

核反応論基礎：基本的概念と量子力学の復習

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)

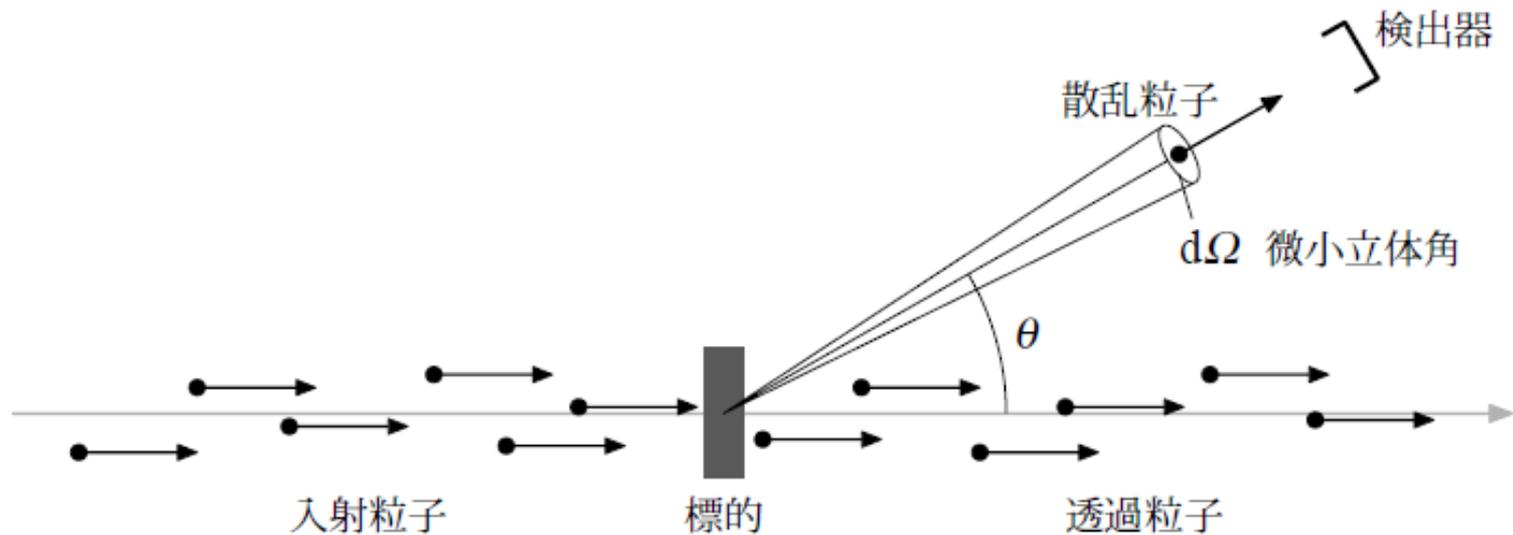


図 21.1: 散乱実験

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

武藤一雄氏(東工大)

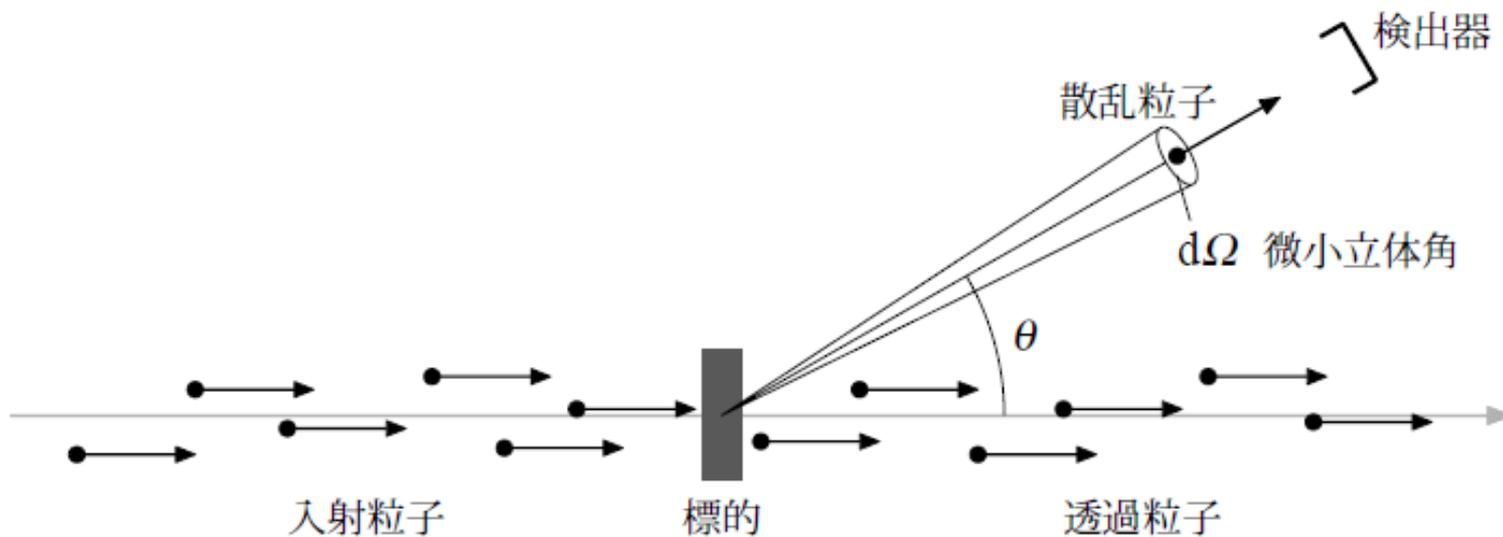
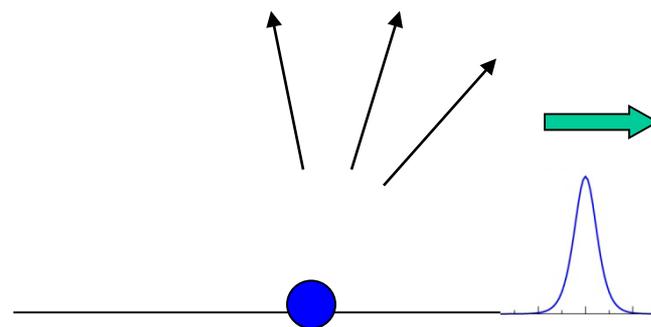
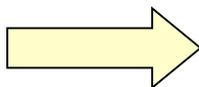


図 21.1: 散乱実験

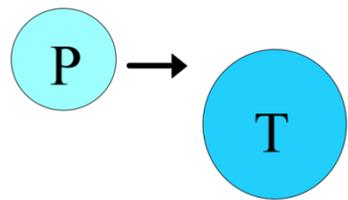
反応プロセス

- 弾性散乱
- 非弾性散乱
- 粒子移行
- 複合粒子形成(核融合)



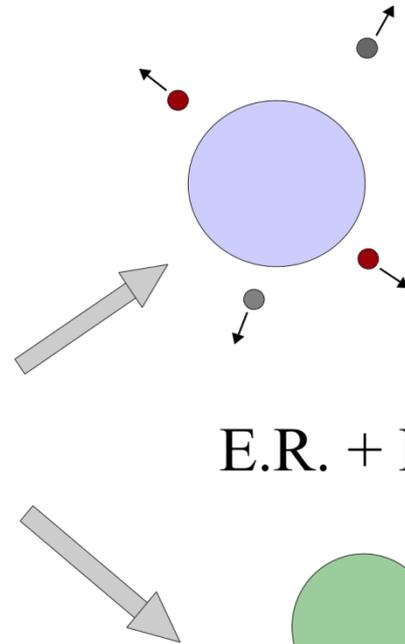
弾性フラックスの減少(吸収)

核融合反応： 複合核生成反応



$$A_{CN} = A_P + A_T$$

融合



蒸発残留核

Evaporation Residue

E.R. ($A_{CN} < 170$)

n, p, α 放出
 γ 崩壊

E.R. + F ($220 > A_{CN} > 170$)

F ($A_{CN} > 220$)

核分裂
Fission

(復習)崩壊に関する相互作用

γ 崩壊(原子核の励起状態)
中性子放出

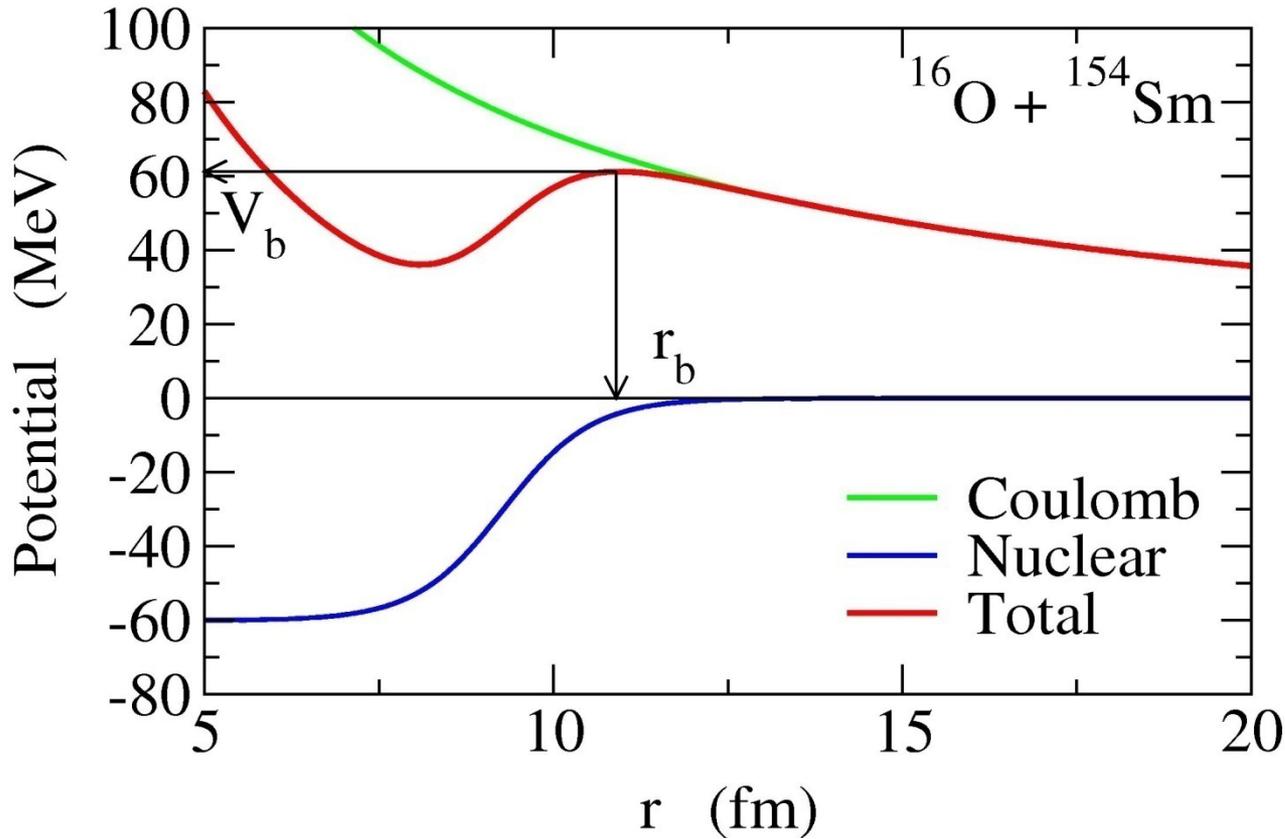
\longleftrightarrow 電磁相互作用
 \longleftrightarrow 強い相互作用

一般に、 $\tau_W \gg \tau_\gamma \gg \tau_S$

$\left\{ \begin{array}{l} \tau_W : \text{弱い相互作用による崩壊の寿命} \\ \tau_\gamma : \text{電磁相互作用による崩壊の寿命} \\ \tau_S : \text{強い相互作用による崩壊の寿命} \end{array} \right.$

結合定数の違い(状態間の結合の強さ)による

重イオン間ポテンシャル



2つの力:

1. クーロン力
長距離斥力
2. 核力
短距離引力

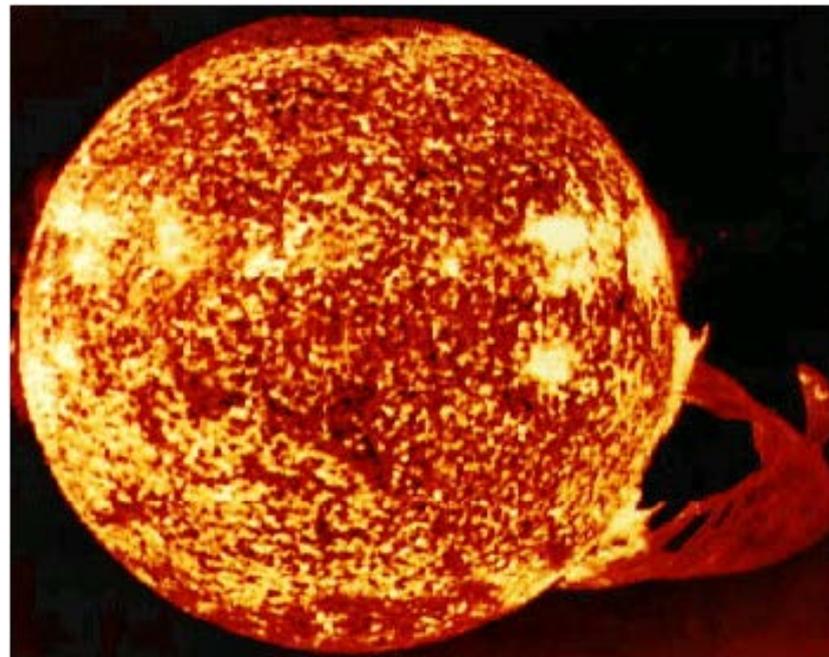
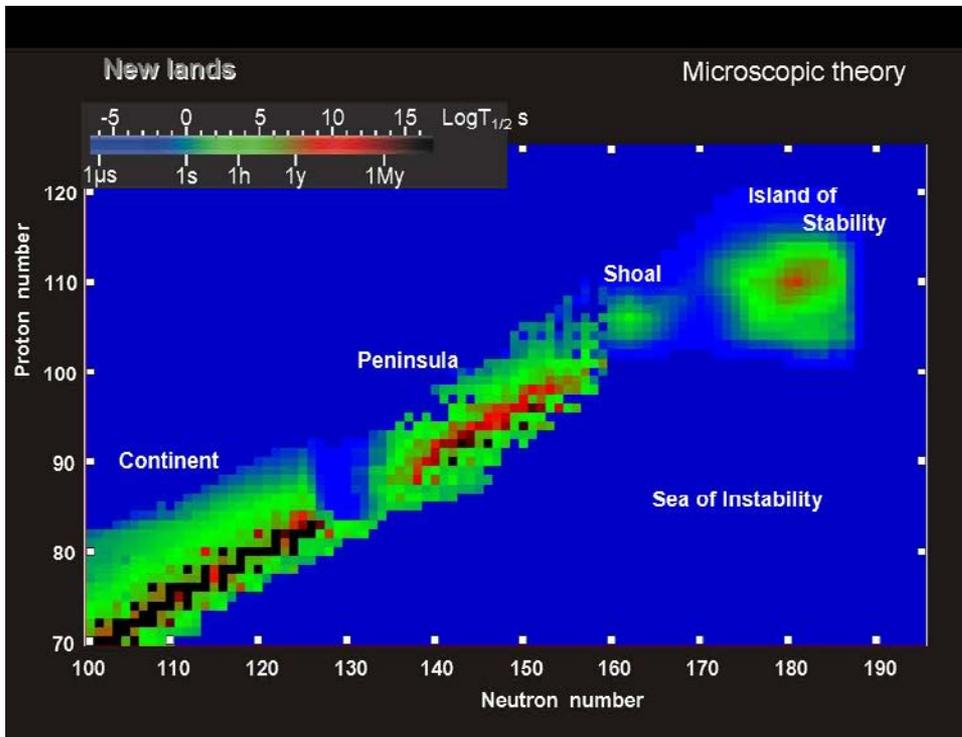


両者の打ち消しあいによりポテンシャル障壁が形成
(クーロン障壁)

- クーロン障壁より高いエネルギー
- ➡ • クーロン障壁近傍のエネルギー (subbarrier energies)
- 極低エネルギー (deep subbarrier energies)

何故、障壁近傍のエネルギーでの核融合に興味があるのか?

2つのわかりやすい理由:



NASA, Skylab space station December 19, 1973, solar flare reaching 589 000 km off solar surface

超重元素の物理
(「冷たい」核融合反応による
新元素の合成)

天体核物理
(星の中での核融合反応)

元素はどのように出来たのか？

→ 宇宙で生まれた

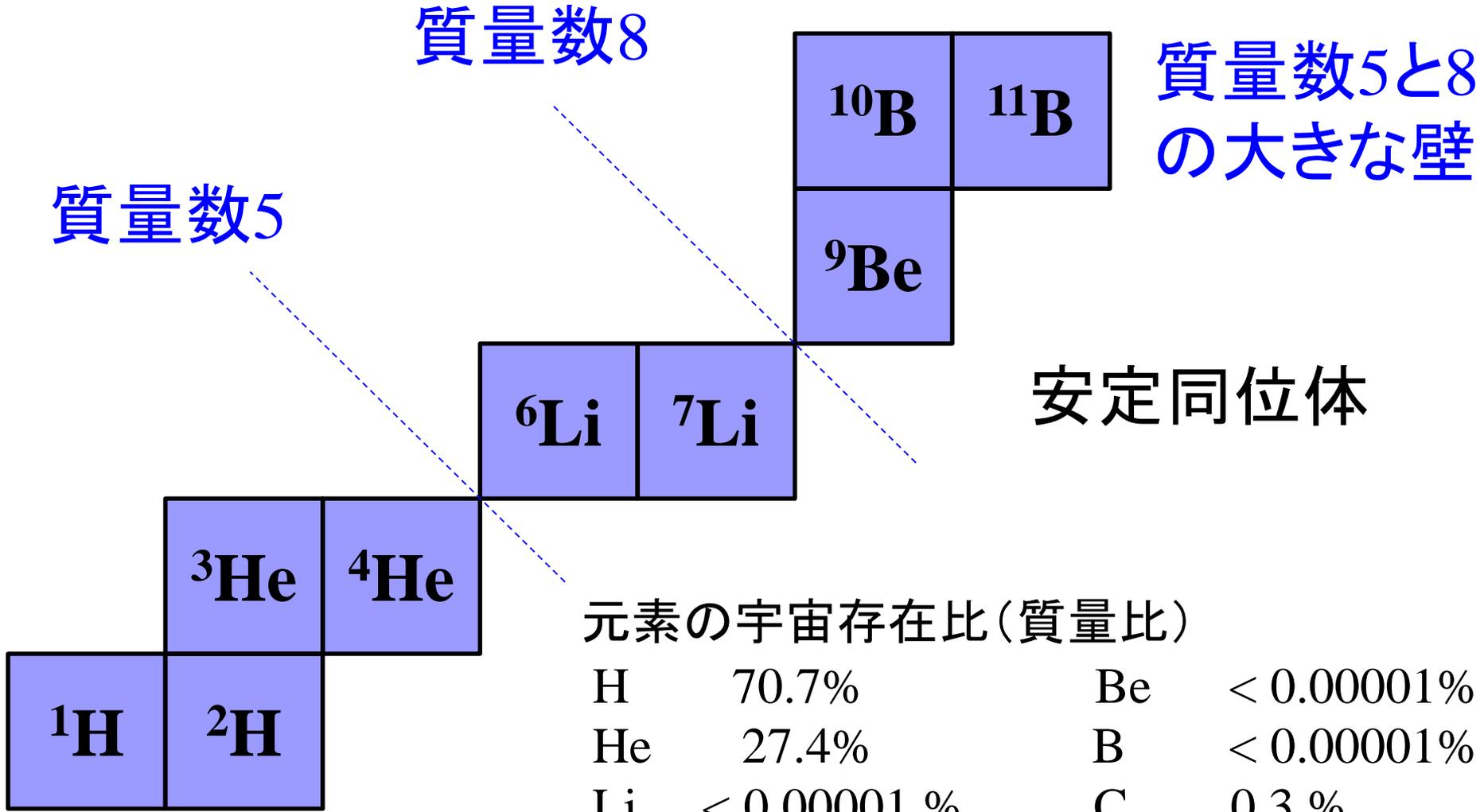


ビッグバン
(137億年前)



Li

Liがほんのちよつとしか
 できなかったわけ



元素の宇宙存在比(質量比)

H	70.7%	Be	< 0.00001%
He	27.4%	B	< 0.00001%
Li	< 0.00001 %	C	0.3 %

元素はどのように出来たのか？

→ 宇宙でうまれた



ビッグバン
(137億年前)



Li

元素はどのように出来たのか？

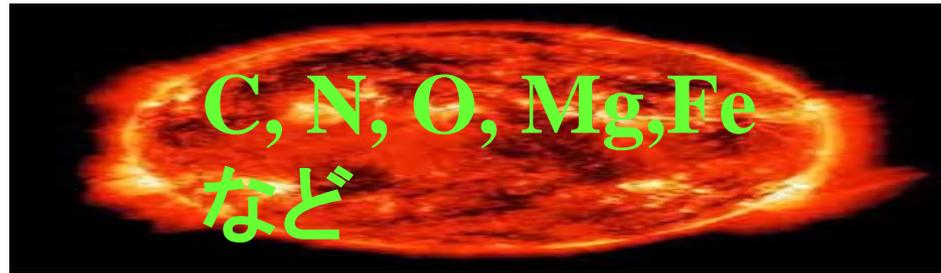
Feまでの元素の起源



(大質量)星の内部での核融合反応
————→ 恒星が光っているもと

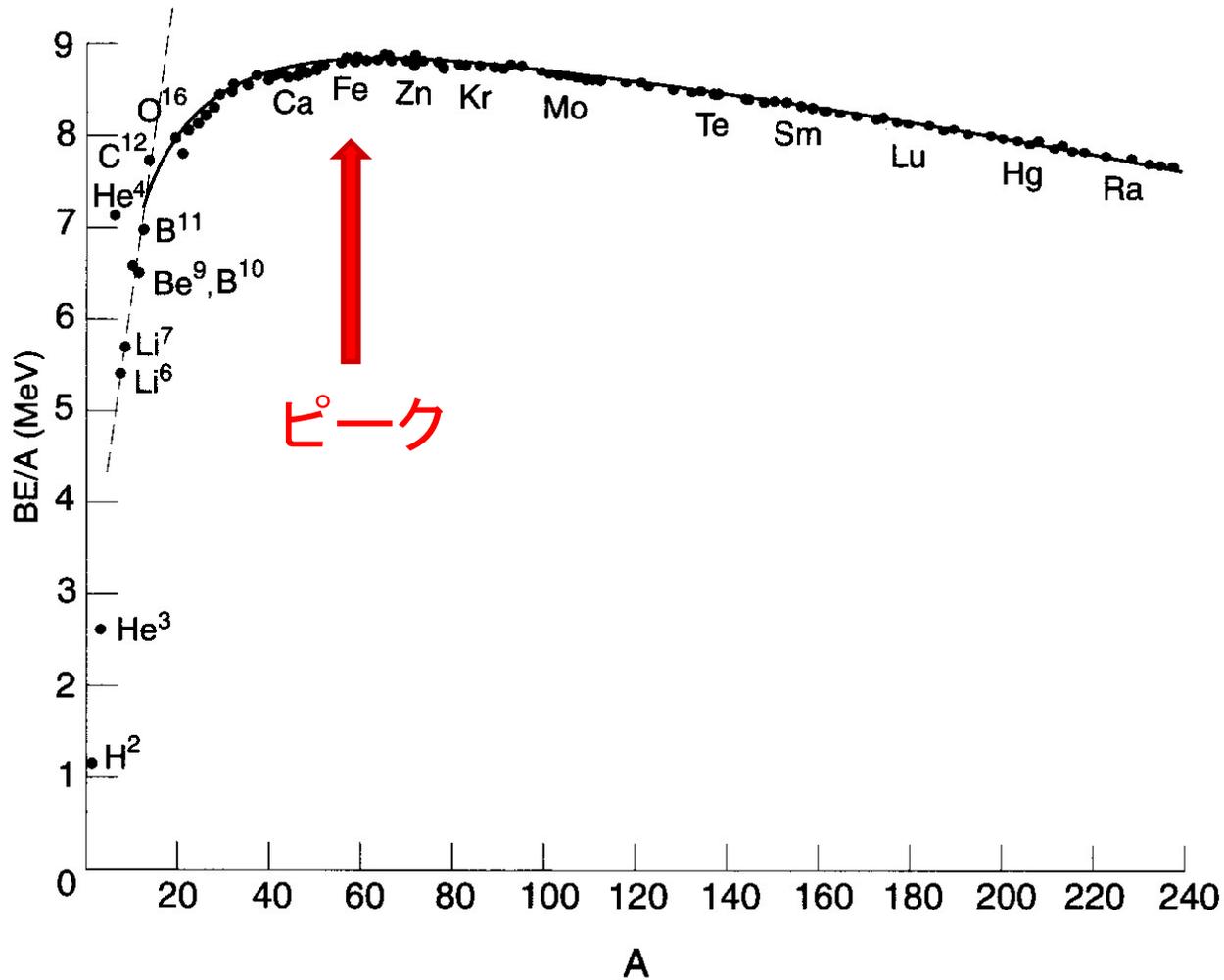
元素はどのように出来たのか？

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

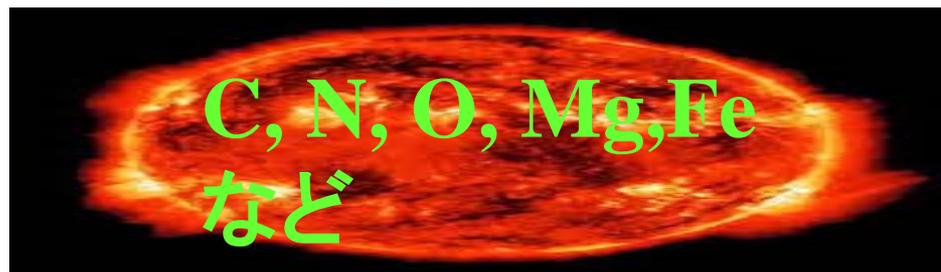
- Feまでは発熱反応
- Feから先は吸熱反応



- 軽い核は核融合した方が安定
- 重い核は核分裂した方が安定

元素はどのように出来たのか？

Feまでの元素の起源



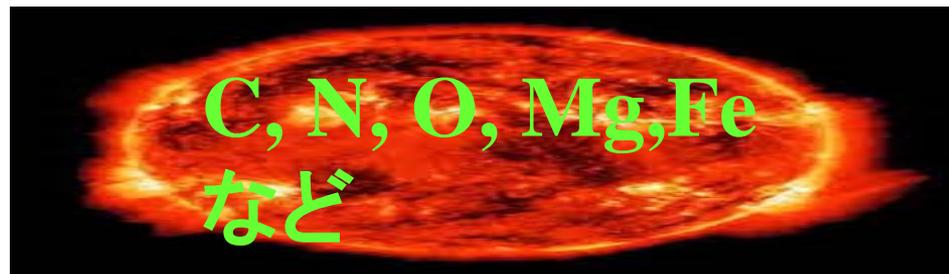
(大質量)星の内部での核融合反応
→ 恒星が光っているもと

- Feまでは発熱反応
- Feから先は吸熱反応

→ 核融合は鉄(Fe)で止まる

鉄より重い元素(例えば鉛など)は
どのように出来たのか？

(ちょっとその前に) 星の一生について

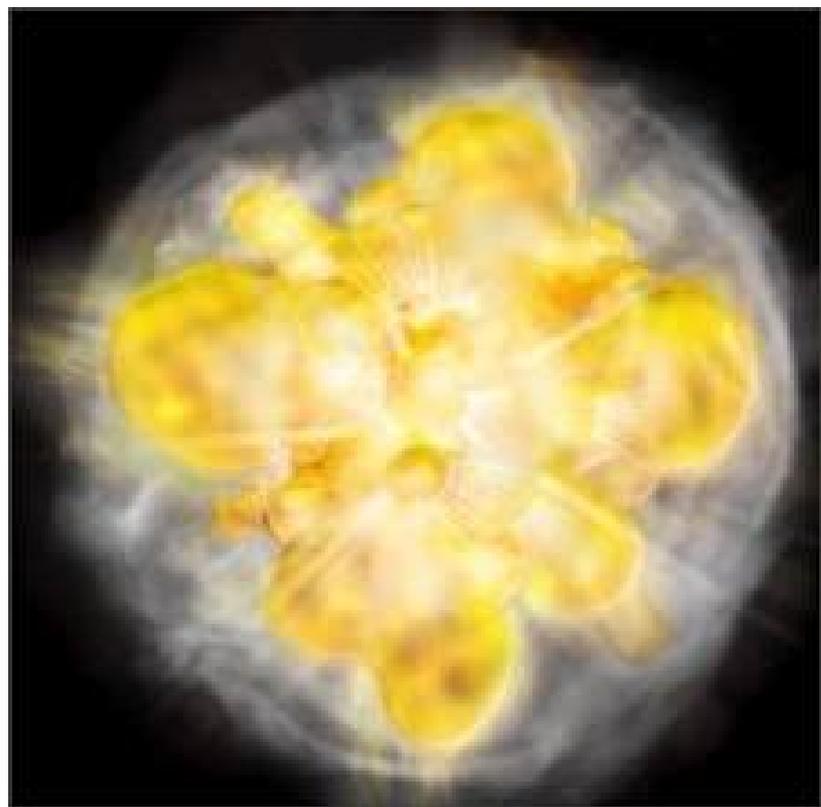


(大質量) 星の内部での核融合反応



核融合の燃料がなくなると

- ✓ 重力により縮む
- ✓ 耐えられなくなると爆発
(超新星爆発)



O

Mg

Ti



N

Ca



Fe

C



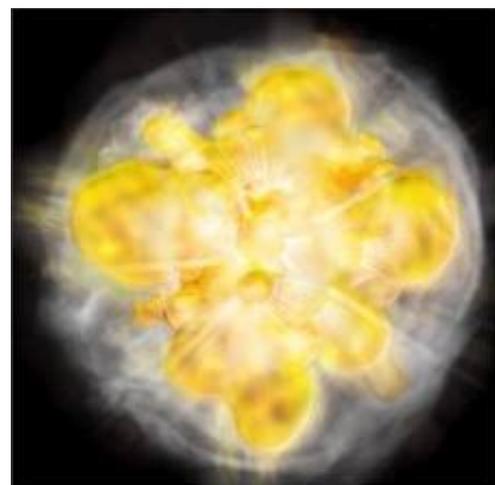
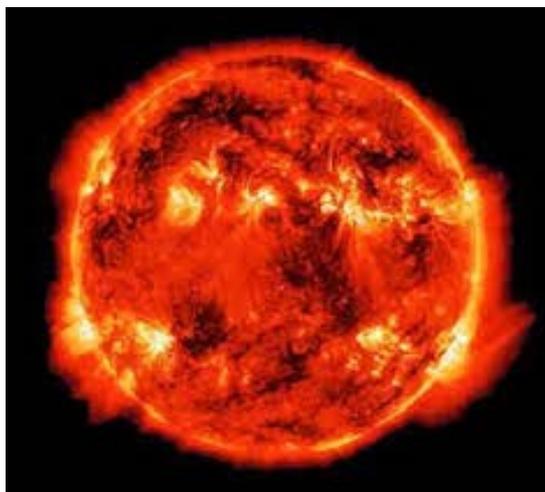
Li

Si



超新星爆発により
元素が宇宙空間に
ばらまかれる

サイクルのくりかえし



星間ガス

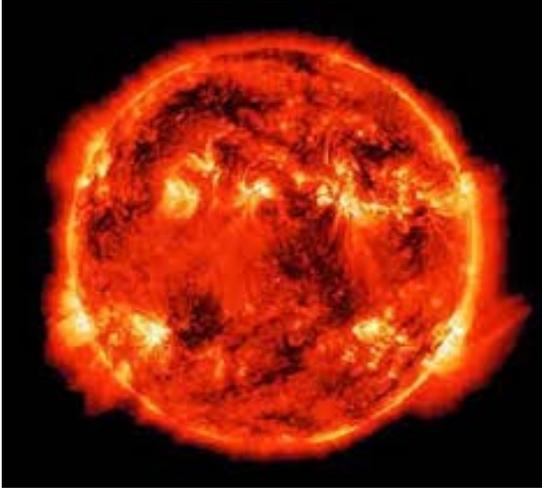
星の形成

超新星爆発



元素はどのように出来たのか？

中性子の吸収

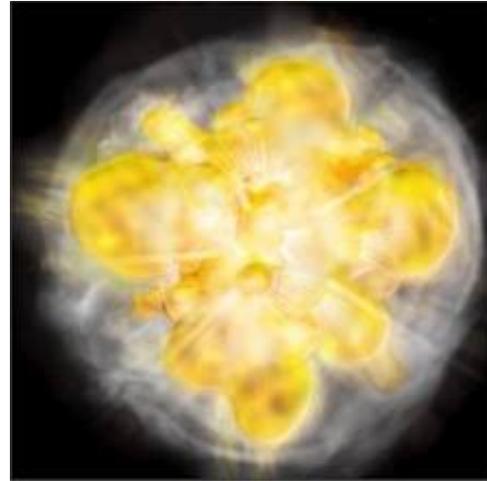


赤色巨星



s-プロセス

Ba, La, Pb, Bi など



超新星爆発

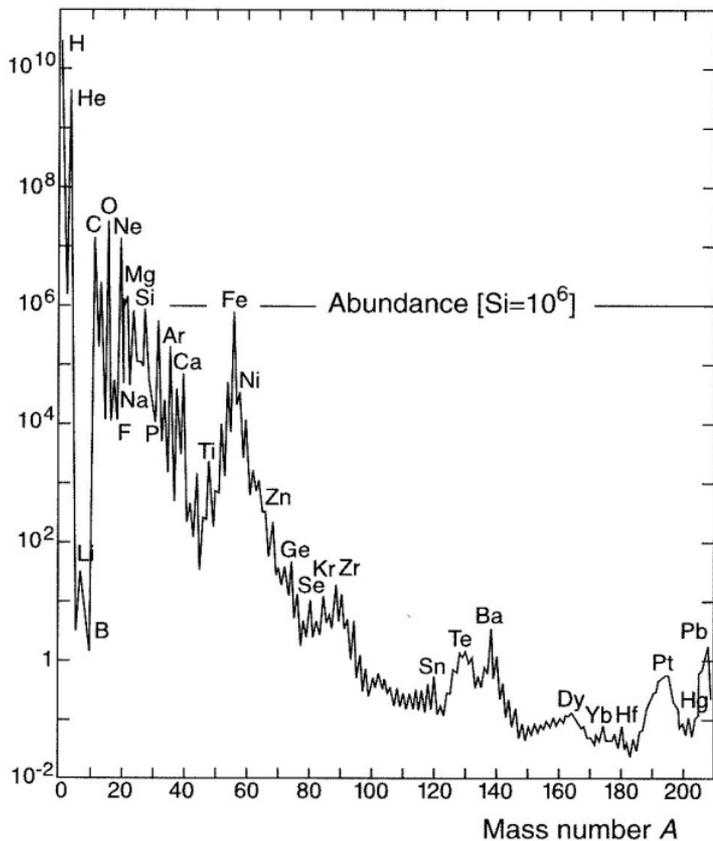


r-プロセス

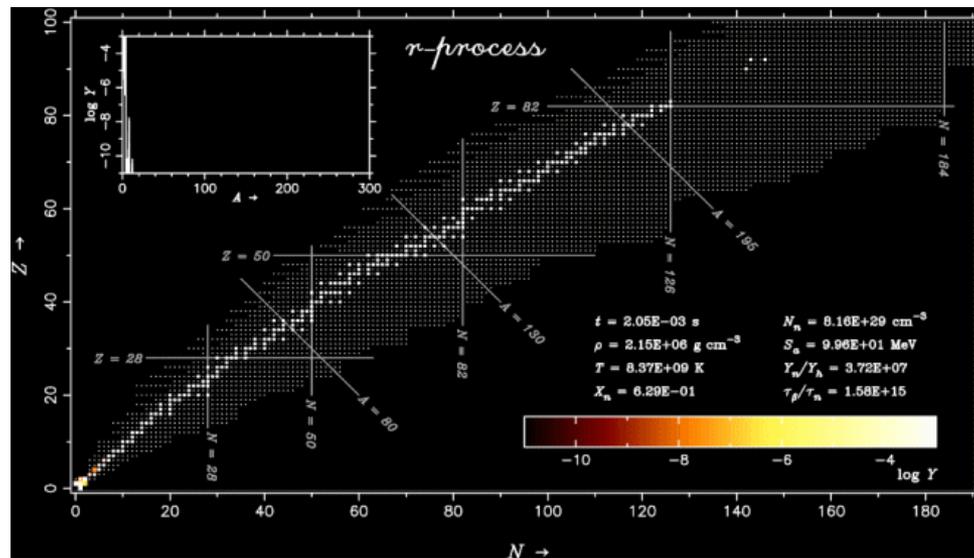
Th, Eu, U など



* 最近では
中性子星
の合体説も。



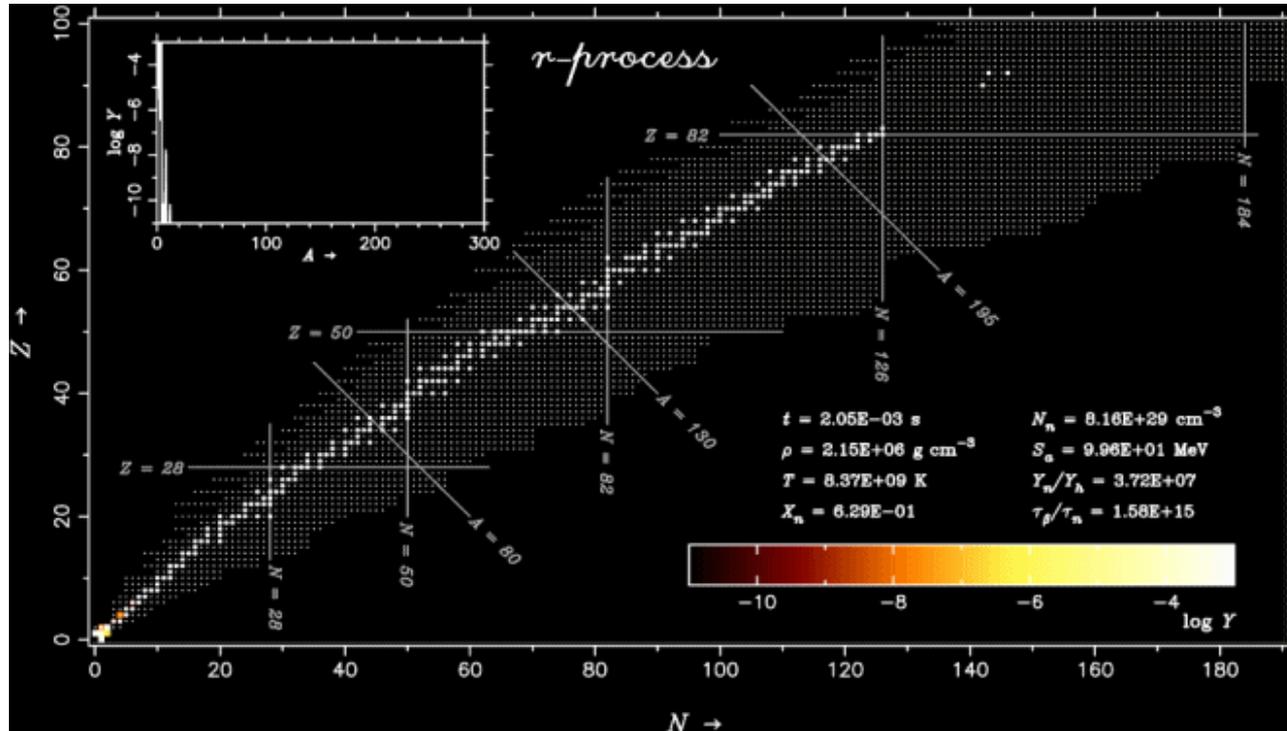
太陽系における元素の量



元素合成シミュレーションの例

→ どうやってこの割合が決まったのか？

r プロセス



鉄より重い元素は超新星爆発の際、r プロセスにより生成されたとされている

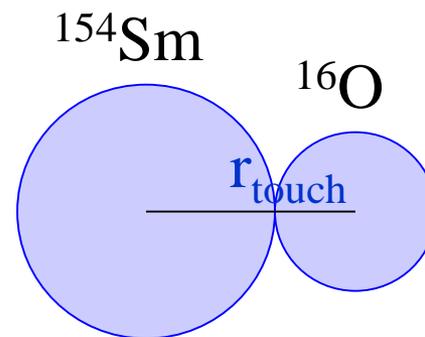
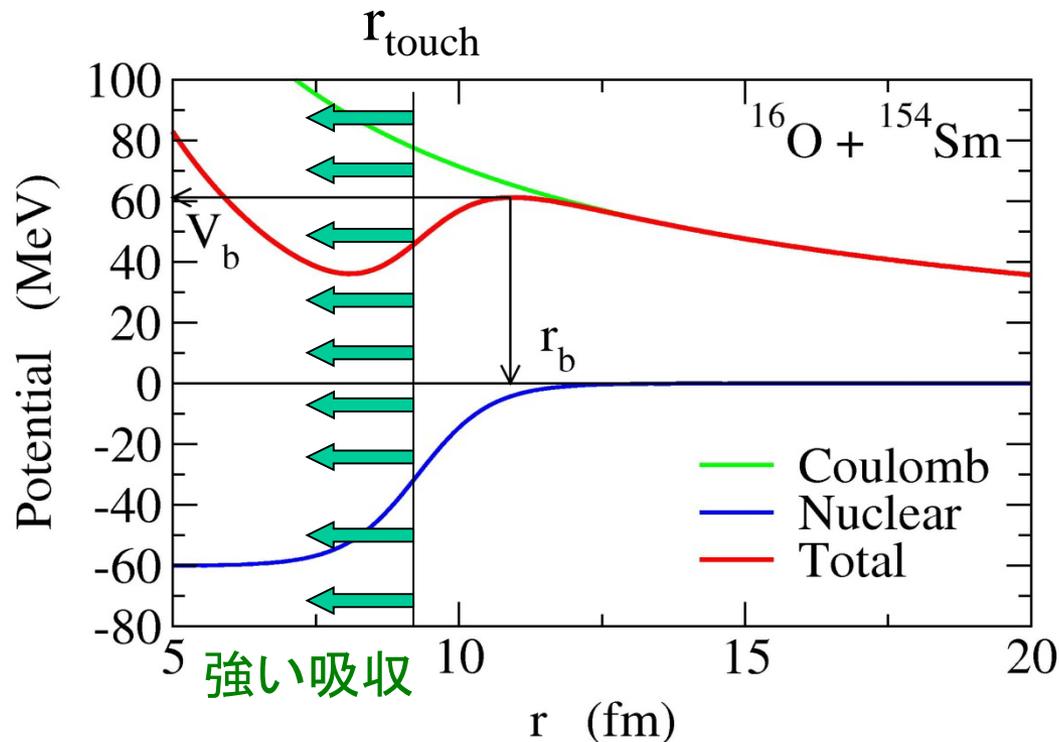
→ 重い不安定核を経由する核融合反応



金やウランがどうやって出来たのか
は実はあまりよくわかっていない。

重イオン核融合反応

重イオン核融合反応の特徴: クーロン障壁内部での強い吸収

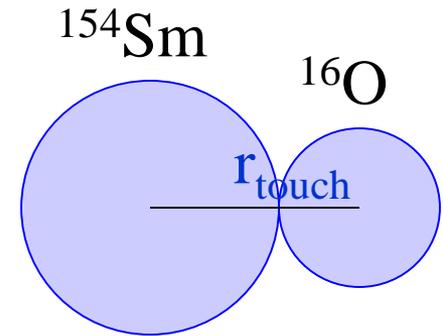
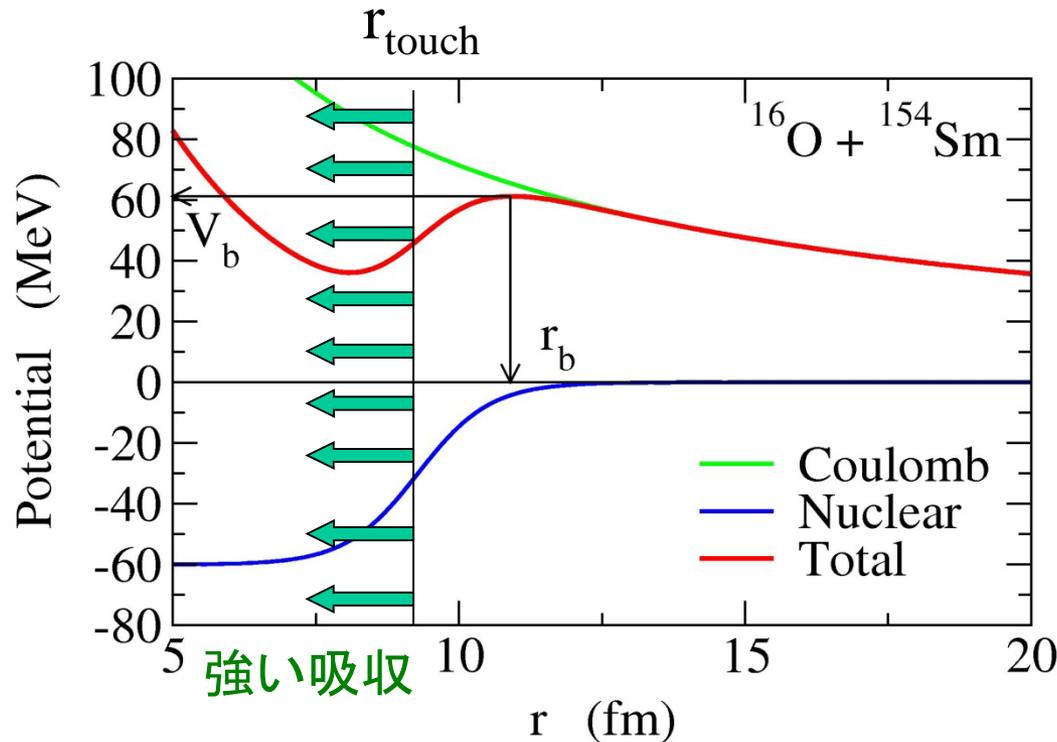


一度接触すると自動的に複合核を形成
(強い吸収の仮定)

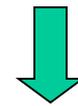
(ただし、系が重くなるとこの仮定は正しくない)

$Z_1 * Z_2 > 1,600 \sim 1,800$ の系
(あとで)

核融合反応と量子トンネル効果



一度接触すると自動的に複合核を形成(強吸収の仮定)



核融合の確率

= r_{touch} に到達する確率

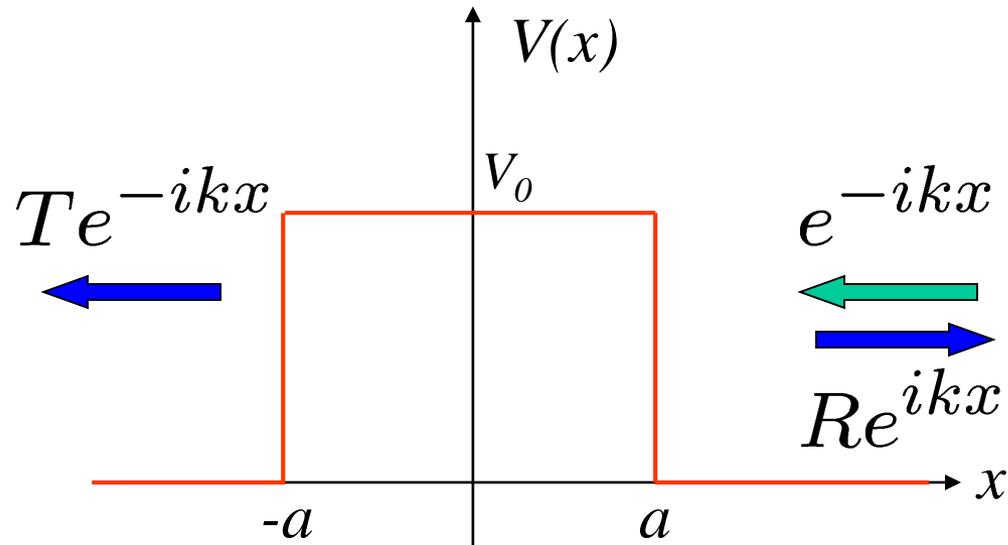


障壁の透過確率

$$\sigma_{\text{fus}}(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1) P_l(E)$$

低エネルギーでは核融合反応はトンネル効果で起きる!

量子トンネル現象

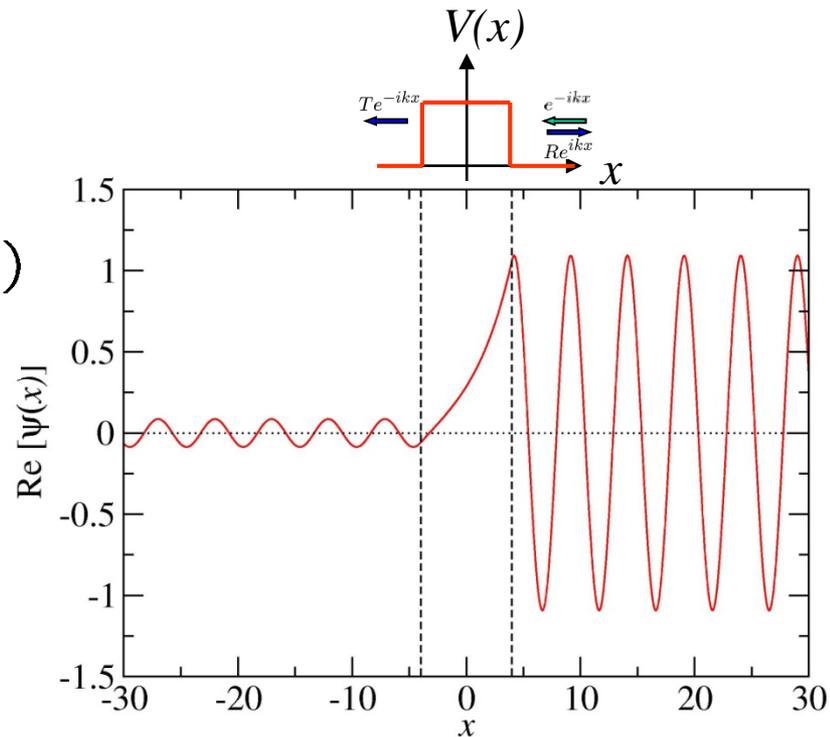


$$\begin{aligned}\psi(x) &= T e^{-ikx} & (x \leq -a) \\ &= A e^{-\kappa x} + B e^{\kappa x} & (-a < x < a) \\ &= e^{-ikx} + R e^{ikx} & (x \geq a)\end{aligned}$$

$$k = \sqrt{2mE/\hbar^2}$$

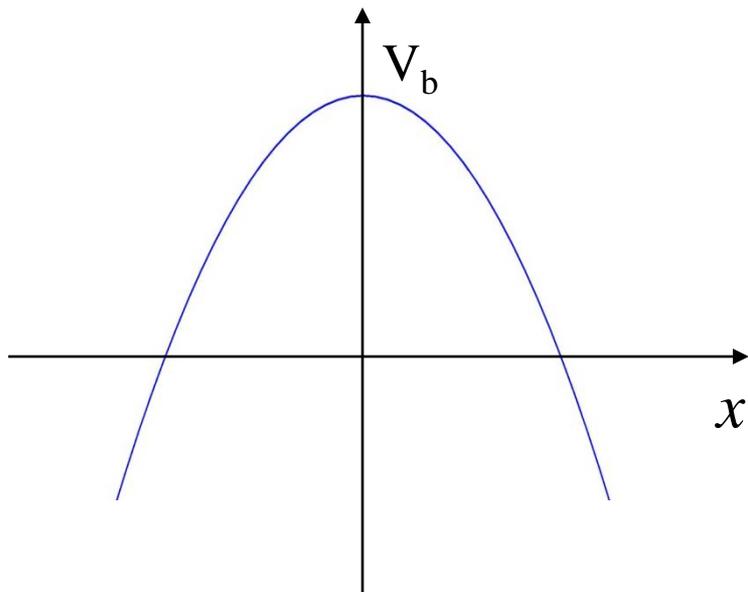
$$\kappa = \sqrt{2m(V_0 - E)/\hbar^2}$$

トンネル確率: $P(E) = |T|^2$

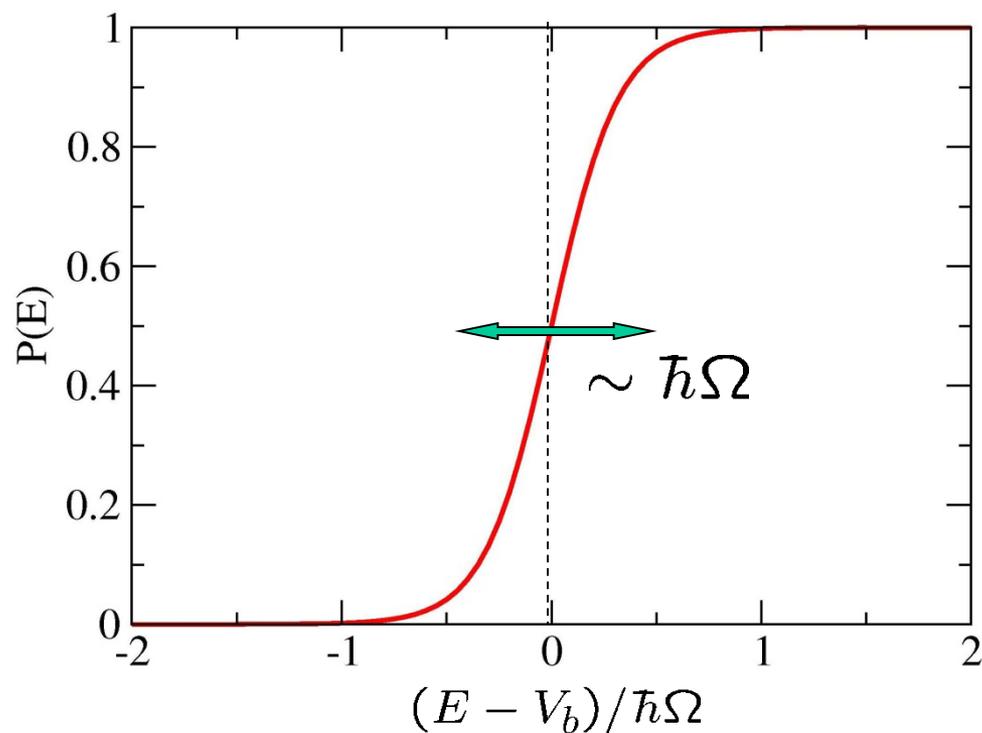


放物線障壁だと.....

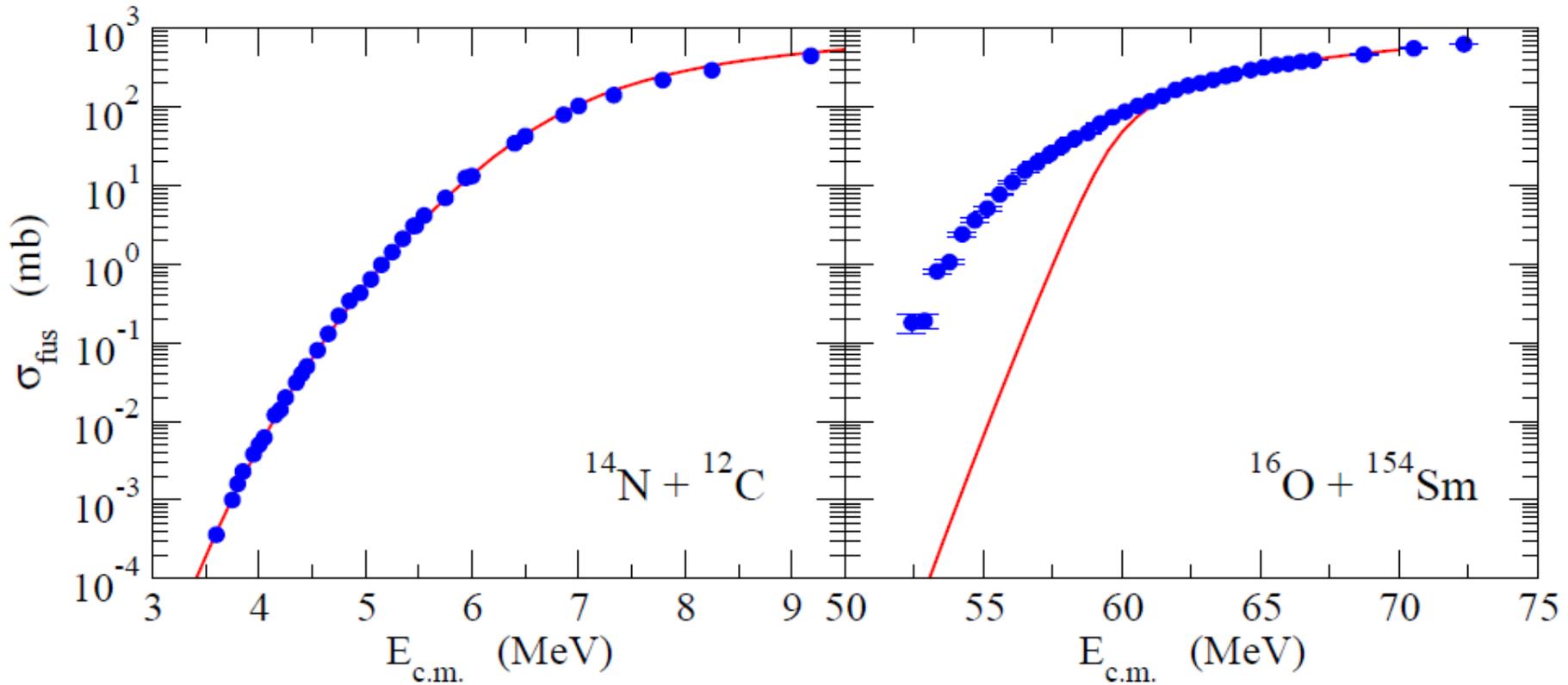
$$V(x) = V_b - \frac{1}{2}m\Omega^2 x^2$$



$$P(E) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{2\pi}{\hbar\Omega}(V_b - E)\right]}$$



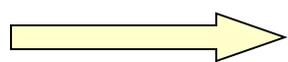
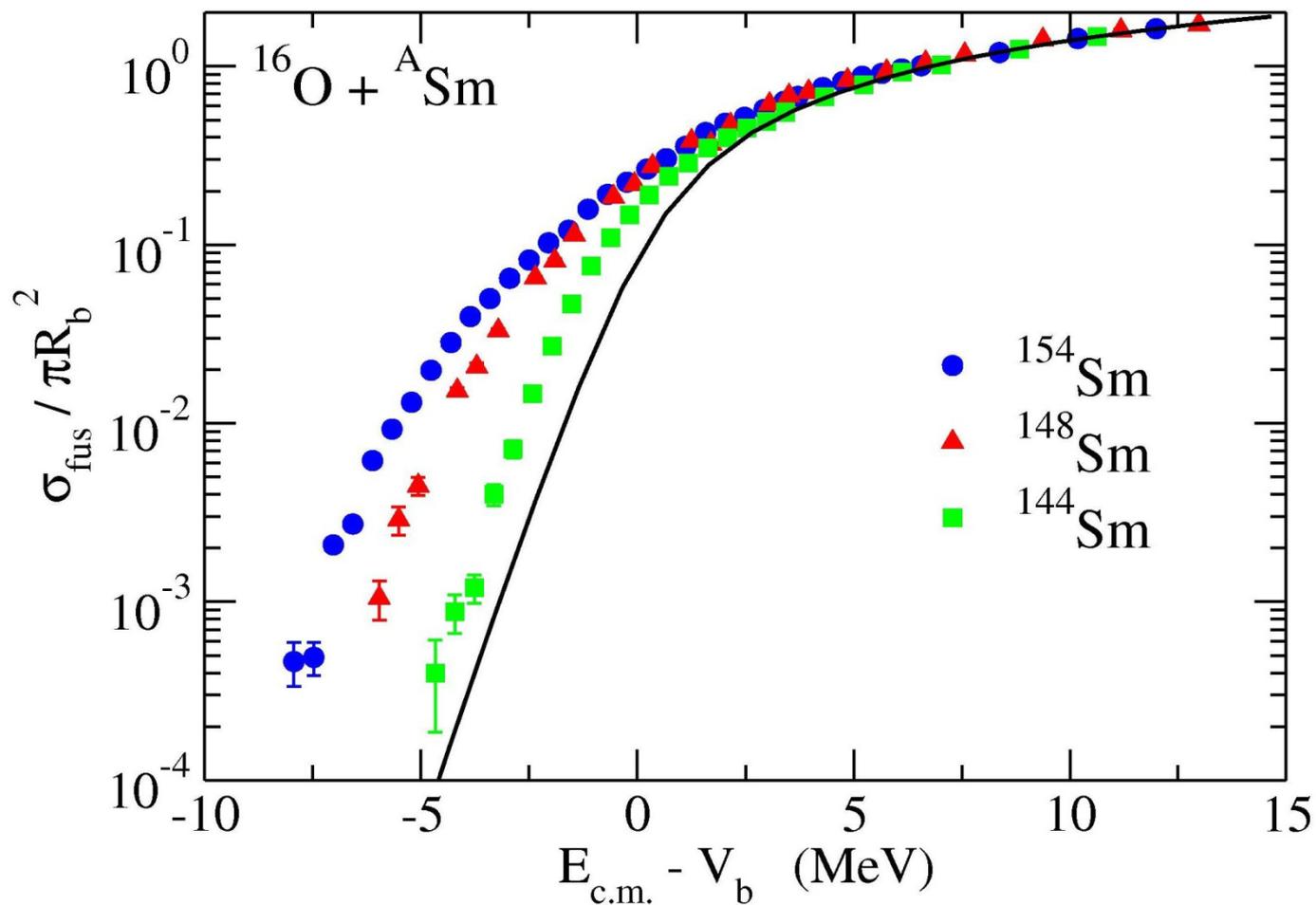
2つの原子核に構造がないとして、適当なポテンシャルを用いて計算



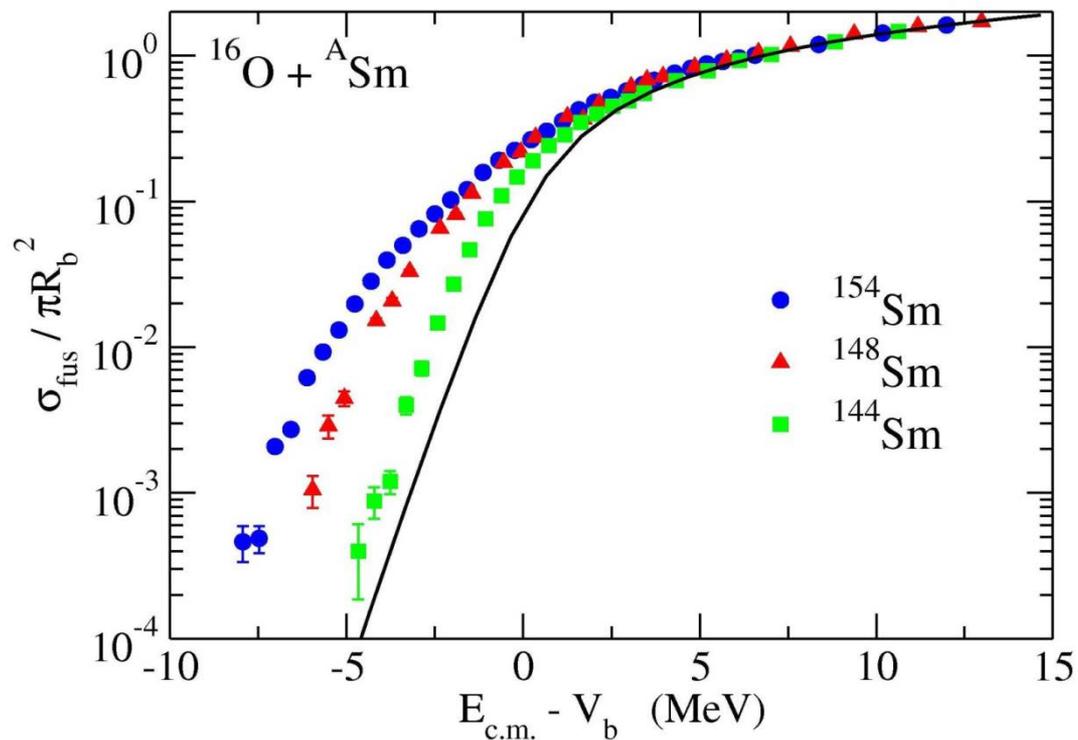
単純なポテンシャル模型:

- 比較的軽い系では実験データを再現
- 系が重くなると過小評価(低エネルギー)

核融合断面積の標的核依存性



$E < V_b$ において強い標的核依存性



(MeV)

1.81 — 3^-
1.66 — 2^+

(MeV)

1.18 — 4^+
1.16 — 3^-

(MeV)

0.90 — 8^+
0.54 — 6^+
0.27 — 4^+
0.082 — 2^+
0 — 0^+

0 — 0^+
 ^{144}Sm

0 — 0^+
 ^{148}Sm

^{154}Sm

原子核の低励起集団運動

偶々核の低エネルギーに現れる励起状態は集団励起状態であり、対相関と殻構造を強く反映する。

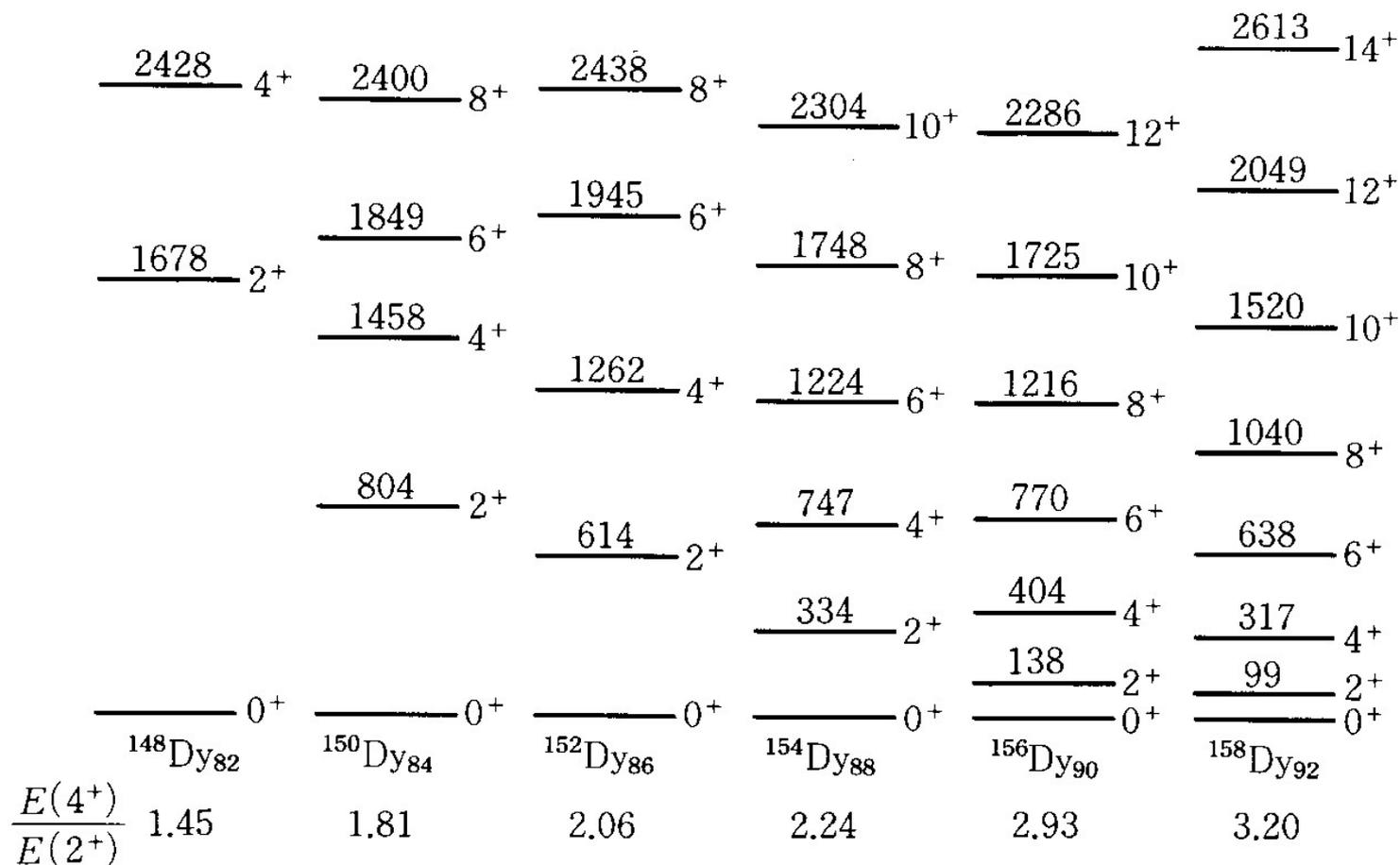


図 3-4 Dy アイソトープの低励起スペクトル. 励起エネルギーの単位は keV.

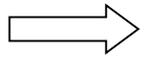
市村、坂田、松柳
「原子核の理論」より

核融合反応に対する集団励起の影響: 回転の場合

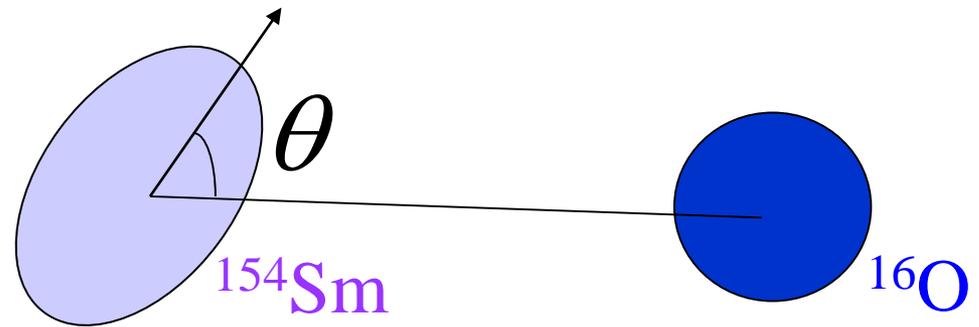
^{154}Sm の方向は反応中にほとんど変化しない

(note)

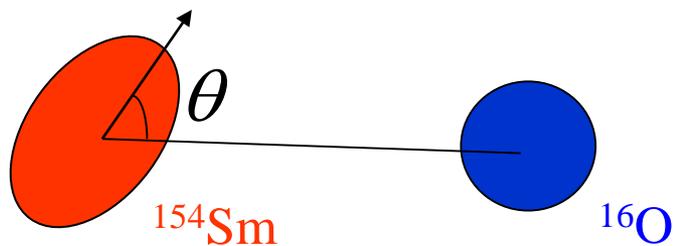
反応の初期は基底状態
(0^+ 状態)



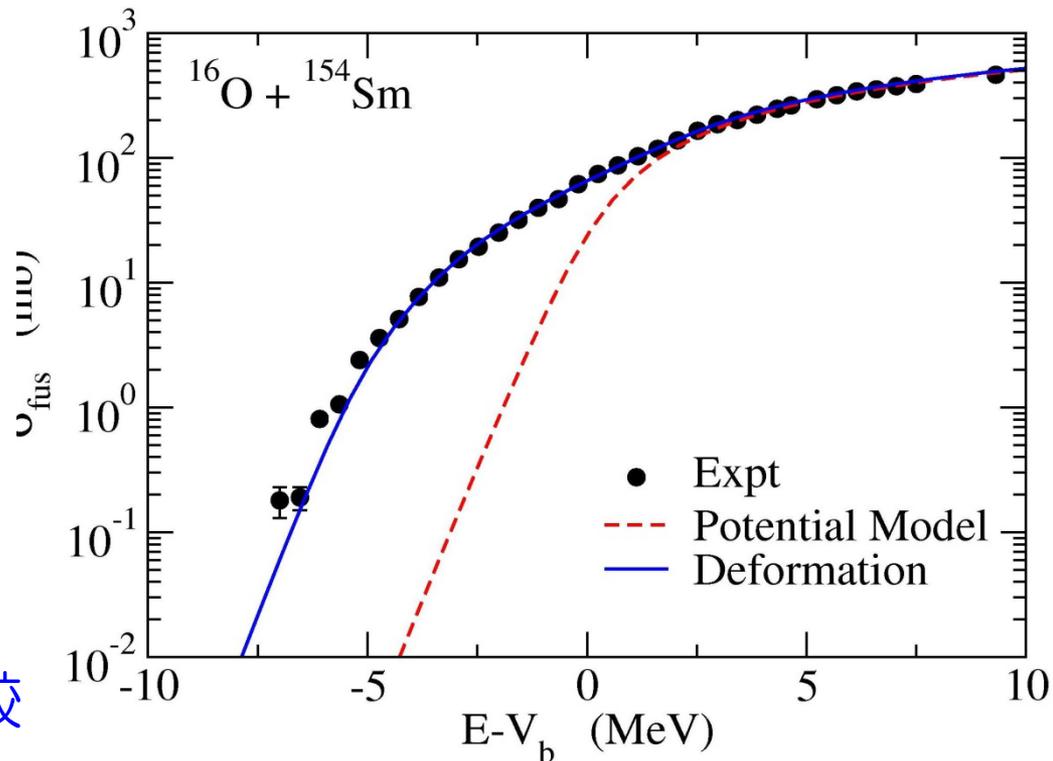
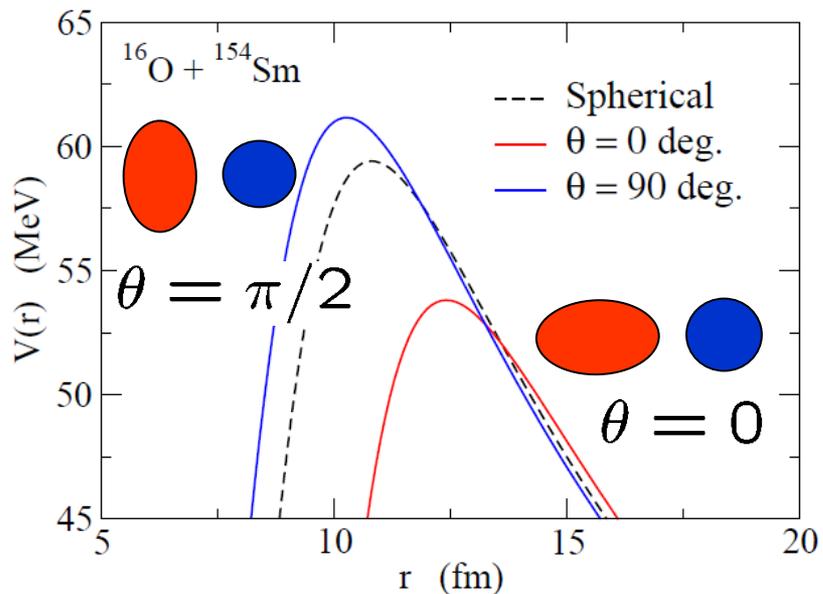
あらゆる方向が等確率
で混ざっている



$$\sigma_{\text{fus}}(E) = \int_0^1 d(\cos \theta) \sigma_{\text{fus}}(E; \theta)$$



$$\sigma_{\text{fus}}(E) = \int_0^1 d(\cos \theta) \sigma_{\text{fus}}(E; \theta)$$



$\theta = 0$ では引力の核力が比較的遠方から働くため障壁が下がる。

$\theta = \pi/2$ はその逆。近づかないと引力が働かないため障壁は上がる。

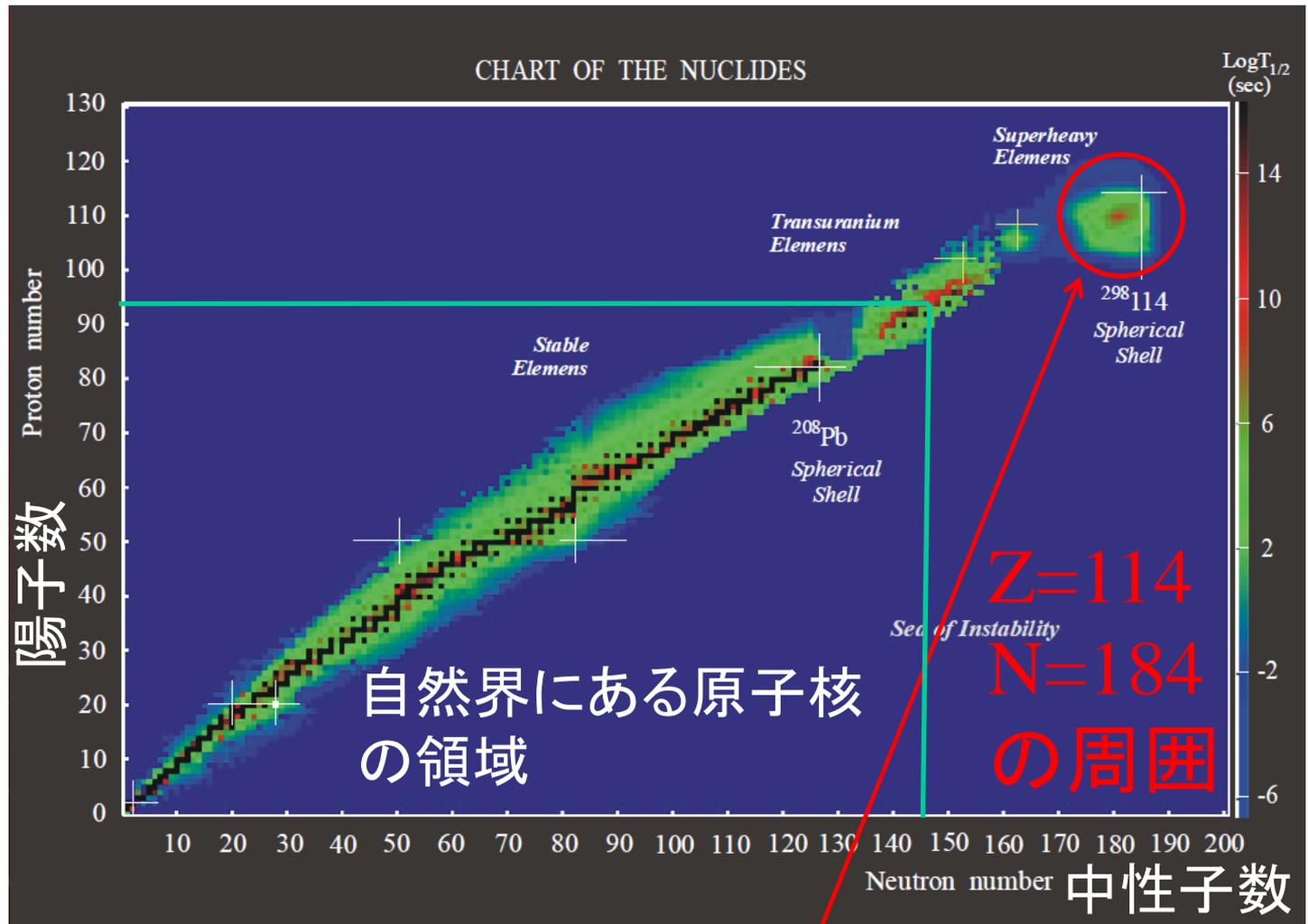
変形の効果: 核融合断面積が 10~100 倍増大

⇒ **核融合反応:** 核構造に対する興味深いプローブ

超重元素(超重原子核)

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
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			

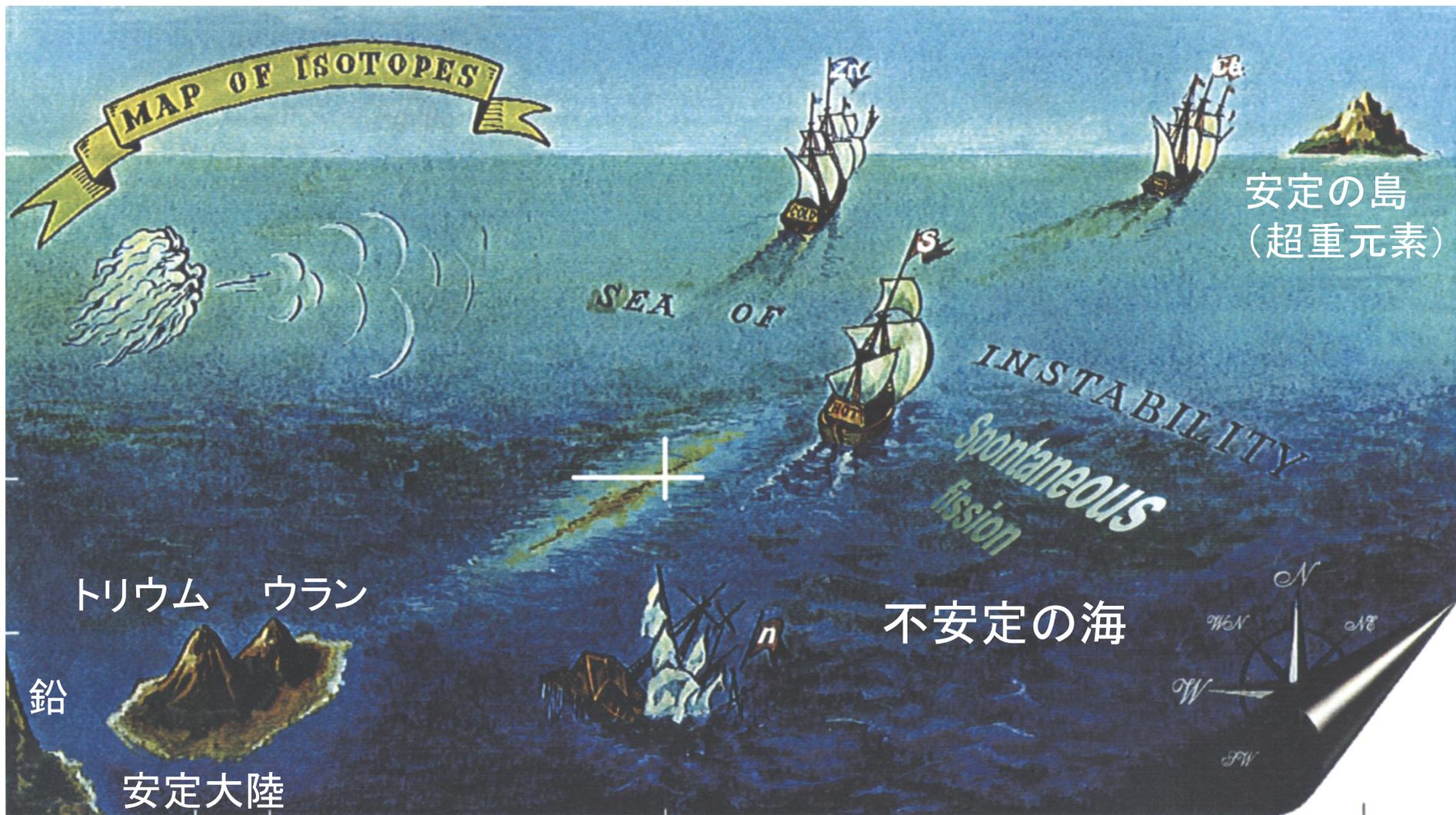
超重元素(超重原子核)



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)

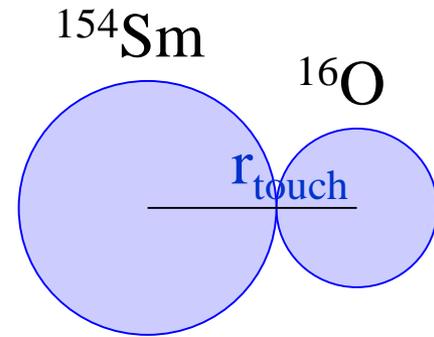
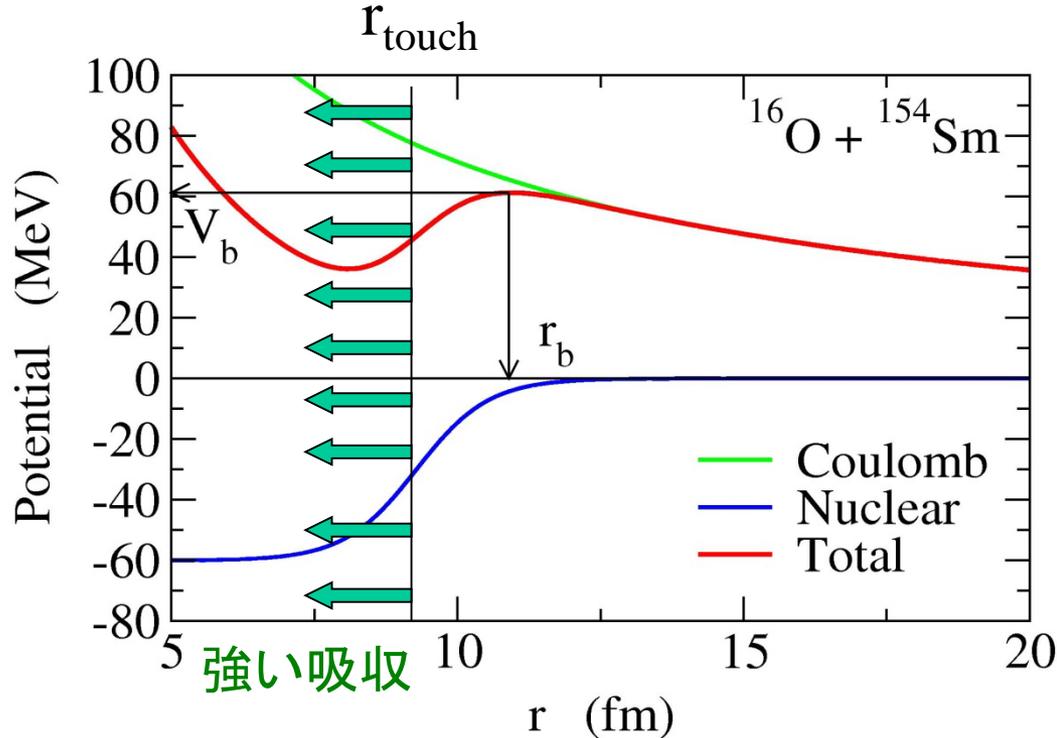
安定の島(超重元素)を目指して



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
(強吸収の仮定)

➤ 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)

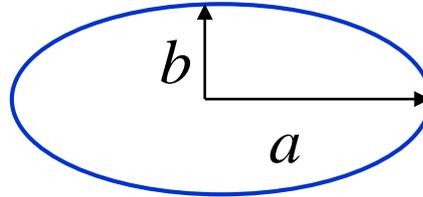
目安: $Z_1 * Z_2 > 1600 \sim 1800$ の系でこのようなことが起こる

(復習)

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

原子核を体積一定のまま変形してみる

例) 回転楕円体



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

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

$$ab^2 = R^3 = \text{一定}$$

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
- } 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)

□ 表面項

$$E_S(\epsilon) = \underbrace{\sigma}_{\text{表面張力}} \underbrace{\int_S dS}_{\text{表面積分}} \sim E_S^{(0)} \left(1 + \frac{2}{5}\epsilon^2 - \frac{4}{105}\epsilon^3 + \dots \right)$$

損

表面張力

表面積分

$$4\pi R^2 \sigma \propto A^{2/3}$$

$$E_S^{(0)} = +a_S A^{2/3}$$

□ クーロン項

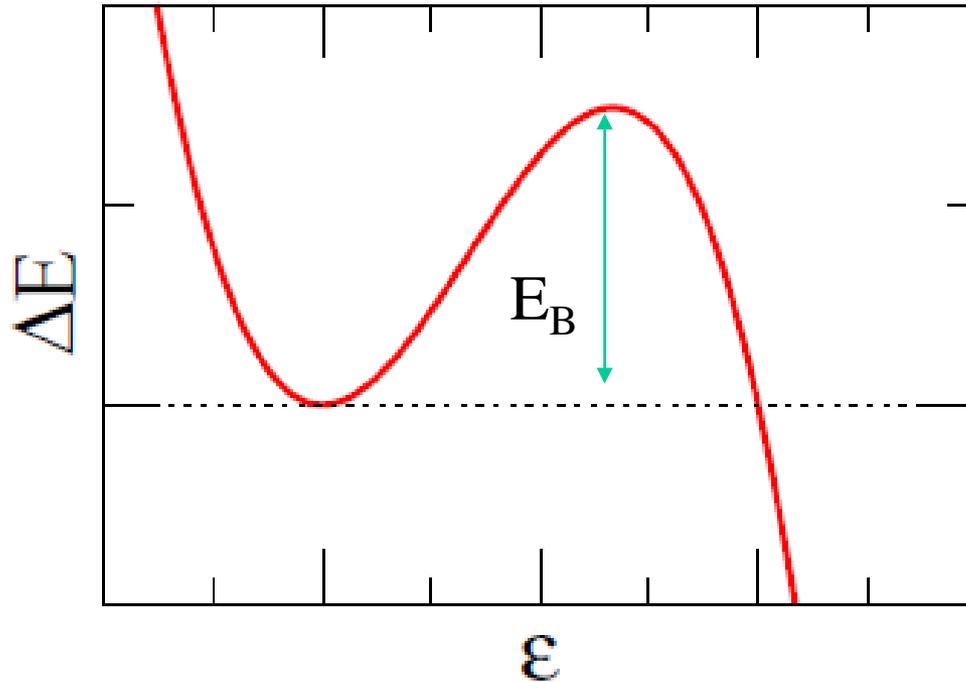
$$E_C(\epsilon) = \frac{1}{2} \int dr dr' \frac{e^2}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \rho(\mathbf{r}) \rho(\mathbf{r}') \\ \sim E_C^{(0)} \left(1 - \frac{1}{5}\epsilon^2 - \frac{4}{105}\epsilon^3 + \dots \right)$$

得

$$E_C^{(0)} = a_C Z(Z-1)/A^{1/3}$$

(復習)

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



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

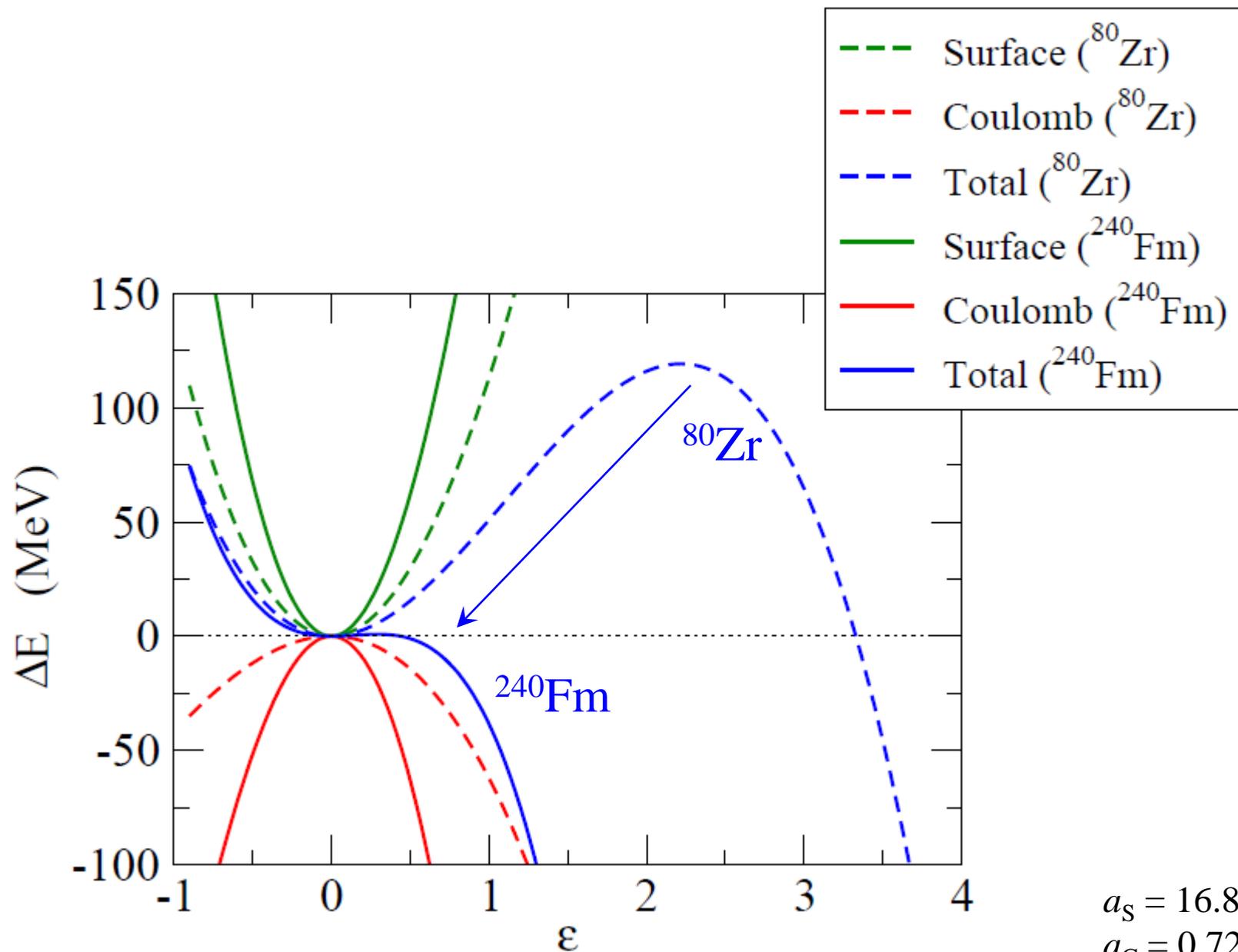
$$E_B = \frac{98}{15} \cdot \frac{(1-x)^3}{(1+2x)^2} \cdot E_S^{(0)}$$

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

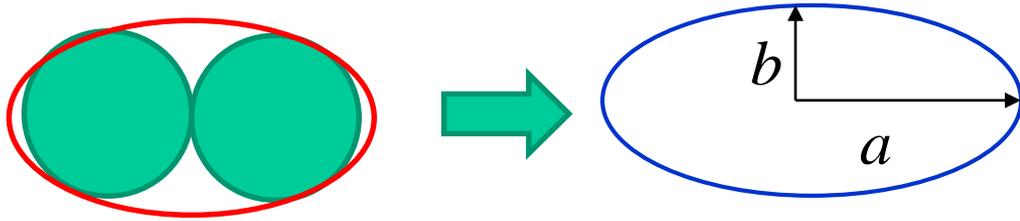
重い核ほど障壁は低くなる

重い核ほど障壁での変形度は小さくなる

$^{80}_{40}\text{Zr}$ と $^{240}_{100}\text{Fm}$ の比較



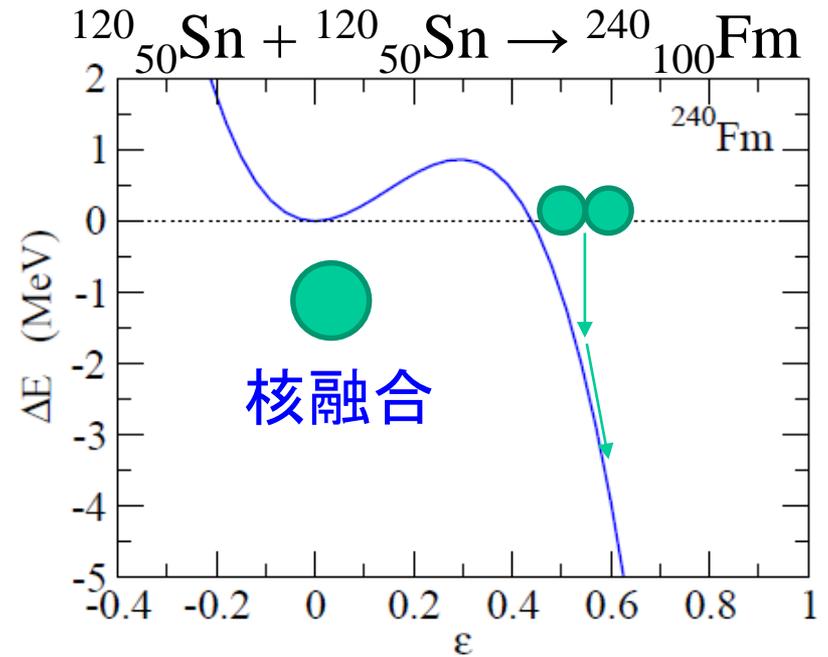
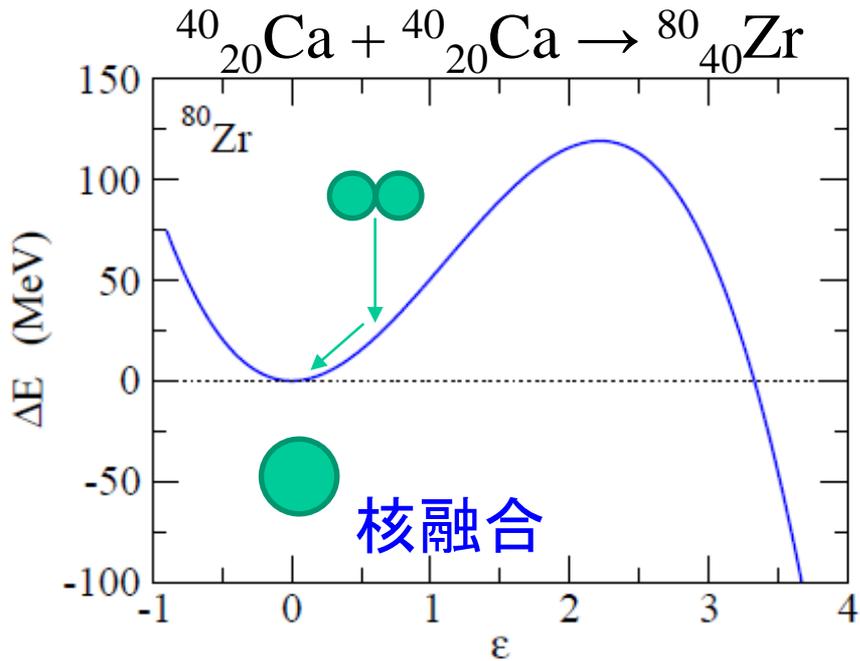
同じ原子核が接触すると:



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

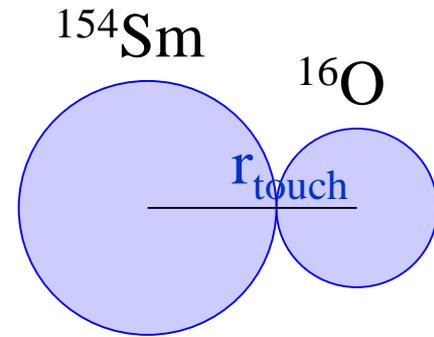
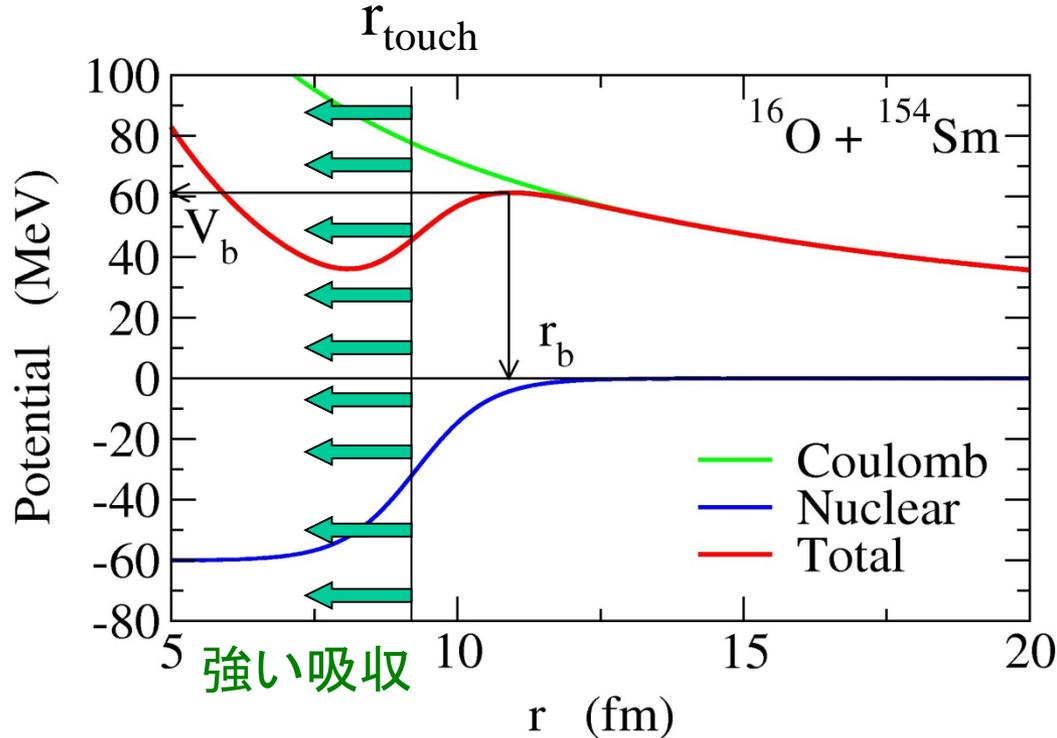
$$b = R_0 \cdot (1 + \epsilon)^{-1/2}$$

$$a/b \sim 2R/R = 2 \rightarrow \epsilon \sim 0.587$$



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:

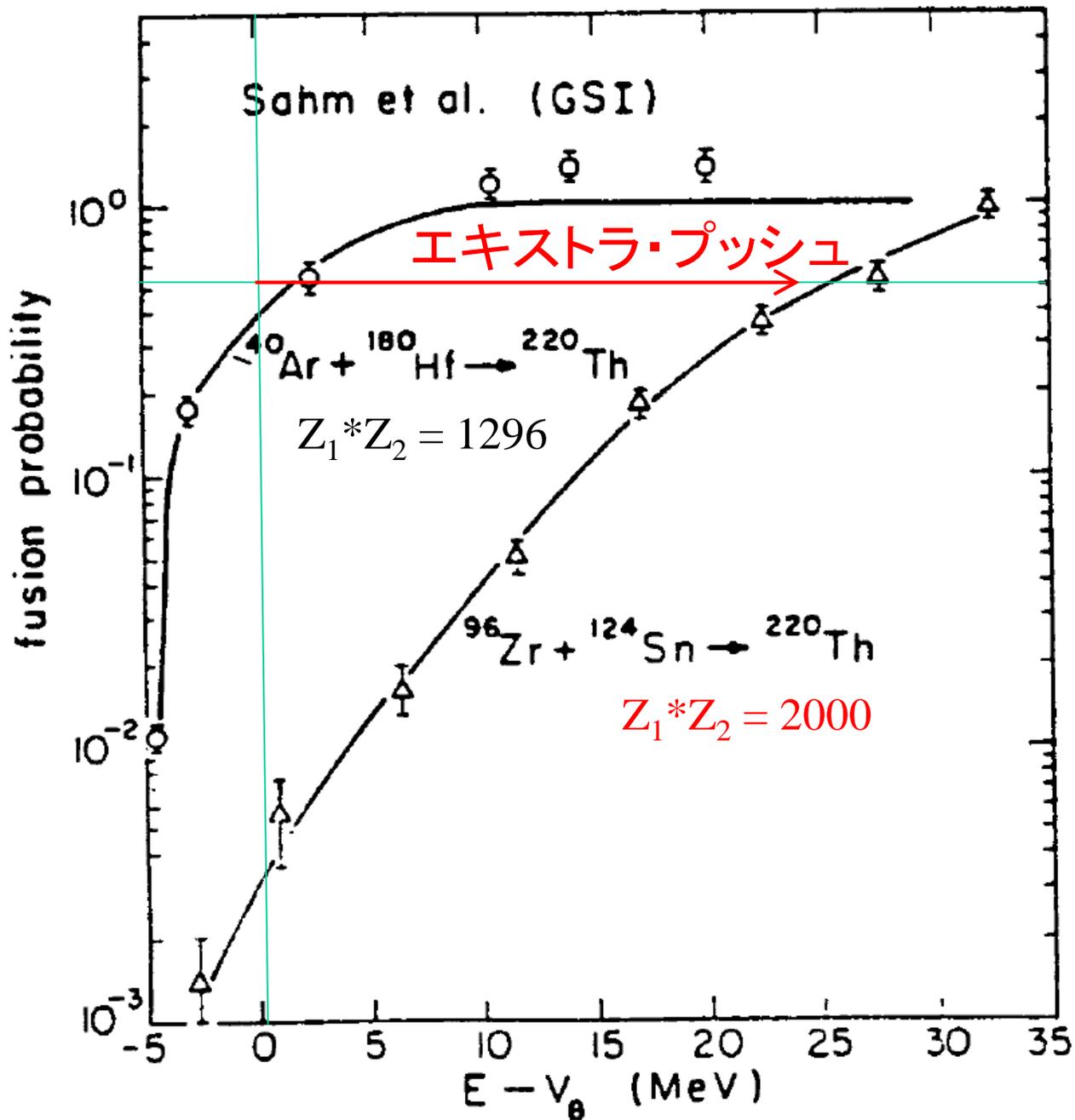


一度接触すると自動的に
複合核を形成
(強吸収の仮定)

➤ 重核・超重核領域における核融合反応:

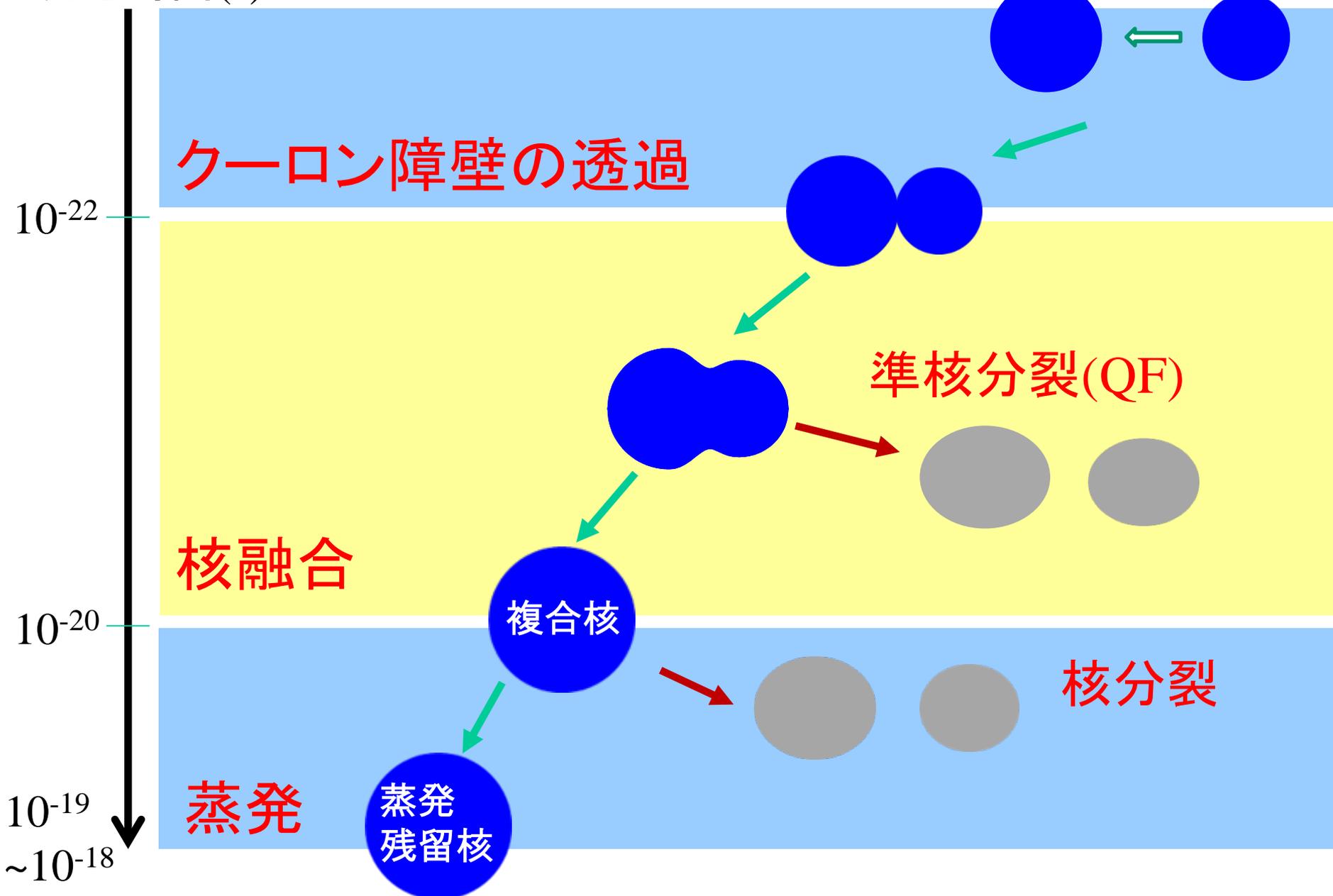
接触しても大きな確率で離れてしまう(クーロン反発が強いため)

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



C.-C. Sahm et al.,
 Z. Phys. A319('84)113

典型的な
反応時間(s)

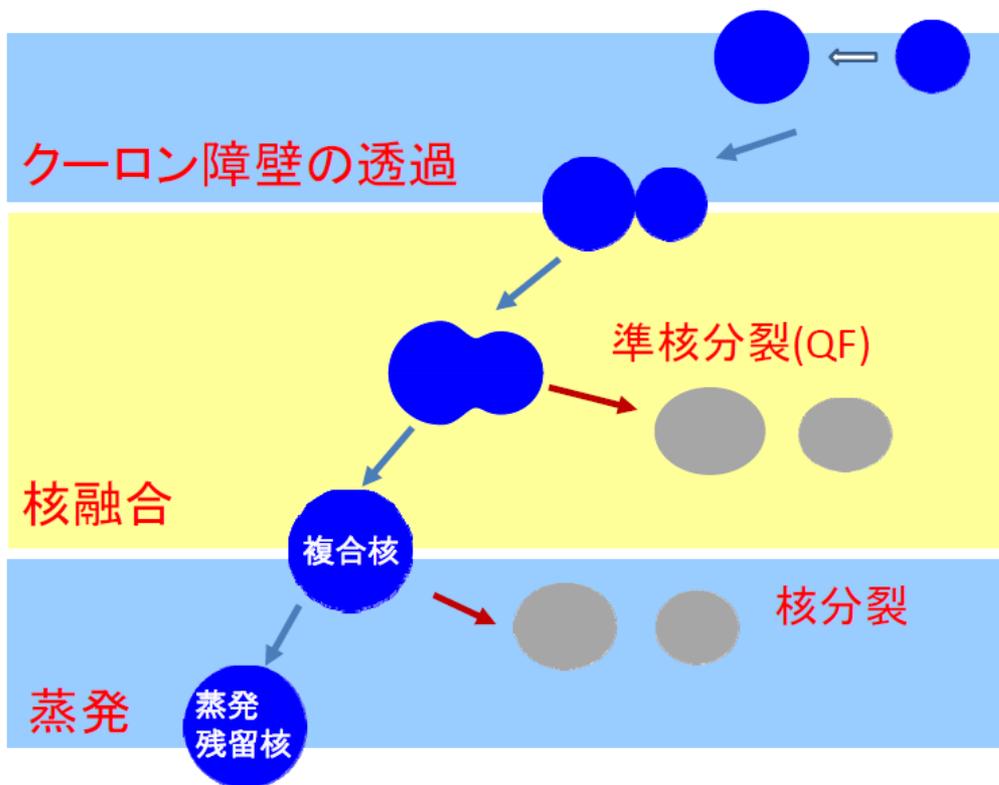


* どのように核融合反応断面積を測定するのか?

➤ 中重核領域の場合:

✓ 核融合生成物の直接測定 (蒸発残留核 + 核分裂)

➤ 重核・超重核領域の場合:



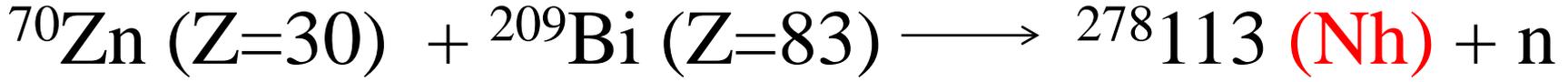
準核分裂 + 生き残りの2重苦

大きな準核分裂の確率のため、核分裂片の測定は複合核形成を意味しない (QFとFFの区別は実験的に困難)

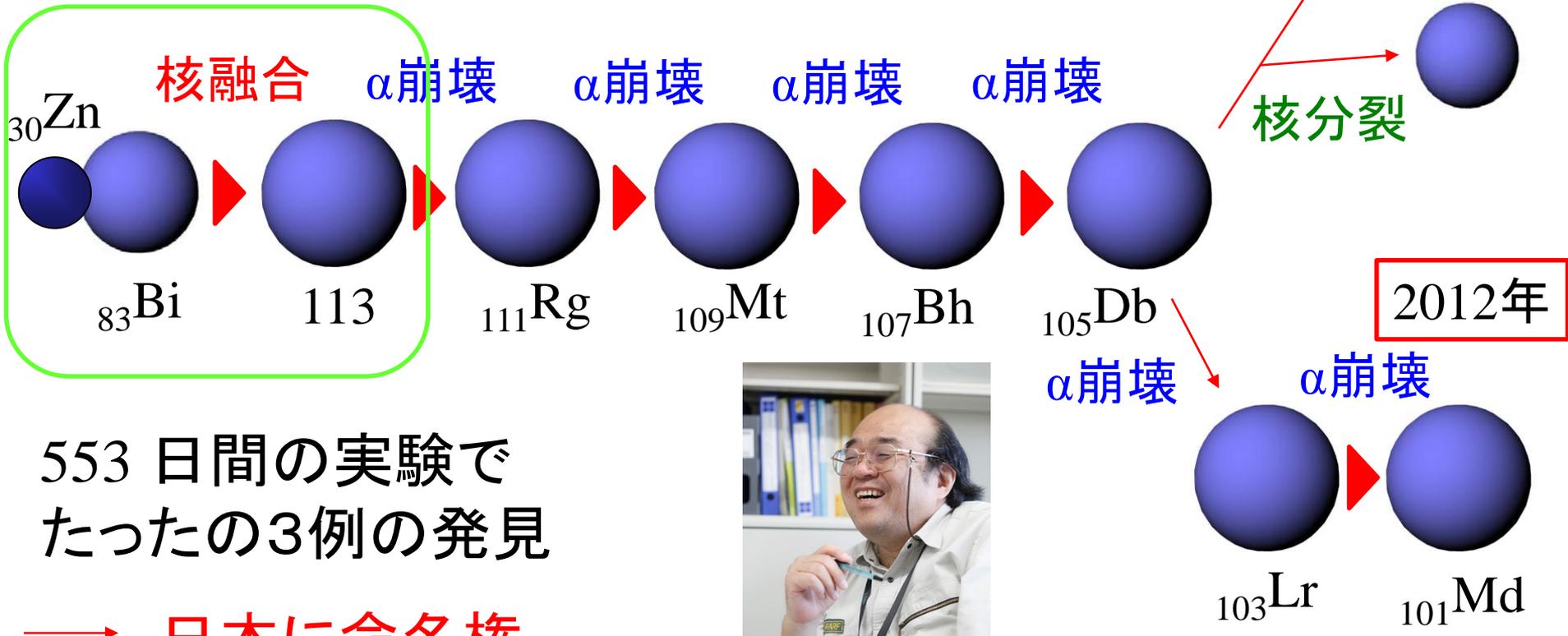
蒸発残留核の測定をもって複合核形成とみなす

重い複合核:
圧倒的な確率で核分裂
(例: $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$ 反応では
核分裂しない確率は
 $P_{\text{suv}} \sim 10^{-6}$ 程度)

新元素113番 案:ニホニウム(Nh)



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

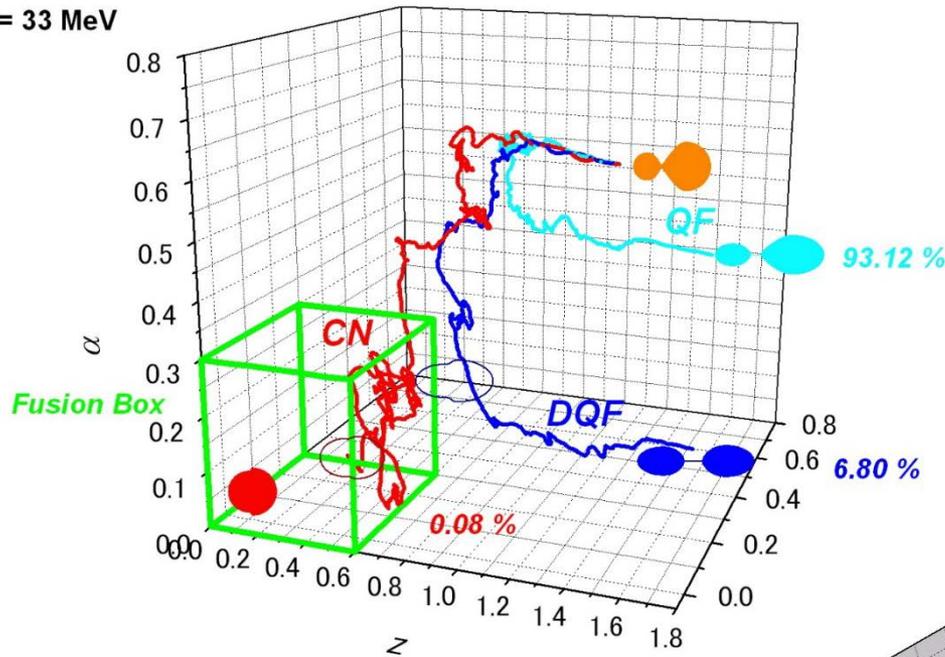
→ 日本に命名権
(案)ニホニウム Nh



理論: ランジュバン法



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



q として

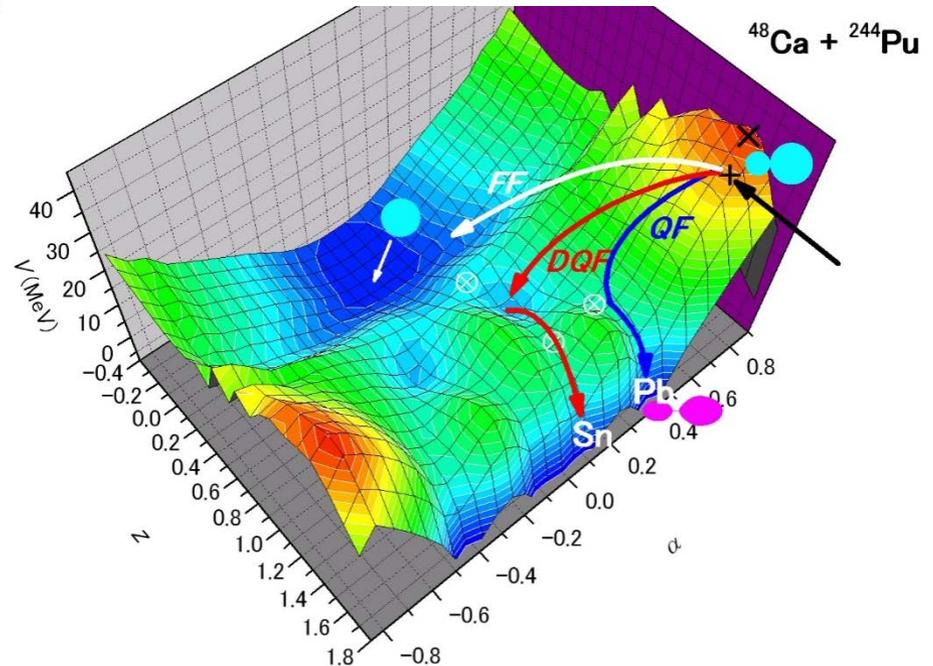
- ・核間距離 (z)
- ・原子核の変形 (δ)
- ・フラグメントの非対称度 (α)

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

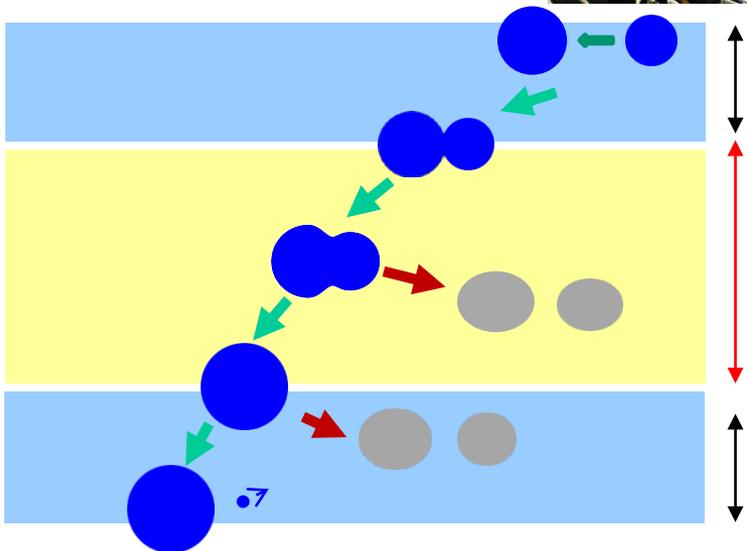
γ : 摩擦係数

$R(t)$: 乱雑力

を多次元に拡張したもの
(ブラウン運動の理論)



Super-heavy nuclei



量子トンネルの確率

ランジュバン方程式

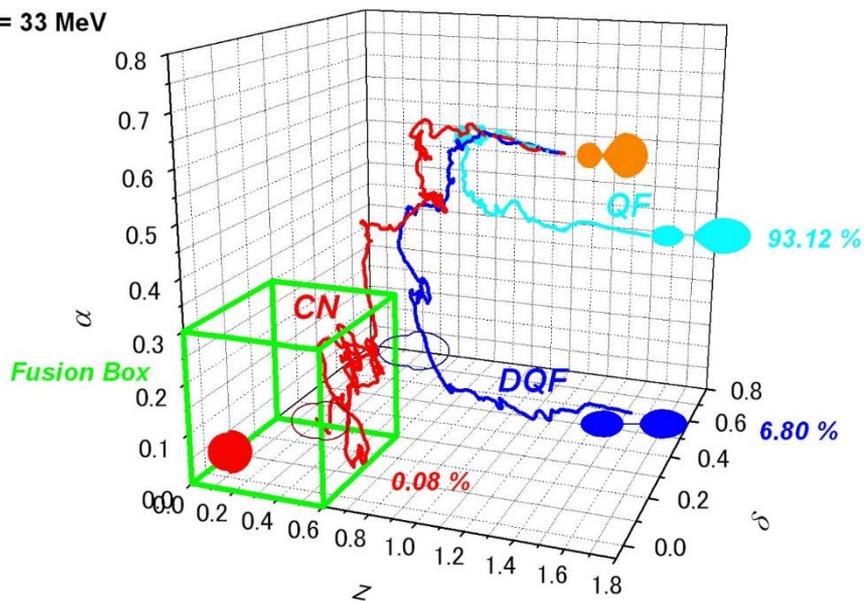
V.I. Zagrebaev and W. Greiner, NPA944('15)257

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

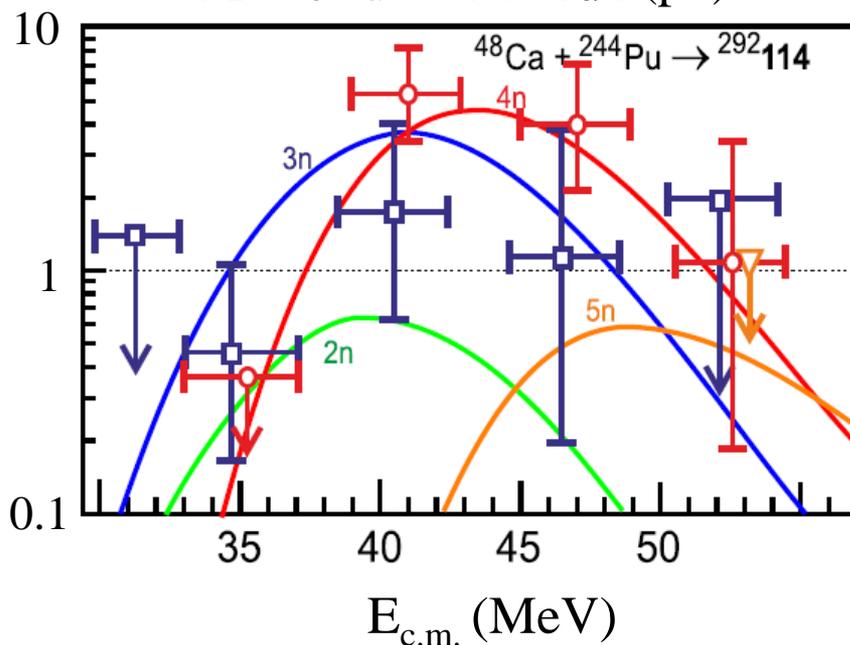
統計模型

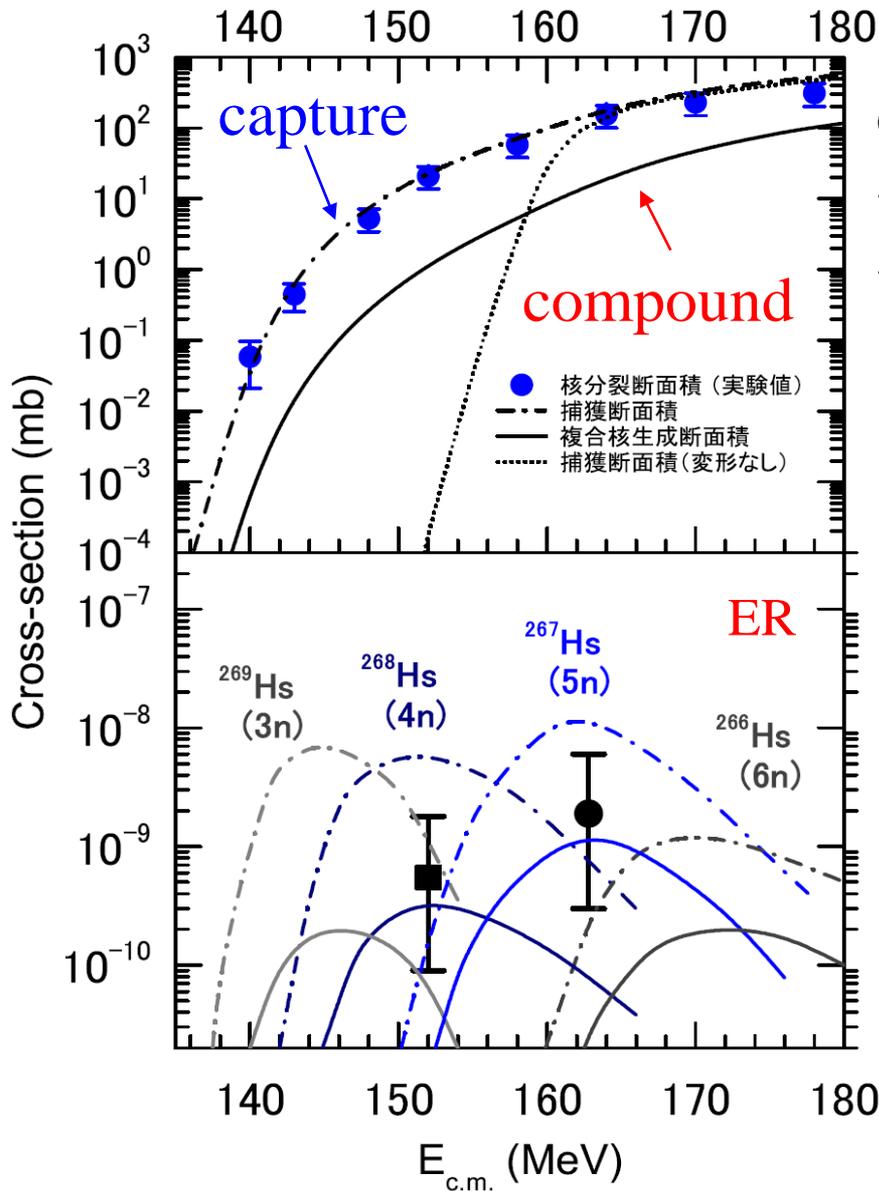
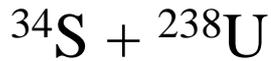


$E^* = 33 \text{ MeV}$



蒸発残留核の断面積 (pb)





coupled-channels (entrance)
+ Langevin (touching to CN)
+ statistical model

物理学会誌2013年10月号

◆◆◆ 解説 ◆◆◆

重イオン核融合反応と超重元素



萩野 浩一

東北大学大学院理学研究科
hagino@nucl.phys.tohoku.ac.jp



有友 嘉浩

東京工業大学原子工學研究所
arimoto.yoshihiro@nr.titech.ac.jp

自然界に存在する元素で最も重いものはこれまで測定された範囲ではプルトニウム (Pu) である。この元素は原子番号 94 を持ち、ウラン鉱石の中にわずかに含まれる。これより大きい原子番号の元素、例えば、96 番元素のキュリウム (Cm) や 100 番元素のフェルミウム (Fm) は人工的には作れるが、自然界には存在しない。これは何故だろうか？ どのような機構で最も重い元素の原子番号が決まっているのだろうか？

させて大きな原子核 (複合核) を作る反応である (右下図)。しかし、超重核領域では、この複合核が生成されること自体が稀である。この領域では、接触した二つの原子核が変形して融合核を形作る前に強いクーロン斥力により再び分離してしまうという準核分裂が起きやすいためである。更に、できた複合核は圧倒的な確率で核分裂により崩壊する。寿命がある程度長い元素ができたことを確認するには、中性子などの放出

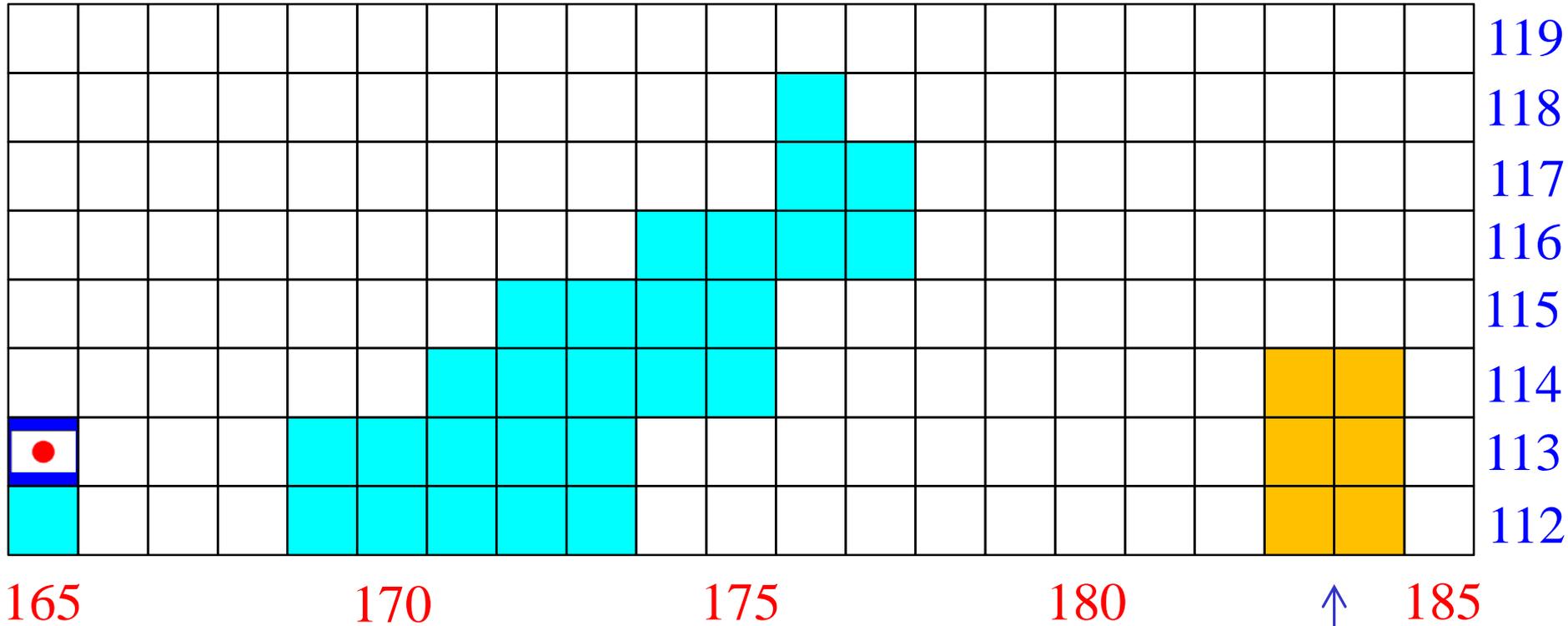
—Keywords—

核融合・複合核:
二つの原子核が融合して一つの原子核になることを核融合と呼び、融合してできた核を複合核と呼ぶ。

殻構造・安定の島:
原子の中で電子軌道が殻構造を持ち、最外殻が満たされる (閉殻) と化学的に安定な原子 (不活性ガス) に近くなるのと同様に、原子核の中の陽子や中性子のエネルギー準位にも殻構造があり

<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009674452>
からダウンロードできます

これまでに作られた超重核



安定の島はこの辺り(?)

島にたどり着くためには中性子過剰核ビームが必要不可欠

将来の重要課題(反応系、ビームのエネルギー、断面積の見積もり)

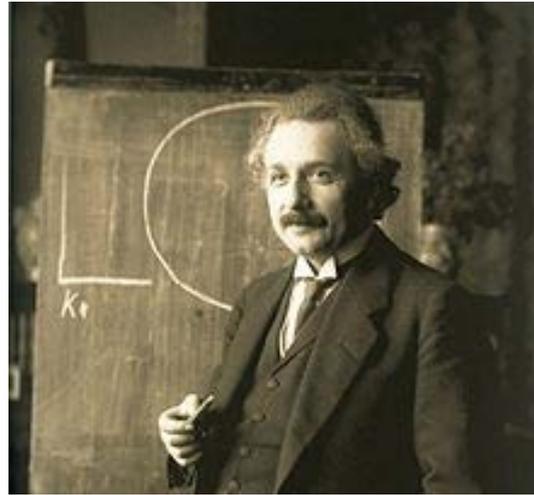
超重元素の化学

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		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 Sq	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
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			

- 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

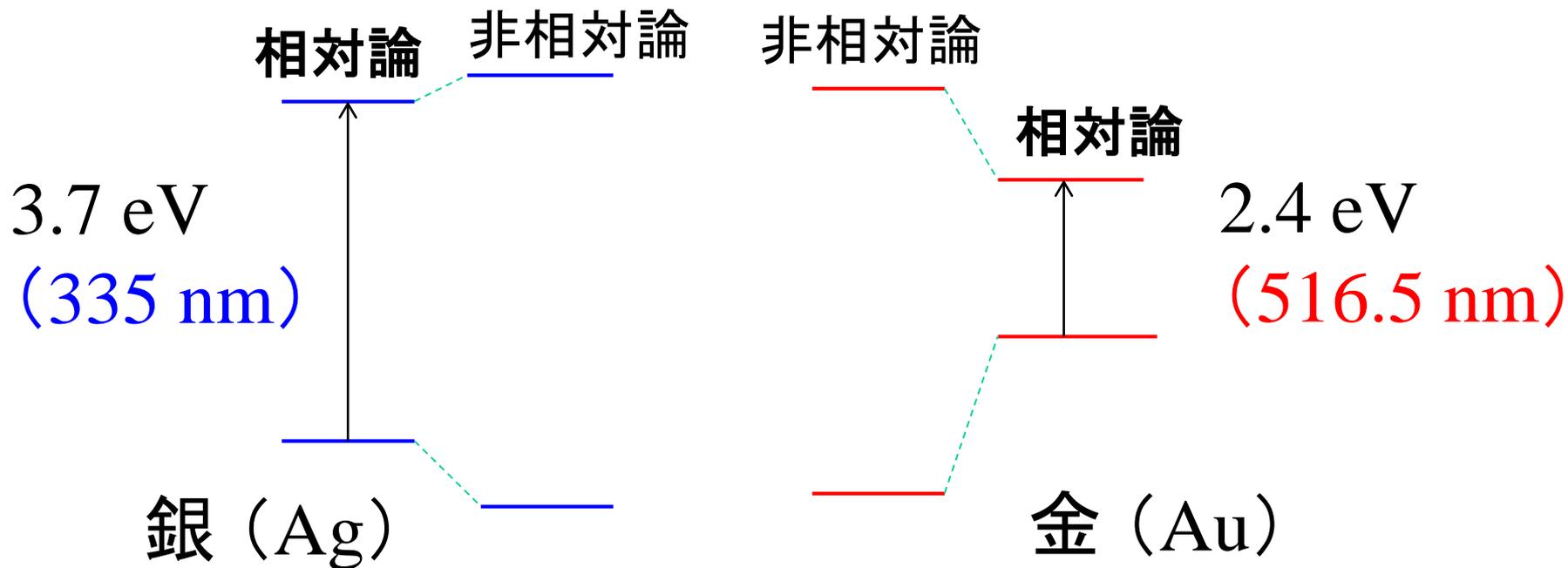
$$E = mc^2$$



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、

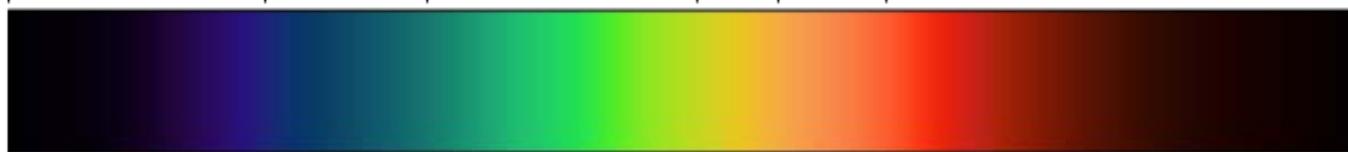
$$E_{1S} = mc^2 \sqrt{1 - (Z\alpha)^2} \sim mc^2 \left(1 - \frac{(Z\alpha)^2}{2} - \frac{(Z\alpha)^4}{8} + \dots \right)$$

相対論的効果



可視光

335 nm 380 nm 517 nm 750 nm

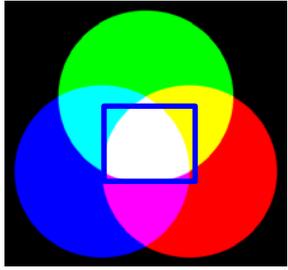


吸收(金)

反射(金)

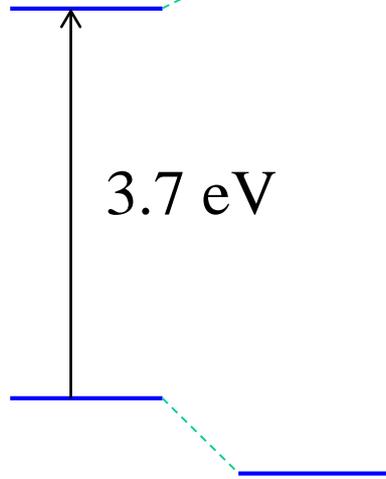


反射(銀)

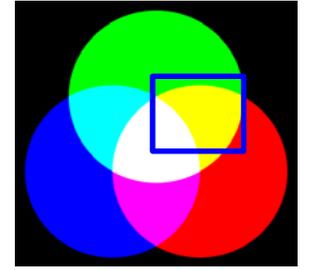
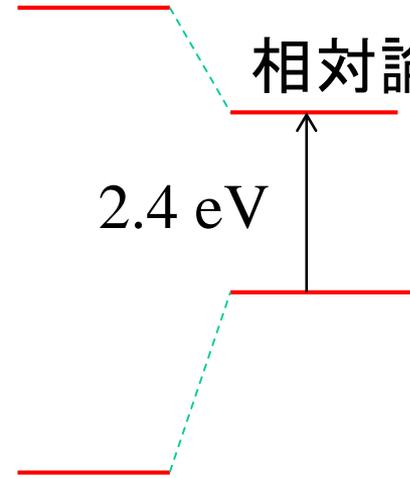


光の
吸収なし

相対論 非相対論



非相対論



青色の光
が吸収

相対論



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		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 Sq	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
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			

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