



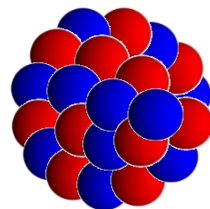
# 自己紹介

- 生まれは仙台、出身は千葉
- 学部、修士、博士: **東北大学**理学部
- ワシントン大(シアトル)でポスドク(1998年~2000年)
- **京都大学基礎物理学研究所**で助手(2000年~2004年)
- **東北大**で助教授/准教授(2004年~2019年)
- **京都大学理学研究科**(2019年~)



□ 専門: 原子核理論(核子多体論)

原子核の構造と反応



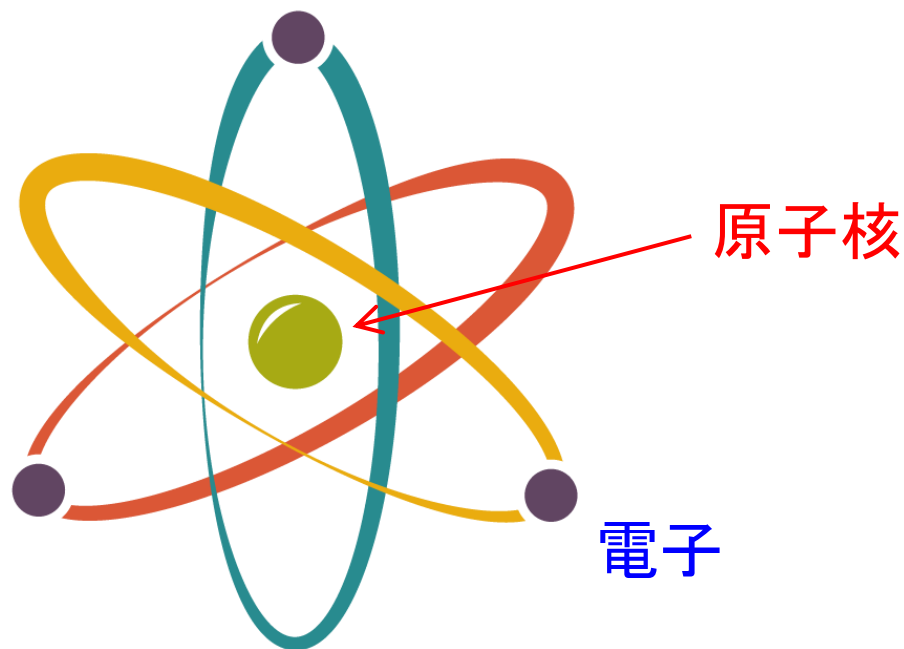
今日はその中でも超重元素(超重核)の物理についてお話しします。







# 何が元素(原子)の存在限界を決めているのか?



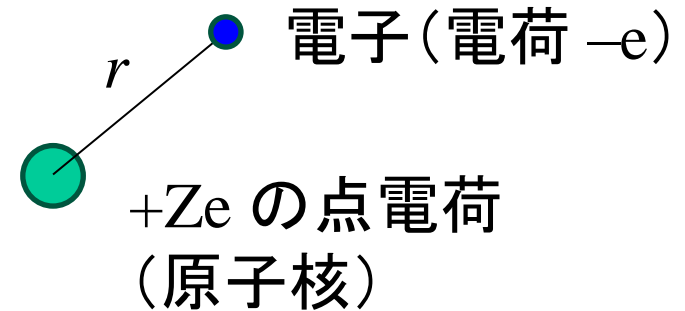
考えなければならない可能性:

- ✓ 原子の中の電子軌道の安定性
- ✓ 原子の中の原子核の安定性

# 原子中の電子の軌道の安定性

水素様原子

$$V(r) = -\frac{Ze^2}{r}$$



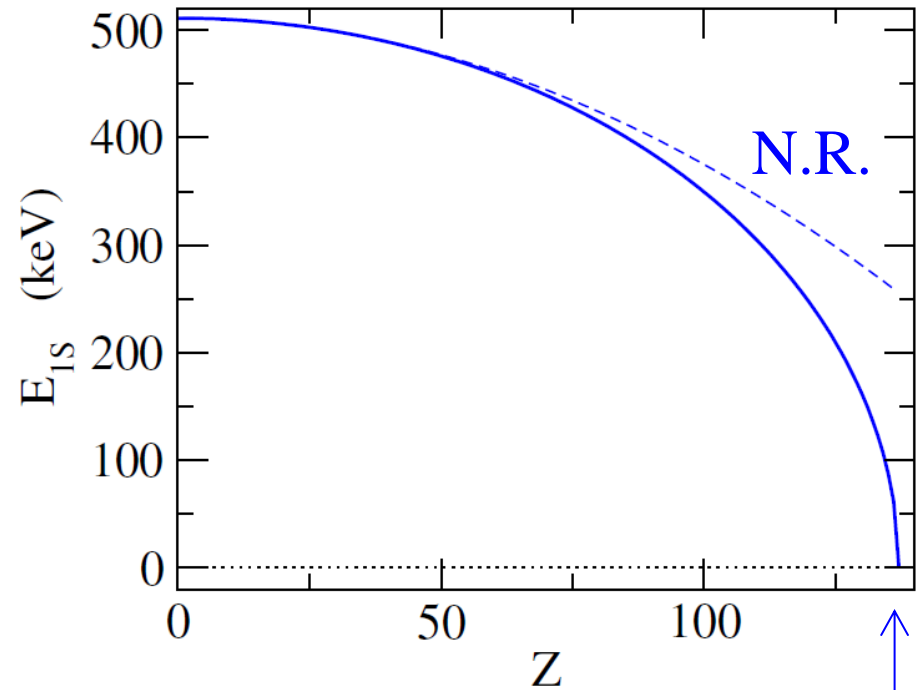
1S 状態(ディラック方程式)

$$E_{1S} = mc^2 \sqrt{1 - (Z\alpha)^2}$$

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \sim \frac{1}{137}$$

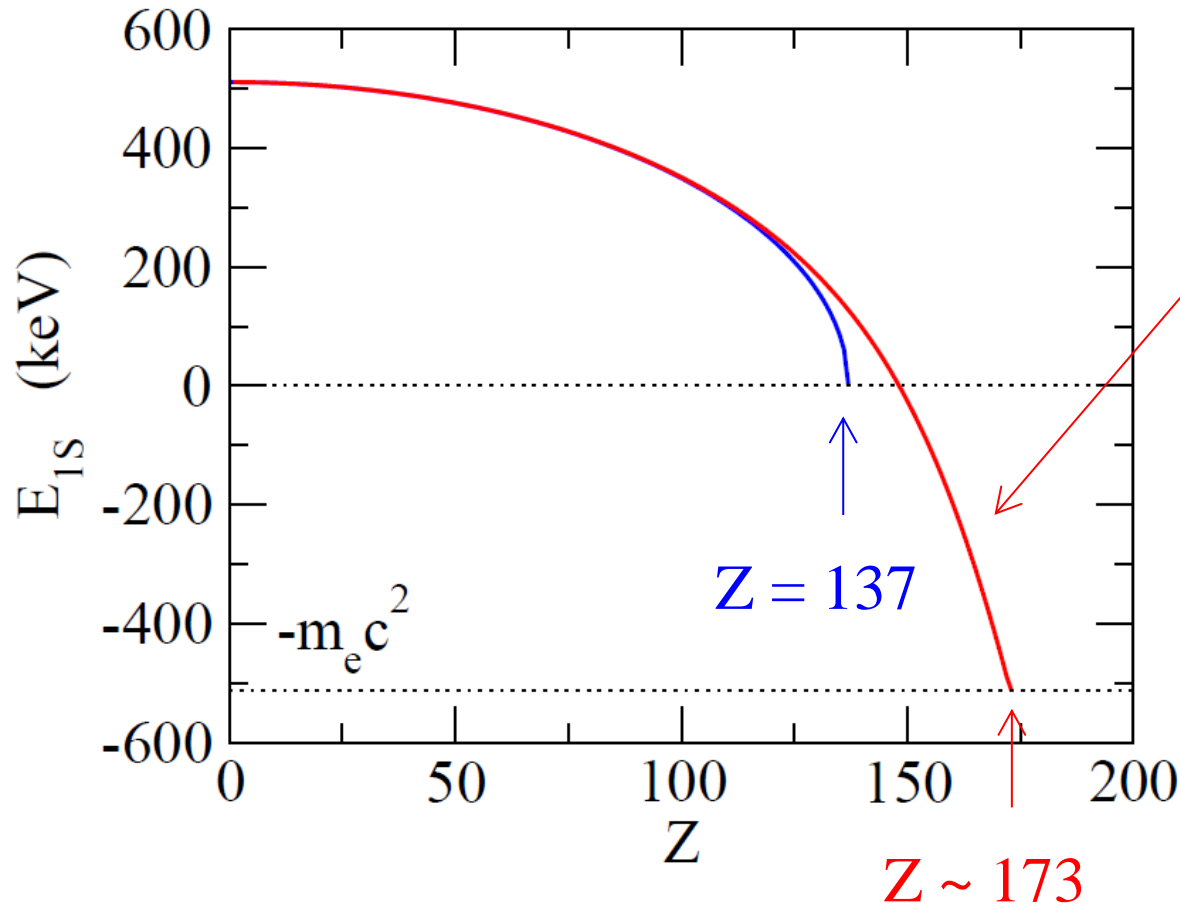
$Z > 137 \rightarrow$  解は存在せず  
(真空崩壊

: 電子・陽電子の対生成が自発的に起こる)



# 原子中の電子の軌道の安定性

## 水素様原子

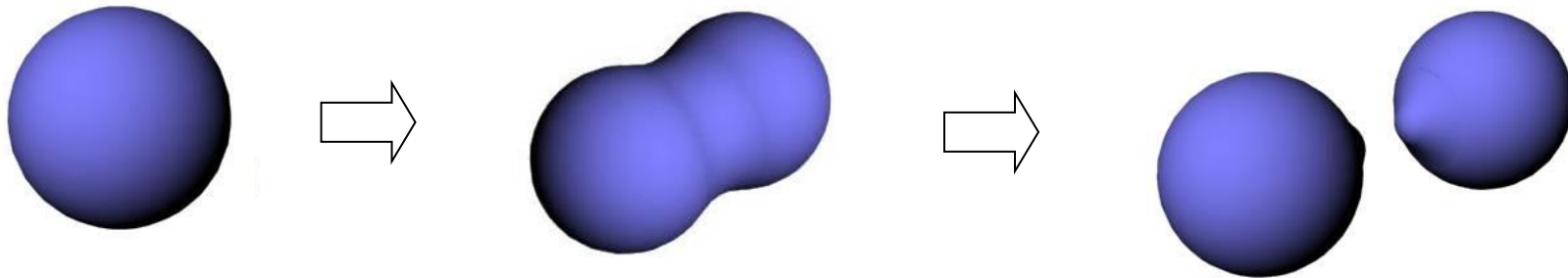


原子核の有限  
サイズ効果  
(一様帯電球  
を仮定)



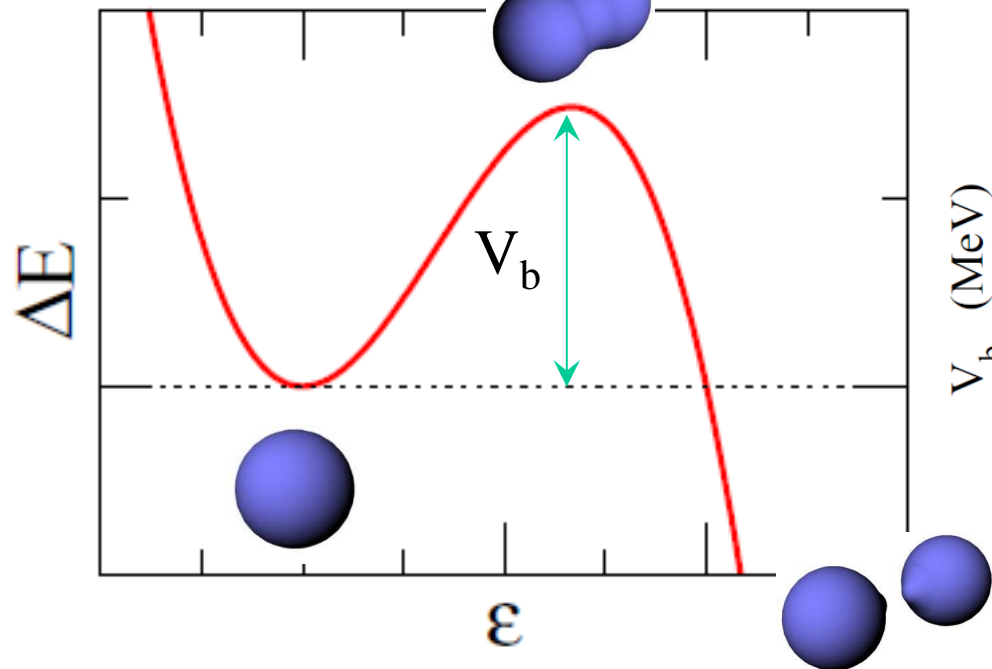
# 原子核の安定性

重い原子核 → 核分裂

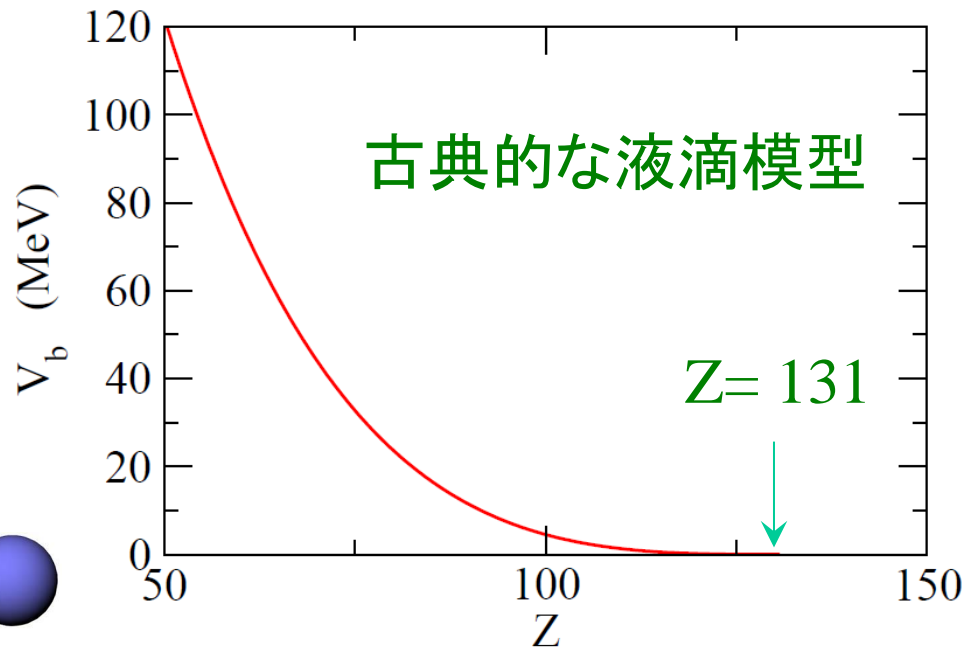


電子軌道が不安定になる前に  
原子核が壊れる

核分裂障壁



障壁の高さ



# 核分裂の最近の研究の進展 (K. Hagino, G.F. Bertsch, K. Uzawa)

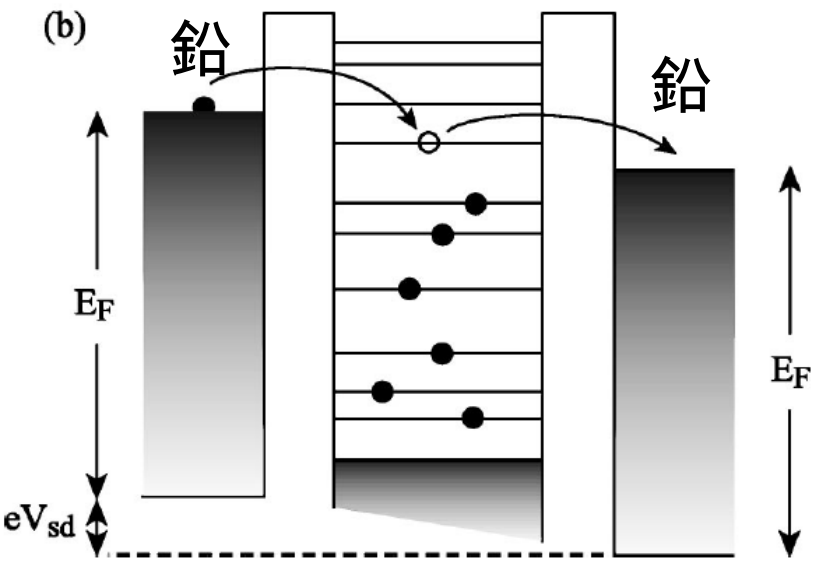
核分裂: 原子核形状の大きな変化

→ その微視的記述が核物理の究極的な課題の1つ

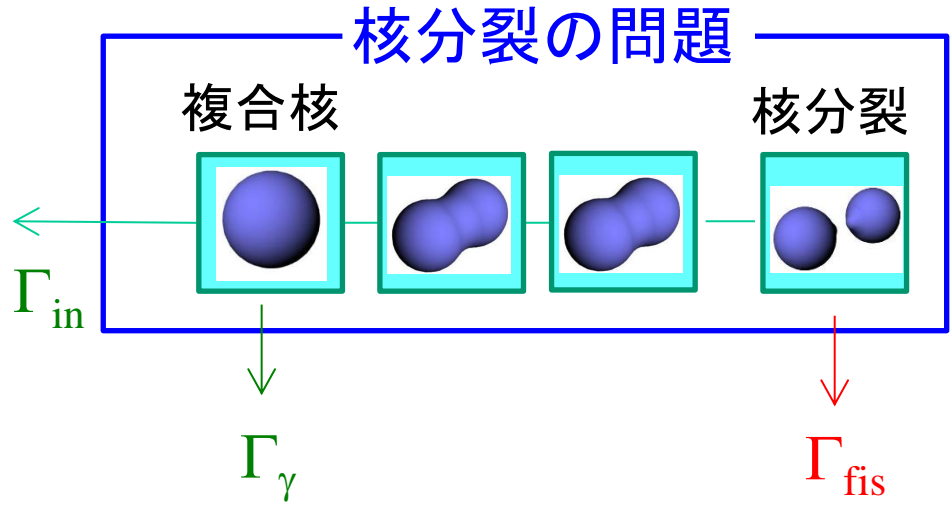
CI (Configuration Interaction)法+ DFT (密度汎関数法)  
+ 非平衡グリーン関数法

G.F. Bertsch and K.Hagino,  
Phys. Rev. C107, 044615 (2023).

量子ドットなどの  
ナノデバイス



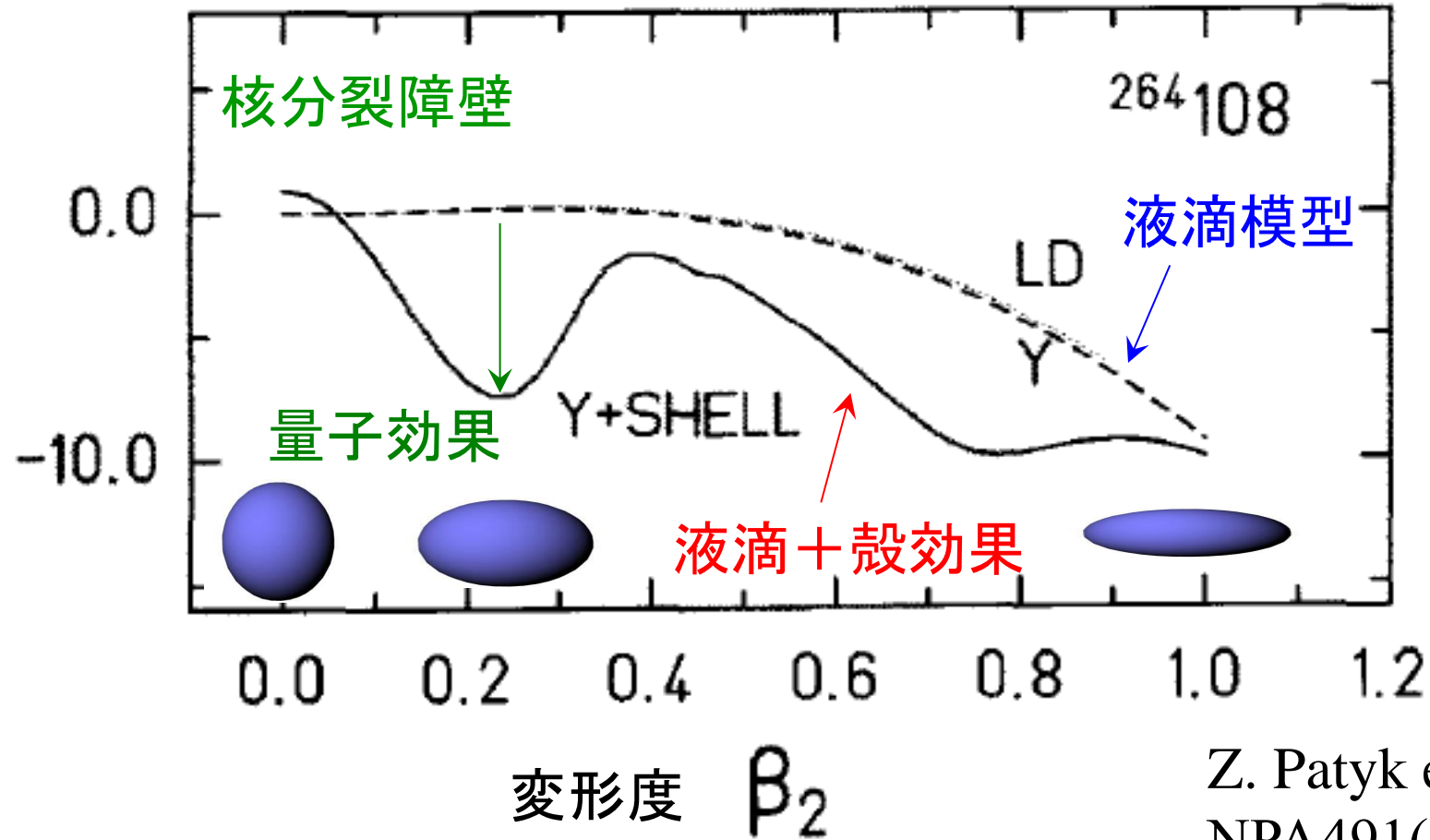
鉛電極の間に電圧をかけると  
電流が流れる



複合核状態→核分裂チャンネル  
への流れ(「非平衡電流」)

$$T_{i \rightarrow j} = \text{Tr}[\Gamma_i G \Gamma_j G^\dagger]$$

# 原子核の安定性

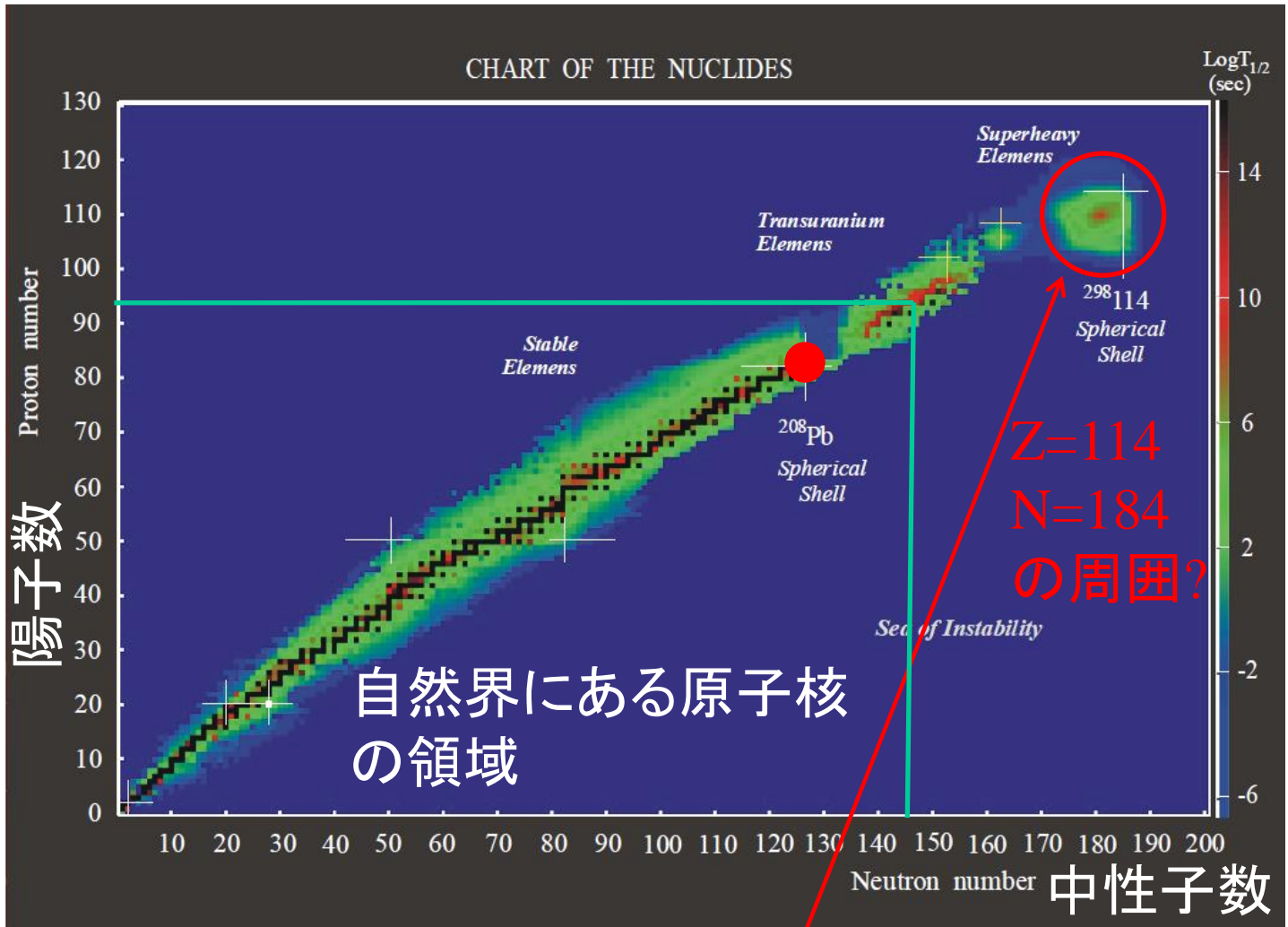


Z. Patyk et al.,  
NPA491('89) 267

量子力学的効果(魔法数の効果)により核分裂障壁が高くなり原子核が安定化する

(原子核の形ごとに原子の希ガスに相当する効果が変化)

# 超重元素(安定の島)

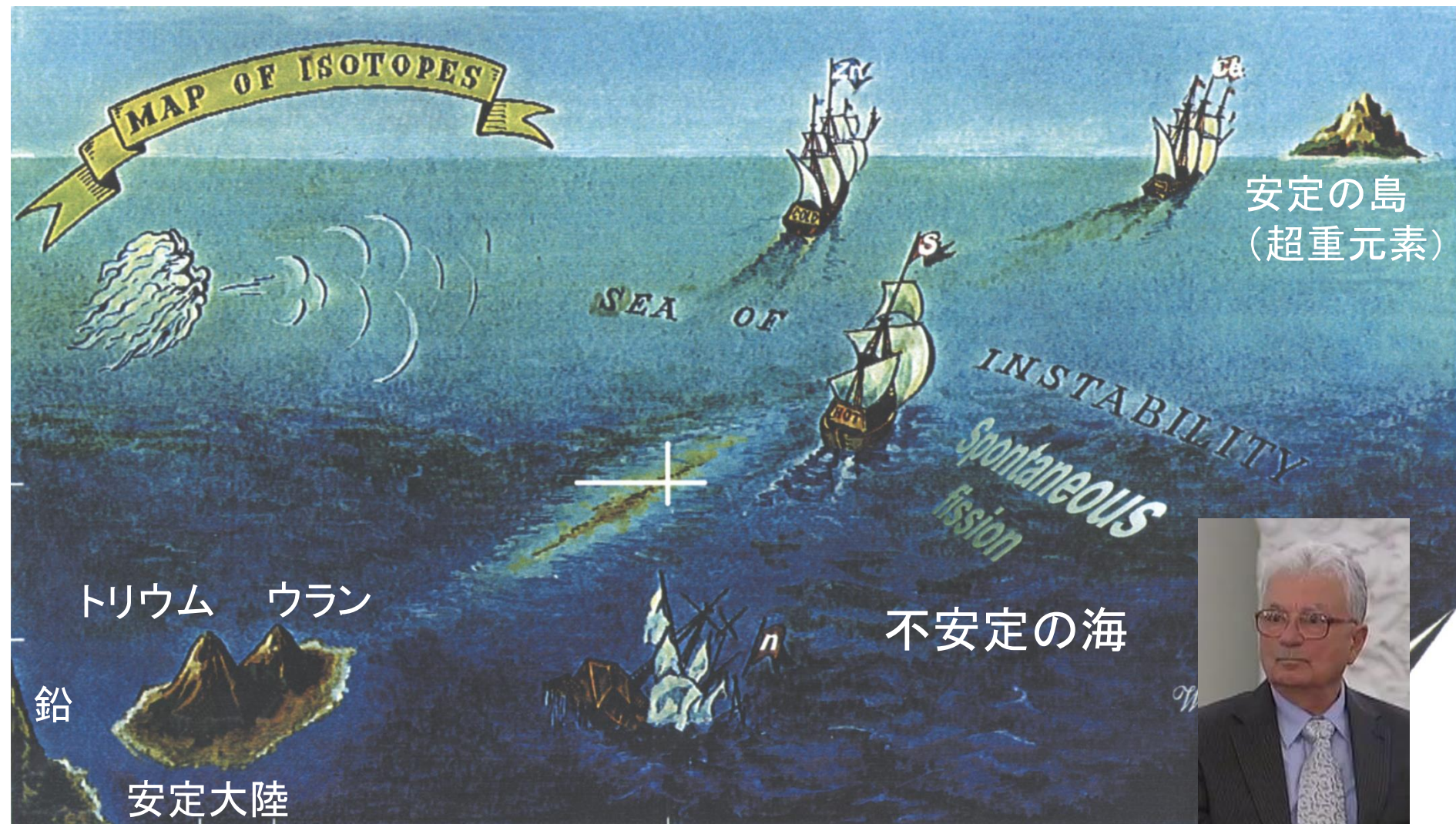


Yuri Oganessian

**10<sup>3-5</sup> 年程度の長寿命?**



# 安定の島(超重元素)を目指して



118

Og  
oganeson

描画は Yuri  
Oganessian 氏

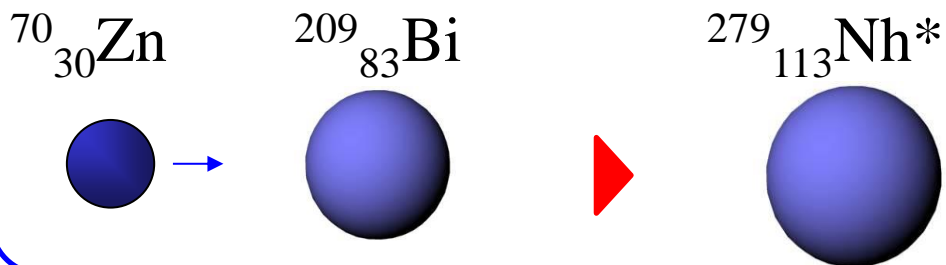
# 113番元素ニホニウム Nh

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

2016年11月

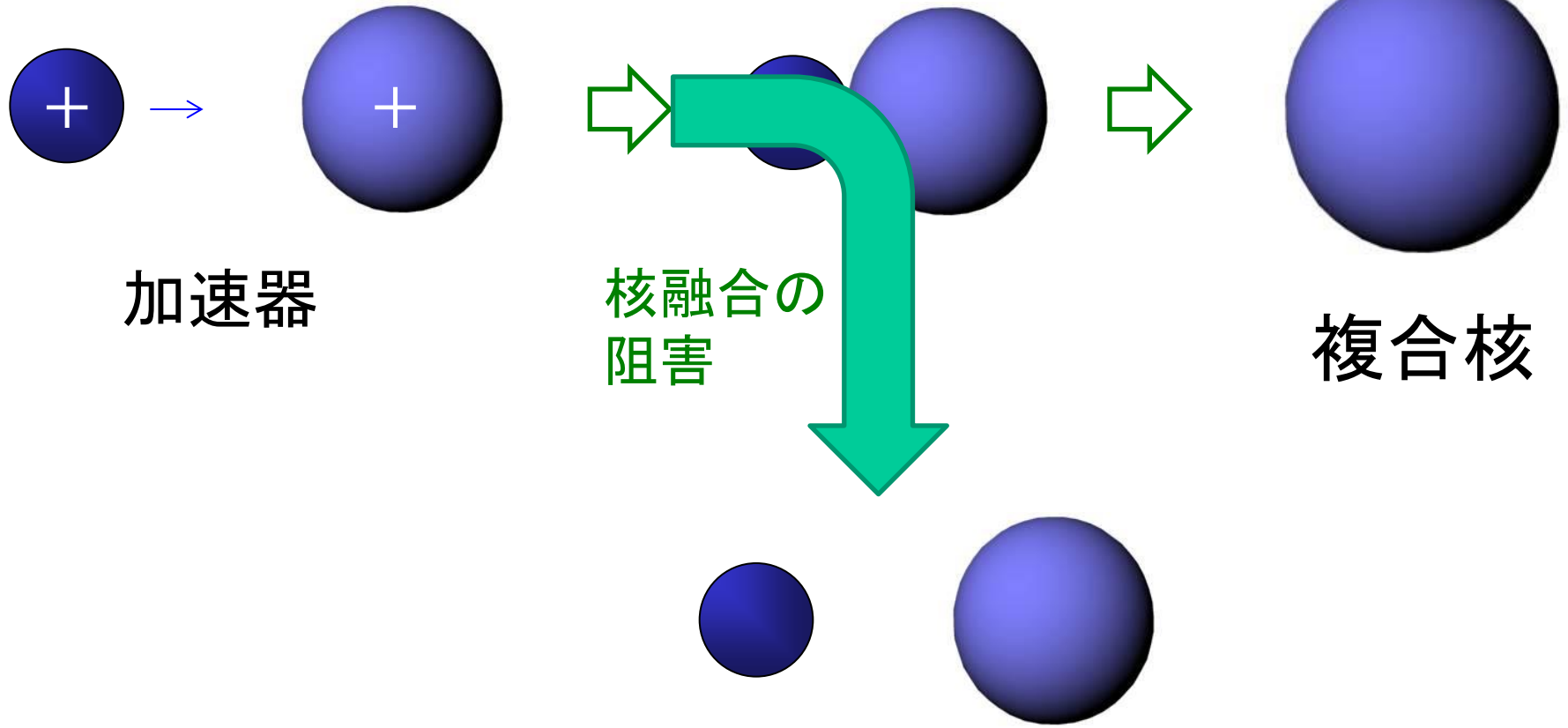


Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											8 O	9 F	10 Ne			
3	11 Na	12 Mg											16 S	17 Cl	18 Ar			
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	34 Se	35 Br	36 Kr			
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	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	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				



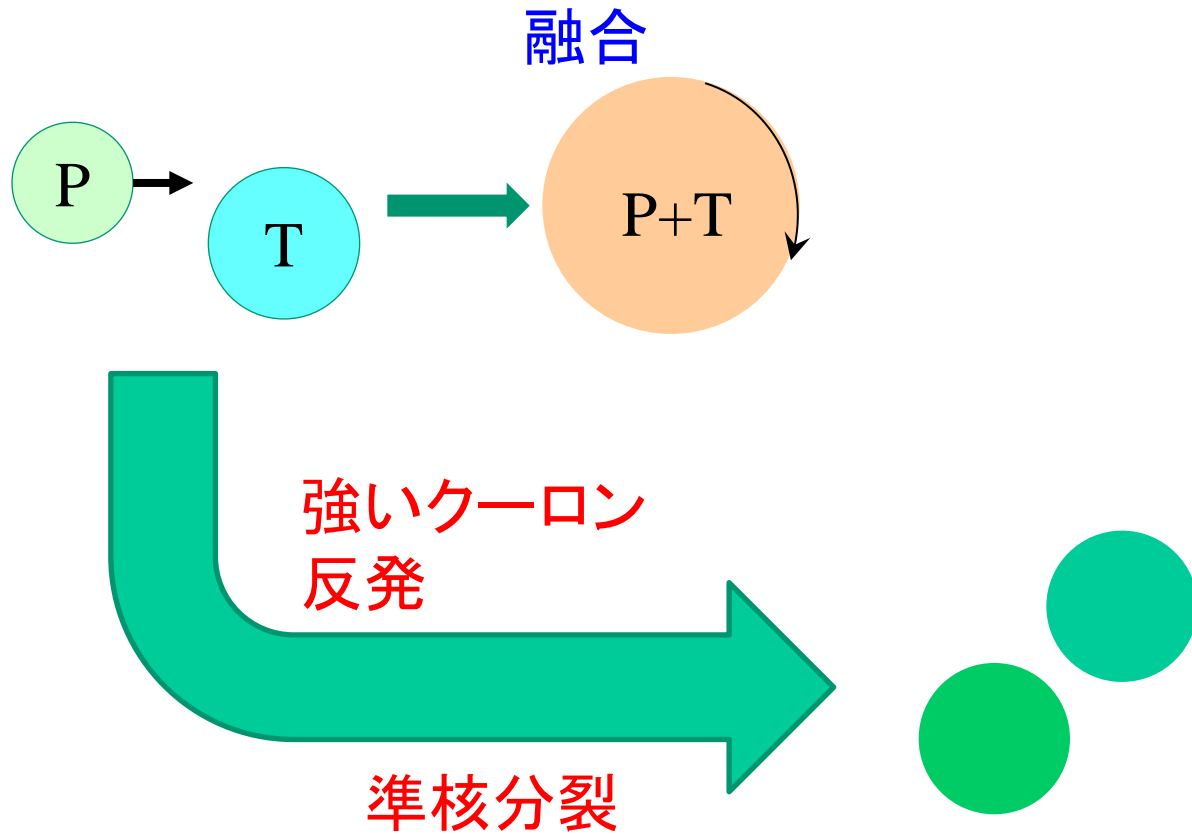
重イオン核融合反応

# 核融合反応：阻害現象



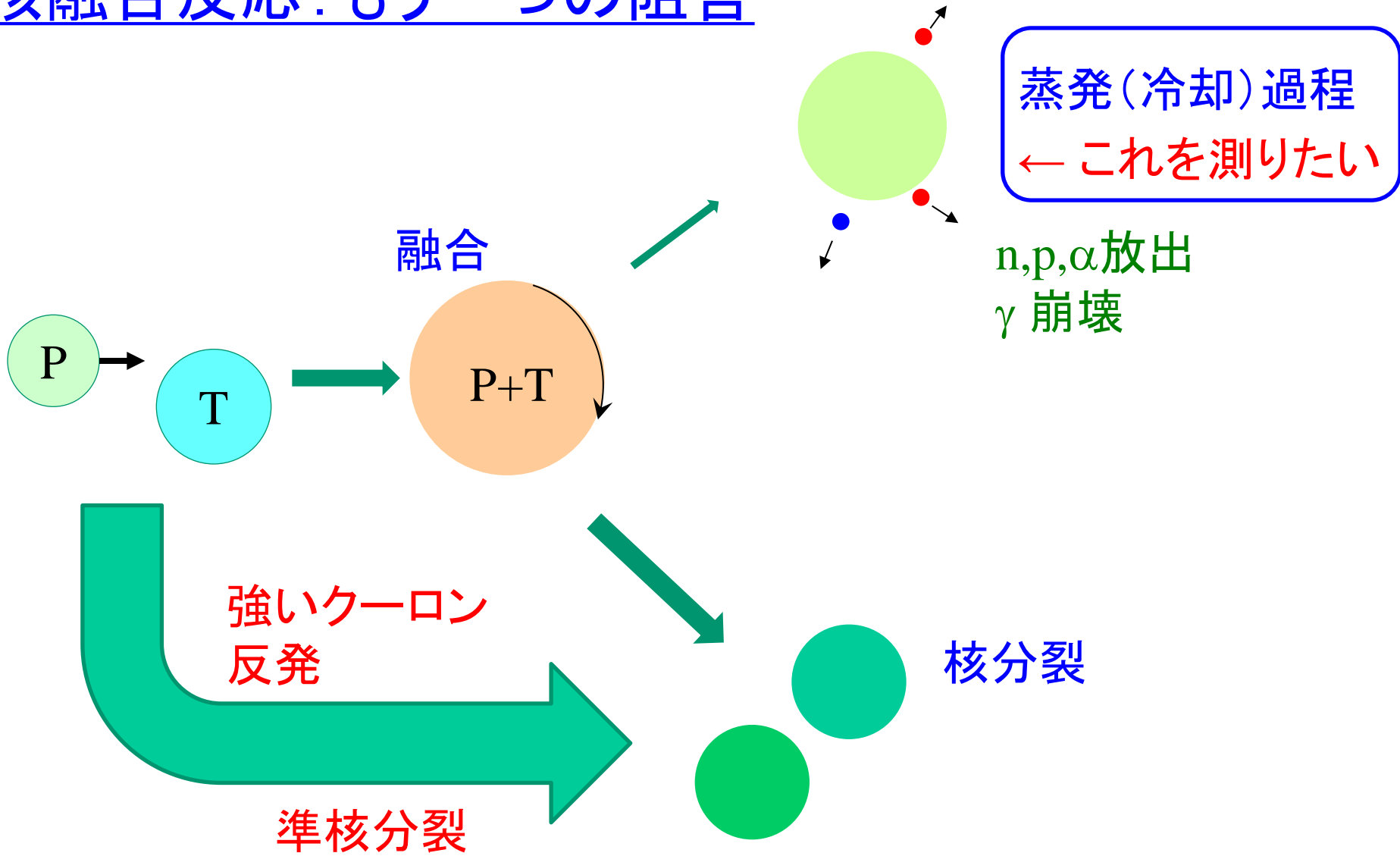
強いクーロン反発  
→ 再分離

# 核融合反応: もう一つの阻害

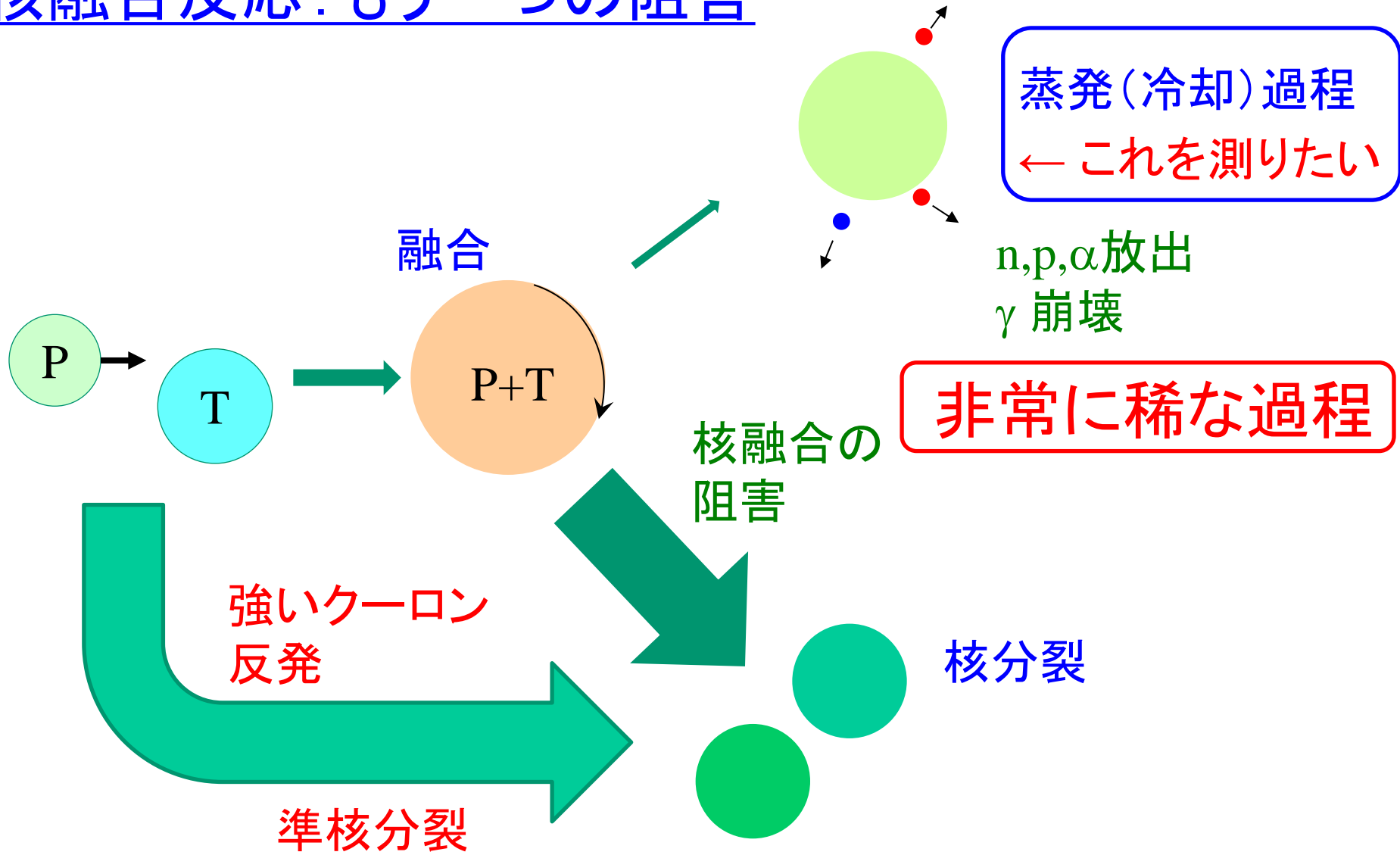




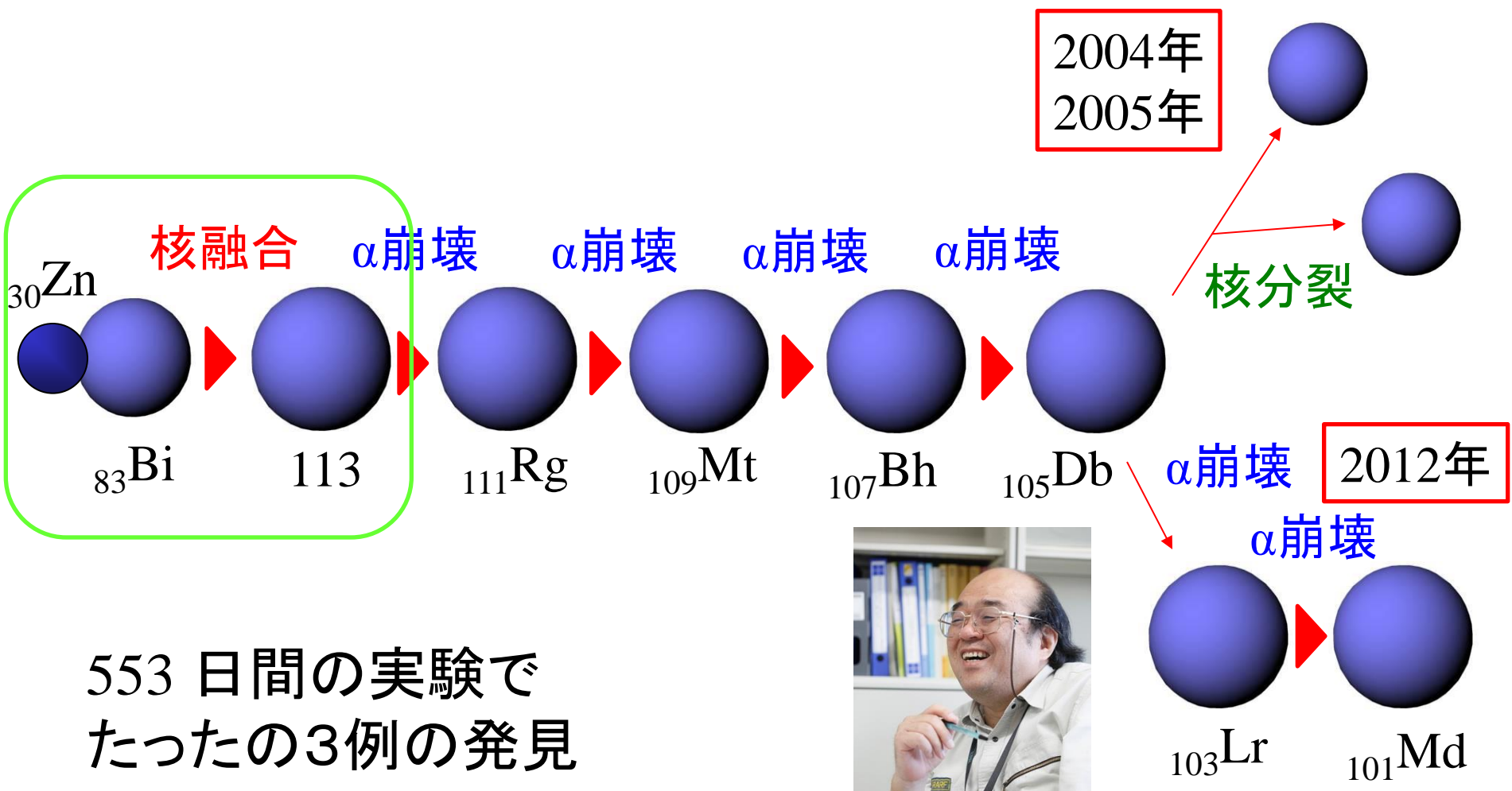
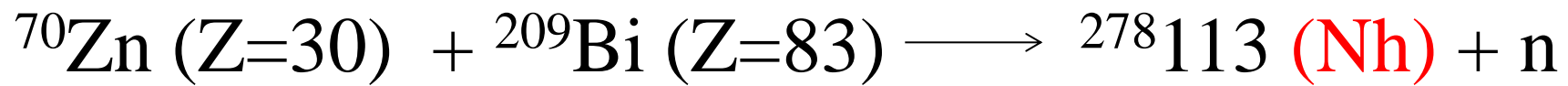
# 核融合反応: もう一つの阻害



# 核融合反応: もう一つの阻害



# 新元素113番:ニホニウム(Nh)




# 次のステップは？

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	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N			
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
8				* 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	
9				* 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	

113  
**Nh**  
nihonium

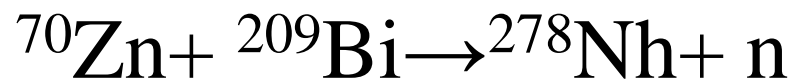
118  
**Og**  
oganeson



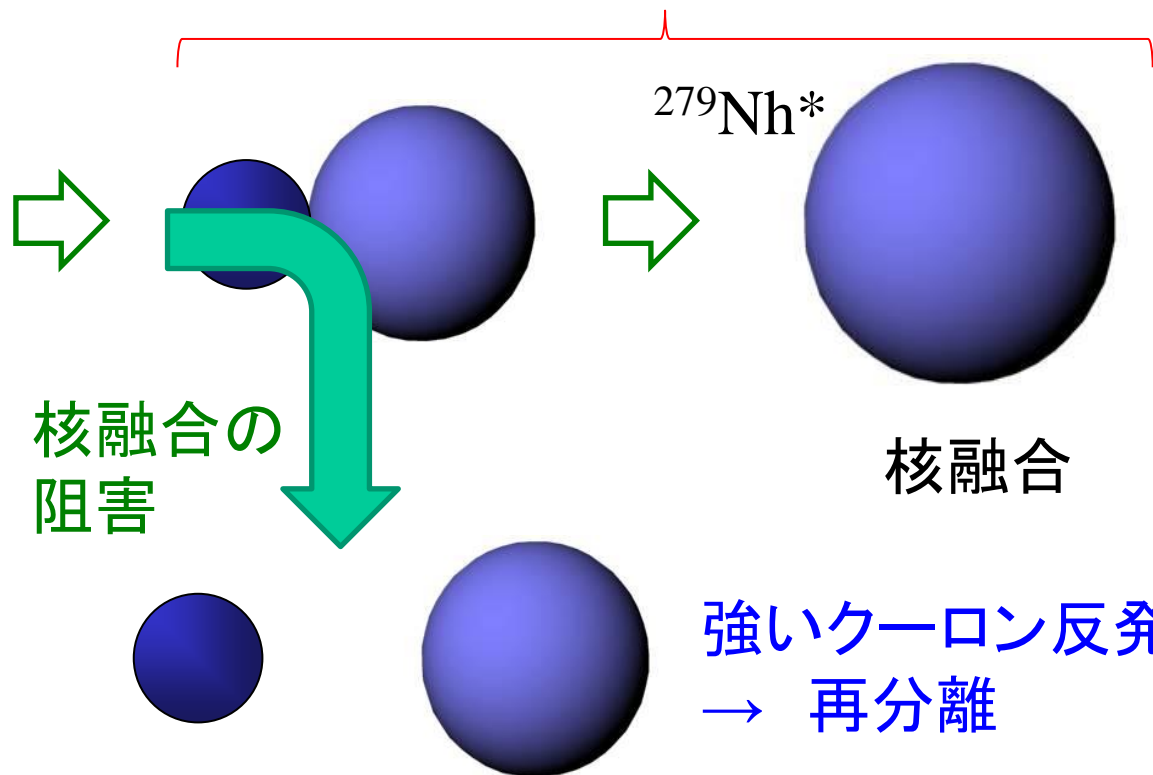
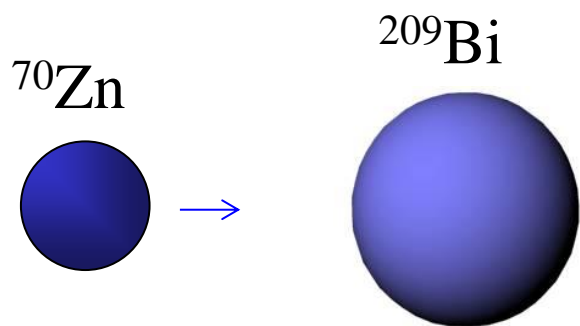
第7周期がすべて埋まる → 次は第8周期へ！

理研で119番元素の探索中

# 超重元素生成反応の理論



## 原子核形状の発展



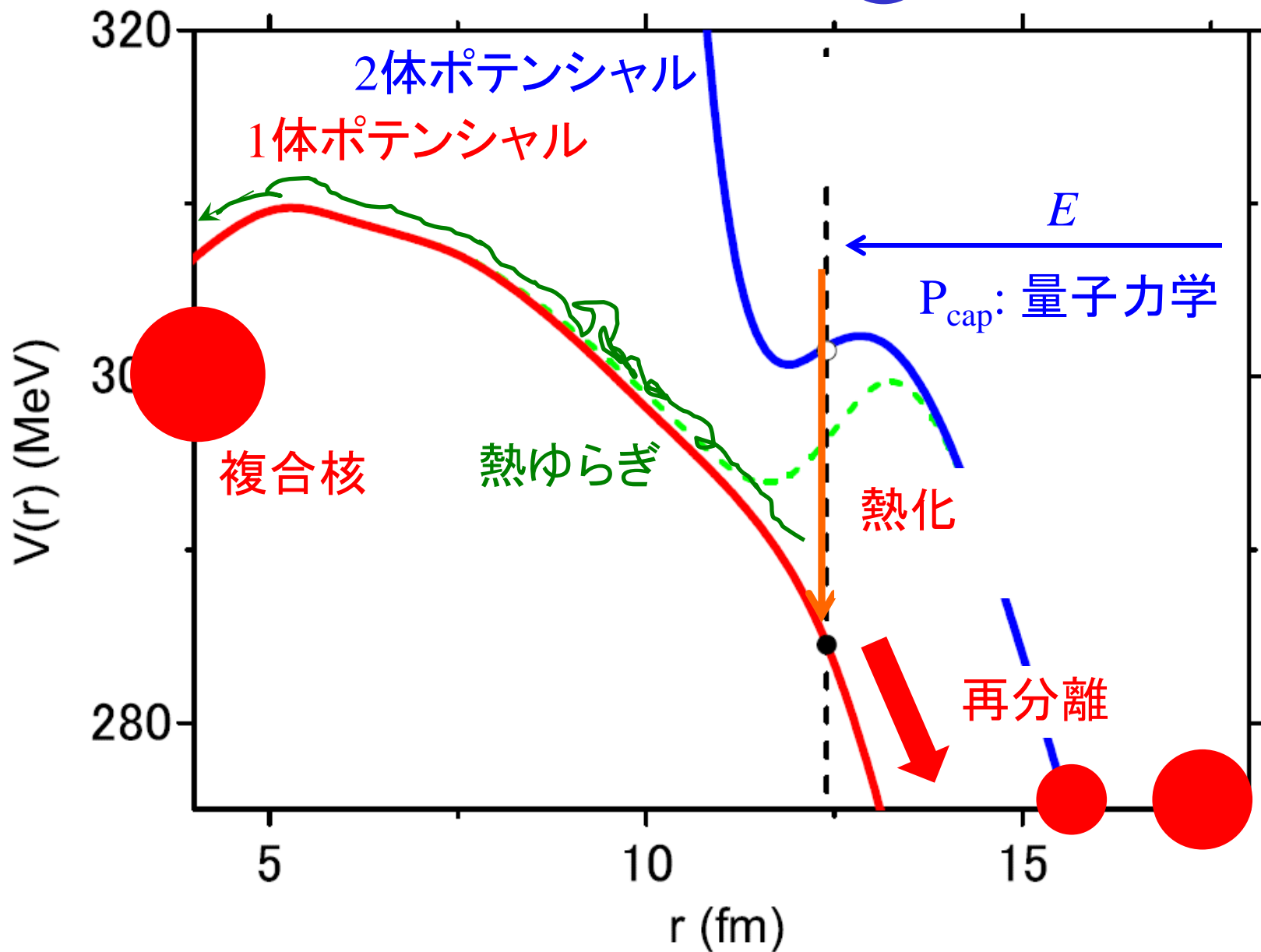
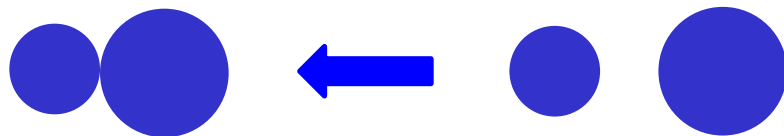
核融合の  
阻害

${}^{279}\text{Nh}^*$

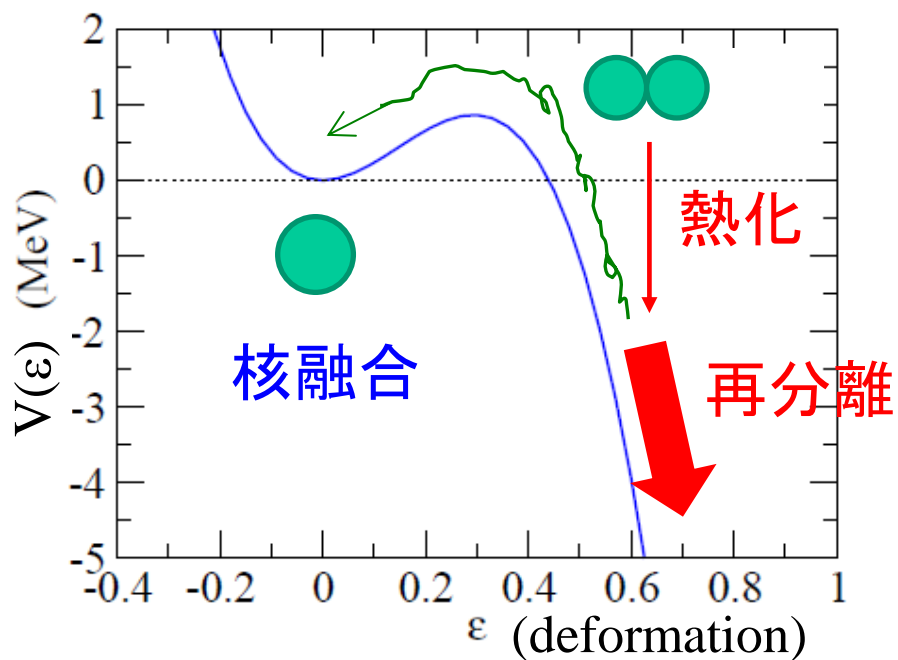
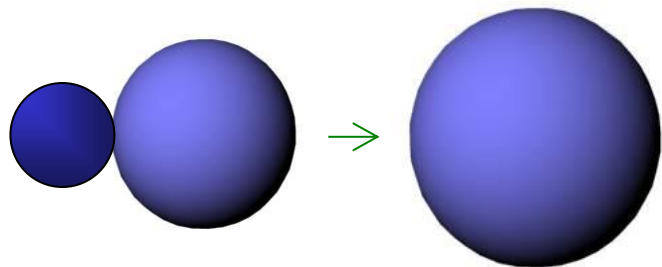
核融合

強いクーロン反発  
→ 再分離

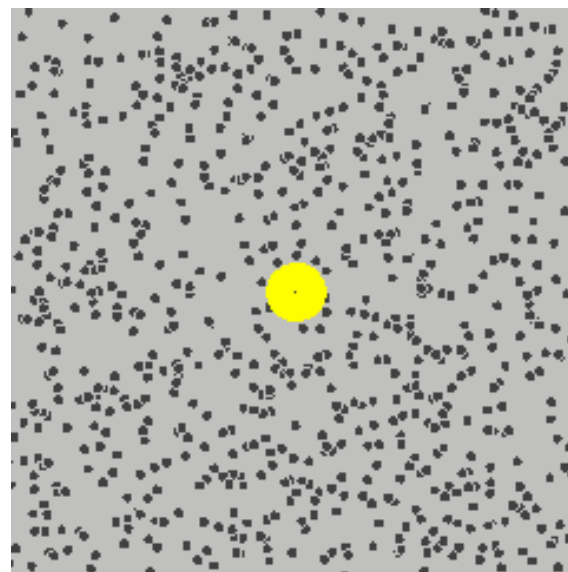
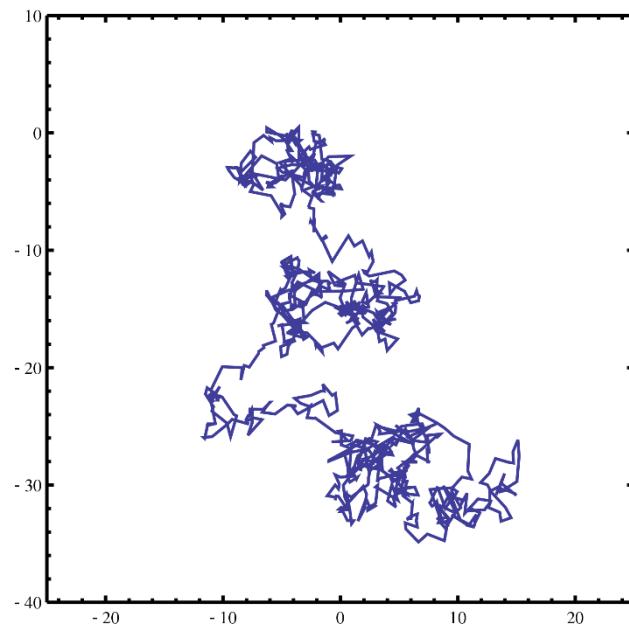
# 超重核生成反応



# 超重元素生成反応



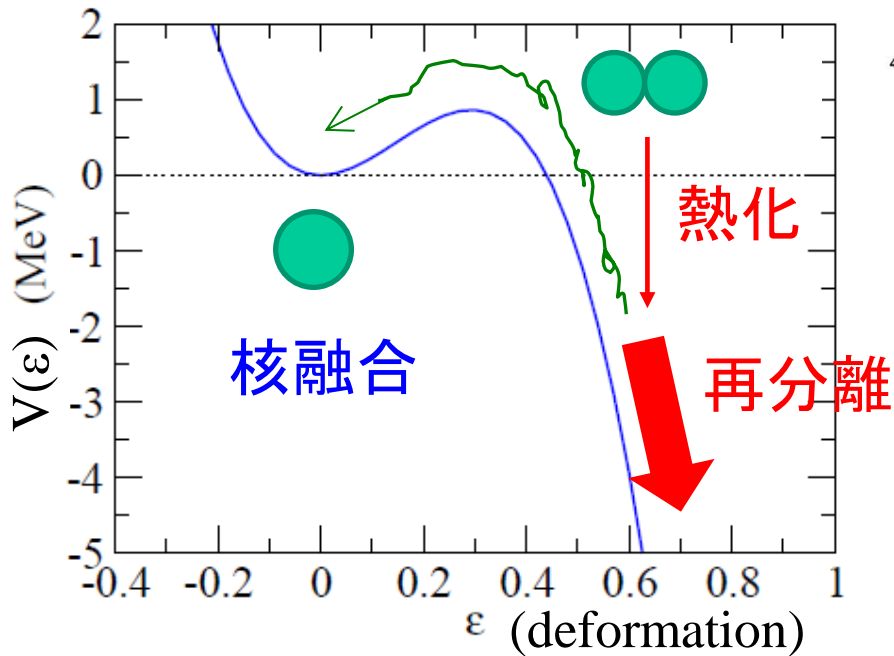
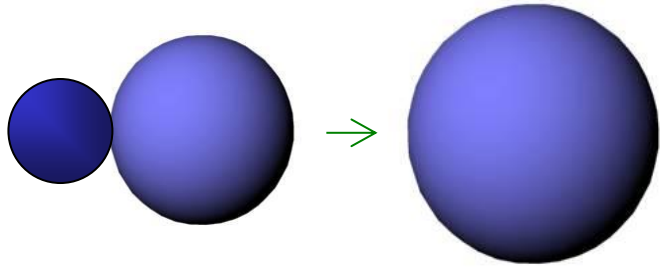
# ブラウン運動



熱的拡散 → (古典的)ランジュバン法

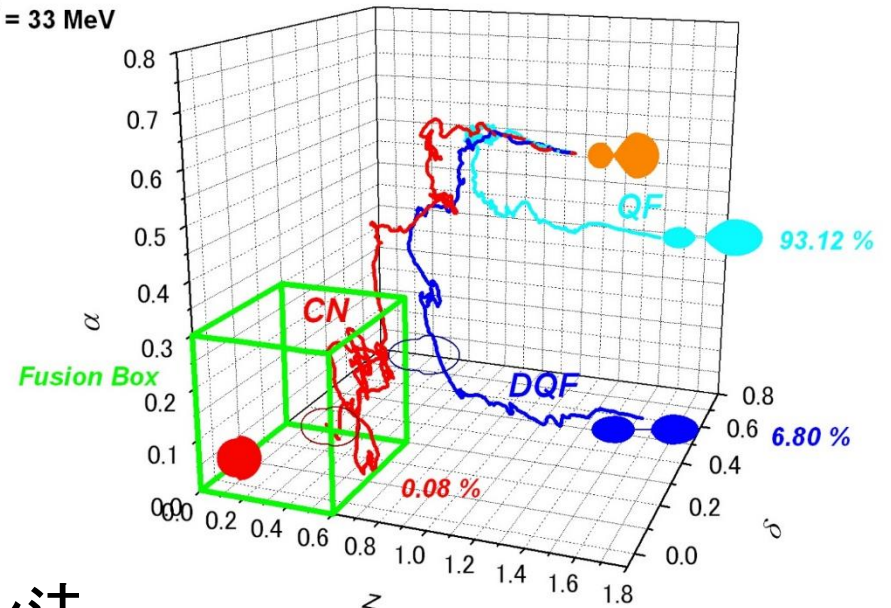
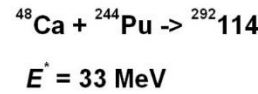
$$ma = F - \gamma v + R(t)$$

# 超重元素生成反応



## 多次元化

- $q$ : 核間距離
- 変形
- フラグメントの質量



a figure from Y. Aritomo

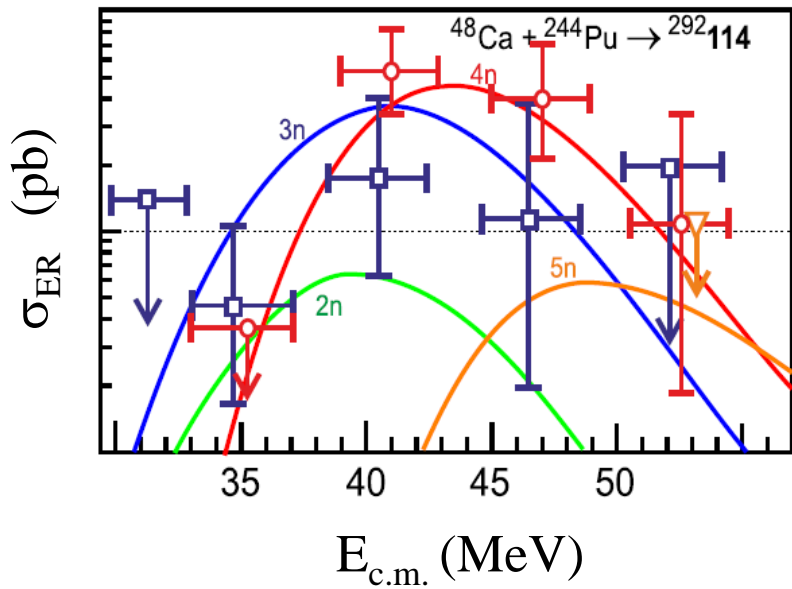
熱的拡散 → (古典的)ランジュバン法

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



# 超重元素生成反応

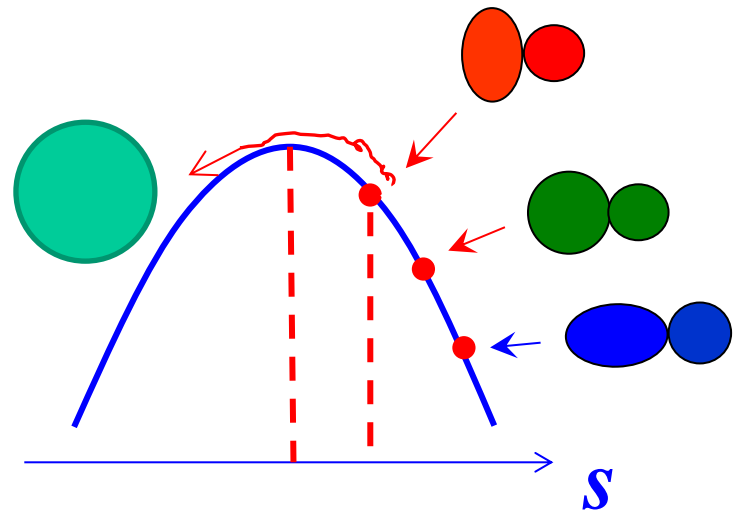
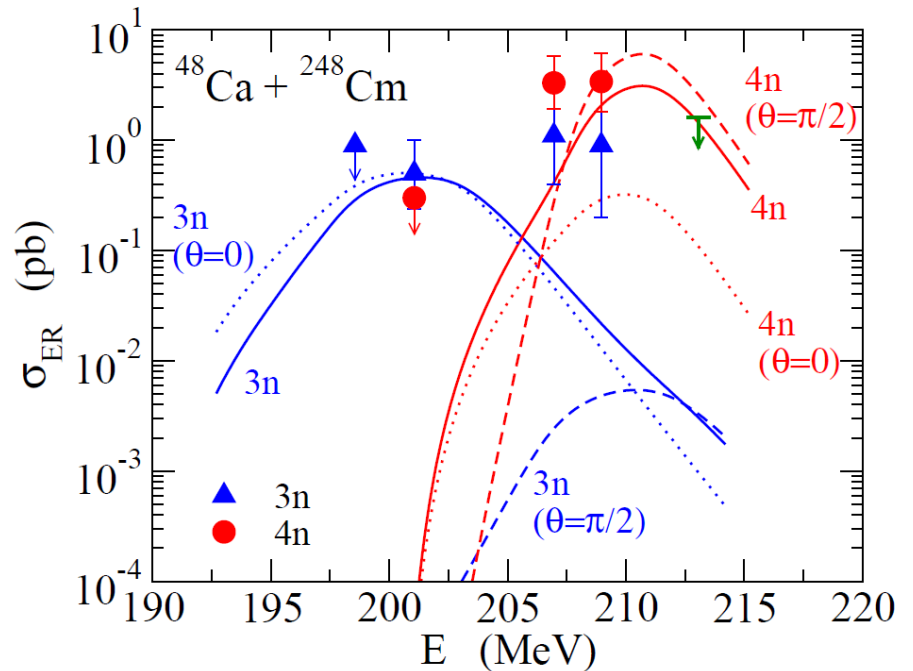
ランジュバン法：  
現象論的には成功



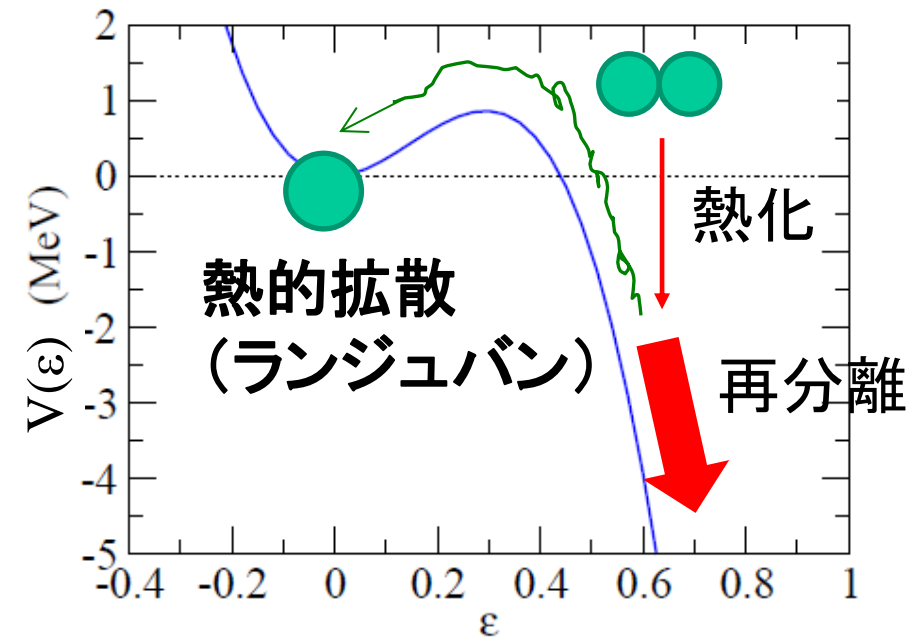
V.I. Zagrebaev and W. Greiner (2015)

# 標的核の変形が果たす役割の議論

K. Hagino, PRC98 ('18) 014607



# 超重元素生成反応：理論的課題



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

ランジュバン法は一見成功しているように見えるが:

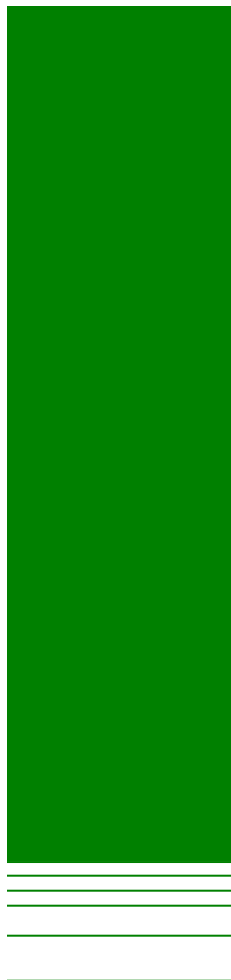
- ✓ どのように熱化するのか?
- ✓ 熱平衡の仮定?
- ✓ 非マルコフ効果
- ✓ 拡散に対する量子効果?

→「量子開放系の物理  
/摩擦の量子論」

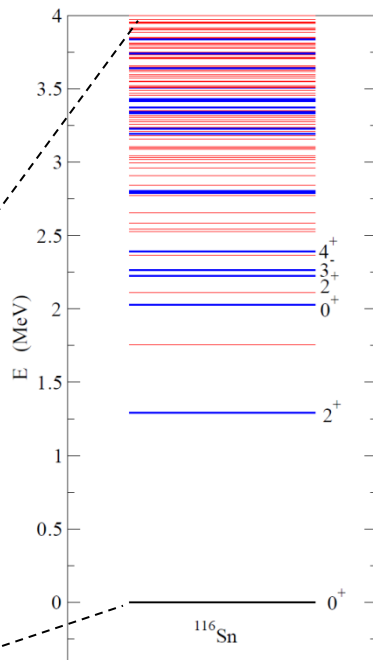
# 量子開放系としての原子核

原子核: 孤立系 → 通常の意味では外界との接触はなし (閉じた系)

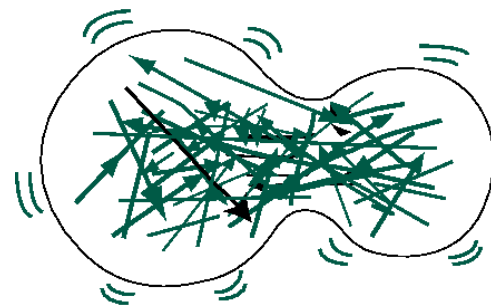
$E^*$



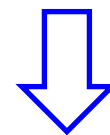
$$\rho(E) \sim e^{2\sqrt{aE^*}}$$



原子核のスペクトル



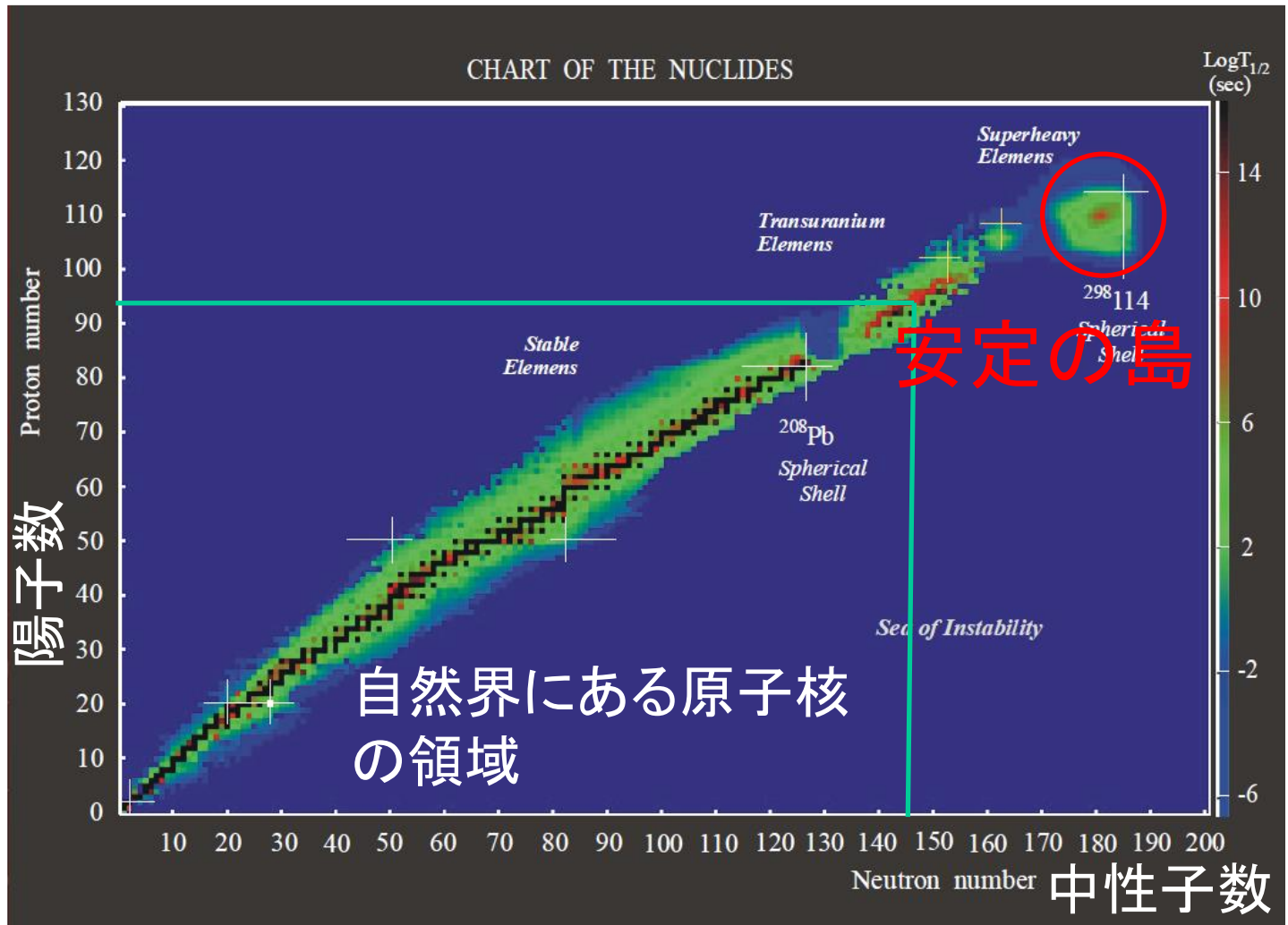
核反応の途中で原子核が複雑に励起



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

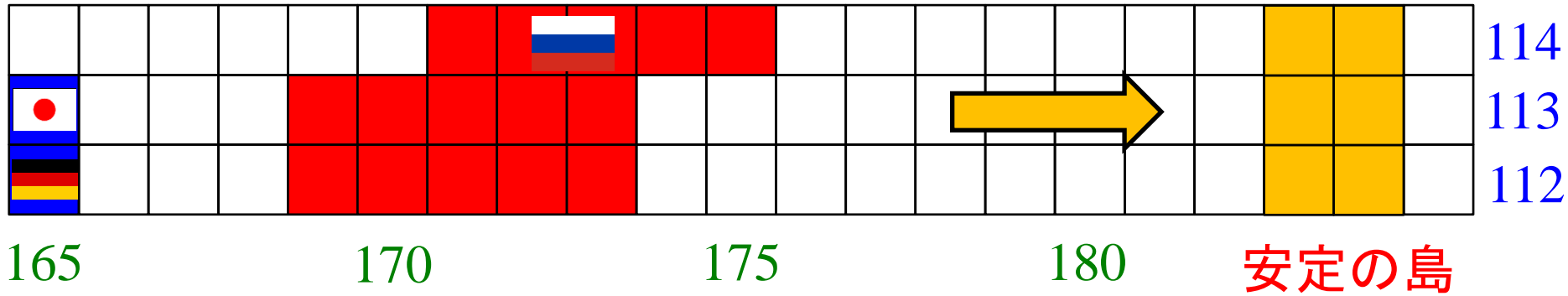
# もう一つの重要な課題



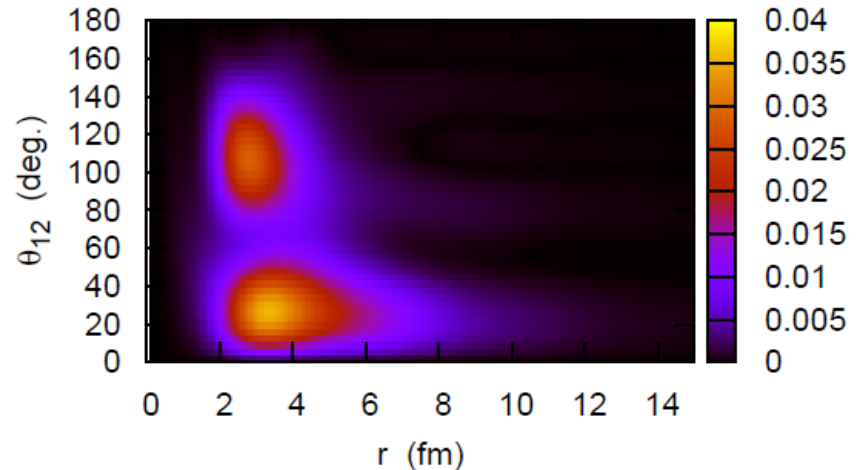
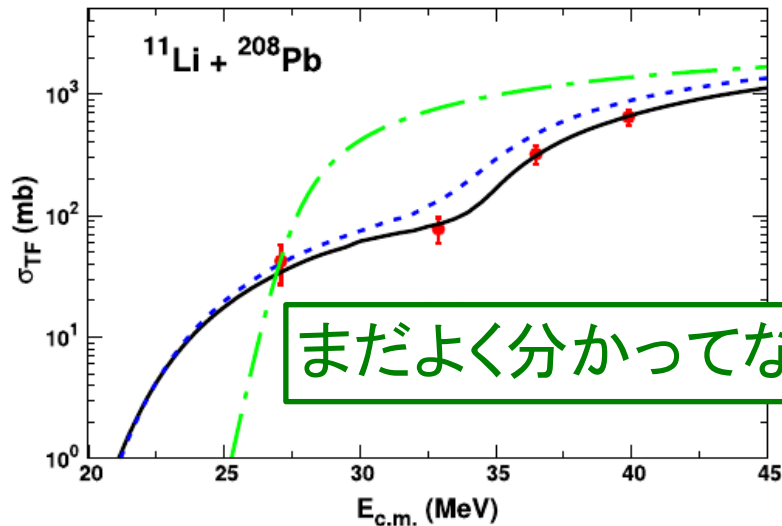
Yuri Oganessian

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?

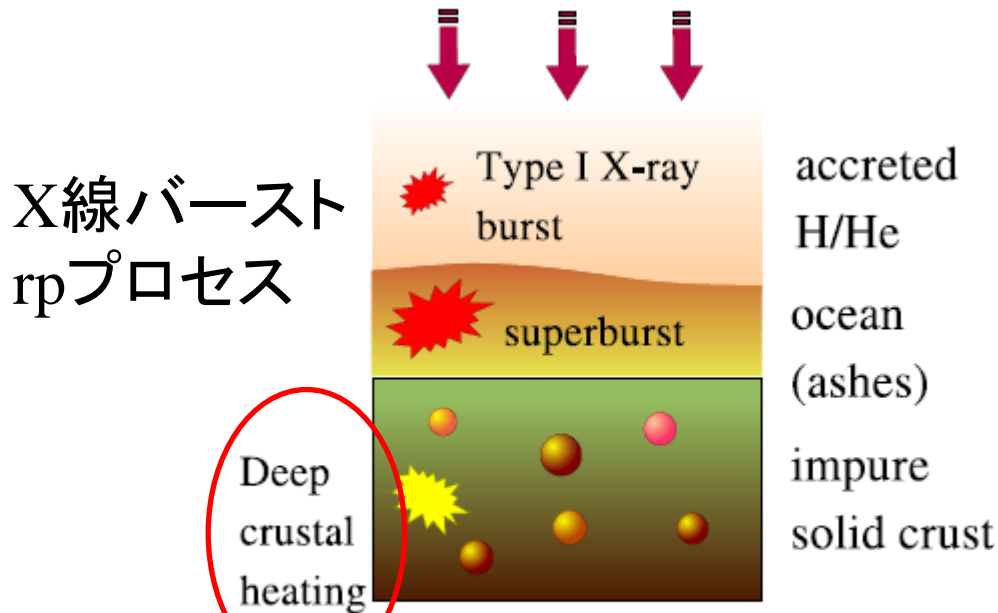


K.H. and H. Sagawa, PRC72('05)044321

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

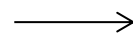
中性子過剰核の構造の理解も必要

# 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



# 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

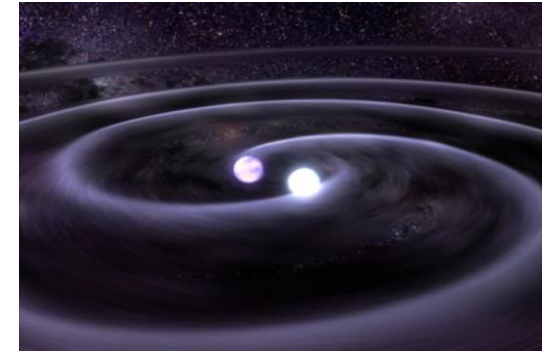
- ✓ 量子開放系の物理
- ✓ 中性子過剰核

## 超重元素の化学や物性

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	

- ✓ 超重元素と周期表
- ✓ 相対論的効果

## 宇宙物理

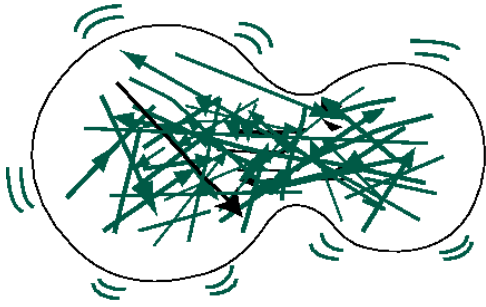


- ✓ 核物理(不安定核)
- ✓ 元素の起源
- ✓ キロノバ

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

# まとめ

## 量子開放系としての原子核における非平衡ダイナミクス



原子核の内部自由度→内的環境の自由度  
→ 原子核: 他の系にないユニークな性質

### ➤ 超重元素生成反応

ランジュバン法が現象論的には成功

理論的な課題:

- ✓ どのように熱化するのか?
- ✓ 非マルコフ効果?
- ✓ 拡散に対する量子補正?
- ✓ 核変形の時間変化?

→量子開放系の物理

### ➤ 誘起核分裂

低エネルギーで適用可能な  
微視的理論の必要性

cf. r-プロセス元素合成

殻模型+

非平衡グリーン関数法を開発中

物性の量子輸送の問題と類似

非平衡グリーン関数法を  
超重元素生成反応に適用すると?