

# 重イオン核融合反応

～多次元トンネル、超重元素、  
そして非平衡統計力学～

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:何が面白いかな?
2. 核構造と核反応が織りなすインタープレイ
3. 核融合反応について
4. 今後の展望:超重元素合成反応
5. まとめ

重イオン核融合反応に関するレビュー論文:

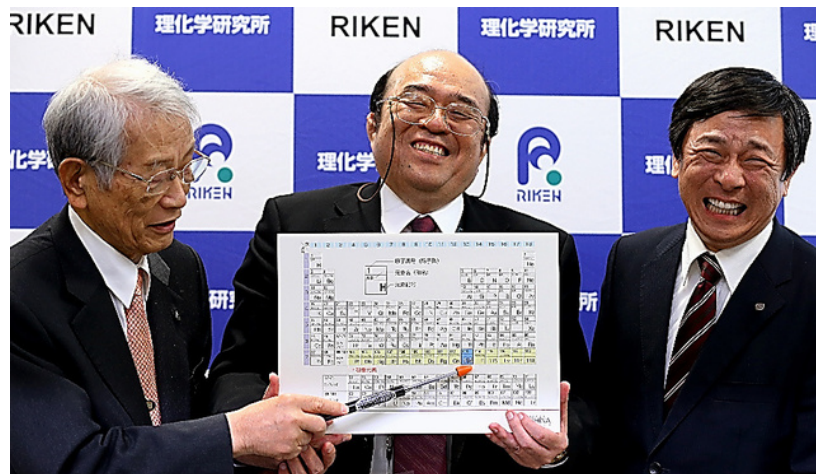
K. Hagino and N. Takigawa, Prog. Theo. Phys.128 ('12)1061.

# はじめてに:ニホニウム

## 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> oganesson

2016年11月

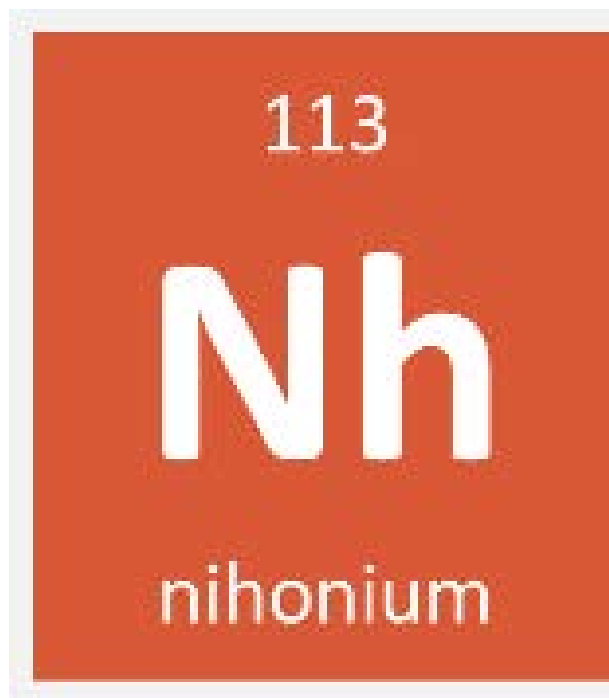


Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period 1	1 H																	2 He
Period 2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
Period 3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
Period 4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
Period 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
Period 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
Period 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				

Wikipedia

はじめに:ニホニウム

113番元素ニホニウム Nh



2016年11月

東大との関係:

113 本郷地区の郵便番号 (113-0033)

New Hampshire Route 113 (NH113)



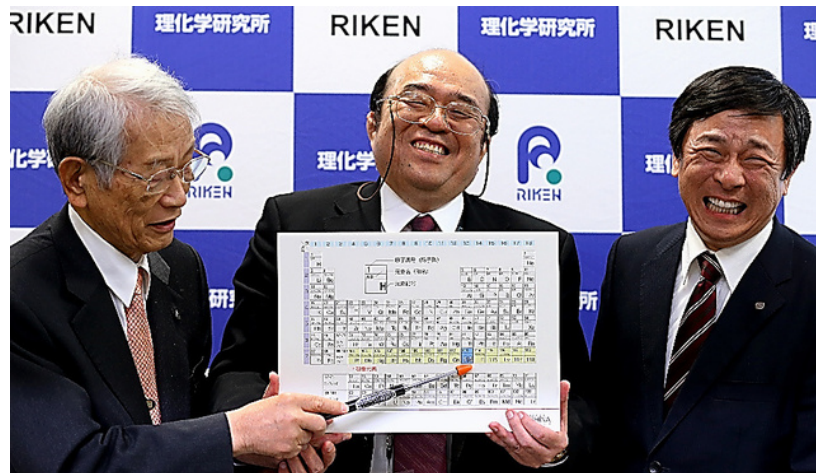
ニューハンプシャーのニホニウム通り

113 電話の故障 (NTT) ← 櫻井さん

113 日本の110番 (イタリア)

# はじめて:ニホニウム

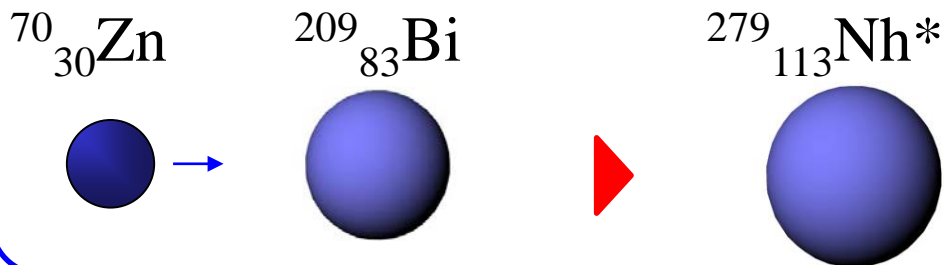
## 113番元素ニホニウム Nh



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

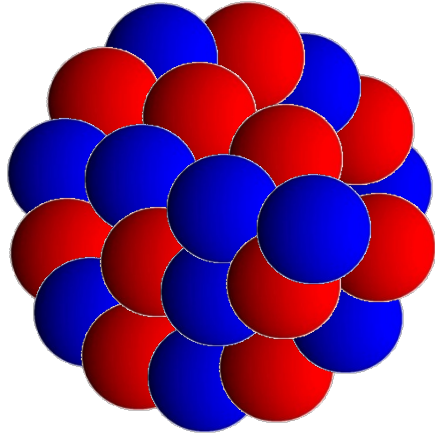
Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period 1 ↓	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
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				

2016年11月



重イオン核融合反応

# 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

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

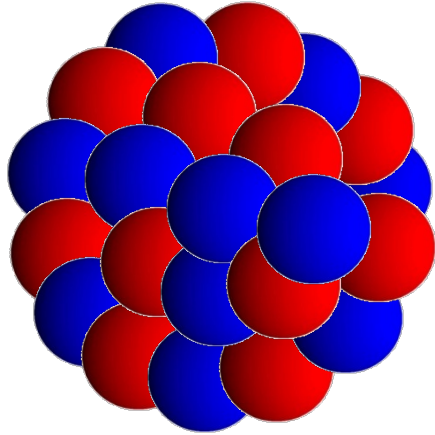
### ➤ ダイナミックス: 原子核反応

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

# 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

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

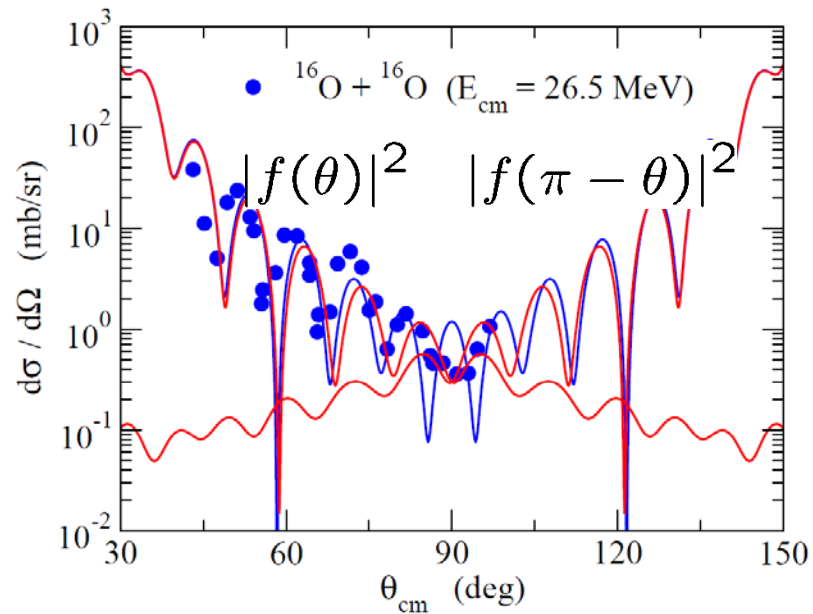
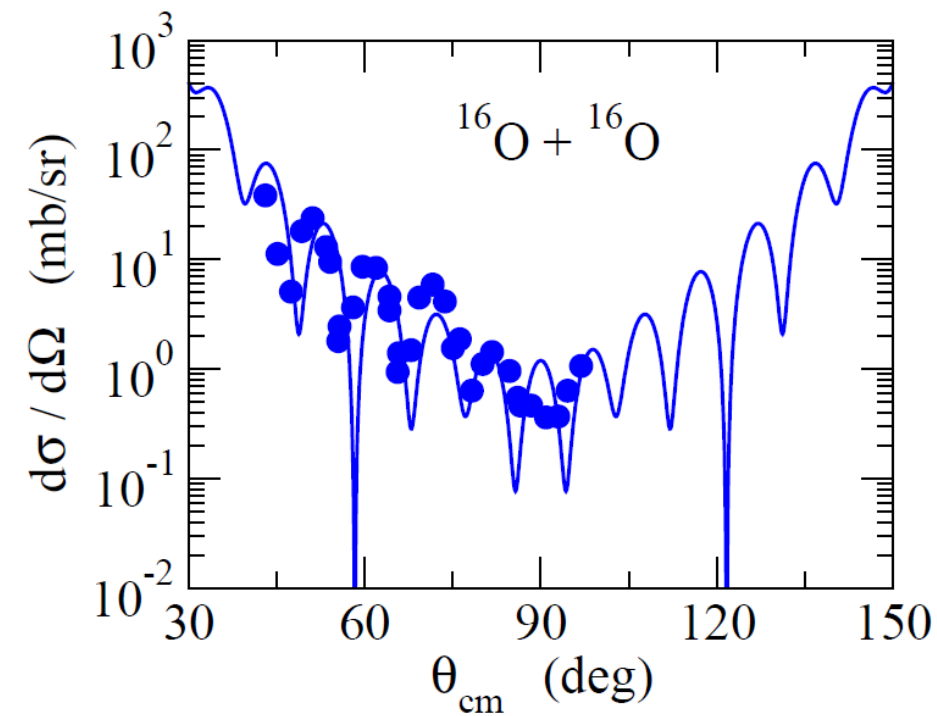
### ➤ ダイナミックス: 原子核反応

#### 原子核は複合粒子

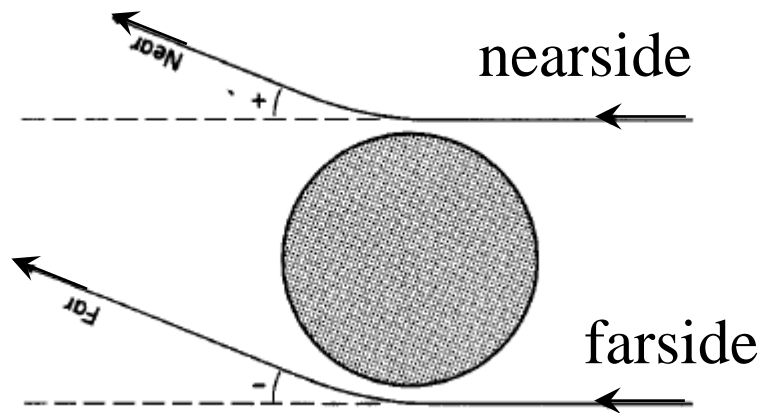
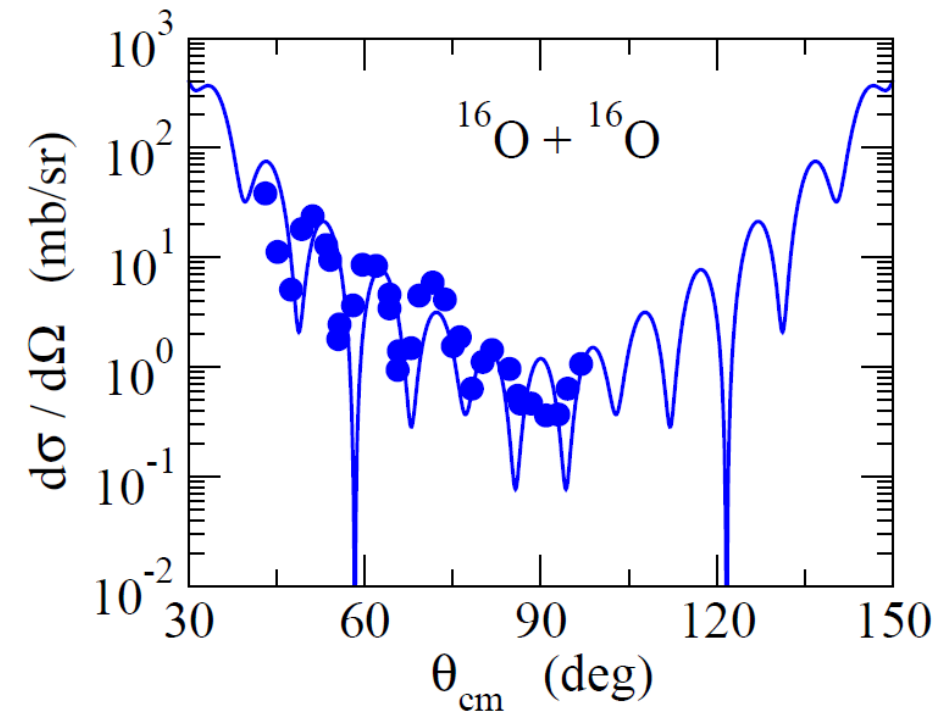
- ✓ 豊富な反応様式
- ✓ 核構造と核反応  
の織り成す様々な  
インタープレイ

- ✓ 弾性散乱
- ✓ 非弾性散乱
- ✓ 核子移行反応
- ✓ 核融合反応

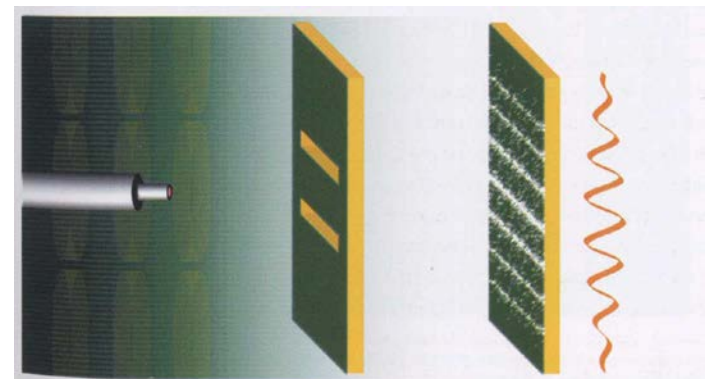
## 例) 弾性散乱にみられる特徴的な干渉パターン



## 例) 弾性散乱にみられる特徴的な干渉パターン

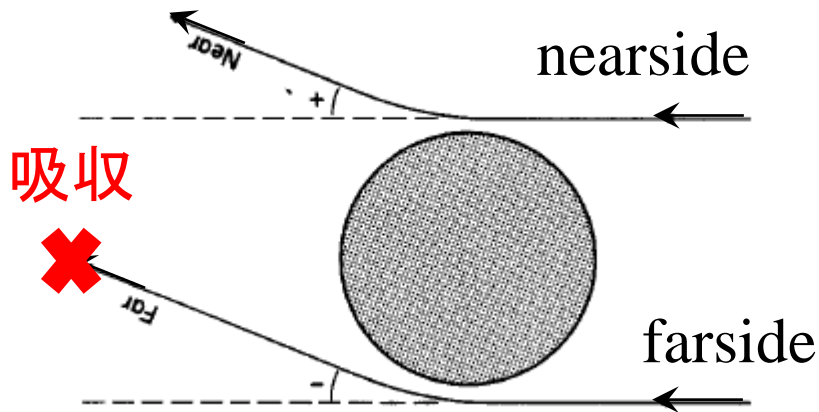
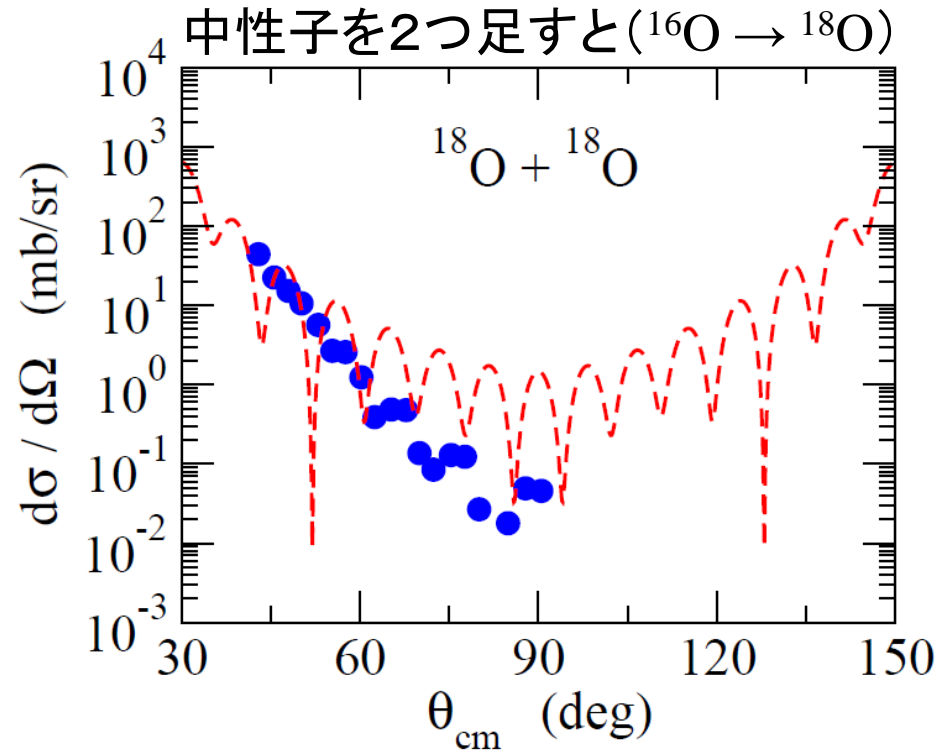
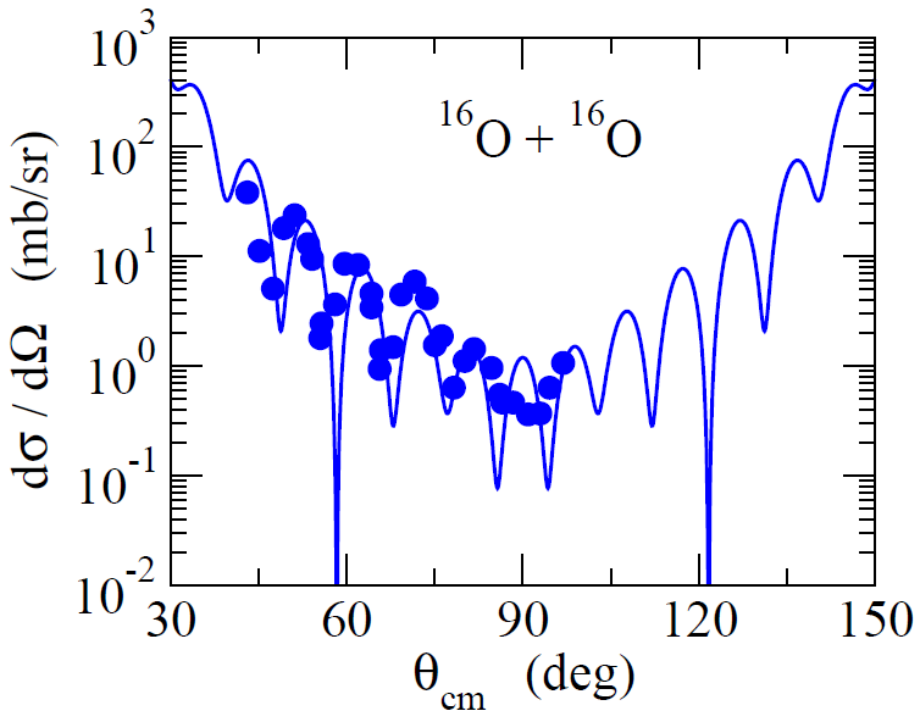


2つの軌道の干渉



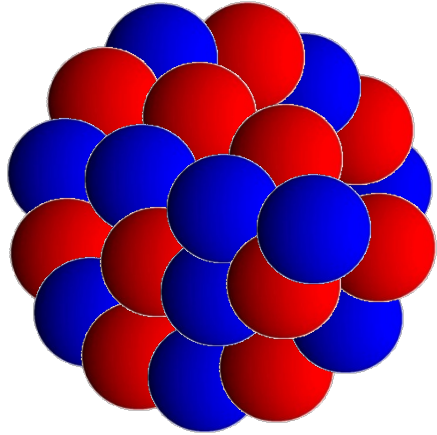


# 例) 弾性散乱にみられる特徴的な干渉パターン



cf. 一重スリット

# はじめに: 低エネルギー原子核物理学のめざすもの



## 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

## □ 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

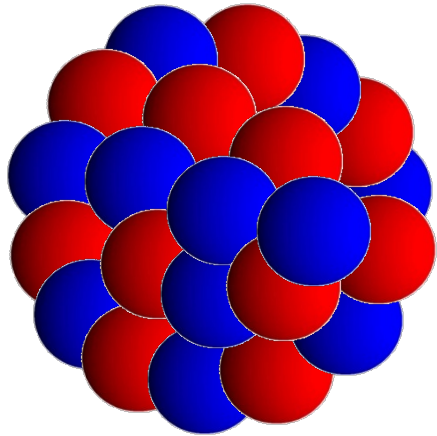
### ➤ 静的な振る舞い: 原子核構造

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

### ➤ ダイナミックス: 原子核反応

- ✓ 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



## 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

## □ 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

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

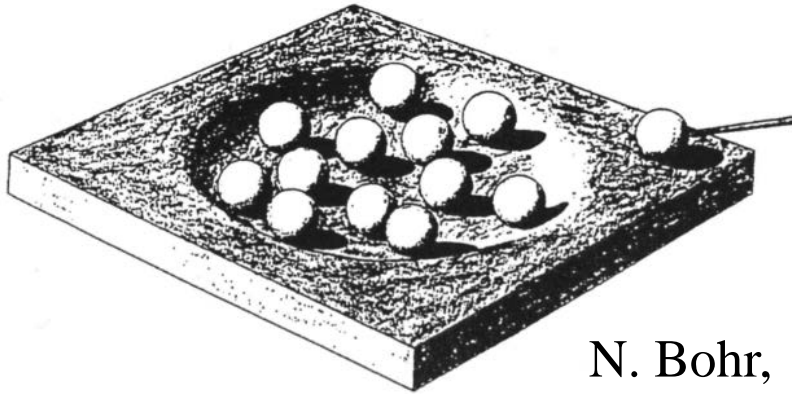
### ➤ ダイナミックス: 原子核反応

- ✓ 弾性散乱
- ✓ 非弾性散乱
- ✓ 核子移行反応
- ✓ 核融合反応 ←

# 核融合反応： 複合核生成反応

Niels Bohr (1936)

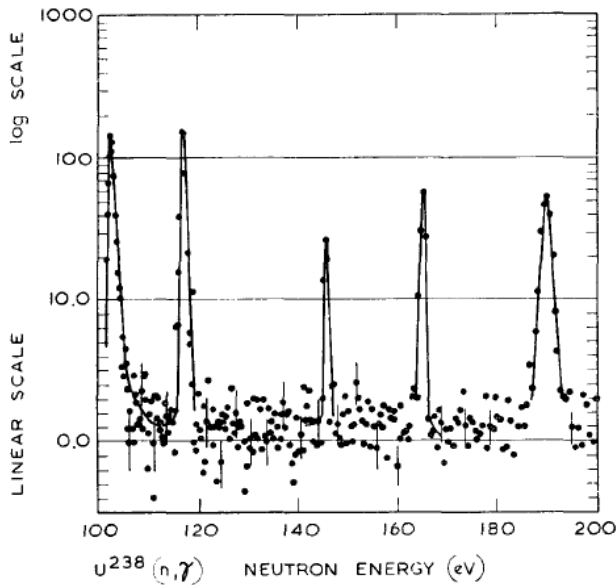
原子核による中性子の吸収 → 複合核



N. Bohr,  
Nature 137 ('36) 351



Wikipedia



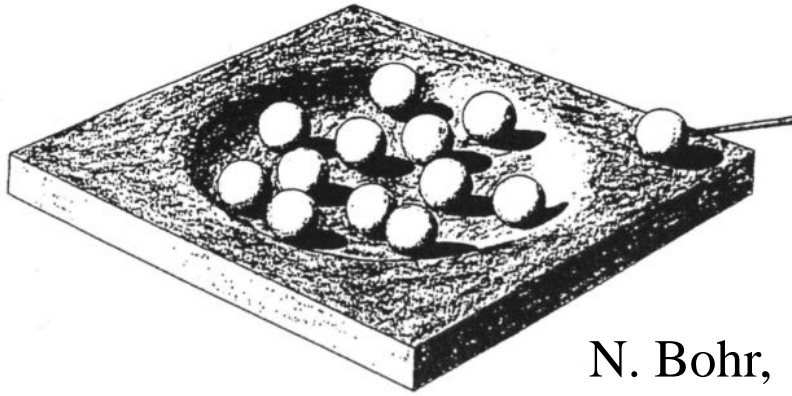
cf. フェルミの実験 (1935)  
MeV スケールの原子核に eV スケールの幅の多数の共鳴状態

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

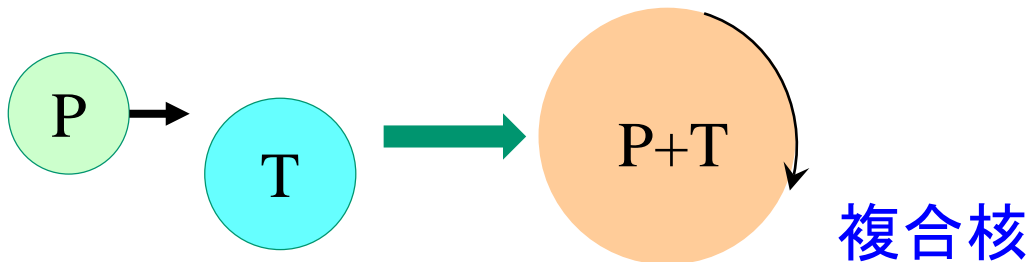


N. Bohr,  
Nature 137 ('36) 351

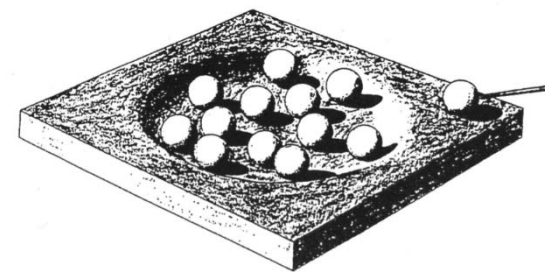
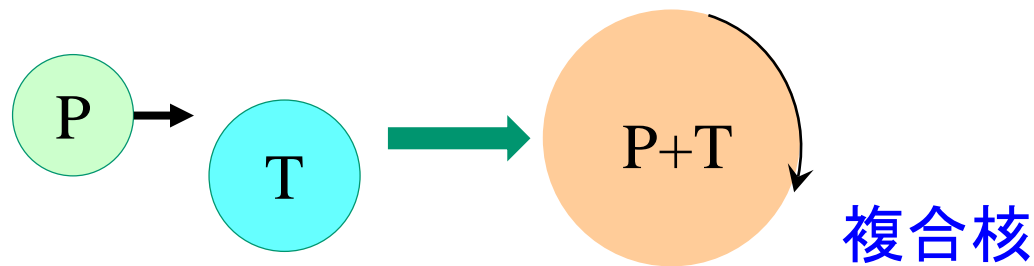


Wikipedia

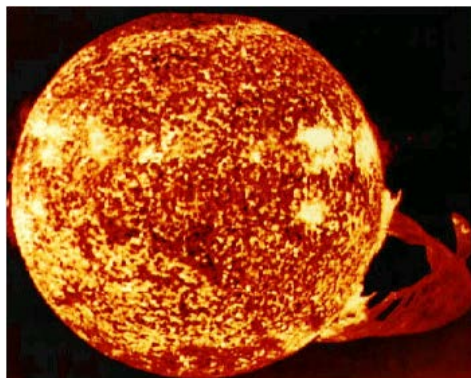
重イオン反応で複合核をつくる = 重イオン核融合反応



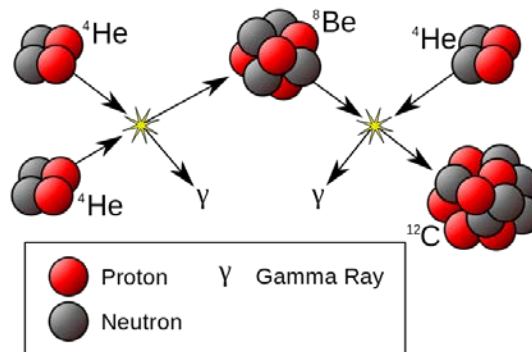
# 核融合反応： 複合核生成反応



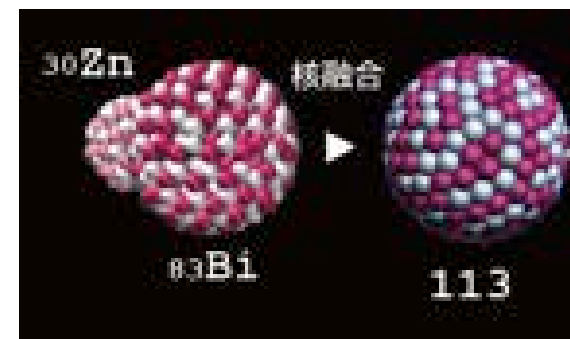
cf. N. Bohr '36



恒星のエネルギー源 (Bethe '39)



元素合成

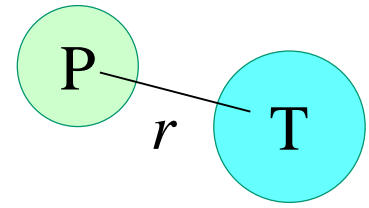


超重元素の合成

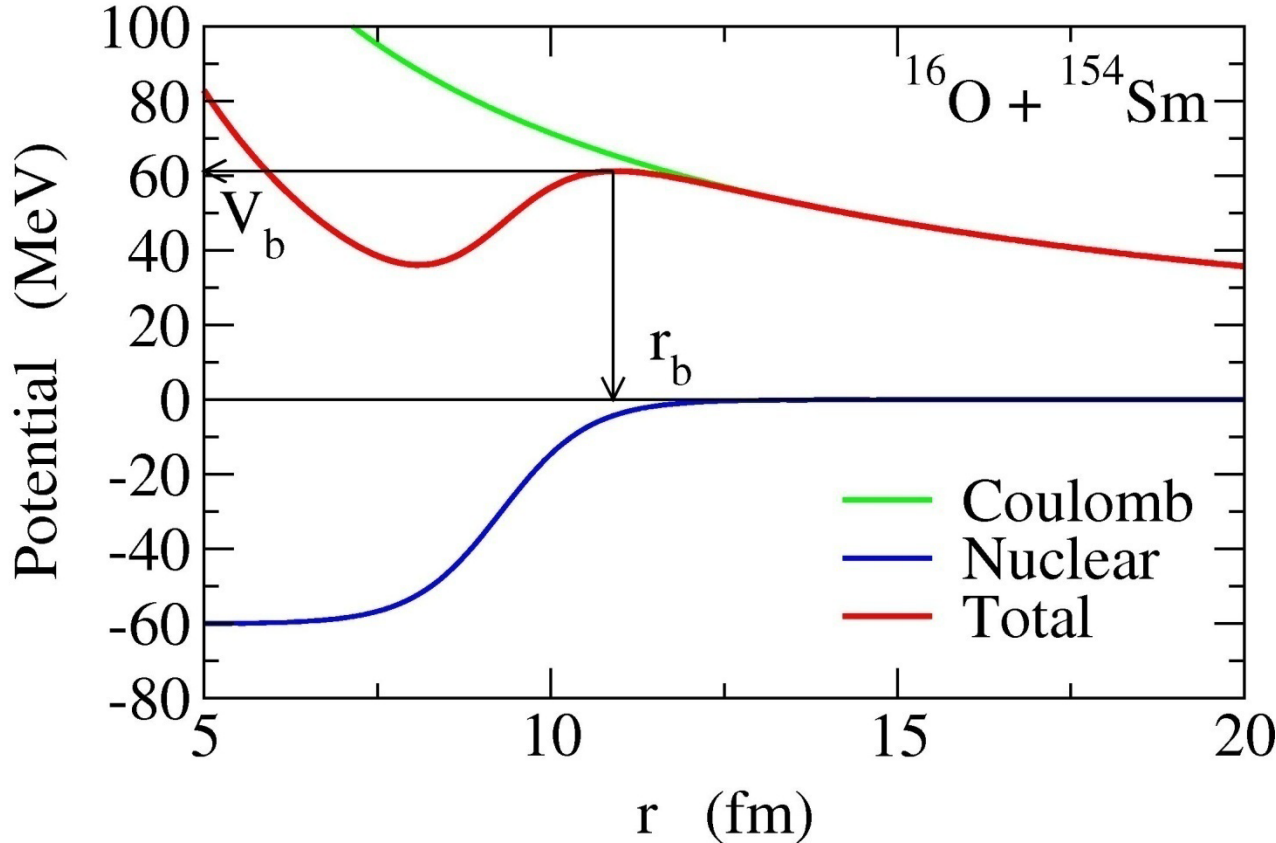
核融合・核分裂: 強い相互作用をする量子多体系の大振幅集団運動

← 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



## ポテンシャル障壁



2つの力:

1. クーロン力  
長距離斥力
2. 核力  
短距離引力



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)

ポテンシャル障壁を透過して  $r$  が小さくなれば核融合  
→ トンネル効果

# 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

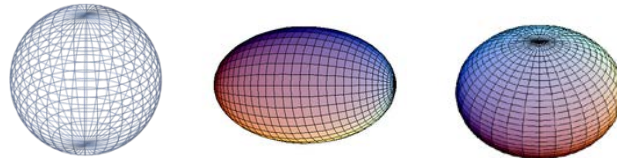
核反応と核構造の強い結合(結合チャンネル効果)

cf. 高エネルギー反応: 反応機構はより単純

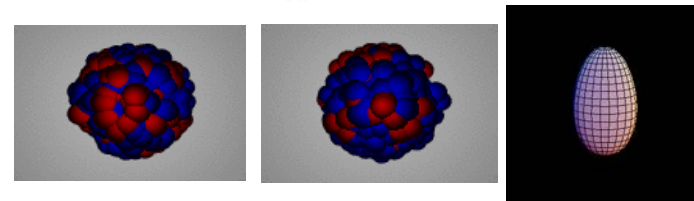
## ✓ 多粒子系の量子トンネル現象

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



様々な変化、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

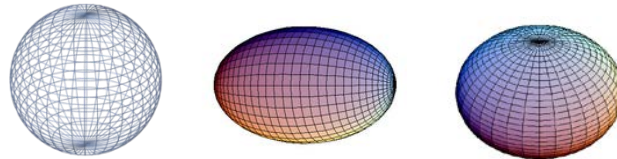
核反応と核構造の強い結合(結合チャンネル効果)

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

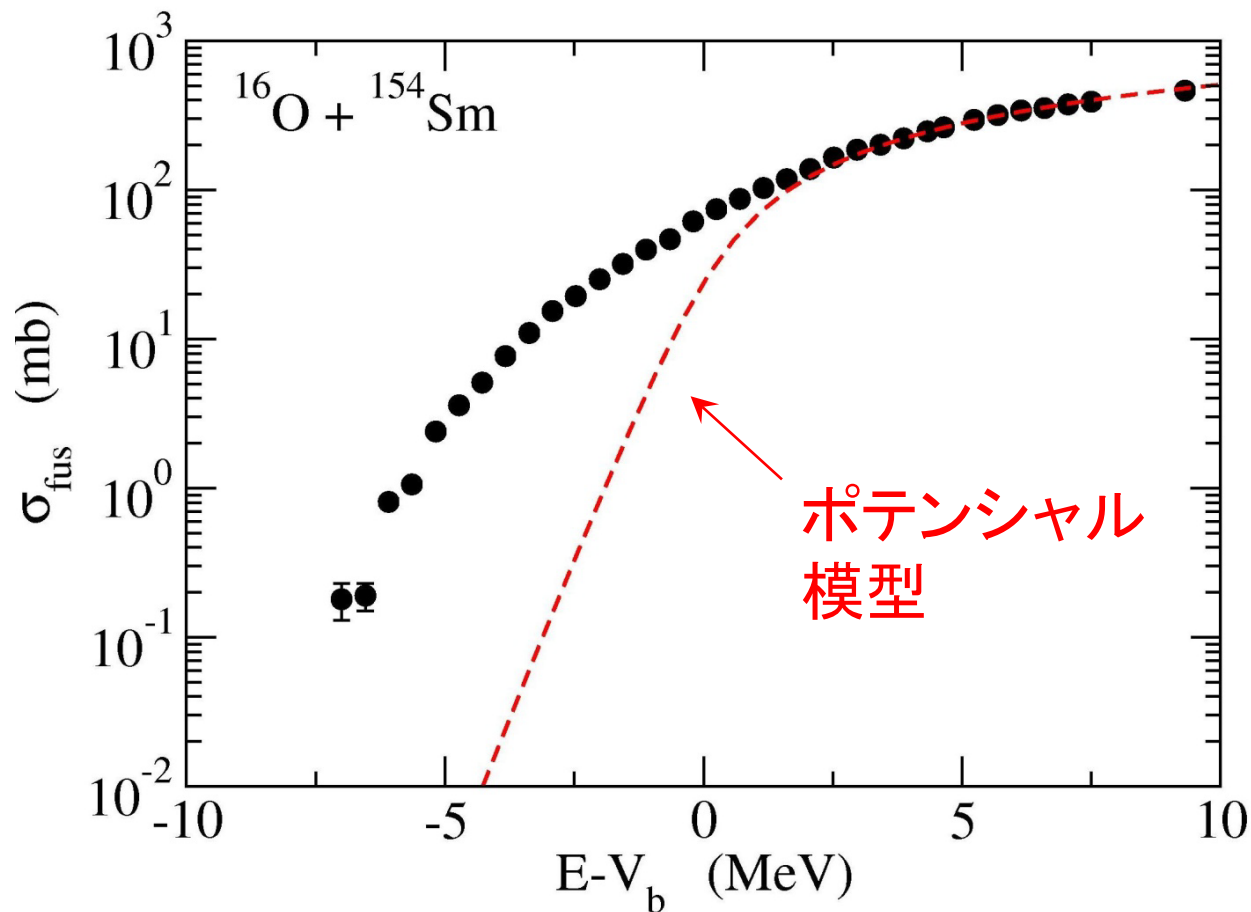
・エネルギーが可変 cf.  $\alpha$ 崩壊: エネルギーが固定されている

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

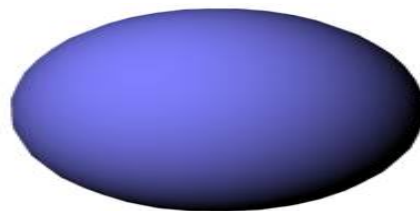
# 核融合反応断面積の大きな増大

ポテンシャル模型: 散乱核は構造を持たない球と仮定

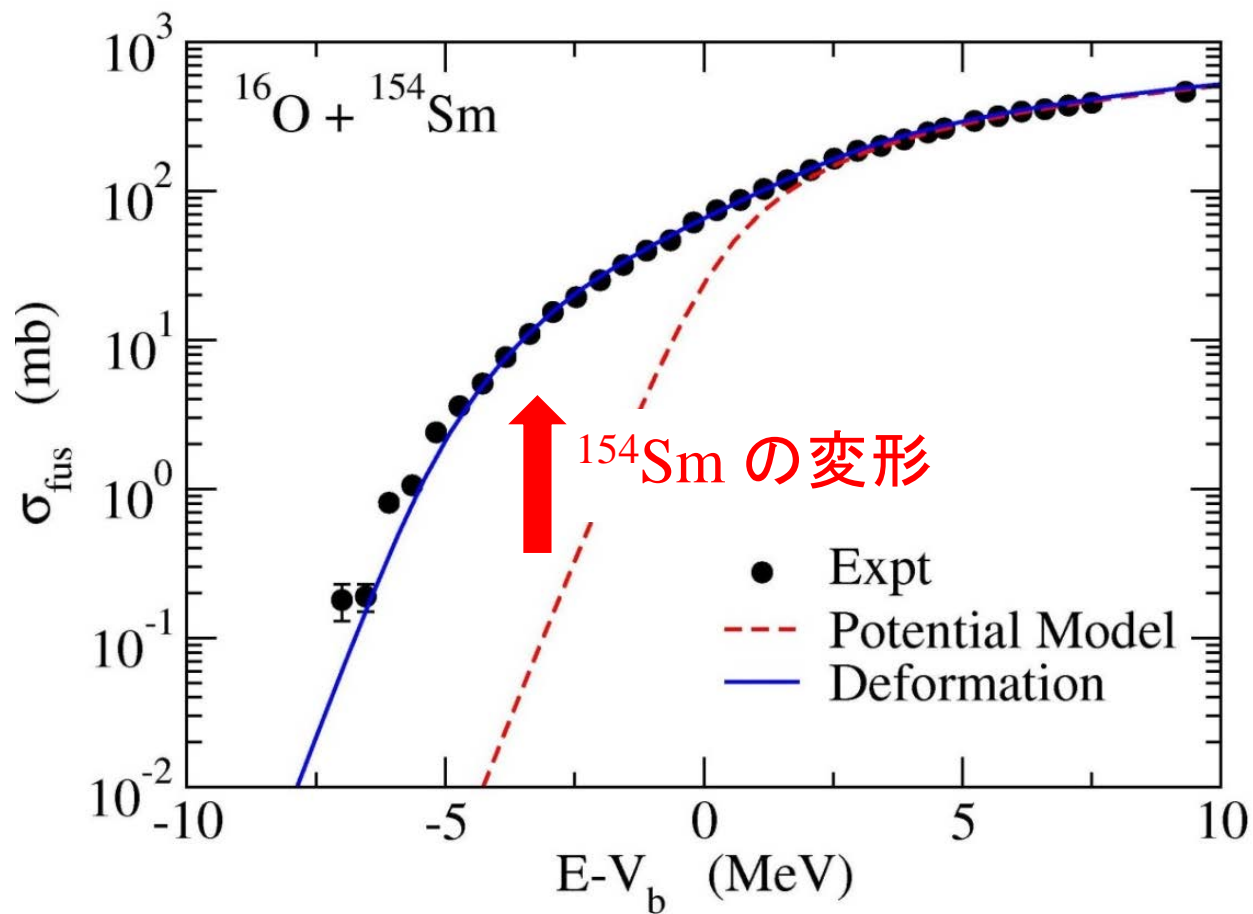
$$\sigma_{\text{fus}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1)(1 - |S_l|^2)$$



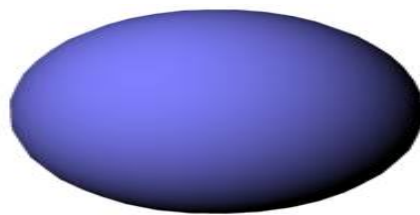
$^{154}\text{Sm}$  : 典型的な変形核



$^{154}\text{Sm}$

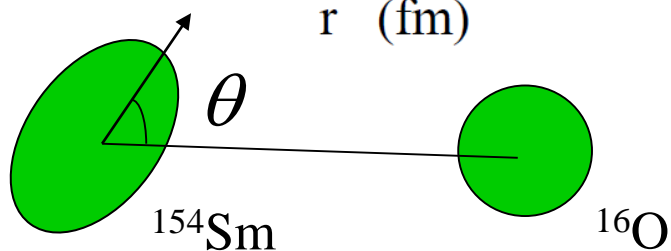
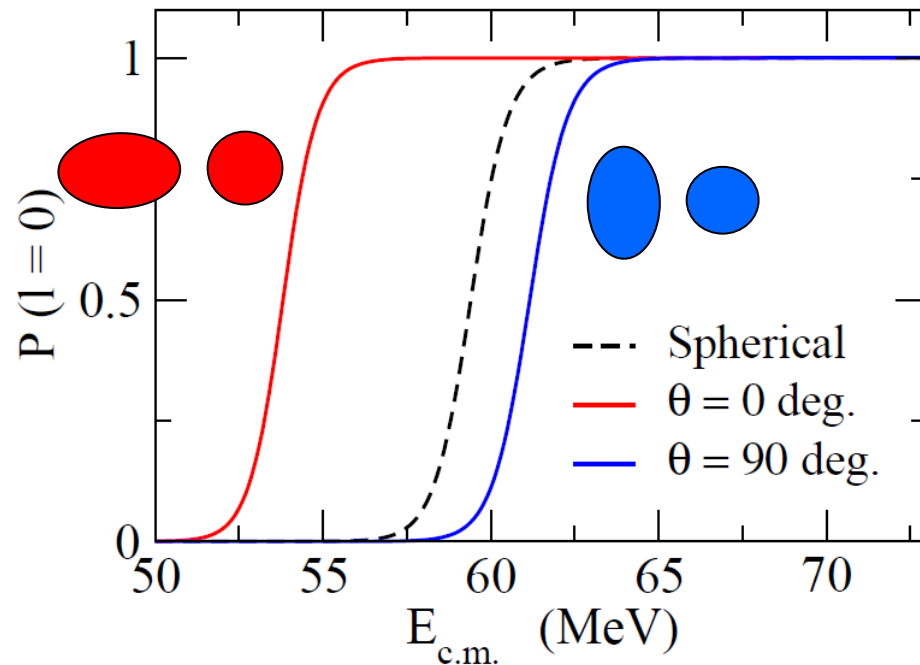
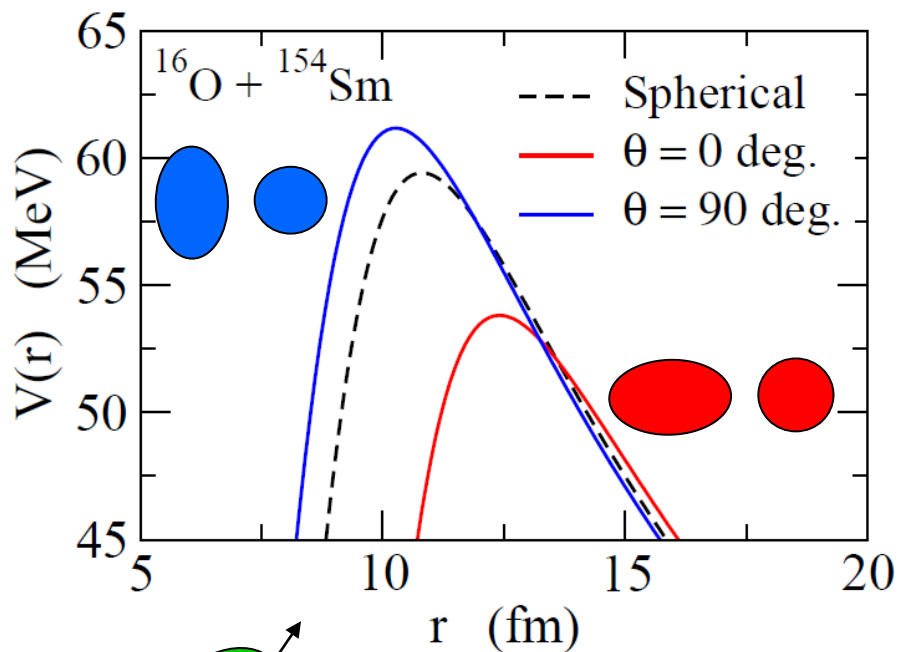


# 原子核の変形の効果



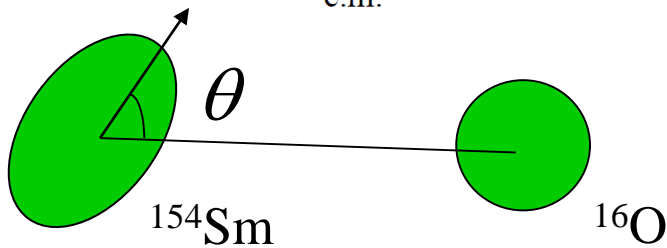
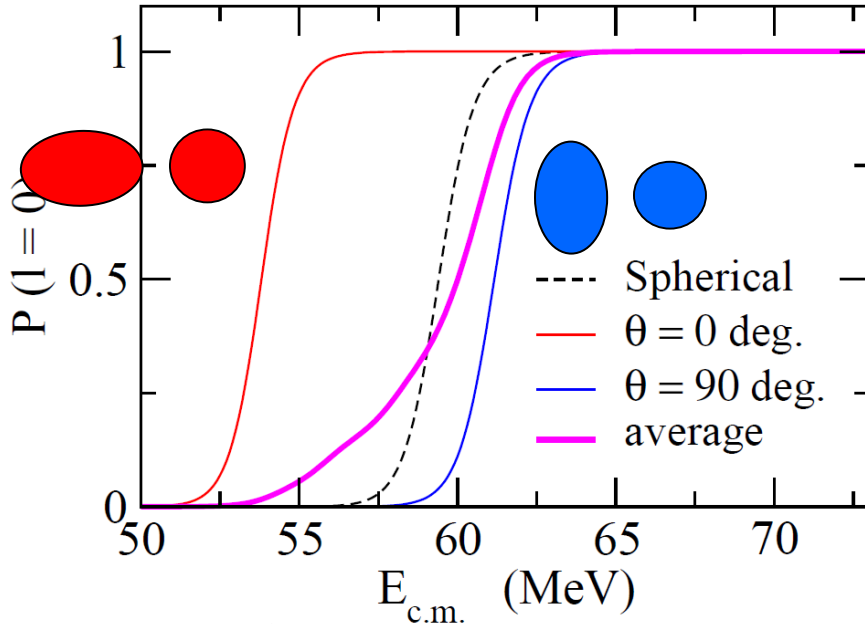
$^{154}\text{Sm}$

$^{154}\text{Sm}$  : 典型的な変形核

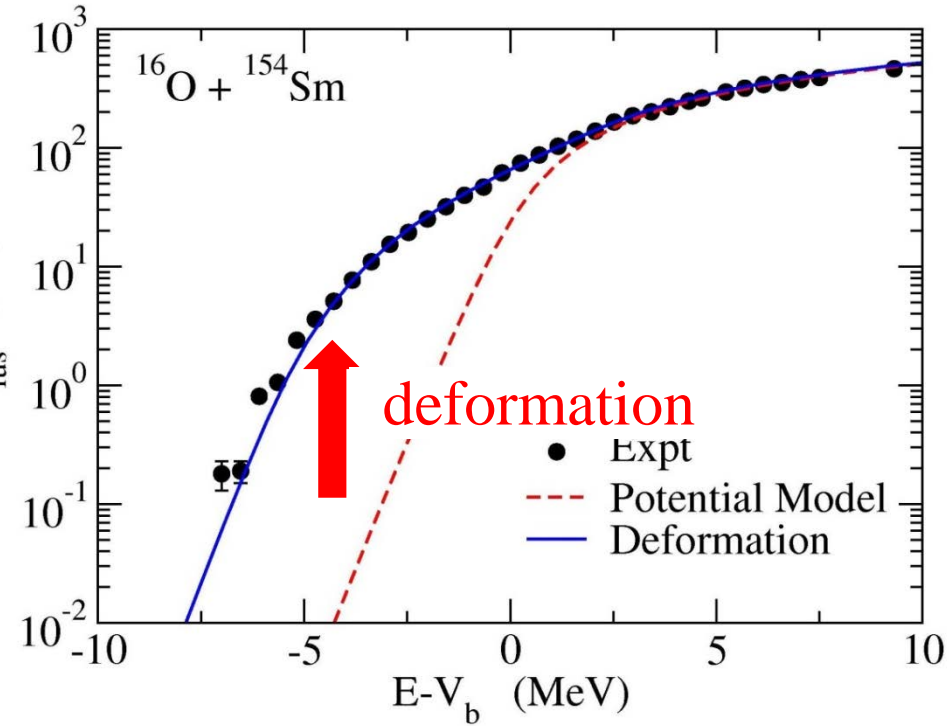


# 原子核の変形の効果

$^{154}\text{Sm}$  : 典型的な変形核

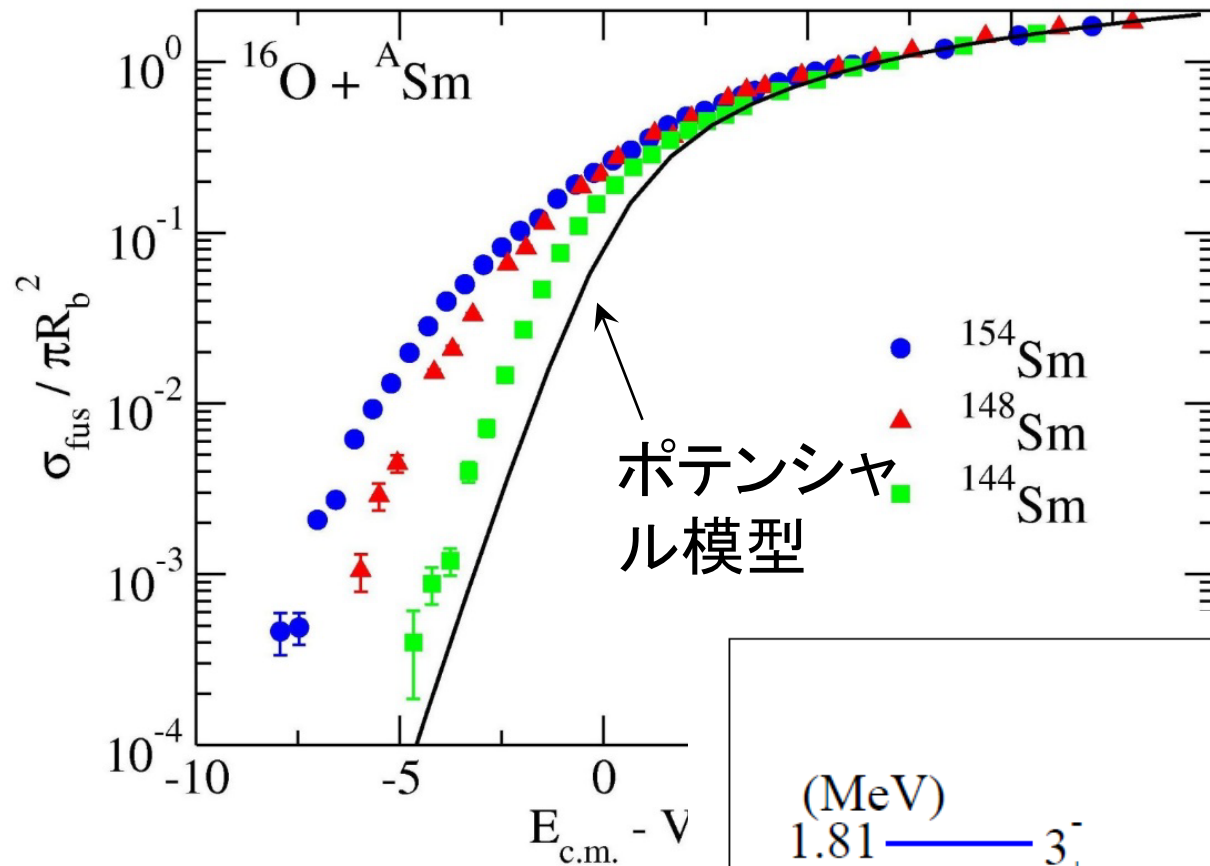


$$\sigma_{\text{fus}}(E) = \int_0^1 d(\cos \theta) \sigma_{\text{fus}}(E; \theta)$$



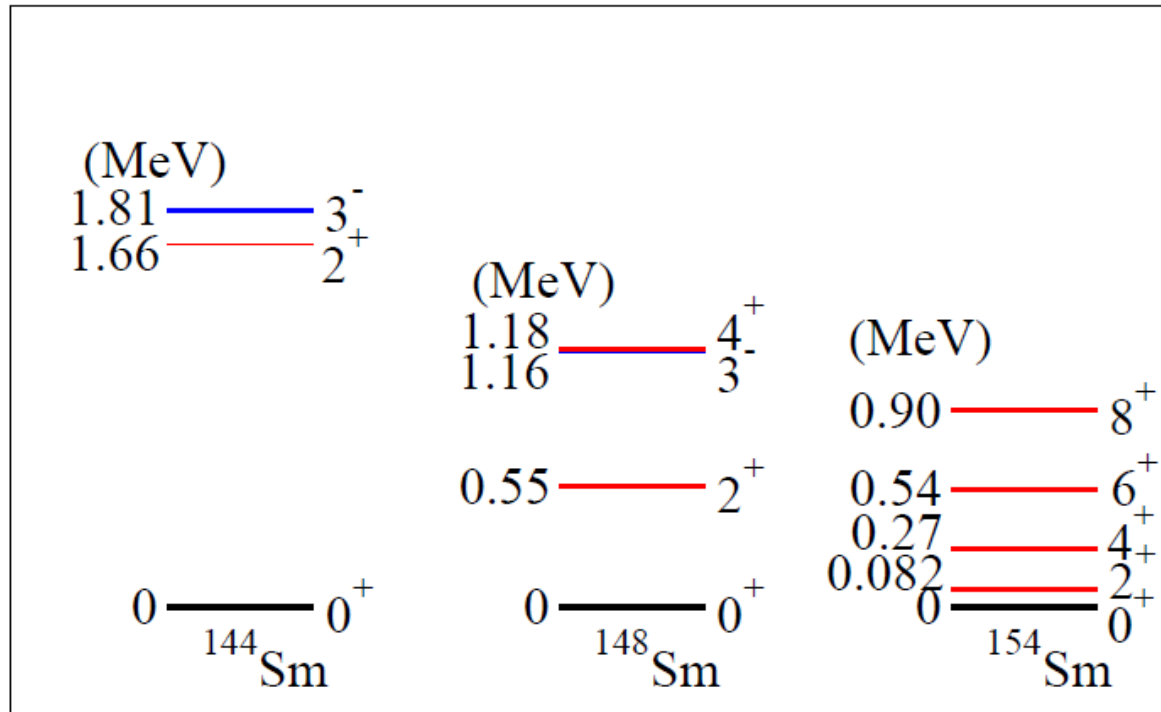
核融合反応: 核構造と核反応の強い結びつき

coupling assisted tunneling



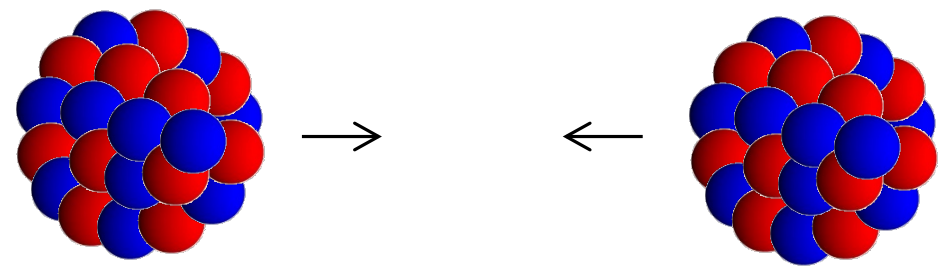
核融合断面積の増幅  
 :他の系でも一般的に

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



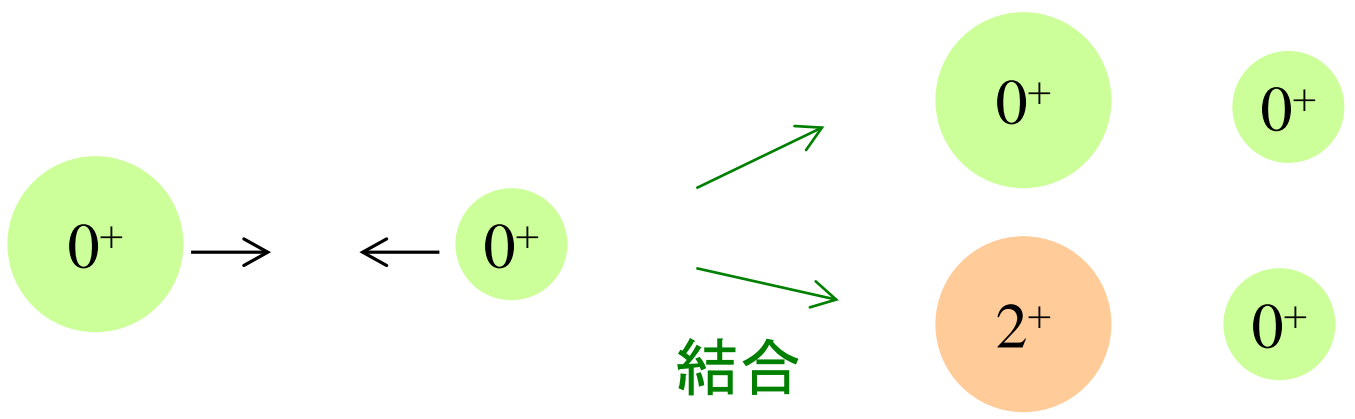
# 結合チャンネル法 : 内部励起を考慮した量子散乱理論

## 多体問題

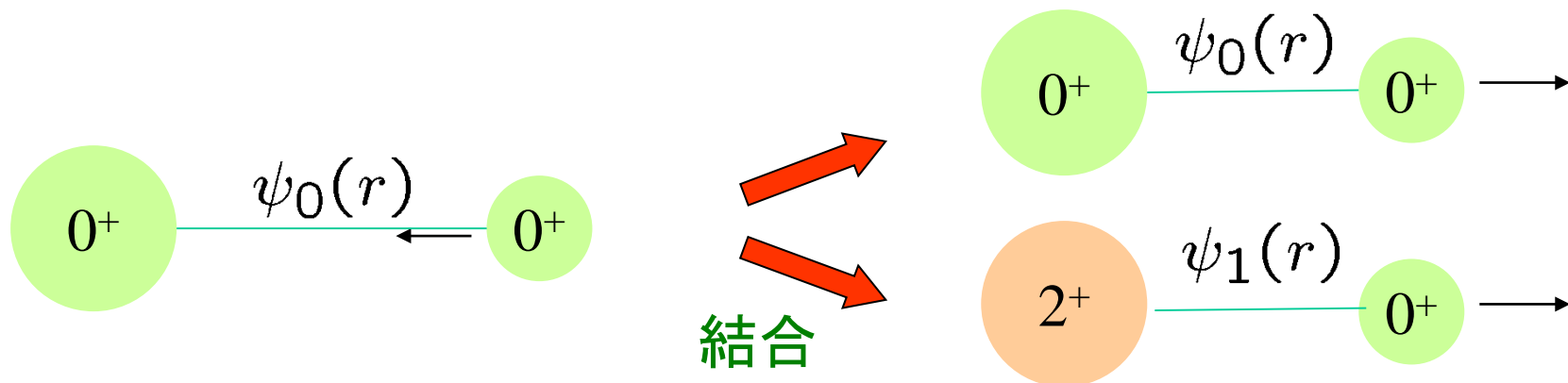


未だに超難問題  
cf. 多粒子トンネルの記述

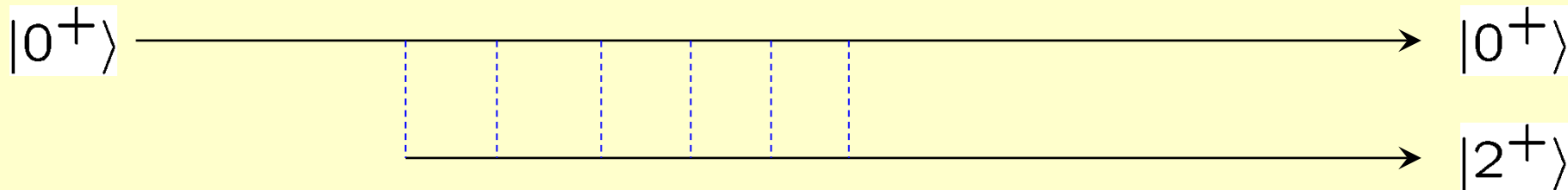
➡ 2体問題 + 原子核の励起 (結合チャンネル・アプローチ)



# 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

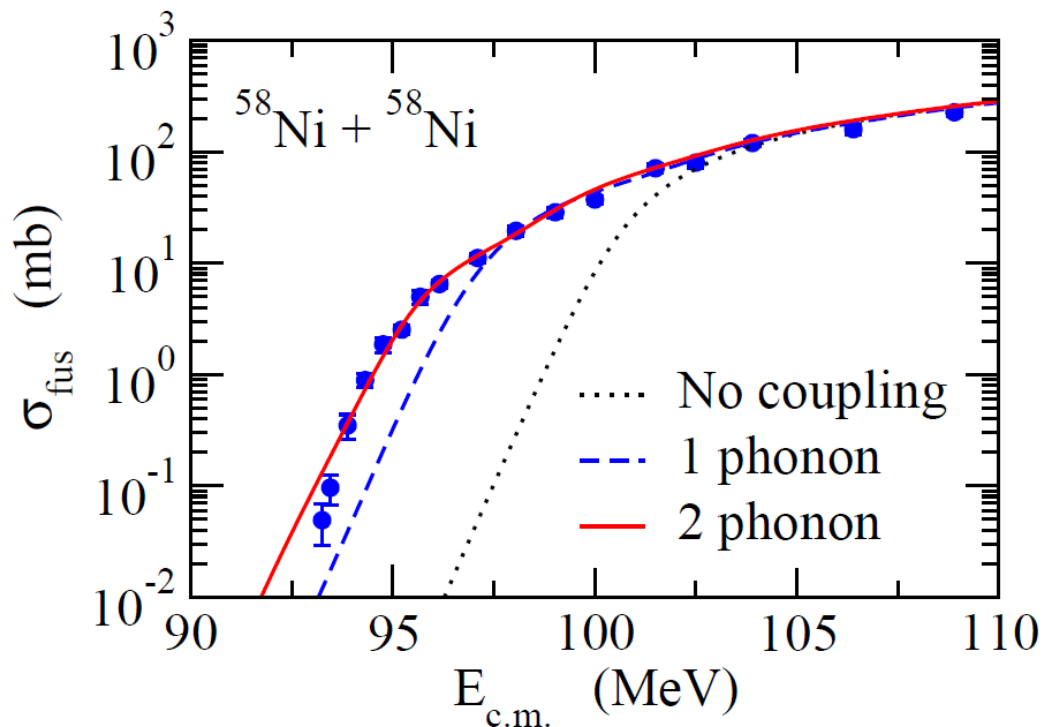
- ✓ 非摂動的 (フルオーダー)
- ✓ 非断熱的 (励起エネルギー)



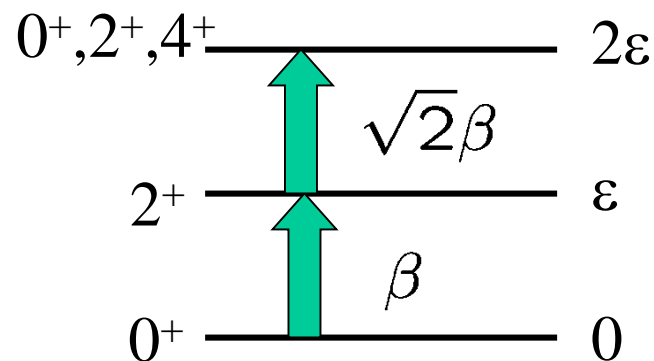
# 結合チャンネル計算のモデル化

- 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
- S. Yusa, K.H., N. Rowley, PRC88 ('13) 044620 など

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

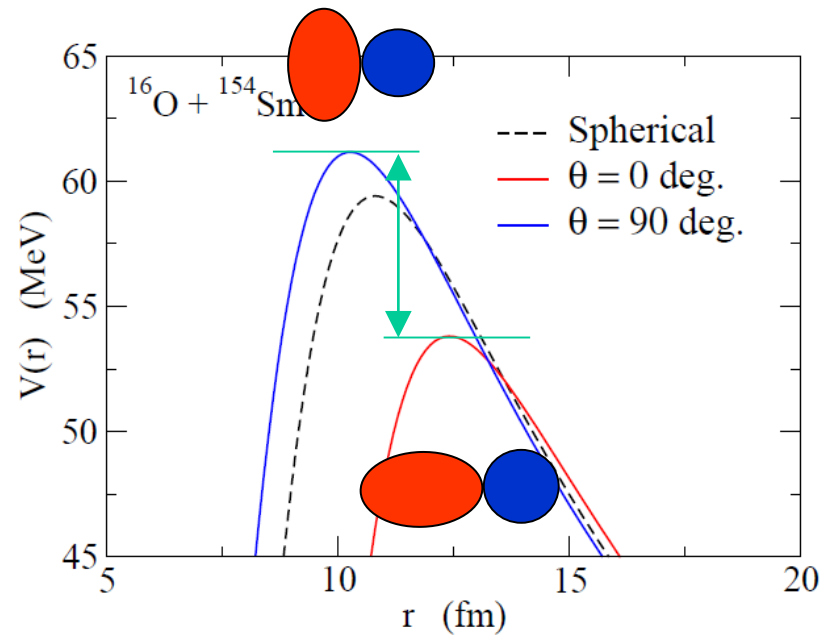
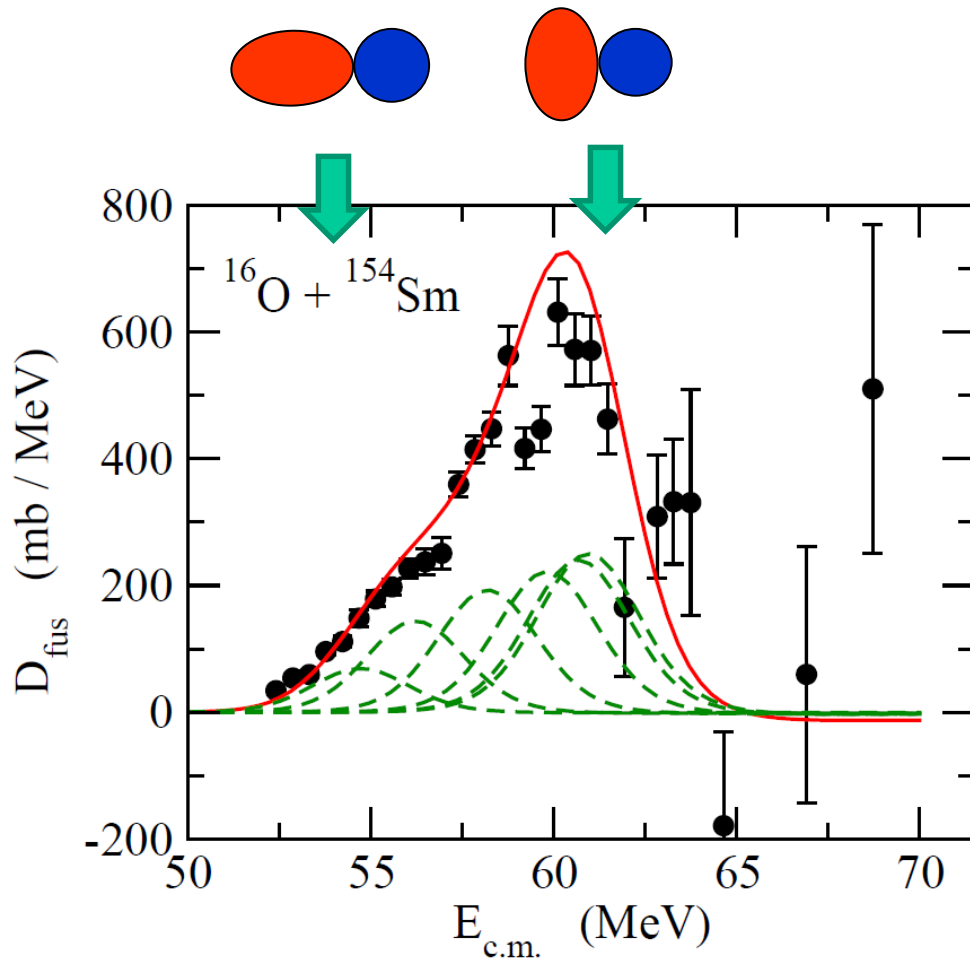


単純な調和振動子



➤ 核融合障壁分布 [Rowley, Satchler, Stelson, PLB254('91)]

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

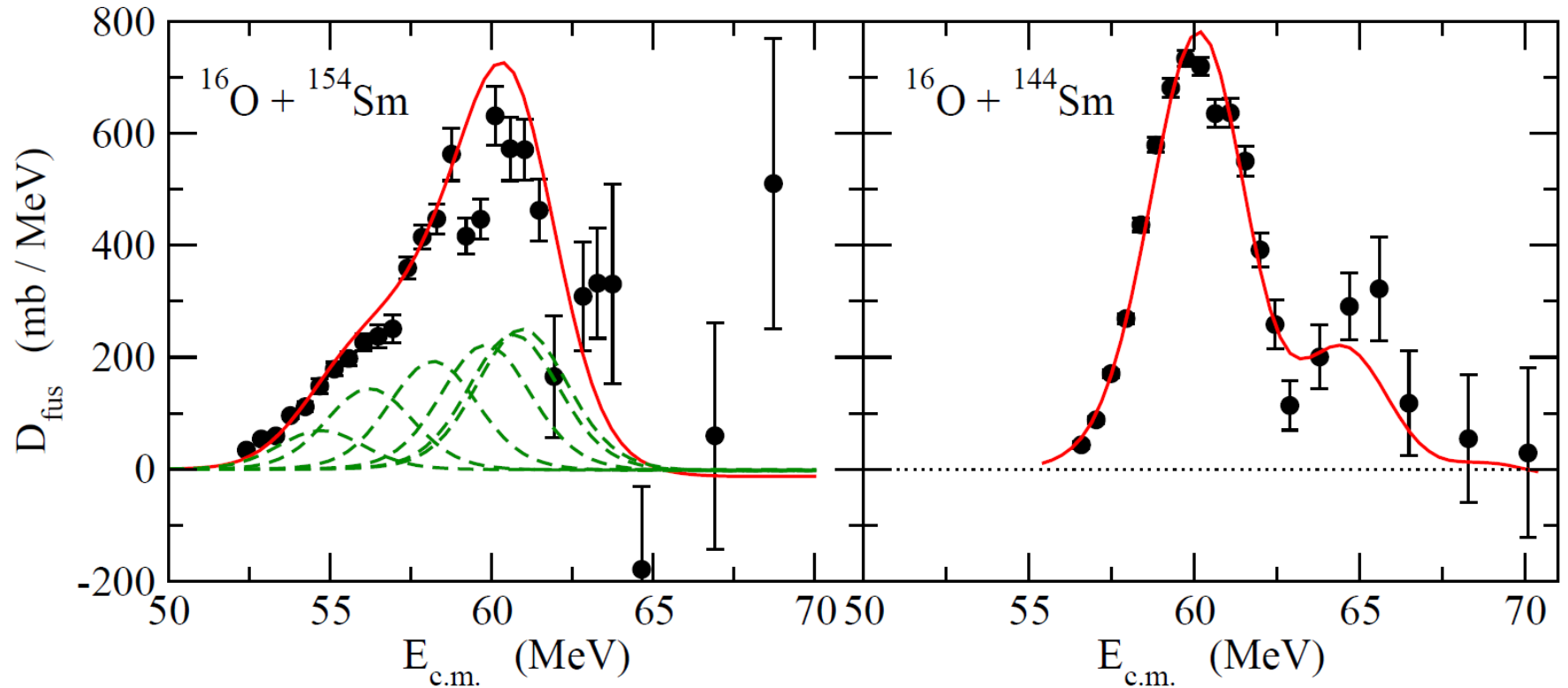


多次元量子トンネル効果に対する有用な方法

▶ 核融合障壁分布 [Rowley, Satchler, Stelson, PLB254('91)]

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

—— 結合チャンネル法



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

\* 表面物理における解離吸着への応用も (K.H., PTP128)

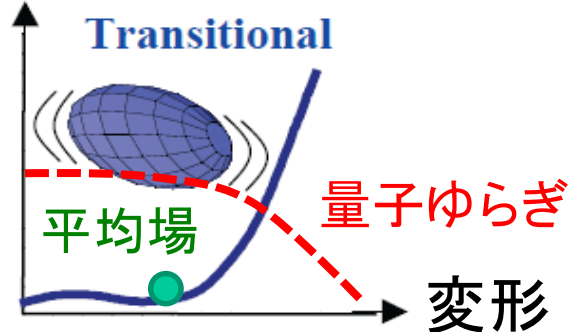
# 更なる発展: 核構造計算を用いた半微視的結合チャンネル計算

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

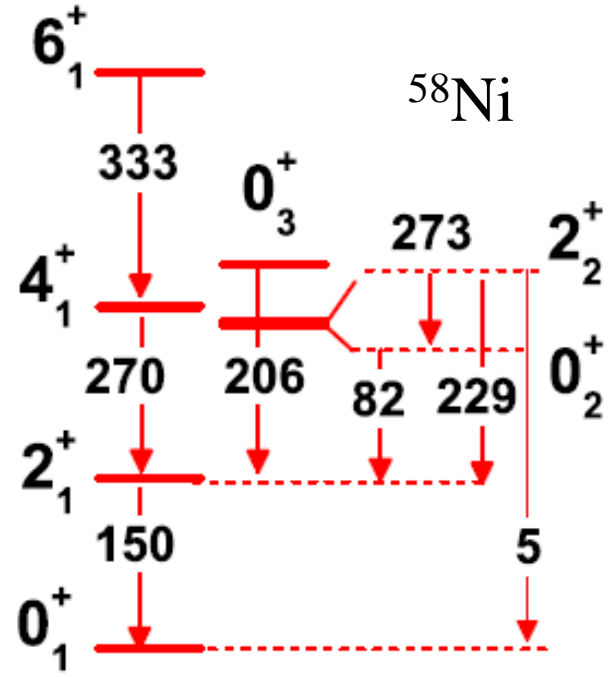
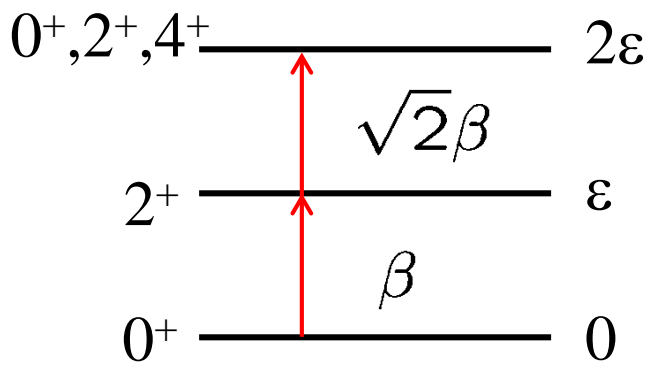
## 結合チャンネル

### + 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)



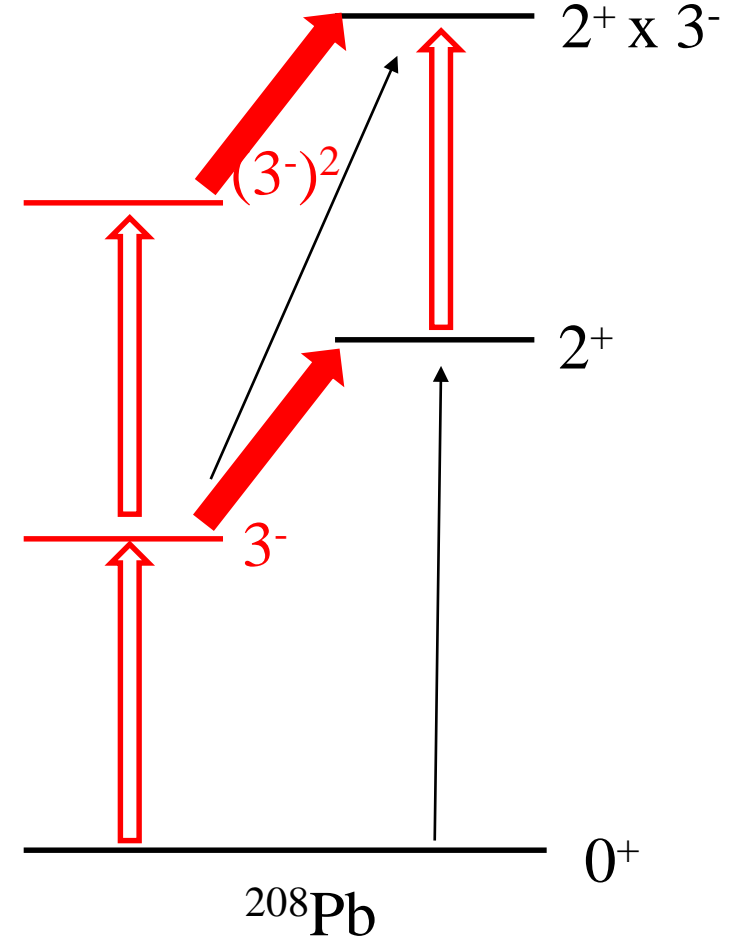
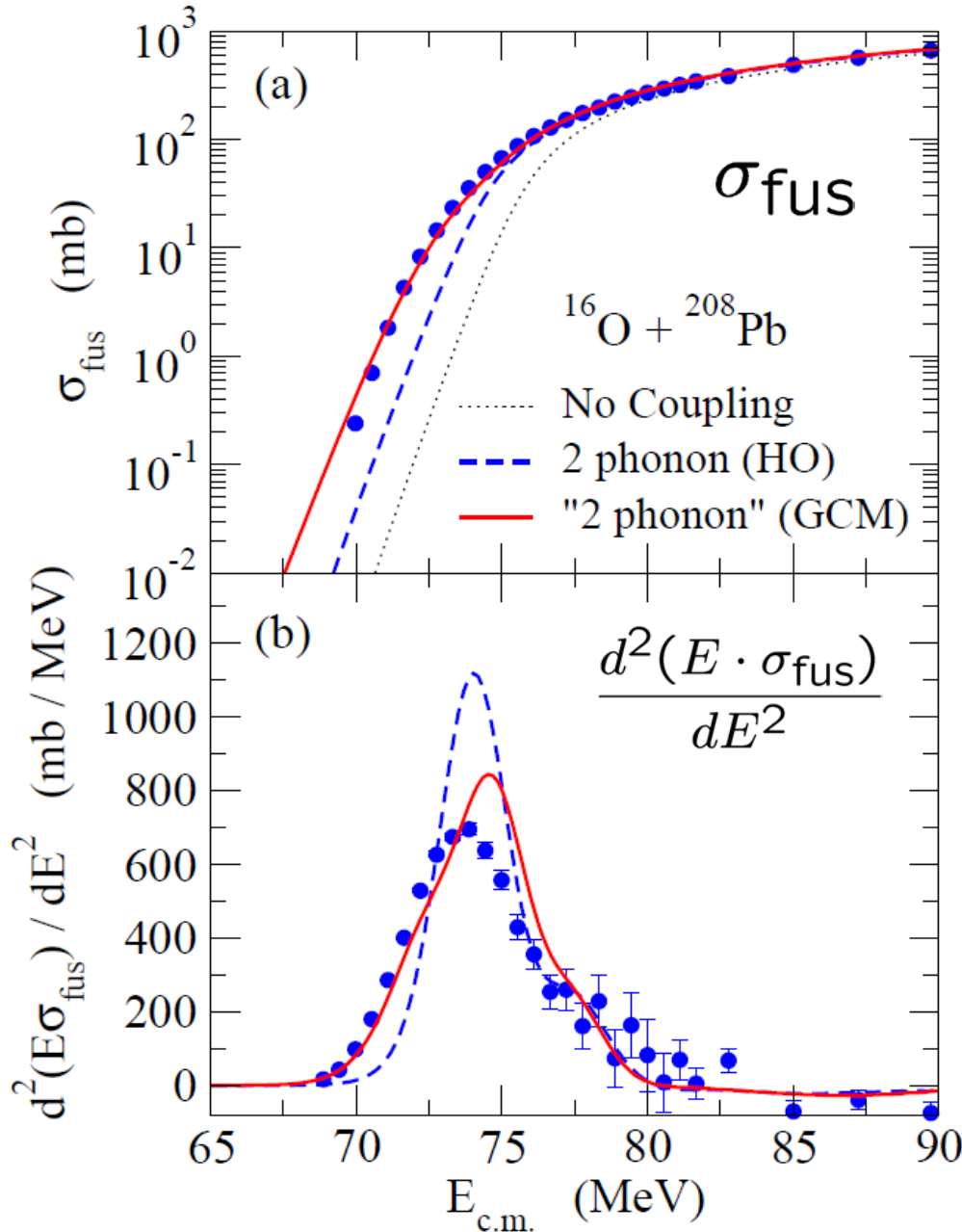
### 単純な調和振動子



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

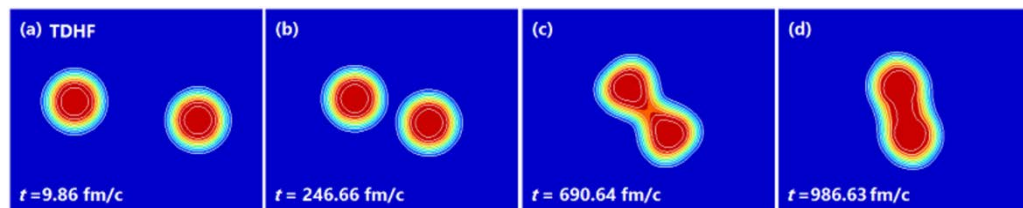
微視的核構造計算を  
インプットとする  
結合チャンネル計算

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

TDHF シミュレーション

微視的

TDHF = Time Dependent Hartree-Fock  
~ Time Dependent DFT



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

第一原理的、しかし、トンネルは記述できない

# 現象論的アプローチから微視的模型へ

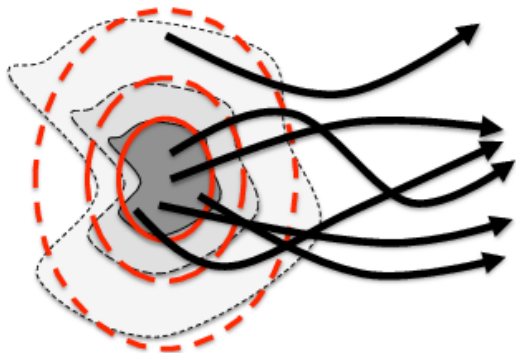
## TDHF シミュレーション

第一原理的、  
しかし、トンネルは記述できない

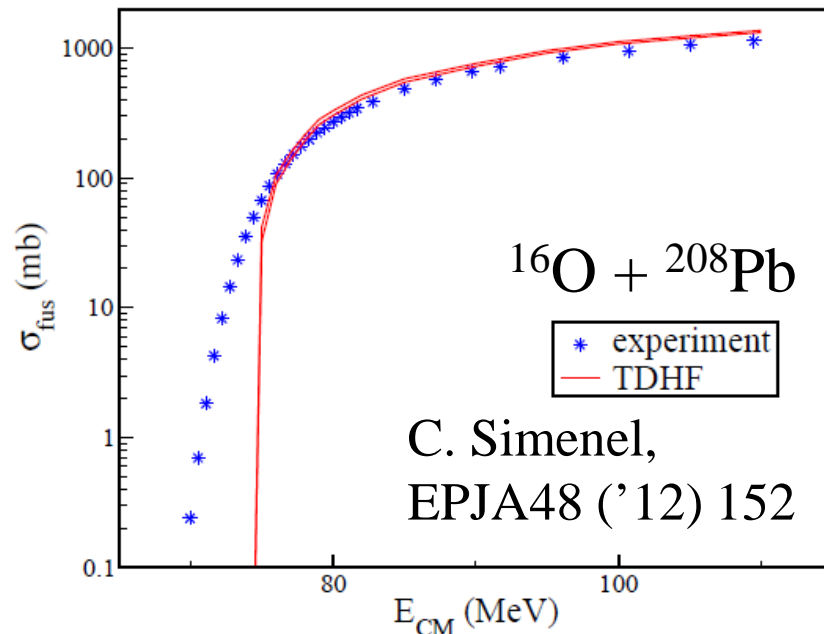
➤「平均場を超えた取り扱い」

時間に依存した生成座標法

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



→ 多体系のトンネル現象?



複数の「古典軌道」の重ね合わせ  
としてダイナミクスを記述

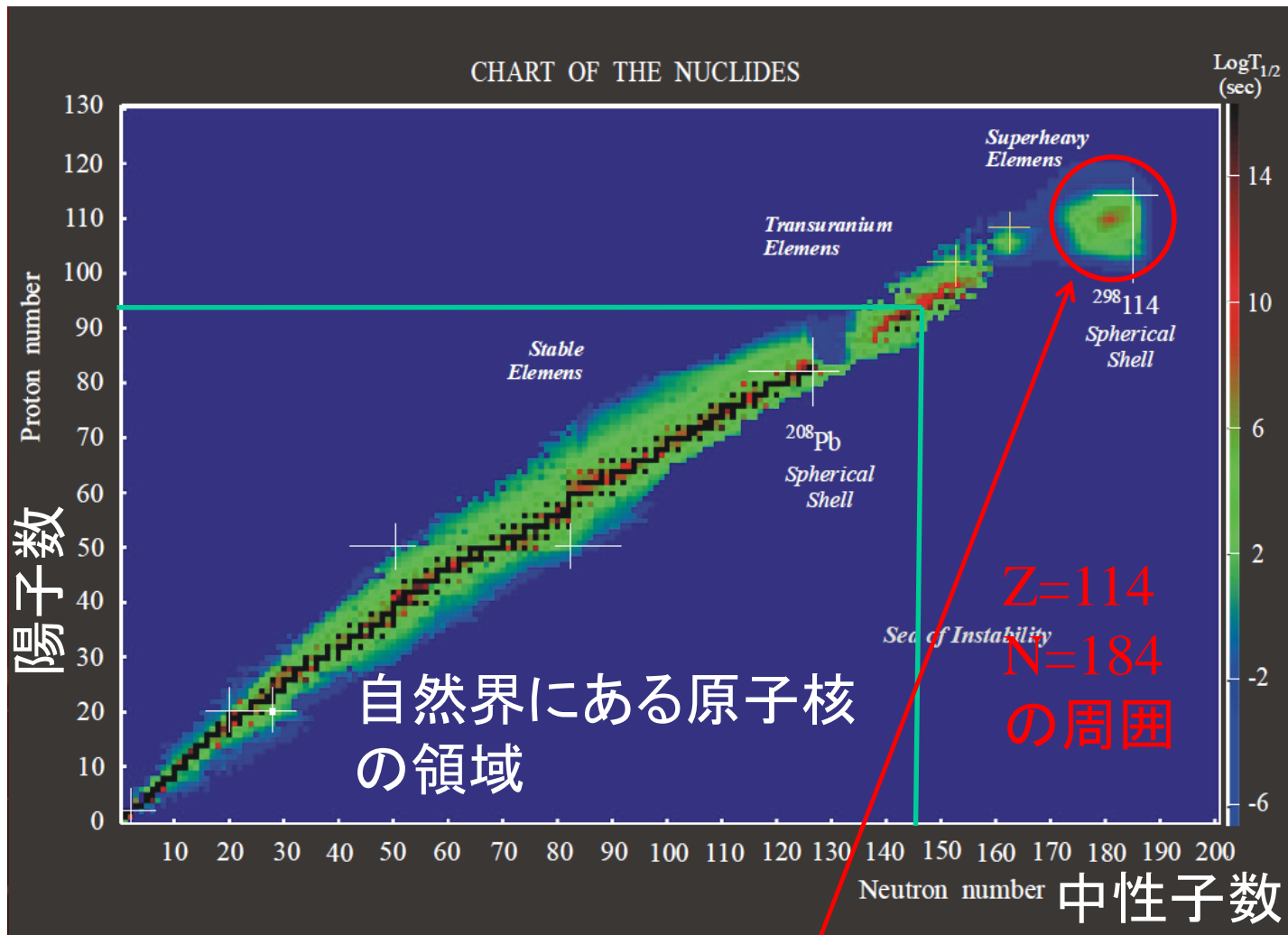
cf. Stochastic mean-field method

B. Yilmaz et al.,

PRC90 ('14) 054617

現在、プロジェクトを推進中  
(K.H. and N. Hasegawa)

# 今後の展望：超重元素合成反応



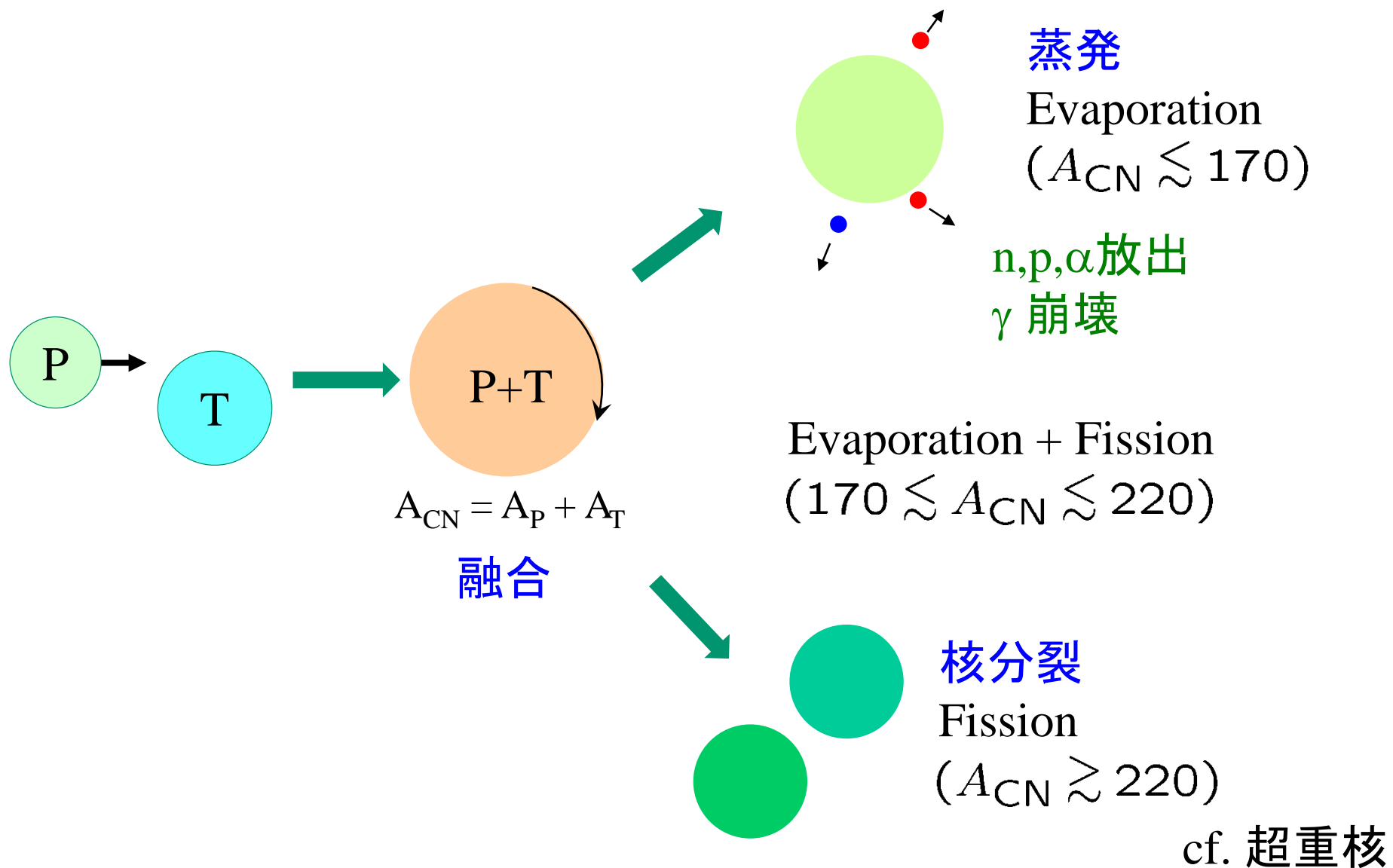
原子核の安定領域の理論的予言  
(1966年：スビアテッキら)

Yuri Oganessian



# 今後の展望: 超重元素合成反応

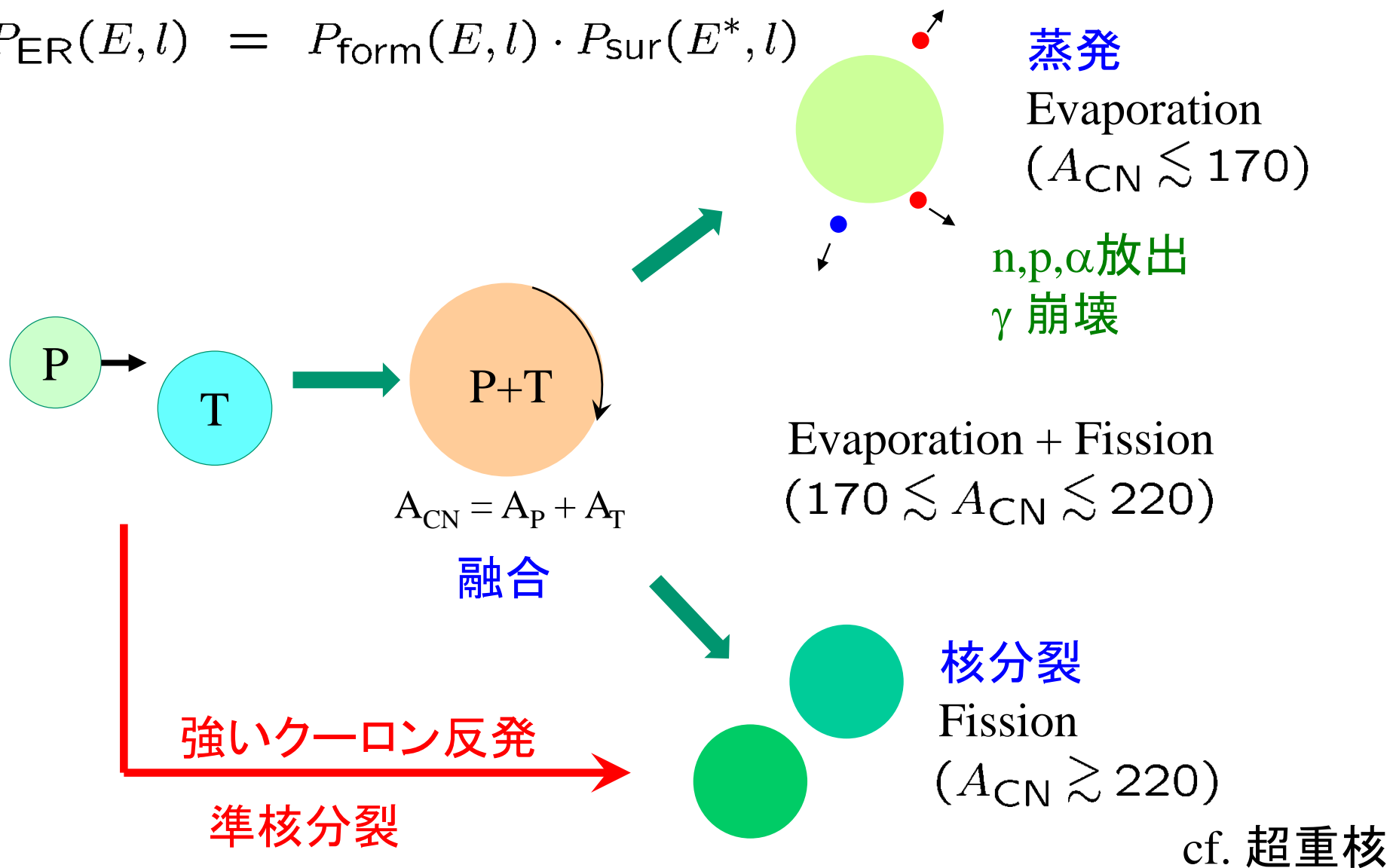
$$P_{\text{fus}}(E, l) = P_{\text{form}}(E, l)$$

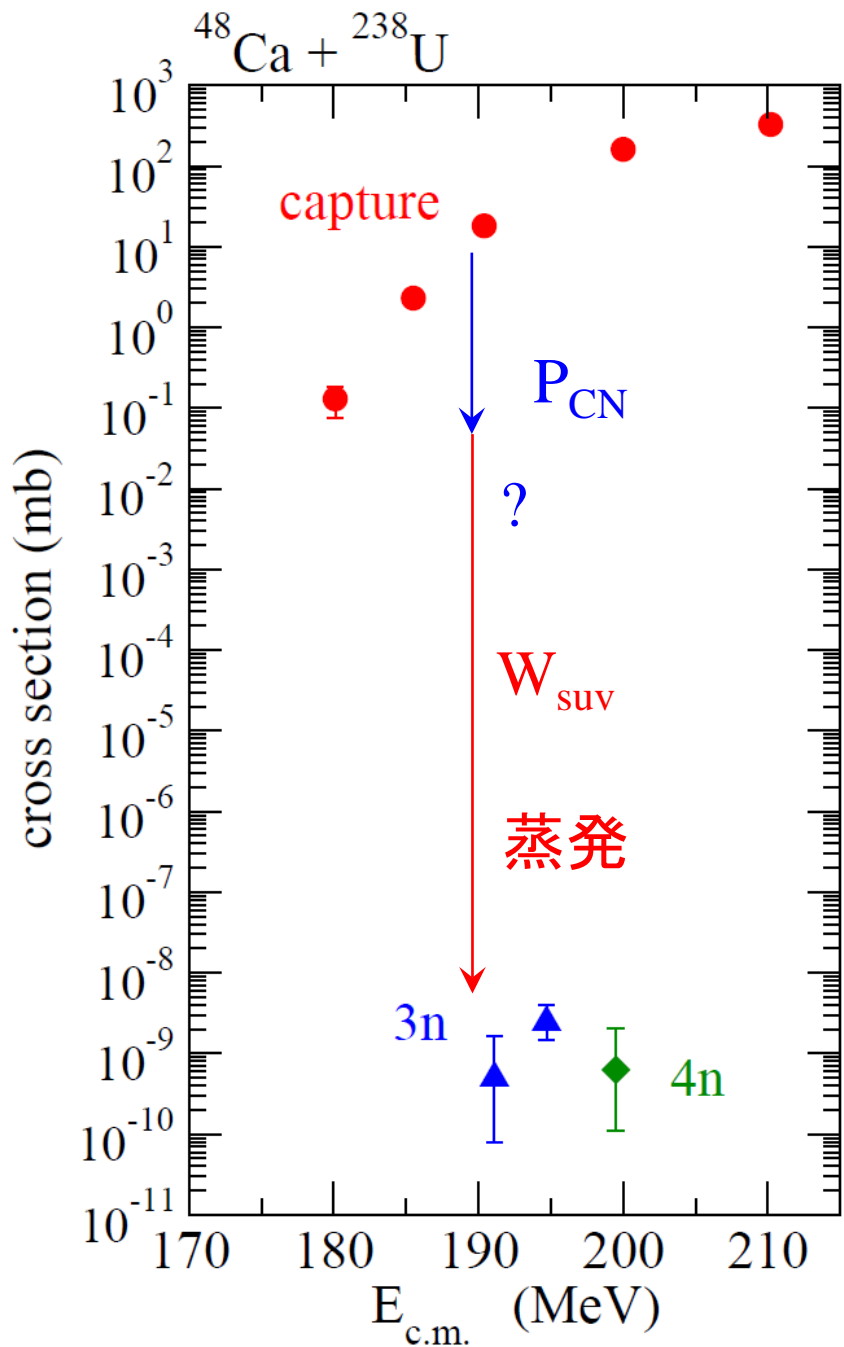


# 今後の展望: 超重元素合成反応

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

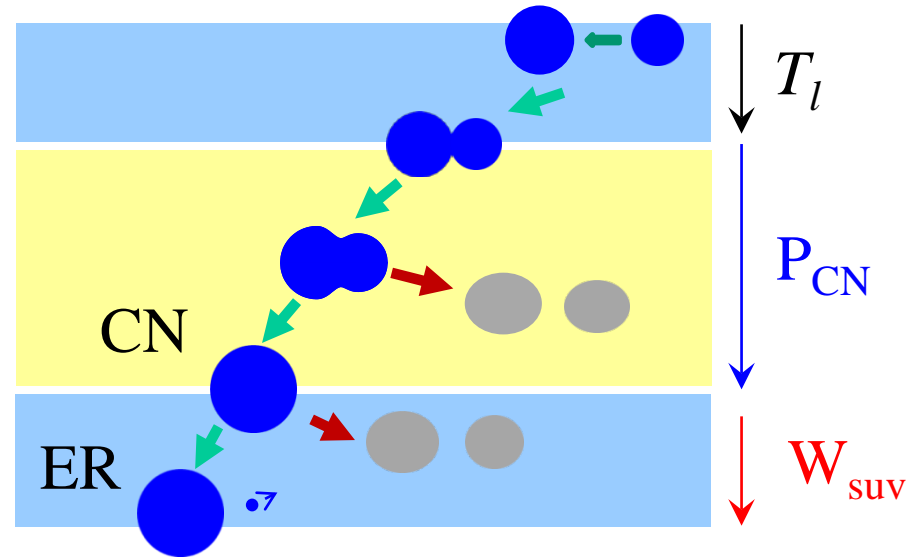
$$P_{\text{ER}}(E, l) = P_{\text{form}}(E, l) \cdot P_{\text{sur}}(E^*, l)$$





超重元素の生成  
: 非常に稀な過程

→ 大きな理論的不定性



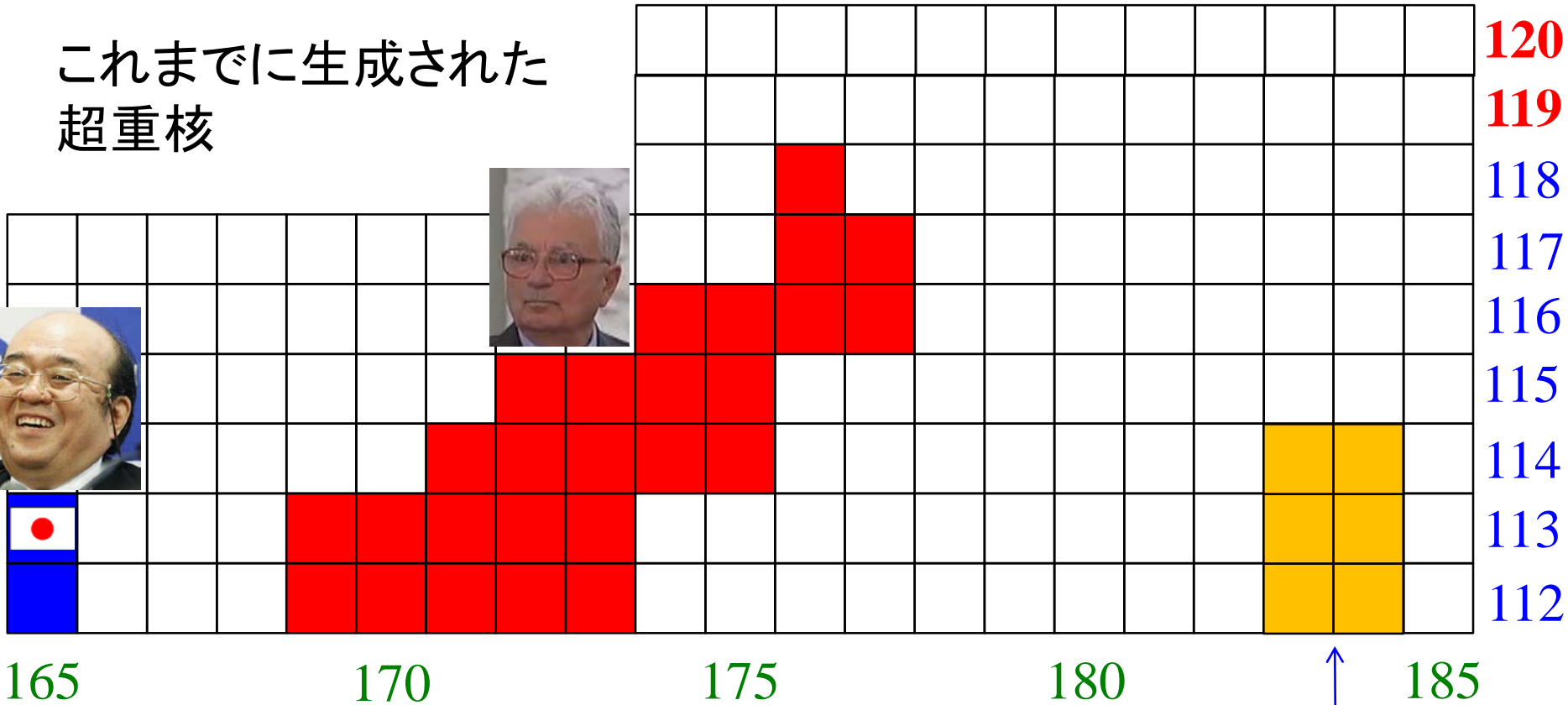
CN=複合核、ER=蒸発残留核

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できるか?

# 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

$^{48}_{20}\text{Ca}$  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?

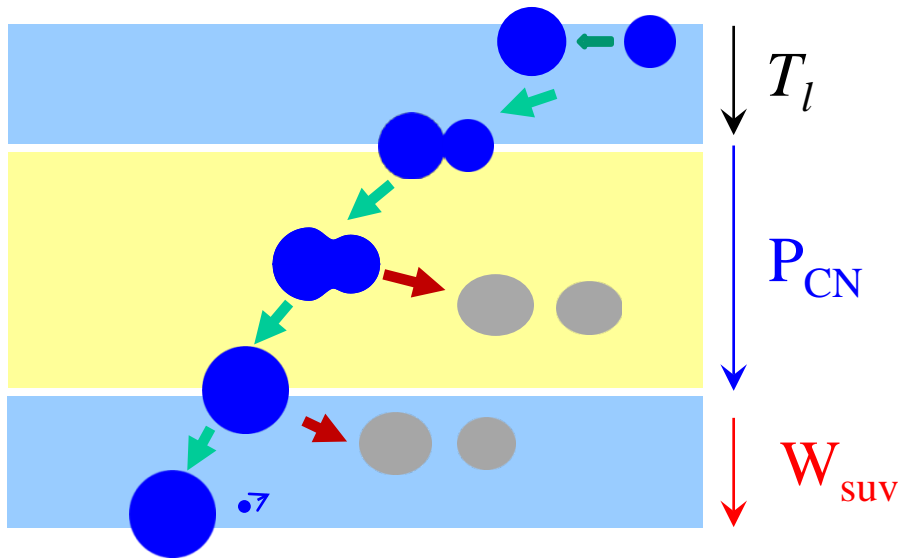
安定の島?

# 今後の研究の方向性－1

➤  $Z=119$  及び  $120$  核に向けて

$^{48}\text{Ca}$  や  $^{50}_{22}\text{Ti}$  などの入射核＋**変形**標的核を用いた核融合反応

超重元素合成反応に対する変形(核構造)の効果の正しい理解



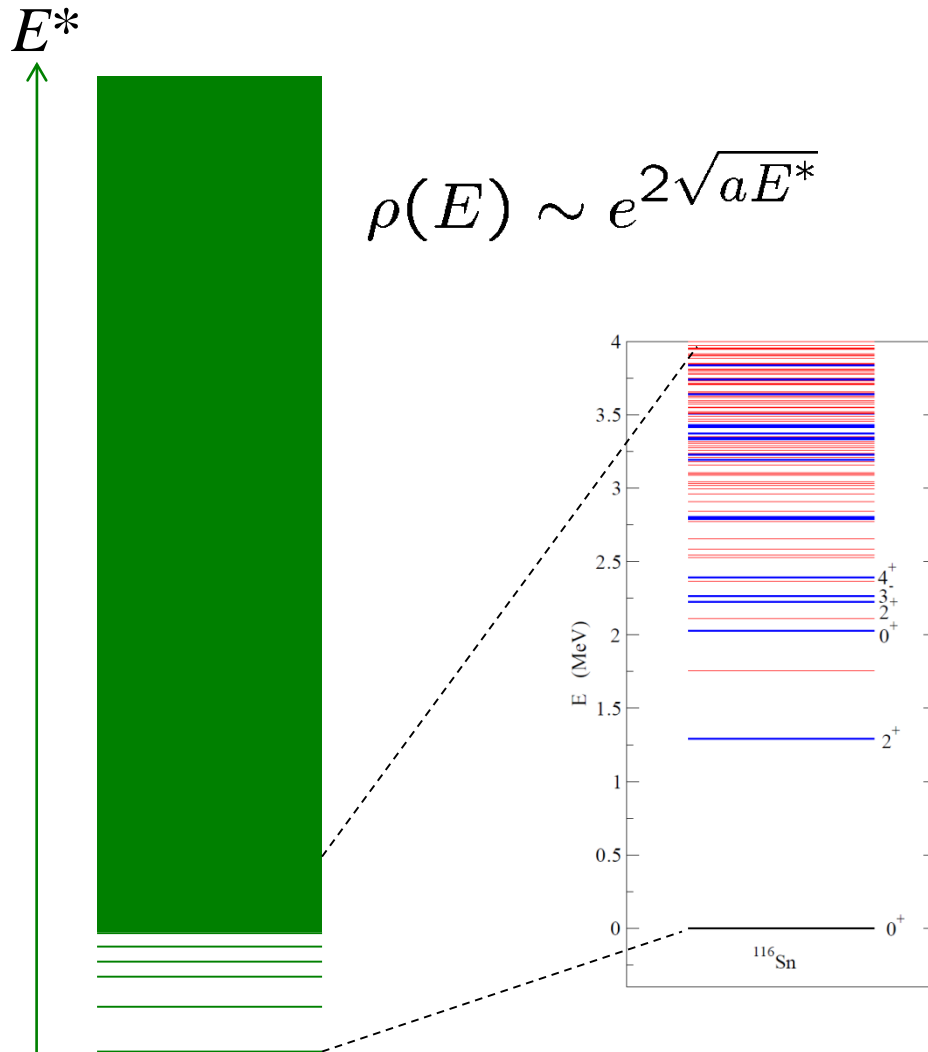
✓ **第一ステップ**

**摩擦の量子論**

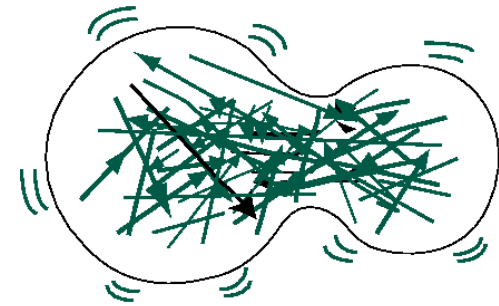
✓ **第二ステップ**

$P_{\text{CN}}$  に対する変形効果?

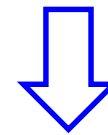
# 原子核の摩擦と重イオン核融合反応



原子核のスペクトル



これらの無数の状態は核反応の途中で複雑に励起



原子核の内部自由度は核反応に対して「環境」のように振舞う

「内的環境自由度」

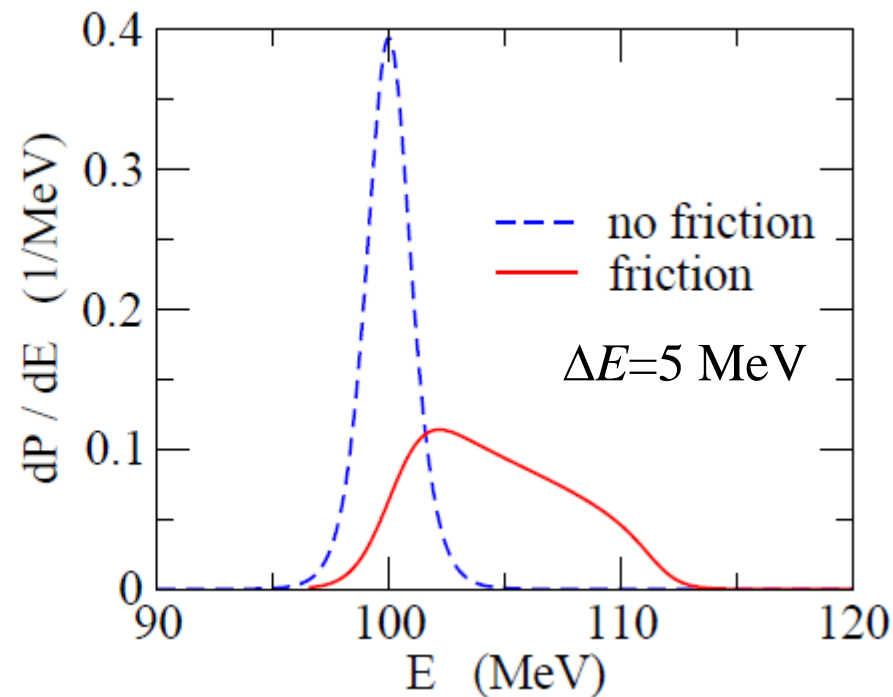
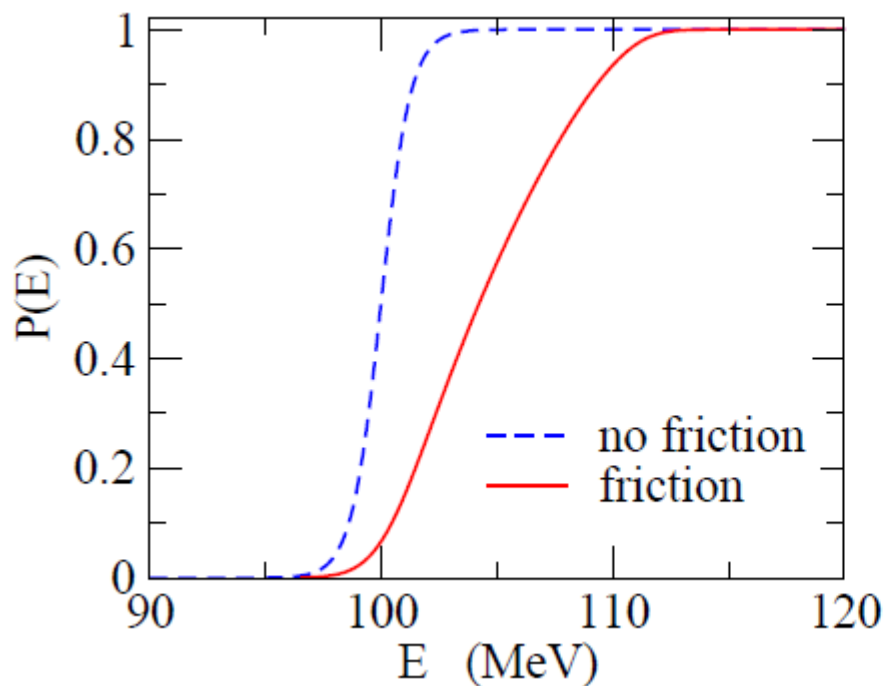
→ 摩擦

# 摩擦の量子論

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

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

## 時間に依存する波束計算

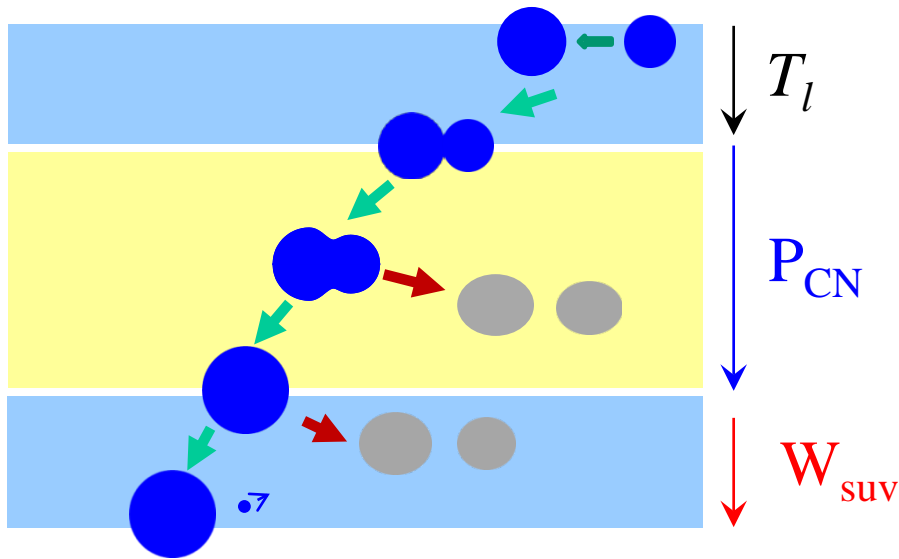


# 今後の研究の方向性－1

➤  $Z=119$  及び  $120$  核に向けて

$^{48}\text{Ca}$  や  $^{50}_{22}\text{Ti}$  などの入射核＋**変形**標的核を用いた核融合反応

超重元素合成反応に対する変形(核構造)の効果の正しい理解

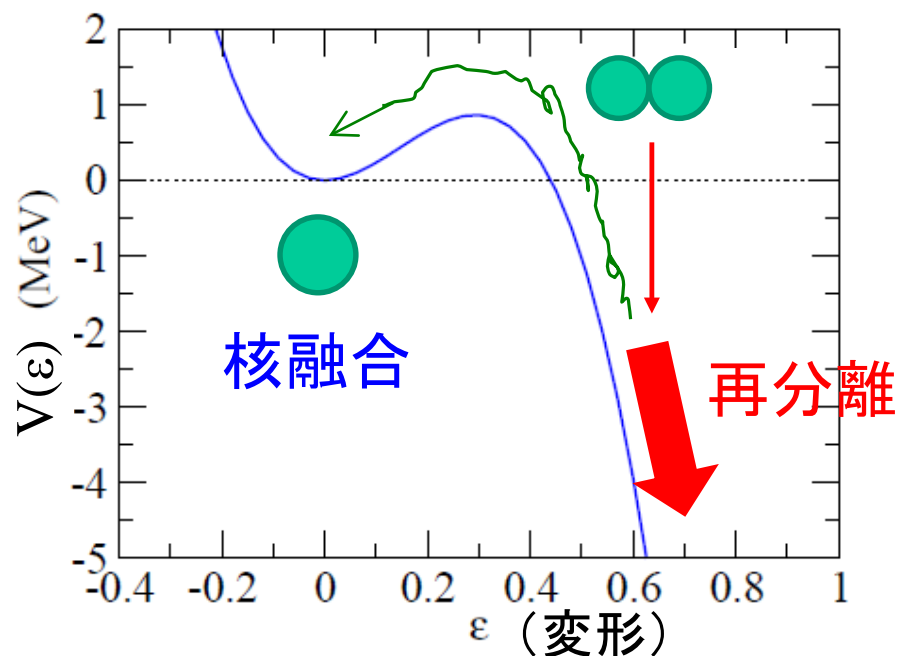


✓ 第一ステップ  
摩擦の量子論

✓ 第二ステップ  
 $P_{\text{CN}}$  に対する変形効果?



# 核融合反応とランジュバン方程式



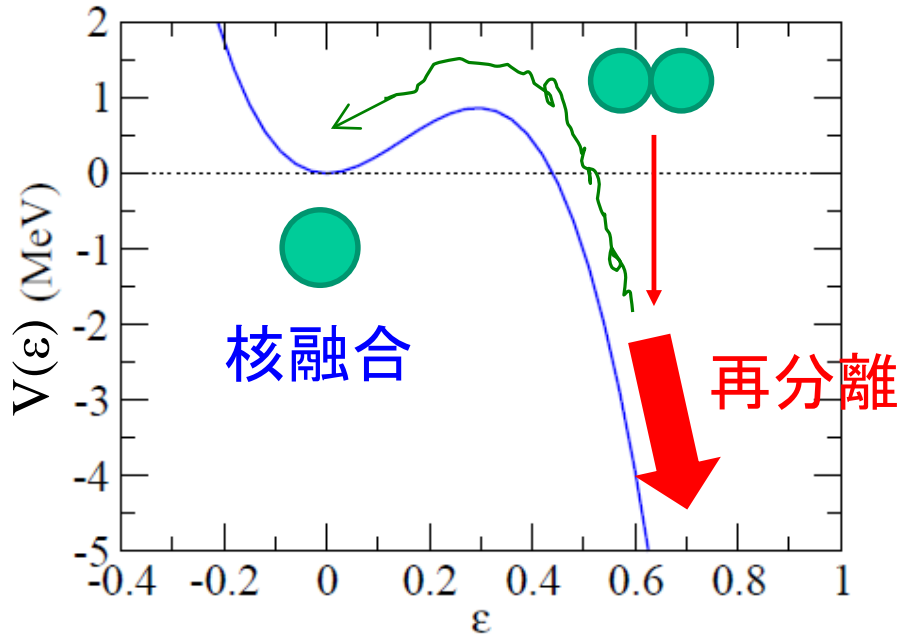
熱的拡散

→ ランジュバン法  
(ブラウン運動)

ゆらぎのダイナミクス  
= 非平衡統計力学

# 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

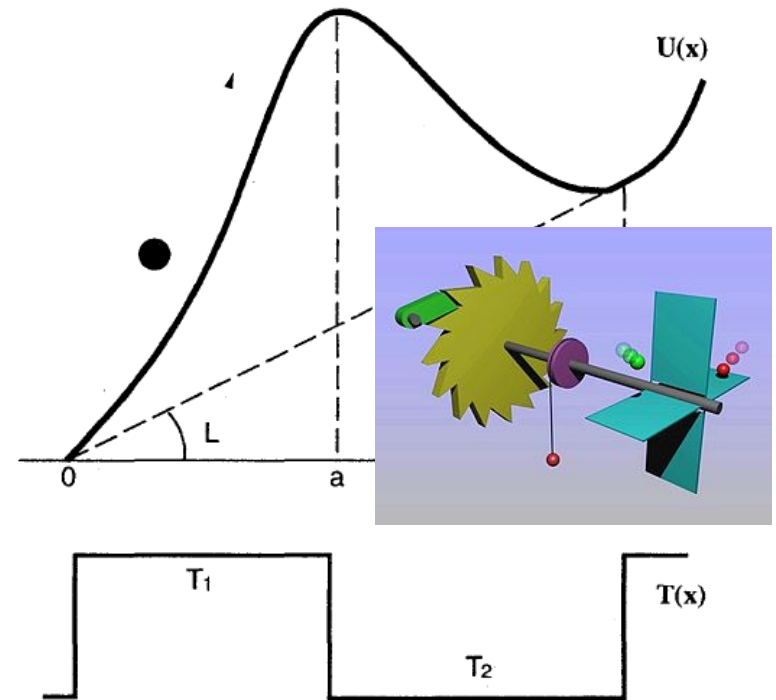
## ➤ 超重核合成反応



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

← 座標に依存する温度

## ➤ 分子モーターに対する数理モデル



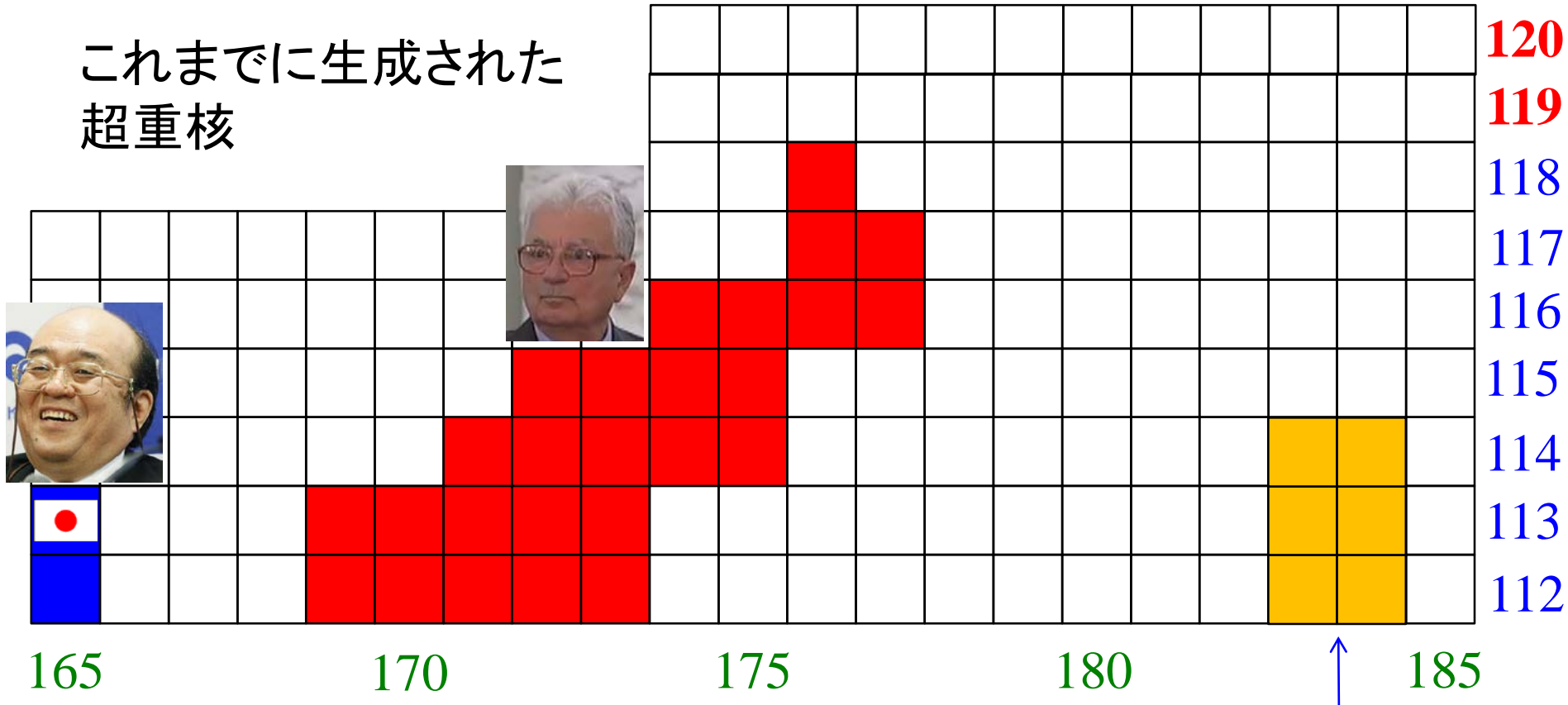
松尾美希、物性研究 73 ('99) 557

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

# 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

$^{48}\text{Ca}$  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

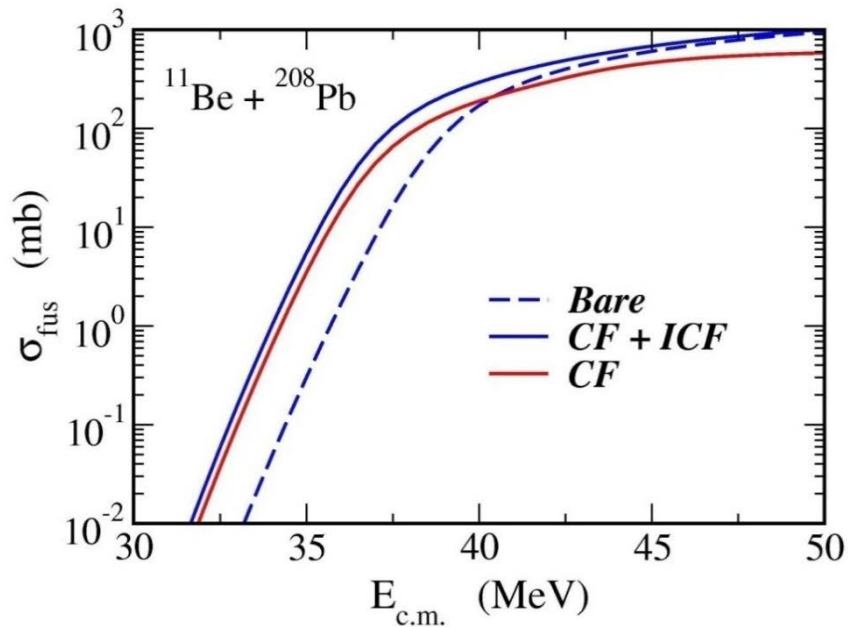
中性子過剰核ビームを用いた実験が必要不可欠 → 反応機構?

安定の島?

## 今後の研究の方向性-2

### ➤ 安定の島に向けて

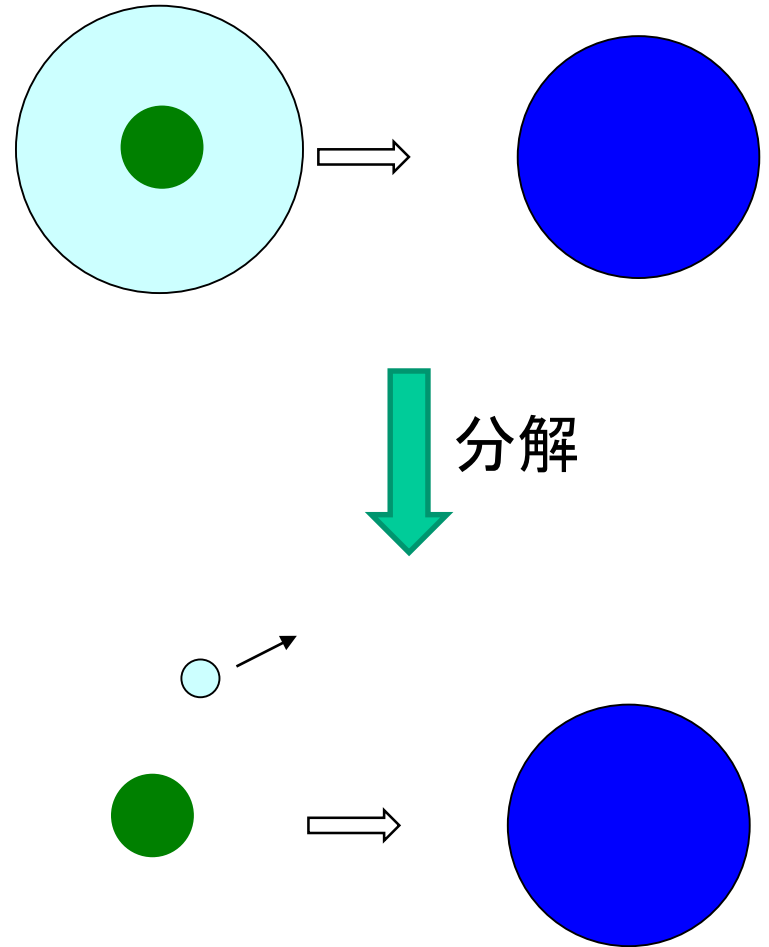
中性子過剰核ビームを用いた  
実験が必要不可欠



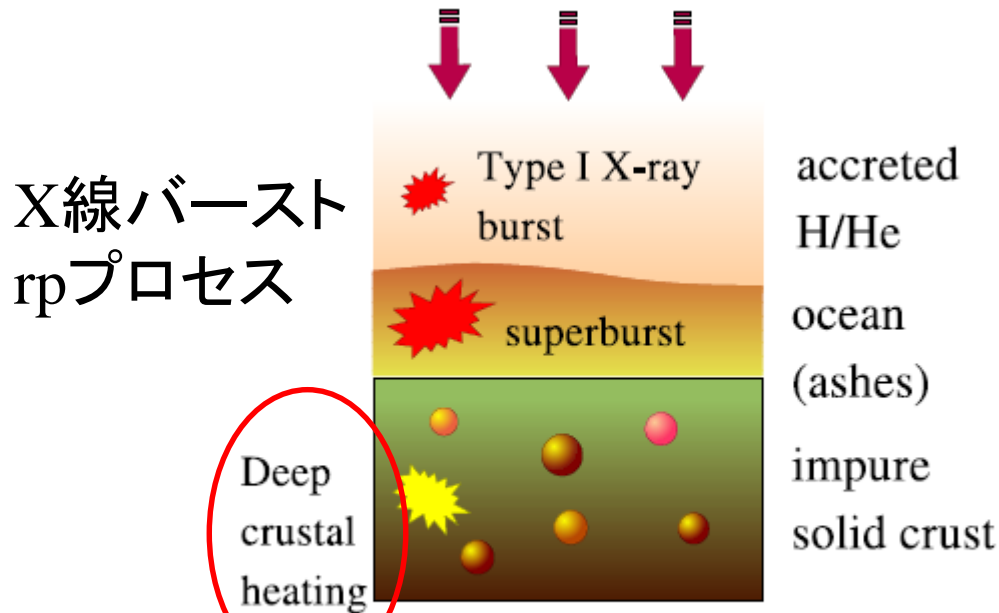
K. Hagino, A. Vitturi, C.H. Dasso,  
and S.M. Lenzi, Phys. Rev. C61 ('00) 037602

反応機構の理解(分解、核子移行、融合)

中性子過剰核=弱束縛

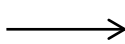


# 質量降着を伴う中性子星で起こる 中性子過剰核の核融合反応



Accreting neutron

中性子過剰核の核融合反応

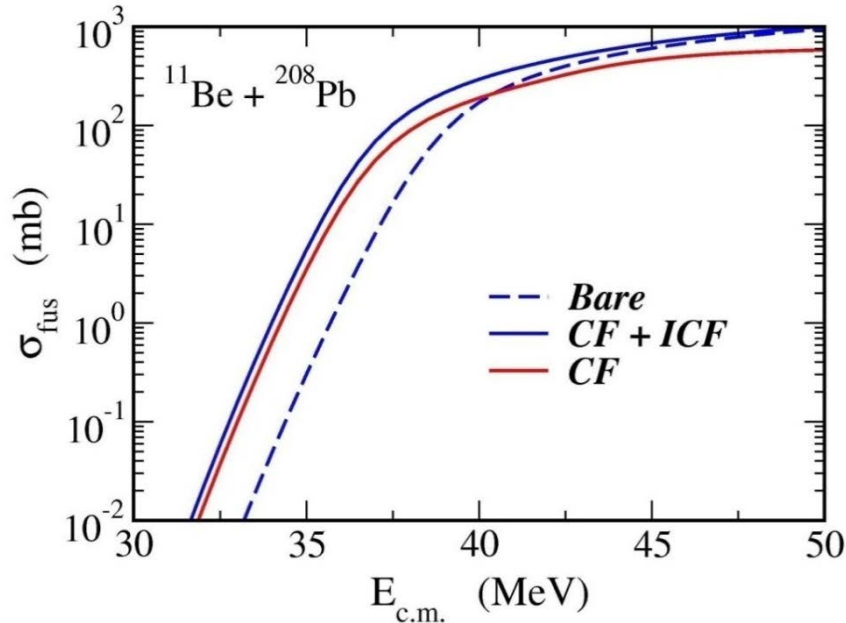


X線連星の静穏期  
におけるX線の起源

## 今後の研究の方向性-2

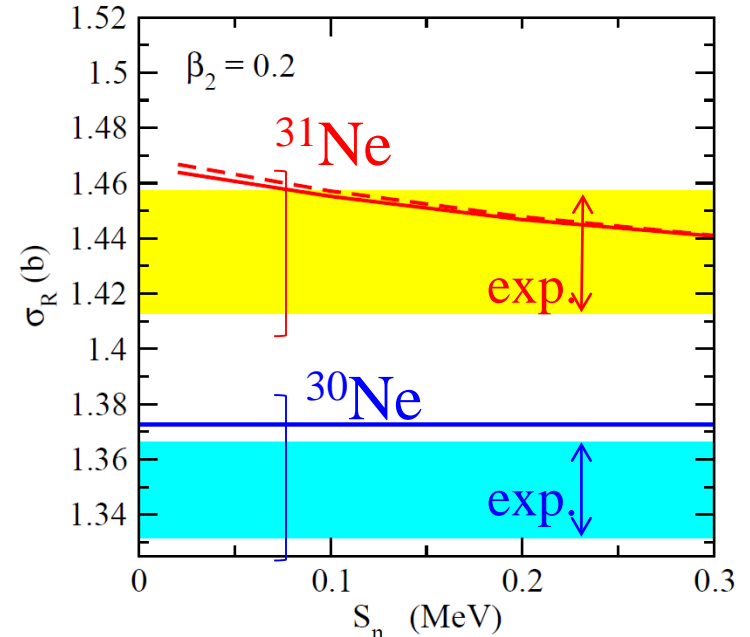
### ➤ 安定の島に向けて

中性子過剰核ビームを用いた  
実験が必要不可欠



+

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

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

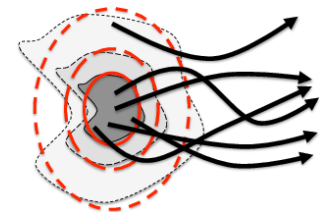
# まとめ

## 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、インタープレイ
- ✓ 種々の内部自由度を持つ系の量子トンネル現象  
coupling assisted tunneling
- ✓ 結合チャンネル法の発展：半微視的結合チャンネル法

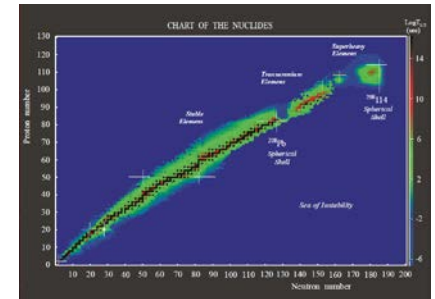
## 残された課題

- ✓ 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



- 温度勾配の下でのランジュバン・ダイナミクス
- 中性子過剰核を軸にした超重核の物理の探究

Back-up slides



# FUSION20

November 16-20, 2020

Shizuoka, Japan

Kouichi Hagino (co-chair) Tohoku University

Katsuhisa Nishio (co-chair) JAEA



# 物理、天文、化学の有機的な連携による重い元素の探究 (超)重元素=強いクーロン場の量子ラボラトリー

## A. 超重元素を作る

A01 新元素の合成  
A02 低速RI  
A03 第3ピーク核

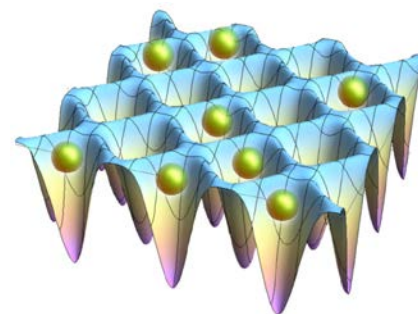
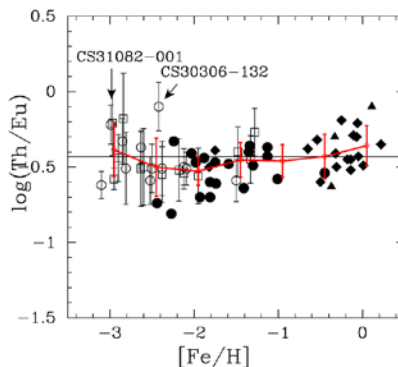
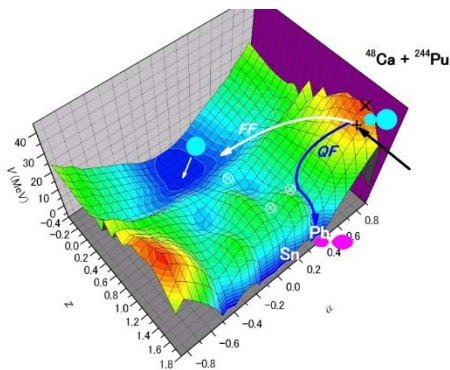
## B. (超)重元素を知る

B01 天文観測  
B02 中性子過剰核  
B03 電子構造

## C. (超)重元素を使う

C01 基礎物理  
C02 化学と物性

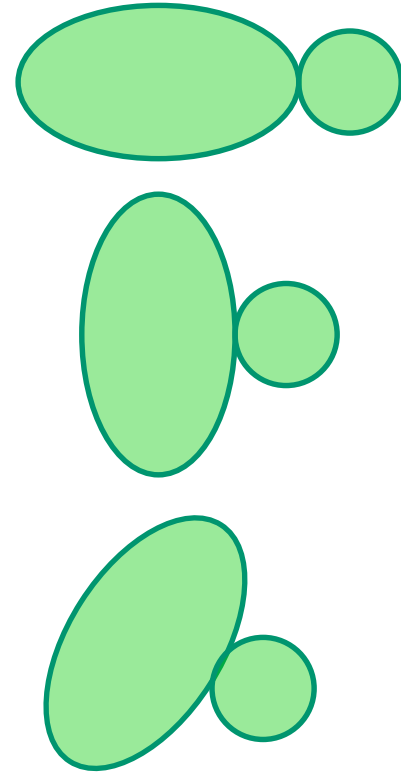
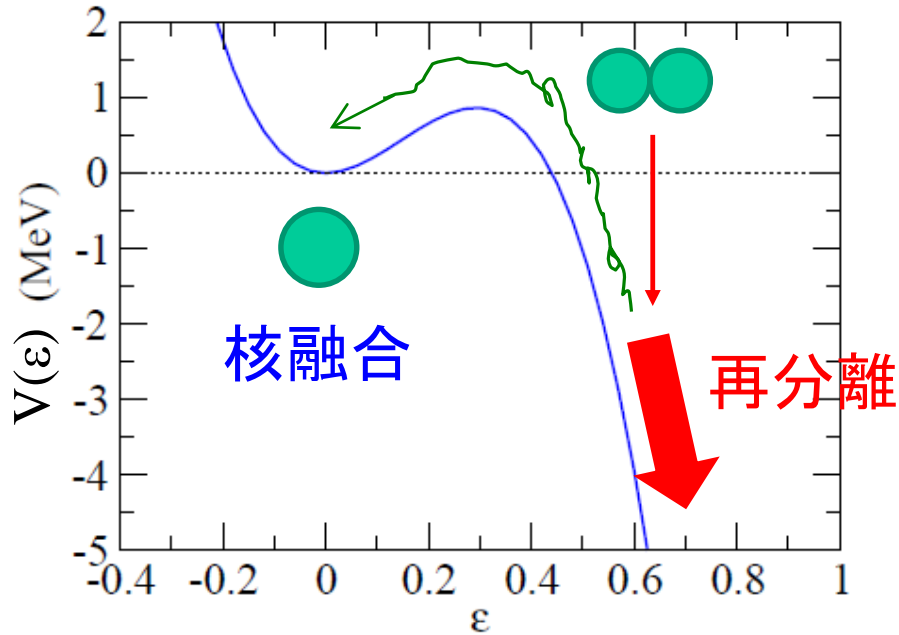
## D. 理論



**超重元素科学の創生**

新しい元素像の構築

# 変形核の核融合反応



## 未解決の問題

原子核の変形: 量子効果

→ ヒート・アップの過程で

どのように形状が変化して複合核が作られるのか?

摩擦の量子論