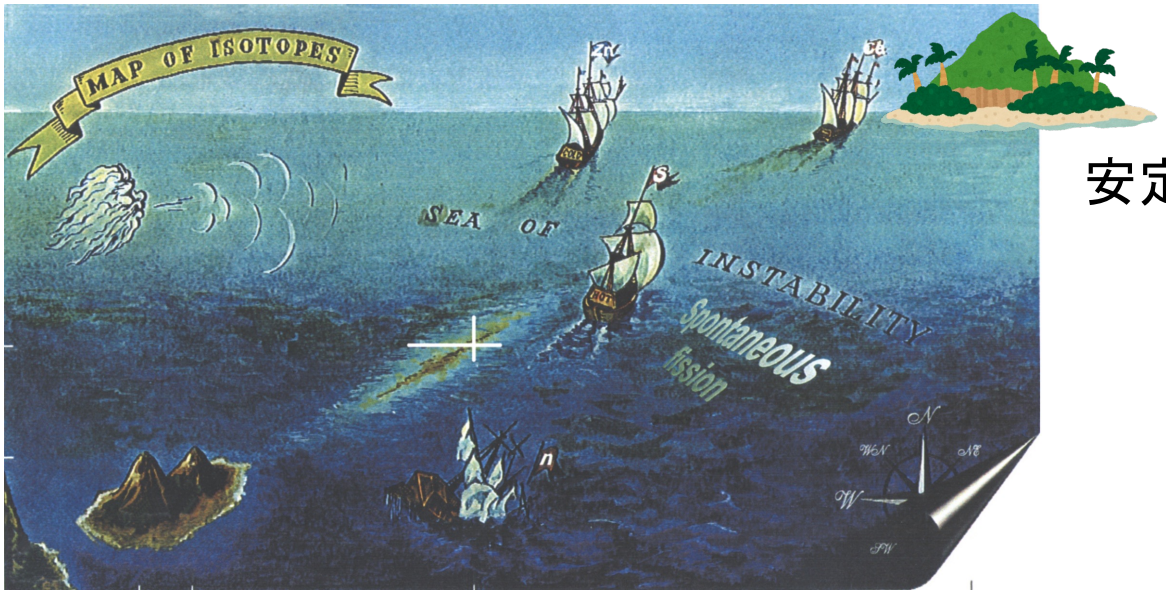
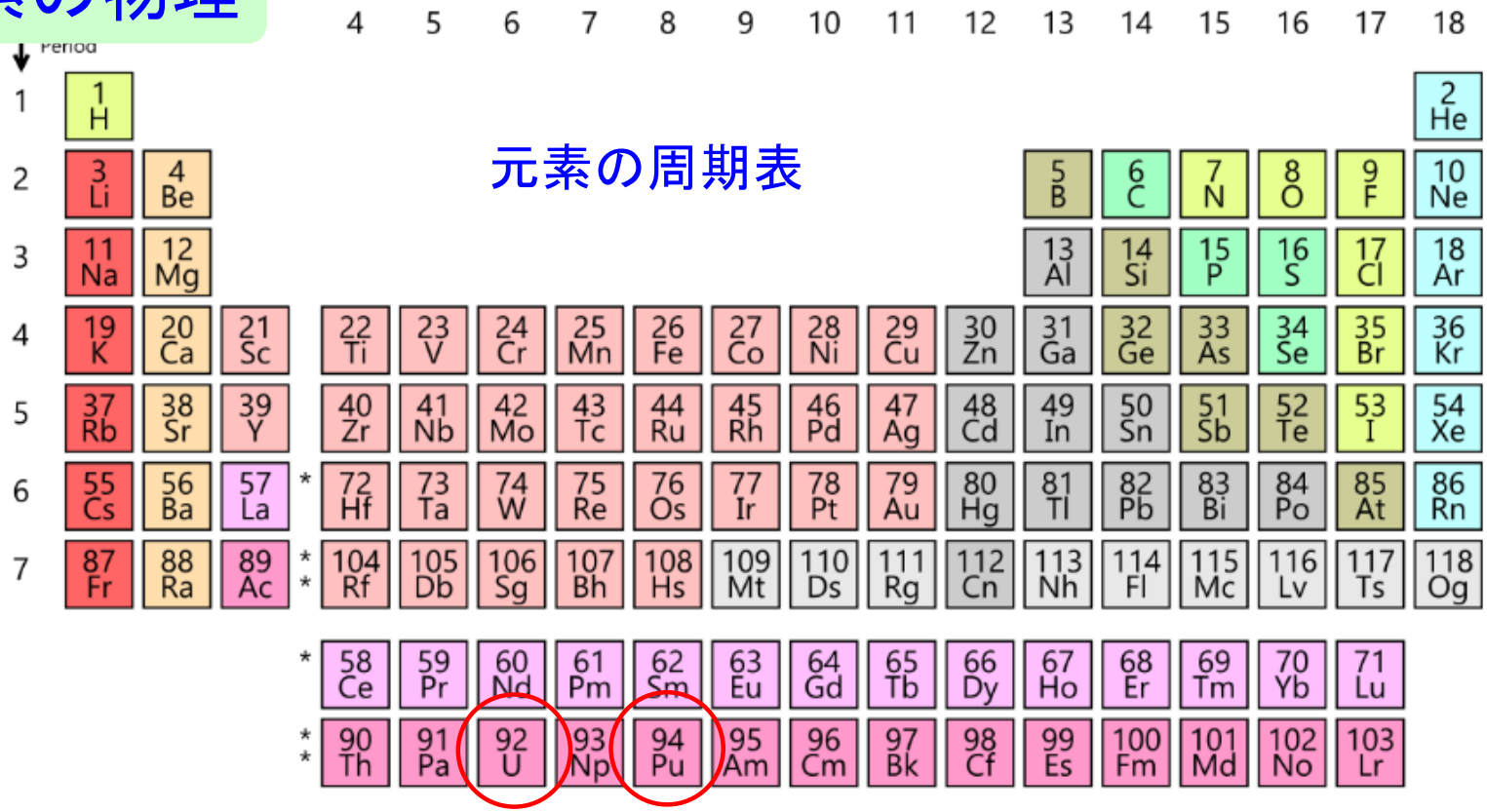
1. イントロダクション：低エネルギー重イオン反応
2. クーロン障壁近傍の重イオン核融合反応と多体トンネル現象
3. **超重元素の物理**
4. 核分裂の物理



安定の島

超重元素の物理



自然界にある一番重い元素

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??

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

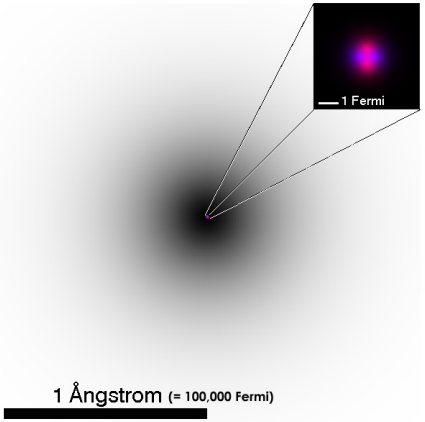
自然界にある元素: **Pu** (Z=94) ⟶ 自然界に極微量ある
U (Z=92)

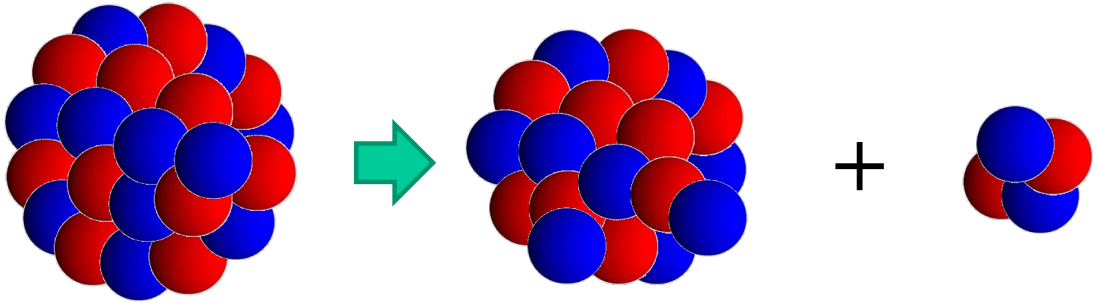
何がこの番号を決めているのか??

重い原子核 ⟶ 大きなクーロン反発

↓

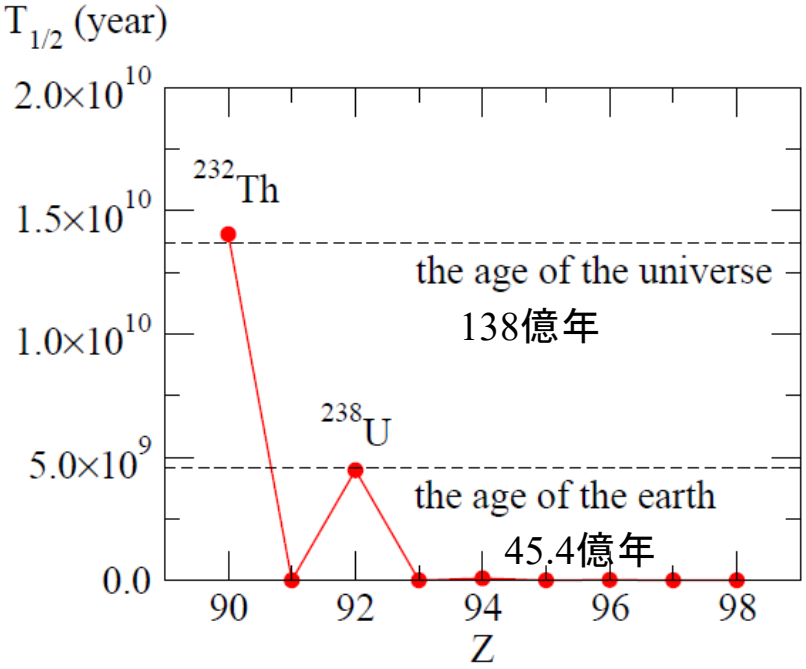
α 崩壊に対して不安定

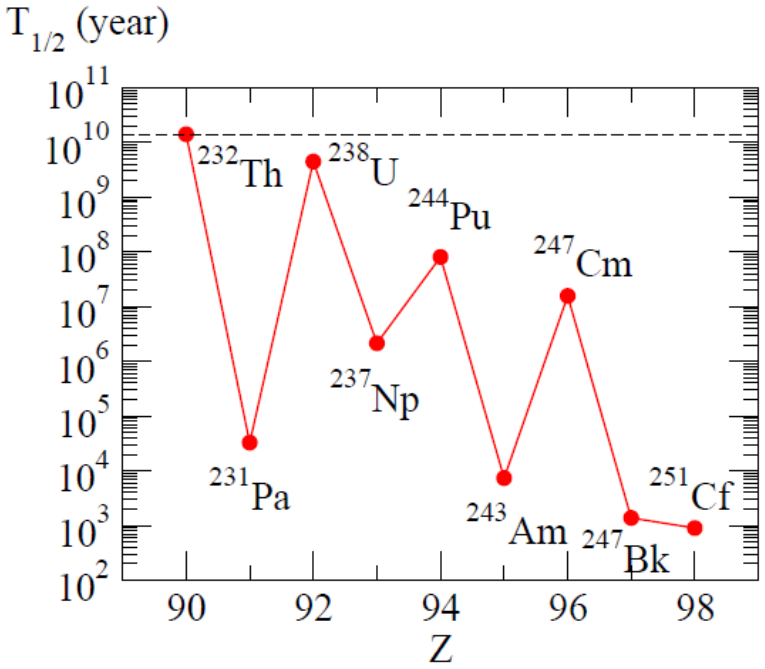




(Z,N) (Z-2,N-2) (Z=2,N=2)

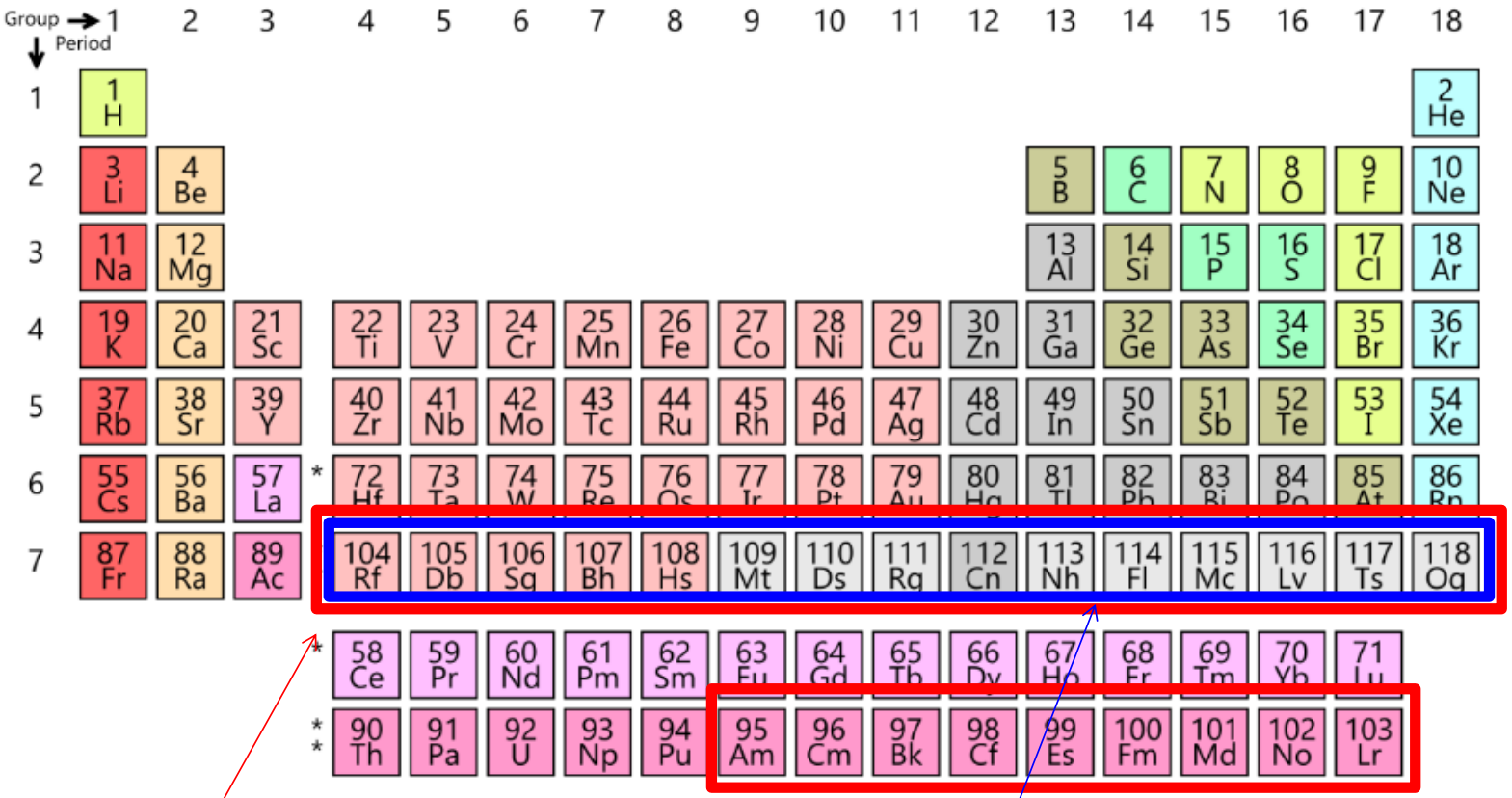
重い原子核の半減期





^{232}Th 1.405 x 10^{10} years
^{238}U 4.468 x 10^{9} years
^{244}Pu 8.08 x 10^{7} years
^{247}Cm 1.56 x 10^{7} years

元素の周期表

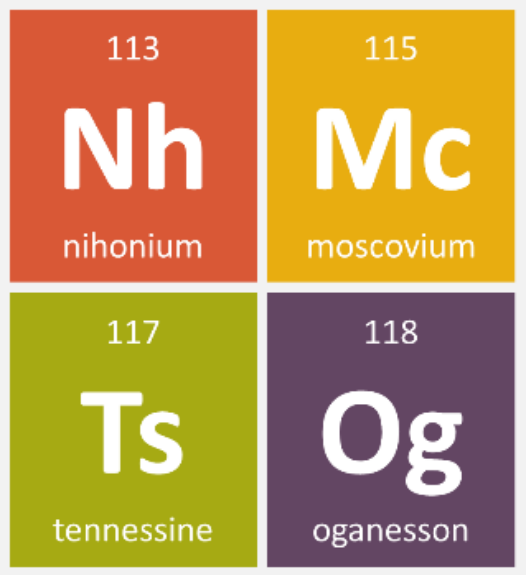


人工元素 ← 原子核反応

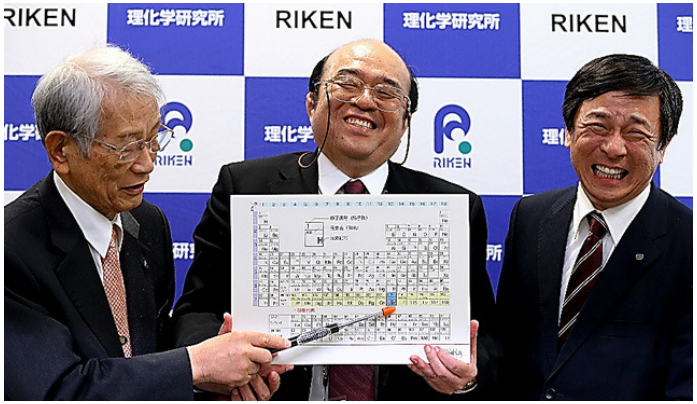
超重元素
（アクチノイド以降の元素）

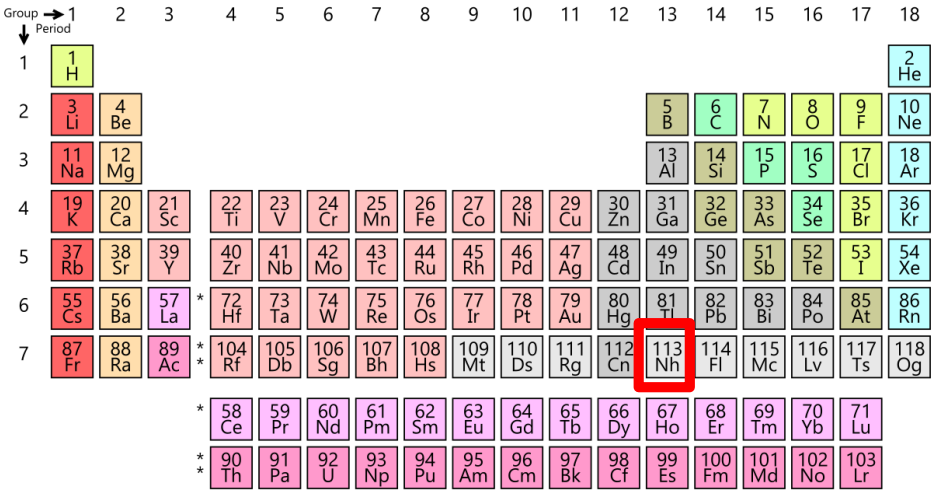
超重元素の核融合反応

113番元素: ニホニウムNh

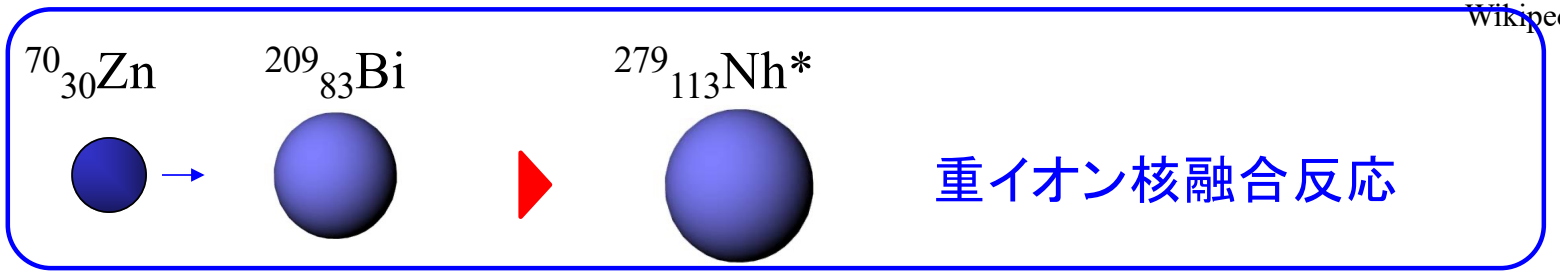


2016年11月

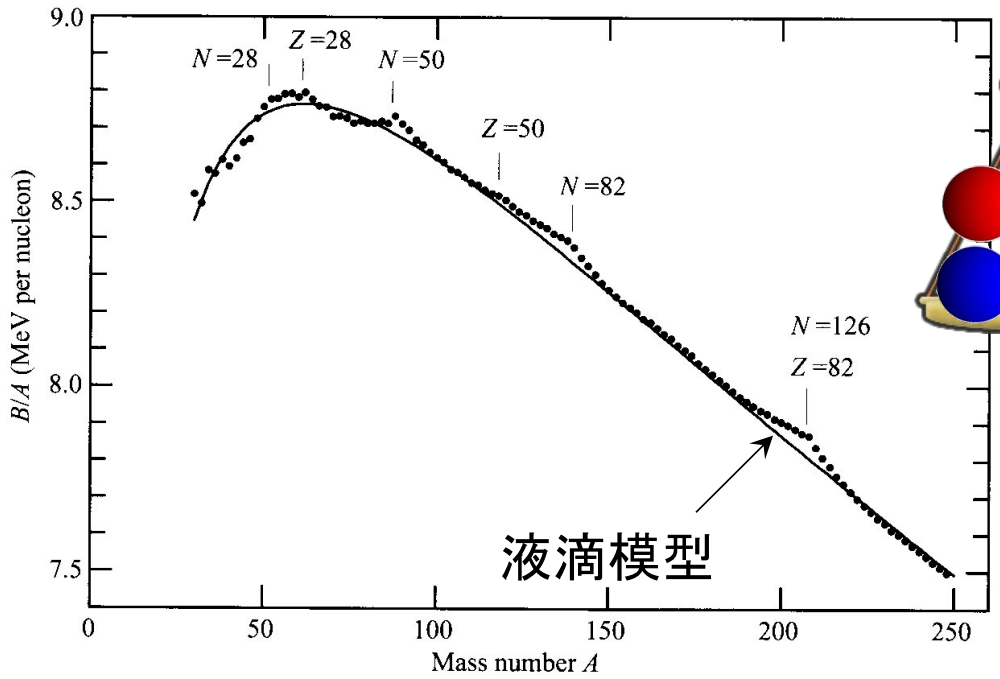


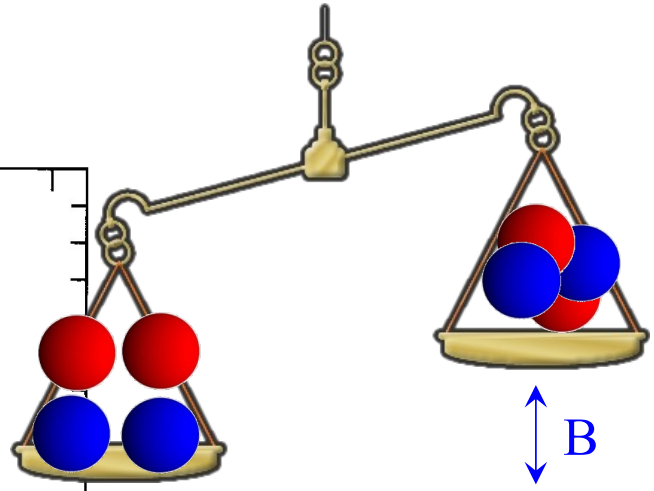


Wikipedia



安定の島の予言：超重元素探索の重要な動機



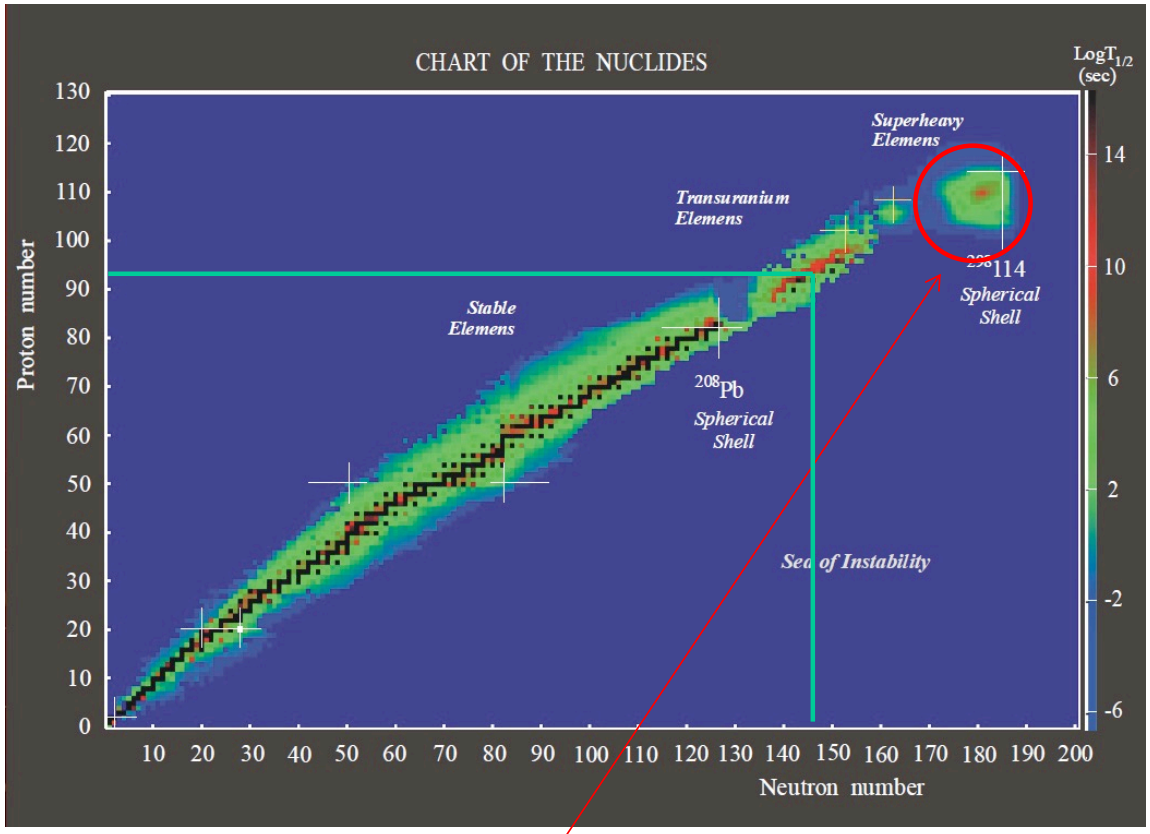


N or Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 で束縛が大（魔法数）

$^{208}_{82}Pb_{126}$: 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

$^{208}_{82}Pb_{126}$: 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

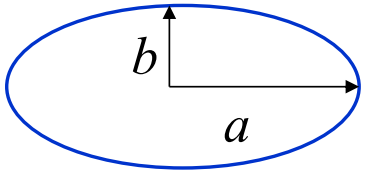
W.D. Myers and W.J. Swiatecki (1966), A. Sobiczewski et al. (1966)：今から60年前

重い核と核分裂障壁（次の時間にもう少し詳しく）

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

原子核を体積一定のまま変形してみる

例）回転楕円体



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

$ab^2 = R^3 =$ 一定

変形したときのエネルギー変化：

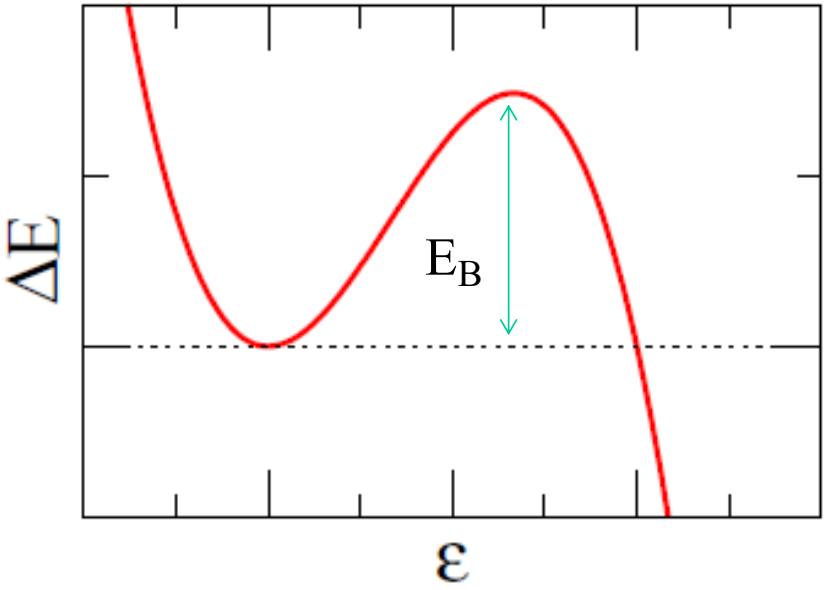
- 体積項、対称エネルギー項：変化せず
- クーロン項
- 表面項

} 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

重い核と核分裂障壁（次の時間にもう少し詳しく）

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



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

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

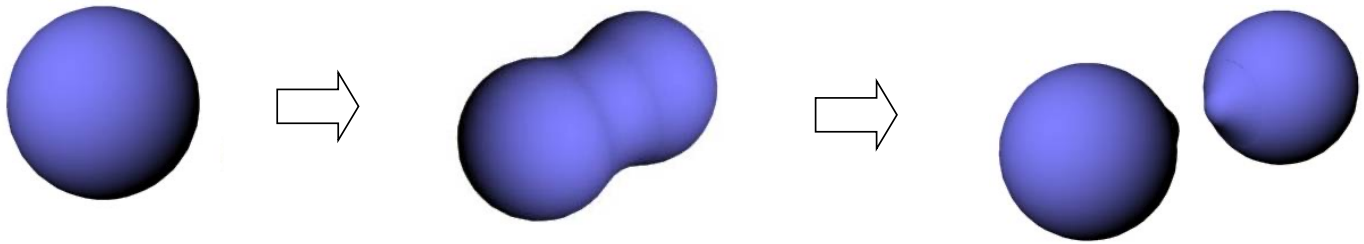
重い核ほど障壁は低くなる

重い核 : $x \sim 1$

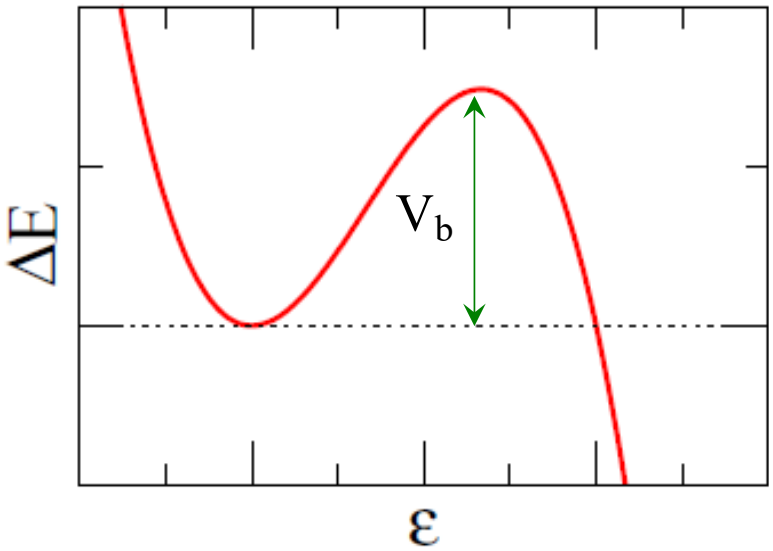
$$\epsilon_B = 7 \cdot \frac{(1-x)}{(1+2x)}$$

重い核ほど障壁での変形度は小さくなる

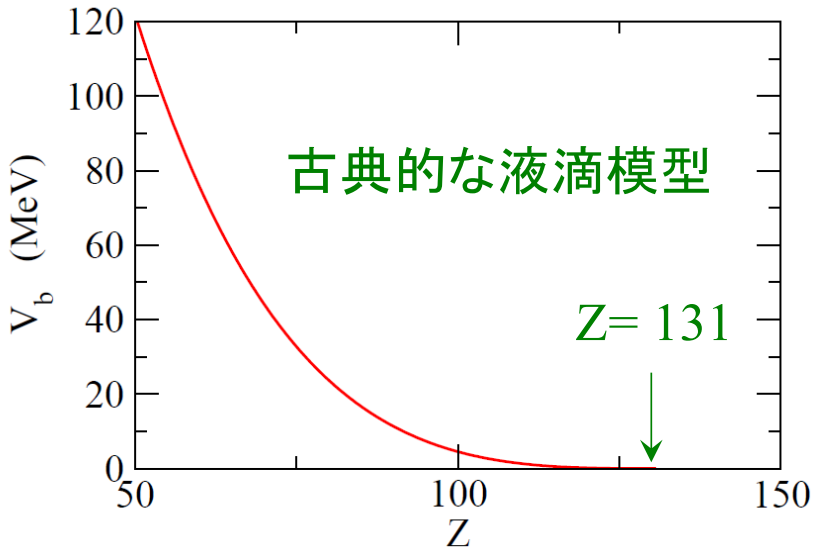
重い原子核 → 核分裂に対して不安定



核分裂障壁

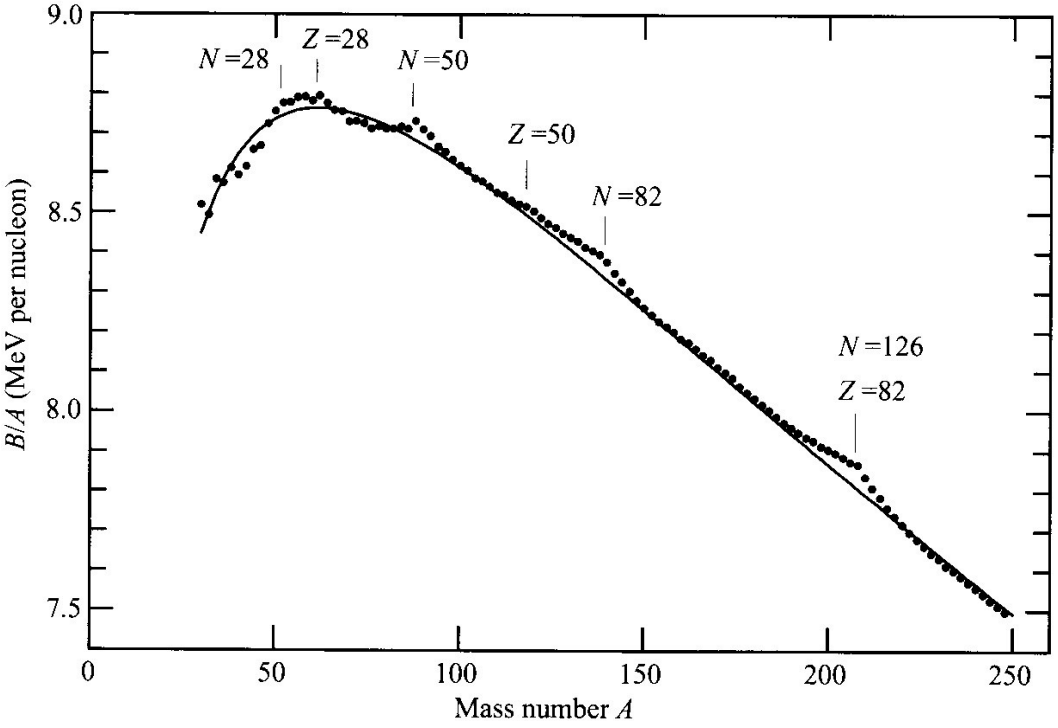


障壁の高さ



量子力学的な殻補正エネルギーを足す:

$B = B_{\mathrm{LDM}} + B_{\mathrm{shell}}$



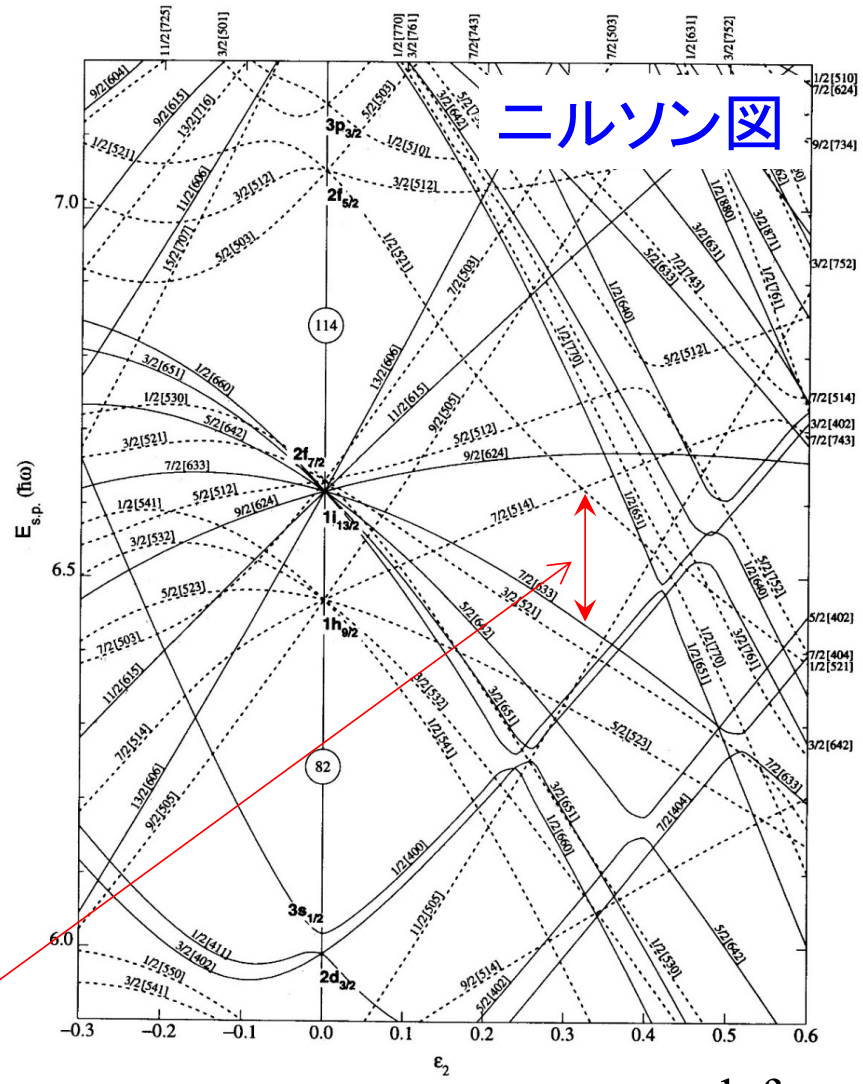


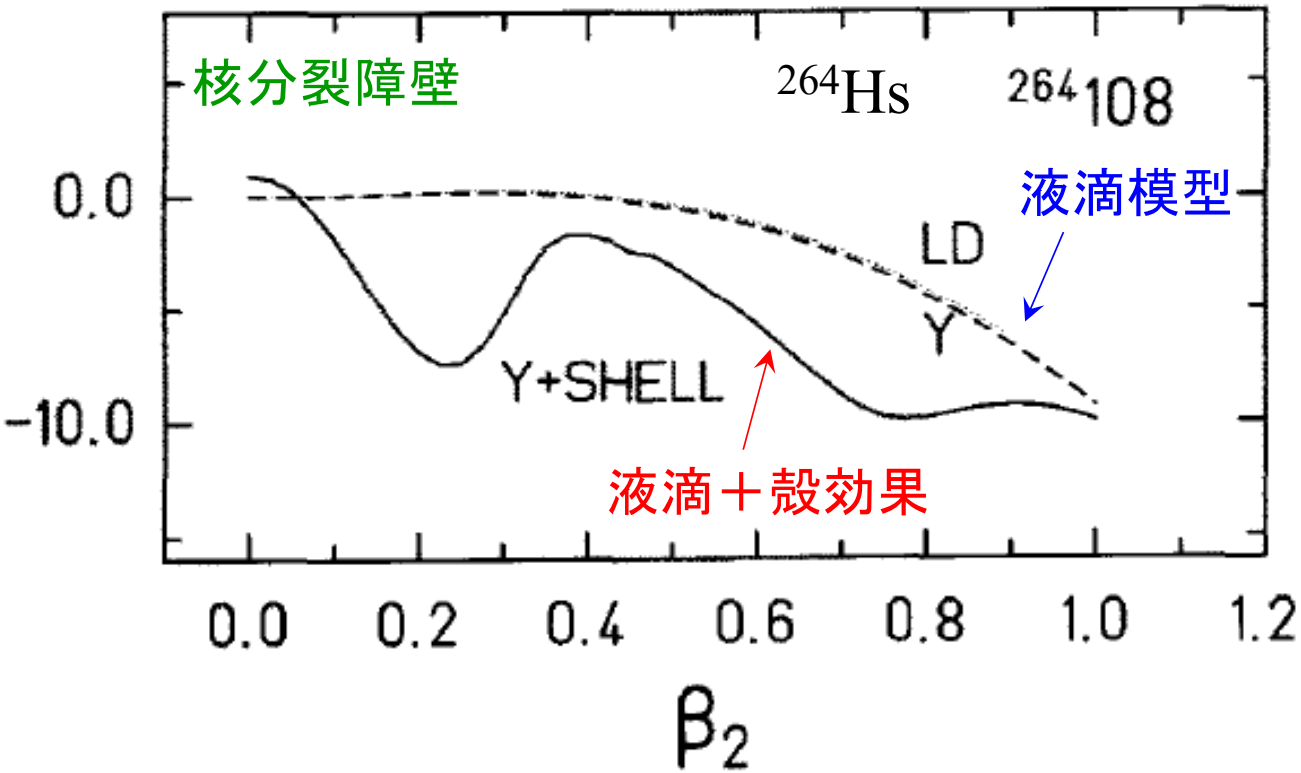
Figure 13. Nilsson diagram for protons, Z ≥ 82 ($\varepsilon_4 = \varepsilon_2^2/6$).

deformation

殻効果:
変形依存性

→

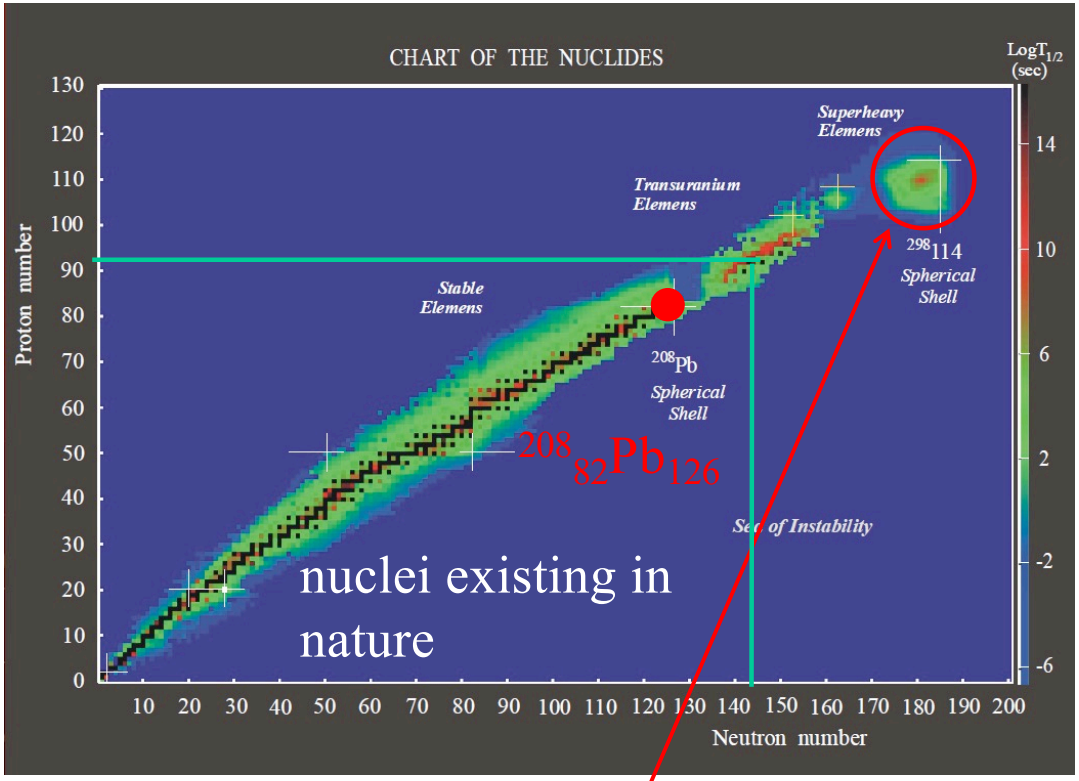
変形すると
エネルギー・ギャップができる



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

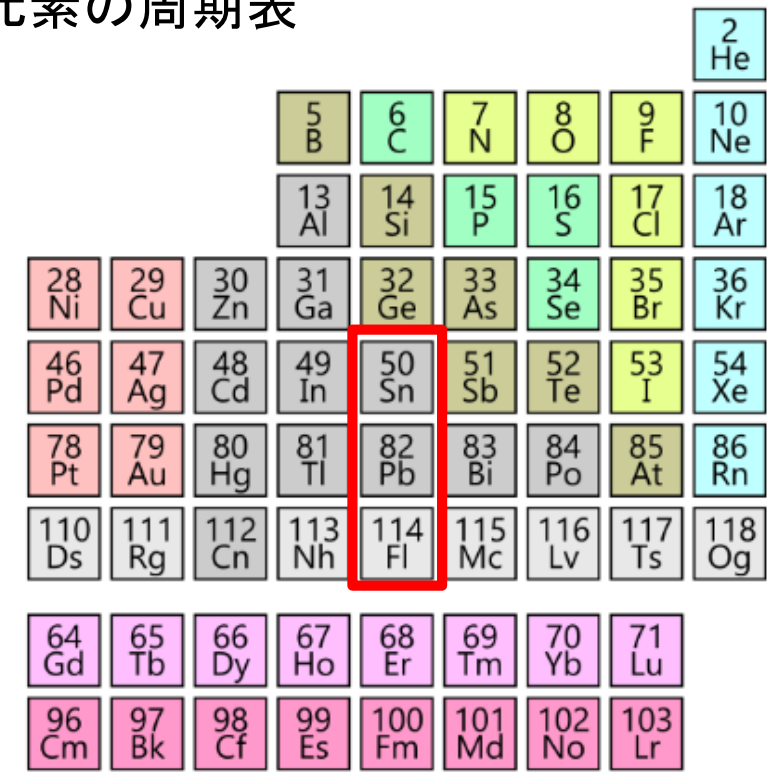
安定の島の予言：超重元素探索の重要な動機



Yuri Oganessian

Z=114, N=184 の周辺（次の２重閉殻?）
: **$10^{3\text{-}5}$ 年くらいの長寿命**

元素の周期表



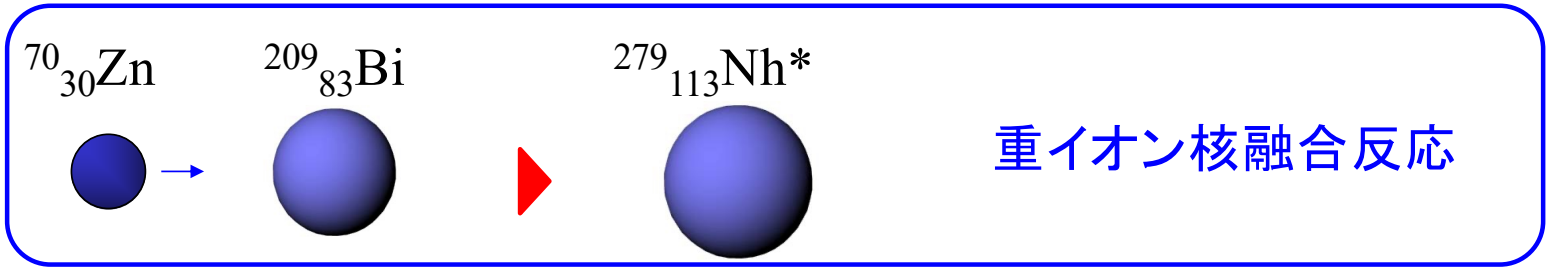
what a magical coincidence!

Y. Maeno, K. Hagino, and T. Ishiguro, Found. of Chem. 23, 201 (2021).

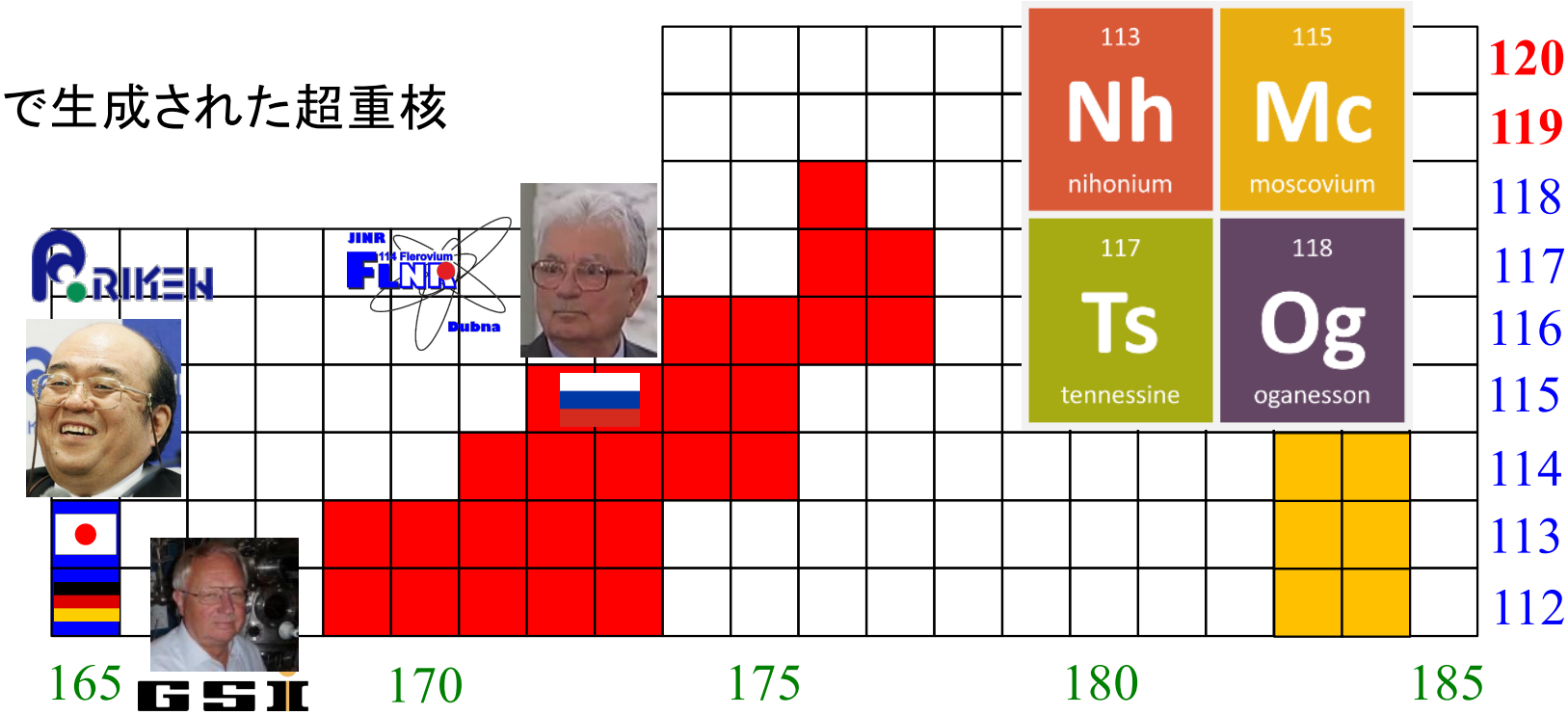
安定の島（超重元素）を目指して

Yuri Oganessian
（アルメニアの切手）

超重元素の核融合反応

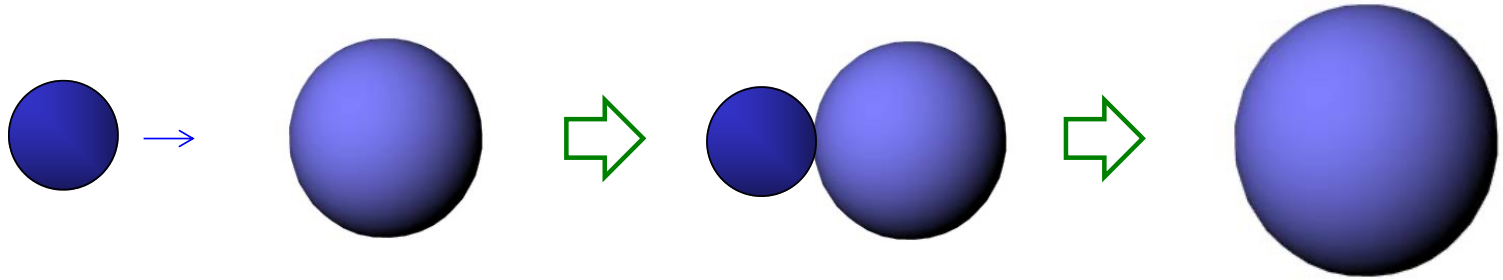


これまで生成された超重核

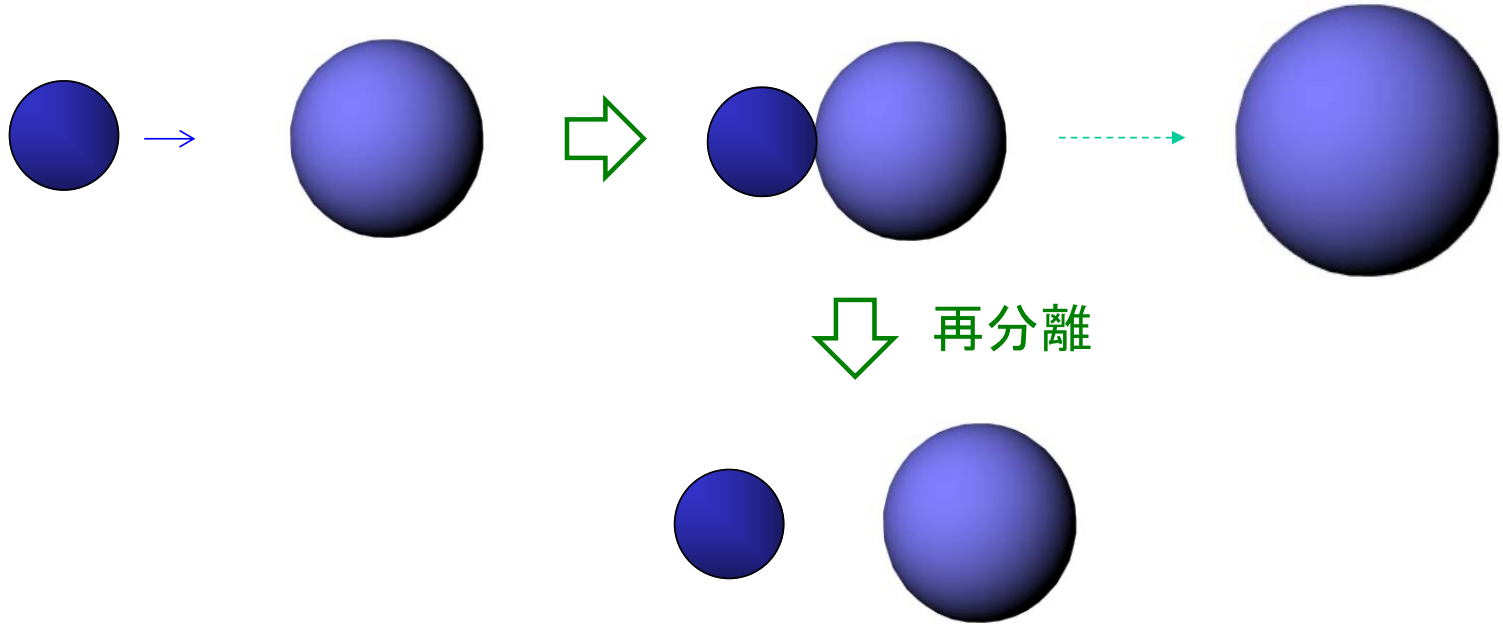


どうやって超重核を作る?　　核融合反応

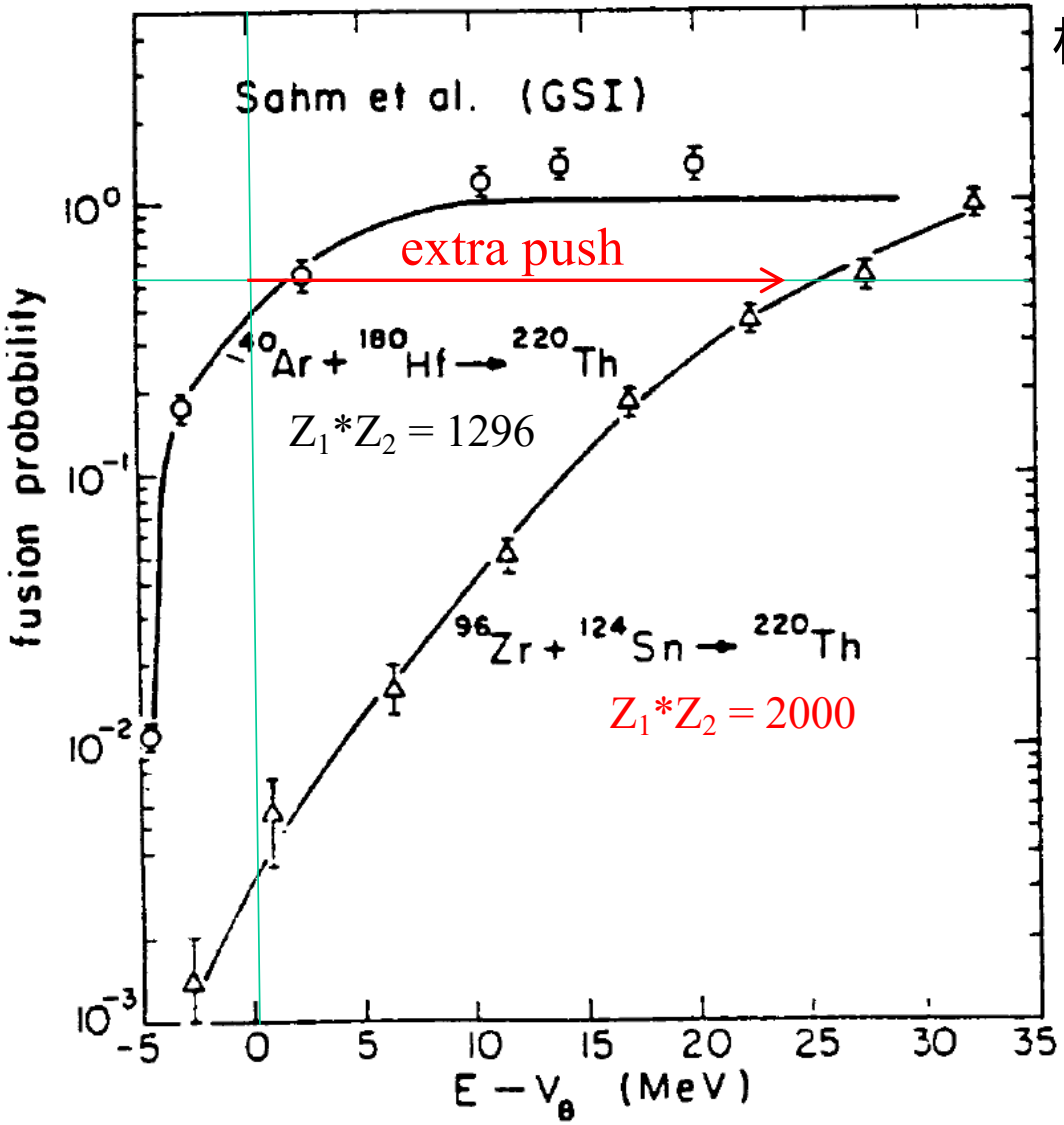
- 中重核の核融合反応:



- 重核や超重核の核融合反応:

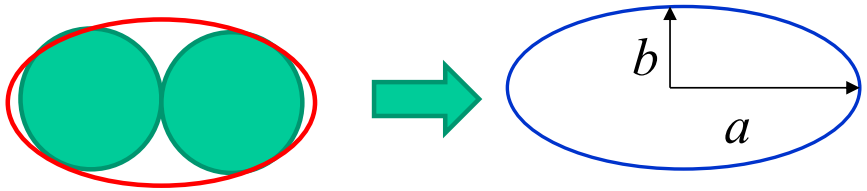


核融合断面積の阻害



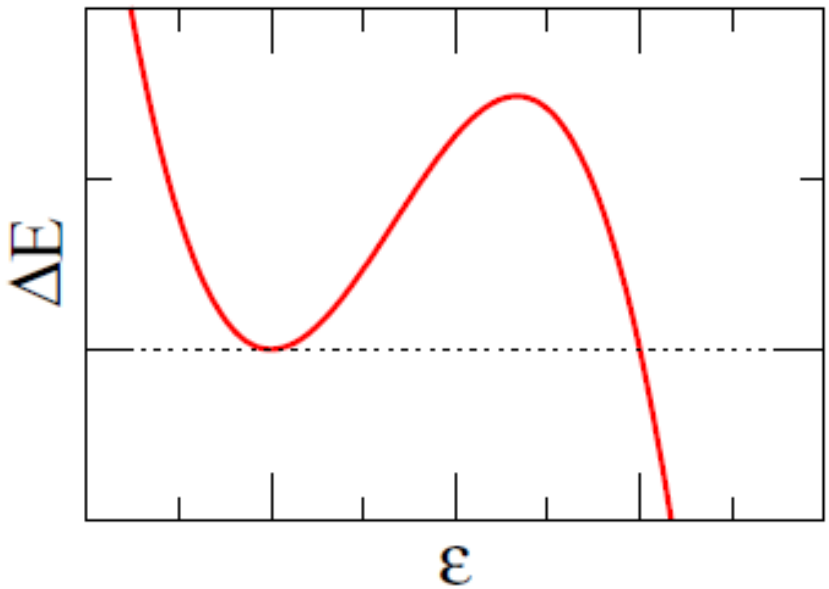
C.-C. Sahm et al.,
Z. Phys. A319('84)113

同じ原子核が接触すると:



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

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



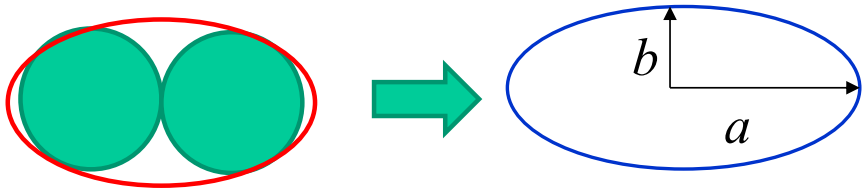
$$E_B = \frac{98}{15} \cdot \frac{(1-x)^3}{(1+2x)^2} \cdot E_S^{(0)}$$

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

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

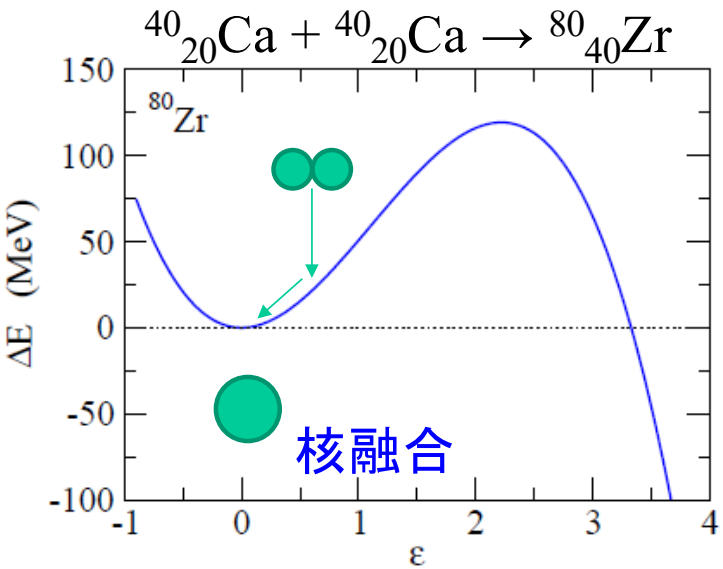
重い核ほど障壁での
変形度は小さくなる

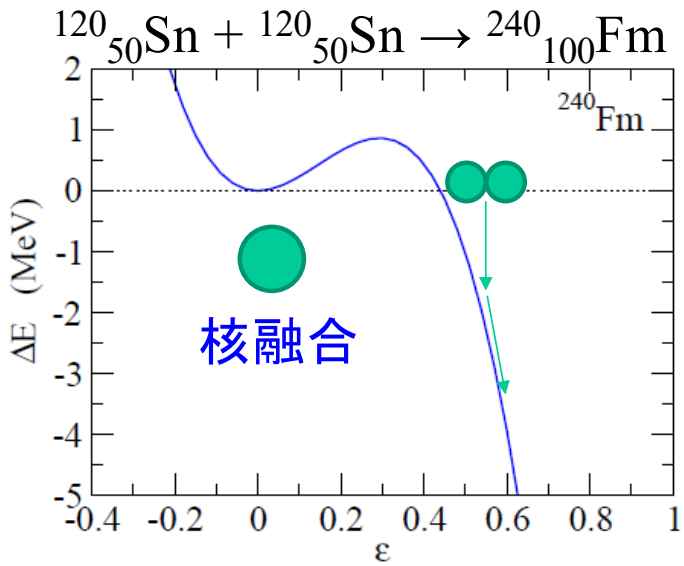
同じ原子核が接触すると:



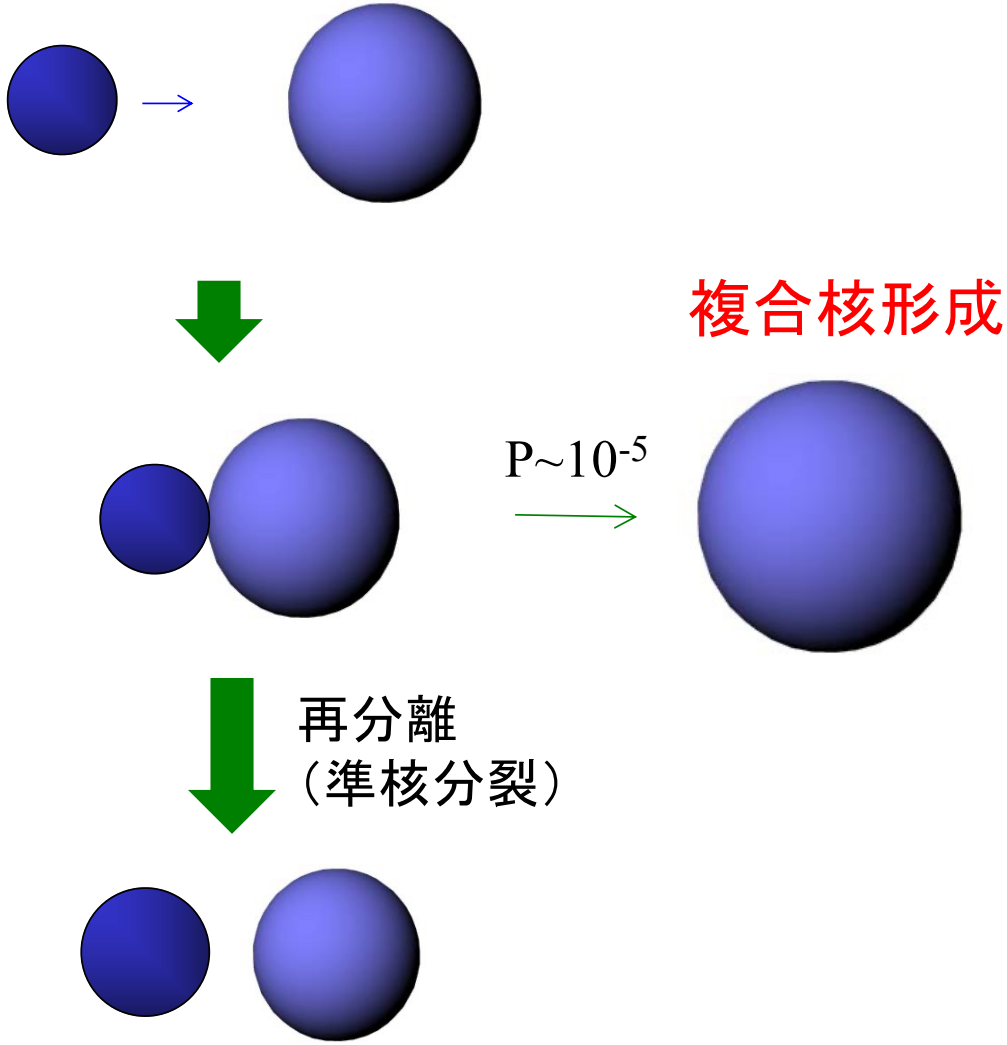
$$a = R_0 \cdot (1+\epsilon)$$
$$b = R_0 \cdot (1+\epsilon)^{-1/2}$$

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

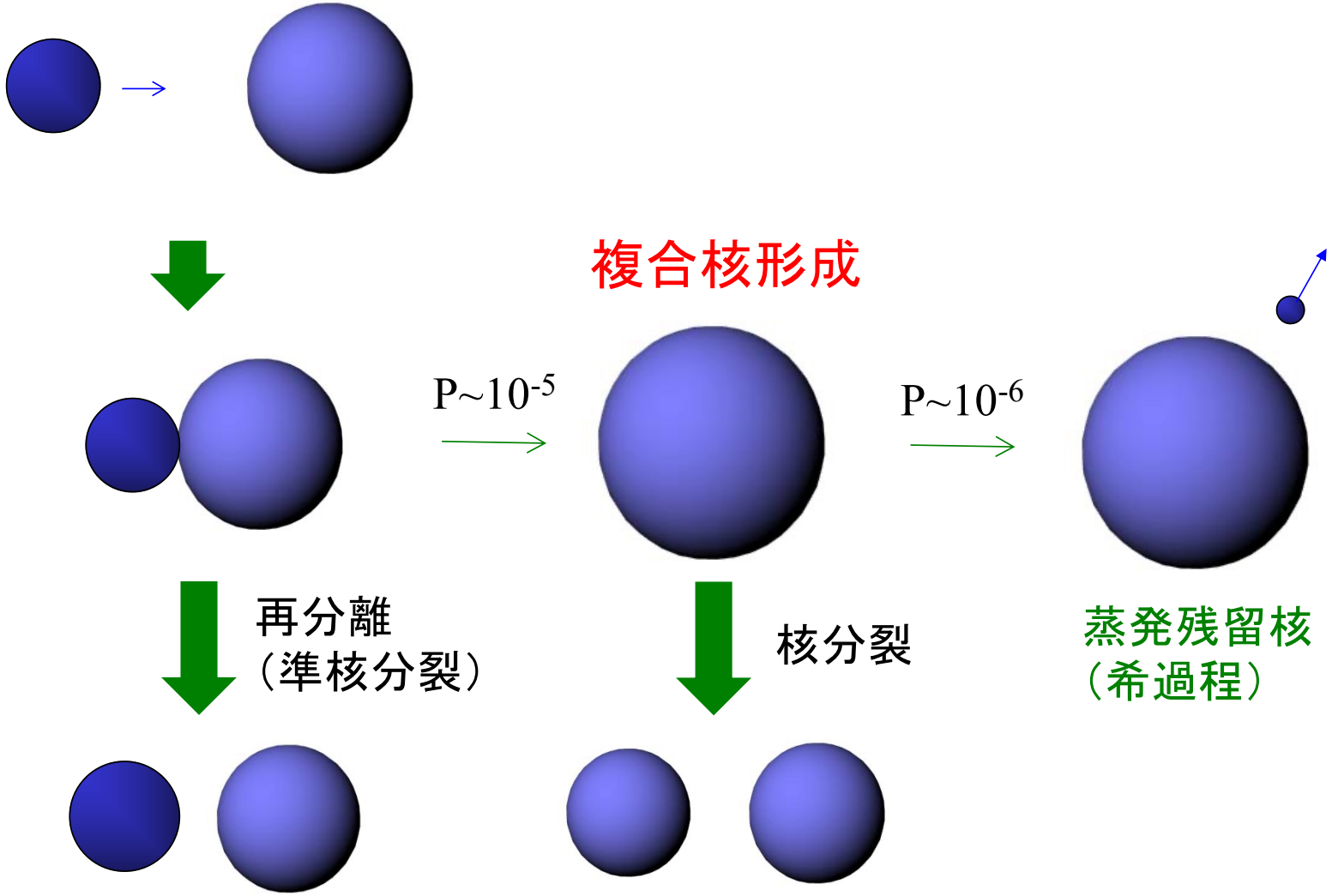




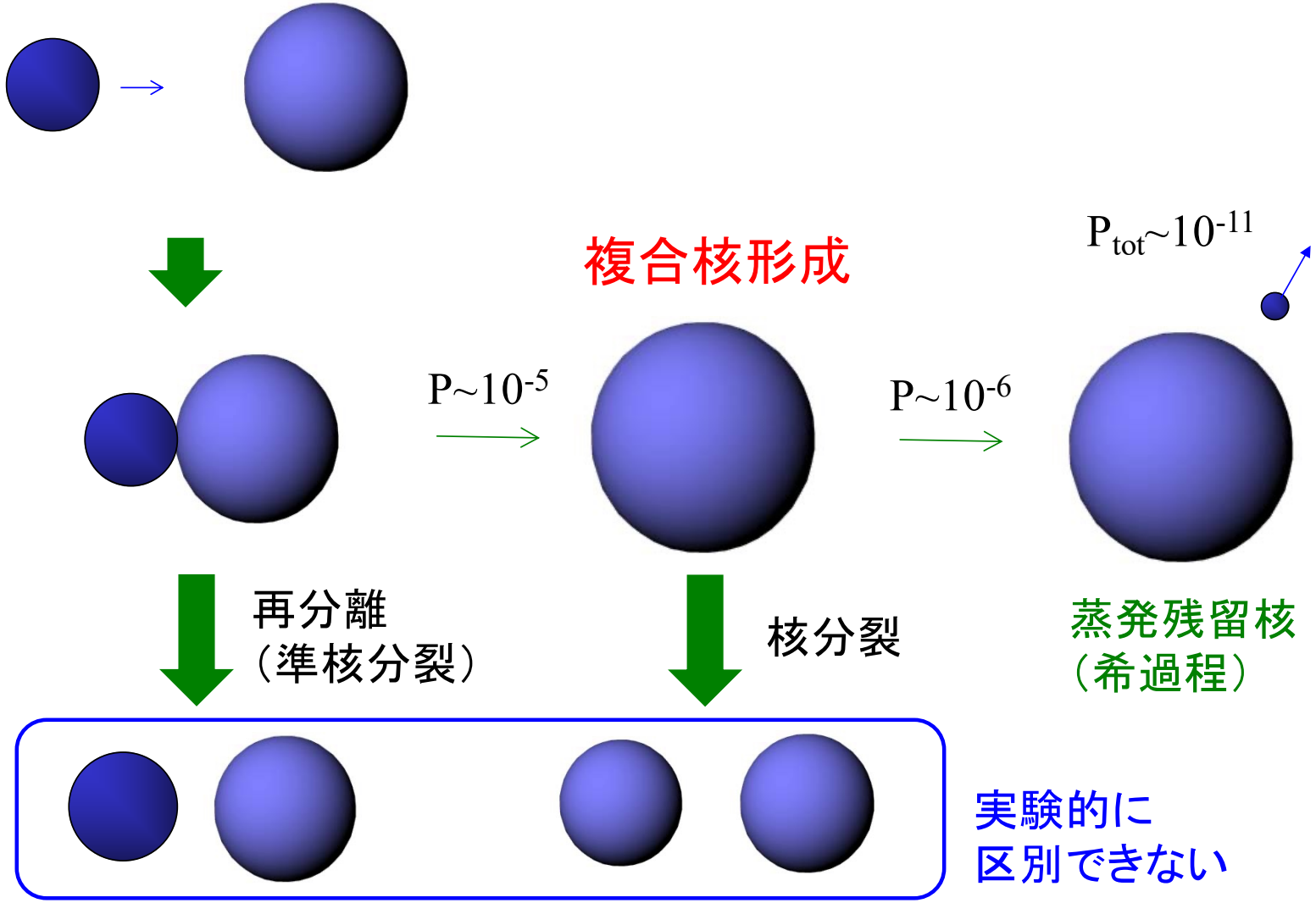
超重元素領域における重イオン核融合反応

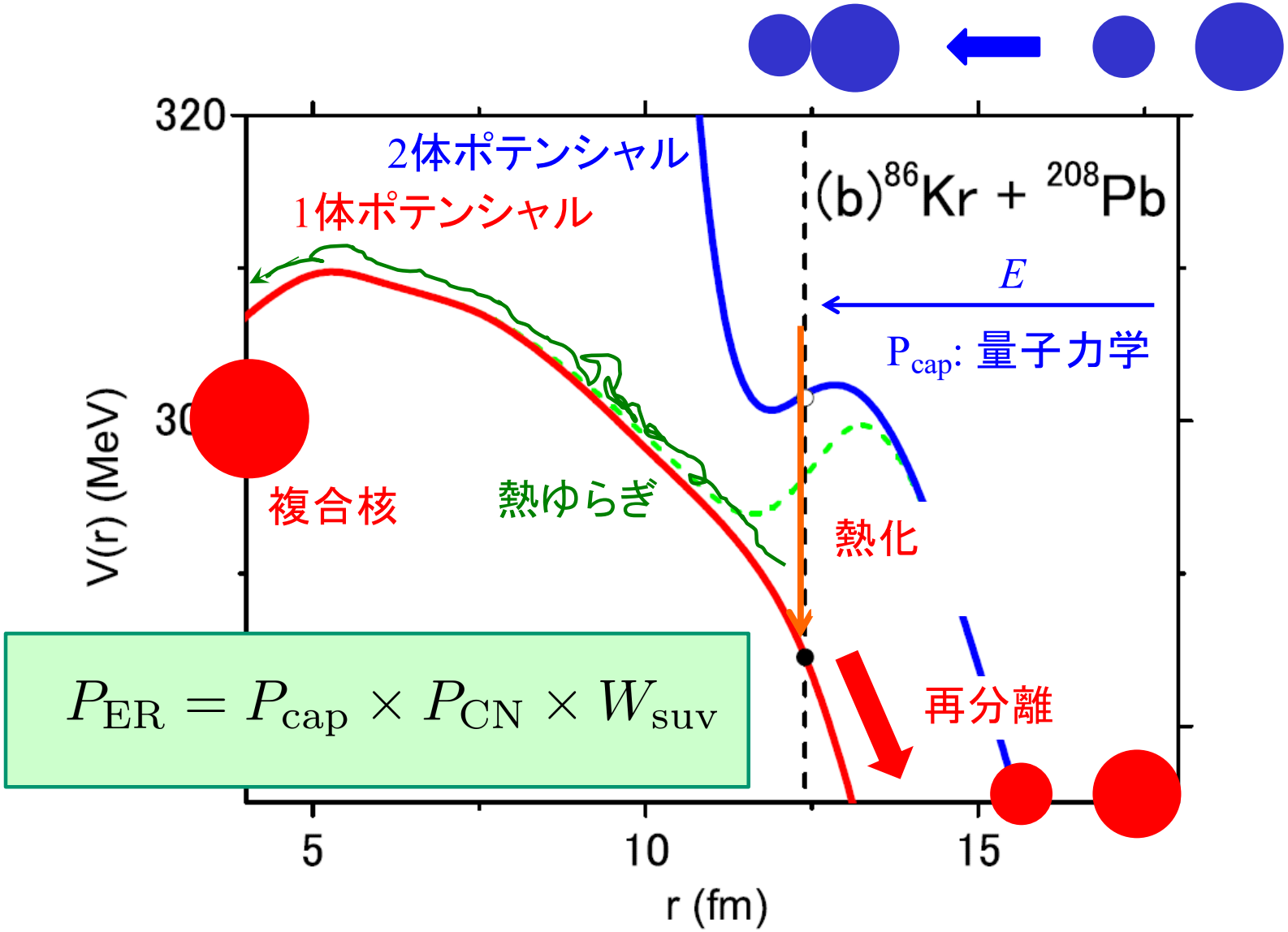


超重元素領域における重イオン核融合反応



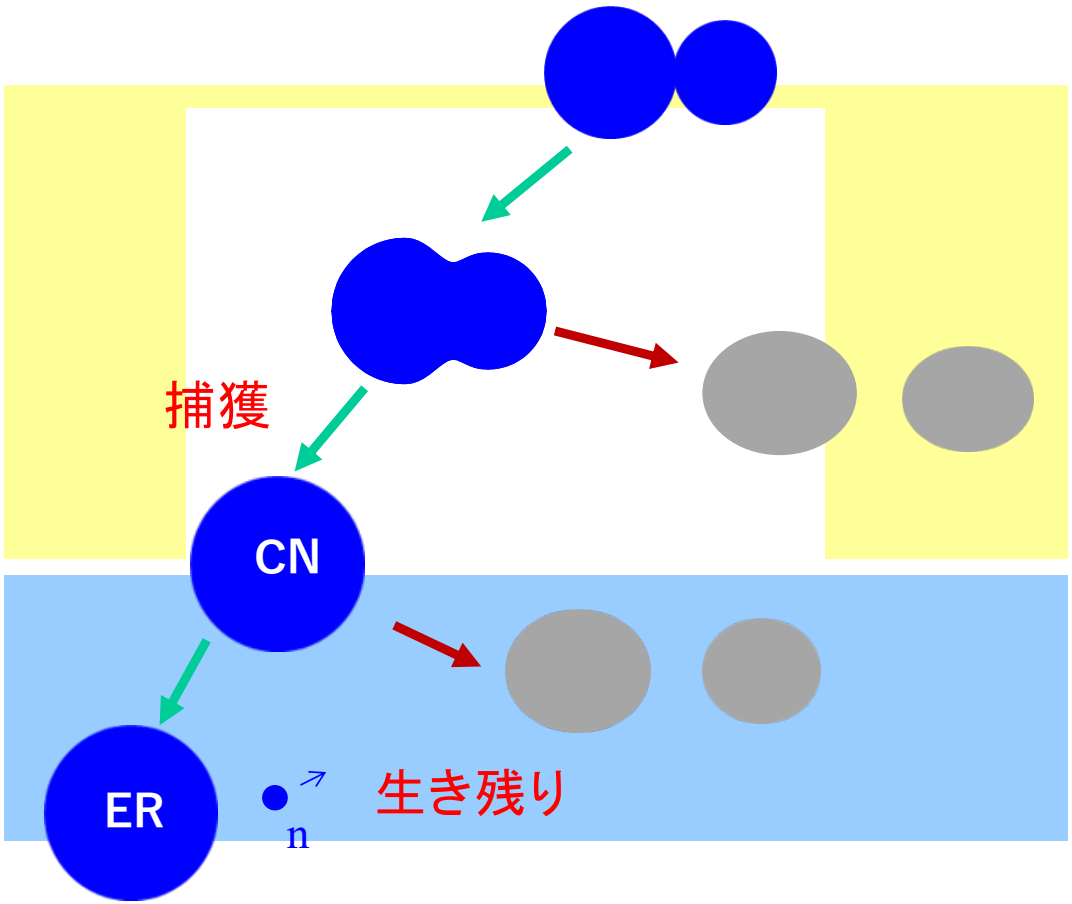
超重元素領域における重イオン核融合反応





$$P_{\mathrm{ER}} = P_{\mathrm{cap}} \times P_{\mathrm{CN}} \times W_{\mathrm{suv}}$$

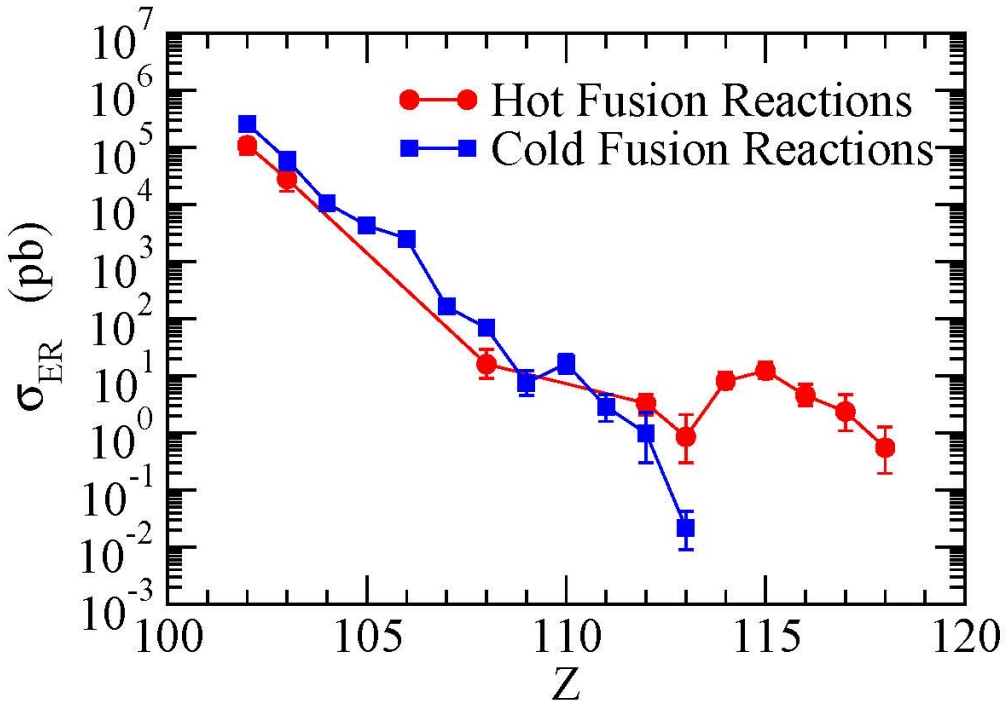
冷たい核融合と熱い核融合



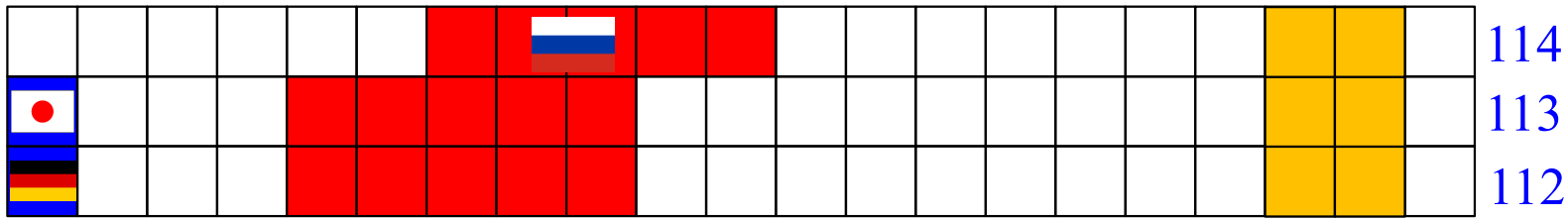
	熱い核融合	冷たい核融合
例	^{48}Ca + ^{243}Am → ^{287}Nh + 4n	^{70}Zn+^{209}Bi → ^{278}Nh + 1n
Z_1Z_2	小	大
E^*(CN)	大	小
捕獲確率	大	小
生き残り	小	大
	^{48}Ca-based	^{208}Pb-based

$$\begin{cases} V_b \propto Z_1 Z_2 \\ P_{\mathrm{sur}} \sim \left(\dfrac{\Gamma_n}{\Gamma_f}\right)^x \end{cases}$$

冷たい核融合と熱い核融合



	熱い核融合	冷たい核融合
例	$^{48}Ca + ^{243}Am \rightarrow ^{287}Nh + 4n$	$^{70}Zn + ^{209}Bi \rightarrow ^{278}Nh + 1n$
Z_1Z_2	小	大
E^*(CN)	大	小
捕獲確率	大	小
生き残り	小	大
	^{48}Ca-based	^{208}Pb-based



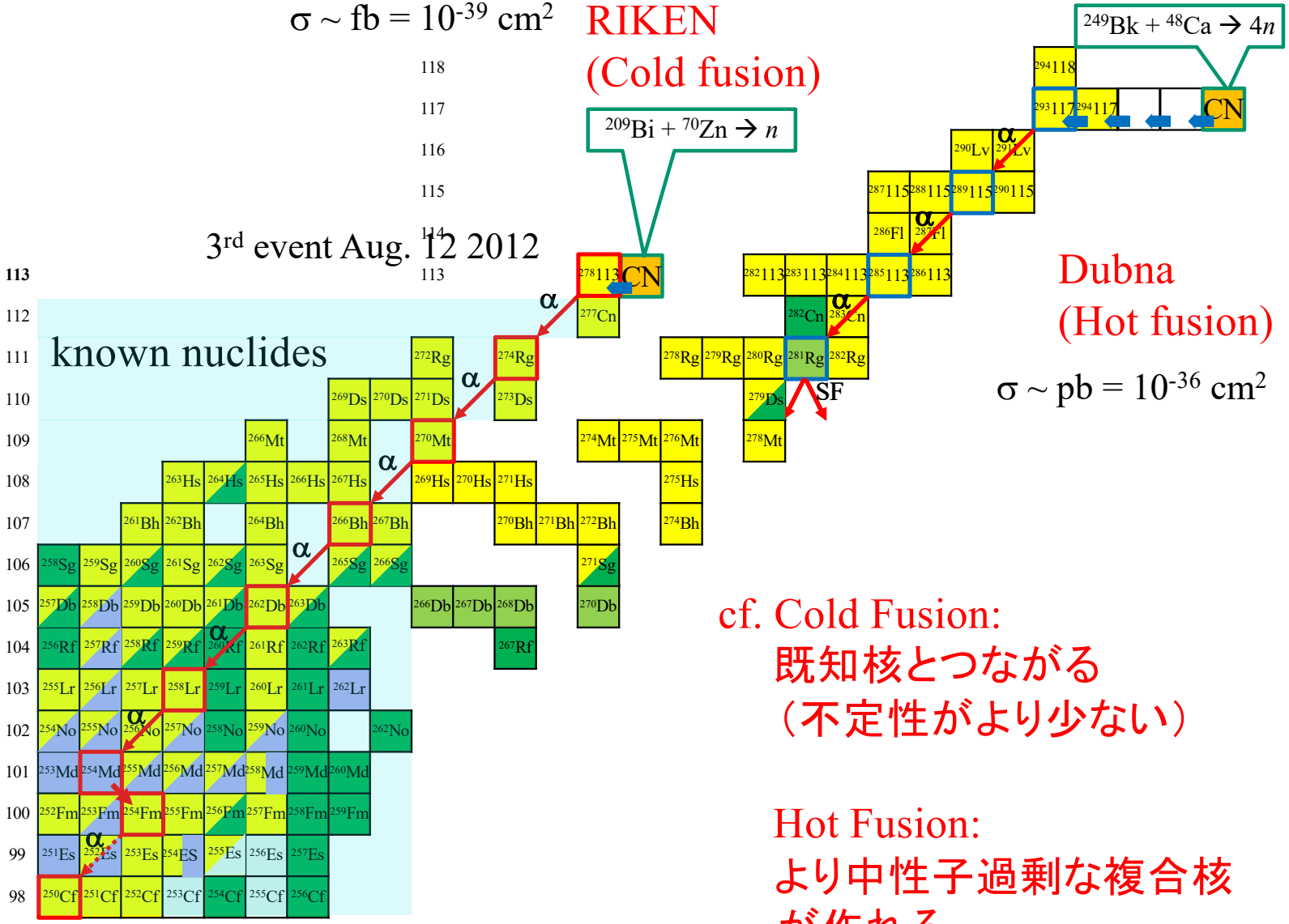
the island of stability (?)

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

RIKEN
(Cold fusion)

$^{209}Bi + {}^{70}Zn \rightarrow n$

3rd event Aug. 12 2012



Dubna
(Hot fusion)

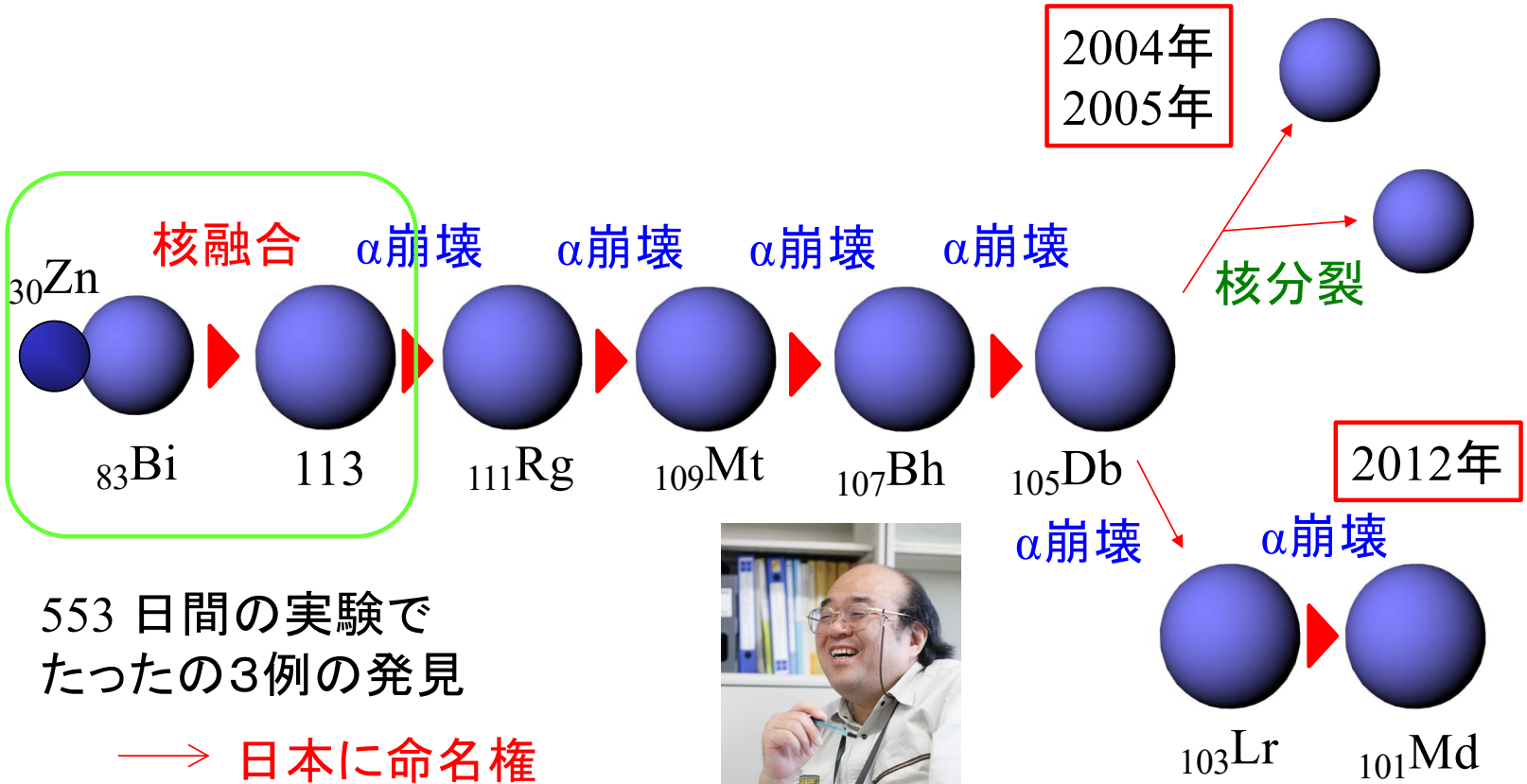
$\sigma \sim pb = 10^{-36}\ cm^2$

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)

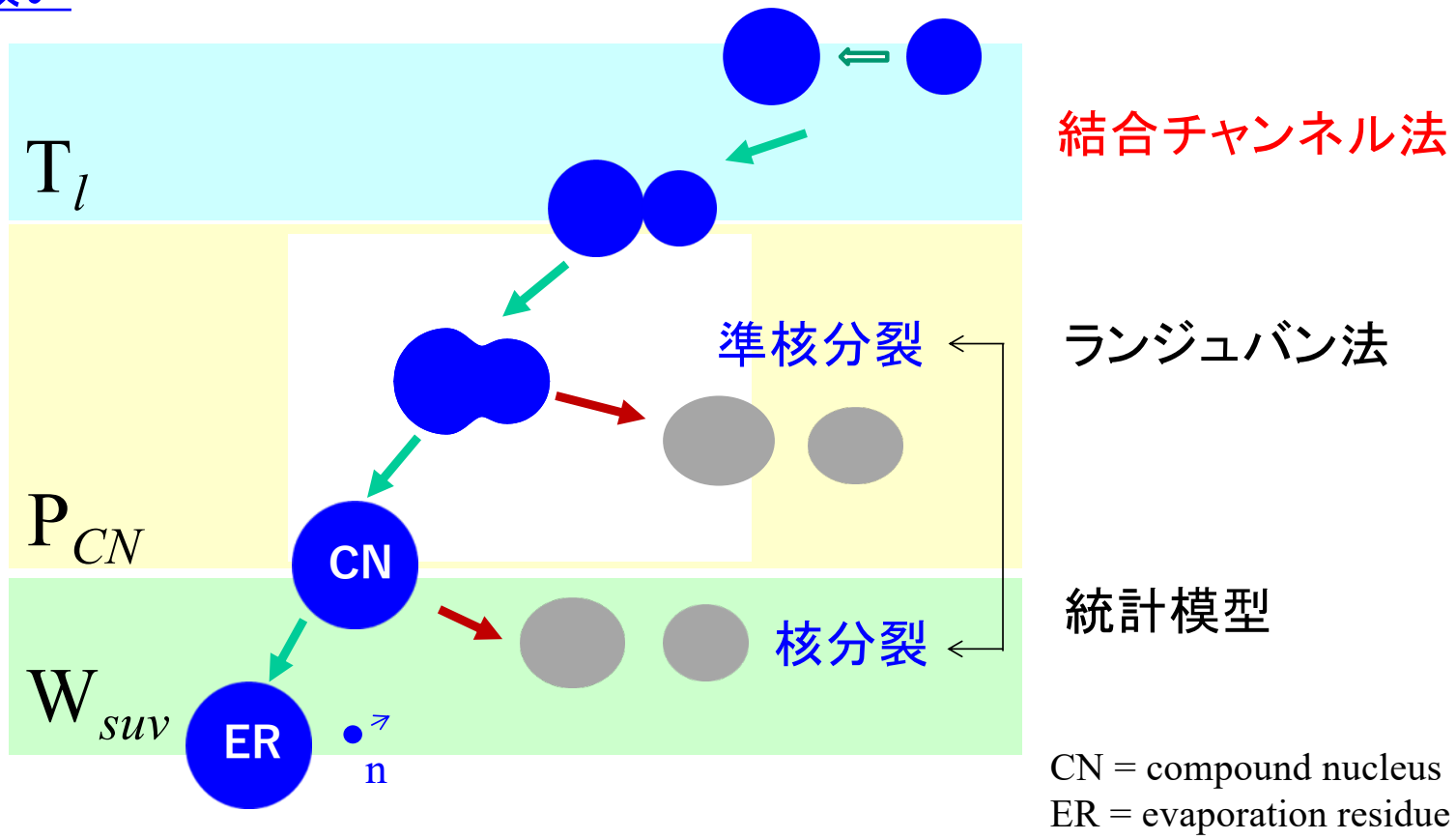
$^{70}Zn\ (Z=30) + {}^{209}Bi\ (Z=83) \rightarrow {}^{278}113\ (Nh) + n$



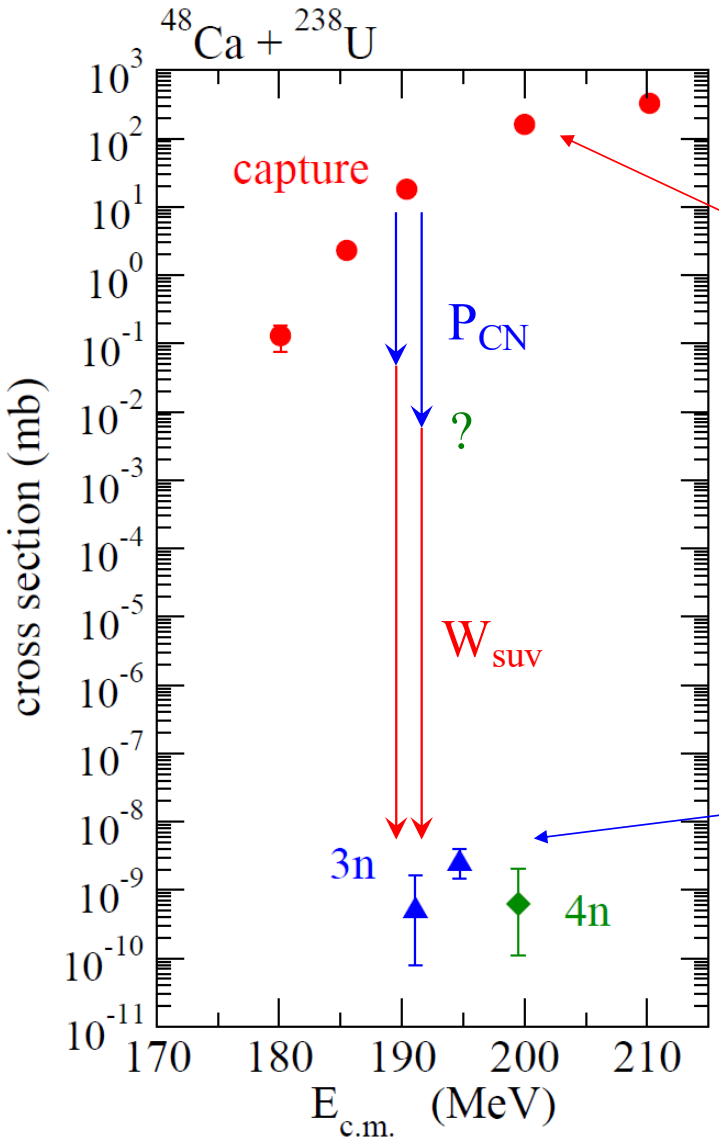
553 日間の実験で
たったの3例の発見

→ 日本に命名権
ニホニウム　Nh

理論的取り扱い



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



P_{CN}に対する実験データがない

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

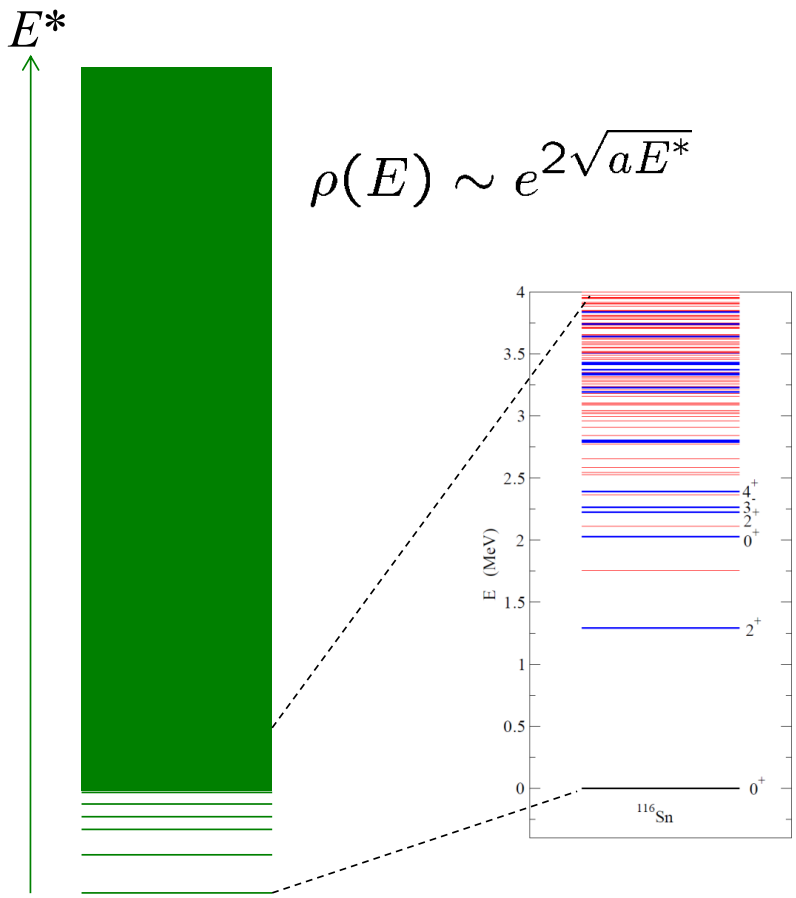
$$\cancel{\sigma_{\mathrm{CN}}(E) = \frac{\pi}{k^2}\sum_l (2l+1)T_l(E) \times P_{\mathrm{CN}}}$$

not available

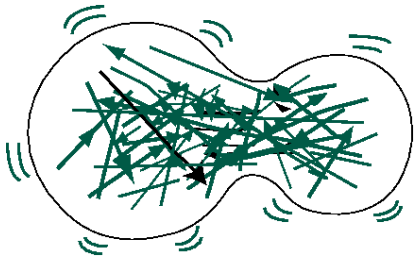
$$\sigma_{\mathrm{ER}}(E) = \frac{\pi}{k^2}\sum_l (2l+1)T_l(E) \times \boxed{P_{\mathrm{CN}} \cdot W_{\mathrm{suv}}}$$

大きな不定性

重イオン核融合反応と量子開放系



原子核のスペクトル



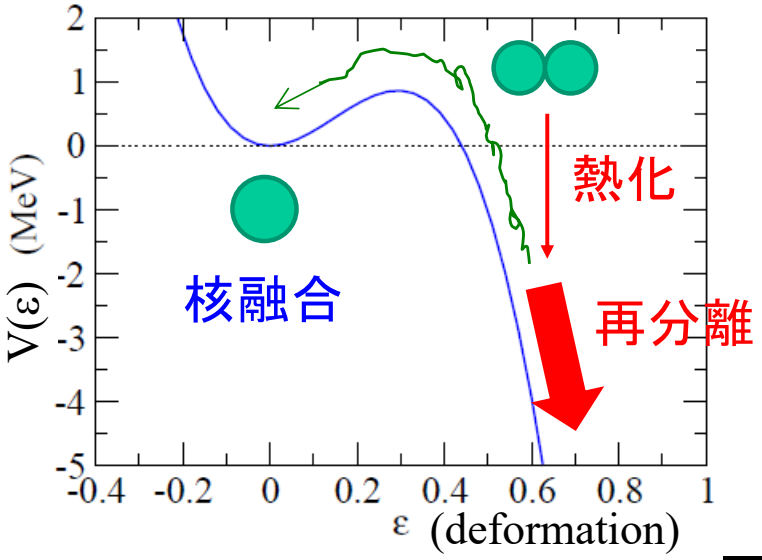
核反応の途中で複雑に励起

⇩

原子核の内部自由度:「環境」
「内的環境自由度」

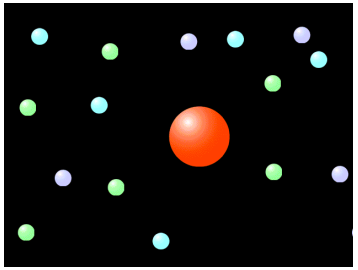
→量子開放系の物理

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）

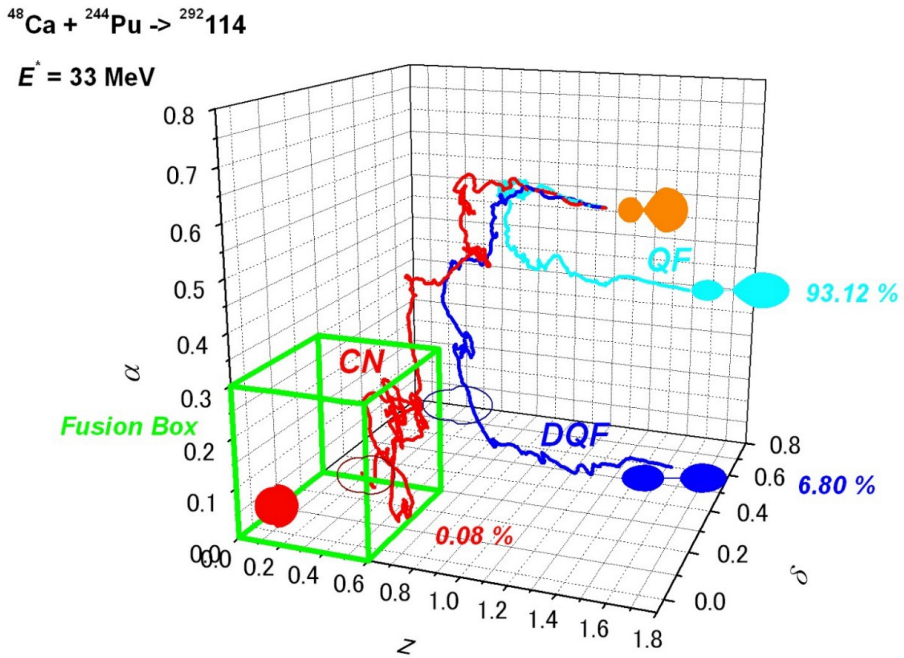


$$m\frac{d^2q}{dt^2} = -\frac{dV(q)}{dq} - \gamma\frac{dq}{dt} + R(t)$$

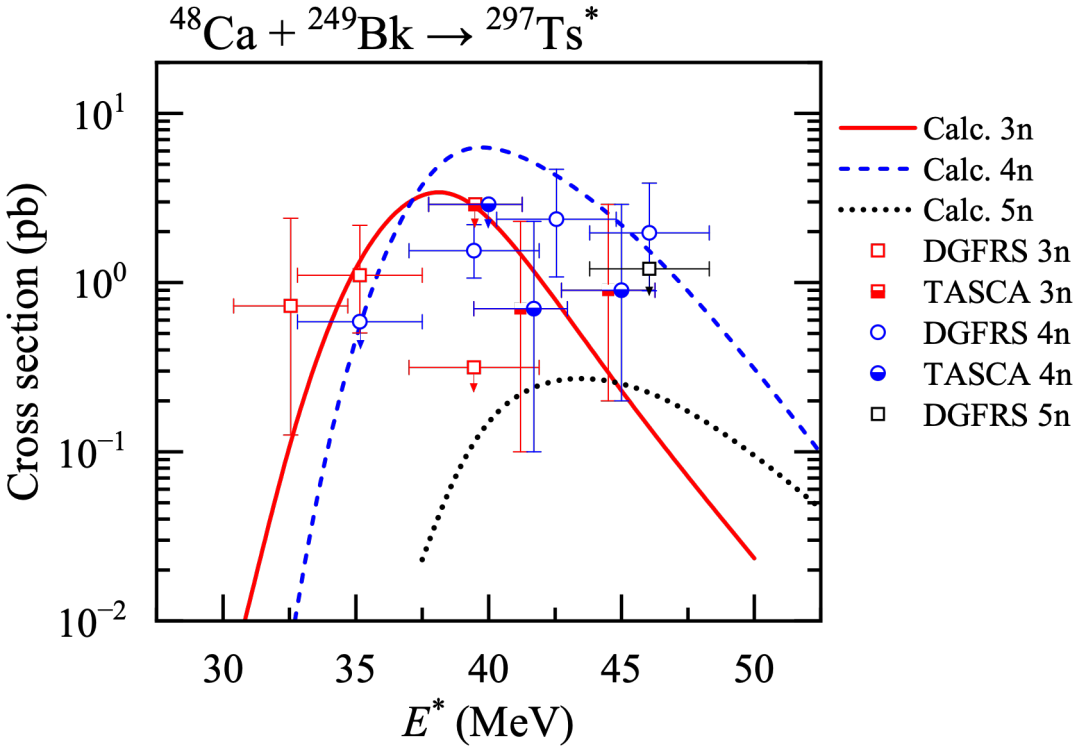
γ: 摩擦係数
$R(t)$: ランダム力

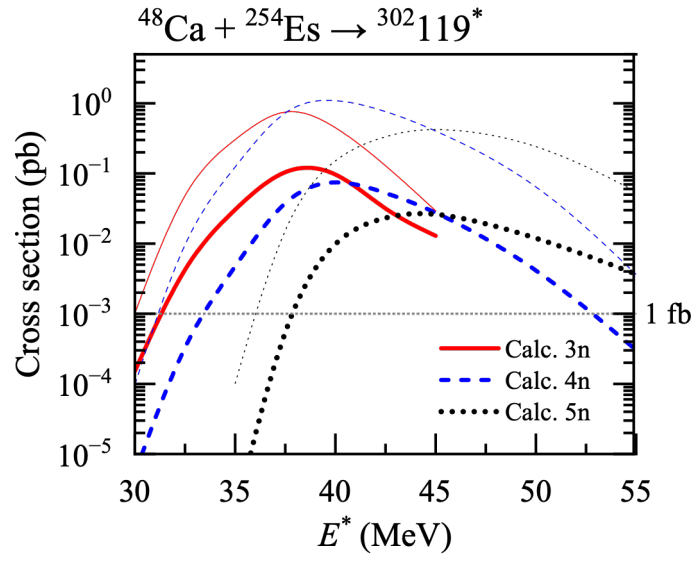
多次元化

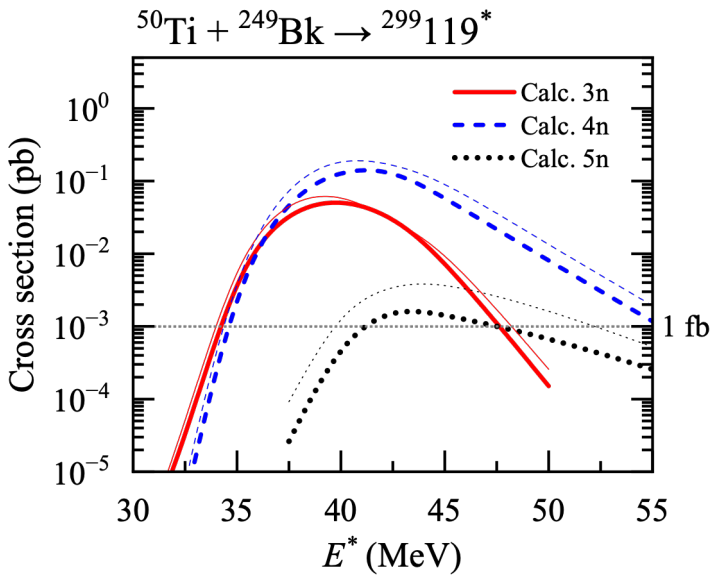
q: ・核間距離
・変形
・フラグメントの質量



ランジュバン法

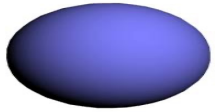






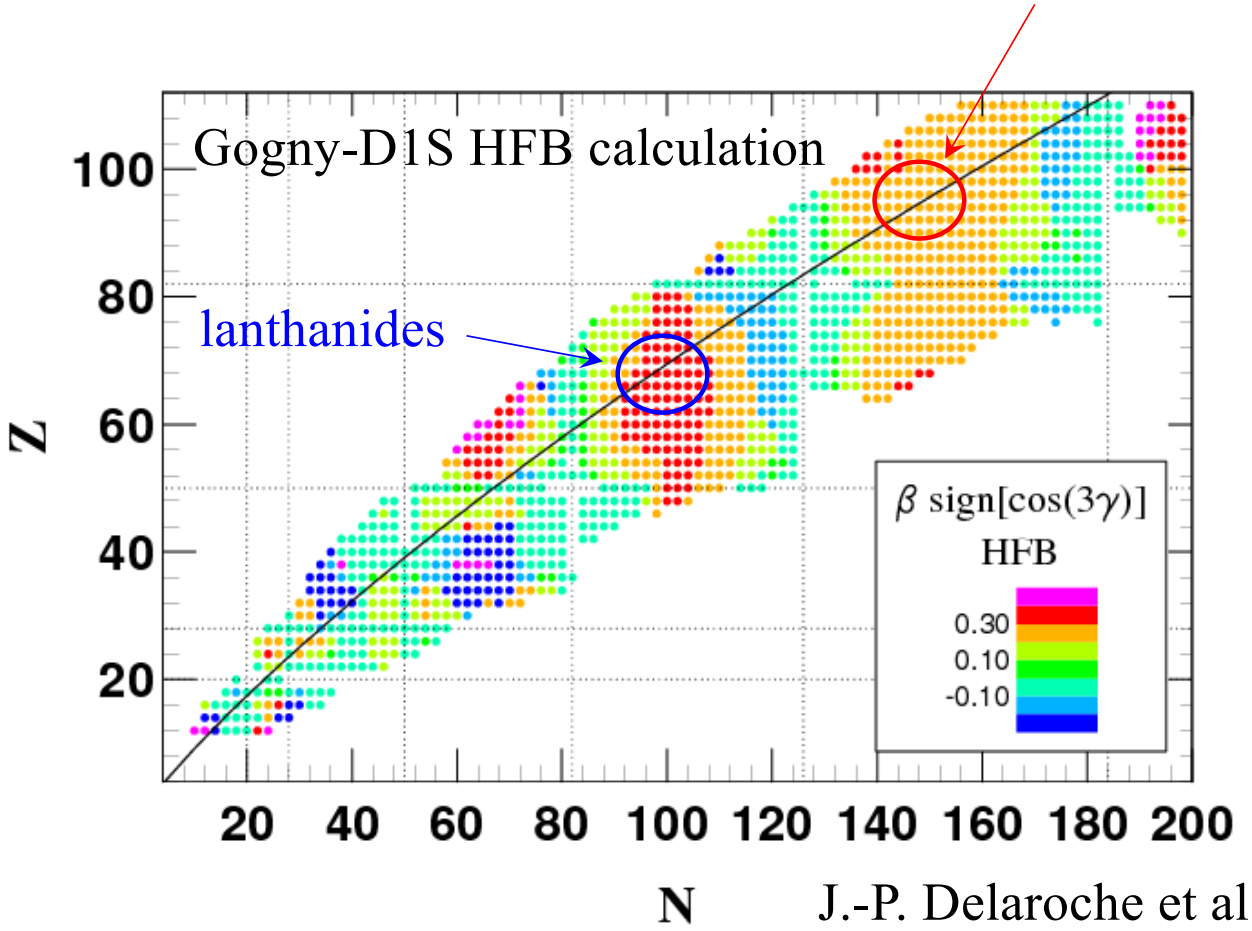
K. Kawai, Y. Aritomo, K. Nakajima,
S. Takagi, and N. Nishimura,
arXiv:2604.19325

熱い核融合反応：変形した標的核



熱い核融合: ^{48}Ca + 変形した標的核

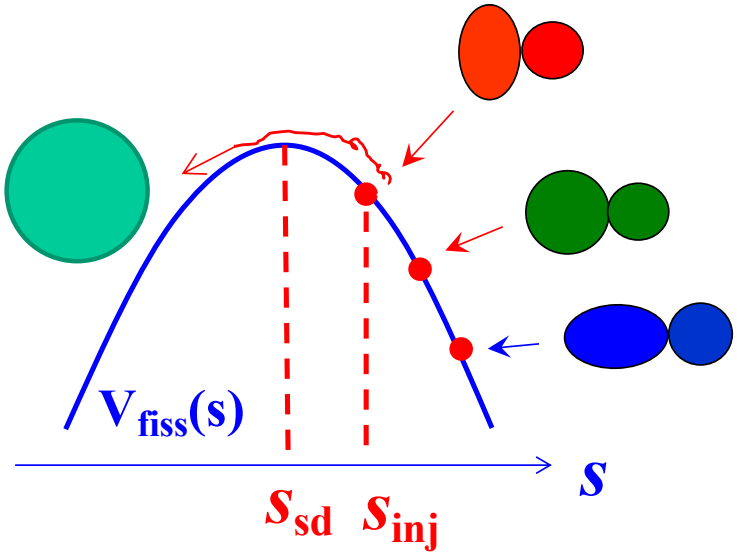
重イオン反応に対する
変形の効果?



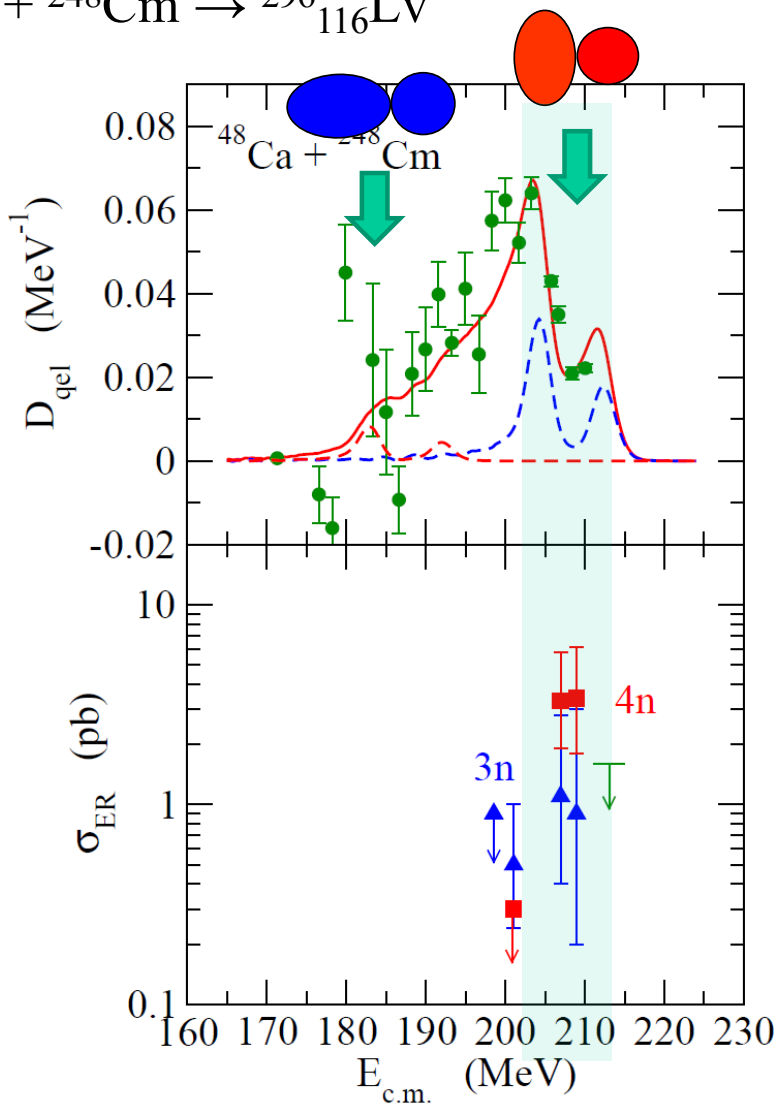
J.-P. Delaroche et al.,
PRC81 ('10) 014303

コンパクトネスの考え:

D.J. Hinde et al., PRL74 ('95) 1295



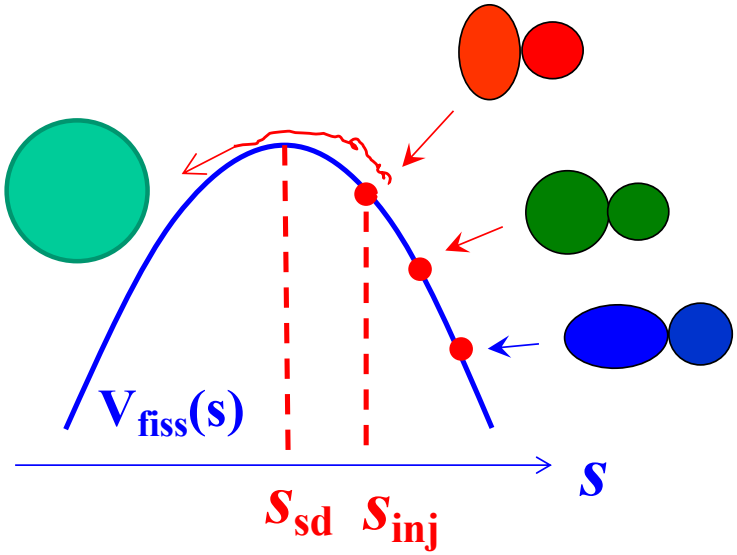
$^{48}Ca + ^{248}Cm \rightarrow ^{296}_{116}Lv^*$



重イオン反応に対する
変形の効果?

コンパクトネスの考え:

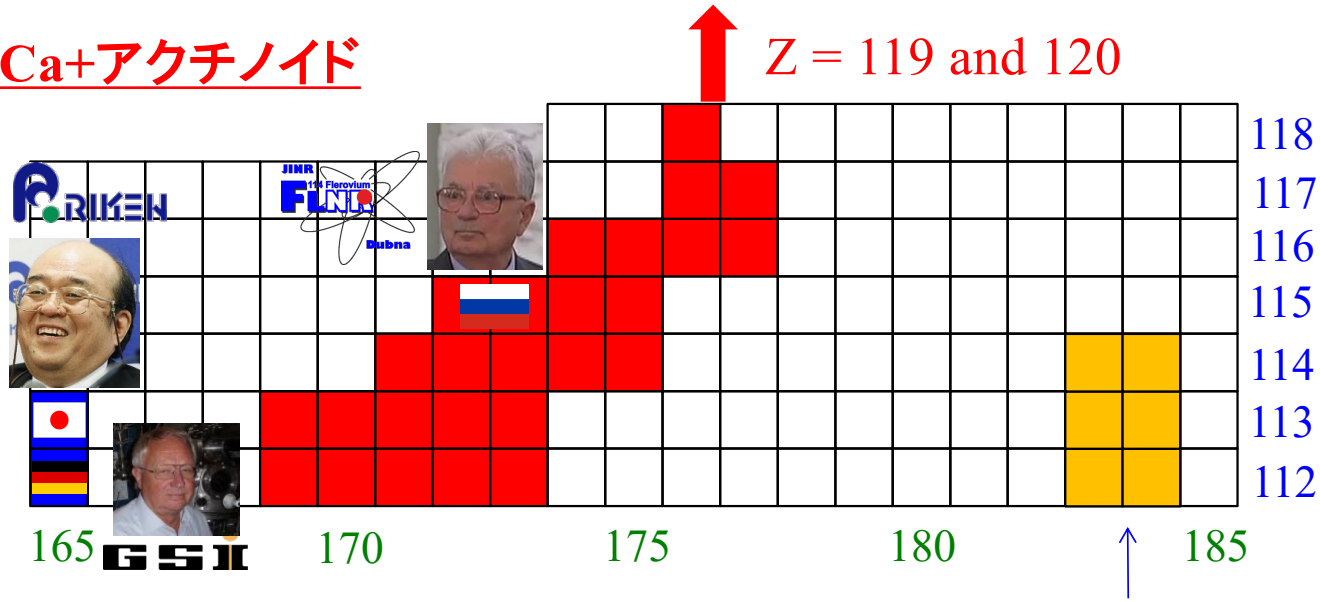
D.J. Hinde et al., PRL74 ('95) 1295

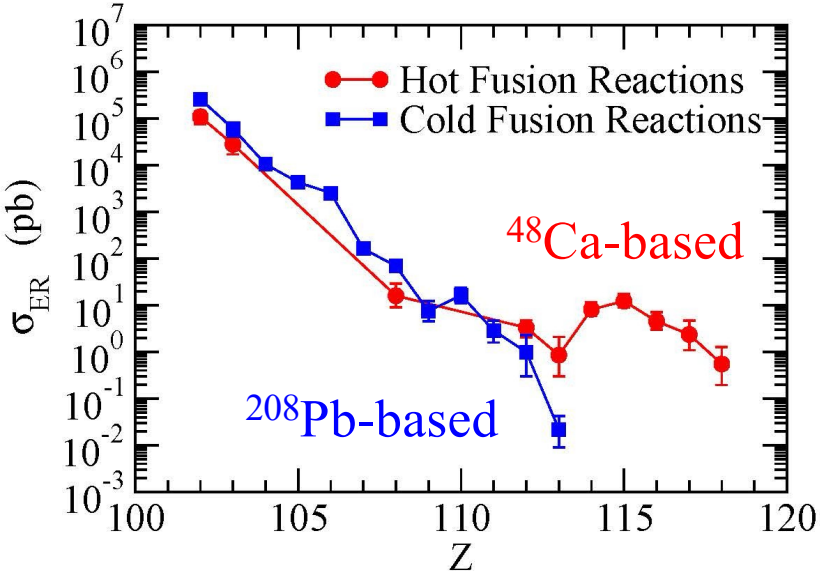


T. Tanaka et al.,
JPSJ 87 ('18) 014201; PRL124 ('20) 052502

K. Hagino, PRC98 ('18) 014607

熱い融合反応: ^{48}Ca+アクチノイド





119番、120番元素
を熱い融合反応で作る

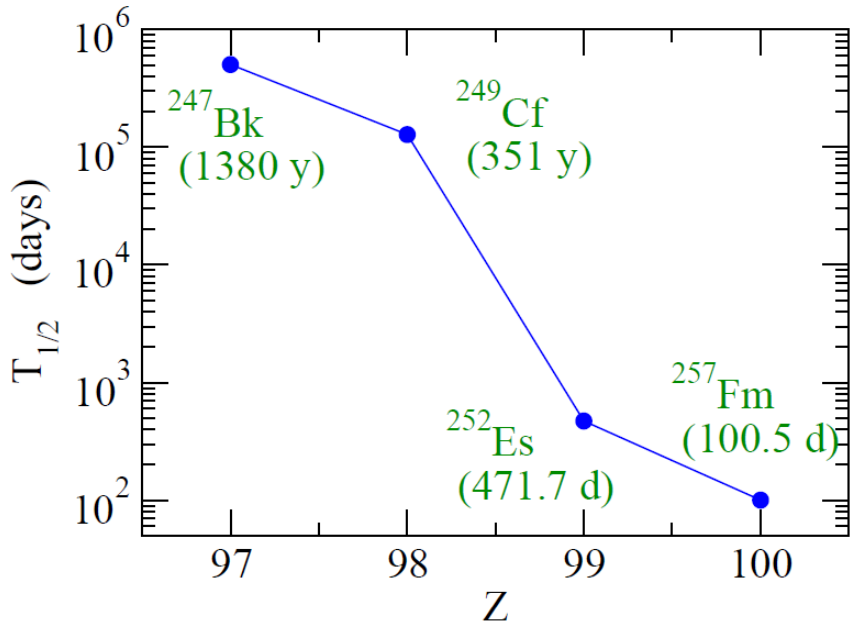
119番及び120番元素に向けて

^{48}Ca を使った熱い融合反応:

$^{48}_{20}Ca + {}_{99}Es \rightarrow 119$

$^{48}_{20}Ca + {}_{100}Fm \rightarrow 120$

短寿命→標的にできるほど大量にない

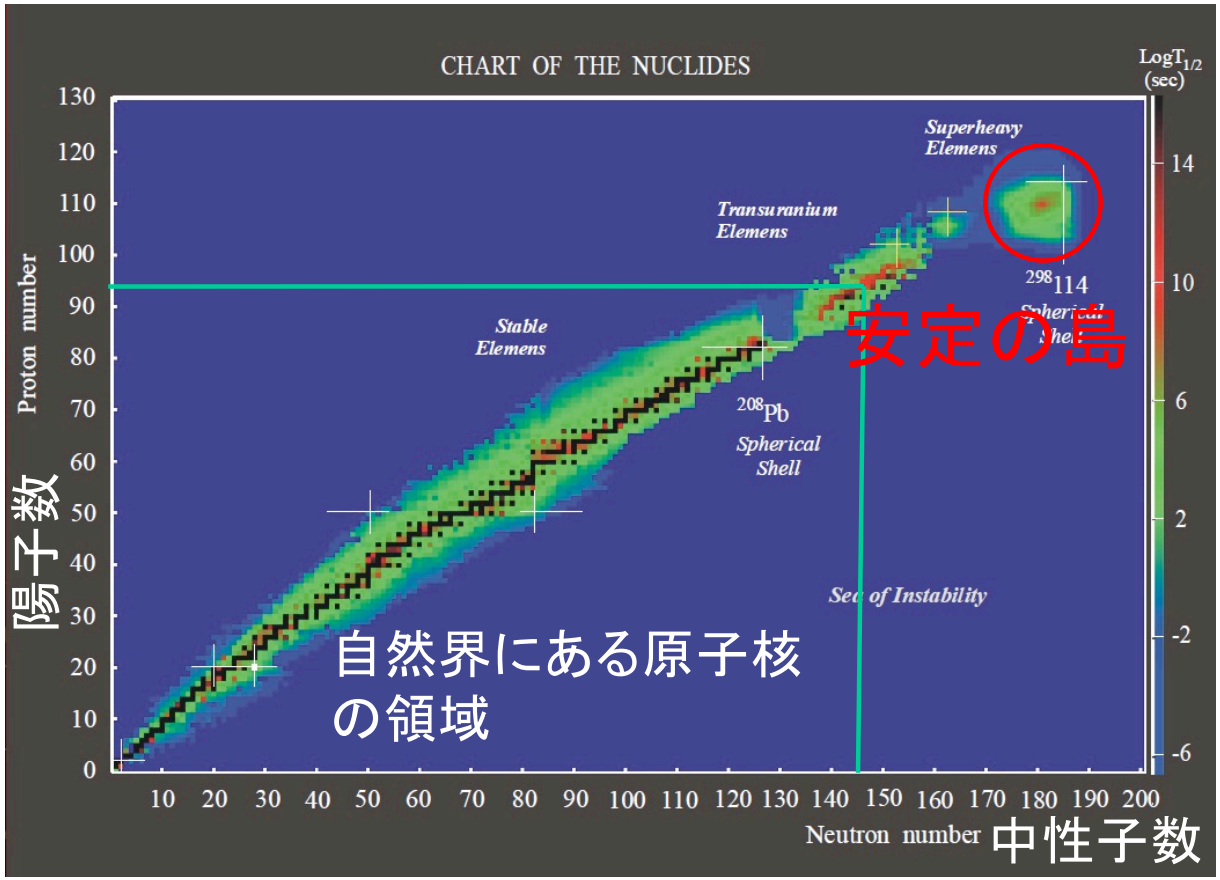


^{48}Ca → $^{50}_{22}$Ti, $^{51}_{23}$V, $^{54}_{24}$Cr 核

二重閉殻 → 開殻

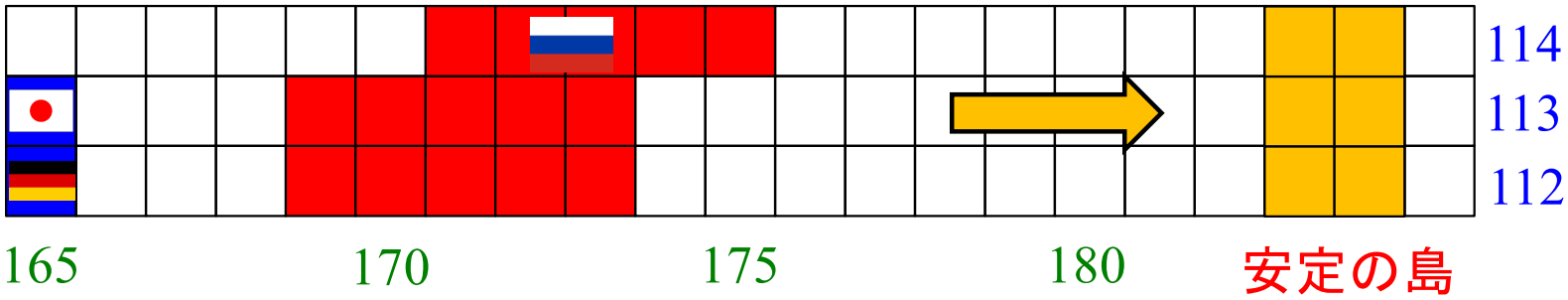
どのくらい断面積は影響を受けるのか?

もう一つの重要な課題



Yuri Oganessian

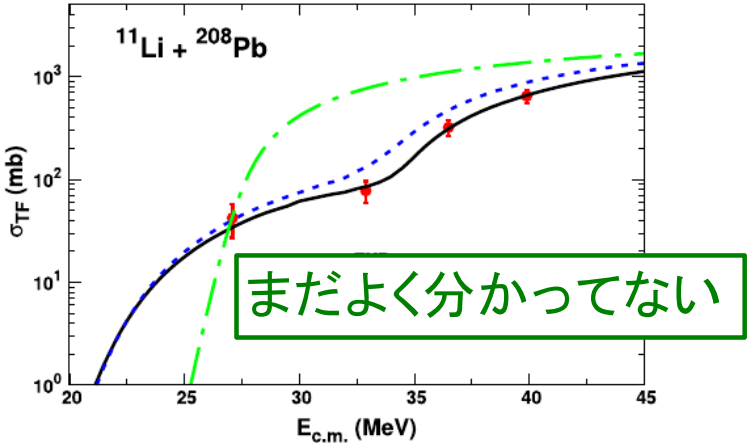
安定の島にどのように到達するか?



中性子過剰核ビームが必須→反応ダイナミックス?

- 低いビーム強度をどうするか?
- 中性子過剰核を用いた核反応のダイナミックス?
  - ✓ 分解や多核子移行反応
  - ✓ 原子核の形状の時間発展中の中性子放出
  - ✓ 統計模型はどれだけいいのか?

中性子過剰核の構造



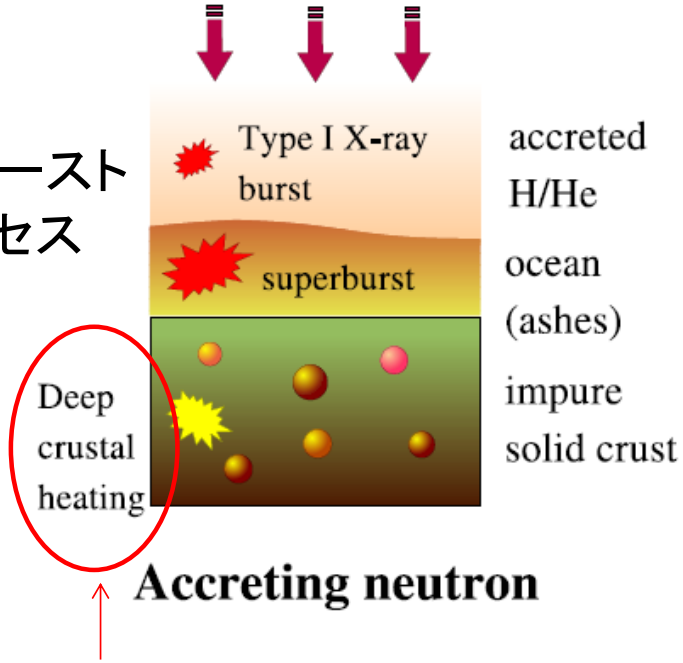
K.-S. Choi, K. Hagino et al., Phys. Lett. B780 ('18) 455

課題はいっぱい

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

X線バースト
rpプロセス

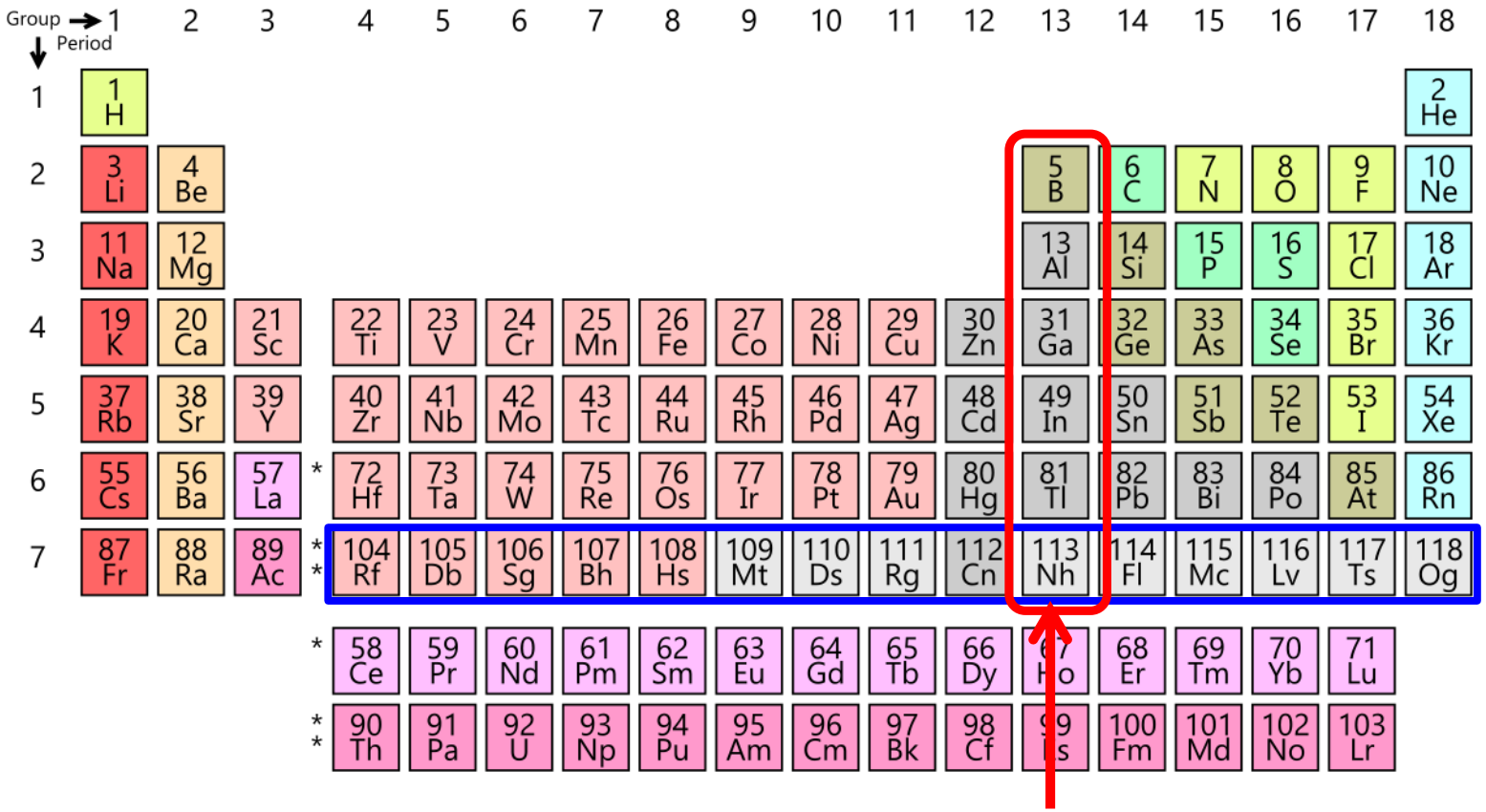


中性子過剰核の核融合反応 ⟶ X線連星の静穏期におけるX線の起源

$^{24}O + ^{24}O$, $^{28}Ne + ^{28}Ne$ など

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

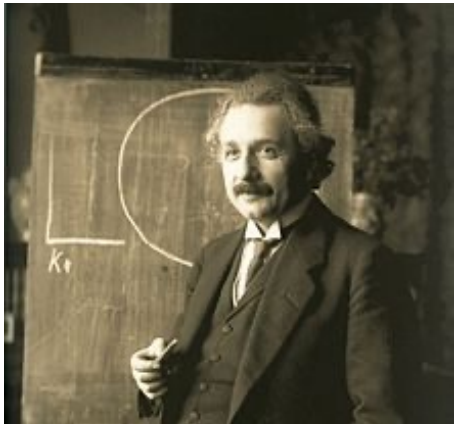
超重元素の化学



- 本当にここに置いちゃっていいの?
- 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、

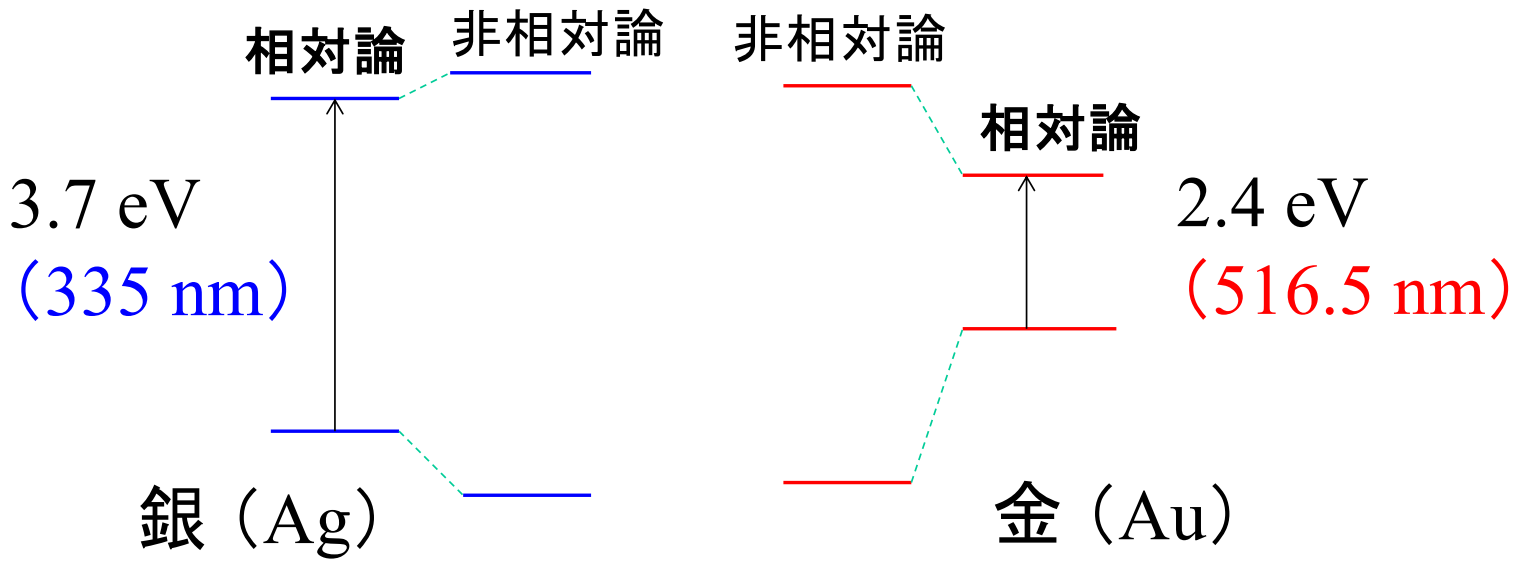
$$E_{1S} = mc^2\sqrt{1-(Z\alpha)^2} \sim mc^2\left(1 - \frac{(Z\alpha)^2}{2} \underbrace{- \frac{(Z\alpha)^4}{8} + \cdots}_{\text{相対論的効果}}\right)$$

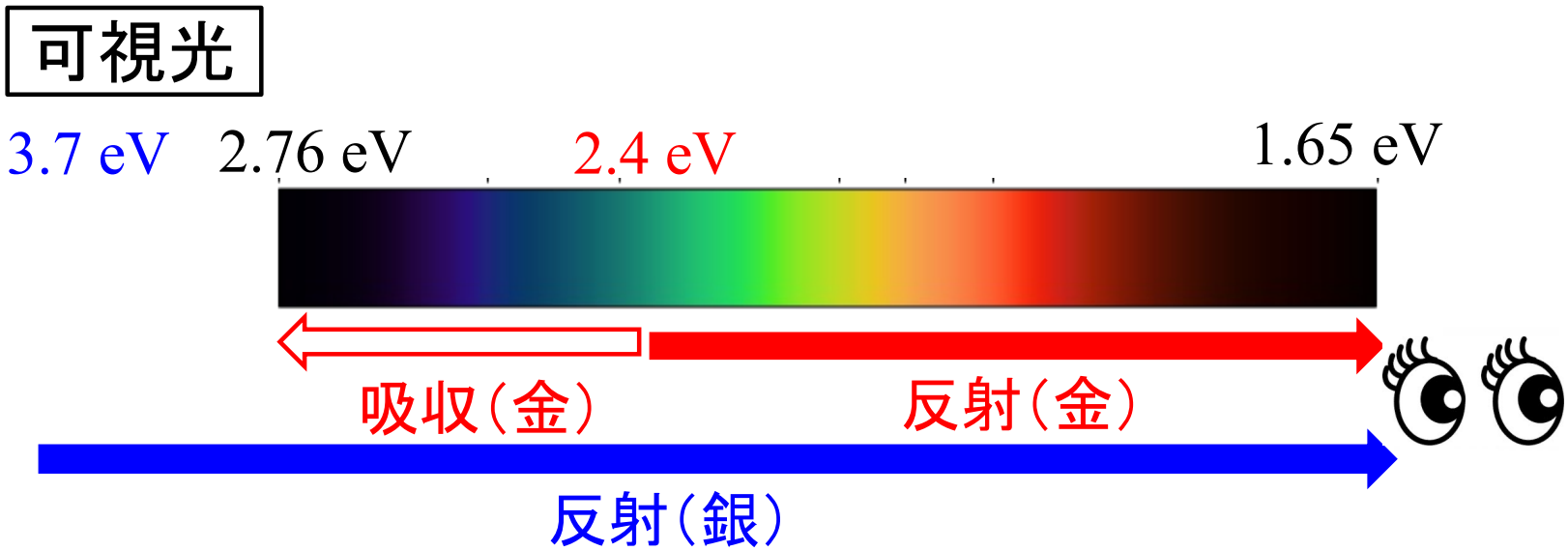
相対論的効果で有名な例：金の色

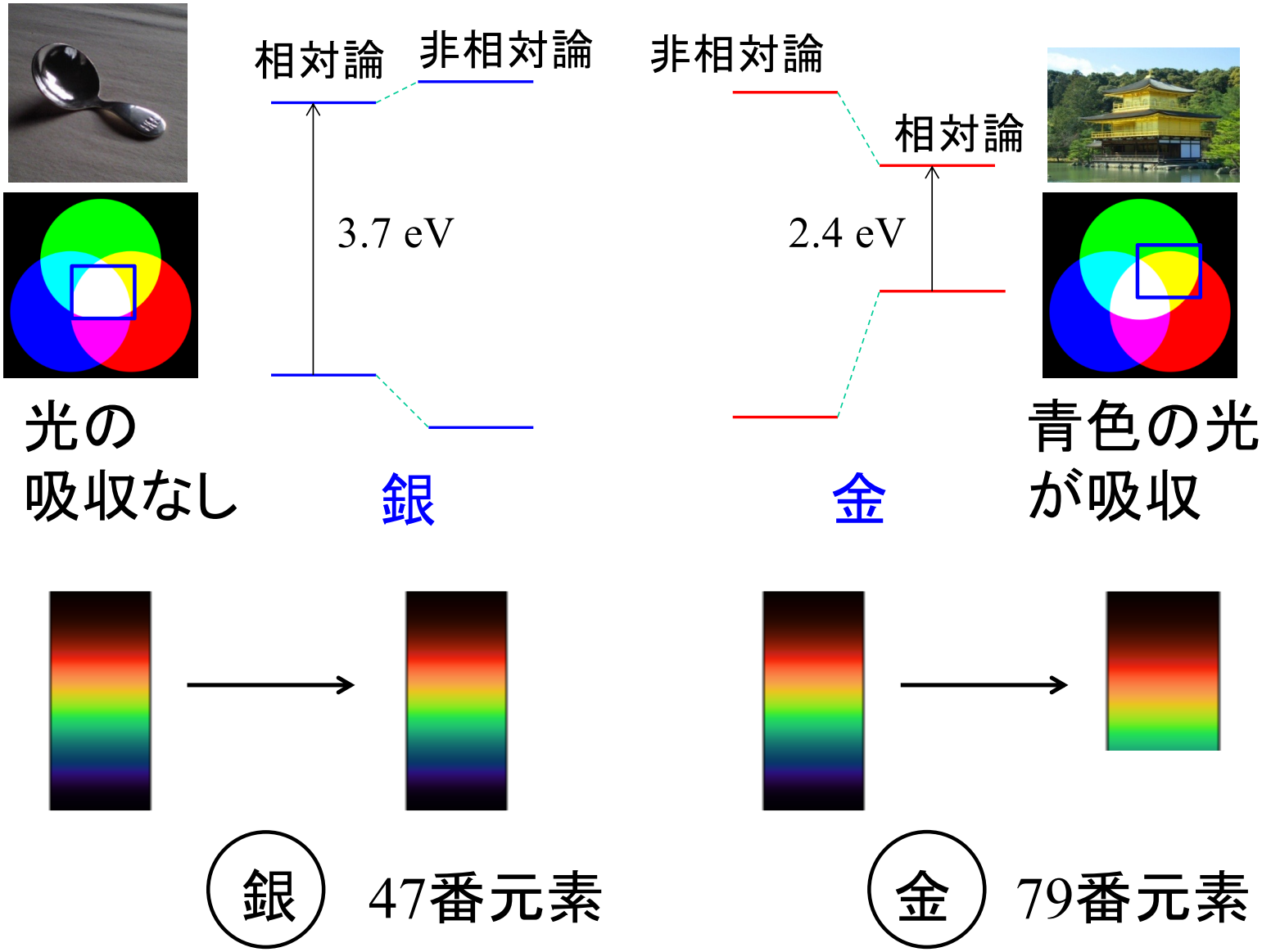
金と銀（と銅）は同族

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

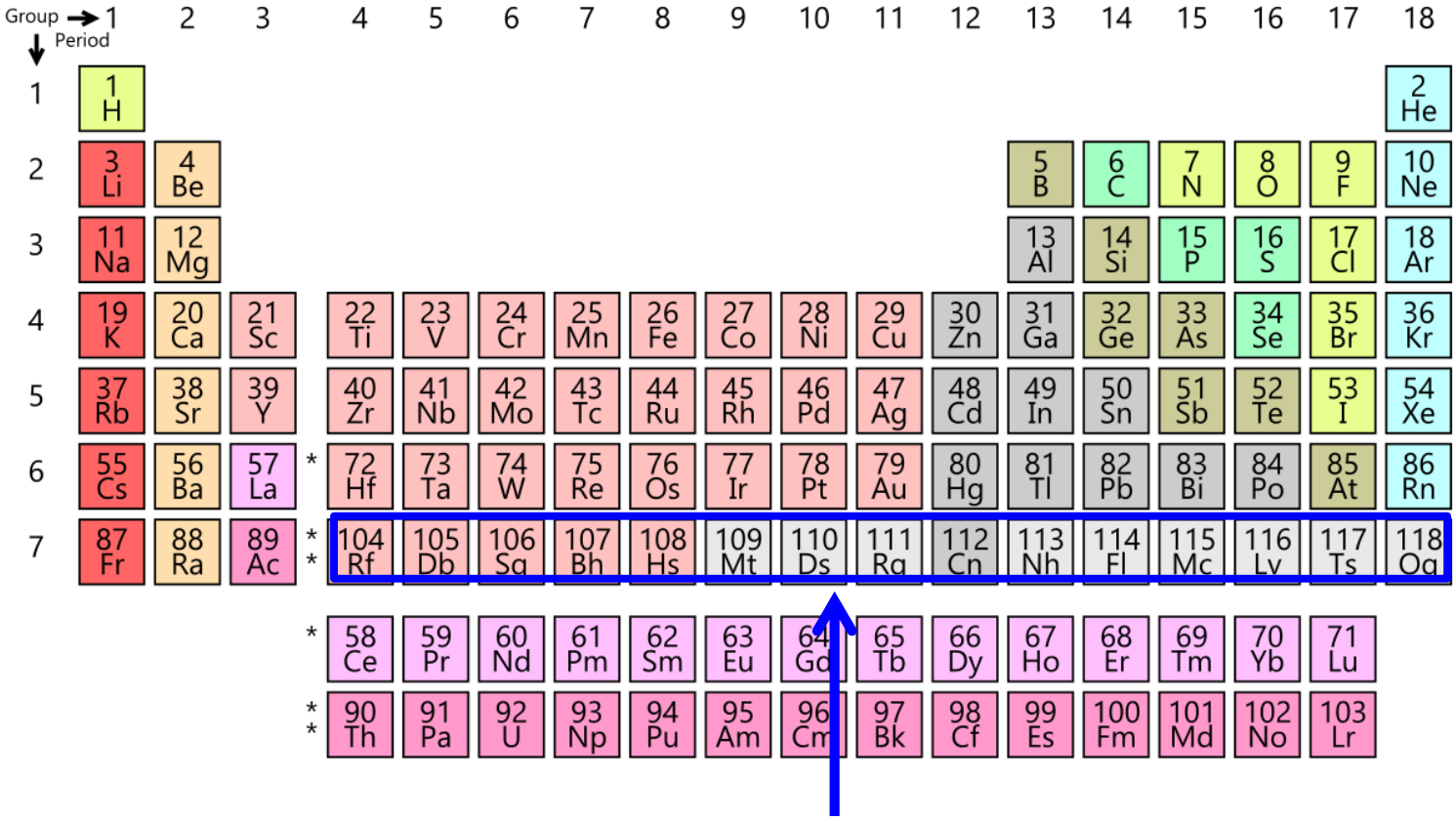
相対論的効果がなければ金の色は銀みたいだった!


相対論
非相対論
非相対論
相対論
3.7 eV
(335 nm)
2.4 eV
(516.5 nm)
銀（Ag）
金（Au）


可視光
3.7 eV
2.76 eV
2.4 eV
1.65 eV
吸収(金)
反射(金)
反射(銀)


相対論
非相対論
3.7 eV
光の
吸収なし
銀
非相対論
相対論
2.4 eV
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



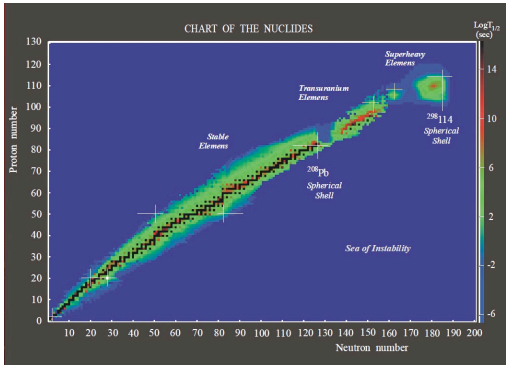
相対論的効果で超重元素の場所が
どのように変わるのか?

→ 未解決の謎

まとめ

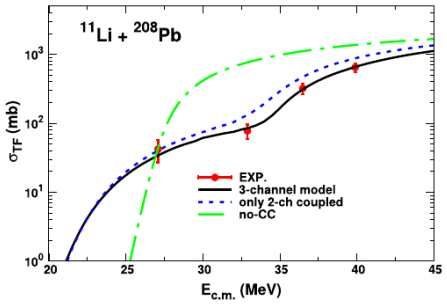
超重元素の物理

- 超重元素
- 安定の島
- 核分裂

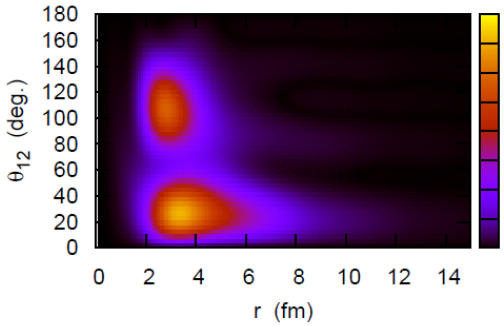


量子開放系の物理

中性子過剰核の反応



中性子過剰核の構造



超重元素 + 中性子過剰核 + 量子開放系 → 新しい研究の展開

おわりに：超重元素：強い電場の環境下での量子多体系

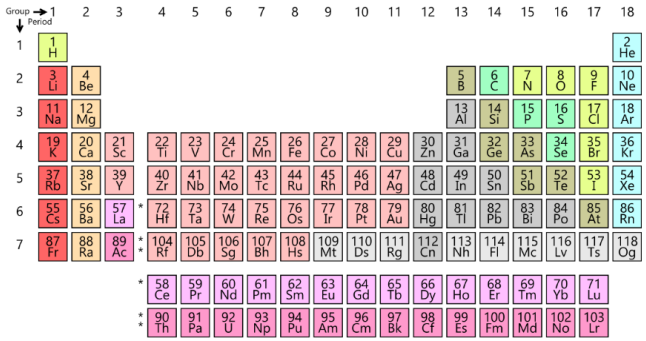
超重元素の物理

反応ダイナミックス

✓量子開放系の物理

✓中性子過剰核

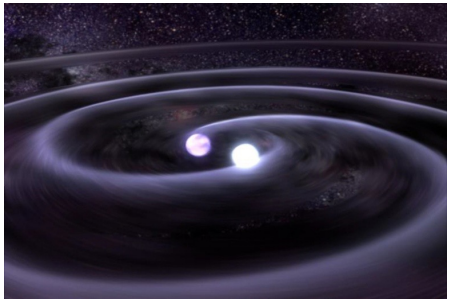
超重元素の化学や物性



✓ 超重元素と周期表

✓ 相対論的効果

宇宙物理



✓ 核物理（不安定核）

✓ 元素の起源

✓ 中性子星の中での核融合

✓ キロノバ

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