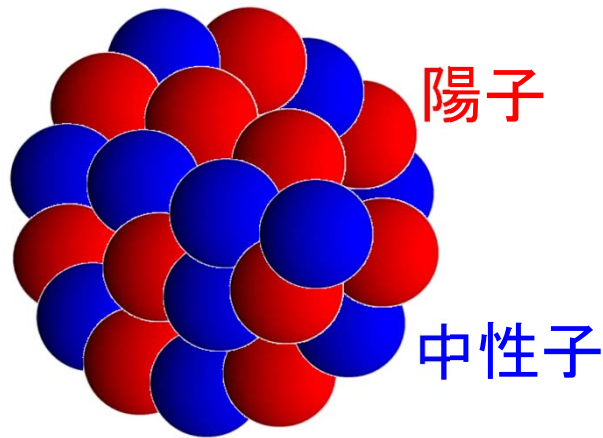


原子核 = 強い相互作用をする粒子(ハドロン)
の集合体



Z個の陽子と
N個の中性子
フェルミオン多体系

- 有限量子多体系
- 自己束縛系

粒子が**多体系**をつくることによって初めて現われる豊富で多様な物理現象の解明

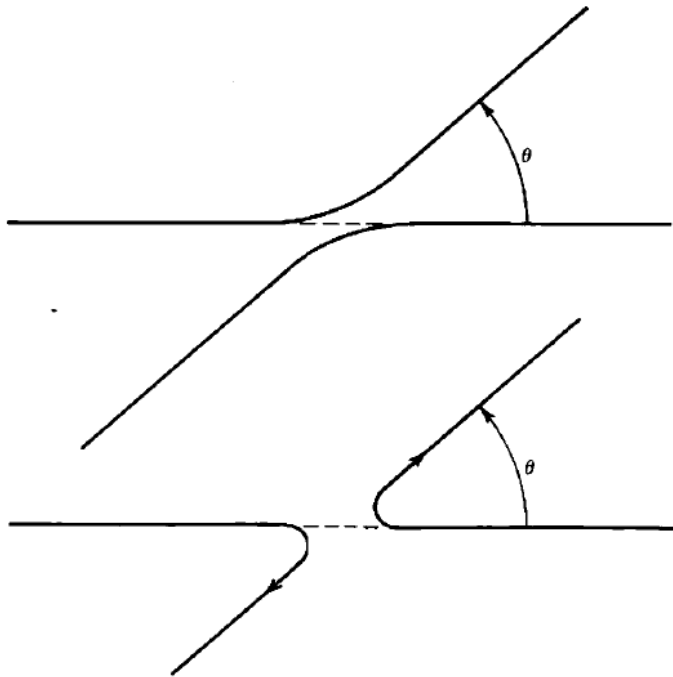
「量子多体論」

- 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

原子核反応にみる量子力学: Mott 散乱

同種粒子の散乱

$$\begin{aligned}\frac{d\sigma}{d\Omega} &= |f(\theta) \pm f(\pi - \theta)|^2 \\ &= |f(\theta)|^2 + |f(\pi - \theta)|^2 \pm f^*(\theta)f(\pi - \theta) \pm f(\theta)f^*(\pi - \theta)\end{aligned}$$



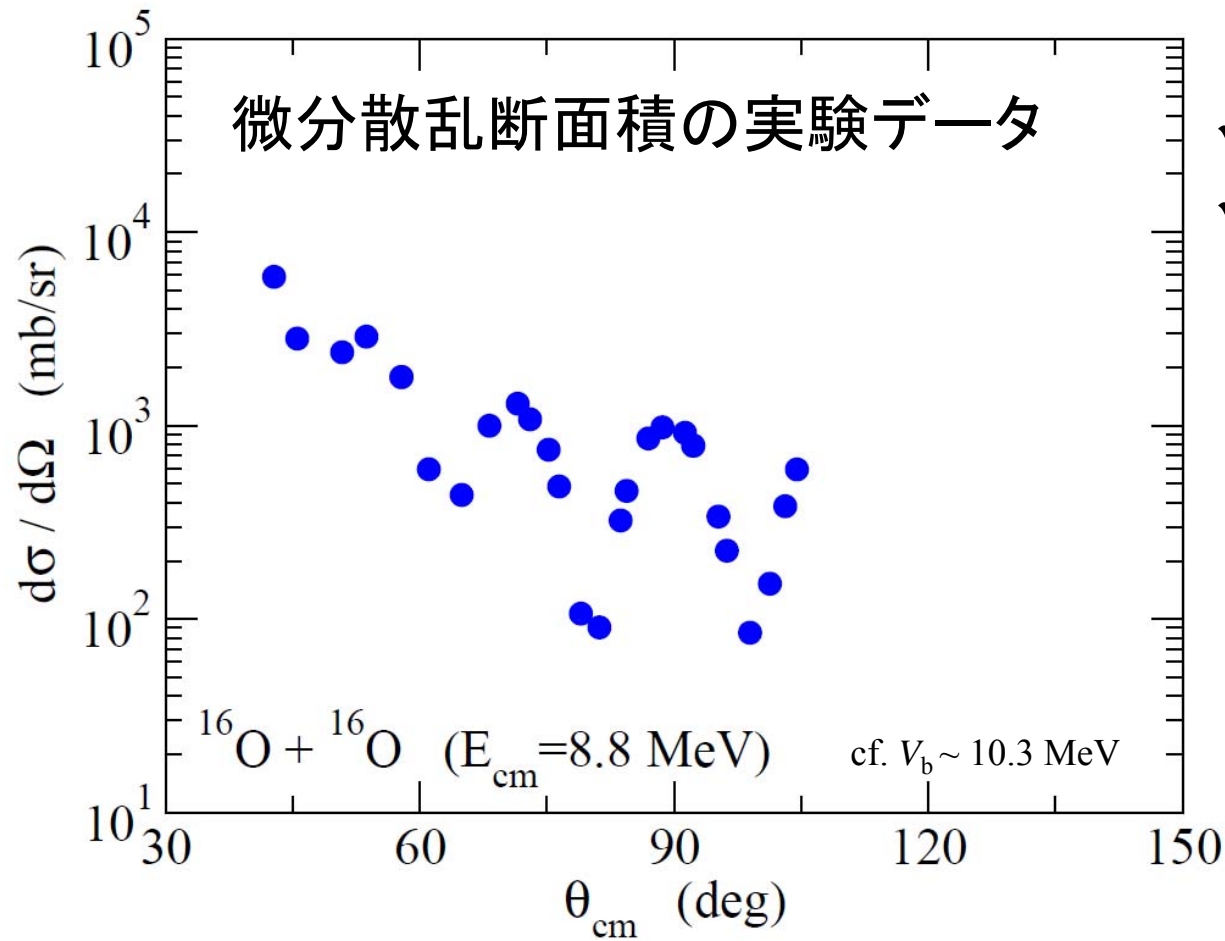
2つのプロセスは区別できない



量子力学では、
確率振幅を足してから2乗

→ 干渉

^{16}O 原子核による ^{16}O 原子核の弾性散乱

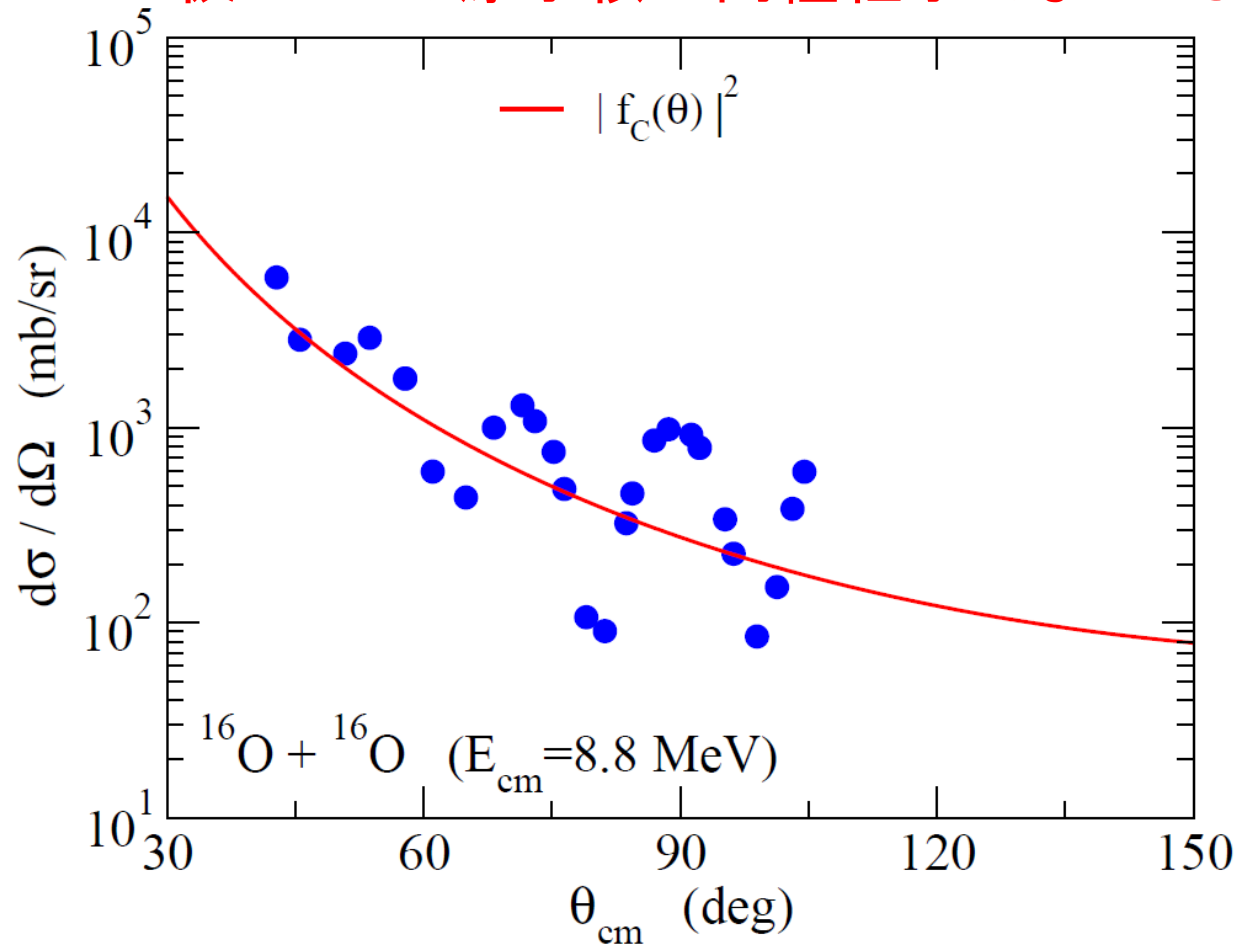


- ✓ (重心系で)90度対称
- ✓ 振動パターン

D.A. Bromley et al.,
Phys. Rev. 123('61)878

^{16}O 原子核による ^{16}O 原子核の弾性散乱

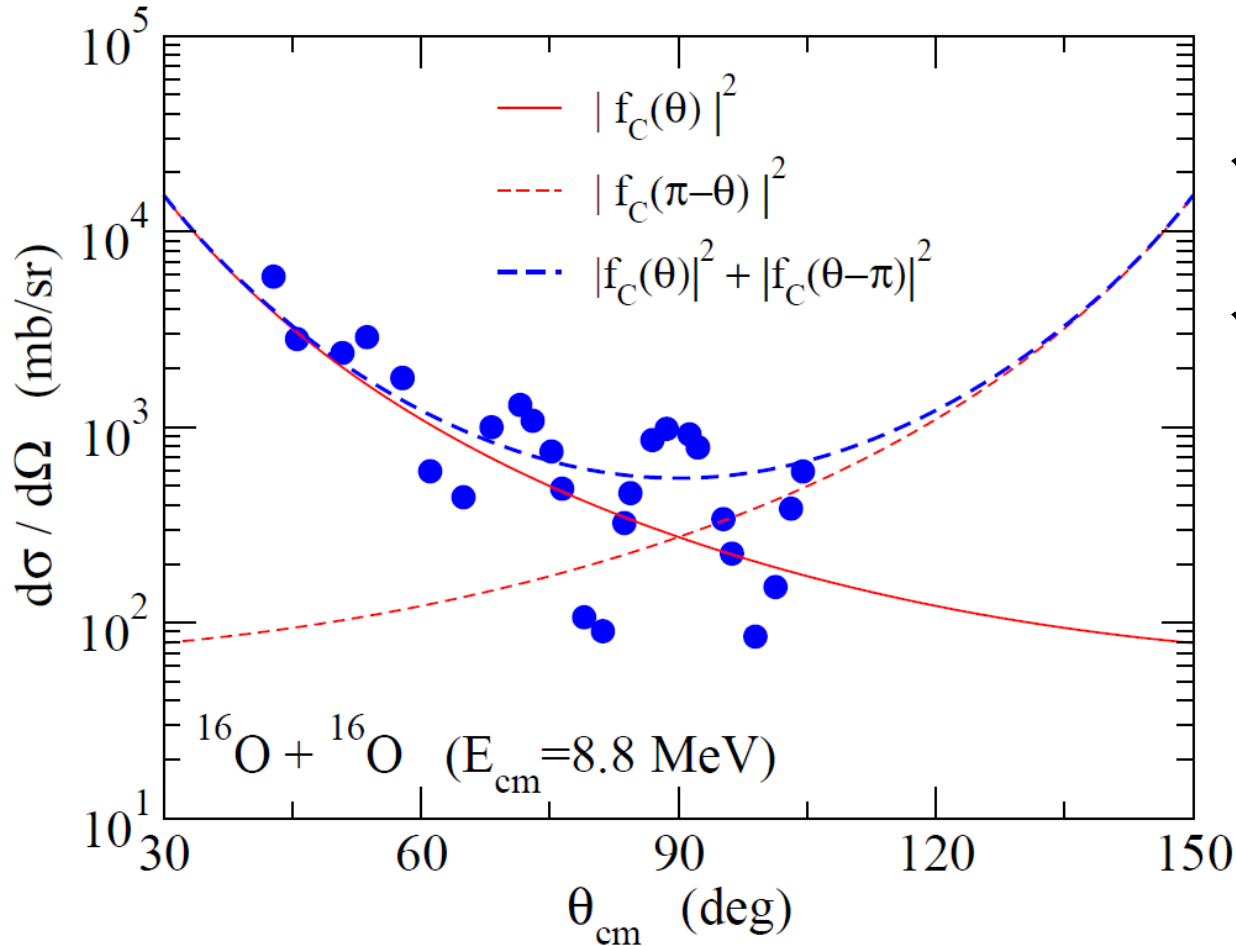
仮に2つの原子核が同種粒子でないとした場合



- ✓ (重心系で)90度対称
- ✓ 振動パターン
- ともに説明不可

^{16}O 原子核による ^{16}O 原子核の弾性散乱

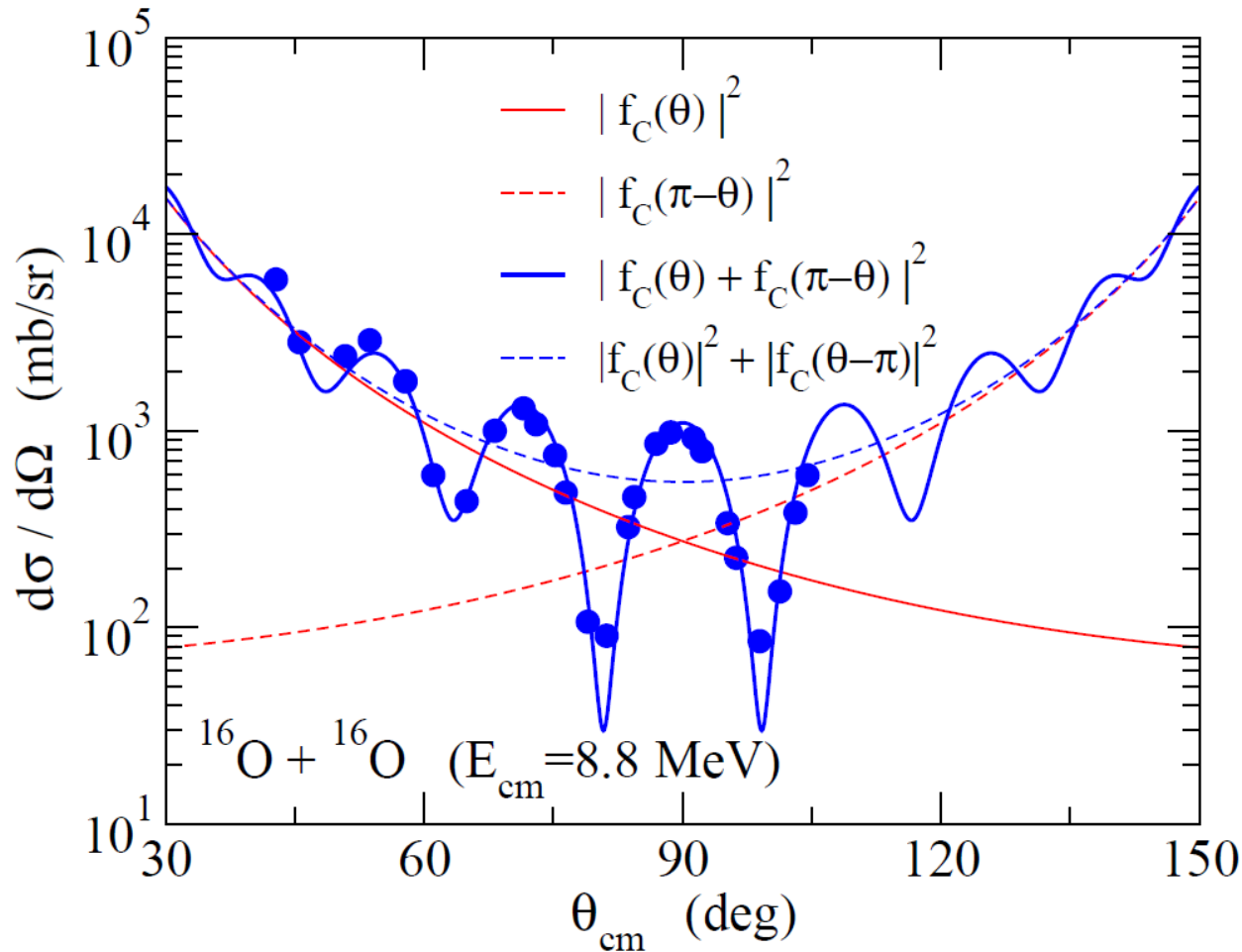
同種粒子であることは考慮するが「古典力学的に」足した場合
(2乗してから足す)



- ✓ (重心系で)90度対称はOKだが
- ✓ 振動パターンはダメ

^{16}O 原子核による ^{16}O 原子核の弾性散乱

量子力学的に振幅を足してから2乗する場合

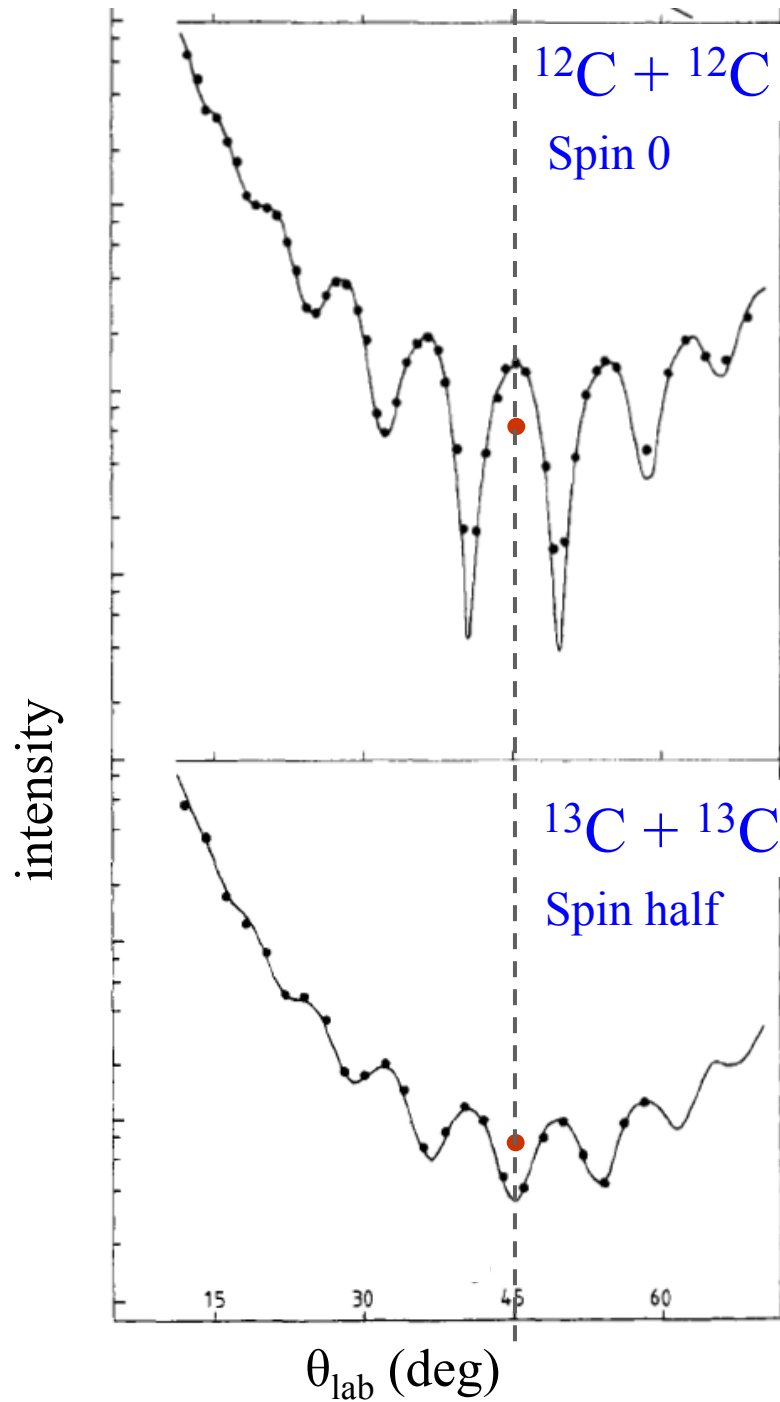


- ✓ (重心系で)90度対称
- ✓ 振動パターン(干渉)

の両方ともOK

原子核が量子力学的な振る舞いをする恰好の例の一つ

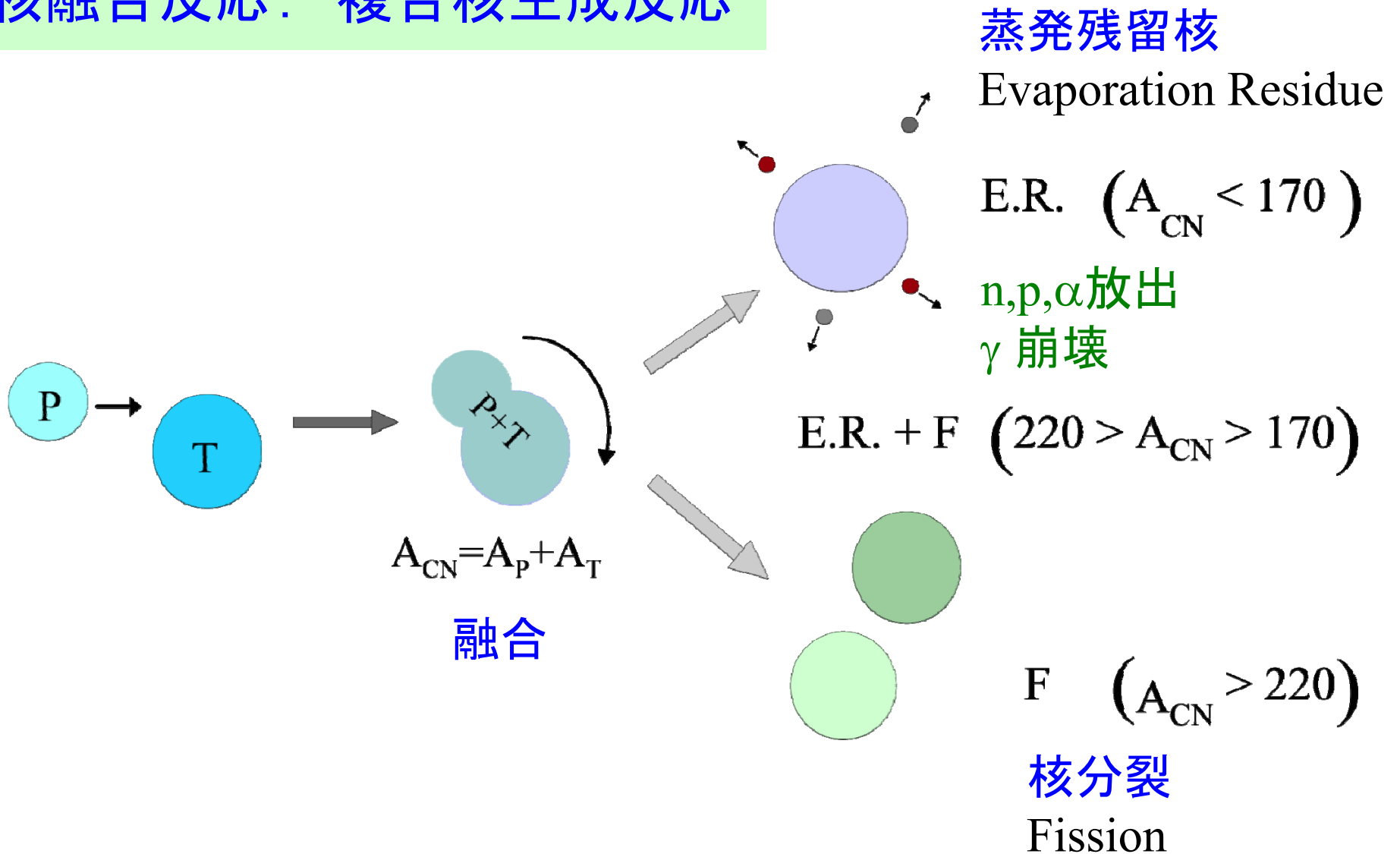
cf. ただし重イオン反応は古典的な概念で理解できることもしばしば(のちほど)



同種ボゾン系
constructive interference

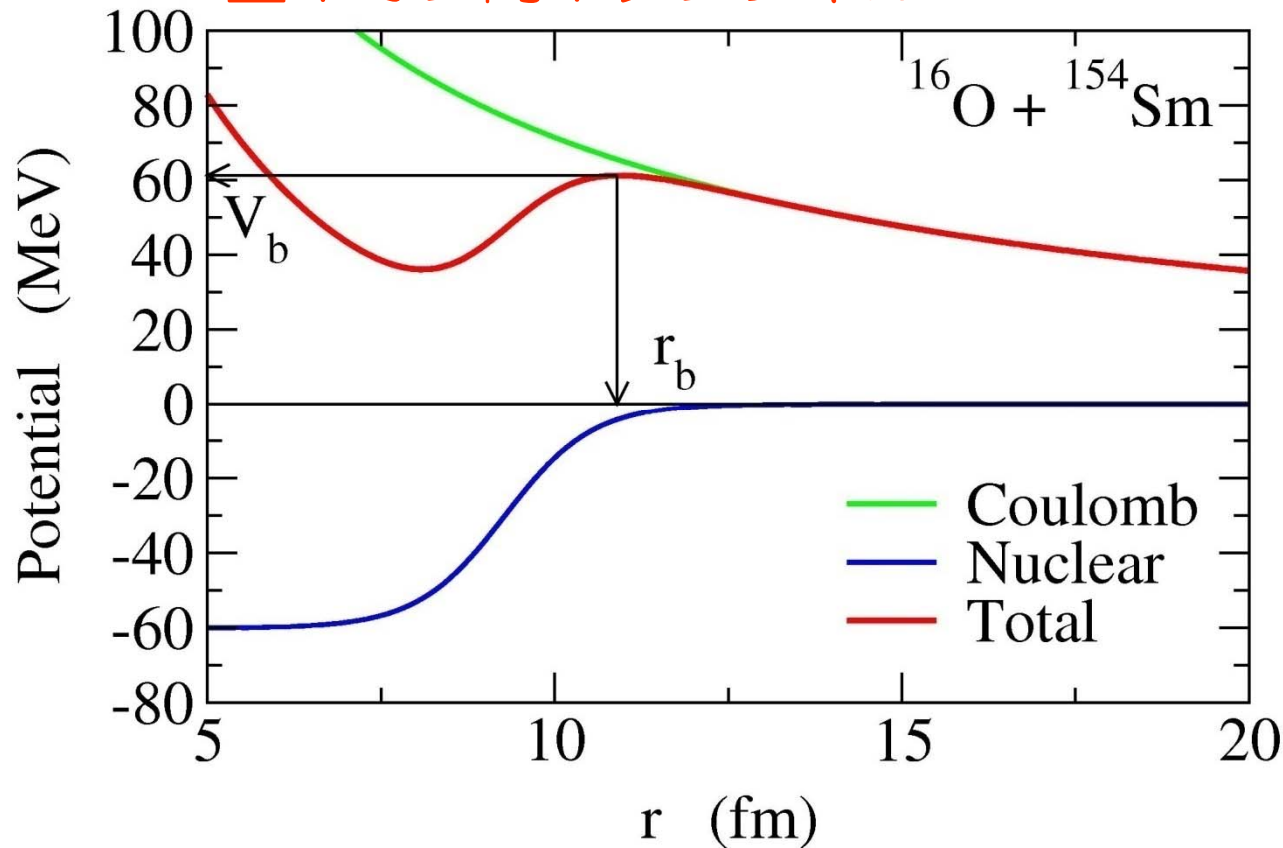
同種フェルミオン系
destructive interference

核融合反応： 複合核生成反応



courtesy: Felipe Canto

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

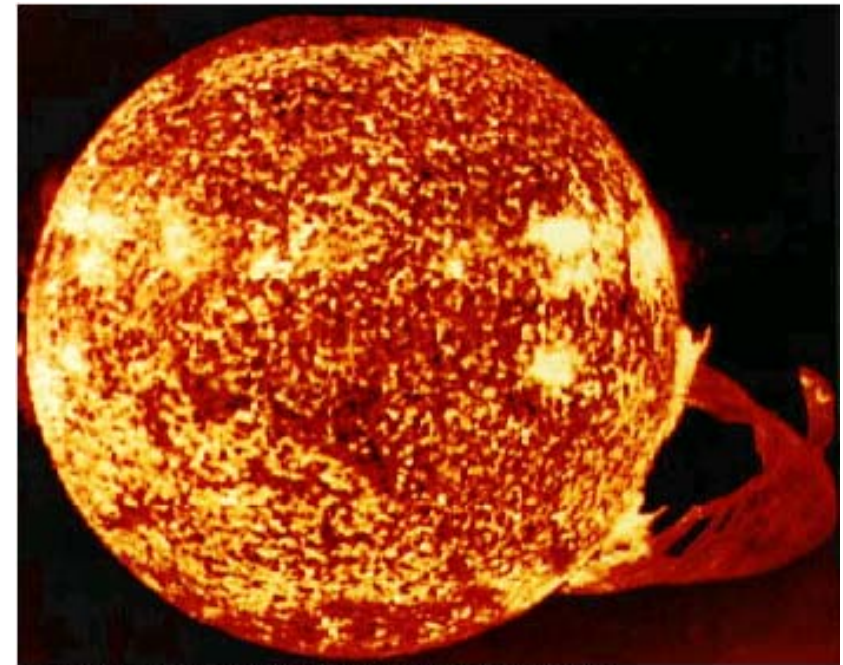
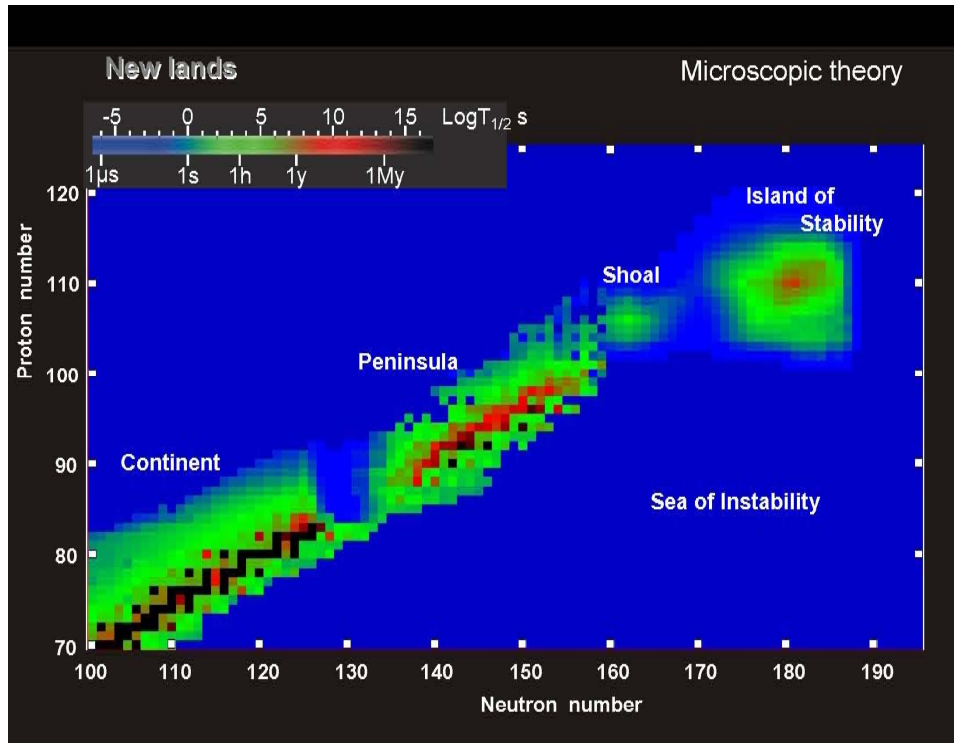


両者の打ち消しあいによりポテンシャル障壁が形成
(クーロン障壁)

- 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？

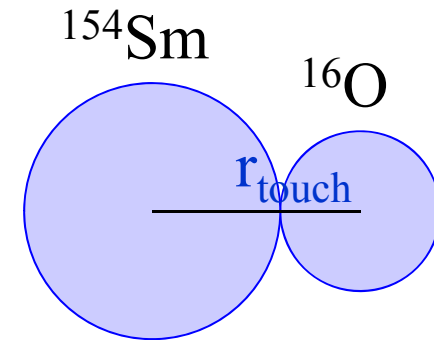
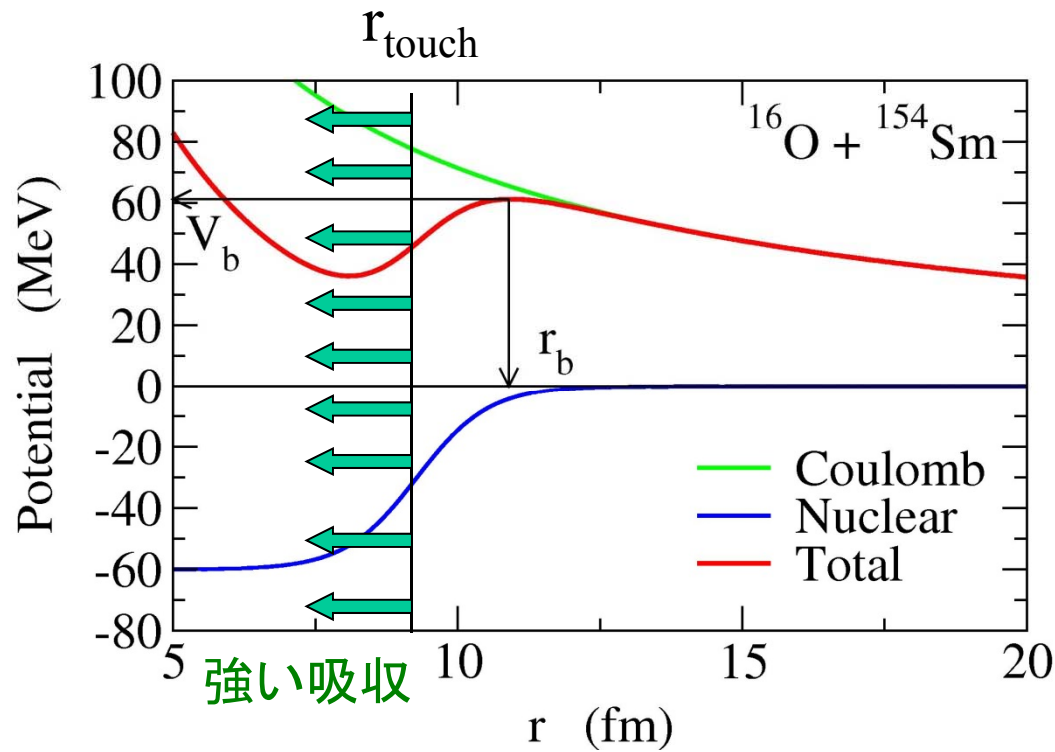
2つのわかりやすい理由:



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)

クーロン障壁内部での強い吸収

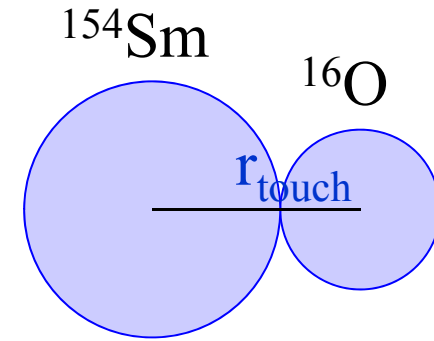
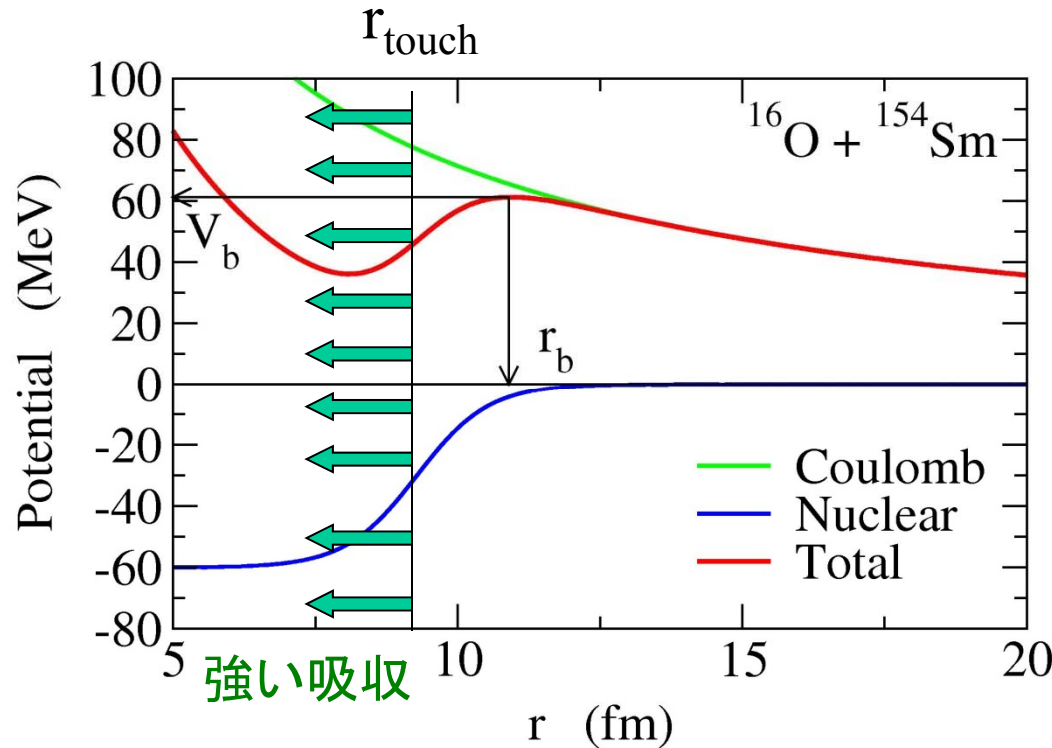


一度接触すると自動的に
複合核を形成
(強吸収の仮定)

(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

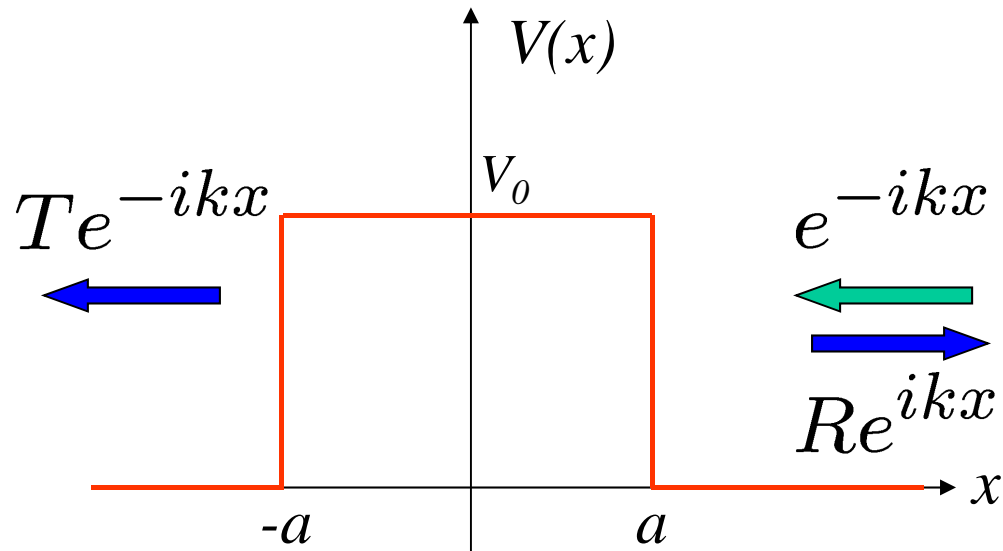


障壁の透過確率

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

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

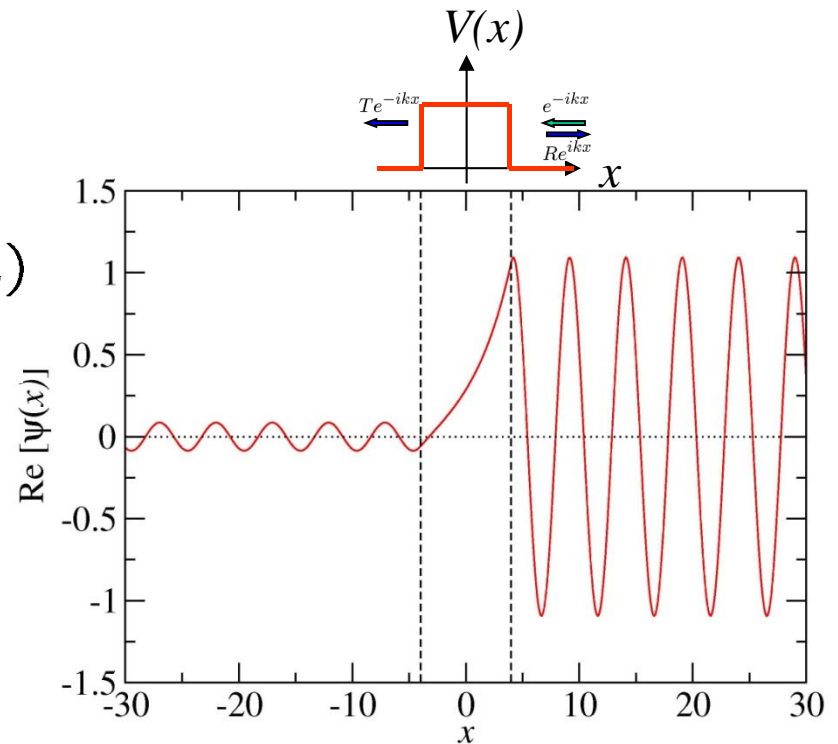


$$\begin{aligned} \psi(x) &= T e^{-ikx} & (x \leq -a) \\ &= A e^{-\kappa x} + B e^{\kappa x} & (-a < x < a) \\ &= e^{-ikx} + R e^{ikx} & (x \geq a) \end{aligned}$$

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

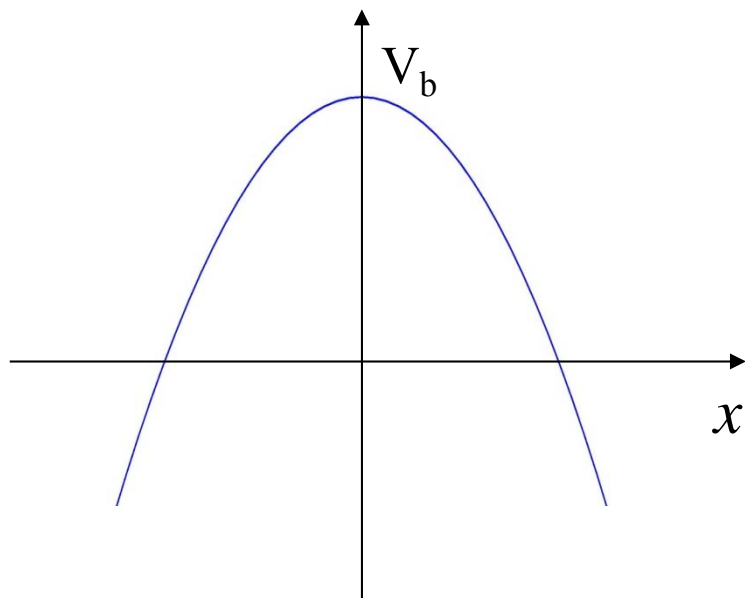
$$\kappa = \sqrt{2m(V_0 - E)/\hbar^2}$$

トンネル確率: $P(E) = |T|^2$

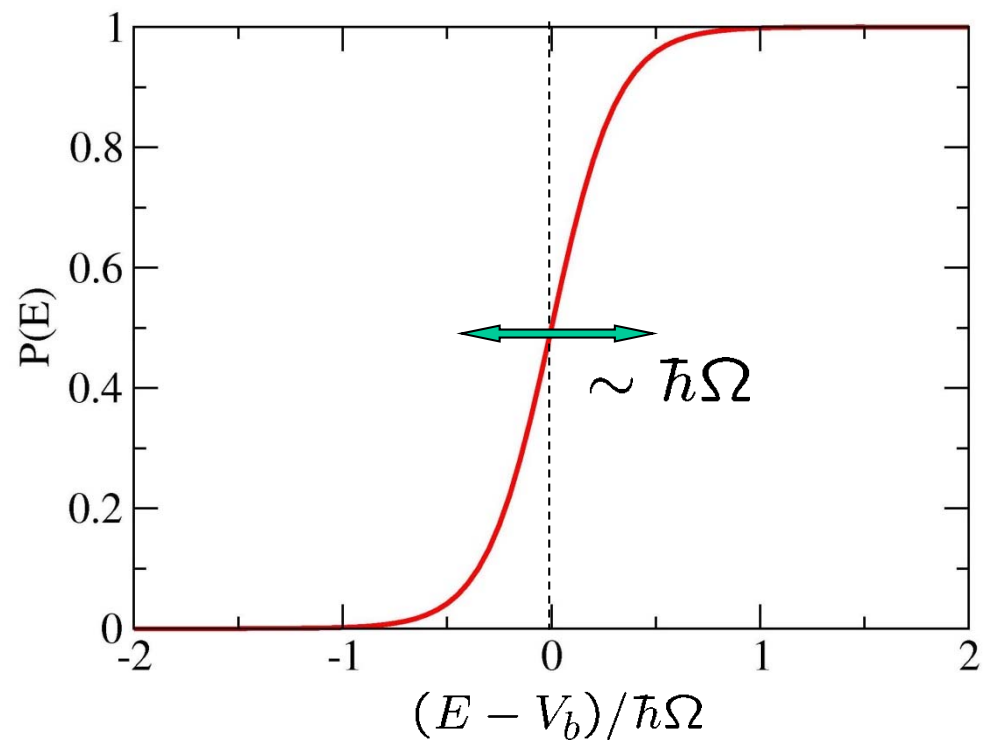


放物線障壁だと.....

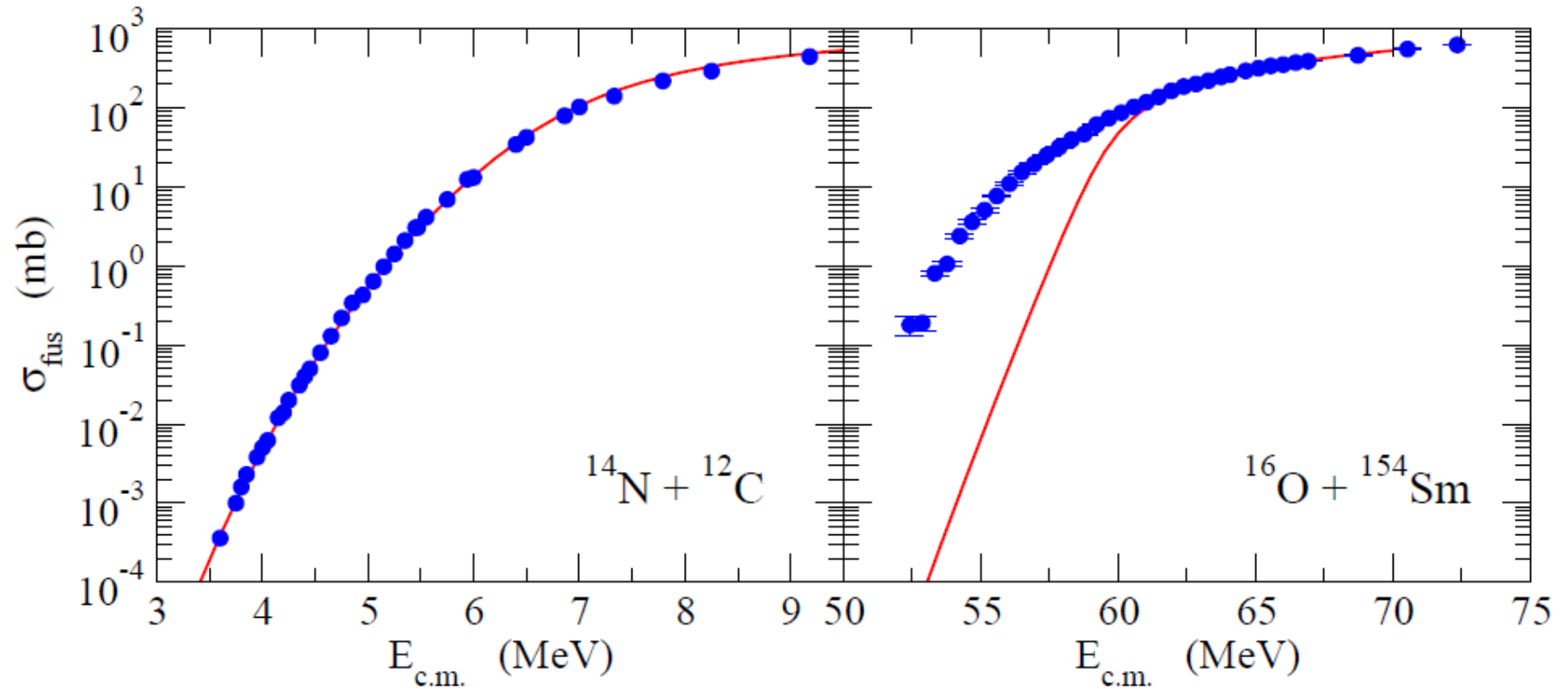
$$V(x) = V_b - \frac{1}{2}m\Omega^2 x^2$$



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



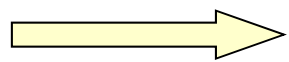
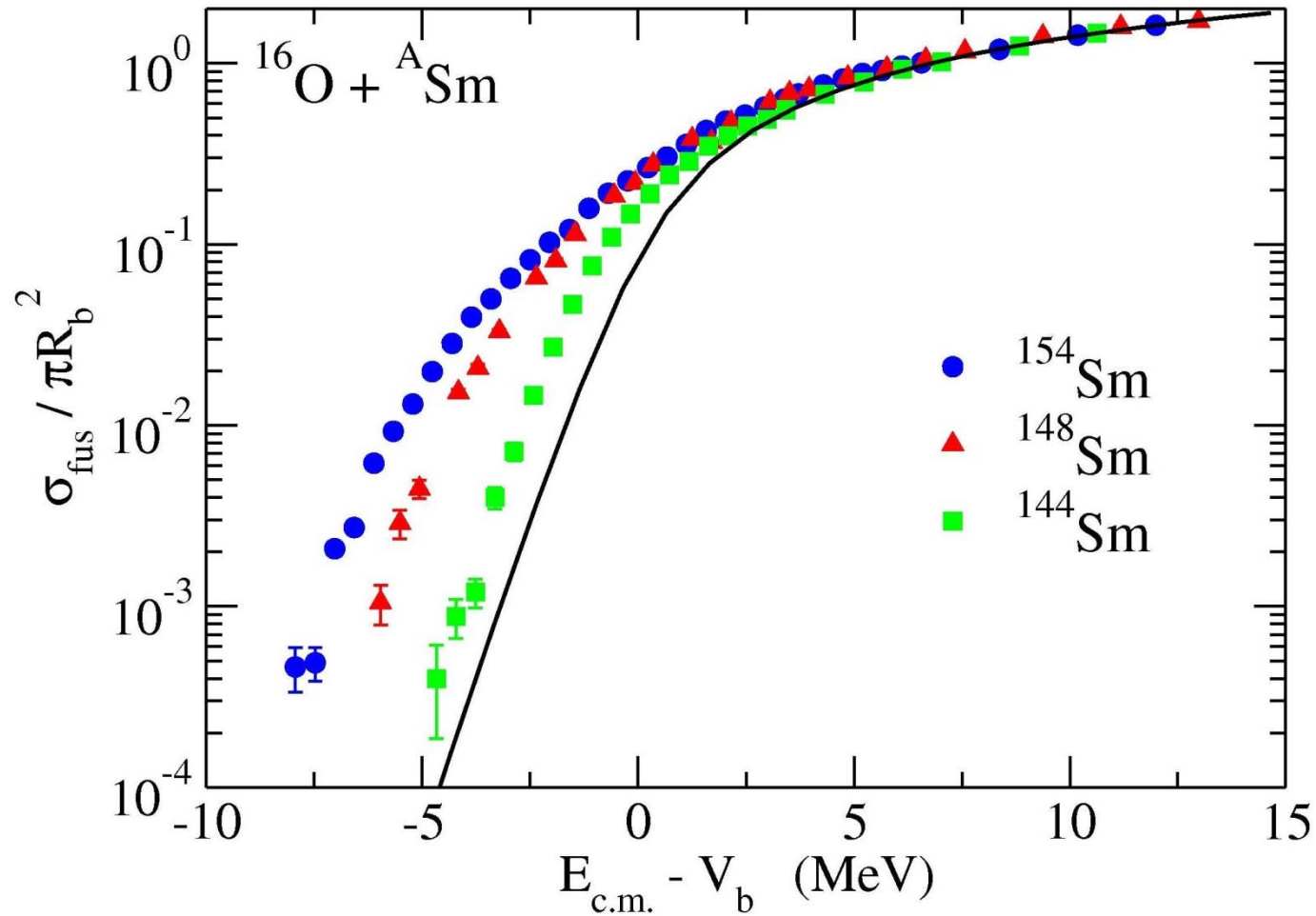
2つの原子核に構造がないとして、適当なポテンシャルを用いて計算



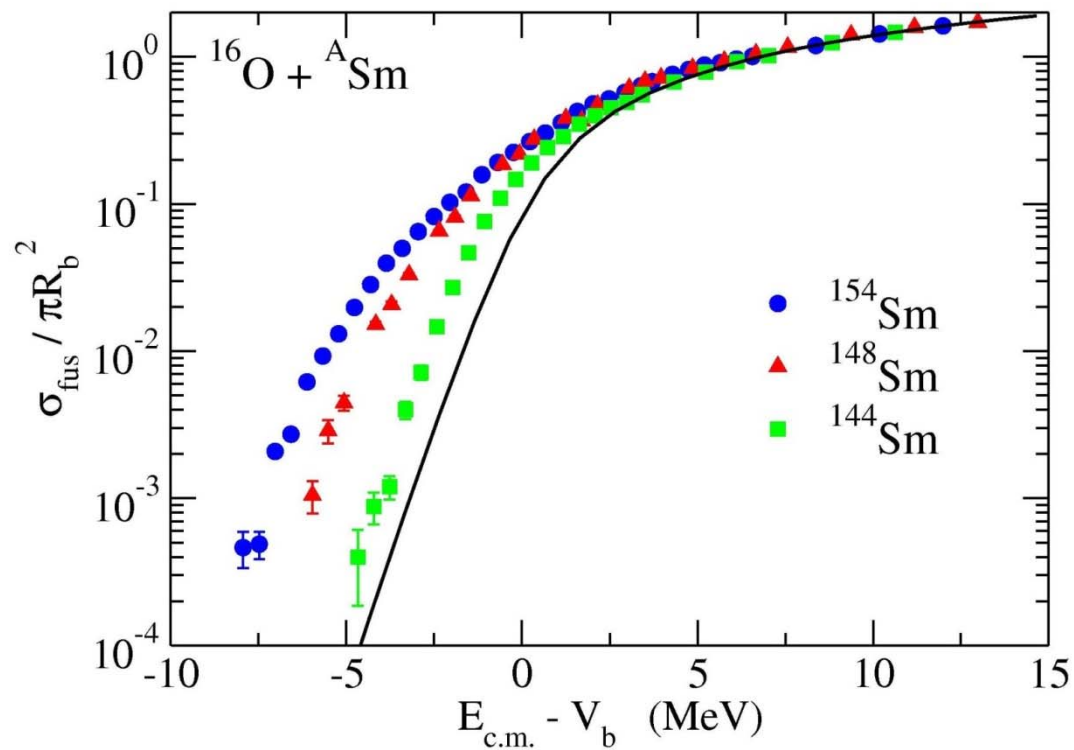
単純なポテンシャル模型：

- 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。

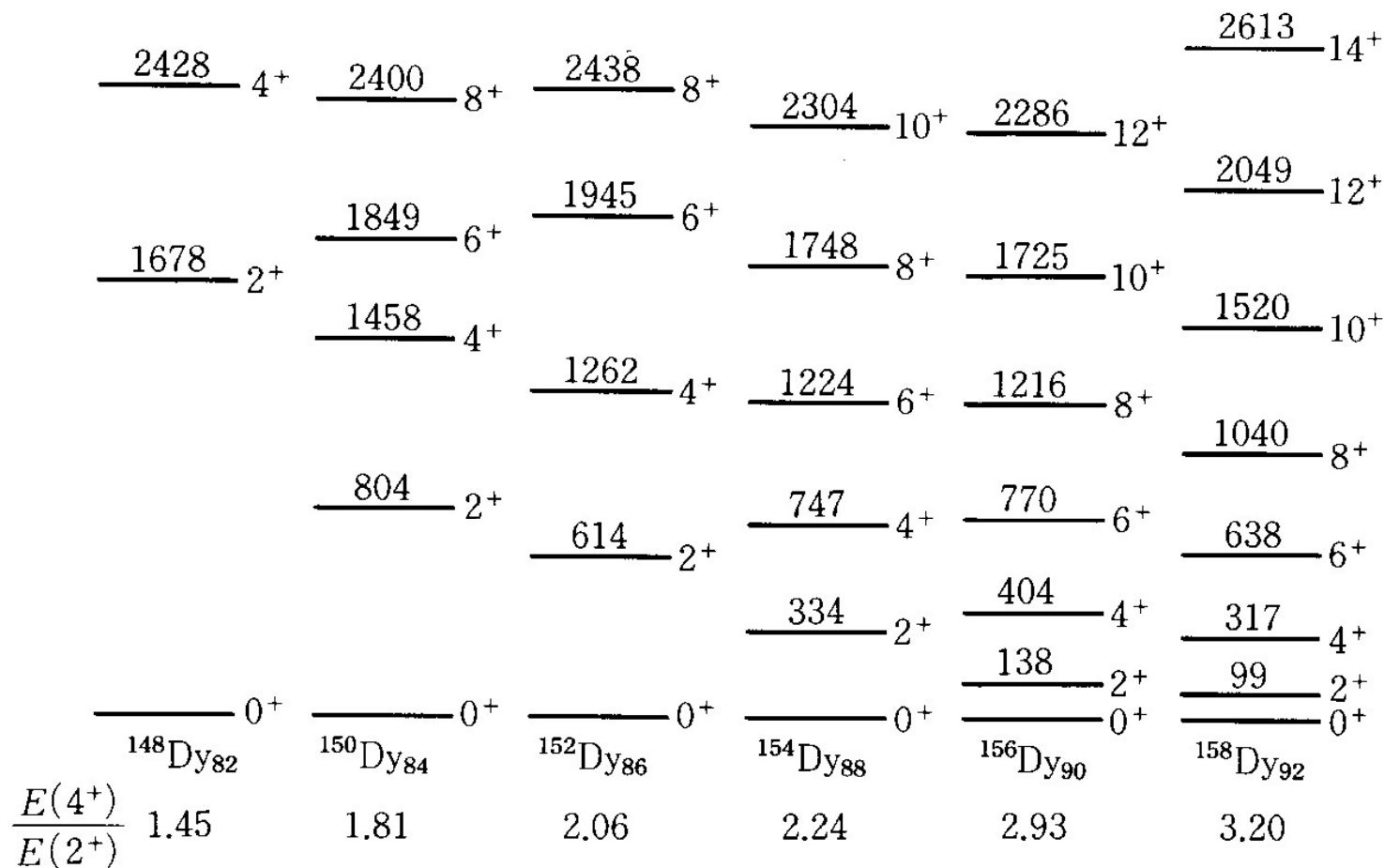


図 3-4 Dy アイソトープの低励起スペクトル。励起エネルギーの単位は keV.

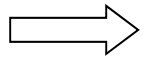
市村、坂田、松柳
「原子核の理論」より

核融合反応に対する集団励起の影響：回転の場合

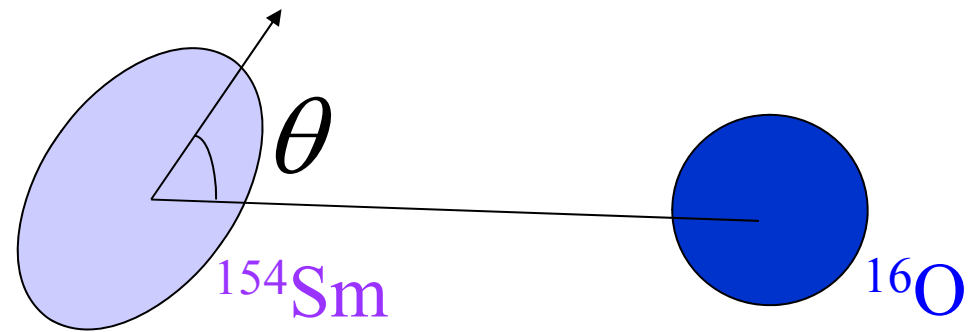
^{154}Sm の方向は反応中にほとんど変化しない

(note)

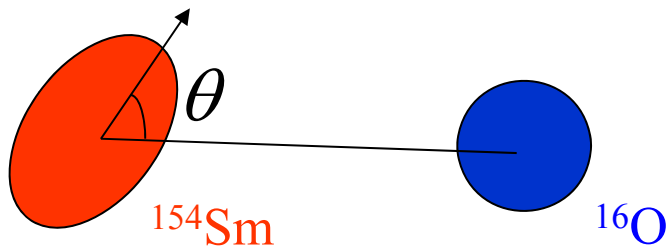
反応の初期は基底状態
(0^+ 状態)



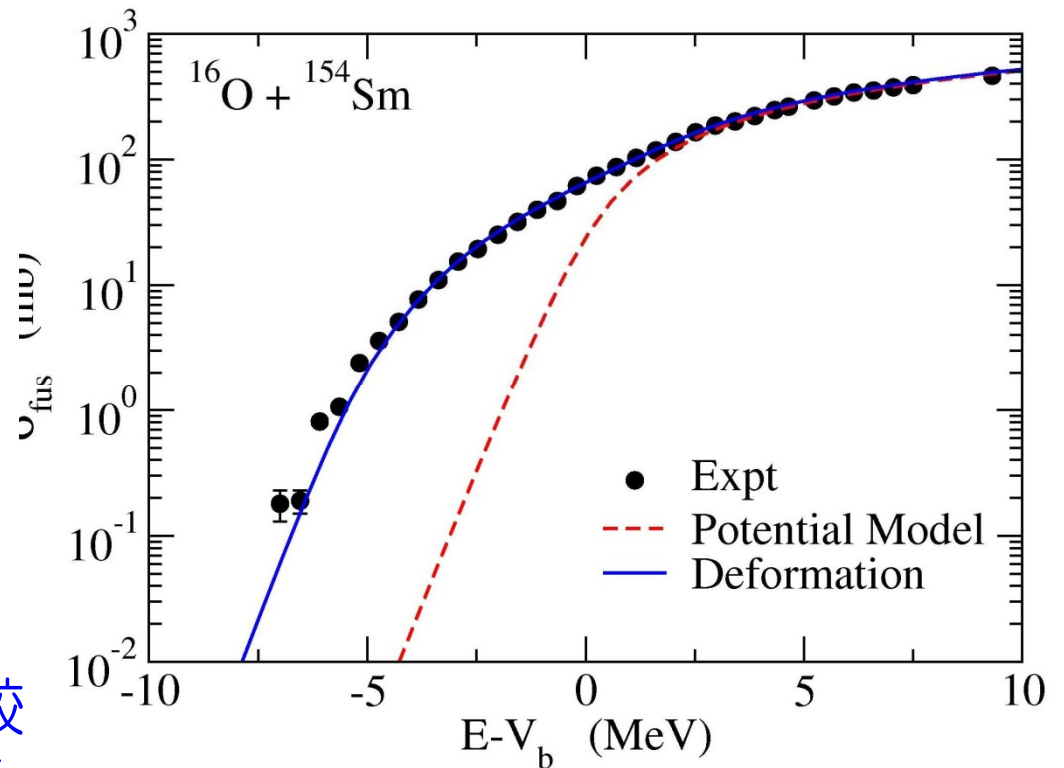
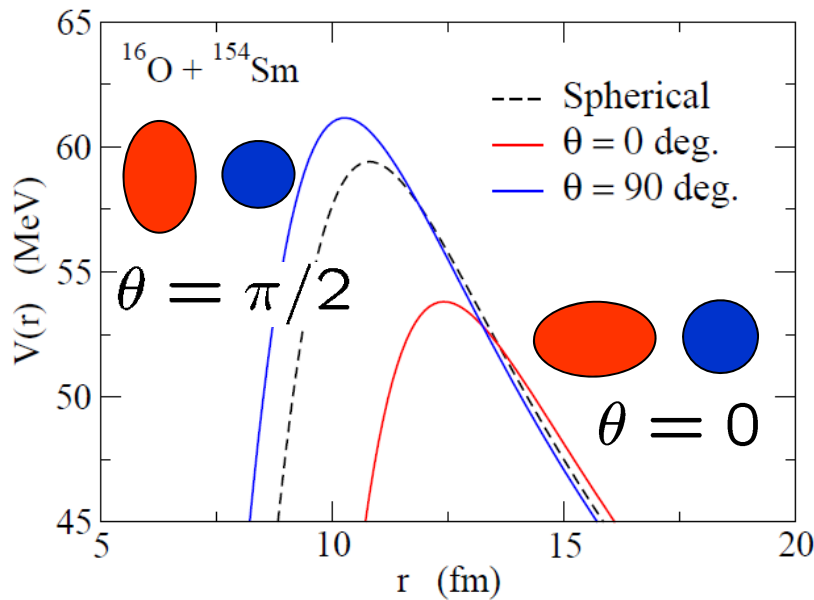
あらゆる方向が等確率
で混ざっている



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



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



$\theta = 0$ 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。

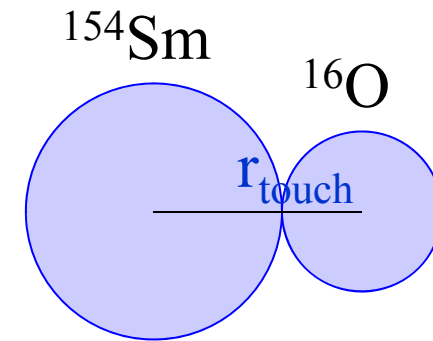
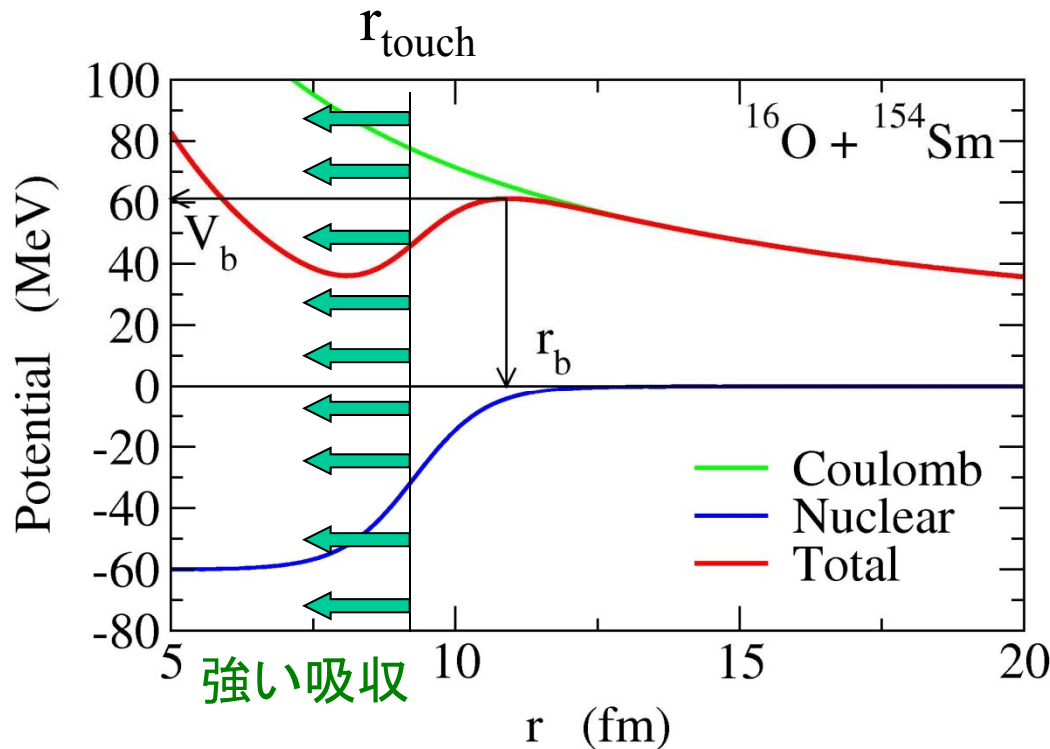
$\theta = \pi/2$ はその逆。近づかないと引力が働かないため障壁は上がる。

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:

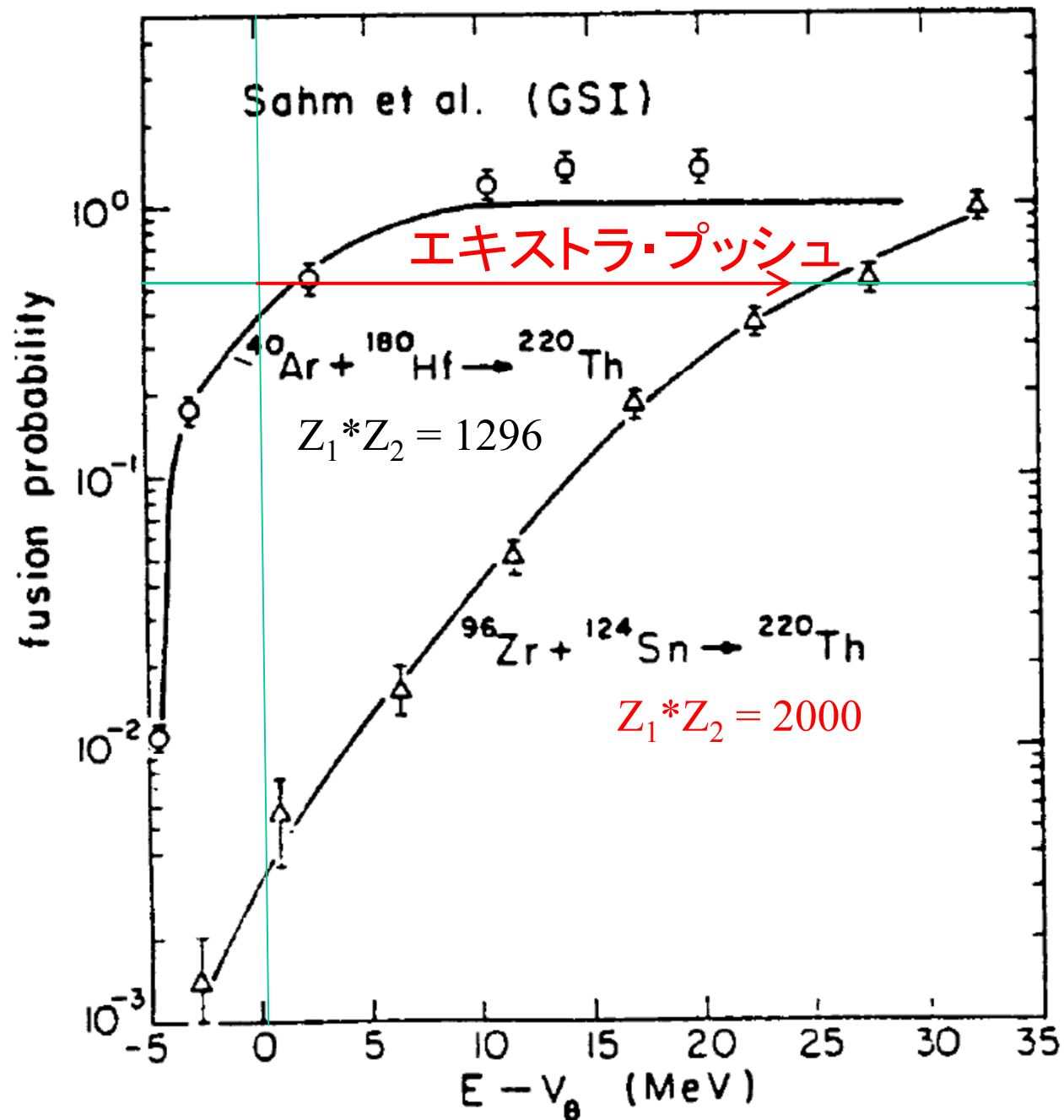


一度接触すると自動的に複合核を形成
(強吸収の仮定)

➤ 重核・超重核領域における核融合反応:

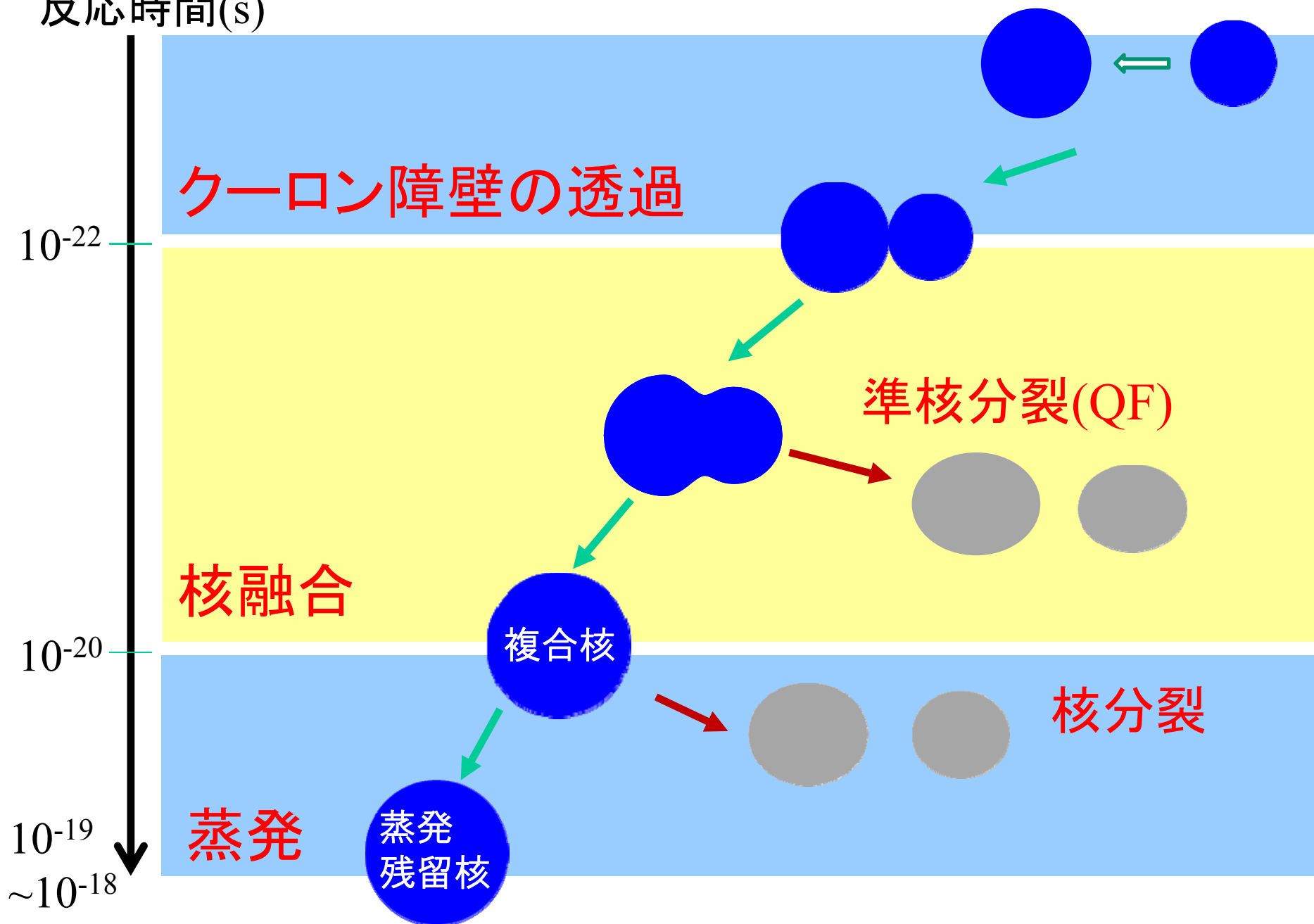
接触しても大きな確率で離れてしまう(クーロン反発が強いため)

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)

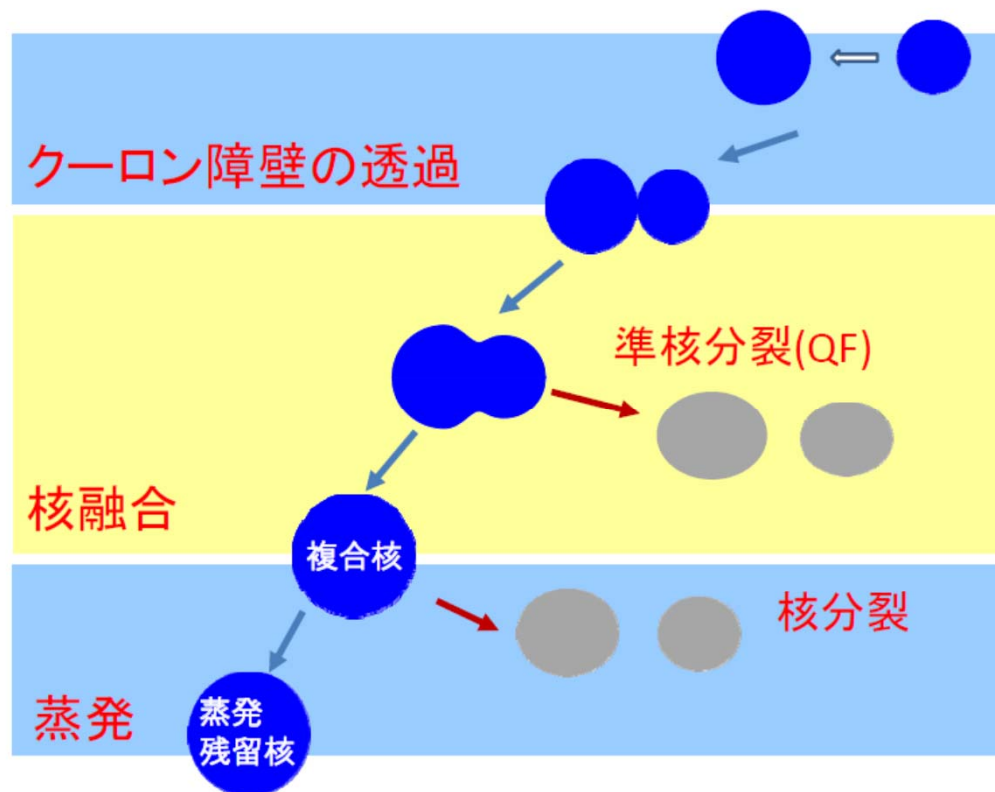


* どのように核融合反応断面積を測定するのか?

➤ 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:



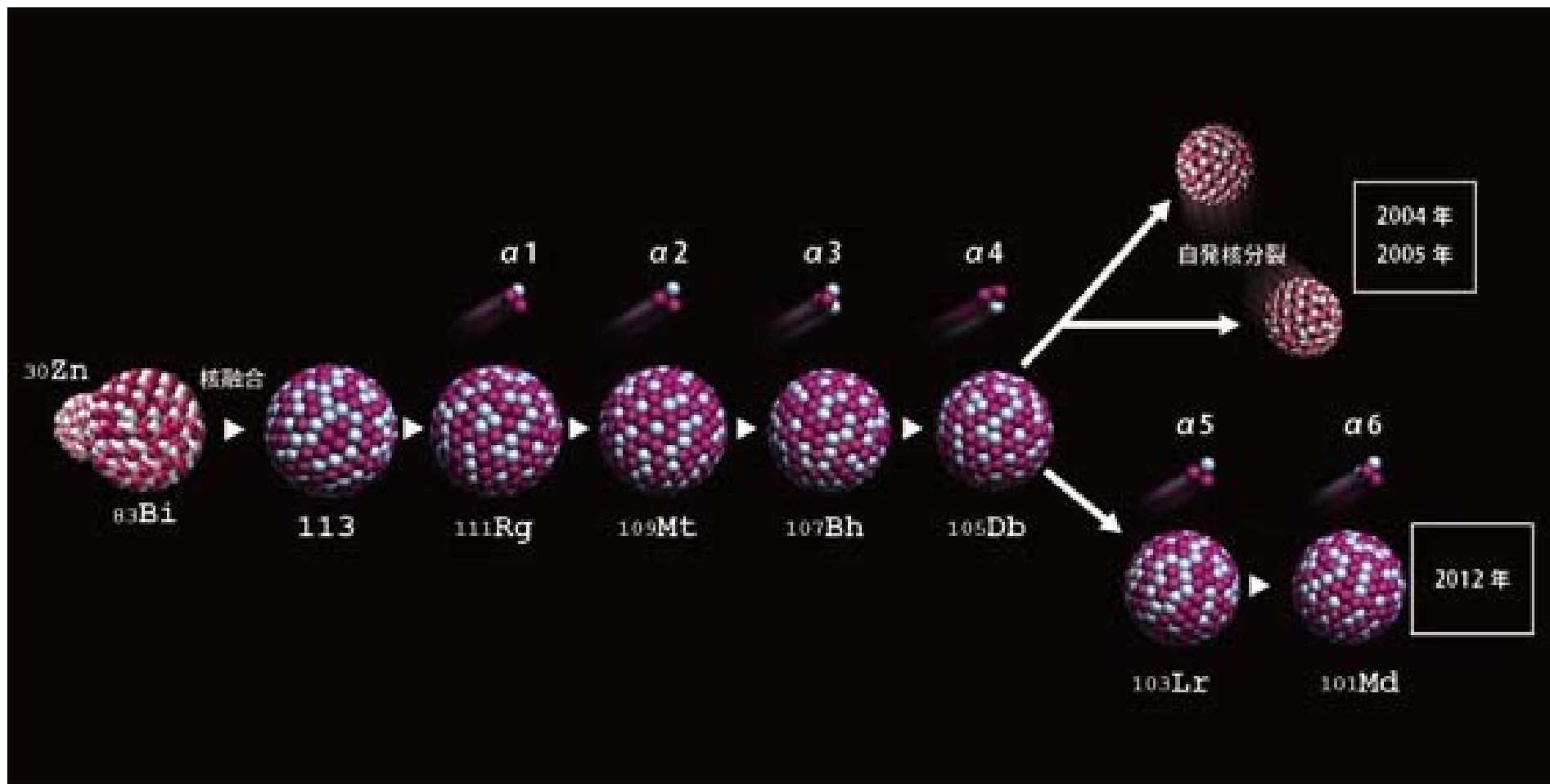
準核分裂+生き残りの2重苦

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)

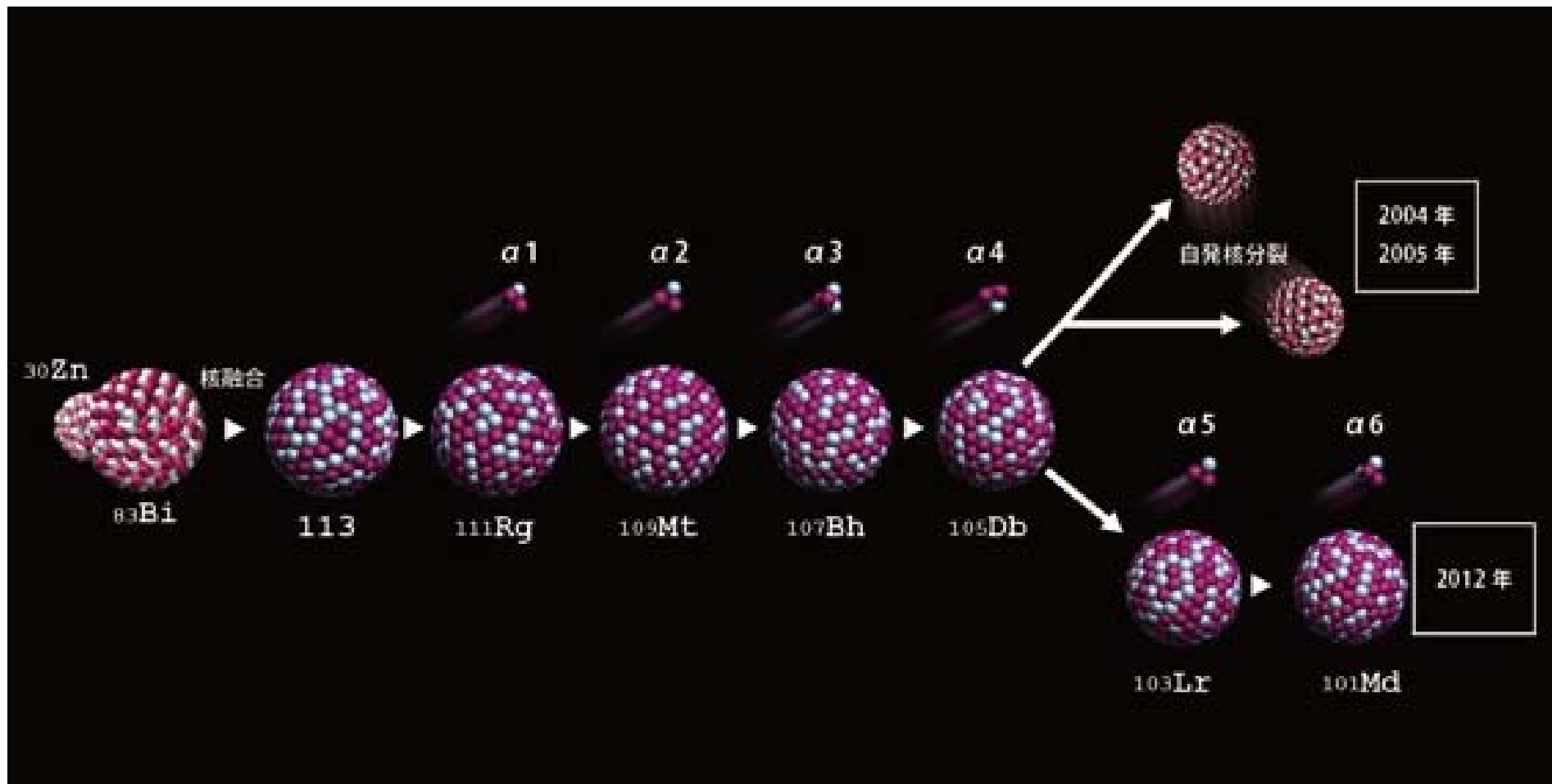
113番元素の合成の成功(理研:森田浩介氏のグループ)



K. Morita et al., J. Phys. Soc. Jpn. 81('12)103201

$$\sigma_{\text{ER}} = 22^{+20}_{-13} \text{ fb} \quad (\text{全553日の実験で3イベント})$$

113番元素の合成の成功(理研:森田浩介氏のグループ)



K. Morita et al., J. Phys. Soc. Jpn. 81('12)103201

日本の名前がつくかなあ？