

2019

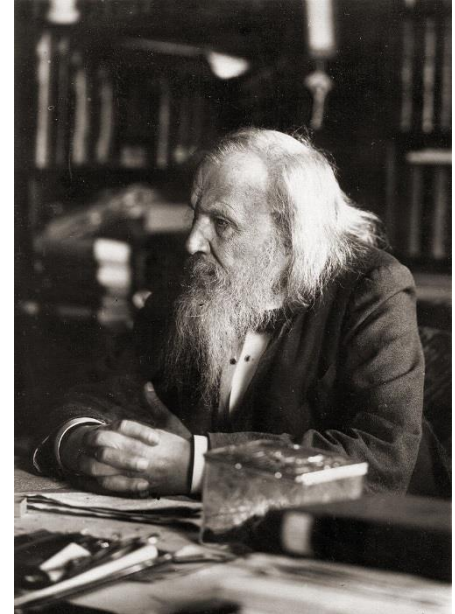
IYPT



元素の周期表(1869年)



International Year
of the Periodic Table
of Chemical Elements



メンデレーエフ
(1834-1907)

今年(令和元年)は周期表
150周年の記念の年
(国際周期表年)

超重元素



超重元素の世界

～ニホニウムの先にあるもの～

萩野浩一
京都大学大学院理学研究科



— 今日お話ししたいこと —

1. はじめに: 超重元素について
2. 核融合反応と超重元素
3. 今後の展望: 第8周期元素に向けて
4. 今後の展望2: 安定の島に向けて
5. おわりに



このロゴマークに書かれている元素は何？

このロゴマークに書かれている
元素は何？



Md (Z=101) **メンデレビウム**

H (Z=1)

C (Z=6)

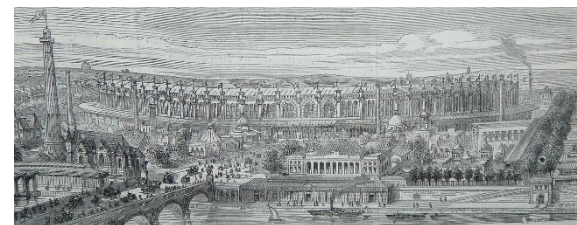
N (Z=7)

O (Z=8)

1876?

1867?

周期表
1869年



パリ万博(1867年)

メンデレーエフの名前
(ロシア文字)? Менделеев

CHON?

NOCH?

どうも違う...

このロゴマークに書かれている
元素は何？



Md (Z=101) メンデレビウム



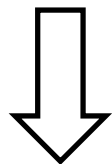
体重70kg

酸素 (O) 43 kg
炭素 (C) 16 kg
水素 (H) 7 kg
窒素 (N) 1.8 kg
カルシウム (Ca) 1.0 kg

ところで.....

メンデレーエフの子孫がもしかしたら日本に?

メンデレーエフの息子
ウラジミール



- ✓ ロシア海軍の軍人
- ✓ 1891年ころ長崎に滞在



秀島タカとフジ
ウラジミールの
奥さんと娘(?)



Q. 元素は何種類くらいあるでしょうか？

1. 約90種類
2. 118種類
3. よくわかっていない

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	

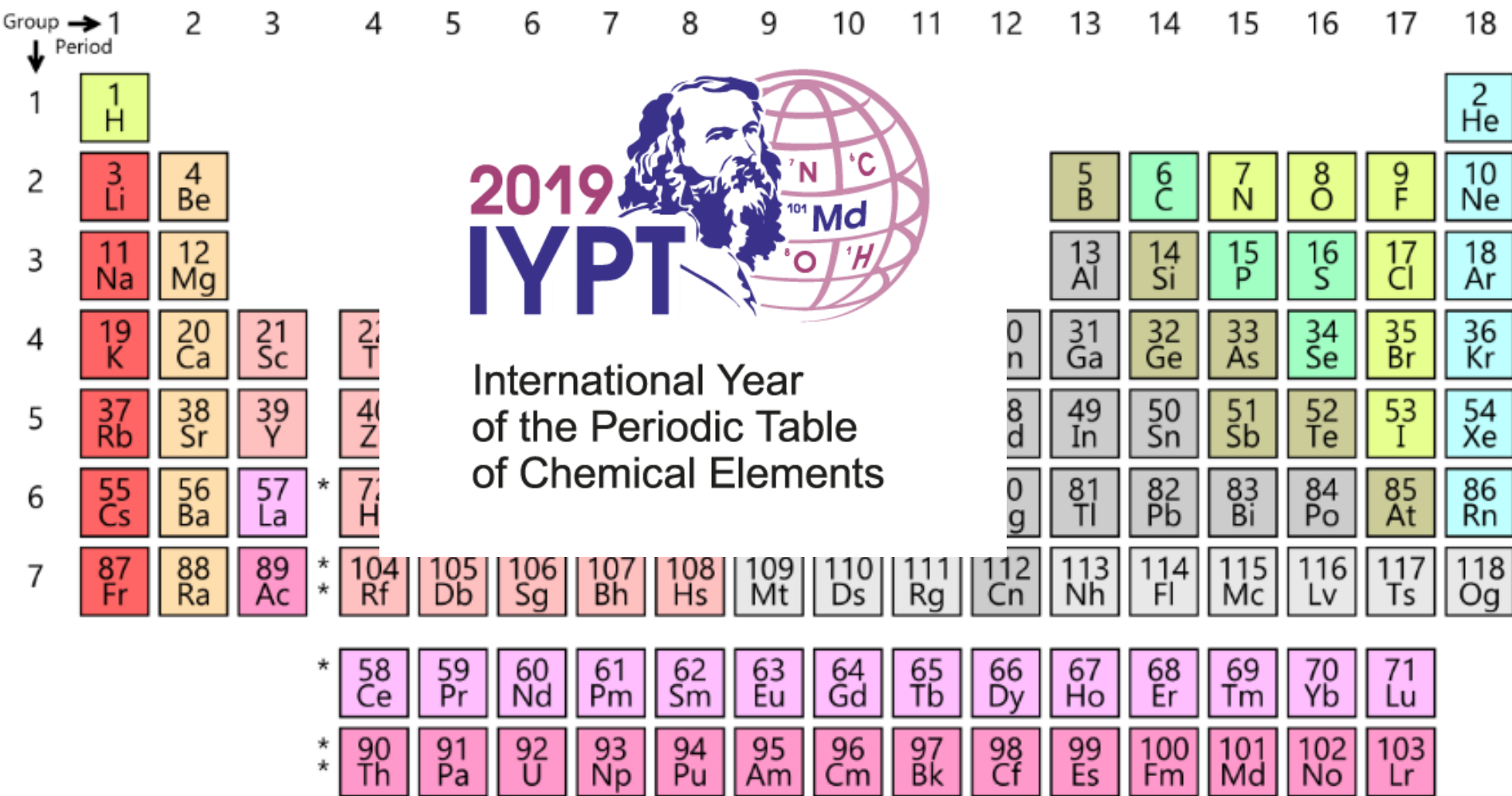


2019
IYPT
International Year
of the Periodic Table
of Chemical Elements

Q. 元素は何種類くらいあるでしょうか？

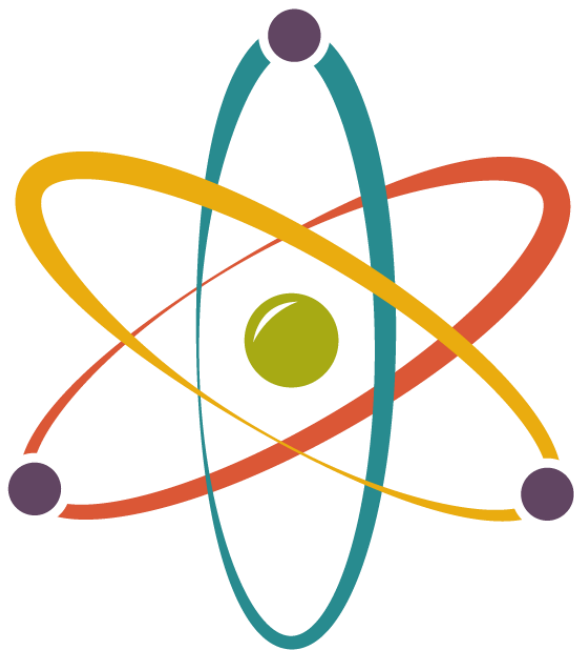
1. 約90種類
2. 118種類
3. よくわかっていない

実は全部正解



1. 約90種類 → 自然にある元素の種類
2. 118種類 → これまでに確認された元素の種類
3. よくわかっていない → 何種類まであるのかはまだ謎

何が元素の存在限界を決めているのか？



**INTERNATIONAL
YEAR OF THE
PERIODIC TABLE
2019**

考えなければならない可能性：

- ✓ 原子の中の電子軌道
- ✓ 原子の中の原子核の安定性

何が元素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:

まず

- ✓ 原子の中の電子軌道
- ✓ 原子の中の原子核の安定性

何が元素の存在限界を決めているのか? i) 原子中の電子の軌道

水素様原子

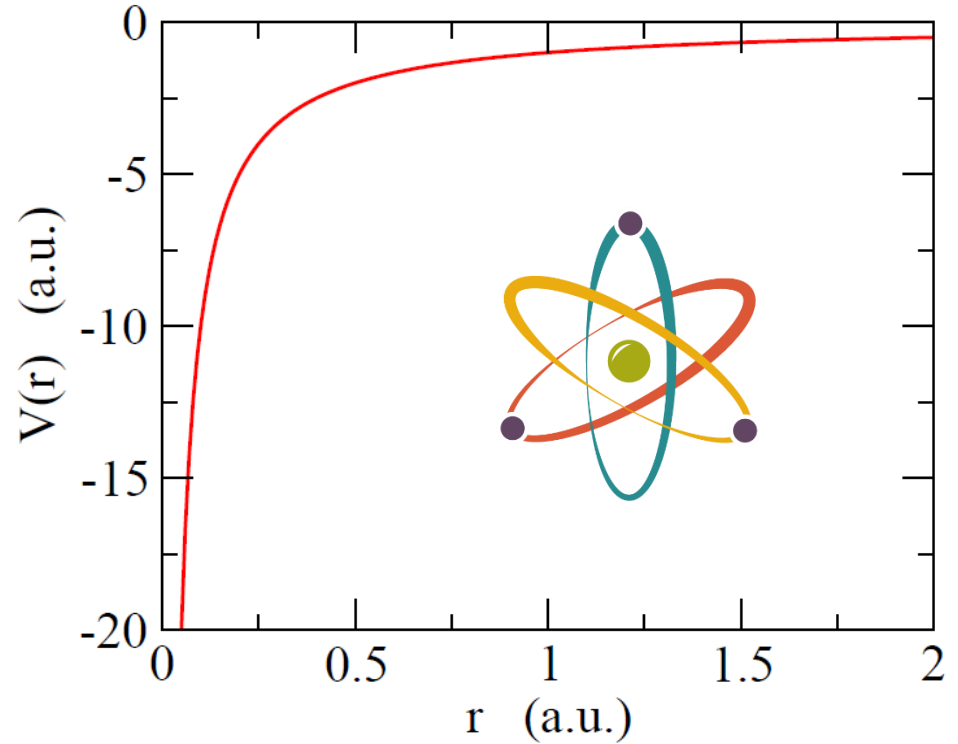
$$V(r) = -\frac{Ze^2}{r}$$

1S 状態

$$E_{1S} = -Z^2 \cdot \frac{me^4}{2\hbar^2}$$

$Z \rightarrow$ 大、 $E_{1S} \rightarrow$ 小

$\langle r \rangle \rightarrow$ 小



何が元素の存在限界を決めているのか？ i) 原子中の電子の軌道

水素様原子

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

1S 状態

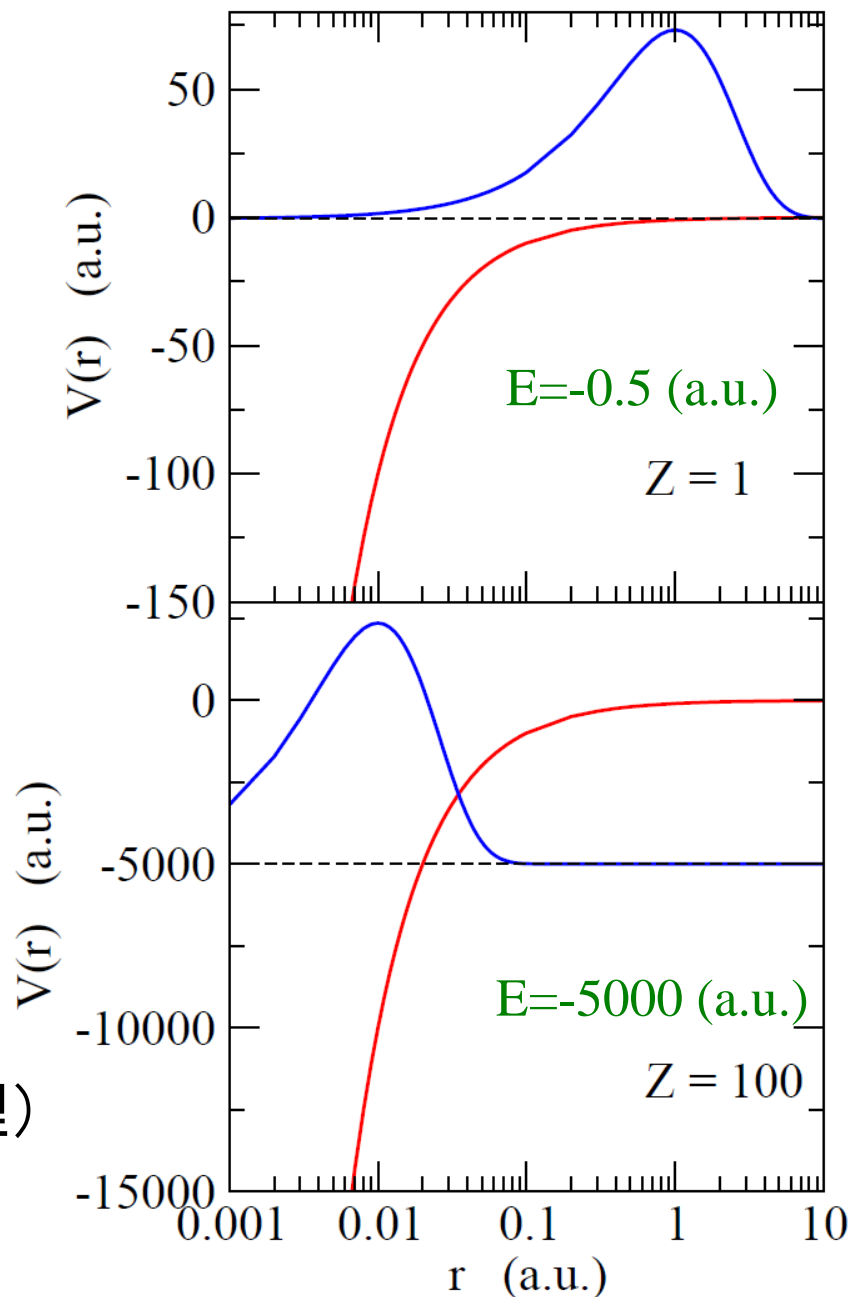
$$E_{1S} = -Z^2 \cdot \frac{me^4}{2\hbar^2}$$

$Z \rightarrow$ 大、 $E_{1S} \rightarrow$ 小

$\langle r \rangle \rightarrow$ 小

$\langle p \rangle \rightarrow$ 大 (不確定性原理)

➡ 相対論的效果



何が元素の存在限界を決めているのか？ i) 原子中の電子の軌道

水素様原子

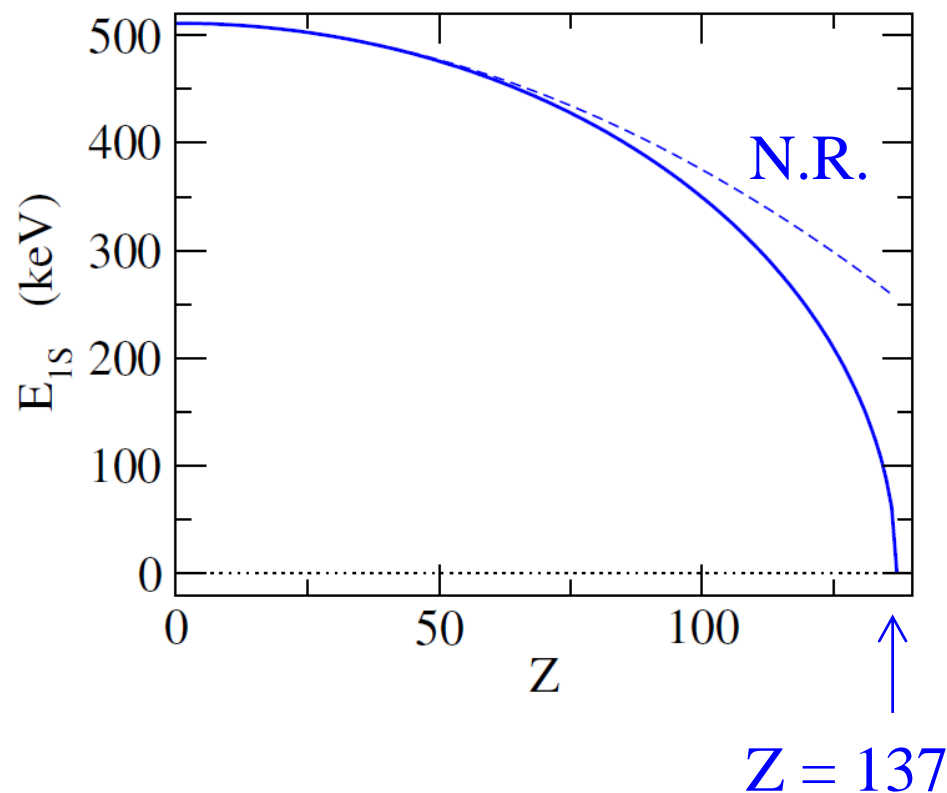
$$V(r) = -\frac{Ze^2}{r}$$

1S 状態 (ディラック方程式)

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

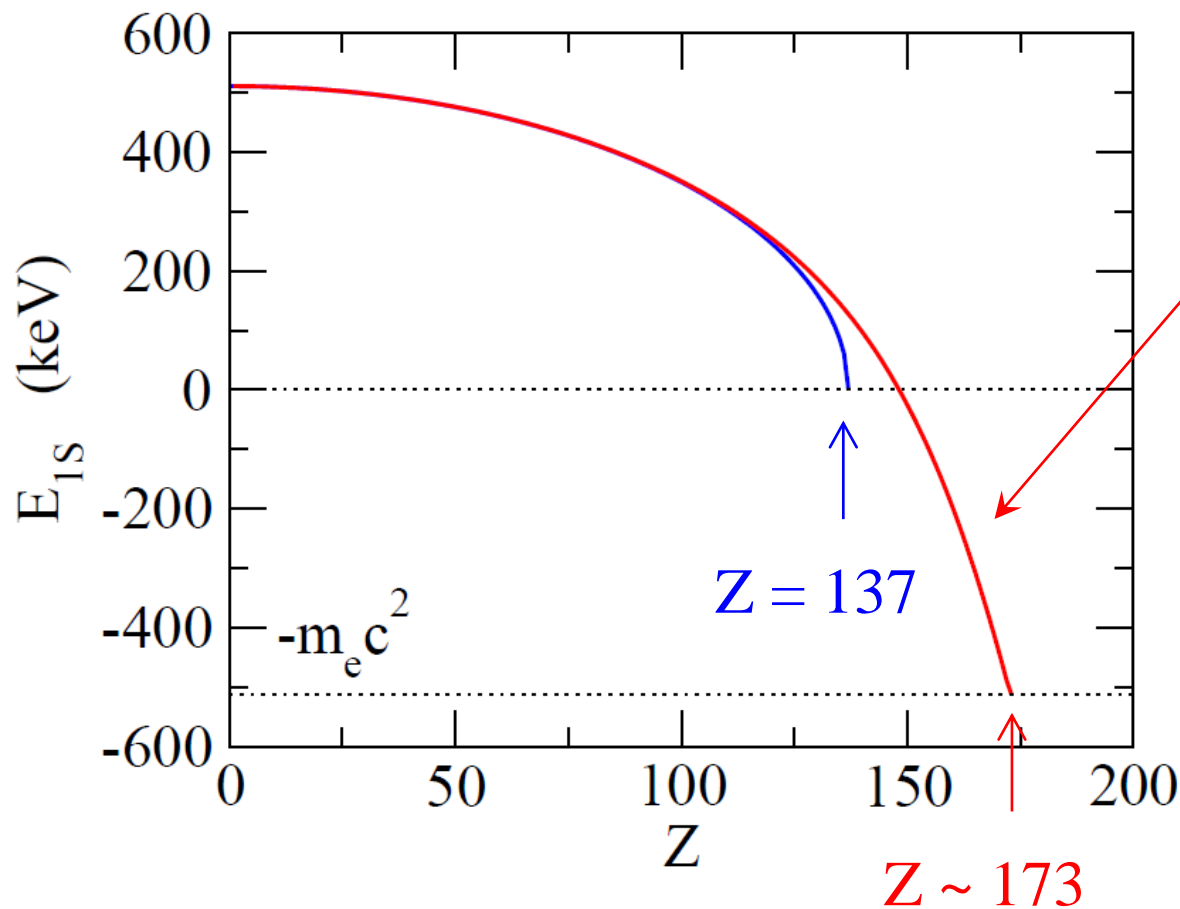
$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \sim \frac{1}{137}$$

$Z > 137 \rightarrow$ 解は存在せず
(真空崩壊)



何が元素の存在限界を決めているのか？ i) 原子中の電子の軌道

水素様原子



原子核の有限
サイズ効果
(一様帯電球
を仮定)

$R_N \sim 10^{-4} \text{ \AA}$
 $r_{ms} \sim 10^{-3} \text{ \AA}$
($A=173$)

何が元素の存在限界を決めているのか？



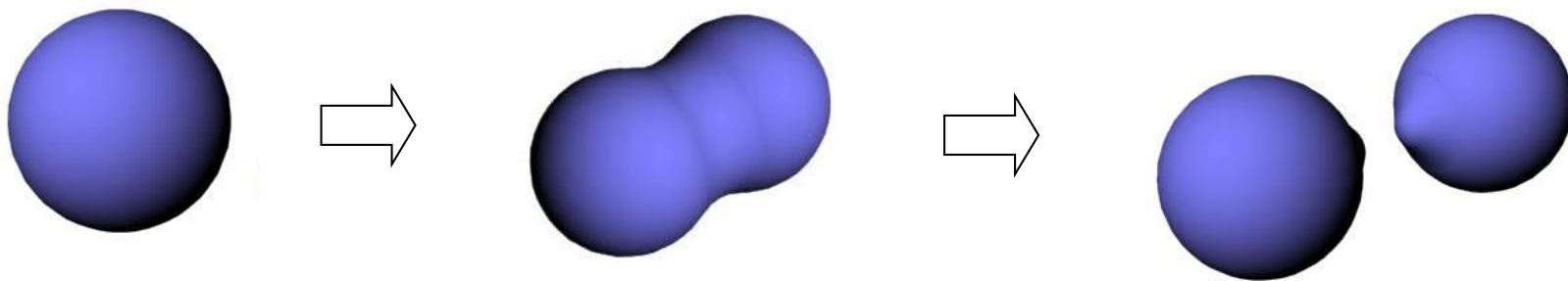
考えなければならない可能性：

次に

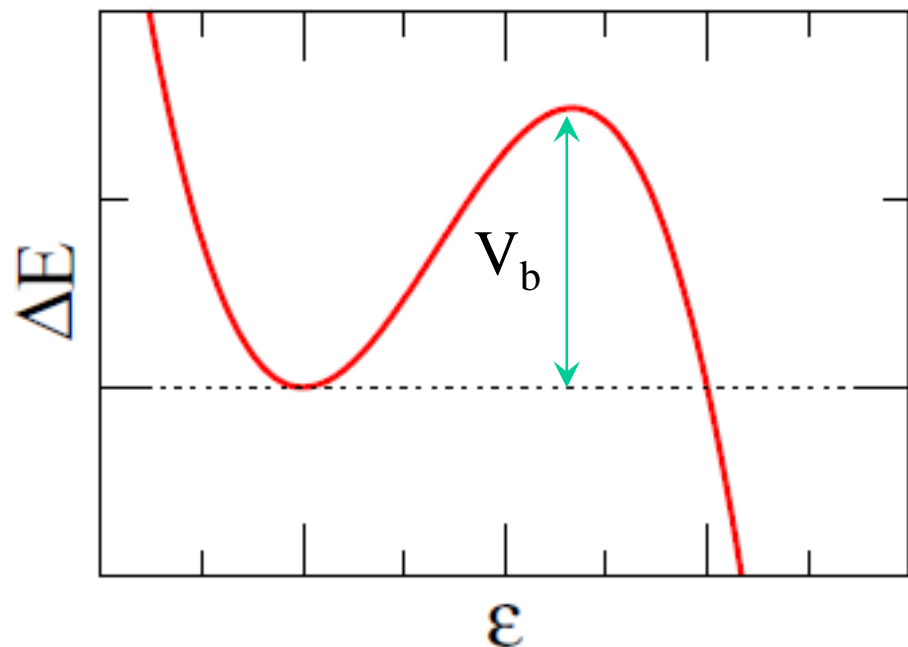
- ✓ 原子の中の電子軌道
- ✓ **原子の中の原子核の安定性**

何が元素の存在限界を決めているのか? ii) 原子中の原子核の寿命

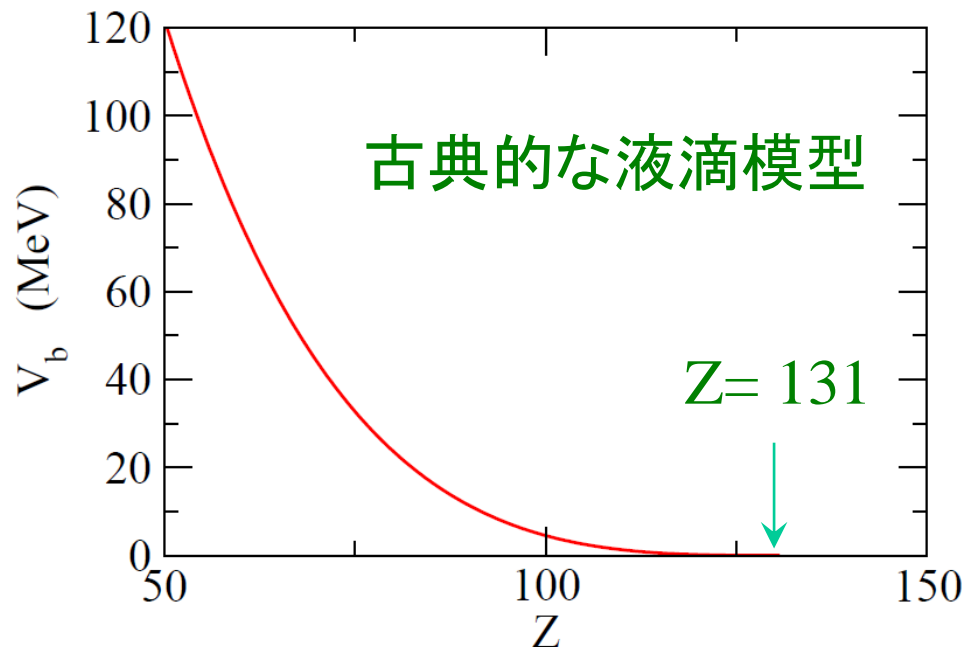
重い原子核 → 核分裂



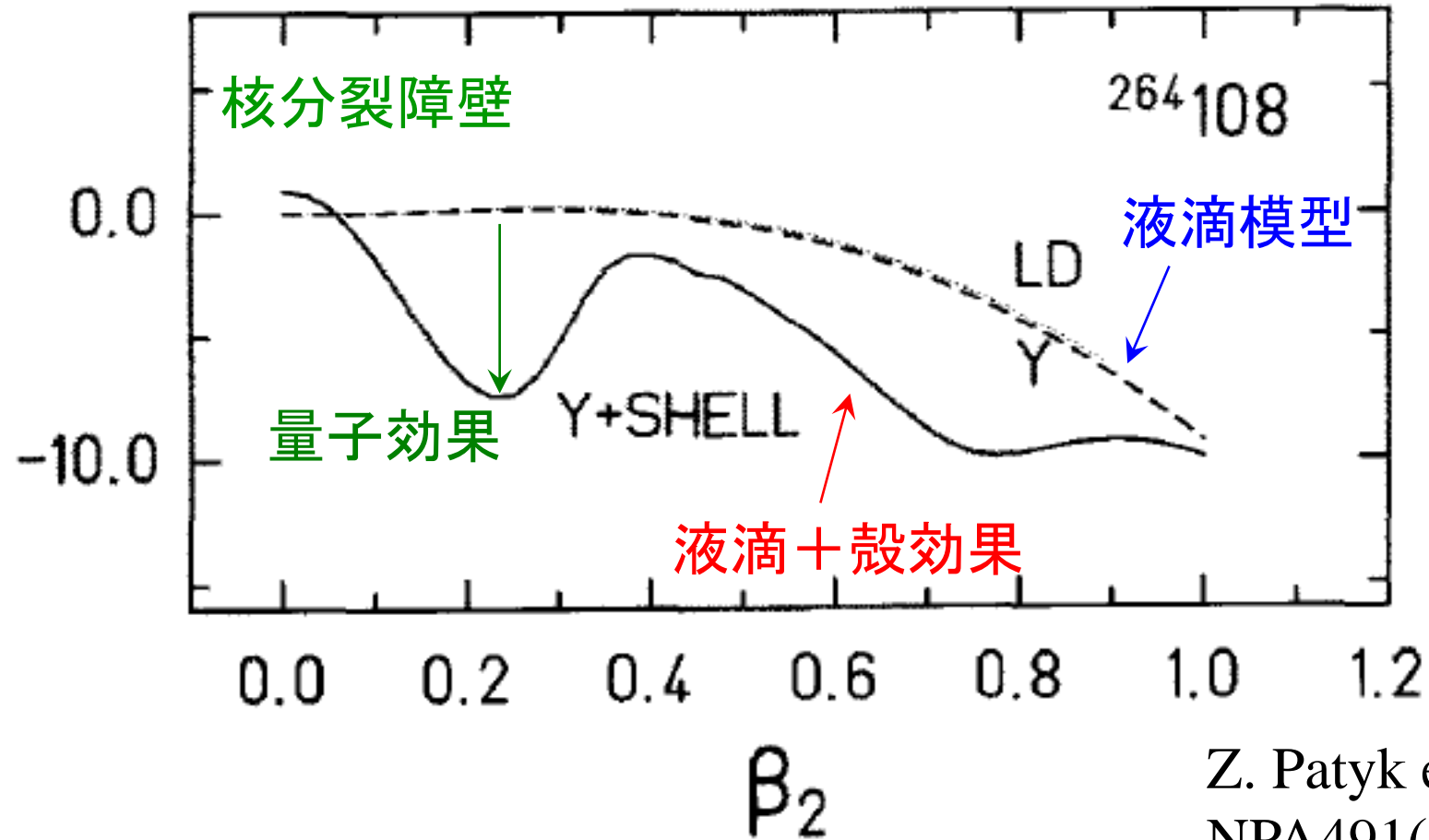
核分裂障壁



障壁の高さ



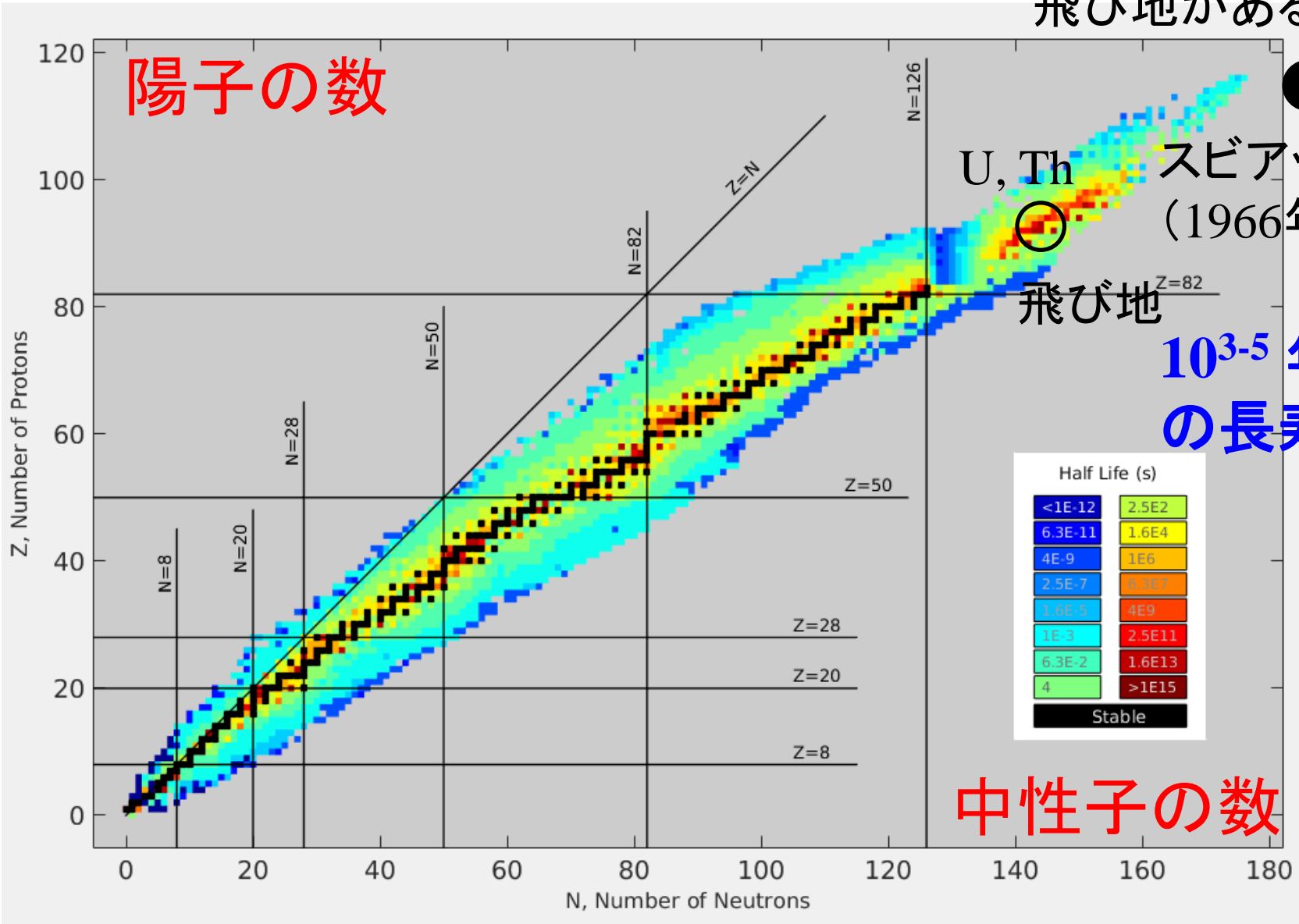
何が元素の存在限界を決めているのか？ ii) 原子中の原子核の寿命



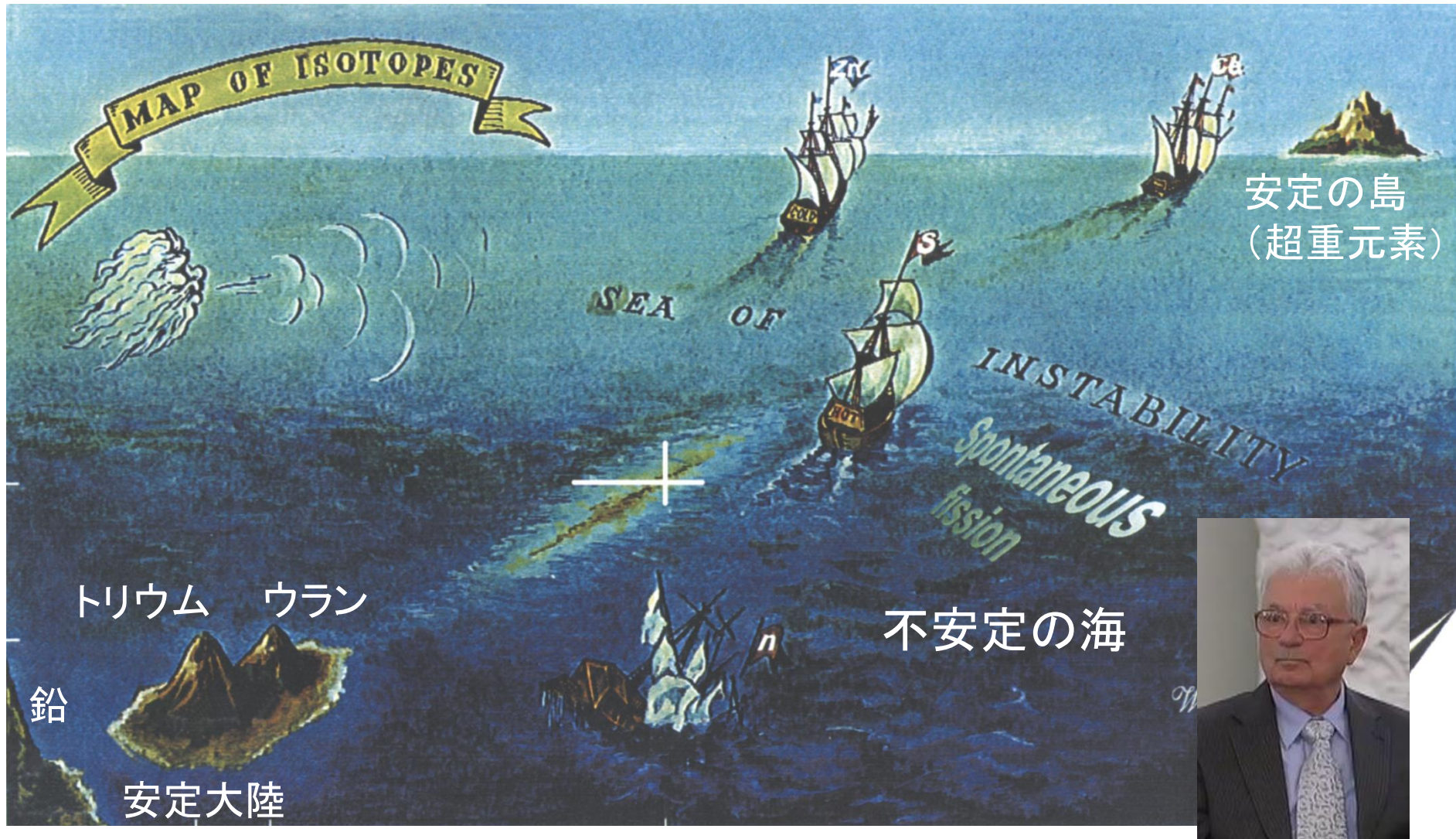
量子力学的効果(魔法数の効果)により核分裂障壁が高くなり原子核が安定化する

超重元素(安定の島)

この辺りにも安定の飛び地があるかも?



安定の島(超重元素)を目指して



描画はYuri Oganessian 氏

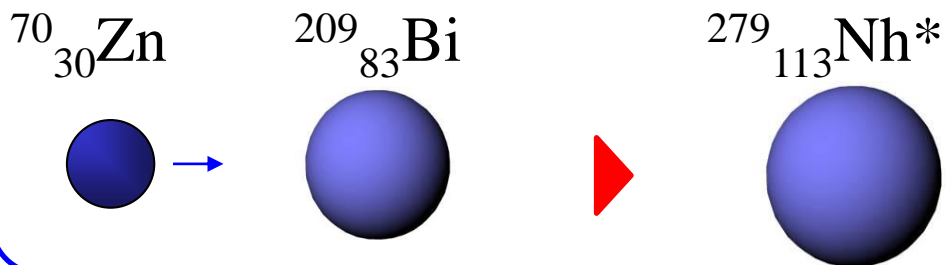
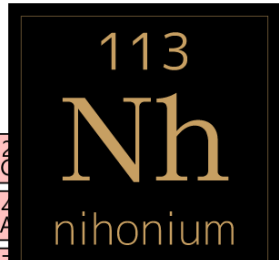
113番元素ニホニウム Nh

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

2016年11月



Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											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

ところで



中国

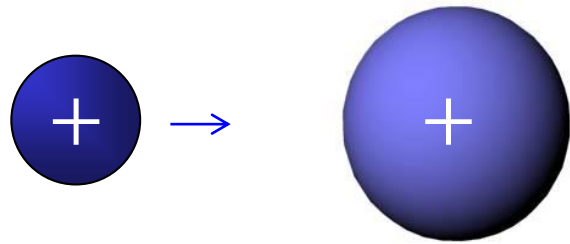
「国家語言委員会」が新しい漢字を制定

石田さん：周期表に名前が載っています！

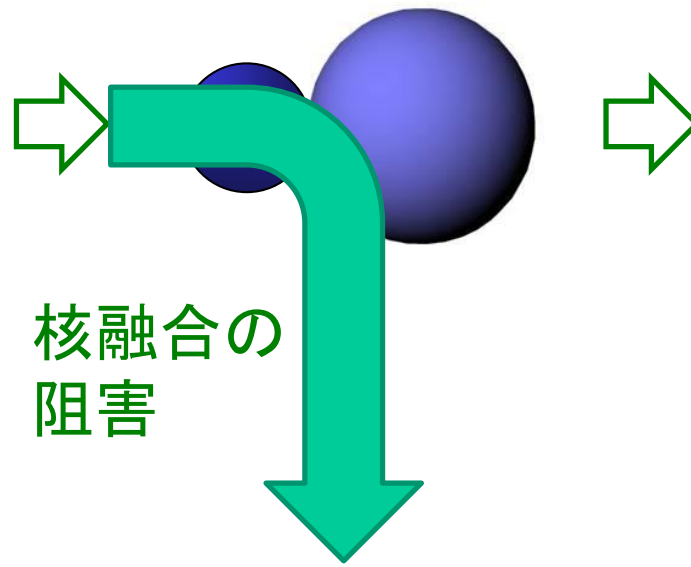
金田さん：惜しかったです！

115番がテネシンだったら周期表に名前が載っていました

核融合反応：阻害現象



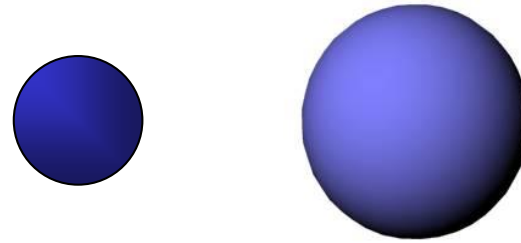
加速器



核融合の
阻害

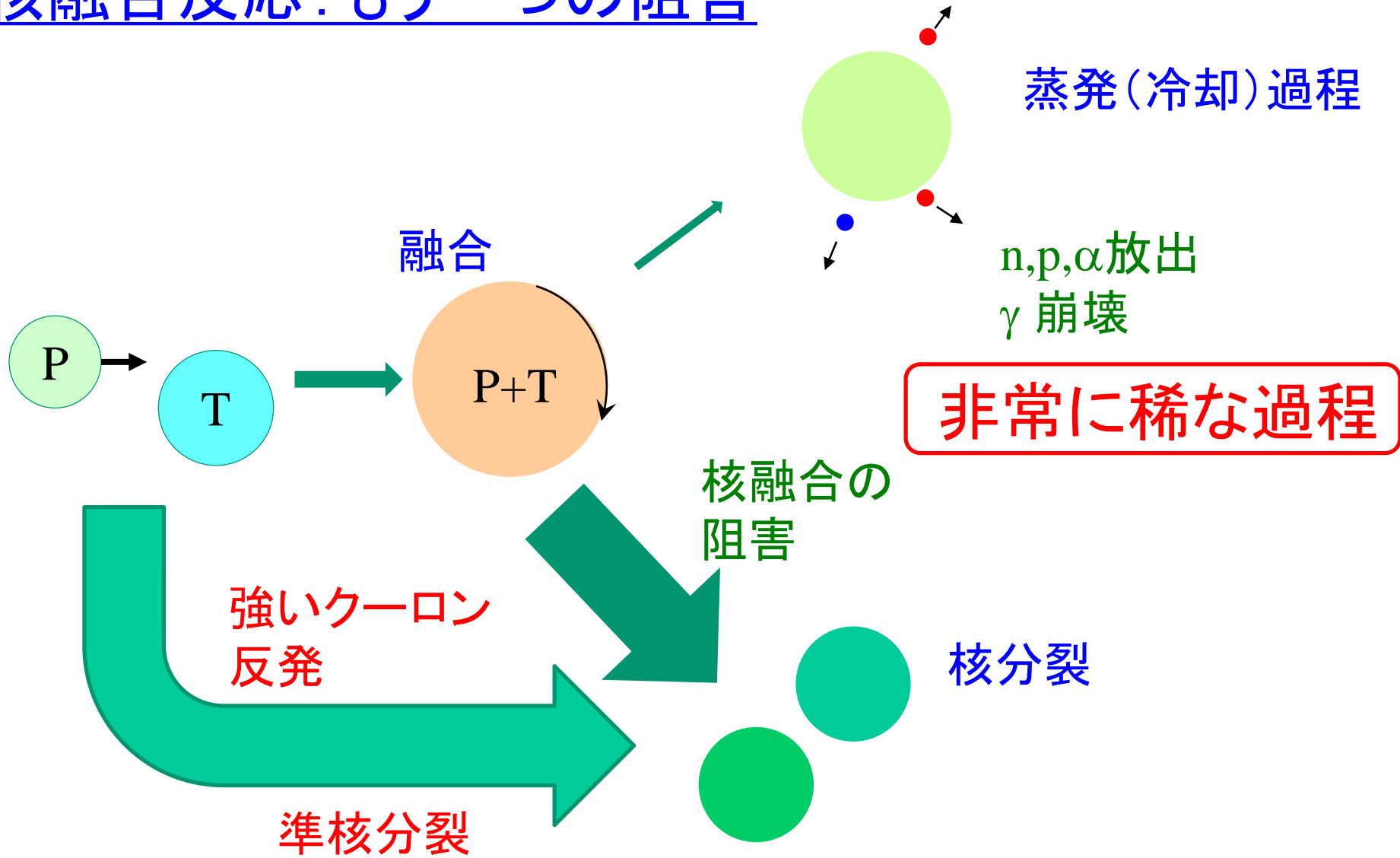


複合核

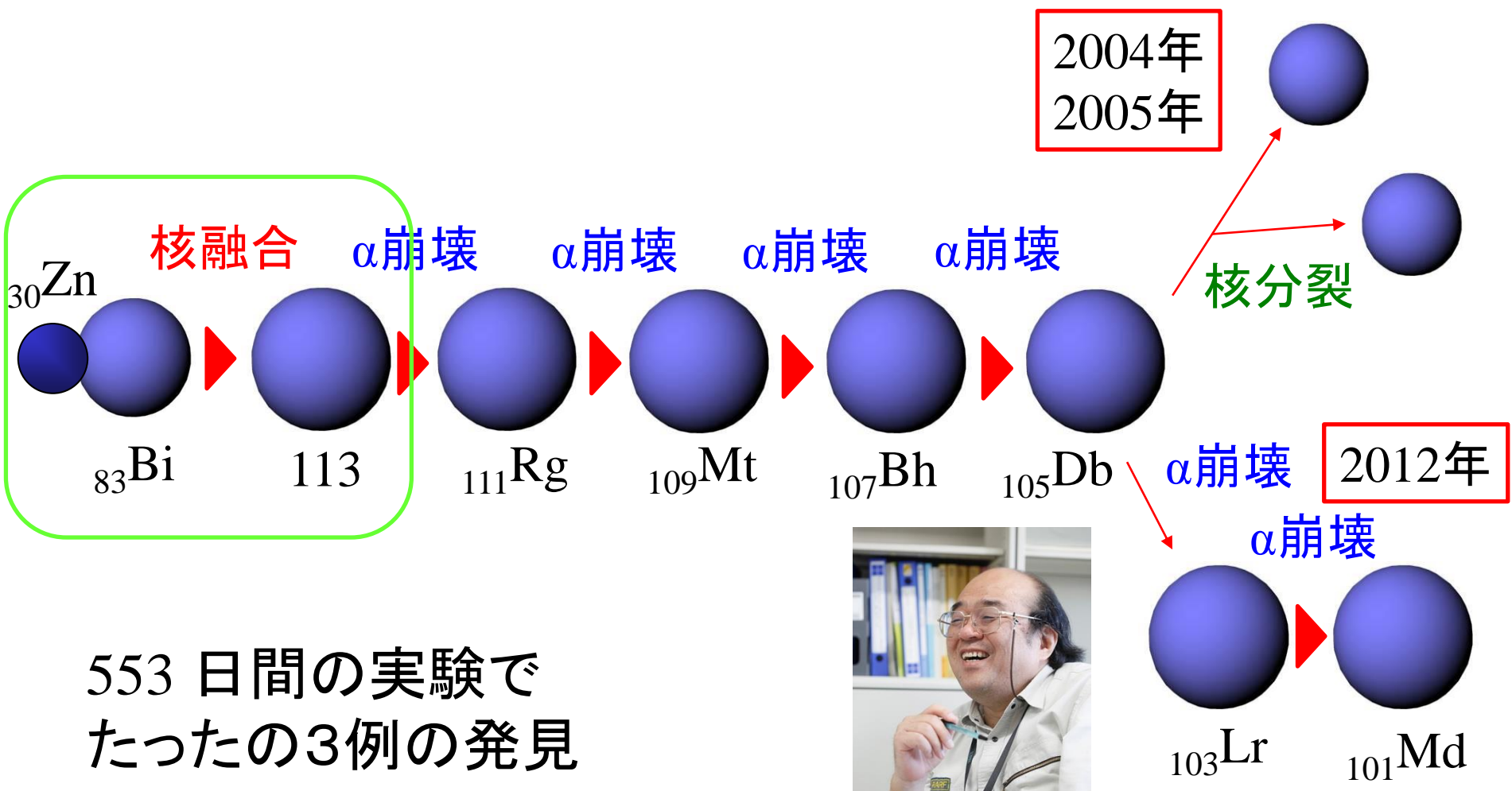
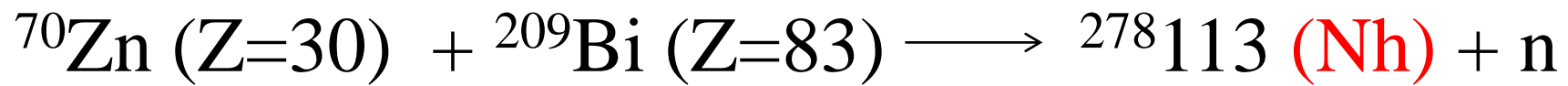


強いクーロン反発
→ 再分離

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！

理研では、119番元素の探索中

第8周期元素の生成

✓ 反応系の検討が必要

(^{48}Ca が使えない)

理論物理学としての課題

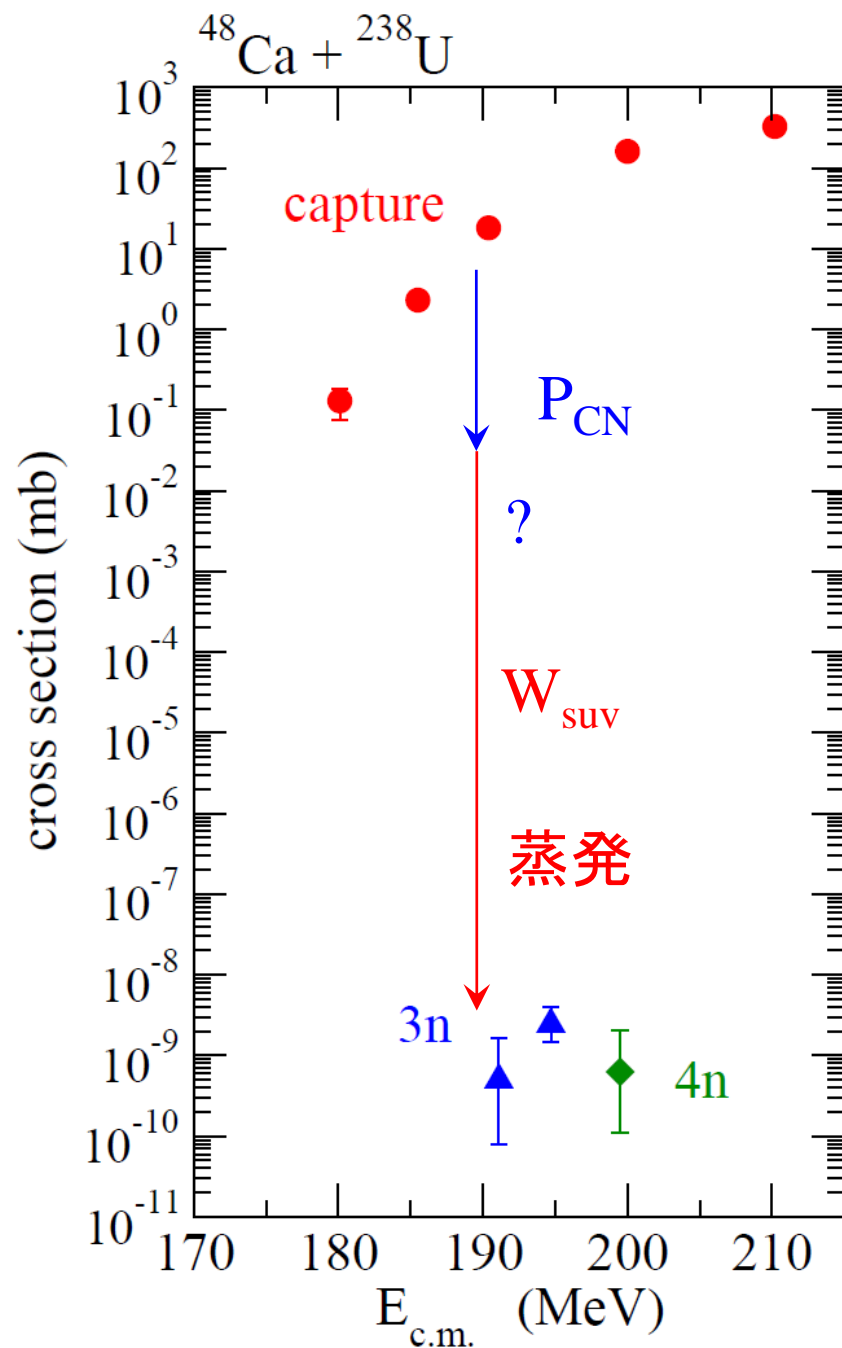
超重元素の生成

: 非常に稀な過程

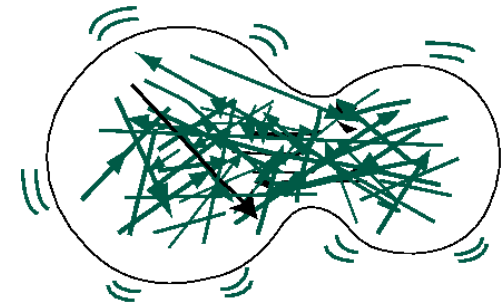
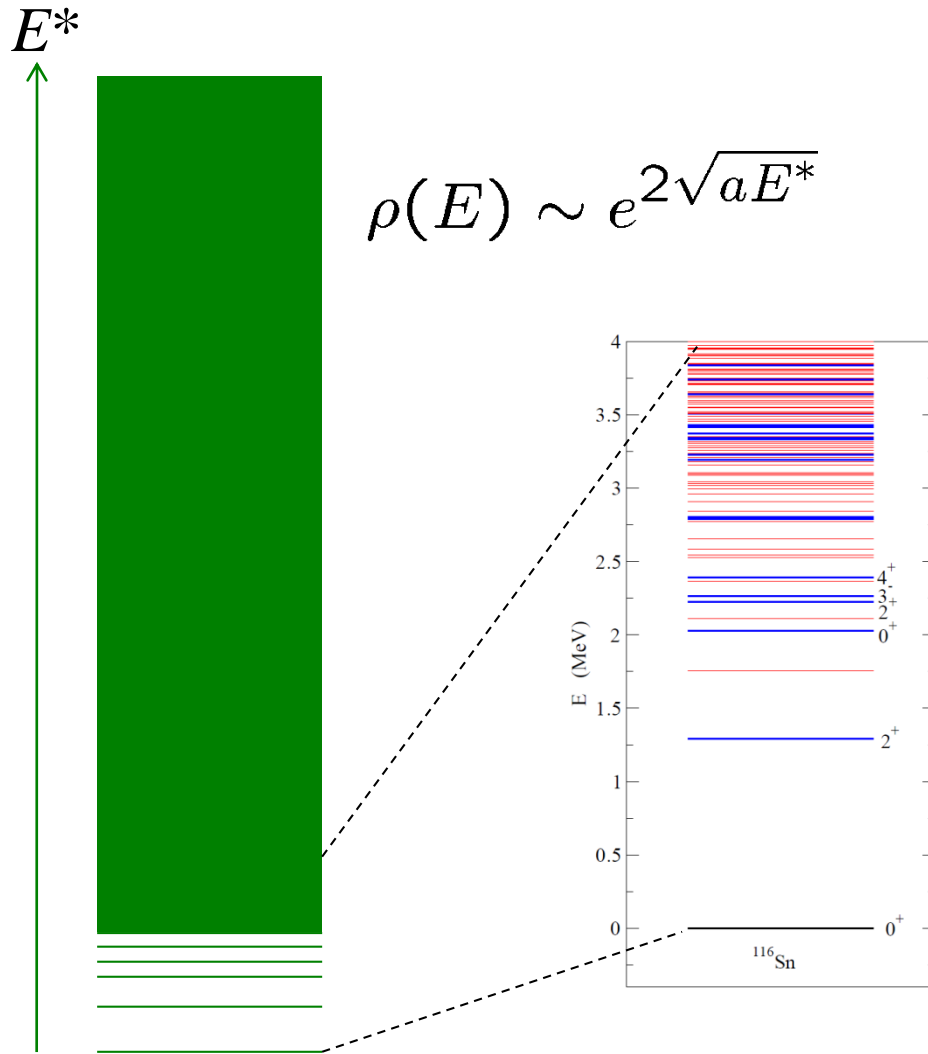
→ 大きな理論的不定性

挑戦的課題:

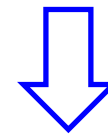
いかに理論的不定性を小さくして
信頼できる理論予言が出来るか?



原子核の摩擦と重イオン核融合反応



核反応の途中で複雑に励起

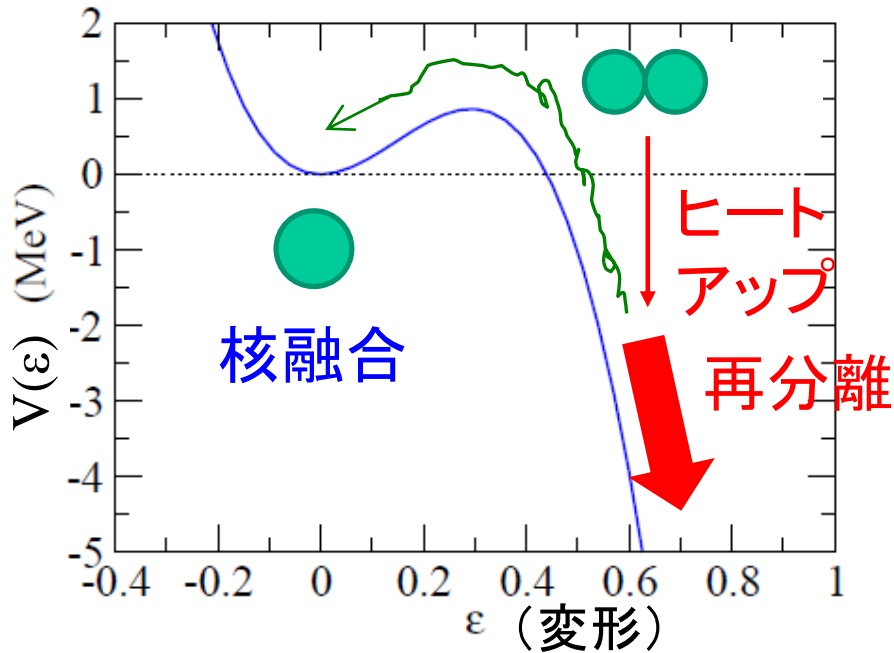


原子核の内部自由度: 「環境」
「内的環境自由度」

→ 摩擦

原子核のスペクトル

ランジュバン法



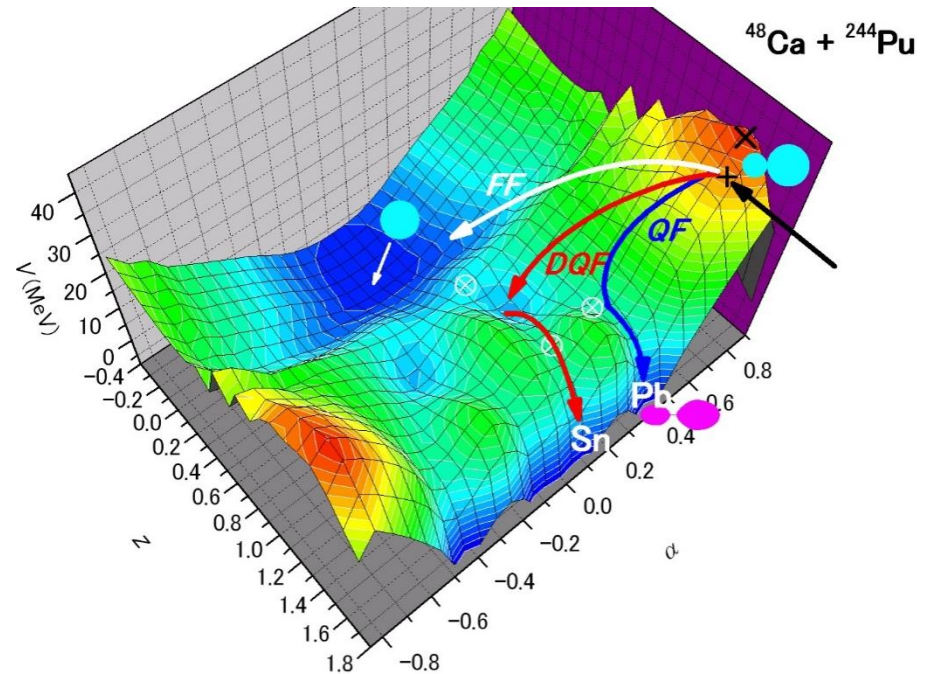
熱的拡散

→ ランジュバン法
(ブラウン運動)

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

多次元化

- ・フラグメント間距離
- ・フラグメントの変形
- ・2つのフラグメントの質量非対称度



Y. Aritomo, K. Hagino, K. Nishio, and S. Chiba, PRC85 (2012) 044614

超重元素反応の新モデル: TDHF + Langevin アプローチ

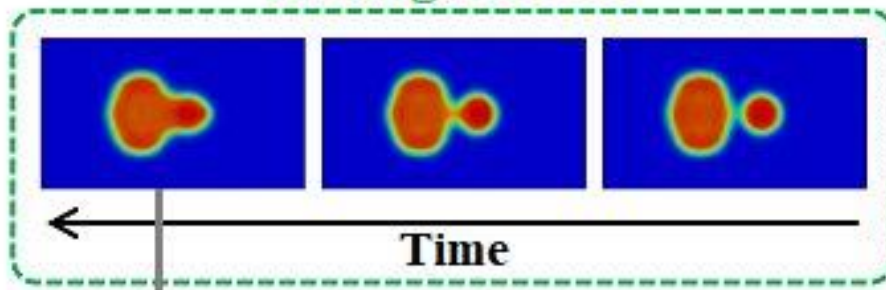
K. Sekizawa and K.H., PRC99 (2019) 051602(R)



TDHF+Langevin:

a new hybrid model of fusion reactions for superheavy elements

1st stage: TDHF



3rd stage:
statistical model



2nd stage:
Langevin model

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

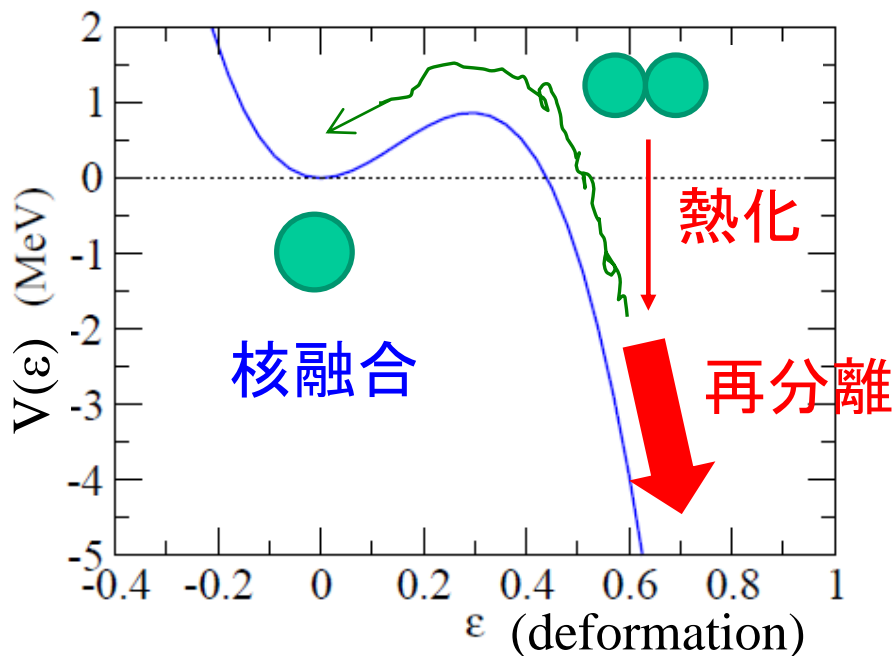
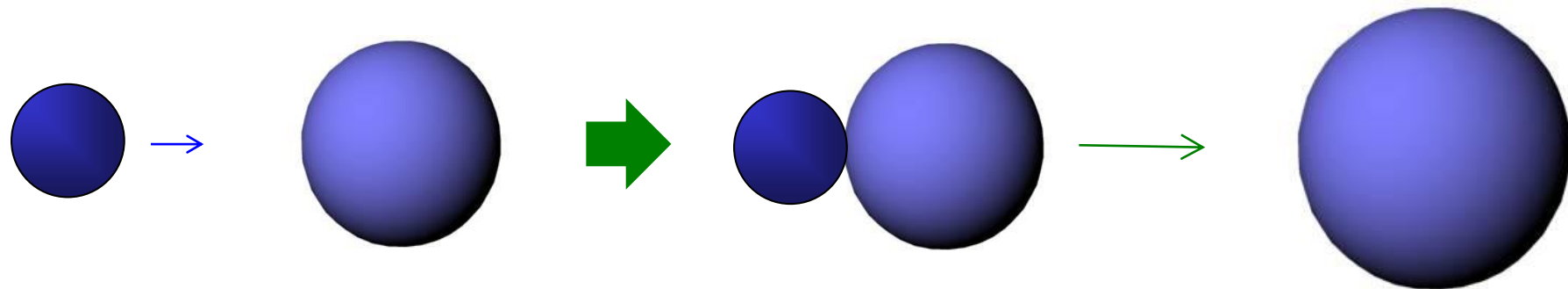
^{48}Ca はどのように特別か?

cf. TDHF=時間に依存する
平均場近似

平均場近似を超える効果?
(量子トンネル効果)

長谷川、谷村、萩野

理論物理学としての課題



✓ どのように熱化するのか?

「摩擦の量子論」

c.f. 量子摩擦を考慮した
トンネル確率

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

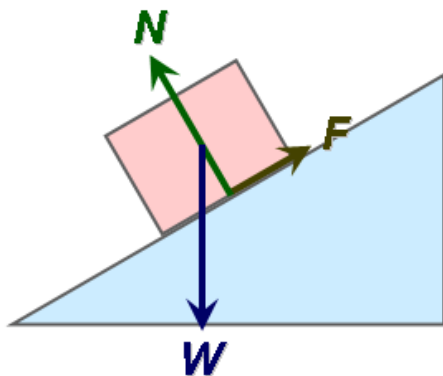
✓ 拡散に対する量子効果?

M. Tokieda and K.H.,
Ann. of Phys. 412 (2019)

熱的拡散

→ ランジュバン法

摩擦の量子論



物体が止まって熱が発生

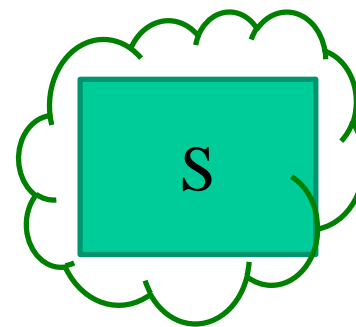
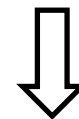
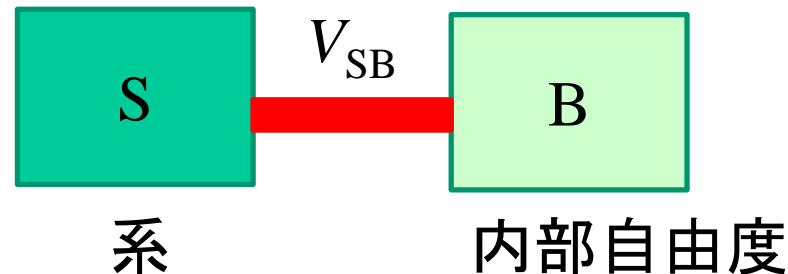


エネルギーが物体から内部
自由度(原子)に転化

量子ランジュバンへ



量子力学では:



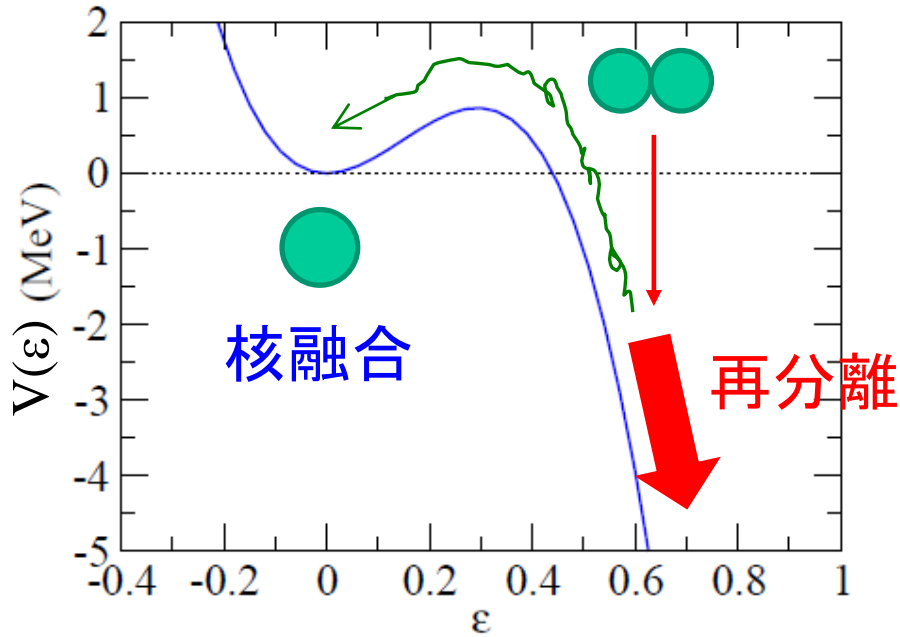
系に衣を着せて解く

最近、衣を着せずに解く方法を開発

M. Tokieda and K.H.,
Ann. of Phys. 412 ('19) 168005

核融合反応と非平衡統計力学: 温度勾配の下での Langevin 動力学

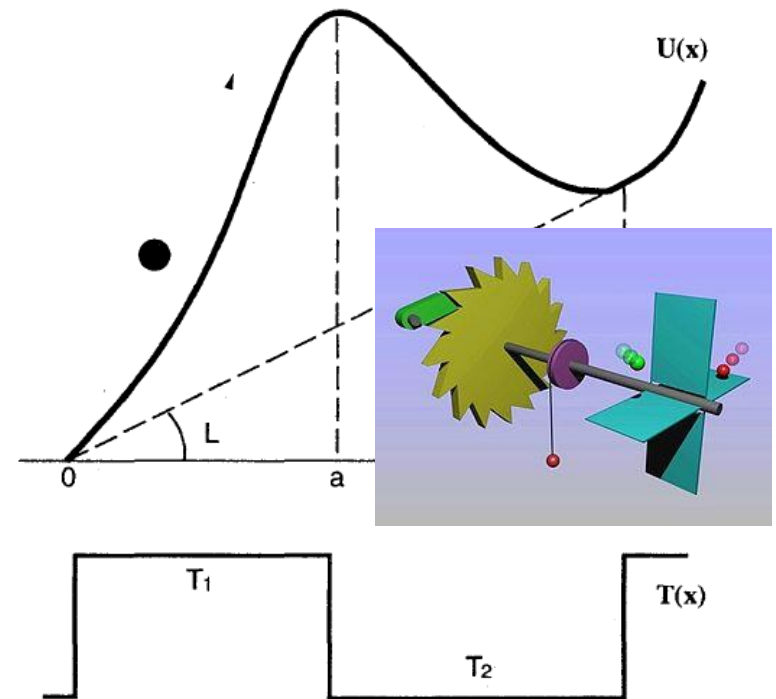
➤ 超重核合成反応



熱的拡散 → ランジュバン法
(ブラウン運動)

ゆらぎのダイナミクス
= 非平衡統計力学

➤ 分子モーターに対する数理モデル

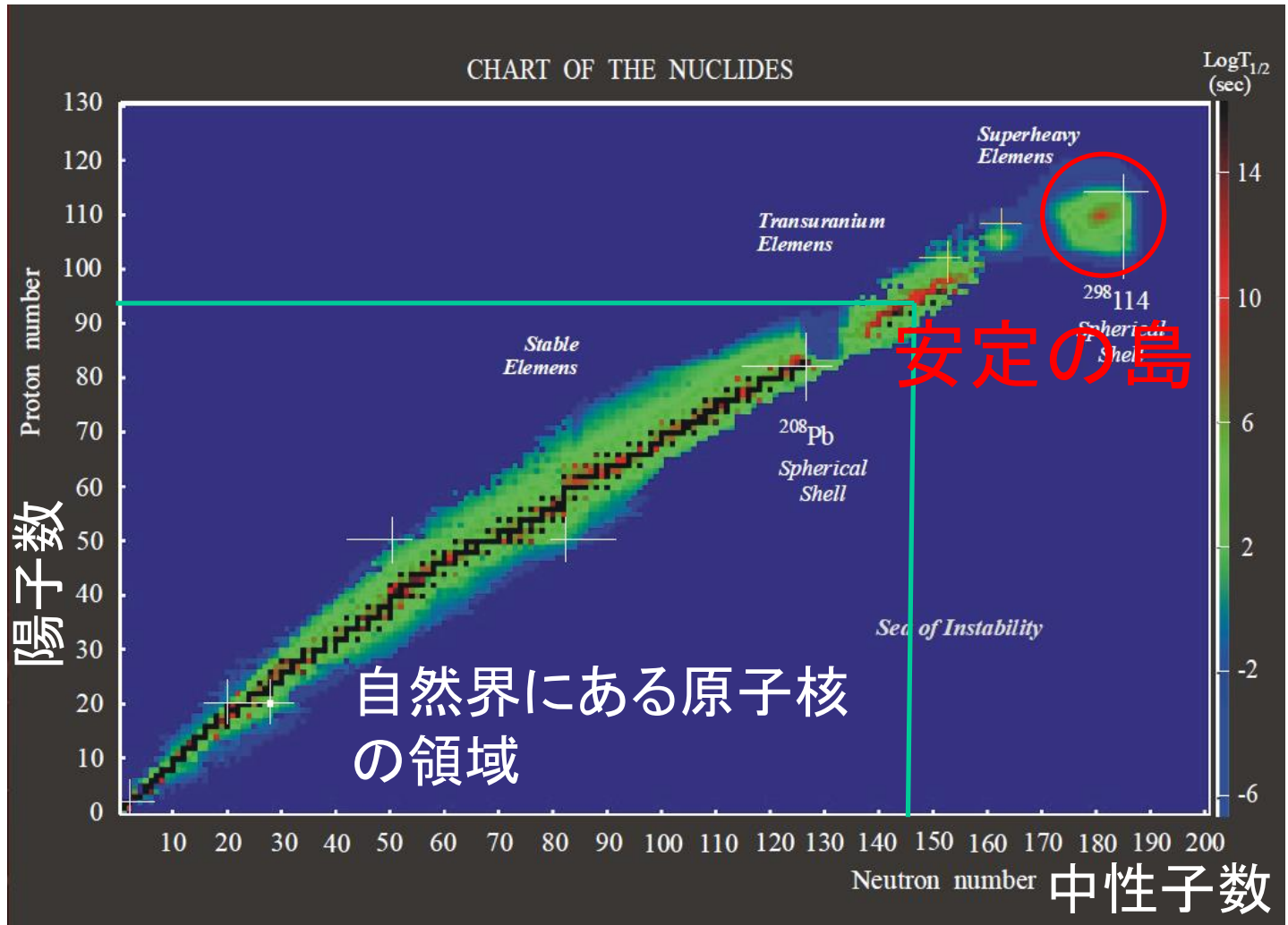


松尾美希、物性研究 73 ('99) 557

温度勾配 → 一方向の運動

非平衡統計力学の一般的問題として超重核生成反応をとらえ直す

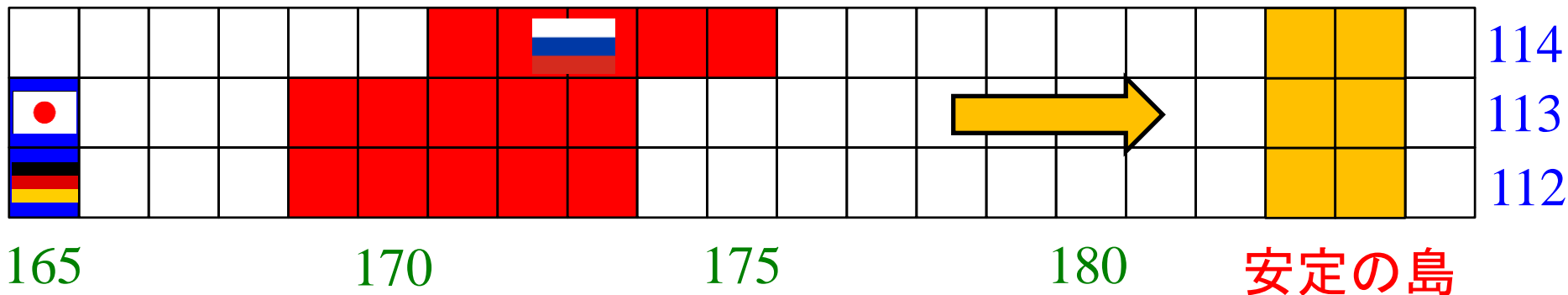
もう一つの重要な課題



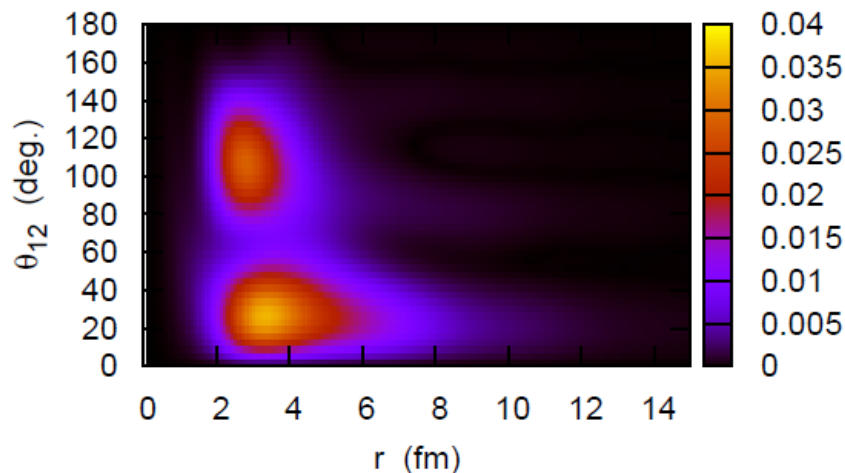
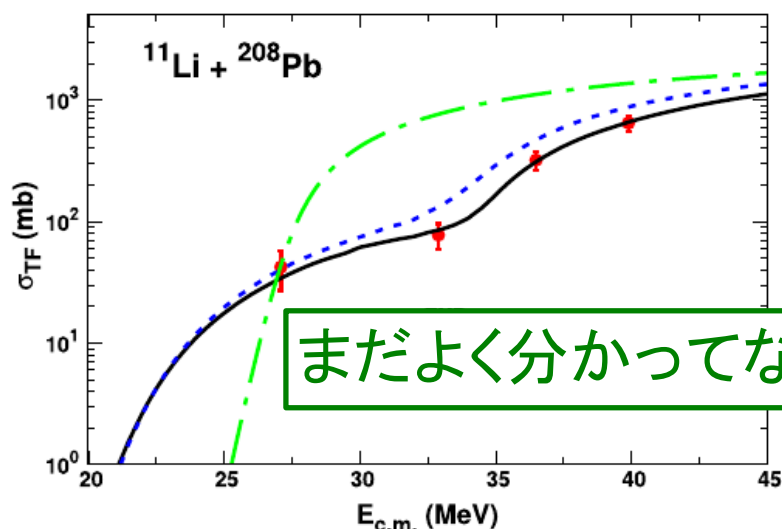
Yuri Oganessian

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?

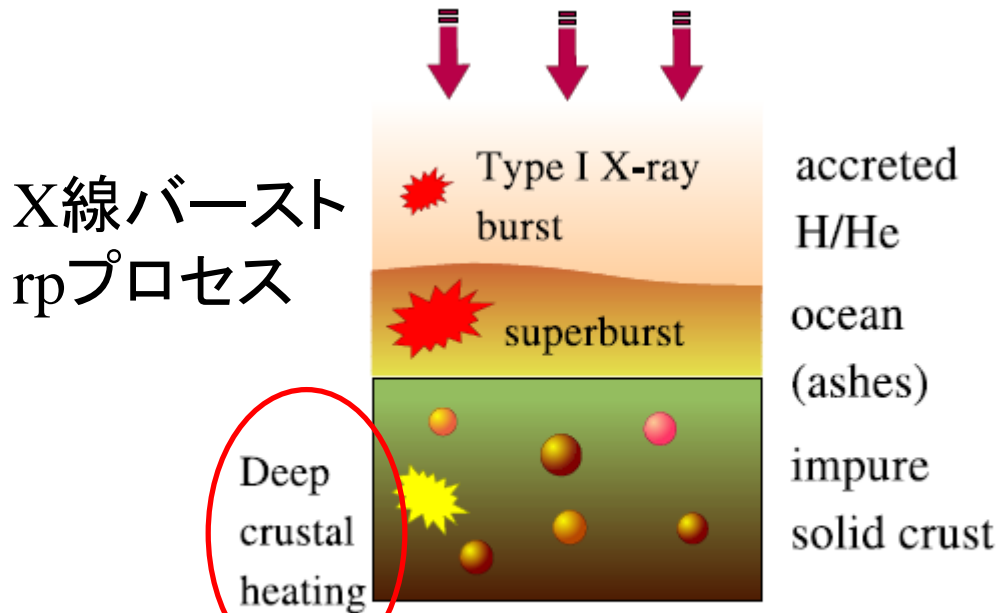


K.H. and H. Sagawa, PRC72('05)044321

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

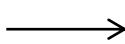
質量降着を伴う中性子星で起こる 中性子過剰核の核融合反応



Deep crustal heating

Accreting neutron

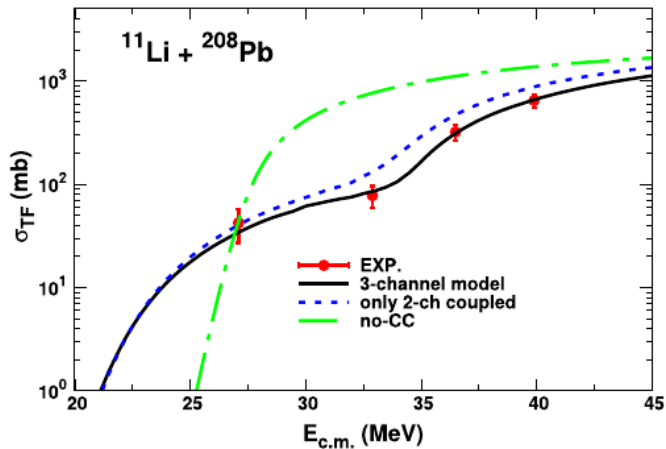
中性子過剰核の核融合反応



X線連星の静穏期
におけるX線の起源

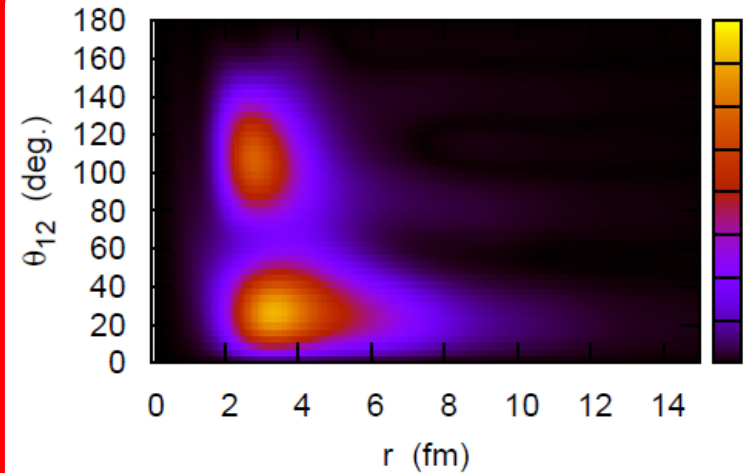


中性子過剰核の反応



- ✓ 核融合反応
- ✓ 多核子移行反応

中性子過剰核の構造



- ✓ 核子相関
- ✓ 集団運動
- ✓ 核分裂

中性子過剰核を軸にした超重元素の物理を展開する

おわりに 超重元素:強い電場の環境下での量子多体系

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

反応ダイナミクス

✓摩擦の量子論

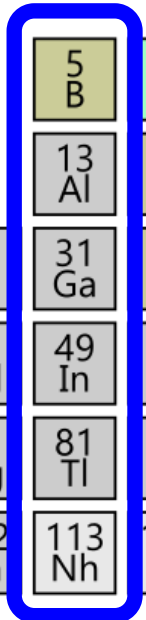
✓中性子過剰核



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



113
Nh
nihonium



118
Og
oganeson

それぞれの超重元素は周期表上でどこに置くべきか?

cf. 相対論的効果

おわりに 超重元素:強い電場の環境下での量子多体系

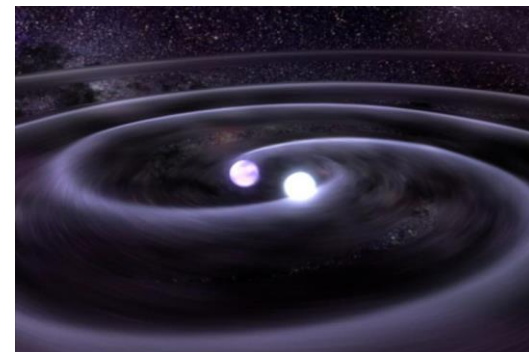
超重元素の核物理

超重元素の化学や物性

宇宙物理



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



反応ダイナミクス

- ✓ 摩擦の量子論
- ✓ 中性子過剰核



- ✓ 核物理(不安定核)
- ✓ 元素の起源
- ✓ キロノバ

核物理、化学、宇宙物理などの分野融合による超重元素の研究