

➤ 電磁遷移の式をもう一度説明して欲しい

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

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

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

✓ ところで。。。。

Γ_{fi} は単位時間当たりの遷移確率

→ 時間 t たった時に遷移しない確率は

$$P_{\text{sur}} = 1 - \Gamma t \sim e^{-\Gamma t}$$

→ 寿命は $\tau = 1/\Gamma$

(状態の寿命を測定すれば
 Γ がわかる)

➤ 電磁遷移の式をもう一度説明して欲しい

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

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

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

✓ 一番簡単な場合: $\lambda=1, \mu=0$

$$r Y_{10}(\theta) \propto z$$

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

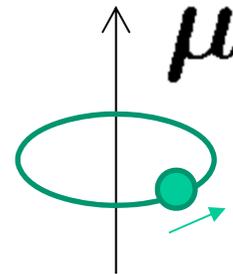
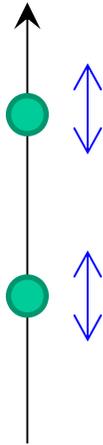
$$\mathcal{M}_{10}^{(M)} \propto \mu_N \sum_{i=1}^A \left\{ g_s^{(i)} s_{zi} + g_l^{(i)} l_{zi} \right\} = \sum_i \mu_{zi}$$

✓ 一番簡単な場合: $\lambda = 1, \mu = 0$

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

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

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

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

M1遷移:

(古典的には)

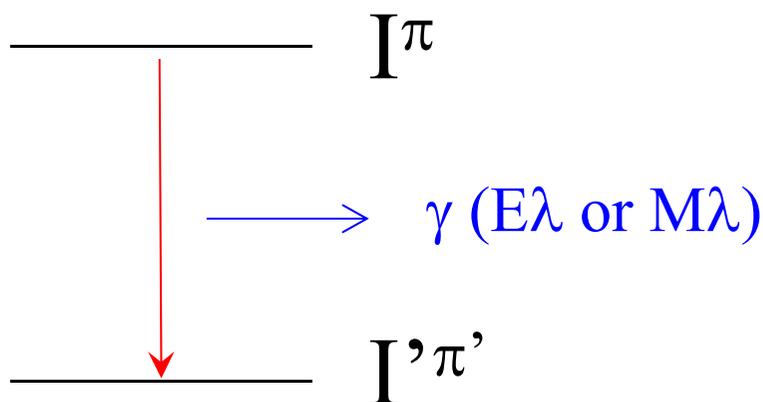
電流の時間変化による遷移

➤ 電氣的遷移と磁氣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

(これで電氣的遷移が主か磁氣的遷移が主か大体絞れる)



$E\lambda$ の演算子: パリティ $(-1)^\lambda$

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

• $\vec{I} + \vec{\lambda} = \vec{I}'$ 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

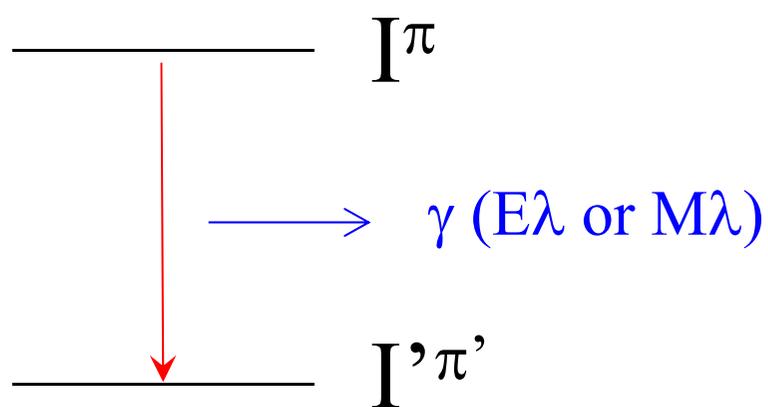
• 一般に

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

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

➤ 選択則は核子のレベルから微視的に説明できるか？

✓ 微視的かどうかというよりは、状態の対称性で決まる

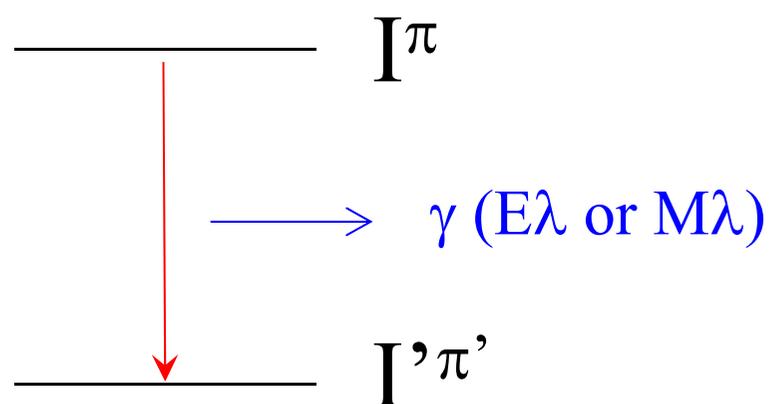


始状態、終状態を微視的に記述したとして、

「核子の集合として全体的にどのような角運動量とパリティを持っているのか」

ということが重要

➤ $4^+ \rightarrow 2^+$ の遷移における選択則の説明をもう一度



- $\vec{I} + \vec{\lambda} = \vec{I}'$ 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

λ の最小値: $4 - 2 = 2$

λ の最大値: $4 + 2 = 6$

$\rightarrow \lambda = 2, 3, 4, 5, 6$

パリティの選択則に注意すると
E2, M3, E4, M5, E6

➤ $\Gamma(E\lambda)$ の方が $\Gamma(M\lambda)$ に比べて大きい理由は何?

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

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

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

✓ 大雑把に言って

$$\Gamma(E\lambda) \propto E_\gamma^{2\lambda+1} R^{2\lambda}, \quad \Gamma(M\lambda) \propto E_\gamma^{2\lambda+1} R^{2\lambda-2}$$

$$R = 6 \text{ fm}, \lambda = 2 \text{ とすると } \Gamma(E\lambda) / \Gamma(M\lambda) \sim 36$$

4⁺ → 2⁺ 遷移の場合: E2, ~~M3~~, ~~E4~~, ~~M5~~, ~~E6~~

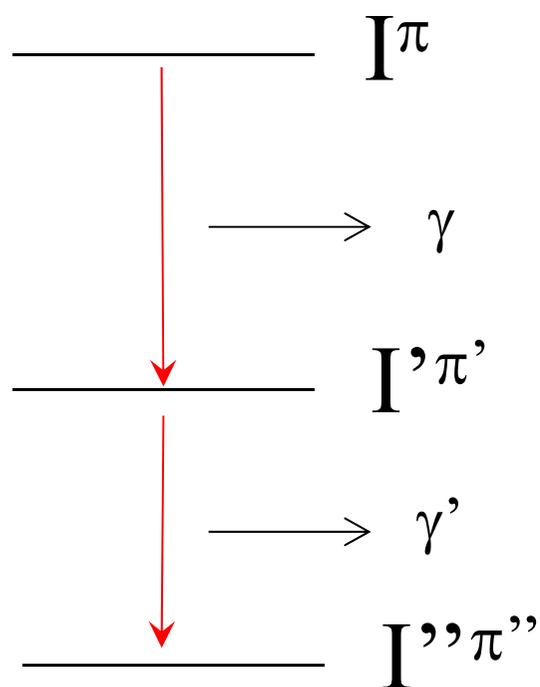
3/2⁺ → 5/2⁺ 遷移の場合: M1, E2, ~~M3~~, ~~E4~~

M1が勝つかE2が勝つかは場合による

➤ 電氣的遷移と磁氣的遷移は実験的にどのように区別できるのか?

$3/2^+ \rightarrow 5/2^+$ 遷移の場合: M1, E2, ~~M3~~, ~~E4~~

M1が勝つかE2が勝つかは場合による



放出される γ 線の角度分布を調べると λ 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

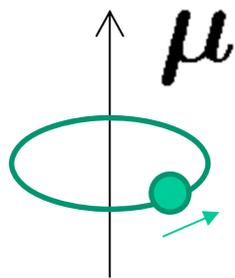
- 磁場をかけて始状態のスピン方向をそろえる
- 最初の γ に対して2番目の γ がどの方向に出るか測る

➤ スピン電流について直感的なイメージがあるか?

$$\rightarrow H_{\text{int}} = -\frac{1}{c} \int dr \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{j}(\mathbf{r}, t)$$

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{j}_o(\mathbf{r}, t) + c \nabla \times \boldsymbol{\mu}(\mathbf{r}, t)$$

➤ 磁気モーメントに対する直感的なイメージ:



$$\mathbf{j} = \nabla \times \boldsymbol{\mu}$$

磁気モーメント: 円電流

$$\boldsymbol{\mu} = \mathbf{j}S$$

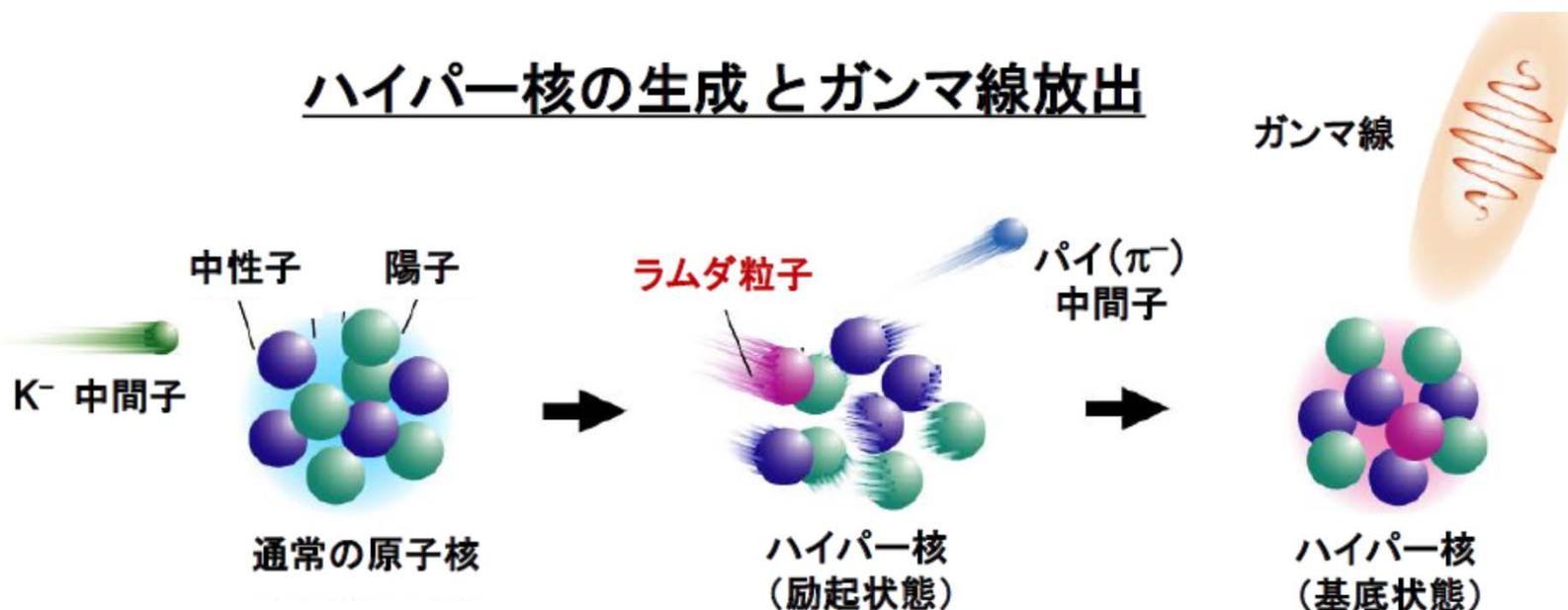
j: 電流、S: 円の面積

➤ 電磁遷移を測定する実験はどのようなものがありますか？

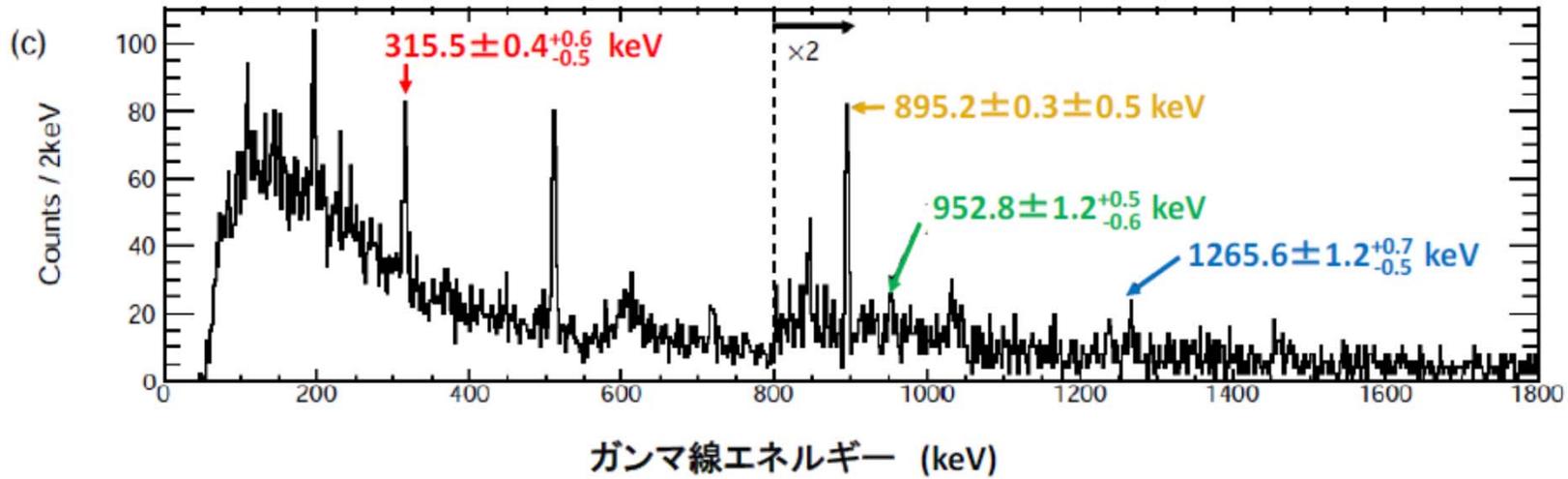
- 原子核の励起状態を核反応などで作って、そこからの γ 線のエネルギーを測る
- 寿命まで測ると遷移強度も分かる

東北大学の原子核実験グループ(田村さん):ハイパー核の γ 線分光実験

ハイパー核の生成とガンマ線放出

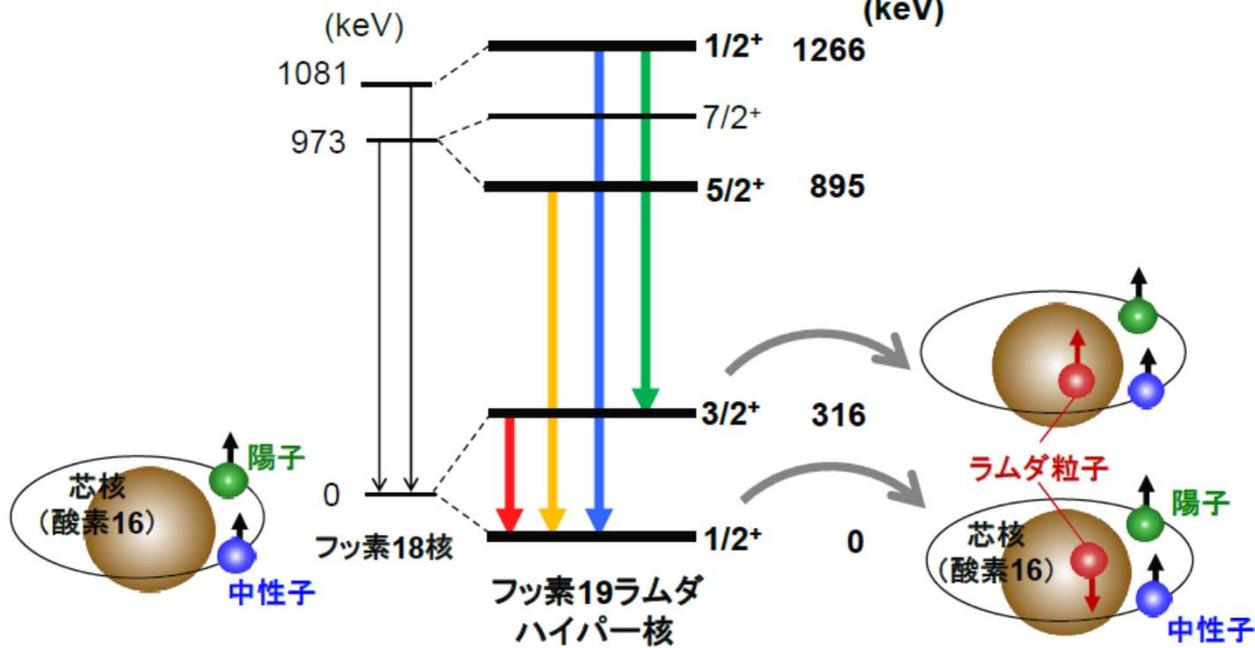


測定されたガンマ線スペクトル



・ 準位図の再構成に成功しました。

本実験で測定した
励起エネルギー
(keV)



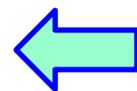
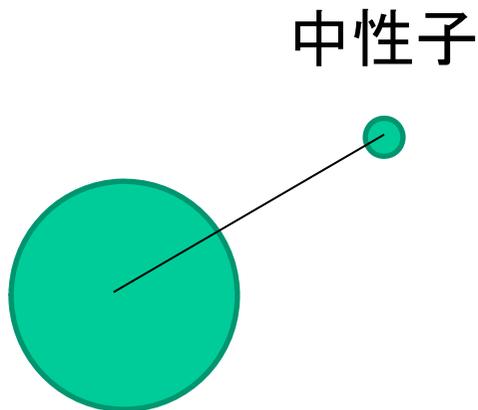
S.B. Yang et al.,
PRL120 ('18) 132505

➤ photon を放出したことによる反跳の効果はどのように取り入れられていますか?

✓ いい質問です

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

* あまりちゃんと言いませんでしたが、この核子の座標は系の重心から測った座標



このような系では、反跳効果のために中性子も effective に電荷を持つ

“effective charge”

“recoil charge”

➤ photonの軌道角運動量って何ですか？

phonon がまっすぐ進むことと軌道角運動量のイメージがうまくあわないのですが。。。。

➤ そうですね。

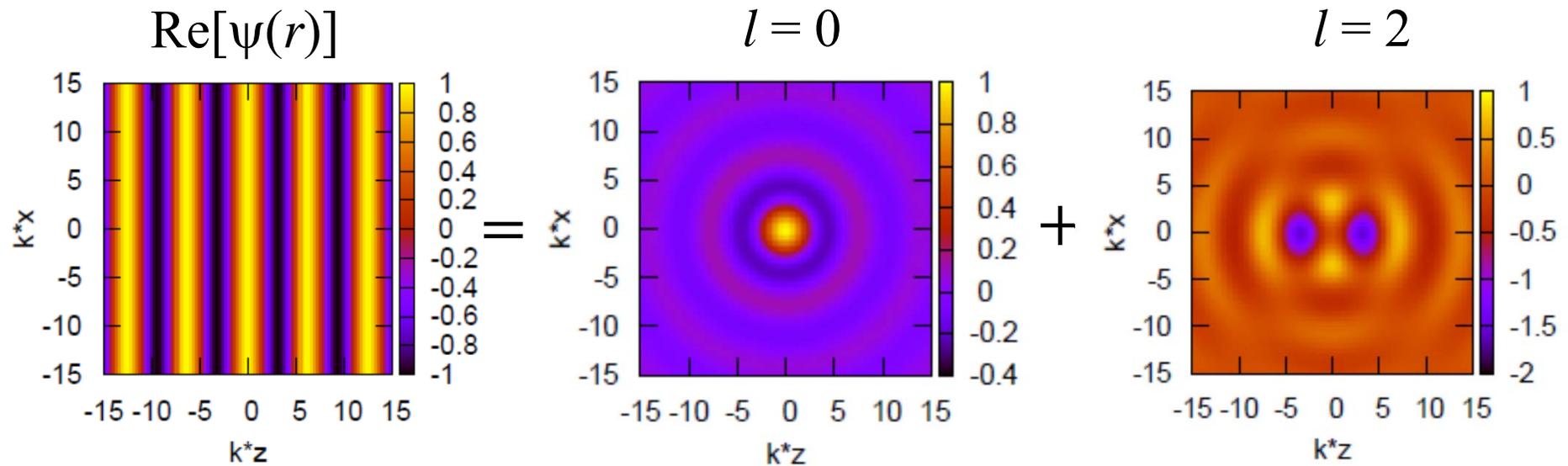
フォトンでなくても、一般の粒子でもそうかもしれません。

$$\psi(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} = \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1)i^l j_l(kr) P_l(\cos\theta)$$

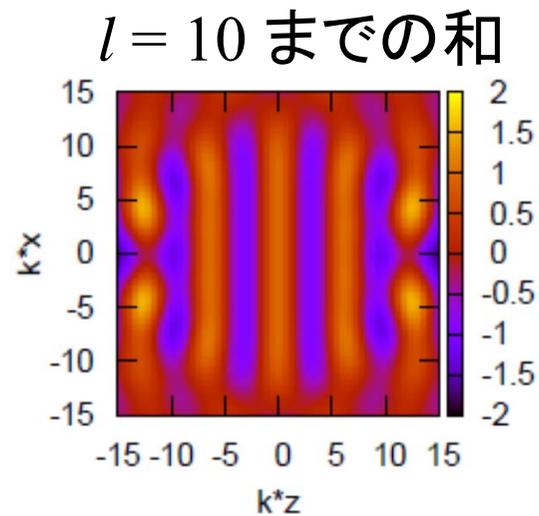
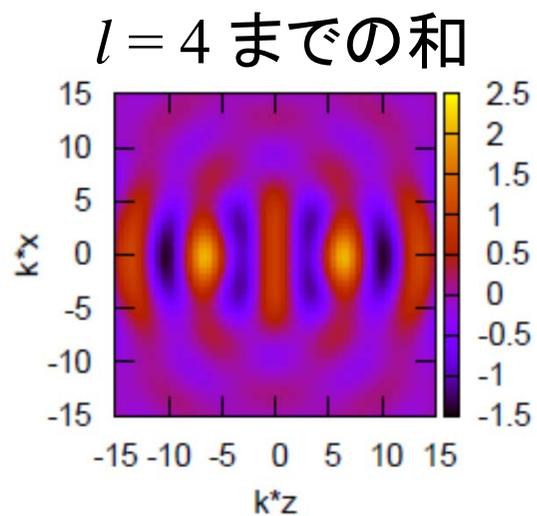
平面波
(進行波)

これを定在波で展開

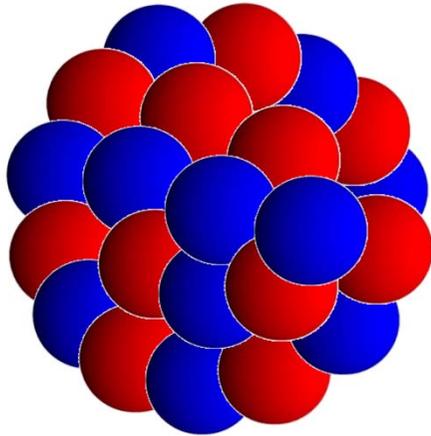
$$\psi(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} = \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1)i^l j_l(kr) P_l(\cos\theta)$$



+



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)

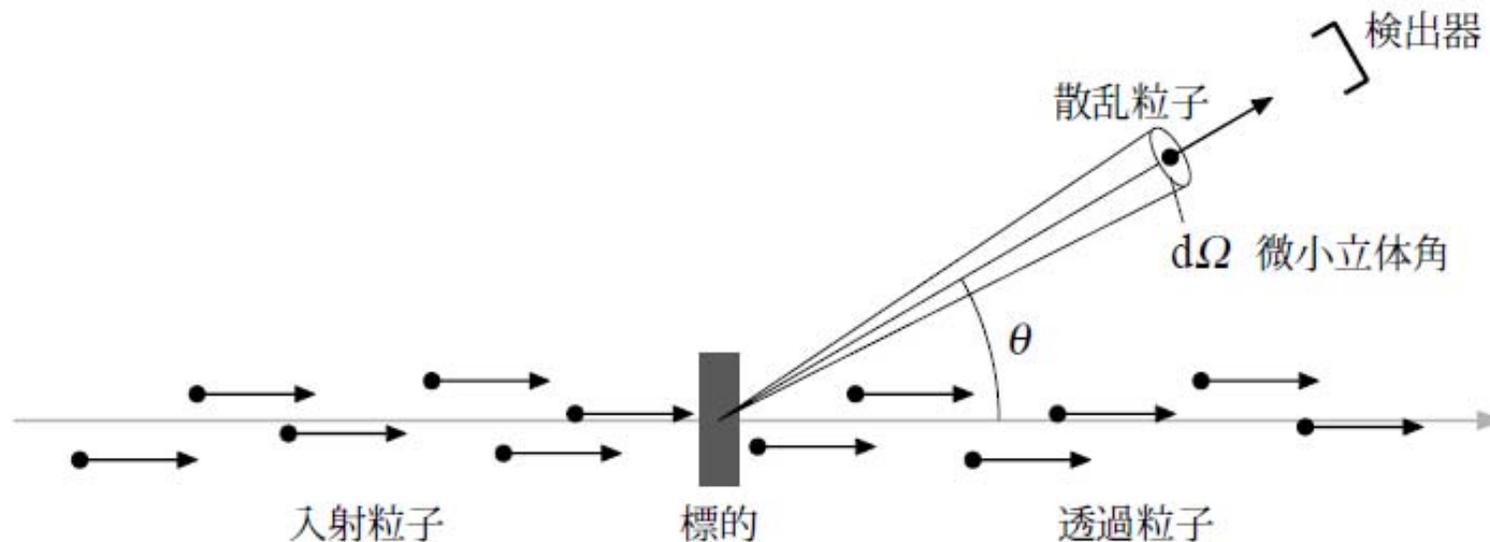


図 21.1: 散乱実験

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

武藤一雄氏(東工大)

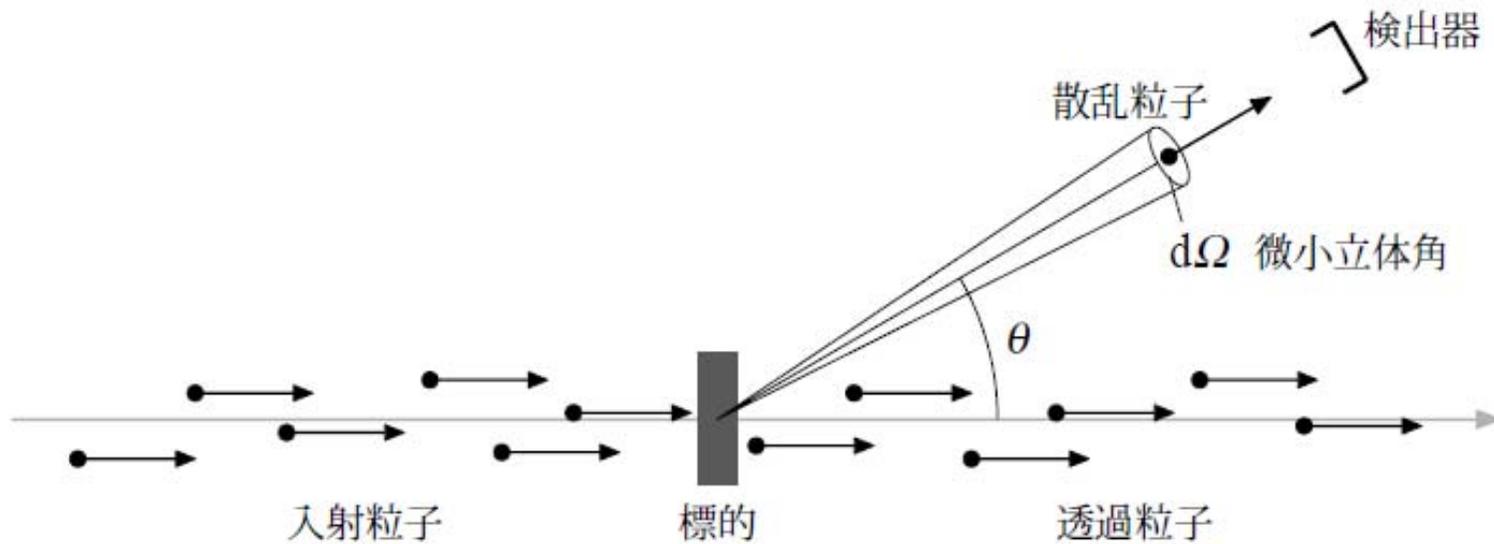


図 21.1: 散乱実験

点粒子の散乱:
弾性散乱のみ

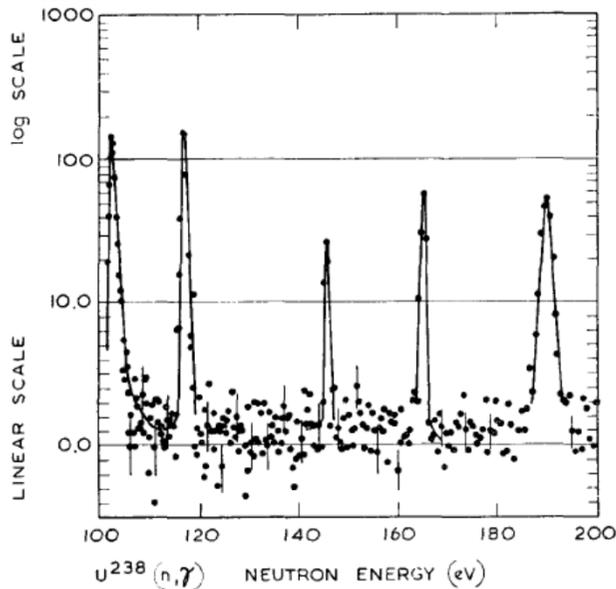


複合粒子の反応プロセス

→ 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

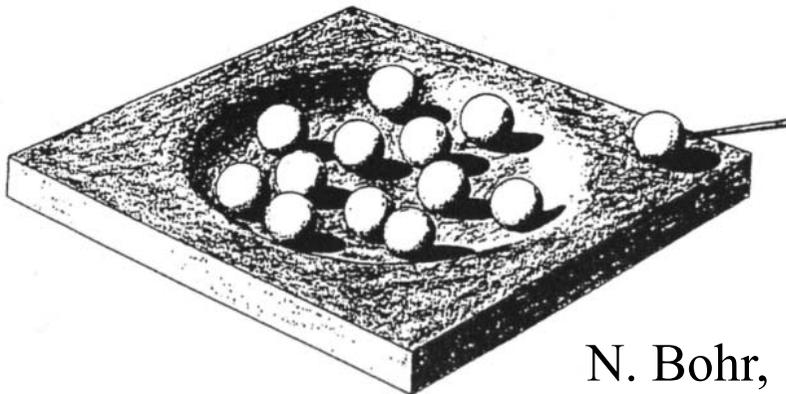


cf. フェルミの実験 (1935)
原子核による中性子の吸収

→ 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

M. Asghar et al., Nucl. Phys. 85 ('66) 305

Niels Bohr (1936): 「複合核」の概念を提唱



N. Bohr,
Nature 137 ('36) 351

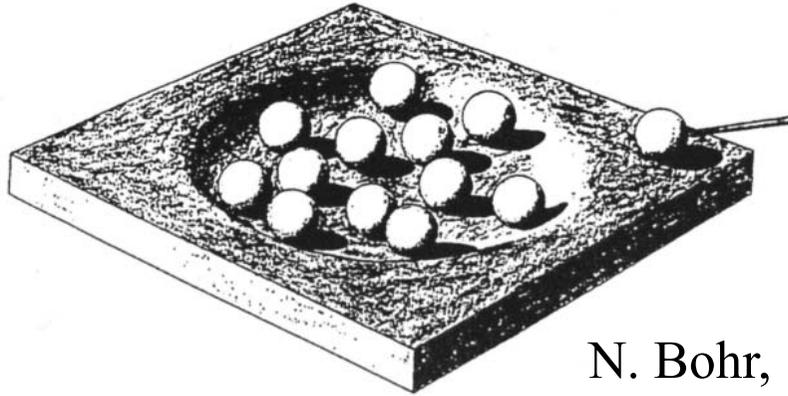


Wikipedia

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

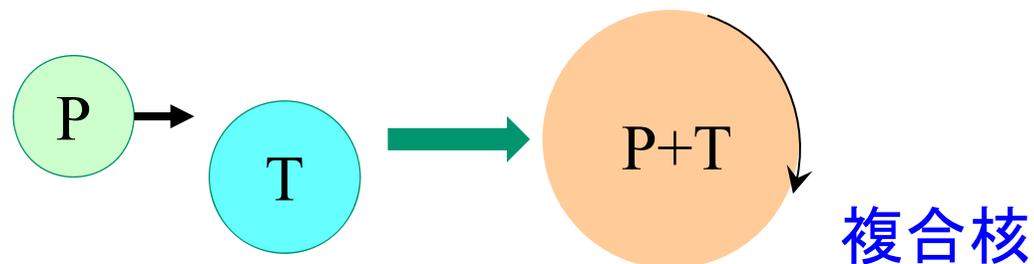


N. Bohr,
Nature 137 ('36) 351

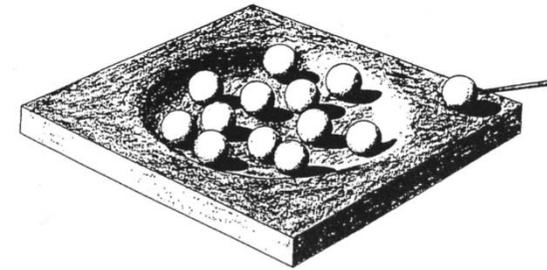
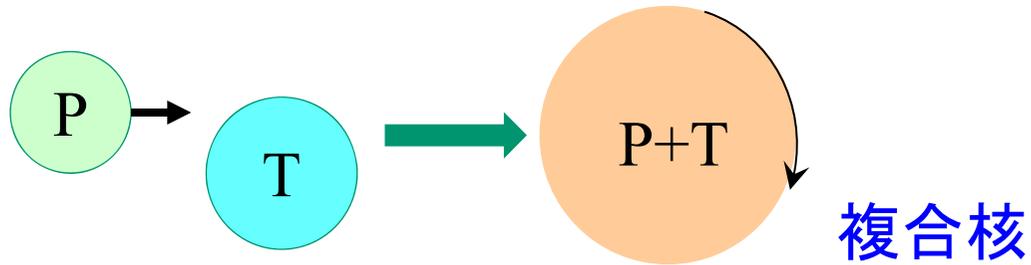


Wikipedia

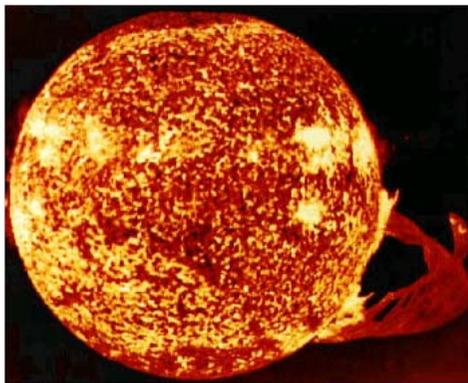
重イオン反応で複合核をつくる = 重イオン核融合反応



核融合反応： 複合核生成反応

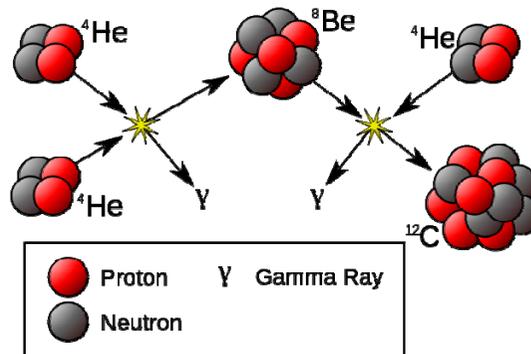


cf. N. Bohr '36

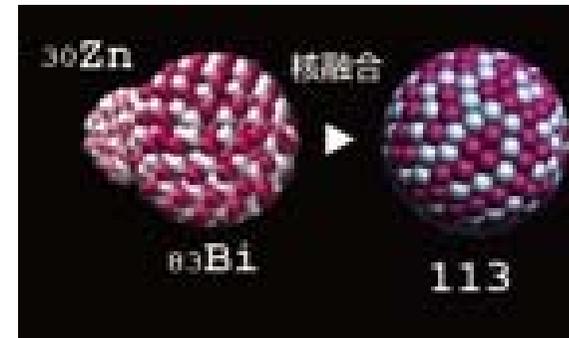


NASA, Skylab space station December 19, 1973, solar flare reaching 689 000 km off solar surface

恒星のエネルギー源 (Bethe '39)

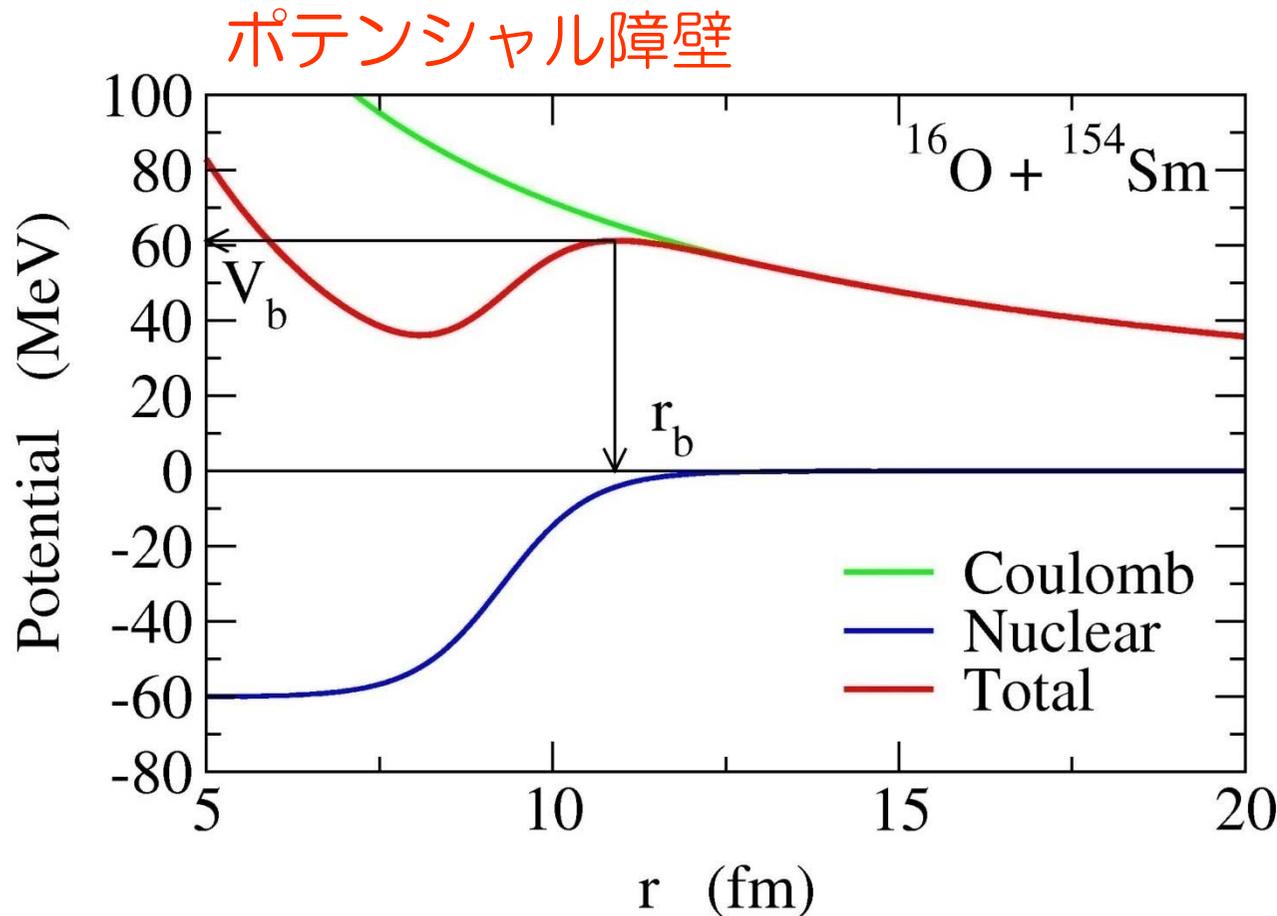
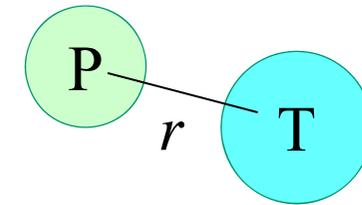


元素合成



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



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)

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		

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

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

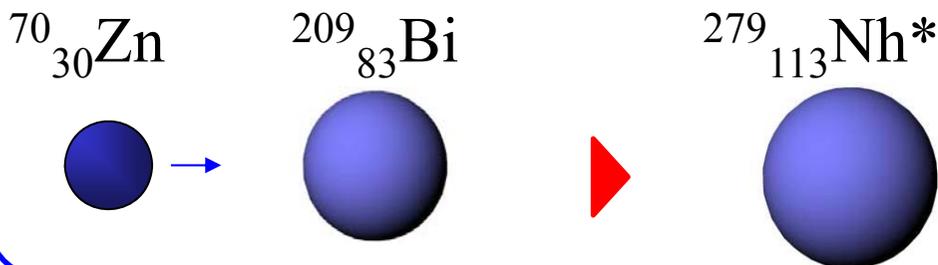
2016年11月



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											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	

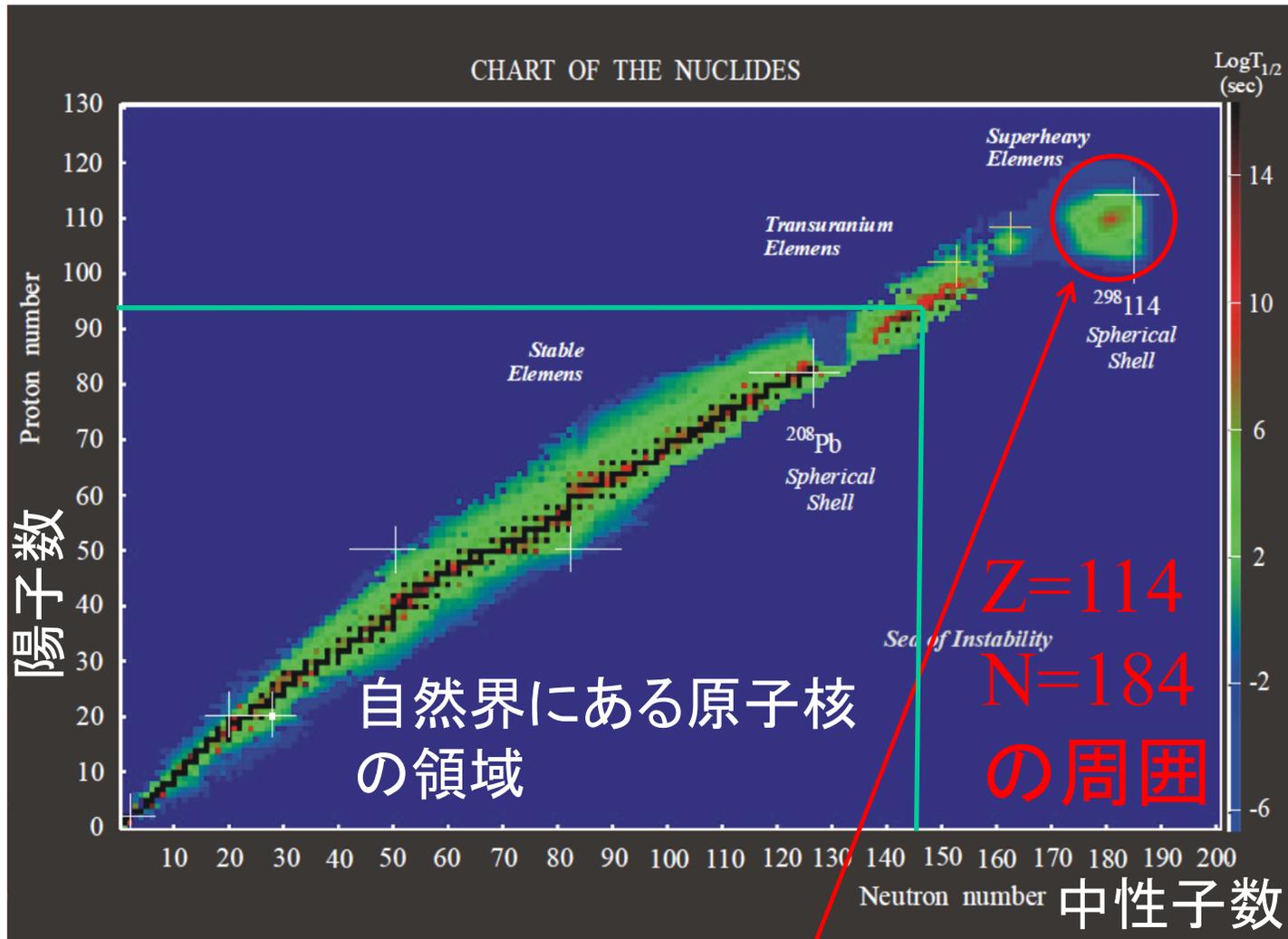
現在、最も重いものは Z=118 (Og)

Wikipedia



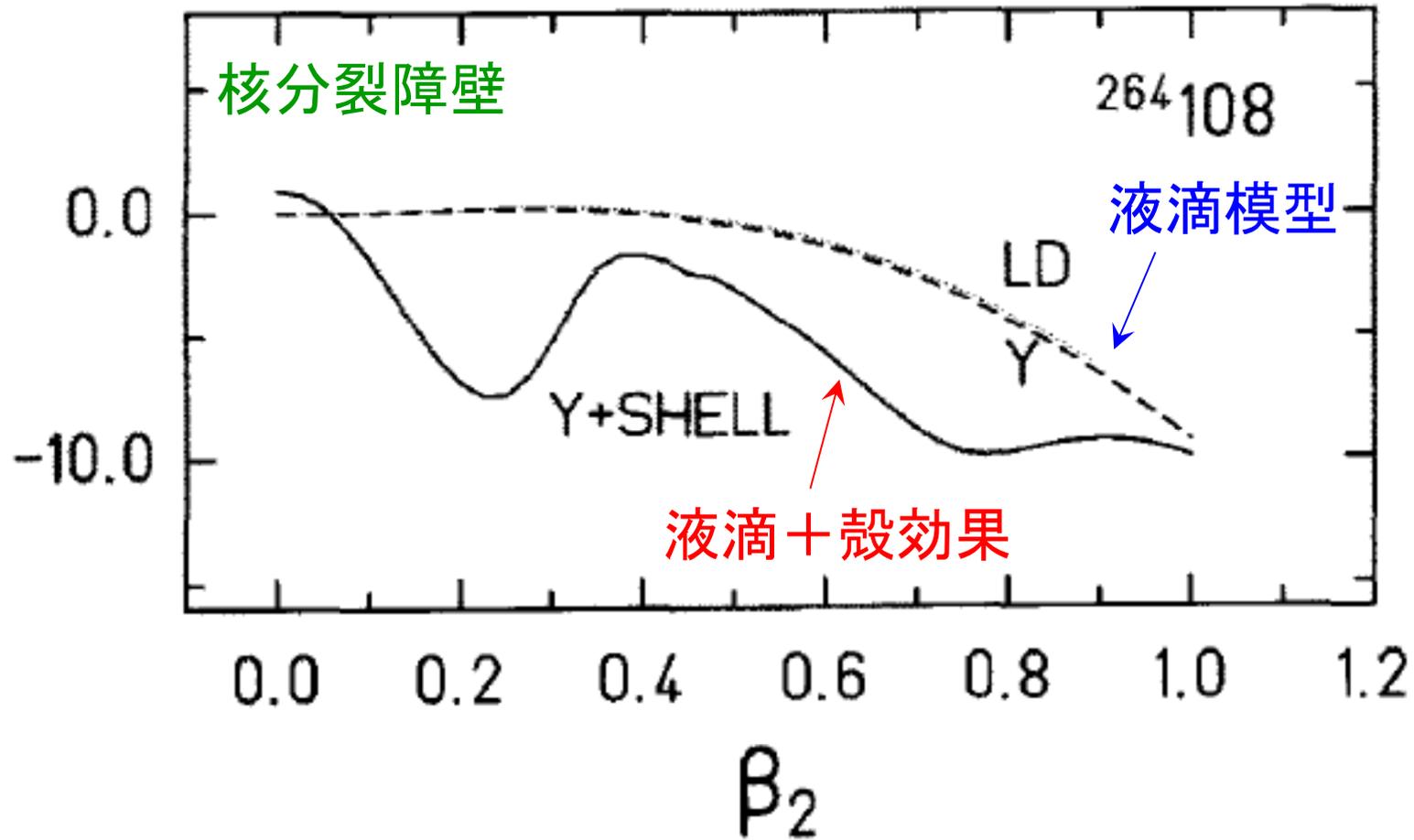
重イオン核融合反応

超重元素(超重原子核)



Yuri Oganessian

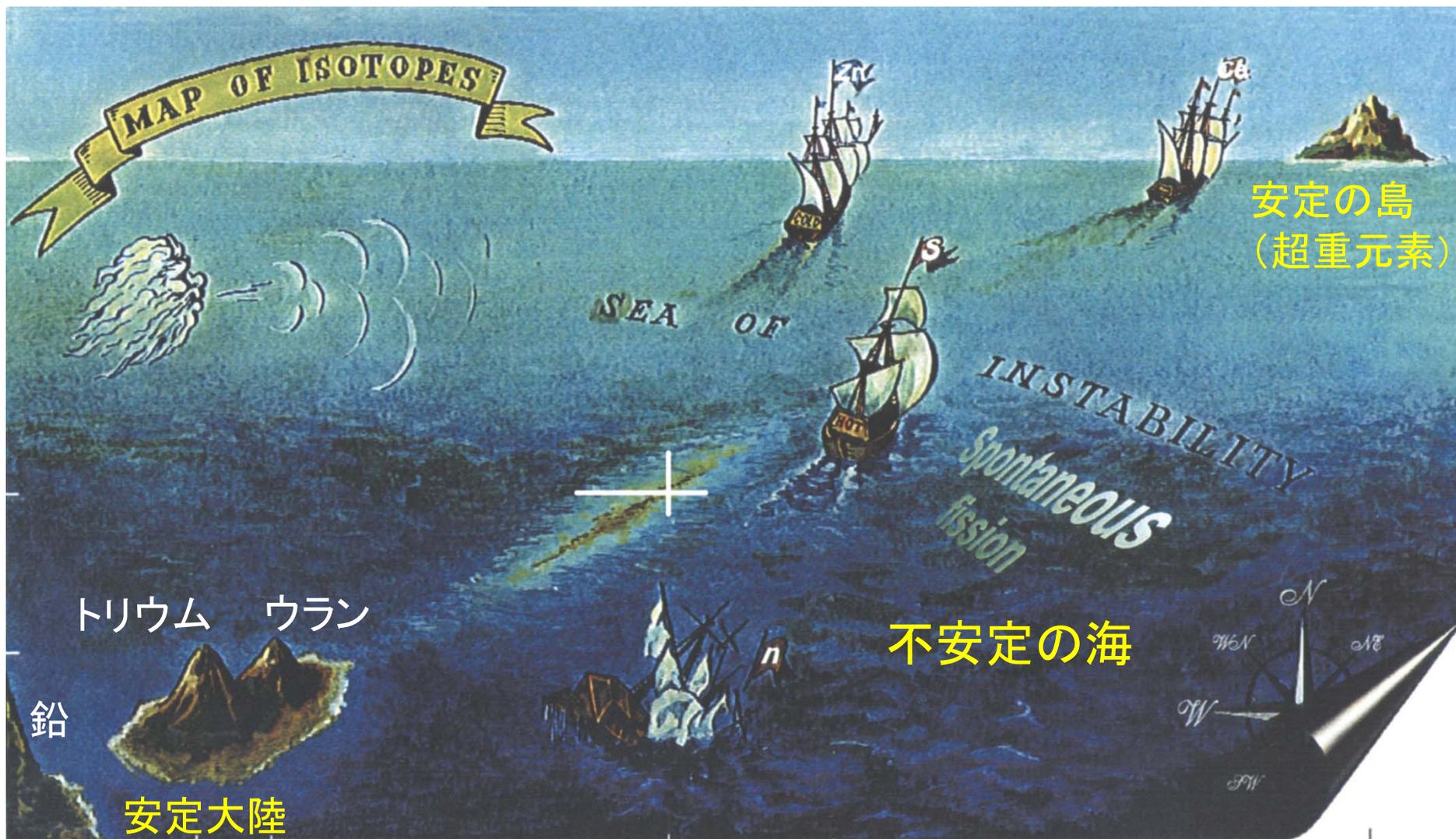
原子核の安定領域の理論的予言
(1966年:スビアテッキラ)



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

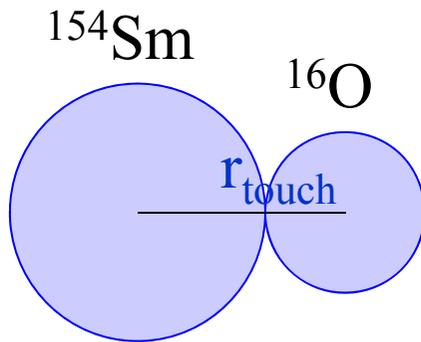
安定の島(超重元素)を目指して



Yuri Oganessian

超重核領域における重イオン核融合反応

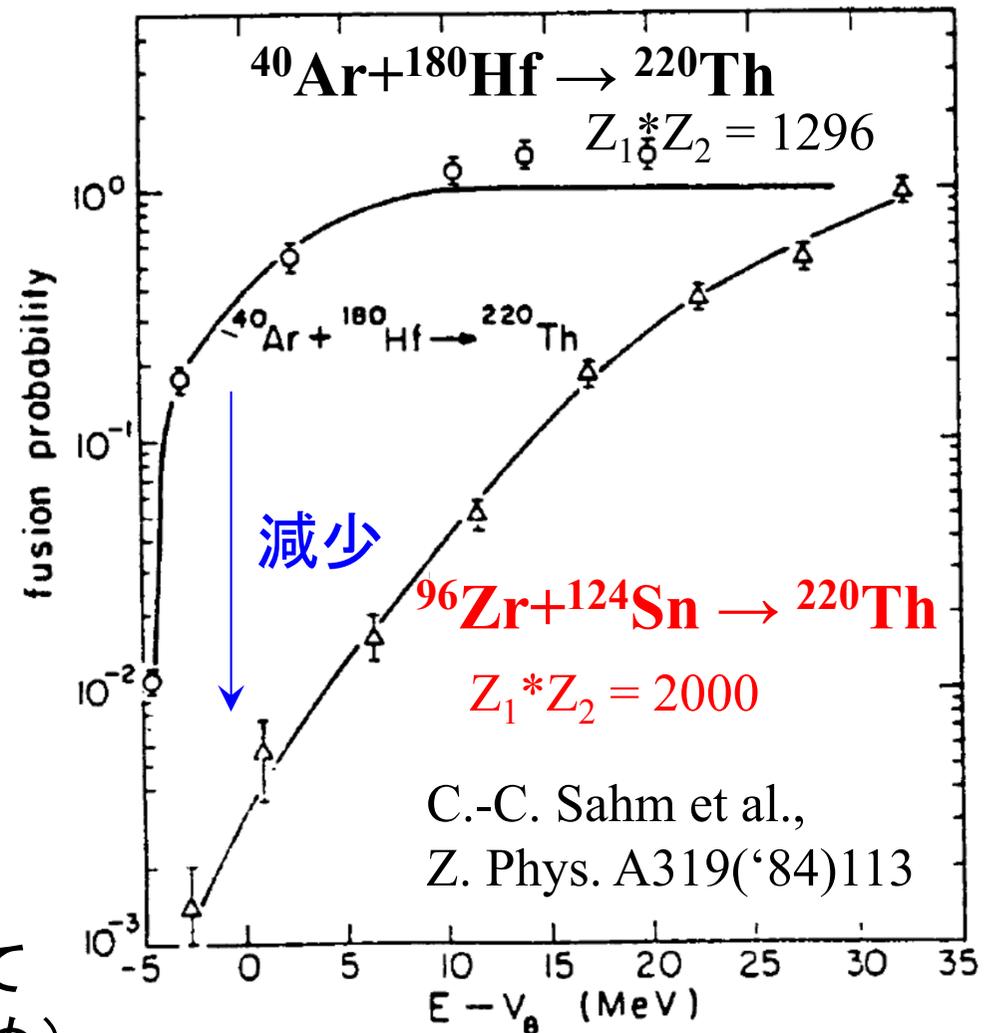
- 中重核領域における核融合反応:



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:

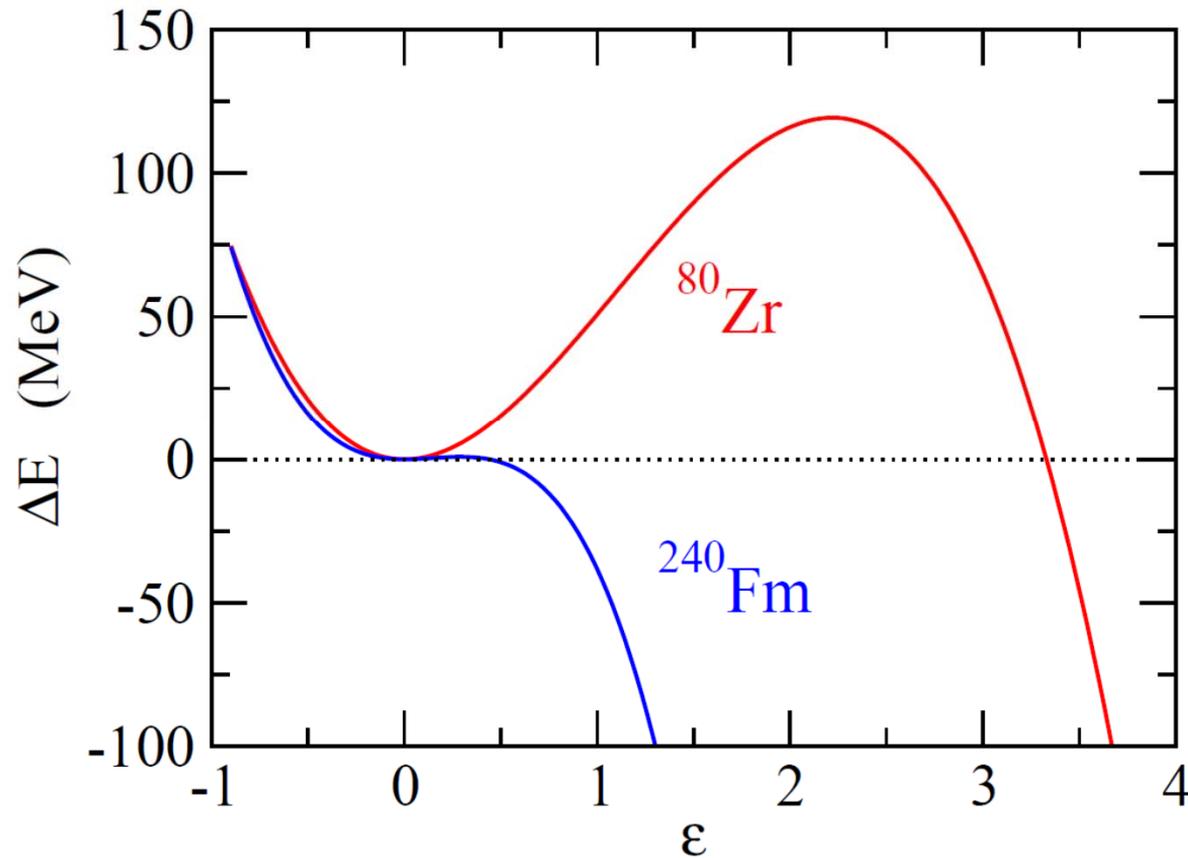
接触しても大きな確率で離れてしまう(クーロン反発が強いため)



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

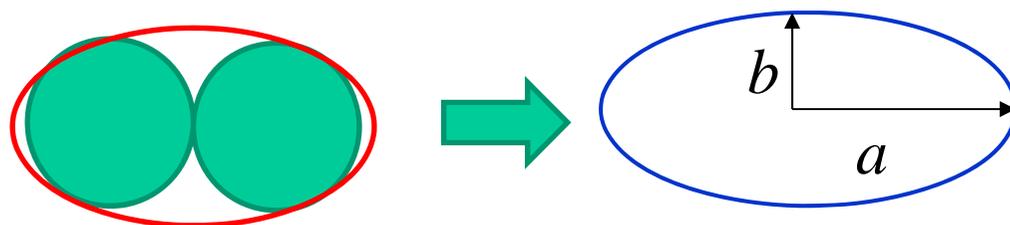
液滴模型での核分裂障壁

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



- ✓ 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

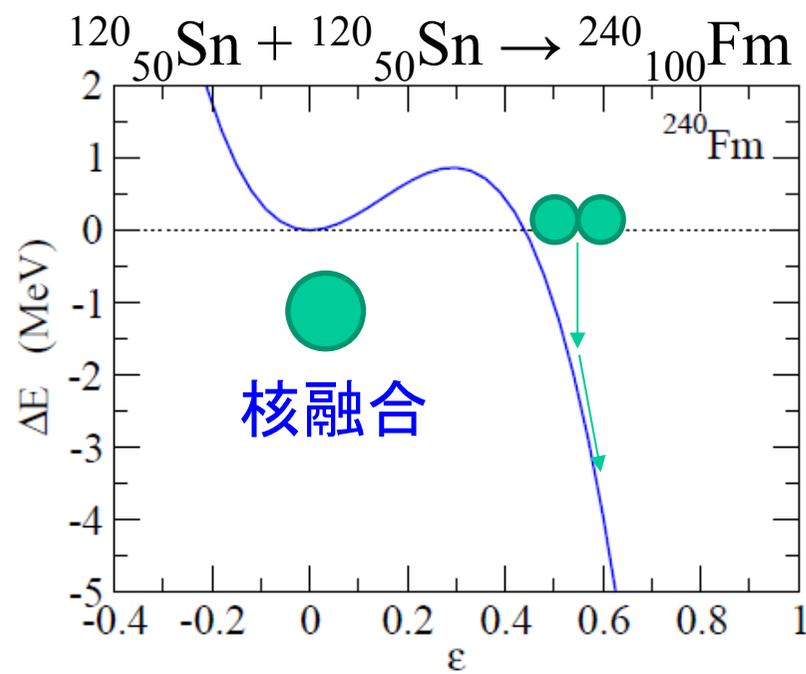
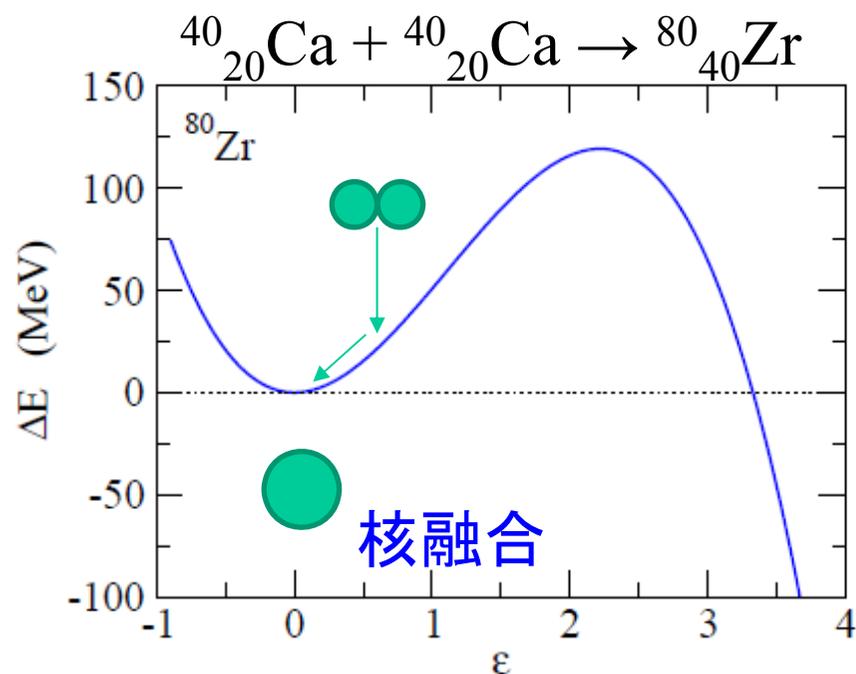
同じ原子核が接触すると:

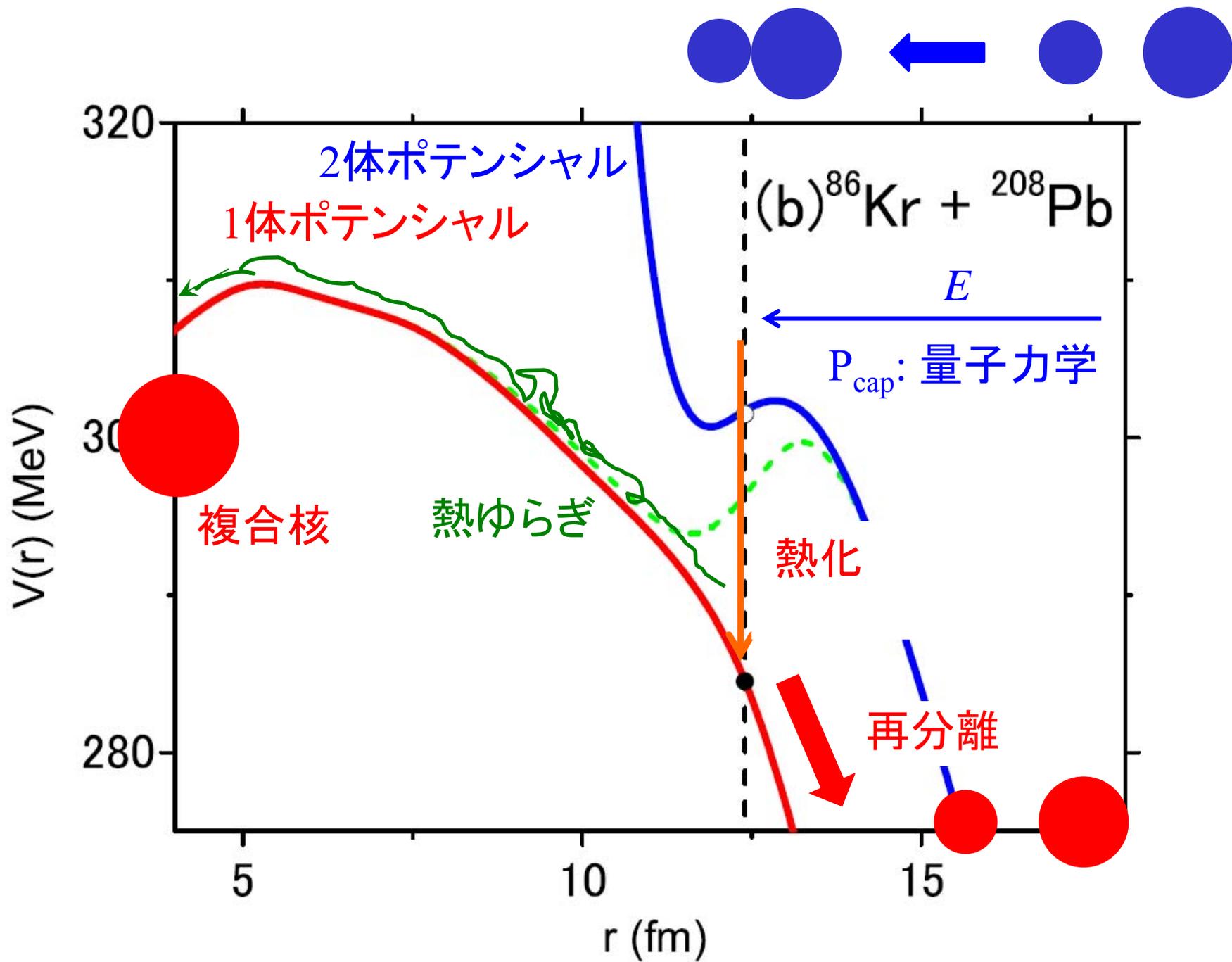


$$a = R_0 \cdot (1 + \epsilon)$$

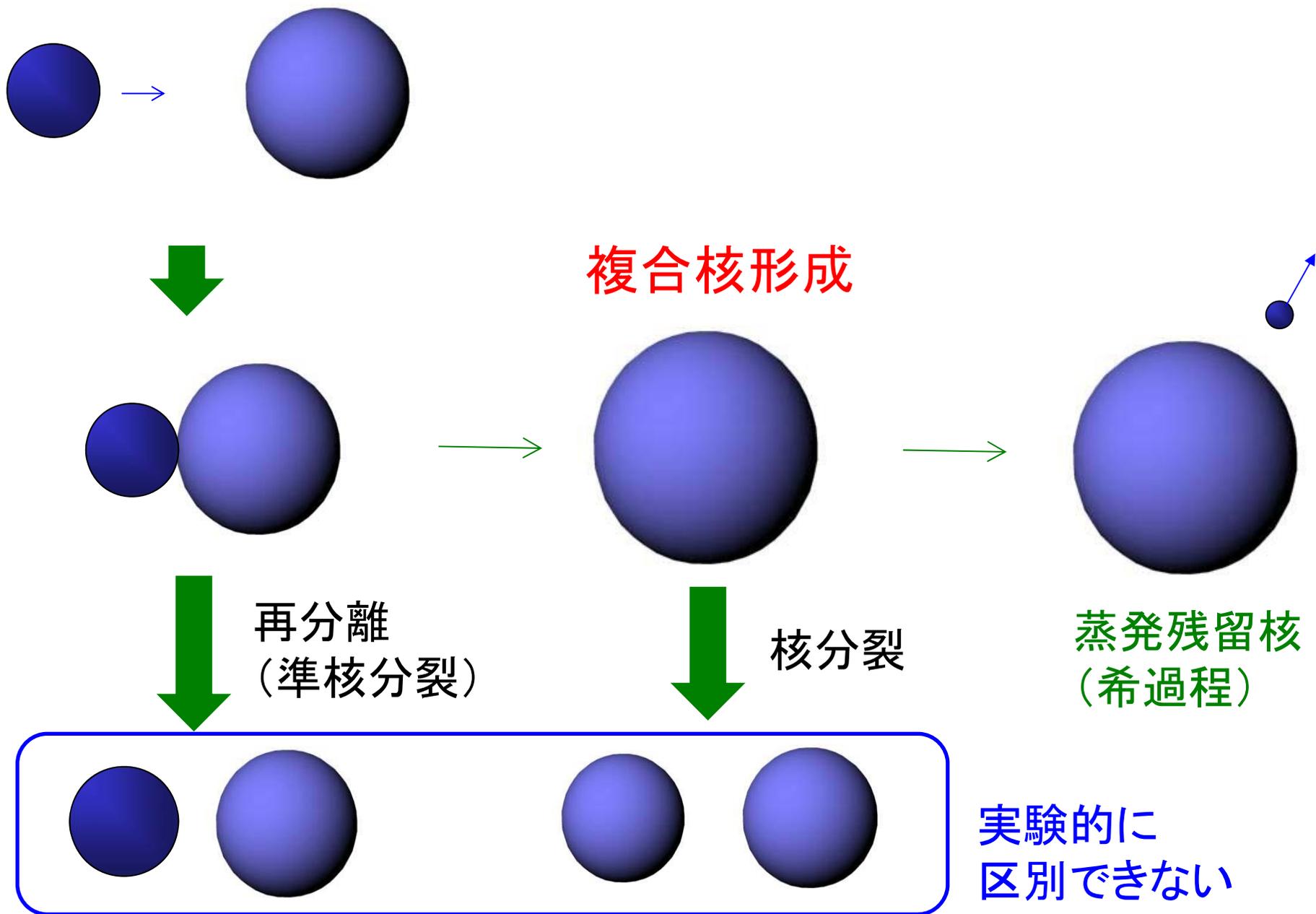
$$b = R_0 \cdot (1 + \epsilon)^{-1/2}$$

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

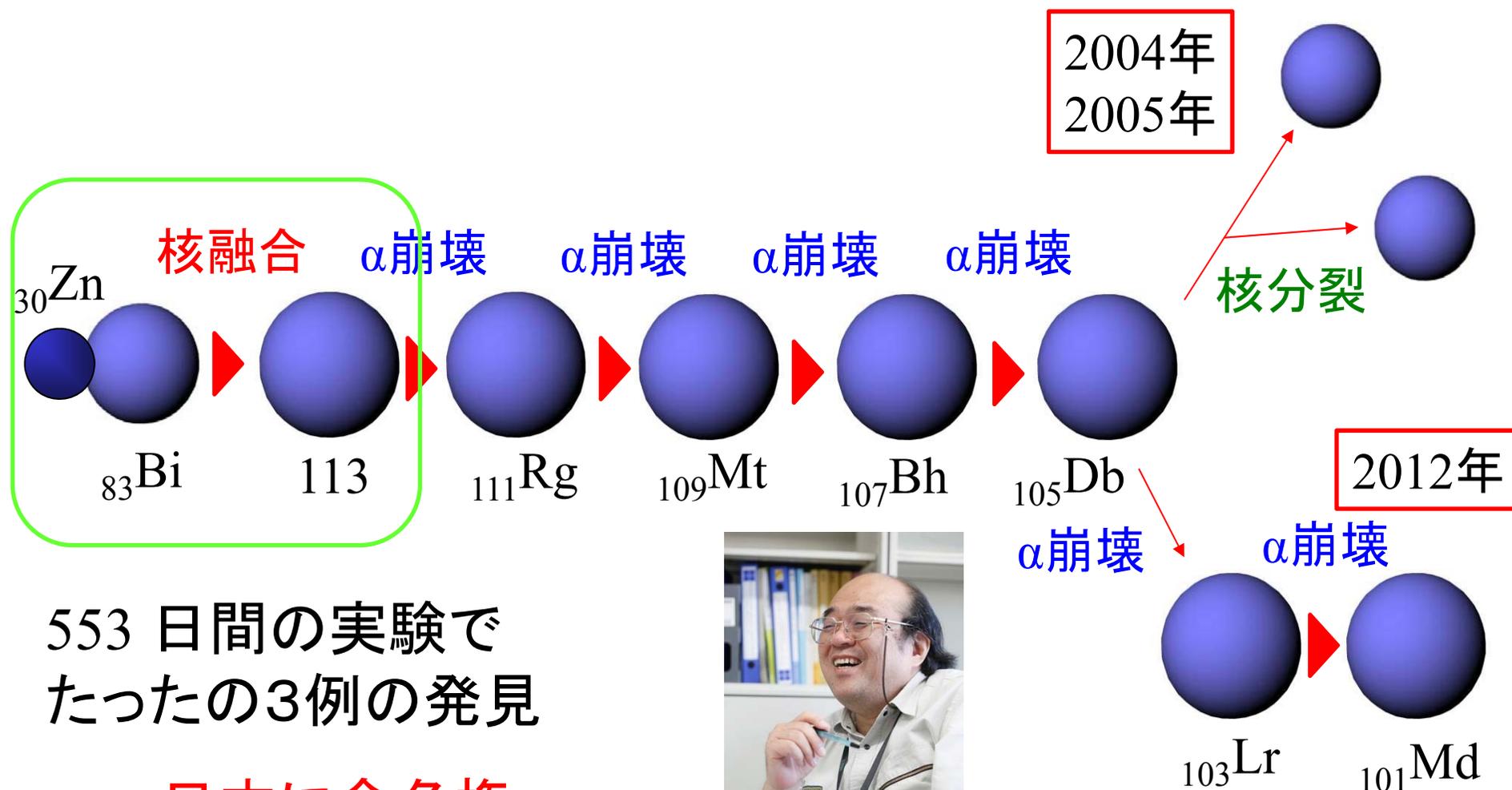
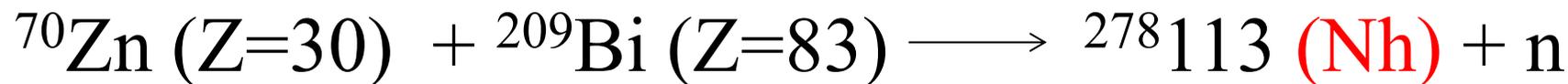




超重元素領域における重イオン核融合反応



新元素113番:ニホニウム(Nh)



553 日間の実験で
たったの3例の発見

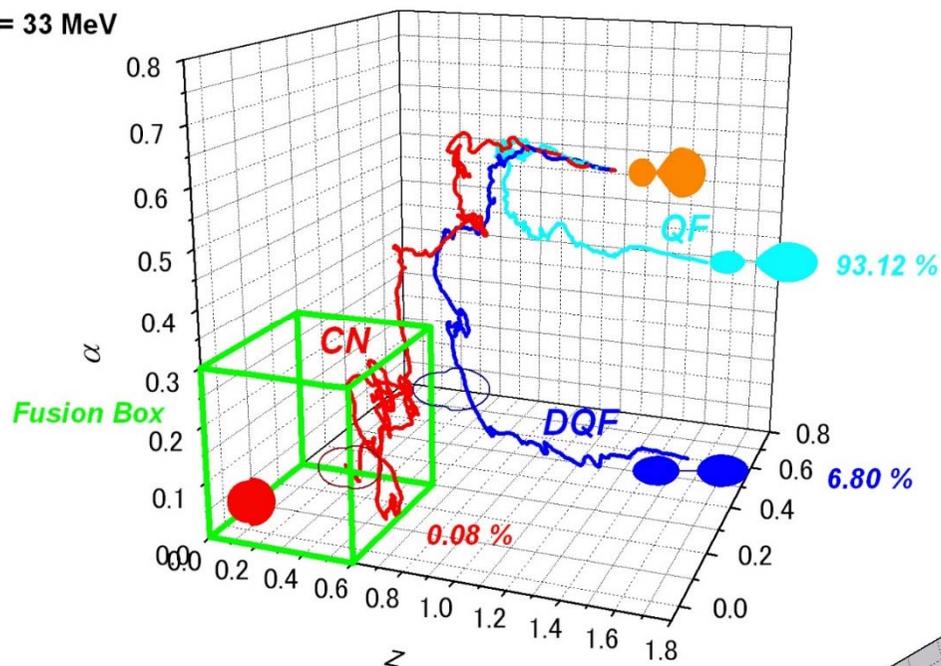
→ 日本に命名権
ニホニウム Nh



理論:ランジュバン法



$E^* = 33 \text{ MeV}$



q として

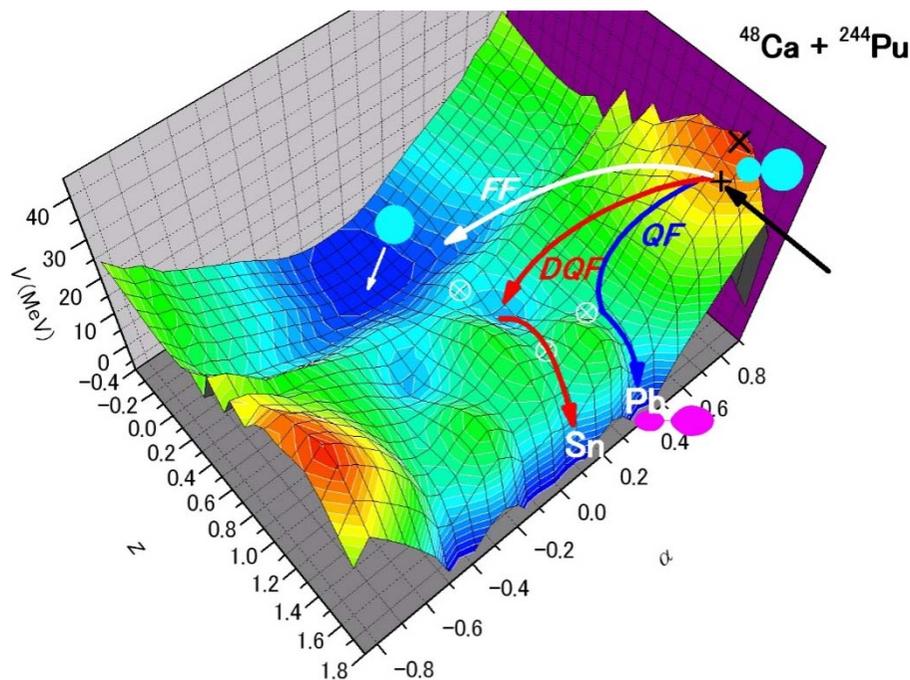
- 核間距離 (z)
- 原子核の変形 (δ)
- フラグメントの非対称度 (α)

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

γ : 摩擦係数

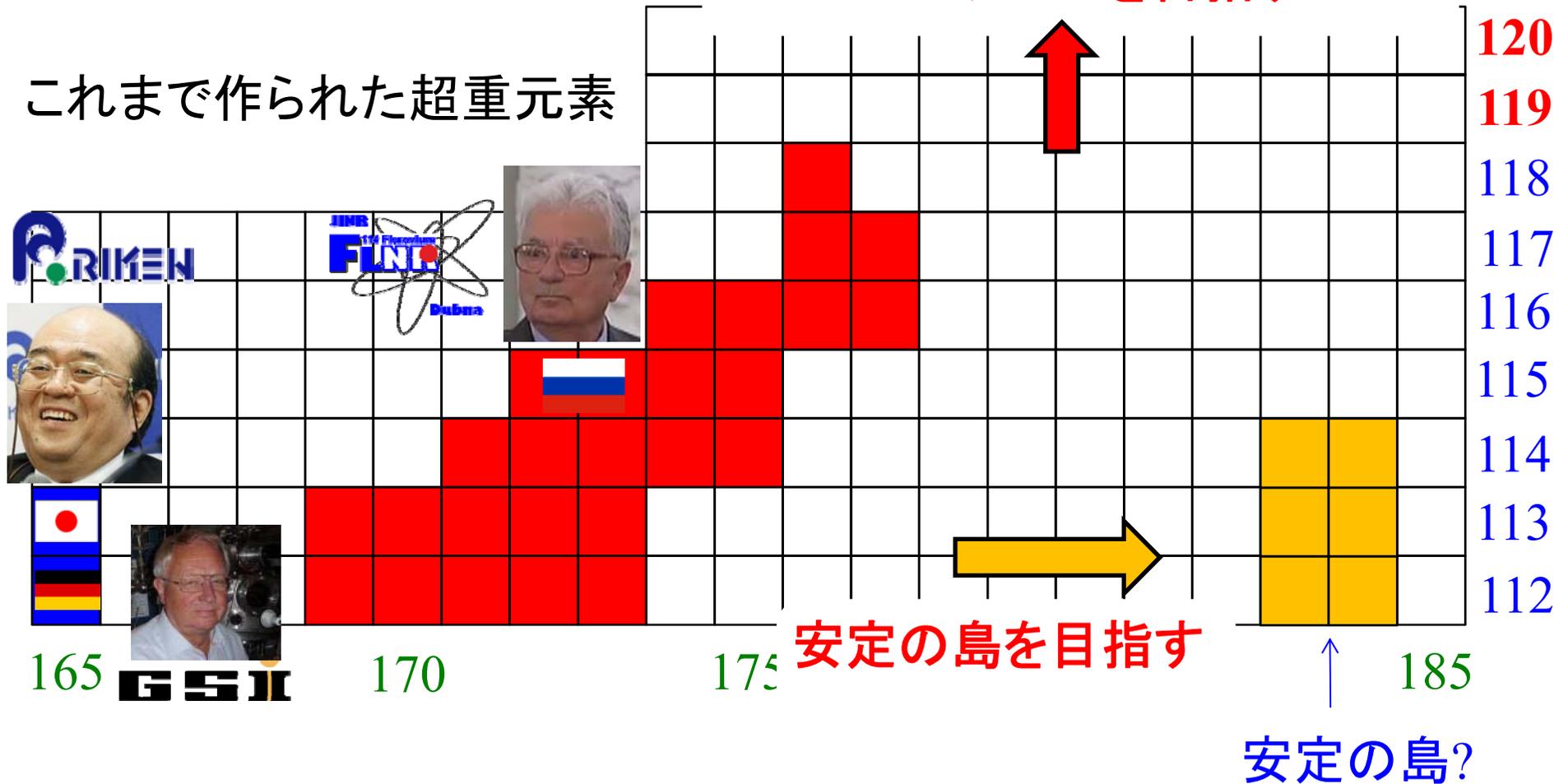
$R(t)$: 乱雑力

を多次元に拡張したもの
(ブラウン運動の理論)



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

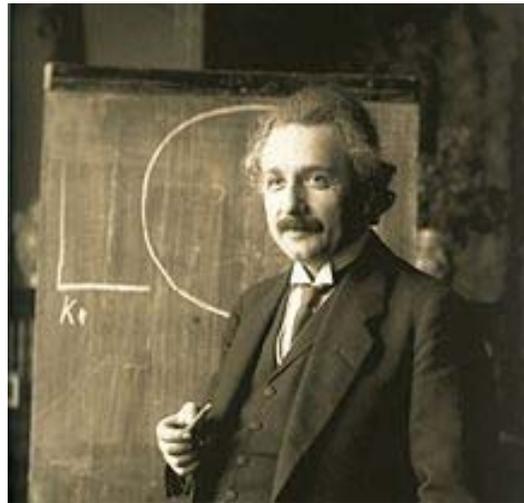
超重元素の化学

Group →	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	

- 超重元素を周期表のここに置けるの？
- つまり、Lv は O, S, Se, Te, Po 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

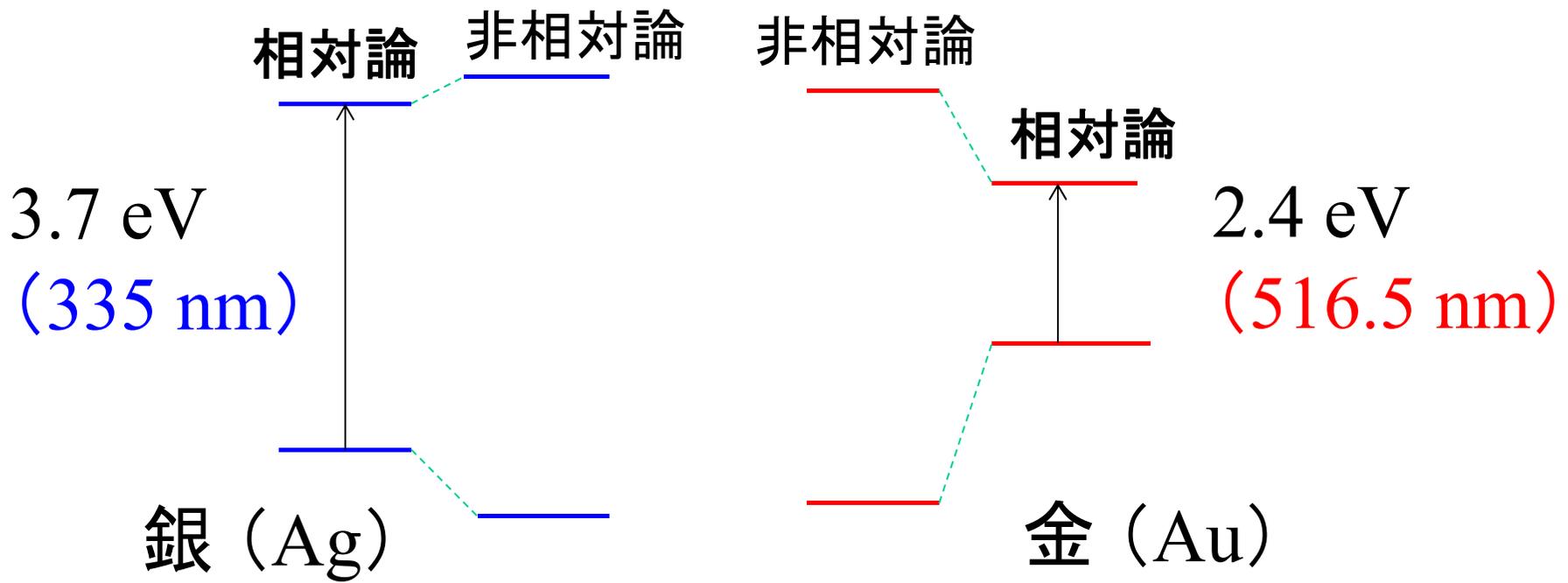
$$E = mc^2$$



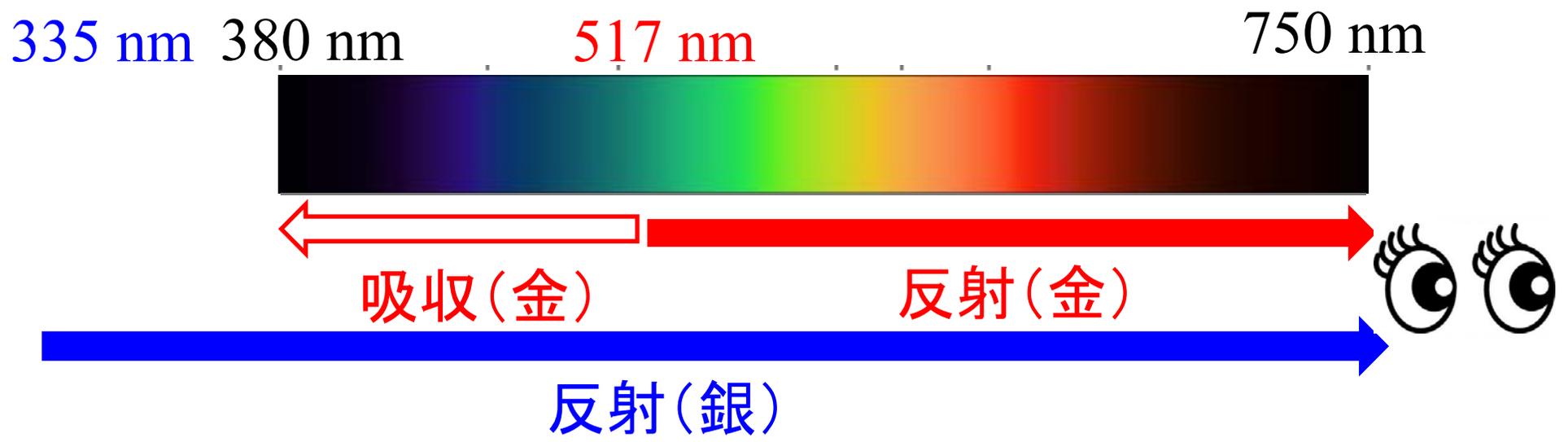
ディラック方程式(相対論的量子力学)を解くと、
原子中の電子のエネルギーは、

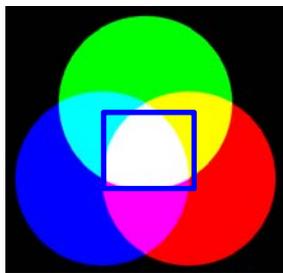
$$E_{1S} = mc^2 \sqrt{1 - (Z\alpha)^2} \sim mc^2 \left(1 - \frac{(Z\alpha)^2}{2} - \underbrace{\frac{(Z\alpha)^4}{8} + \dots}_{\text{相対論的効果}} \right)$$

相対論的効果



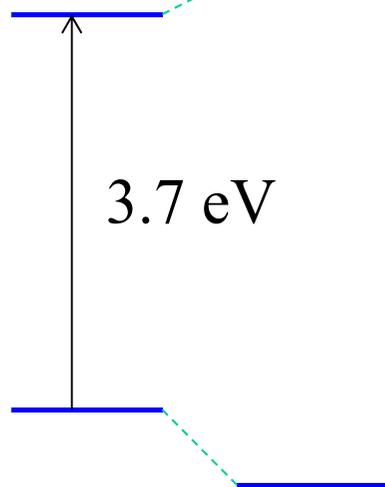
可視光





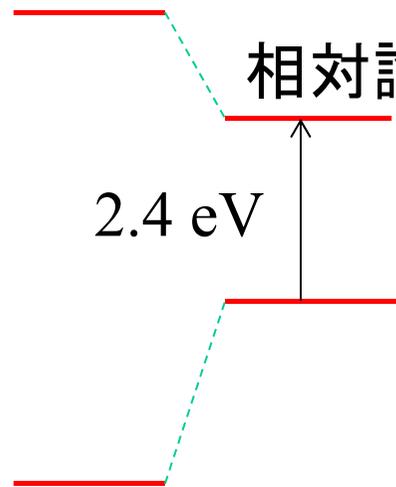
光の
吸収なし

相対論 非相対論

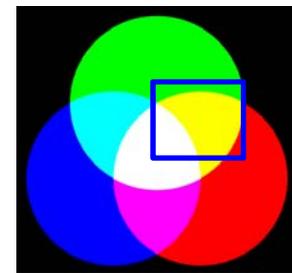


銀

非相対論



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

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	

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