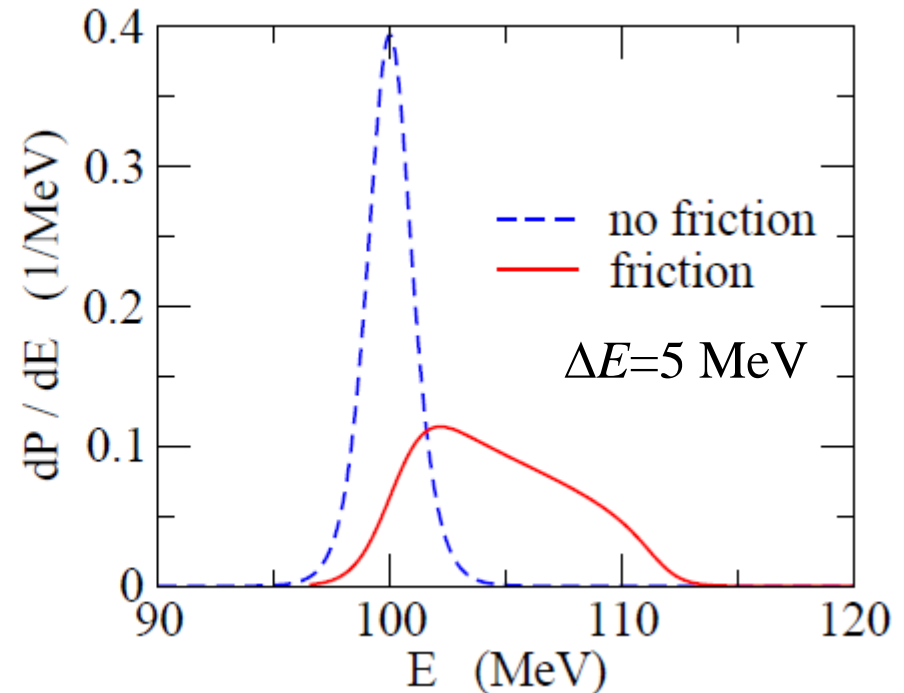
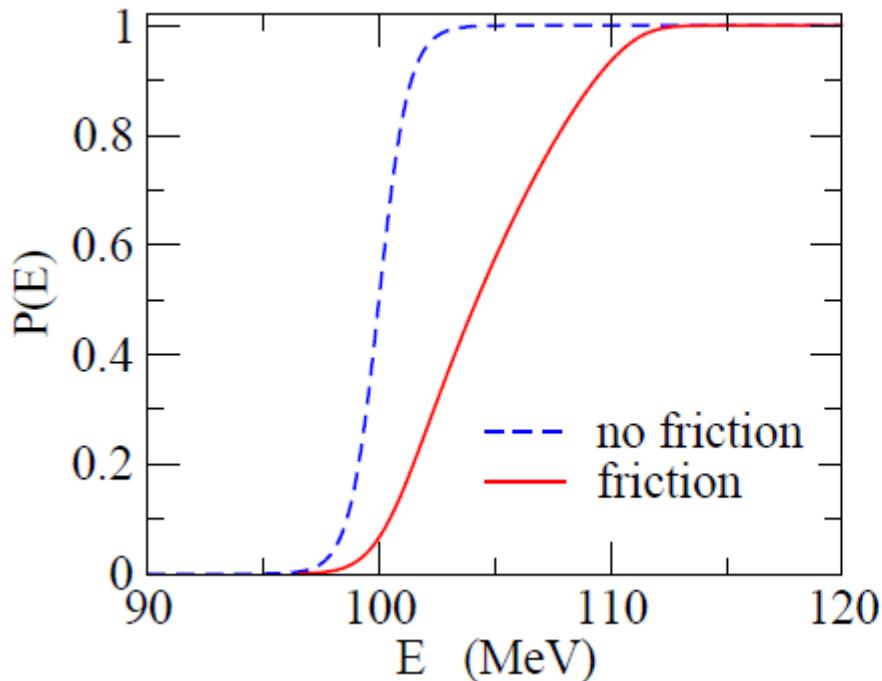
$$\dot{p} = -V'(x) - \gamma p$$

量子化の一形式: Kanai(金井)モデル (E. Kanai, PTP 3 (1948) 440)

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

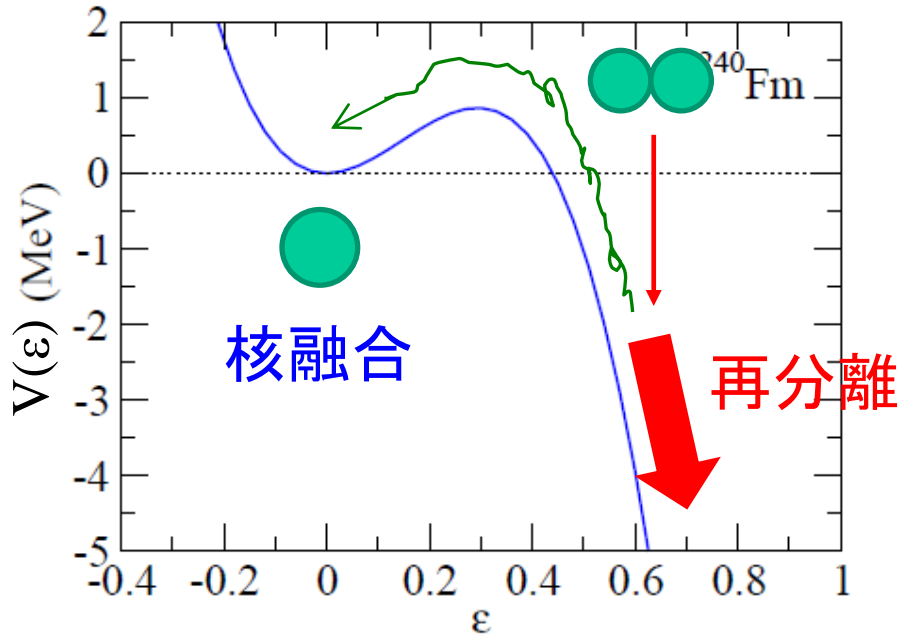
(古典的な運動方程式を再現するハミルトニアン)

時間に依存する波束計算



# 核融合反応と非平衡統計力学: 温度勾配の下での Langevin 動力学

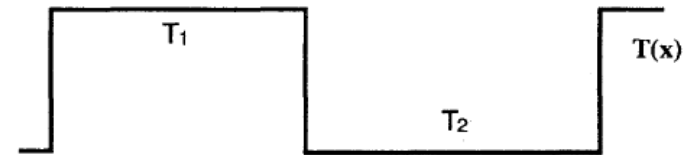
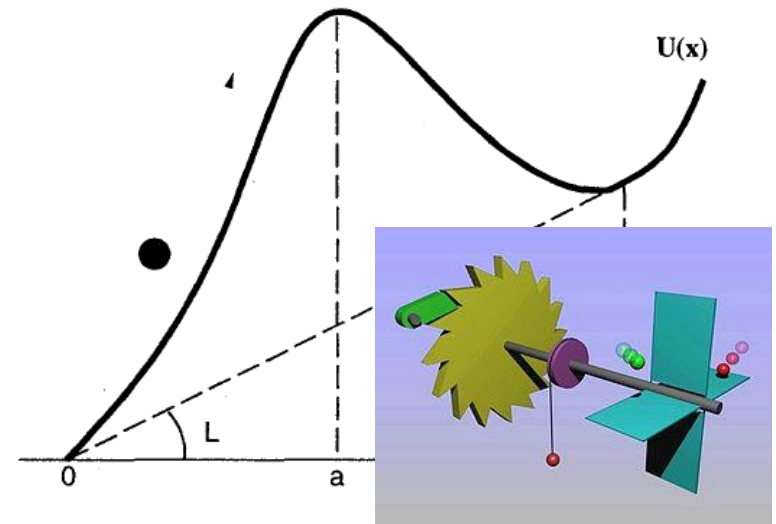
## ➤ 超重核合成反応



$$E_{\text{int}} = E^* - E_{\text{kin}} - V(\epsilon) = aT^2$$

← 座標に依存する温度

## ➤ 分子モーターに対する数理モデル



松尾美希、物性研究 73 ('99) 557

温度勾配 → 一方向の運動

非平衡統計力学の一般的問題として超重核生成反応をとらえ直す

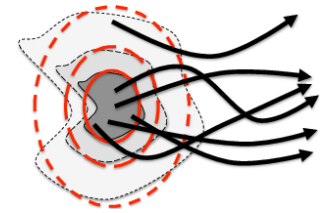
# まとめ

## 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

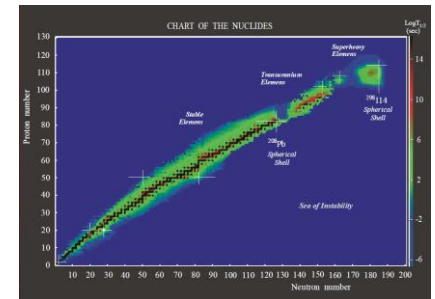
## 残された課題

- ✓ 多粒子系のトンネル現象をどのように理解する?
  - 低エネルギー核融合反応の微視的理解
  - 大振幅集団運動、量子摩擦



## 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
- 温度勾配の下でのランジュバン・ダイナミクス