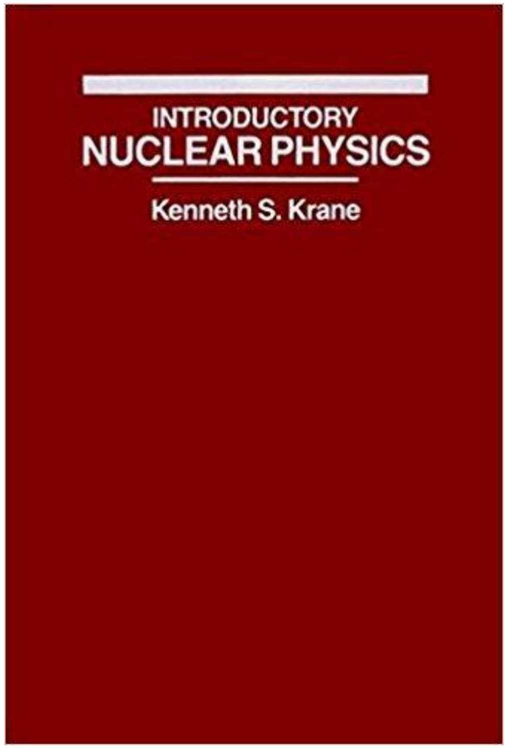
先週のアンケートより

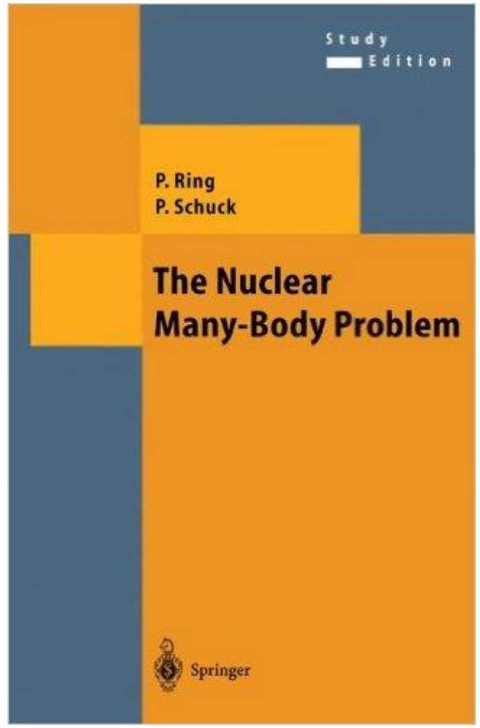
➢ 電磁遷移に関するお薦めの教科書を教えてください



Krane

第10章

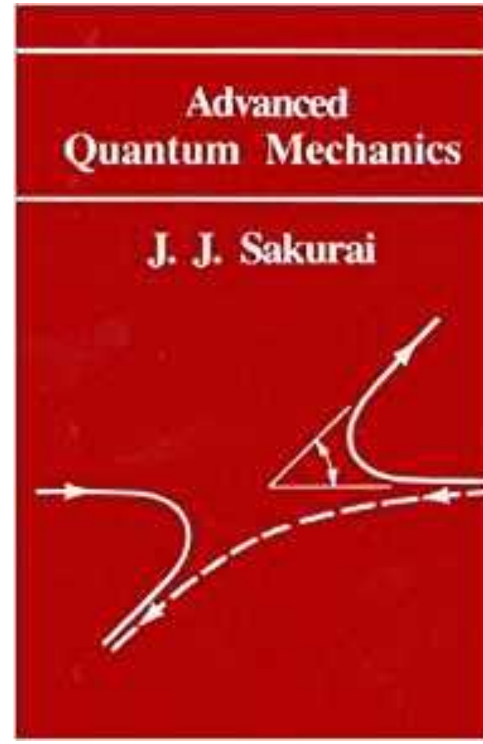
とても丁寧



Ring-Schuck

Appendix B

コンパクトに
まとまっている



J.J. Sakurai

2-4章

E1, E2, M1 遷移のみ
だが、丁寧かつしっかり
とした説明

- 原子核の電磁遷移で2次以降が効くことはありますか？
- 2個以上のフォトンの放出を伴う電磁遷移はありますか？

✓原子核の電磁遷移では、高次効果が必要な場合はほとんどありません

→通常は1次の摂動論で十分

➢ Eλ 遷移と Mλ 遷移の違いをもう一度

$$\Gamma_{fi}(\lambda\mu) \sim \frac{8\pi(\lambda+1)}{\hbar\lambda((2\lambda+1)!!)^2}\left(\frac{E_\gamma}{\hbar c}\right)^{2\lambda+1} |\langle\Psi_f|\mathcal{M}_{\lambda\mu}|\Psi_i\rangle|^2$$

Eλ 遷移 $$\mathcal{M}^{(E)}_{\lambda\mu} = \sum_{i=1}^{A} e_i r_i^\lambda Y_{\lambda\mu}(\hat{\boldsymbol{r}}_i)$$

Mλ 遷移 $$\mathcal{M}^{(M)}_{\lambda\mu} = \mu_N \sum_{i=1}^{A} \left\{ g_s^{(i)} \boldsymbol{s}_i + \frac{2}{\lambda+1} g_l^{(i)} \boldsymbol{l}_i \right\} \cdot \left(\boldsymbol{\nabla} r_i^\lambda Y_{\lambda\mu}(\hat{\boldsymbol{r}}_i) \right)$$

➢ i の和が i=1~A でとっているけど、中性子は Eλ 遷移に関係しないのでは?

✓その通りです。

ここでは、$e_i = e$ (i = p), e_i =0 (i = n) としているので、中性子は寄与しません。

➢ Eλ 遷移と Mλ 遷移の違いをもう一度

$$\Gamma_{fi}(\lambda\mu) \sim \frac{8\pi(\lambda+1)}{\hbar\lambda((2\lambda+1)!!)^2}\left(\frac{E_\gamma}{\hbar c}\right)^{2\lambda+1} |\langle\Psi_f|\mathcal{M}_{\lambda\mu}|\Psi_i\rangle|^2$$

Eλ 遷移 $$\mathcal{M}^{(E)}_{\lambda\mu} = \sum_{i=1}^{A} e_i r_i^\lambda Y_{\lambda\mu}(\hat{\boldsymbol{r}}_i)$$

Mλ 遷移 $$\mathcal{M}^{(M)}_{\lambda\mu} = \mu_N \sum_{i=1}^{A}\left\{g_s^{(i)}\boldsymbol{s}_i + \frac{2}{\lambda+1}g_l^{(i)}\boldsymbol{l}_i\right\}\cdot\left(\boldsymbol{\nabla} r_i^\lambda Y_{\lambda\mu}(\hat{\boldsymbol{r}}_i)\right)$$

✓ 一番簡単な場合: $\lambda = 1, \mu = 0$

$$rY_{10}(\theta) \propto z$$

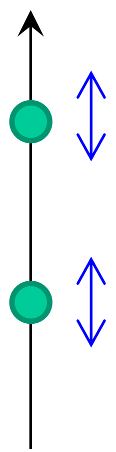
$$\mathcal{M}^{(E)}_{10} \propto \sum_i e_i z_i$$

$$\mathcal{M}^{(M)}_{10} \propto \mu_N \sum_{i=1}^{A}\left\{g_s^{(i)} s_{zi} + g_l^{(i)} l_{zi}\right\} = \sum_i \mu_{zi}$$

✓ 一番簡単な場合: $\lambda = 1, \mu = 0$

$$\mathcal{M}^{(E)}_{10} \propto \sum_i e_i z_i$$

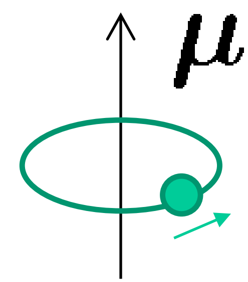
$$\mathcal{M}^{(M)}_{10} \propto \mu_N \sum_{i=1}^{A} \left\{ g_s^{(i)} s_{zi} + g_l^{(i)} l_{zi} \right\} = \sum_i \mu_{zi}$$



E1遷移:
(古典的には)
z 方向の電荷分布の時間変化による遷移

「電気的遷移」

古典的には



磁気モーメント:円電流

$$\mu = IS$$

I:電流、S:円の面積

M1遷移:
(古典的には)
電流の時間変化による遷移

「磁気的遷移」

➢「長波長近似」って何ですか?

遷移確率(長波長近似)

$$\Gamma_{fi}(\lambda\mu) \sim \frac{8\pi(\lambda+1)}{\hbar\lambda((2\lambda+1)!!)^2}\left(\frac{E_\gamma}{\hbar c}\right)^{2\lambda+1} |\langle\Psi_f|\mathcal{M}_{\lambda\mu}|\Psi_i\rangle|^2$$

$$\mathcal{M}^{(E)}_{\lambda\mu} = \sum_i e_i r_i^\lambda Y_{\lambda\mu}(\hat{\boldsymbol{r}}_i)$$

✓ フォトンの波長が長い(フォトンのエネルギーが小さい)という近似

具体的には、 $$e^{i\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}} = \sum_{l=0}^{\infty}(2l+1)i^l j_l(kr)P_l(\cos\theta)$$

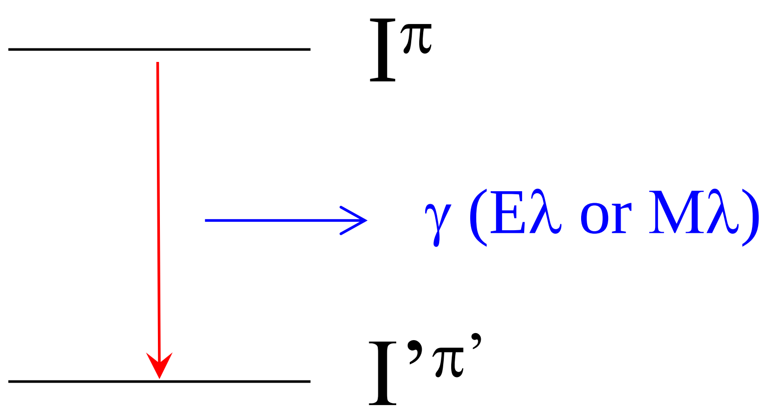
で $kr << 1$ として $$j_l(kr) \sim \frac{(kr)^l}{(2l+1)!!}$$ とする。

$$k = \frac{E_\gamma}{\hbar c}$$

➢ 電気的遷移と磁気的遷移は実験的にどのように区別できるのか?

✓ γ崩壊の寿命測定からのみでは区別できません

→ 選択則と多重極に関する考察から区別する
（これで電気的遷移が主か磁気的遷移が主か大体絞れる）



- $\vec{I} + \vec{\lambda} = \vec{I'}$ を満たす λ
- π と π' が同じとき:

  Eであれば λ は偶数
  Mであれば λ は奇数
- π と π' が違うとき:

  Eであれば λ は奇数
  Mであれば λ は偶数
- 一般に

$$\Gamma(E\lambda) \gg \Gamma(M\lambda)$$
$$\Gamma(E\lambda) \gg \Gamma(E\lambda+1) \gg \cdots$$

Eλの演算子:パリティ $(-1)^{\lambda}$
Mλの演算子:パリティ $(-1)^{\lambda+1}$

➢$4^+ \to 2^+$ の遷移で選択則をもう一度説明してください。

✓$4^+ \to 2^+$ 角運動量は λ = 2, 3, 4, 5, 6 (4-2=2 ~ 4+2=6)

$$\mathcal{M}_{\lambda\mu} = \sum_{i=1}^{Z} e r_i^{\lambda} Y_{\lambda\mu}(\hat{\boldsymbol{r}}_i) \equiv \hat{Q}_{\lambda\mu}$$

パリティ $(-1)^{\lambda}$

$$\mathcal{M}_{\lambda\mu} = \mu_N \sum_{i=1}^{A} \left\{ g_s^{(i)} \boldsymbol{s}_i + \frac{2}{\lambda+1} g_l^{(i)} \boldsymbol{l}_i \right\} \cdot \left(\boldsymbol{\nabla} r_i^{\lambda} Y_{\lambda\mu}(\hat{\boldsymbol{r}}_i) \right) \equiv \hat{M}_{\lambda\mu}$$

パリティ $(-1)^{\lambda+1}$

$4^+ \to 2^+$ でパリティは変わっていないので、

E なら偶数のλ

M なら奇数の λ

⇨ $4^+ \to 2^+$ E2, E4, M3, E6, M5

- Mλ 遷移より Eλ 遷移が大きくなるのは何故ですか?

$$\Gamma_{fi}(\lambda\mu) \sim \frac{8\pi(\lambda+1)}{\hbar\lambda((2\lambda+1)!!)^2}\left(\frac{E_\gamma}{\hbar c}\right)^{2\lambda+1} |\langle\Psi_f|\mathcal{M}_{\lambda\mu}|\Psi_i\rangle|^2$$

Eλ 遷移 $$\mathcal{M}^{(E)}_{\lambda\mu} = \sum_i e_i r_i^\lambda Y_{\lambda\mu}(\hat{\boldsymbol{r}}_i) = \int d\boldsymbol{r}\,\rho(\boldsymbol{r}) r^\lambda Y_{\lambda\mu}(\hat{\boldsymbol{r}}) \equiv \hat{Q}_{\lambda\mu}$$

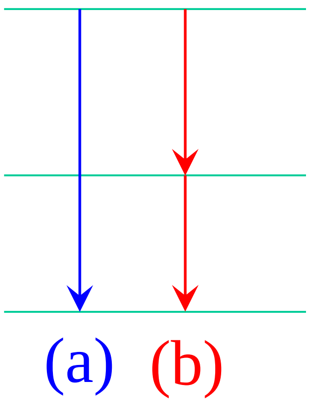
Mλ 遷移 $$\mathcal{M}^{(M)}_{\lambda\mu} = \mu_N \sum_{i=1}^{A}\left\{g_s^{(i)}\boldsymbol{s}_i + \frac{2}{\lambda+1} g_l^{(i)}\boldsymbol{l}_i\right\}\cdot\left(\boldsymbol{\nabla} r_i^\lambda Y_{\lambda\mu}(\hat{\boldsymbol{r}}_i)\right)$$

一般に $$\Gamma(E\lambda) \gg \Gamma(M\lambda)$$

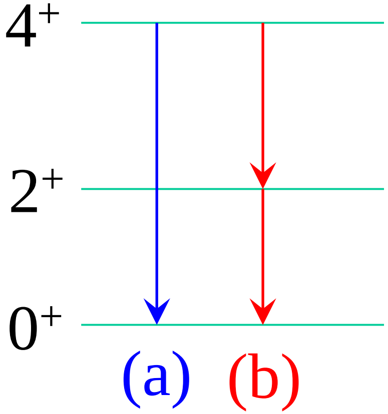
- ✓ 大雑把に言うと、核磁子 μ_N のため

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p c} \sim e\frac{200}{2\times 1000}\ (e\mathrm{fm})$$

➢ 電磁遷移で2ステップの遷移が起こりやすい場合があるのはどういうとき?



✓ 例えば、以下のような場合:

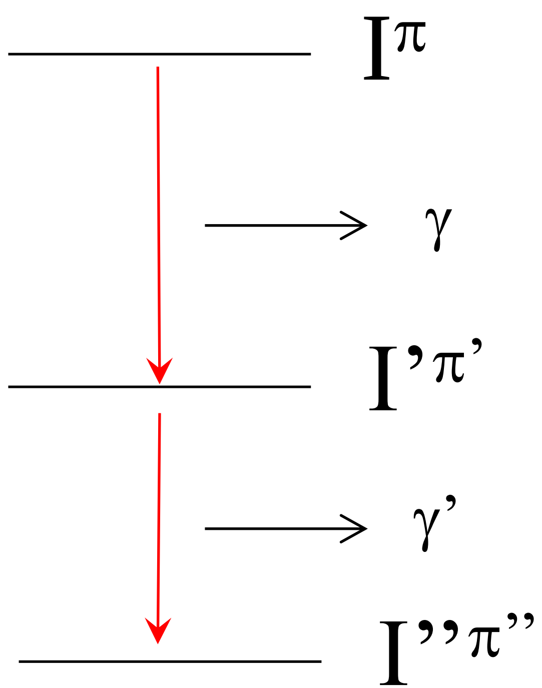


(a) は E4 遷移。
(b) は E2 遷移が2回。

$$\Gamma(E\lambda) \gg \Gamma(E\lambda+1) \gg \cdots$$

あとはそれぞれの状態の核構造にも依存する。

➢ フォトンの角運動量はどうやって測るのか?



✓放出されるγ線の角度分布を調べるとλ（角運動量）を決めることができる

← 基準となる方向を決める必要がある

- 磁場をかけて始状態のスピンの方向をそろえる
- 最初のγに対して2番目のγがどの方向に出るか測る

➢ ウィグナー・エッカルトの定理で縦2重線が入っているものは何?

$$\langle I_f M_f | \mathcal{M}_{\lambda\mu} | I_i M_i \rangle = (-1)^{I_i - M_i} \frac{1}{\sqrt{2\lambda+1}} \underbrace{\langle I_f M_f I_i - M_i | \lambda\mu \rangle} \underbrace{\langle I_f || \mathcal{M}_\lambda || I_i \rangle}$$

M_i, M_f の依存性は単純な Clebsch

M_i, M_f に依存しない

「換算行列要素」と呼ばれるもの。

➢ 換算行列要素の計算の仕方は?

$$\langle I_f M_f | \mathcal{M}_{\lambda\mu} | I_i M_i \rangle = (-1)^{I_i - M_i} \frac{1}{\sqrt{2\lambda+1}} \langle I_f M_f I_i - M_i | \lambda\mu \rangle \langle I_f || \mathcal{M}_\lambda || I_i \rangle$$

✓ M_i, M_f, μ に具体的な値を入れて計算を行い、上の式と比べる。

（例）

$$\langle \uparrow | S_z | \uparrow \rangle = \frac{\hbar}{2}$$

$$\begin{aligned}
\langle \uparrow | S_z | \uparrow \rangle &= (-1)^{1/2-1/2} \frac{1}{\sqrt{2\cdot 1+1}} \left\langle \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ -\frac{1}{2} \middle| 10 \right\rangle \\
&\quad \times \langle 1/2 || S || 1/2 \rangle \\
&= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1}{\sqrt{2}} \langle 1/2 || S || 1/2 \rangle
\end{aligned}$$

➡ $$\langle 1/2 || S || 1/2 \rangle = \hbar \sqrt{\frac{3}{2}}$$

＊あと、主なものは Edmonds の本などに載っている

➢ ウィグナー・エッカルトの定理が Georgi の本と違うみたい?

$$\langle I_f M_f | \mathcal{M}_{\lambda\mu} | I_i M_i \rangle = (-1)^{I_i - M_i} \frac{1}{\sqrt{2\lambda+1}} \underbrace{\langle I_f M_f I_i - M_i | \lambda\mu \rangle}_{\text{M_i, M_f の依存性は単純な Clebsch}} \underbrace{\langle I_f || \mathcal{M}_\lambda || I_i \rangle}_{\text{M_i, M_f に依存しない}}$$

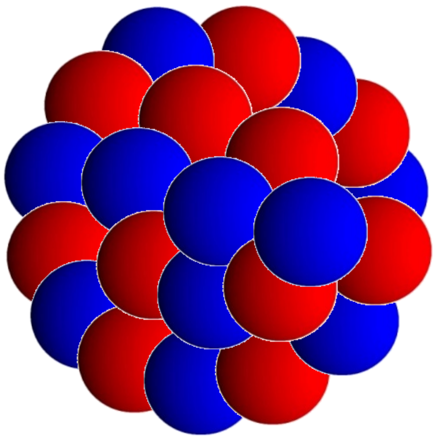
Georgiの本だと:

$$\begin{aligned} \langle I_f M_f | \mathcal{M}_{\lambda\mu} | I_i M_i \rangle &= \langle \lambda\mu I_i M_i | I_f M_f \rangle \langle I_f || \mathcal{M}_\lambda || I_i \rangle \\ &= (-1)^{\lambda - I_f + M_i} \sqrt{\frac{2I_f+1}{2\lambda+1}} \langle I_f M_f I_i - M_i | \lambda\mu \rangle \langle I_f || \mathcal{M}_\lambda || I_i \rangle \end{aligned}$$

✓ これは、換算行列要素の定義（コンベンション）が違うため。

＊ここでは、A.R. Edmonds, “Angular Momentum in Quantum Mechanics” のコンベンションに従う（割とスタンダード）。

原子核反応について



□ 核子多体系としての原子核の振る舞い

⟵ 核子間相互作用から理解する

➢ 静的な振る舞い：原子核構造

✓ 基底状態の性質
（質量、大きさ、形など）

✓ 励起状態の性質

➢ ダイナミックス：原子核反応

原子核は複合粒子

●そのような原子核2つが衝突するとどのようなことが起こるのか？
●量子力学の具体的な応用

原子核核反応

原子核の形や相互作用、励起状態の性質：衝突実験

cf. ラザフォードの実験（α 散乱）

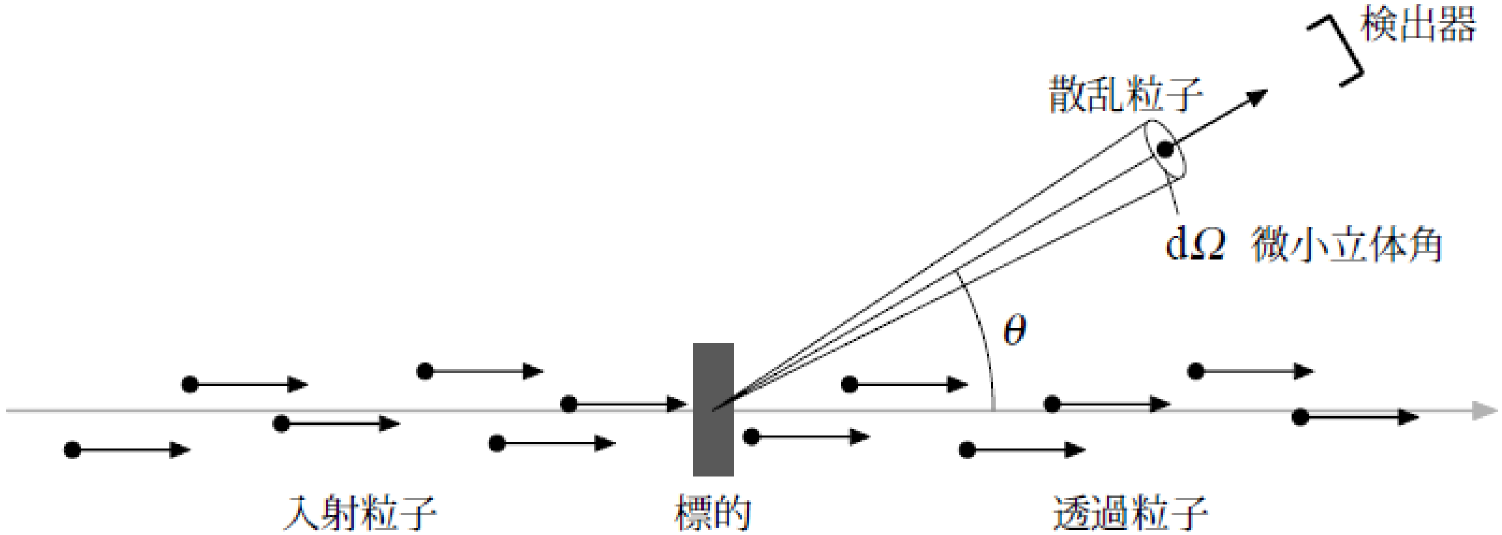


図 21.1: 散乱実験

http://www.th.phys.titech.ac.jp/~muto/lectures/QMII11/QMII11_chap21.pdf

武藤一雄氏（東工大）

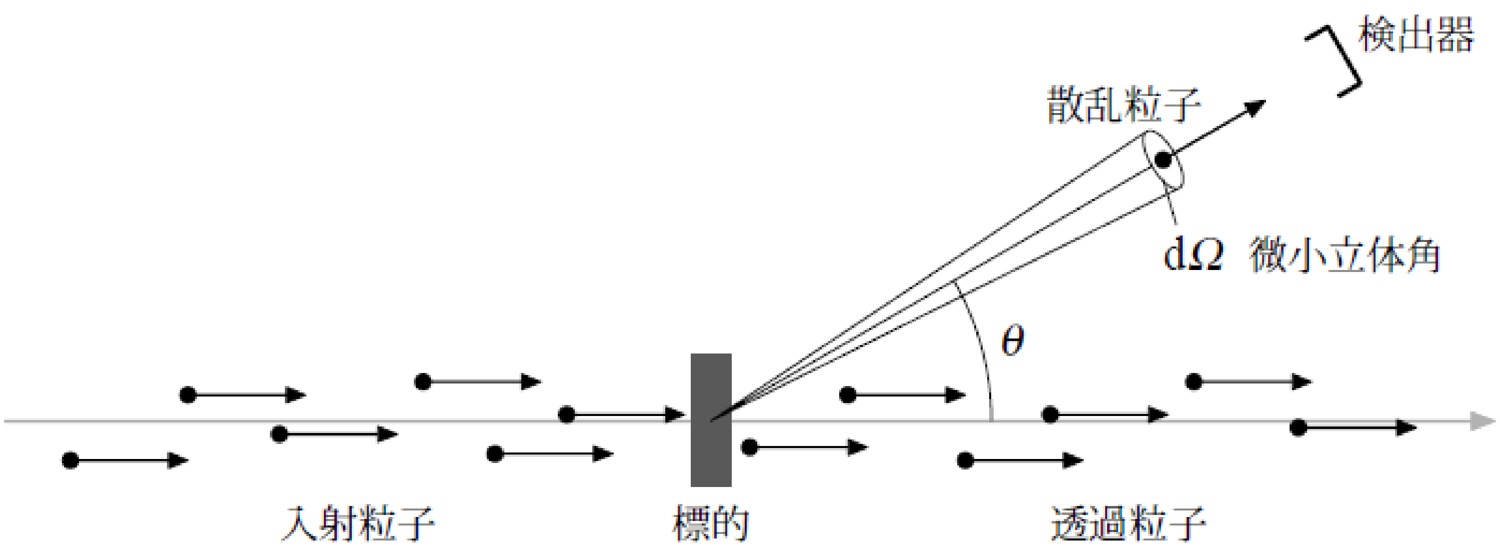


図 21.1: 散乱実験

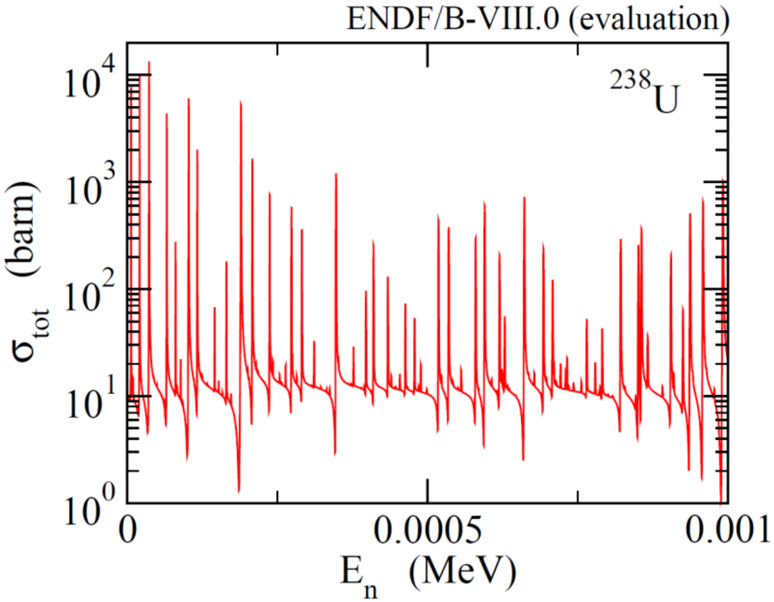
点粒子の散乱：
弾性散乱のみ

複合粒子の反応プロセス

→ 豊富な反応様式

- 弾性散乱
- 非弾性散乱
- 粒子移行
- 複合粒子形成（核融合）

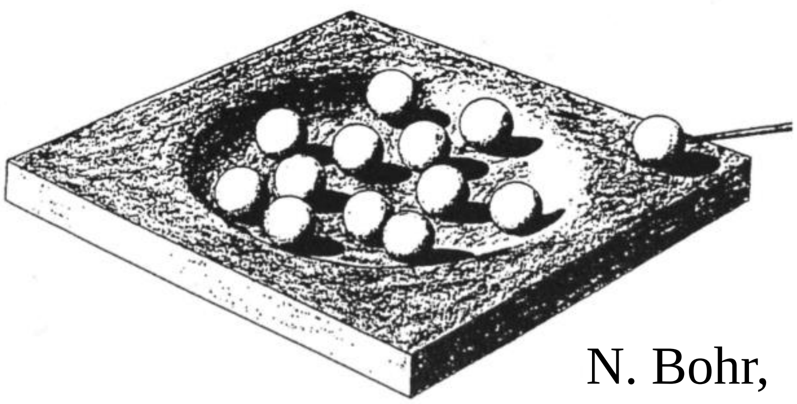
核融合反応： 複合核生成反応



cf. フェルミの実験 (1935)
原子核による中性子の吸収

→ MeV スケールの原子核に
eV スケールの幅の多数の共鳴状態

Niels Bohr (1936):「複合核」の概念を提唱



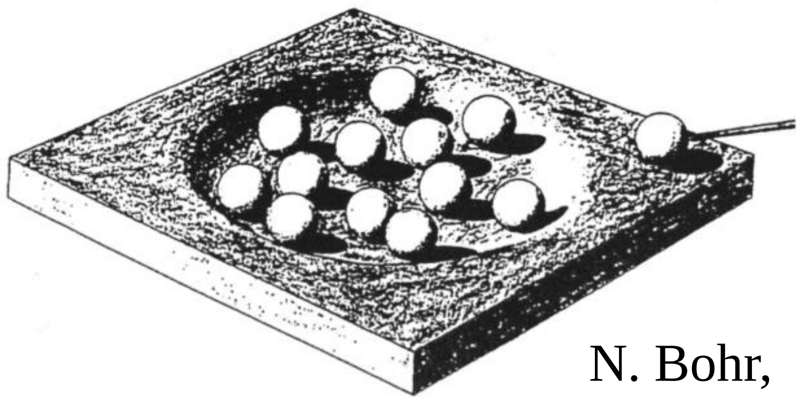
N. Bohr,
Nature 137 ('36) 351

Wikipedia

核融合反応： 複合核生成反応

Niels Bohr (1936)

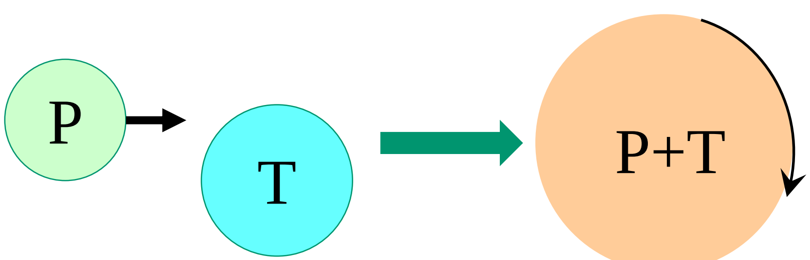
原子核による中性子の吸収 → 複合核



N. Bohr,
Nature 137 (‘36) 351

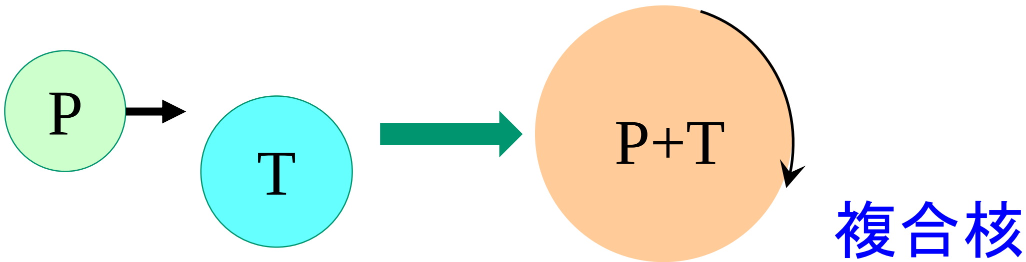
Wikipedia

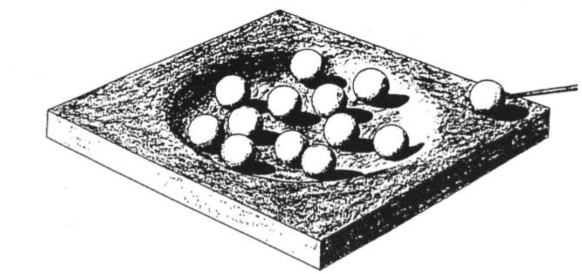
重イオン反応で複合核をつくる ＝ **重イオン核融合反応**



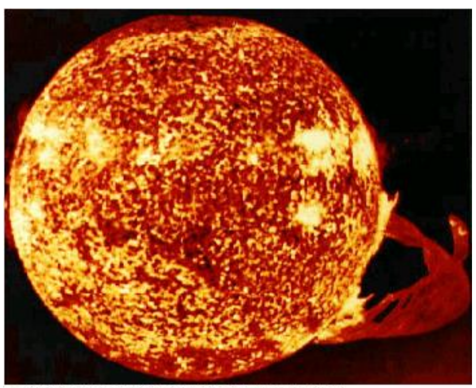
複合核

核融合反応： 複合核生成反応



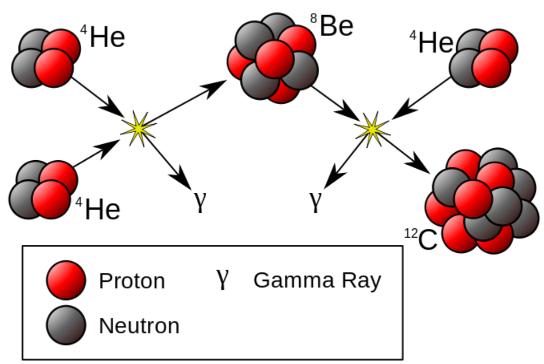


cf. N. Bohr ‘36

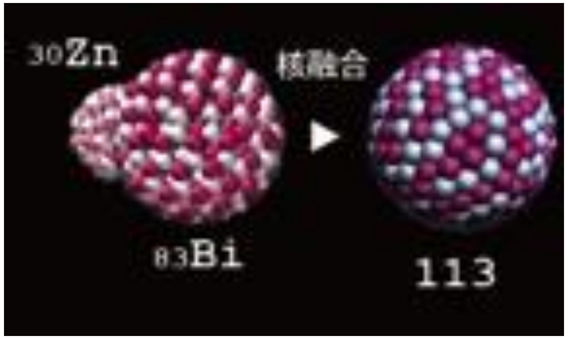


NASA, Skylab space station December 19, 1973, solar flare reaching 588 000 km off solar surface

恒星のエネルギー源 (Bethe ‘39)

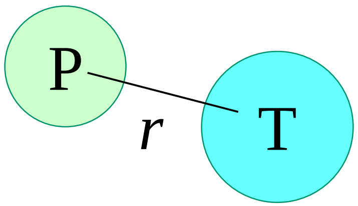


元素合成

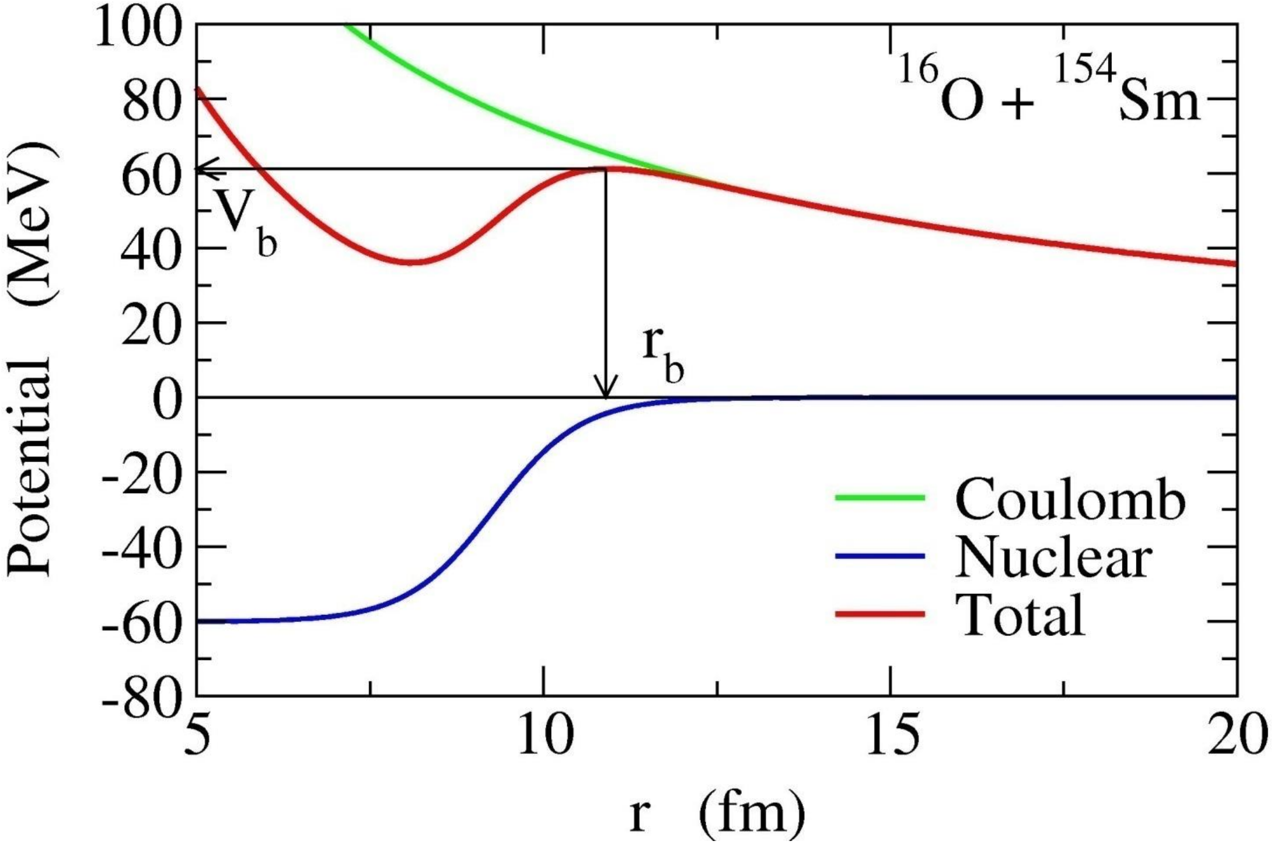


超重元素の合成

重イオン核融合反応と量子トンネル現象



ポテンシャル障壁



2つの力:

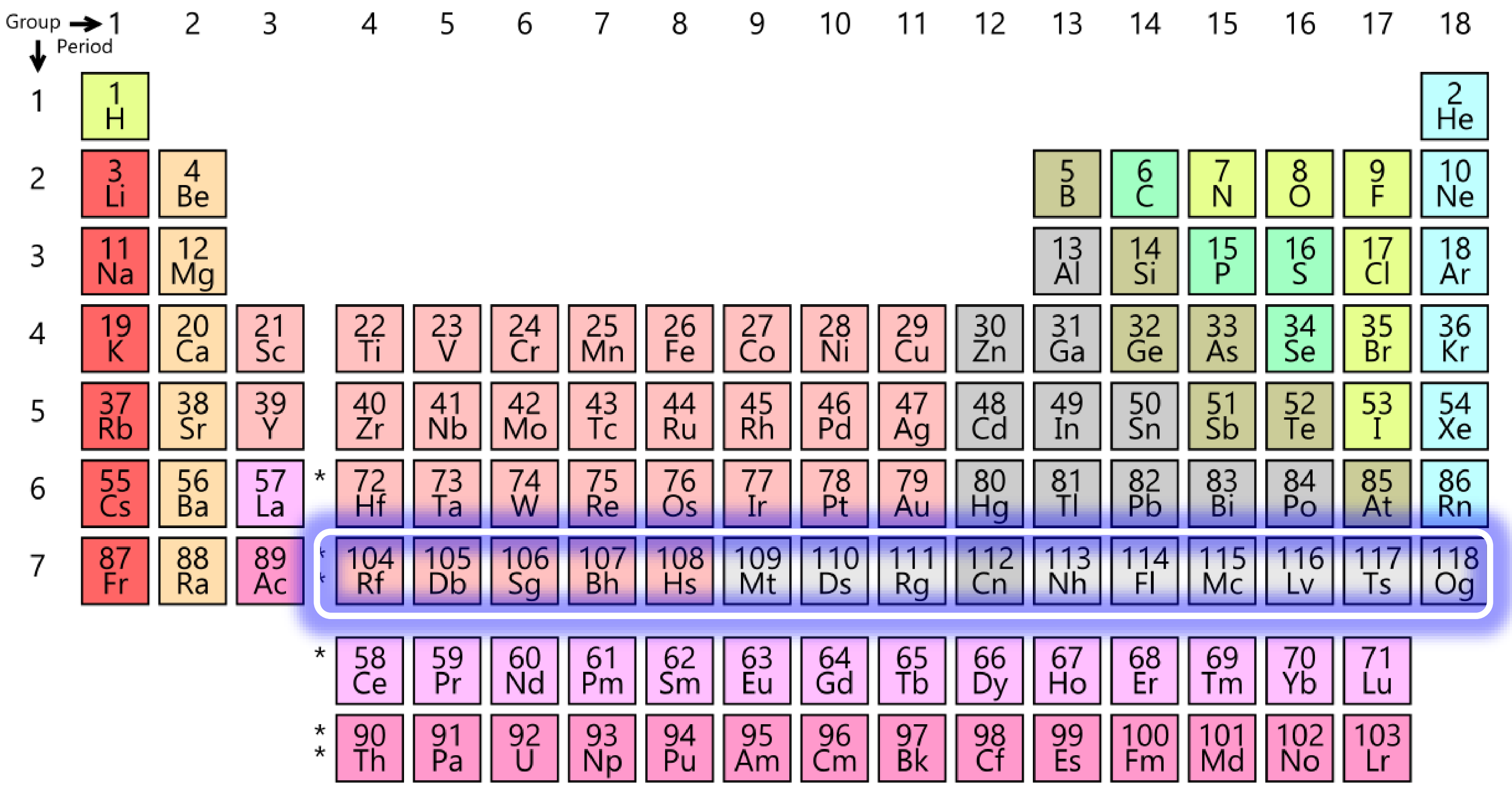
1. クーロン力
   長距離斥力
2. 核力
   短距離引力

両者の打ち消しあいによりポテンシャル障壁が形成
（クーロン障壁）

ポテンシャル障壁を透過して r が小さくなれば核融合
→ トンネル効果

c.f. 天体核反応

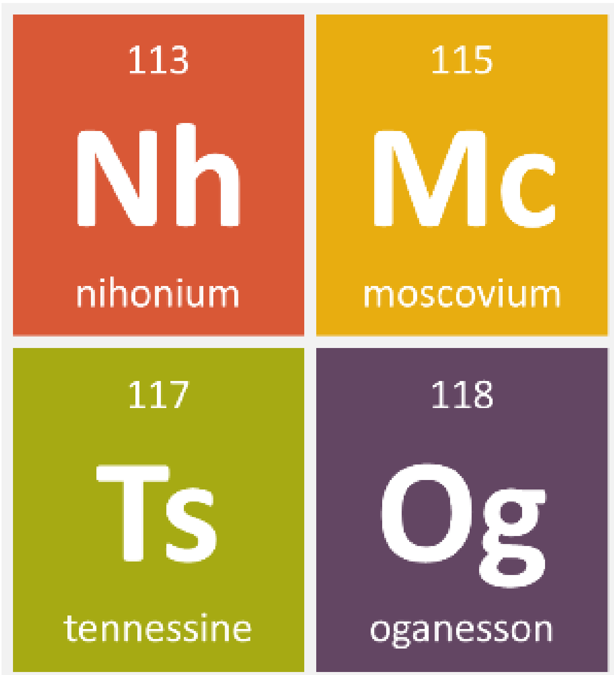
超重元素(超重原子核)



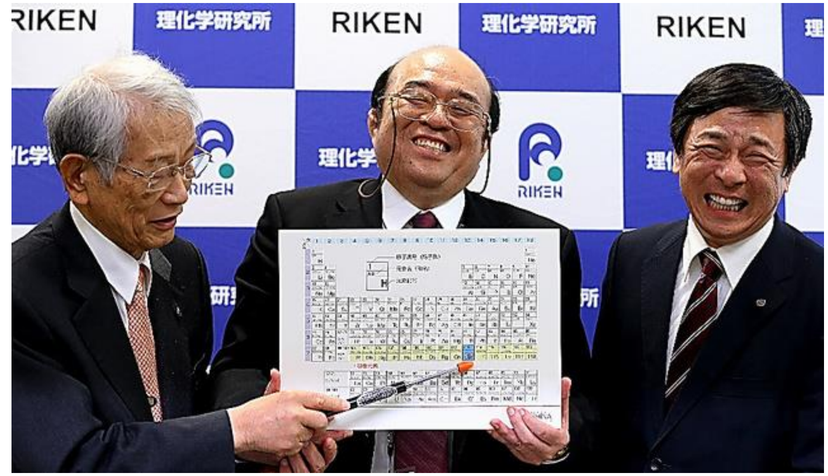
自然界にある最も重い元素は U や Pt

→ それより重い元素を核融合反応で作る

超重元素



2016年11月

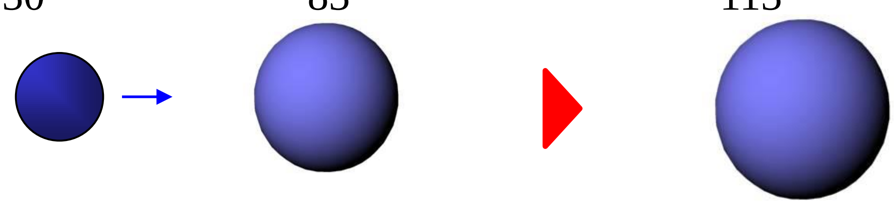


Group → / Period ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 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	

Wikipedia

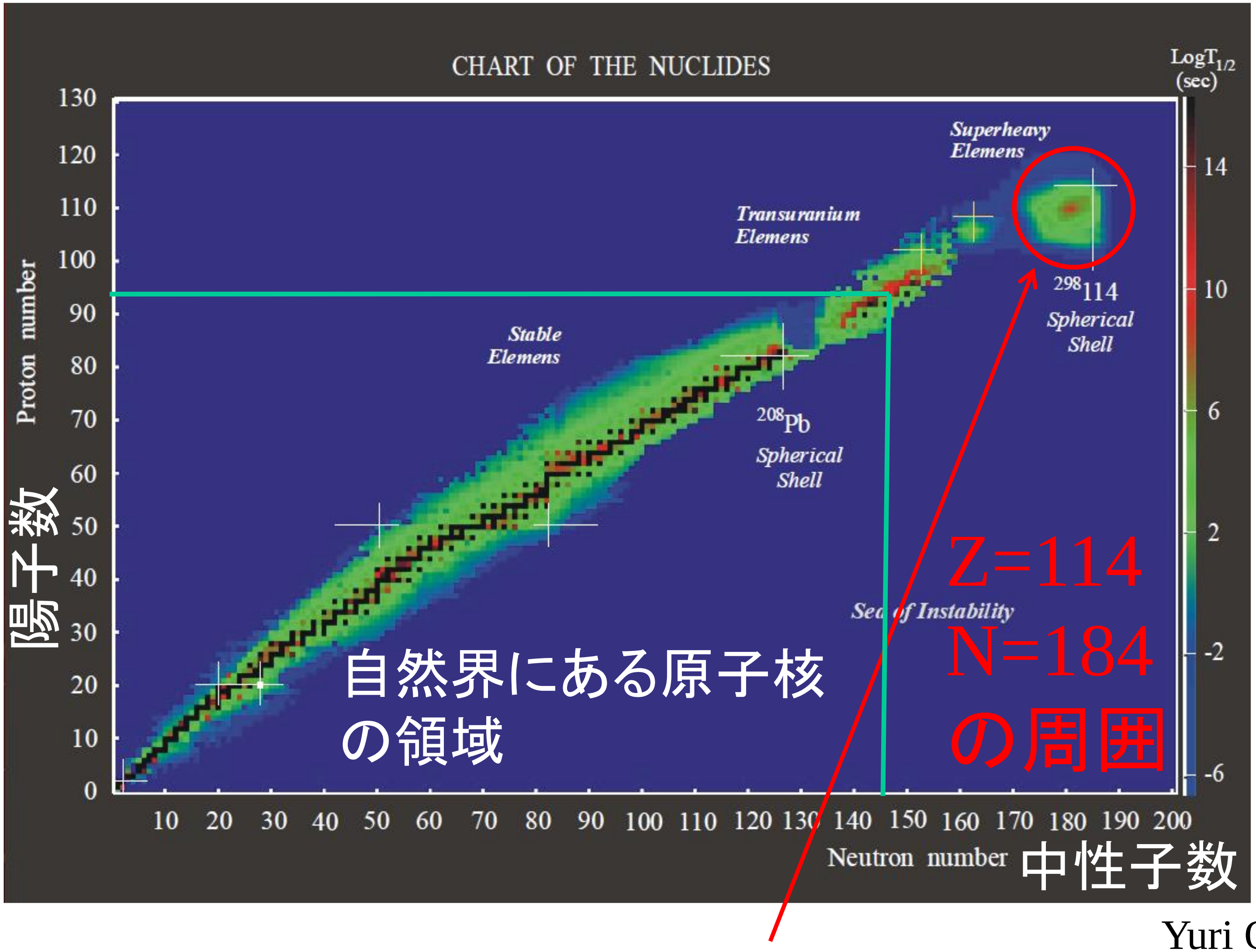
現在、最も重いものは Z=118 (Og)

$^{70}_{30}Zn$ $^{209}_{83}Bi$ $^{279}_{113}Nh^*$



重イオン核融合反応

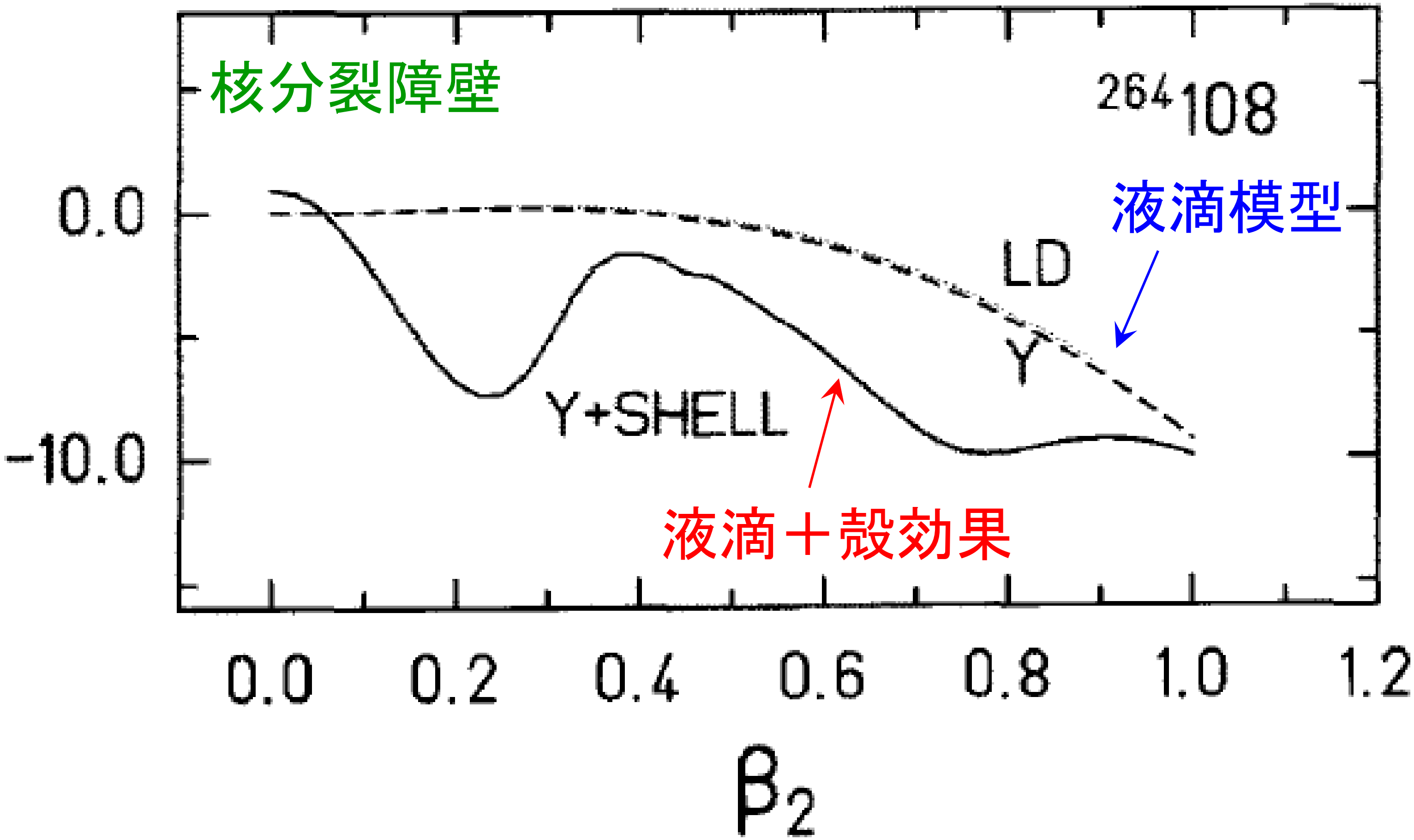
超重元素(超重原子核)



Yuri Oganessian

原子核の安定領域の理論的予言

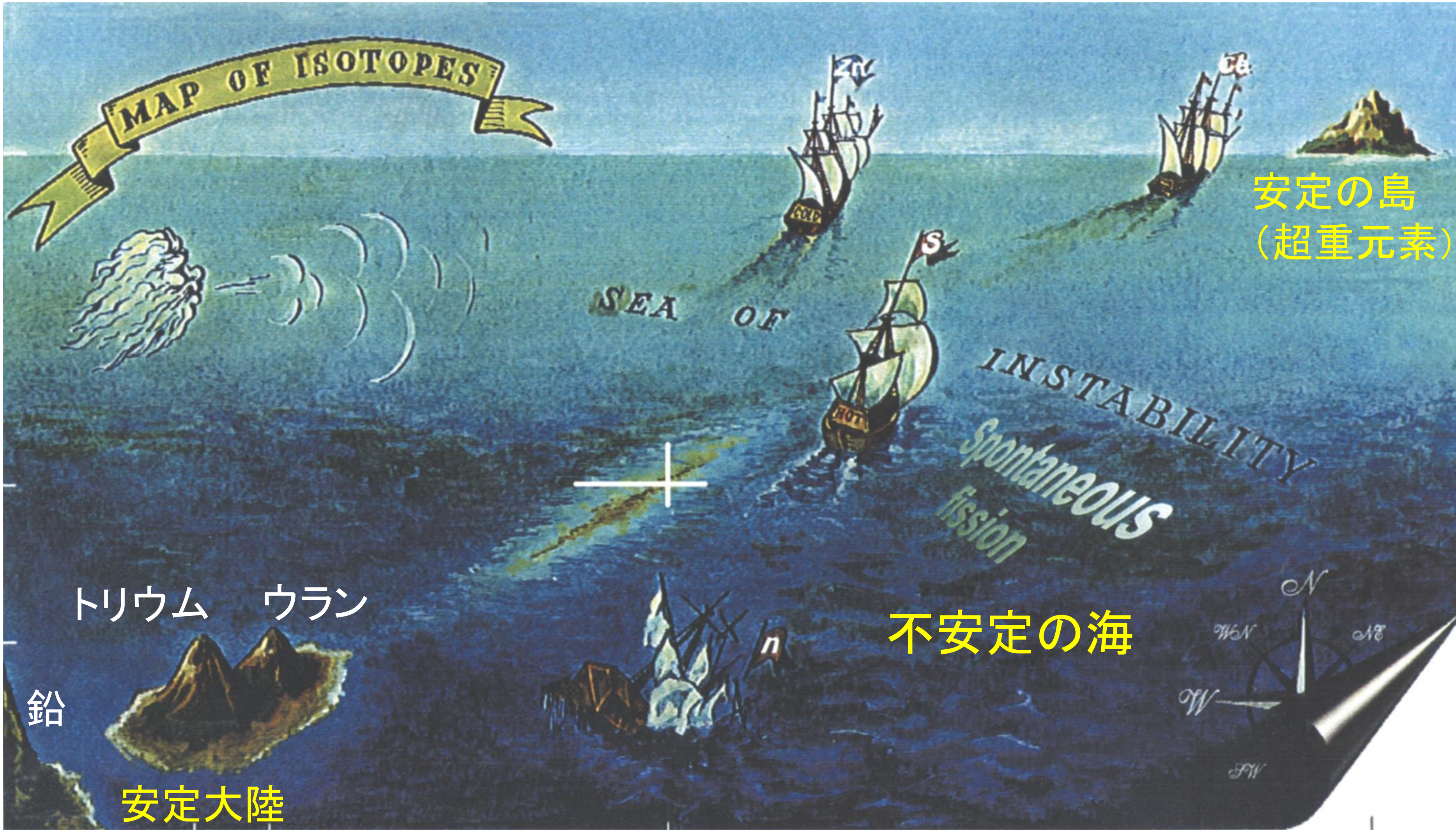
(1966年:スビアテッキら)



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

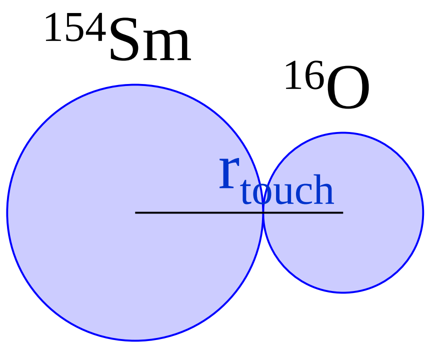
安定の島(超重元素)を目指して



Yuri Oganessian

超重核領域における重イオン核融合反応

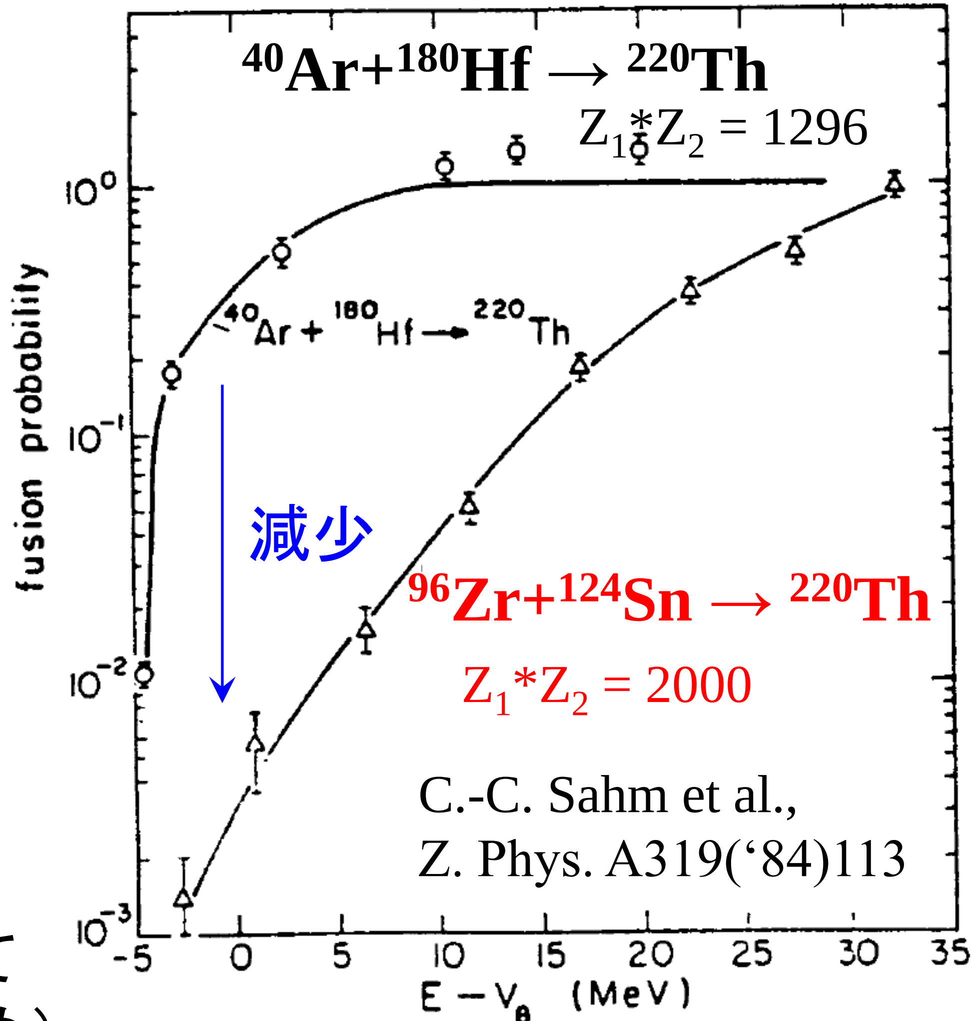
➤ 中重核領域における核融合反応：



一度接触すると自動的に複合核を形成

➤ 重核・超重核領域における核融合反応：

接触しても大きな確率で離れてしまう（クーロン反発が強いため）



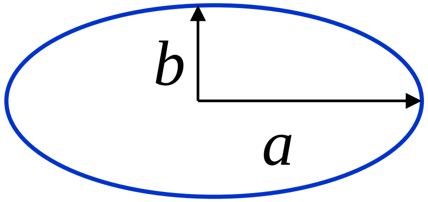
目安：$Z_1 * Z_2 > 1600 \sim 1800$ の系でこのようなことが起こる

（復習）

$$B(N,Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{\mathrm{sym}} \frac{(N-Z)^2}{A}$$

原子核を体積一定のまま変形してみる

例）回転楕円体



$$\begin{aligned} a &= R\cdot(1+\epsilon) \\ b &= R\cdot(1+\epsilon)^{-1/2} \end{aligned}$$

$ab^2 = R^3 =$ 一定

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

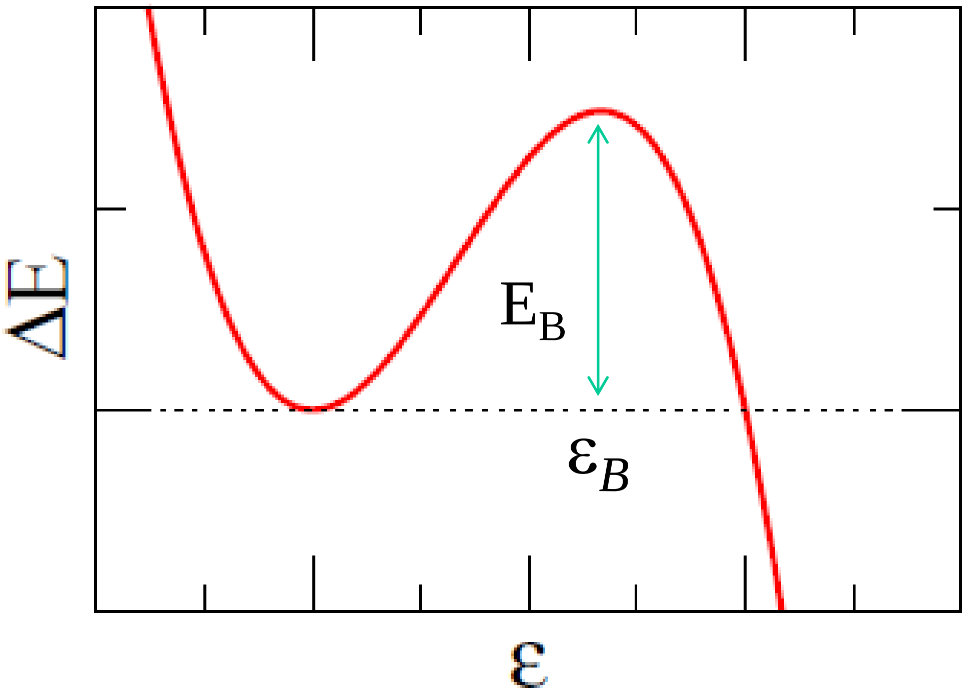
（クーロン項、表面項）変化

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）

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



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

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

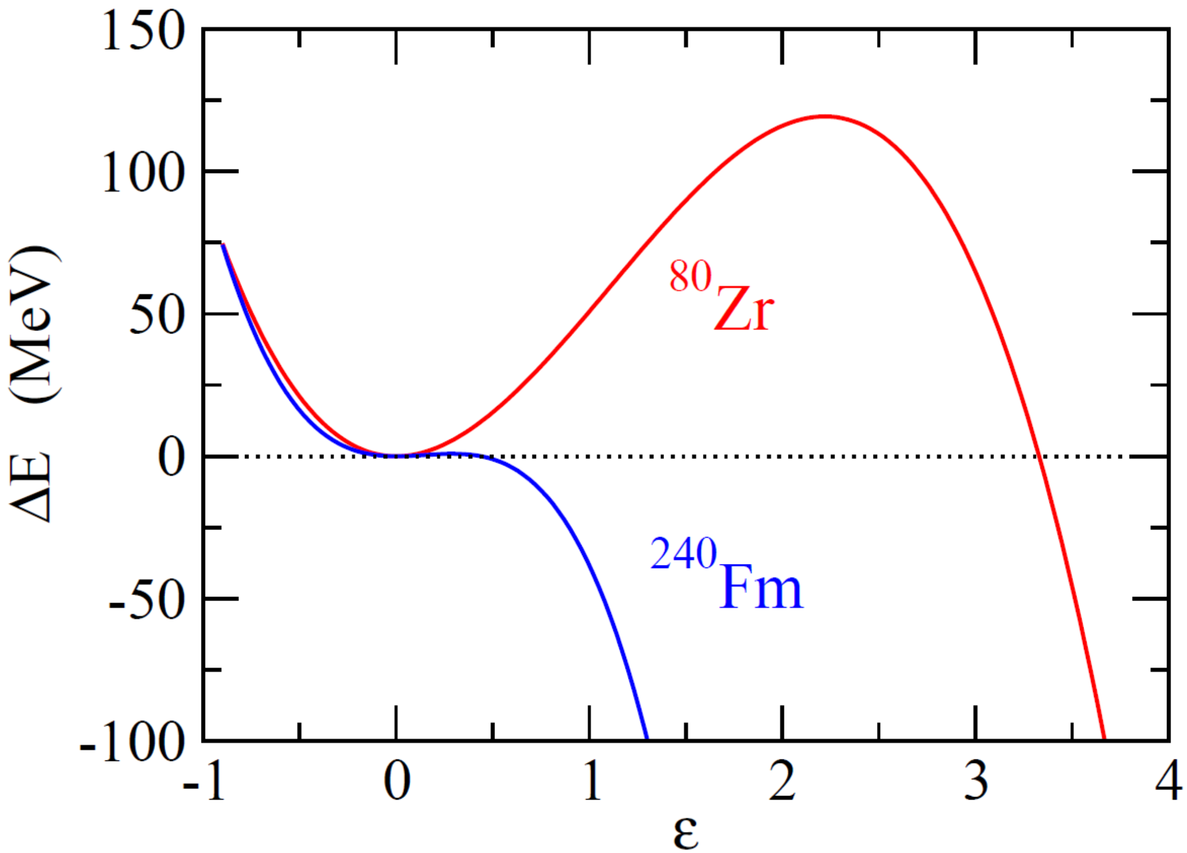
重い核ほど障壁は低くなる

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

重い核ほど障壁での変形度は小さくなる

液滴模型での核分裂障壁

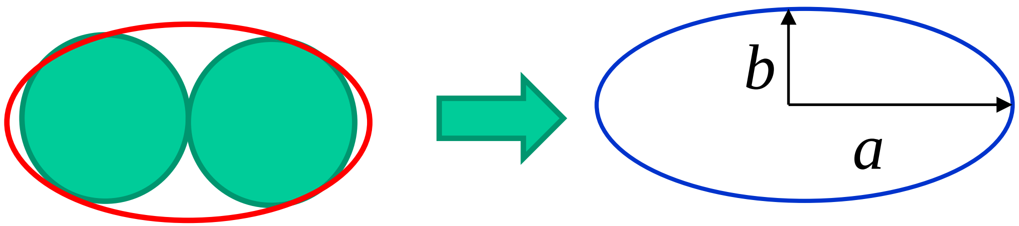
$$\Delta E = E_S^{(0)}\left\{\frac{2}{5}(1-x)\epsilon^2 - \frac{4}{105}(1+2x)\epsilon^3 + \cdots\right\} \qquad x \equiv \frac{E_C^{(0)}}{2E_S^{(0)}}$$



✓ 重い核ほど障壁は低くなる

✓ 重い核ほど障壁での変形度は小さくなる

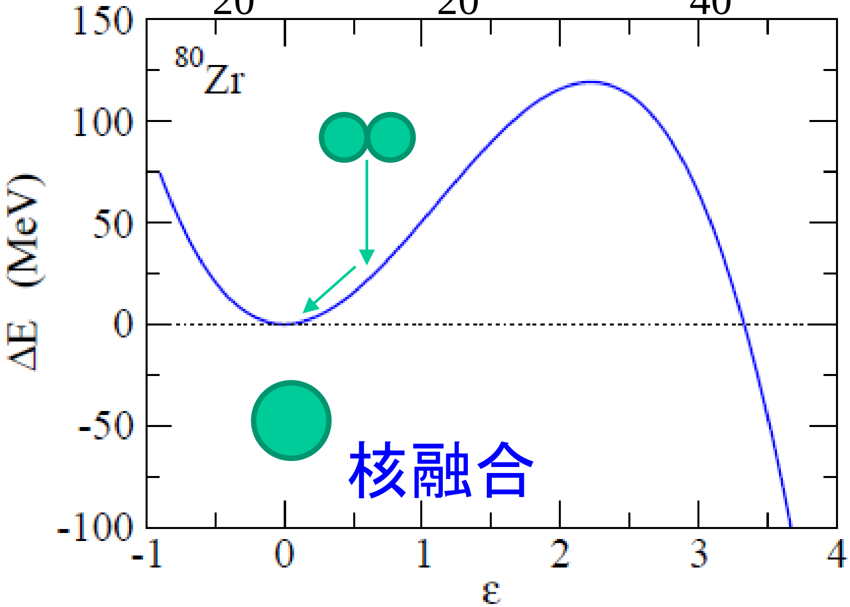
同じ原子核が接触すると:



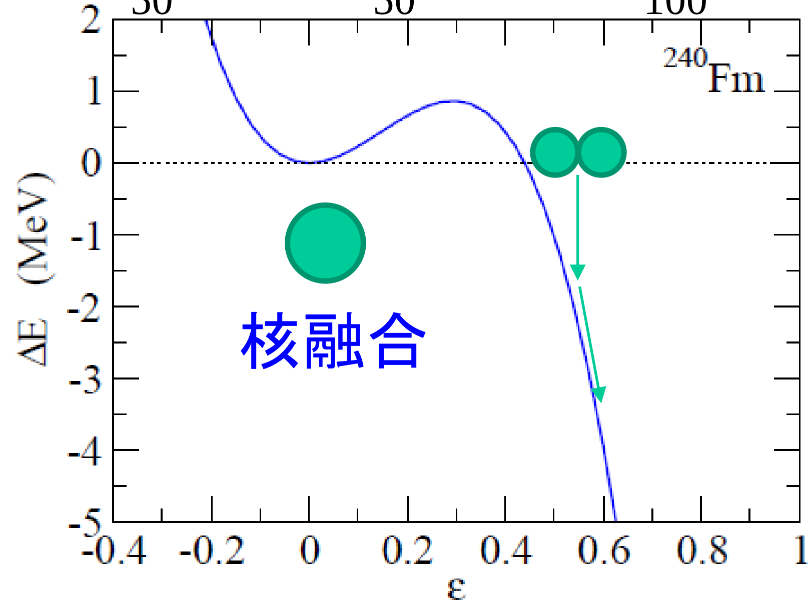
$$
\begin{aligned}
a &= R_0 \cdot (1+\epsilon) \\
b &= R_0 \cdot (1+\epsilon)^{-1/2}
\end{aligned}
$$

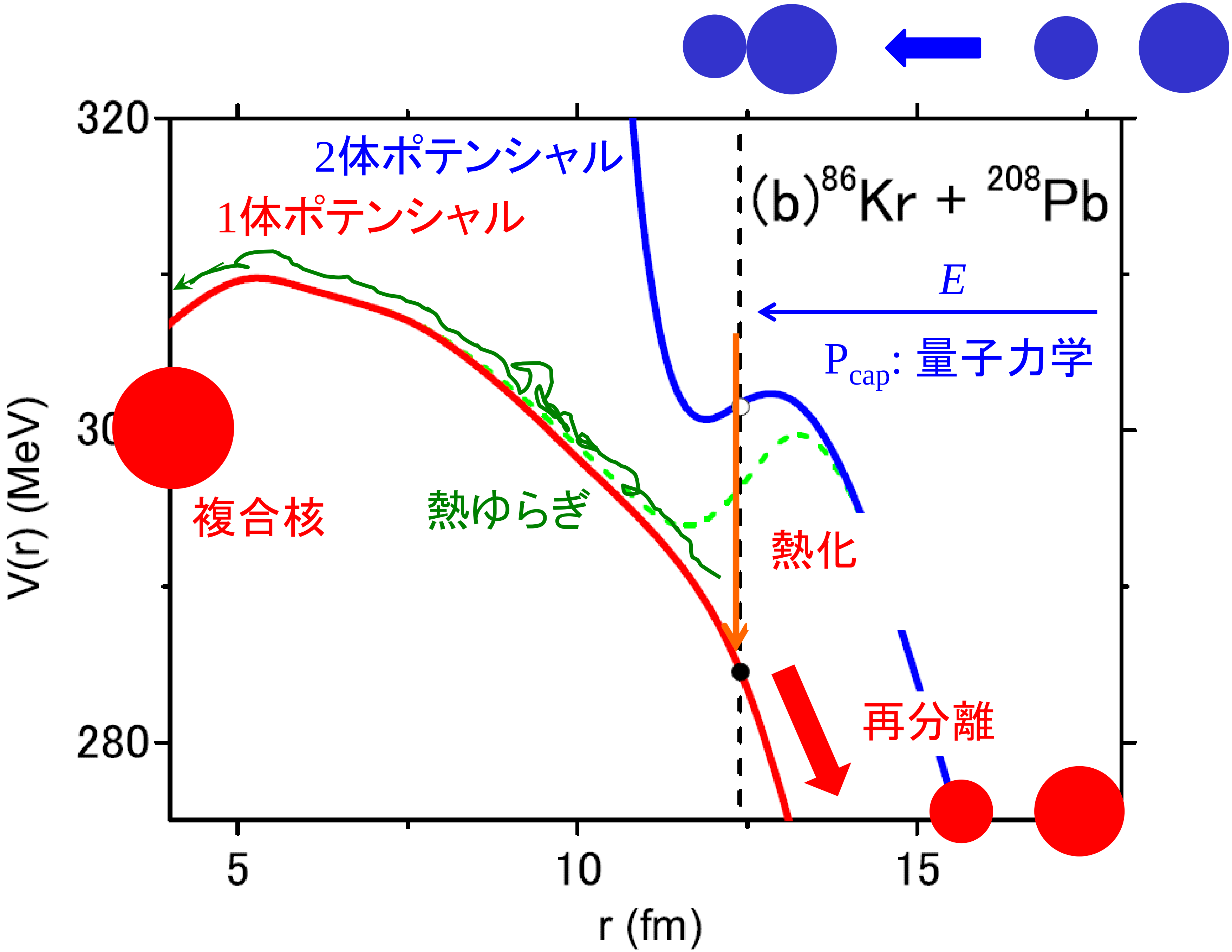
$$
\frac{a}{b} \sim \frac{2R}{R} = 2 \rightarrow \epsilon \sim 0.587
$$

$^{40}_{20}Ca + ^{40}_{20}Ca \rightarrow ^{80}_{40}Zr$



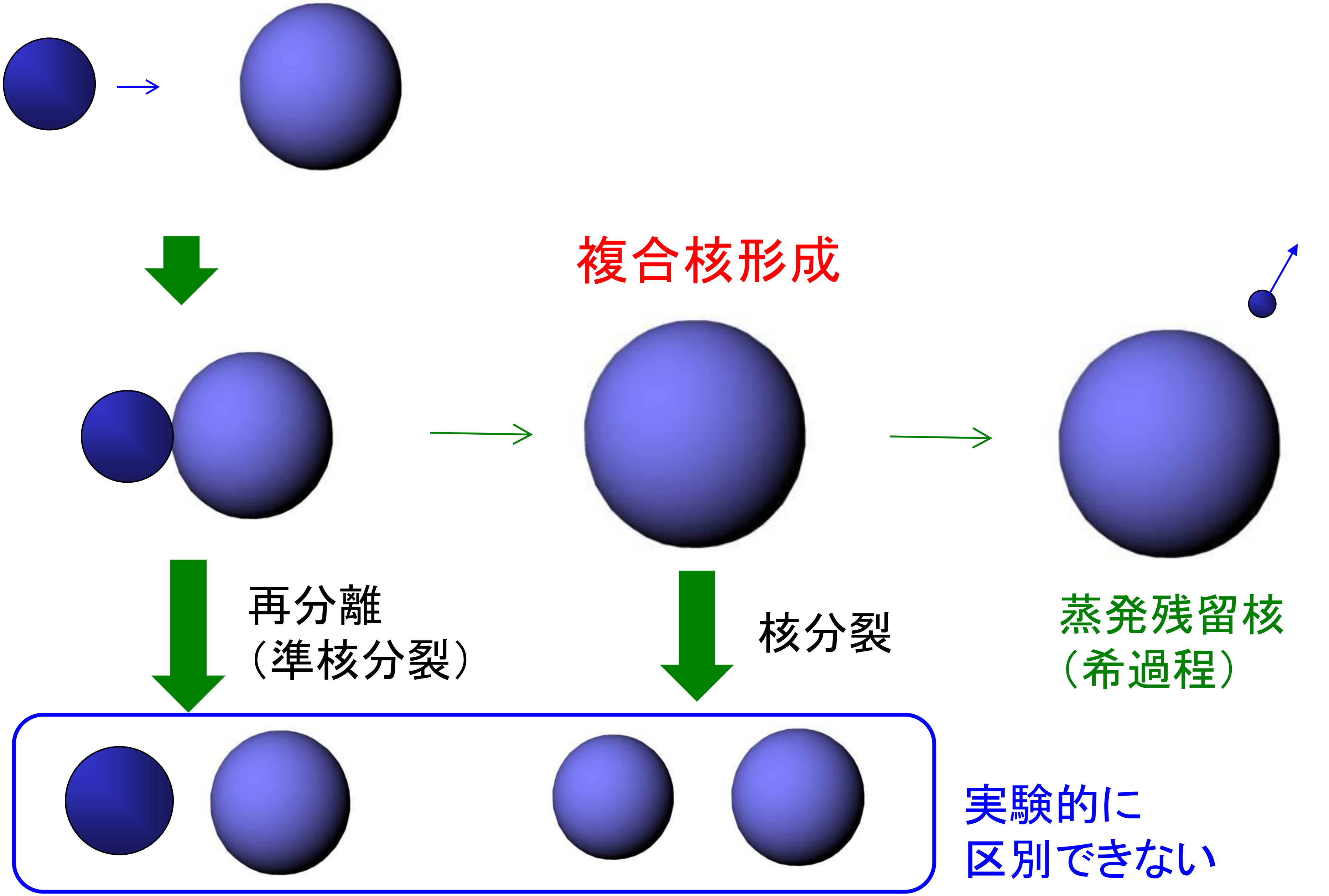
$^{120}_{50}Sn + ^{120}_{50}Sn \rightarrow ^{240}_{100}Fm$





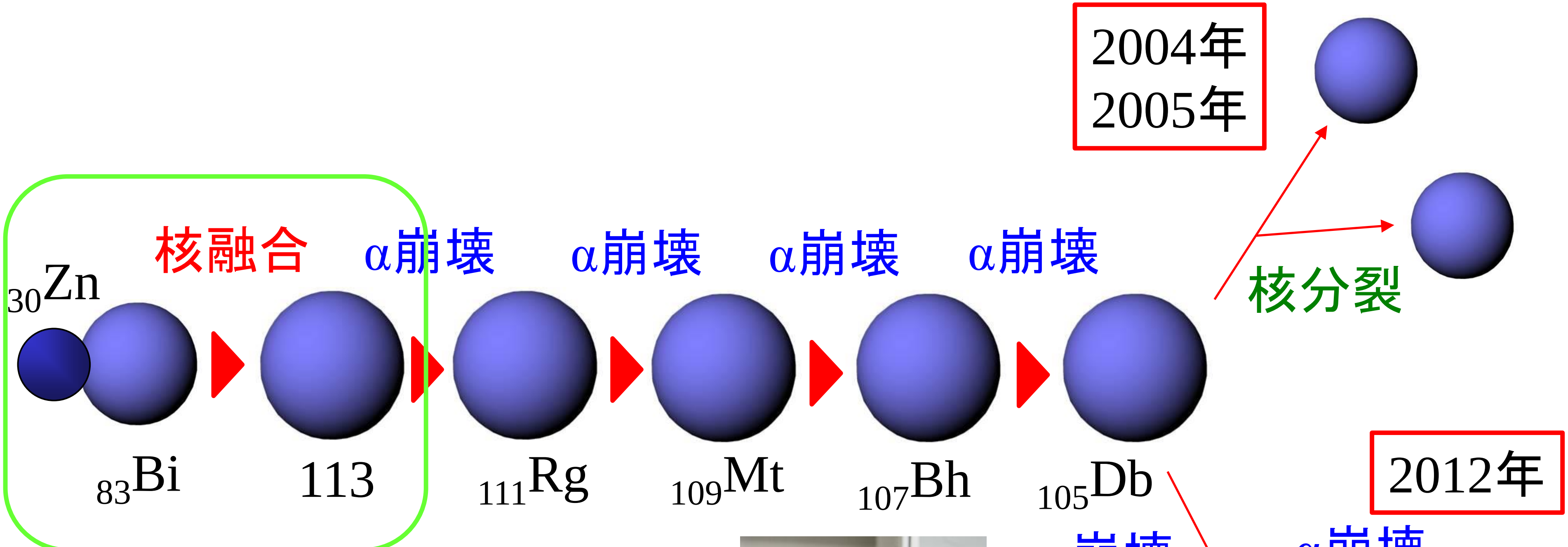
2体ポテンシャル
1体ポテンシャル
(b) ^{86}Kr + ^{208}Pb
E
P_{cap}: 量子力学
複合核
熱ゆらぎ
熱化
再分離
320
300
280
5
10
15
V(r) (MeV)
r (fm)

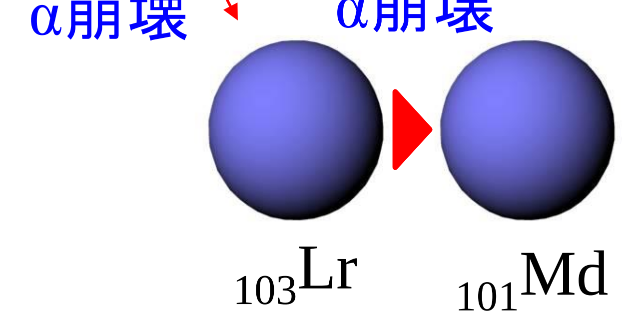
超重元素領域における重イオン核融合反応



新元素113番：ニホニウム（Nh）

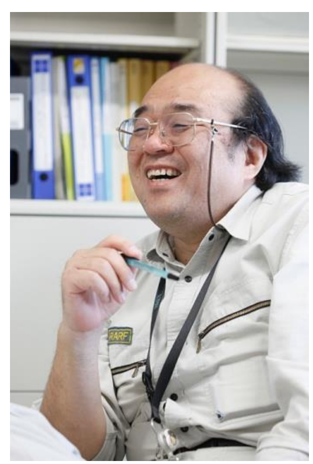
$$^{70}\mathrm{Zn}\ (Z=30)\ +\ ^{209}\mathrm{Bi}\ (Z=83) \longrightarrow\ ^{278}113\ (\mathrm{Nh}) + n$$

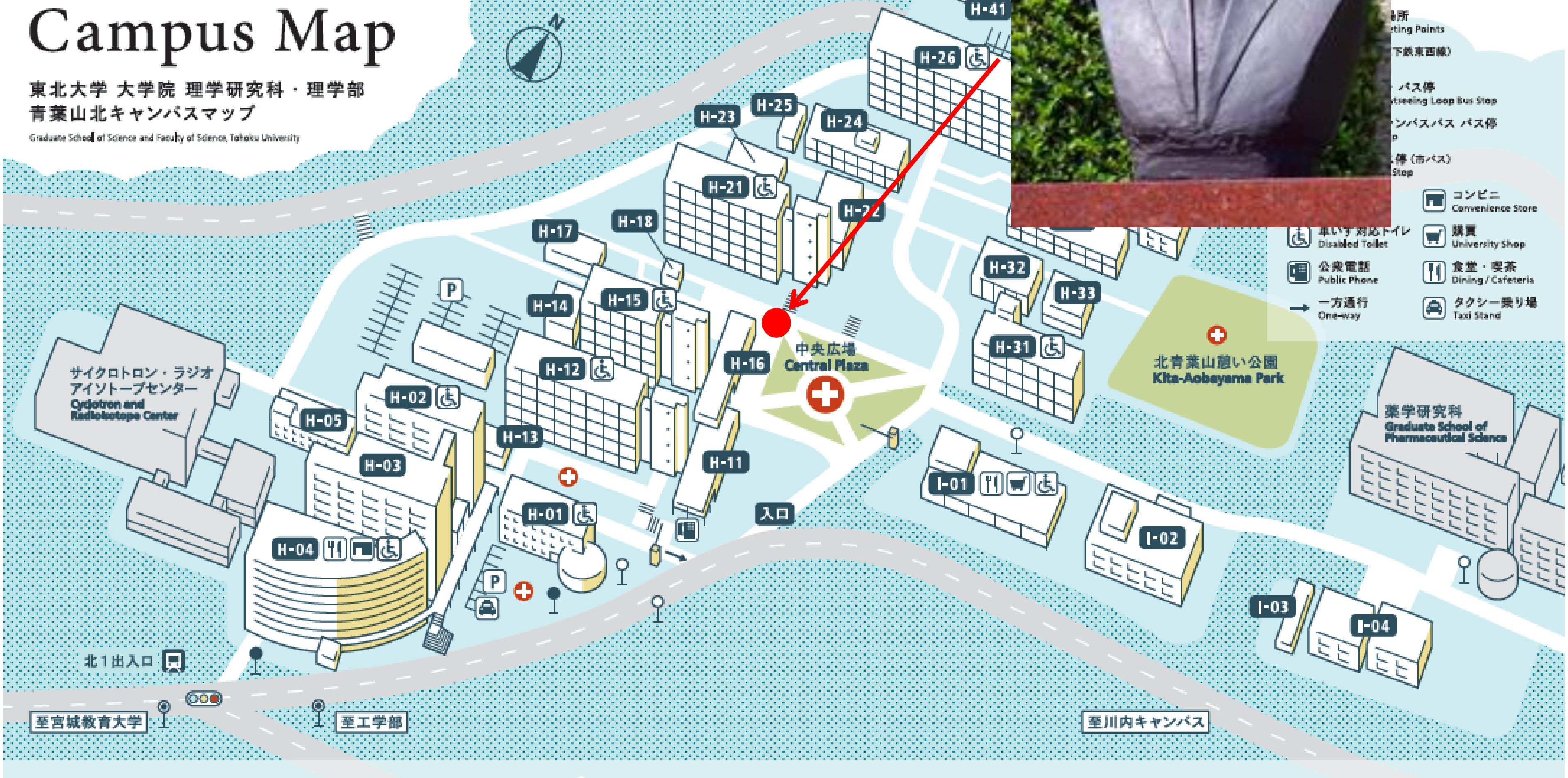




553 日間の実験で
たったの3例の発見

→ 日本に命名権
ニホニウム　Nh





Campus Map
東北大学 大学院 理学研究科・理学部
青葉山北キャンパスマップ
Graduate School of Science and Faculty of Science, Tohoku University
N
H-41
H-26
H-25
H-23
H-24
H-21
H-22
H-17
H-18
H-14
H-15
H-16
H-12
H-13
H-11
H-02
H-05
H-03
H-04
H-01
H-32
H-33
H-31
I-01
I-02
I-03
I-04
P
中央広場
Central Plaza
入口
北青葉山憩い公園
Kita-Aobayama Park
薬学研究科
Graduate School of Pharmaceutical Science
サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター
Cyclotron and Radioisotope Center
北1出入口
至宮城教育大学
至工学部
至川内キャンパス
コンビニ
Convenience Store
車いす対応トイレ
Disabled Toilet
購買
University Shop
公衆電話
Public Phone
食堂・喫茶
Dining / Cafeteria
一方通行
One-way
タクシー乗り場
Taxi Stand

幻の元素、ニッポニウム（Np）

1908 年 :「43番目の元素」として新元素を発見し
ニッポニウム（Np）と命名したと発表。

→ その後疑問視され、周期表からは落とされる
（実は75番元素レニウム（当時未発見）だった）

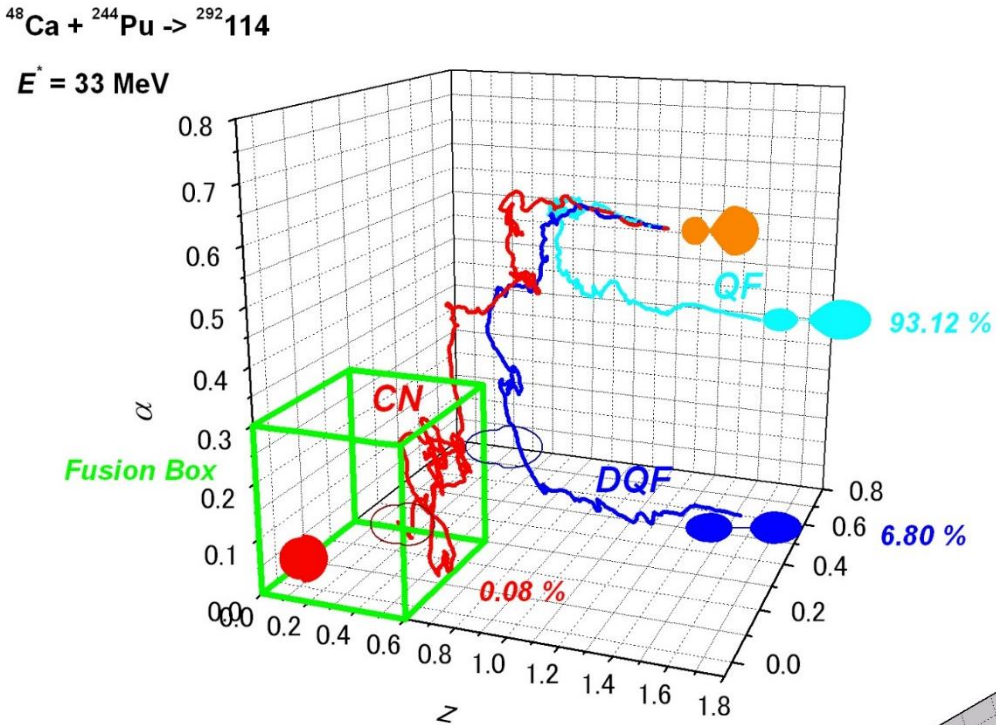
小川正孝
(1865－1930)

東北大学第4代総長
（1919－1928）

ニホニウム Nh は
この時以来の悲願
達成！

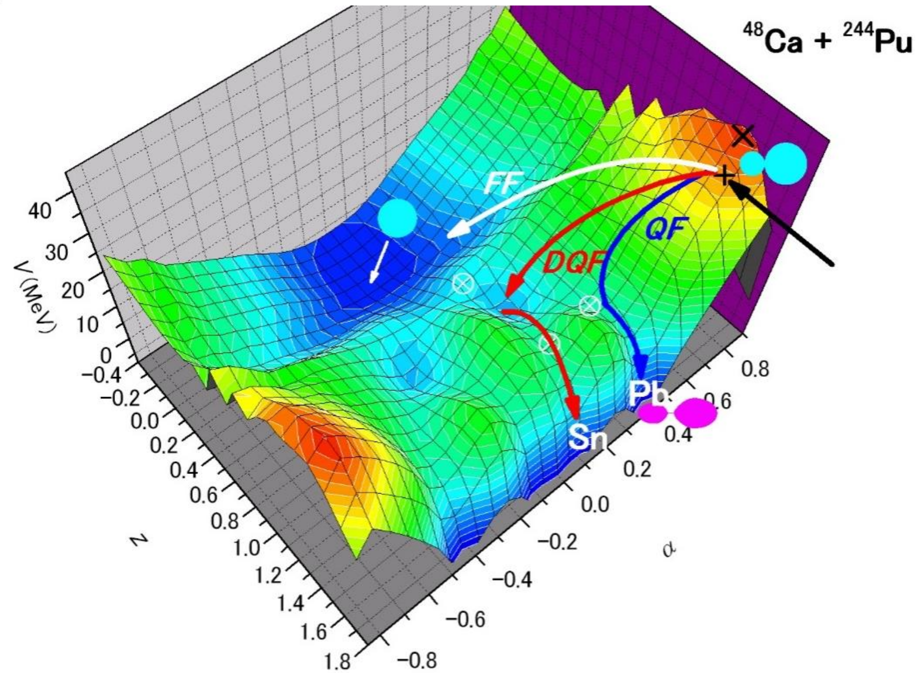
理論:ランジュバン法

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



γ: 摩擦係数
$R(t)$: 乱雑力

を多次元に拡張したもの
(ブラウン運動の理論)

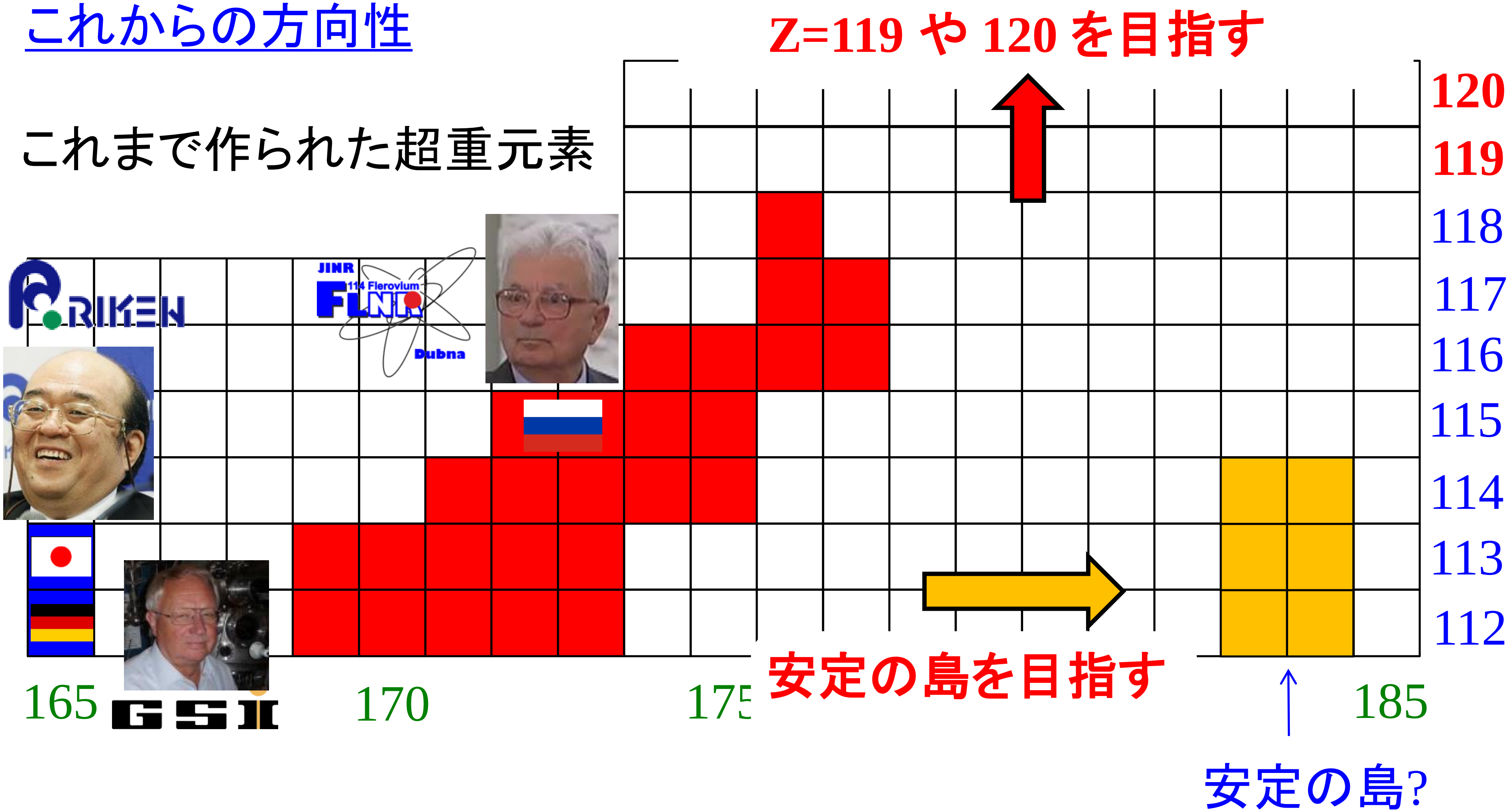


q として

- 核間距離 (z)
- 原子核の変形 (δ)
- フラグメントの非対称度 (α)

これからの方向性

これまで作られた超重元素



理論的課題:

- 反応機構の理解
- 核融合断面積の精度良い予言

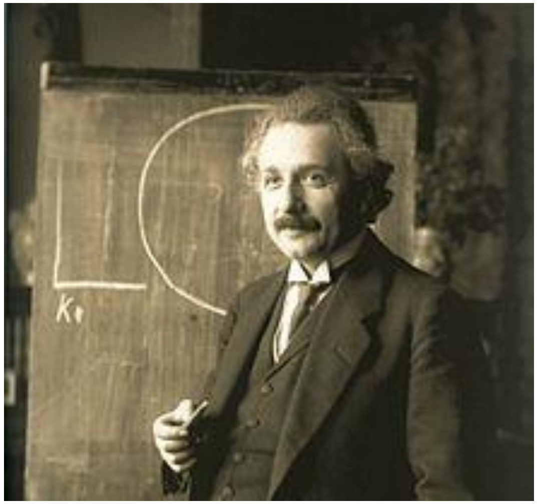
超重元素の化学

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	

- 本当にここに置いちゃっていいの?
- 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、

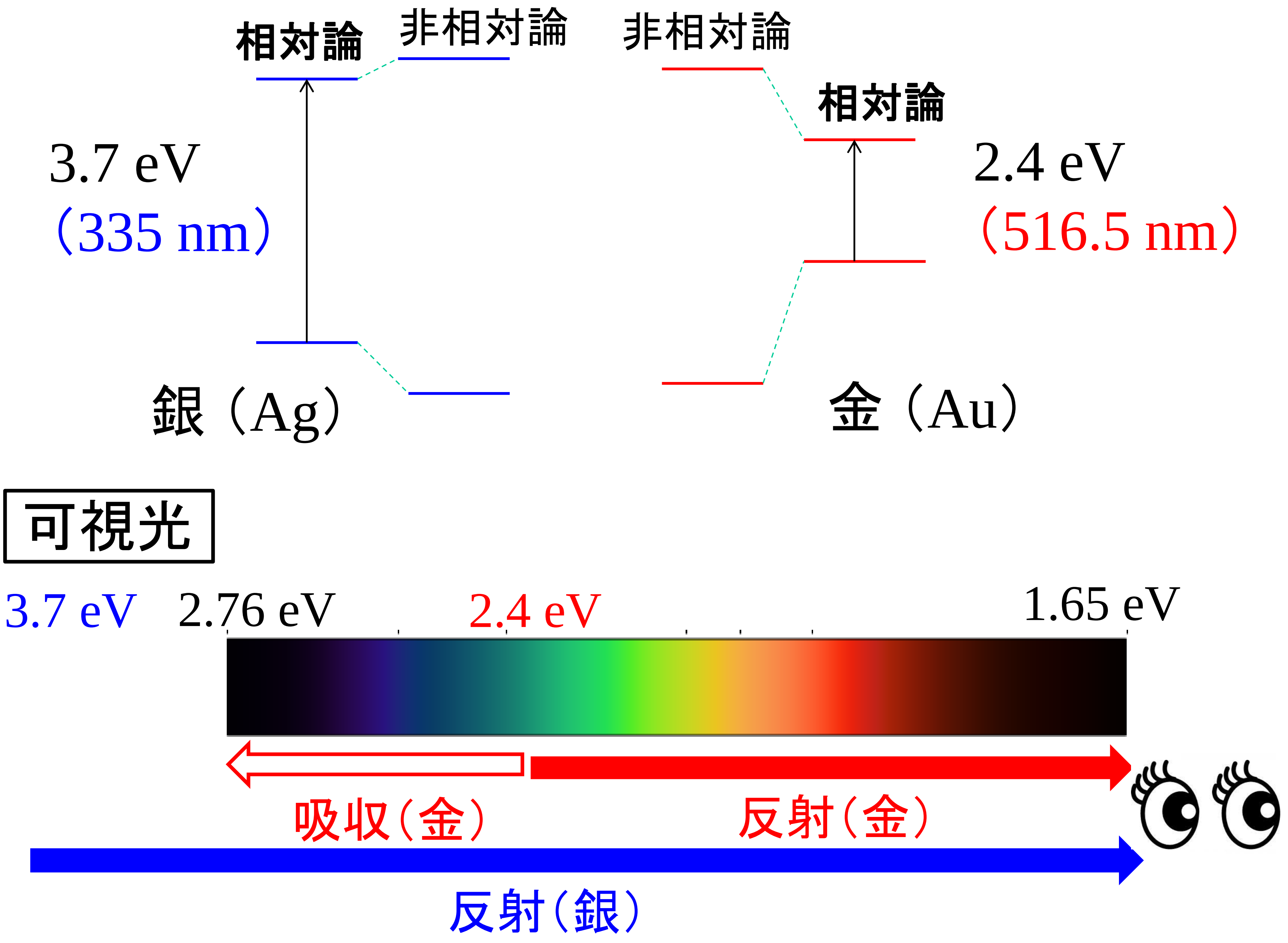
$$E_{1S} = mc^2\sqrt{1-(Z\alpha)^2} \sim mc^2\left(1 - \frac{(Z\alpha)^2}{2} \underbrace{- \frac{(Z\alpha)^4}{8} + \cdots}_{\text{相対論的効果}}\right)$$

相対論的効果で有名な例：金の色

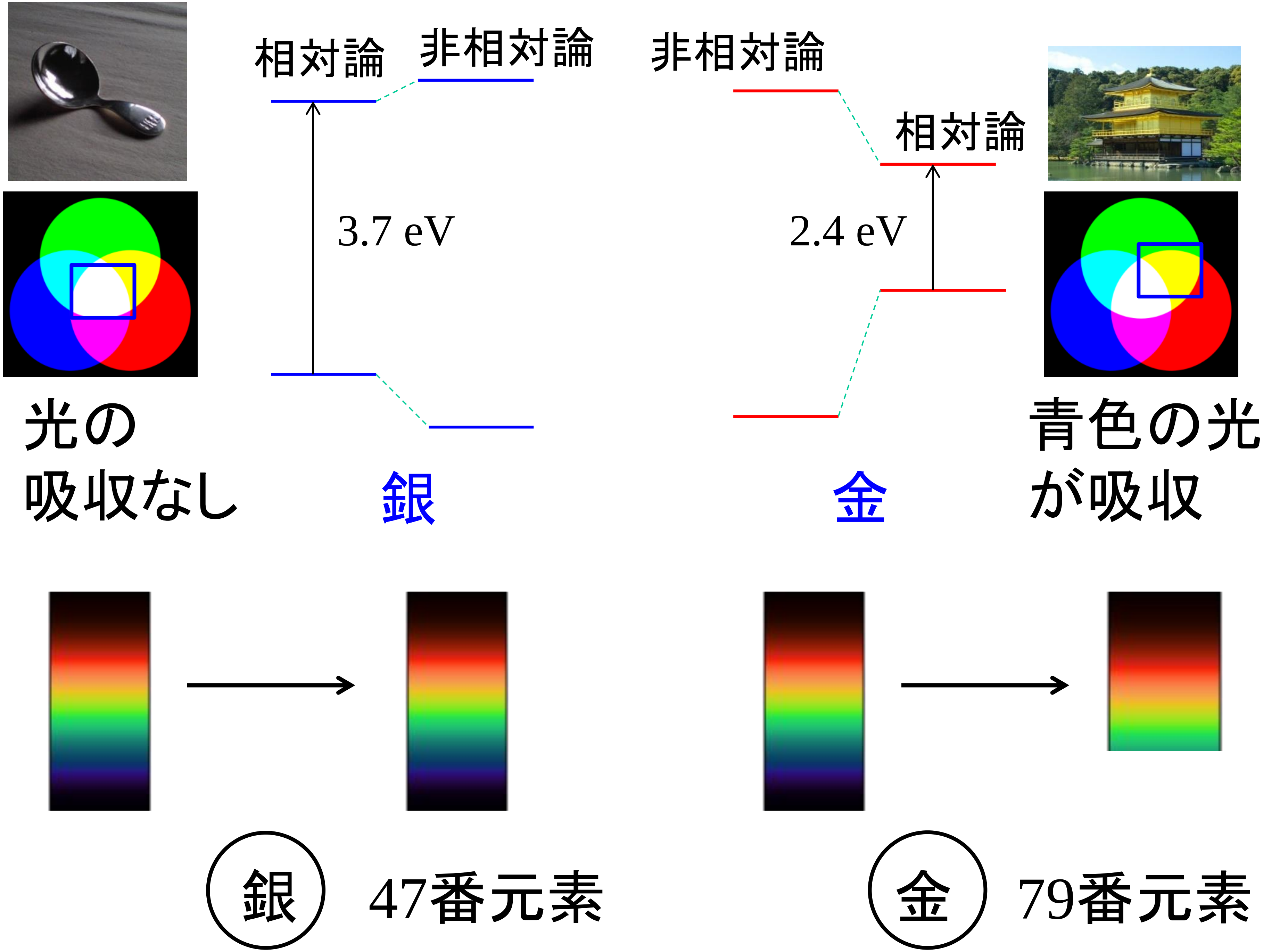
金と銀は同族

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
非相対論
相対論
3.7 eV
（335 nm）
2.4 eV
（516.5 nm）
銀（Ag）
金（Au）
可視光
3.7 eV
2.76 eV
2.4 eV
1.65 eV
吸収（金）
反射（金）
反射（銀）


相対論
非相対論
3.7 eV
光の
吸収なし
銀
非相対論
相対論
2.4 eV
青色の光
が吸収
金
銀
47番元素
金
79番元素

超重元素の化学

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

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

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？

出席の代わりに授業アンケート

学籍番号、名前、所属研究室（所属大講座）

この授業に関して、質問や疑問を自由に何でも書いて下さい。

例）　・今日の授業を聞いて疑問に思ったこと
・この講義全体を通しての感想など

などなど

今日は最終回なので、特になければ
名前だけでもOK。