

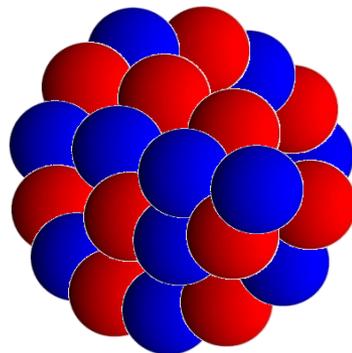
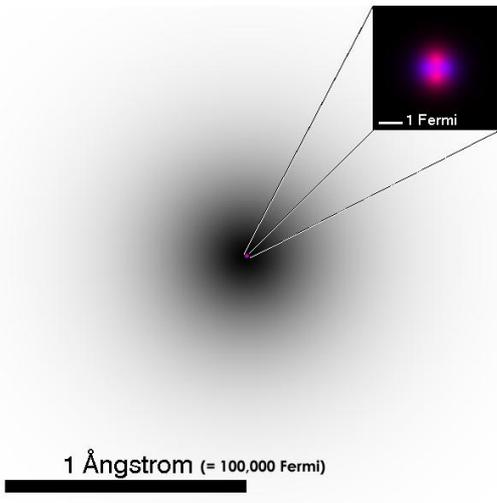
Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

自然界にある元素: **Pu** ($Z=94$) → 自然界に極微量ある
U ($Z=92$)

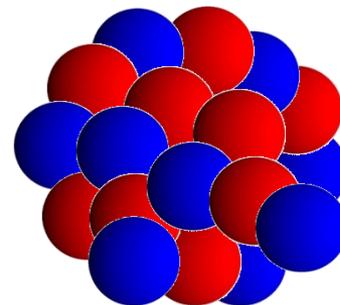
何がこの番号を決めているのか??

重い原子核 → 大きなクーロン反発

↓
 α 崩壊に対して不安定

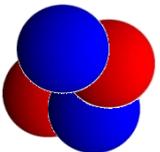


(Z, N)



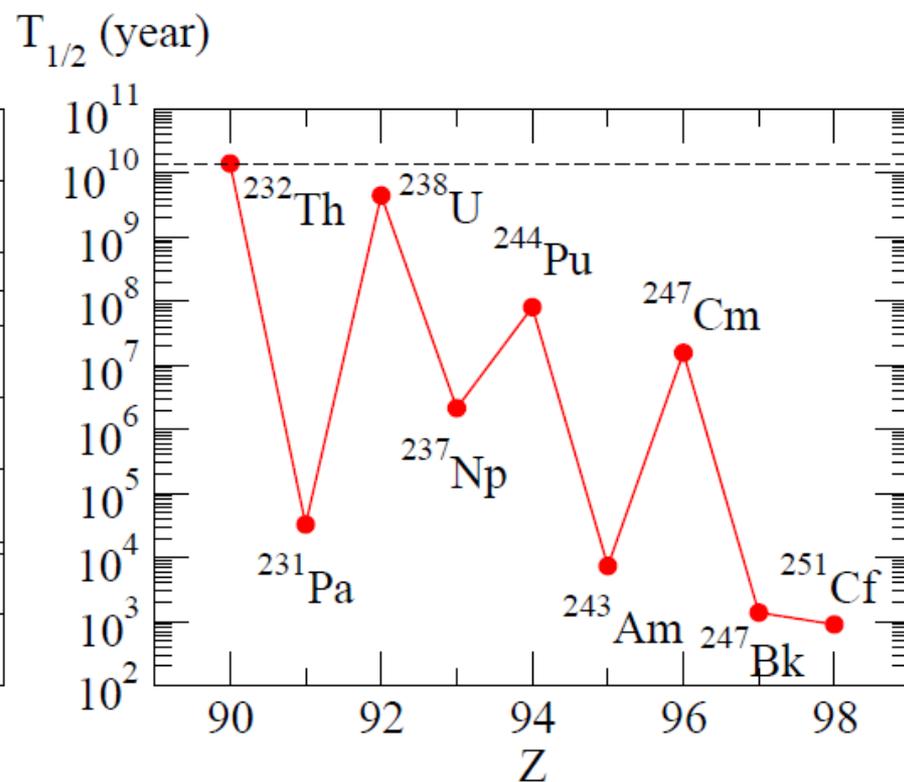
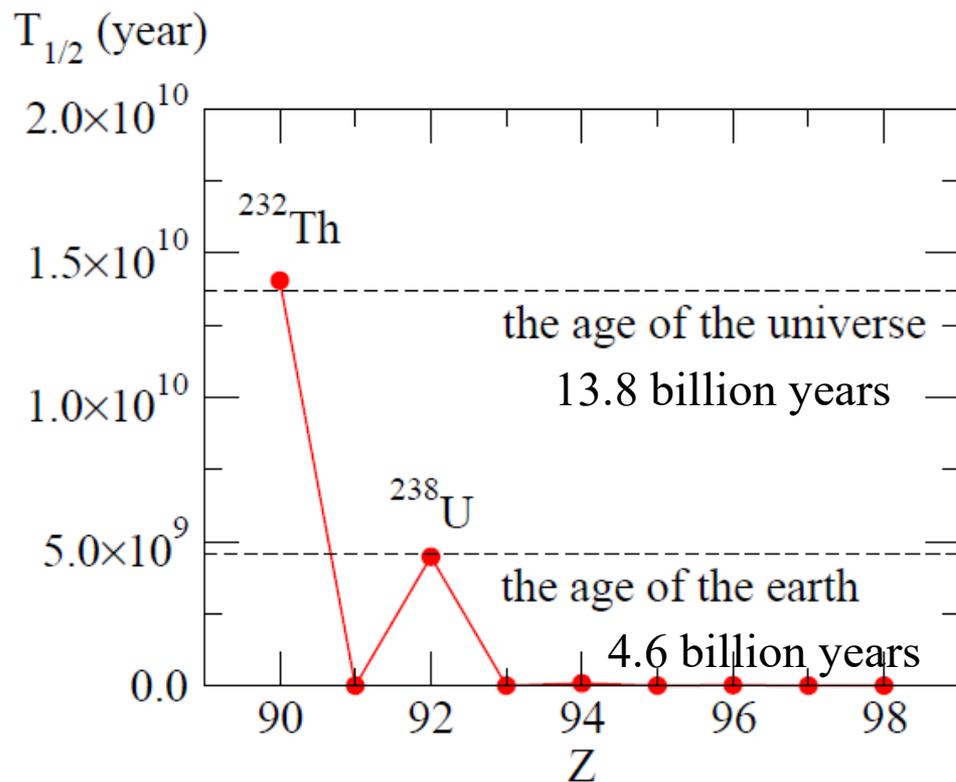
$(Z-2, N-2)$

+



$(Z=2, N=2)$

重い原子核の半減期



^{232}Th 1.405×10^{10} years

^{238}U 4.468×10^9 years

^{244}Pu 8.08×10^7 years

^{247}Cm 1.56×10^7 years

元素の周期表

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	

人工元素

← 原子核反応

超重元素

(アクチノイド以降の元素)

超重元素の核融合反応

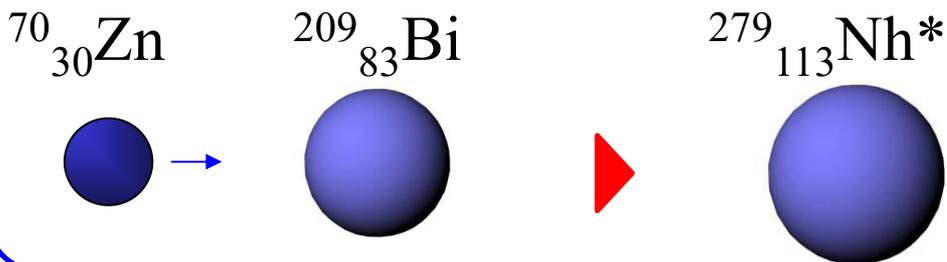
113番元素: ニホニウムNh

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

2016年11月



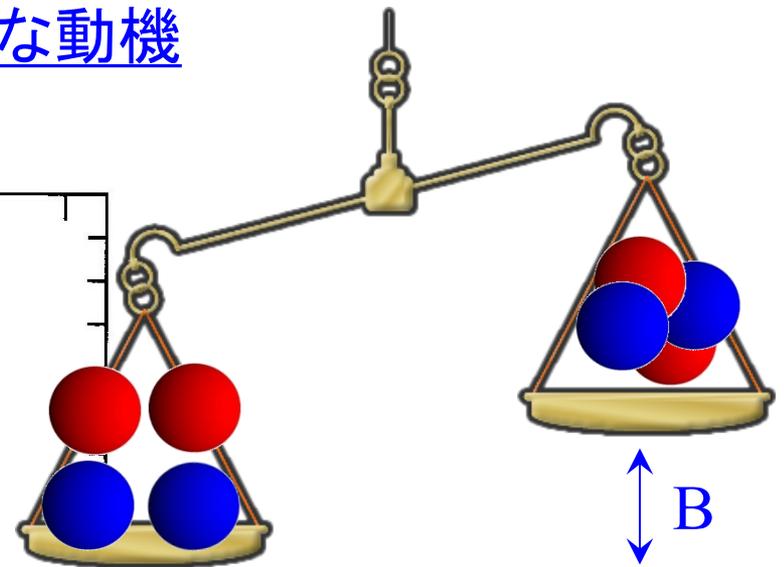
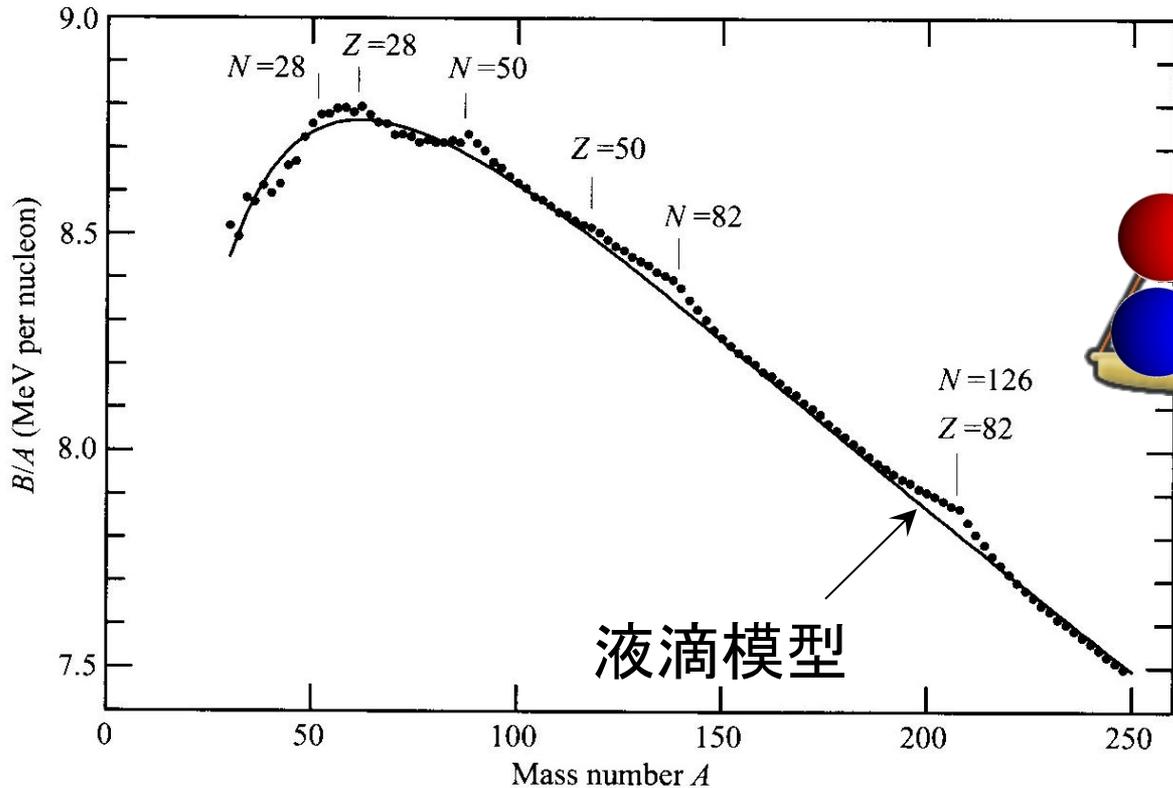
Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 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

Wikipedia

安定の島の予言: 超重元素探索の重要な動機

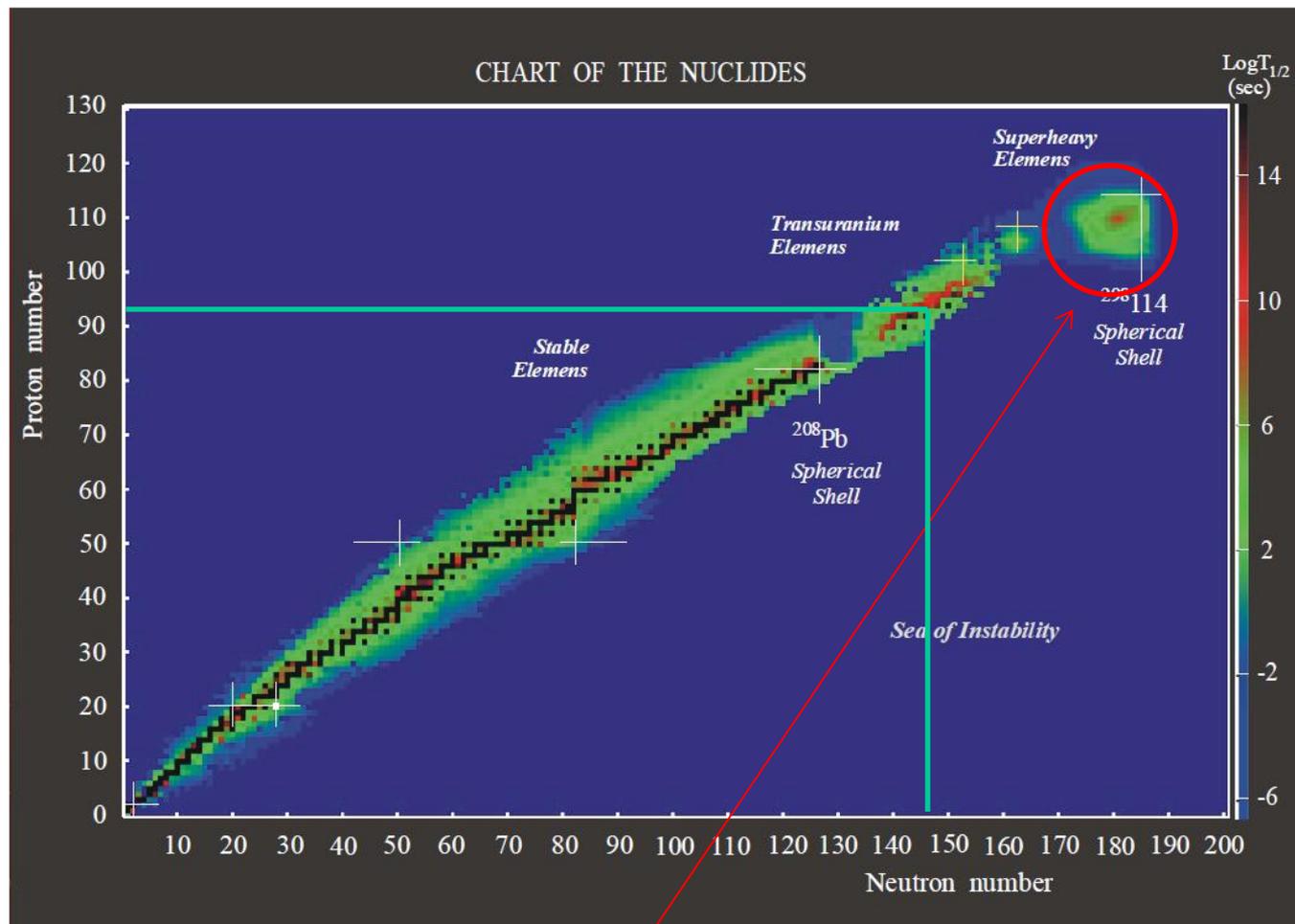


N or $Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$ で束縛が大(魔法数)

${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$: 自然界にある一番重い2重魔法数核→次はどこ？

安定の島の予言: 超重元素探索の重要な動機

$^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$: 自然界にある一番重い2重魔法数核→次はどこ？



安定の島: Z=114, N=184 の周辺

Yuri Oganessian

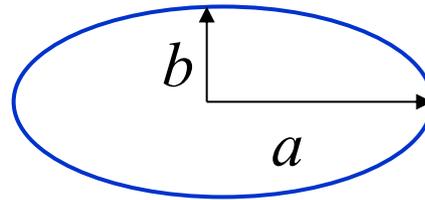
W.D. Myers and W.J. Swiatecki (1966), A. Sobiczewski et al. (1966): 今から60年前

復習: 重い核と核分裂障壁

$$B(N, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{\text{sym}} \frac{(N - Z)^2}{A}$$

原子核を**体積一定のまま**変形してみる

例) 回転楕円体



$$\begin{aligned} a &= R \cdot (1 + \epsilon) \\ b &= R \cdot (1 + \epsilon)^{-1/2} \\ ab^2 &= R^3 = \text{一定} \end{aligned}$$

変形したときのエネルギー変化:

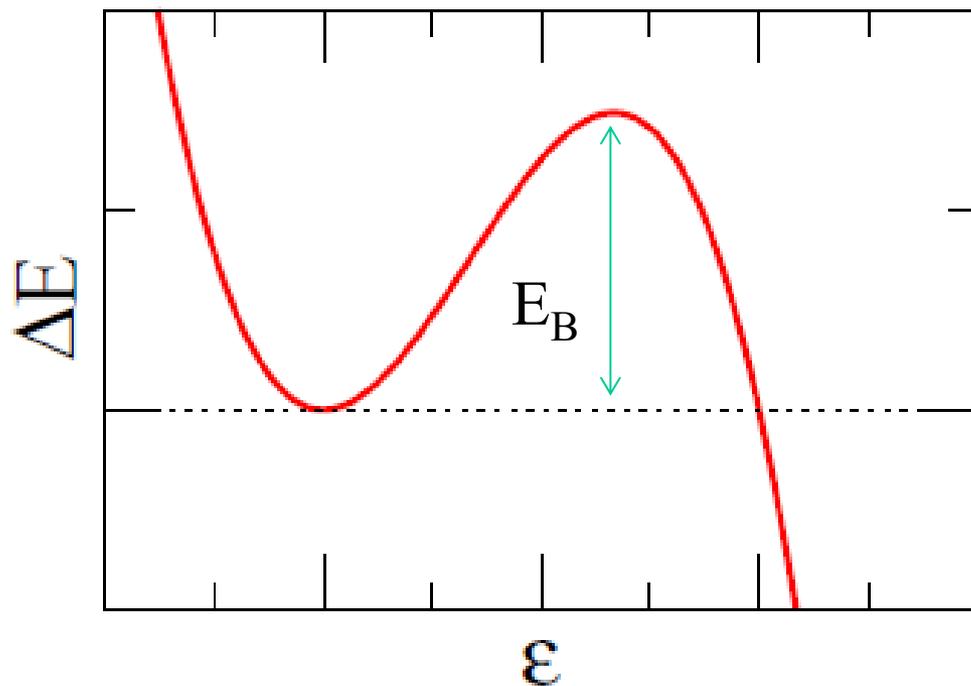
- 体積項、対称エネルギー項: 変化せず
 - クーロン項
 - 表面項
- } 変化

{ 表面項 → 球形になる傾向
クーロン項 → 変形になる傾向 } → 2つの力の競合

(復習)

$$\Delta E = E_S^{(0)} \left\{ \frac{2}{5}(1-x)\epsilon^2 - \frac{4}{105}(1+2x)\epsilon^3 + \dots \right\}$$

$$x \equiv \frac{E_C^{(0)}}{2E_S^{(0)}} = \frac{a_C}{2a_S} \cdot \frac{Z^2}{A} \sim \frac{1}{53.3} \cdot \frac{Z^2}{A}$$



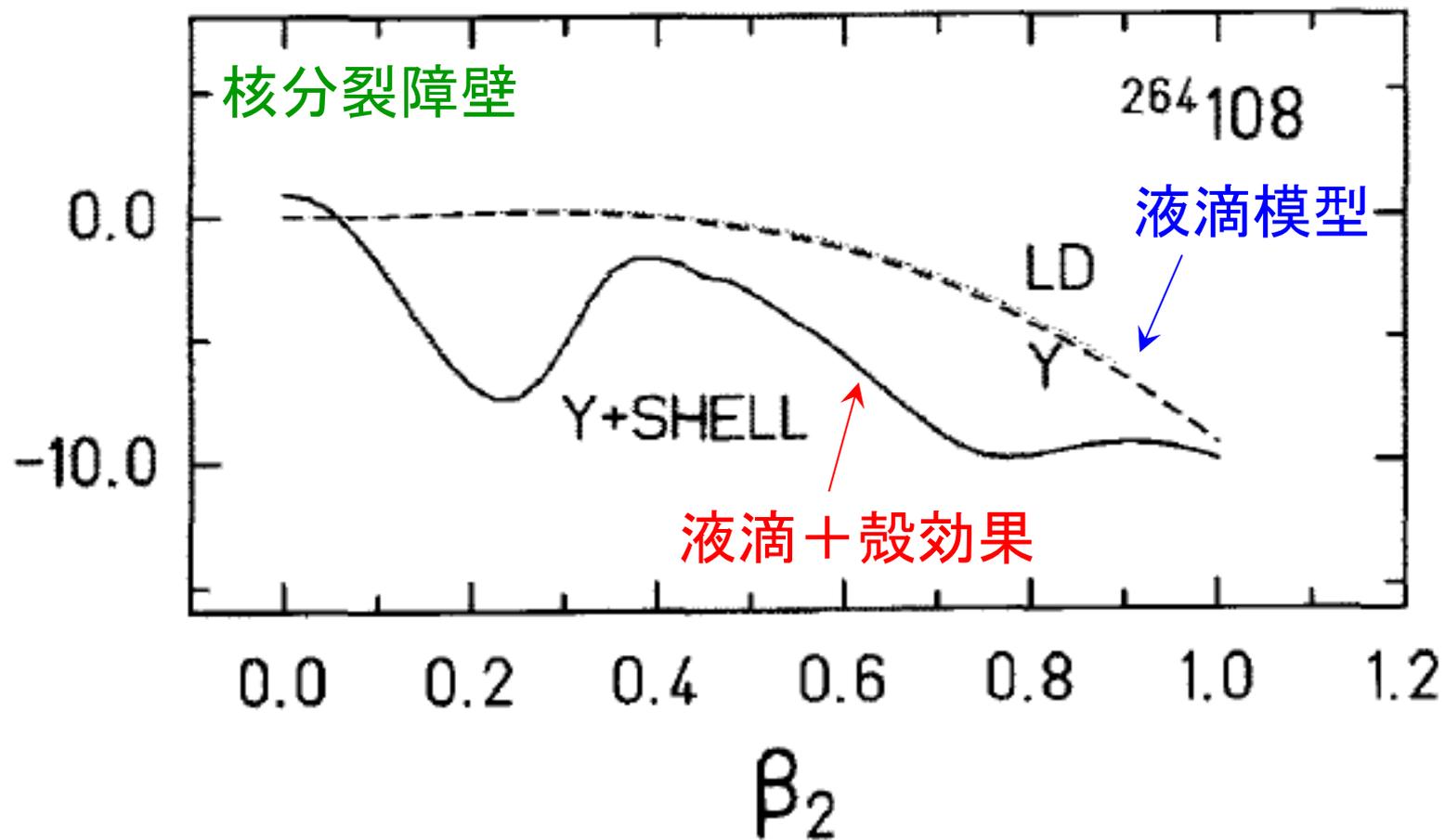
重い核: $x \sim 1$

$$E_B = \frac{98}{15} \cdot \frac{(1-x)^3}{(1+2x)^2} \cdot E_S^{(0)}$$

重い核ほど障壁は低くなる

$$\epsilon_B = 7 \cdot \frac{(1-x)}{(1+2x)}$$

重い核ほど障壁での変形度は小さくなる



Z. Patyk et al. NPA491('89)267

殻効果(変形魔法数)により核分裂障壁が高くなり安定化

安定の島(超重元素)を目指して



Yuri Oganessian
(アルメニアの切手)

who is she?

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
----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Z=110	Darmstadtium (Ds)	1994	Germany
Z=111	Roentgenium (Rg)	1994	Germany
Z=112	Copernicium (Cn)	1996	Germany
Z=113	Nihonium (Nh)	2003	Russia / 2004 Japan
Z=114	Flerovium (Fl)	1999	Russia
Z=115	Moscovium (Mc)	2003	Russia
Z=116	Livermorium (Lv)	2000	Russia
Z=117	Tennessine (Ts)	2010	Russia
Z=118	Oganesson (Og)	2002	Russia

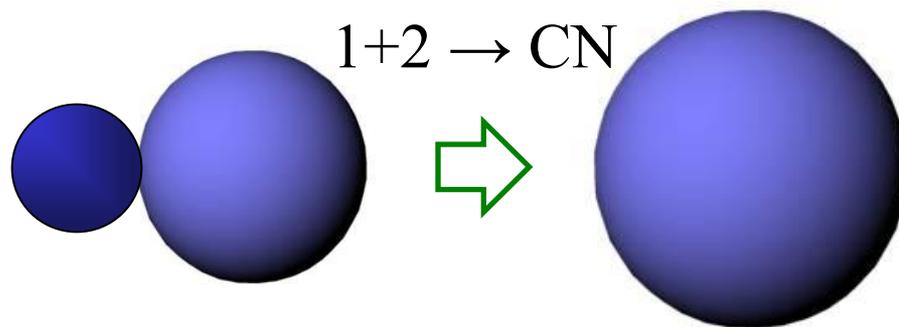
113 Nh nihonium	115 Mc moscovium
117 Ts tennessine	118 Og oganeson

ドイツ、日本: 冷たい融合反応 (cold fusion)

ロシア: 熱い融合反応 (hot fusion)

ドイツ、日本: 冷たい融合反応 (cold fusion)

ロシア: 熱い融合反応 (hot fusion)



	Hot Fusion	Cold Fusion
例	$^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am} \rightarrow ^{287}\text{Nh} + 4n$	$^{70}\text{Zn} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{278}\text{Nh} + 1n$
非対称度	大	小

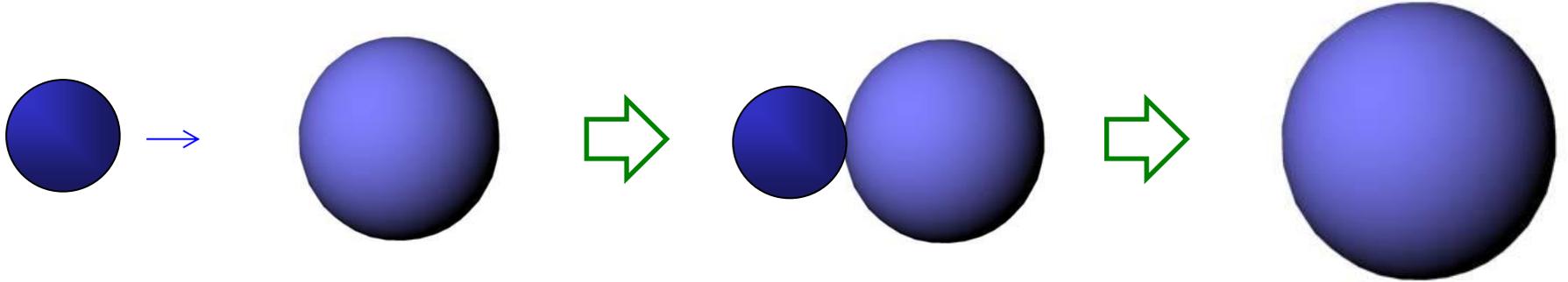
熱い複合核

冷たい複合核

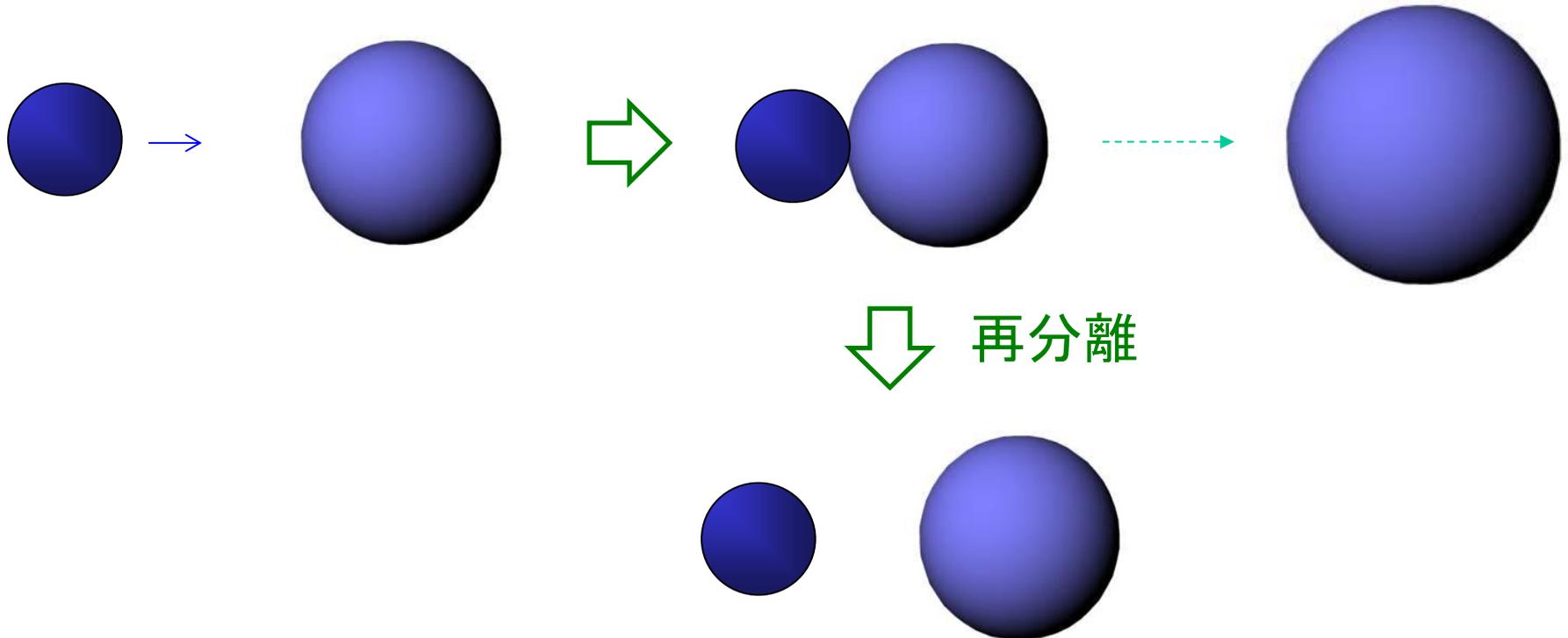
どうやって超重核を作る?

核融合反応

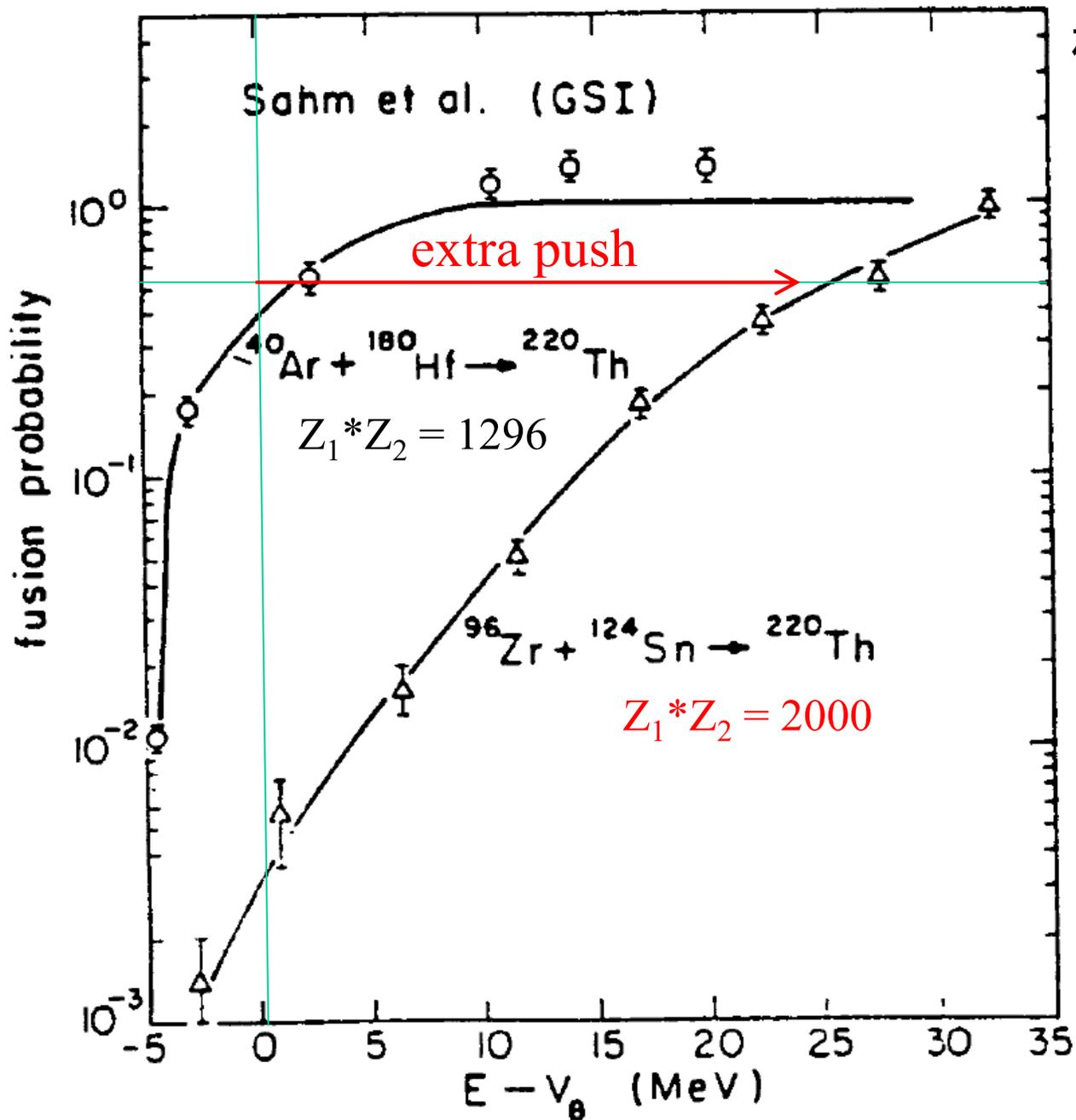
➤ 中重核の核融合反応:



➤ 重核や超重核の核融合反応:

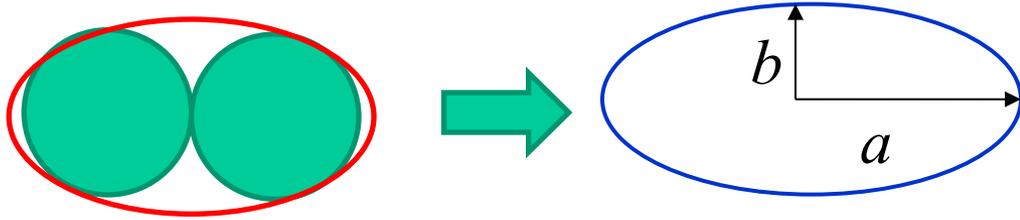


核融合断面積の阻害



C.-C. Sahm et al.,
Z. Phys. A319('84)113

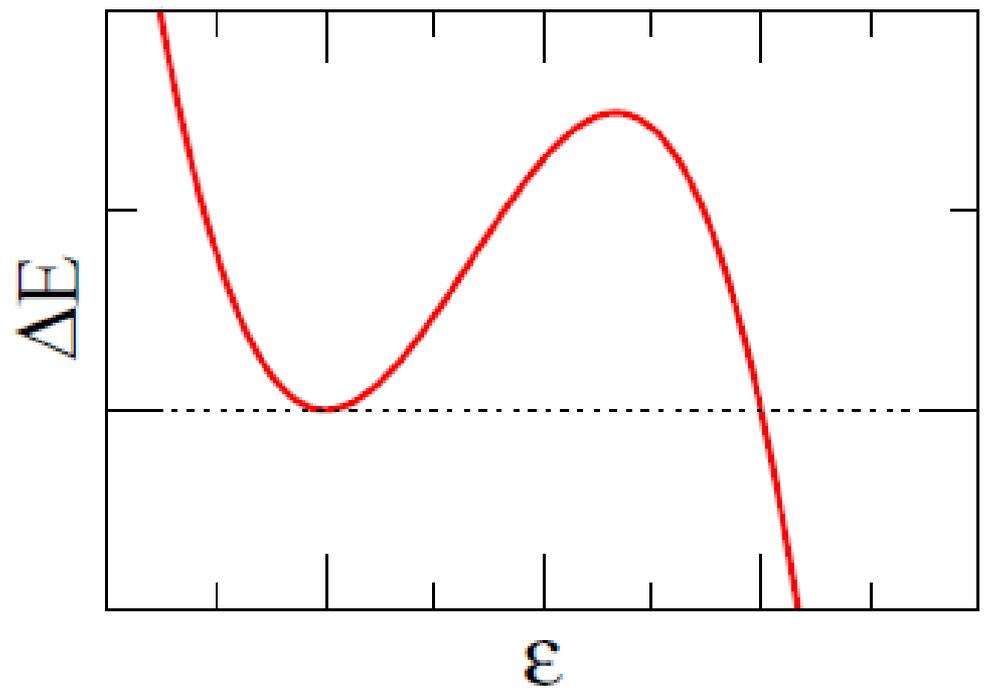
同じ原子核が接触すると:



$$a = R_0 \cdot (1 + \epsilon)$$

$$b = R_0 \cdot (1 + \epsilon)^{-1/2}$$

$$\frac{a}{b} \sim \frac{2R}{R} = 2 \rightarrow \epsilon \sim 0.587$$



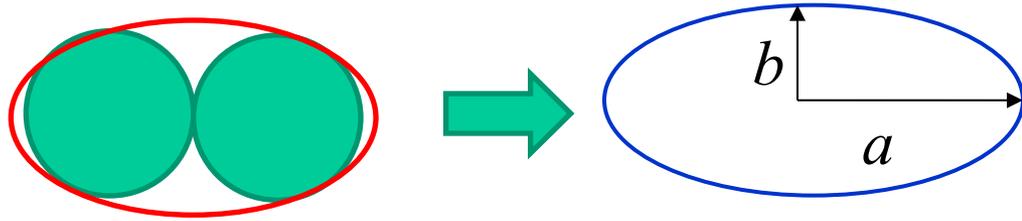
$$E_B = \frac{98}{15} \cdot \frac{(1-x)^3}{(1+2x)^2} \cdot E_S^{(0)}$$

$$\epsilon_B = 7 \cdot \frac{(1-x)}{(1+2x)}$$

$$x \equiv \frac{E_C^{(0)}}{2E_S^{(0)}} = \frac{a_C}{2a_S} \cdot \frac{Z^2}{A} \sim \frac{1}{53.3} \cdot \frac{Z^2}{A}$$

重い核ほど障壁での
変形度は小さくなる

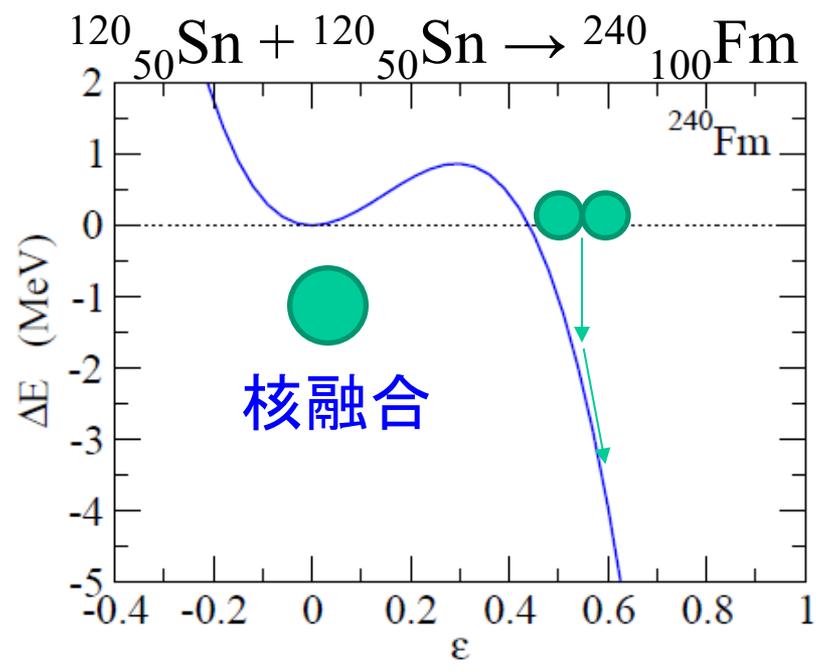
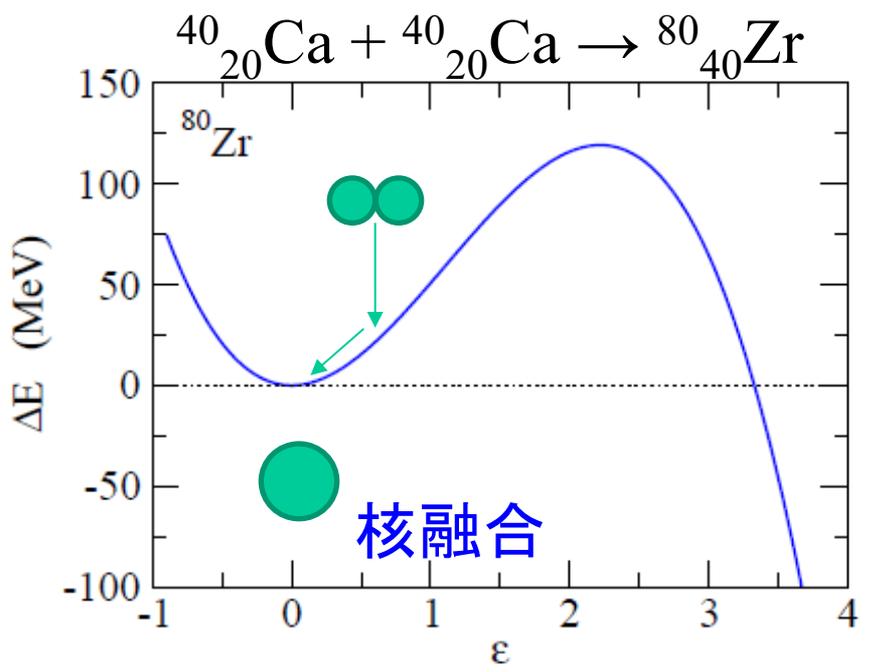
同じ原子核が接触すると:

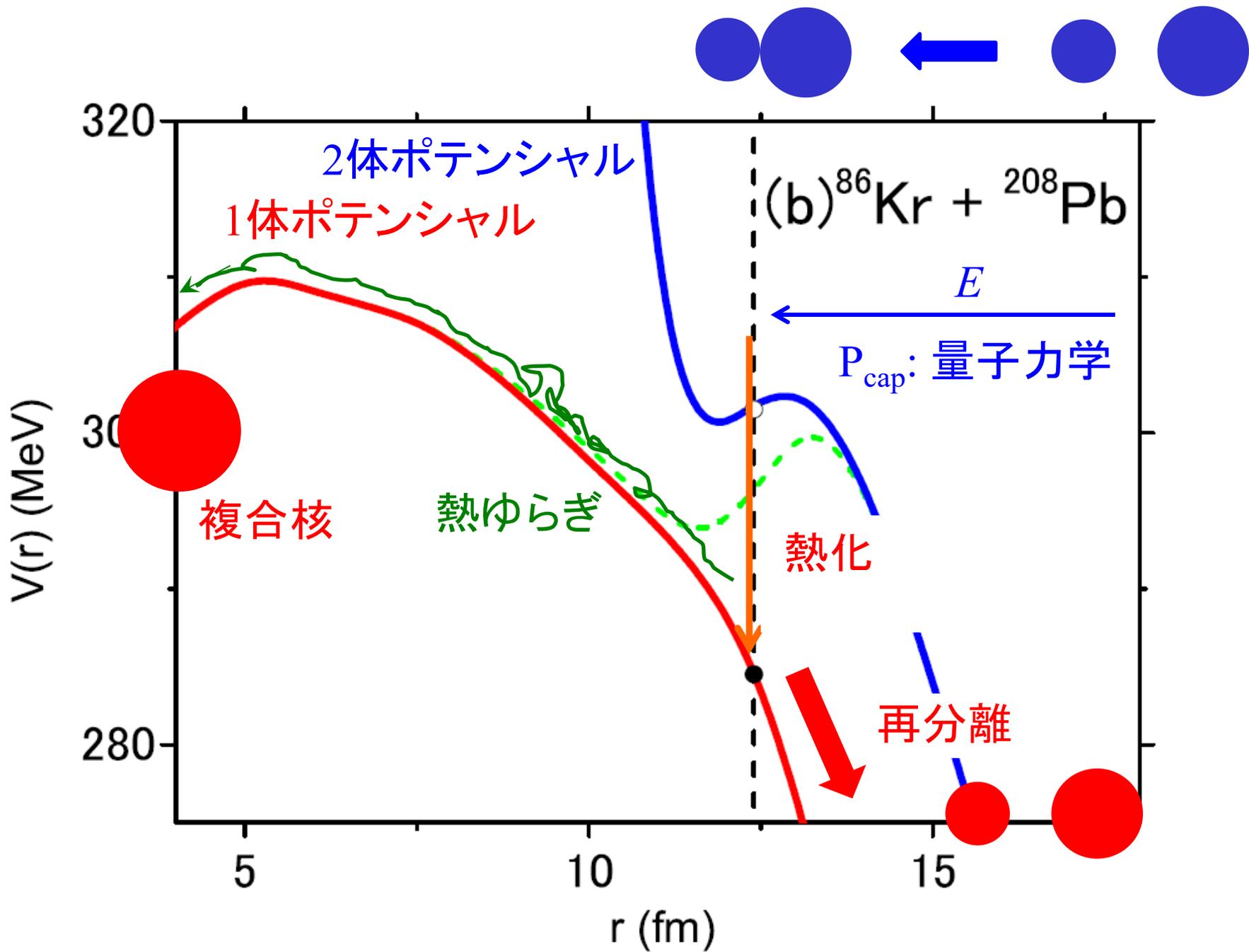


$$a = R_0 \cdot (1 + \epsilon)$$

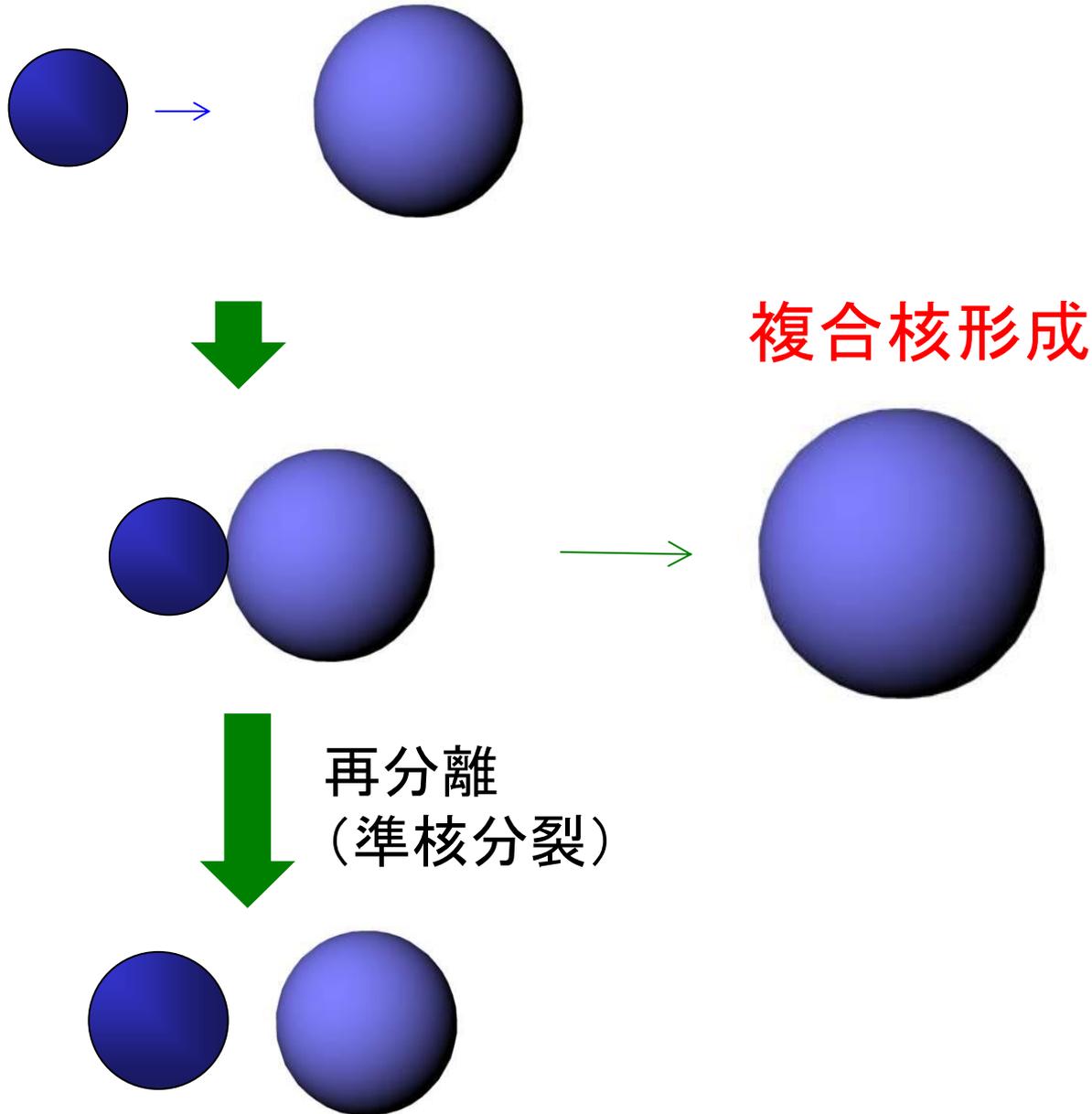
$$b = R_0 \cdot (1 + \epsilon)^{-1/2}$$

$$\frac{a}{b} \sim \frac{2R}{R} = 2 \rightarrow \epsilon \sim 0.587$$

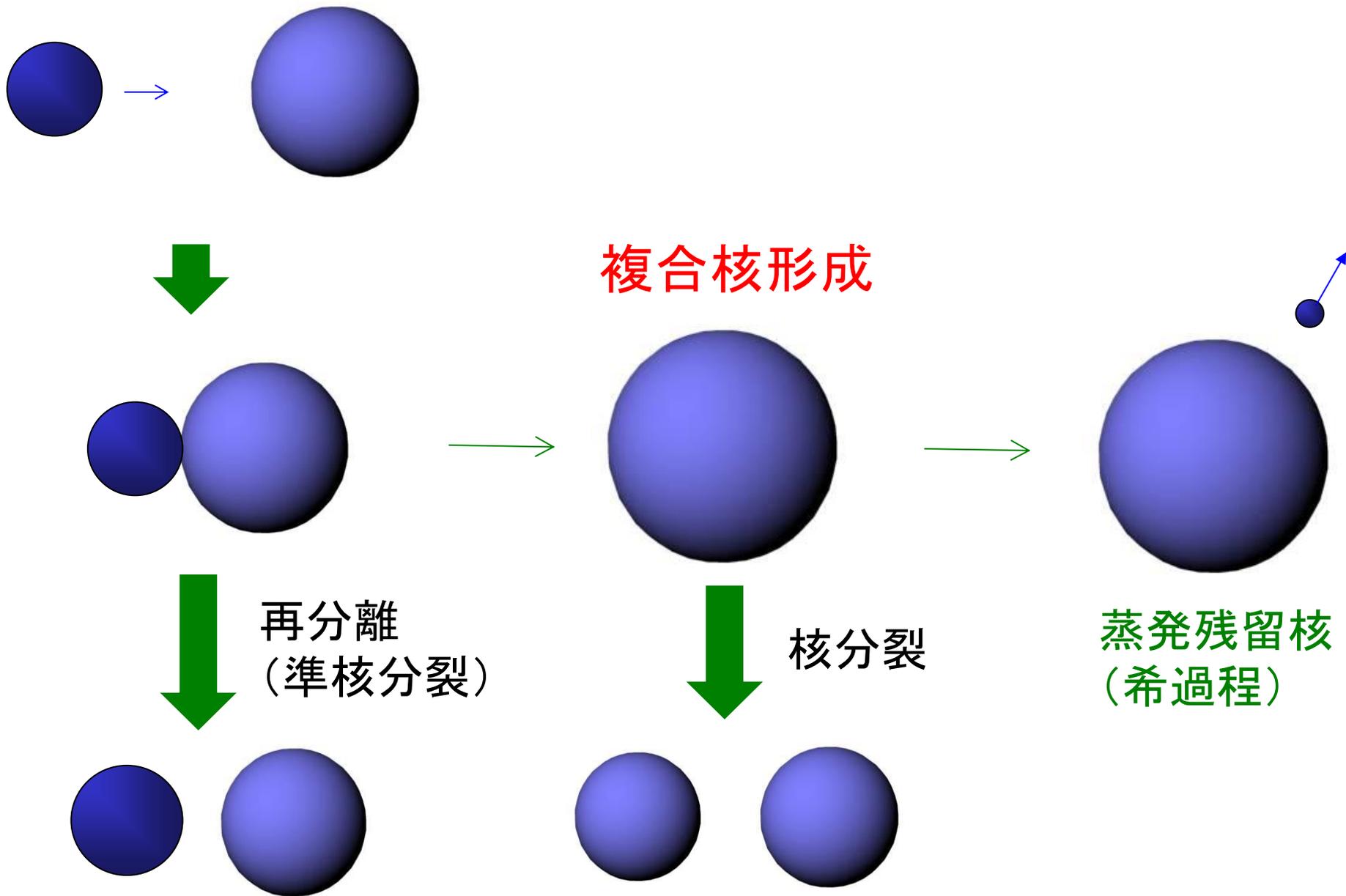




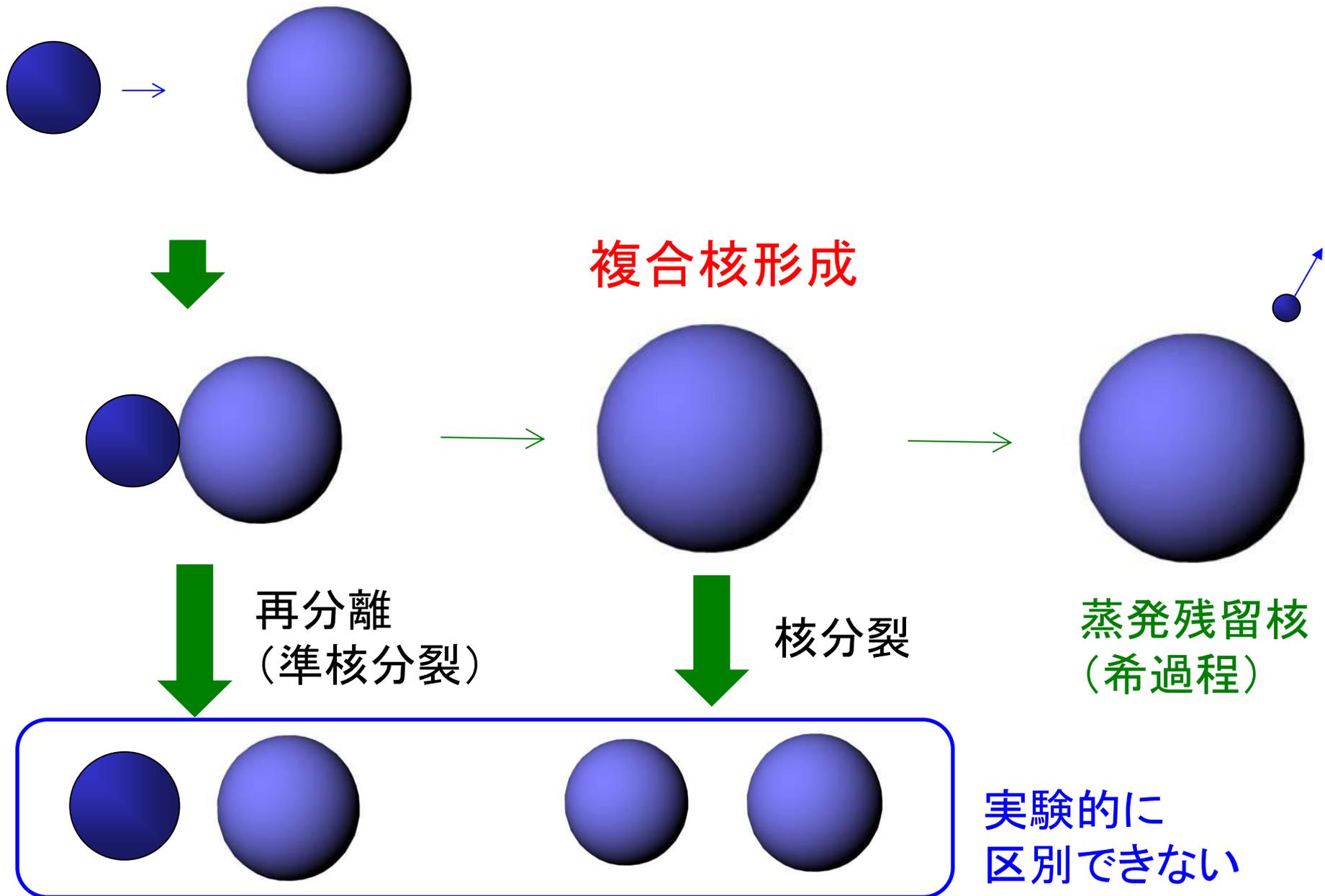
超重元素領域における重イオン核融合反応



超重元素領域における重イオン核融合反応



超重元素領域における重イオン核融合反応

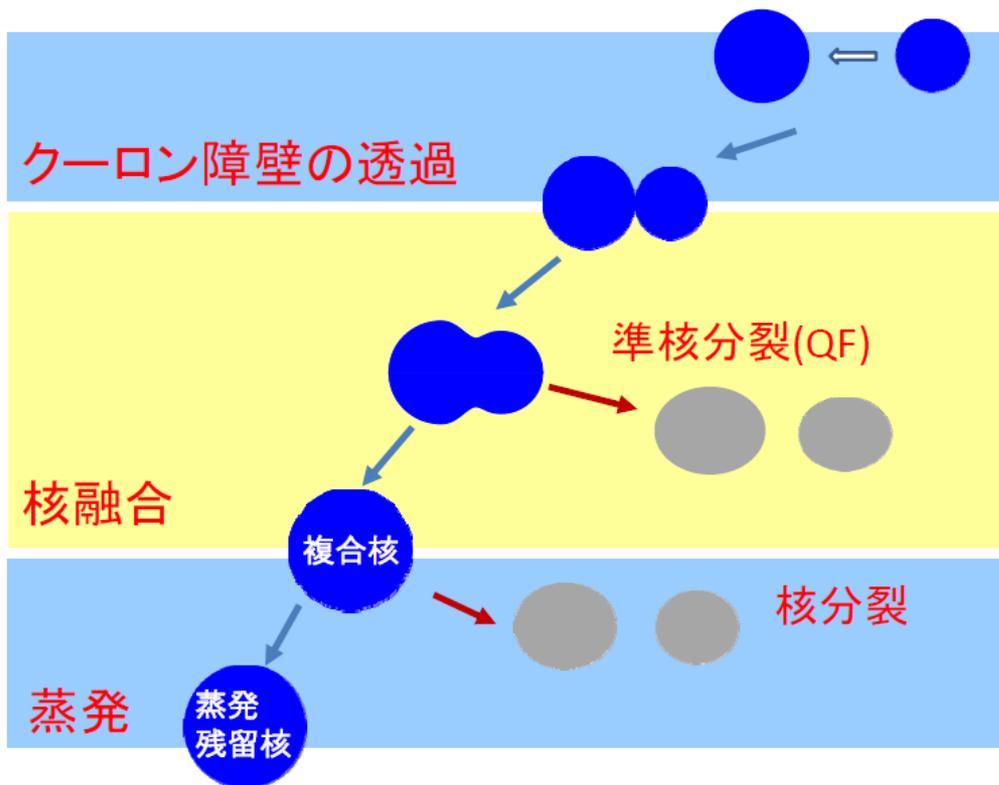


* どのように核融合反応断面積を測定するのか?

➤ 中重核領域の場合:

✓ 核融合生成物の直接測定 (蒸発残留核 + 核分裂)

➤ 重核・超重核領域の場合:



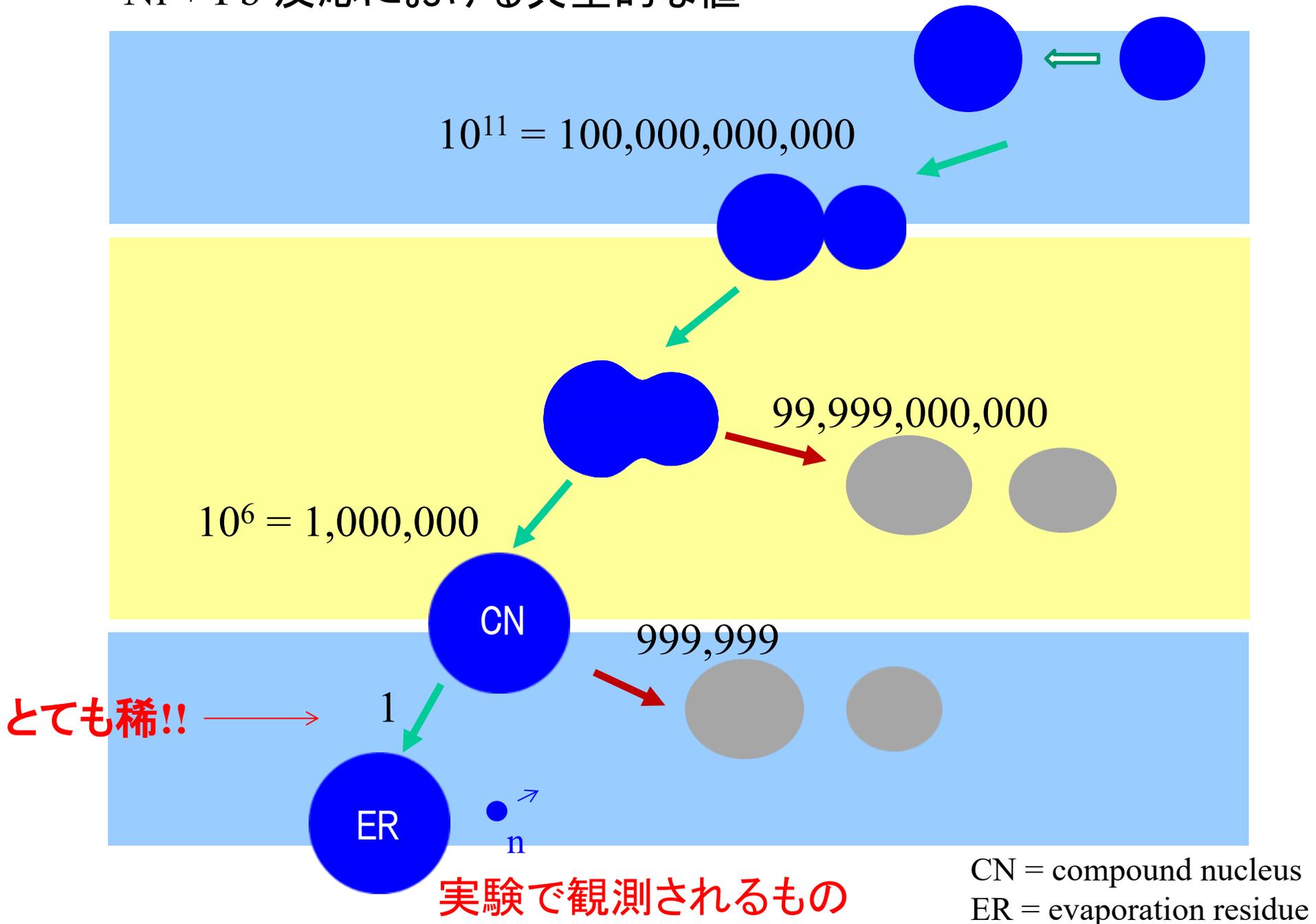
準核分裂 + 生き残りの2重苦

大きな準核分裂の確率のため、核分裂片の測定は複合核形成を意味しない (QFとFFの区別は実験的に困難)

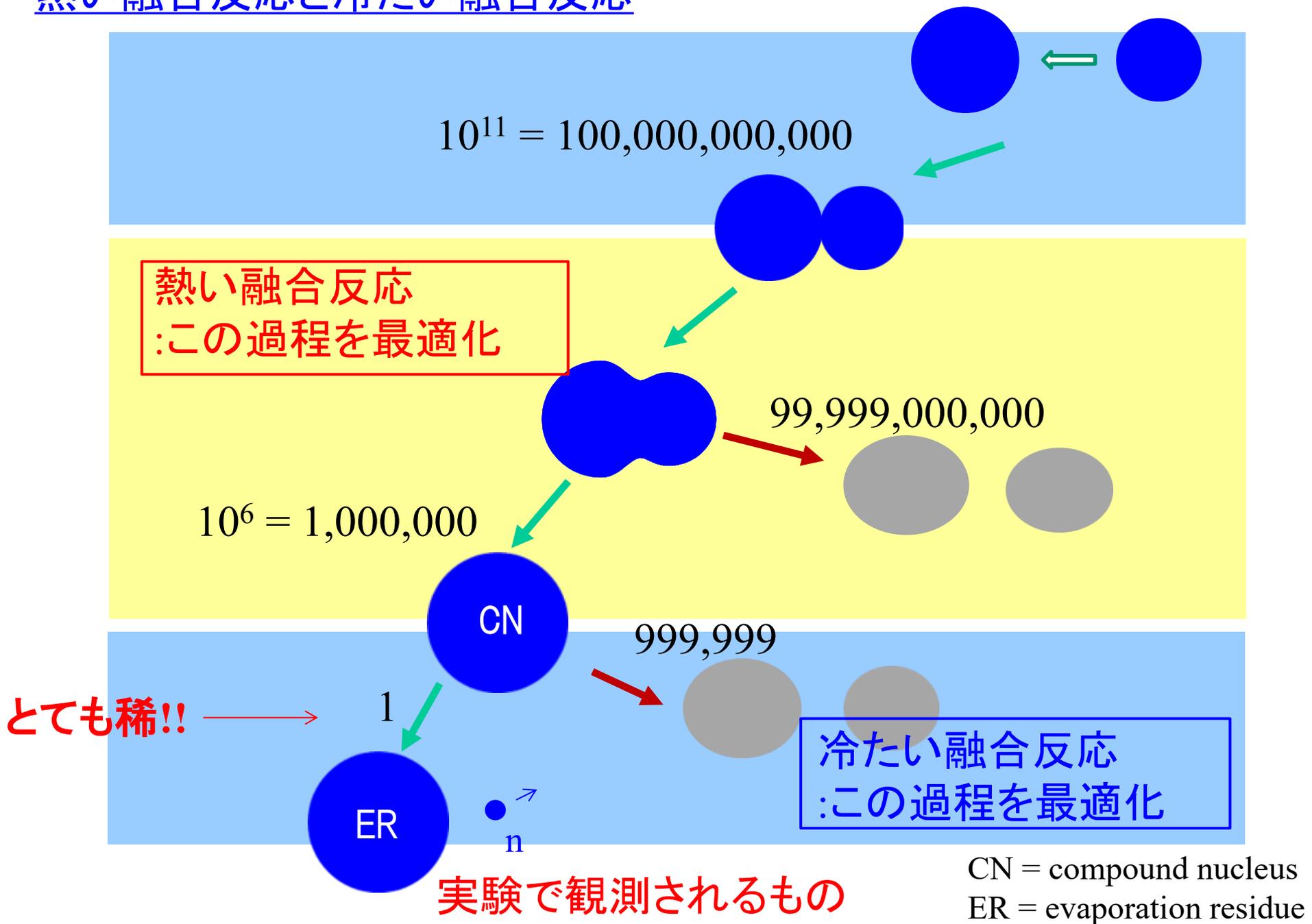
蒸発残留核の測定をもって複合核形成とみなす

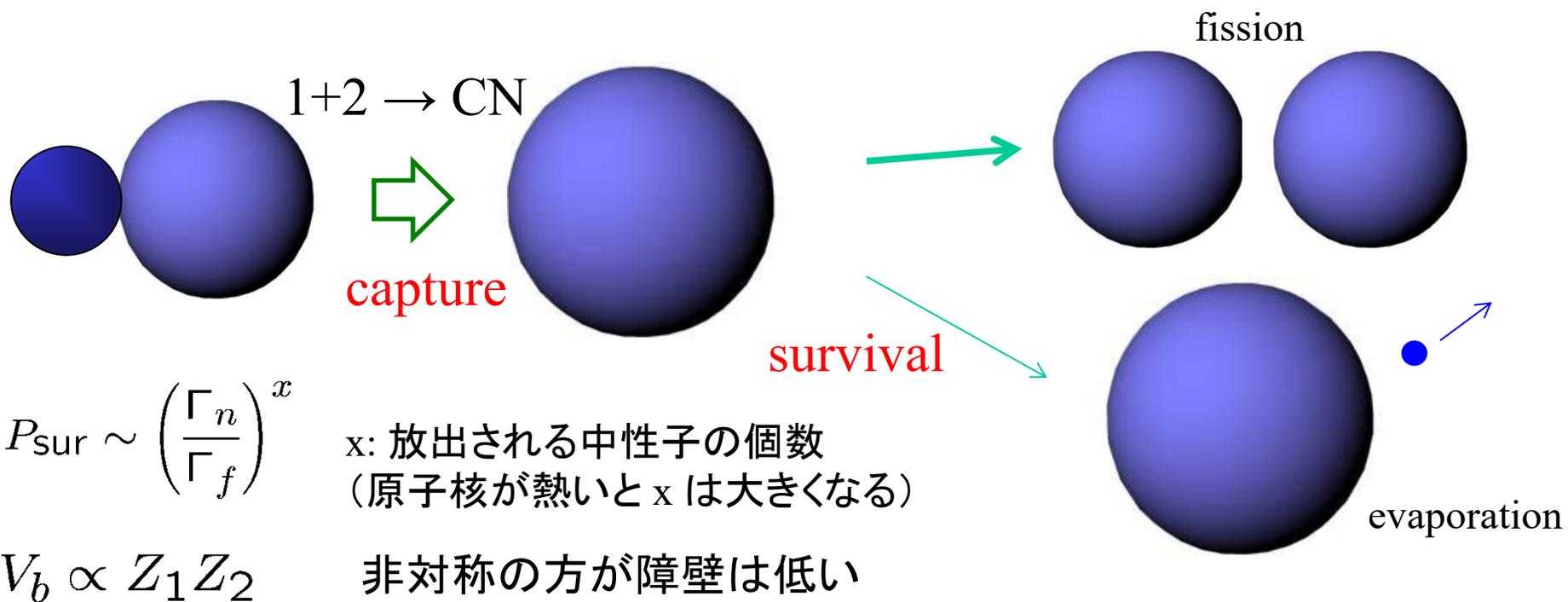
重い複合核:
圧倒的な確率で核分裂
(例: $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$ 反応では
核分裂しない確率は
 $P_{\text{suv}} \sim 10^{-6}$ 程度)

Ni + Pb 反応における典型的な値

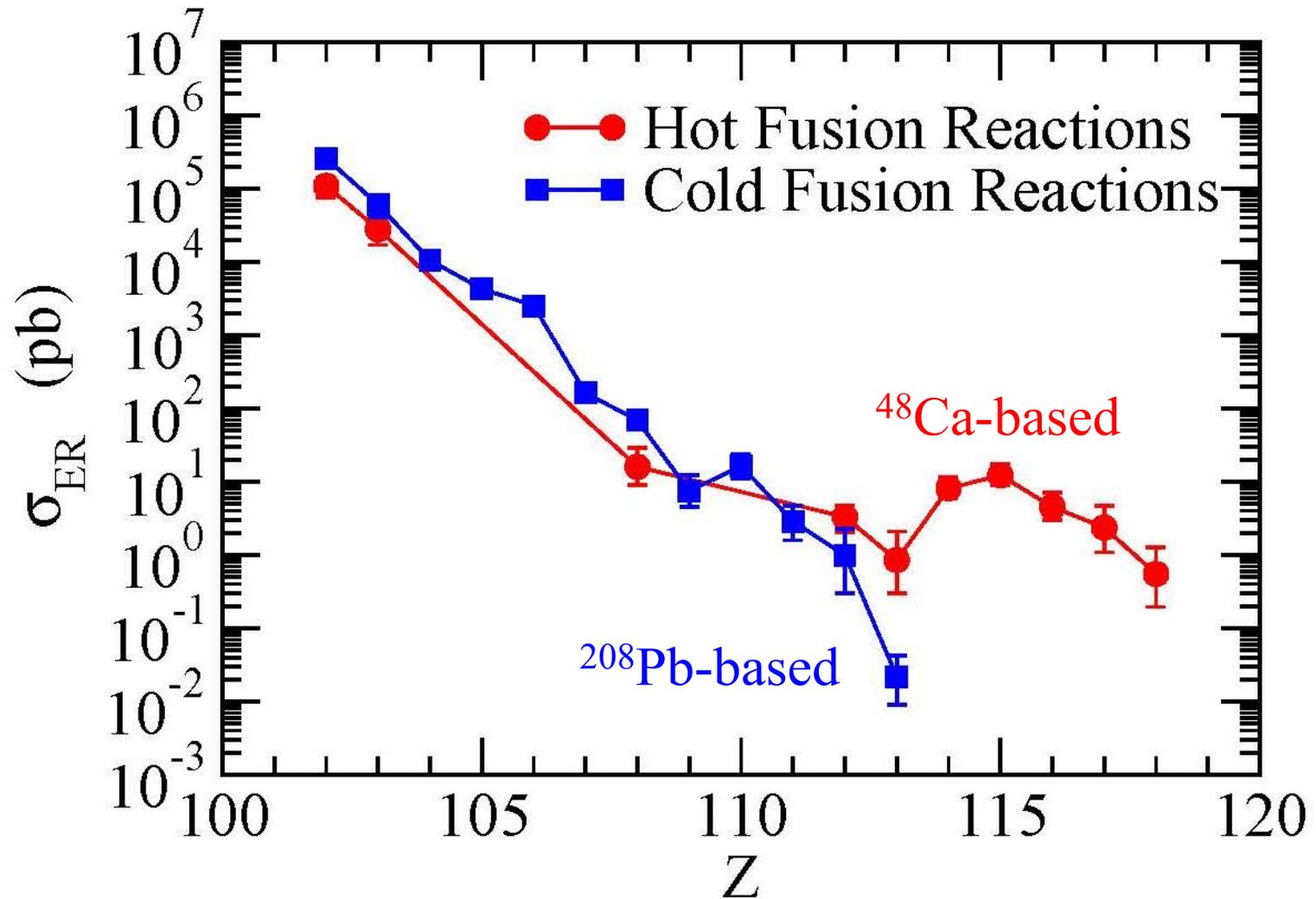


熱い融合反応と冷たい融合反応





	Hot Fusion	Cold Fusion
Example	$^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am} \rightarrow ^{287}\text{Nh} + 4n$	$^{70}\text{Zn} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{278}\text{Nh} + 1n$
asymmetry	large	small
Capture	large	small
Survival	small	large



*hot fusion の核融合断面積の振る舞いは後で議論します。

$$\sigma \sim \text{fb} = 10^{-39} \text{ cm}^2$$

RIKEN

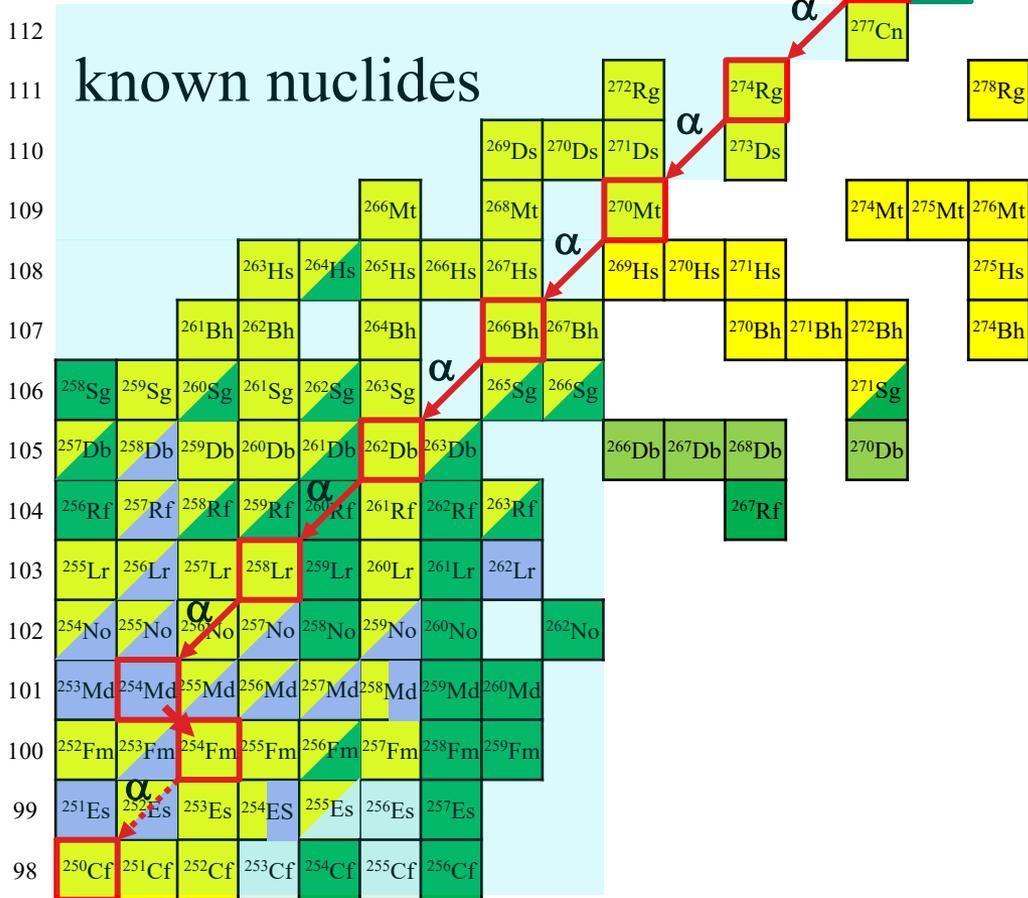
(Cold fusion)



3rd event Aug. 12 2012

113

known nuclides



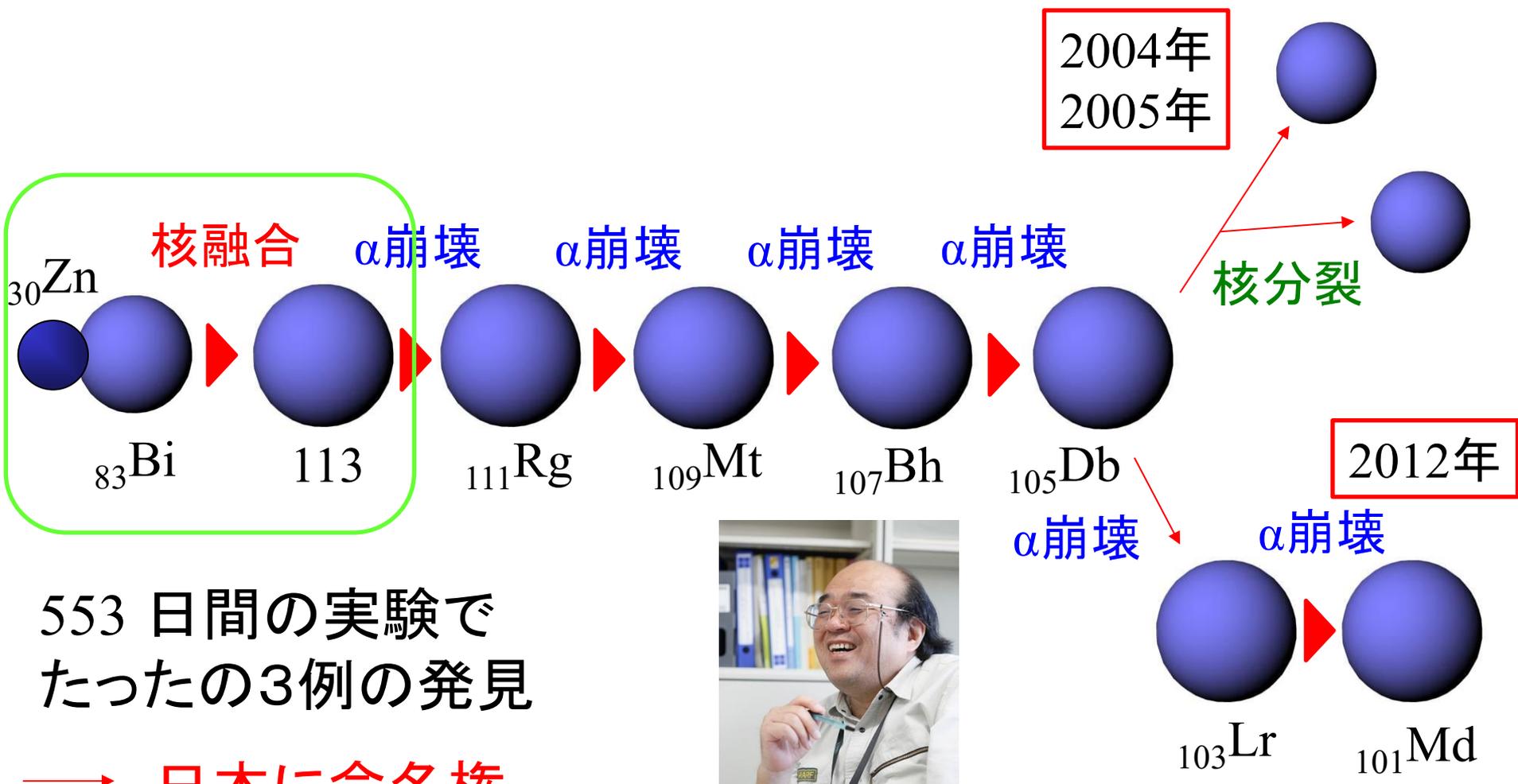
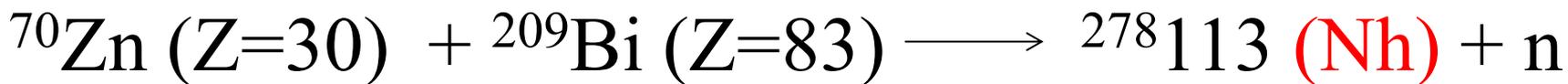
Dubna
(Hot fusion)

$$\sigma \sim \text{pb} = 10^{-36} \text{ cm}^2$$

cf. Cold Fusion:
既知核とつながる
(不定性がより少ない)

Hot Fusion:
より中性子過剰な複合核
が作れる。

新元素113番 ニホニウム (Nh)



553 日間の実験で
たったの3例の発見

→ 日本に命名権
ニホニウム Nh



レポート問題8 (×切: 2026年1月31日(土))

113番元素 Nh を



で作る場合で、できた原子核の励起エネルギーを比較せよ。ただし、反応の入射エネルギーは重心系でクーロン障壁の高さと同じとせよ。また、それぞれの原子核が平均で何個の中性を放出するか見積もれ(中性子の平均的な分離エネルギーを 8 MeV とする)。

必要な情報:

✓ 束縛エネルギー (MeV)	${}^{48}\text{Ca}$: 416.0	${}^{70}\text{Zn}$: 611.1
	${}^{243}\text{Am}$: 1829.84	${}^{209}\text{Bi}$: 1640.23
	${}^{291}\text{Nh}$: 2086.85	${}^{279}\text{Nh}$: 2004.25

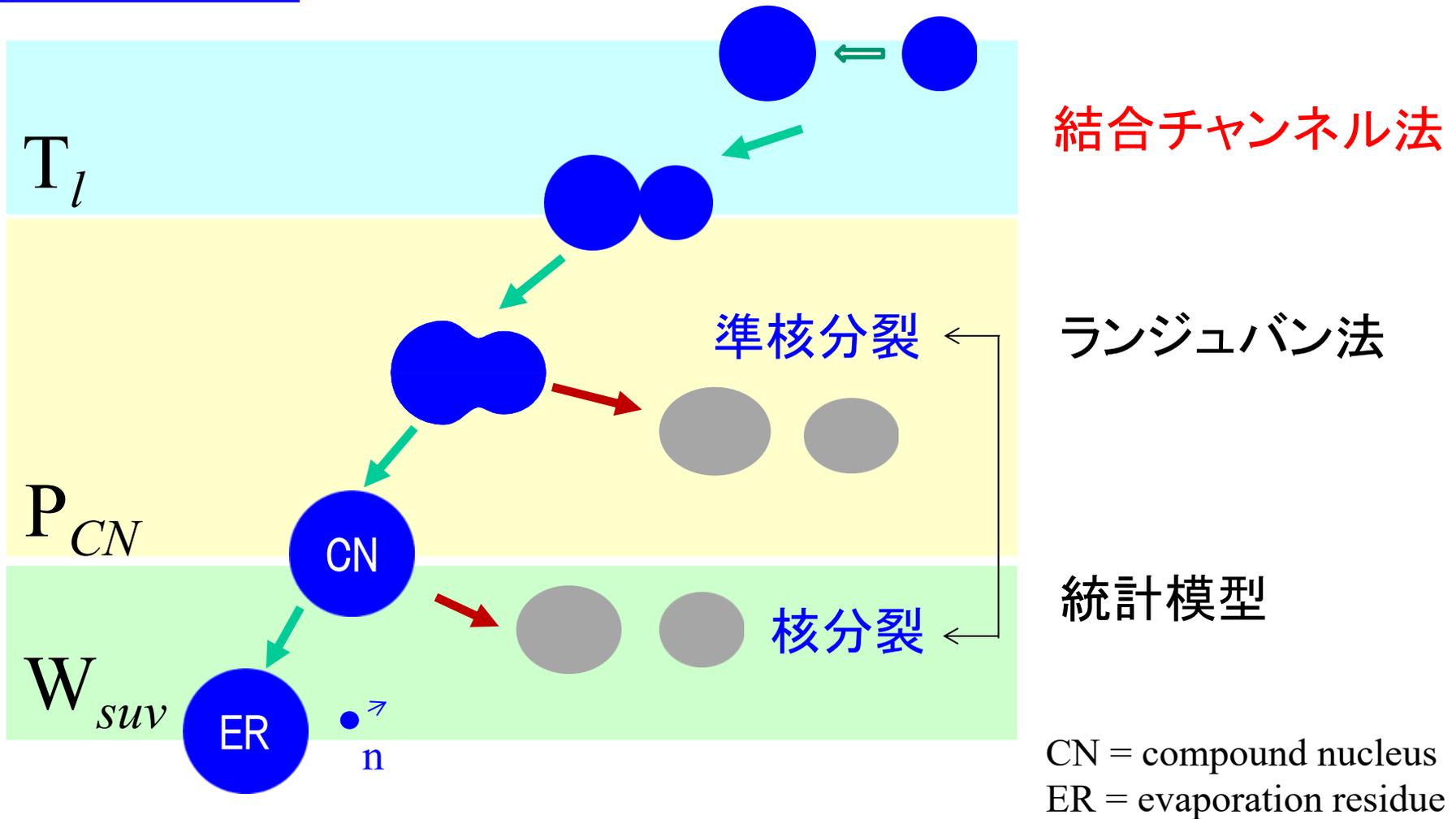
* ${}^{291}, {}^{279}\text{Nh}$ の束縛エネルギーは理論値

✓ クーロン障壁の高さ (MeV)

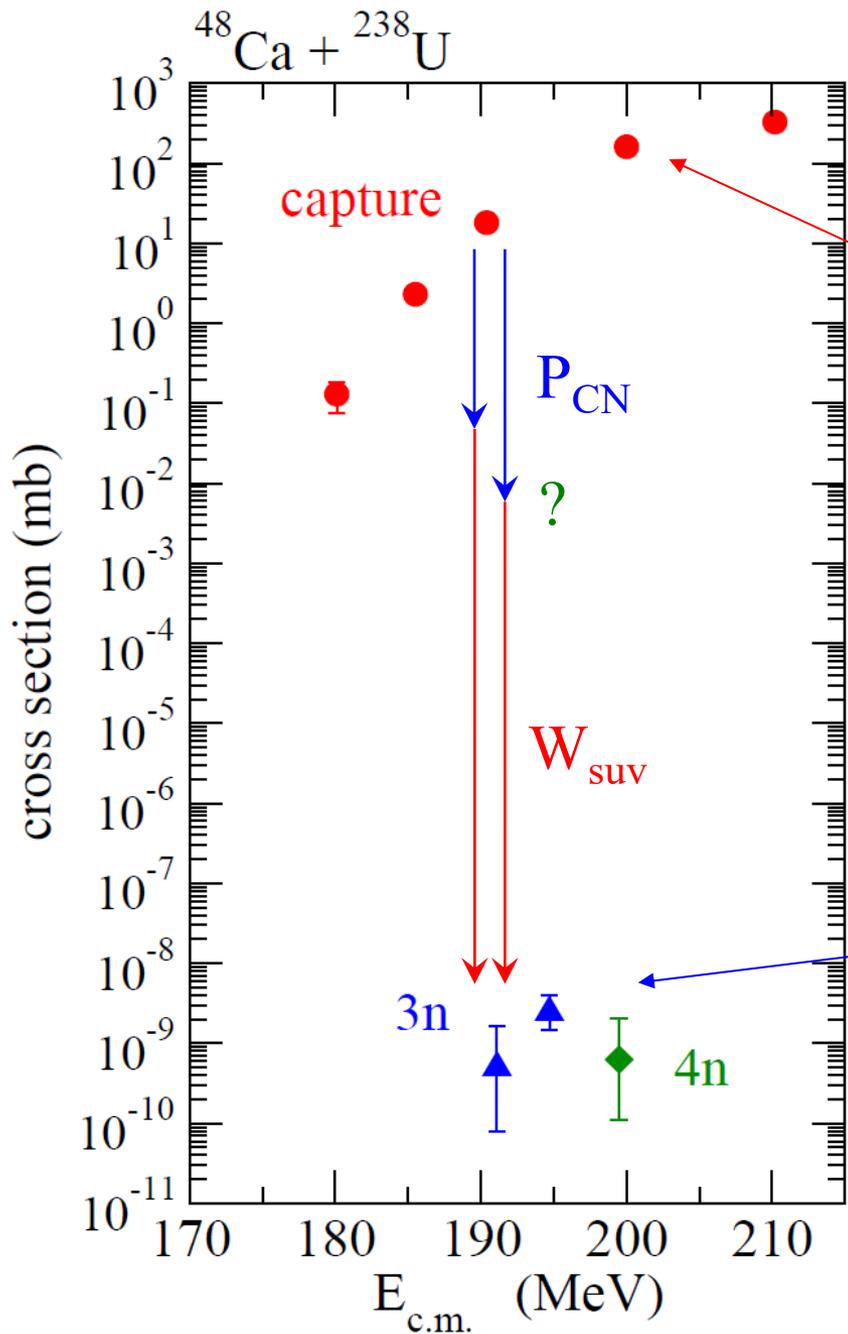
$${}^{48}\text{Ca} + {}^{243}\text{Am}: 192.7, \quad {}^{70}\text{Zn} + {}^{209}\text{Bi}: 256.1$$

* グローバルポテンシャルによる理論値

理論的取り扱い



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



no experimental data for P_{CN}

$$\sigma_{\text{cap}}(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1) T_l(E)$$

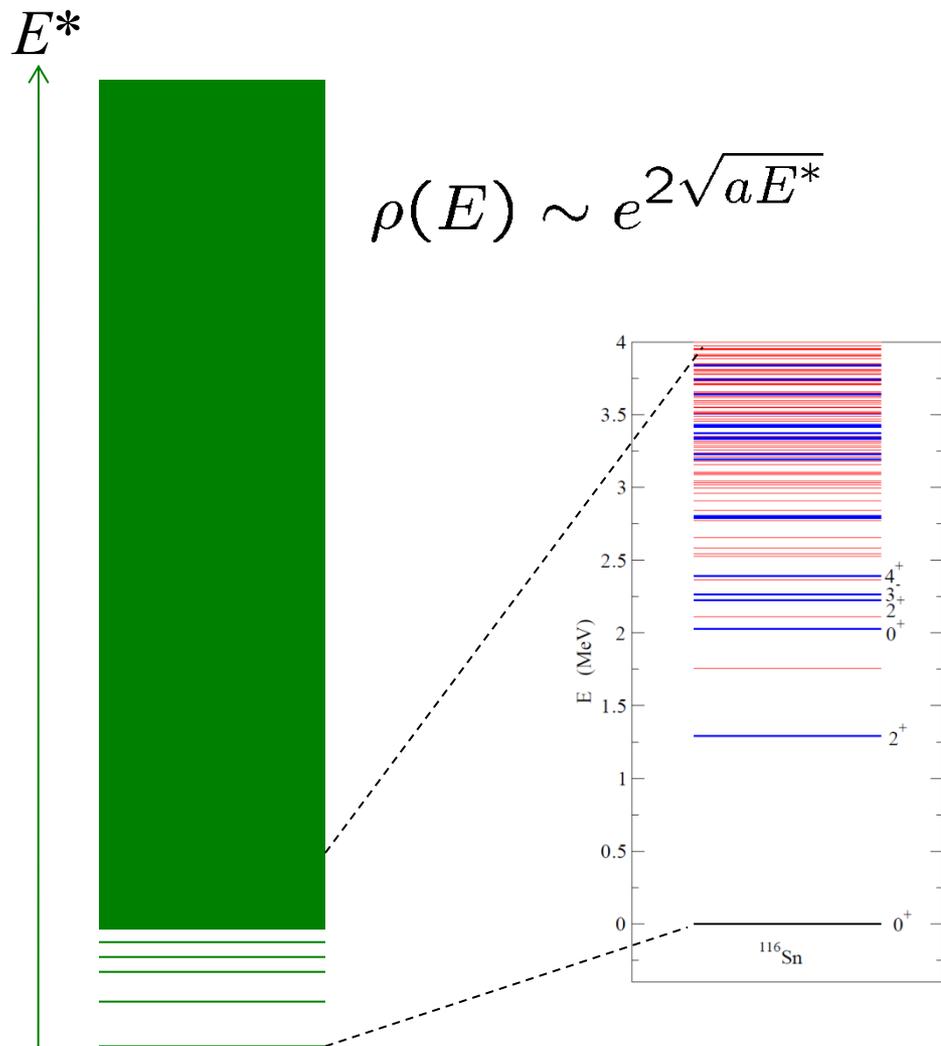
~~$$\sigma_{\text{CN}}(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1) T_l(E) \times P_{\text{CN}}$$~~

not available

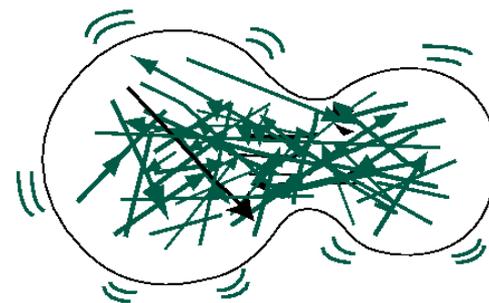
$$\sigma_{\text{ER}}(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1) T_l(E) \times P_{\text{CN}} \cdot W_{\text{suv}}$$

large uncertainties

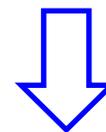
重イオン核融合反応と量子開放系



原子核のスペクトル



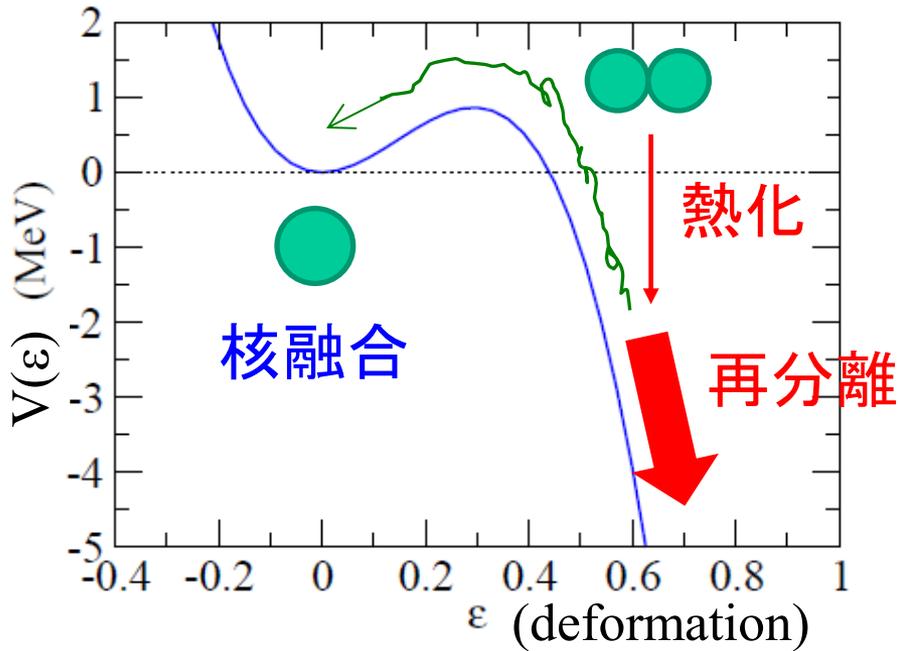
核反応の途中で複雑に励起



原子核の内部自由度:「環境」
「内的環境自由度」

→量子開放系の物理

ランジュバン法



熱的なゆらぎ

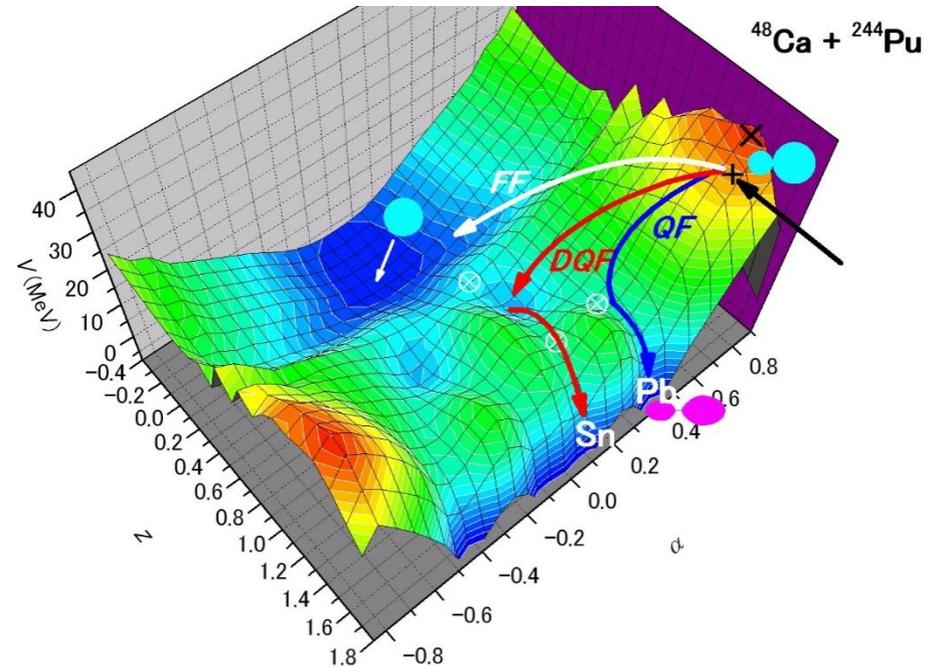
→ ランジュバン法
(ブラウン運動)

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

γ : friction coefficient
 $R(t)$: random force

多次元化

- q : 核間距離
- 変形
- フラグメントの質量



理論: ランジュバン法

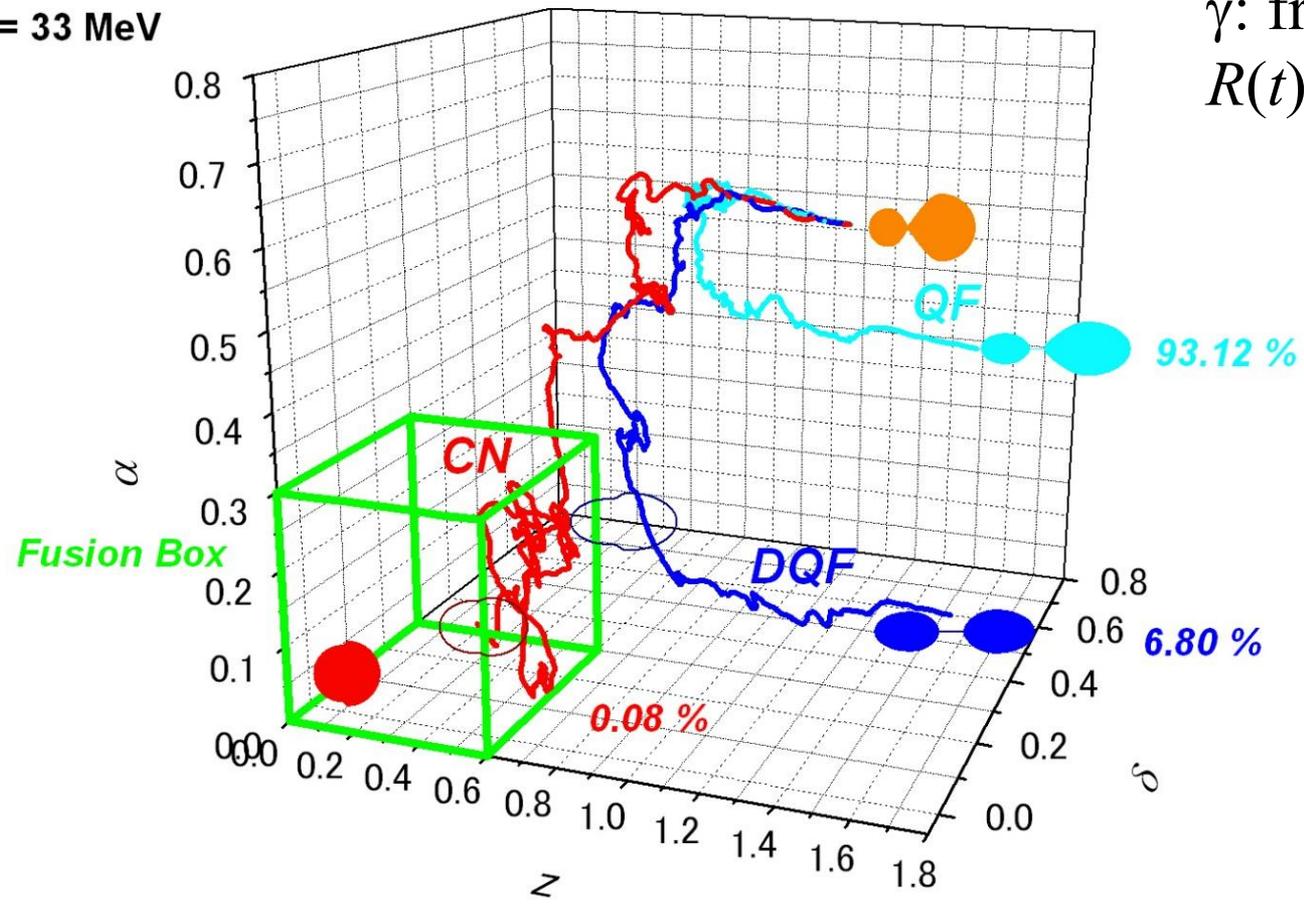
multi-dimensional extension of:

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

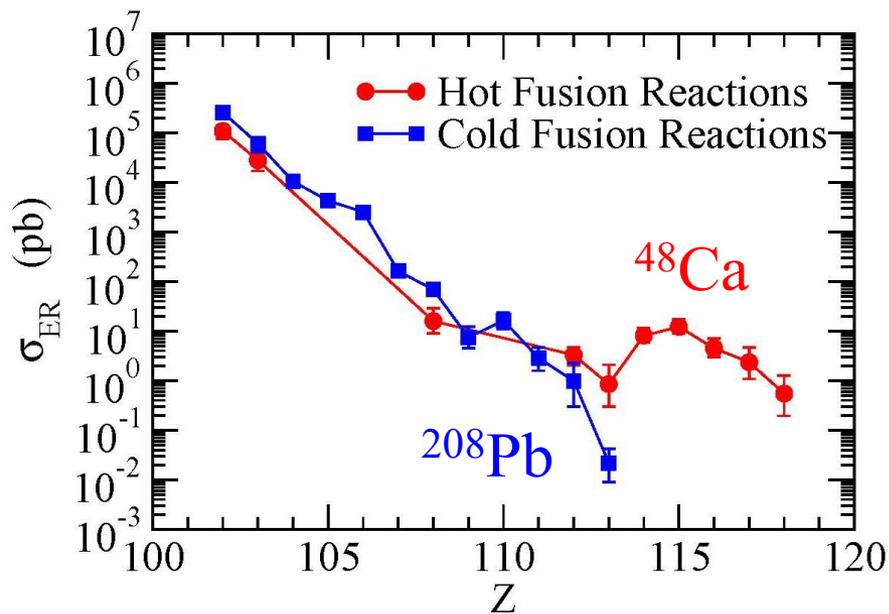
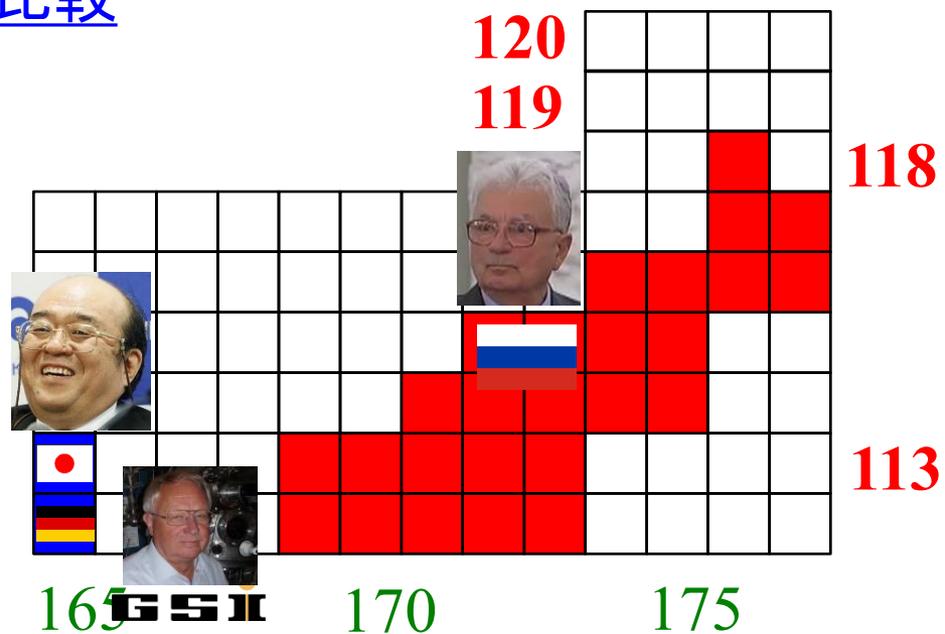
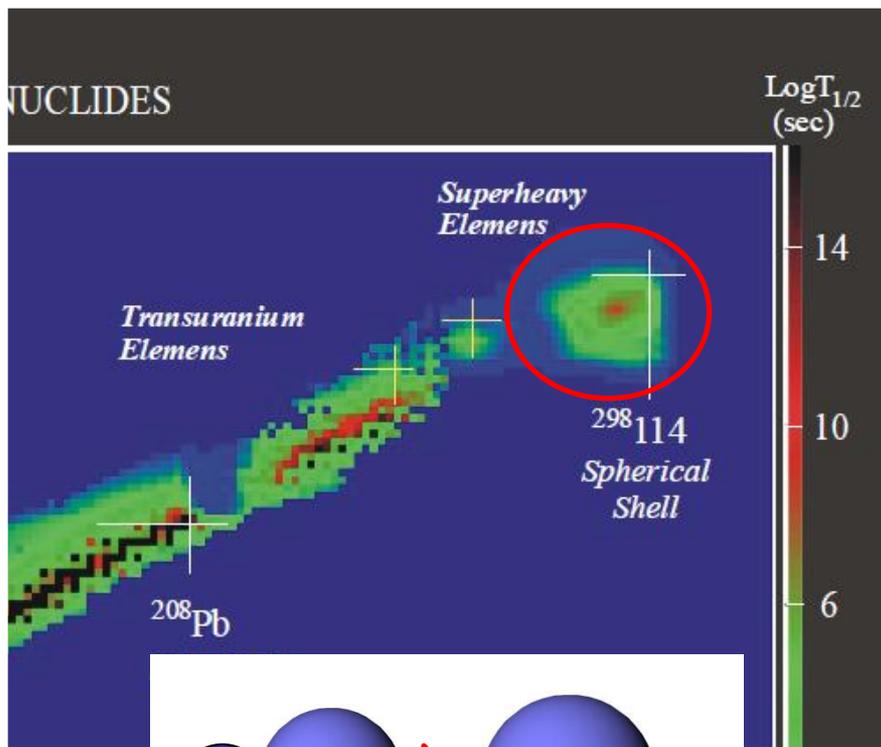
γ : friction coefficient
 $R(t)$: random force



$E^* = 33 \text{ MeV}$

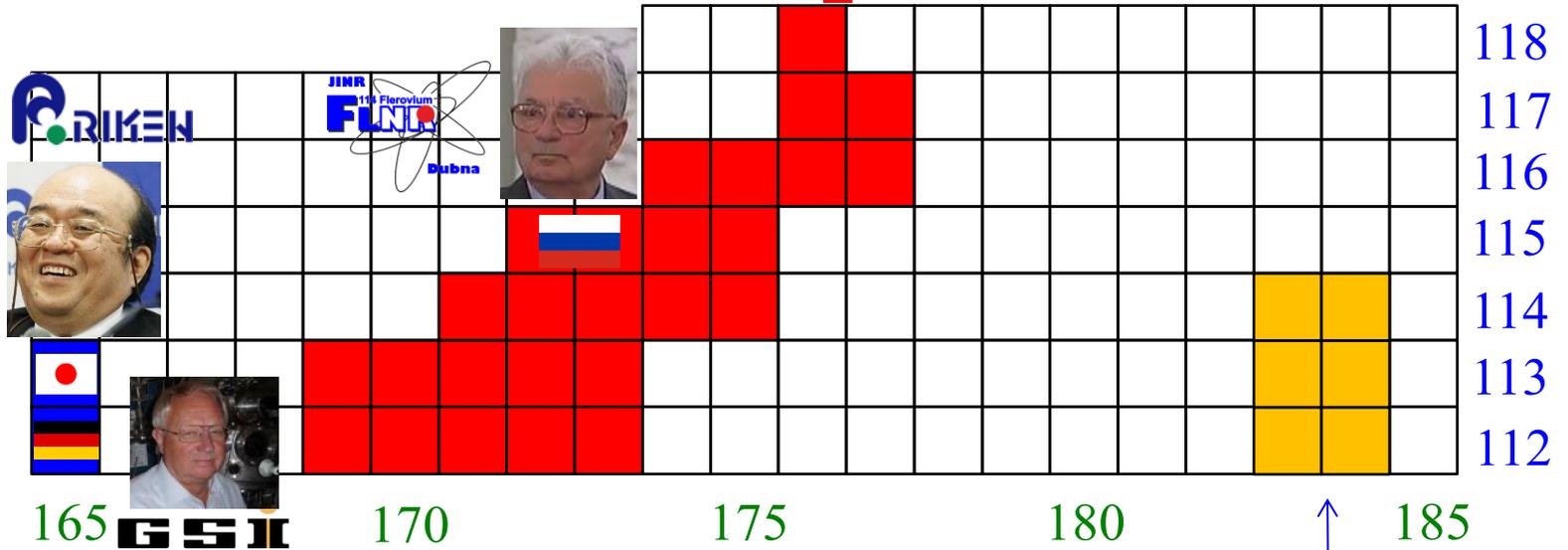


熱い融合と冷たい融合：断面積の比較

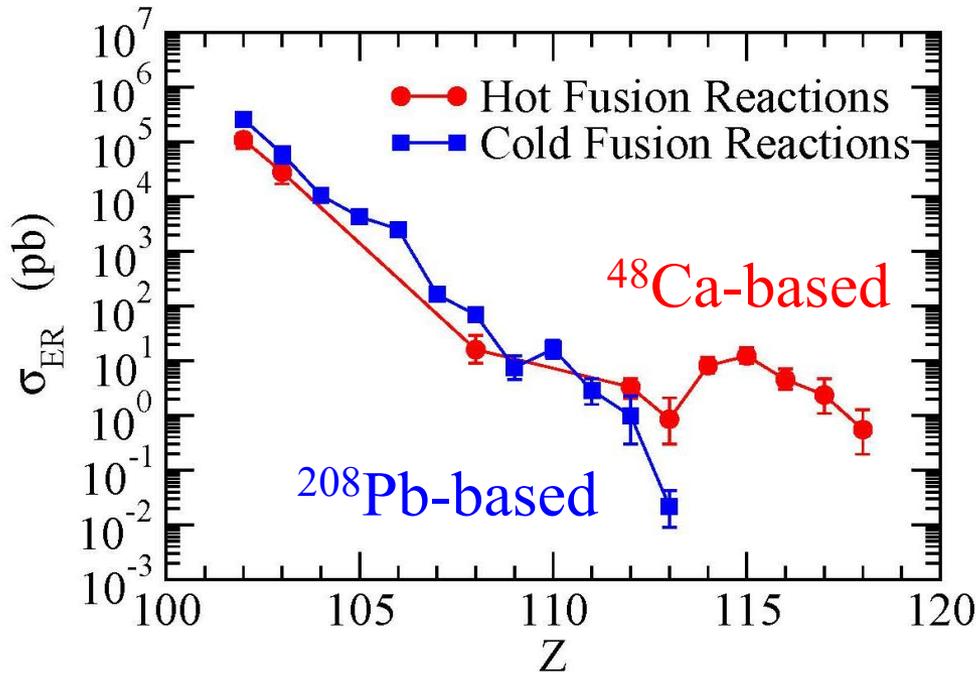


熱い融合反応: ^{48}Ca +actinides

$Z = 119$ and 120



安定の島?



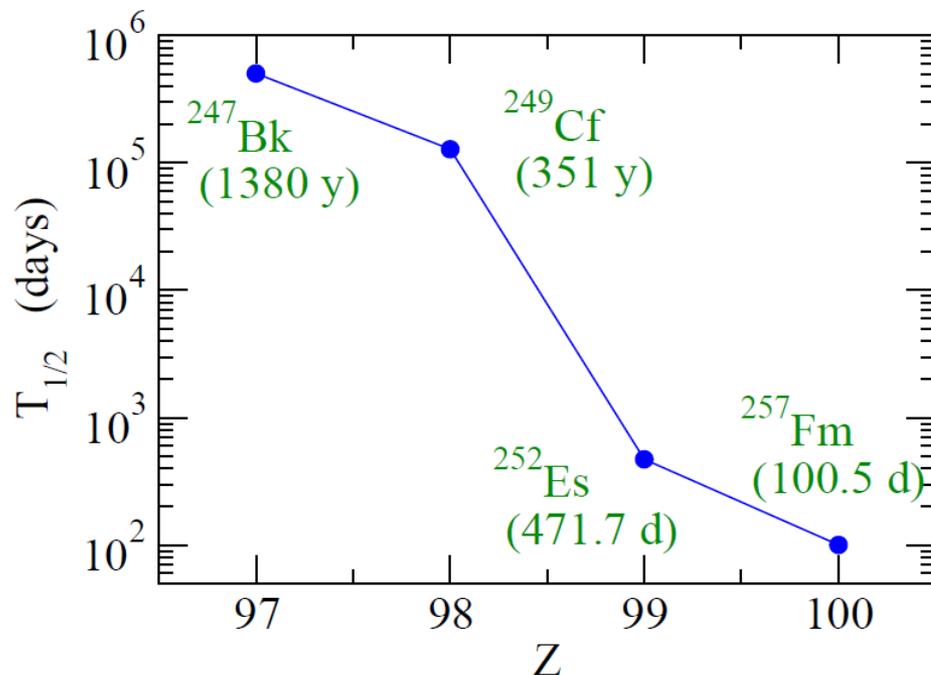
119番、120番元素
を熱い融合反応で作る

119番及び120番元素に向けて

^{48}Ca を使った熱い融合反応:



短寿命→標的にできるほど大量に
ない

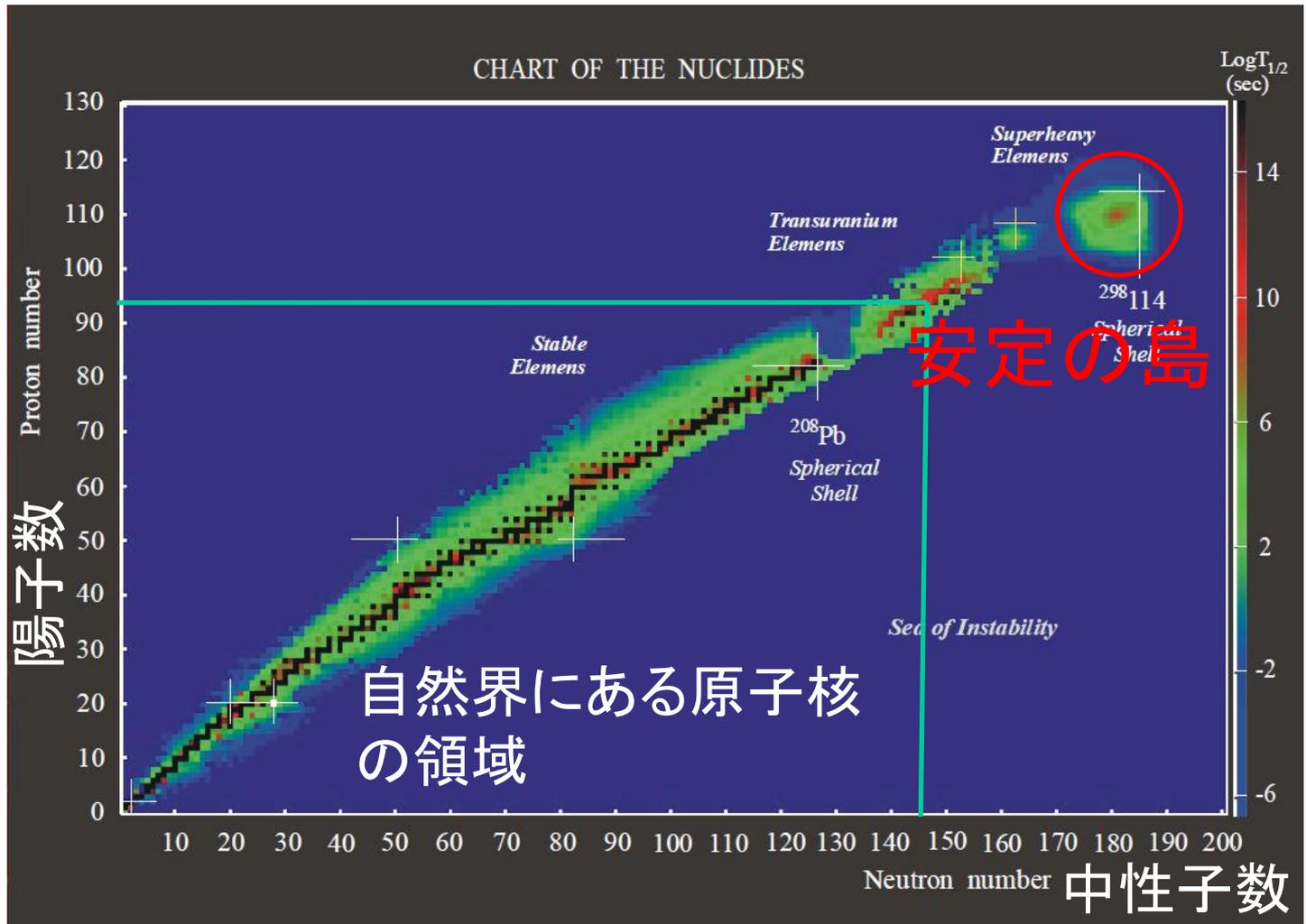


$^{48}\text{Ca} \rightarrow {}^{50}_{22}\text{Ti}, {}^{51}_{23}\text{V}, {}^{54}_{24}\text{Cr}$ 核

二重閉殻 → 開殻

どのくらい断面積は
影響を受けるのか?

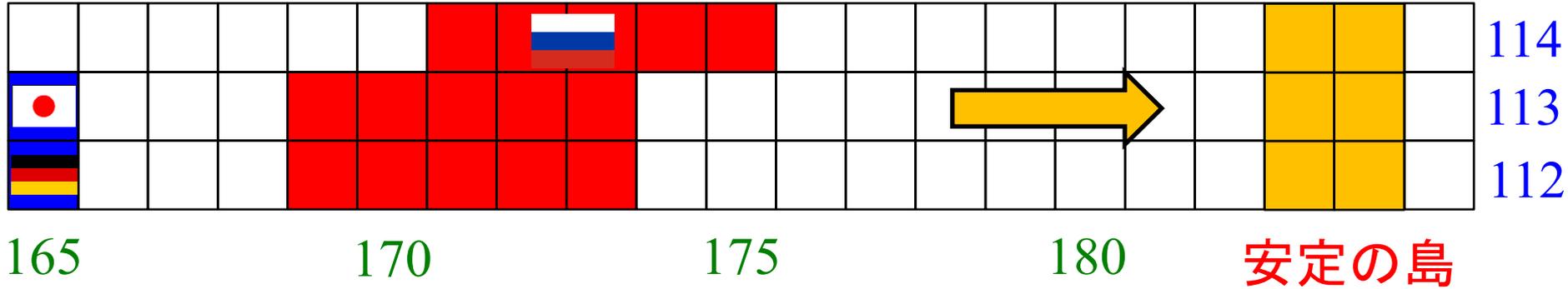
もう一つの重要な課題



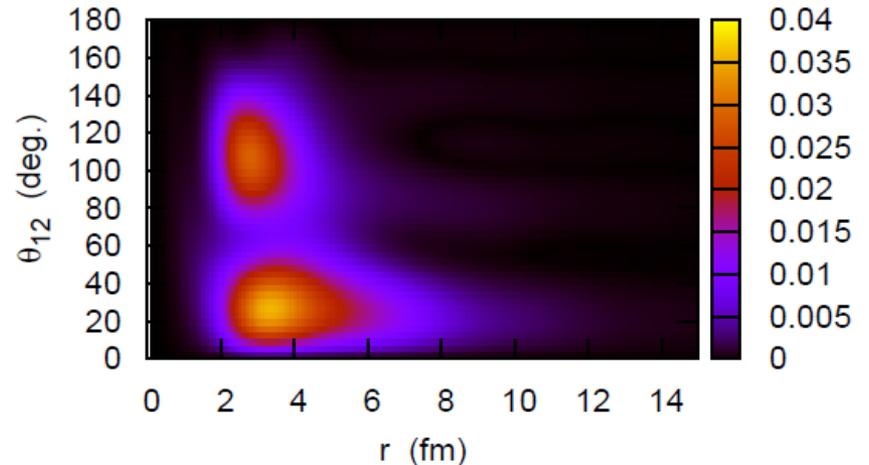
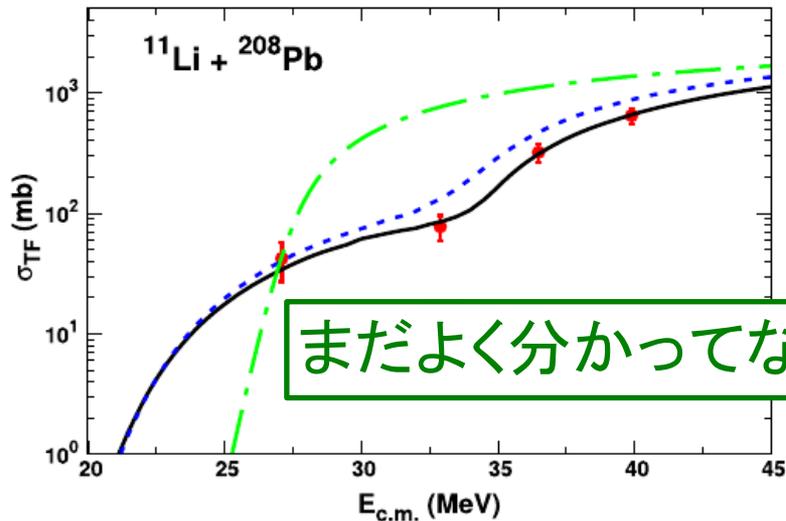
Yuri Oganessian

安定の島にどのように到達するか?

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?

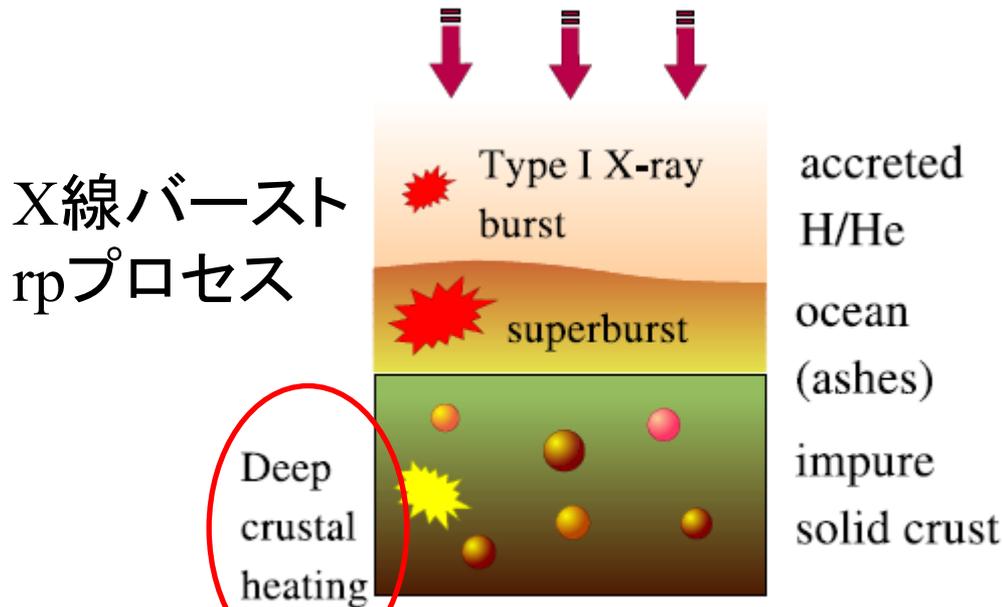


K.H. and H. Sagawa, PRC72('05)044321

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

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



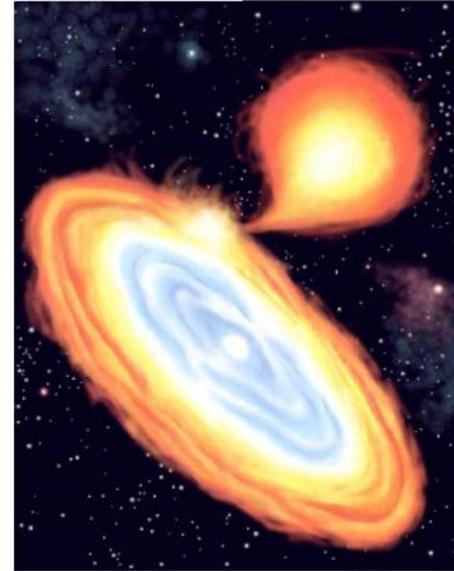
Deep crustal heating

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



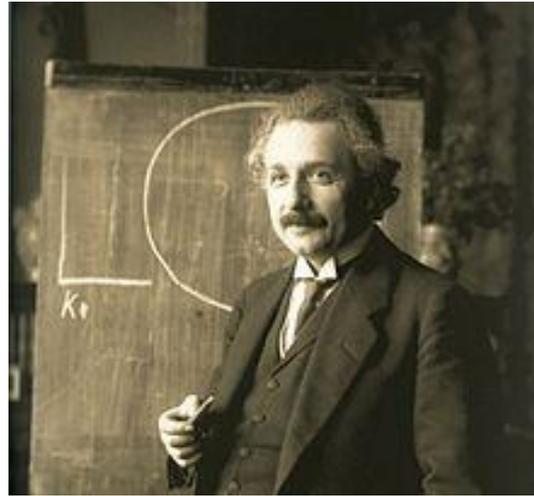
超重元素の化学

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	

- 本当にここに置きちゃっていいの？
- Nh は B や Al などと同じ性質？

相対論的効果：原子番号の大きい元素で重要

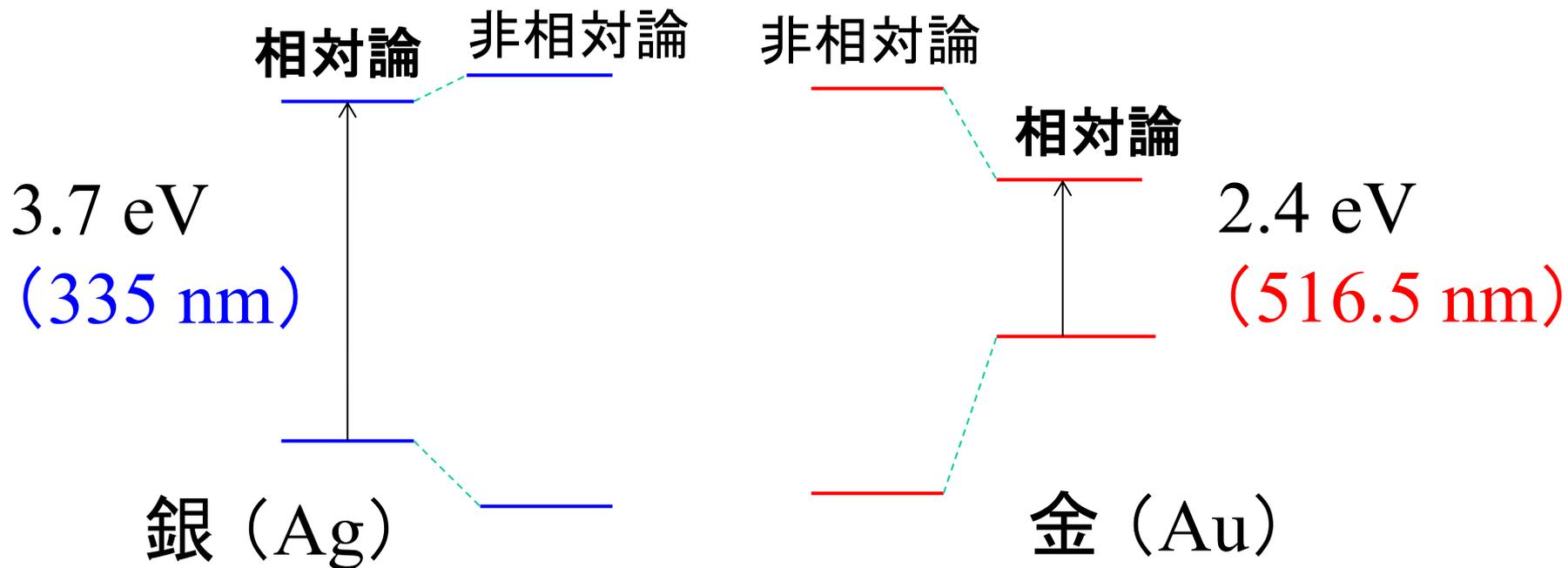
$$E = mc^2$$



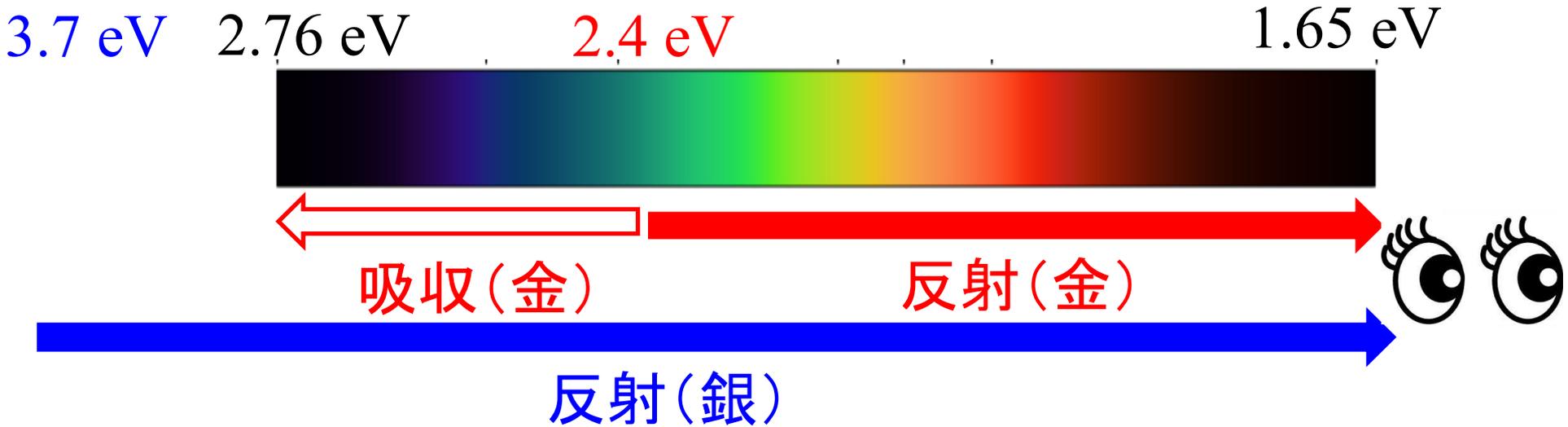
ディラック方程式(相対論的量子力学)を解くと、
原子中の電子のエネルギーは、

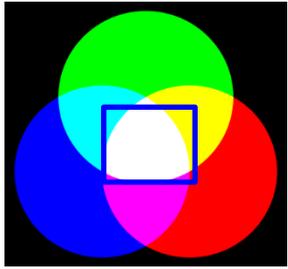
$$E_{1S} = mc^2 \sqrt{1 - (Z\alpha)^2} \sim mc^2 \left(1 - \frac{(Z\alpha)^2}{2} - \frac{(Z\alpha)^4}{8} + \dots \right)$$

相対論的効果



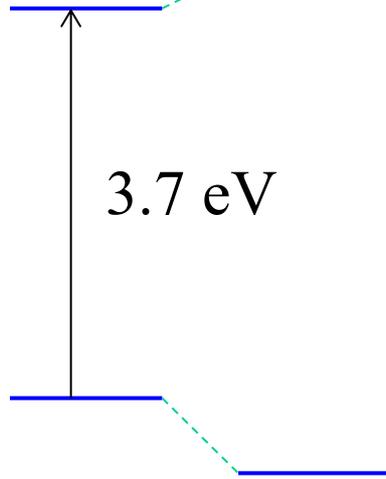
可視光





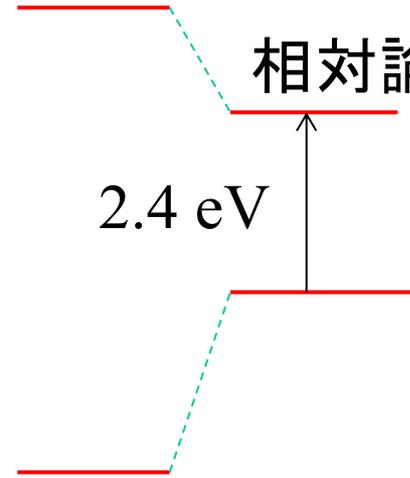
光の
吸収なし

相対論 非相対論

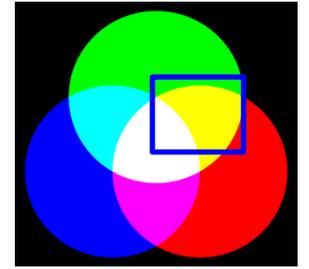


銀

非相対論



金



青色の光
が吸収



銀

47番元素



金

79番元素

超重元素の化学

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	

相対論的効果で超重元素の場所が
どのように変わるのか? → 未解決の謎

相対論的効果で有名な例: 金の色

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

5 37 Rb 38 Sr 39 Y 40 Zr 41 Nb 42 Mo 43 Tc 44 Ru 45 Rh 46 Pd 47 Ag

6 55 Cs 56 Ba 57 La * 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 72 Hf 73 Ta 74 W 75 Re 76 Os 77 Ir 78 Pt 79 Au

7 87 Fr 88 Ra 89 Ac * 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 104 Rf 105 Db 106 Sg 107 Bh 108 Hs 109 Mt 110 Ds 111 Rg

金と銀は同族



相対論的効果がなければ金の色は銀みたいだった!

ニホニウムで指輪を作ると何色なの?