

超重元素の物理

～原子核周期表と量子開放系～



萩野浩一

物理第二教室

原子核理論研究室

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				

113
Nh
nihonium

自己紹介

- 生まれ: 昭和46年(1971年)2月24日(宮城県仙台市)
- 出身: 千葉県
- 平成元年東北大学理学部入学
- 修士: 東北大学大学院理学研究科
- 博士: 東北大学大学院理学研究科(1998年3月)
- ワシントン大(シアトル)でポスドク(1998年10月~2000年11月)
- 京大基研で助手(2000年12月~2004年4月)
cf. 益川さん、九後さん、国広さん。寺川さん(高橋研)。
- 東北大で助教授/准教授(2004年5月~2019年8月)
- 京大物2(2019年8月~)
- 専門: 原子核理論(核子多体論)
- 趣味: 歴史散歩、お茶、ワイン&チーズ(お酒)



超重元素の物理

～原子核周期表と量子開放系～

萩野浩一

物理第二教室

原子核理論研究室



— 今日お話ししたいこと —

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



ニホニウム命名記念式典（平成29年3月14日、日本学士院）

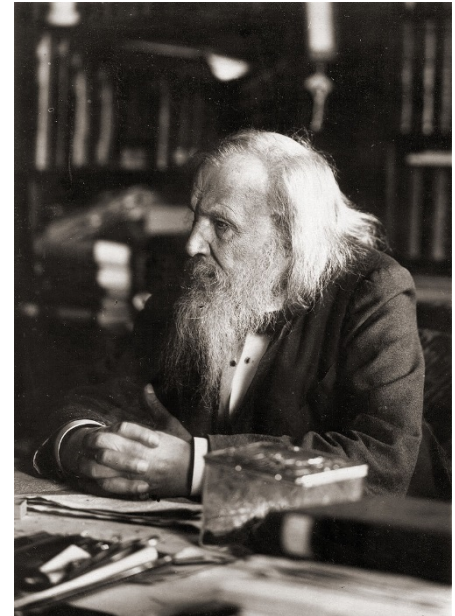
皇太子殿下（当時）：「高校2年生の時の化学の夏休みの宿題は元素の周期表を30枚以上手書きで書くというものでした。」

元素の周期表(1869年)



International Year
of the Periodic Table
of Chemical Elements

昨年(令和元年)は周期表
150周年の記念の年
(国際周期表年)



メンデレーエフ
(1834-1907)

元素の周期表(1869年)

元素周期表 de ワクワク♪

International Year of the Periodic Table of Chemical Elements
国際周期表年2019
特別展 in 京都

入場無料

今年メンデレーエフによる元素周期表の発見から150周年にあたる、ユネスコ国際周期表年(IYPT2019)です。日本でも「国際周期表年(IYPT)実行委員会」のもとでの特別展が、各地で行われています。「一家に1枚周期表」や「エレメンタッチ周期表」の発祥地でもある京都大学にて、特別展の一環としての市民向けイベントを開催します。

全国巡回展

メンデレーエフの時代から現在までのいろんな周期表、元素が発見され方さまざまな鉱物、元素にまつわる最先端の科学技術などを展示します。また、今回は特別に京都大学元素同好会によるポスター展示を行います。

元素検定

日曜午後に行います(事前申込制)。「元素検定」は、元素や周期表にまつわる検定試験です。「元素検定」には、初めて挑戦する方のための「3級」から、少し手ごわい「2級」、超マニアック問題に挑む「1級」までがあります(今回は、1級は実施しません)。ご家族や友達どうでの参加も大歓迎! (参加費500円)
 元素周期表同好会HP
<https://gensoclub.jimdo.com>

元素で遊ぼう

- 周期表工作教室(エレメンタッチ)
 土曜午前1回、日曜午前1回・午後2回、定員各20名(事前予約も受け付けます)
- 面白い周期表(カラクリペディア、元素ネイル)
 野老実験クラブ(佐藤康子、中村恵子)
- えれめんとランプで遊ぼう

講演会

土曜日午後1回一般市民向けの講演会を行います(収容人数130名)。
 ★事前参加登録も受け付けています。

●「一家に1枚周期表」に込め方
 ●メンデレーエフと周期表
 ●現在の周期表への発展
 ●ビッグバンから二ホニウムまで
 ●小川正孝と幻の新元素
 ●面白い周期表
 ●趣味で始める「元素学」#とは

玉尾 皓平(豊田理化学研究所)
 桜井 弘(京都薬科大学名誉教授)
 前野 悦輝(京都大学)
 延與 秀人(理化学研究所)
 久松 洋二(慶應義塾総合科学博物館)
 名和 長泰(前久留米大学附設中学・高校)
 谷口 亜紳(元素学さん)

日時 9月7日土 午前10時～午後5時30分
 9月8日日 午前10時～午後5時

場所 京都大学 百周年時計台記念館 2階

京都大学への交通案内

京橋	京阪本線 特急49分	出町柳	徒歩 20分
特田	阪急京都線 特急43分	河原町	バス 約20分
大阪	JR京都線 新快速29分	京都	京都市営地下鉄烏丸線 今出川 徒歩 約15分

京都大学 吉田キャンパス 時計台



閉会式(令和元年12月5日:
 東京)

←特別展 in 京都(前野さん)

Group → 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
 ↓ Period

元素の周期表(1869年)



1	1 H												5 B	6 C	7 N													
2	3 Li	4 Be												13 Al	14 Si	15 P												
3	11 Na	12 Mg												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
4	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													
5	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													
6	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										
7				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											

118
Og
oganesson

- 自然界にある元素の種類: 90種
- これまでに確認された元素: 118種類

Group → 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

↓ Period

1 2 3 4 5 6 7

1 H

2 3 Li 4 Be 5 B 6 C 7 N

3 11 Na 12 Mg 13 Al 14 Si 15 P

4 19 K 20 Ca 21 Sc 22 Ti 23 V 24 Cr 25 Mn 26 Fe 27 Co 28 Ni 29 Cu 33 As 113 Nh 118 Og

5 37 Rb 38 Sr 39 Y 40 Zr 41 Nb 42 Mo 43 Tc 44 Ru 45 Rh 46 Pd 47 Ag 51 Sb

6 55 Cs 56 Ba 57 La * 72 Hf 73 Ta 74 W 75 Re 76 Os 77 Ir 78 Pt 79 Au 83 Bi

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 = アクチノイド以降
(Z = 104 より重い元素)

113 Nh
nihonium

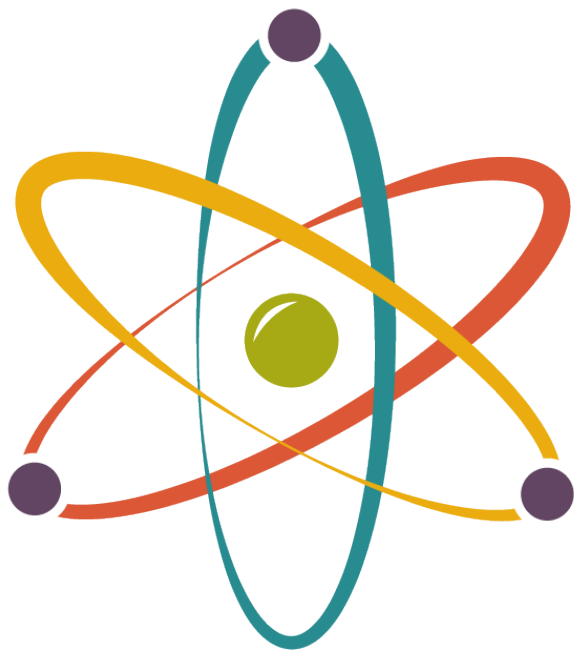
118 Og
oganeson



- 自然界にある元素の種類: 90種
- これまでに確認された元素: 118種類

元素は何種類まであるのか? → まだ分かっていない

何が元素の存在限界を決めているのか？

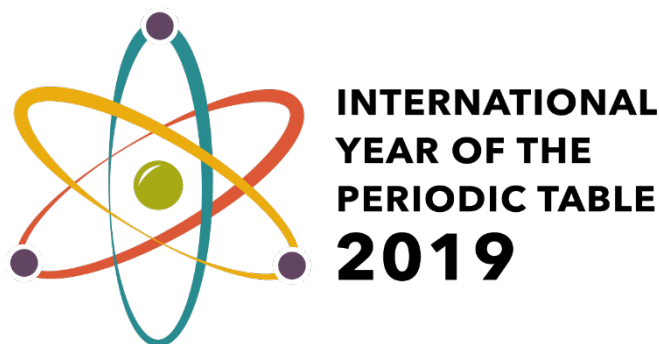


**INTERNATIONAL
YEAR OF THE
PERIODIC TABLE
2019**

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

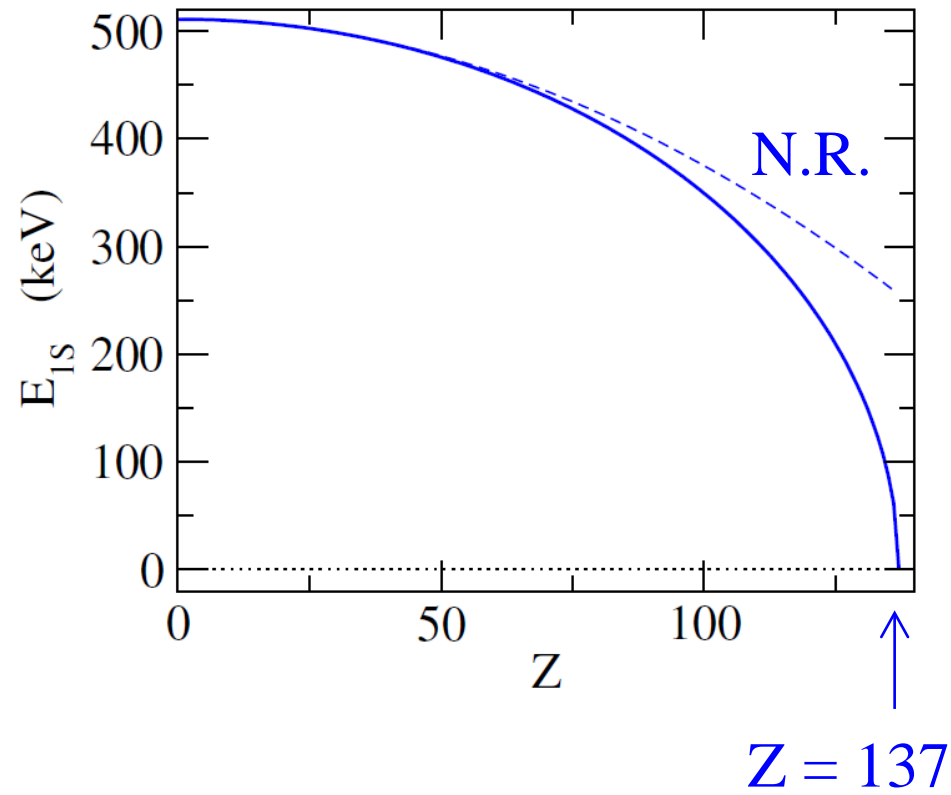
$$V(r) = -\frac{Ze^2}{r}$$

1S 状態 (ディラック方程式)

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

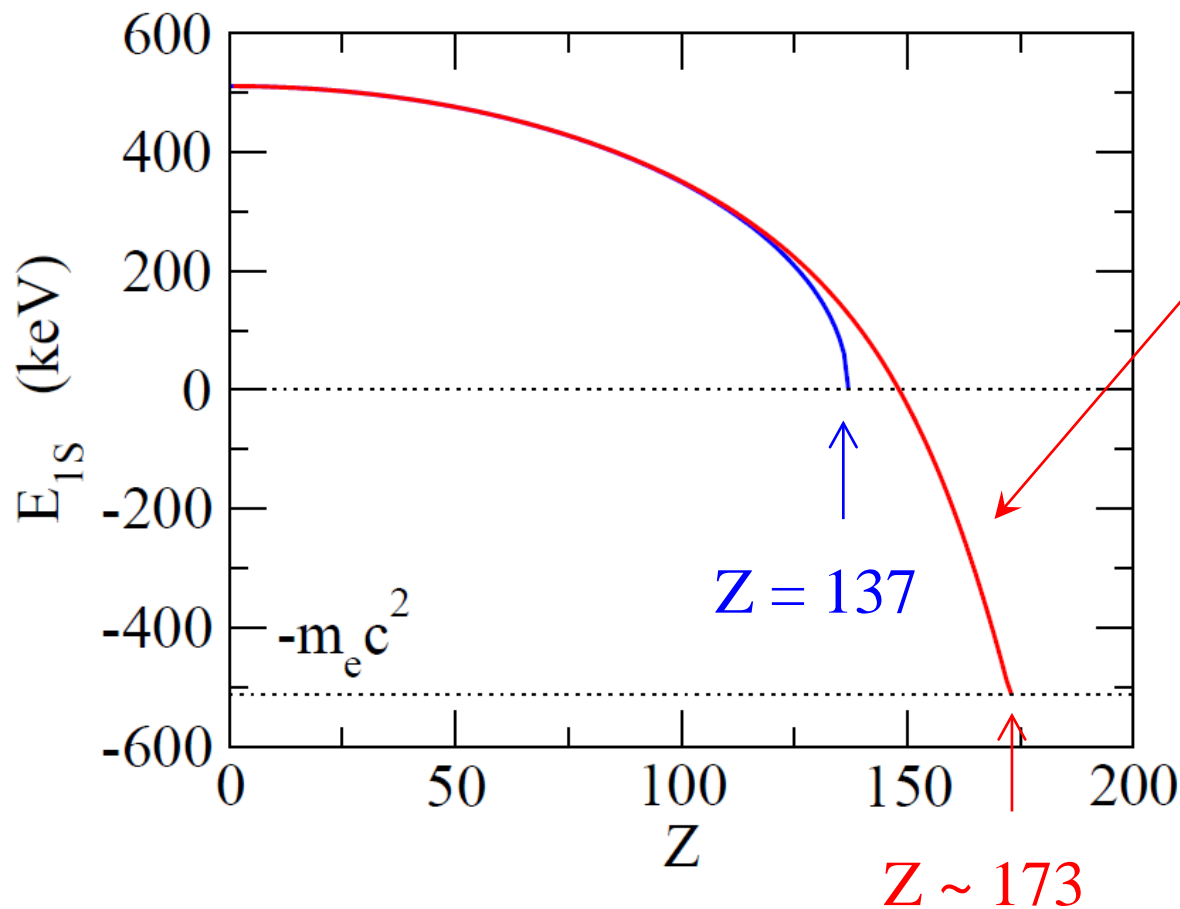
$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \sim \frac{1}{137}$$

$Z > 137 \rightarrow$ 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

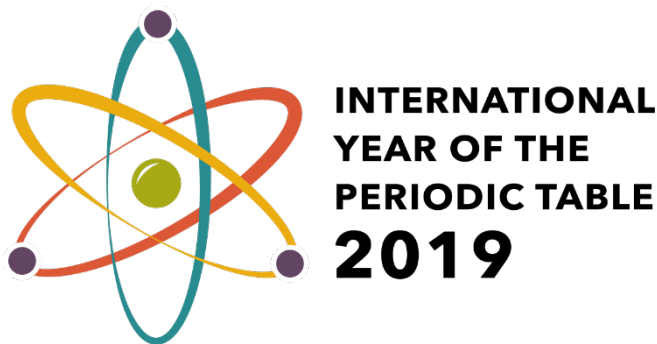
水素様原子



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？



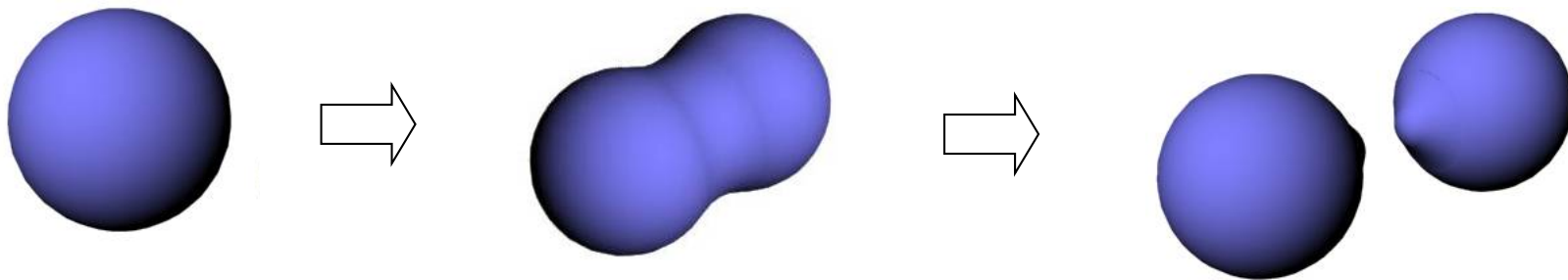
考えなければならない可能性：

次に

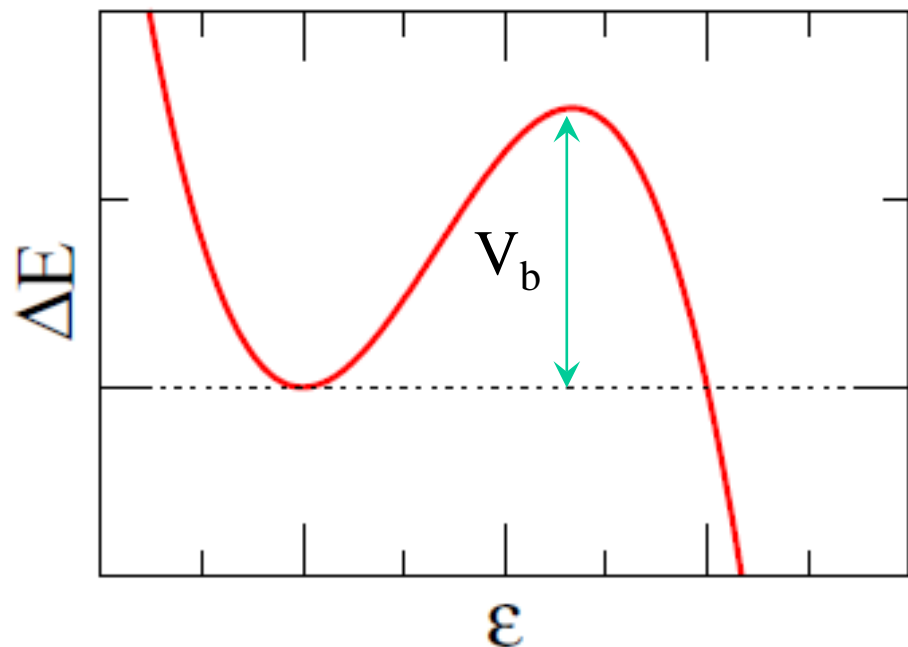
- ✓ 原子の中の電子軌道
- ✓ **原子の中の原子核の安定性**

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

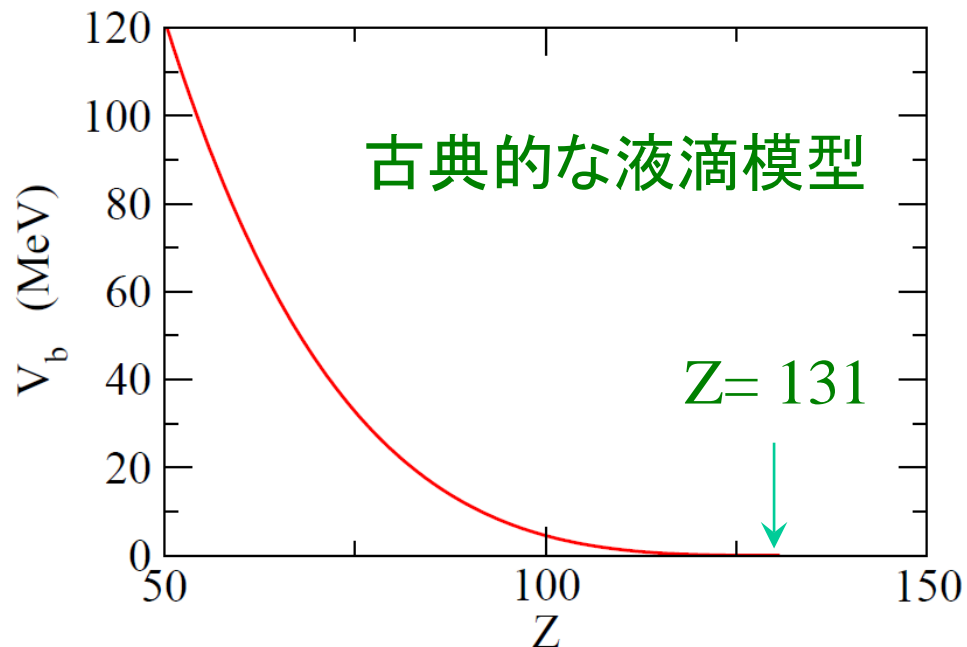
重い原子核 → 核分裂



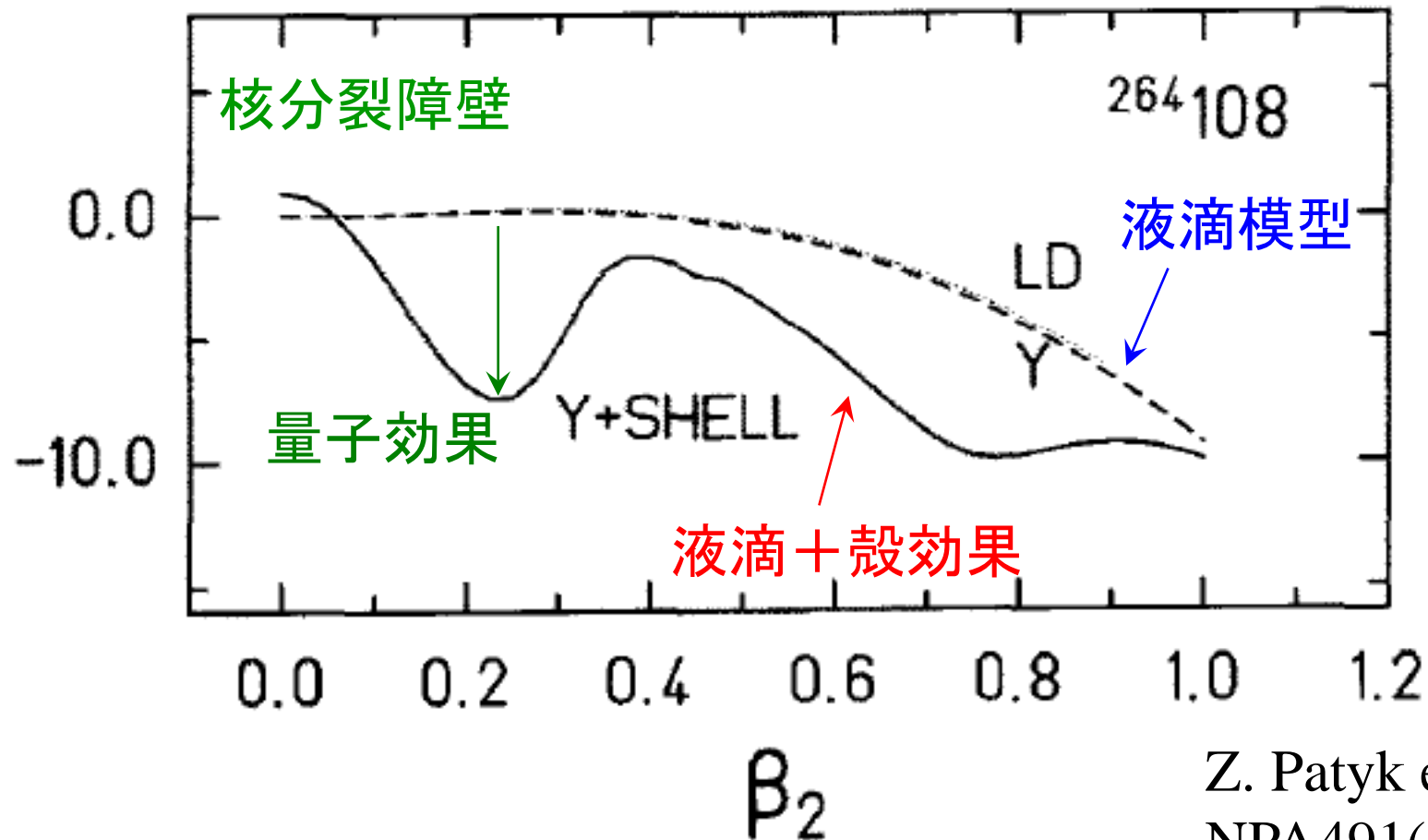
核分裂障壁



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



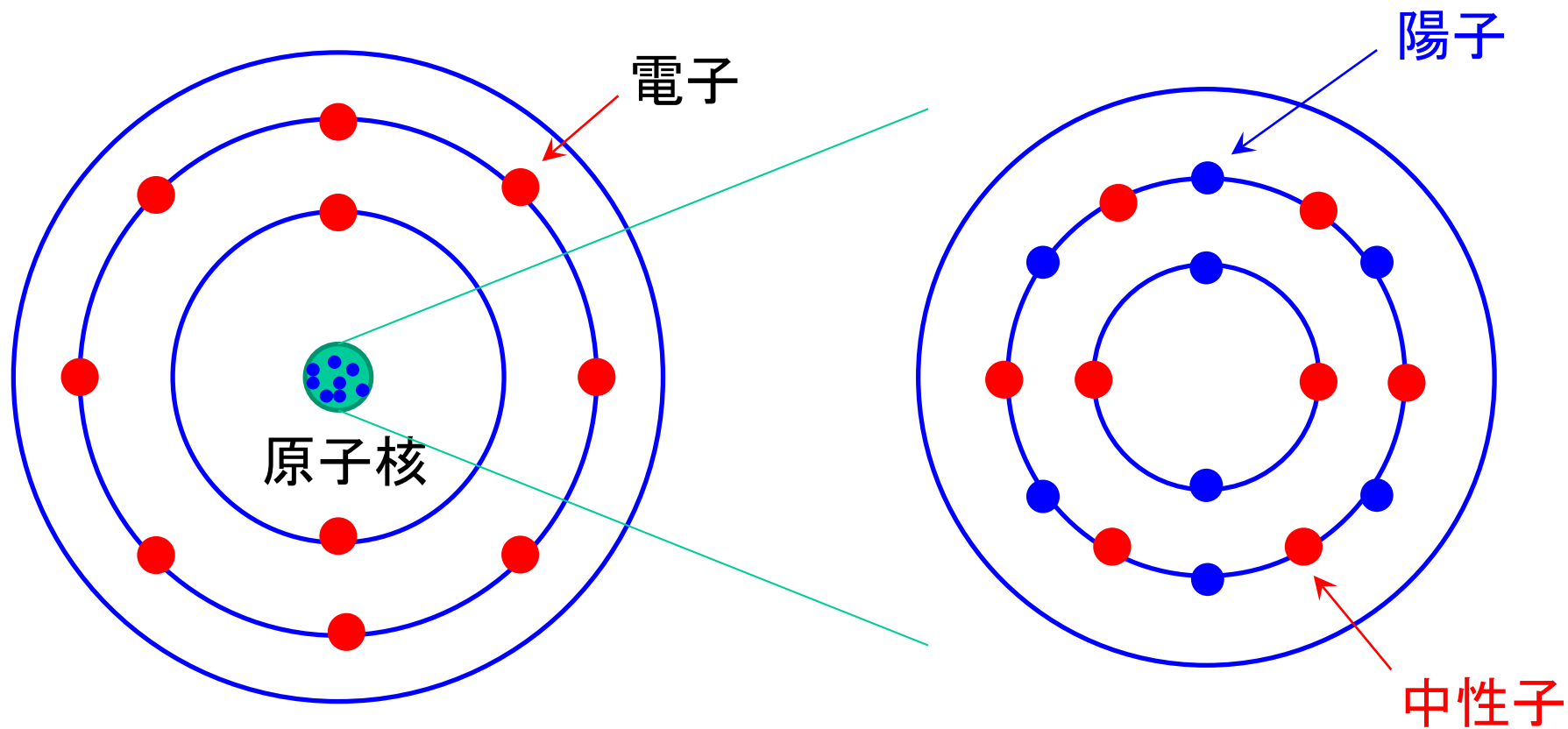
Z. Patyk et al.,
NPA491('89) 267

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

→ 原子の希ガスに相当する

原子核の殻構造

電子と同様に、陽子や中性子にも軌道運動が考えられる



原子の構造
(Neの場合)

原子核の構造
(^{16}O の場合)

原子核の殻構造

スピン軌道力

希ガスのときのように軌道が埋まると原子核が安定になる。

魔法数: 2, 8, 20, 28, 50, 82, (126)

* 希ガスは2, 10, 18, 36, 54, 86, 118

殻模型(からもけい)

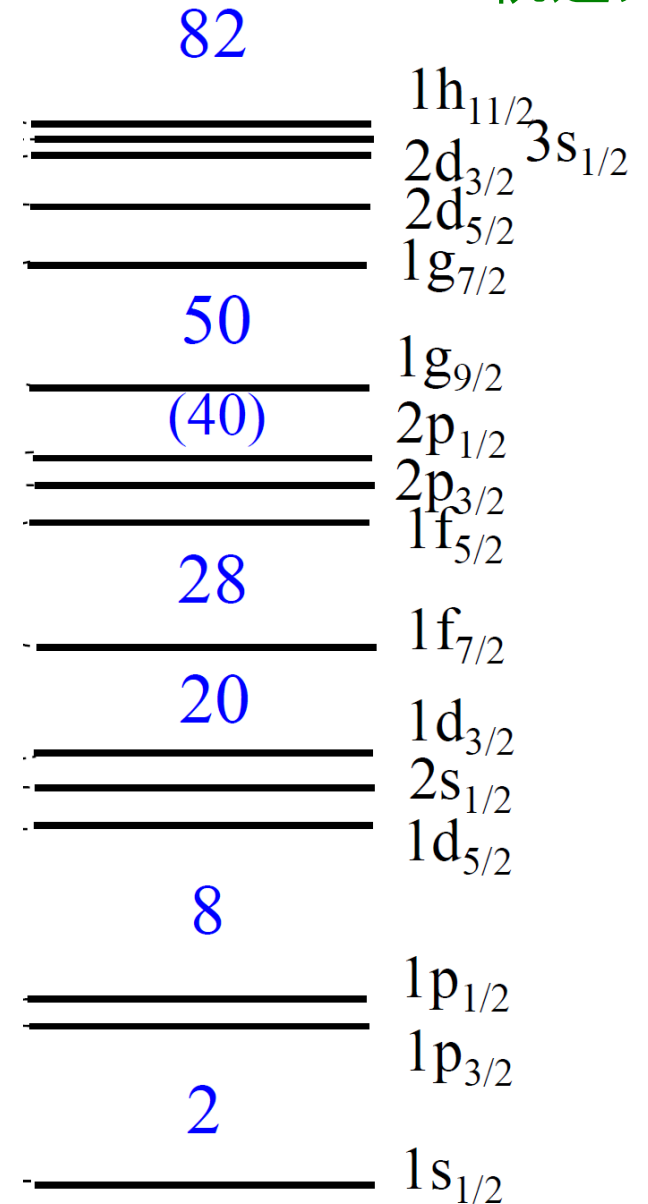


メイヤー



イエンセン

Nobel Foundation archive



1963年にノーベル物理学賞を受賞(メイヤーは2人目の女性受賞者)

元素の周期表

希ガス

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	

元素の原子核の周期表?

陽子の魔法数 ← 希ガス

Group → 1 2
↓ Period

原子核の周期表は作れないのか?

→ ありそうでなかった

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							



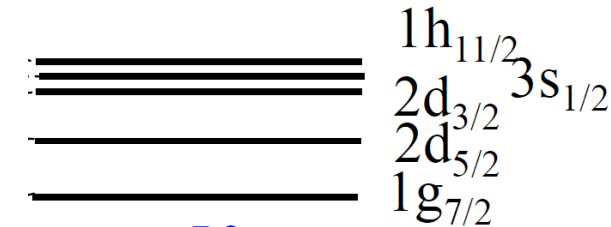
前野さん(物1)

原子核の周期表

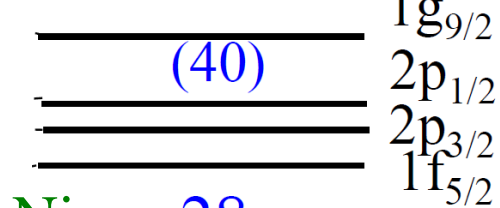
K. Hagino and Y. Maeno,
Found. of Chem. 22, 267 (2020).

陽子の
魔法数

Pb ← 82



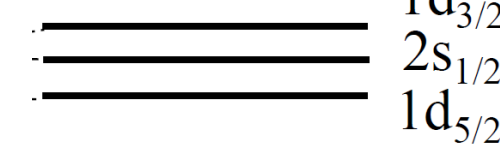
Sn ← 50



Ni ← 28



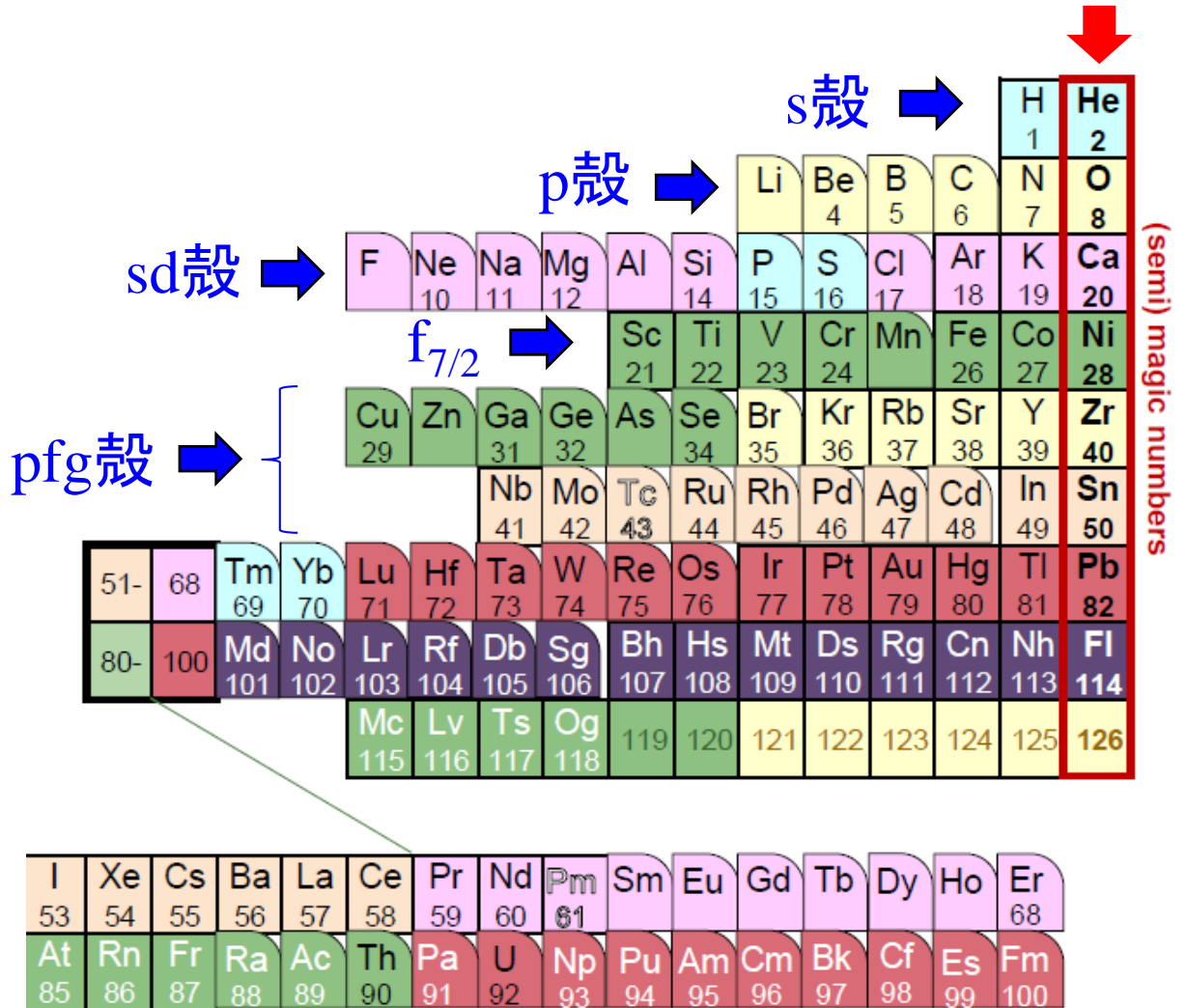
Ca ← 20



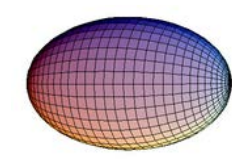
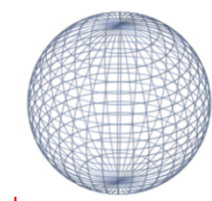
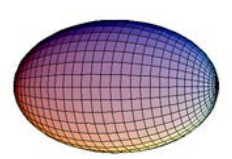
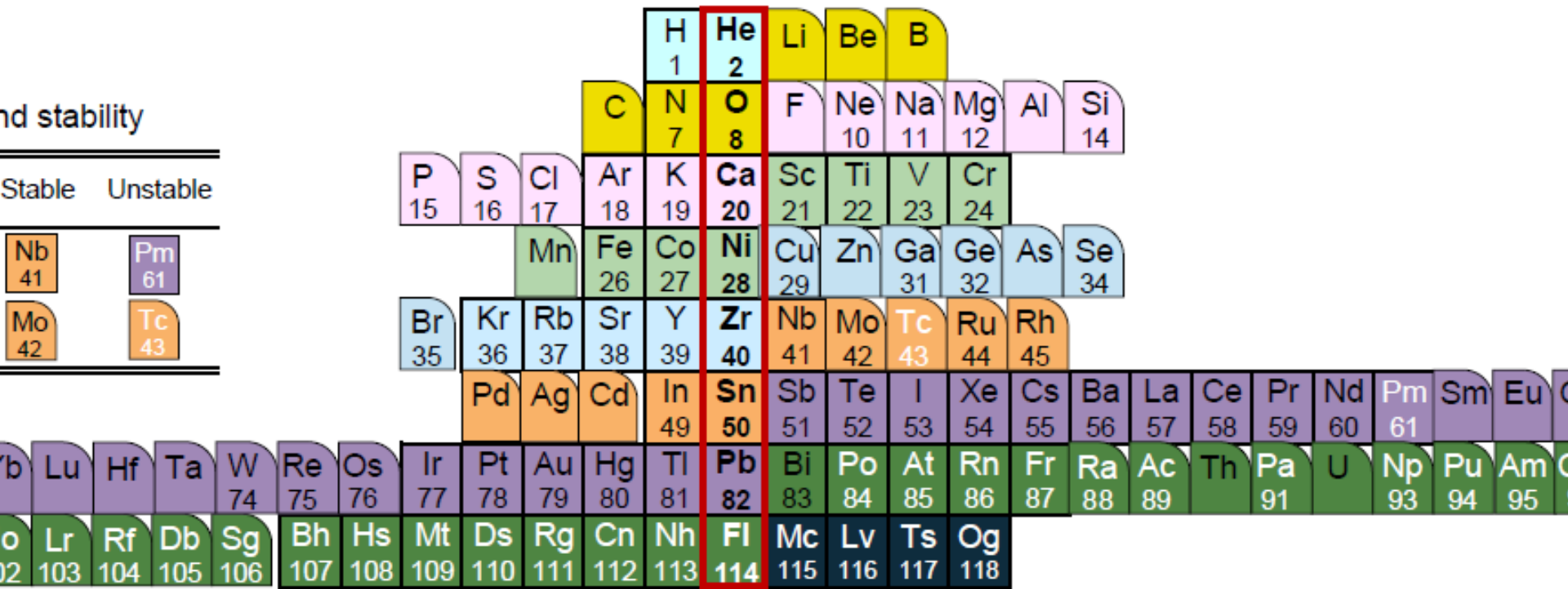
O ← 8



He ← 2



- ✓ 原子核の形で箱の種類を変えた
- ✓ 字の種類で原子核の安定性を区別した(不安定な原子核は白抜き)



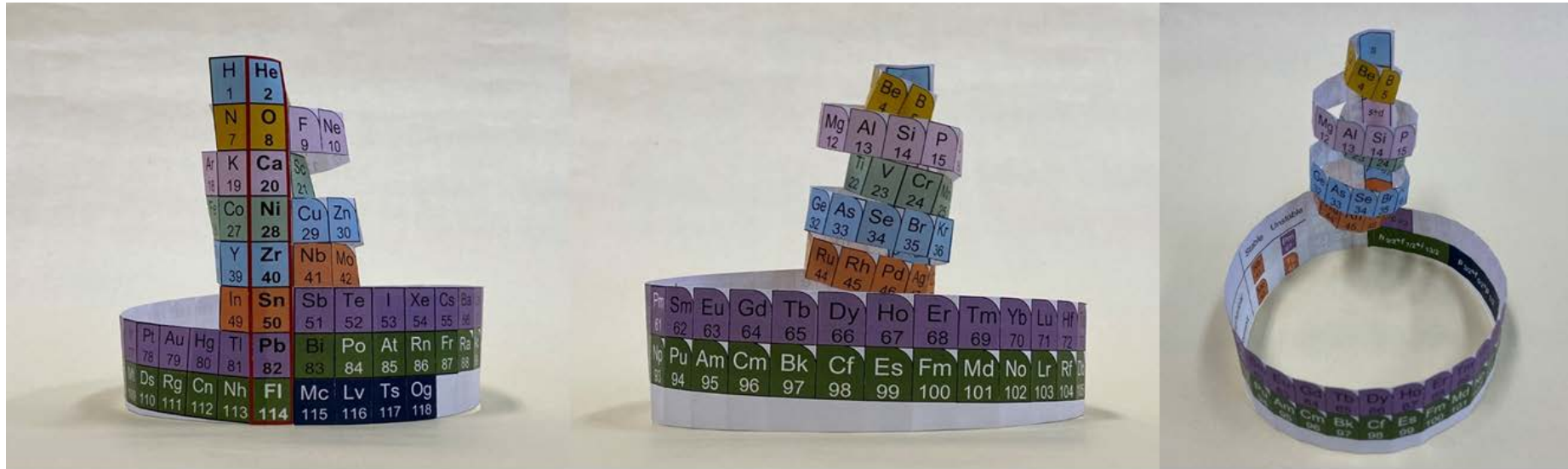
魔法数から離れる
につれ原子核が変形

魔法数の近くは
原子核が球形

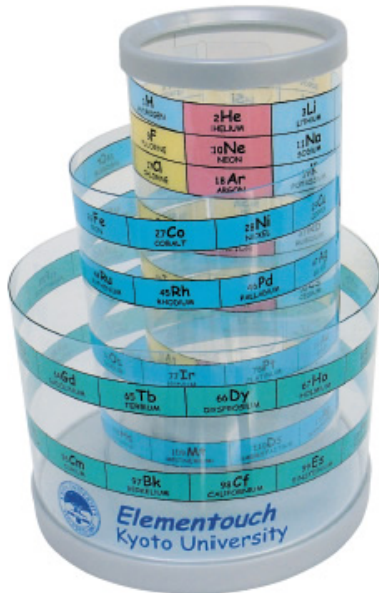
魔法数から離れる
につれ原子核が変形

原子核の周期表

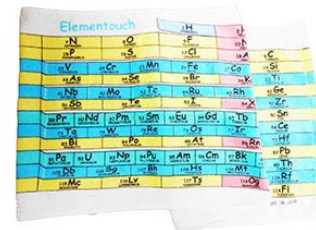
3D原子核周期表「ニュークリタッチ」



cf. 3D周期表エレメントタッチ
(前野悦輝、2001年)



マグカップ



タオル



Tシャツ
(京大生協)

いろいろなメディアに取り上げてもらいました

購読はこちら [1週間無料]

読賣新聞

オンライン

ログイン 新規登録

ニュース > 科学・IT

「すいへーりーべ」でおなじみの元素周期表、新パターン提案…京大が原子核の状態着目

2020/04/22 23:41

日本経済新聞

ストーリー Myニュース 日

トップ 速報 マネー 経済・金融 政治 ビジネス マーケット テクノロジー

新しい周期表を考案 京大、原子核の性質を表現

2020/5/3付 | 日本経済新聞 朝刊

保存 共有

京都大学の前野悦輝教授と萩野浩一教授は、原子核の性質をわかりやすく新しい周期表を考案した。従来の周期表が元素の化学的な性質を知るのに役立つ。新しい周期表は元素の原子核の性質を知るのに使える。

NEWS RELEASE 27-MAY-2020

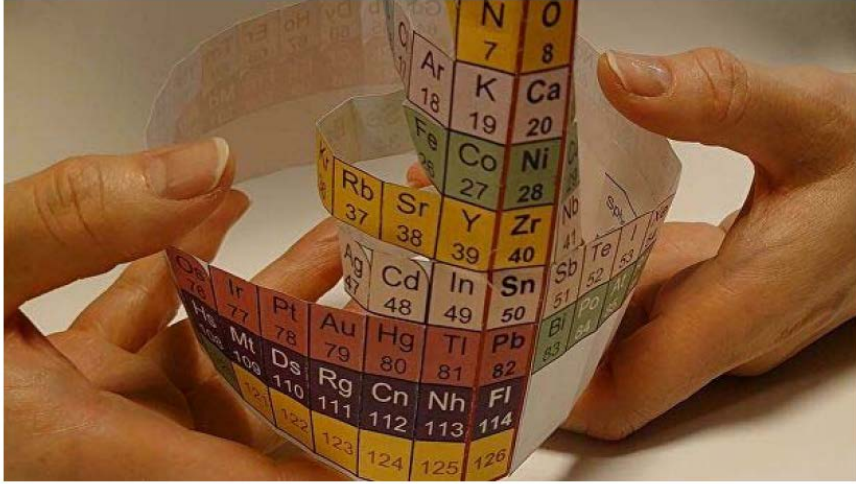
A special elemental magic

Kyoto scientists announce a 'nuclear' periodic table

KYOTO UNIVERSITY

Японские физики представили новую периодическую таблицу элементов

19:34 27.05.2020 58122



© Фото : Kyoto University/Yoshiteru Maeno/Kouichi Hagino

МОСКВА, 27 мая — РИА Новости. Ученые из [Киотского университета](#) представили периодическую таблицу элементов, которая в отличие от таблицы Менделеева, где за основу взяты электроны в атоме, основана на

マジックな偶然

Y. Maeno, K. Hagino, and T. Ishiguro,
Found. of Chem., open access

元素周期表

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



何と、原子核の魔法数核
が縦に並んでいる！
(その前後も同じ並び)

マジックな偶然

Y. Maeno, K. Hagino, and T. Ishiguro,
Found. of Chem., open access.

元素周期表

						2		He							
						5	6	7	8	9	10				
						B	C	N	O	F	Ne				
						13	14	15	16	17	18				
						Al	Si	P	S	Cl	Ar				
28	29	30	31	32	33	34	35	36							
Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr							
46	47	48	49	50	51	52	53	54							
Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe							
78	79	80	81	82	83	84	85	86							
Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn							
110	111	112	113	114	115	116	117	118							
Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og							
								64	65	66	67	68	69	70	71
								Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
								96	97	98	99	100	101	102	103
								Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

原子核周期表

						H	He	Li	Be	B						
						1	2									
						C	N	O	F	Ne	Na	Mg				
						6	7	8	9	10	11	12				
P	S	Cl	Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr							
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24							
						Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge			
						25	26	27	28	29	30	31	32			
Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru							
35	36	37	38	39	40	41	42	43	44							
						Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
						46	47	48	49	50	51	52	53	54		
						78	79	80	81	82	83	84	85	86		
						Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
						77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
						Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og		
						110	111	112	113	114	115	116	117	118		

原子核の魔法数核
が縦に並んでいる！
(その前後も同じ並び)

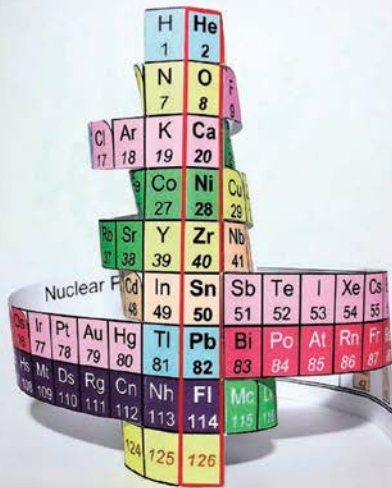
原子核周期表を
見て初めて気がつく
マジック

•磁気記録の材料と物理
•原子核の周期表

NO. 12

2020 | vol. 75

B U T S U R I
日本物理学会誌



日本物理学会 | www.jps.or.jp



原子核の周期表——Magic な関係

前野 悦輝 〈京都大学大学院理学研究科 maeno.yoshiteru.2e@kyoto-u.ac.jp〉

萩野 浩一 〈京都大学大学院理学研究科 hagino.kouichi.5m@kyoto-u.ac.jp〉

2019年12月の物1、物2合同忘年会
から始まった共同研究



マジックな偶然

Y. Maeno, K. Hagino, and T. Ishiguro,
Found. of Chem., in press.

元素周期表

						2	He										
						5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne
						13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar
28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
110	Ds	111	Rg	112	Cn	113	Nh	114	Fl	115	Mc	116	Lv	117	Ts	118	Og
64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu		
96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr		

原子核周期表

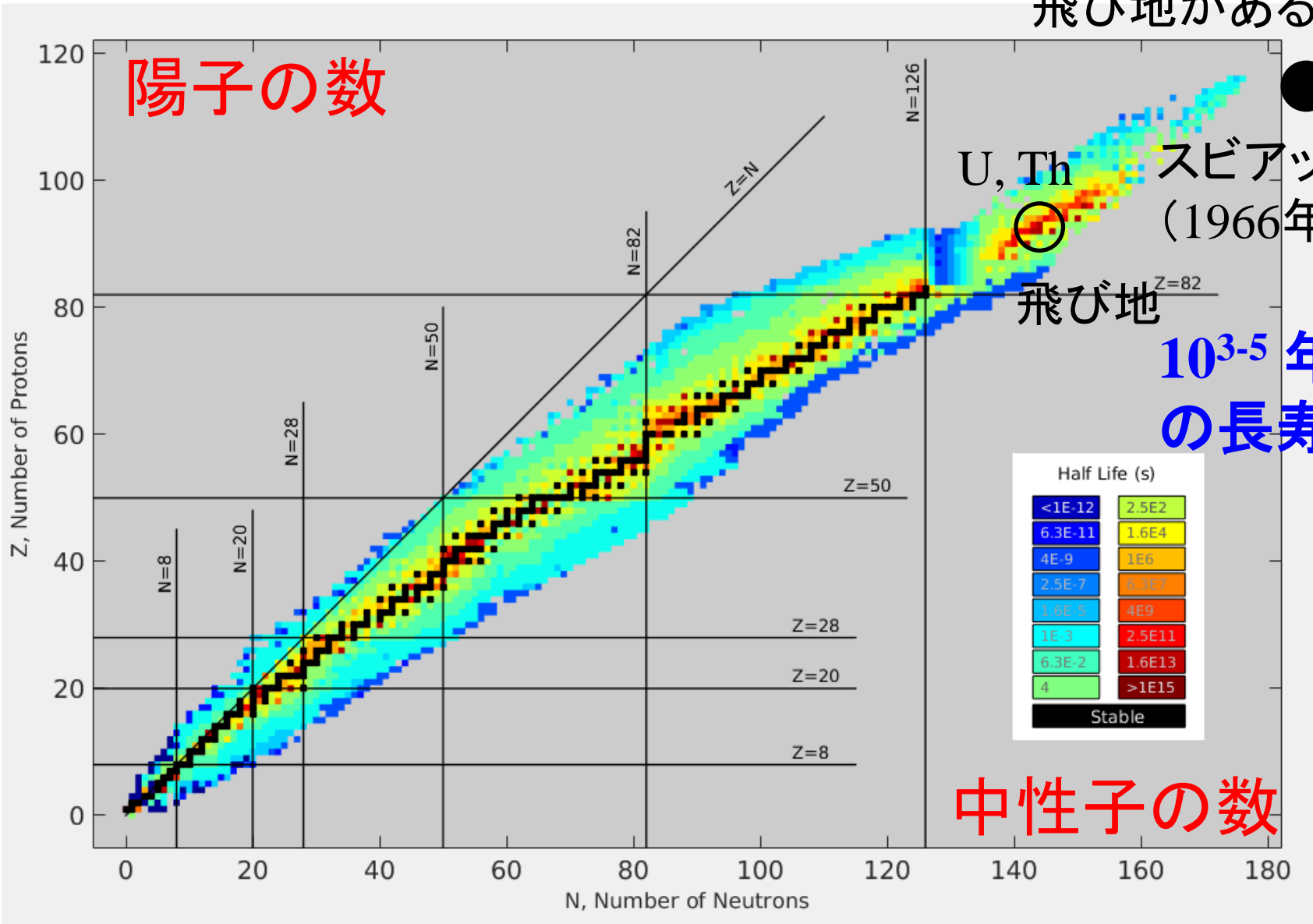
						H	He	Li	Be	B		
						C	N	O	F	Ne	Na	Mg
P	S	Cl	Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr			
				Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	
Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru			
		Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn			
Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og			
109	110	111	112	113	114	115	116	117	118			

^{114}Fl

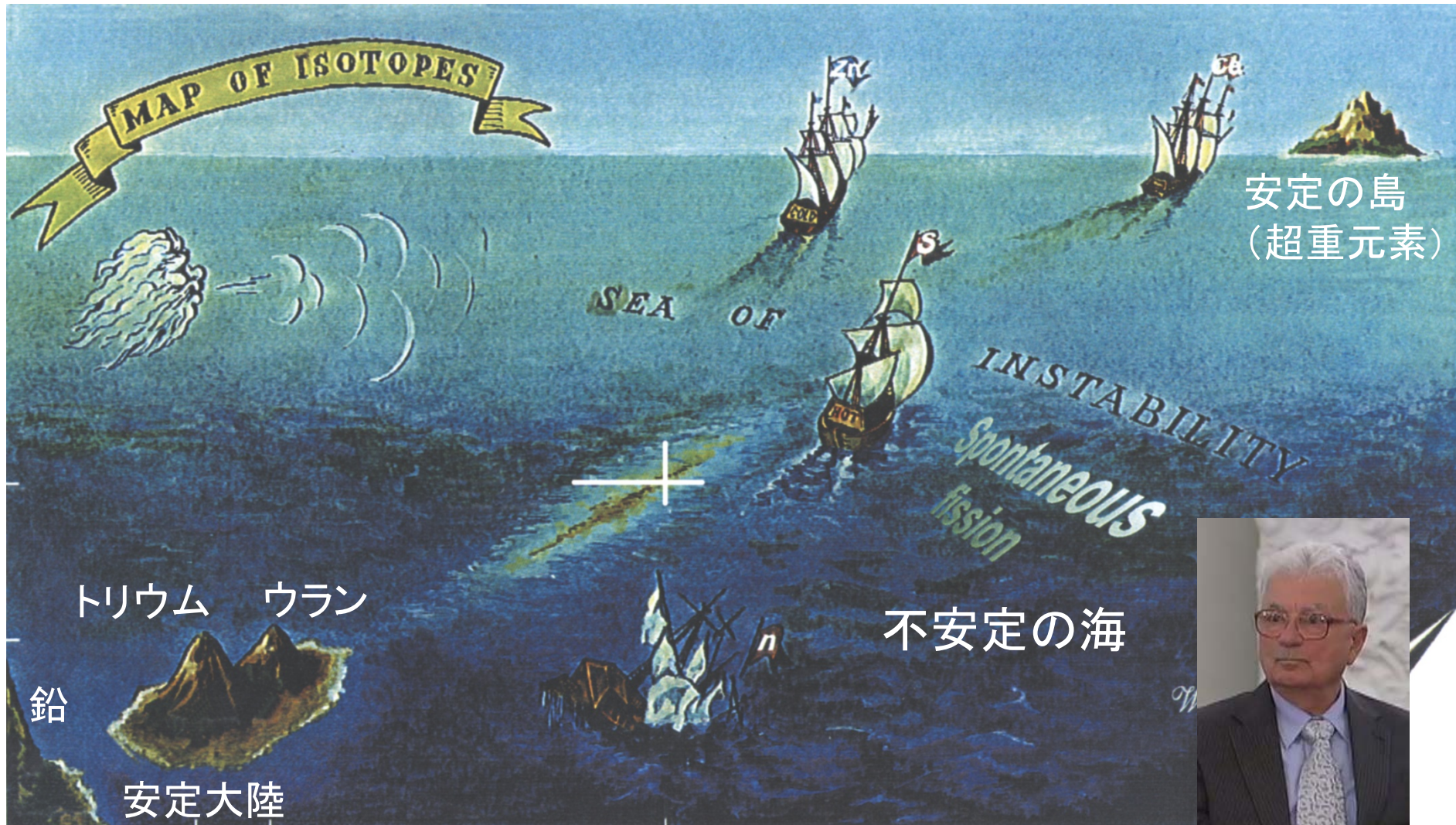
→ 超重元素

超重元素(殻効果と安定の島)

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



118

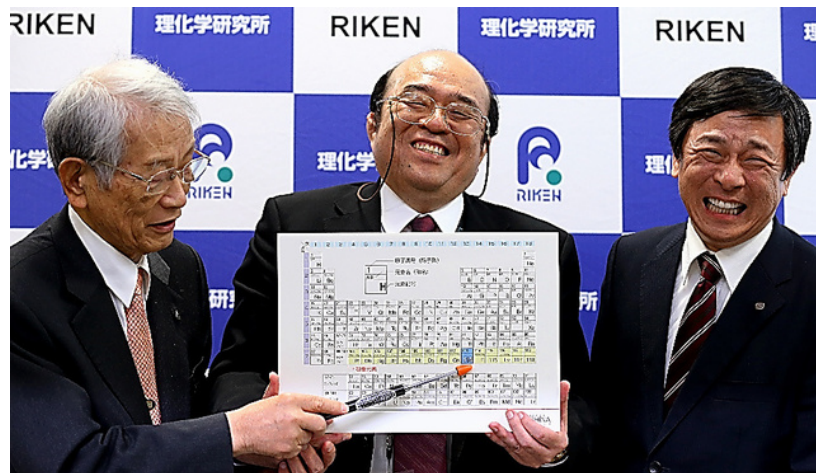
Og
oganeson

描画はYuri
Oganessian 氏

113番元素ニホニウム Nh

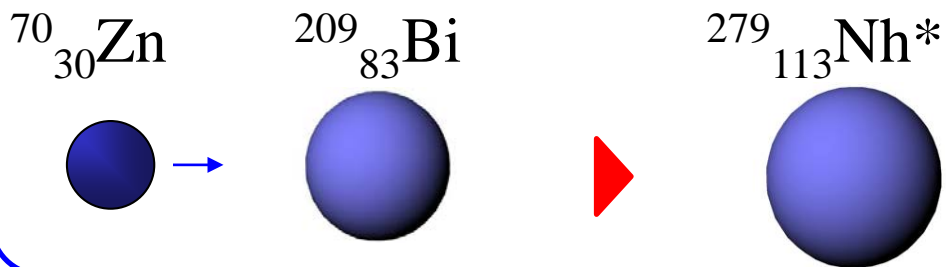
113 Nh nihonium	115 Mc moscovium
117 Ts tennessine	118 Og oganesson

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				

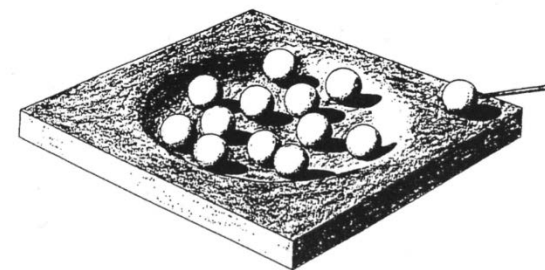
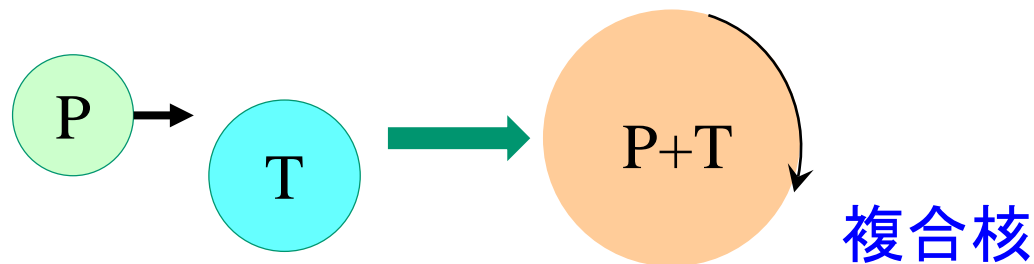
113
Nh
nihonium



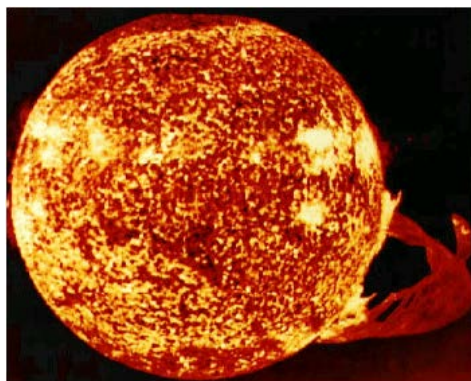
重イオン核融合反応

Wikipedia

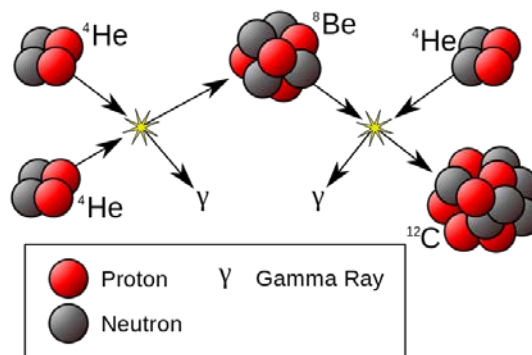
核融合反応： 複合核生成反応



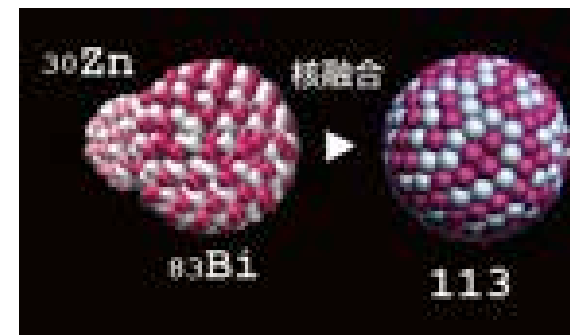
cf. N. Bohr '36



恒星のエネルギー源 (Bethe '39)



元素合成

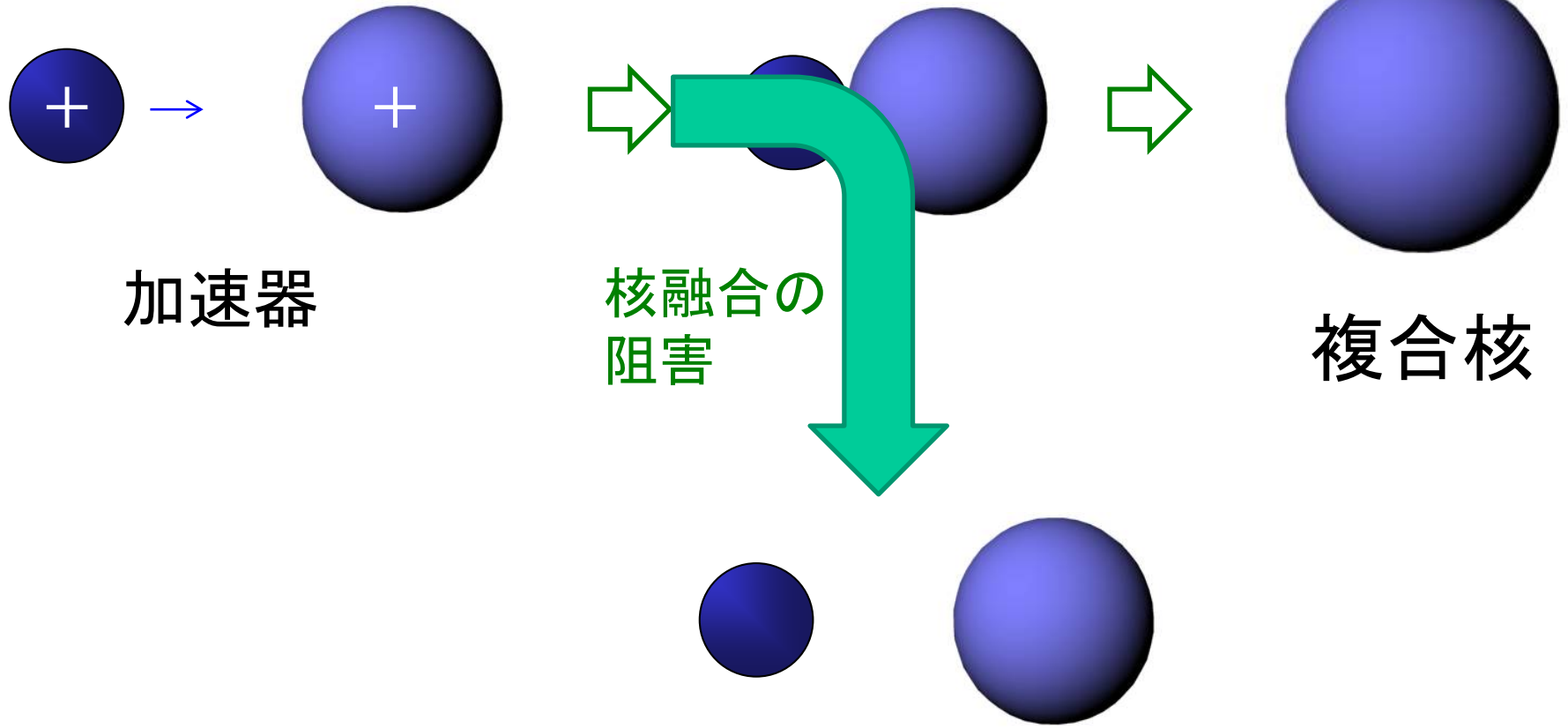


超重元素の合成

核融合・核分裂: 強い相互作用をする量子多体系の大振幅集団運動

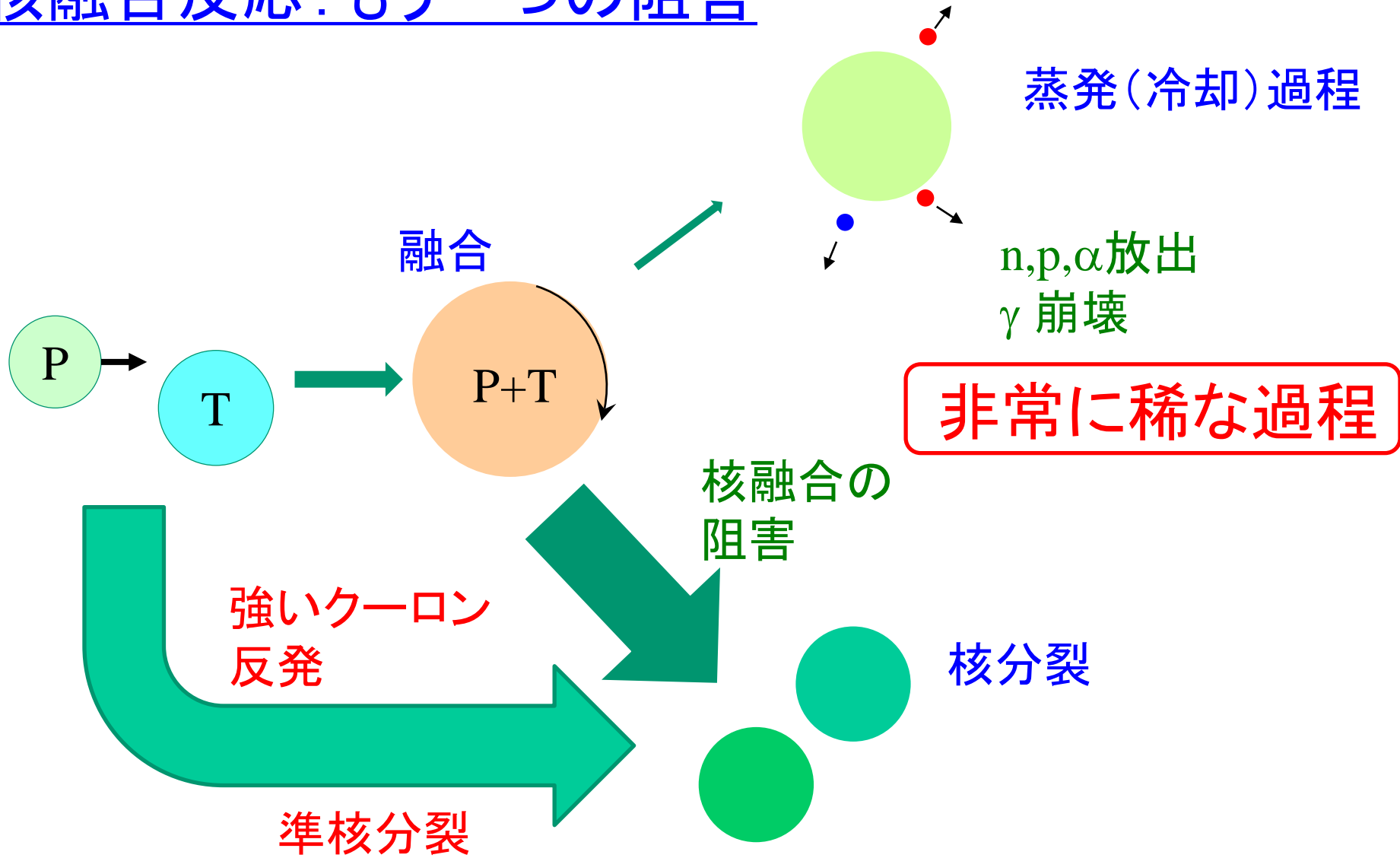
← 微視的理解: 核物理における究極の未解決問題の一つ

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



蒸発(冷却)過程

融合

n,p,α放出
γ崩壊

非常に稀な過程

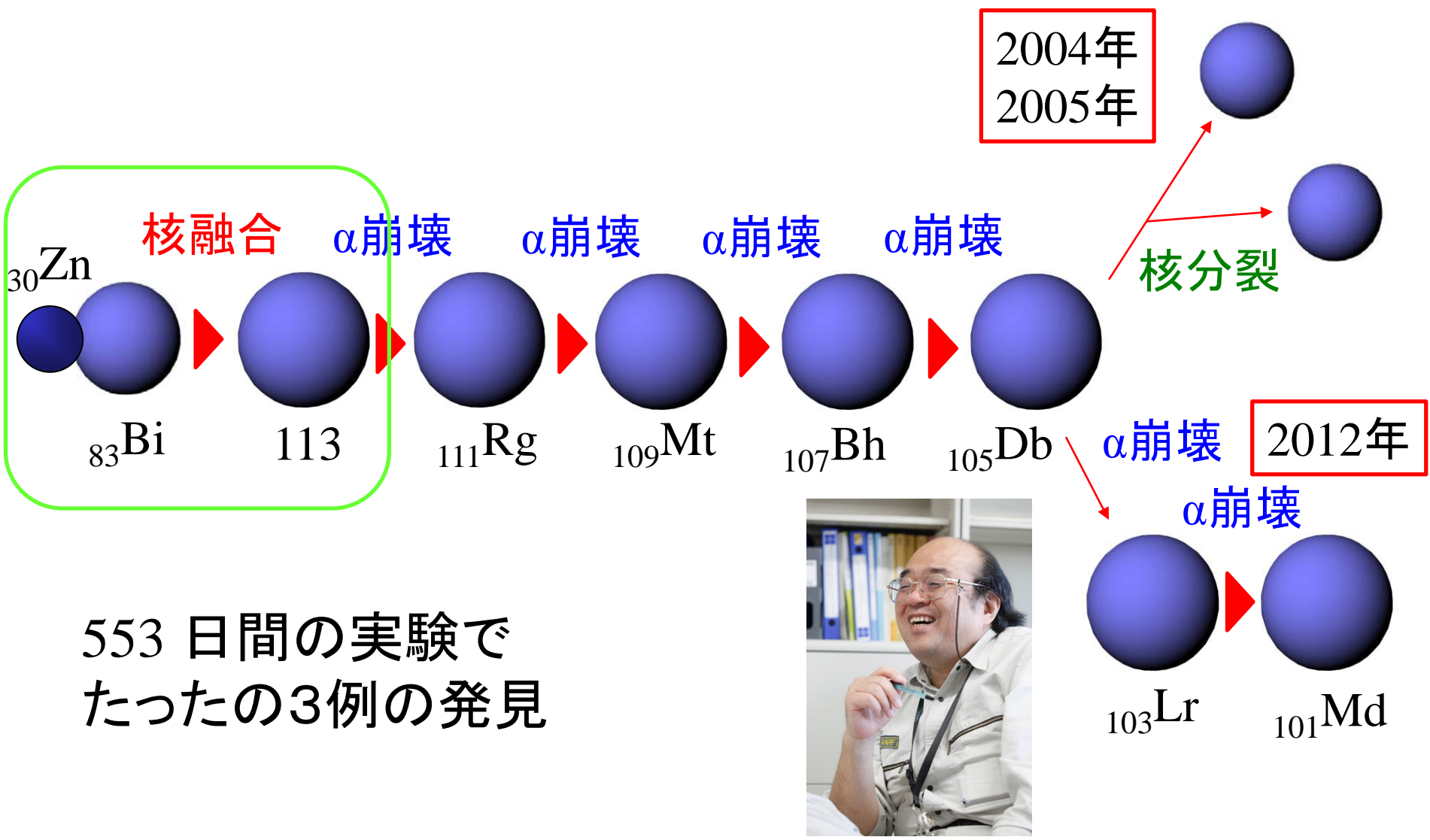
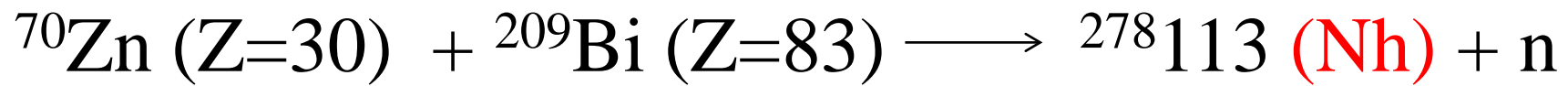
核融合の
阻害

核分裂

強いクーロン
反発

準核分裂

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)

新しい核反応モデルを開発:

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

➤ 理論物理学としての課題

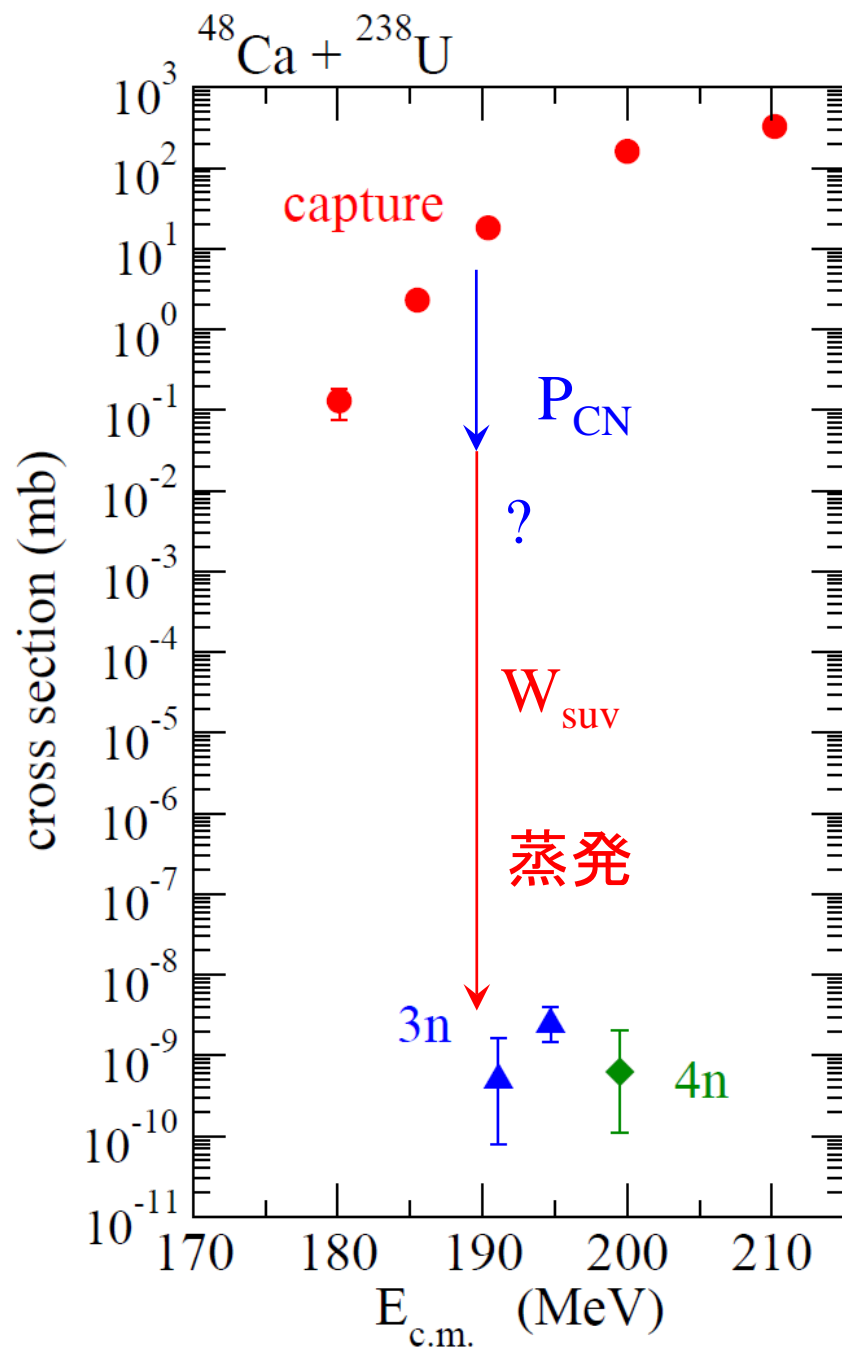
超重元素の生成

: 非常に稀な過程

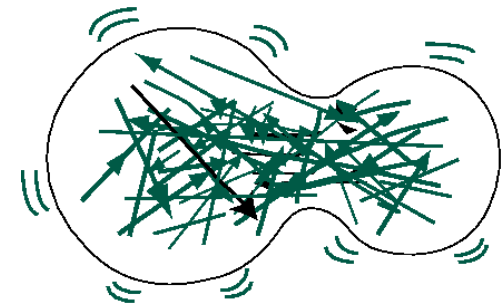
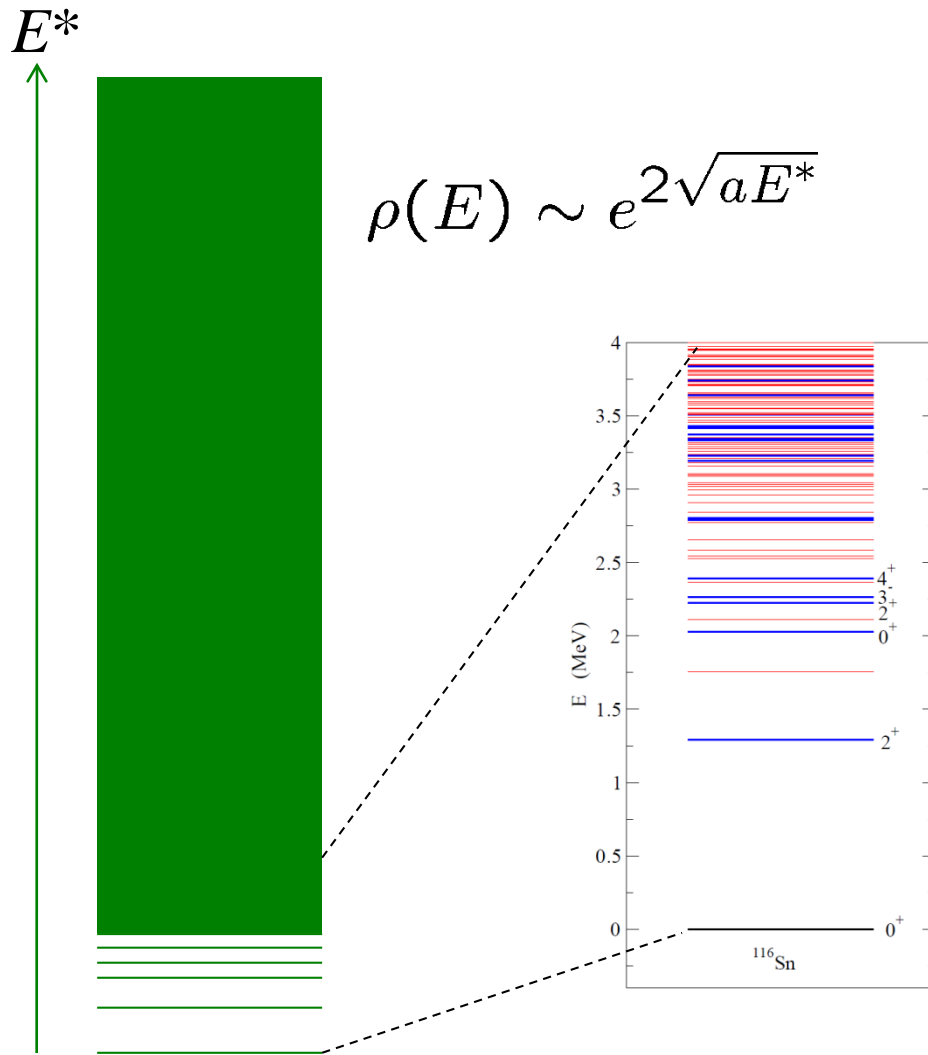
→ 大きな理論的不定性

挑戦的課題:

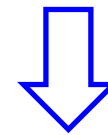
いかに理論的不定性を小さくして
信頼できる理論予言が出来るか?



重イオン核融合反応と量子開放系



核反応の途中で複雑に励起

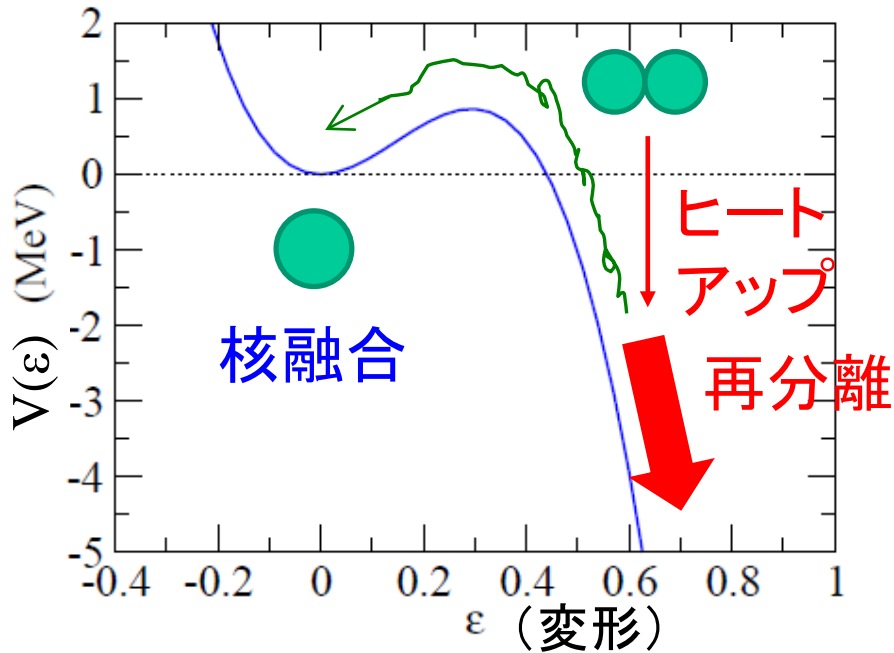


原子核の内部自由度:「環境」
「内的環境自由度」

→量子開放系の物理

原子核のスペクトル

ランジュバン法



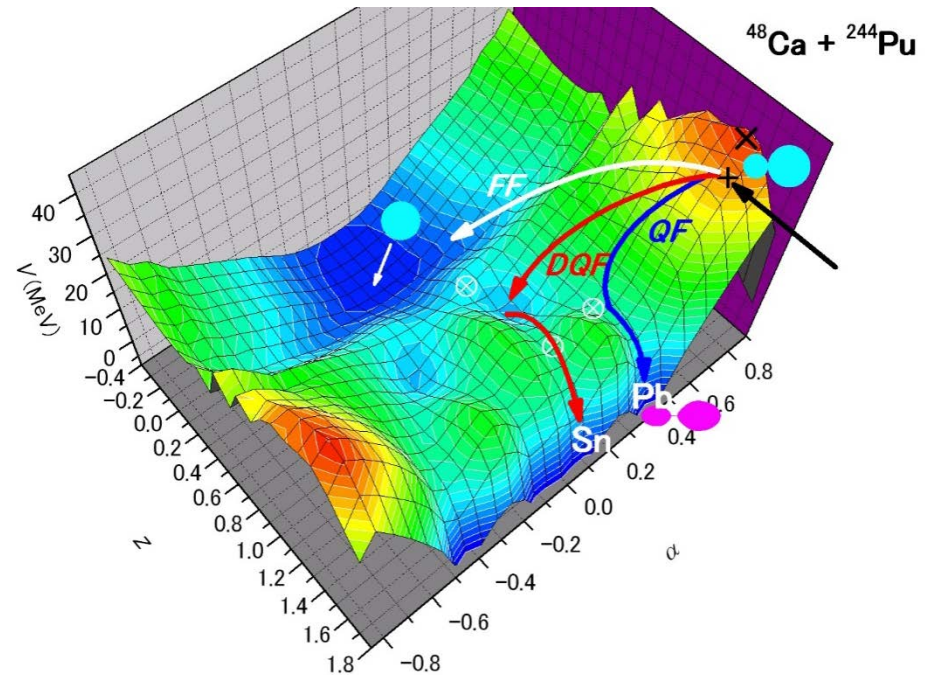
熱的拡散

→ 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

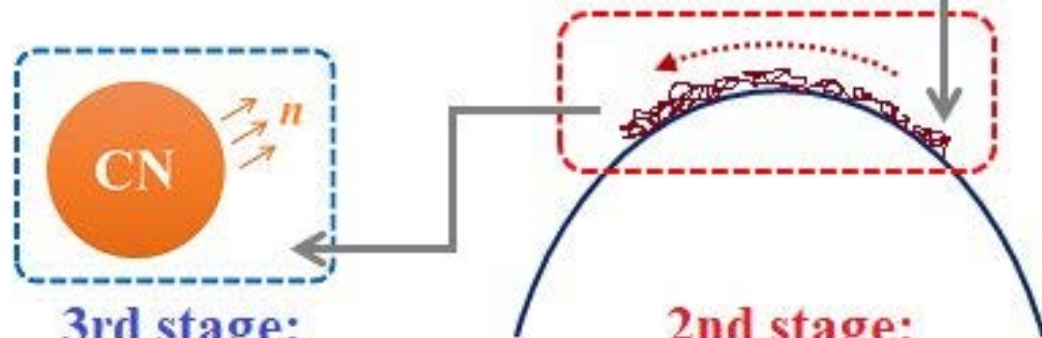
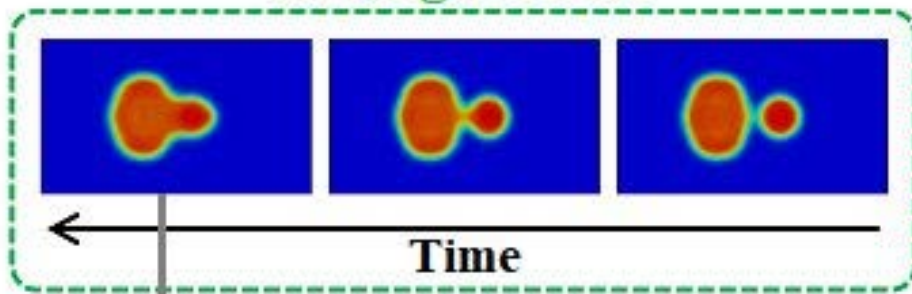
K. Sekizawa and K.H., PRC99 (2019) 051602(R)



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

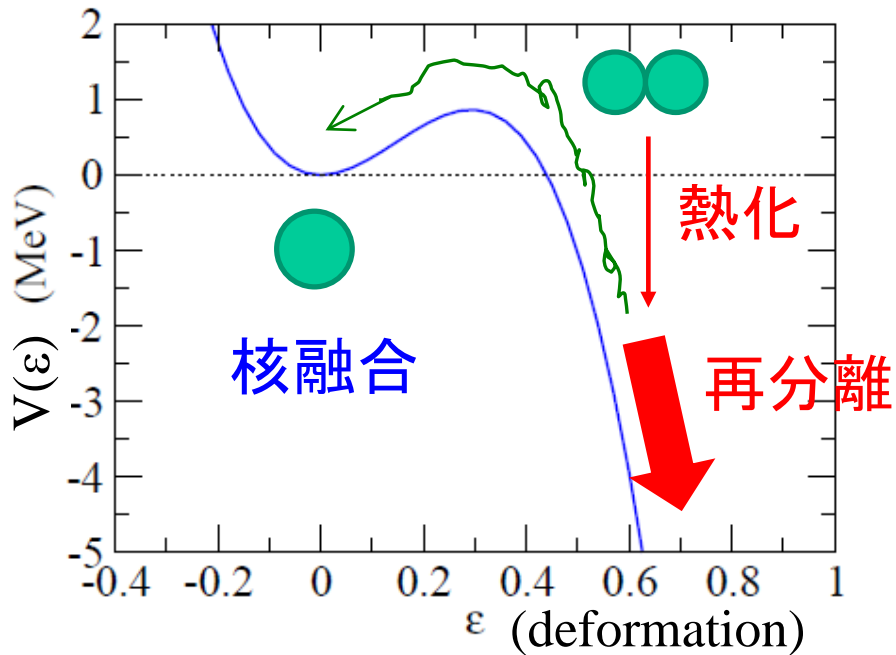
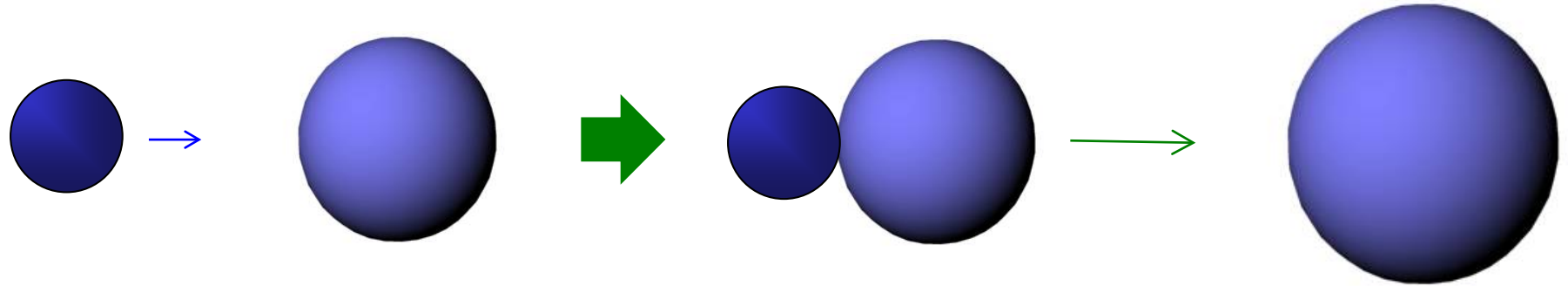
ランジュバン方程式

断面積の反応系依存性



Yuri Oganessian

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

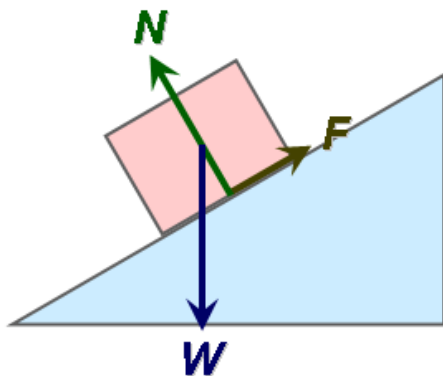
✓ 拡散に対する量子効果?

M. Tokieda and K.H.,
Ann. of Phys. 412 (2020)

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

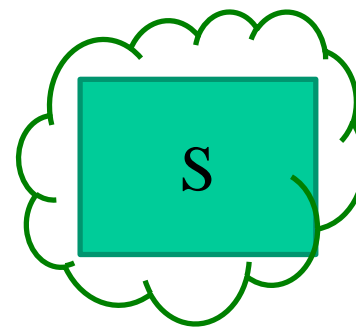
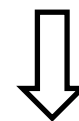
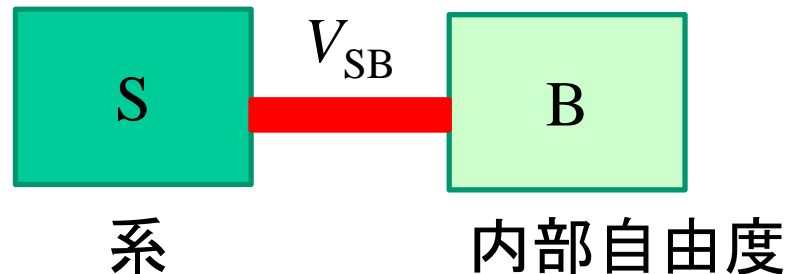


エネルギーが物体から内部
自由度(原子)に転化

量子ランジュバンへ



量子力学では:



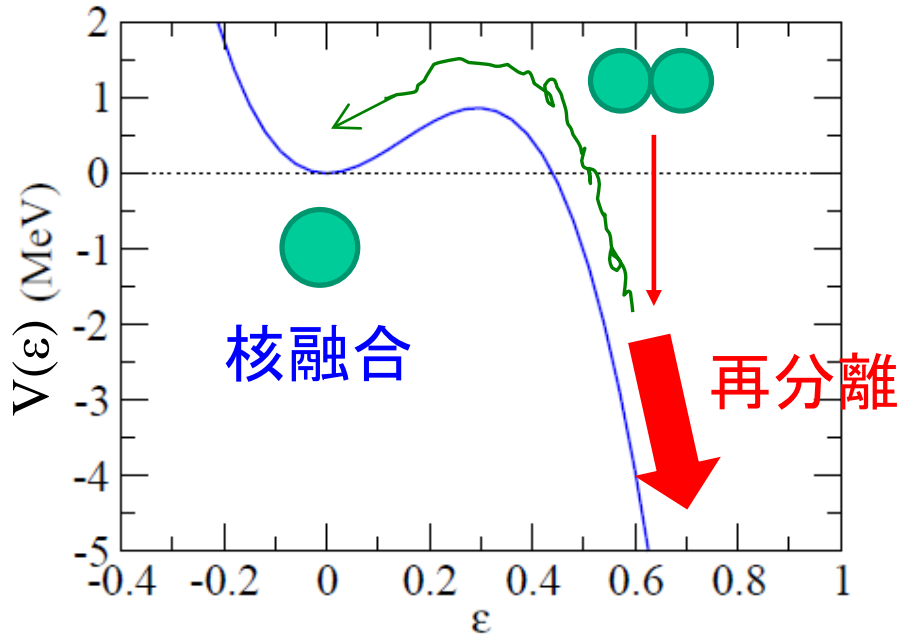
系に衣を着せて解く

最近、衣を着せずに解く方法を開発

M. Tokieda and K.H.,
Ann. of Phys. 412 ('20) 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

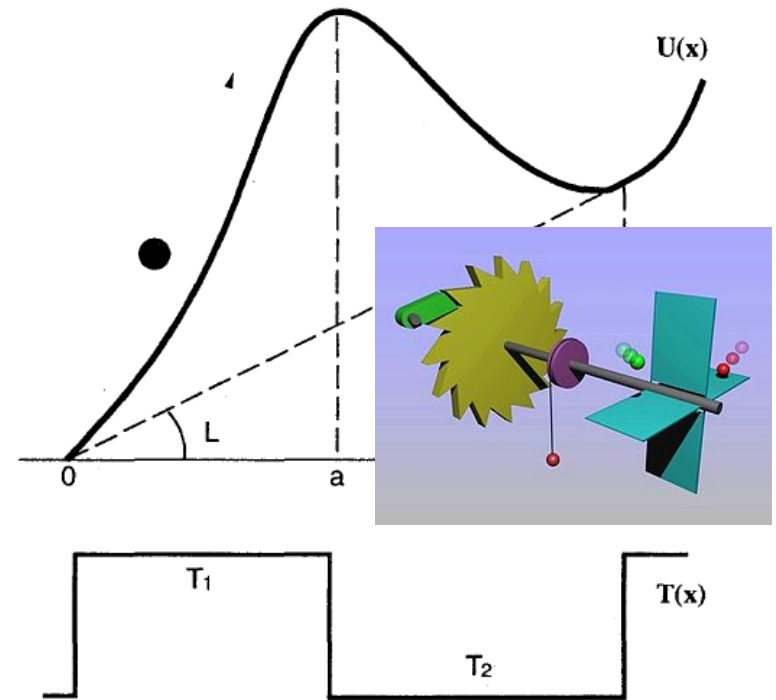
➤ 超重核合成反応



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

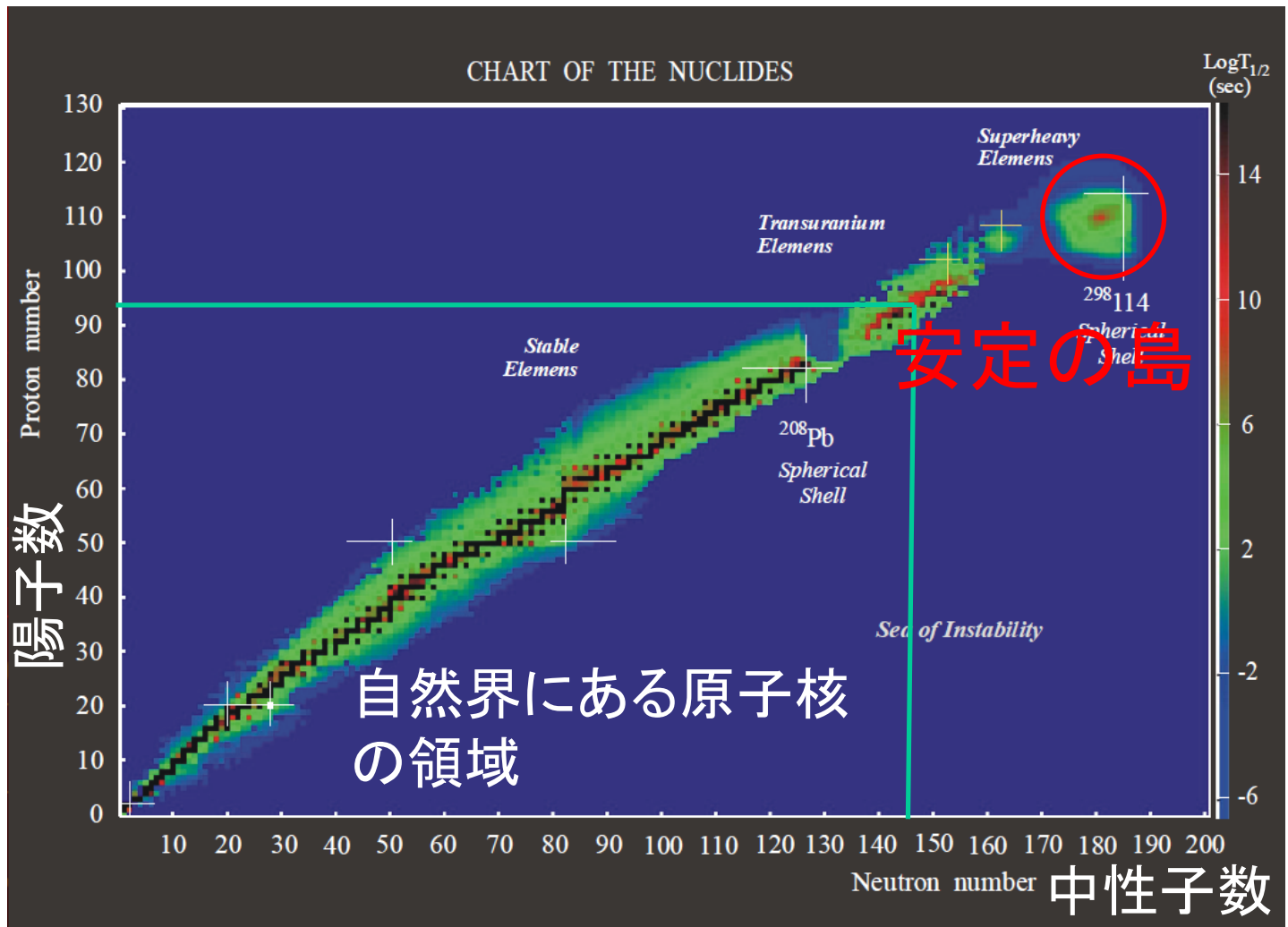


松尾美希、物性研究 73 ('99) 557
佐々さん

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

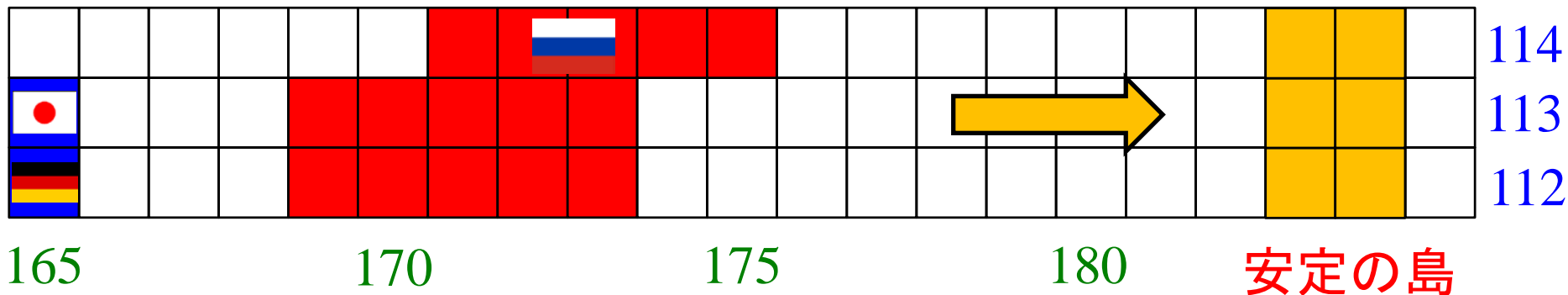
もう一つの重要な課題



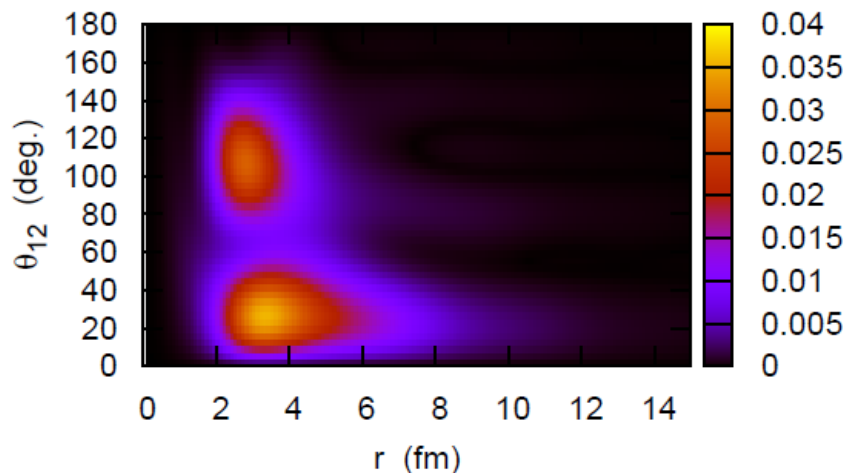
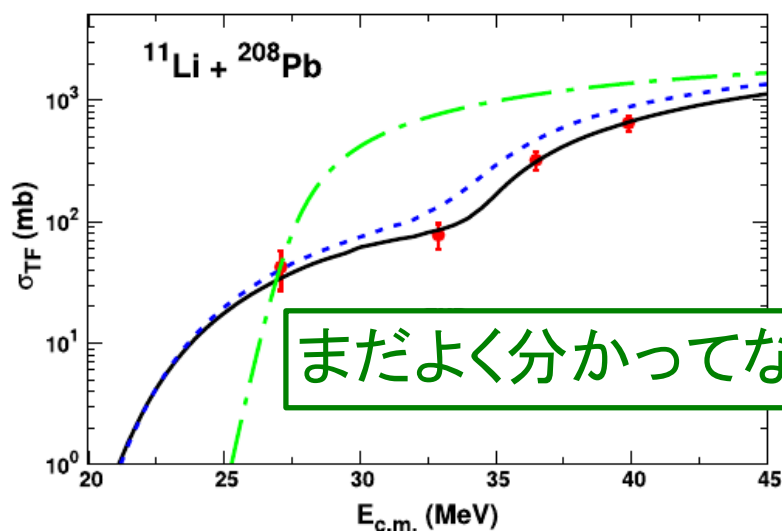
Yuri Oganessian

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?

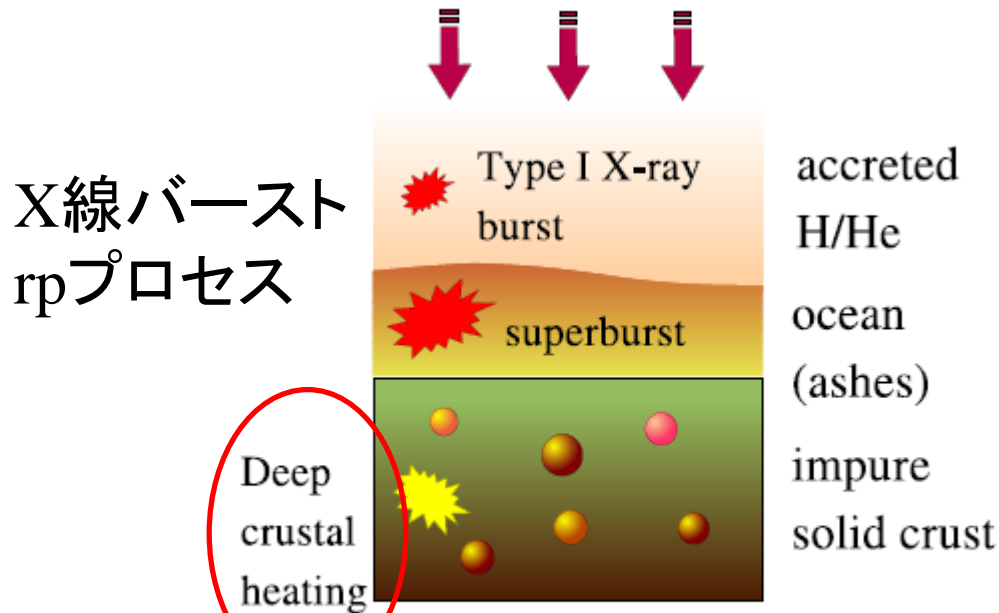


K.H. and H. Sagawa, PRC72('05)044321

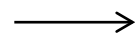
K.-S. Choi, K. Hagino et al.,
Phys. Lett. B780 ('18) 455

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



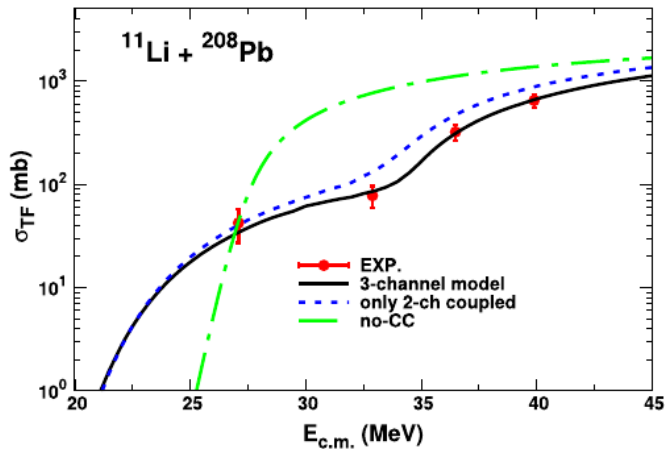
中性子過剰核の核融合反応



X線連星の静穏期
におけるX線の起源

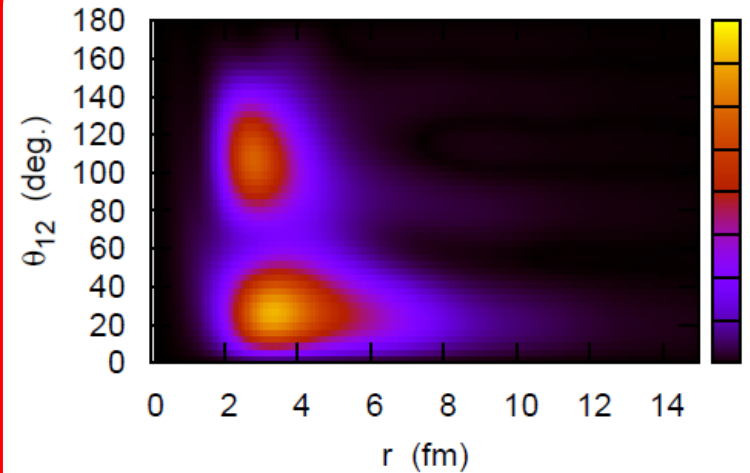


中性子過剰核の反応



- ✓ 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

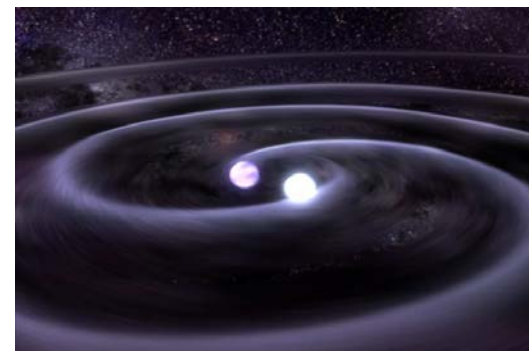
- ✓ 量子開放系の物理
- ✓ 中性子過剰核

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	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
- ✓ 相対論的效果

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

