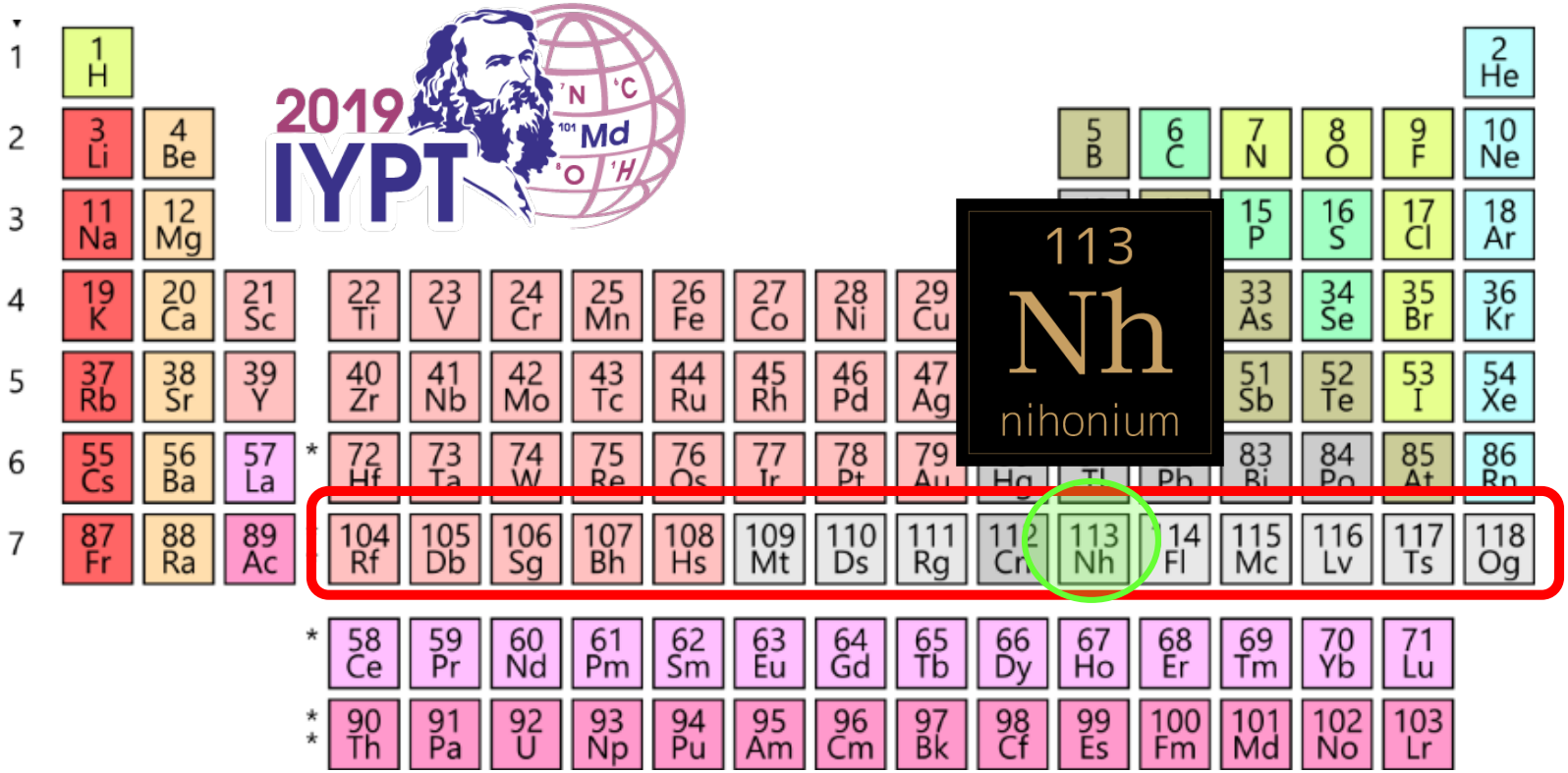
超重元素の世界
～ニホニウムの先にあるもの～

京都大学大学院理学研究科　教授
萩野浩一



簡単な自己紹介

名前：萩野浩一（はぎのこういち）
生年：昭和46年（48歳）
生まれ：宮城県仙台市
（両親が仙台市出身）
育ち：神奈川県平塚市、
北海道札幌市、
千葉県銚子市

簡単な自己紹介

略歴：・市立銚子高校
・東北大学理学部（学部、大学院）
・ワシントン大学（ポスドク研究員）
・京都大学基礎物理学研究所（助手）

＊当時の所長：益川敏英氏

・東北大学理学部（助教授、准教授）
・この8月から京都大学理学部教授

専門：理論物理学（原子核理論）
ニホニウムとも関連した研究

超重元素の世界
～ニホニウムの先にあるもの～

げんそ

元素

この世の中にあるものは、
すべて元素からできています。

元素　＝　すべてのものを作る材料

材料

材料

元素

元素の周期表

水兵リーベ僕の船
七曲りシップスクラークか！

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

- ✓ 世の中のすべてのものが約90種類の元素の組み合わせ
- ✓ 元素をうまく並べると縦に同じ性質を持つものが並ぶ

ニホニウム命名記念式典（平成29年3月14日、日本学士院）

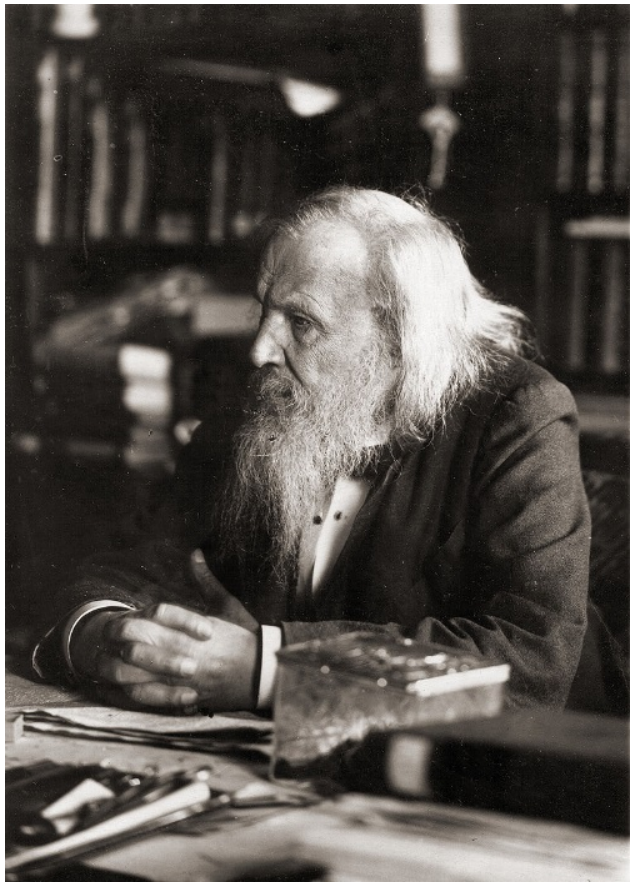
皇太子殿下（当時）:「高校2年生の時の化学の夏休みの宿題は元素の周期表を30枚以上手書きで書くというものでした。」

元素の周期表（1869年に発表）

2019 IYPT

International Year
of the Periodic Table
of Chemical Elements

国際周期表年



メンデレーエフ
(1834-1907)

元素の周期表（1869年に発表）

2019 IYPT

International Year
of the Periodic Table
of Chemical Elements

国際周期表年

閉会式（令和元年12月5日：東京）

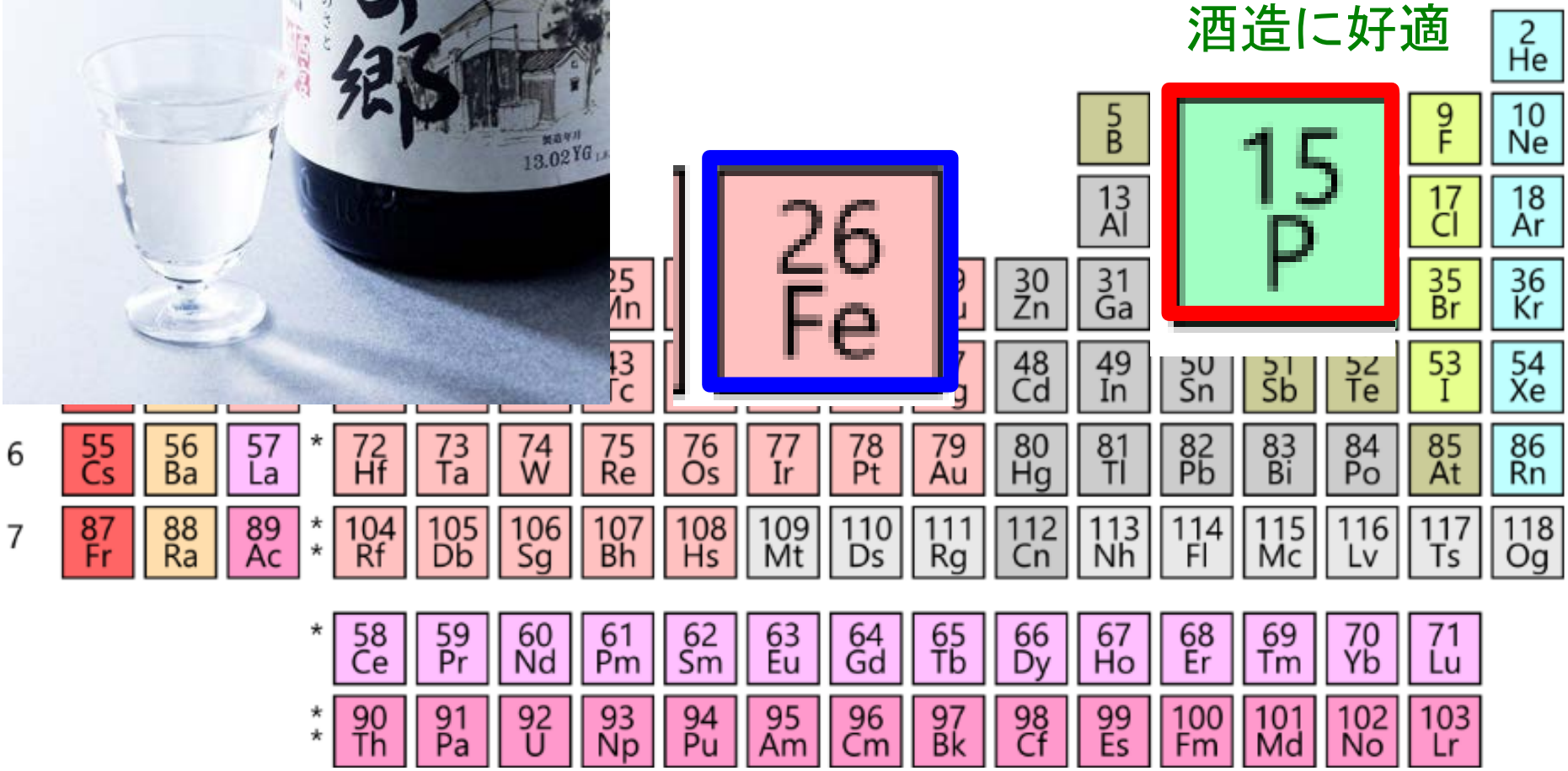
西宮：灘のお酒

宮水

リン（15番元素）が多く

鉄（26番元素）が少ない

酒造に好適



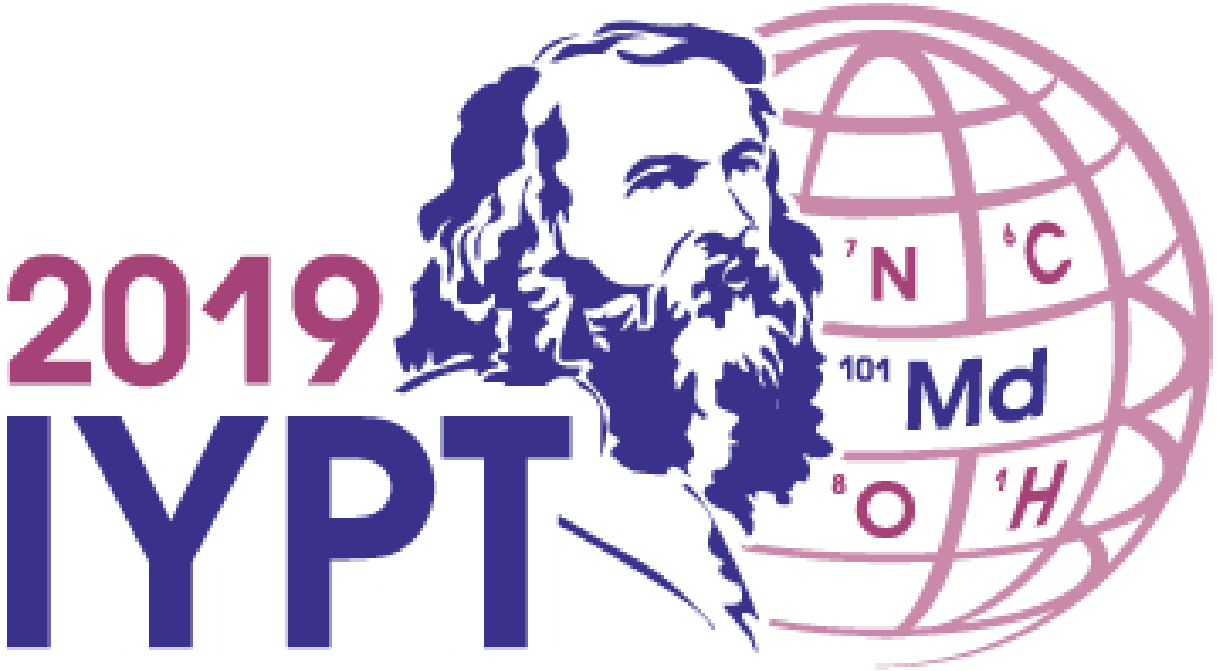
超重元素の世界
～ニホニウムの先にあるもの～

京都大学大学院理学研究科　教授
萩野浩一

今日お話ししたいこと

1. はじめに:もう少し元素について
2. ニホニウムについて
3. 超重元素に関する現在の研究と今後
4. おわりに

国際周期表年



このロゴマークに書かれている元素は何？

５つの元素：
N（7番）、C（6番）、Md（101番）、O（8番）、H（1番）

このロゴマークに書かれている
元素は何？

H (Z=1)
C (Z=6)
N (Z=7)
O (Z=8)

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

Md（Z=101）メンデレビウム

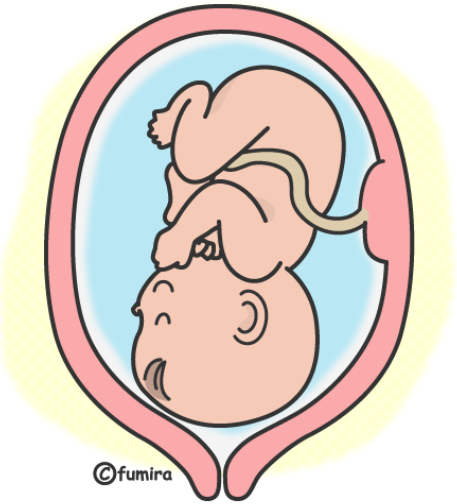
人の体はどんな元素から出来ている?

酸素 43 kg
炭素 16 kg
水素 7 kg
窒素 1.8 kg
カルシウム 1.0 kg
リン 780 g
カリウム 140 g
硫黄 140 g
ナトリウム 100 g
塩素 95 g
マグネシウム 19 g
鉄 4.2 g
フッ素 2.6 g
亜鉛 2.3 g
ケイ素 1.0 g
ルビジウム 0.68 g
ストロンチウム0.32 g
臭素 0.26 g
鉛 0.12 g
銅 72 mg
アルミニウム 60 mg
カドミウム50 mg

セリウム 40 mg
バリウム 22 mg
ヨウ素 20 mg
スズ 20 mg
チタン 20 mg
ホウ素 18 mg
ニッケル 15 mg
セレン 15 mg
クロム 14 mg
マンガン 12 mg
ヒ素 7 mg
リチウム 7 mg
セシウム 6 mg
水銀 6 mg
ゲルマニウム 5 mg
モリブデン 5 mg
コバルト 3 mg
アンチモン 2 mg
銀 2 mg
ニオブ 1.5 mg
ジリコニウム 1 mg
ランタン 0.8 mg

ガリウム 0.7 mg
テルル 0.7 mg
イットリウム 0.6 mg
ビスマス 0.5 mg
タリウム 0.5 mg
インジウム 0.4 mg
金 0.2 mg
スカンジウム 0.2 mg
タンタル 0.2 mg
バナジウム 0.11 mg
トリウム 0.1 mg
ウラン 0.1 mg
サマリウム 50 µg
ベリリウム 36 µg
タングステン 20 µg

John Emsley,
“The Elements”,
3rd ed. Clarendon Press,
Oxford, 1998



羊水に含まれる主な元素

1. 水素
2. 酸素
3. ナトリウム
4. 塩素
5. カリウム
6. カルシウム
7. マグネシウム

海水に含まれる主な元素

1. 水素
2. 酸素
3. ナトリウム
4. 塩素
5. マグネシウム
6. 硫黄
7. カリウム
8. カルシウム

生命は海から生まれた?

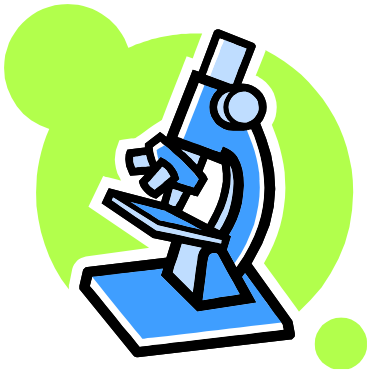
物質が元素からできているってどういう意味？

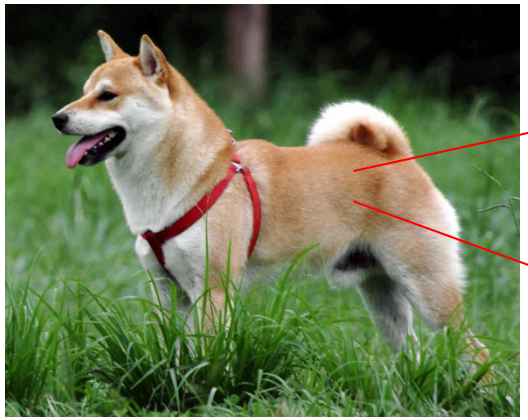
~ 50 cm

物質が元素からできているってどういう意味？

~ 50 cm

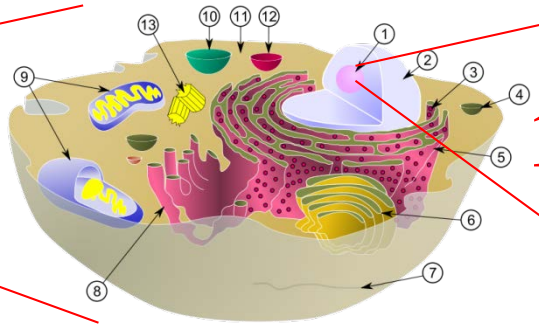
拡大してみてみると?





~ 50 cm

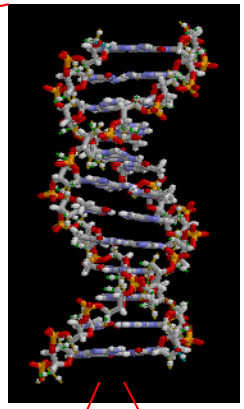
細胞



~ μm = 10^{-6} m

100倍

DNA

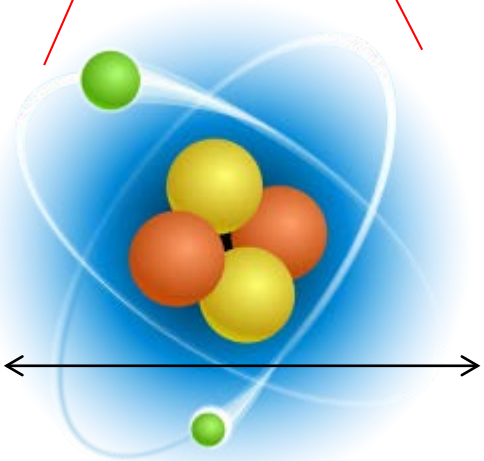


~ 10^{-8} m

50万倍

100倍

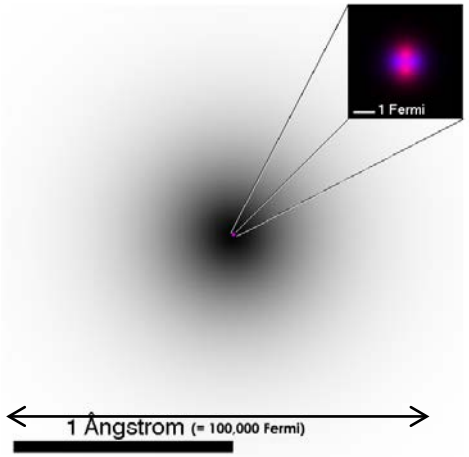
原子



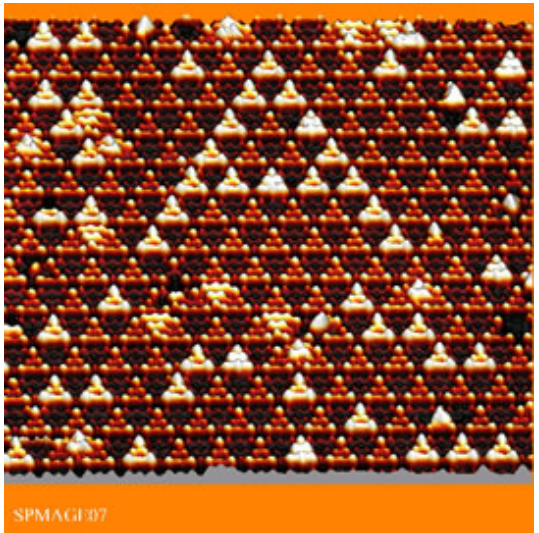
~ 10^{-10} m

すべてのものは原子から組み立てられる

- タレス、デモクリトス（古代ギリシャ）
- ドルトン（19世紀初頭の化学者）
- ボルツマン（19世紀後期）
- アインシュタイン（1905年）



~ 10^{-10} m



走査トンネル顕微鏡
の写真
（東北大学物理学専攻
表面物理研究室）

すべてのものは原子から組み立てられる

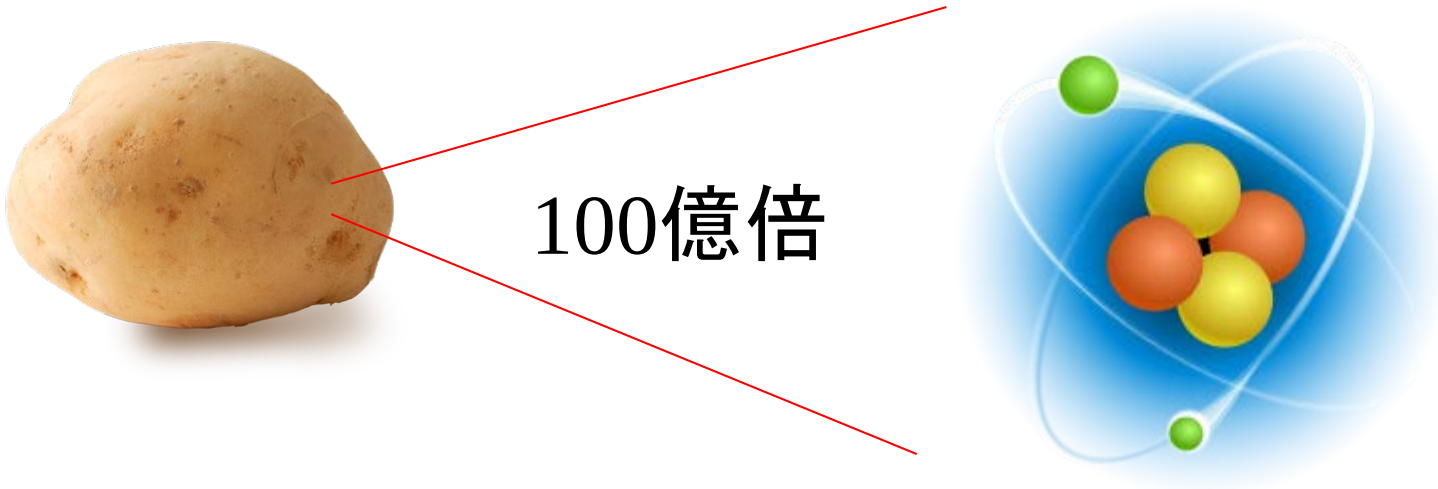
たった一つの文章で現代科学の成果をまとめると:

「万物は原子から構成されている」

（リチャード・ファインマン）

リチャード・ファインマン
(1918-1988)
1965 年ノーベル物理学賞受賞
(写真：The Nobel Foundation)

ジャガイモも拡大すると原子の集まり



げんし
原子

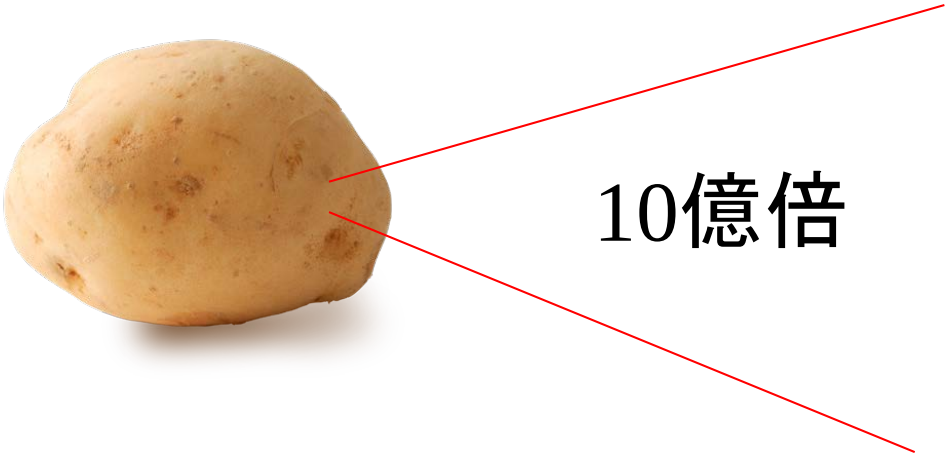
100グラムのジャガイモの中には、

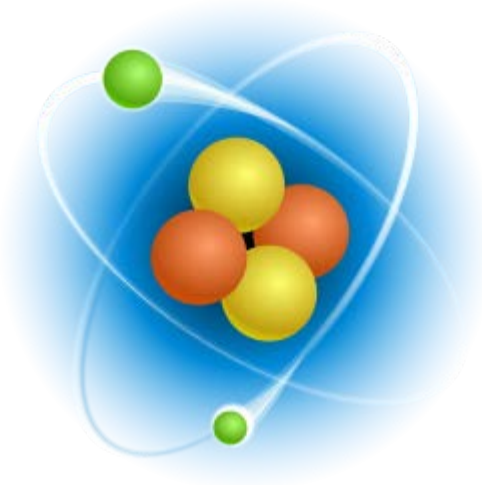
約100000000000000000000000000 個

（10序個）の原子が入っている!!

＝1兆 x 1兆 x 千

なんとゼロが25 個!!
一、十、百、千、万、億、兆、
京、垓、序（じょ）、穣（じょう）、、、





原子

原子にもいろいろな種類　＝　元素

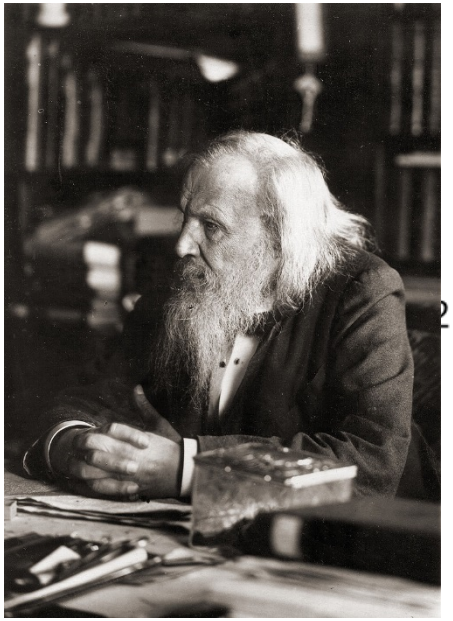
- 水素
- 酸素
- 炭素
- カルシウム
- マグネシウム
- 硫黄　　など。

この世の中には約90種類の元素がある

軽い順に並べると

1. 水素
2. ヘリウム
3. リチウム
4. ベリリウム
5. ホウ素
6. 炭素
7. 窒素
8. 酸素
9. フッ素
10. ネオン
11. ナトリウム
12. マグネシウム
13. アルミニウム
14. ケイ素
15. リン
16. 硫黄
17. 塩素
18. アルゴン
19. カリウム
20. カルシウム
21. スカンジウム
22. チタン
23. バナジウム
24. クロム
25. マンガン
26. 鉄
27. コバルト
28. ニッケル
29. 銅
30. 亜鉛
31. ガリウム
32. ゲルマニウム
33. ヒ素
34. セレン
35. 臭素
36. クリプトン
37. ルビジウム
38. ストロンチウム
39. イットリウム
40. ジルコニウム
41. ニオブ
42. モリブデン
43. テクネチウム
44. ルテニウム
45. ロジウム
46. パラジウム
47. 銀
48. カドミウム
49. インジウム
50. スズ
51. アンチモン
52. テルル
53. ヨウ素
54. キセノン
55. セシウム
56. バリウム
57. ランタン
58. セリウム
59. プラセオジム
60. ネオジウム
61. プロメチウム
62. サマリウム
63. ユウロビウム
64. ガドリニウム
65. テルビウム
66. ジスプロシウム
67. ホルミウム
68. エルビウム
69. ツリウム
70. イッテルビウム
71. ルテチウム
72. ハフニウム
73. タンタル
74. タングステン
75. レニウム
76. オスミウム
77. イリジウム
78. 白金
79. 金
80. 水銀
81. タリウム
82. 鉛
83. ビスマス
84. ポロニウム
85. アスタチン
86. ラドン
87. フランシウム
88. ラジウム
89. アクチニウム
90. トリウム
91. プロトアクチニウム
92. ウラン

元素の周期表



メンデレーエフ
(1834-1907)

Group → / 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	

元素の周期表

Group → / ↓ 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		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

周期的に同じ性質を持つ元素が並ぶ
（メンデレーエフ 1869年）

→ 未知の原子の性質が予言できる

ガリウムの発見（1874 年）
ゲルマニウムの発見（1879年）

（少し余談）
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(?)

元素のルーツ：元素のファミリーヒストリー

→ 宇宙でうまれた

ビッグバン
（138億年前）

Li

「知ろうとすること。」
早野龍五、糸井重里　著
新潮文庫

「僕たちの体の中の水素は
138億歳。

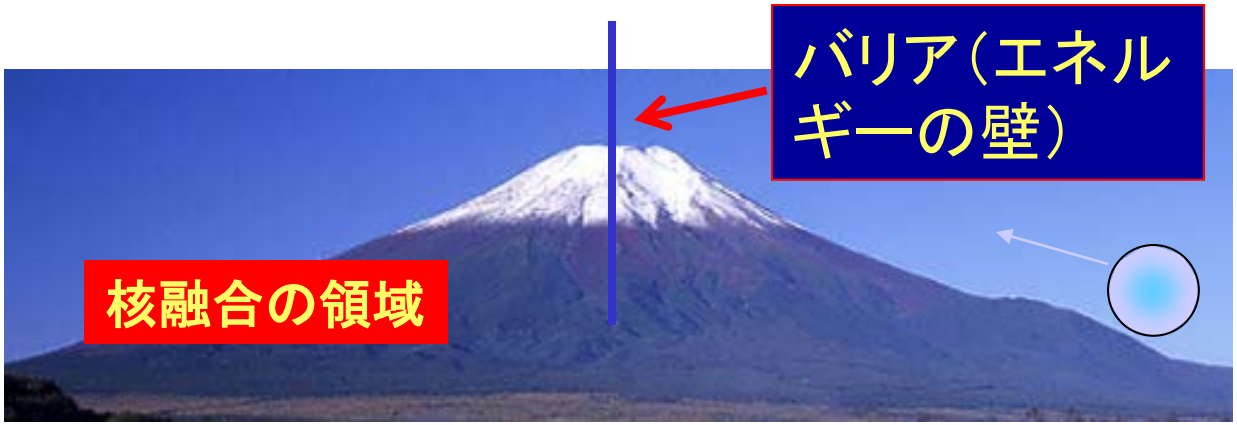
つまり、ビッグバンの時に
できた水素が巡り巡って
僕たちの体の中にある。」

Fe までの元素はどのように出来たのか?

Feまでの元素の起源

（大質量）星の内部での核融合反応

⟶ 恒星が光っているもと



原子核を勢いよくぶつけるとバリアを乗り越えて核融合が起きる

…しかし、星（太陽）の中では「勢い」（エネルギー）が足りない

量子力学(りょうしりきがく)

物質は波の性質と粒子の性質の両方を持っている

電子:粒子
　　ド・ブロイ波

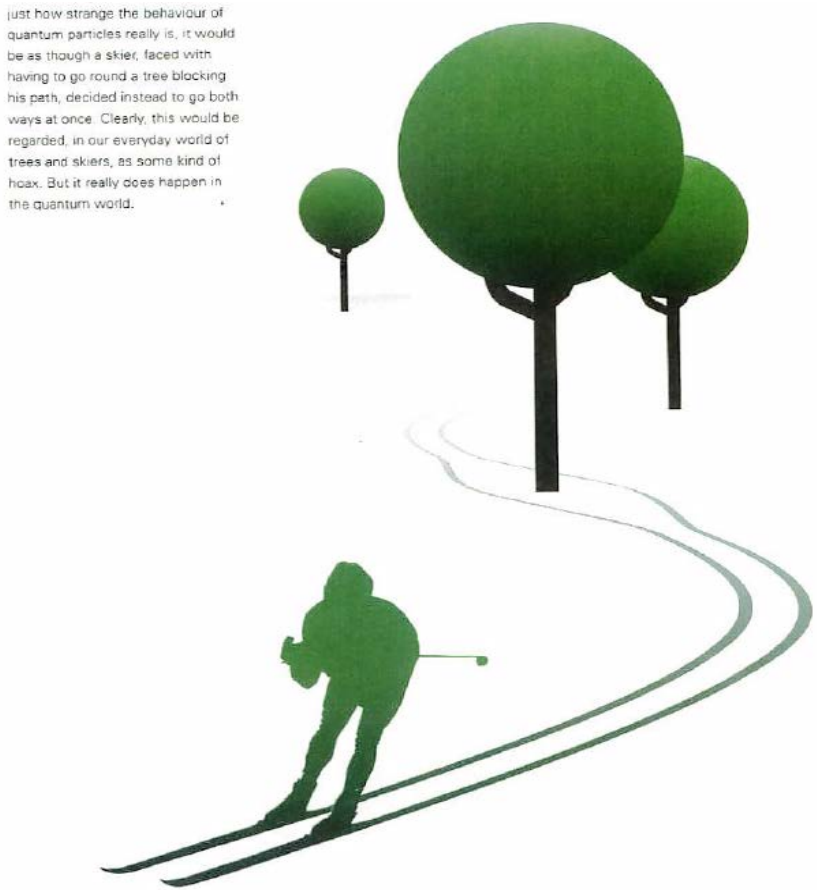
電磁波:波
　　光子

ハイゼンベルクの不確定性原理

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq 10^{-34} \quad \mathrm{J\ s}$$

位置と運動量を同時に決めることはできない

ハイゼンベルク
（1901～1976）



「見て楽しむ量子物理学の世界」
ジム・アルカリーリ著

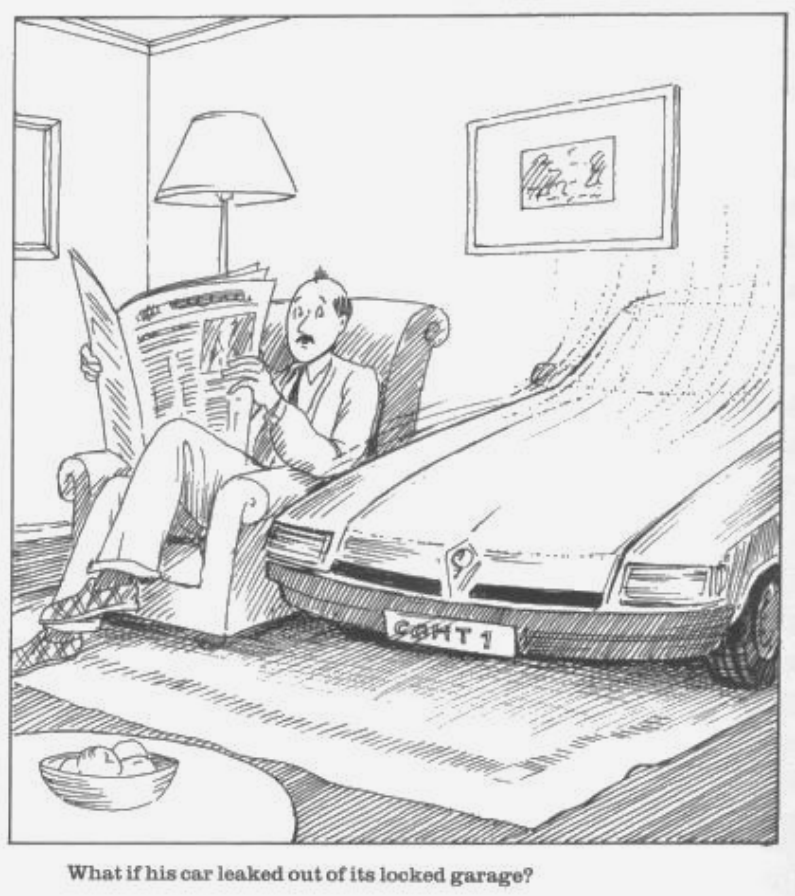
ハイゼンベルクの不確定性原理

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq 10^{-34} \quad \text{Ｊｓ}$$

位置と運動量を同時に決めることはできない

ハイゼンベルク
（1901～1976）

....もし $\Delta p \cdot \Delta x \geq 10$ Ｊｓだったら.....



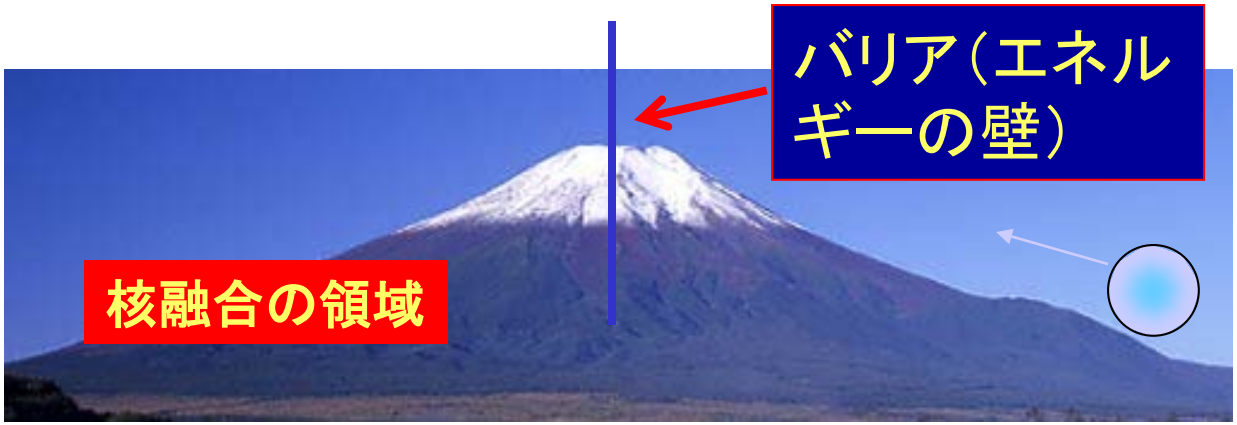
What if his car leaked out of its locked garage?

車が壁をすり抜ける!?

↑

実際には質量が軽い場合のみ

電子の質量：約 10^{-27} g
陽子の質量：約 10^{-24} g



原子核を勢いよくぶつけるとバリアを乗り越えて核融合が起きる

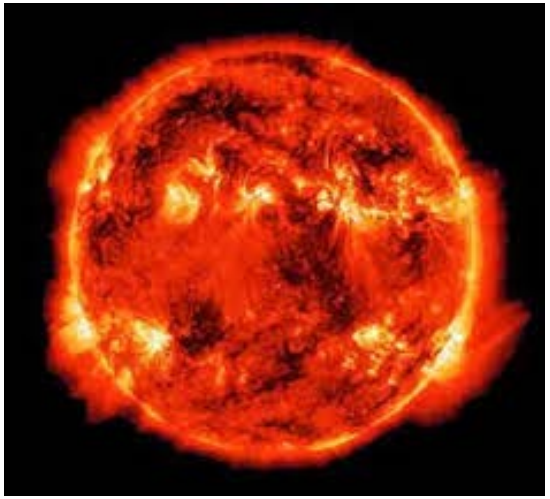
…しかし、星（太陽）の中では「勢い」（エネルギー）が足りない

→ 「量子トンネル現象」で星は輝いている

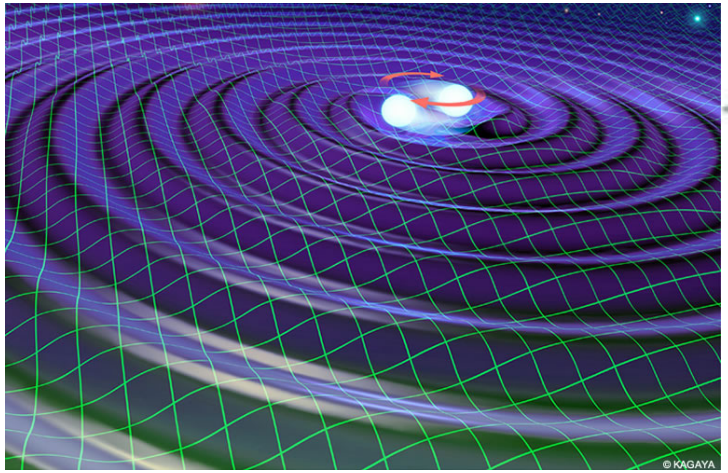
ジャック・デュケノワ著「おばけパーティー」より

Fe より重い元素はどのように出来たのか?

中性子の吸収



赤色巨星



中性子星の合体

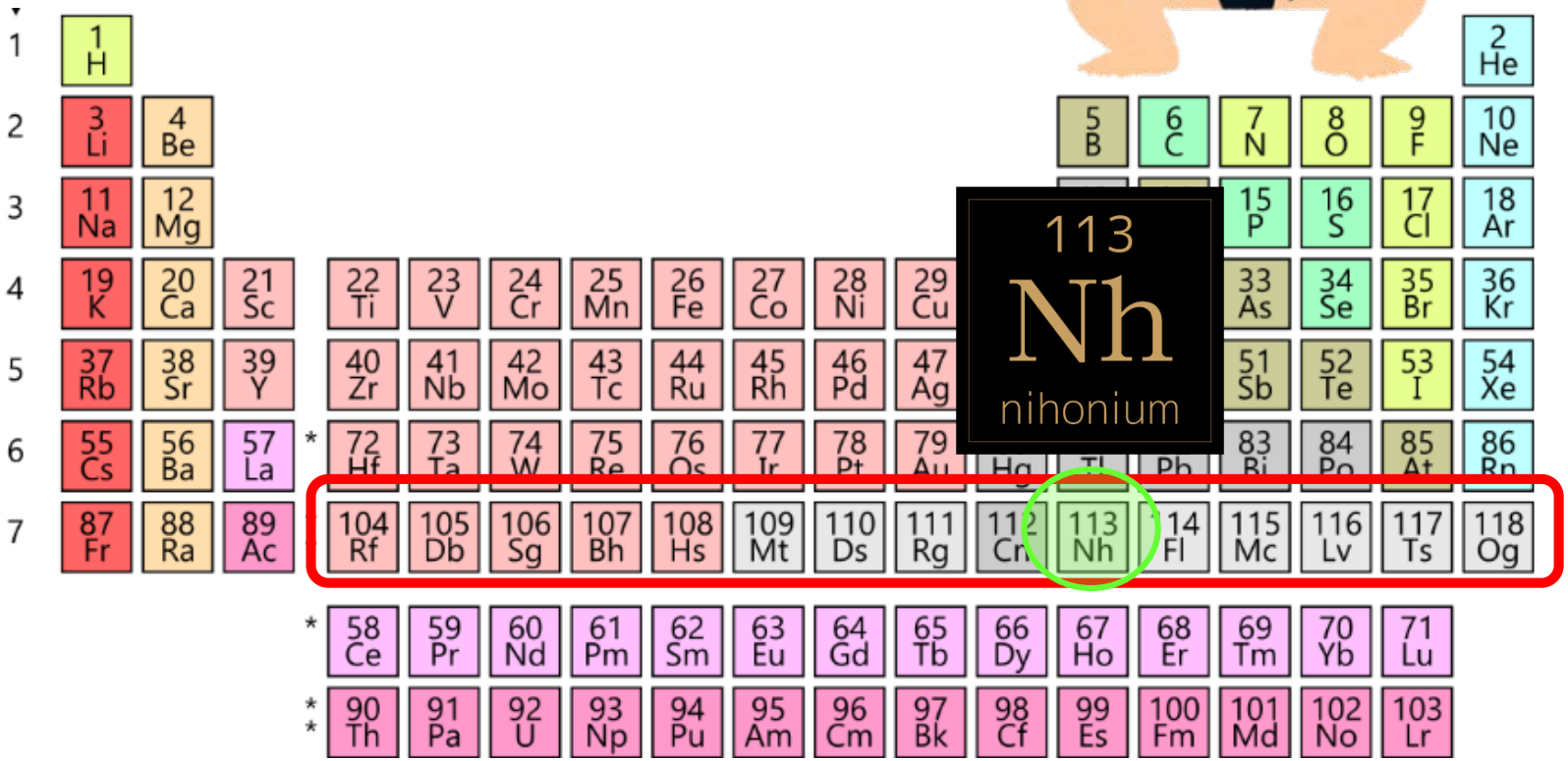
↑

重力波

実は、金の起源はよくわかっていない

超重元素について

Z=104番より重い元素



元素の周期表

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	

最も重い元素は何?

元素の周期表

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	

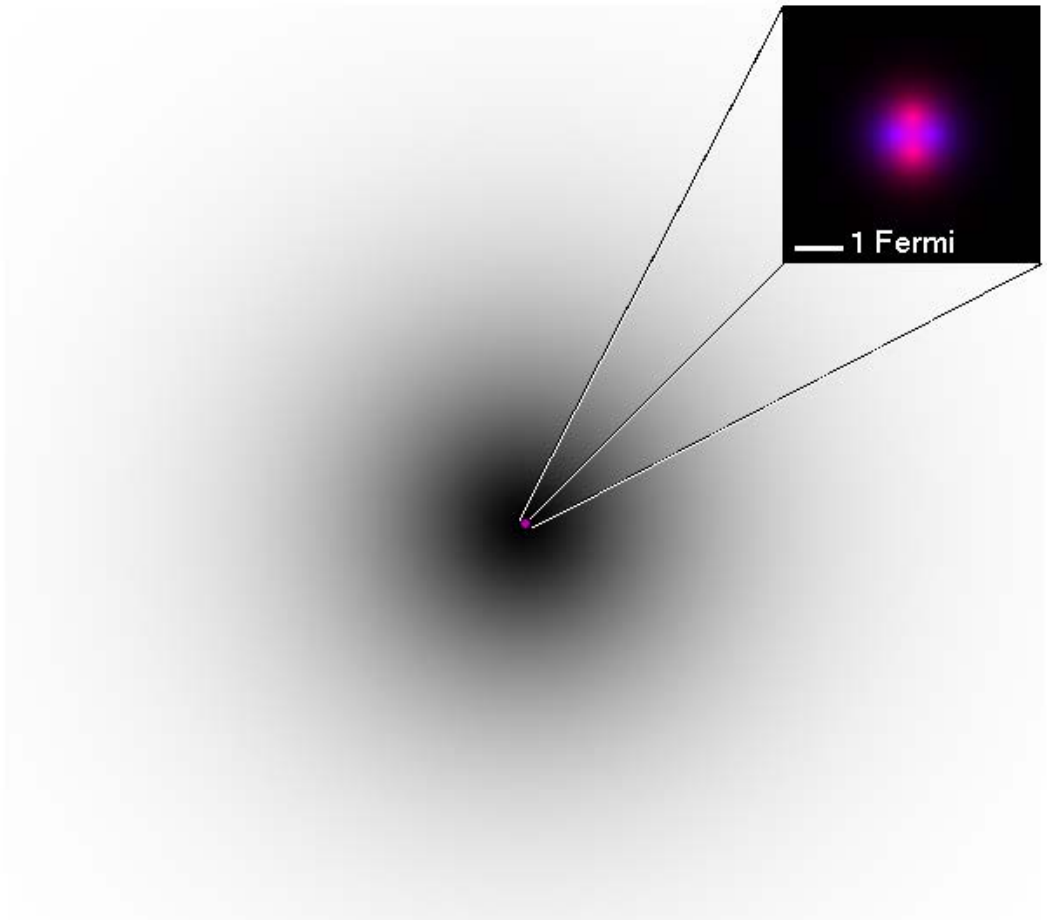
最も重い元素は何?

自然界:**プルトニウム**（Z=94）→極微量存在

ウラン（Z=92）

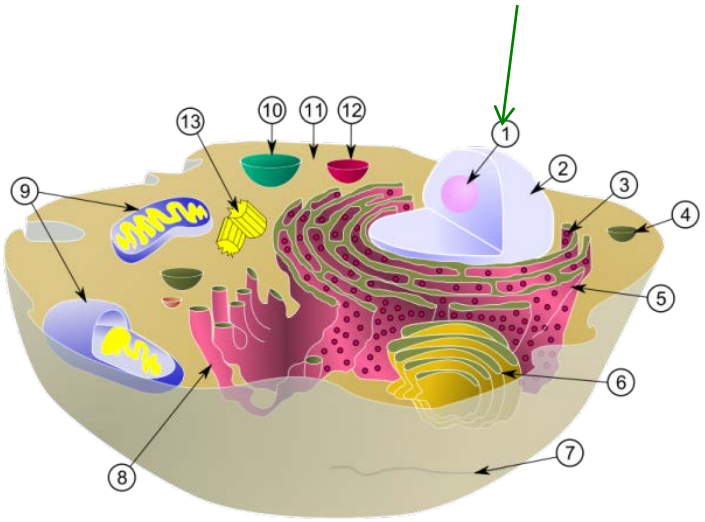
何がこの番号を決めている?

原子の中身



原子の核（原子核）

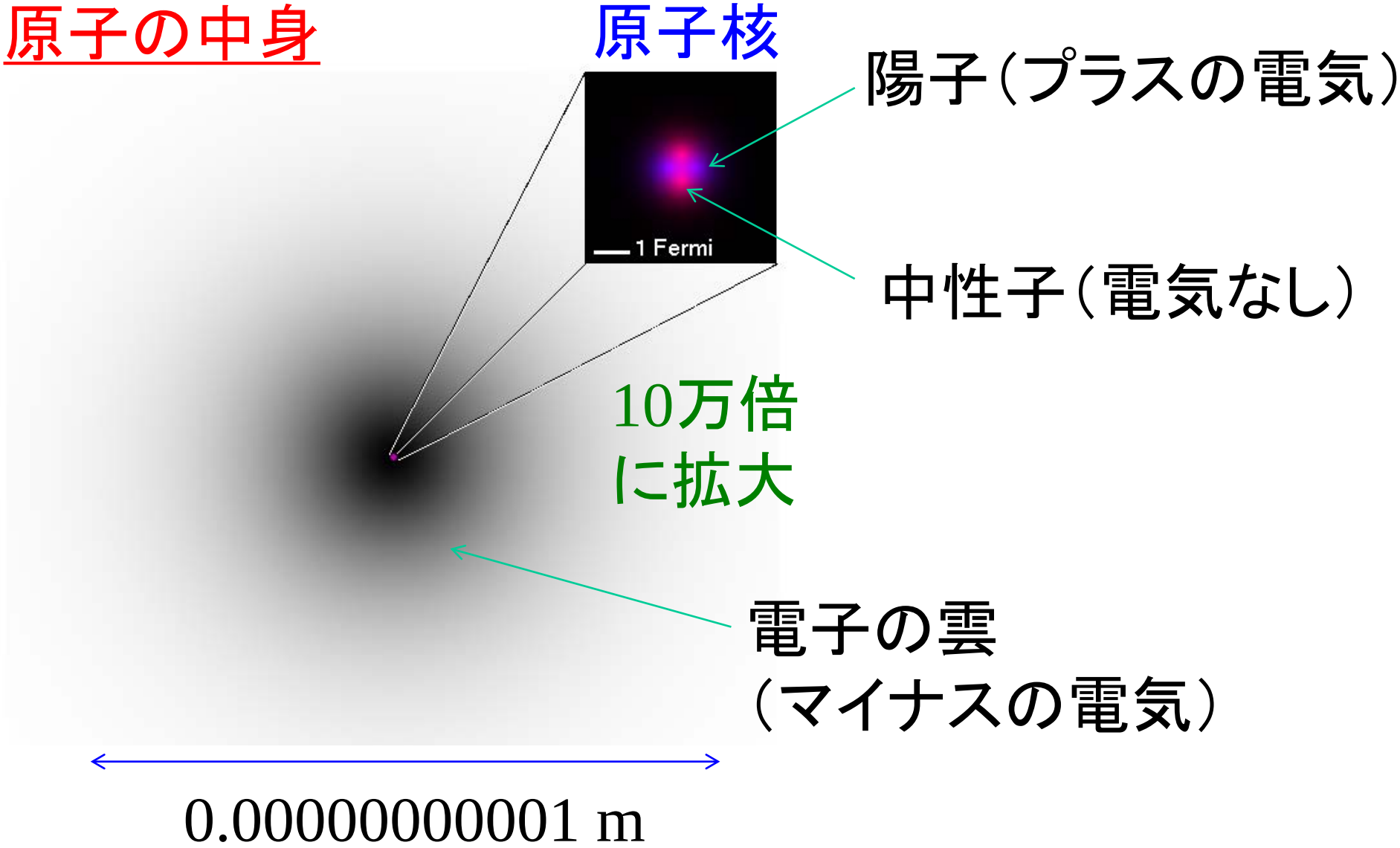
細胞核



原子の中身

（参考）細胞の中身

原子の中身



- 陽子の数　＝　電子の数
- 化学的な性質　＝　電子の数

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

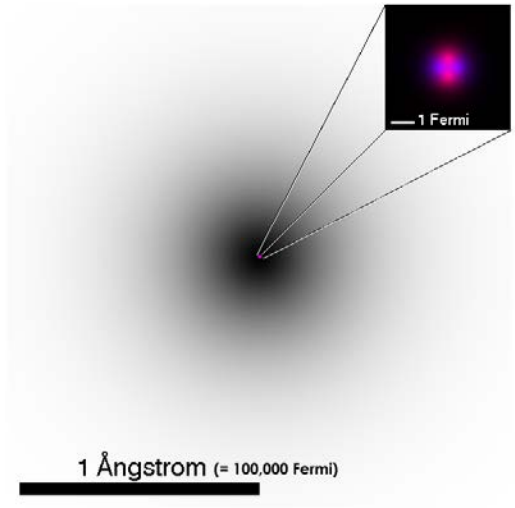
何が最も重い元素の番号を決めているのか?

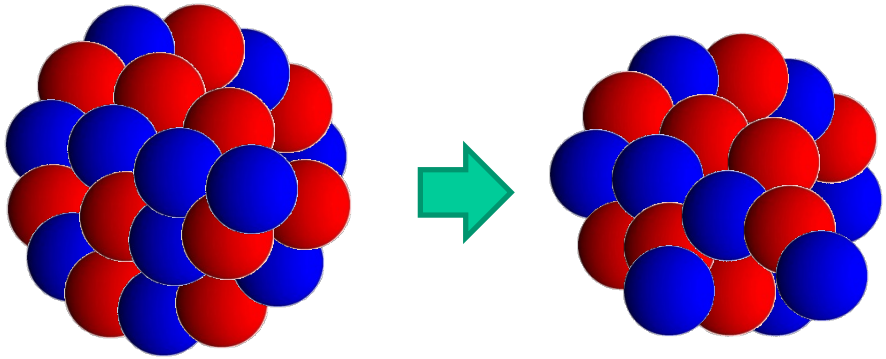
重い原子核→ 電気的反発力が大

↓

α粒子を出して安定になる
（アルファー崩壊）

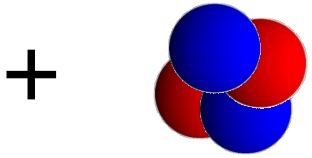
原子核





(Z,N)　　(Z-2,N-2)

^{4}He 原子核
= α 粒子



(Z=2,N=2)

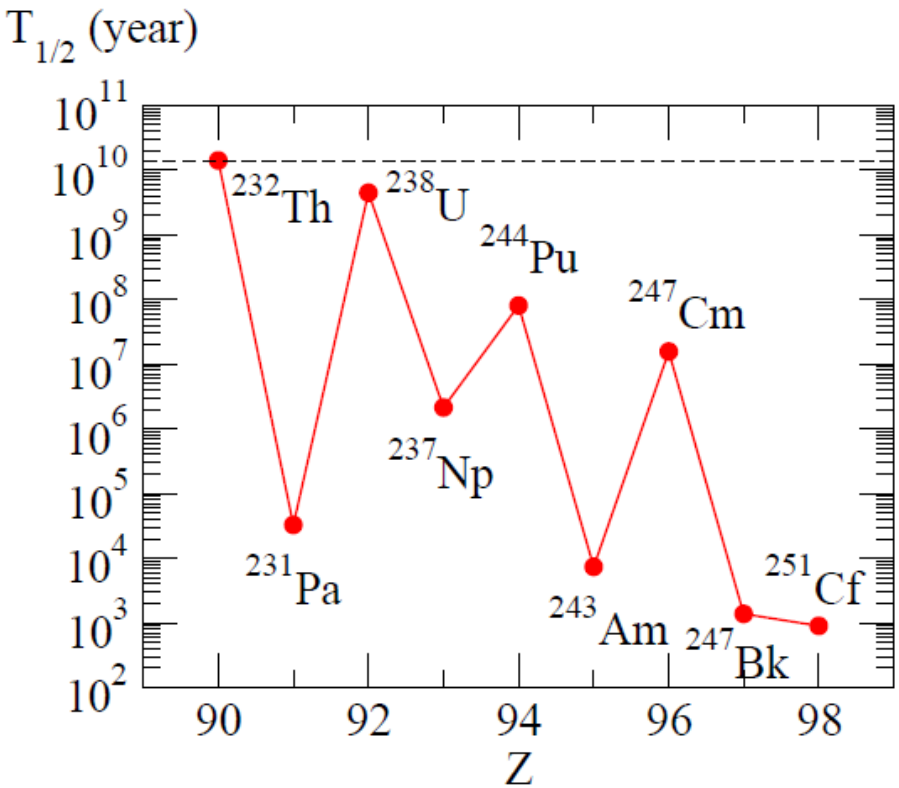
重い原子核の寿命

^{232}Th　140.5 億年
^{238}U　44.7 億年
^{244}Pu　8000 万年

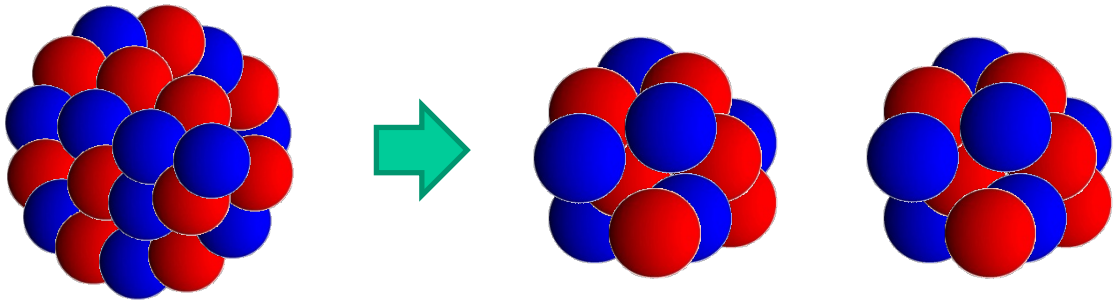
---

^{247}Cm　1560 万年

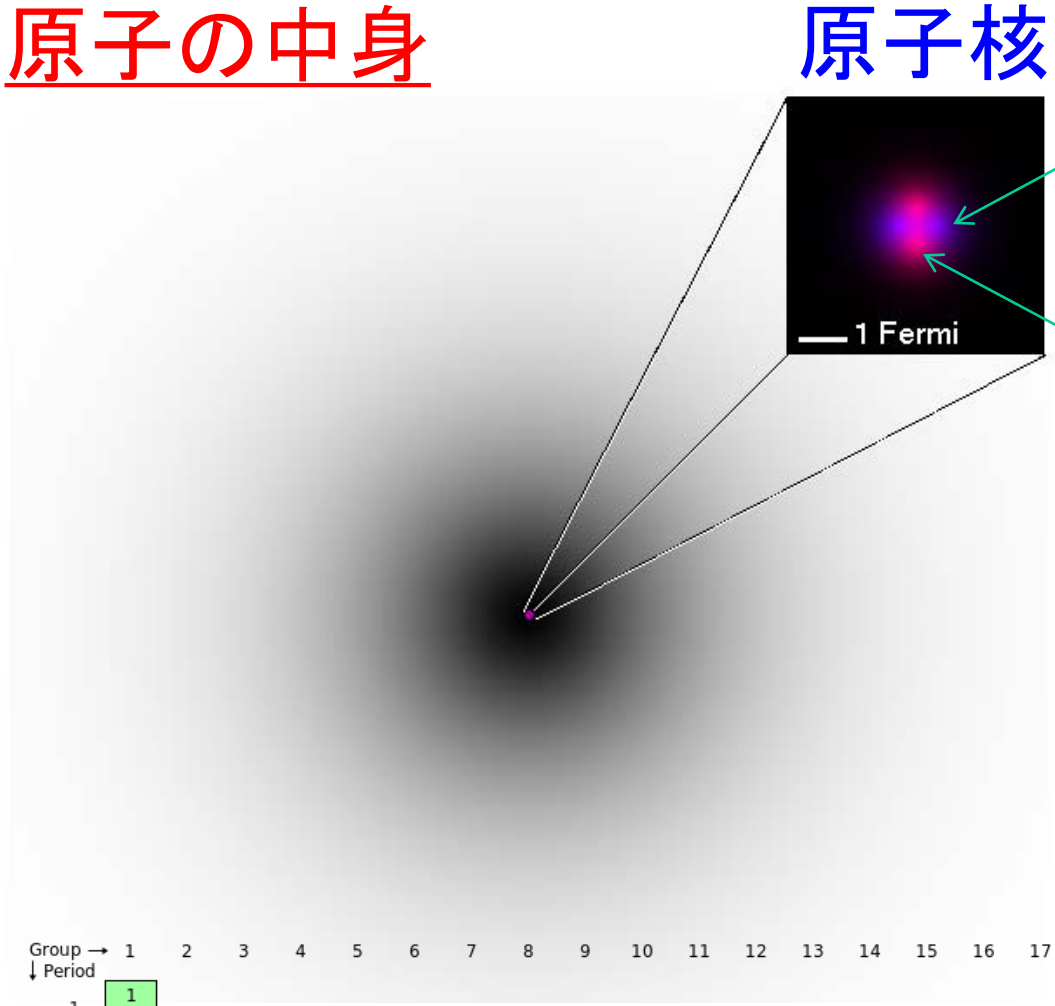
（参考）宇宙の年齢：138億年
地球の年齢：45.4億年



＊もっと重い原子核は核分裂で壊れることも：



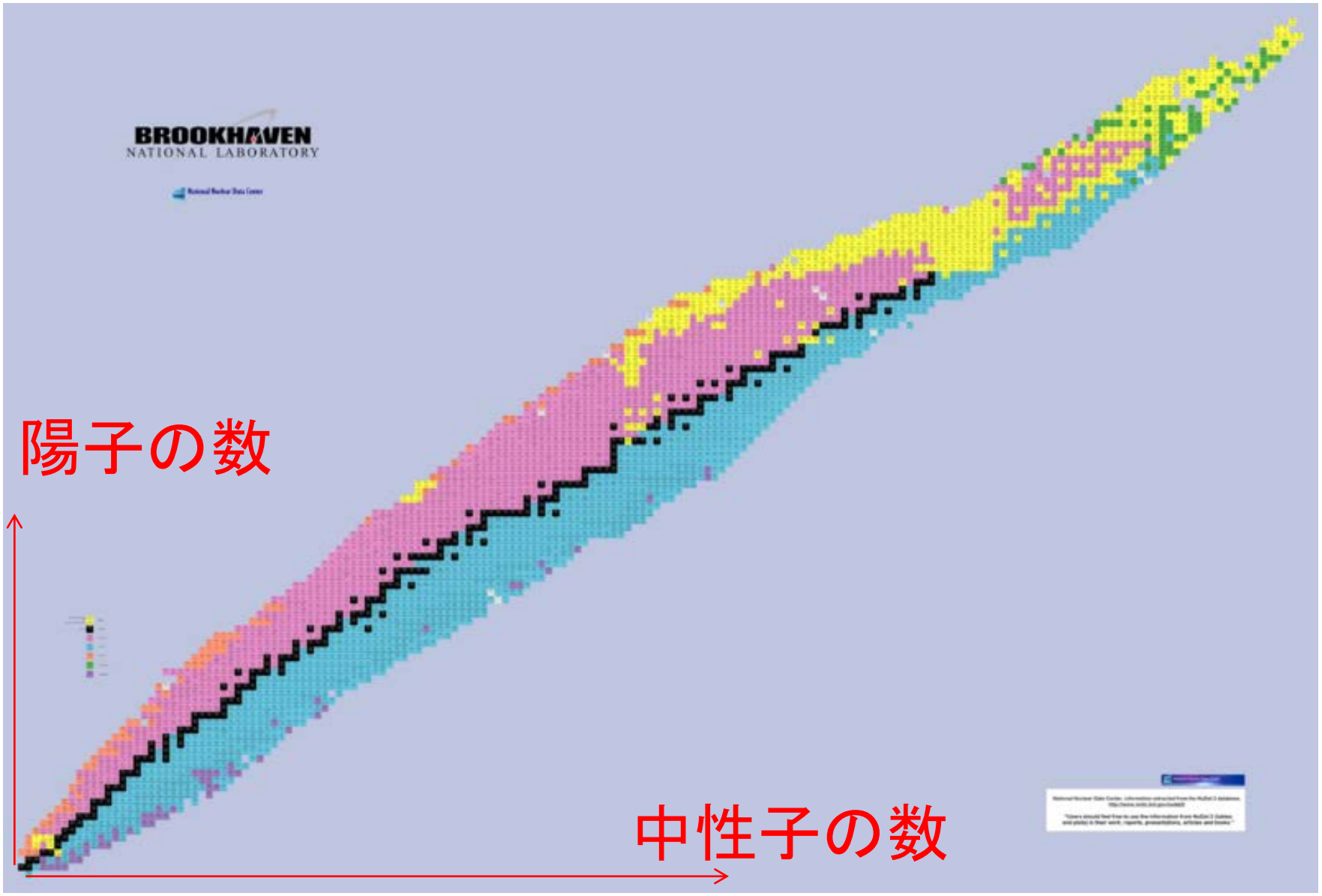
原子の中身



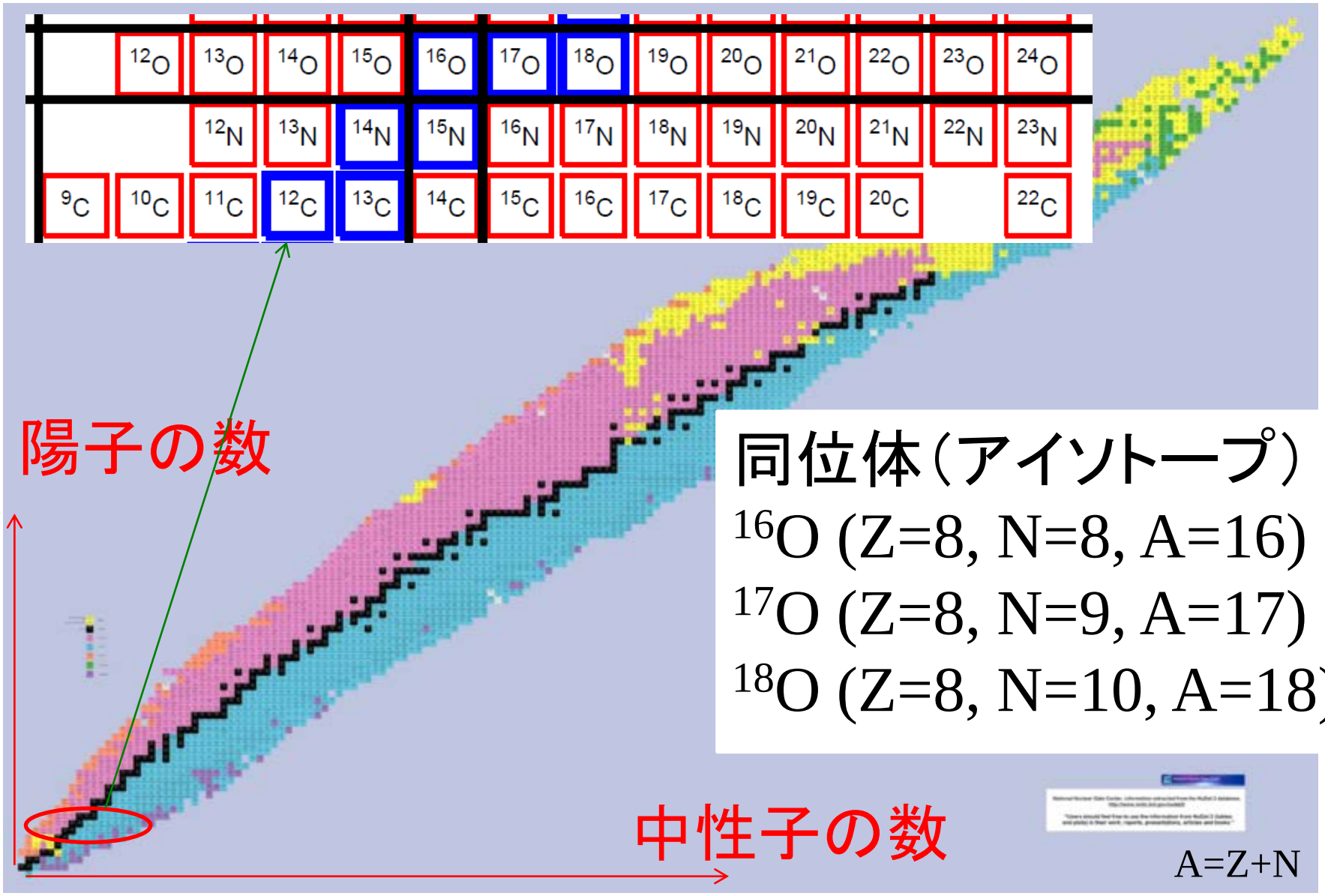
Group → / ↓ Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 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		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		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo

← 中性子は?

核図表:原子核の地図



核図表：原子核の地図



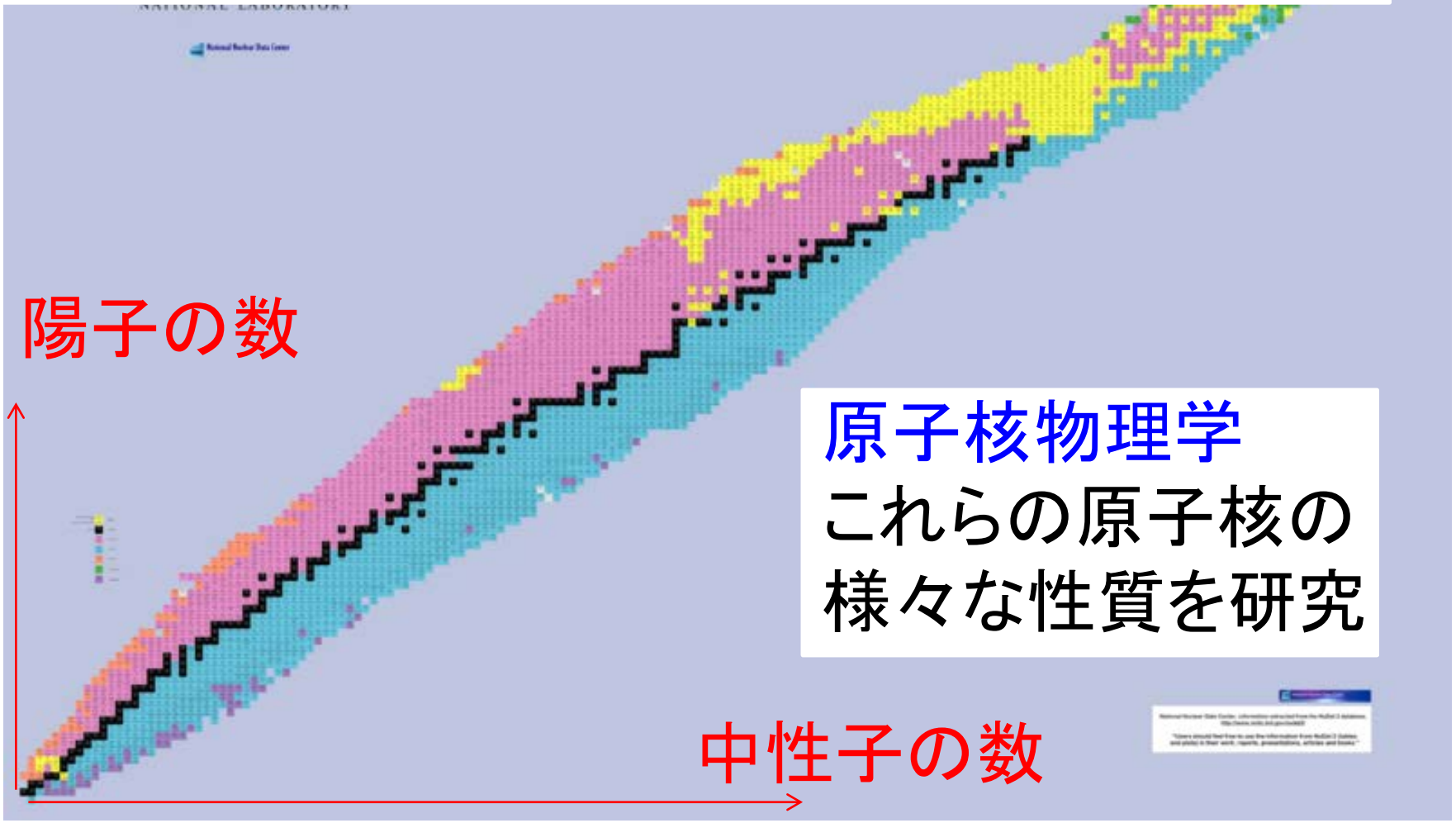
同位体（アイソトープ）

^{16}O (Z=8, N=8, A=16)

^{17}O (Z=8, N=9, A=17)

^{18}O (Z=8, N=10, A=18)

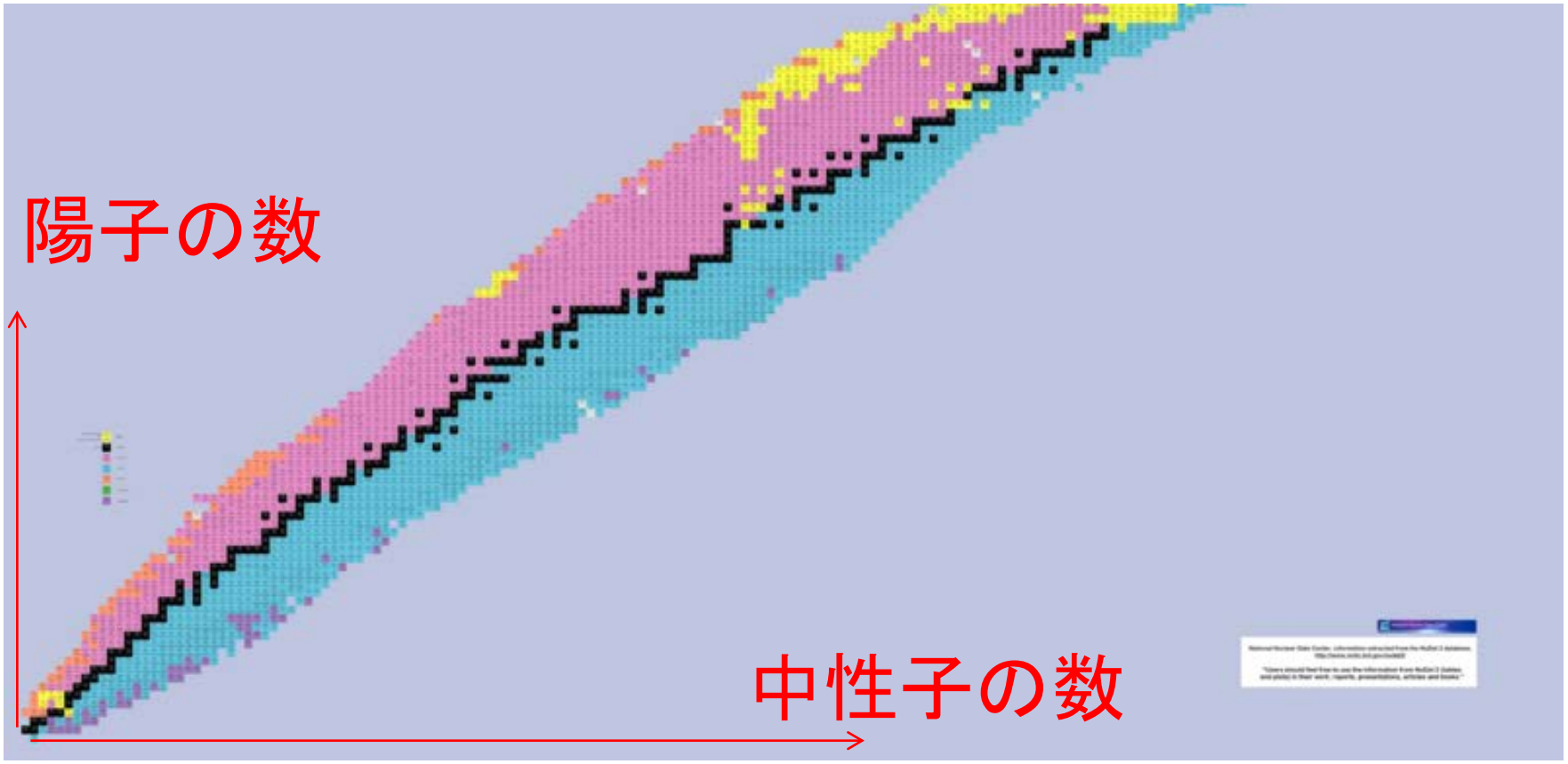
・自然界にある安定な原子核: 287種
・これまで人工的に作られた原子核 :約 3,000種
・理論上存在が予想される原子核:約10,000種



原子核物理学
これらの原子核の
様々な性質を研究

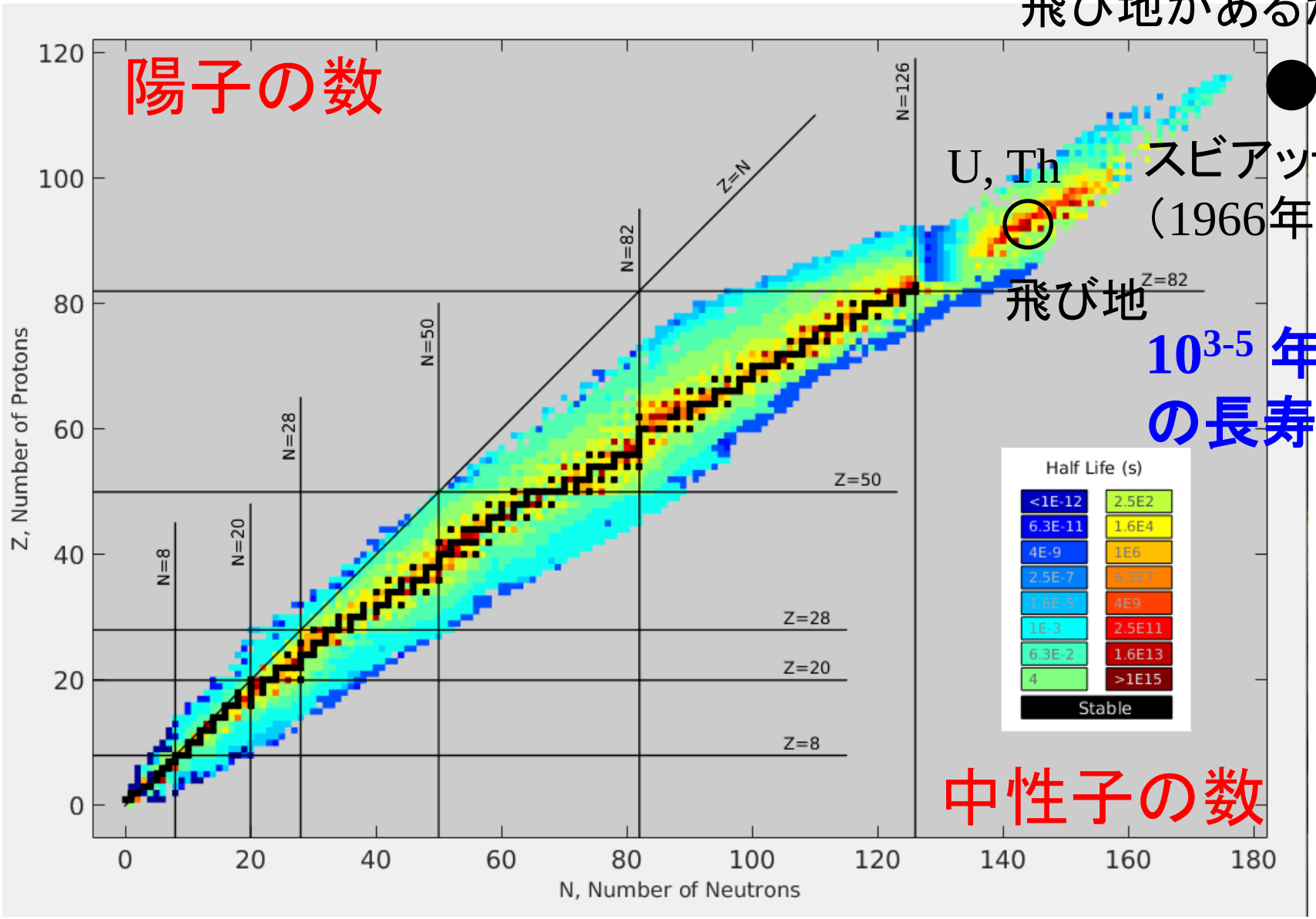
核図表：原子核の地図

「未知の世界を探求する人々は、地図を持たない旅行者である。地図は探求の結果として、できるのである。」
湯川秀樹 「旅人」より



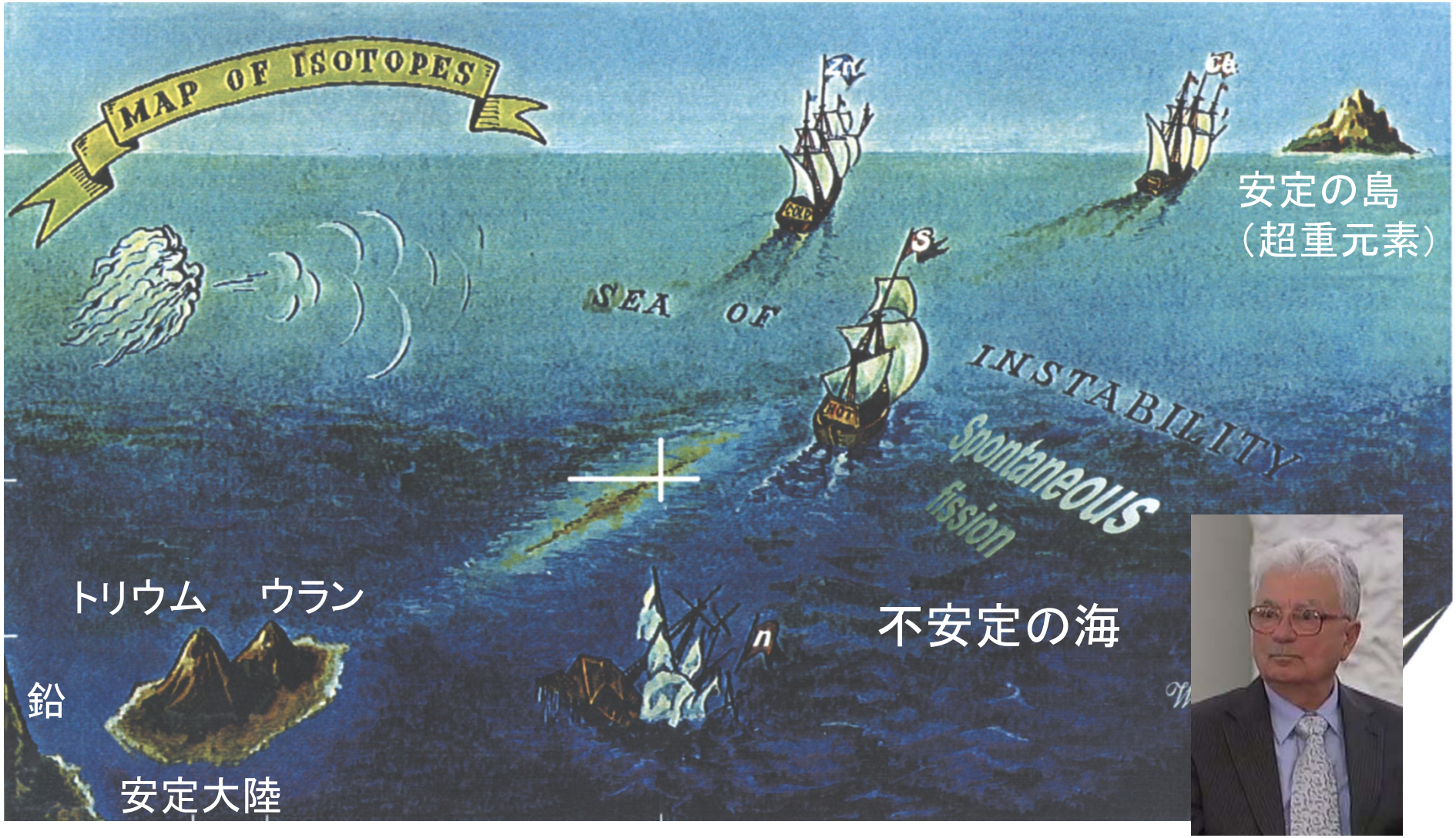
超重元素（安定の島）

この辺りにも安定の飛び地があるかも?



Wikipedia

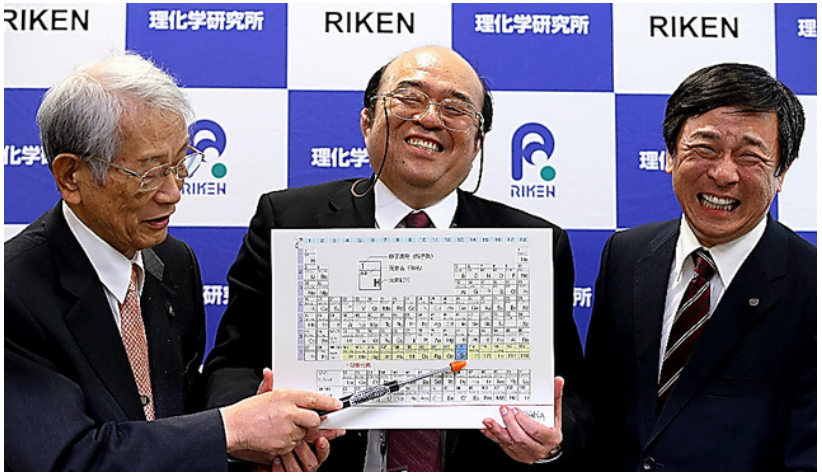
安定の島(超重元素)を目指して

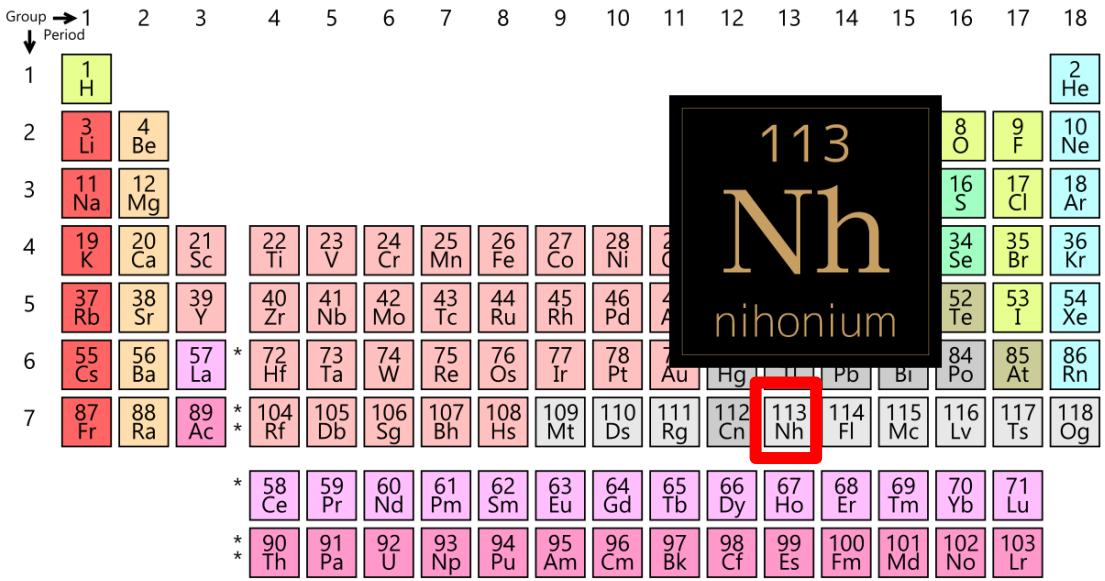


描画:オーガネシアン氏

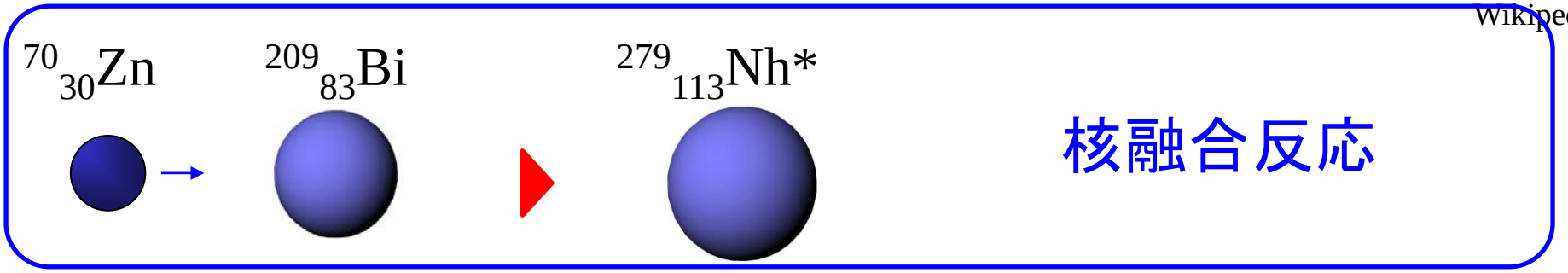
113番元素ニホニウム Nh

2016年11月





Wikipedia



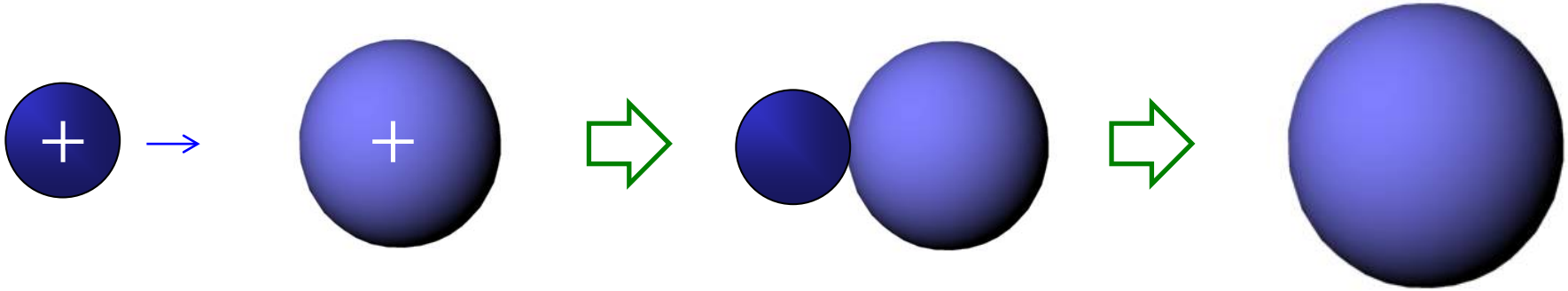
ところで

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！

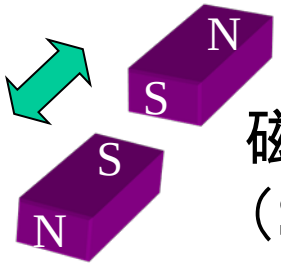
金田さん：惜しかったです！
115番がテネシンだったら周期表に名前が載っていました

核融合反応：原子核と原子核をくっつける

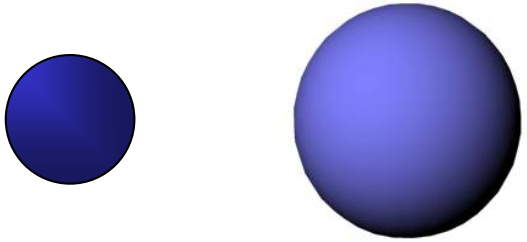


加速器を
使って勢いよくぶつける

大きな
原子核



磁石
（SとS、NとN
は反発）

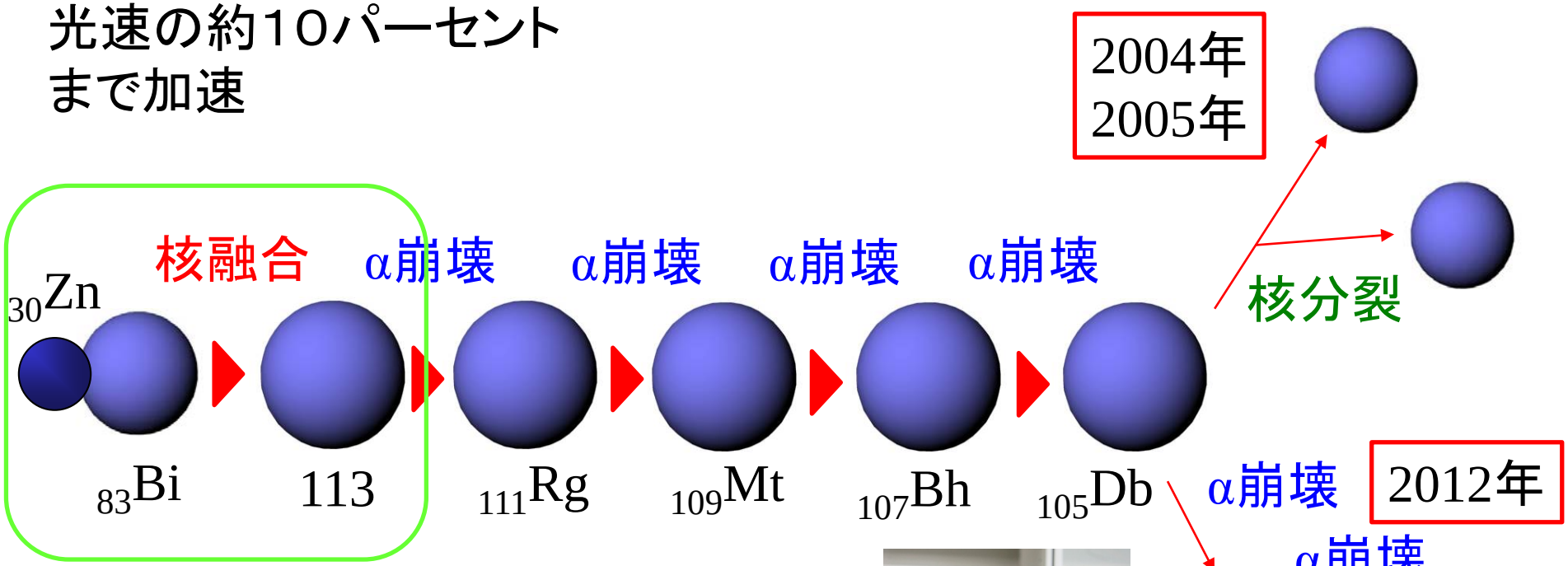


でも、ほとんどはくっつけても
すぐ離れてしまう
（大きな原子核ができない）

新元素113番：ニホニウム（Nh）

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

光速の約10パーセント
まで加速



553 日間の実験で
たったの3例の発見

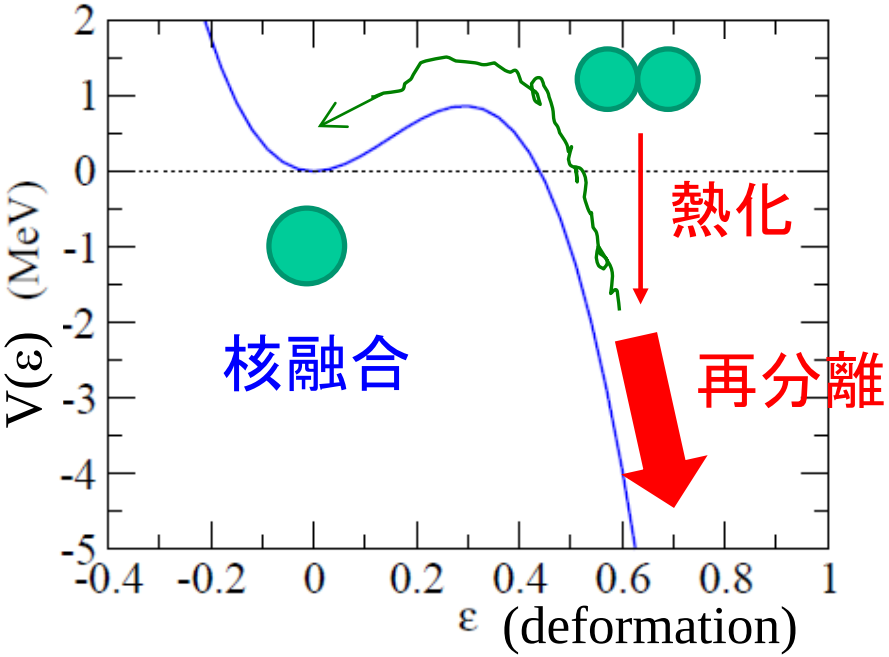
→ 日本に命名権

ニホニウム　Nh

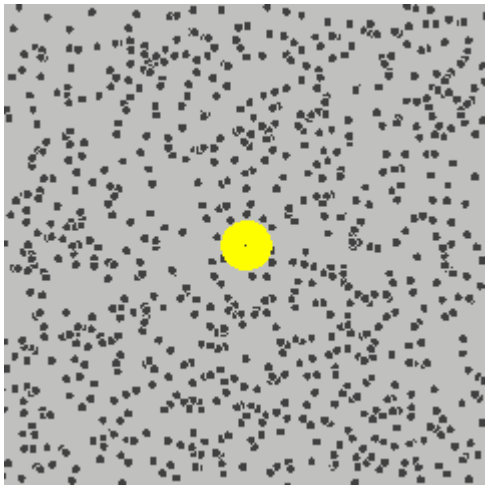
理論的な計算

ランジュバン方程式

$$ma = F \underbrace{- \gamma v}_{\text{摩擦力}} + \underbrace{R(t)}_{\text{ランダム力}}$$

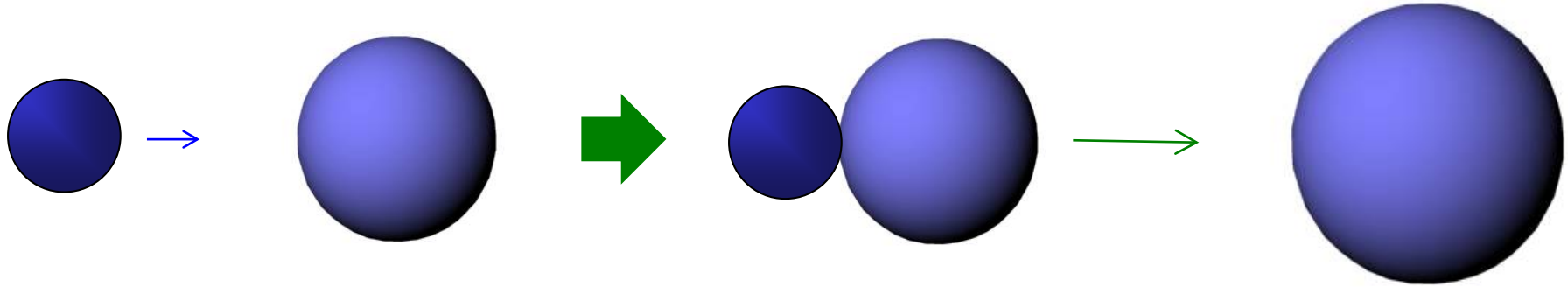


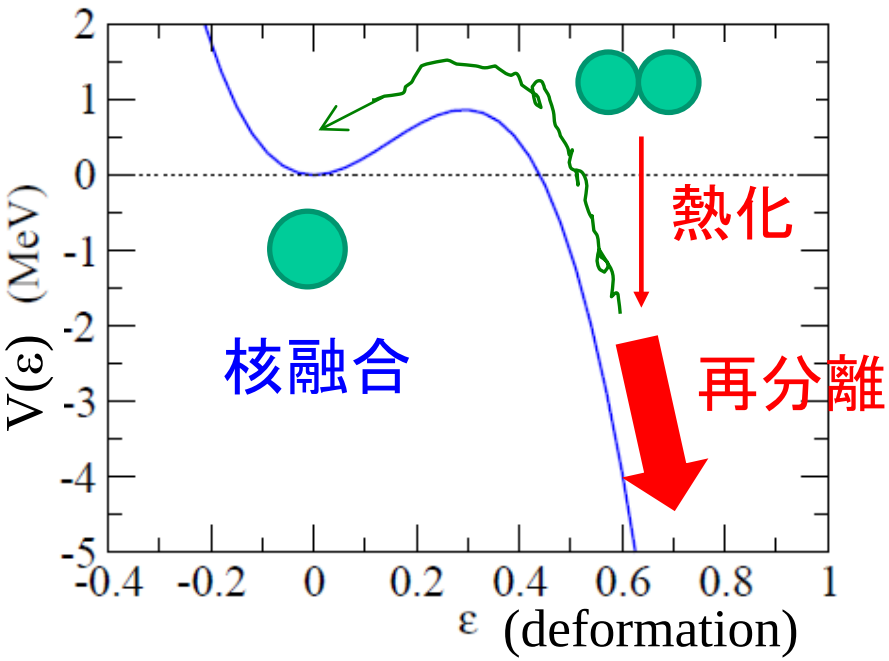
ブラウン運動

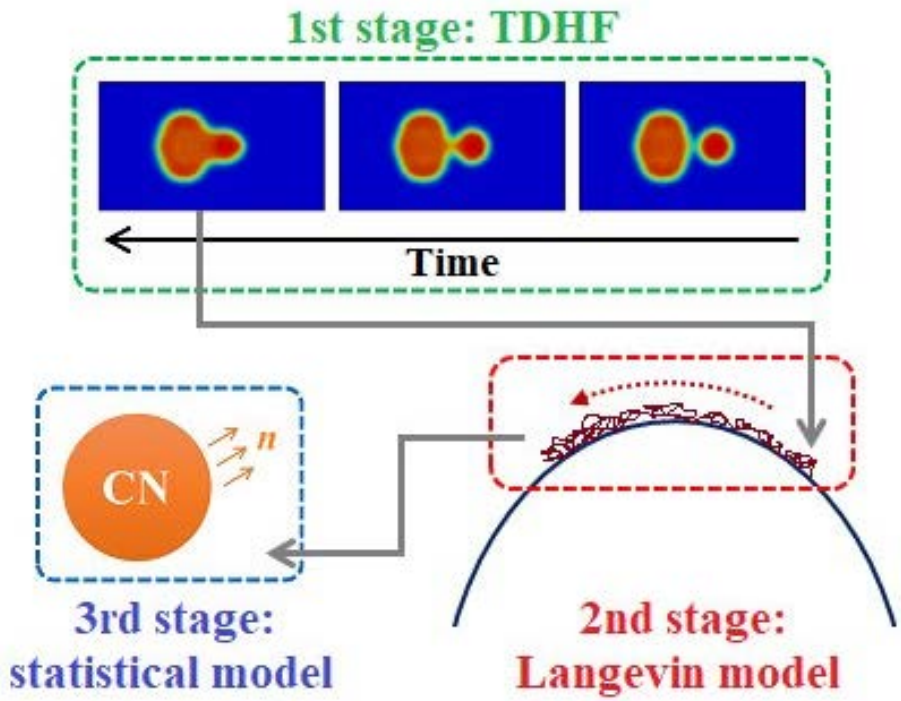


Wikipedia

理論物理学としての課題





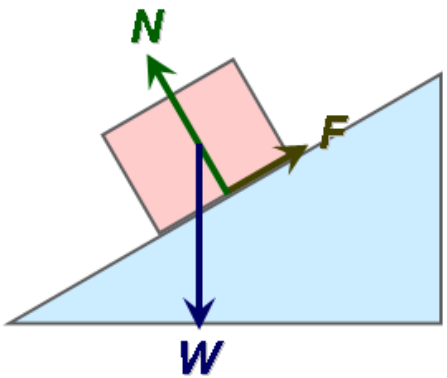


熱的拡散

⟶ ランジュバン方程式

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

摩擦の量子論



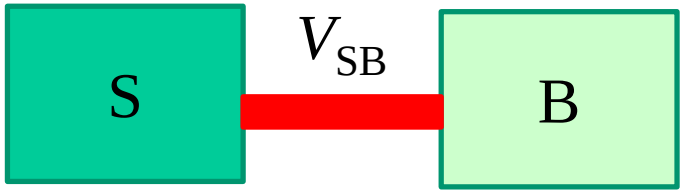
物体が止まって熱が発生

⇩

エネルギーが物体から内部自由度（原子）に転化

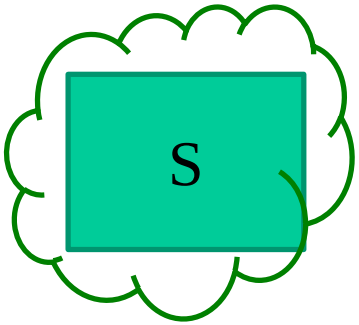
量子ランジュバンへ
（量子ウォーク）

量子力学では：



系　　内部自由度

⇩

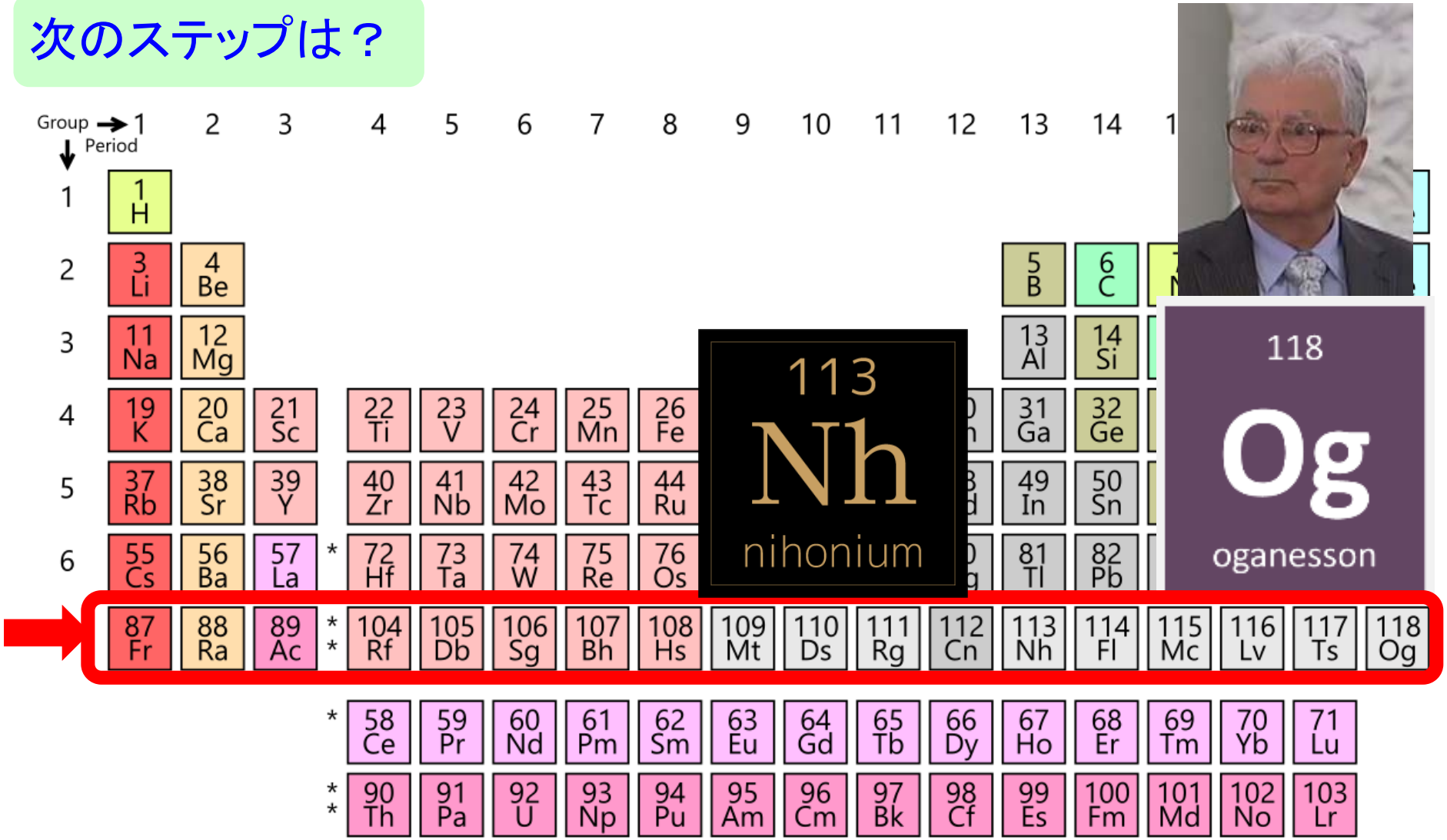


系に衣を着せて解く

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

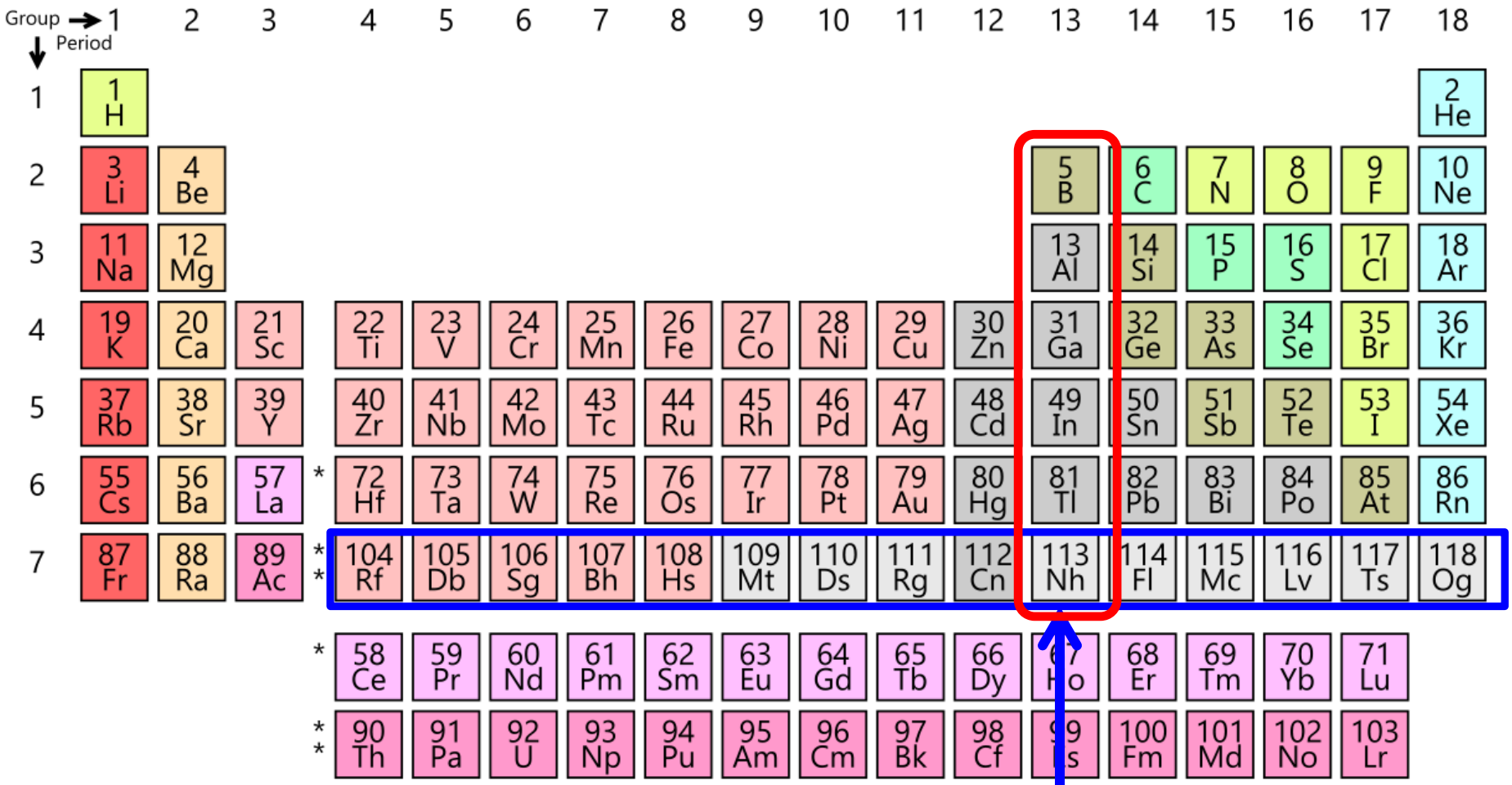
次のステップは？



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

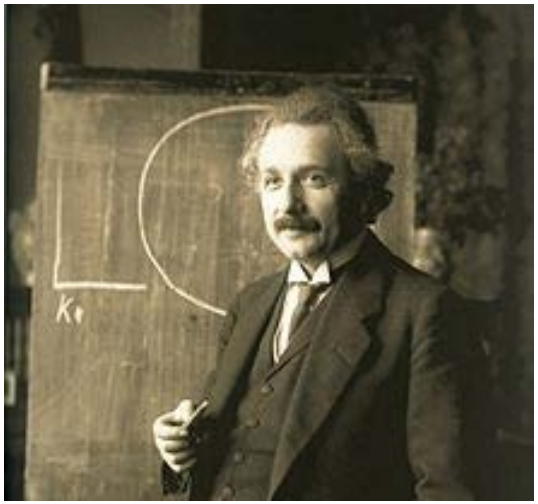
超重元素の化学



- 超重元素を周期表のここに置けるの?
- つまり、Nh は B, Al, Ga などと同じ性質?

相対論的効果：原子番号の大きい元素で重要

$$E = mc^2$$



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

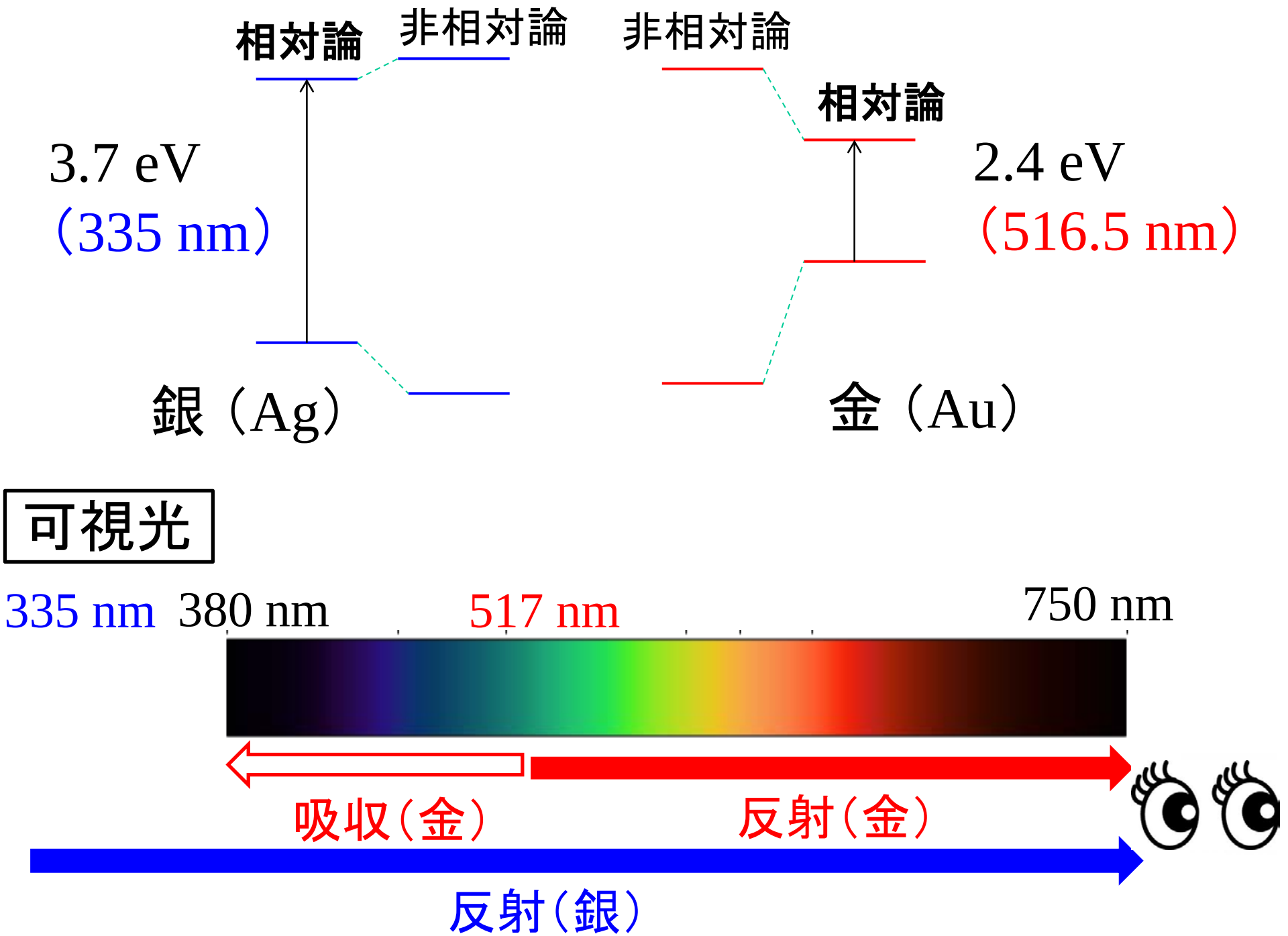
$$E_{1S} = mc^2\sqrt{1-(Z\alpha)^2} \sim mc^2\left(1 - \frac{(Z\alpha)^2}{2} \underbrace{- \frac{(Z\alpha)^4}{8} + \cdots}_{\text{相対論的効果}}\right)$$

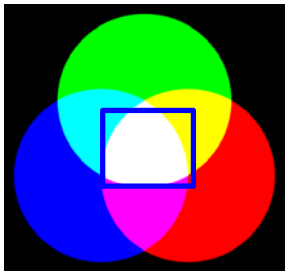
相対論的効果で有名な例:金の色

金と銀は同族

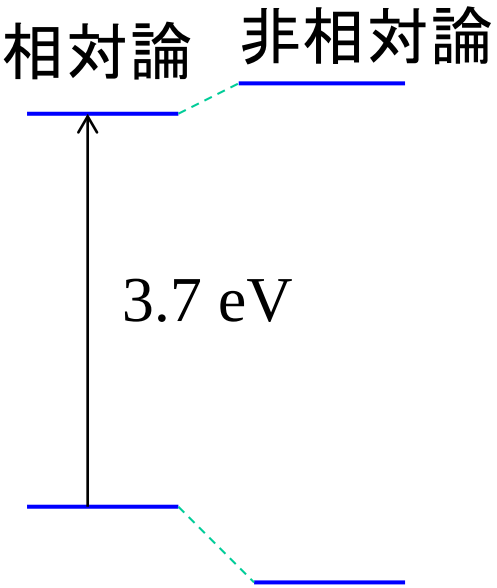
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La *	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac *	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

相対論的効果がなければ金の色は銀みたいだった!

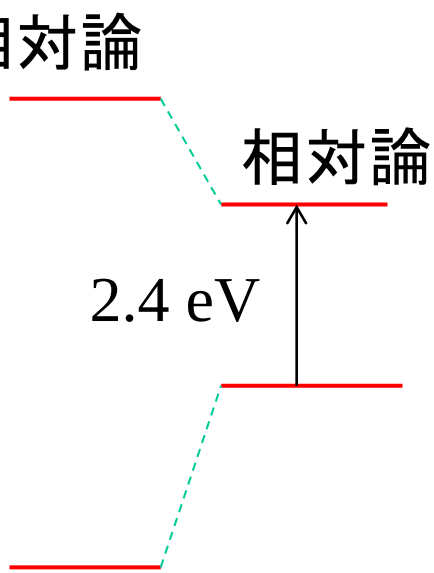

相対論
非相対論
3.7 eV
（335 nm）
銀（Ag）
非相対論
相対論
2.4 eV
（516.5 nm）
金（Au）
可視光
335 nm
380 nm
517 nm
750 nm
吸収（金）
反射（金）
反射（銀）



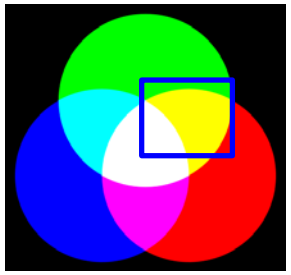
光の
吸収なし



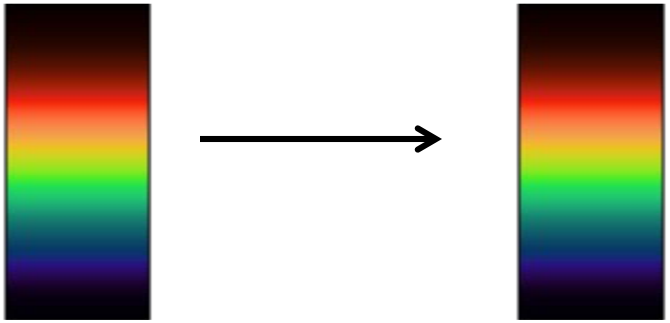
銀



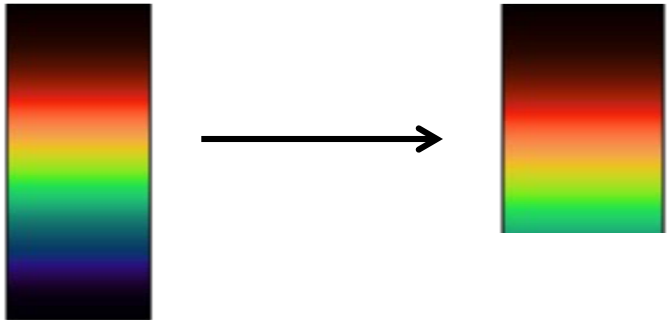
金



青色の光
が吸収

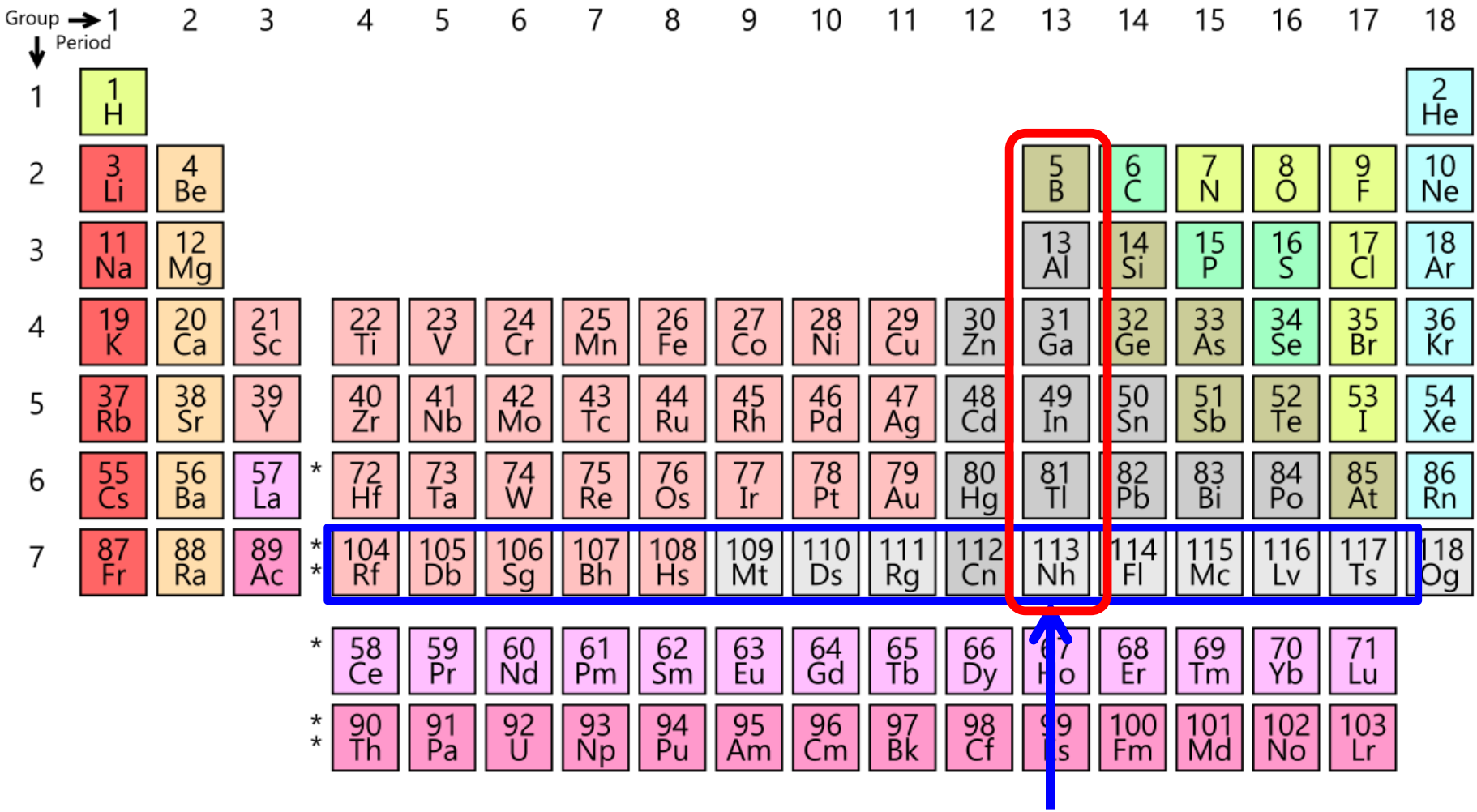


銀　47番元素



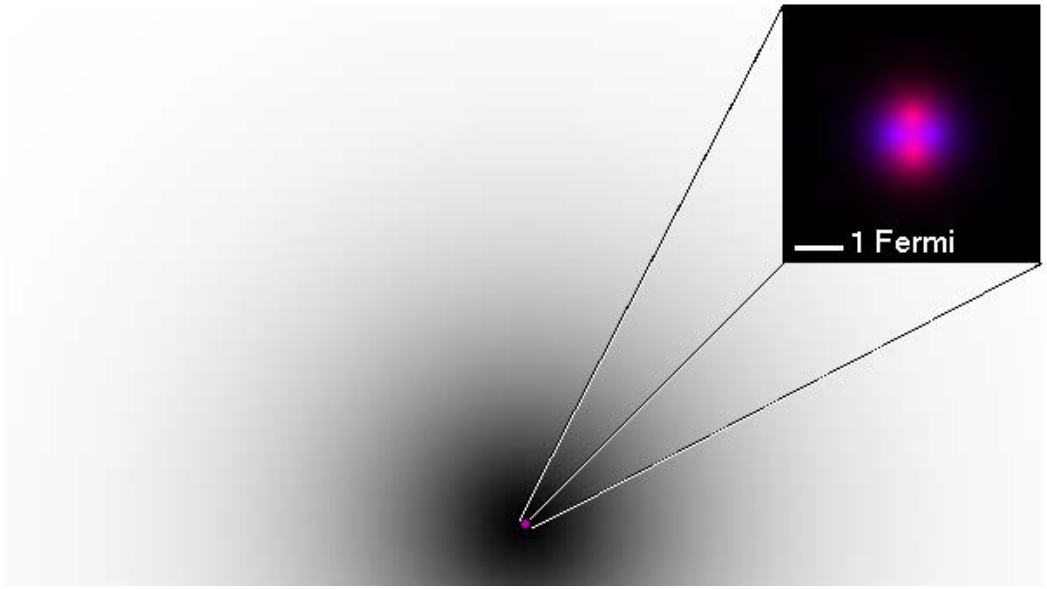
金　79番元素

超重元素の化学



相対論的効果で超重元素の場所が
どのように変わるのか? ⟶ 未解決の謎

まとめ



原子核

小さな小さな原子核が元素にとっては大きな役割

- 自然界にある最も重い元素
- 元素の起源・星が燃えている理由
- 超重元素

✓ 今、118番元素 Og まで。次は119番、120番。

✓ 新しい周期表を作る