



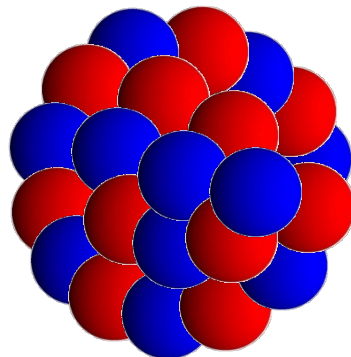
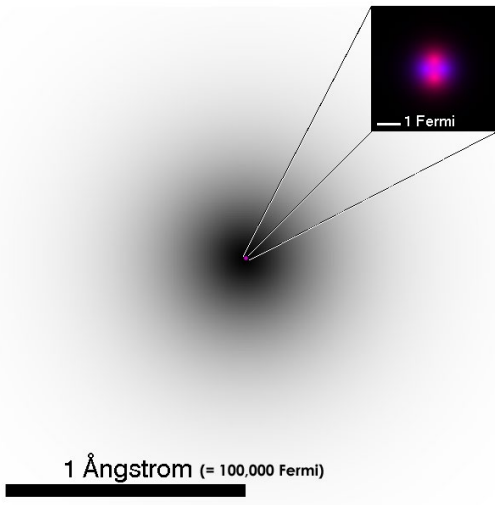
|             |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-------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

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

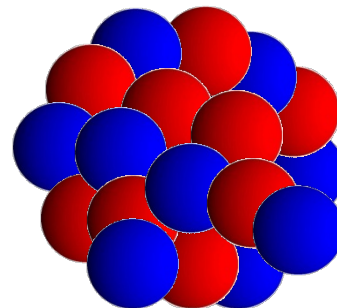
何がこの番号を決めているのか??

重い原子核 → 大きなクーロン反発

↓  
 $\alpha$  崩壊に対して不安定

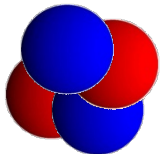


$(Z, N)$



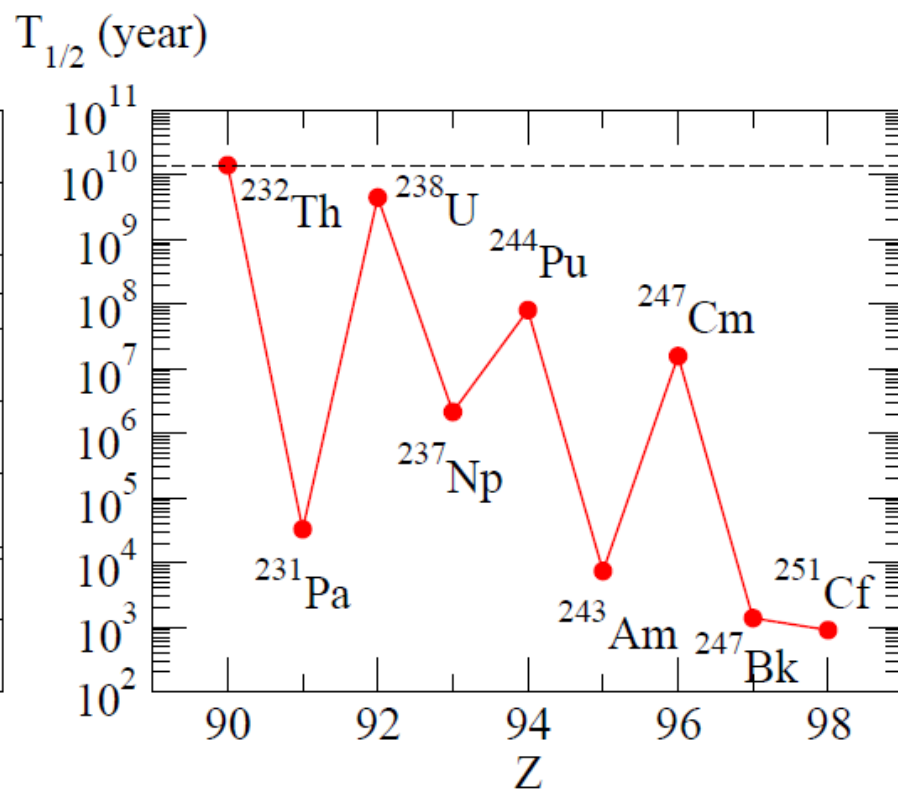
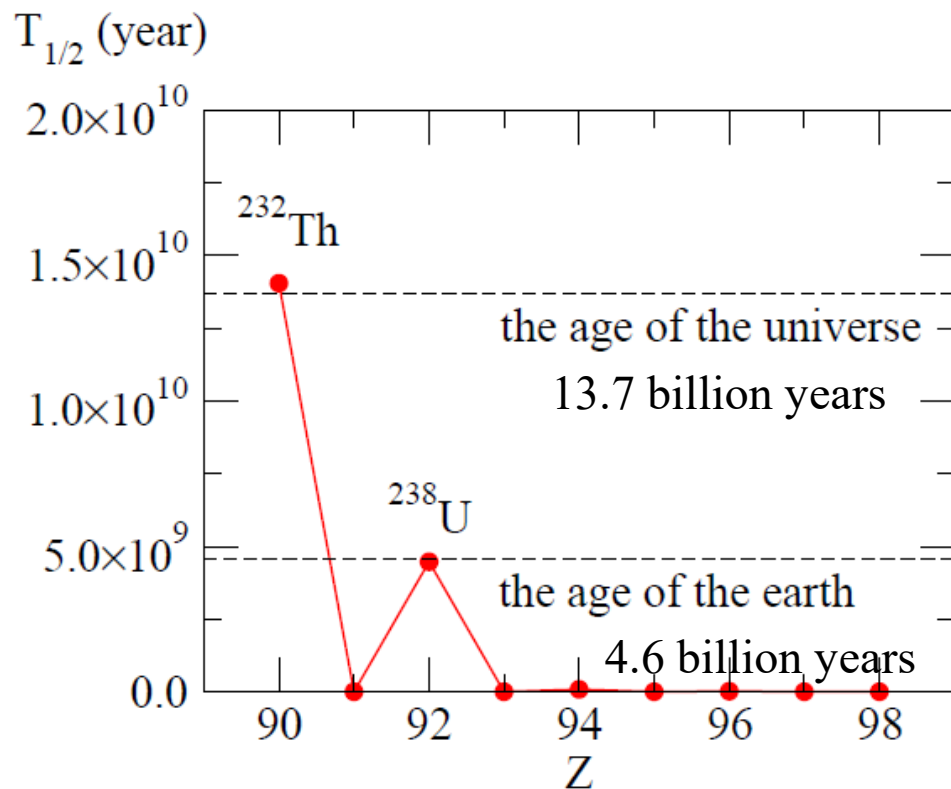
$(Z-2, N-2)$

+



$(Z=2, N=2)$

# 重い原子核の半減期



$^{232}\text{Th}$   $1.405 \times 10^{10}$  years

$^{238}\text{U}$   $4.468 \times 10^9$  years

$^{244}\text{Pu}$   $8.08 \times 10^7$  years

$^{247}\text{Cm}$   $1.56 \times 10^7$  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<br>H   |          |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           | 2<br>He   |           |
| 2        | 3<br>Li  | 4<br>Be  |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           | 5<br>B    | 6<br>C    | 7<br>N    | 8<br>O    | 9<br>F    | 10<br>Ne  |           |
| 3        | 11<br>Na | 12<br>Mg |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           | 13<br>Al  | 14<br>Si  | 15<br>P   | 16<br>S   | 17<br>Cl  | 18<br>Ar  |           |
| 4        | 19<br>K  | 20<br>Ca | 21<br>Sc | 22<br>Ti | 23<br>V   | 24<br>Cr  | 25<br>Mn  | 26<br>Fe  | 27<br>Co  | 28<br>Ni  | 29<br>Cu  | 30<br>Zn  | 31<br>Ga  | 32<br>Ge  | 33<br>As  | 34<br>Se  | 35<br>Br  | 36<br>Kr  |           |
| 5        | 37<br>Rb | 38<br>Sr | 39<br>Y  | 40<br>Zr | 41<br>Nb  | 42<br>Mo  | 43<br>Tc  | 44<br>Ru  | 45<br>Rh  | 46<br>Pd  | 47<br>Ag  | 48<br>Cd  | 49<br>In  | 50<br>Sn  | 51<br>Sb  | 52<br>Te  | 53<br>I   | 54<br>Xe  |           |
| 6        | 55<br>Cs | 56<br>Ba | 57<br>La | *        | 72<br>Hf  | 73<br>Ta  | 74<br>W   | 75<br>Re  | 76<br>Os  | 77<br>Ir  | 78<br>Pt  | 79<br>Au  | 80<br>Hg  | 81<br>Tl  | 82<br>Pb  | 83<br>Bi  | 84<br>Po  | 85<br>At  | 86<br>Rn  |
| 7        | 87<br>Fr | 88<br>Ra | 89<br>Ac |          | 104<br>Rf | 105<br>Db | 106<br>Sg | 107<br>Bh | 108<br>Hs | 109<br>Mt | 110<br>Ds | 111<br>Rg | 112<br>Cn | 113<br>Nh | 114<br>Fl | 115<br>Mc | 116<br>Lv | 117<br>Ts | 118<br>Og |
|          |          |          |          | *        | 58<br>Ce  | 59<br>Pr  | 60<br>Nd  | 61<br>Pm  | 62<br>Sm  | 63<br>Eu  | 64<br>Gd  | 65<br>Tb  | 66<br>Dy  | 67<br>Ho  | 68<br>Er  | 69<br>Tm  | 70<br>Yb  | 71<br>Lu  |           |
|          |          |          |          | *        | 90<br>Th  | 91<br>Pa  | 92<br>U   | 93<br>Np  | 94<br>Pu  | 95<br>Am  | 96<br>Cm  | 97<br>Bk  | 98<br>Cf  | 99<br>Es  | 100<br>Fm | 101<br>Md | 102<br>No | 103<br>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

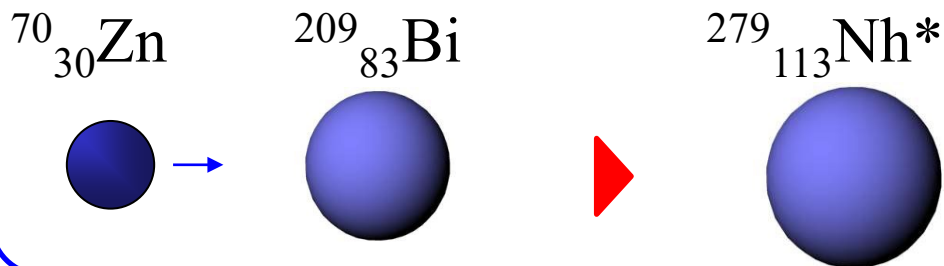
113番元素: ニホニウムNh

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

2016年11月



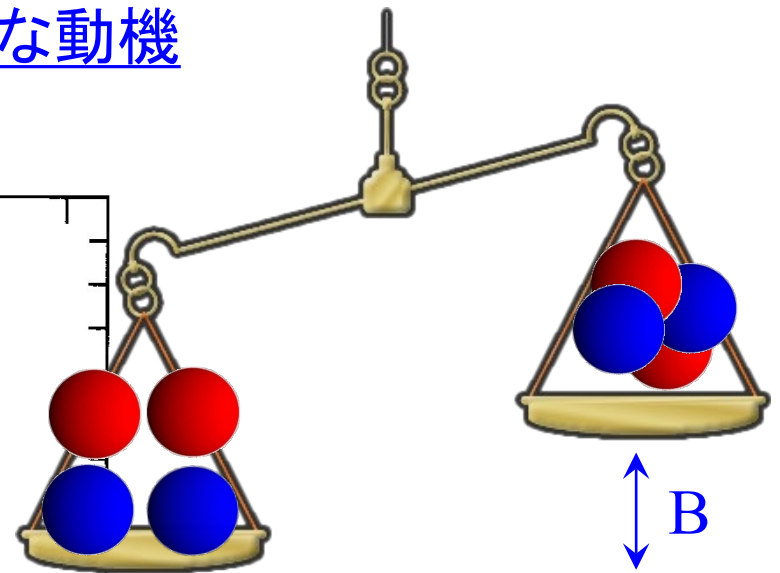
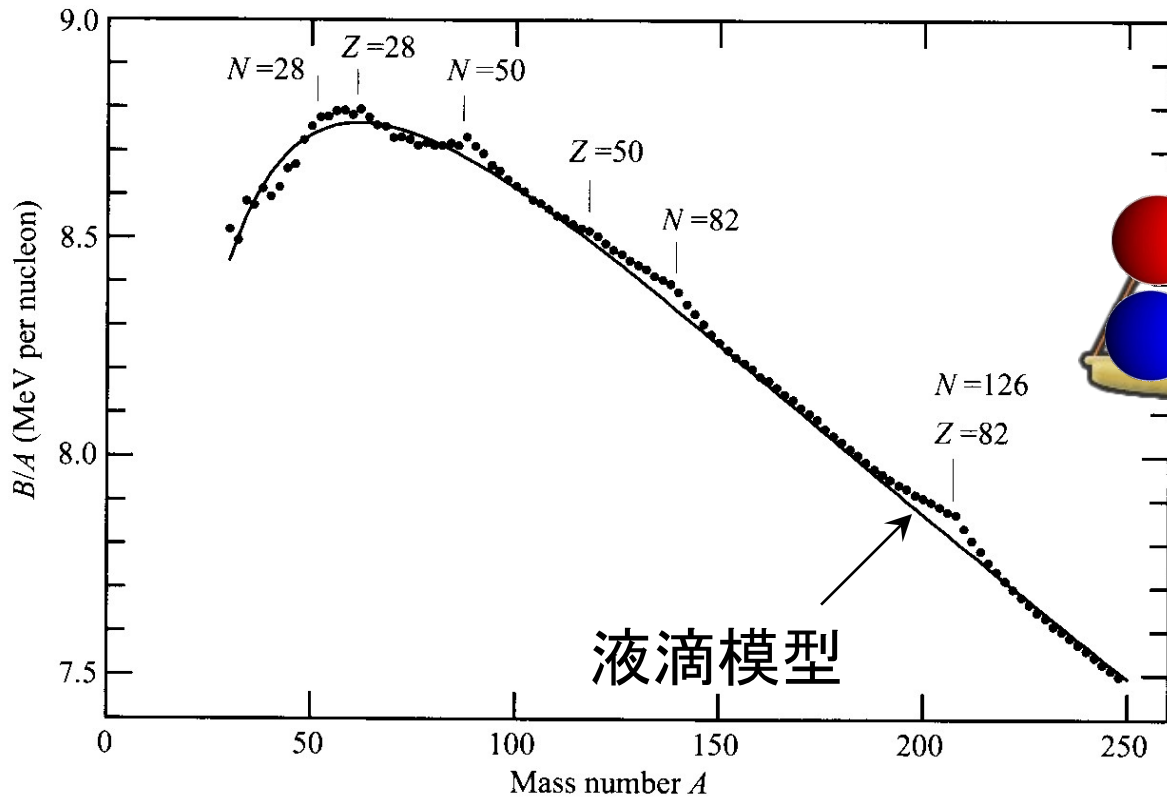
| Group | 1     | 2     | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     | 15     | 16     | 17     | 18     |
|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 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

# 安定の島の予言: 超重元素探索の重要な動機

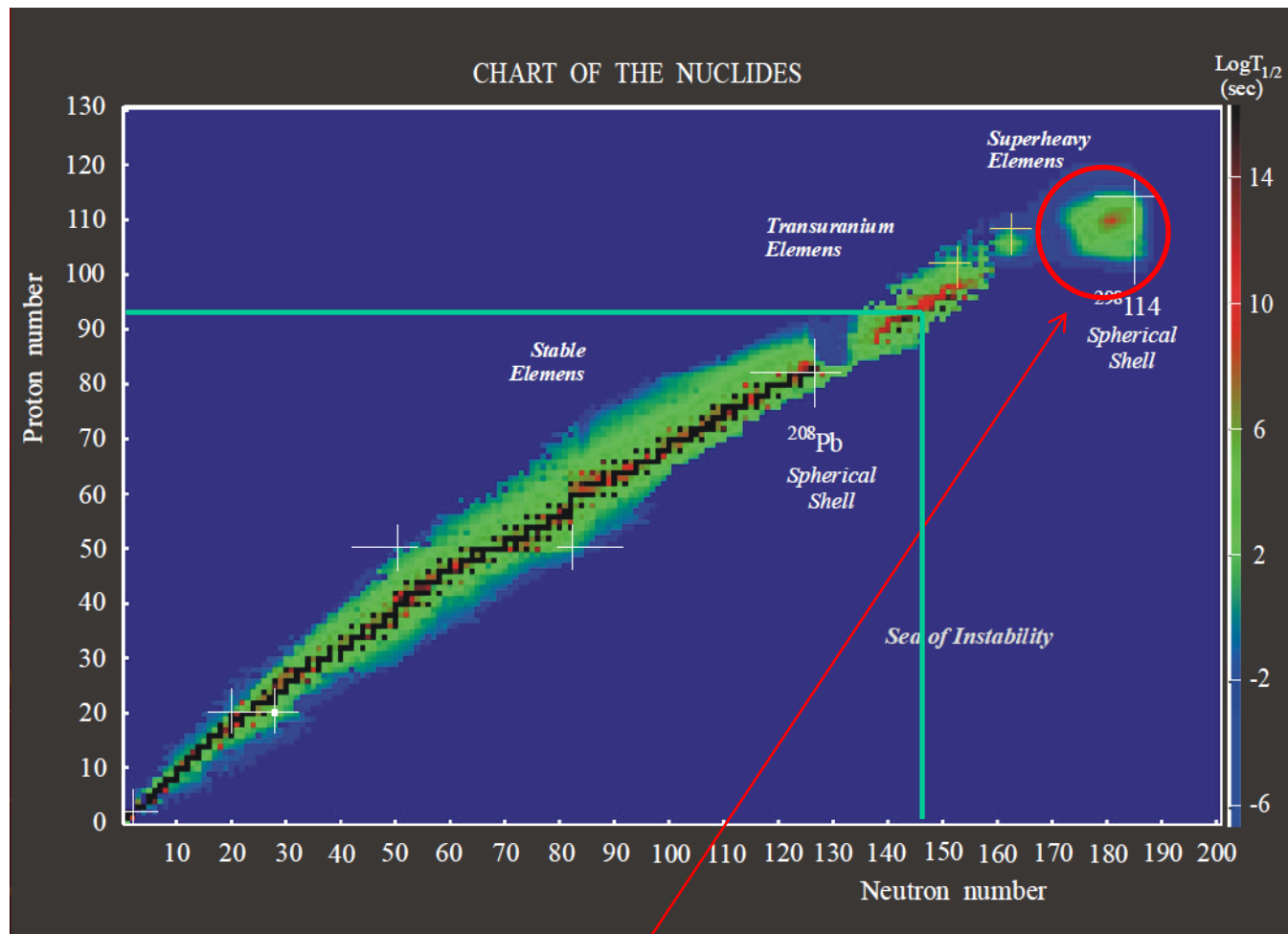


$N$  or  $Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$  で束縛が大(魔法数)

${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$ : 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

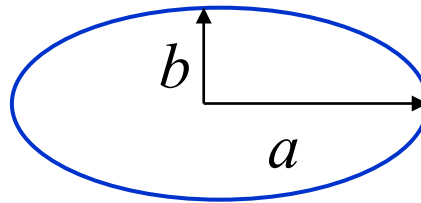
W.D. Myers and W.J. Swiatecki (1966), A. Sobiczewski et al. (1966)

## 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

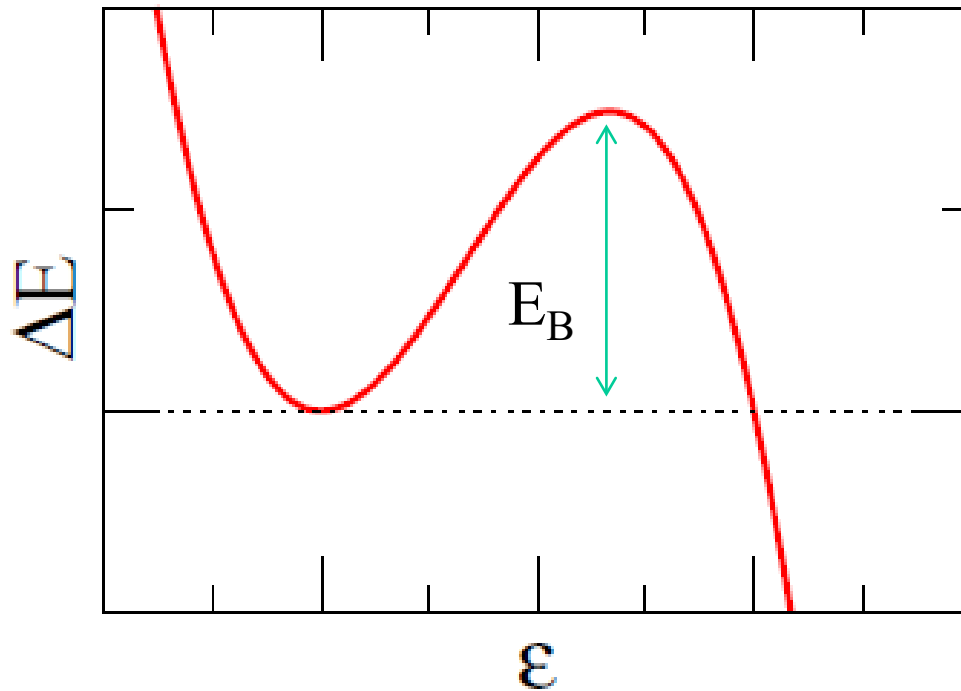
{ 表面項 → 球形になる傾向  
クーロン項 → 変形になる傾向 } → 2つの力の競合



(復習)

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

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



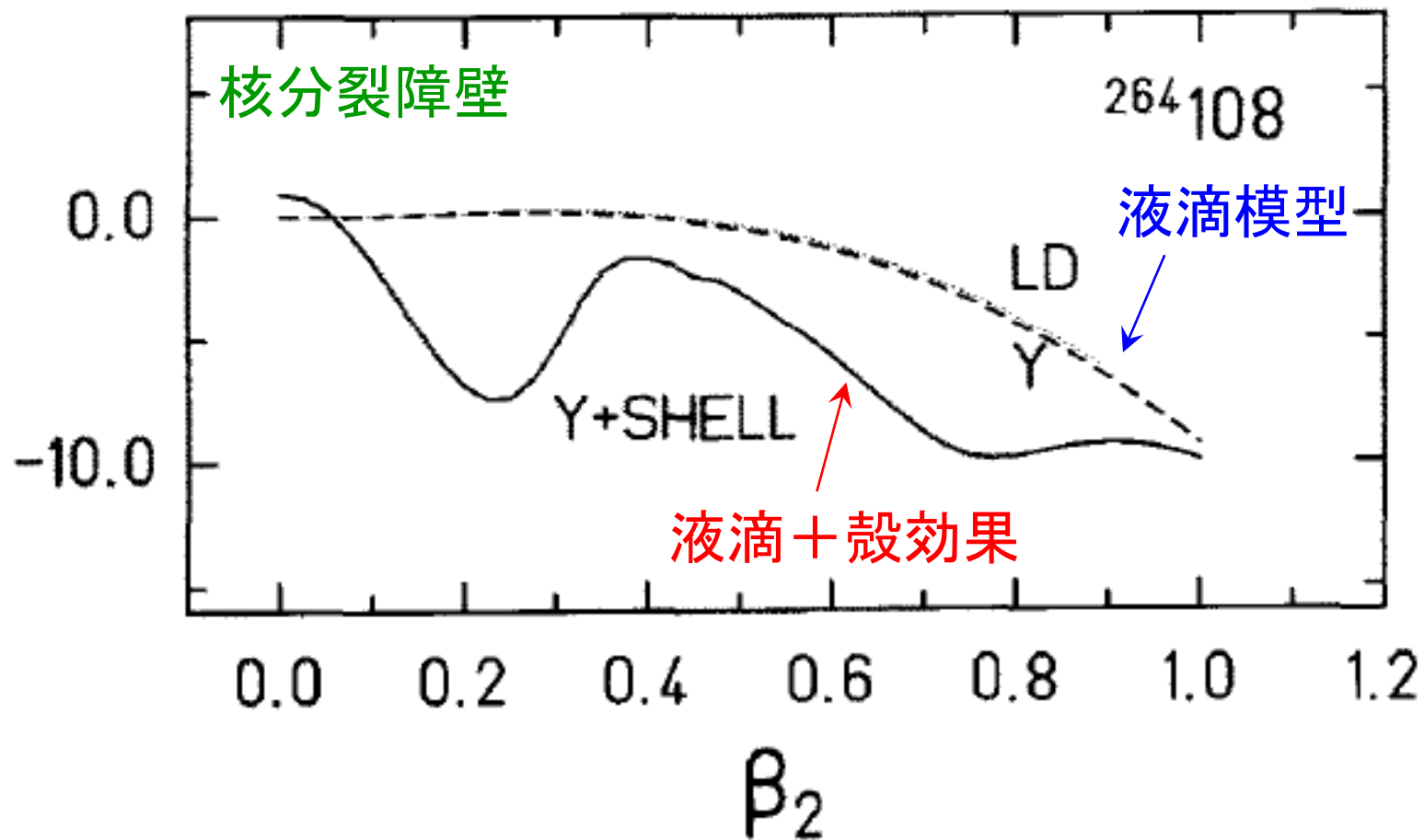
重い核:  $x \sim 1$

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

重い核ほど障壁は低くなる

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

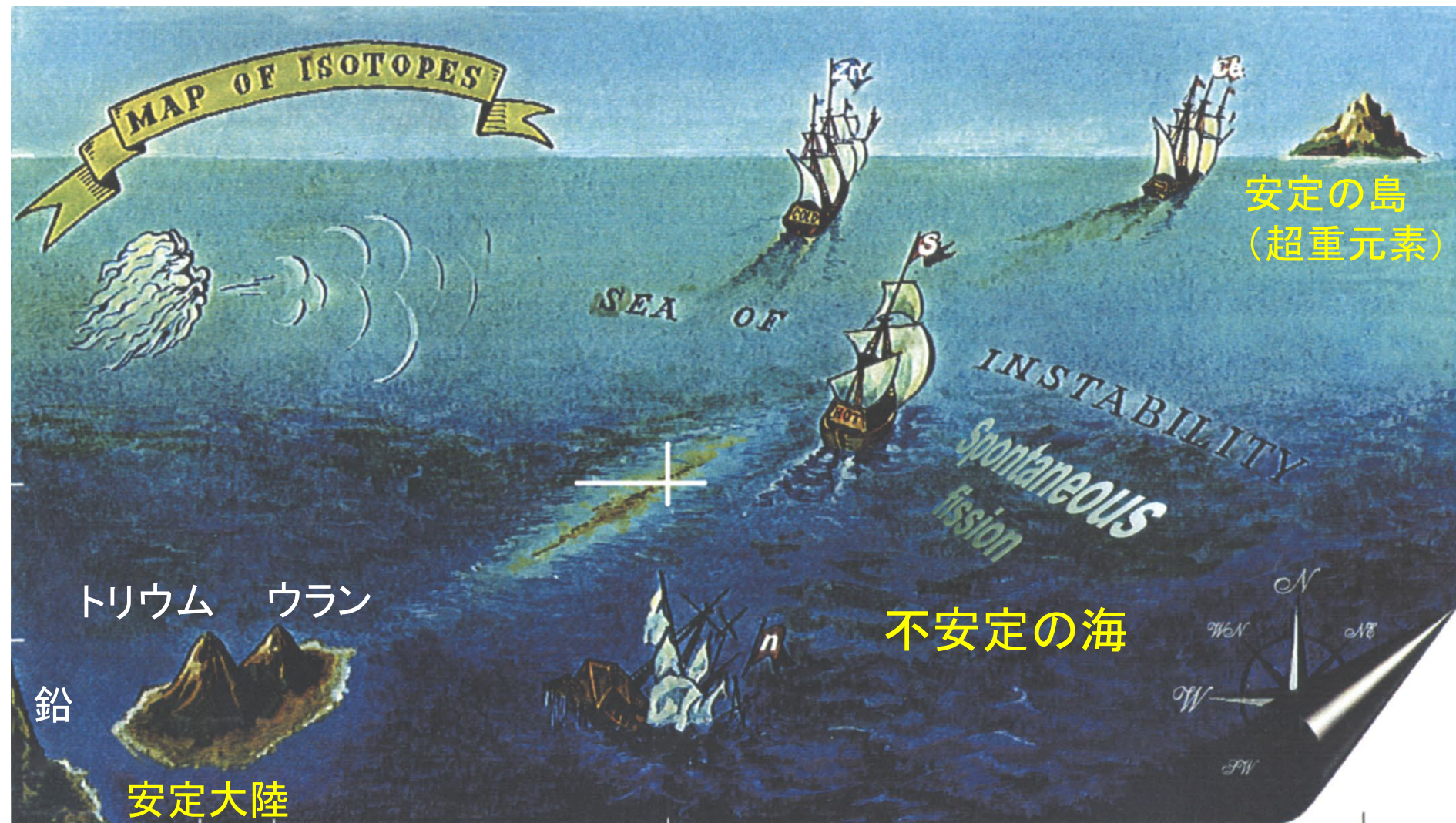
重い核ほど障壁での変形度は小さくなる



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



118

Og  
oganeson

Yuri Oganessian

# who is she?

7

|    |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 87 | 88 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 |
| Fr | Ra | Rf  | Db  | Sg  | Bh  | Hs  | Mt  | Ds  | Rg  | Cn  | Uut | Fl  | Uup | Lv  | Uus | Uuo |

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

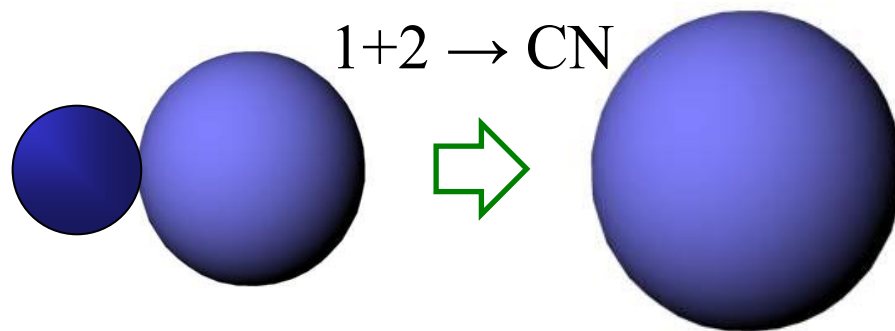
|                                |                               |
|--------------------------------|-------------------------------|
| 113<br><b>Nh</b><br>nihonium   | 115<br><b>Mc</b><br>moscovium |
| 117<br><b>Ts</b><br>tennessine | 118<br><b>Og</b><br>oganeson  |

**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   |

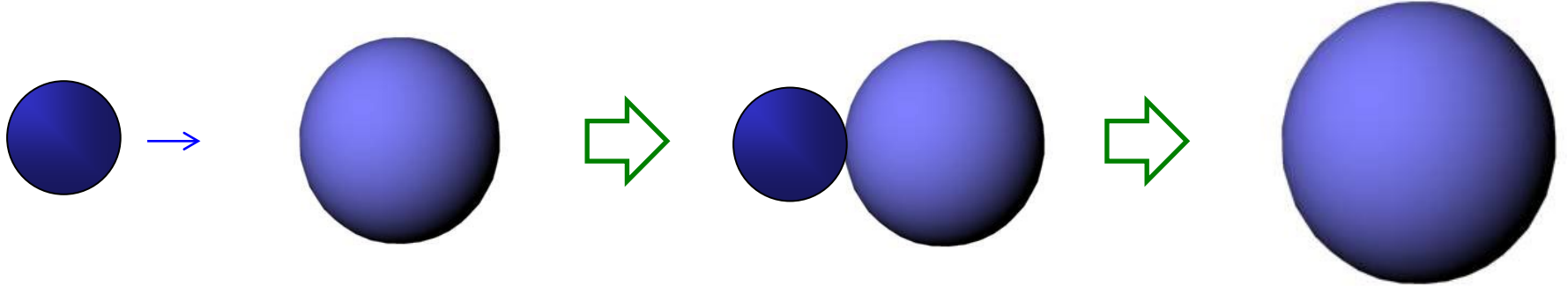
熱い複合核

冷たい複合核

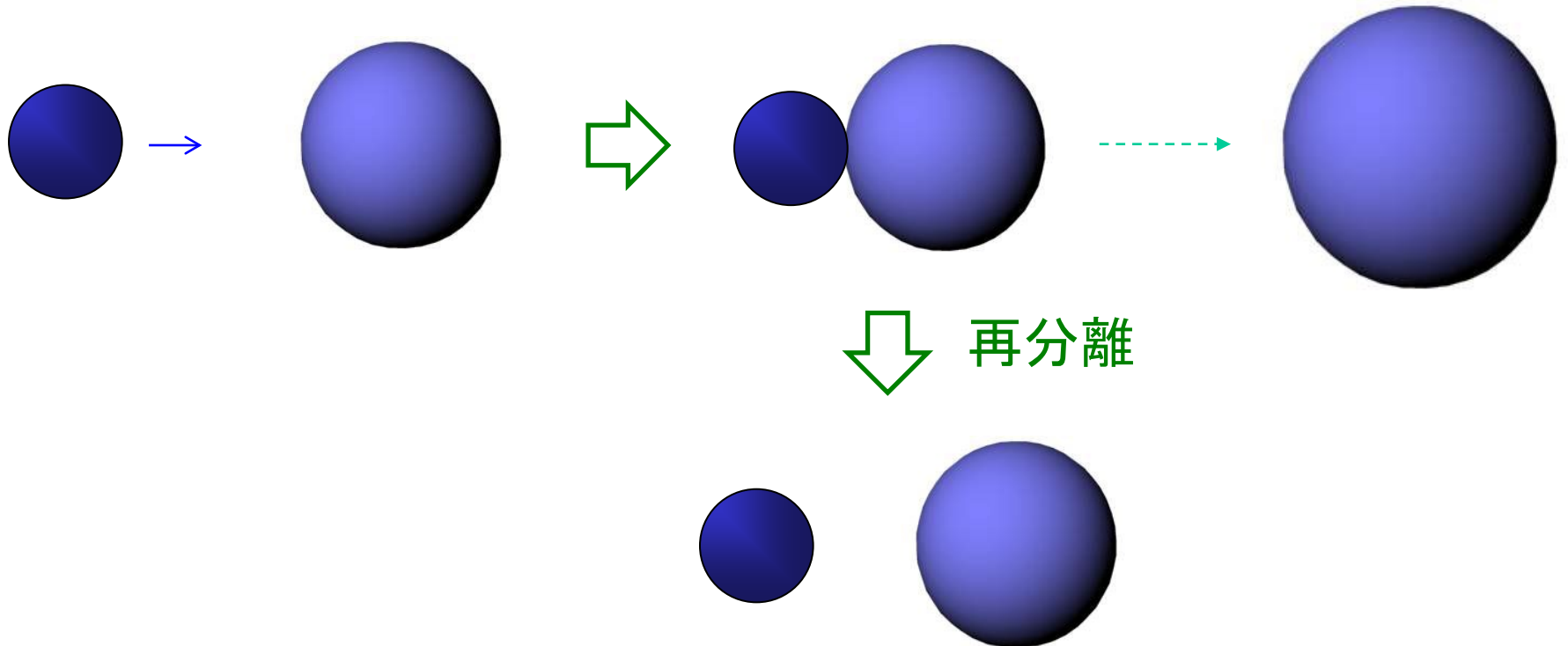
# どうやって超重核を作る?

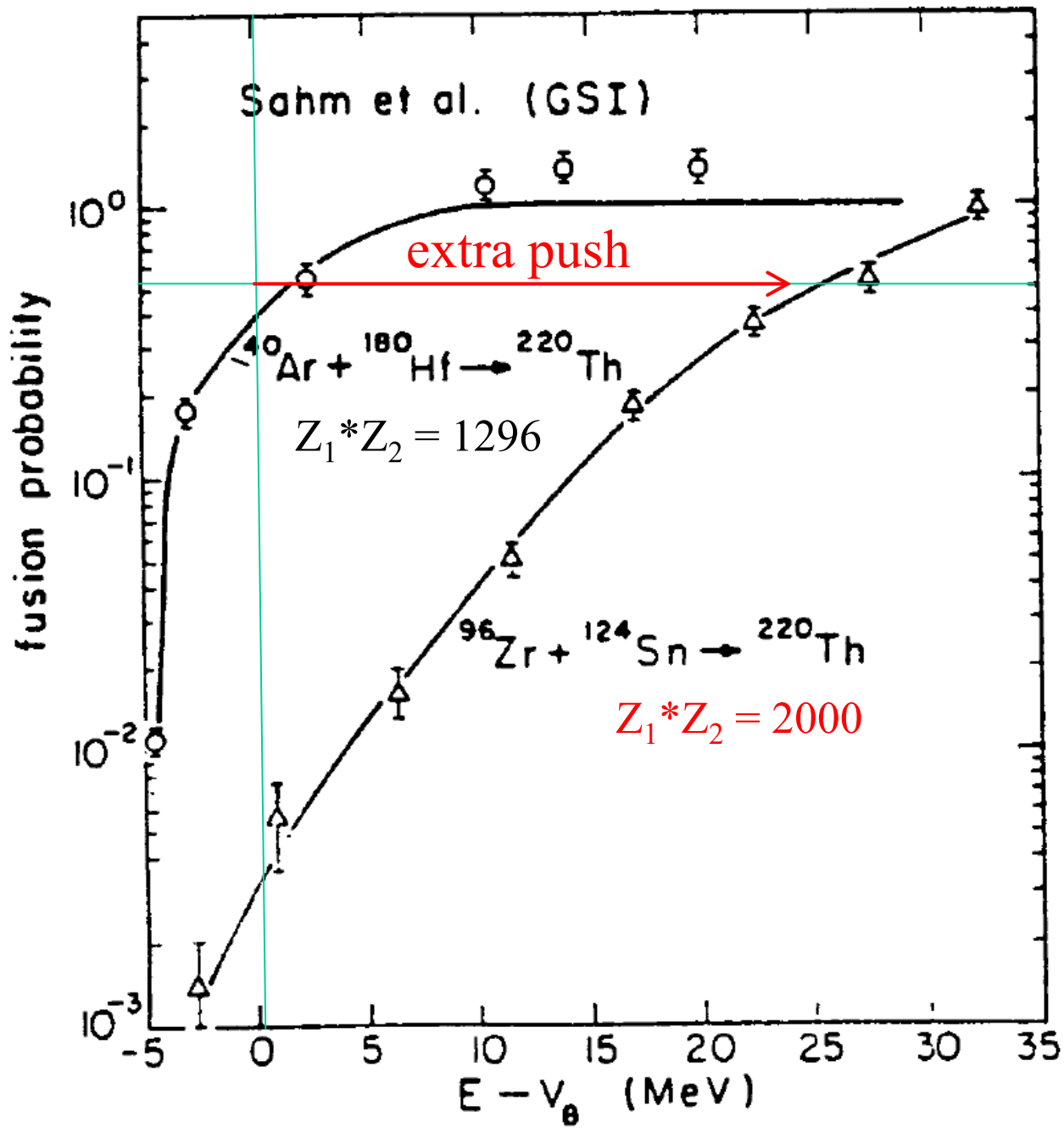
## 核融合反応

➤ 中重核の核融合反応:



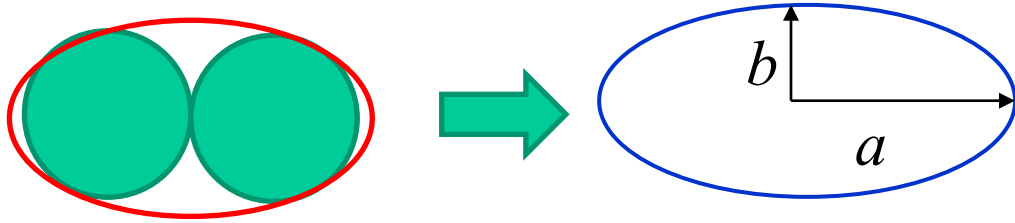
➤ 重核や超重核の核融合反応:





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

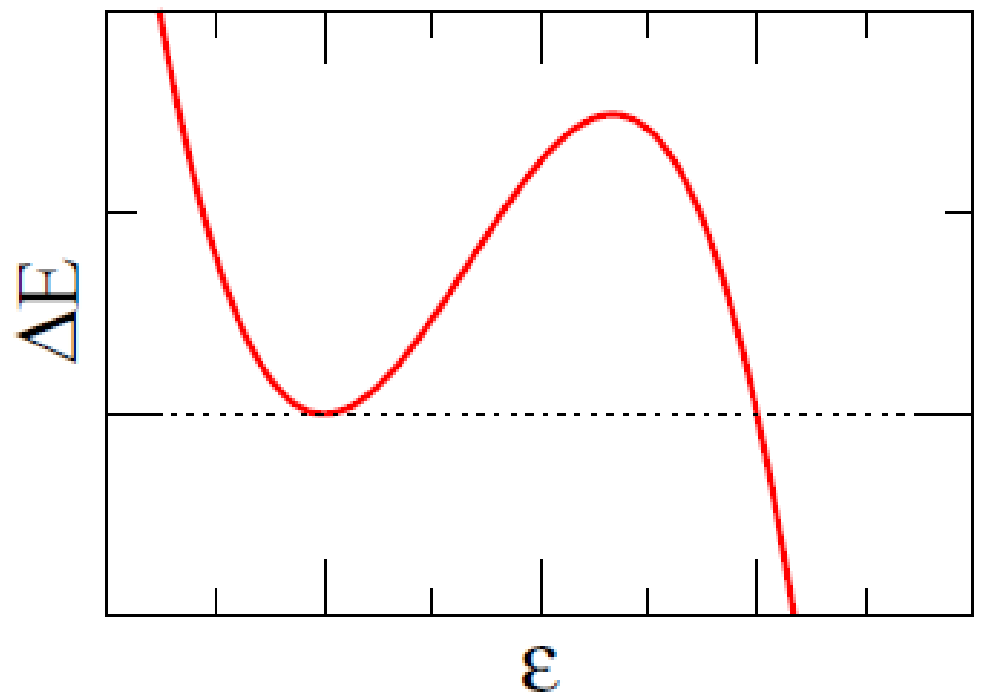
同じ原子核が接触すると:



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

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

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

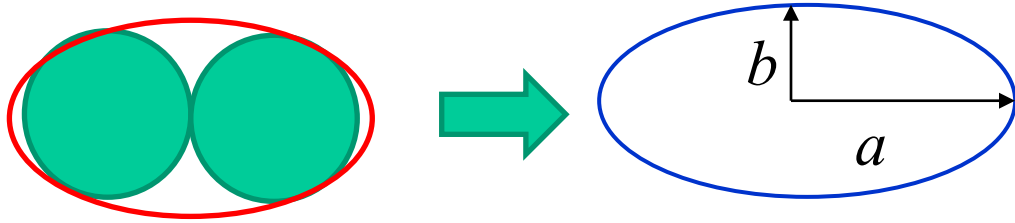


$$x \equiv \frac{E_C^{(0)}}{2E_S^{(0)}} = \frac{a_C}{2a_S} \cdot \frac{Z^2}{A} \sim \frac{1}{53.3} \cdot \frac{Z^2}{A}$$

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



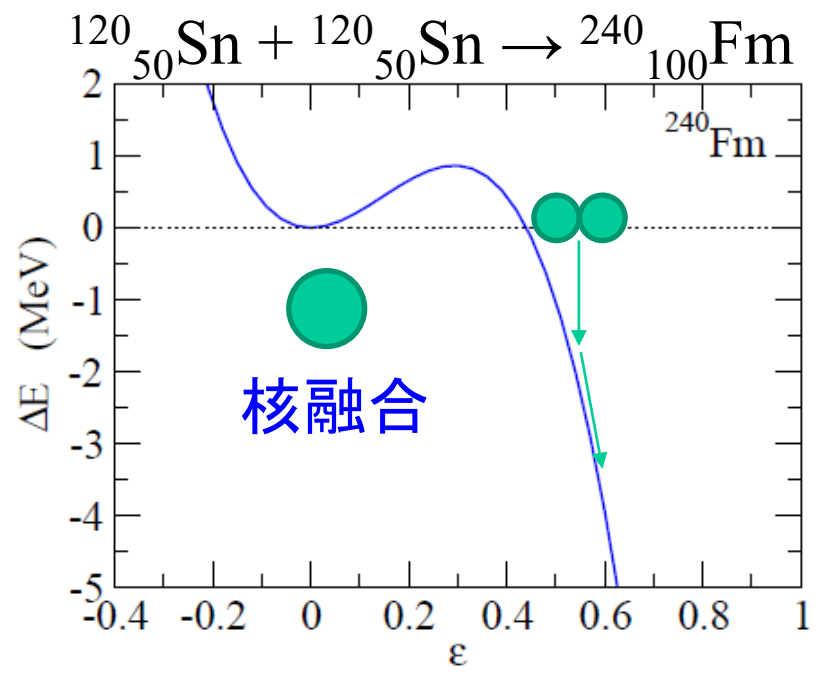
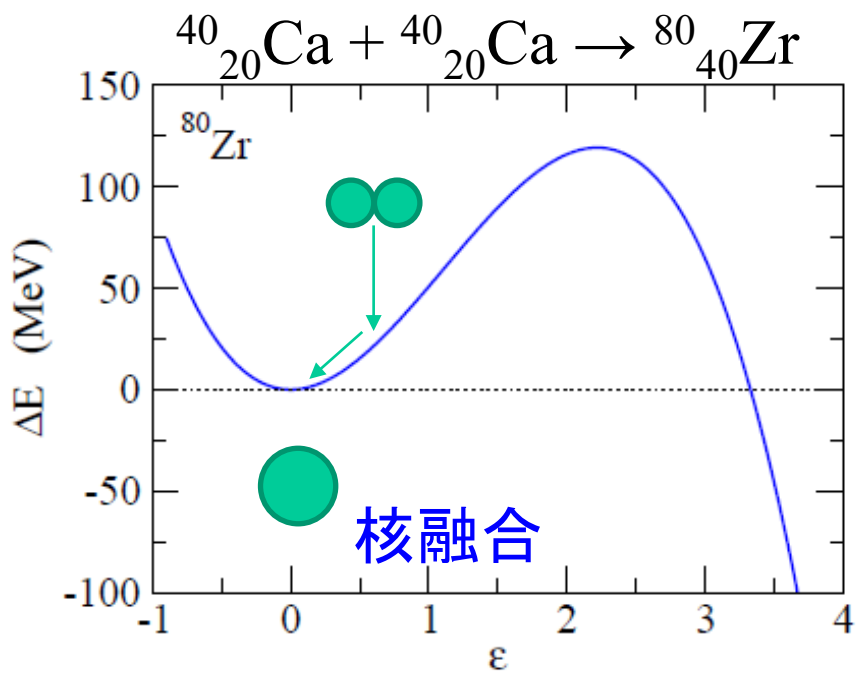
同じ原子核が接触すると:

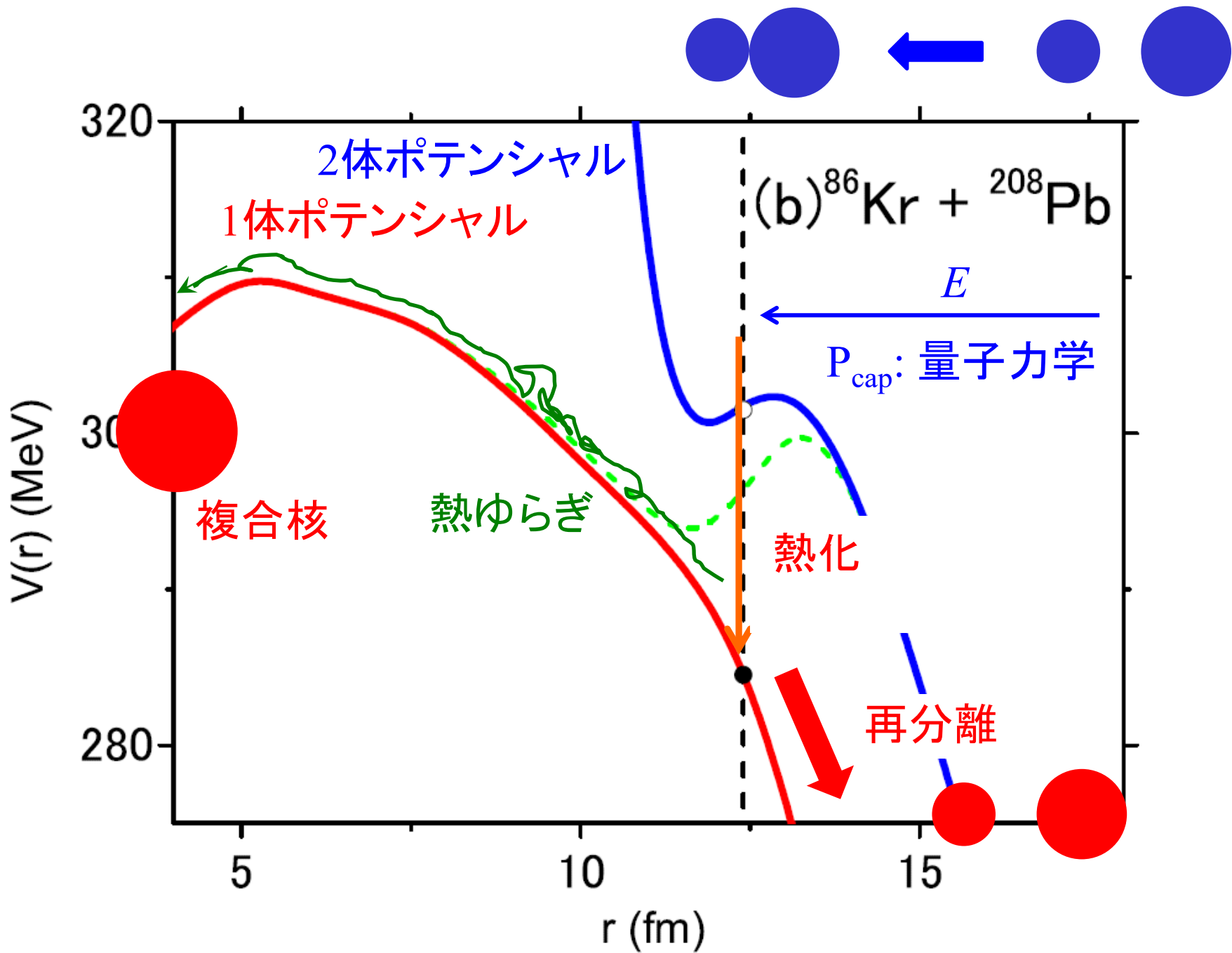


$$a = R_0 \cdot (1 + \epsilon)$$

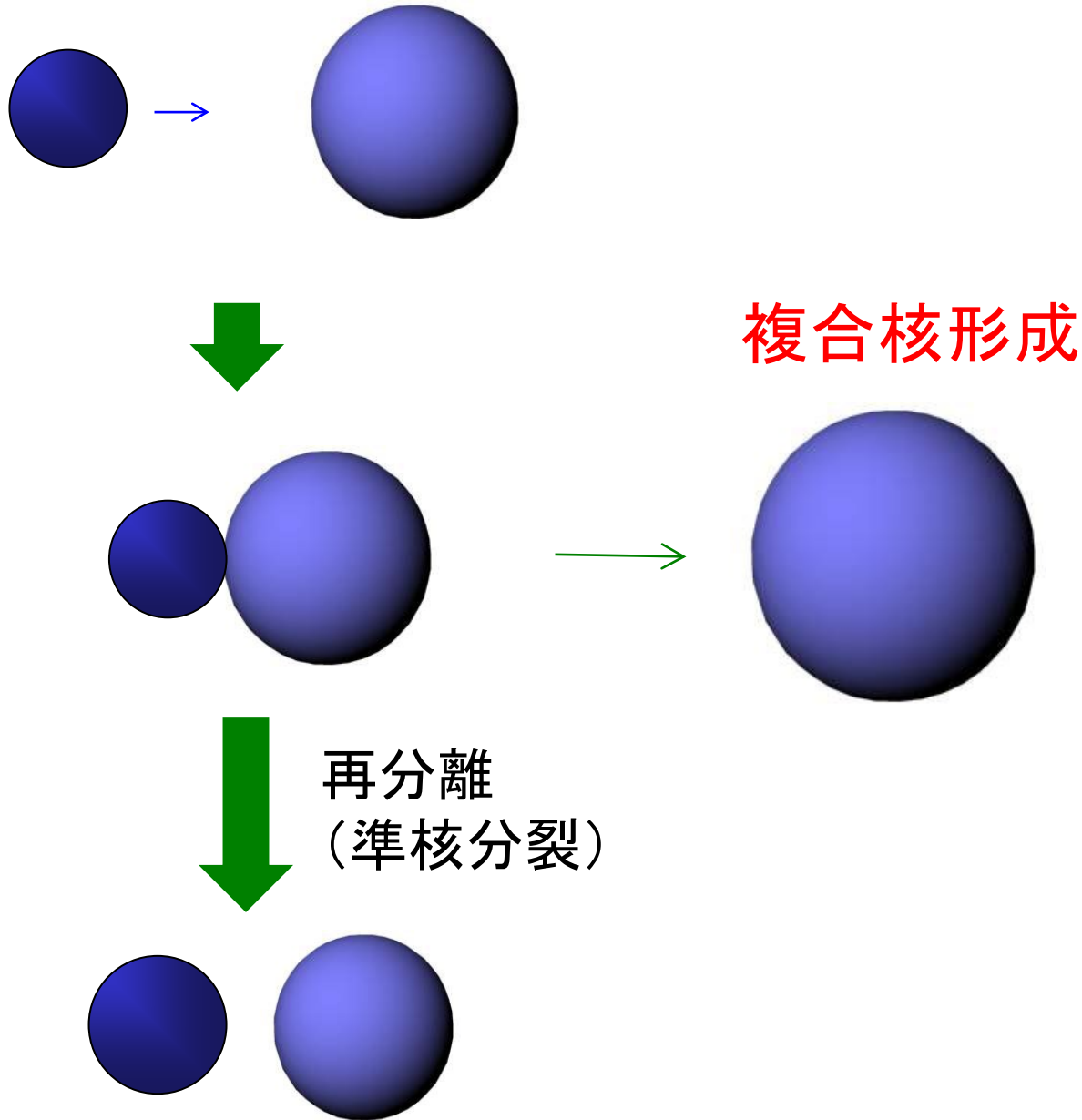
$$b = R_0 \cdot (1 + \epsilon)^{-1/2}$$

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

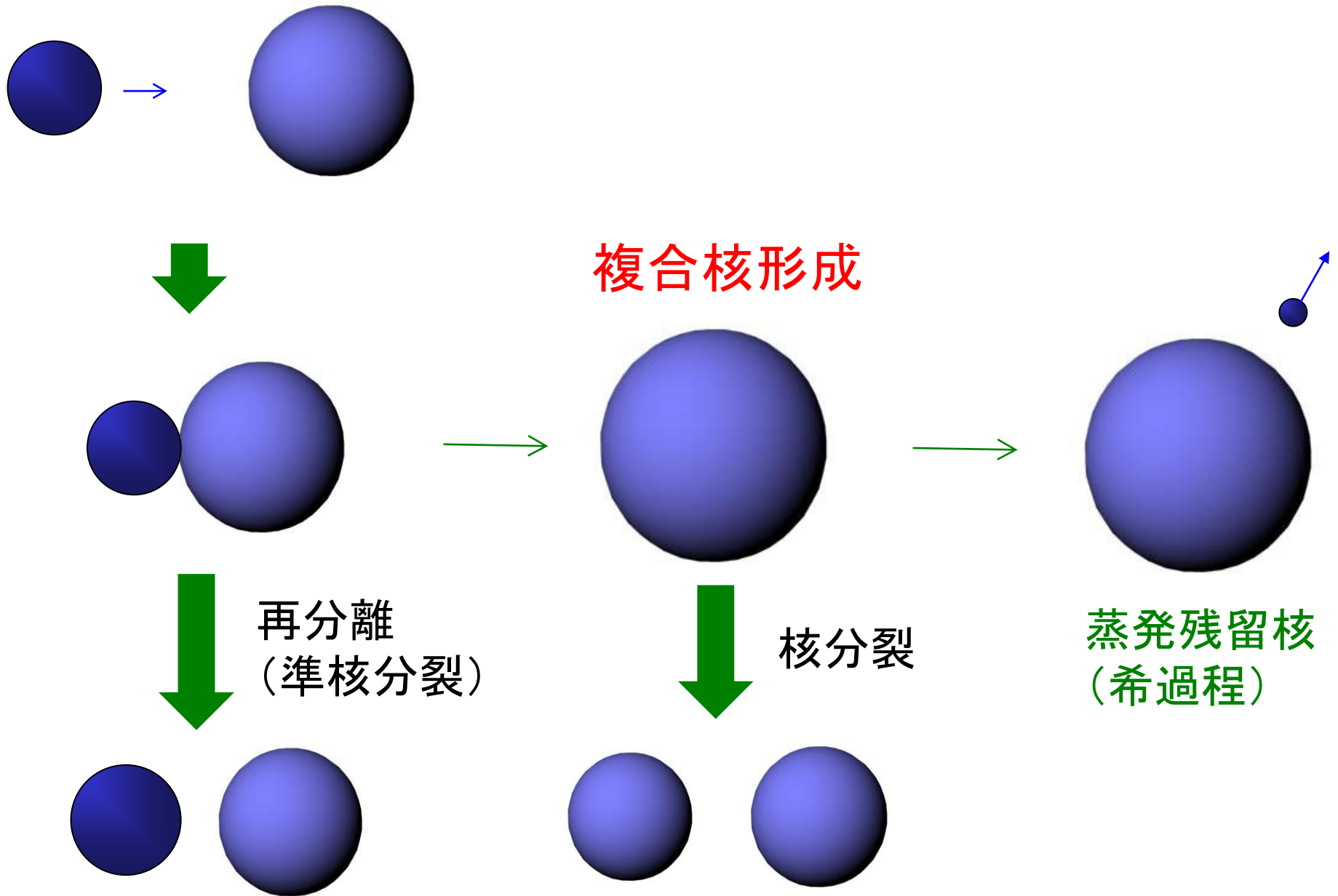




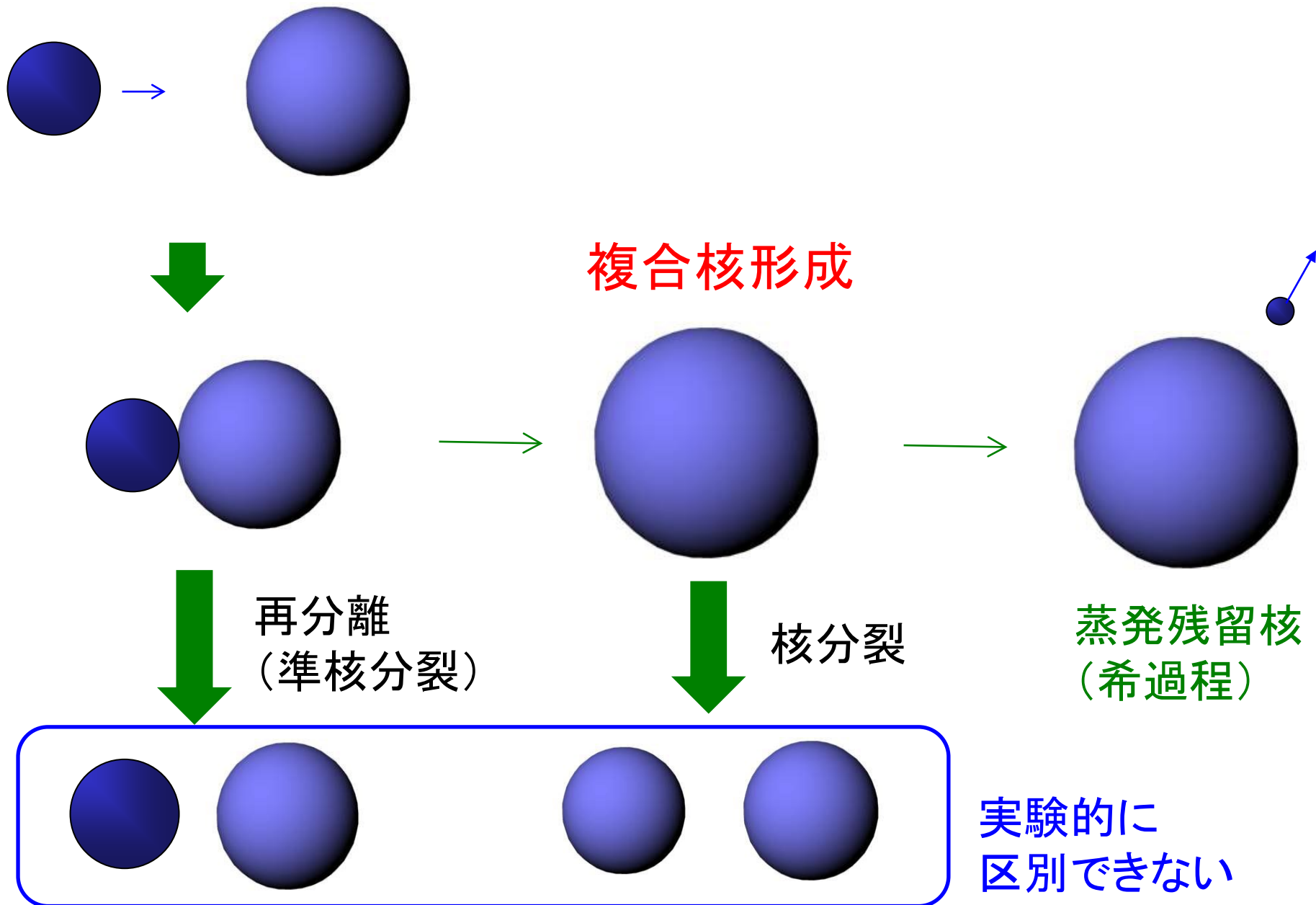
# 超重元素領域における重イオン核融合反応



# 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

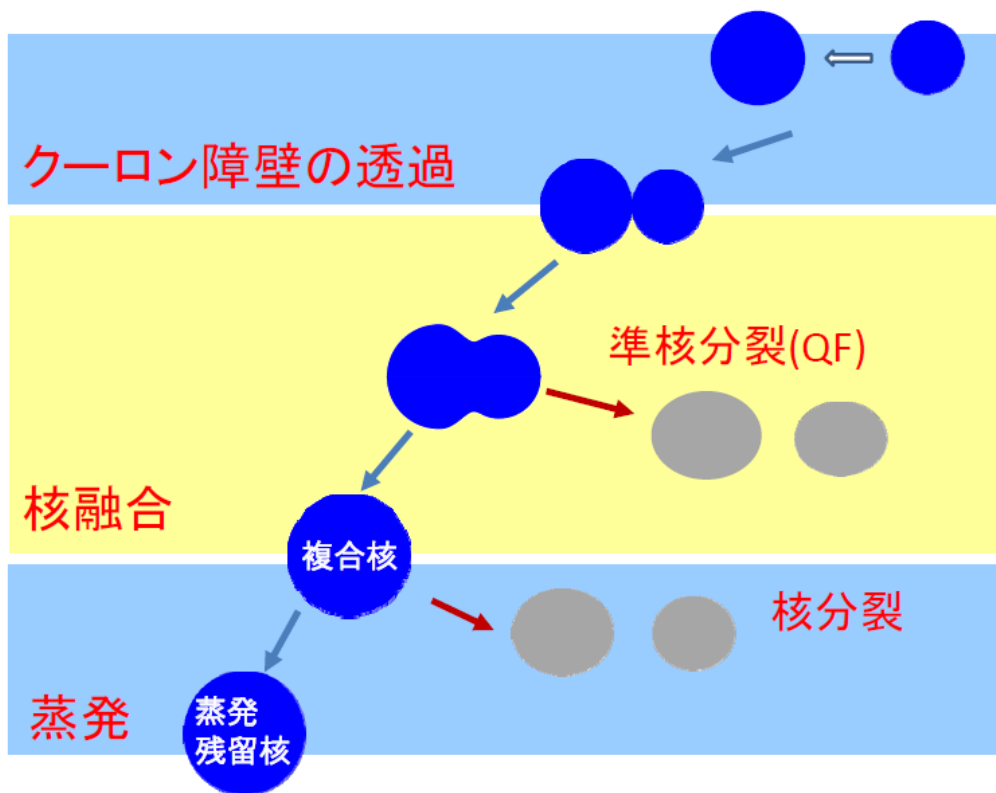


## \* どのように核融合反応断面積を測定するのか?

### ➤ 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:



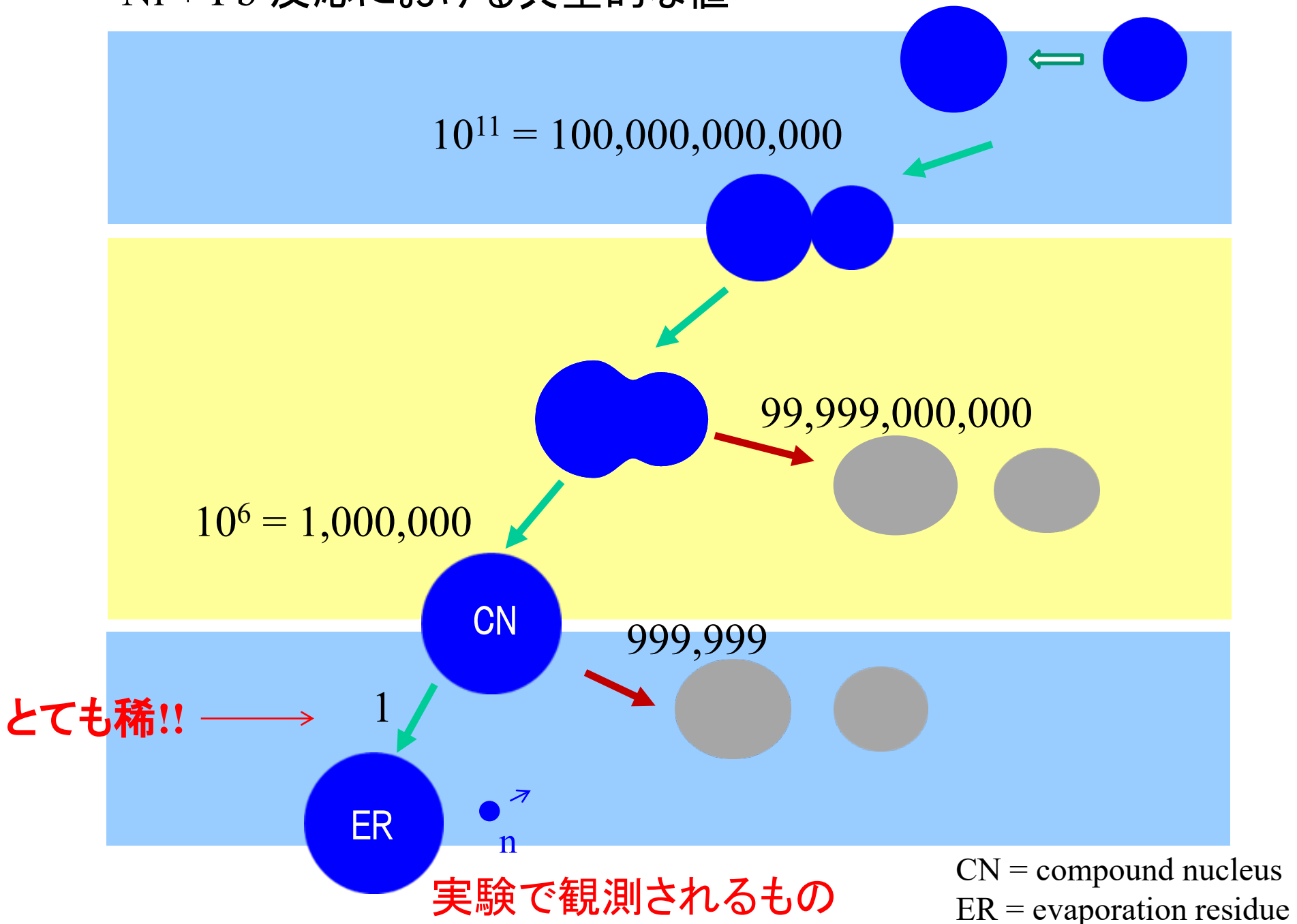
準核分裂 + 生き残りの2重苦

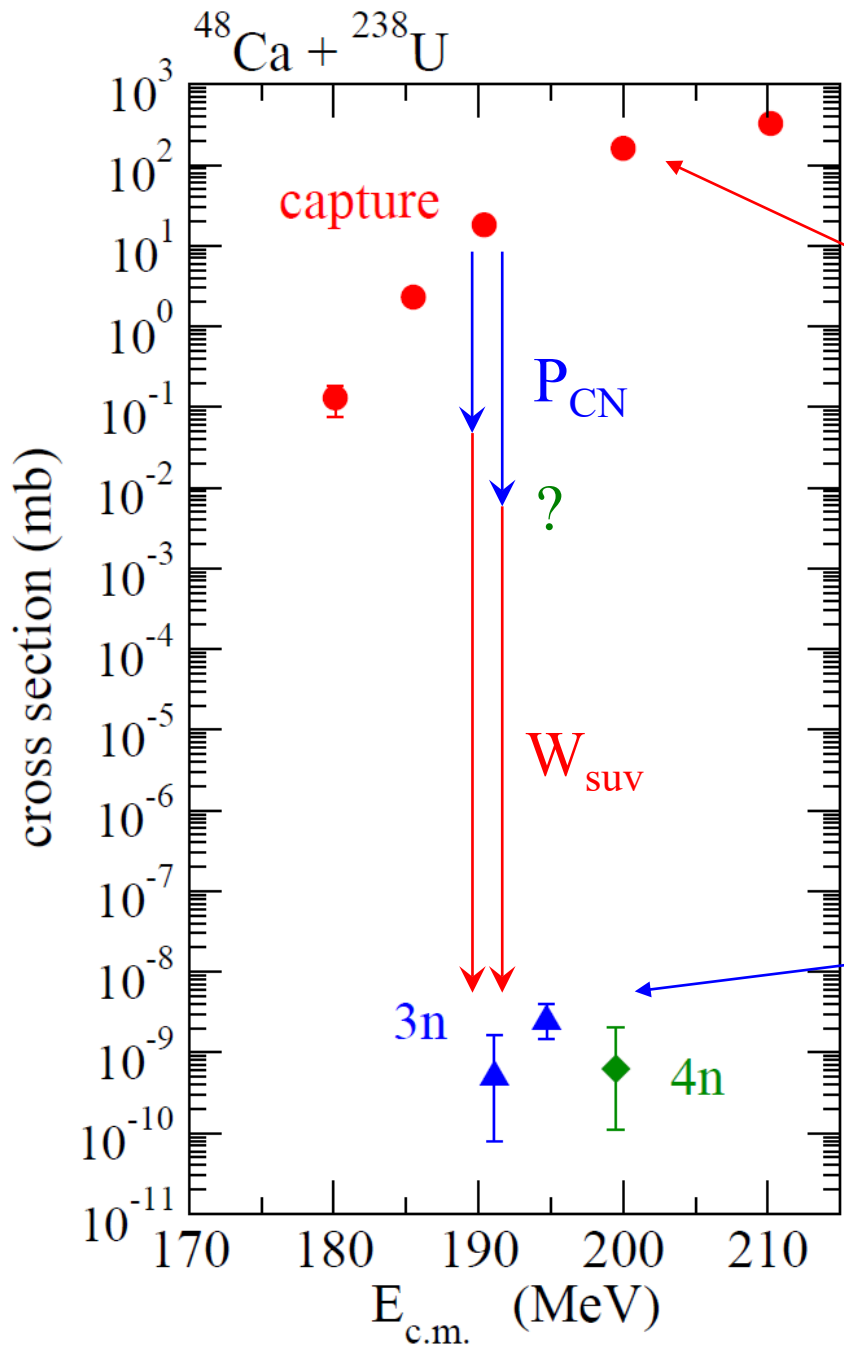
大きな準核分裂の確率のため、核分裂片の測定は複合核形成を意味しない (QFとFFの区別は実験的に困難)

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





no experimental data for  $P_{\text{CN}}$

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

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

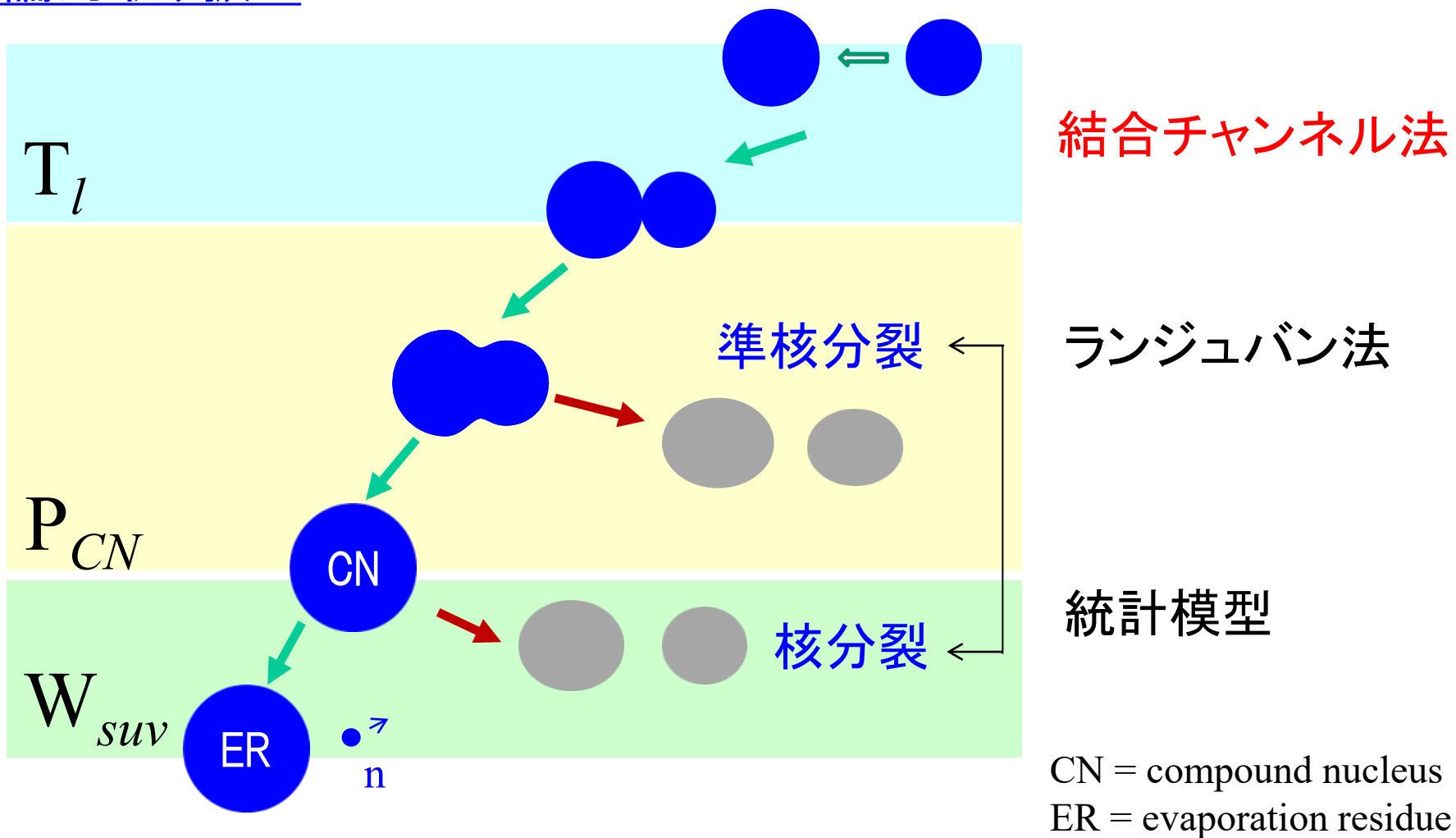
not available

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

large uncertainties

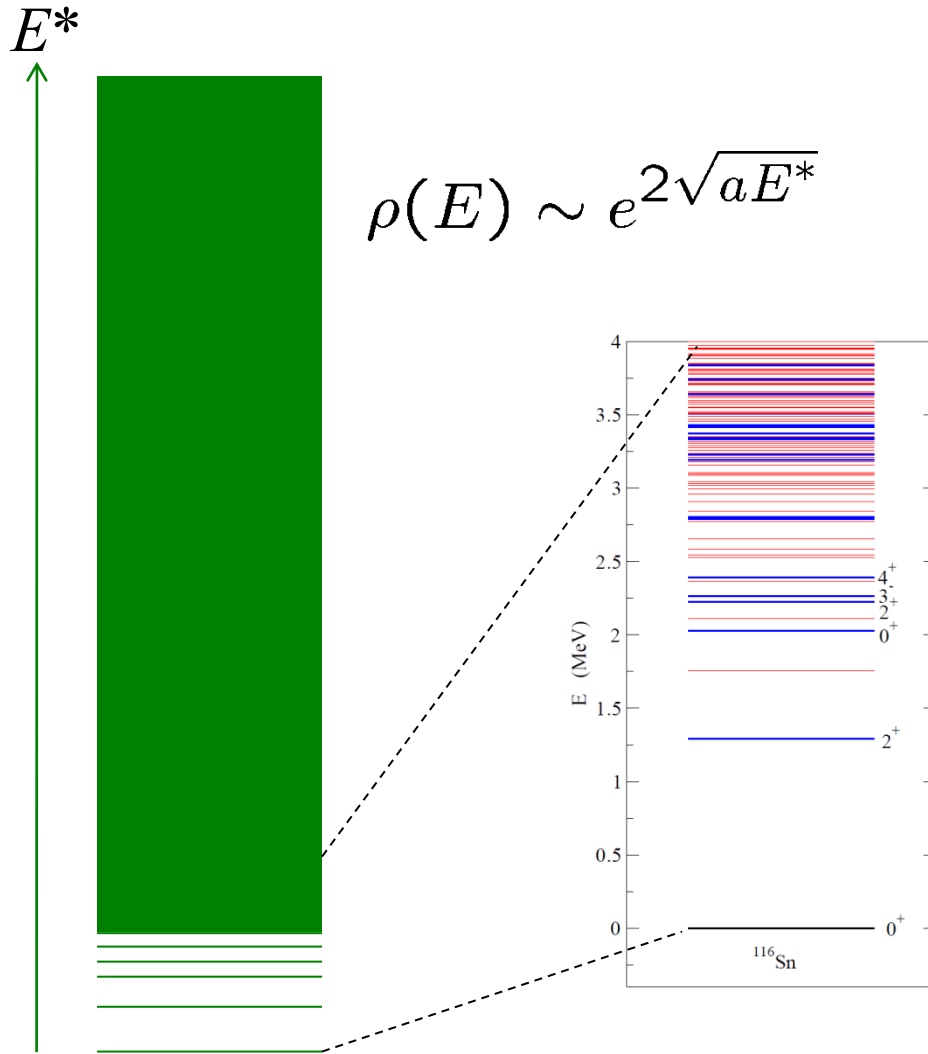


# 理論的取り扱い

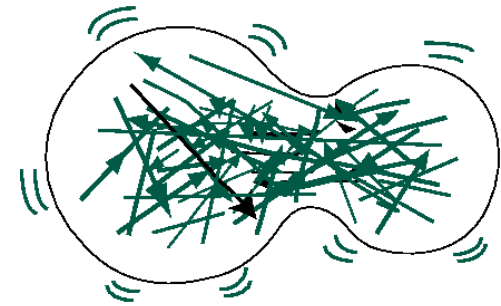


$$\sigma_{ER}(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1) T_l(E) P_{CN}(E, l) W_{suv}(E^*, l)$$

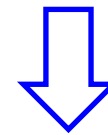
# 重イオン核融合反応と量子開放系



原子核のスペクトル



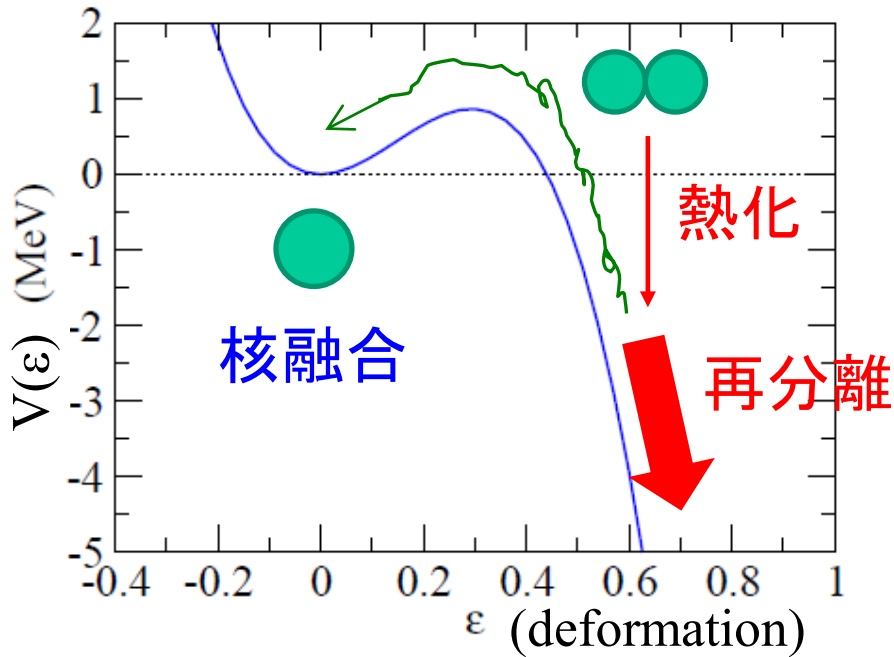
核反応の途中で複雑に励起



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

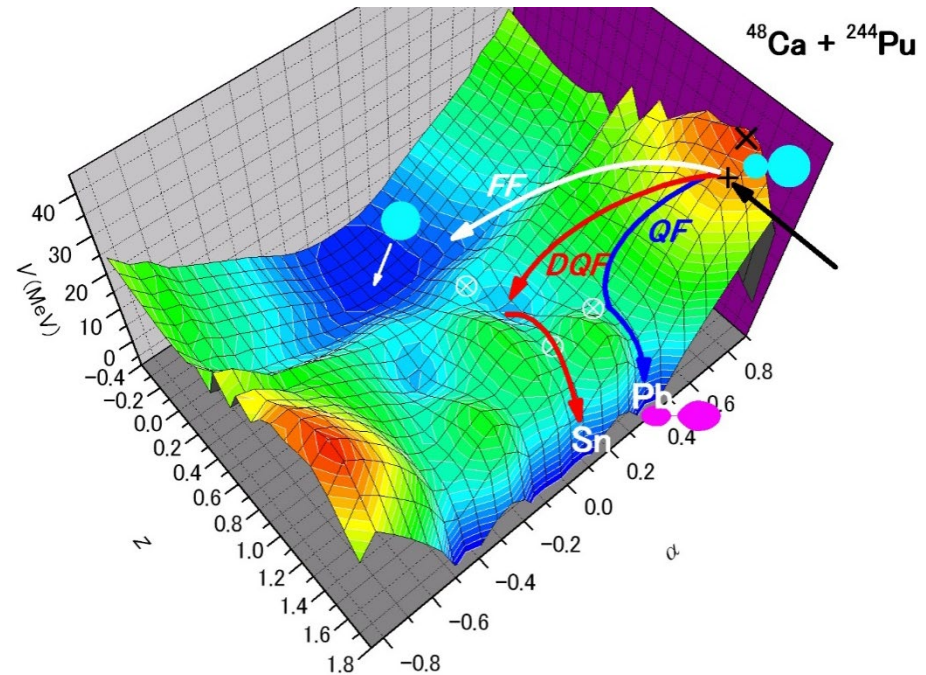
→ ランジュバン法  
(ブラウン運動)

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

$\gamma$ : 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

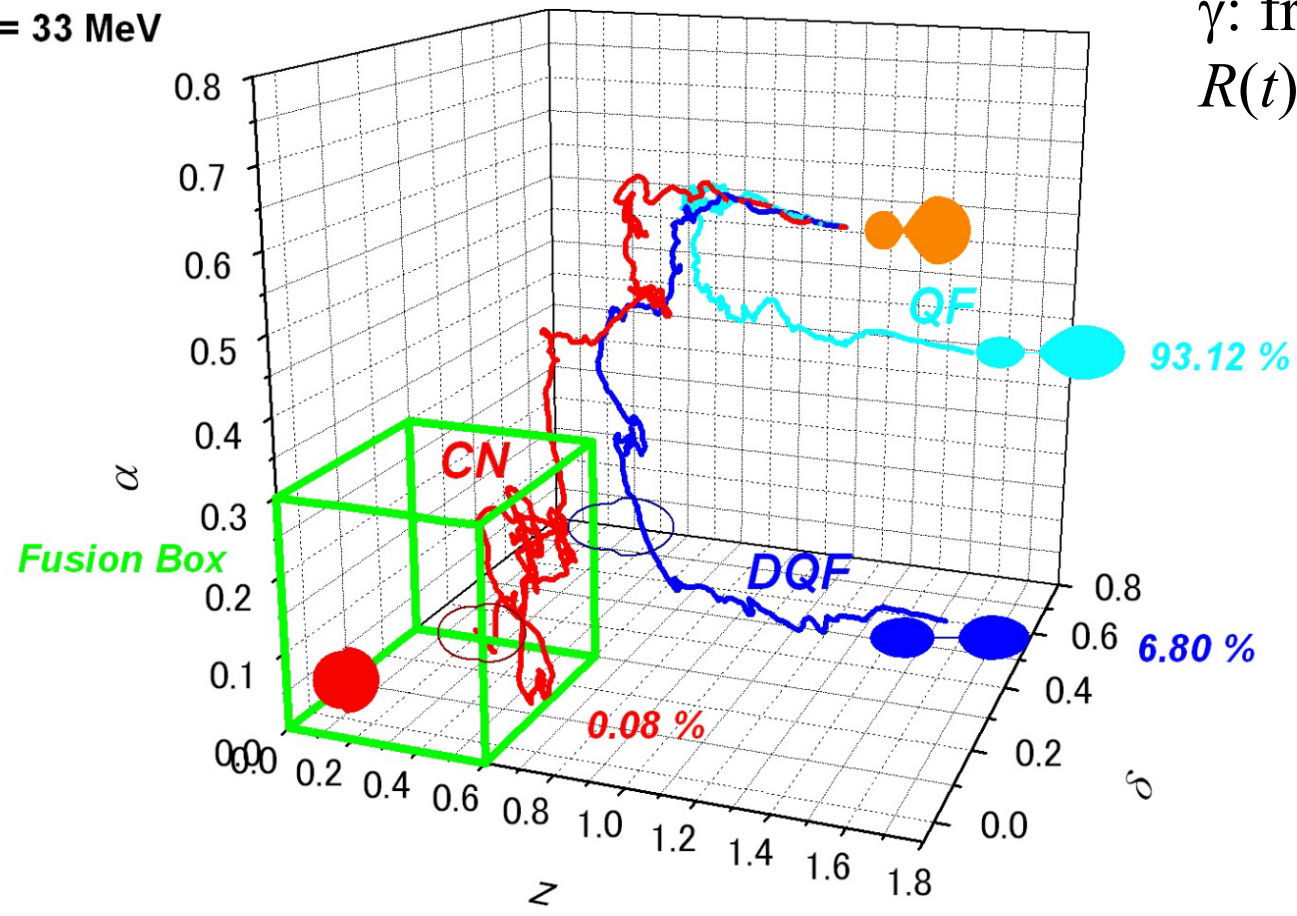
multi-dimensional extension of:

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

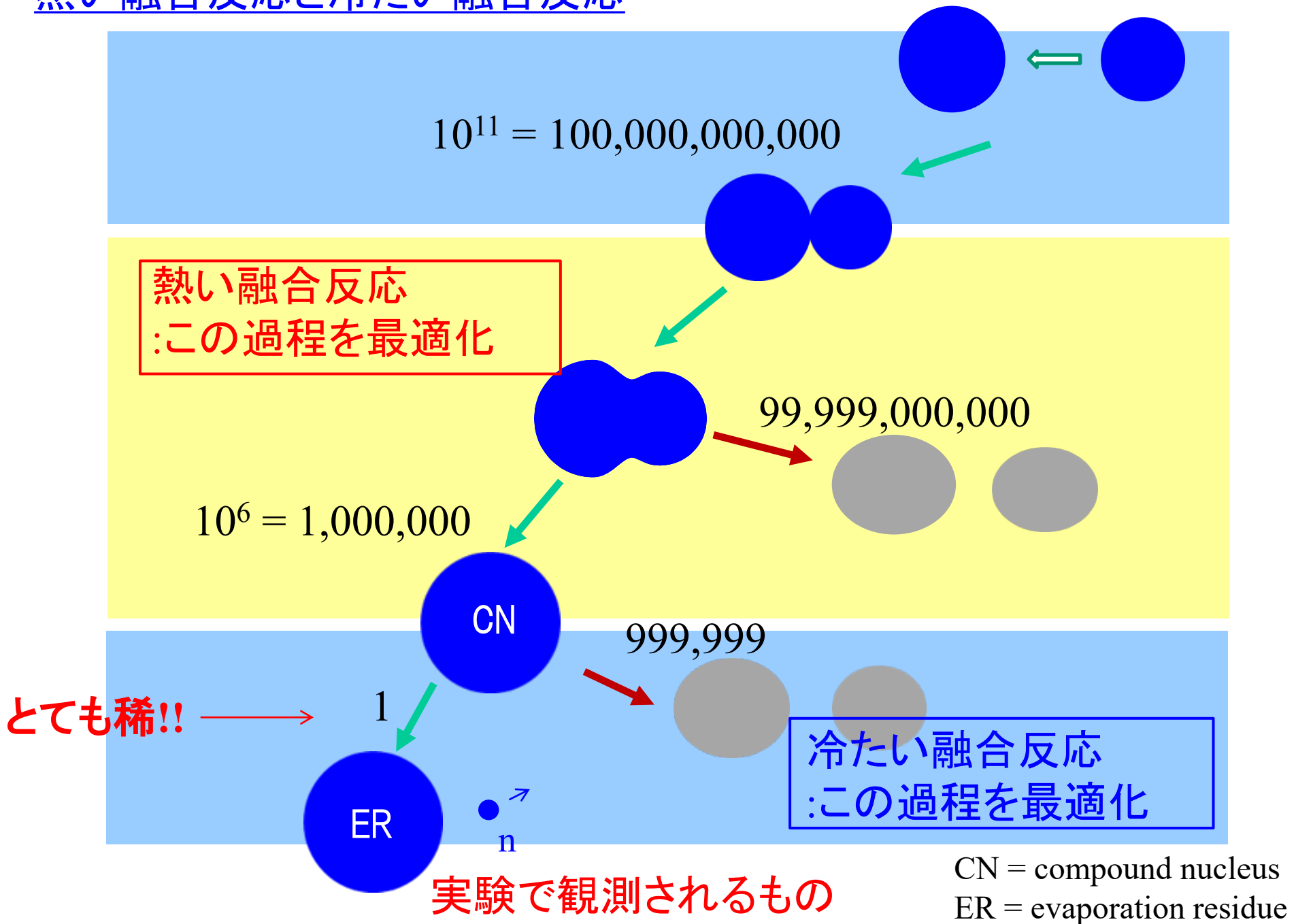
$\gamma$ : friction coefficient  
 $R(t)$ : random force

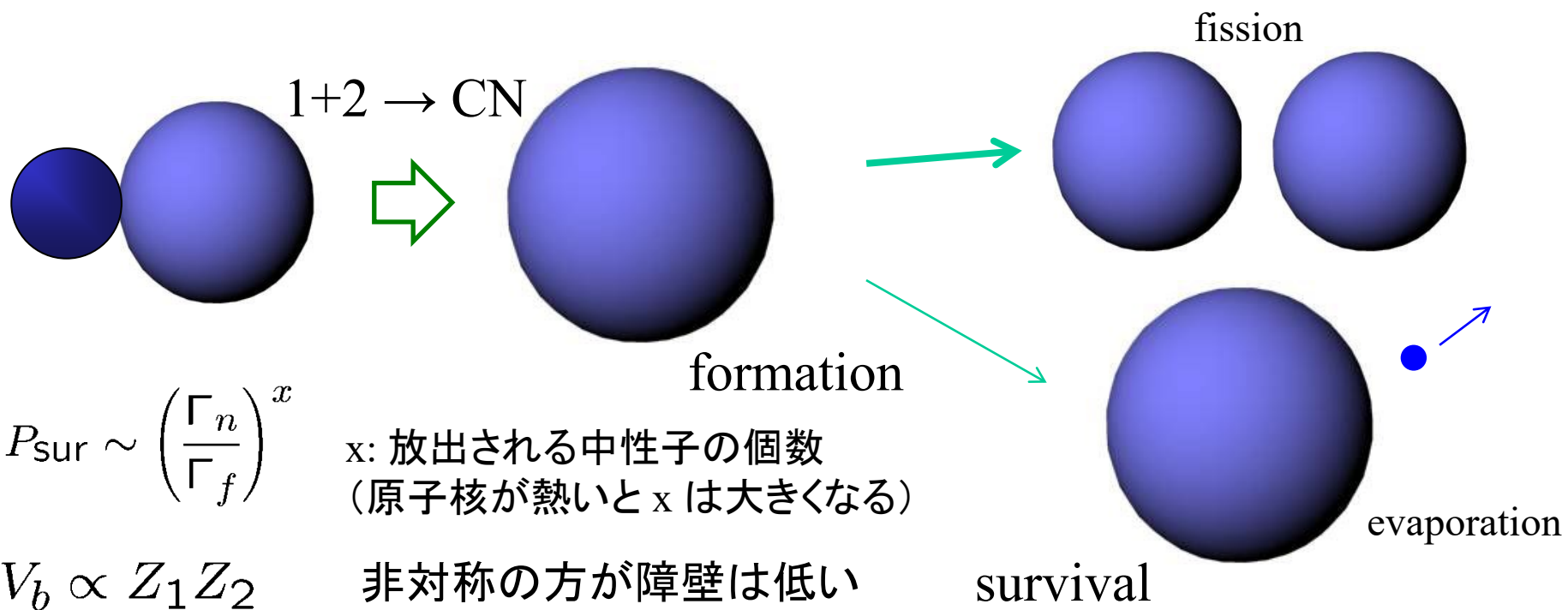


$E^* = 33 \text{ MeV}$



# 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   |

# レポート問題8(×切:12月2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)

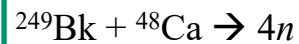
$${}^{48}\text{Ca}+{}^{243}\text{Am}: 192.7, \quad {}^{70}\text{Zn}+{}^{209}\text{Bi}: 256.1$$

\* グローバルポテンシャルによる理論値

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

RIKEN

(Cold fusion)



3<sup>rd</sup> event Aug. 12 2012

113

112

111

110

109

108

107

106

105

104

103

102

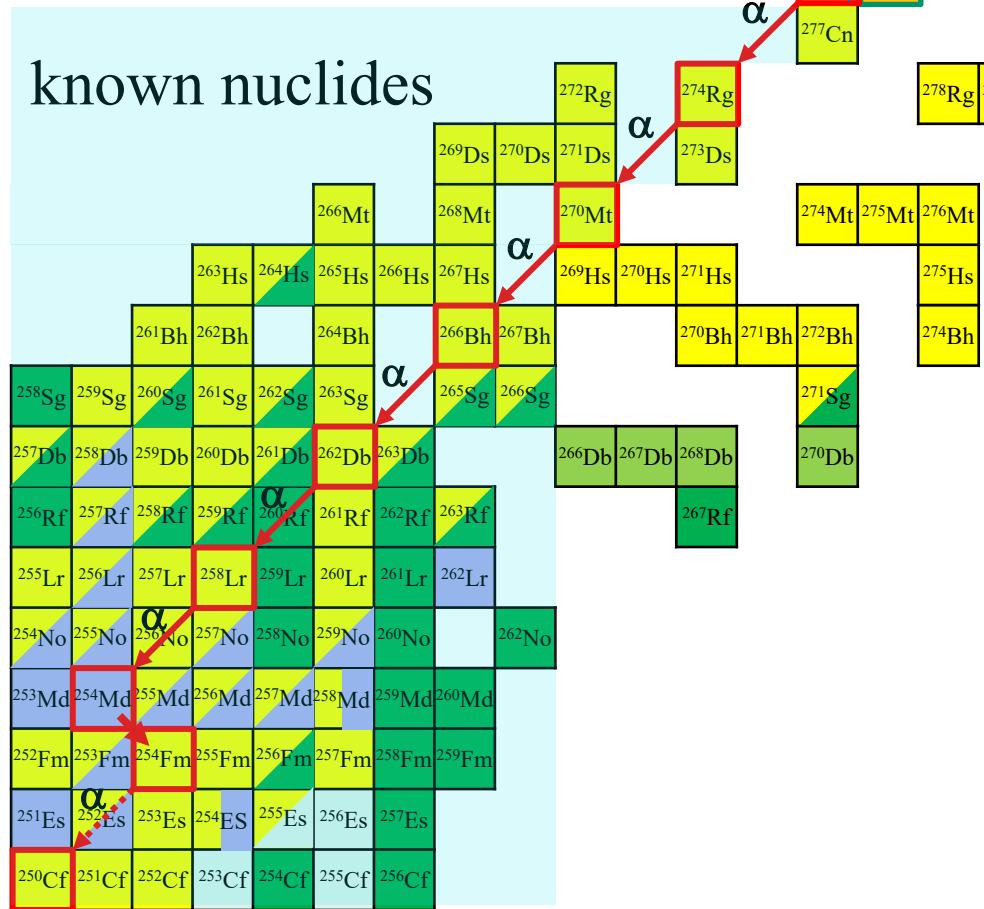
101

100

99

98

known nuclides



Dubna  
(Hot fusion)

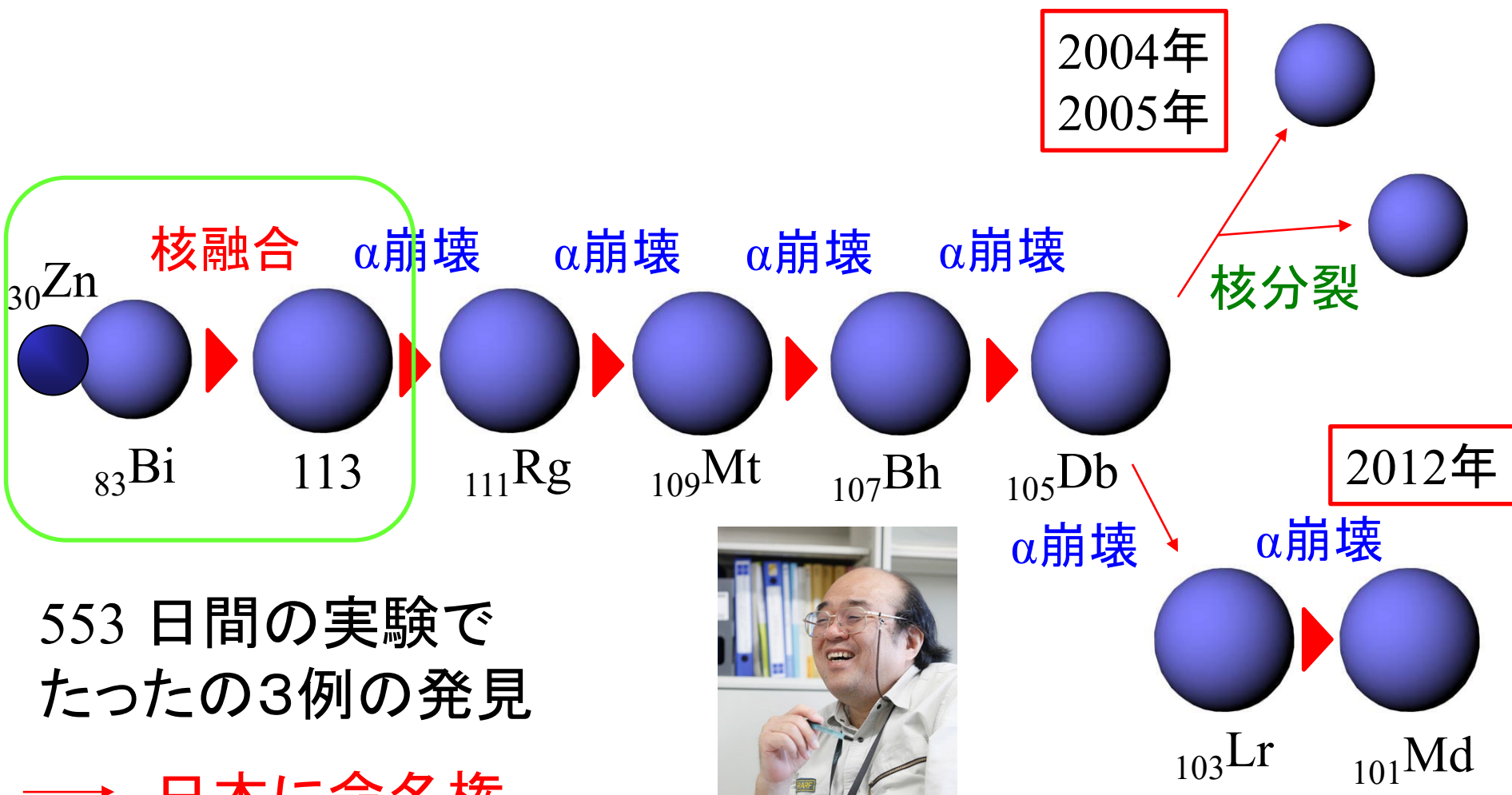
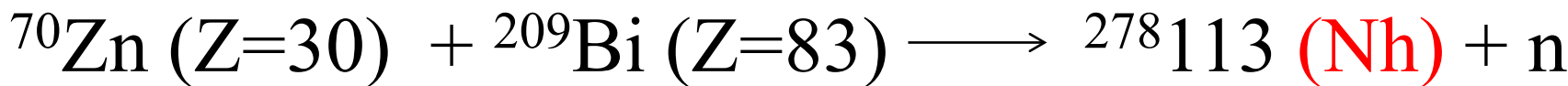
$$\sigma \sim \text{pb} = 10^{-36} \text{ cm}^2$$

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)

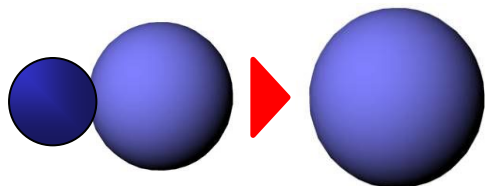
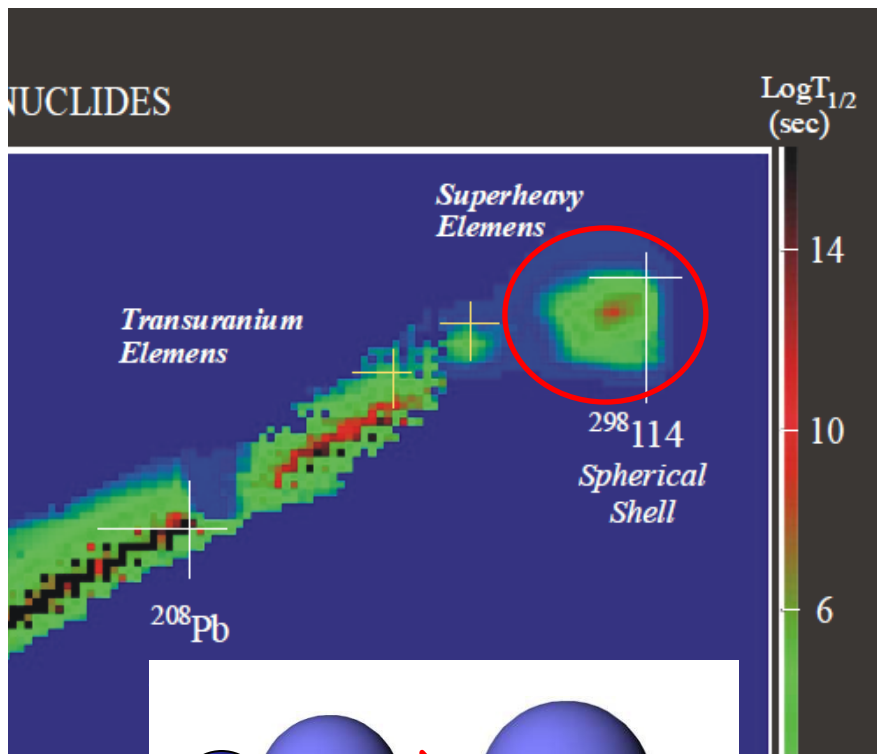


553 日間の実験で  
たったの3例の発見

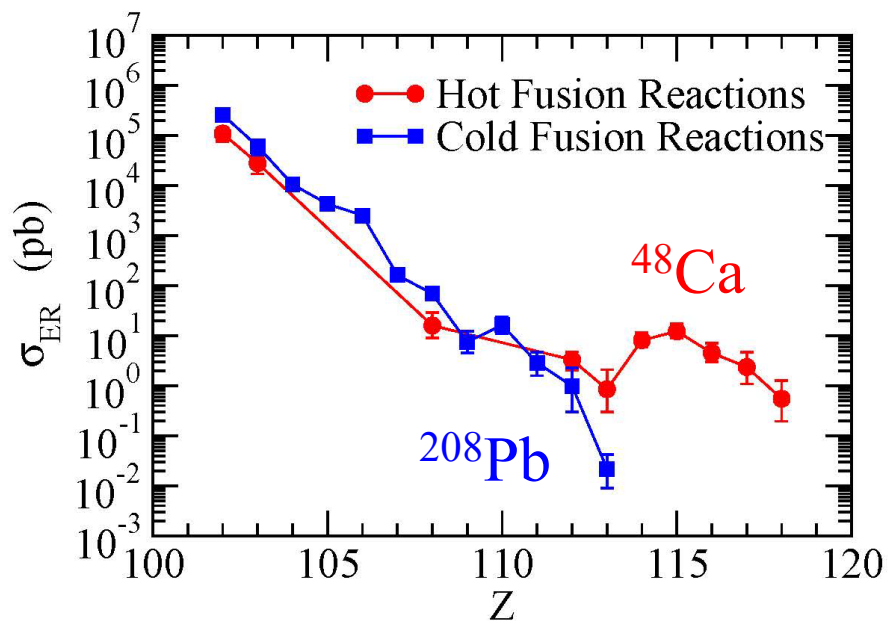
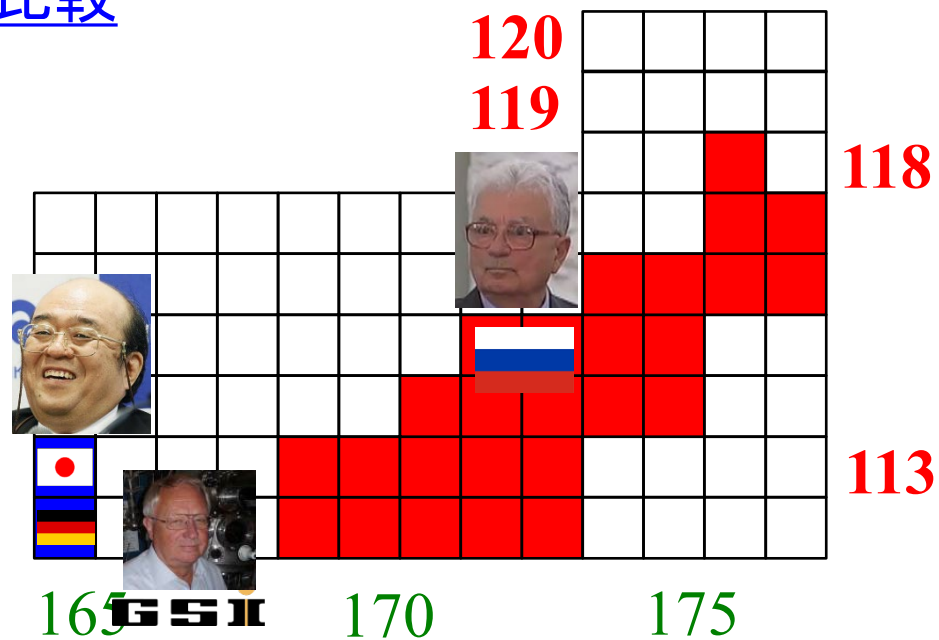
→ 日本に命名権  
ニホニウム Nh



# 熱い融合と冷たい融合：断面積の比較

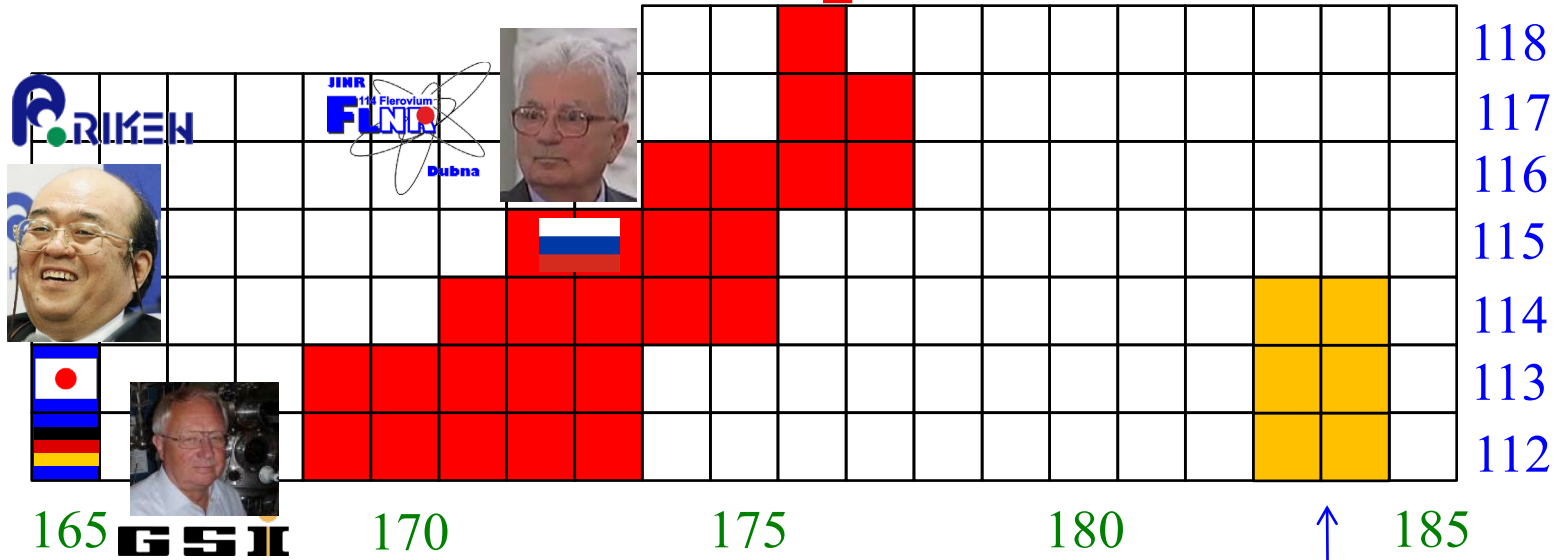


核融合反応

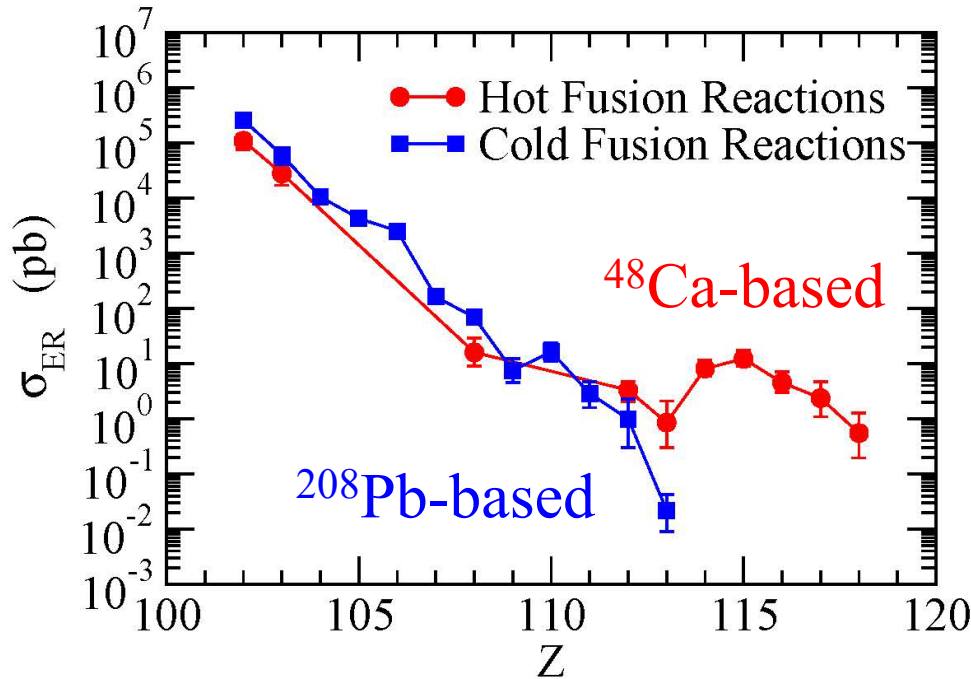


# 熱い融合反応: $^{48}\text{Ca}$ +actinides

$Z = 119$  and  $120$



安定の島?



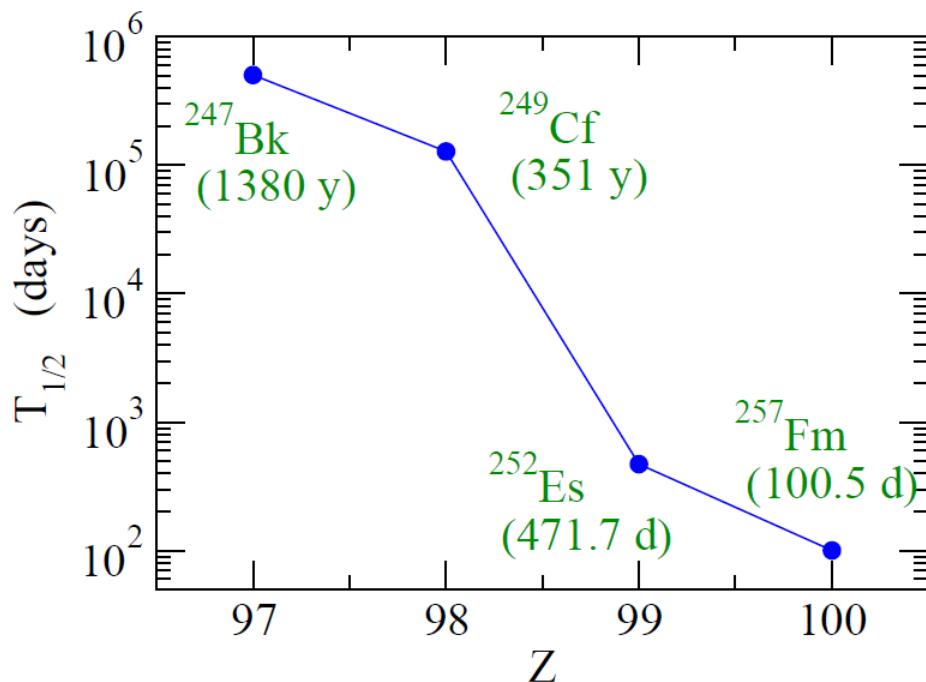
119番、120番元素  
を熱い融合反応で作る

# 119番及び120番元素に向けて

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

# 超重元素反応の新モデル: TDHF + Langevin アプローチ

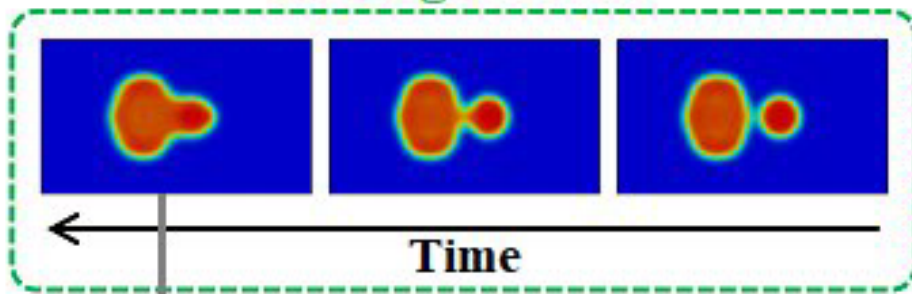
K. Sekizawa and K.H., PRC99 (2019) 051602(R)



## 新しい核反応モデルの開発

時間に依存する  
密度汎関数理論

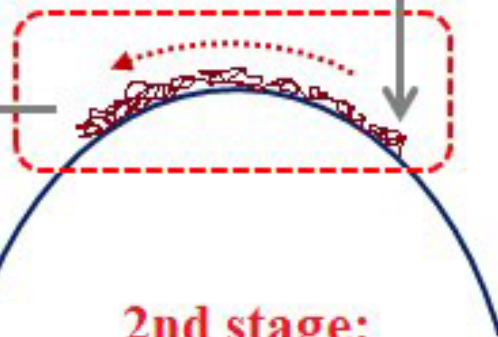
1st stage: TDHF



3rd stage:

statistical model

統計力学的手法



2nd stage:

Langevin model

ランジュバン方程式

断面積の反応系依存性



Yuri Oganessian

# New model for fusion for SHE: TDHF + Langevin approach

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



how special is  $^{48}\text{Ca}$  ?

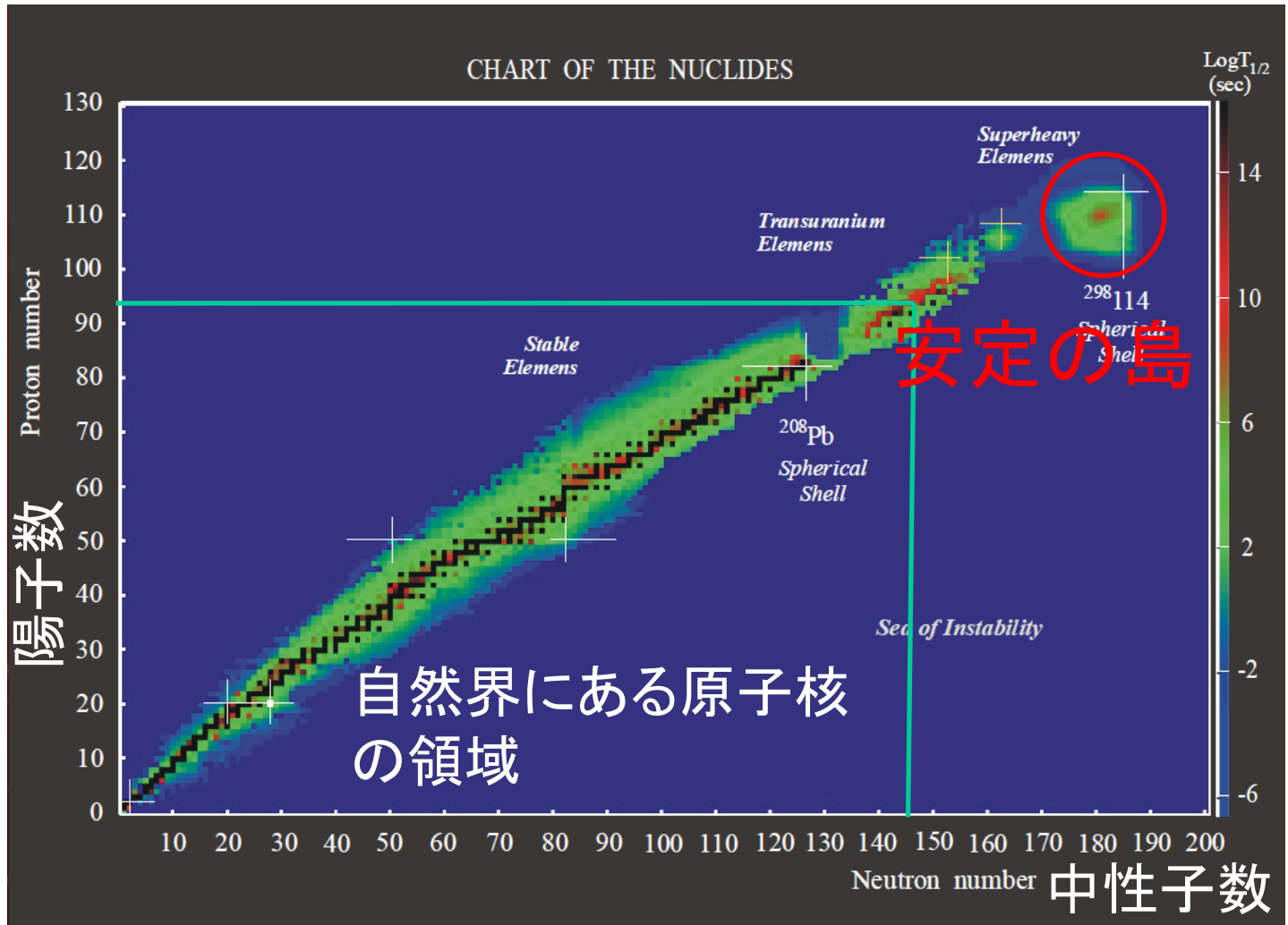
| System                             | CN             | $E^*$<br>(MeV) | $R_{\min}$<br>(fm) | $P_{\text{CN}}$<br>( $\times 10^4$ ) | $W_{\text{sur}}$<br>( $\times 10^9$ ) | $P_{\text{CN}} W_{\text{sur}}$<br>( $\times 10^{13}$ ) |
|------------------------------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| $^{48}\text{Ca} + ^{254}\text{Fm}$ | $^{302}_{120}$ | 29.0           | 12.93              | 1.72                                 | 176                                   | 302  |
| $^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$ | $^{302}_{120}$ | 33.2           | 13.09              | 1.89                                 | 1.31                                  | 2.47   |
| $^{51}\text{V} + ^{249}\text{Bk}$  | $^{300}_{120}$ | 37.0           | 12.94              | 3.95                                 | 0.117                                 | 0.461  |
| $^{48}\text{Ca} + ^{257}\text{Fm}$ | $^{305}_{120}$ | 30.5           | 12.94              | 2.49                                 | 0.729                                 | 1.82   |

$$P_{\text{ER}} = P_{\text{cap}} \cdot P_{\text{CN}} \cdot W_{\text{sur}}$$

similar  $P_{\text{CN}}$

- ✓ no special role of  $^{48}\text{Ca}$  in the entrance channel
- ✓ non- $^{48}\text{Ca}$  proj.: about 2 order of magnitude smaller due mainly to  $W_{\text{sur}}$

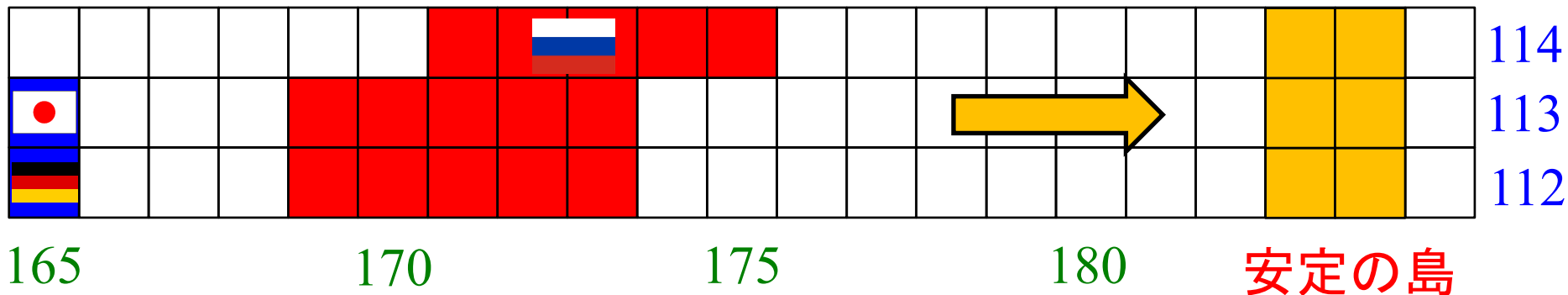
# もう一つの重要な課題



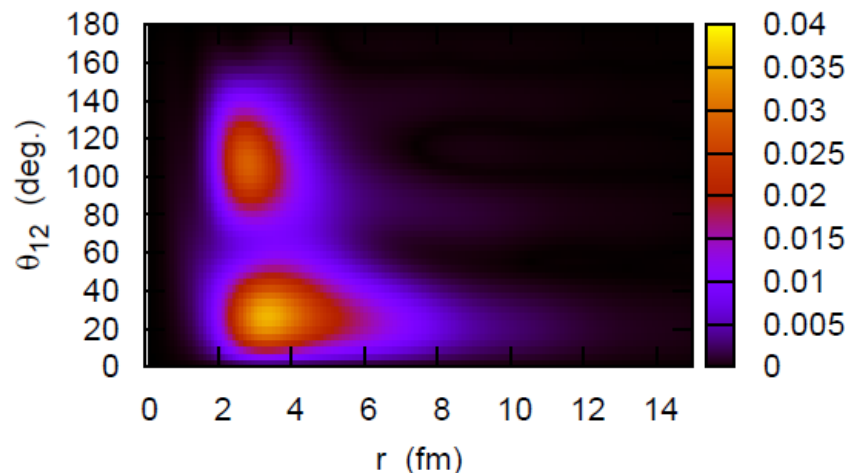
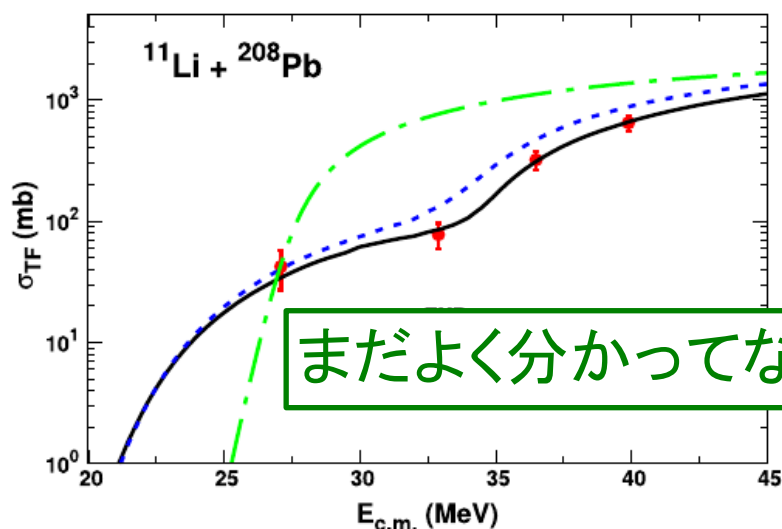
Yuri Oganessian

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?



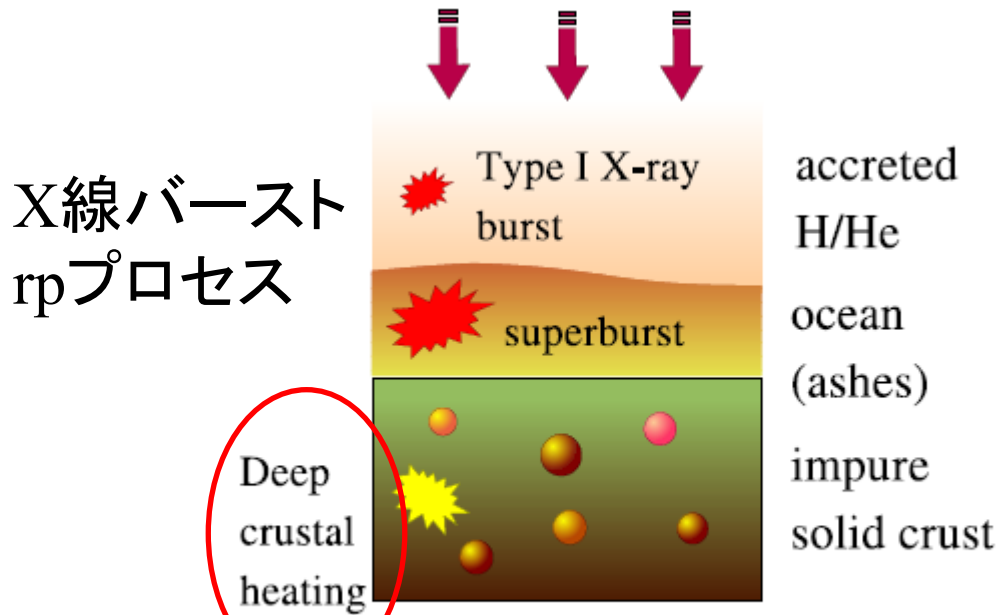
K.H. and H. Sagawa, PRC72('05)044321

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

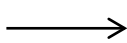


# 質量降着を伴う中性子星で起こる 中性子過剰核の核融合反応



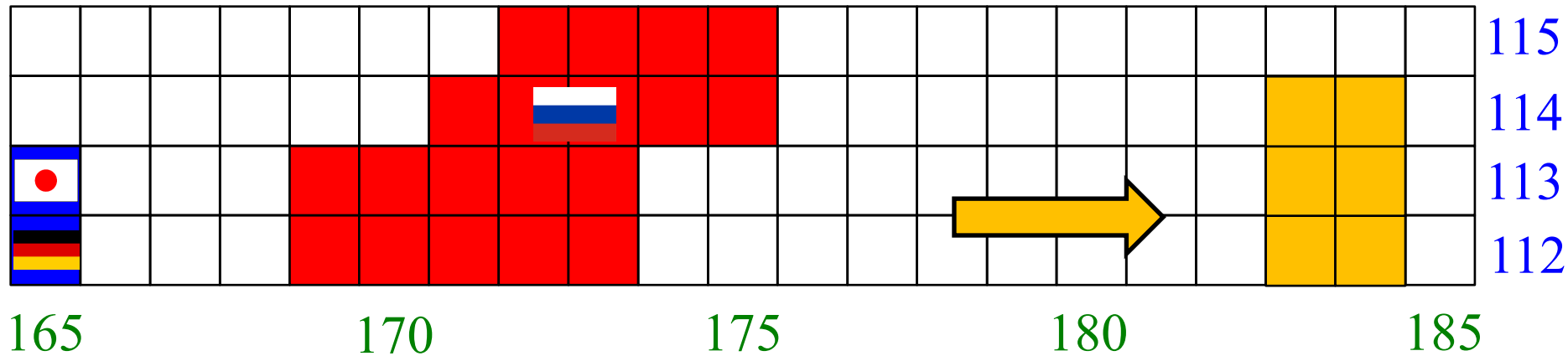
Accreting neutron

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

# 安定の島に向けて



## 中性子過剰核ビームが必須

- 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
  - ✓ 統計モデルはどれだけいいのか?

## 中性子過剰核の構造

課題はいっぱい

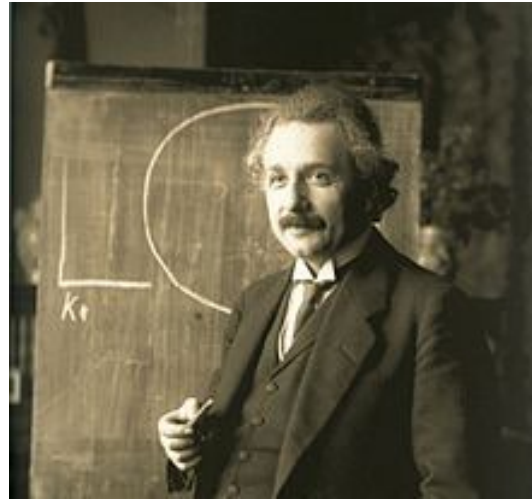
# 超重元素の化学

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

$$E = mc^2$$

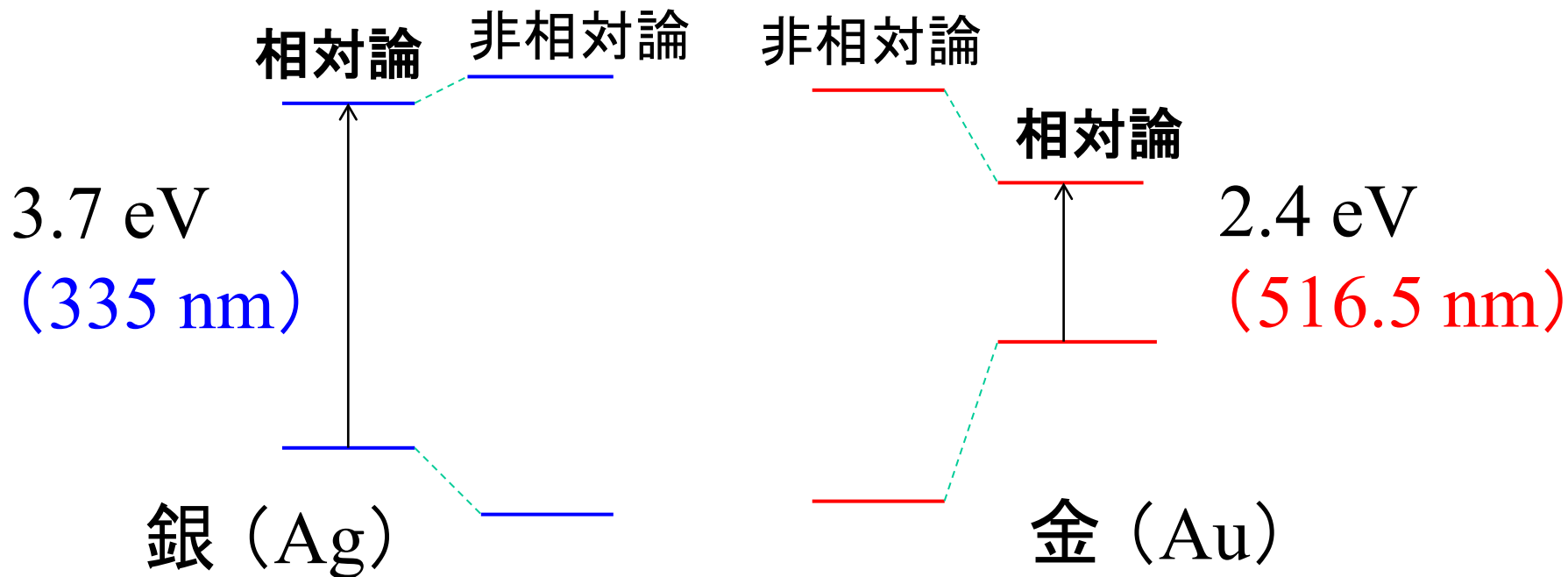


ディラック方程式(相対論的量子力学)を解くと、  
原子中の電子のエネルギーは、

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

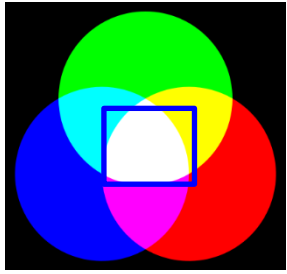
相対論的効果





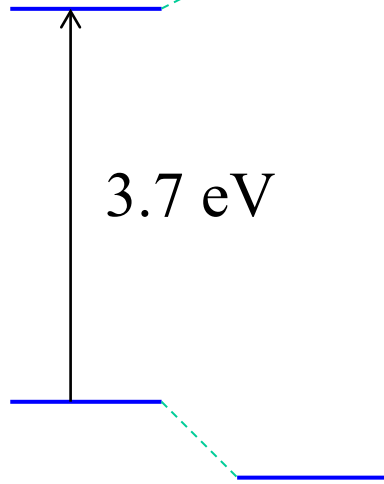
可視光



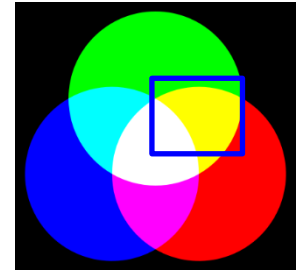
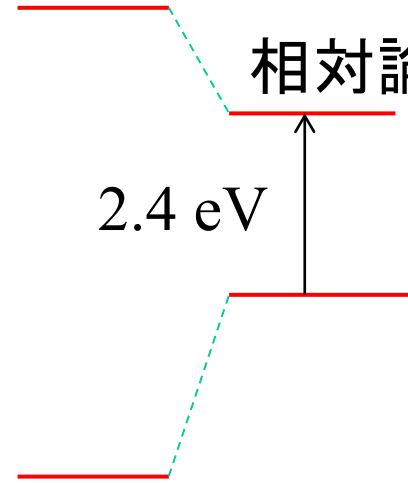


光の  
吸収なし

相対論 非相対論



非相対論



青色の光  
が吸収

相対論



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

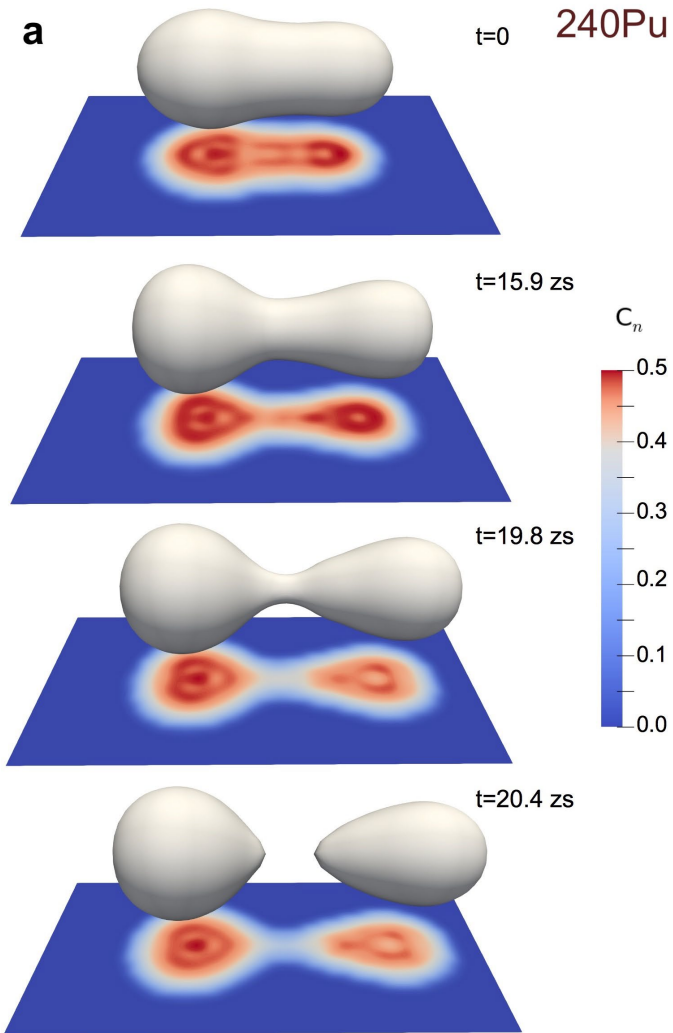
金と銀は同族



相対論的効果がなければ金の色は銀みたいだった!

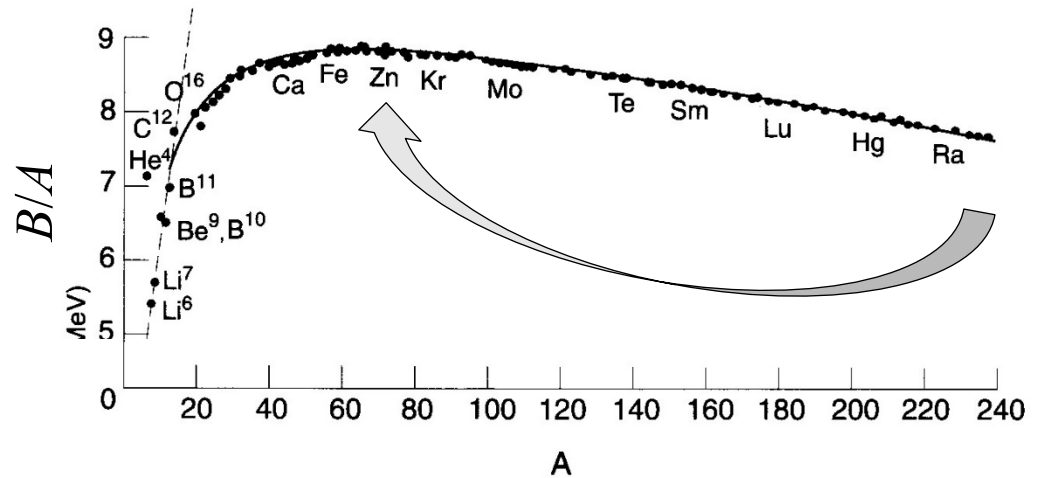
ニホニウムで指輪を作ると何色なの？

# 核分裂について



G. Scamps and C. Simenel,  
Nature 564 (2018) 382

- discovered about 80 years ago (in 1938) by Hahn and Strassmann
- a primary decay mode of heavy nuclei

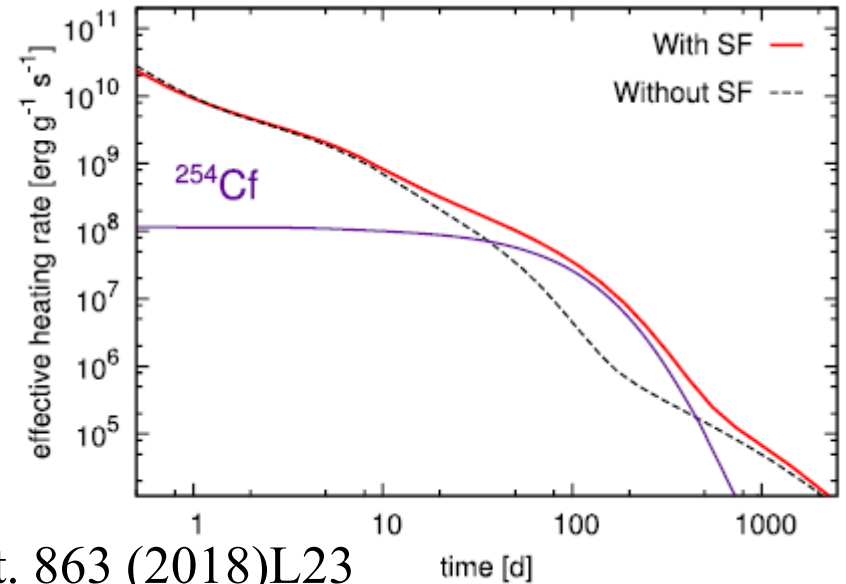
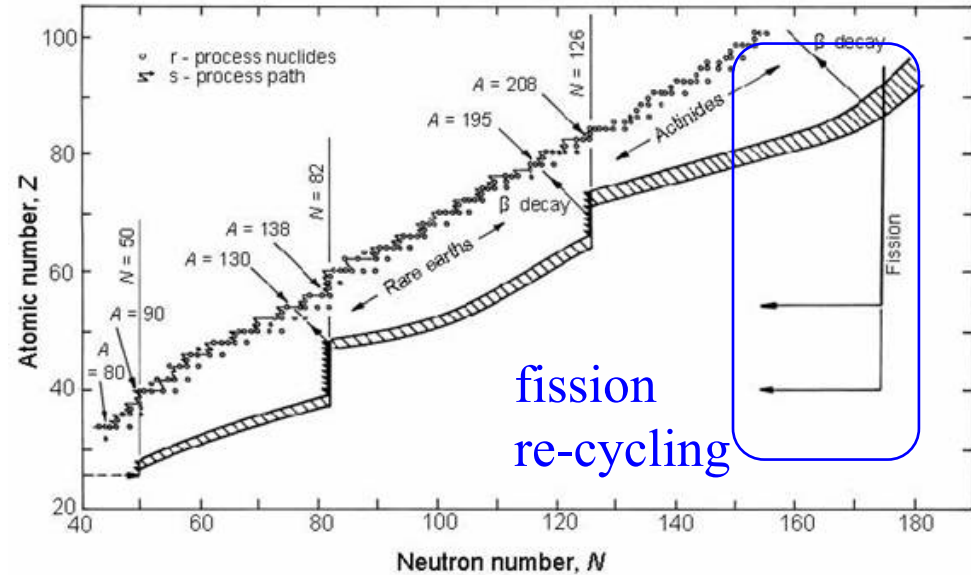
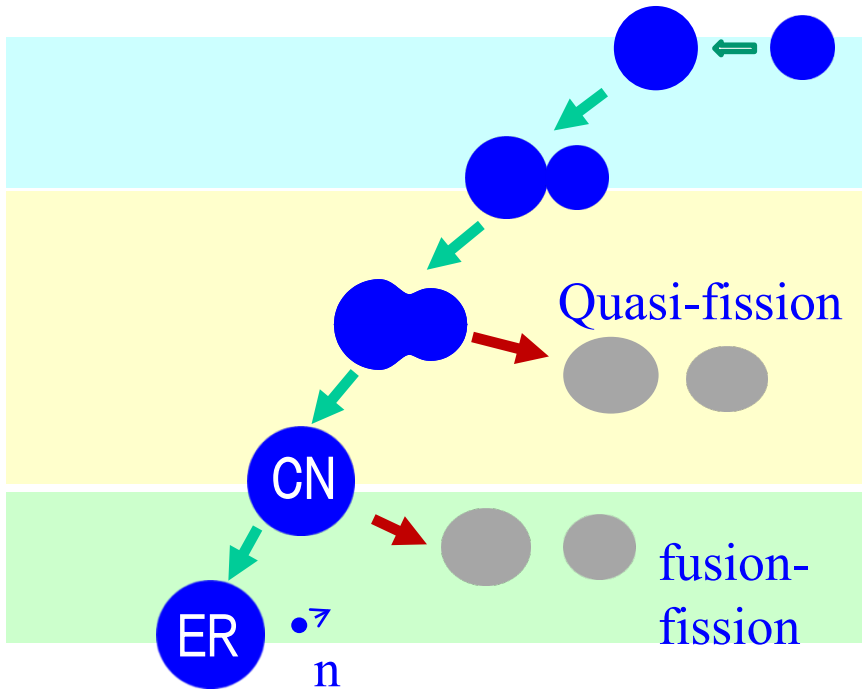


- **important role in:**

- energy production
- superheavy elements
- r-process nucleosynthesis
- production of neutron-rich nuclei

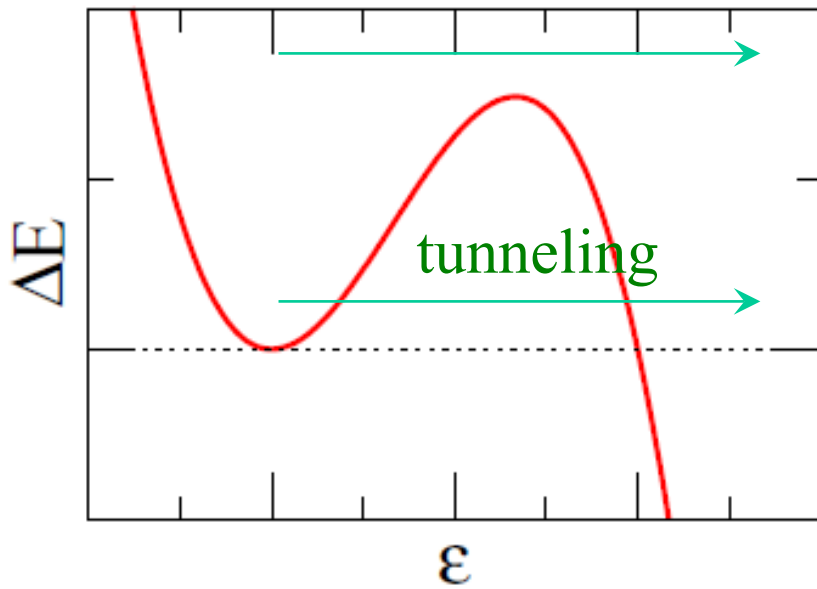
# fission in r-process nucleosynthesis

## fission in SHE



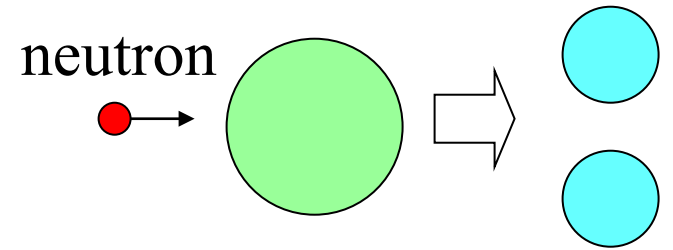
Y. Zhu et al.,  
Astrophys. J. Lett. 863 (2018)L23

➤ various fission processes



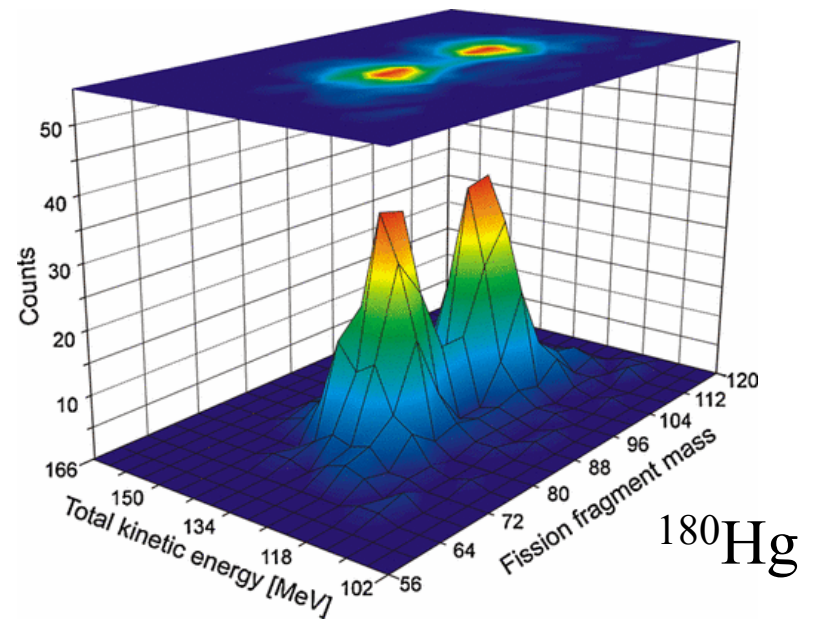
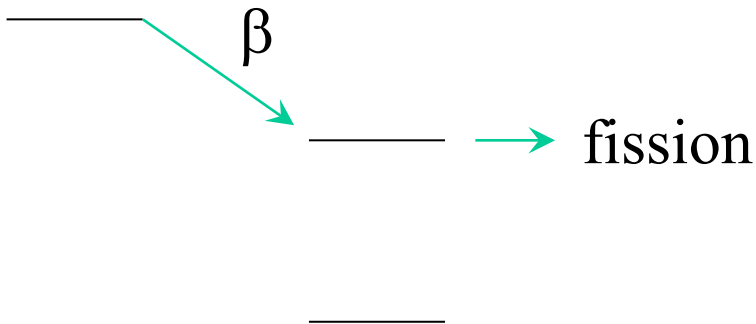
induced  
fission

spontaneous  
fission

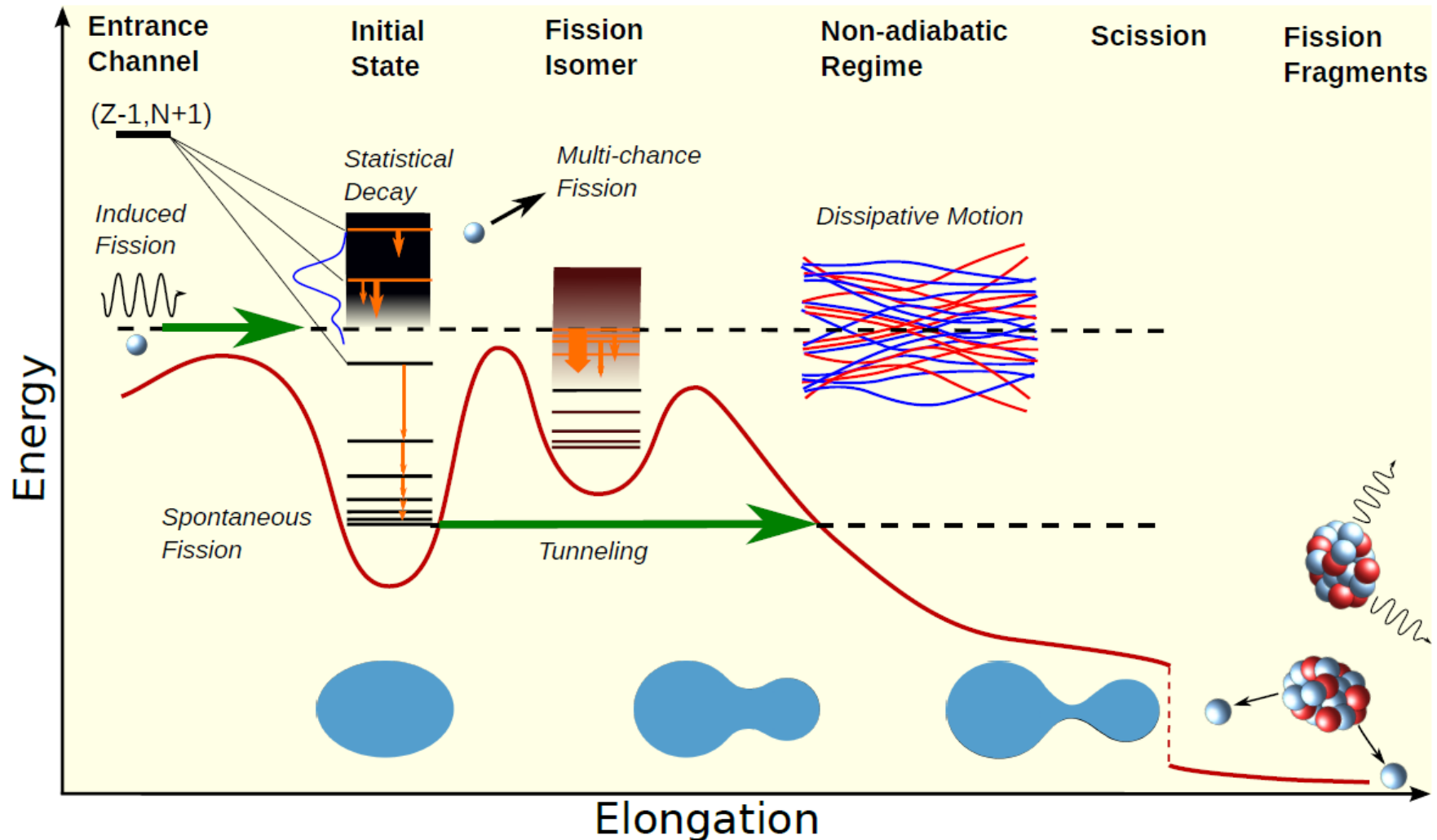


asymmetric fission

beta-delayed fission



# 微視的に核分裂を記述する(主にはDFTをベースにしたアプローチ)



“Future of fission theory”

M. Bender et al., J. of Phys. G47, 113002 (2020)