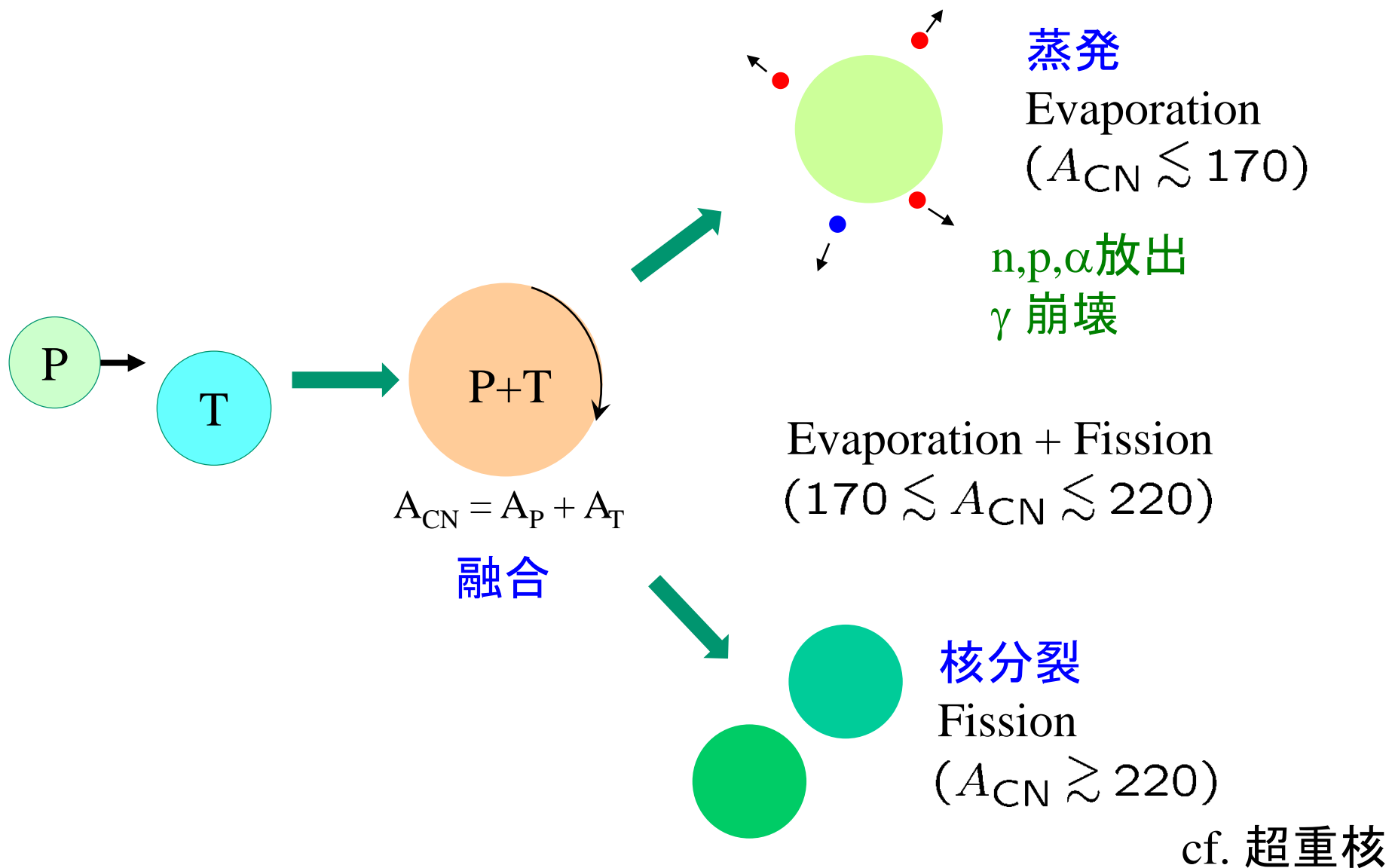
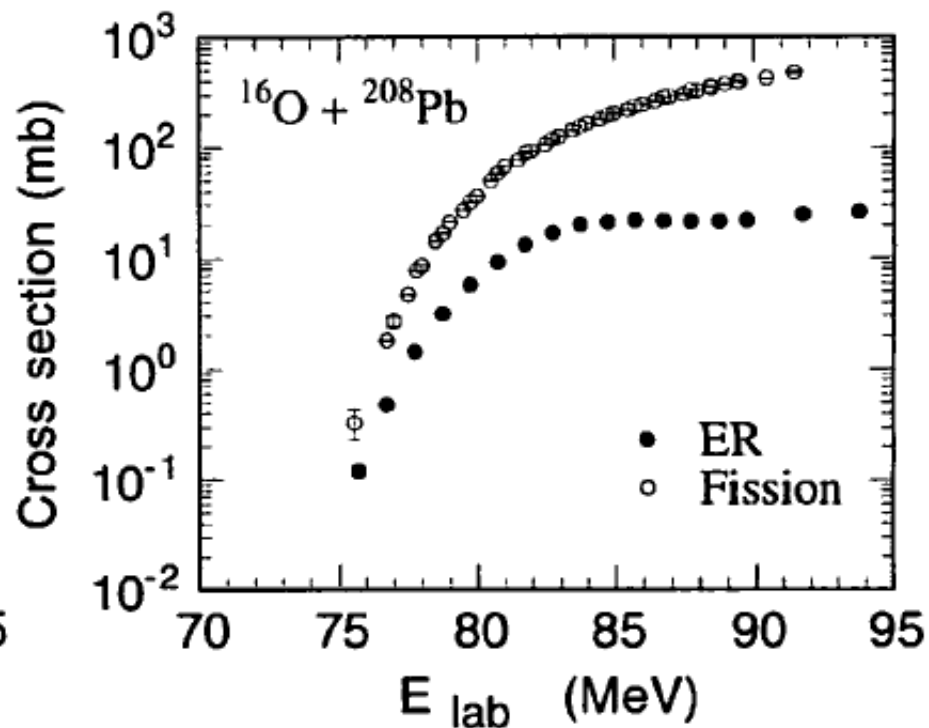
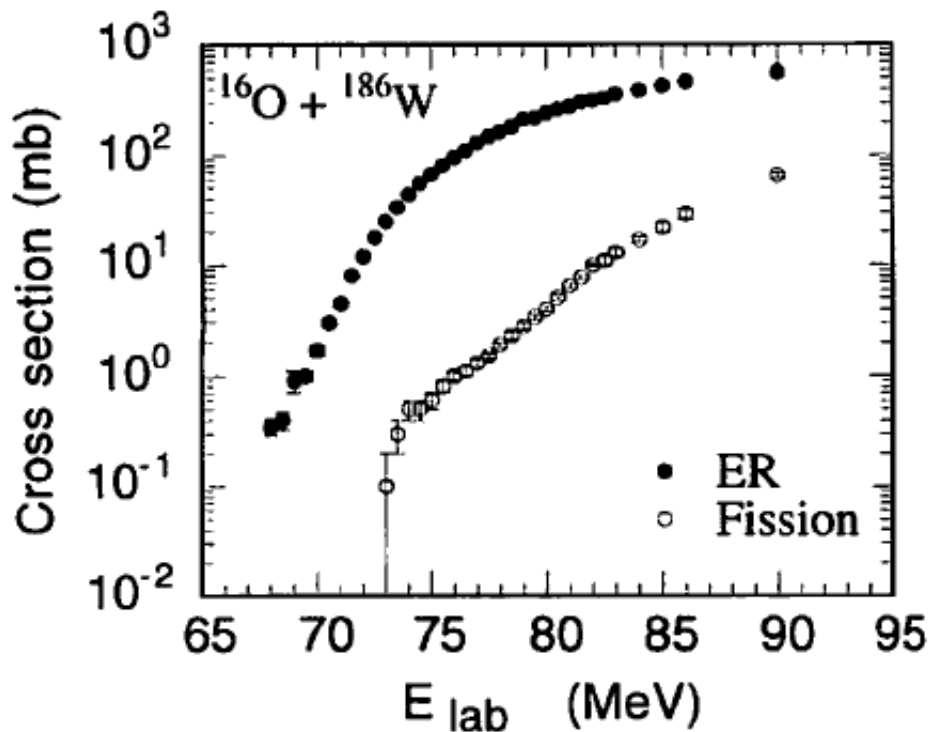
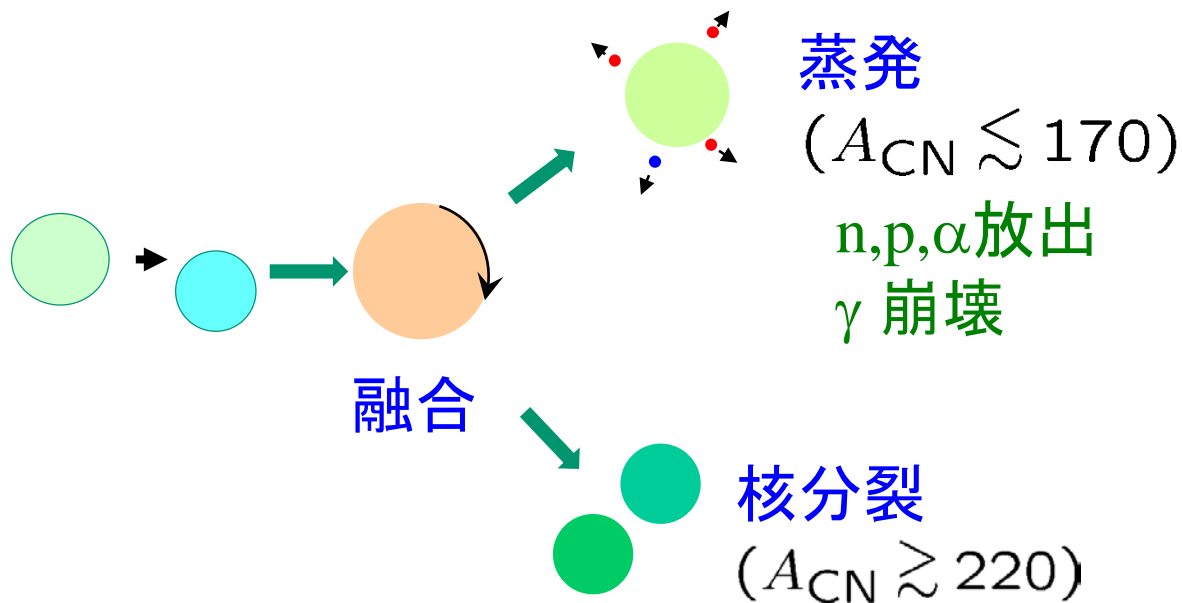


不安定核の低エネルギー反応

- 核融合反応
- 対移行反応
- 弾性散乱

核融合反応：複合核生成反応





* どのように核融合反応断面積を測定するのか?

✓ 蒸発残留核からの特性X線の測定

✓ 蒸発残留核からのガンマ線の測定

効率の良い検出器が必要、バックグラウンドの見積もりが問題
長寿命のアイソマーがあると使えない

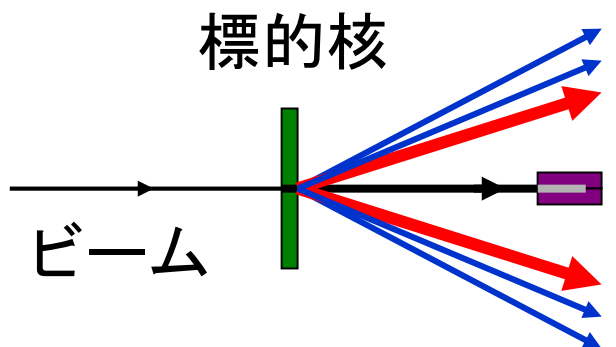
✓ 蒸発残留核からの α 崩壊の測定

α 放出核にのみ用いることができる
超重核合成反応では標準的な方法

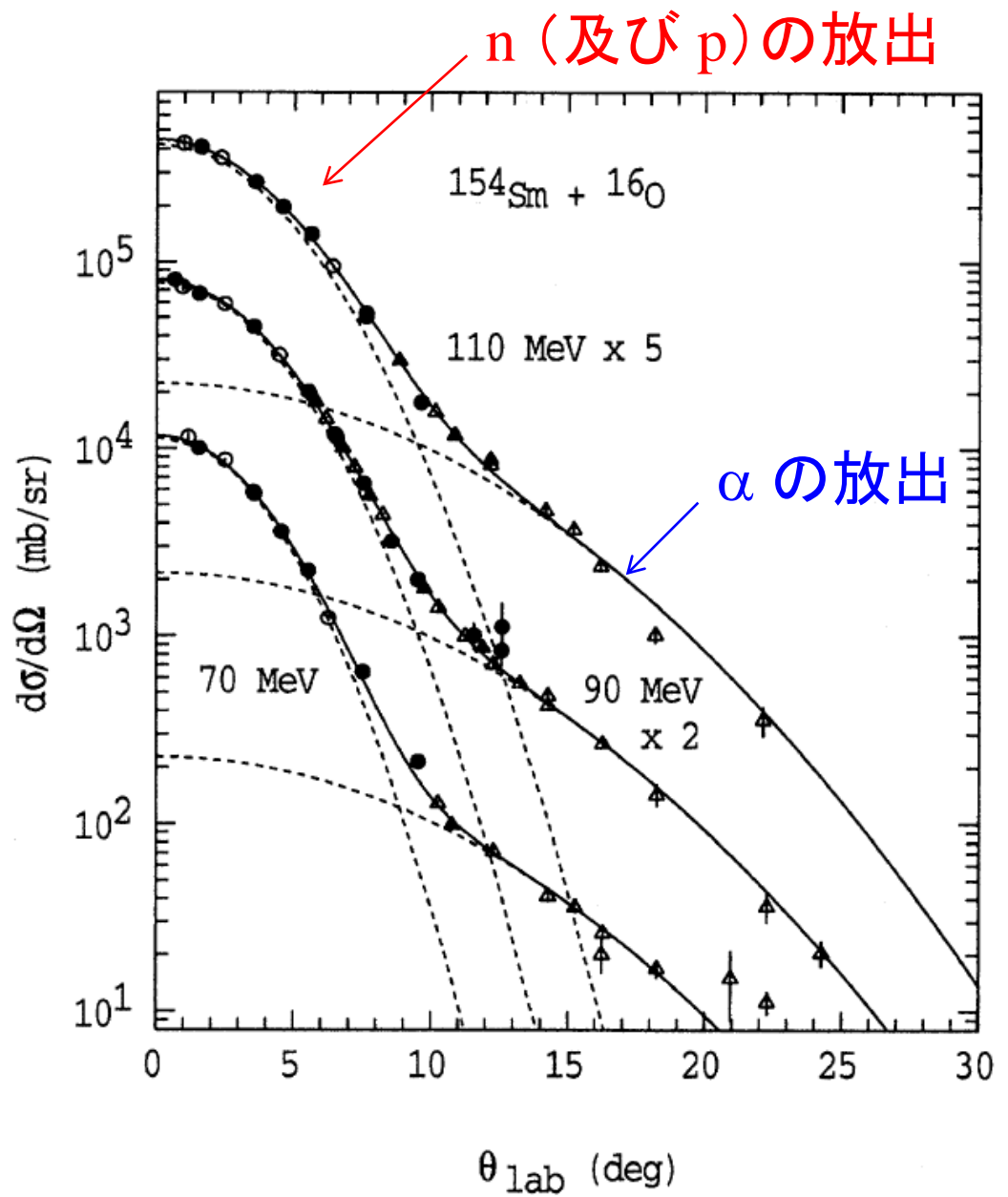
✓ 核融合生成物の直接測定(蒸発残留核+核分裂)

最も不定性がない方法
蒸発残留核とビームを分けるのに実験的技術が必要
核分裂片: 広い角度をカバーする必要性

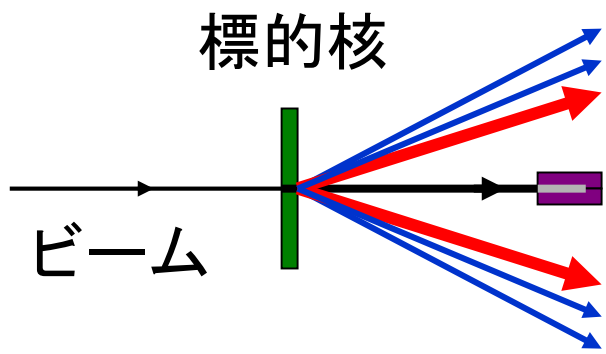
蒸発残留核の測定



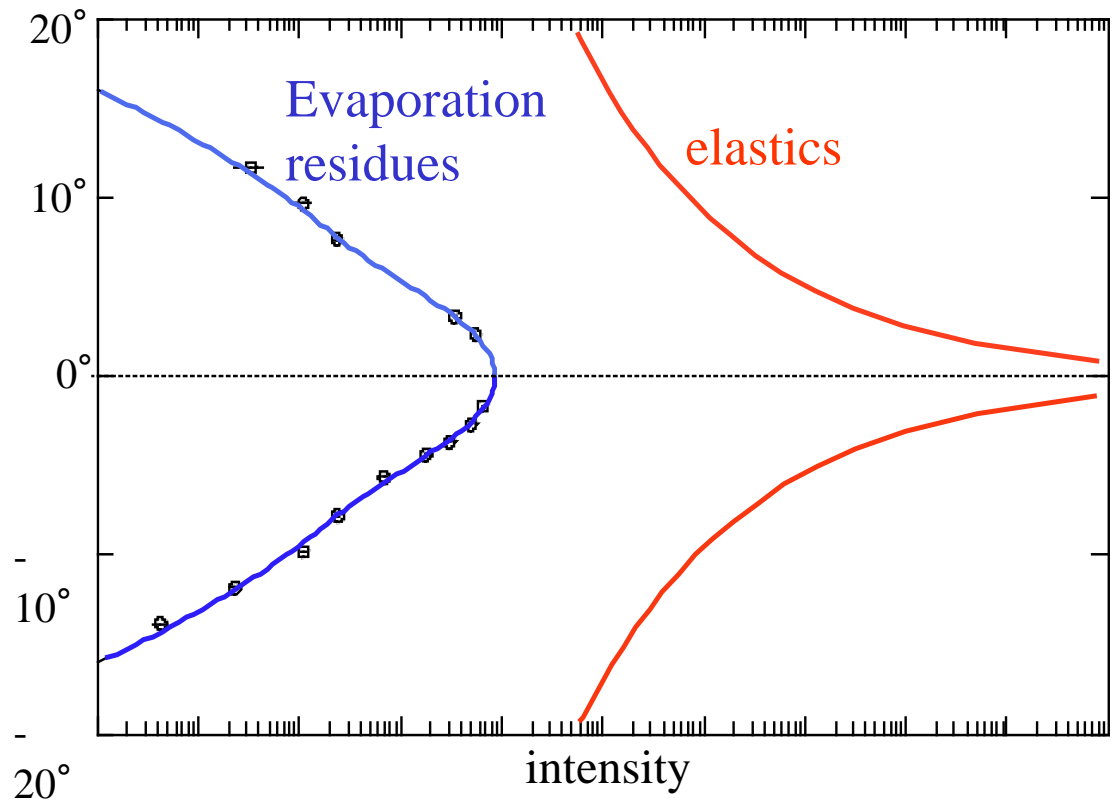
蒸発残留核:
前方角度へ



蒸発残留核の測定

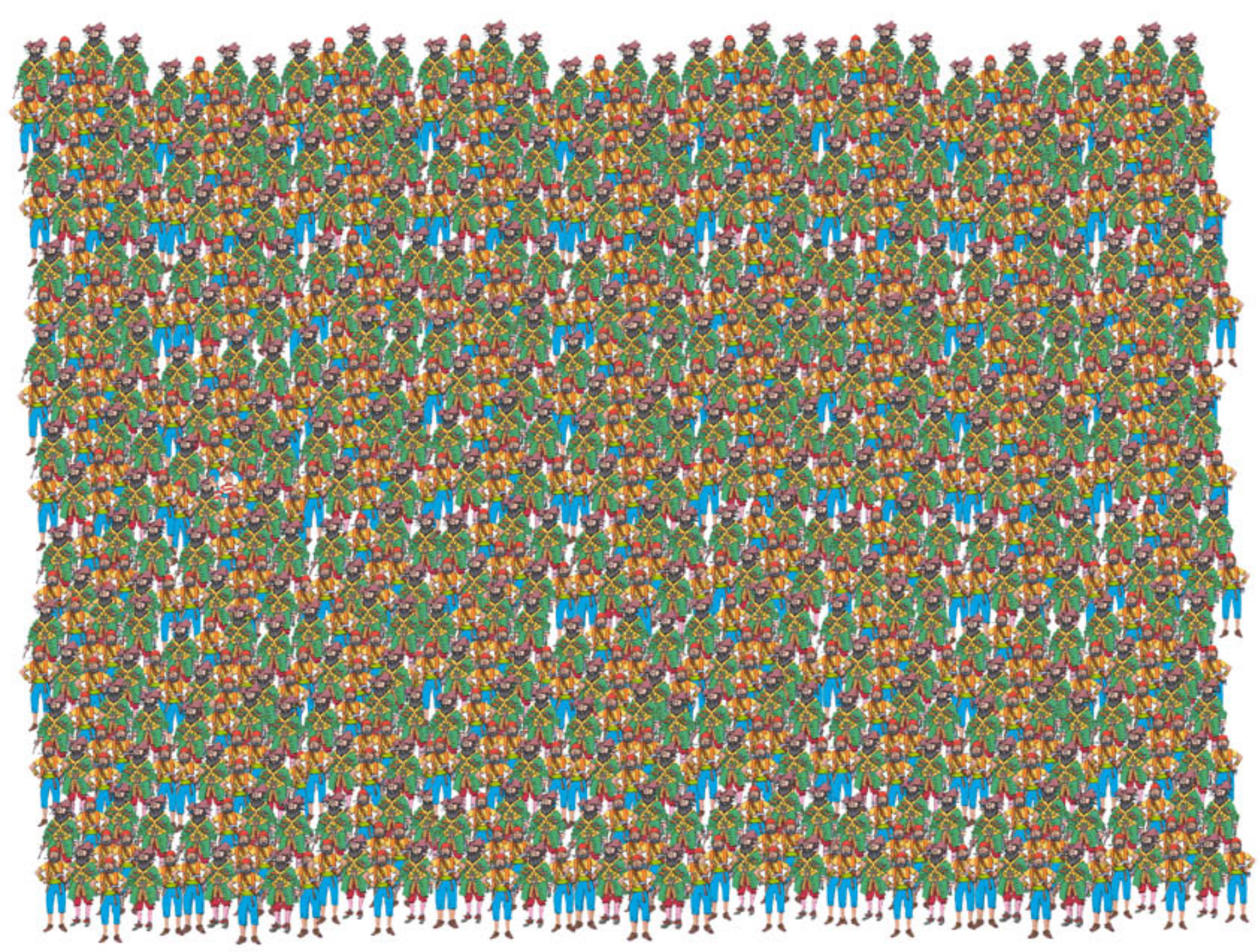


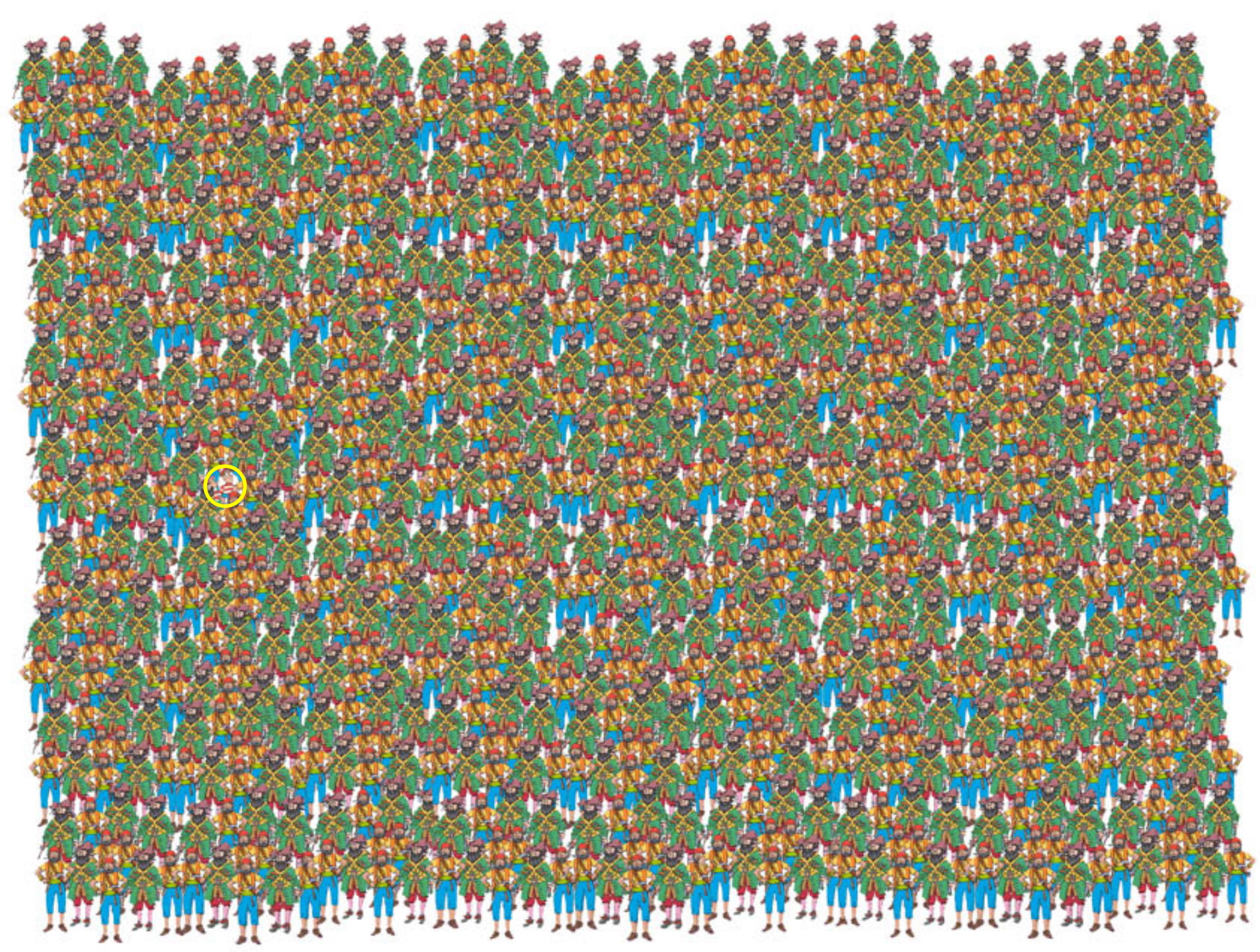
蒸発残留核:
前方角度へ
ビーム粒子も
前方角度へ



beam-like 粒子: 蒸発残留核の $10^4 \sim 10^{12}$ 倍の強度

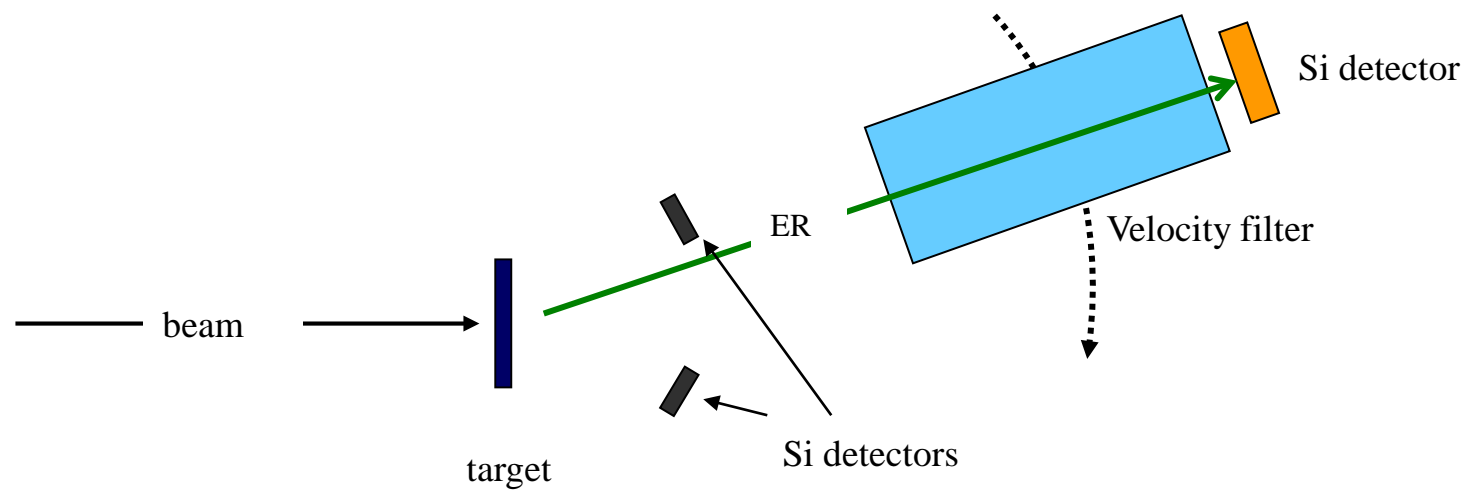




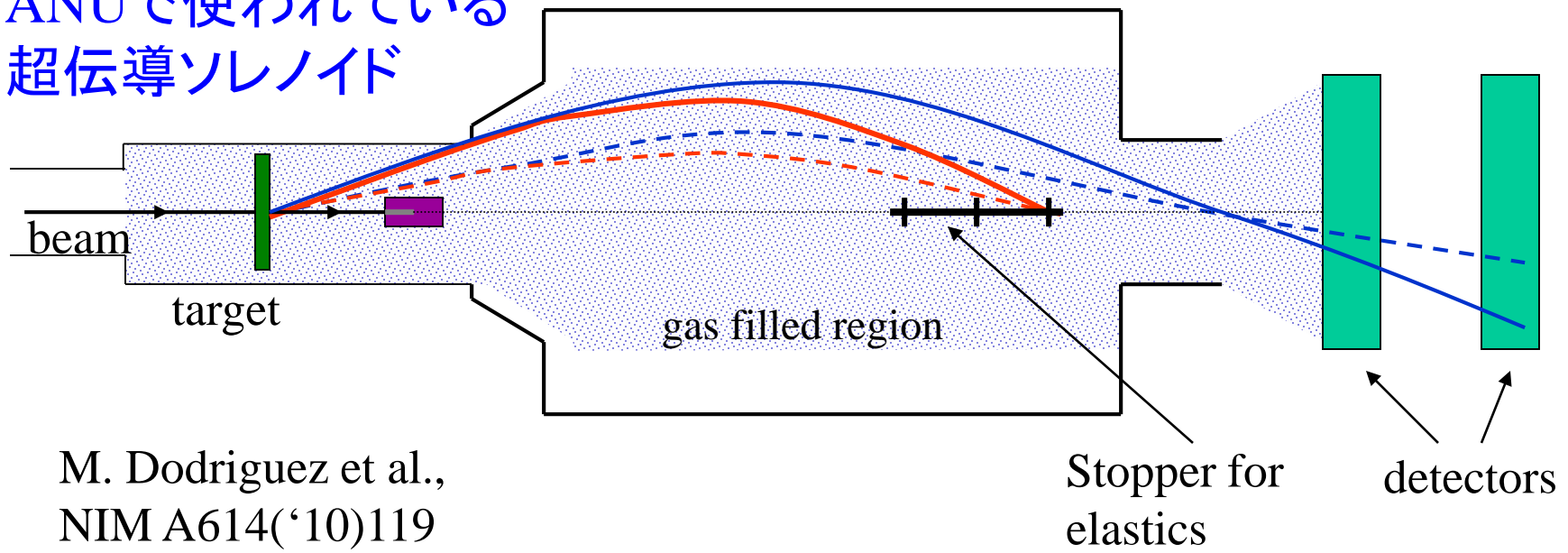


蒸発残留核の測定

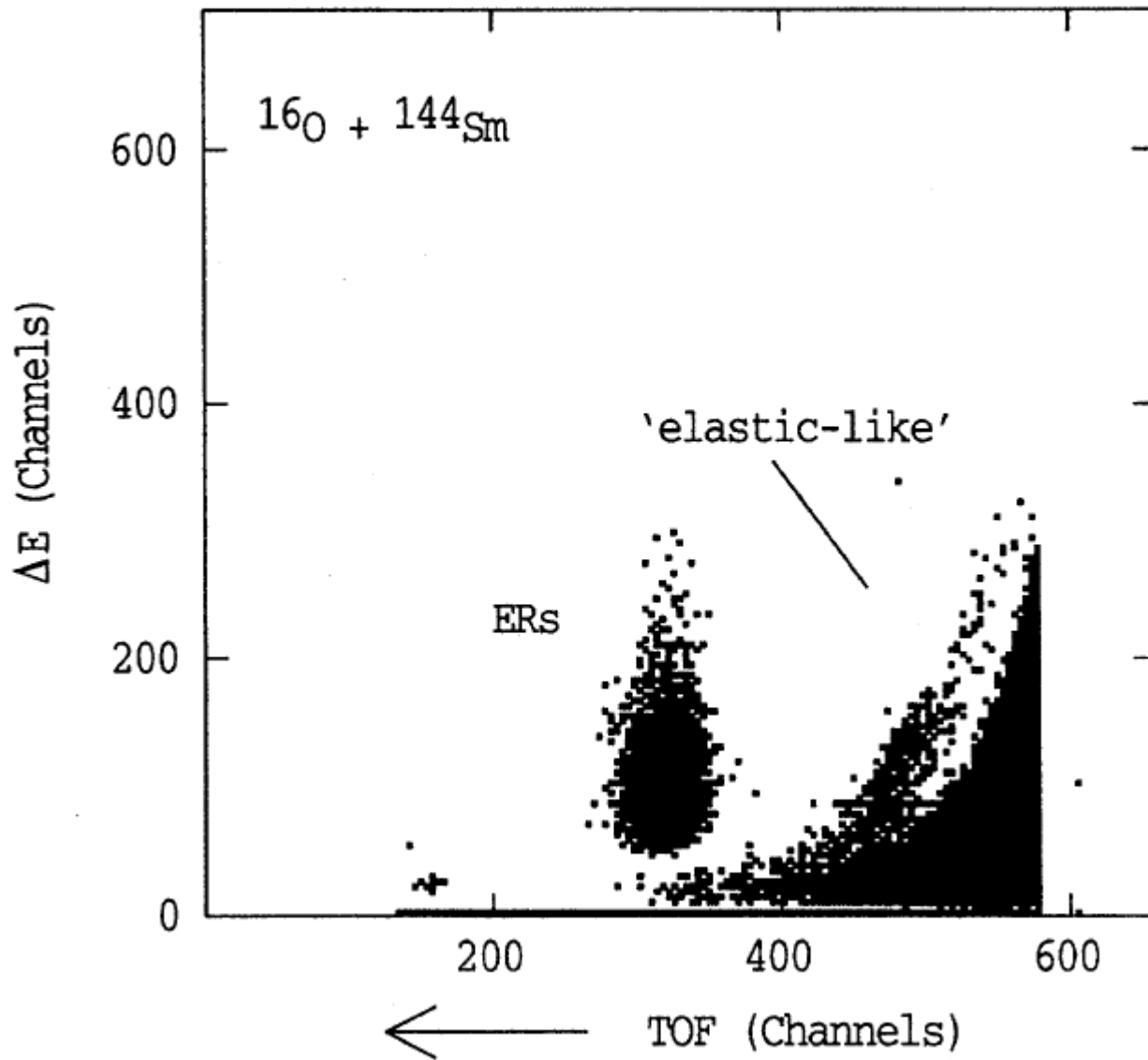
velocity filter 等を用いてうまく蒸発残留核と beam-like 粒子をわけける



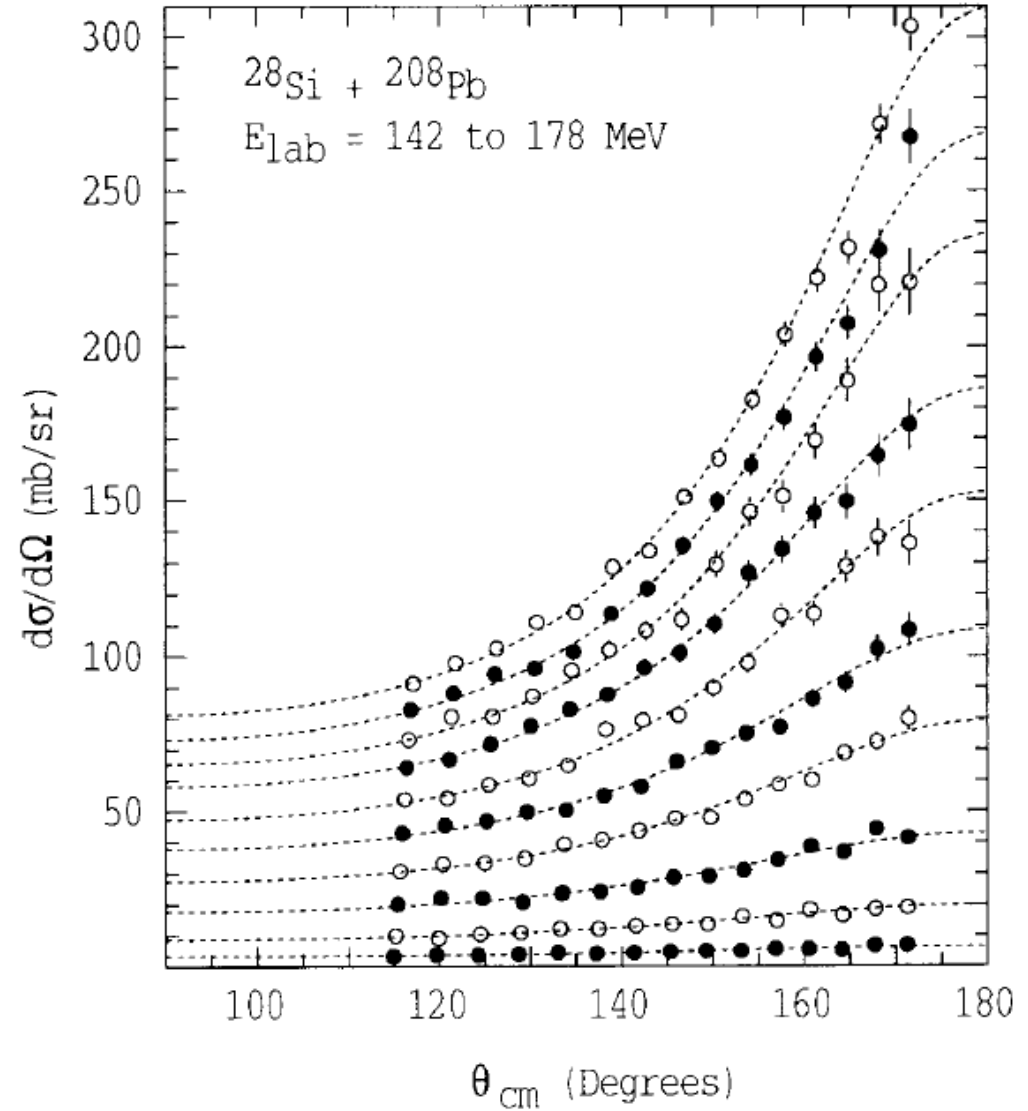
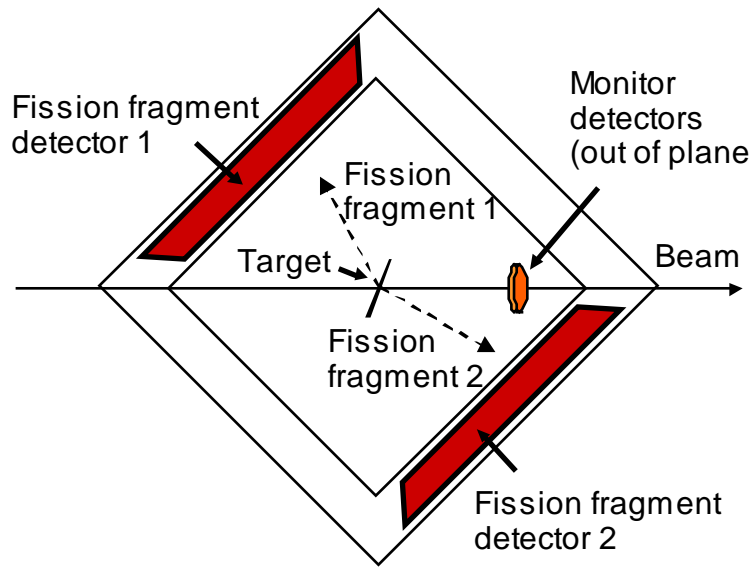
ANUで使われている超伝導ソレノイド



M. Dodriguez et al.,
NIM A614('10)119

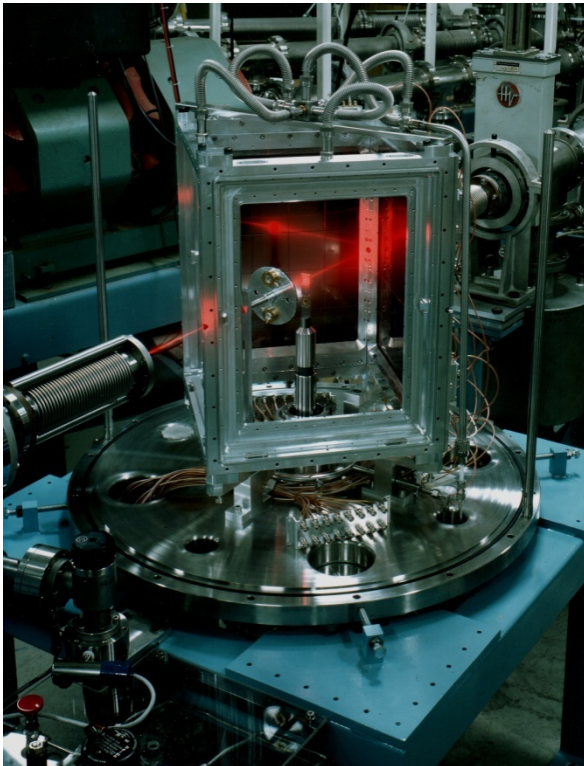


核分裂片の測定



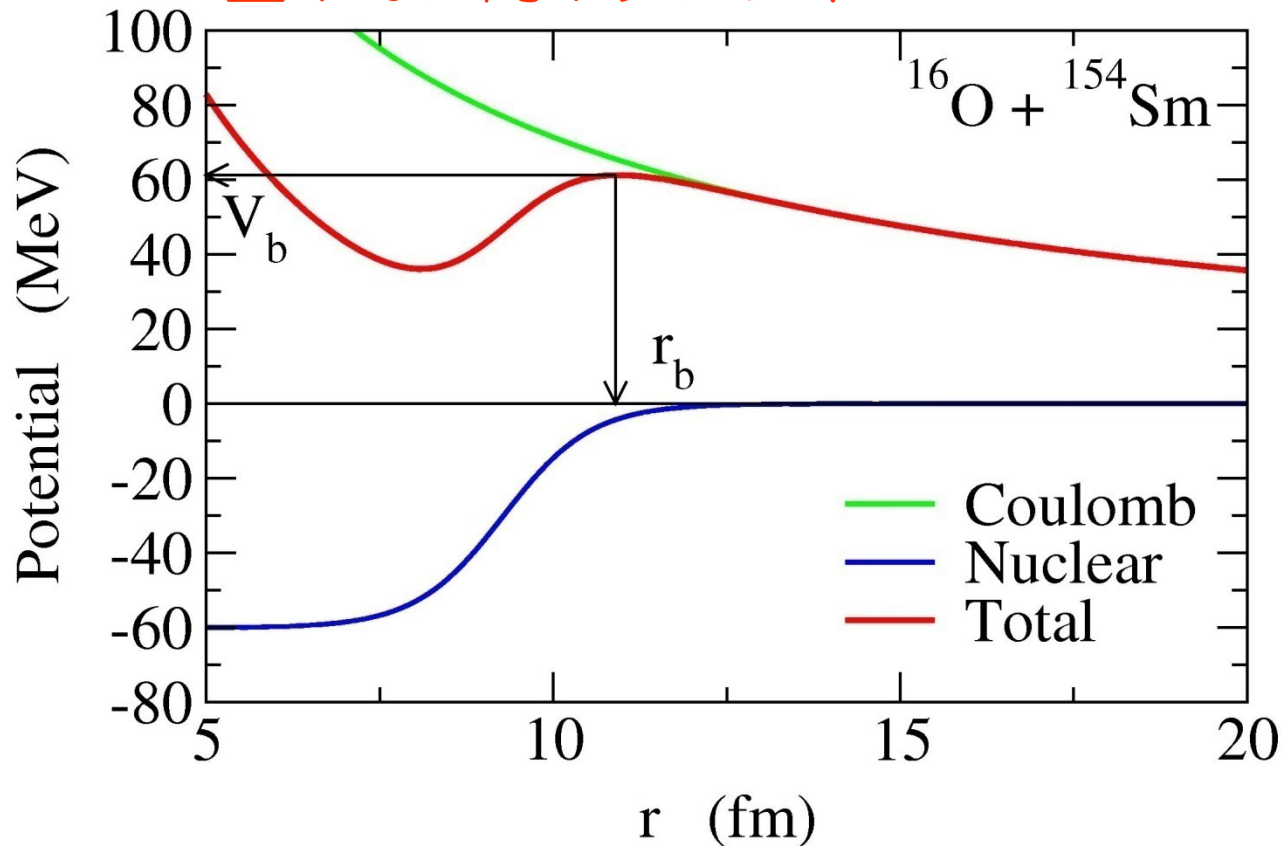
D.J. Hinde et al., NPA592('95)271

← ANUで使われている検出器



重イオン核融合反応

重イオン間ポテンシャル



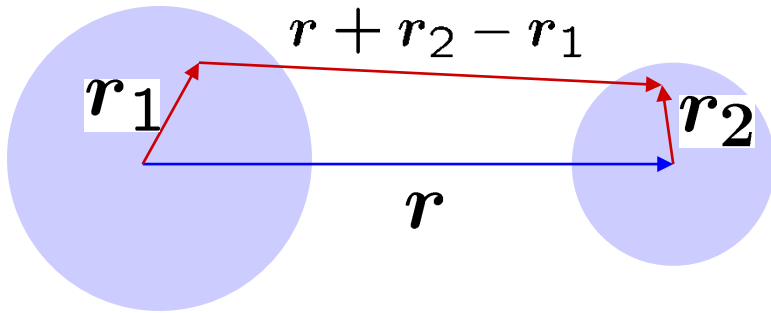
2つの力:

1. クーロン力
長距離斥力
2. 核力
短距離引力



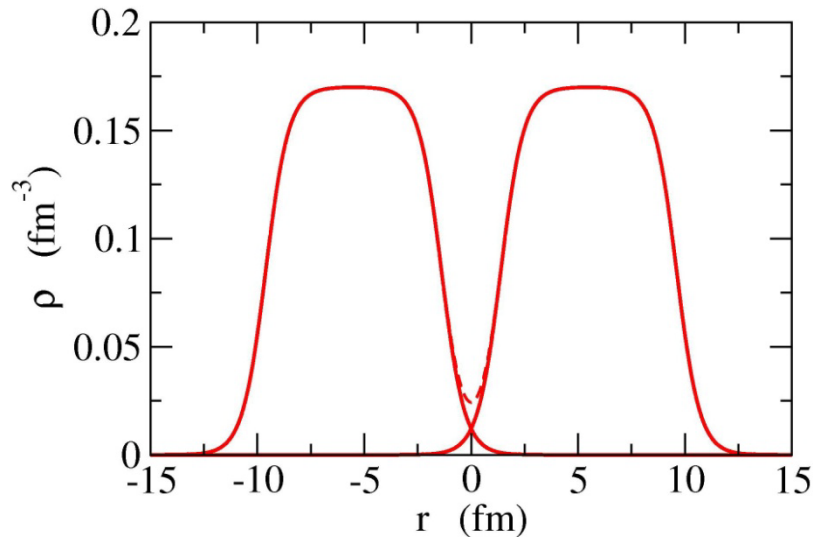
両者の打ち消しあいによりポテンシャル障壁が形成
(クーロン障壁)

• Double Folding Potential



$$V_{DF}(r) = \int dr_1 dr_2 \rho_1(r_1) \rho_2(r_2) \times v_{nn}(r + r_2 - r_1)$$

(微視的ポテンシャルの直接項に相当)



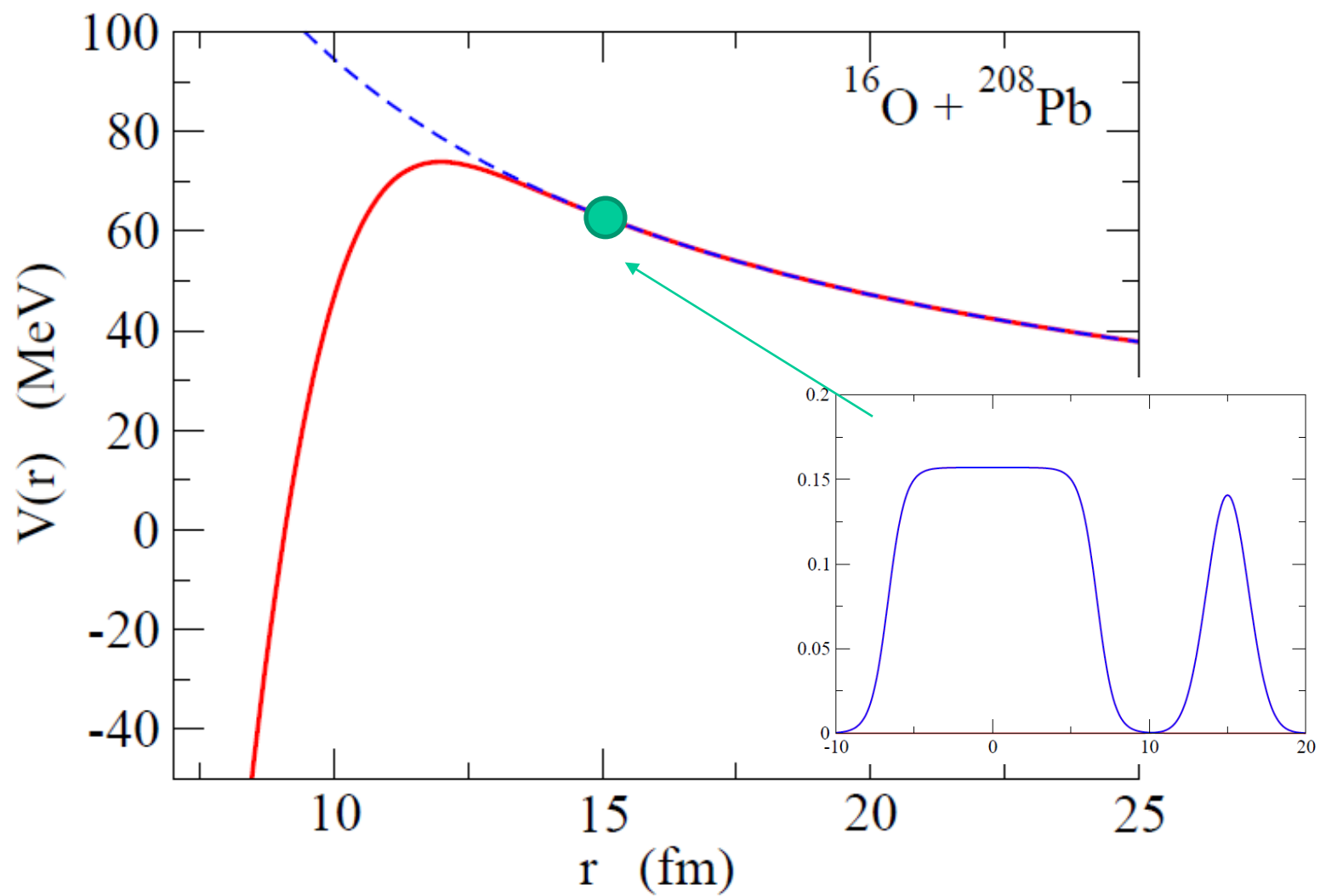
$$\rho(r) \sim \frac{\rho_0}{1 + \exp[(r - R_d)/a_d]}$$

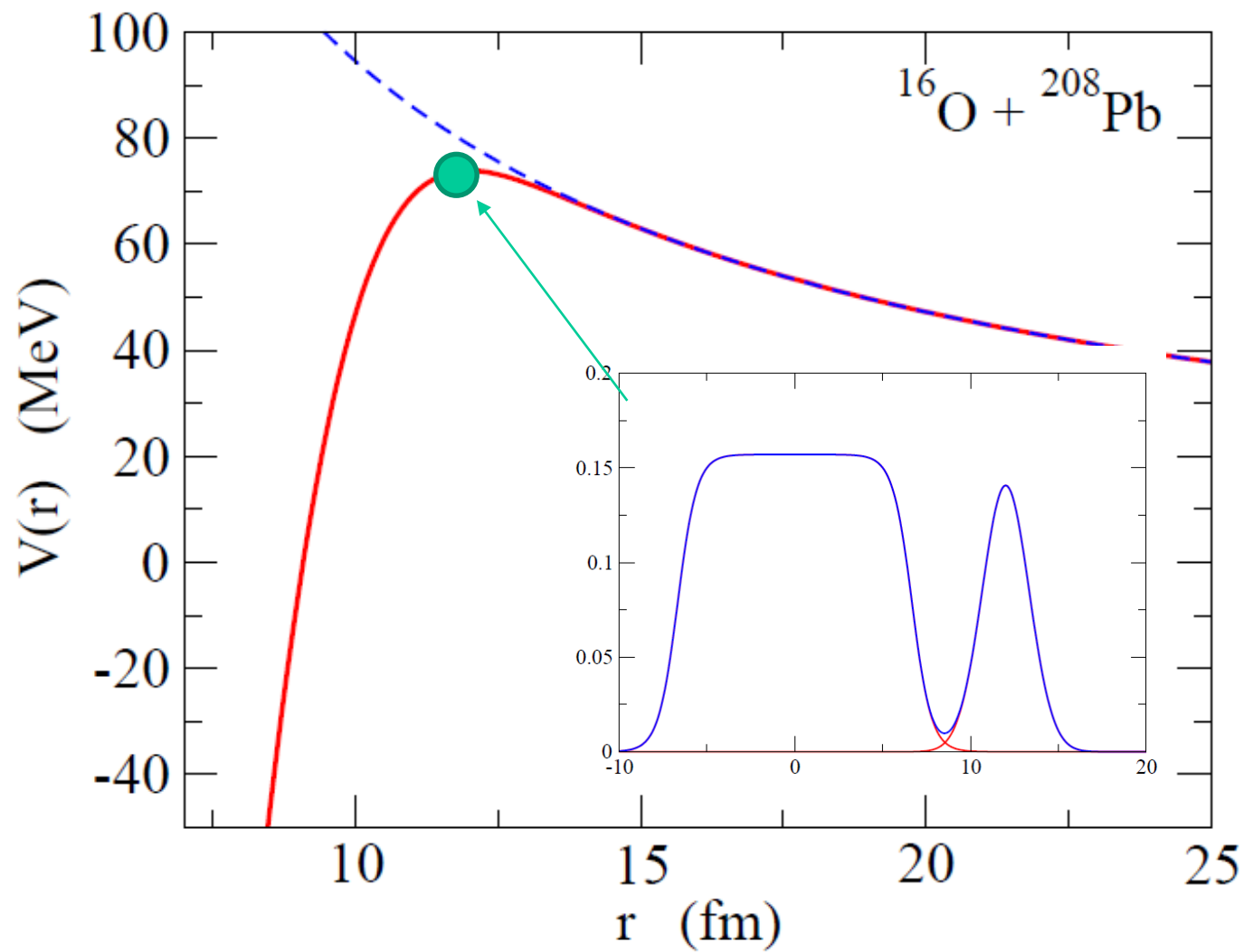
$$a_d \sim 0.54 \text{ (fm)}$$

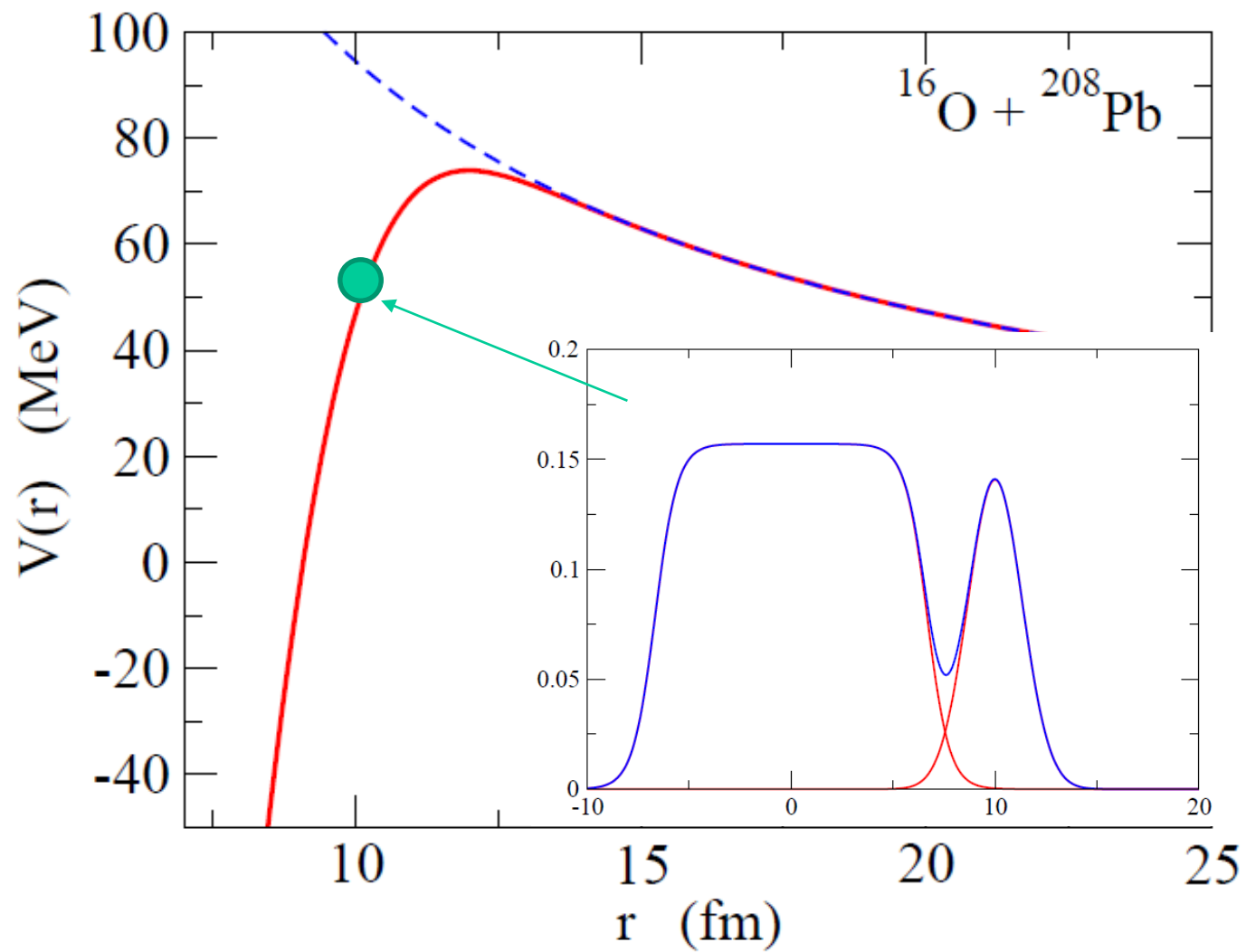
• Phenomenological potential

$$V_{WS}(r) = -\frac{V_0}{1 + \exp[(r - R_0)/a]}$$

$$a \sim 0.63 \text{ (fm)}$$



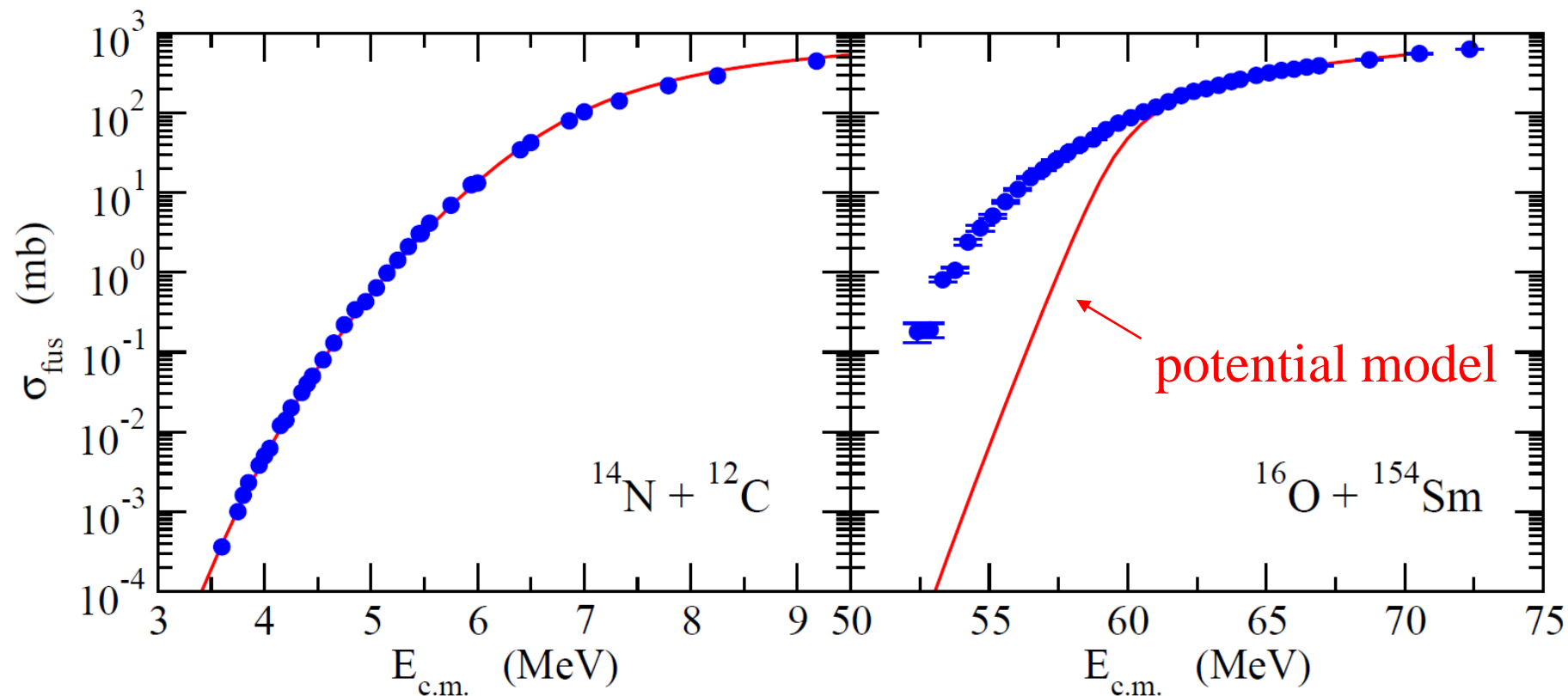




核融合反応断面積の大きな増大

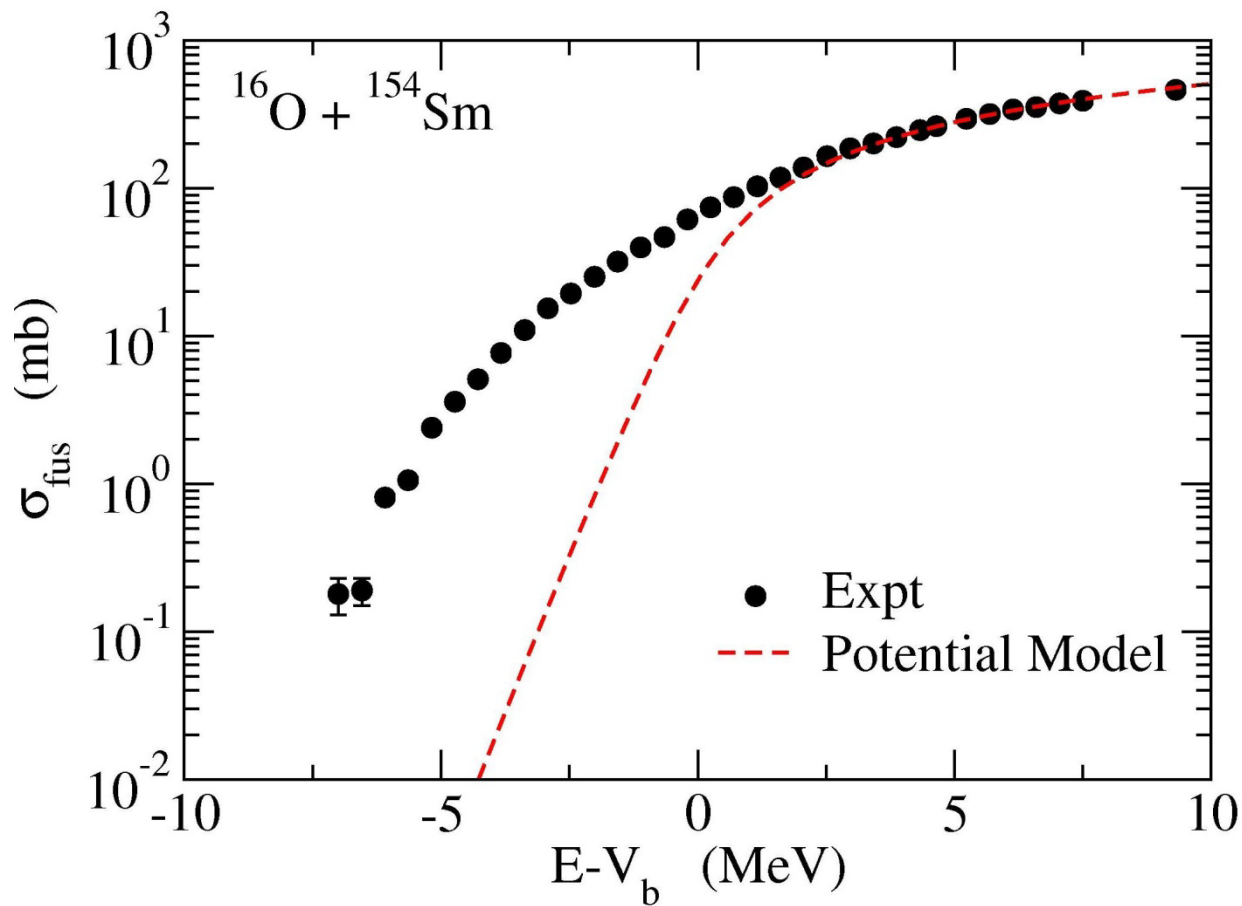
ポテンシャル模型: $V(r) +$ 吸収

$$\sigma_{\text{fus}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1)(1 - |S_l|^2)$$



cf. 初期の実験:

R.G. Stokstad et al., PRL41('78) 465



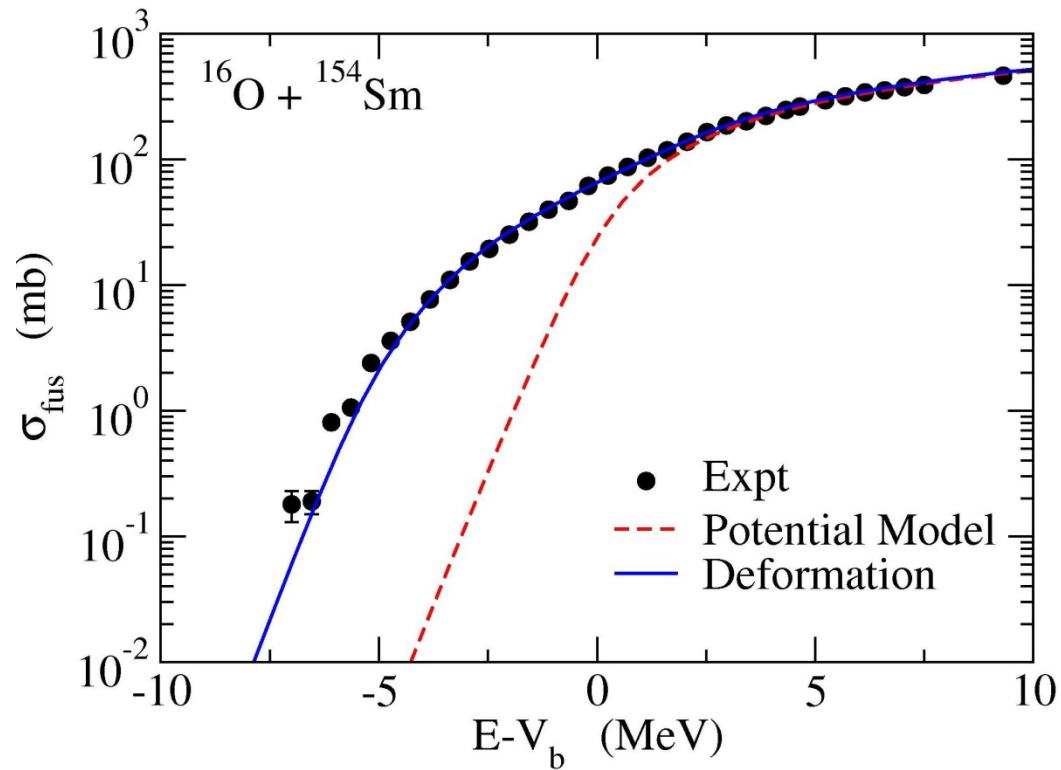
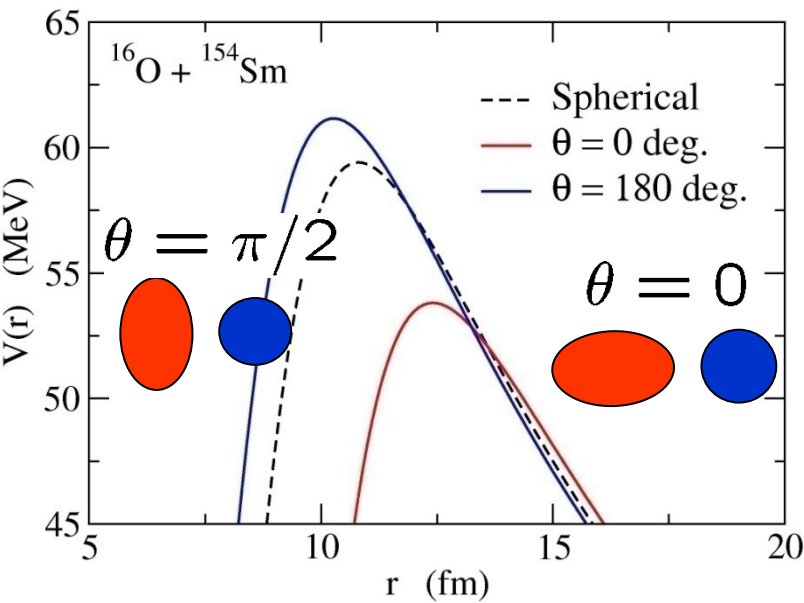
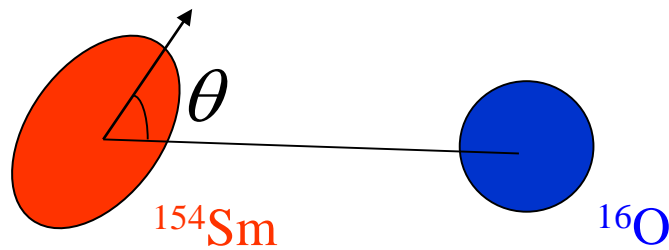
ポテンシャル模型:

$E > V_b$ では大体データを再現

$E < V_b$ では核融合断面積を過小に評価

$^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$ 核融合反応に対する ^{154}Sm の変形の効果

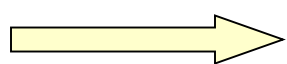
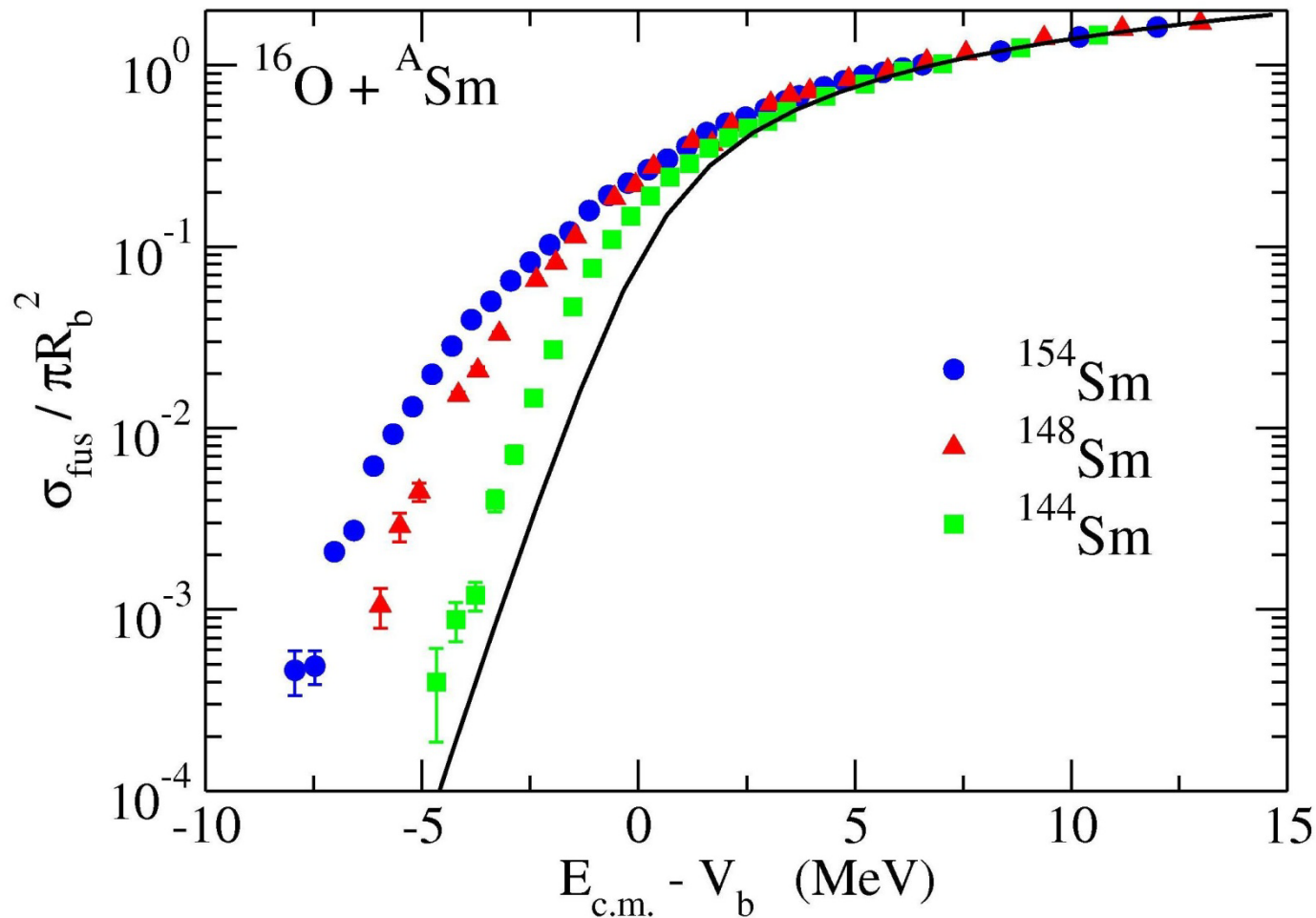
$$\sigma_{\text{fus}}(E) = \int_0^1 d(\cos \theta) \sigma_{\text{fus}}(E; \theta)$$



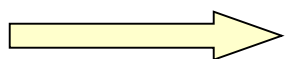
変形の効果: 核融合断面積が 10~100 倍増大

トンネル確率は障壁の変化に敏感 \implies 核融合反応: 核構造に対する興味深いプローブ

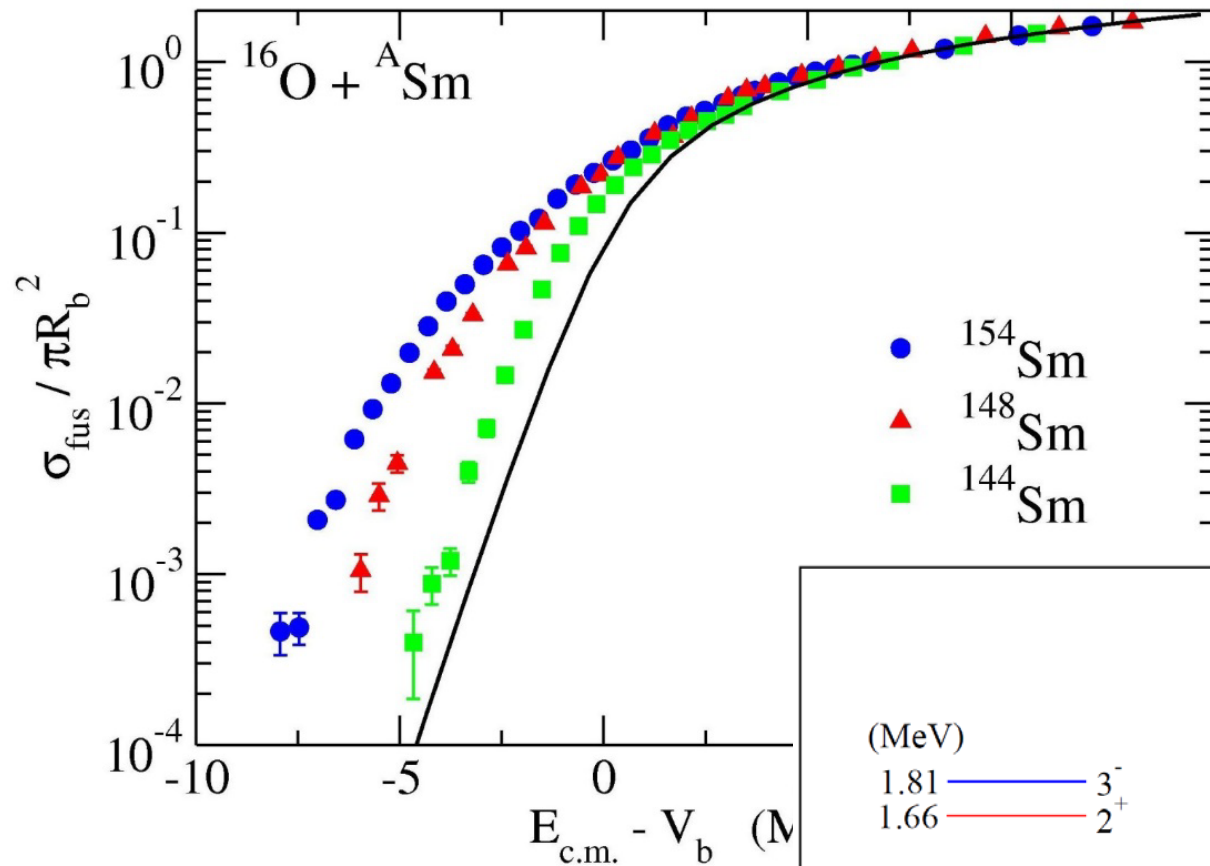
核融合断面積の標的核依存性



$E < V_b$ において強い標的核依存性

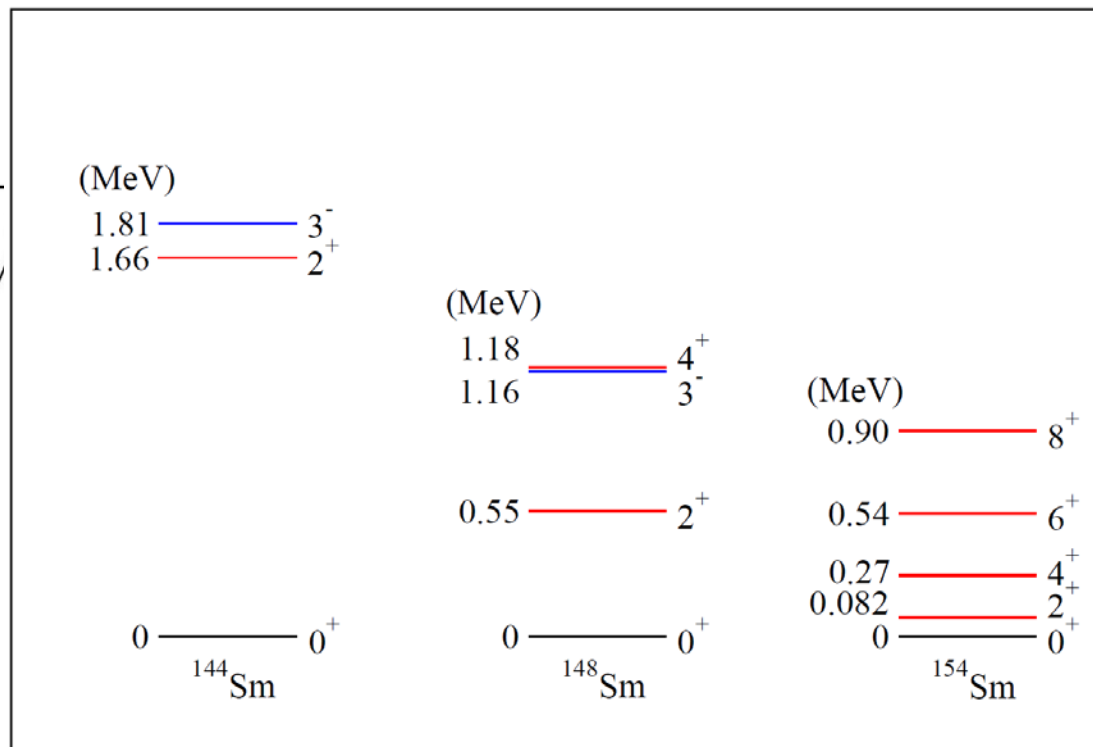


低励起集団運動の影響



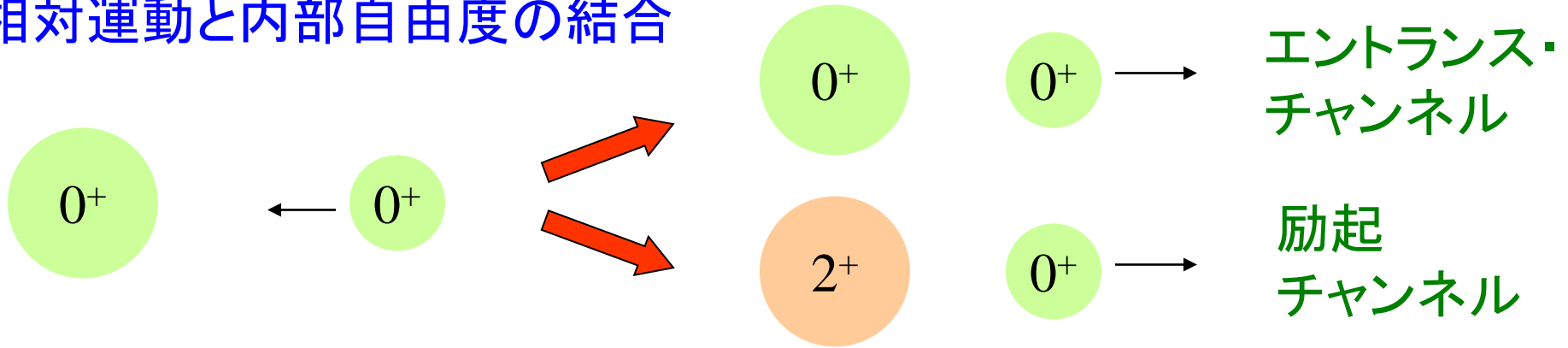
$E < V_b$ において
強い標的核依存性

→ 低励起集団運動
との結合が重要



(参考)より一般的には結合チャンネル法で説明される

相対運動と内部自由度の結合



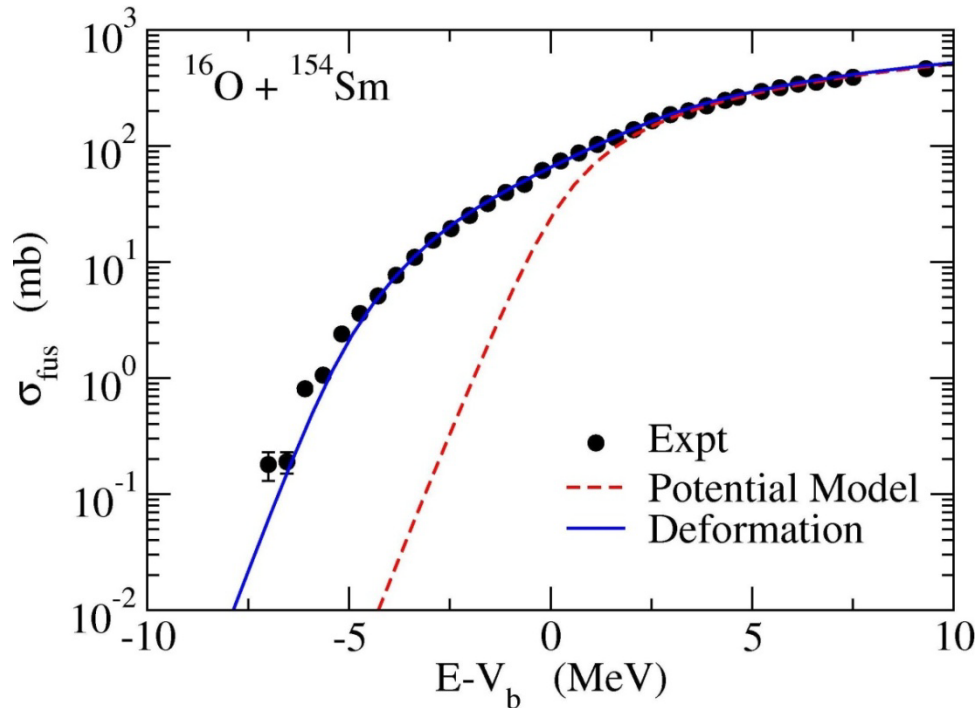
結合チャンネル方程式

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + V_0(r) + \epsilon_k - E \right] \psi_k(\mathbf{r}) + \sum_{k'} \langle \phi_k | V_{\text{coup}} | \phi_{k'} \rangle \psi_{k'}(\mathbf{r}) = 0$$

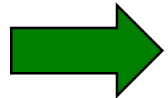
励起エネルギー

励起オペレーター

不安定核を用いた核融合反応



安定核の核融合反応では、原子核間相対運動と散乱核の内部自由度(内部励起)が結合することで、核融合反応断面積が増大(トンネル領域)



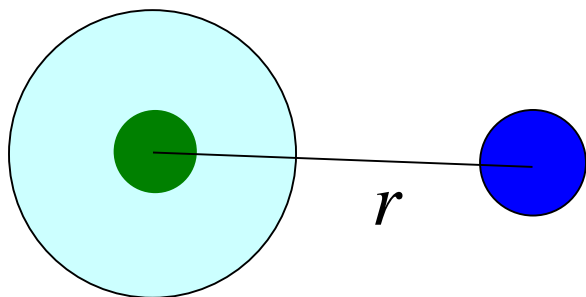
不安定核(弱束縛核)を用いるとどうなるか?
核融合反応断面積は増大? 変化なし? 減少?

2つの効果

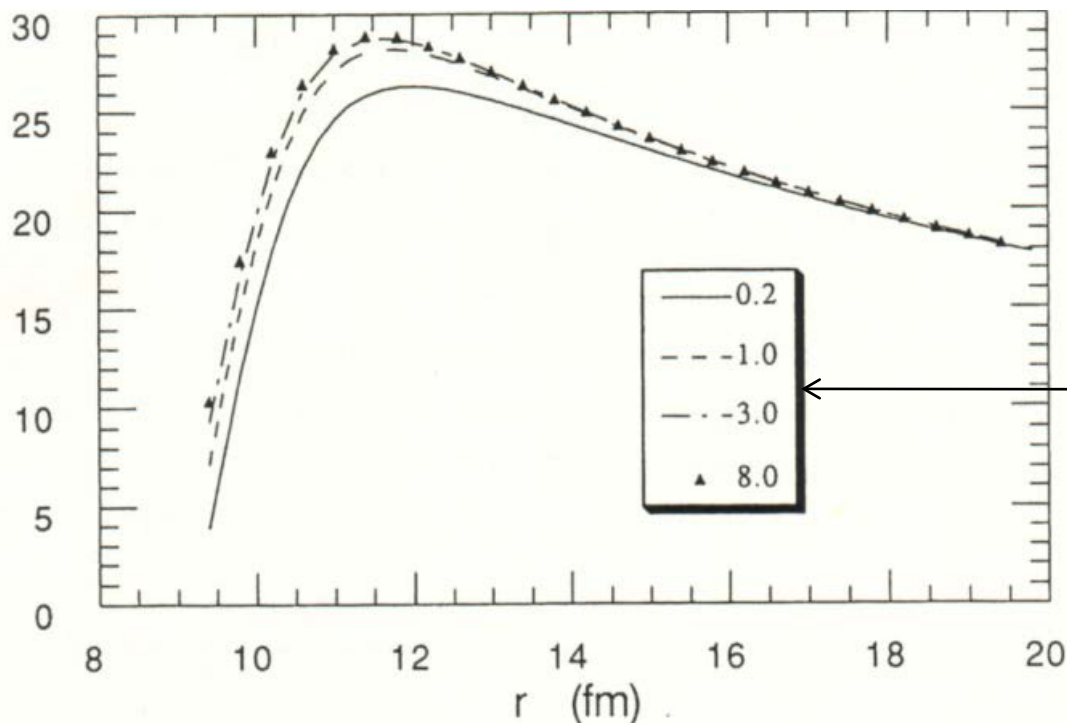
1. ハロー構造による重イオン間
ポテンシャルの低下



核融合反応断面積の
増大



ハロー → 広がった密度分布
→ 遠方から核力(引力)
がはたらく



$^{11}\text{Li} + ^{208}\text{Pb}$ に対する2重畳み
込みポテンシャル

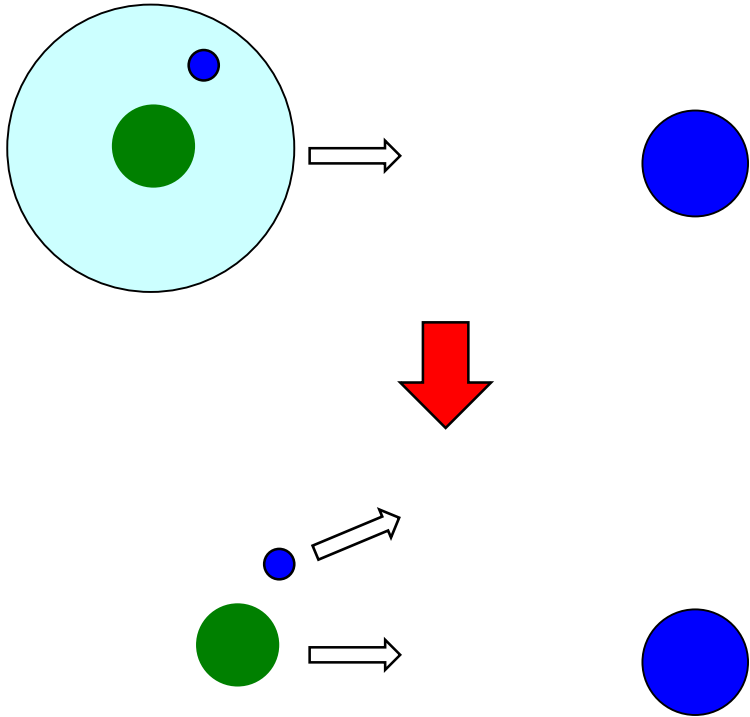
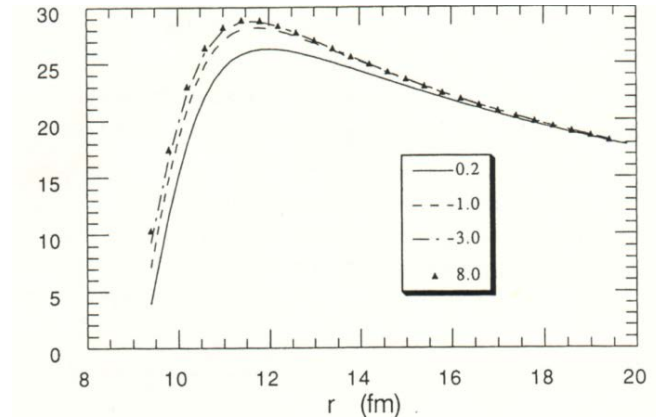
dineutron クラスタ
の分離エネルギー

N. Takigawa and H. Sagawa,
PLB265('91)23

2つの効果

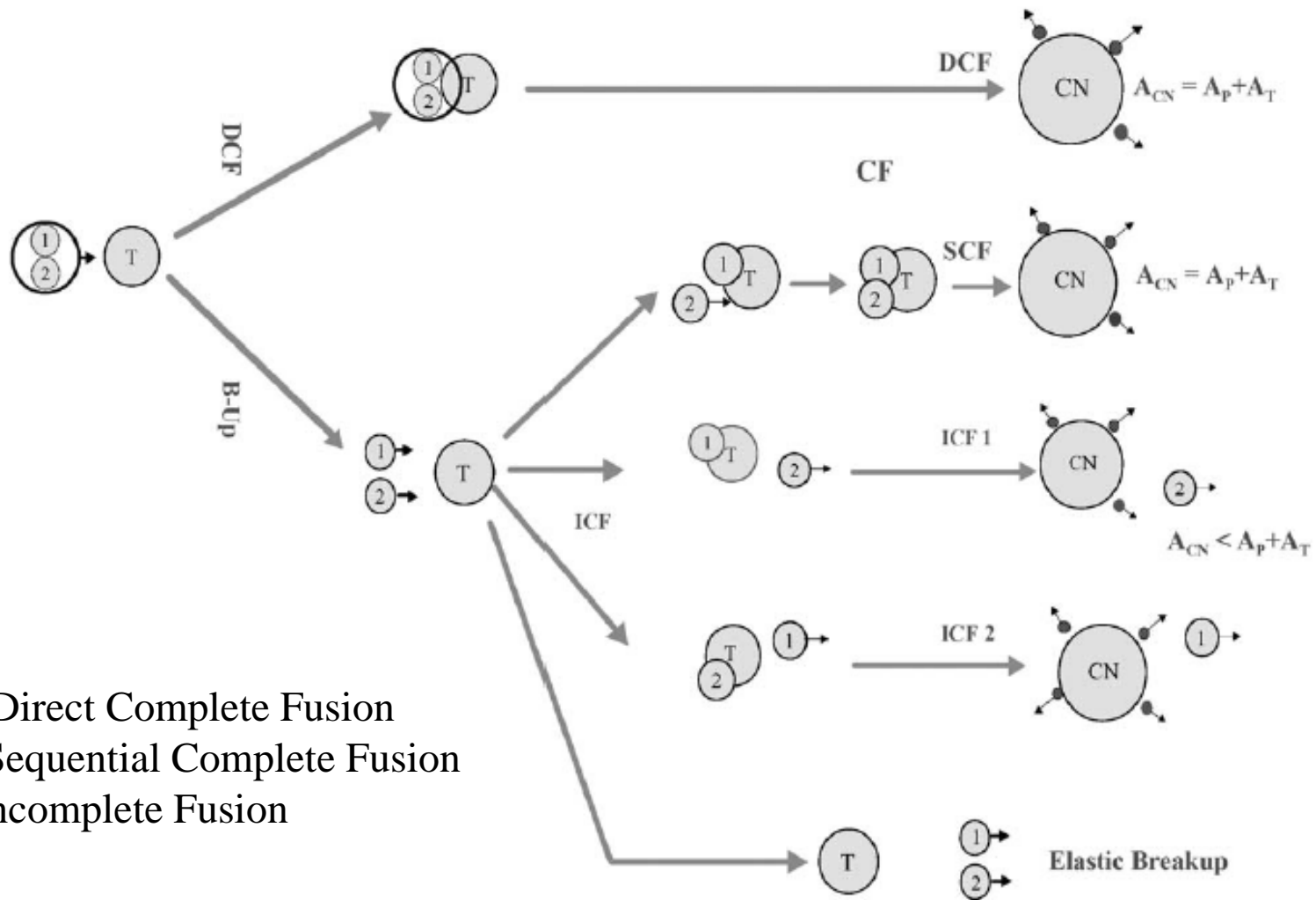
1. ハロー構造による重イオン間ポテンシャルの低下
2. 分解 (breakup) の効果

これはあまり自明ではない



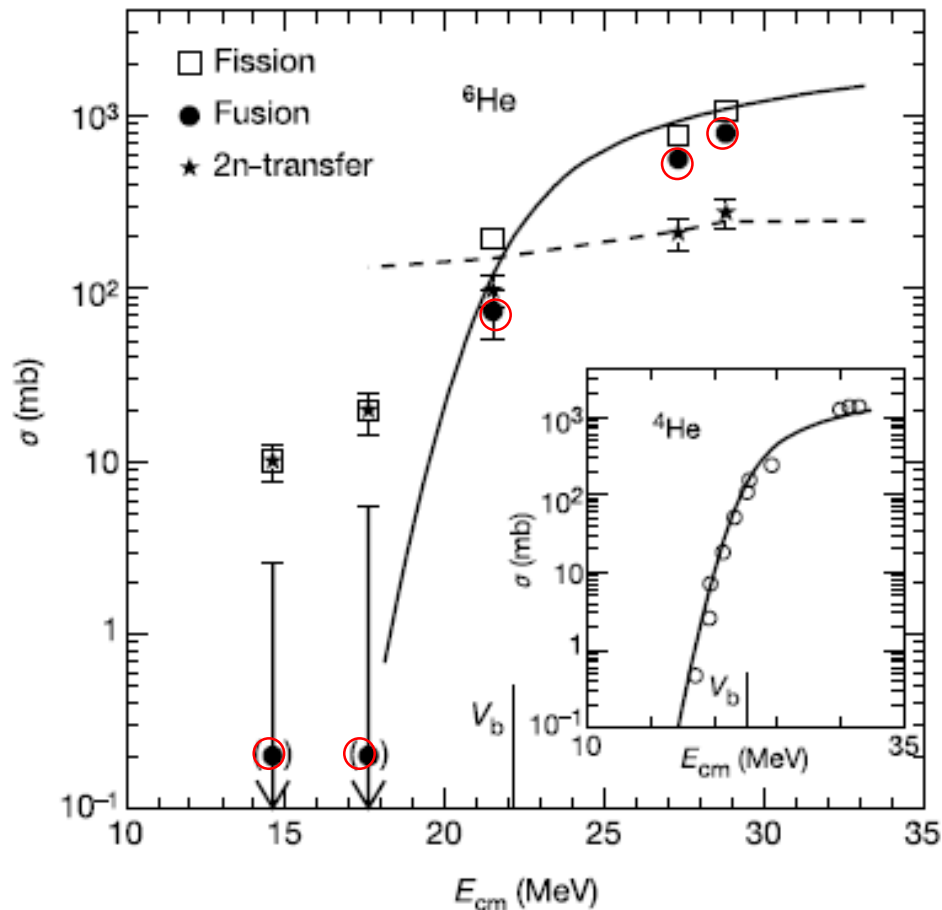
- 分解すると障壁の低下がなくなるので核融合反応断面積は減少?
- 安定核と同様、結合チャンネル効果により断面積は増大?
- もっと複雑な分解の動的な効果?

複雑な反応プロセス

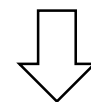


DCF=Direct Complete Fusion
 SCF=Sequential Complete Fusion
 ICF=Incomplete Fusion

実際の実験データ



➤核融合反応断面積は、ポテンシャルモデルの予測と矛盾していない(ように見える)

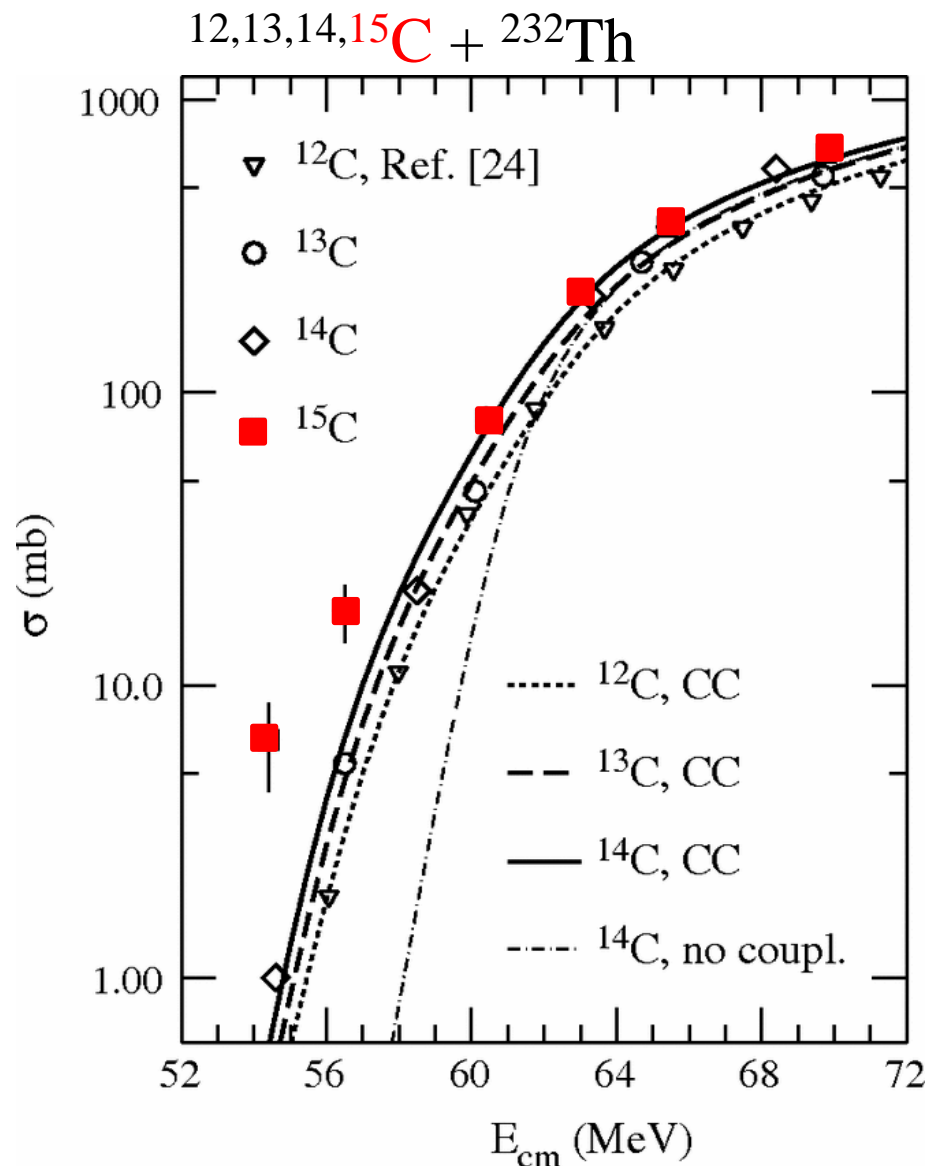


ポテンシャルの低下による増幅と分解の効果による減少が打ち消しあい?

➤大きな2中性子移行反応の断面積

R. Raabe et al., Nature 431 ('04)823

実際の実験データ



M. Alcorta et al., PRL106('11)

12,13,14,¹⁵C + ²³²Th

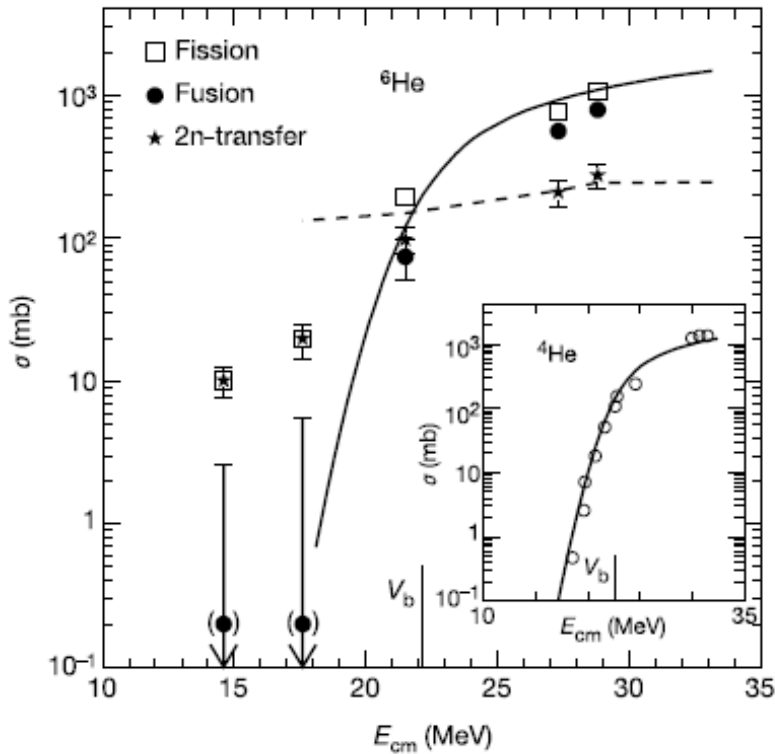
M. Alcorta et al.,
PRL106('11)172701

¹⁵C: 1n ハロ一原子核

→ 核融合反応断面積
の増大

核子移行過程の効果?

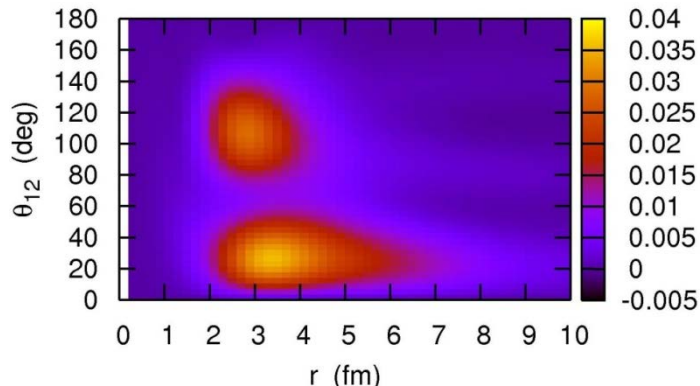
対移行反応



大きな 2n 移行断面積



中性子過剰核の反応では
(分解に加えて)
核子移行がキーワードの一つ

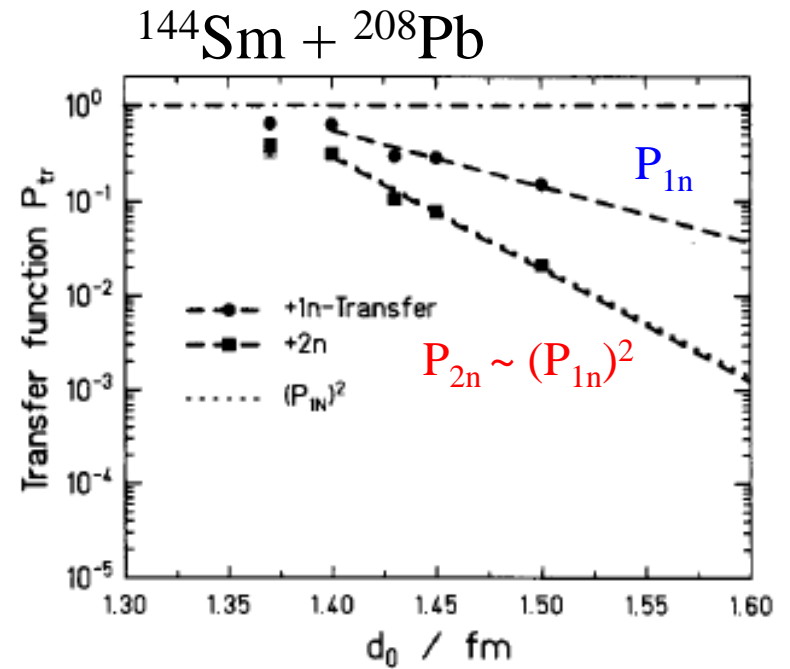
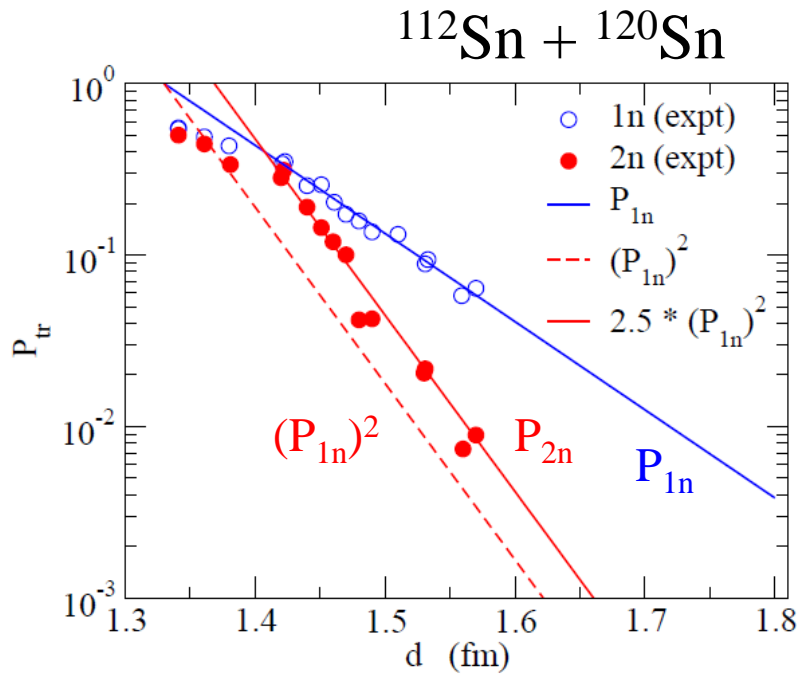


特にダイ・ニュートロン相関との
関係で対移行反応は今後ますます
重要な研究課題

対相関と対移行反応

対移行反応の確率は対相関を強く反映する

対移行の確率: $P_{tr} \sim \frac{d\sigma_{tr}}{d\sigma_R}$



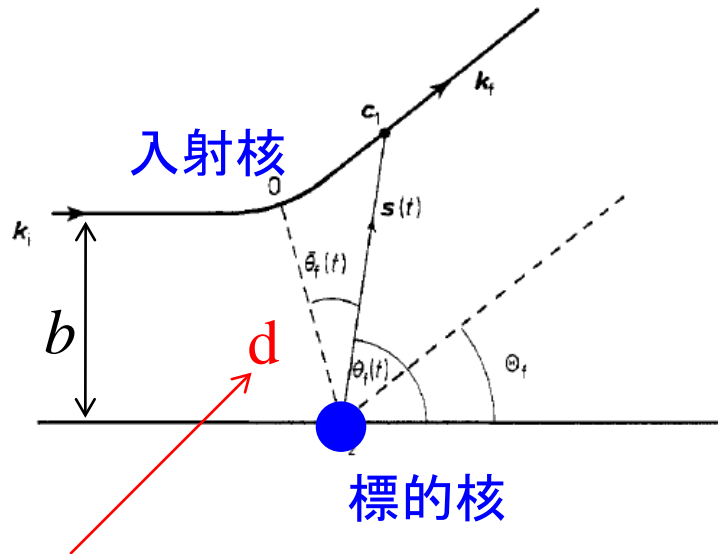
W. von Oertzen et al., Z. Phys. A326('87)463

J. Speer et al., PLB259('91)422

$R_{\min} = d(A_P^{1/3} + A_T^{1/3})$ はラザフォード軌道の最近接距離

(補足)ラザフォード軌道

* 高田健次郎先生
「インターネットセミナー」
2-5-A章が分かりやすい



クーロン力

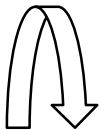
$$V_C(r) = \frac{Z_P Z_T e^2}{r}$$

による古典的な軌道

最近接距離 (the distance of closest approach)

$$d = \frac{Z_P Z_T e^2}{2E} \left[1 + \sqrt{1 + \cot^2 \frac{\theta}{2}} \right]$$

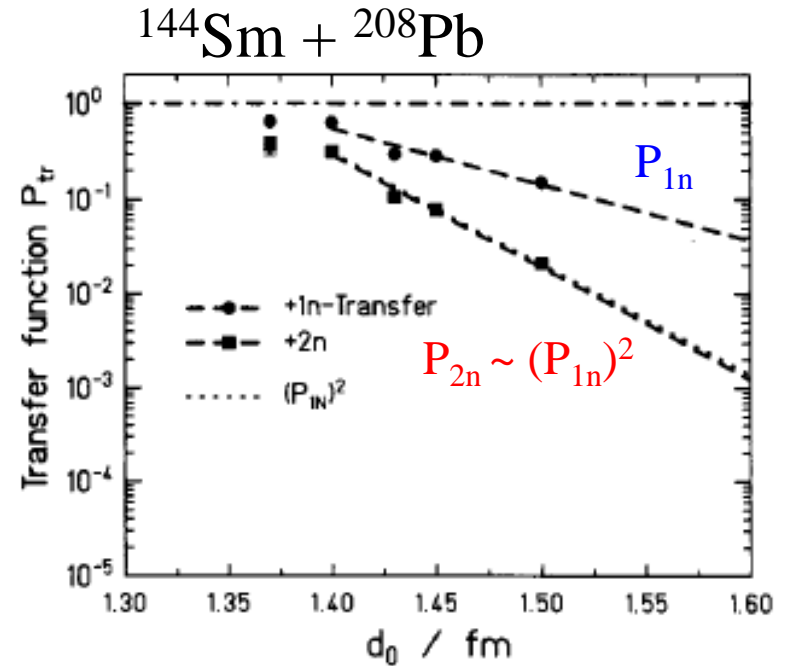
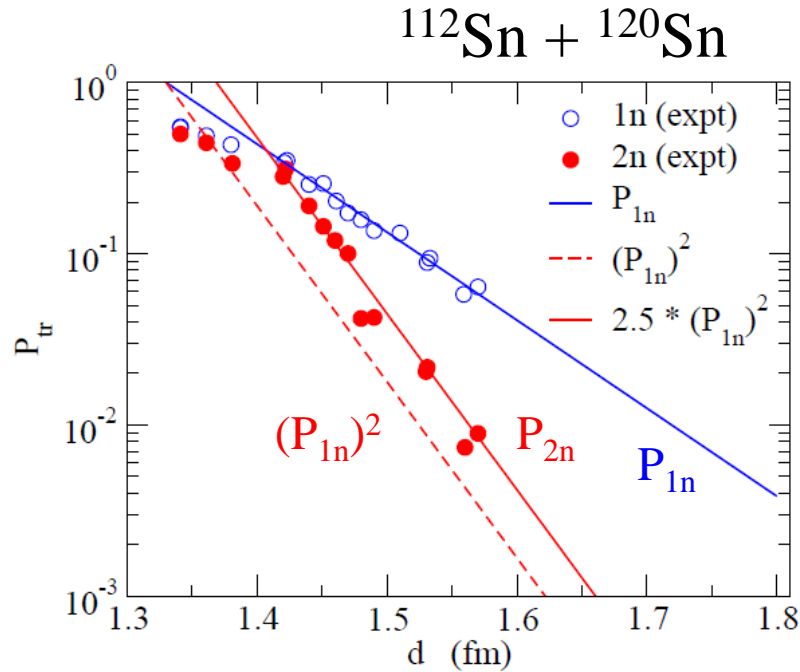
θ は散乱角



最近接距離は入射エネルギー E と散乱角 θ の関数

対相関と対移行反応

対移行反応の確率は対相関を強く反映する



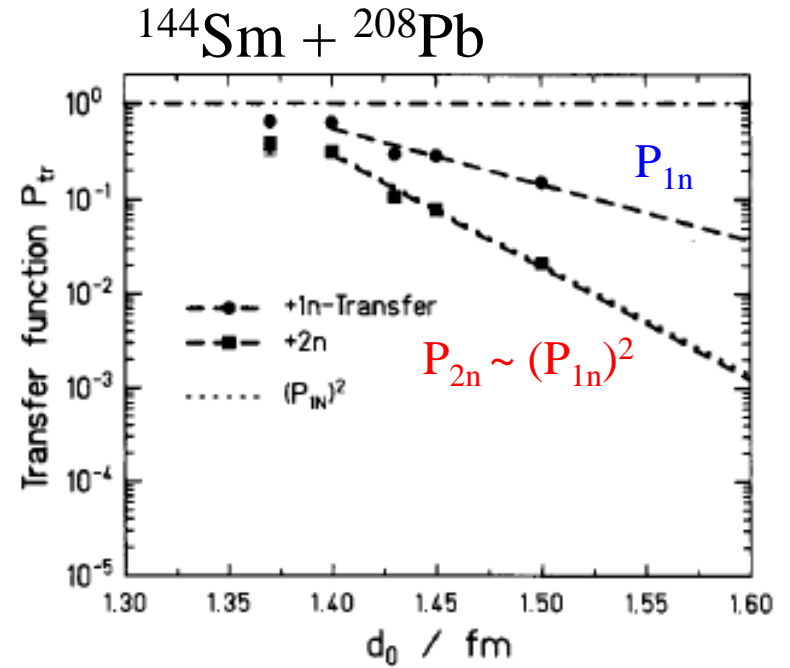
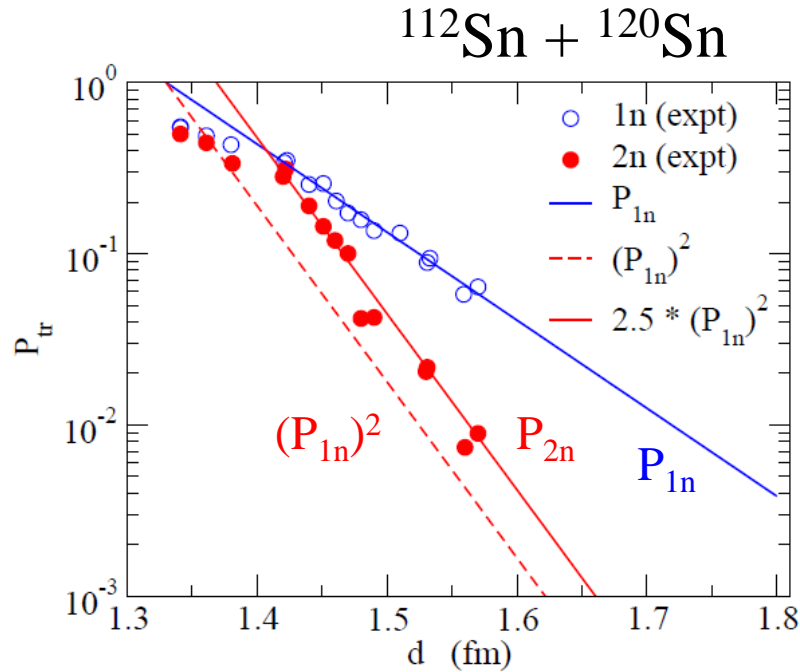
- $^{112}\text{Sn} + ^{120}\text{Sn}$ 反応では、単純な $(P_{1n})^2$ に比べて2中性子移行確率が増大
- 対相関が働かない(セミ)魔法数の原子核は2中性子移行確率の増大は見られない



2中性子移行確率は対相関に敏感

対相関と対移行反応

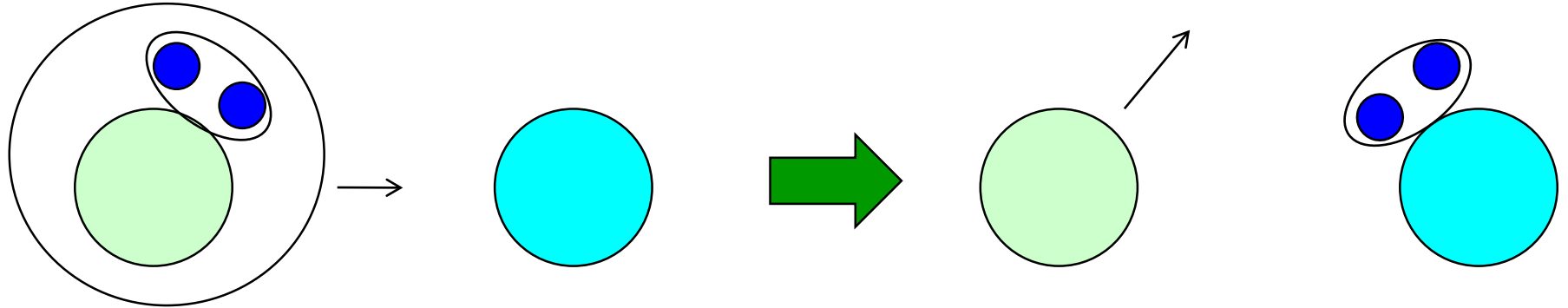
対移行反応の確率は対相関を強く反映する



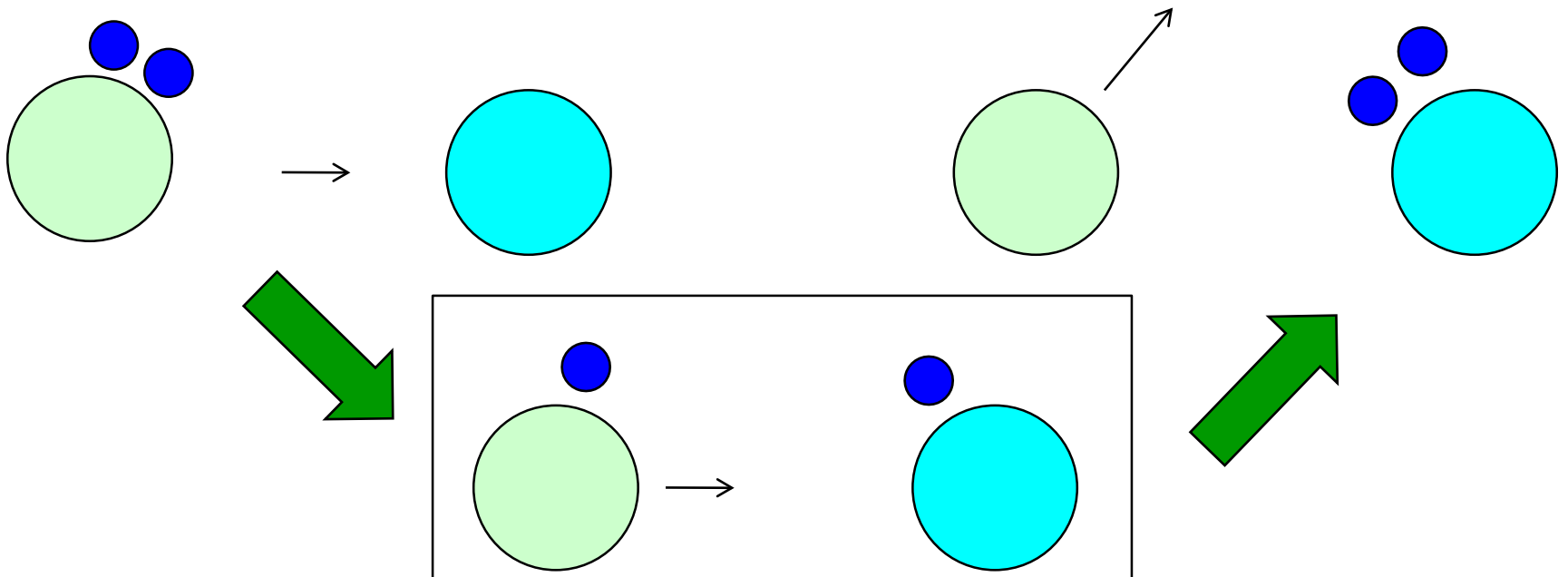
(注) ペアリングの強い系でも $1n$ 移行の方が $2n$ 移行に比べてとても多い

1ステップか2ステップか?

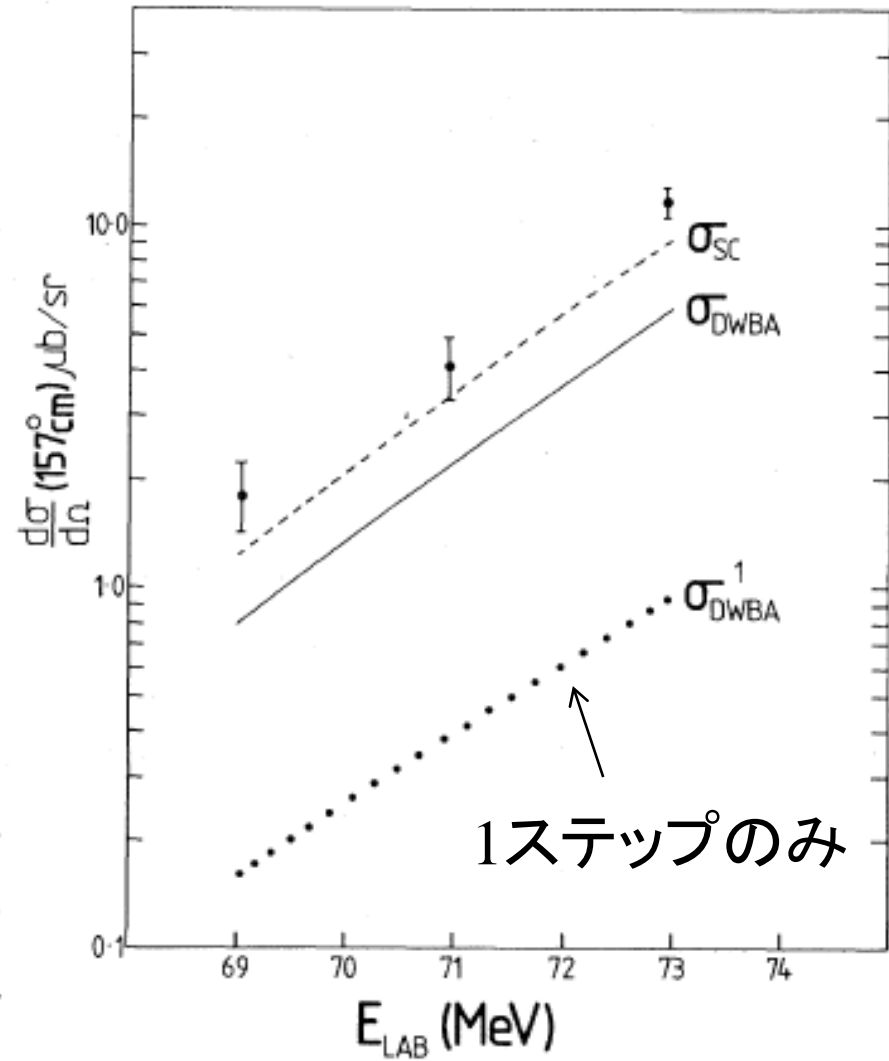
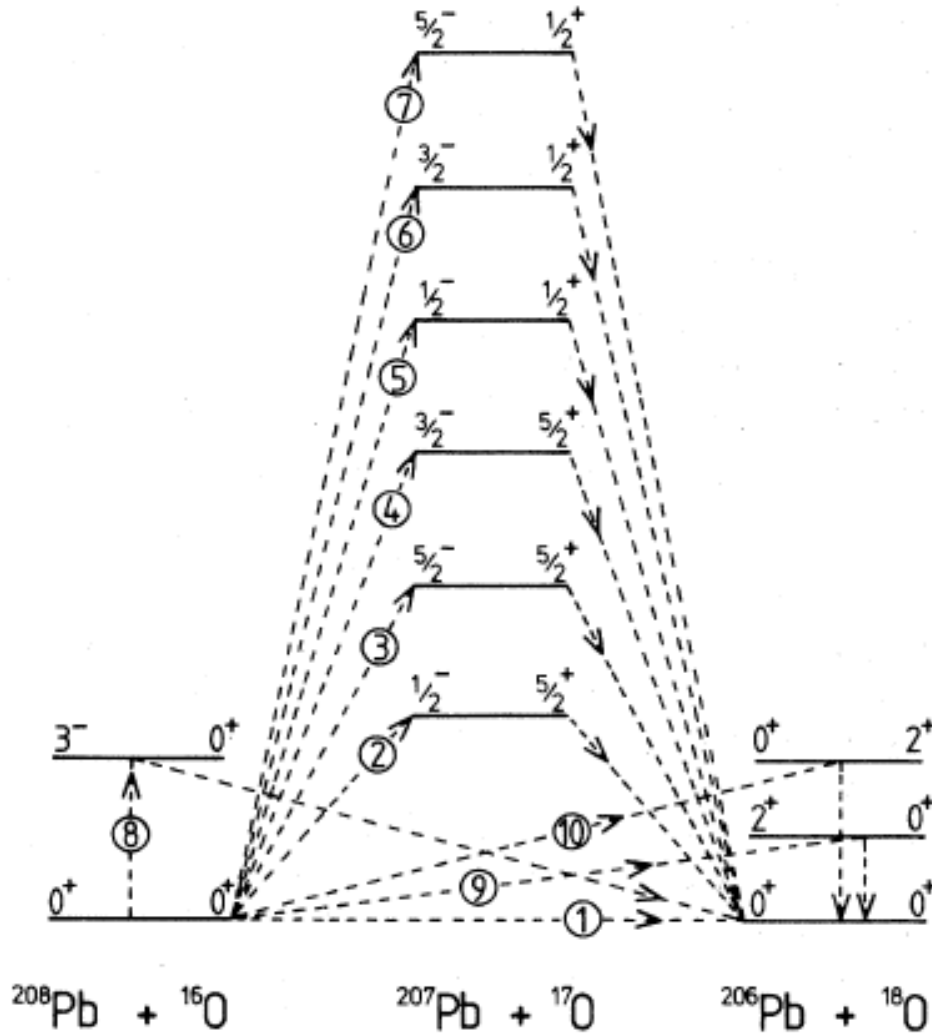
1ステップ (simultaneous/direct)



2ステップ (sequential):



1ステップか2ステップか?



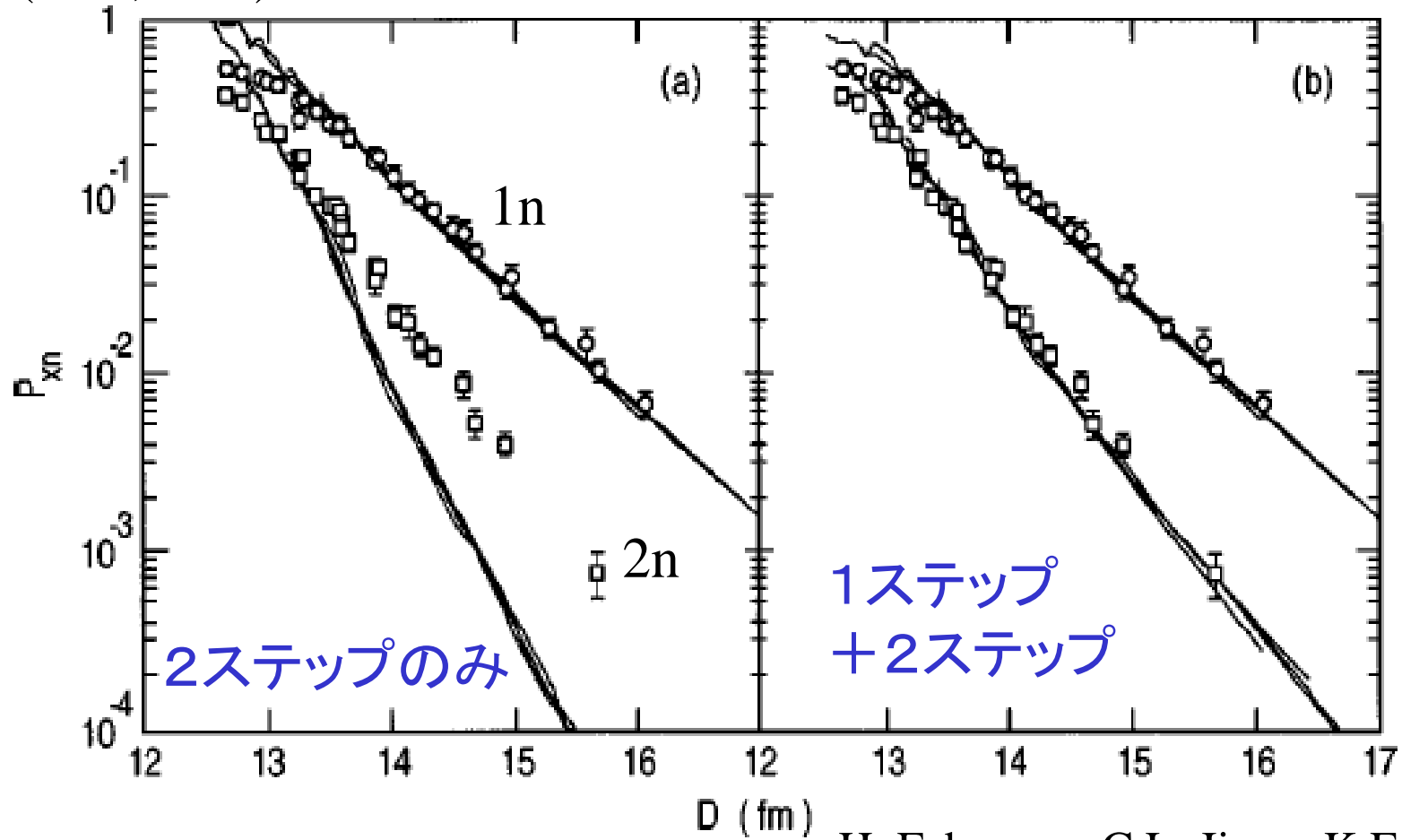
M.A. Franey et al.,
PRL41('78)837

1ステップのみの計算はデータを全く再現しない

→ 2ステップ過程の重要性

1ステップか2ステップか?

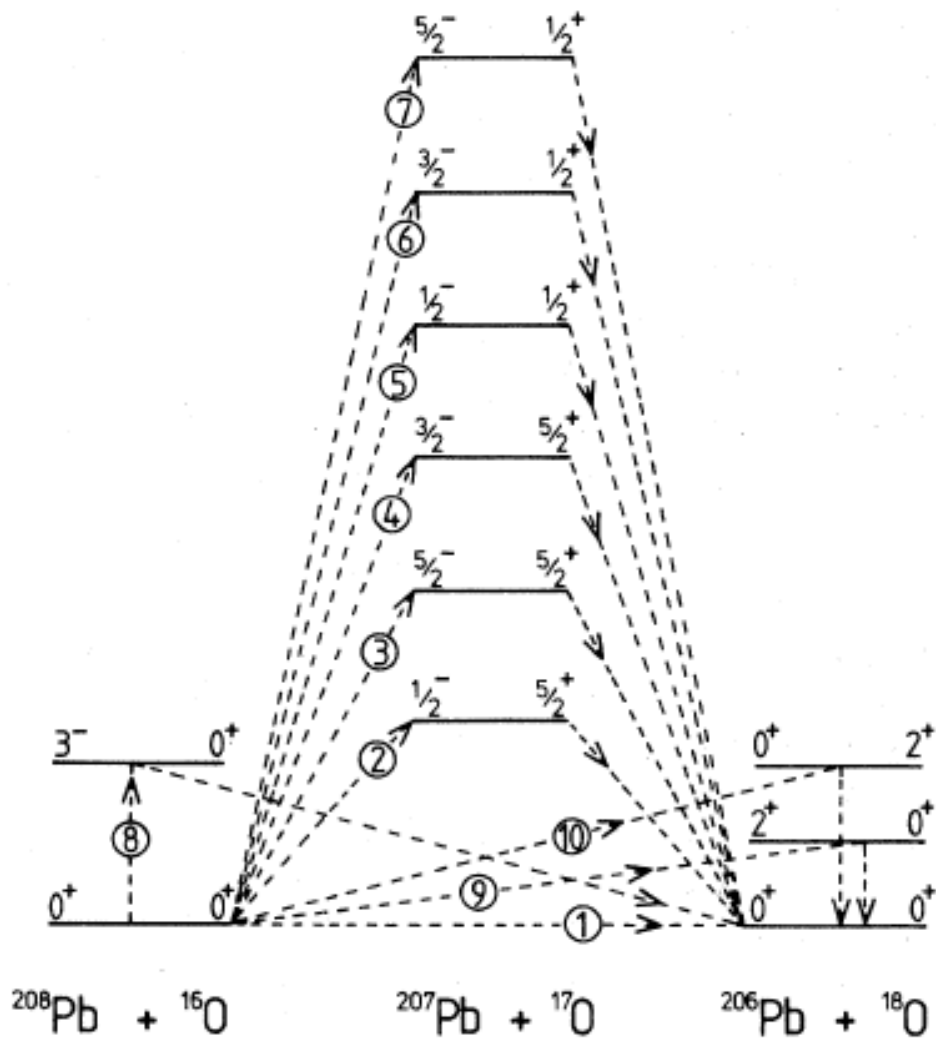
$^{124}\text{Sn}(^{58}\text{Ni}, ^{60}\text{Ni})^{122}\text{Sn}$ 反応



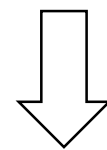
H. Esbensen, C.L. Jiang, K.E. Rehm,
PRC57('98)2401

1ステップと2ステップの両方が重要

中性子過剰核を用いた対移行反応



中性子過剰核を用いると、
中間状態(の多くが)非束縛



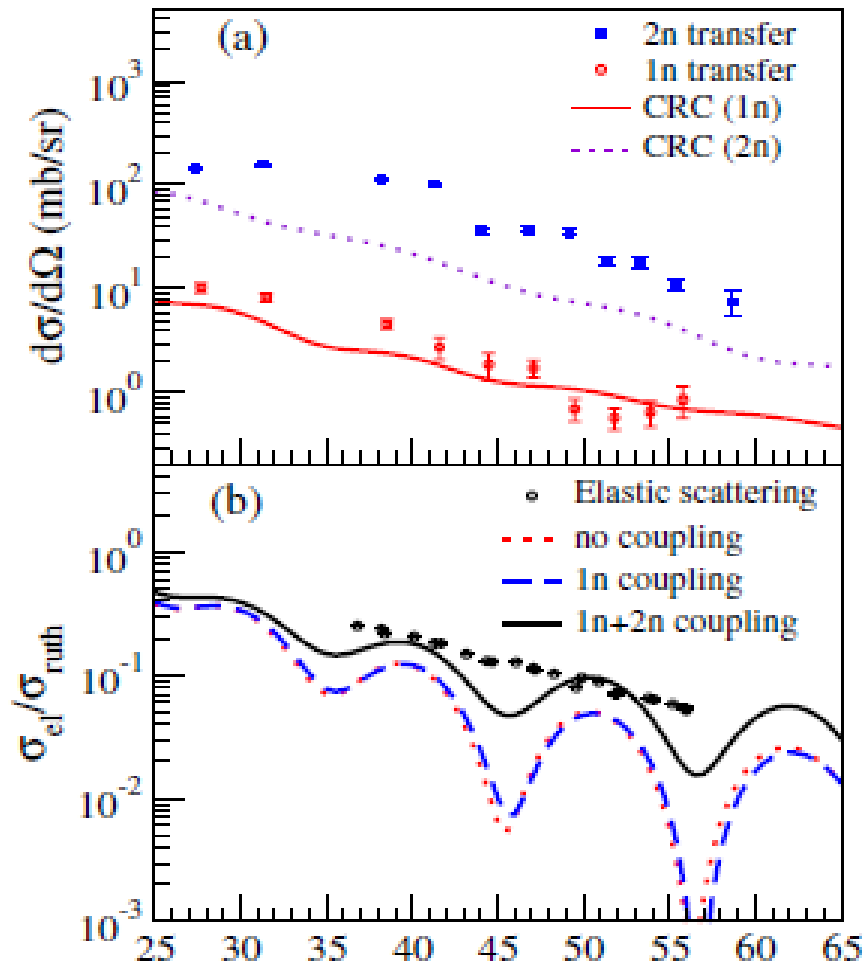
反応機構はどう変わる?



これからの課題

ボロミアン核の対移行反応: 実験データ

${}^6\text{He} + {}^{65}\text{Cu}$ (GANIL)

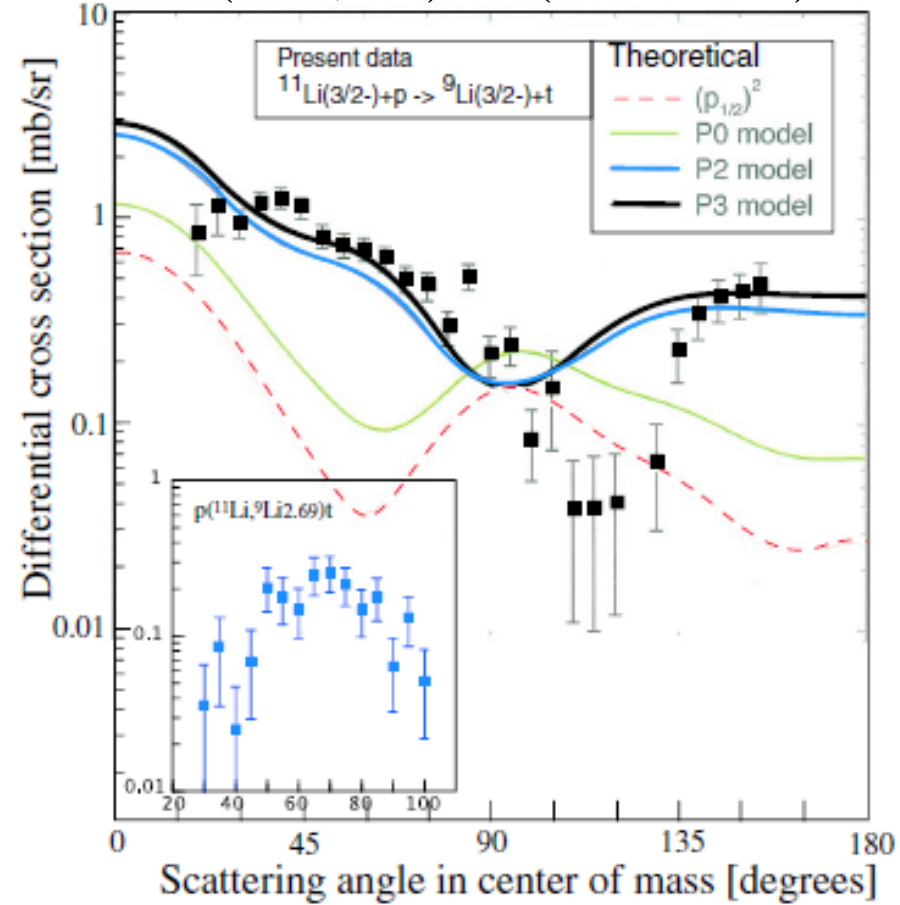


$E_{\text{lab}} = 22.6 \text{ MeV}$ θ_{cm} (deg)

A. Chatterjee et al., PRL101('08)032701

➤ 1n 移行に比べて 2n 移行が主

${}^1\text{H}({}^{11}\text{Li}, {}^9\text{Li}){}^3\text{H}$ (TRIUMF)



$E_{\text{lab}} = 3 \text{ MeV/A}$

I. Tanihata et al., PRL100('08)192502

➤ 相関なしの計算は実験データを再現せず

(参考)代理反応

中性子移行反応は原子力の観点からも重要

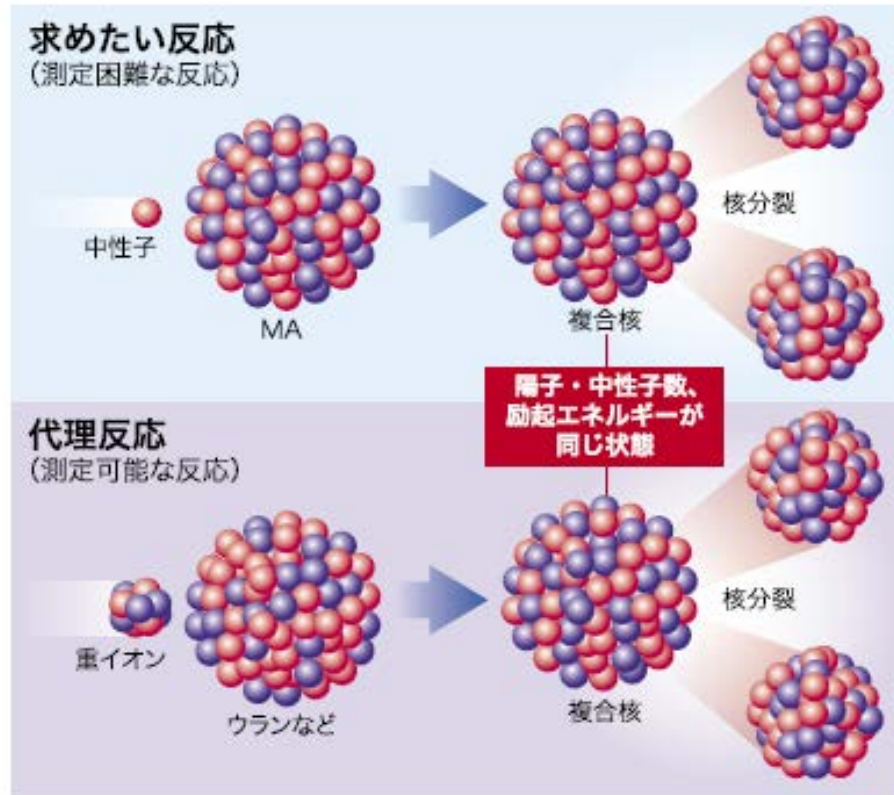
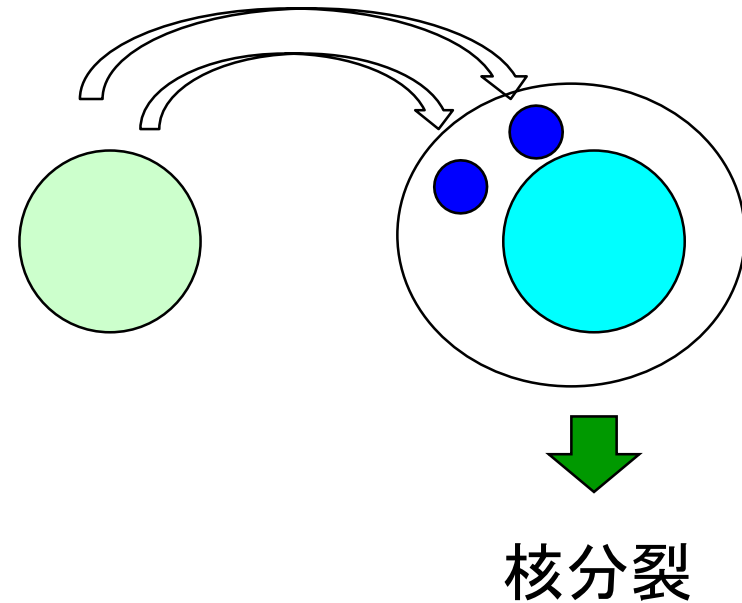


図1 代理反応

<http://asrc.jaea.go.jp/15panhu/kagaku/32kagaku/32interview.pdf>

中性子誘起核分裂 (n,f) を
中性子移行反応を用いて模擬
(代理反応)

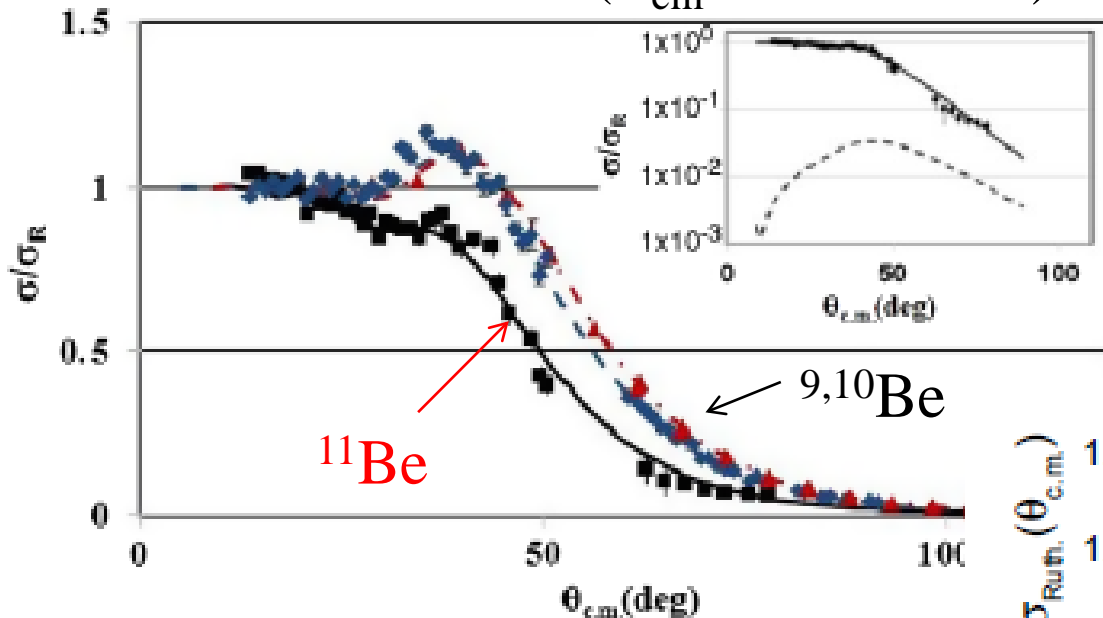


中性子誘起核分裂の間接測定

JAEA でプロジェクトが進行中

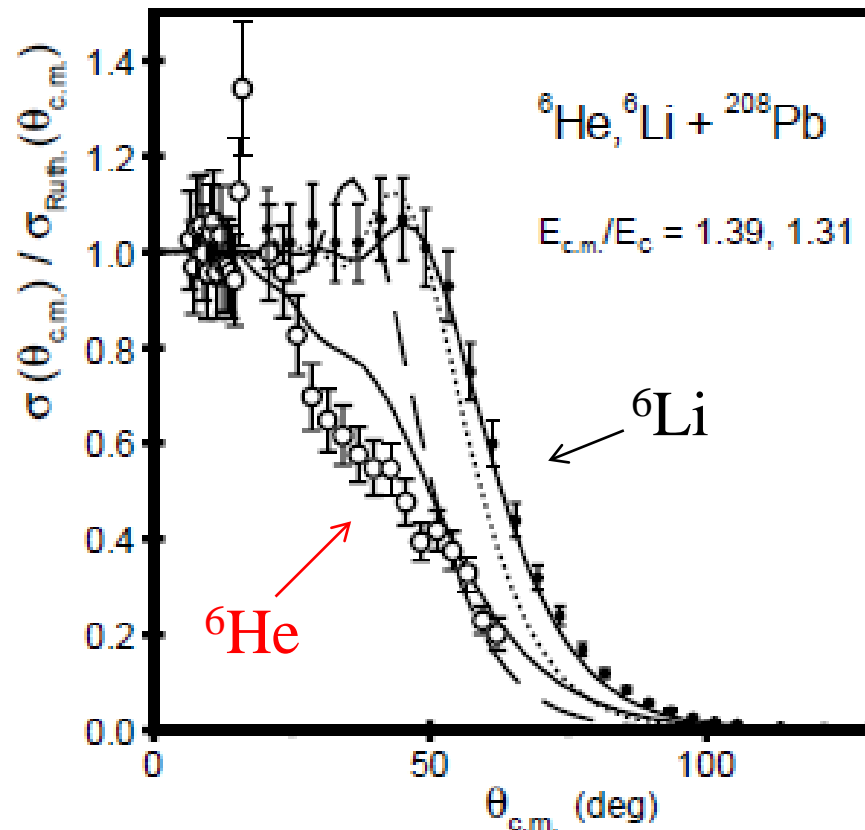
ハロ一核の弾性散乱

$9,10,11\text{Be} + {}^{64}\text{Zn}$ ($E_{\text{cm}} = 24.5 \text{ MeV}$)



A. Di Pietro et al.,
PRL105('10)022701

K. Rusek et al.,
PRC67('03)041604(R)

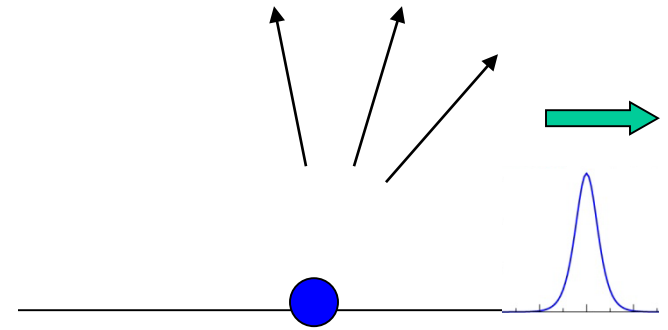
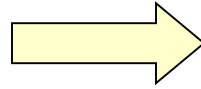


ハロ一核を用いると弾性散乱
の断面積が大きく減少

Optical model

Reaction processes

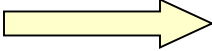
- Elastic scatt.
- Inelastic scatt.
- Transfer reaction
- Compound nucleus formation (fusion)



Loss of incident flux
(absorption)

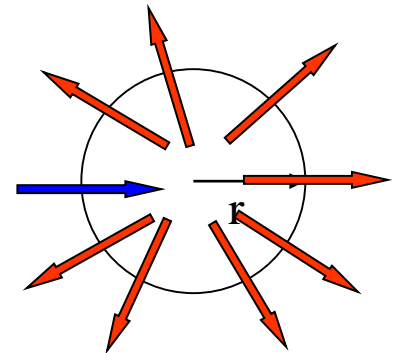
Optical potential

$$V_{\text{opt}}(\mathbf{r}) = V(\mathbf{r}) - iW(\mathbf{r}) \quad (W > 0)$$


$$\nabla \cdot \mathbf{j} = \dots = -\frac{2}{\hbar}W|\psi|^2$$

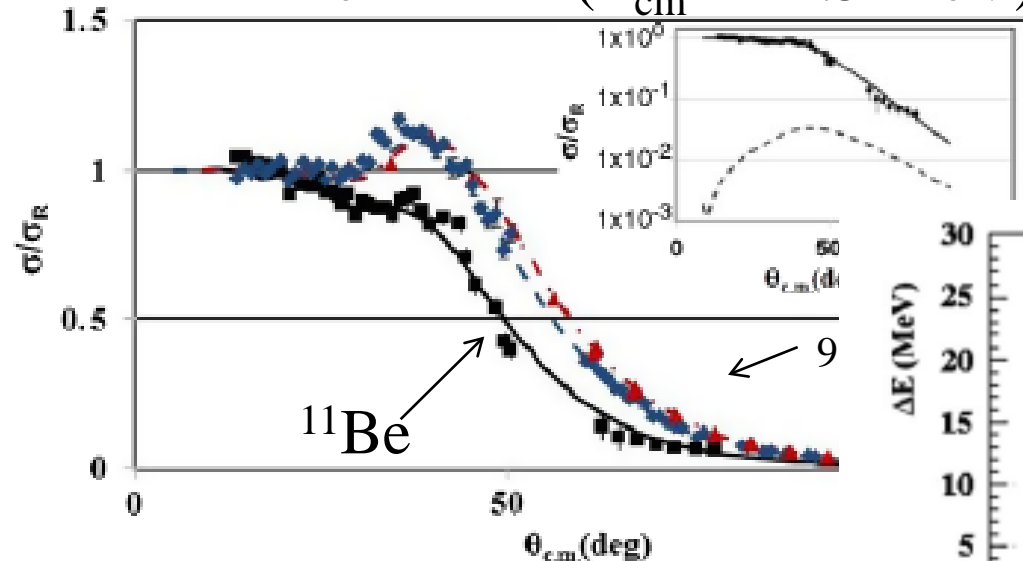
(note) Gauss's theorem

$$\int_S \mathbf{j} \cdot \mathbf{n} dS = \int_V \nabla \cdot \mathbf{j} dV$$



ハロ一核の弾性散乱

$9,10,11\text{Be} + {}^{64}\text{Zn}$ ($E_{\text{cm}} = 24.5 \text{ MeV}$)



A. Di Pietro et al.,
PRL105('10)022701

反応断面積(弾性散乱
以外の和):

$\sigma_R = 1090 \text{ mb}$ (${}^9\text{Be}$)

1260 mb (${}^{10}\text{Be}$)

2730 mb (${}^{11}\text{Be}$)

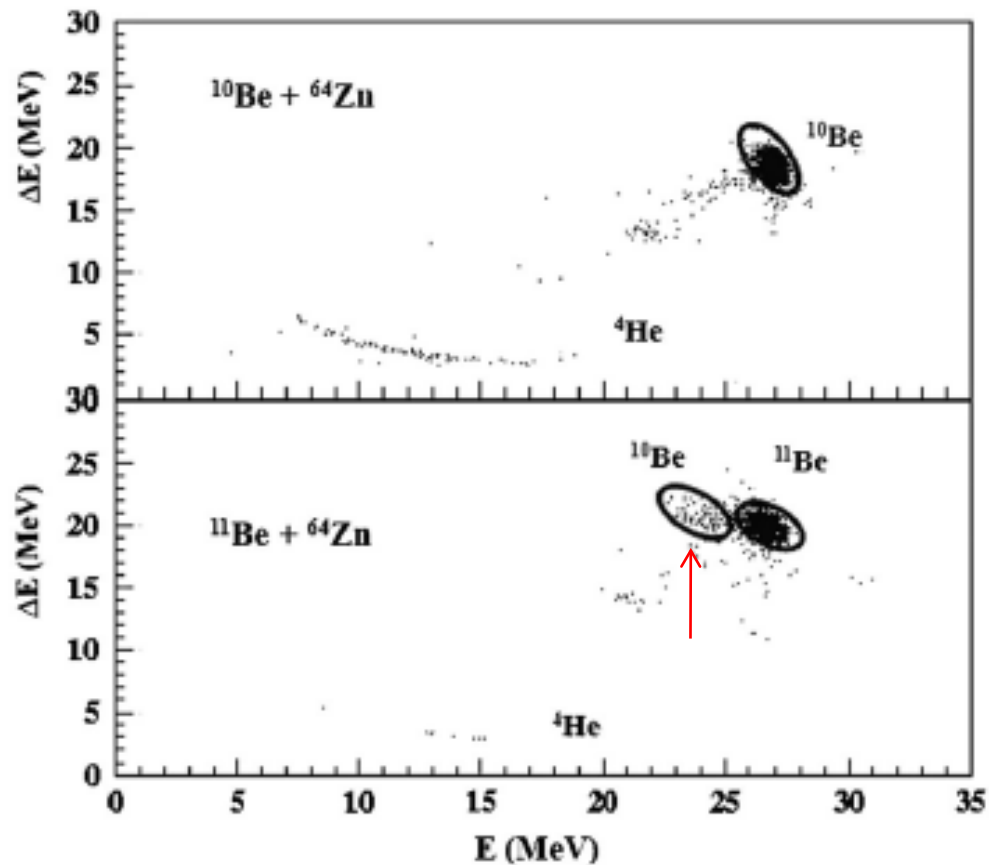
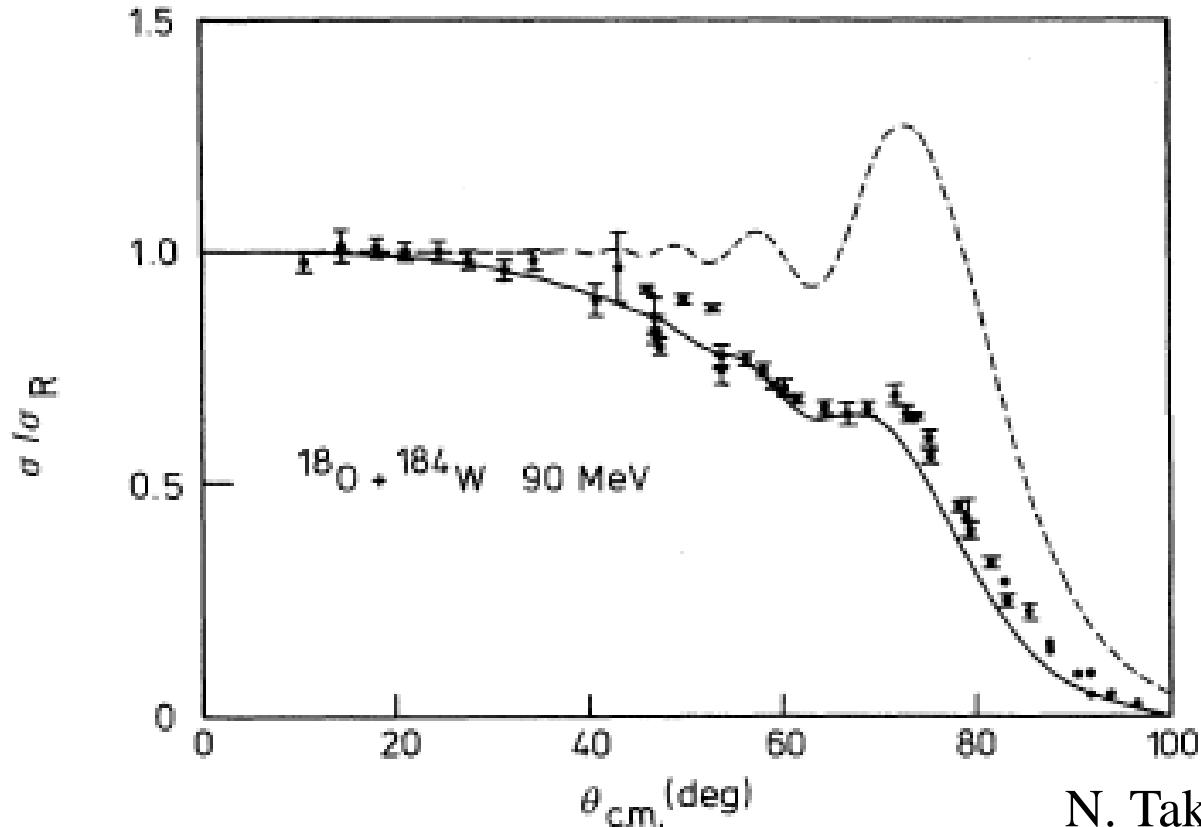


FIG. 2. ΔE - E scatter plots for the reactions ${}^{10}\text{Be} + {}^{64}\text{Zn}$ (top) and ${}^{11}\text{Be} + {}^{64}\text{Zn}$ (bottom), at $\theta = 35^\circ$.

同じような例(ただし、安定核) : $^{18}\text{O} + ^{184}\text{W}$



N. Takigawa, F. Michel,
A.B. Balantekin, G. Reidemeister,
PRC44('91)477

回転励起のエネルギーは小 \longrightarrow (クーロン)励起されやすい

弾性散乱のフラックスの一部が非弾性散乱に流れ、
弾性散乱の断面積が減る cf. 長いレンジの吸収