

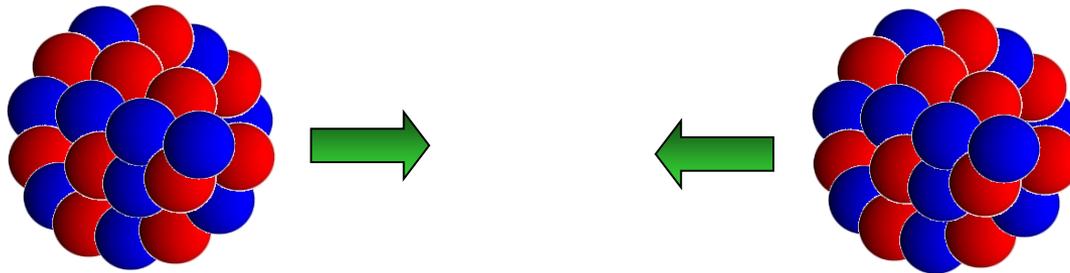
核融合反応理論の展開 と超重元素

萩野浩一

東北大学大学院理学研究科



TOHOKU
UNIVERSITY



▶ 東北大学着任(2004年5月)

✓ 重イオン(核融合)反応: 吉田思郎→滝川昇→萩野

武樋孝之(2006)、Muhammad Zamrun F. (2007)、
遊佐秀作(2012)、時枝正明、長谷川直人



ハルオレオ大総長

✓ 中性子過剰核

Nyein Wink Lwin(2006)、湊太志(2008)、大石知広(2013)、
谷村雄介(2014)、浦田靖子(2016)

✓ ハイパー核

Myaing Thi Win(2010)、Mei Hua(2016)

ハイパー核ゼミ(理論、実験合同ゼミ)

✓ 科学史

中村哲さん、豊田直樹さんらとの共同研究(2019.2-9)

論文121本、プロシーディングス60本など

2011年度の研究室忘年会(芦ノ牧温泉)



谷村

大石

湊

遊佐

2011 12 27

理論・実験合同宴会(根村氏送別会)

2011年8月10日



おまかせ会席
精選会席
味物盛り
五二五円

➤ 東北大学着任(2004年5月)

➡ ✓ 重イオン(核融合)反応

武樋孝之(2006)、Muhammad Zamrun F. (2007)、
遊佐秀作(2012)、時枝正明、長谷川直人

✓ 中性子過剰核

Nyein Wink Lwin(2006)、湊太志(2008)、大石知広(2013)、
谷村雄介(2014)、浦田靖子(2016)

✓ ハイパー核

Myaing Thi Win(2010)、Mei Hua(2016)

ハイパー核ゼミ(理論、実験合同ゼミ)

✓ 科学史

中村哲さん、豊田直樹さんらとの共同研究

論文121本、プロシーディングス60本など

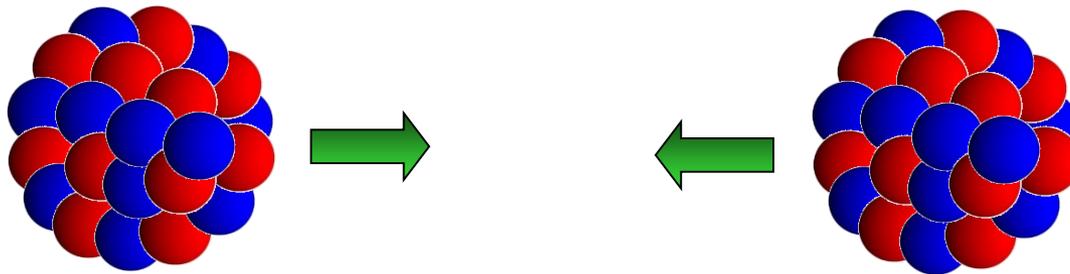
核融合反応理論の展開 と超重元素



TOHOKU
UNIVERSITY

萩野浩一

東北大学大学院理学研究科



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

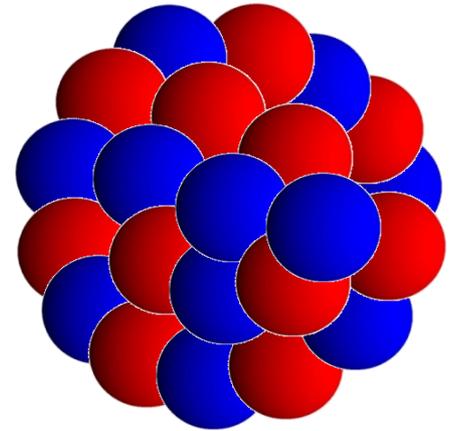
□ 核子多体系としての原子核の振る舞い

← 核子間相互作用から理解する

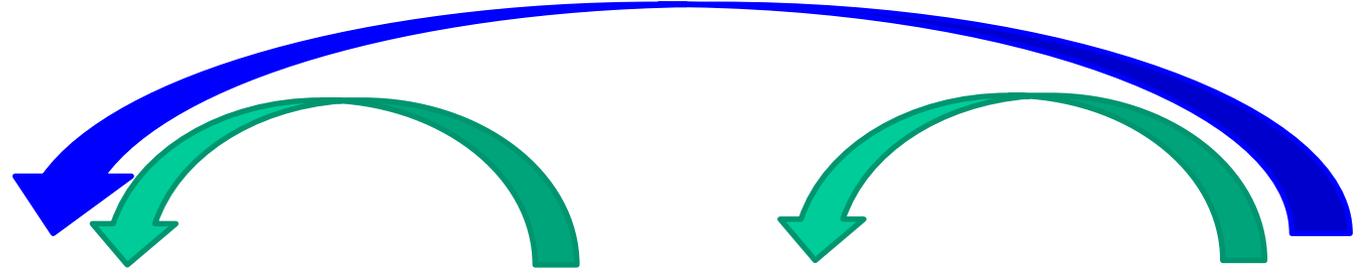
➤ 静的な振る舞い: 原子核構造論

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

➤ ダイナミックス: 原子核反応論



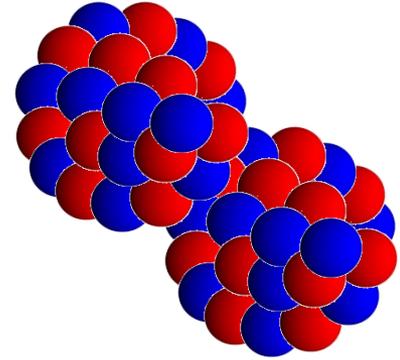
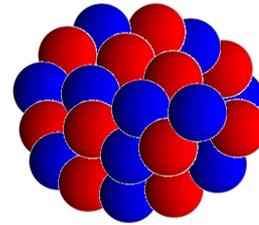
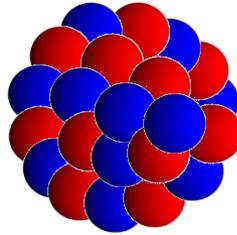
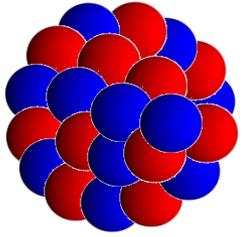
量子多体系のダイナミクス(原子核反応)



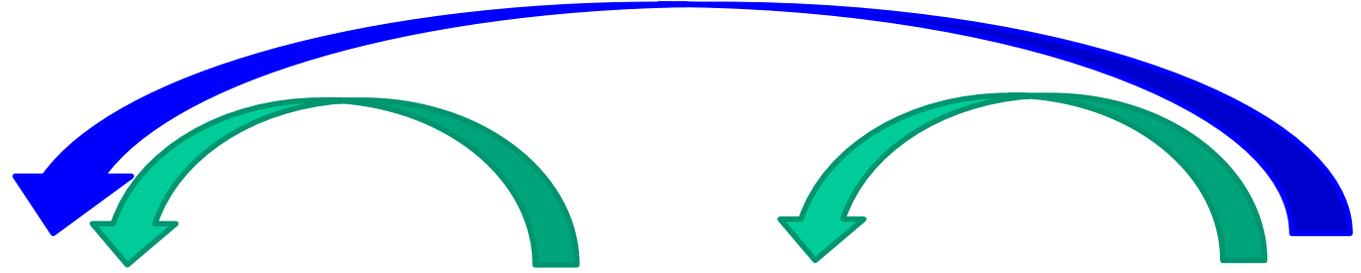
弾性散乱

非弾性散乱

核融合



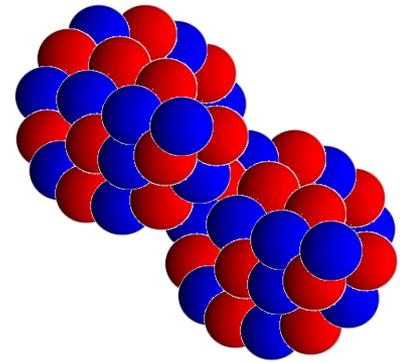
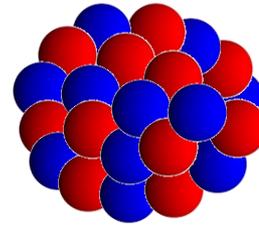
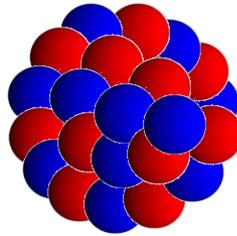
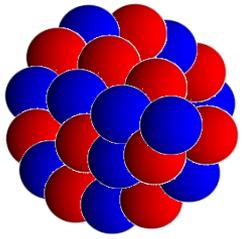
量子多体系のダイナミクス(原子核反応)



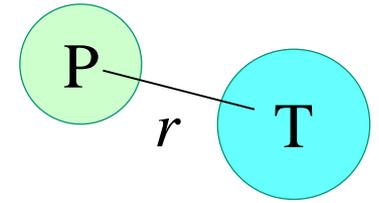
弾性散乱

非弾性散乱

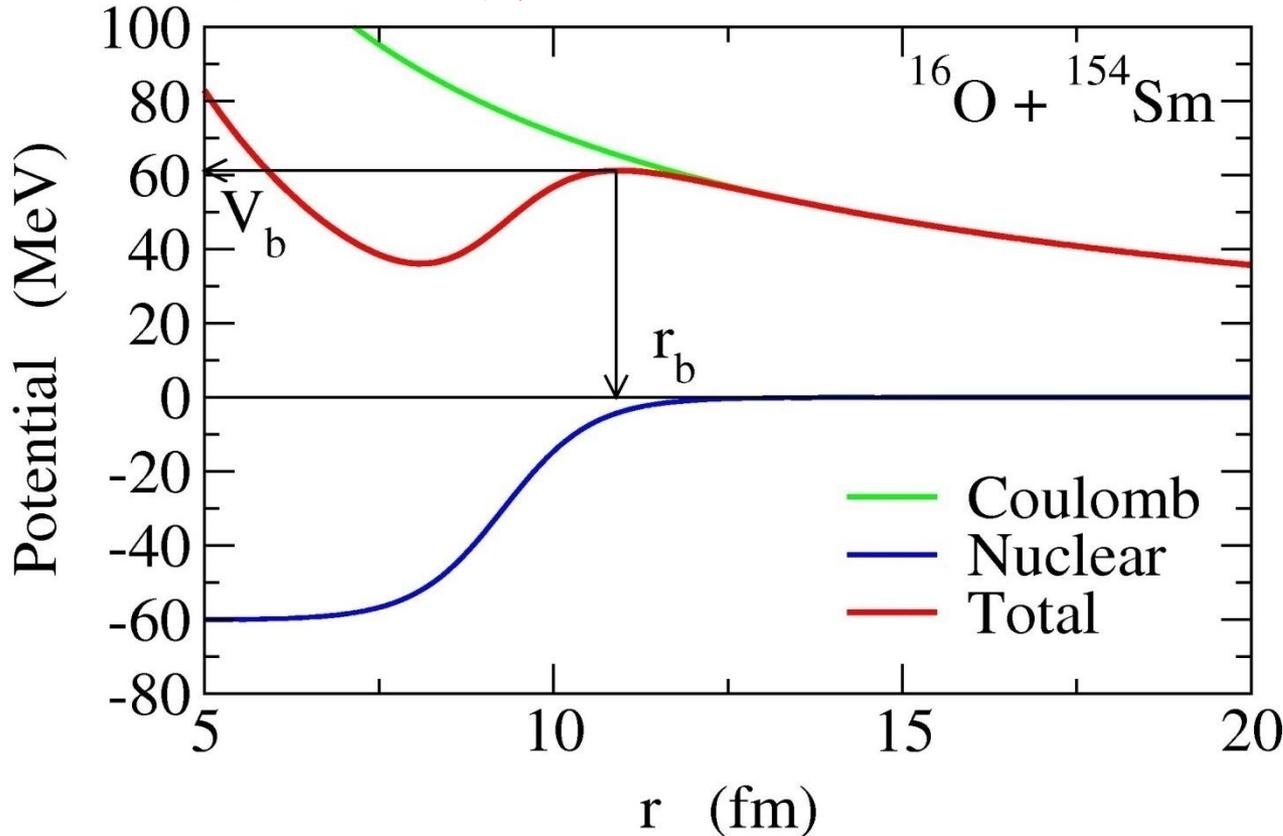
核融合



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)

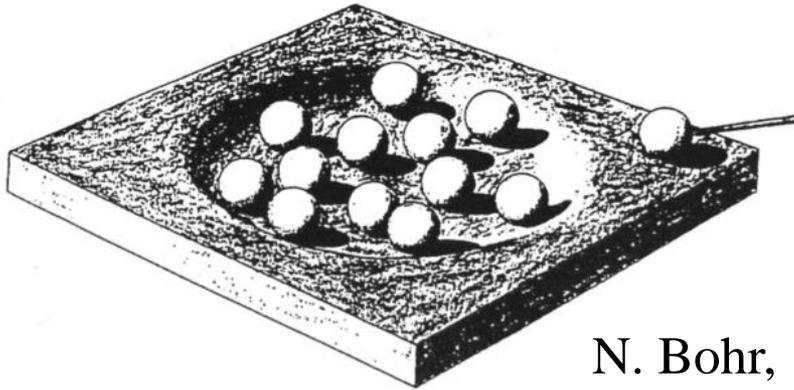
クーロン障壁の高さ→系のエネルギー・スケールを規定

クーロン障壁近傍のエネルギーにおける核融合反応

核融合反応： 複合核生成反応

Niels Bohr (1936)

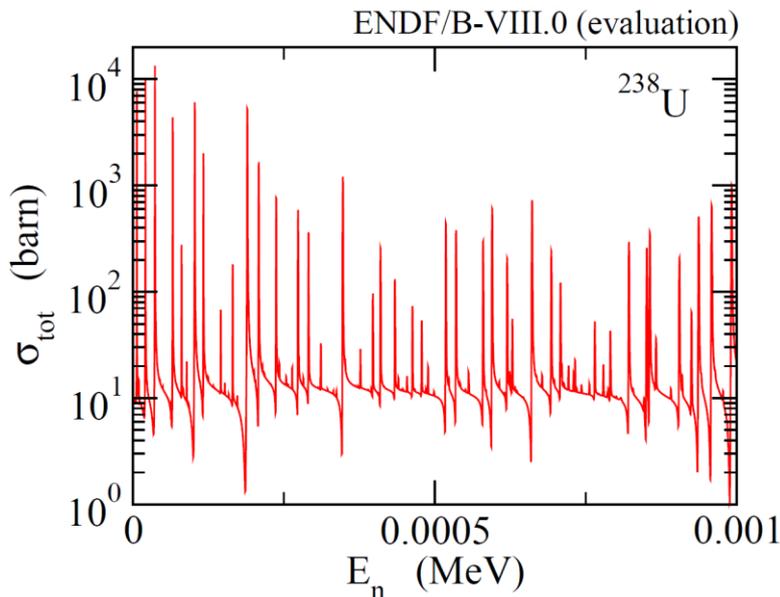
原子核による中性子の吸収 → 複合核



N. Bohr,
Nature 137 ('36) 351



Wikipedia

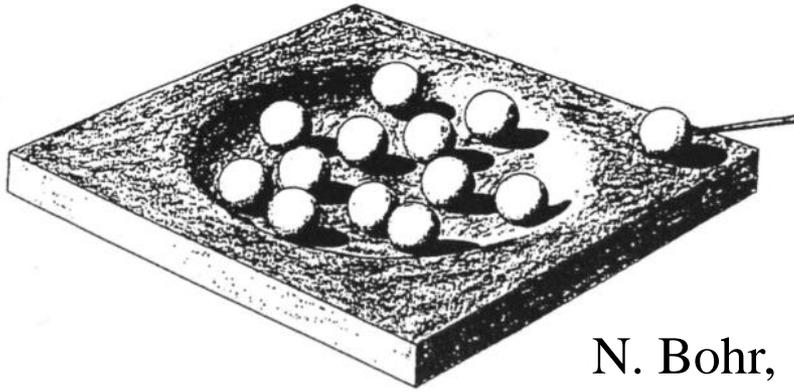


cf. フェルミの実験 (1935)
MeV スケールの原子核に
eV スケールの幅の多数の共鳴状態

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

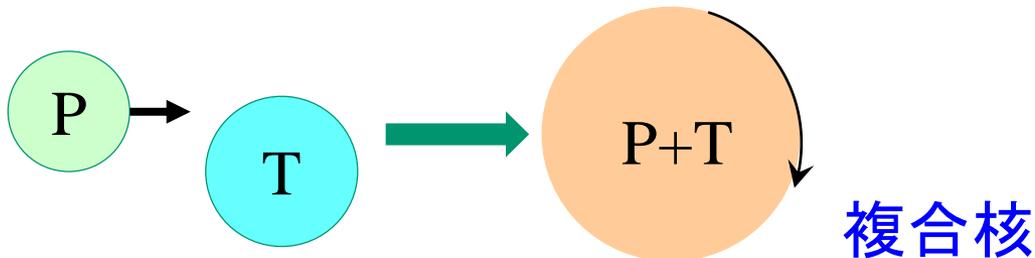


N. Bohr,
Nature 137 ('36) 351

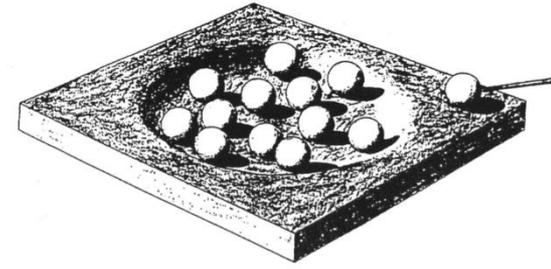
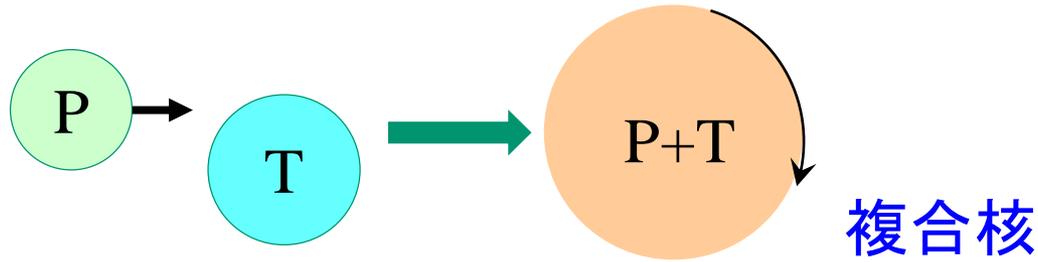


Wikipedia

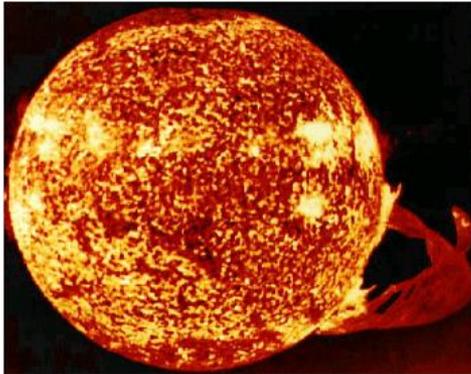
重イオン反応で複合核をつくる = 重イオン核融合反応



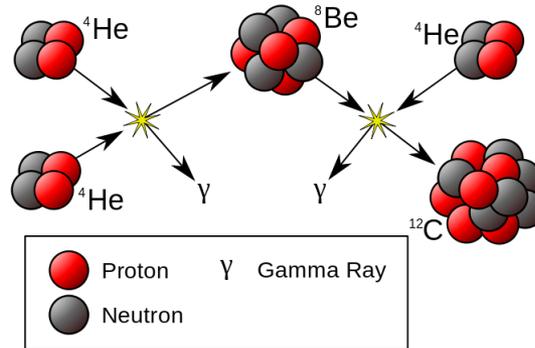
核融合反応： 複合核生成反応



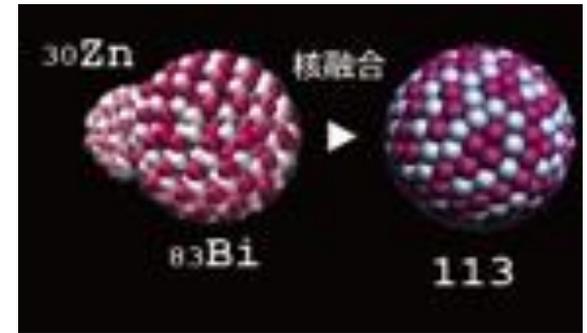
cf. N. Bohr '36



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

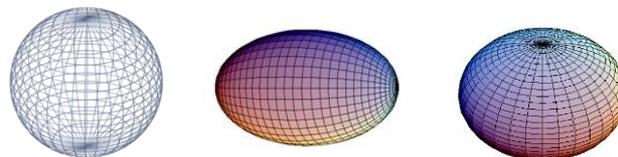
核反応と核構造の強い結合(結合チャンネル効果)

cf. 高エネルギー反応: 反応機構はより単純

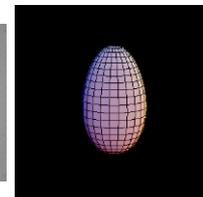
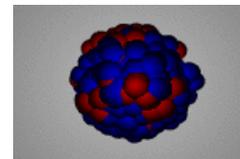
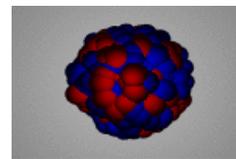
✓ 多粒子系の量子トンネル現象

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

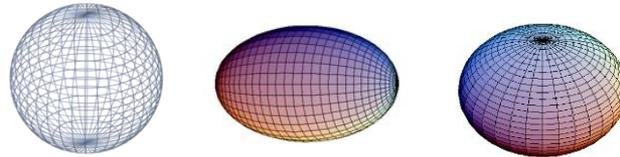
核反応と核構造の強い結合(結合チャンネル効果)

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

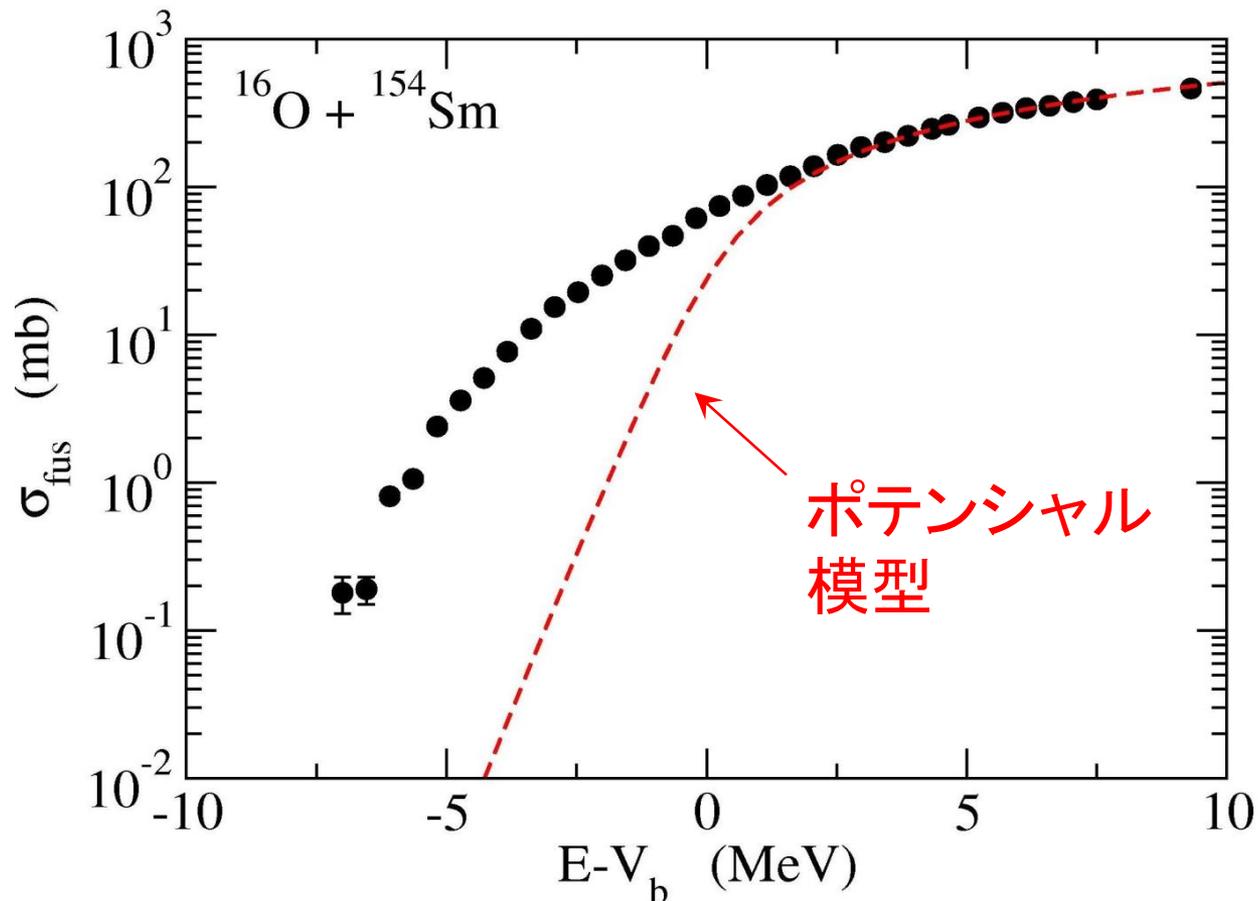
・エネルギーが可変 cf. α 崩壊: エネルギーが固定されている

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(～'80)

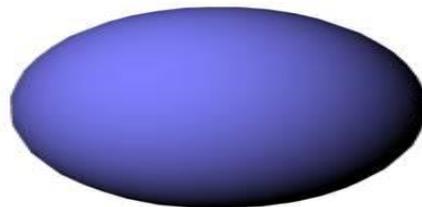
ポテンシャル模型: 散乱核は構造を持たない球と仮定

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

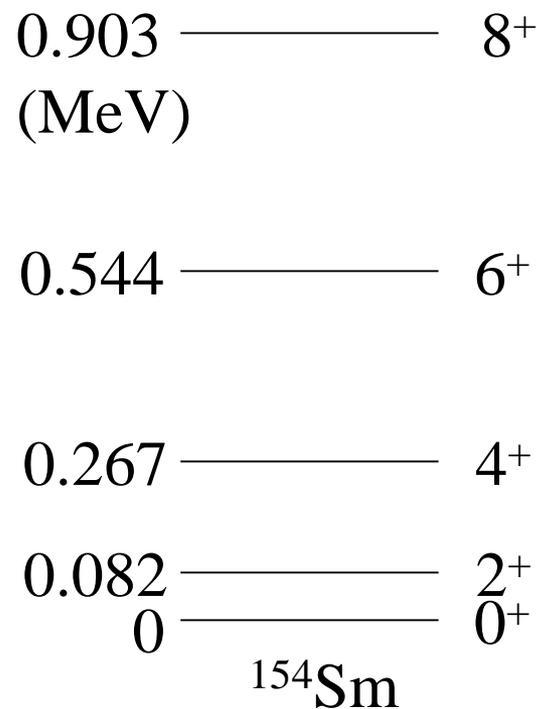
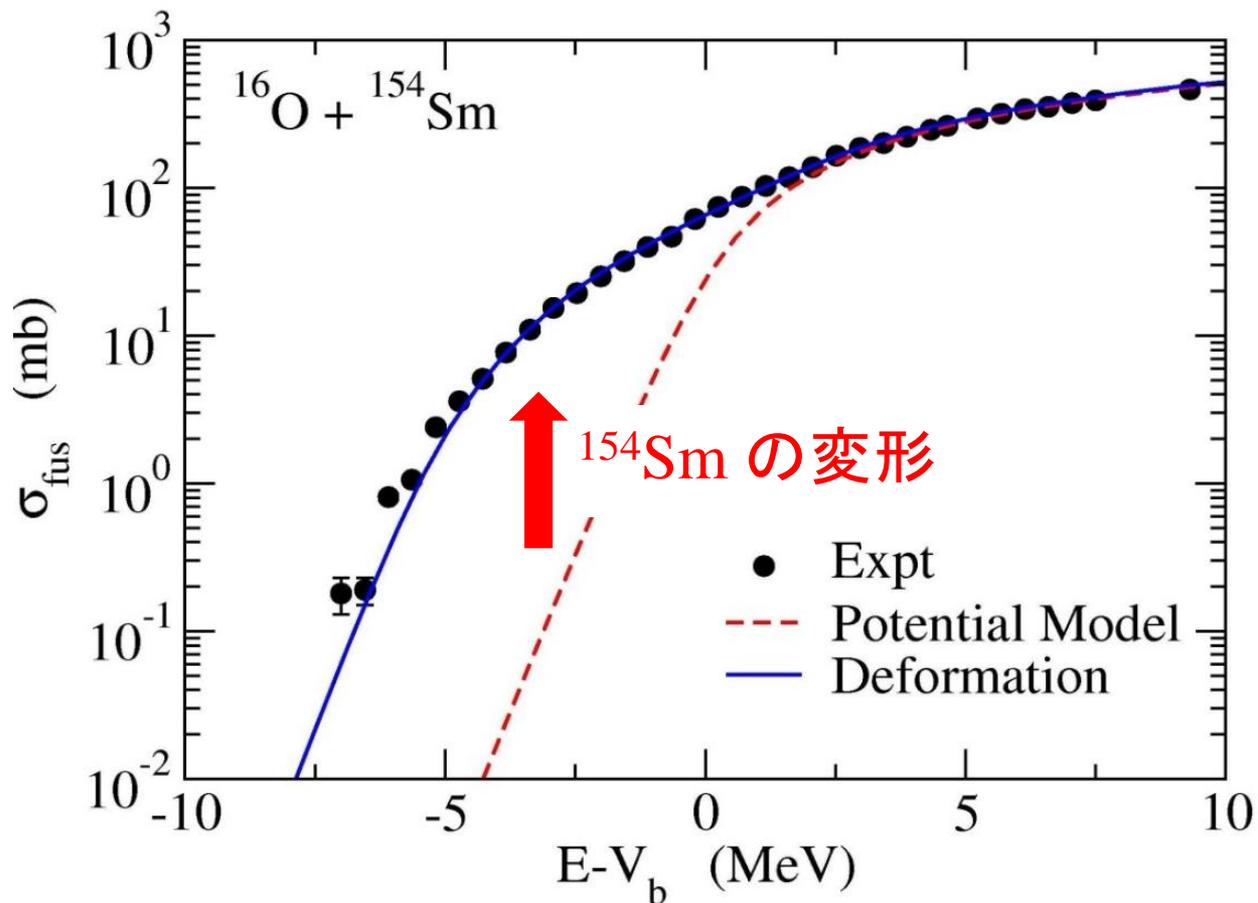


核融合反応断面積の大きな増大 (~'80)

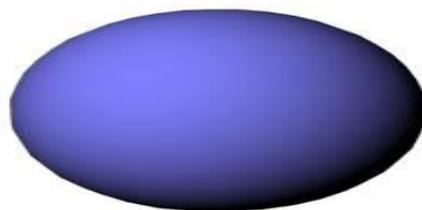
^{154}Sm : 典型的な変形核



^{154}Sm

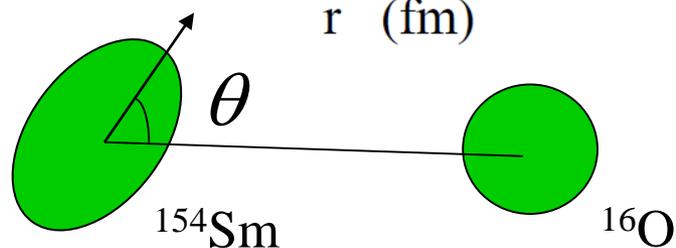
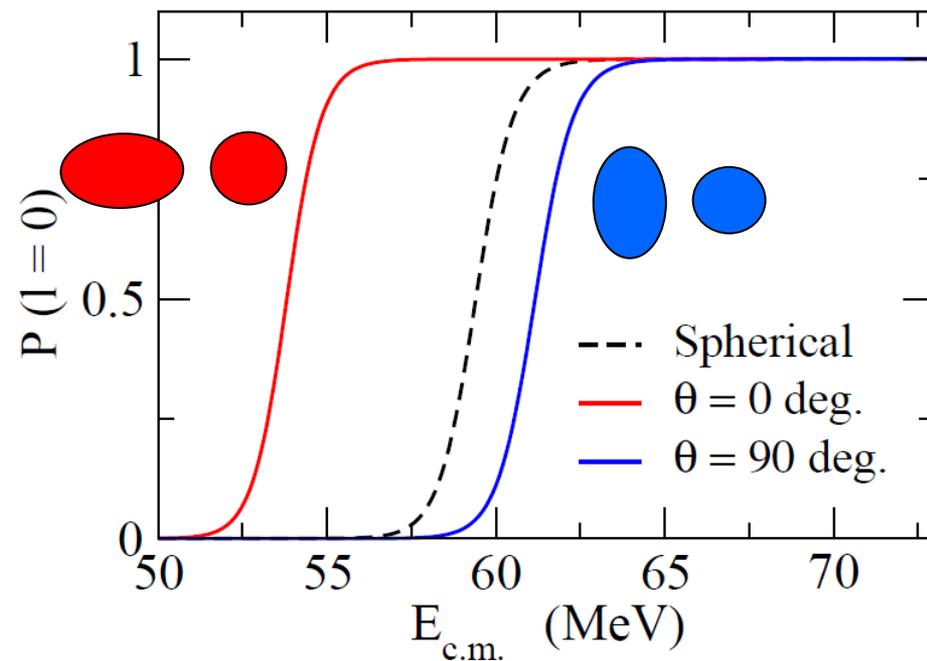
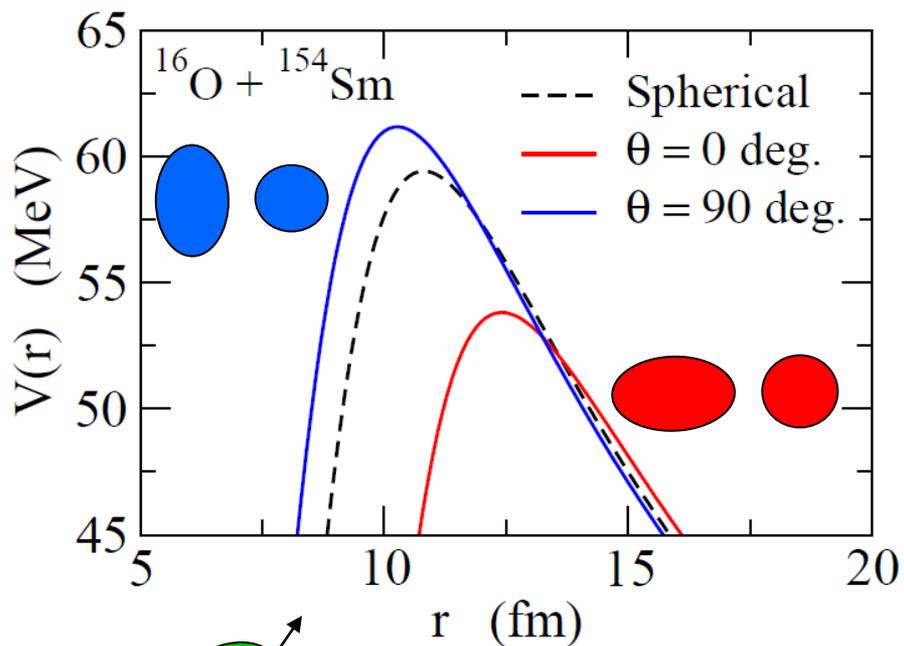


原子核の変形の効果



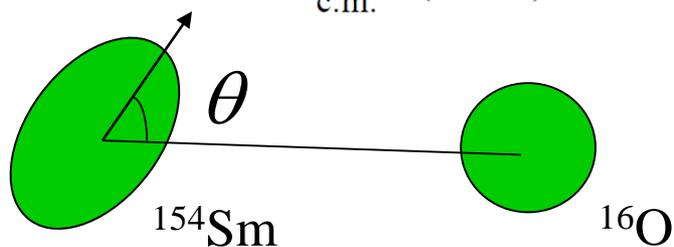
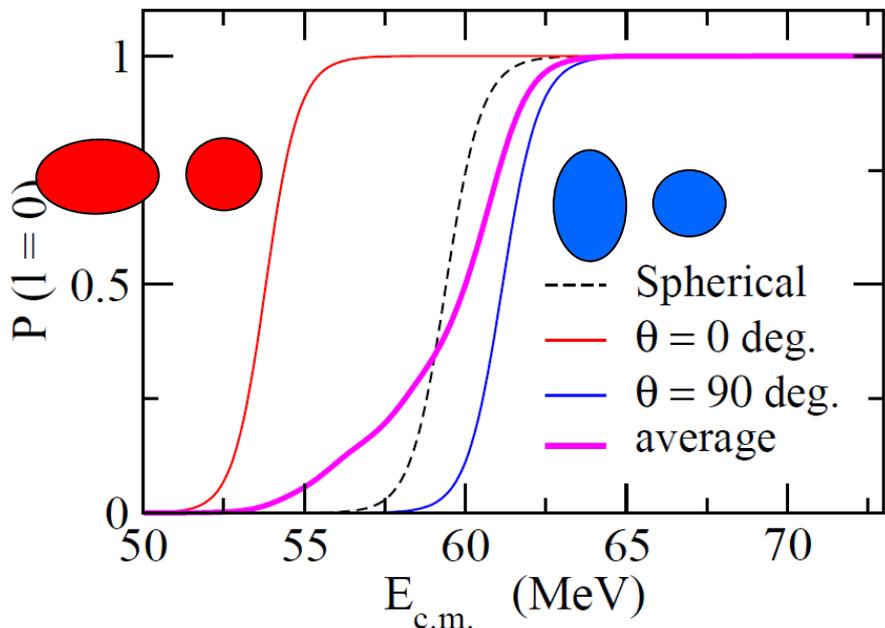
^{154}Sm

^{154}Sm : 典型的な変形核

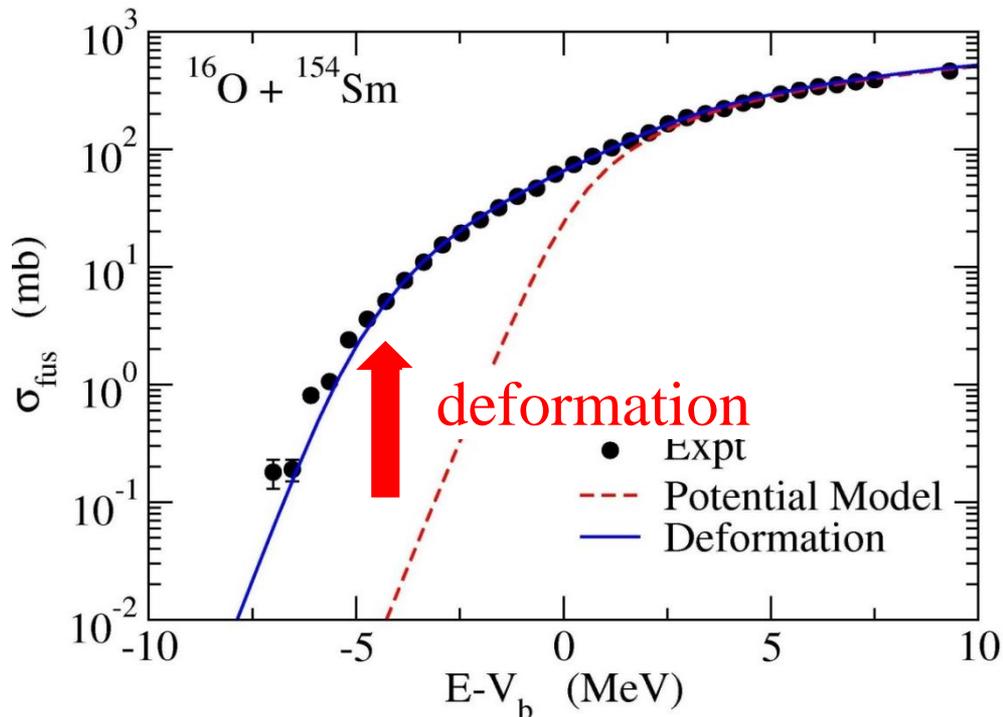


原子核の変形の効果

^{154}Sm : 典型的な変形核

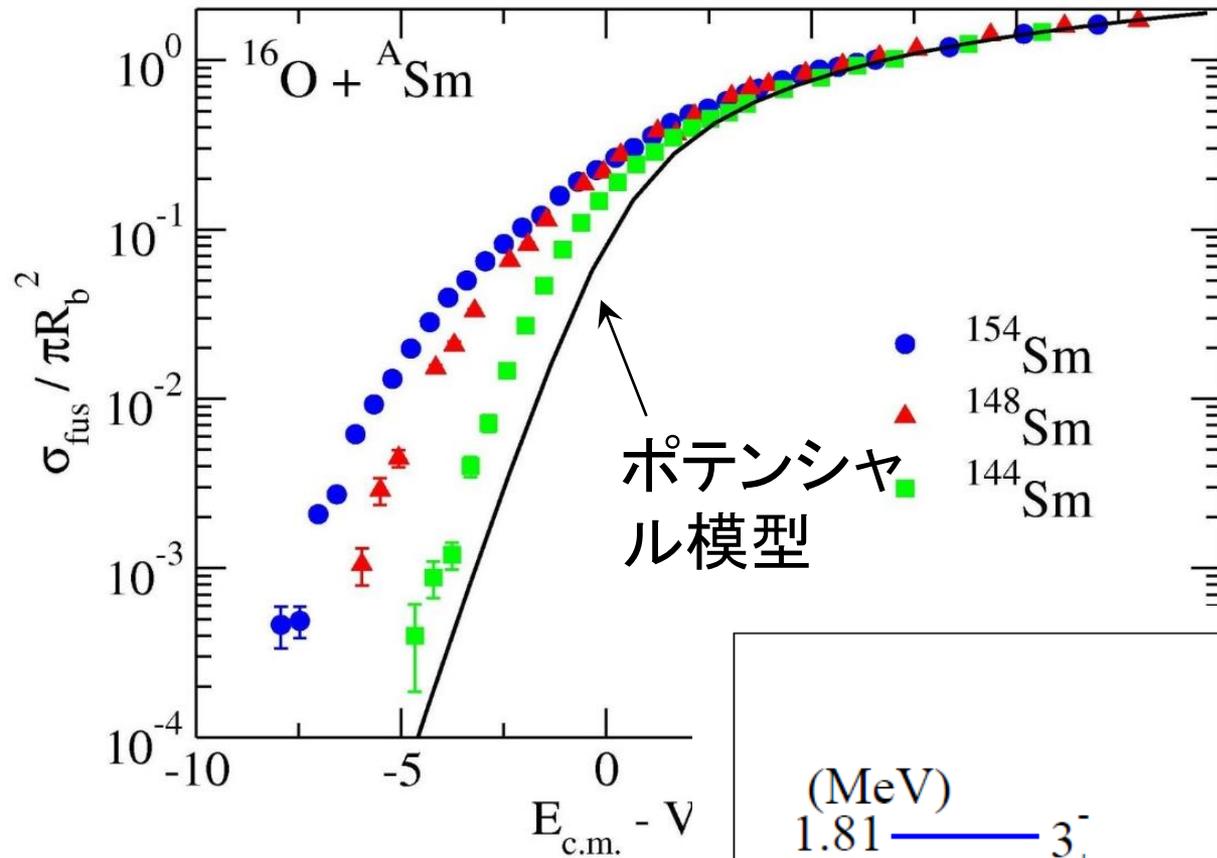


$$\sigma_{\text{fus}}(E) = \int_0^1 d(\cos \theta) \sigma_{\text{fus}}(E; \theta)$$



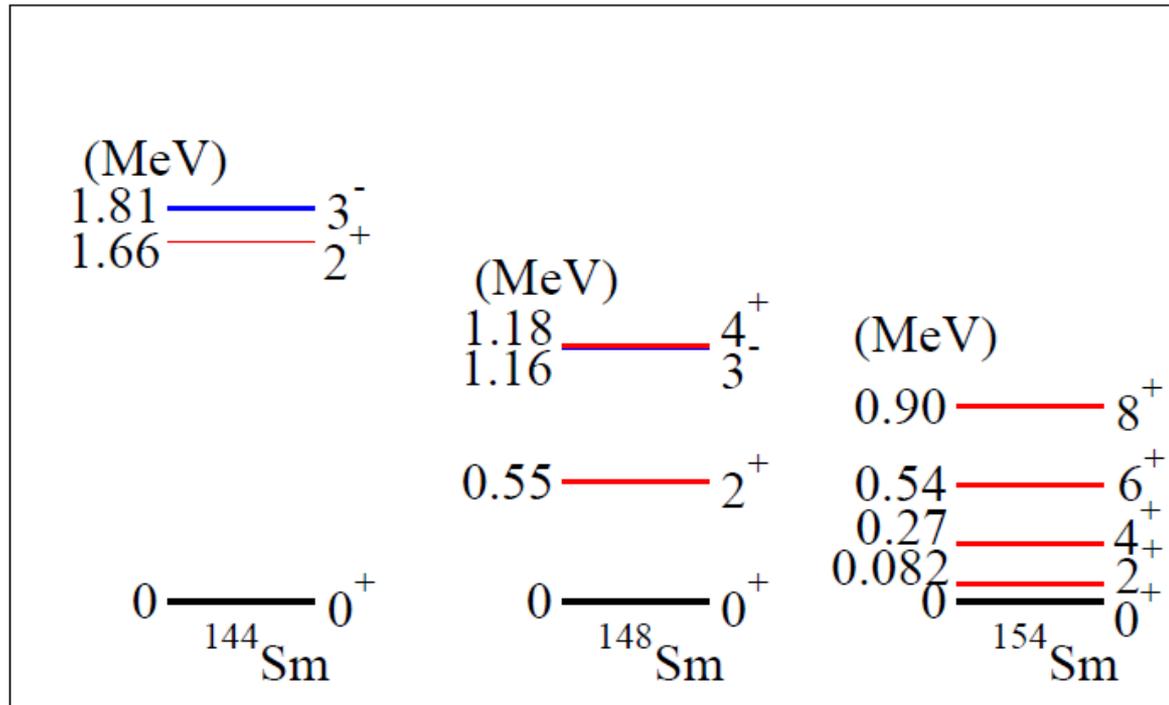
核融合反応: 核構造と核反応
の強い結びつき

coupling assisted tunneling



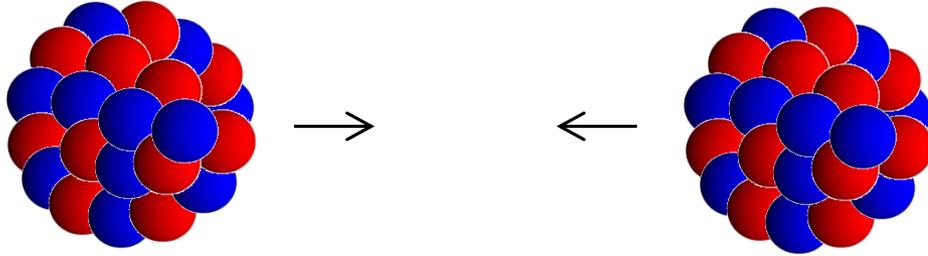
核融合断面積の増幅
 :他の系でも一般的に

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

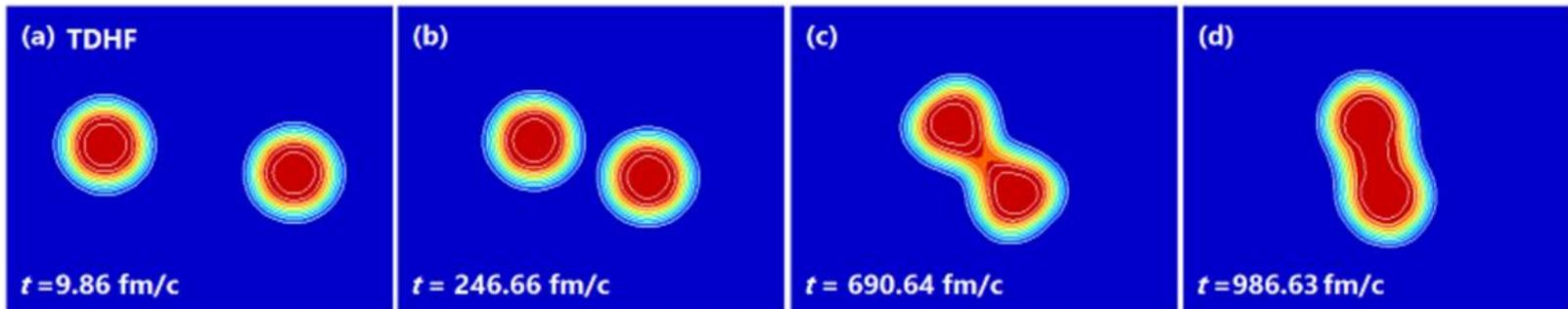
多体問題



未だに超難問題
cf. 多粒子トンネルの記述

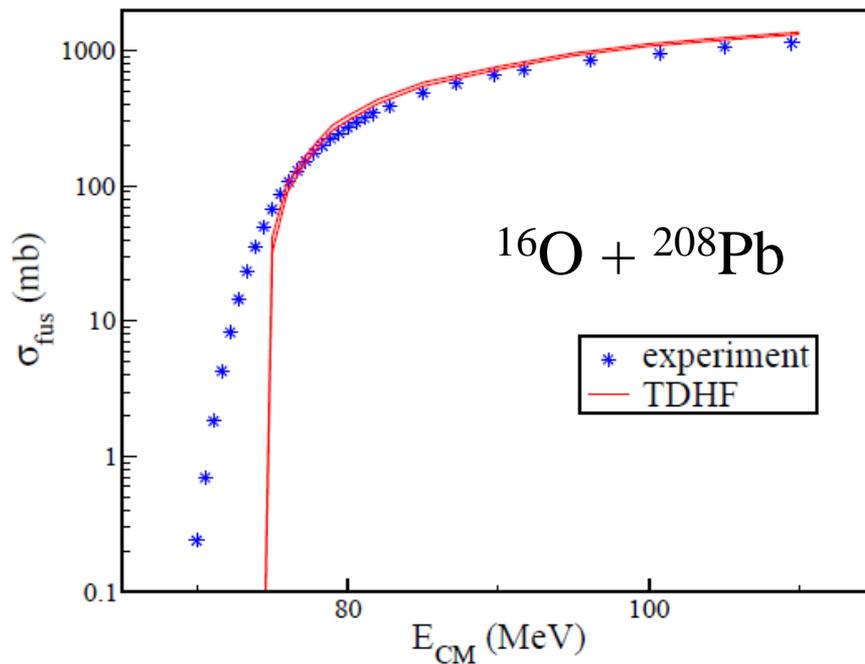
TDHF シミュレーション

TDHF = Time Dependent Hartree-Fock



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

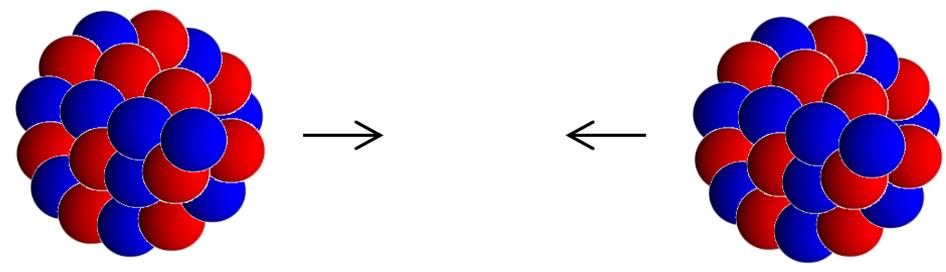
第一原理的、しかし、トンネルは記述できない



C. Simenel,
EPJA48 ('12) 152

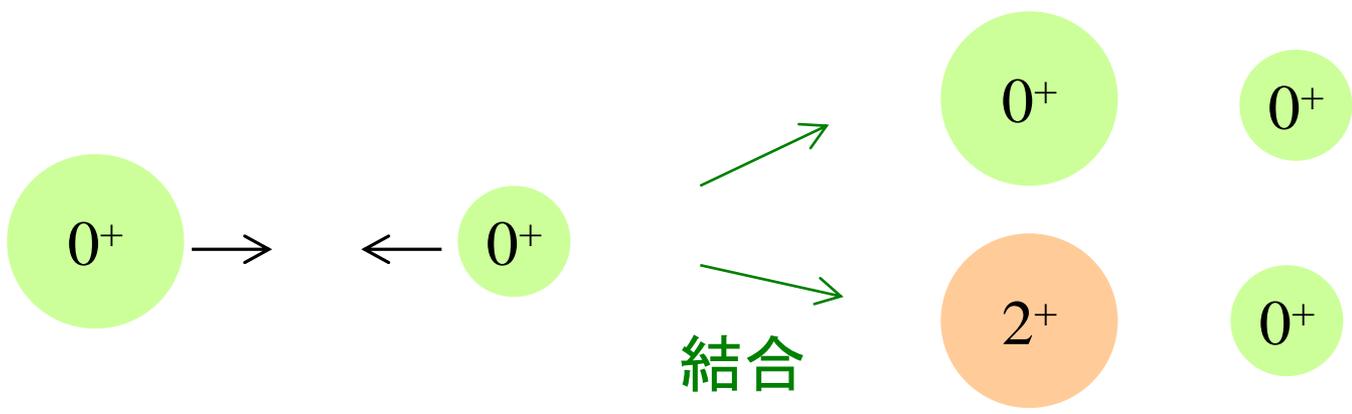
結合チャンネル法 : 内部励起を考慮した量子散乱理論

多体問題

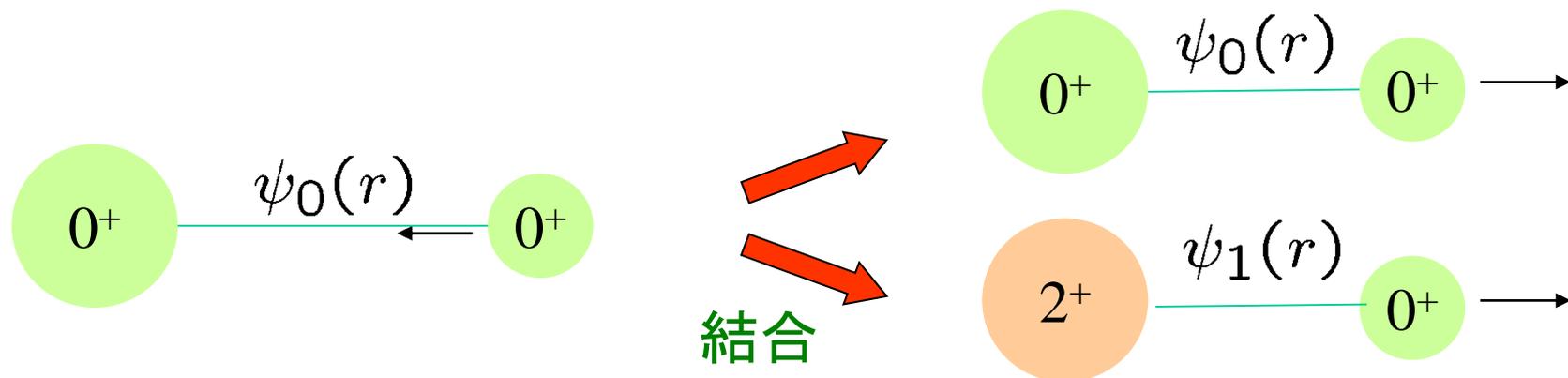


未だに超難問題
cf. 多粒子トンネルの記述

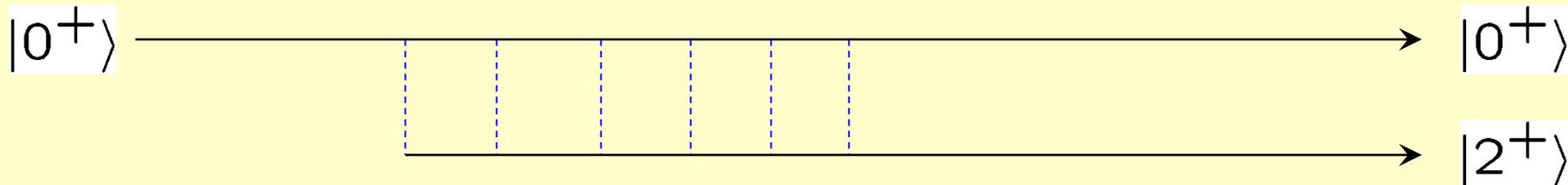
➡ 2体問題 + 原子核の励起 (結合チャンネル・アプローチ)



結合チャンネル法 : 内部励起を考慮した量子散乱理論



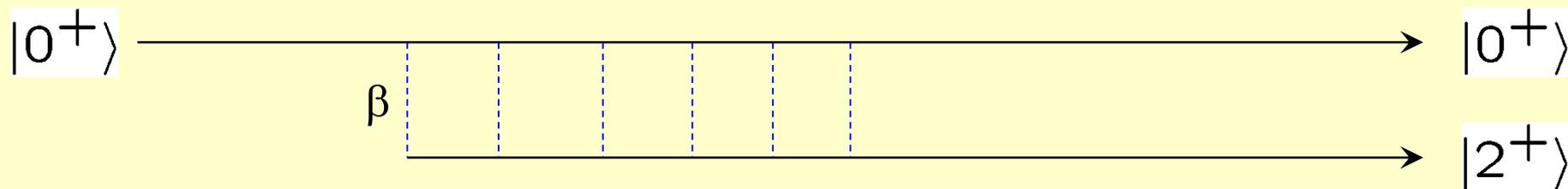
$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + \overleftarrow{V}(r) - \overleftarrow{E} \right] \overrightarrow{\psi}(r) = 0$$



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)

結合チャンネル法: 内部励起を考慮した量子散乱理論



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)

以前は、ハミルトニアンは結合定数 β の1次のオーダーまでで近似:

$$H = -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + V_0(r) + \beta f(r) \hat{O}$$

全オーダーの取扱い

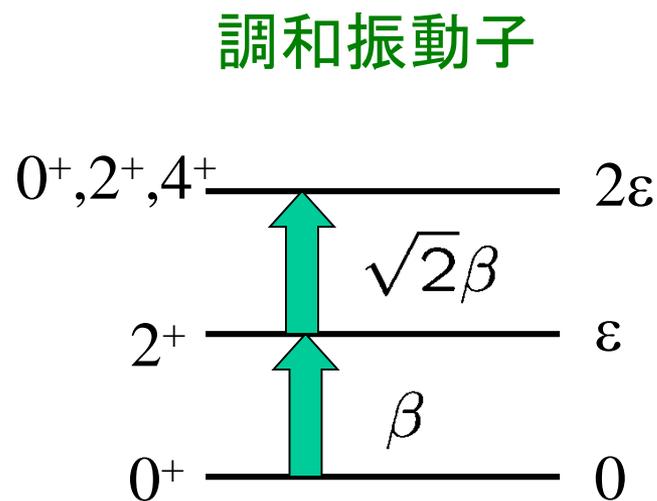
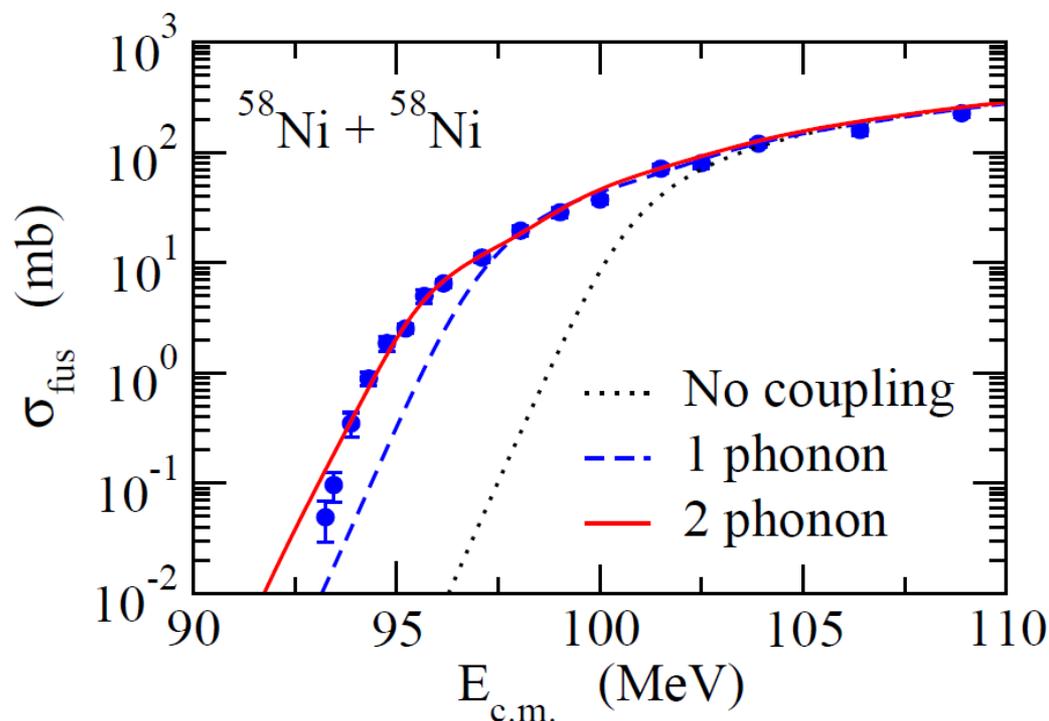
$$V(r, \beta \hat{O})$$

K.H., N. Rowley, and A.T. Kruppa,
Comp. Phys. Comm. 123('99) 143.

世界標準の
方法

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., and N. Rowley, PRC88 ('13) 044620
- J.M. Yao and K.H., PRC94 ('16) 11303(R) など



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

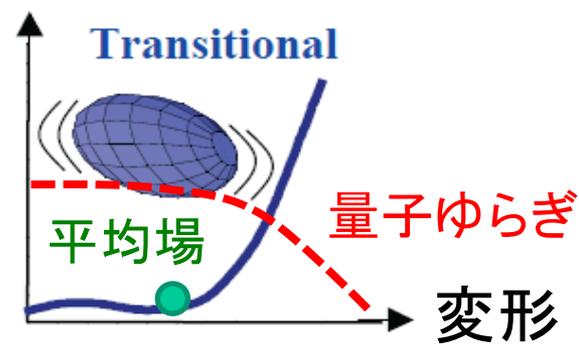
更なる発展: 核構造計算を用いた半微視的結合チャンネル計算

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

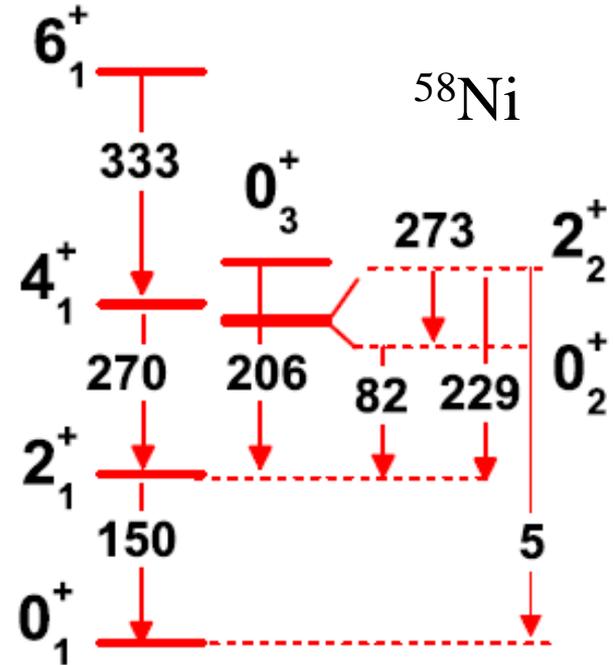
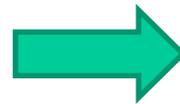
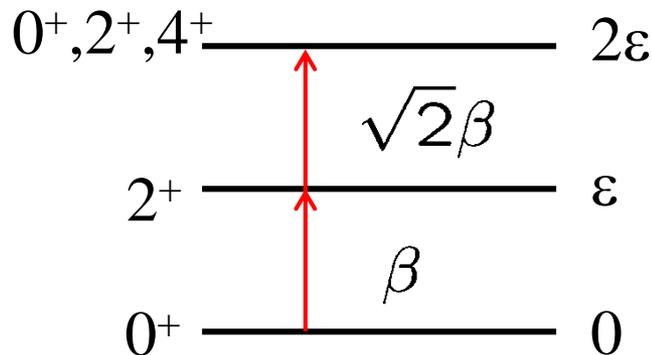
結合チャンネル

+ 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)



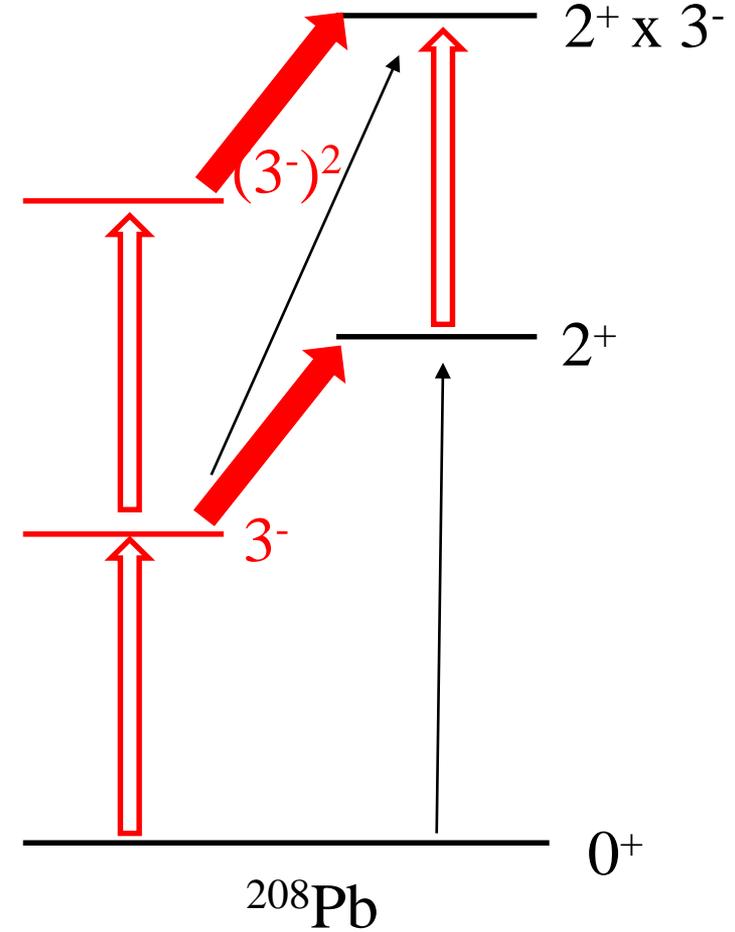
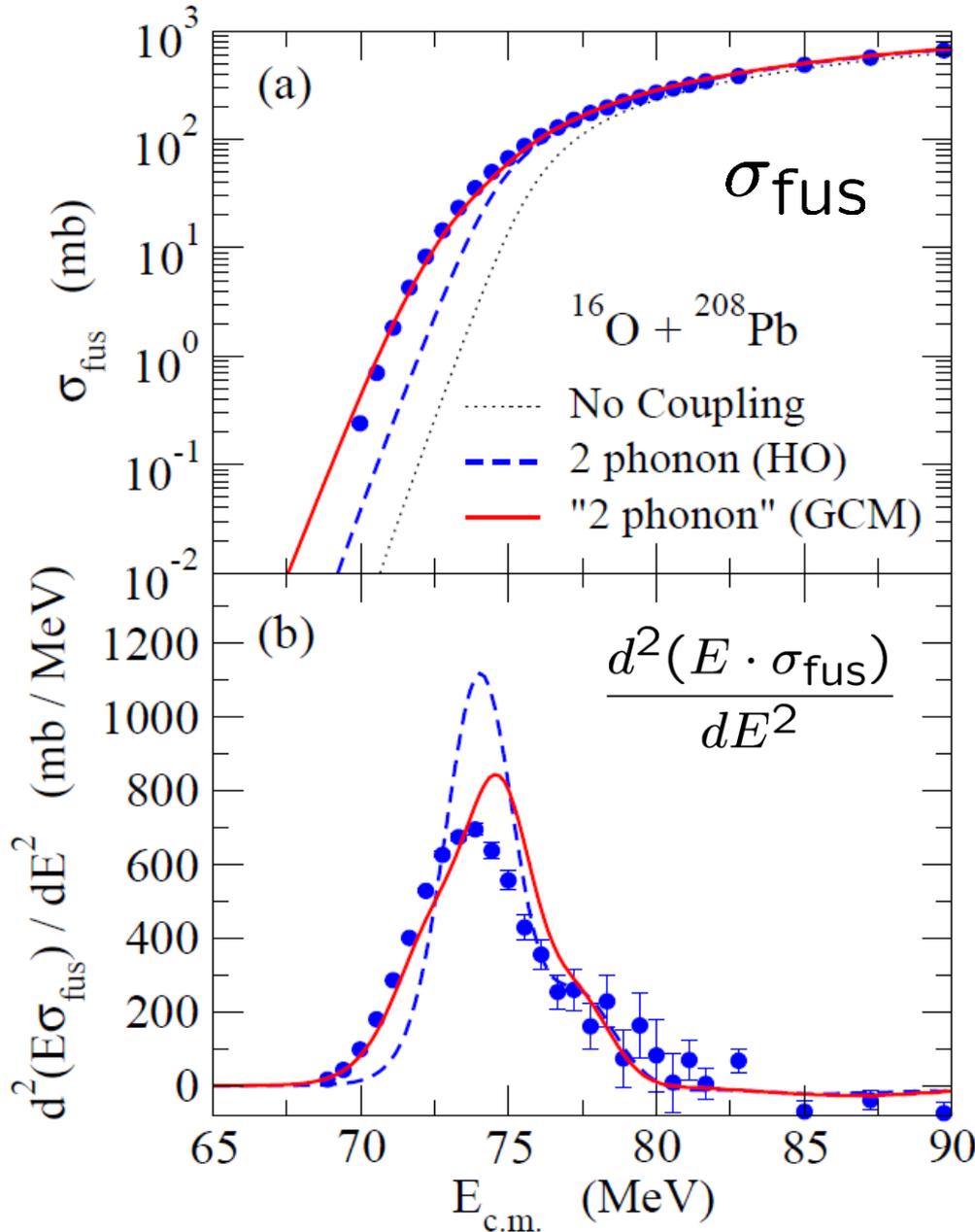
単純な調和振動子



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

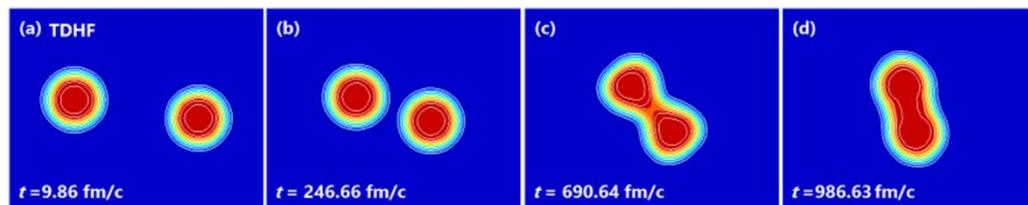
微視的核構造計算を
インプットとする
結合チャンネル計算

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

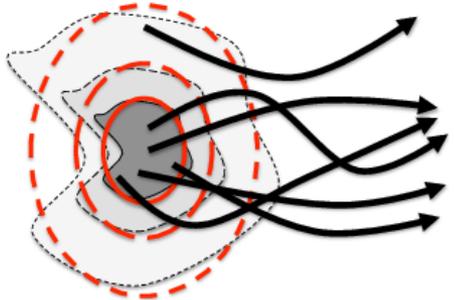
TDHF シミュレーション

第一原理的、
しかし、トンネルは記述できない

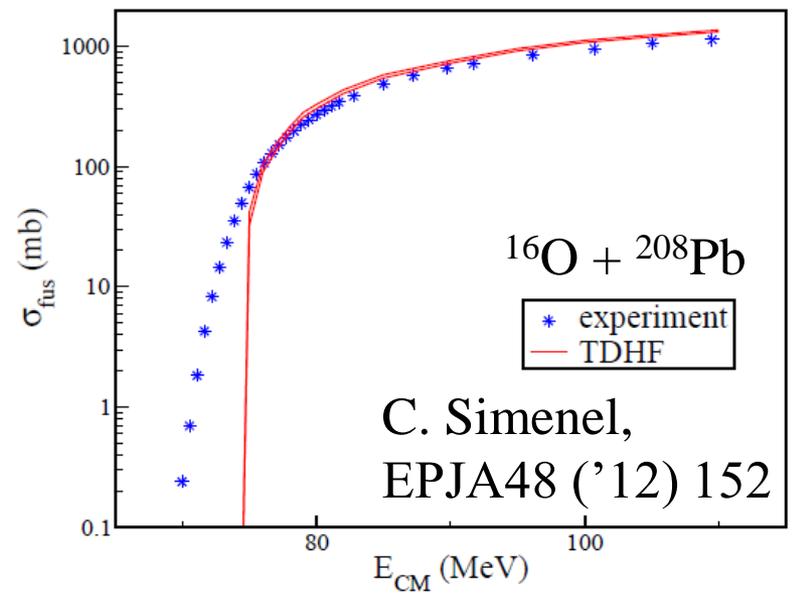
➤「平均場を超えた取り扱い」

✓ 時間に依存した生成座標法

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



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

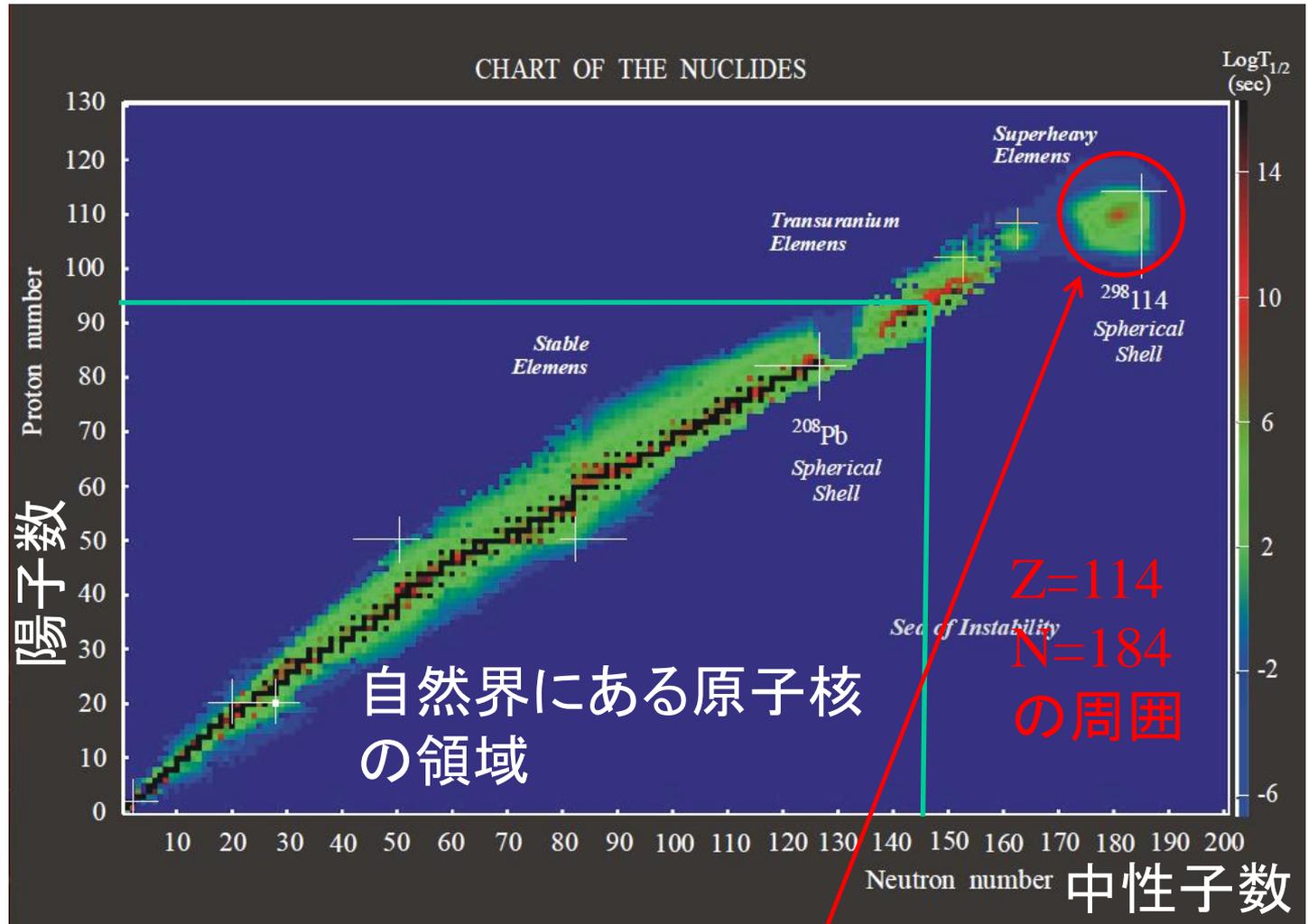


cf. Stochastic mean-field method
B. Yilmaz et al.,
PRC90 ('14) 054617

これからの課題

長谷川(D1)、谷村、萩野

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

超重核合成のための核融合反応

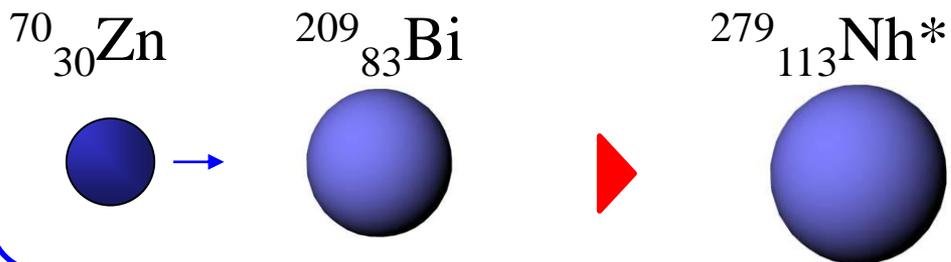
113番元素ニホニウム Nh

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

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	

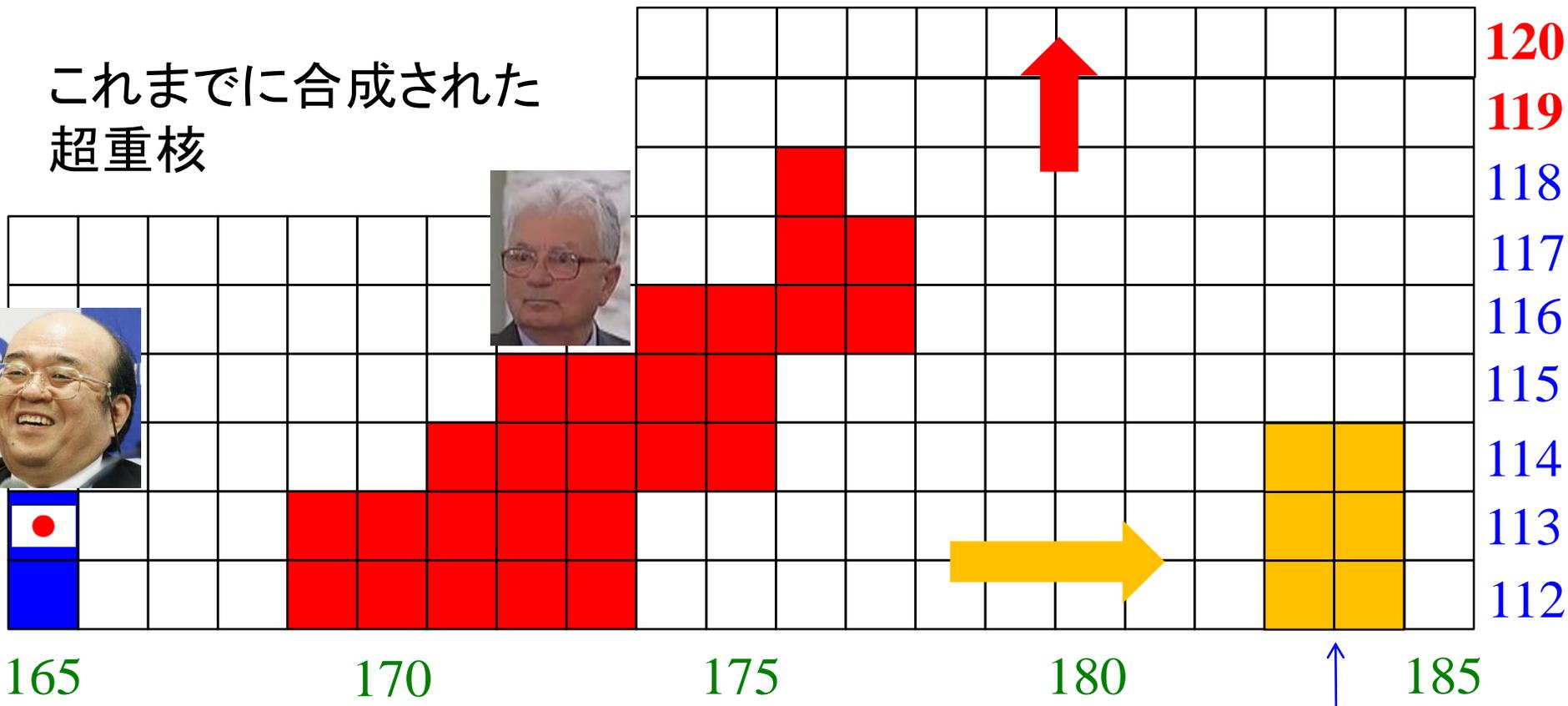


重イオン核融合反応

Wikipedia

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

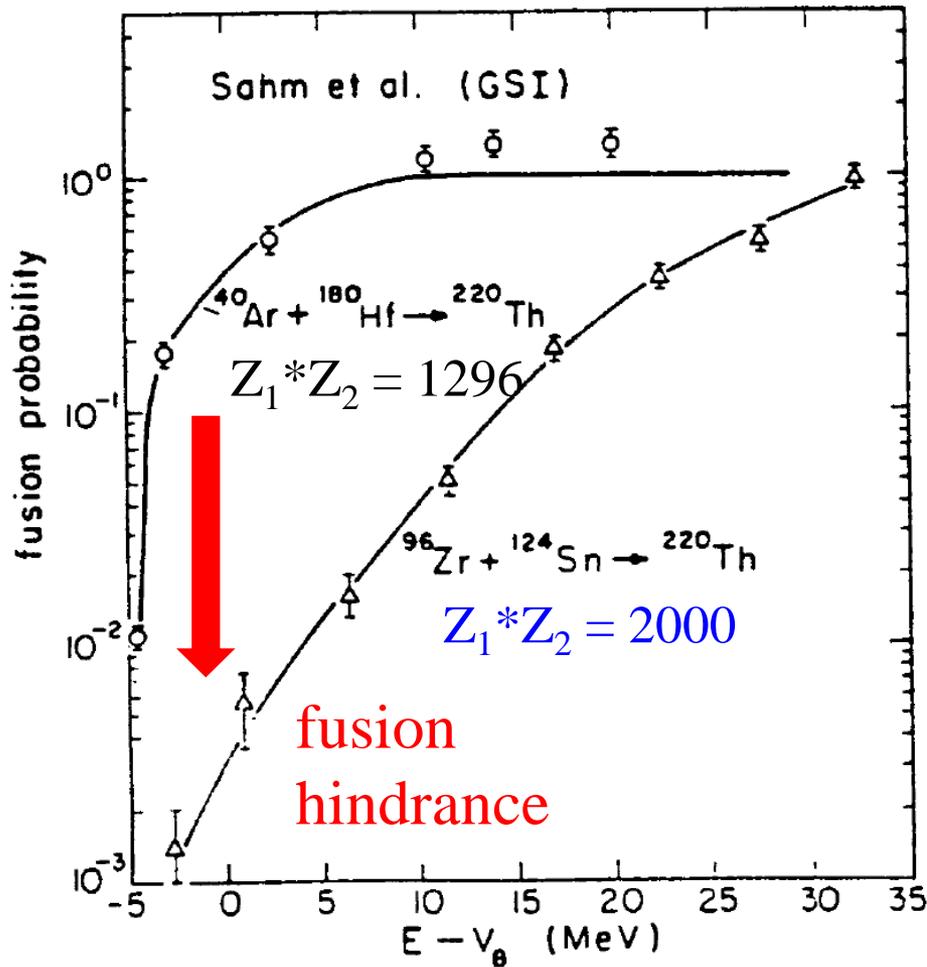
➤ 安定の島に向けて

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

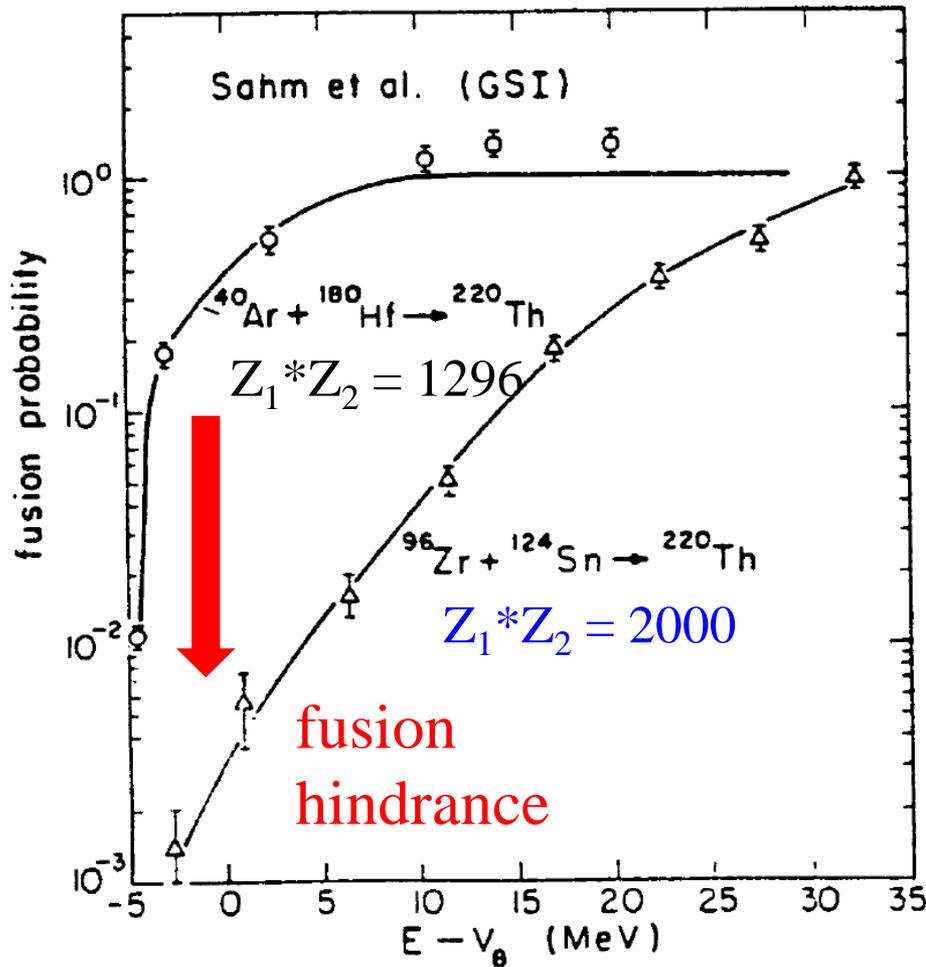
113 Nh nihonium	115 Mc moscovium
117 Ts tennessine	118 Og oganesson

重イオン核融合反応
による合成

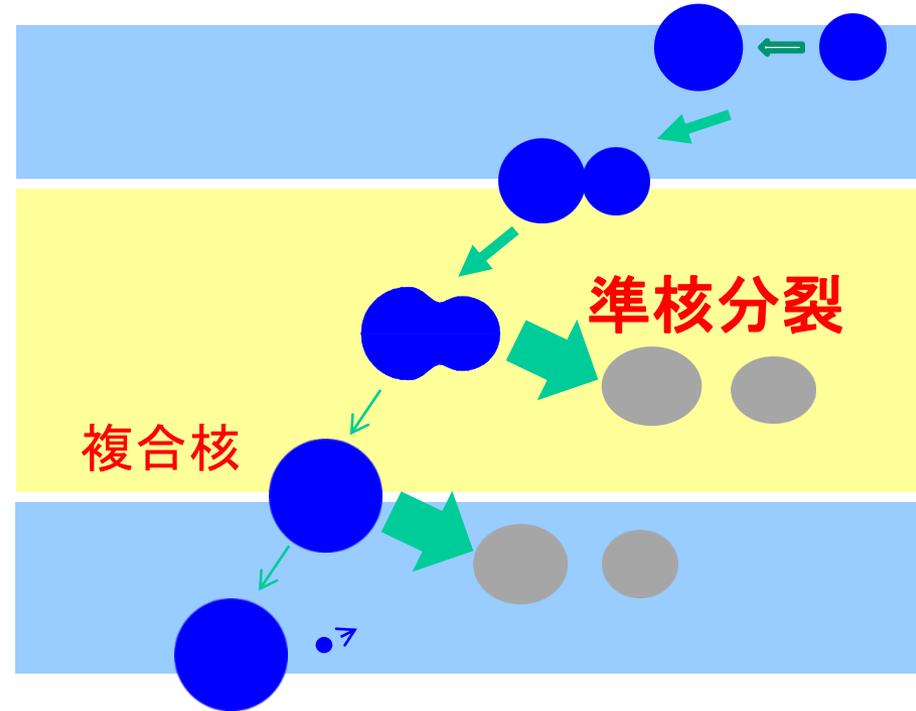
理論の課題:
反応機構の理解

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

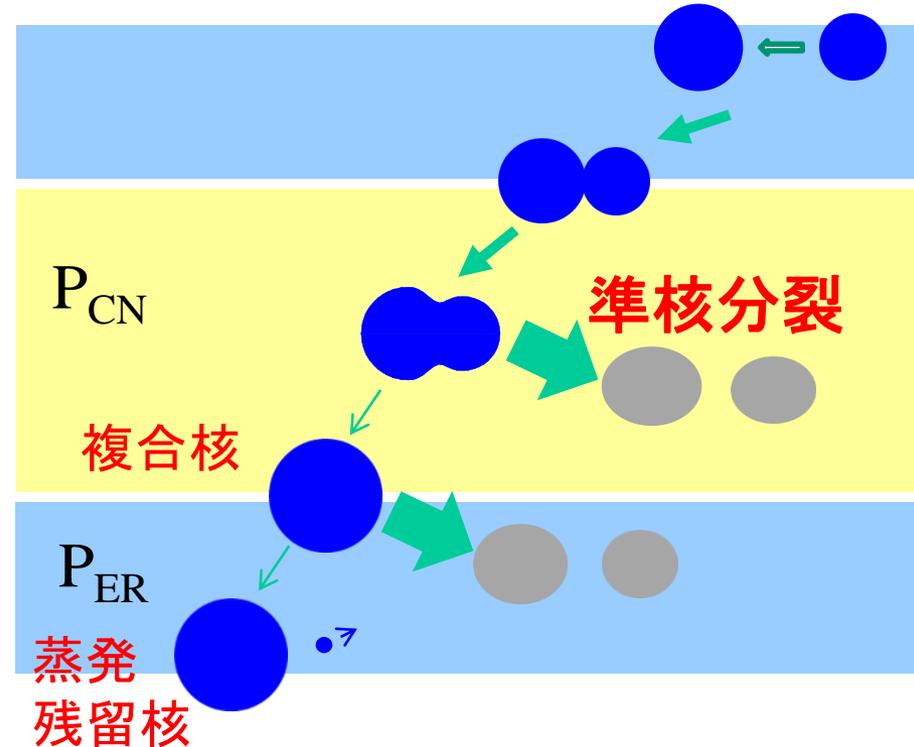
→ 大きな理論的不定性

- ✓ 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

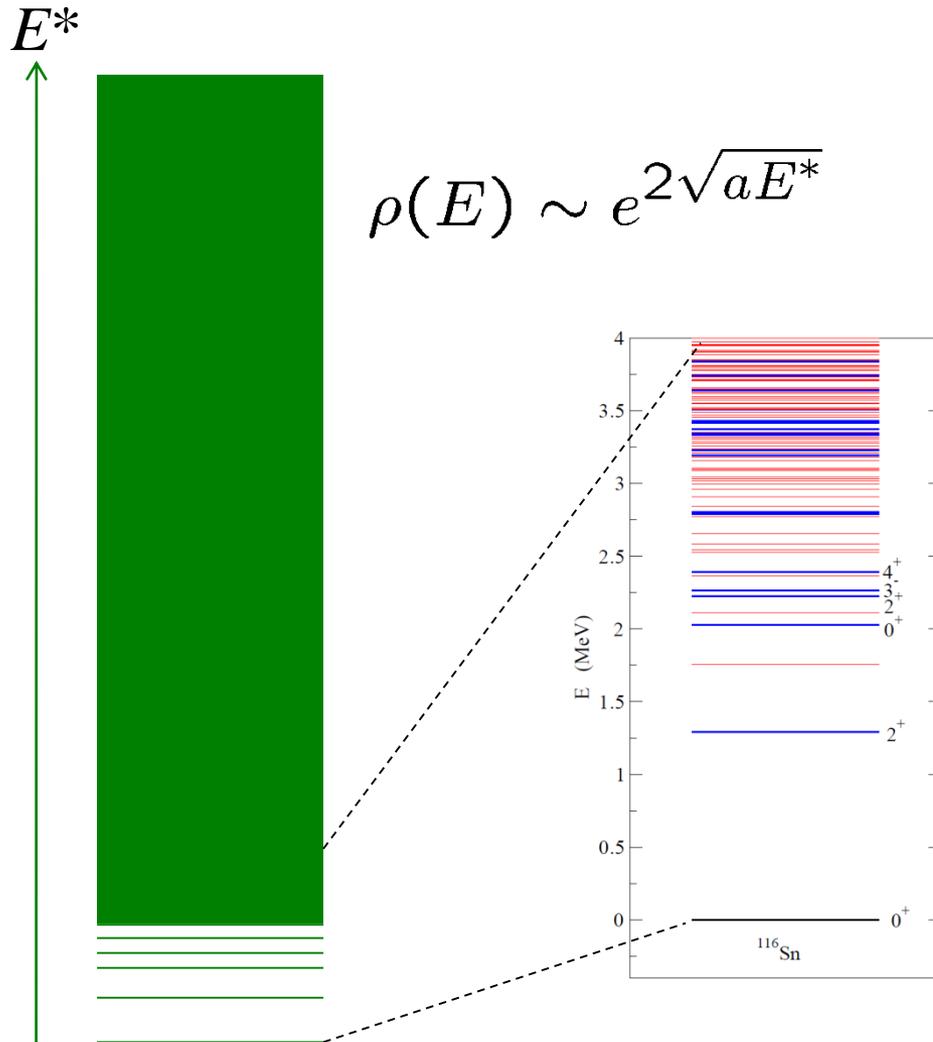
挑戦的課題:
いかに理論的不定性を小さくして
信頼できる理論予言が出来るか?

核融合阻害の現代的理解

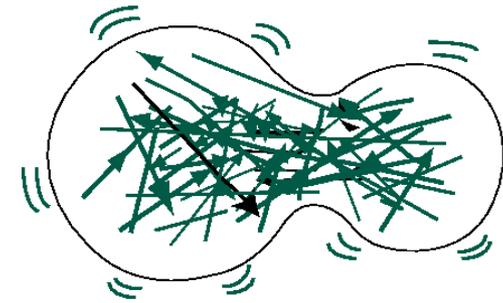


強いクーロン反発
→ 複合核を作る前に再分離

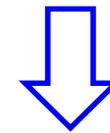
原子核の摩擦と重イオン核融合反応



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

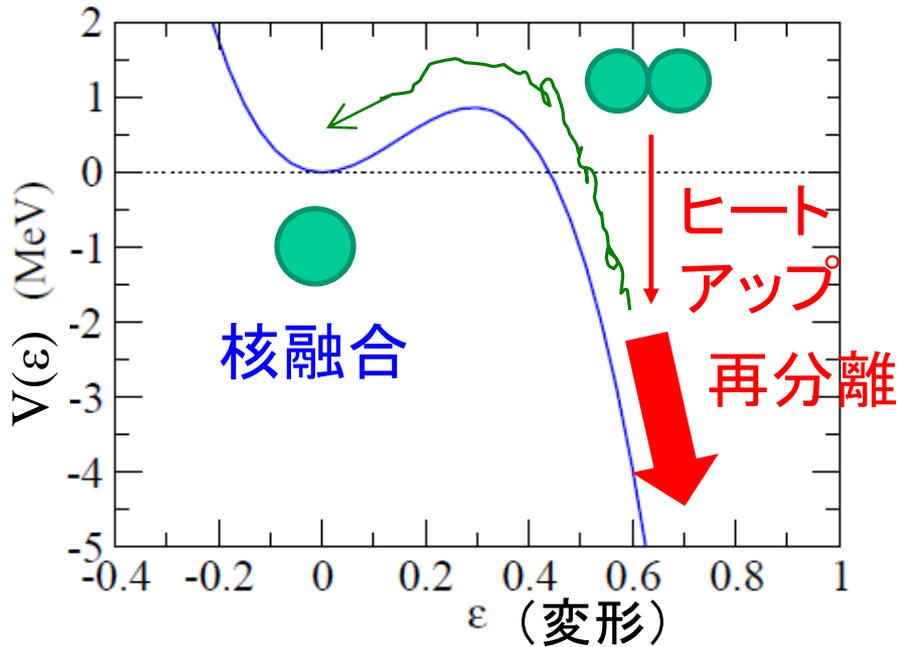


原子核の内部自由度は核反応に対して「環境」のように振舞う

「内的環境自由度」

→ 摩擦

ランジュバン法



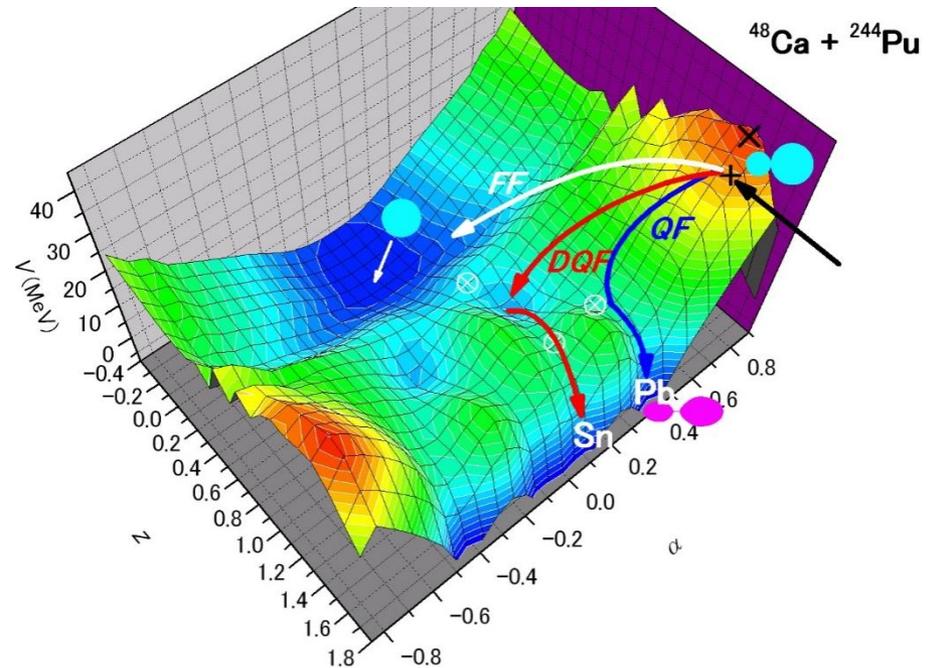
熱的拡散

→ ランジュバン法
(ブラウン運動)

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

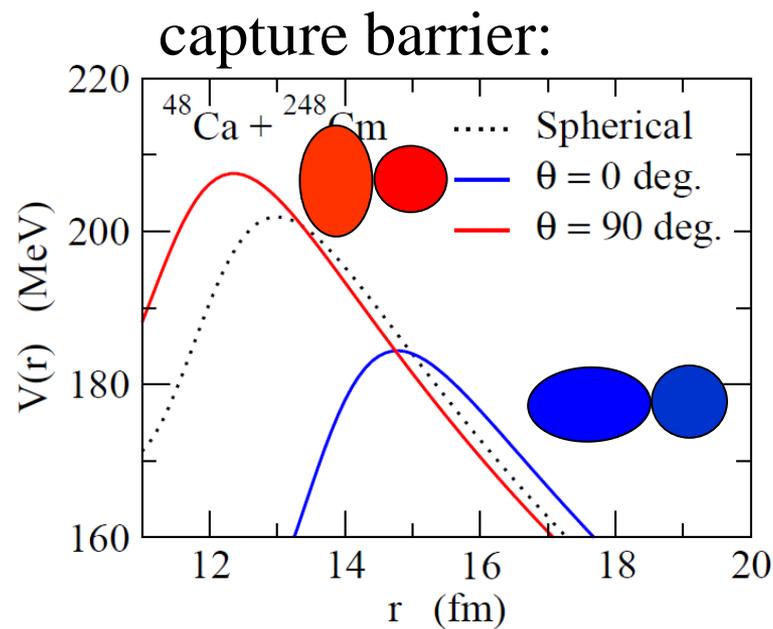
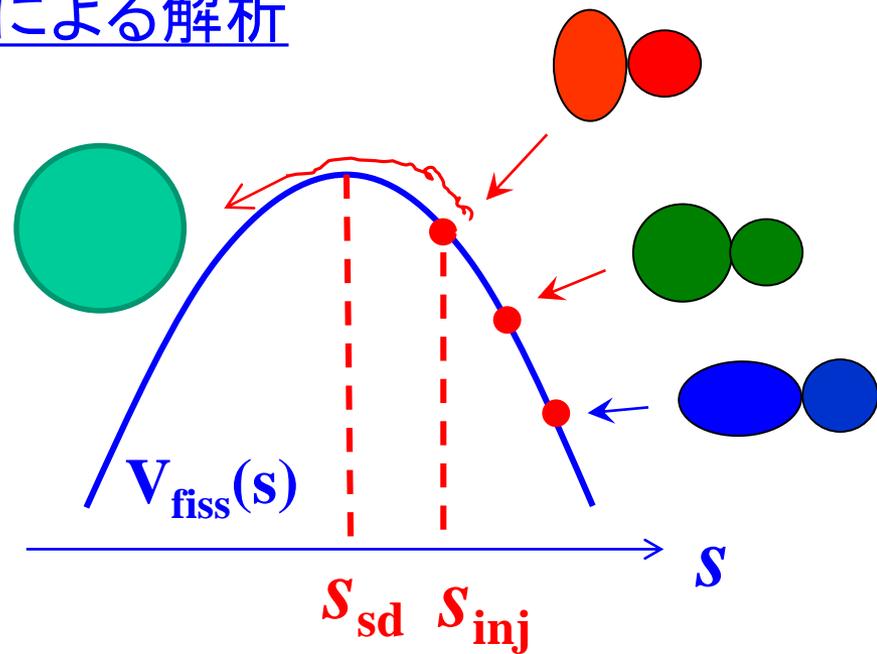
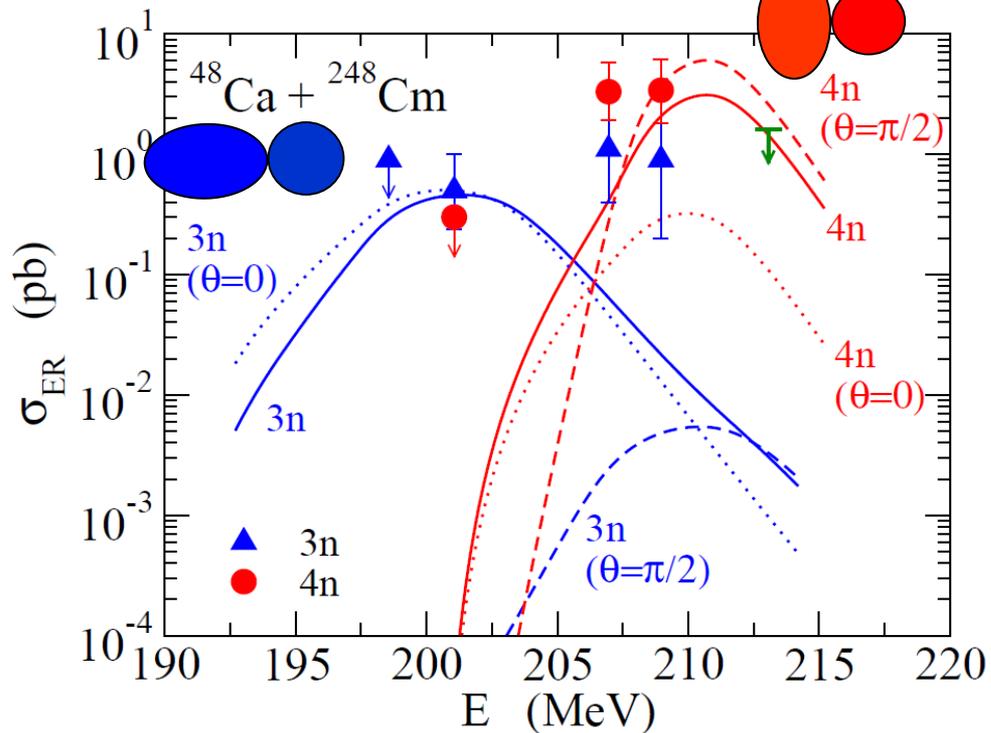
多次元化

- ・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



拡張された fusion-by-diffusion 模型による解析

K.H., PRC98 ('18) 014607



超重元素反応の新モデル: TDHF + Langevin アプローチ

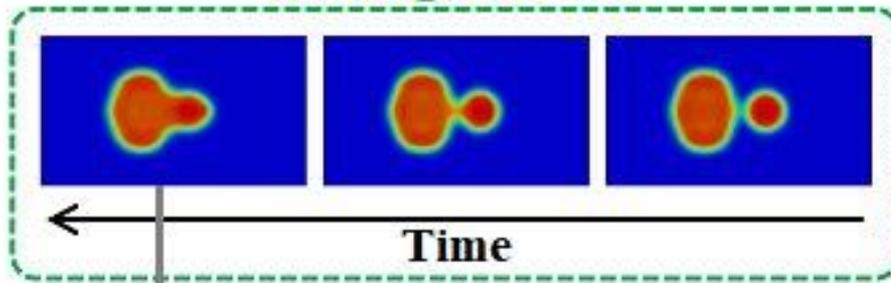
K. Sekizawa and K.H., PRC99 (2019) 051602(R)



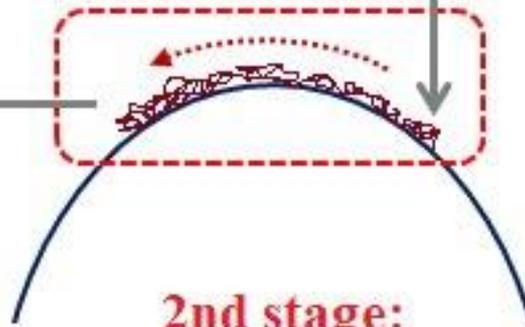
TDHF+Langevin:

a new hybrid model of fusion reactions for superheavy elements

1st stage: TDHF



3rd stage:
statistical model

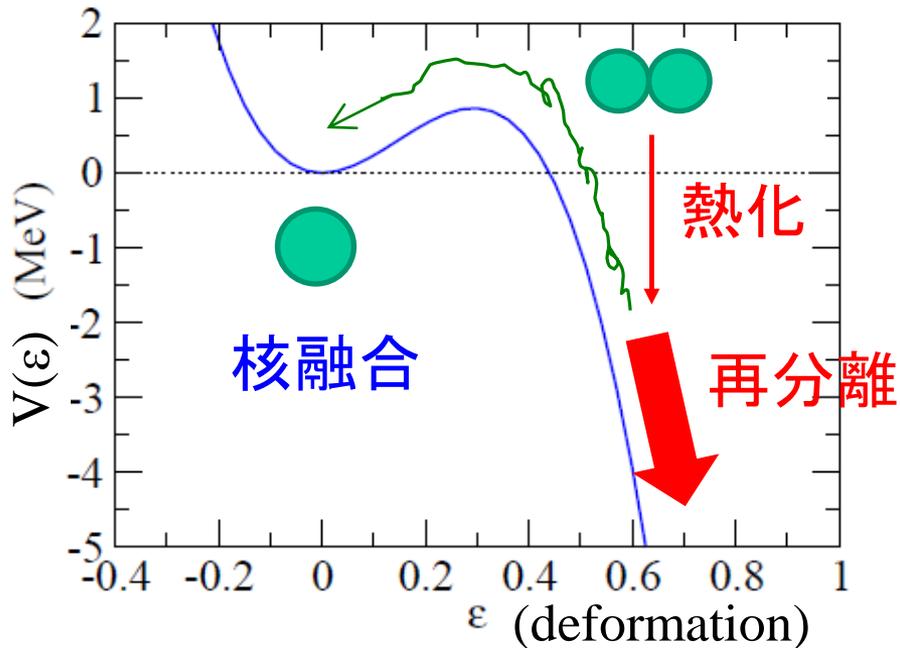
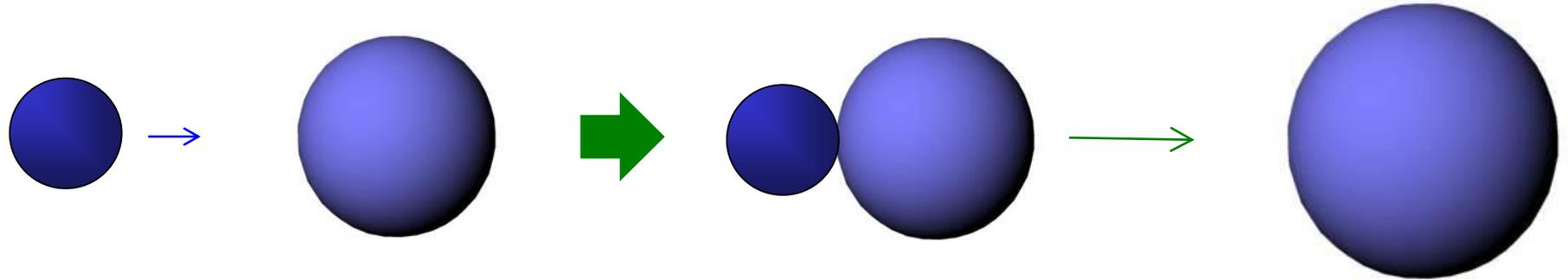


2nd stage:
Langevin model

System	CN (fm)	R_{\min}	P_{fus} ($\times 10^{13}$)	
$^{48}\text{Ca} + ^{254}\text{Fm}$	302	120	12.93	302
$^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$	302	120	13.09	2.47
$^{51}\text{V} + ^{249}\text{Bk}$	300	120	12.94	0.461
$^{48}\text{Ca} + ^{257}\text{Fm}$	305	120	12.94	1.82

^{48}Ca はどのように特別か?

理論物理学としての課題



✓ どのように熱化するのか?

「摩擦の量子論」

c.f. 量子摩擦を考慮した
トンネル確率

M. Tokieda and K.H.,
PRC95 ('17) 054604

✓ 非マルコフ効果?

✓ 拡散に対する量子補正?

熱的拡散

→ ランジュバン法

摩擦の量子論

古典的な運動方程式

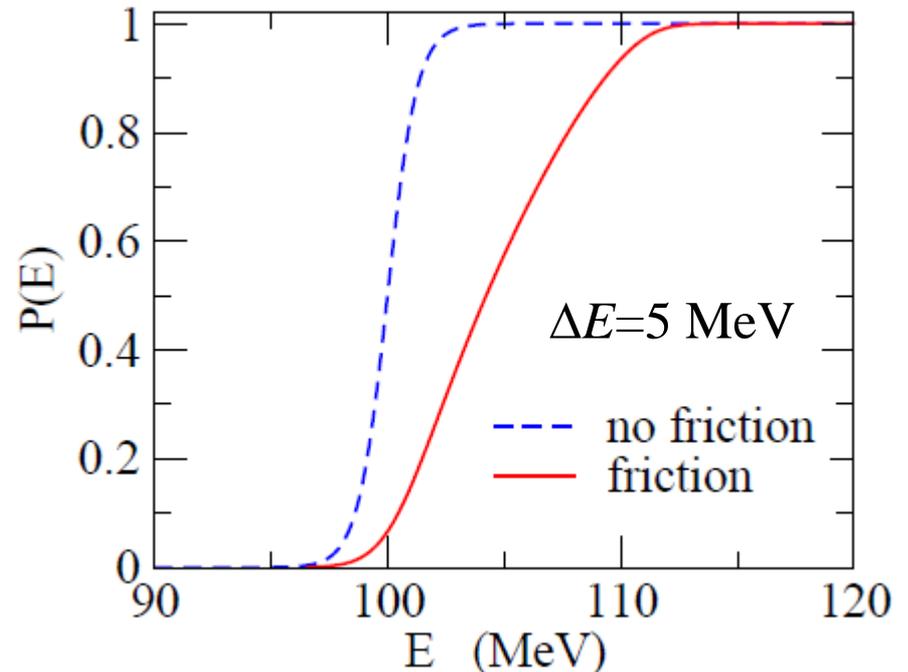
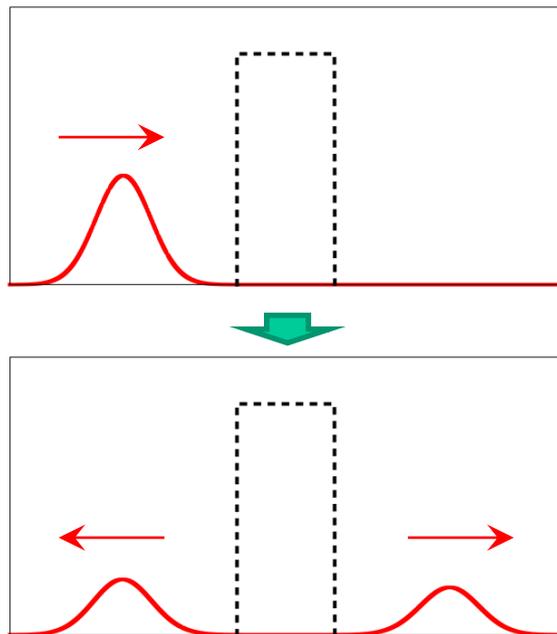
$$\dot{p} = -V'(x) - \gamma p$$

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

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

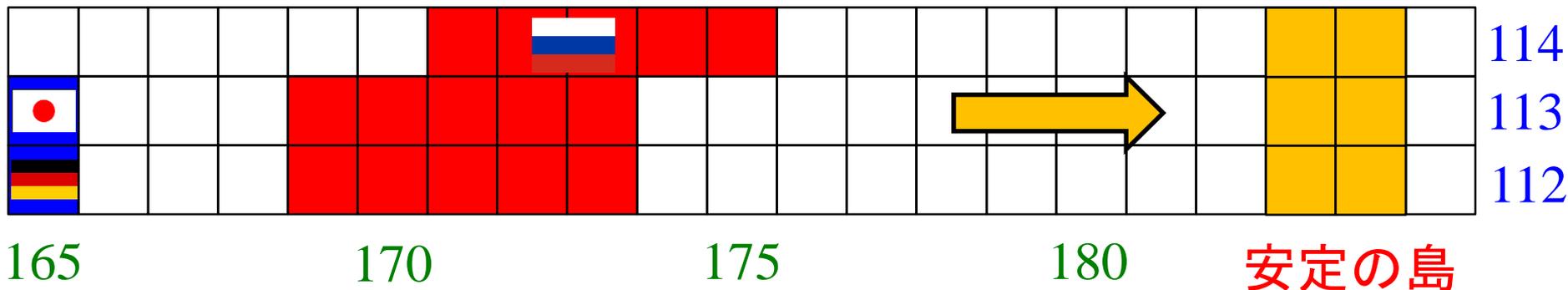
➡ $\frac{d}{dt} \langle p \rangle = -\langle V'(x) \rangle - \gamma \langle p \rangle$

時間に依存する波束法

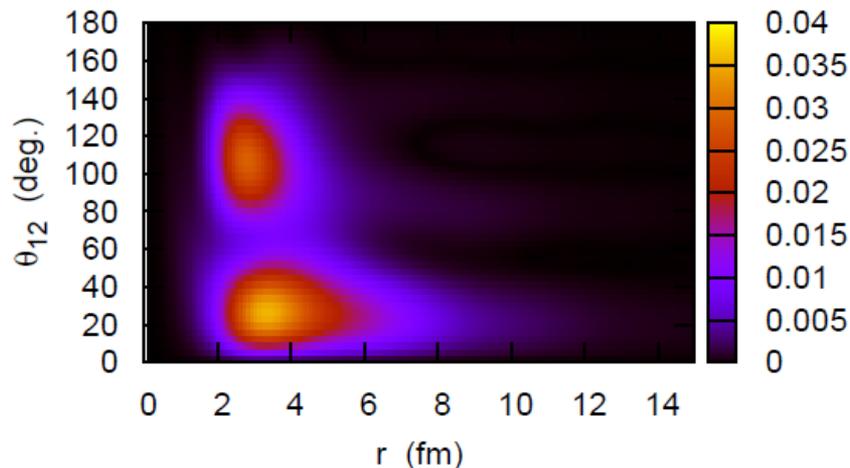
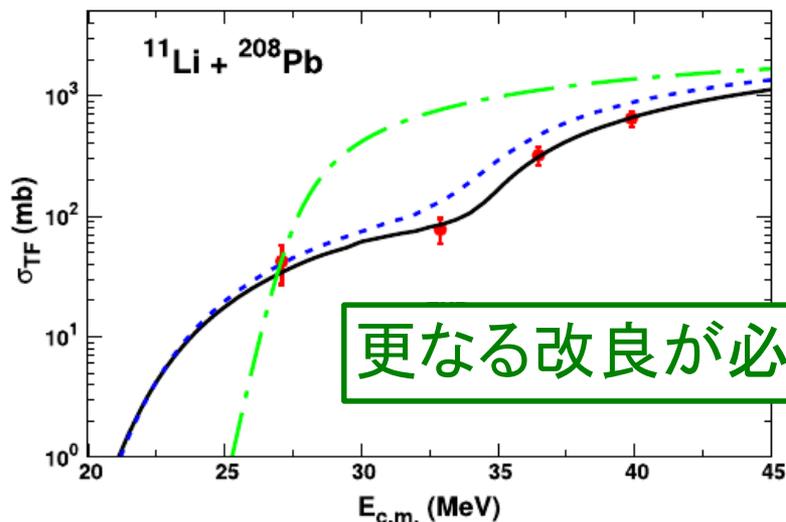


もう一つの課題

中性子過剰核の核融合反応



中性子過剰核ビームが必須→反応ダイナミクス?

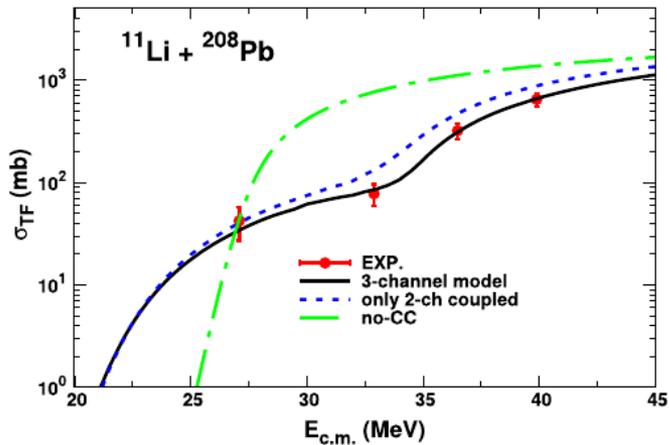


K.H. and H. Sagawa, PRC72('05)044321

K.-S. Choi, K. Hagino et al.,
Phys. Lett. B780 ('18) 455

中性子過剰核の構造の理解も必要

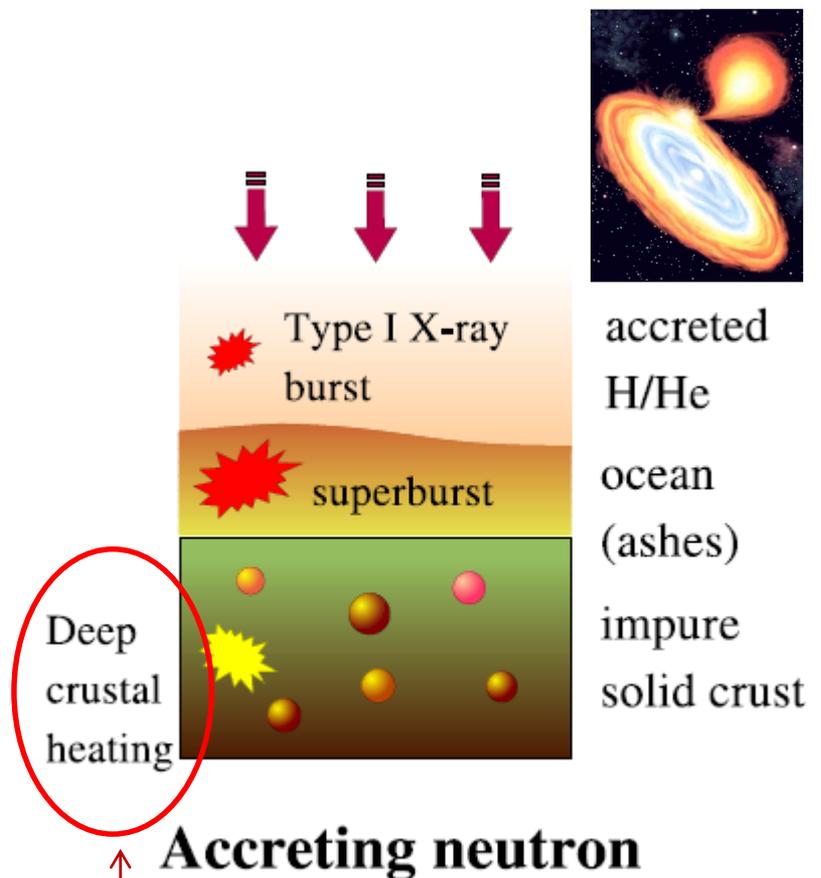
中性子過剰核の反応



- ✓ 核融合反応
- ✓ 多核子移行反応



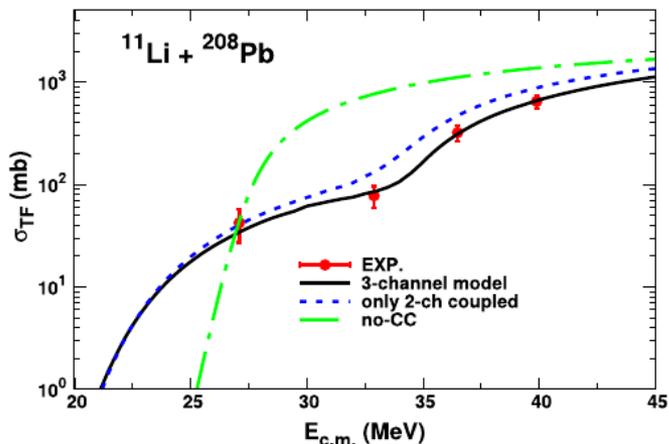
- 微視的反應理論の開発
- 中性子星内部の核反応



中性子過剰核の融合反応



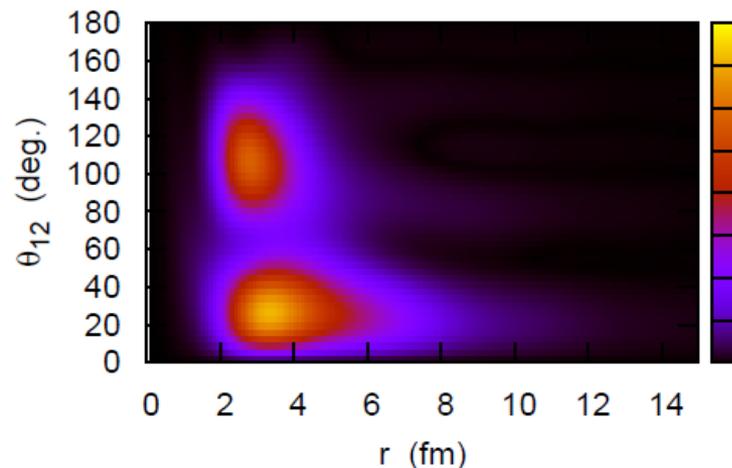
中性子過剰核の反応



- ✓ 核融合反応
- ✓ 多核子移行反応

- 微視的反応理論の開発
- 中性子星内部の核反応

中性子過剰核の構造



- ✓ 核子相関
- ✓ 集団運動
- ✓ 核分裂

少数系から多体系へ

中性子過剰核を軸にした超重元素の物理を展開する

まとめ

超重元素:強い電場の環境下での量子多体系

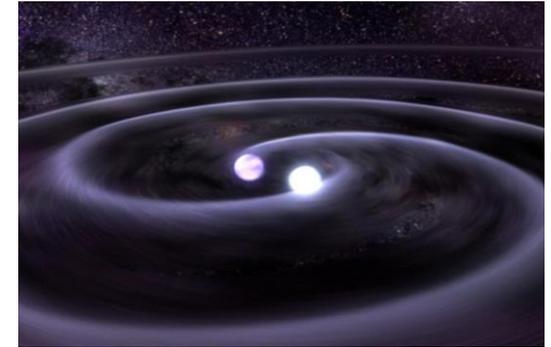
超重元素の核物理

超重元素の化学や物性

宇宙物理



Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period ↓	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	



反応ダイナミクス

- ✓ 摩擦の量子論
- ✓ 中性子過剰核



- ✓ 核物理(不安定核)
- ✓ 元素の起源
- ✓ キロノバ

核物理、化学、宇宙物理などの分野融合による超重元素の研究

おわりに:若手に向けて

- ✓ 昔の論文をよく読む
- ✓ 「守・破・離」(千利休)
- ✓ 海外経験は重要

「興味」の幅を広く持つ

