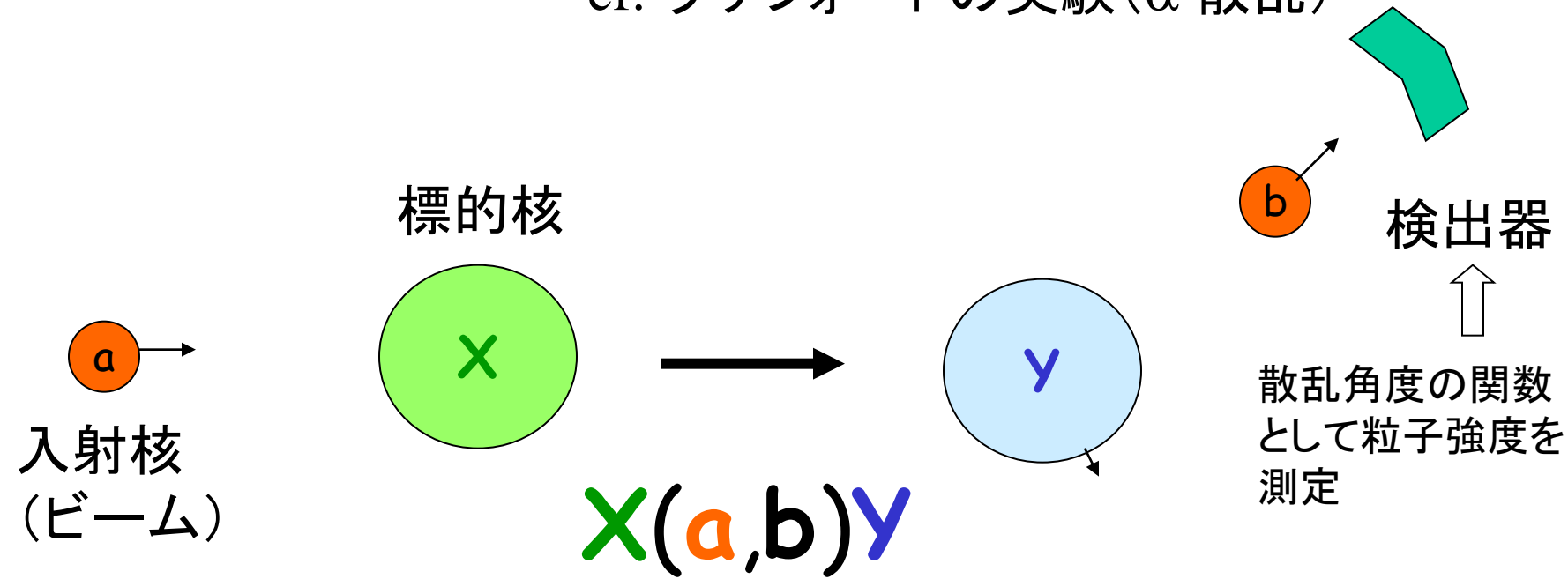


不安定核の反応(低エネルギー)

- 核融合反応
- 対移行反応
- 弾性散乱

核反応論基礎

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)

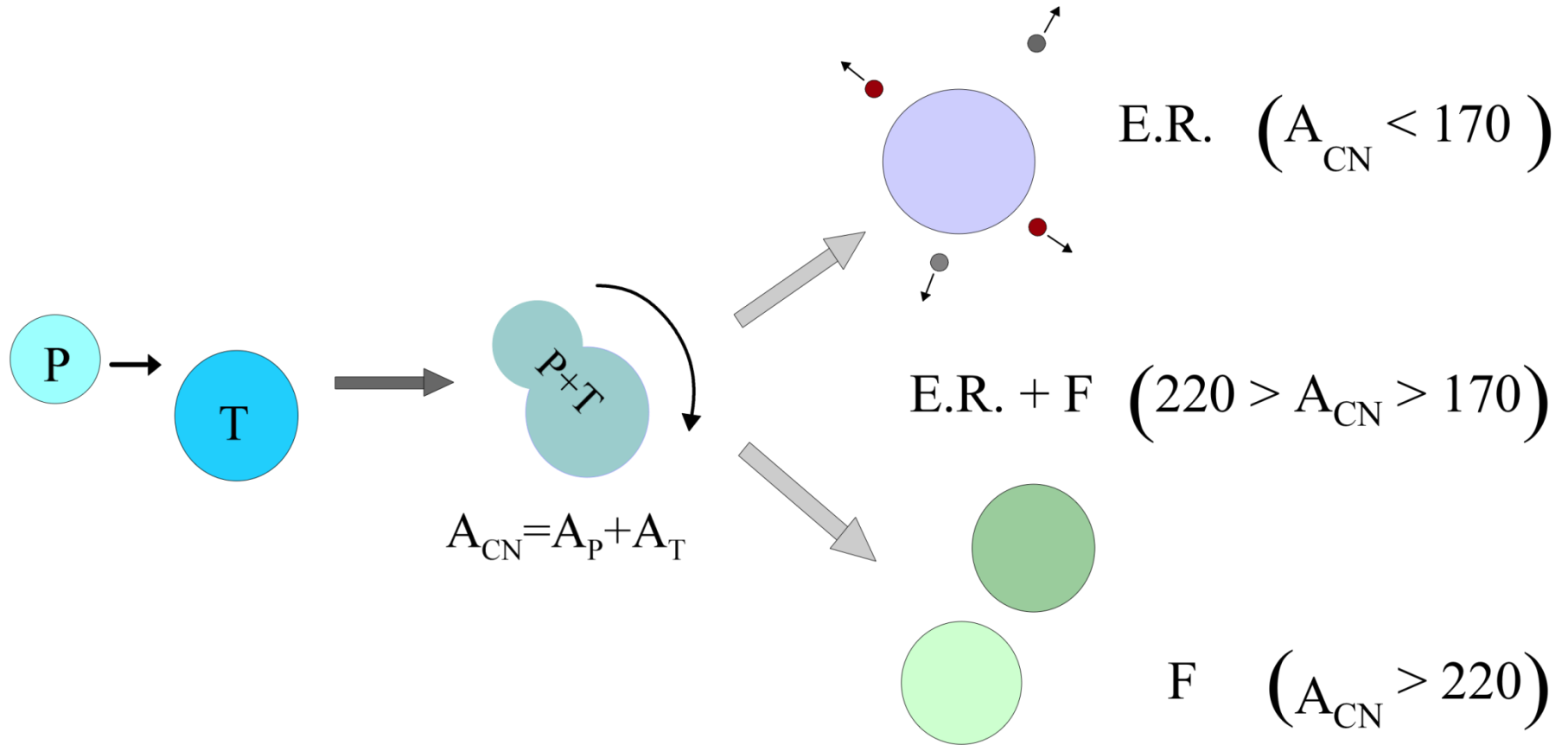


反応チャンネルの例

- $^{208}\text{Pb}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{O})^{208}\text{Pb}$: $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ 弾性散乱
- $^{208}\text{Pb}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{O})^{208}\text{Pb}^*$: $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ 非弾性散乱
- $^{208}\text{Pb}(^{17}\text{O}, ^{16}\text{O})^{209}\text{Pb}$: 1 中性子移行反応

この他に複合核合成反応 (核融合反応) も

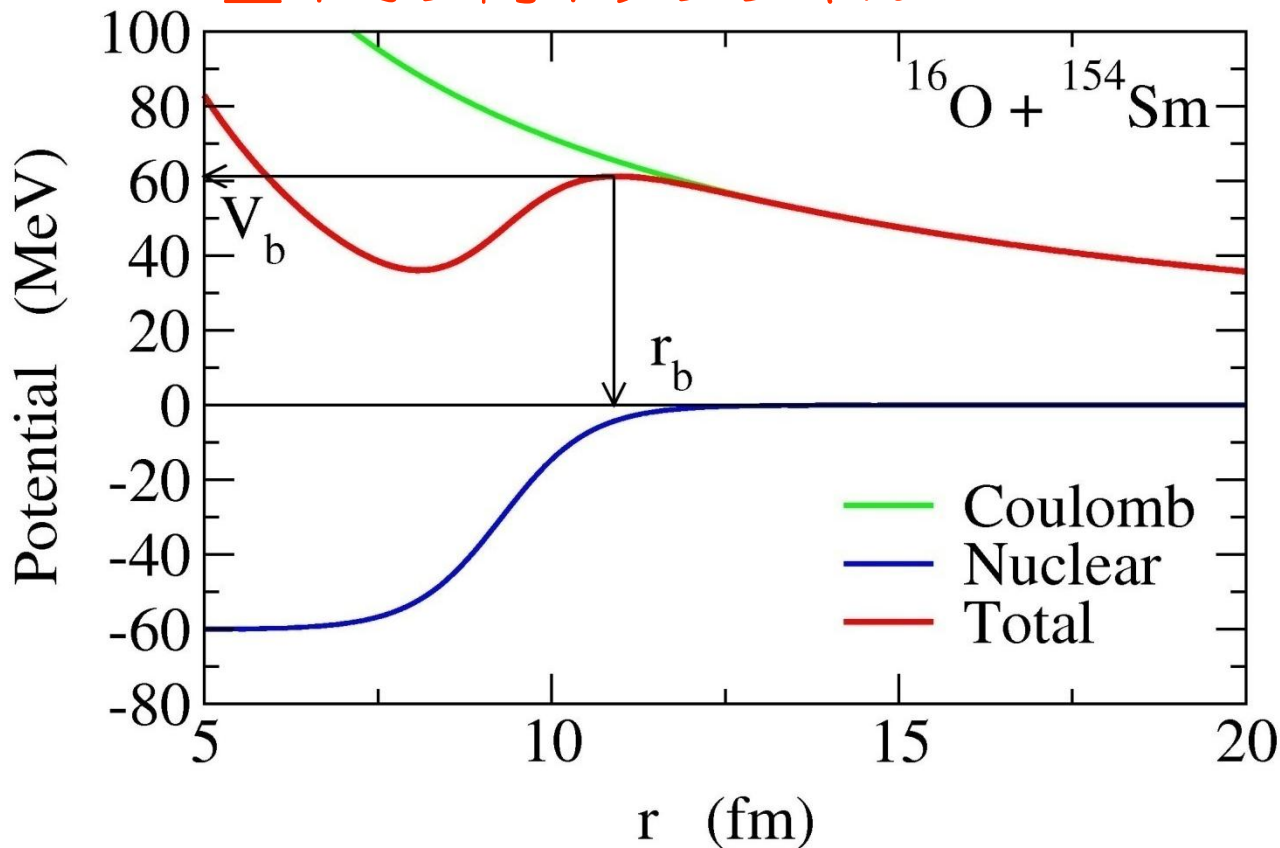
核融合反応: 複合核合成反応



courtesy: Felipe Canto

重イオン反応の概観

重イオン間ポテンシャル



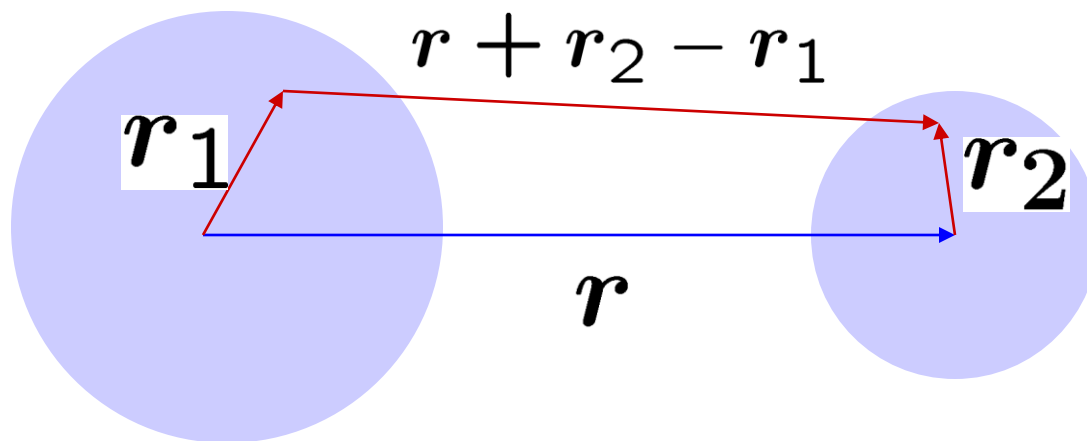
2つの力:

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)

- 二重畳み込みポテンシャル (Double Folding Potential)



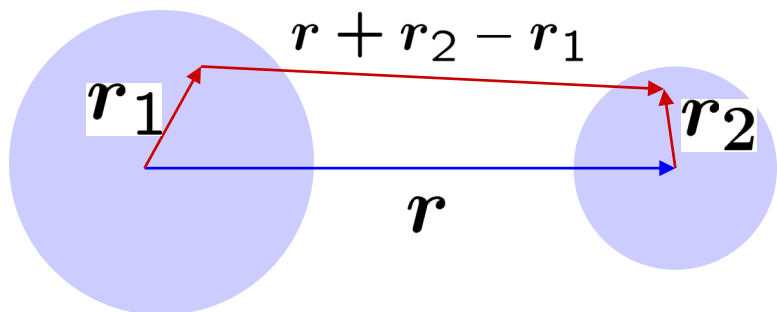
$$V_{DF}(r) = \int dr_1 dr_2 \rho_1(r_1) \rho_2(r_2) \times v(r + r_2 - r_1)$$

v : 核子間相互作用

- 現象論的ポテンシャル

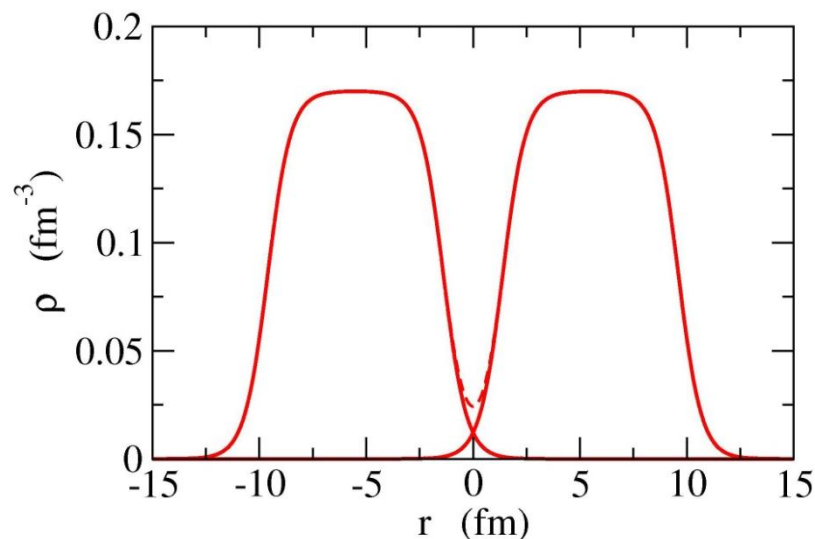
$$V_{WS}(r) = -\frac{V_0}{1 + \exp[(r - R_0)/a]}$$

• 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)



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

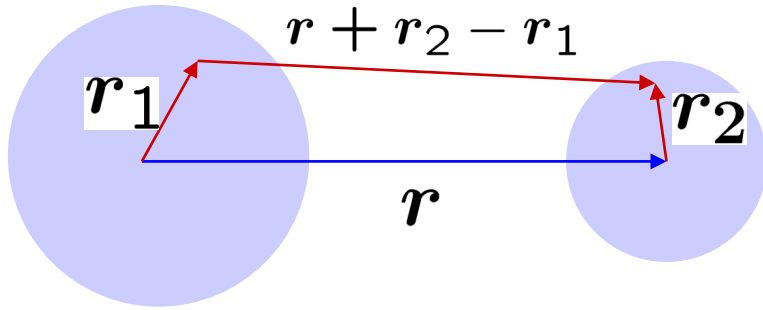
$$a_d \sim 0.54 \text{ (fm)}$$

• Phenomenological potential

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

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

Double folding potential



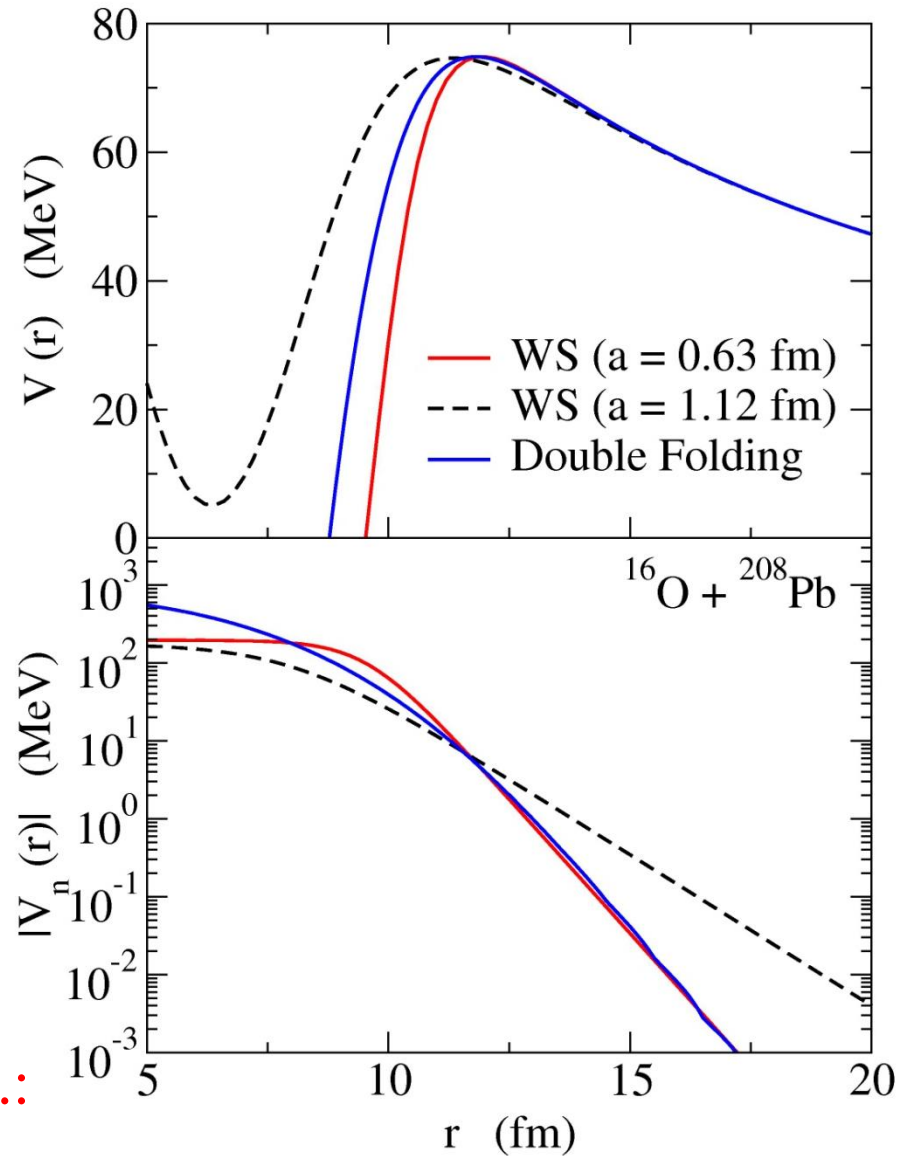
$$V_{DF}(\mathbf{r}) = \int d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 \rho_1(\mathbf{r}_1) \rho_2(\mathbf{r}_2) \times v(\mathbf{r} + \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)$$

cf. Michigan 3 range Yukawa (M3Y) interaction

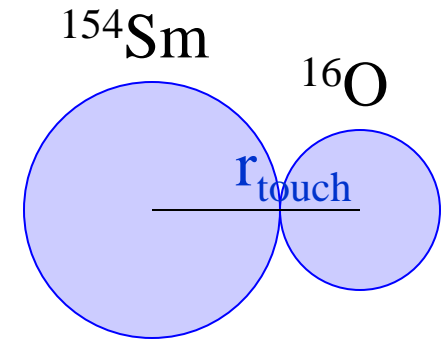
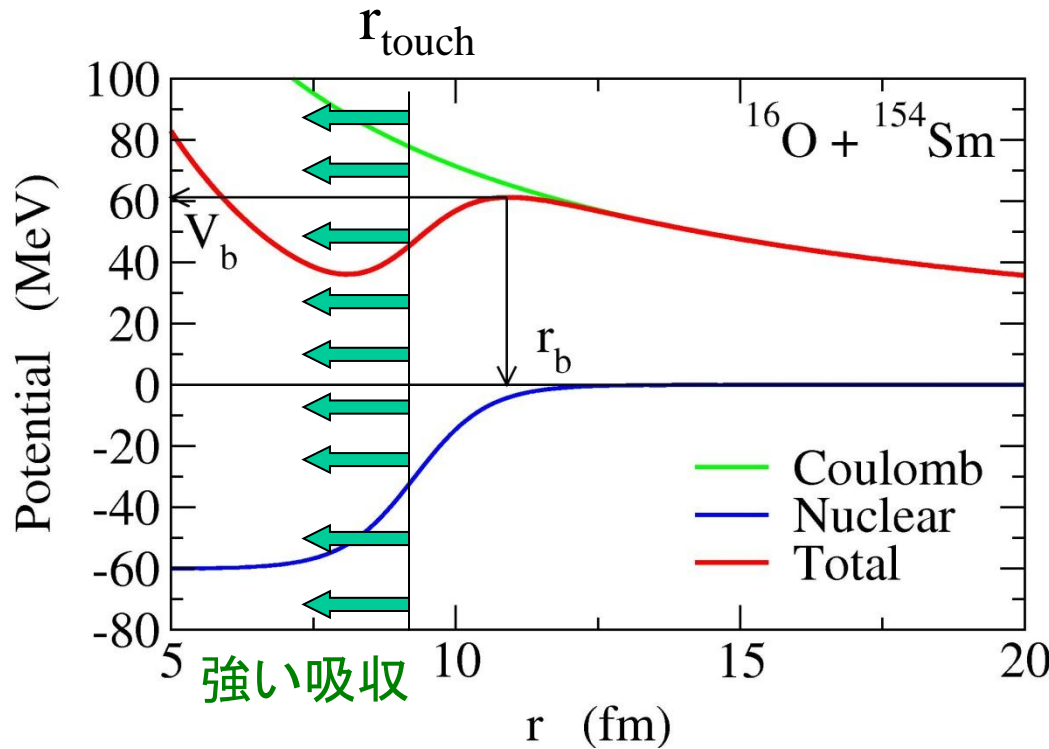
$$v_{nn}(r) = 7999 \frac{e^{-4r}}{4r} - 2134 \frac{e^{-2.5r}}{2.5r} - 276 \delta(r) \quad (\text{MeV})$$

Phenomenological Woods-Saxon pot.:

$$V_N(r) = -V_0 / [1 + \exp((r - R_0)/a)]$$



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)

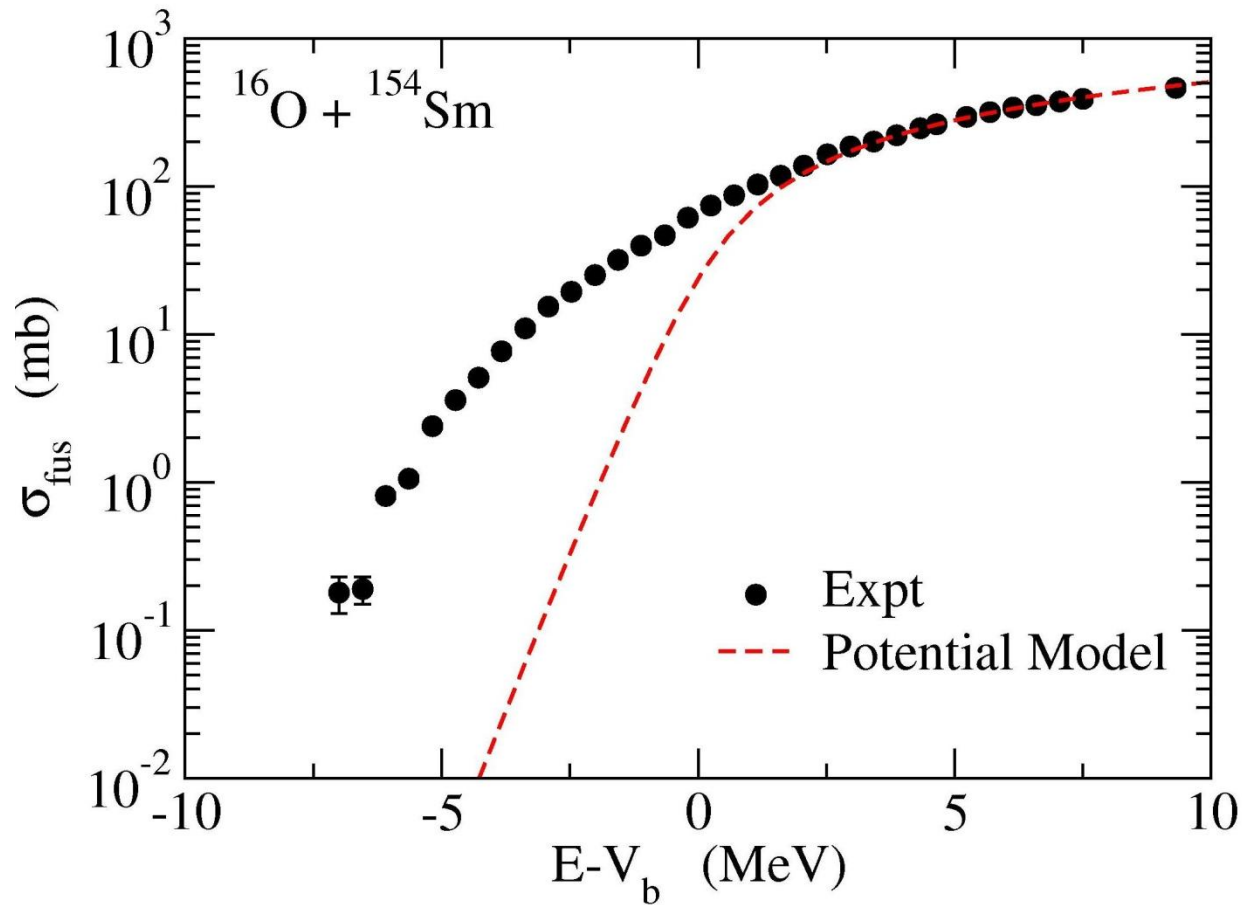


核融合の確率
 $= r_{\text{touch}}$ に到達する確率



障壁の透過確率

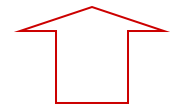
$$\sigma_{\text{fus}}(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1) P_l(E)$$



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



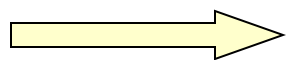
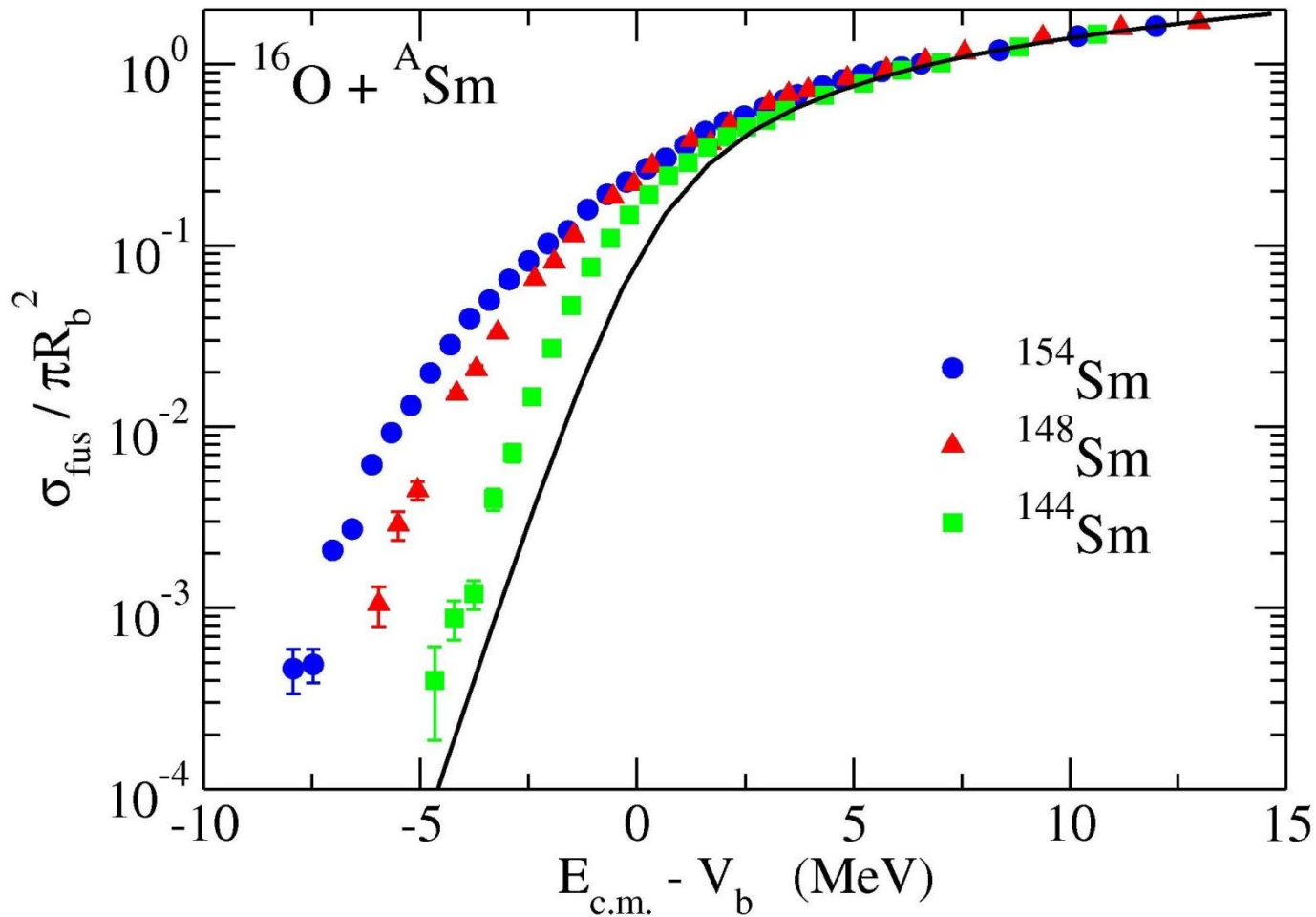
何が原因？

cf. seminal work:

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

PRC21('80)2427

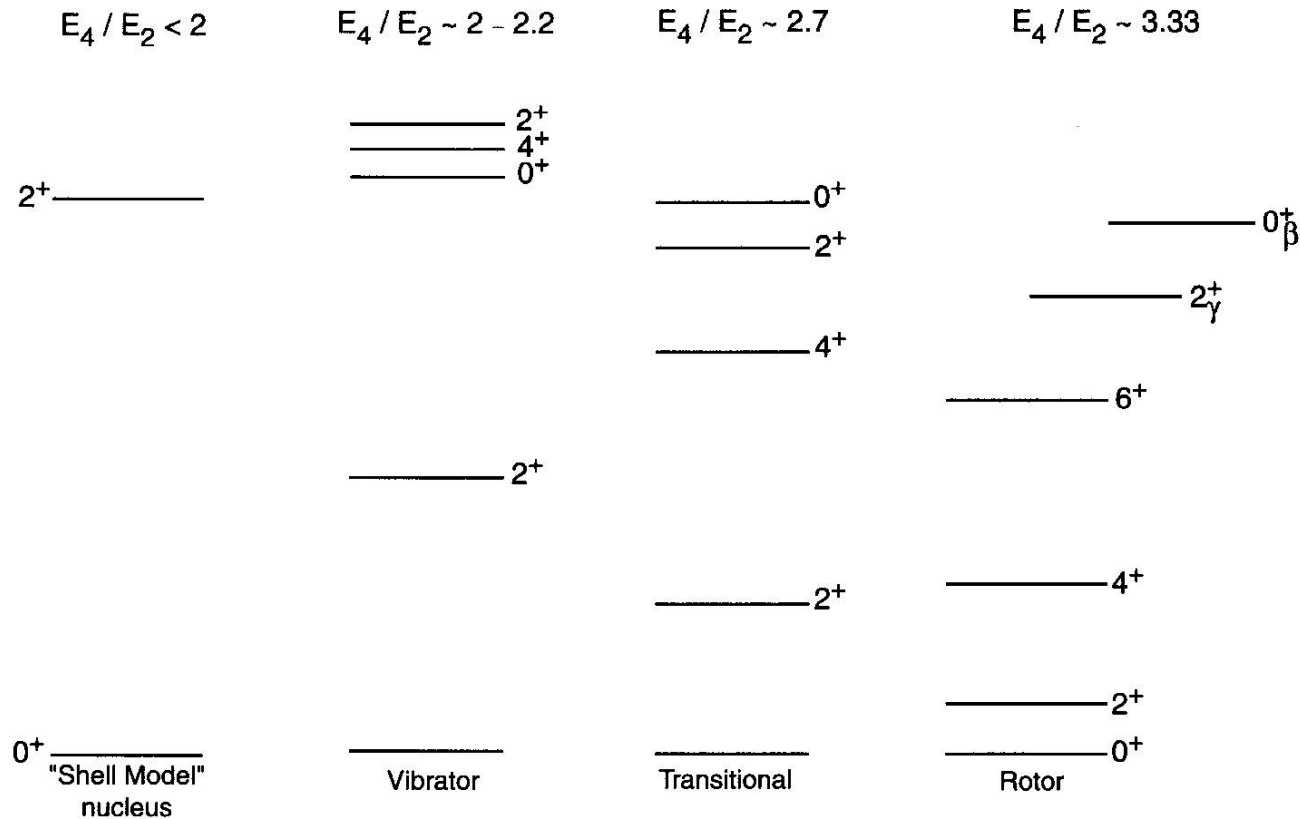
核融合断面積の標的核依存性



$E < V_b$ において強い標的核依存性

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。



SCHEMATIC EVOLUTION OF STRUCTURE
NEAR CLOSED - SHELL → MID SHELL

Taken from R.F. Casten,
“Nuclear Structure from a
Simple Perspective”

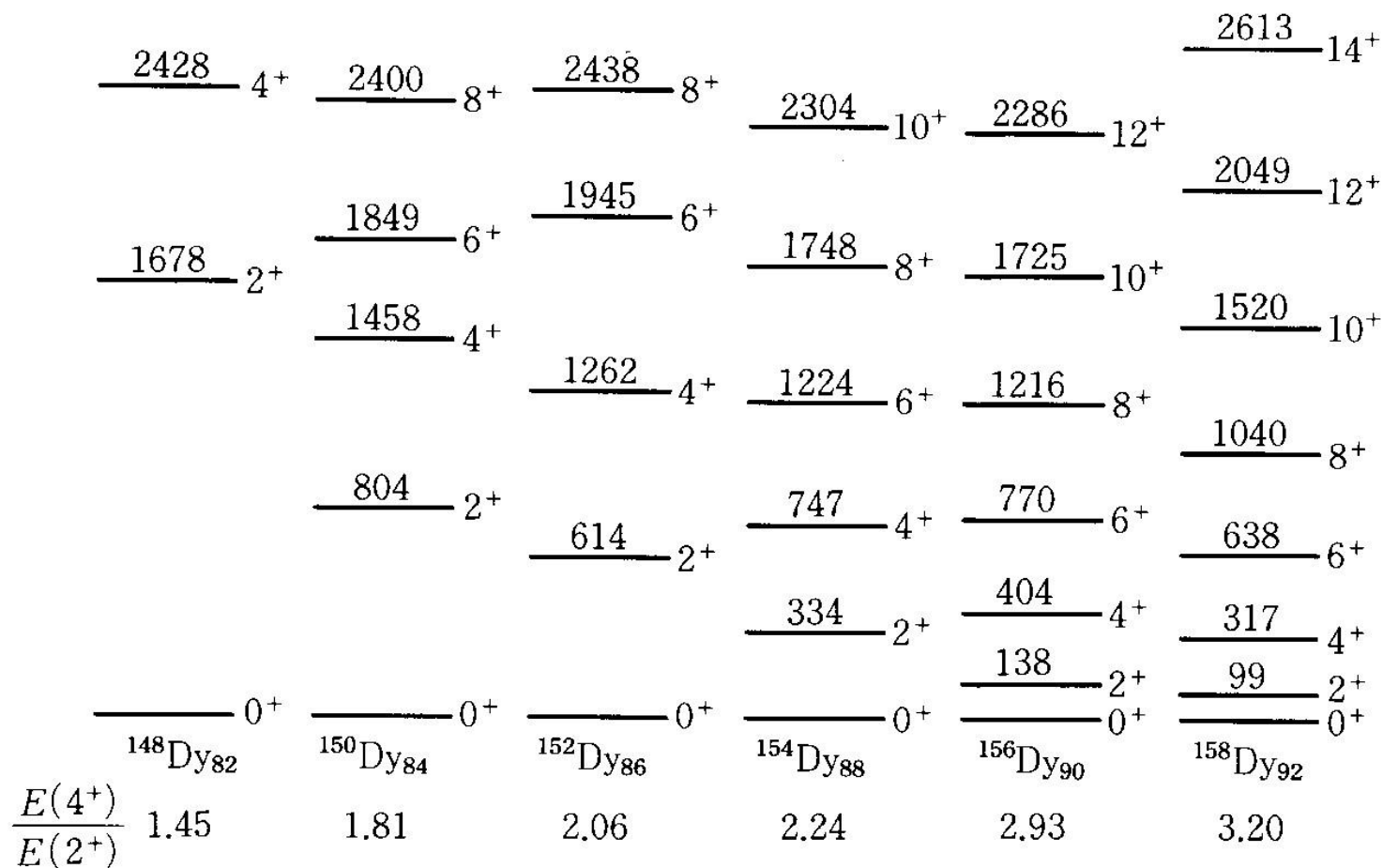
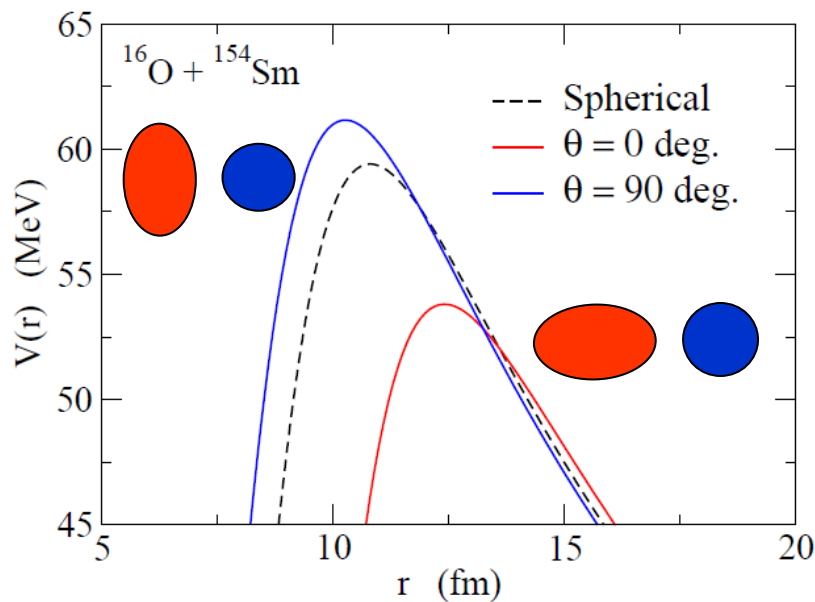
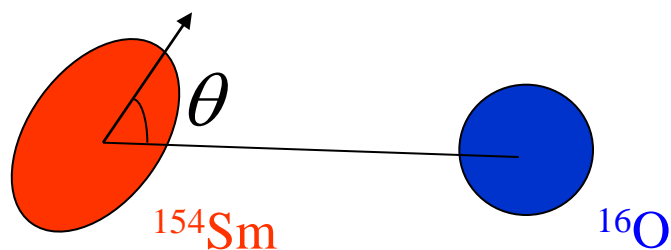


図 3-4 Dy アイソトープの低励起スペクトル. 励起エネルギーの単位は keV.

市村、坂田、松柳
「原子核の理論」より

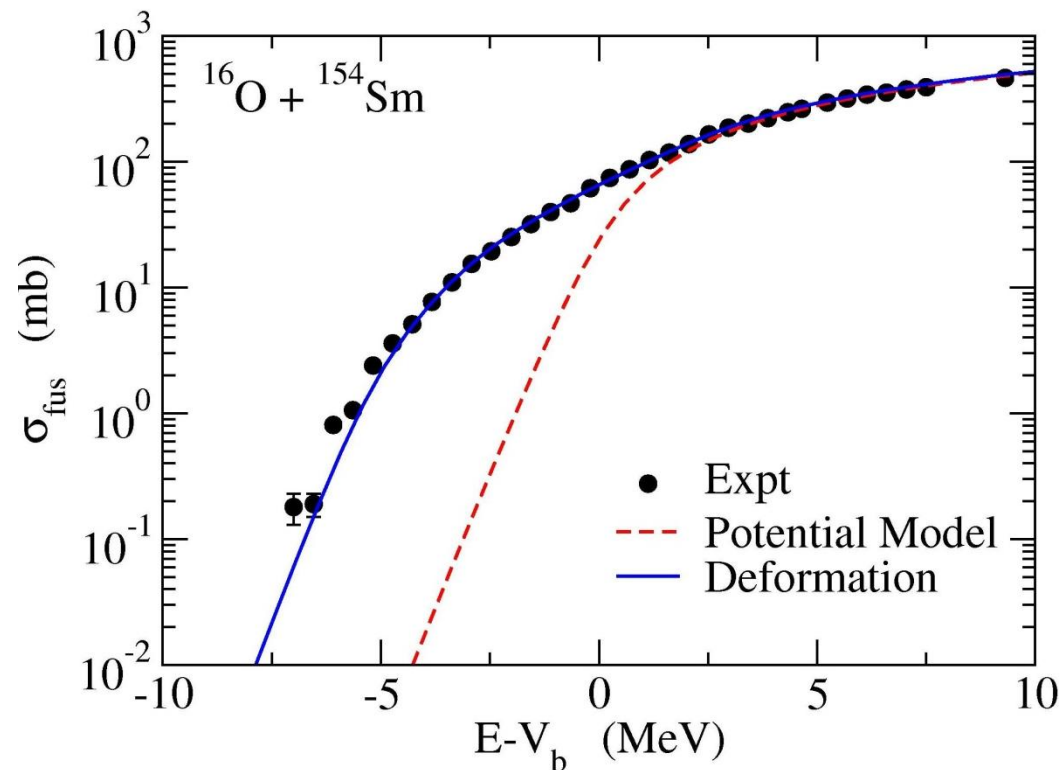
Subbarrier fusion:

strong interplay between reaction and structure

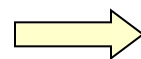


coupled-channels equations

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

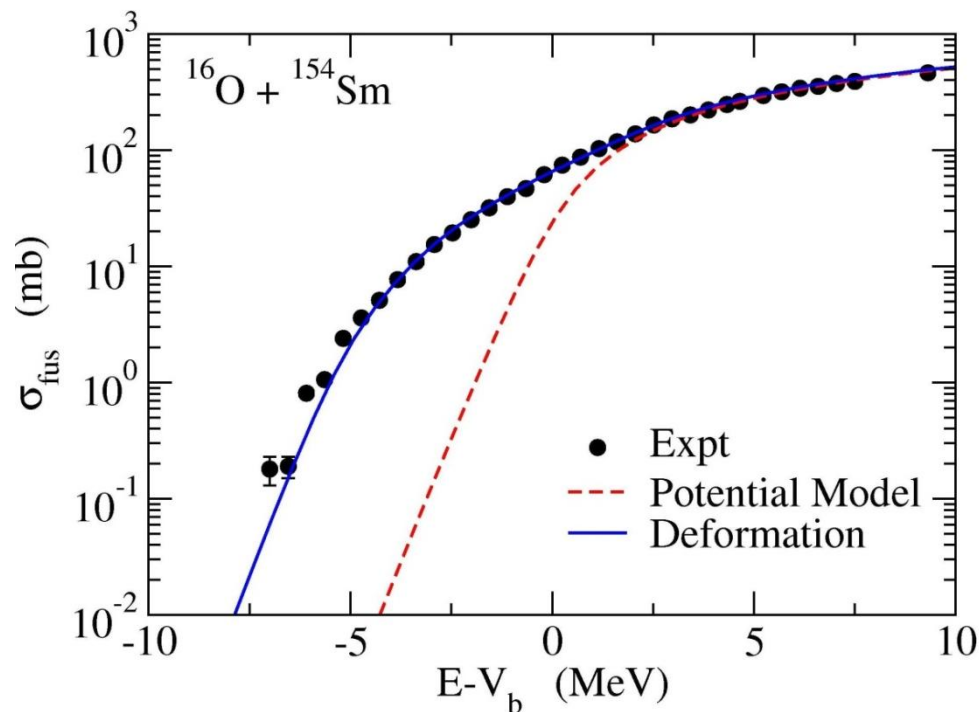


Def. Effect: enhances σ_{fus} by a factor of 10 ~ 100

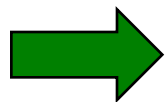


Fusion: interesting probe for nuclear structure

不安定核を用いた核融合反応



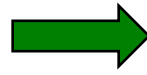
安定核の核融合反応では、原子核間相対運動と散乱核の内部自由度(内部励起)が結合することで、核融合反応断面積が増大(トンネル領域)



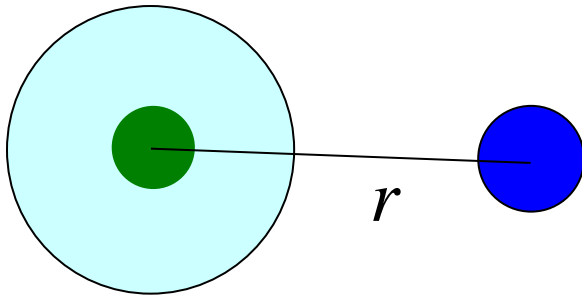
不安定核(弱束縛核)を用いるとどうなるか?
核融合反応断面積は増大? 変化なし? 減少?

2つの効果

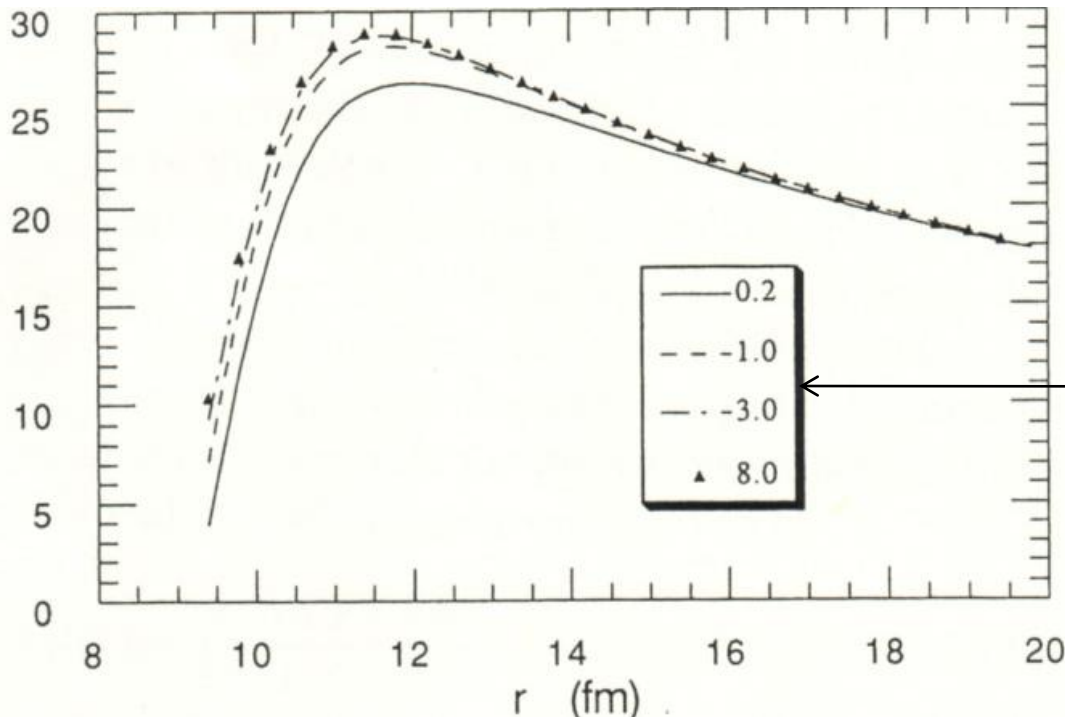
1. ハロー構造による重イオン間
ポテンシャルの低下



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

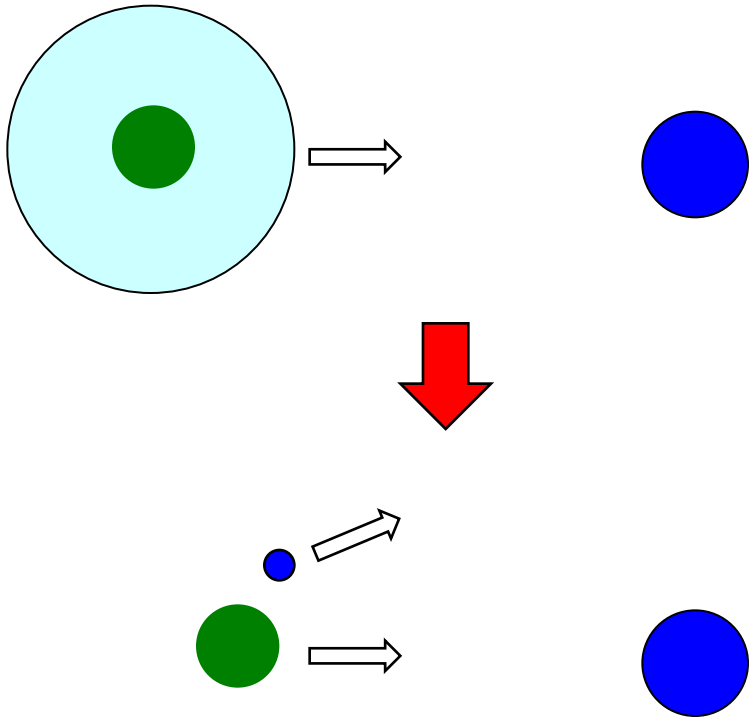
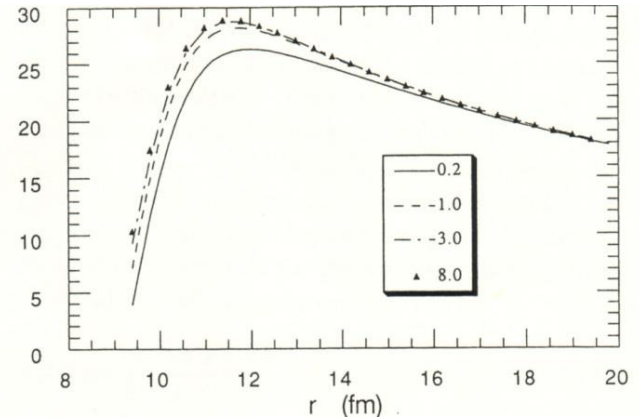
dineutron クラスタ
の分離エネルギー

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

2つの効果

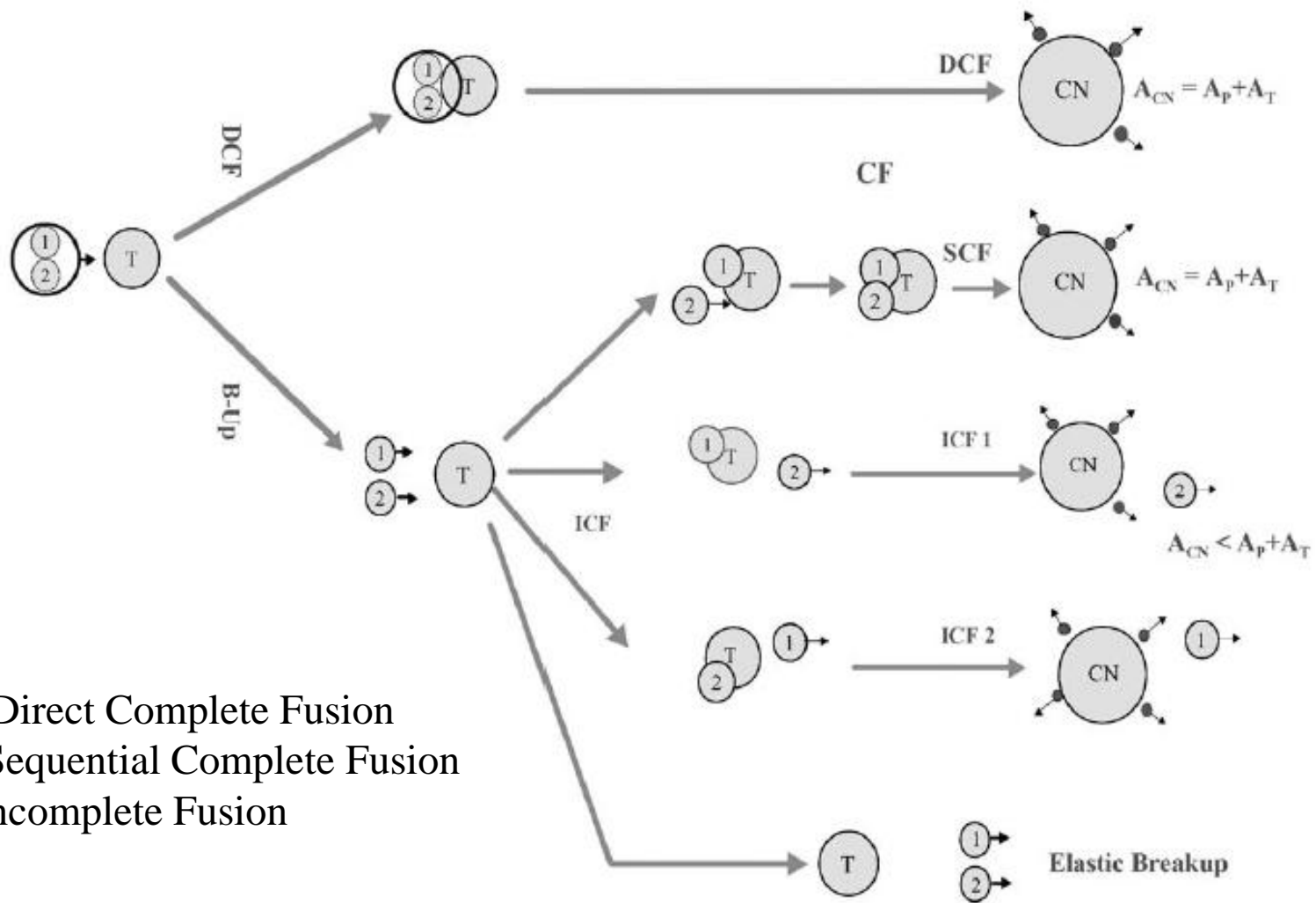
1. ハロー構造による重イオン間ポテンシャルの低下
2. 分解 (breakup) の効果

これはあまり自明ではない



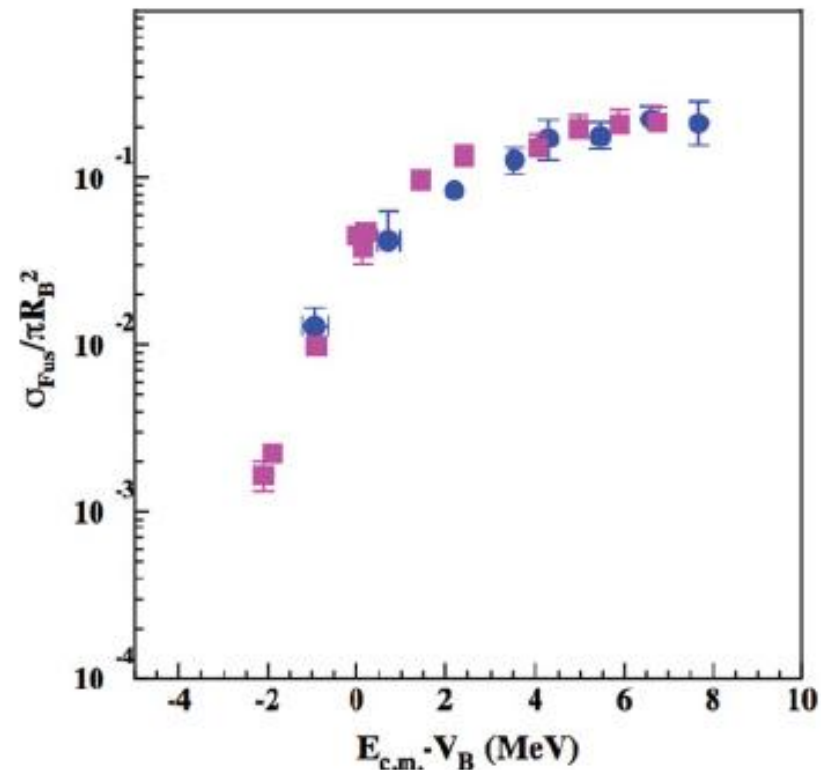
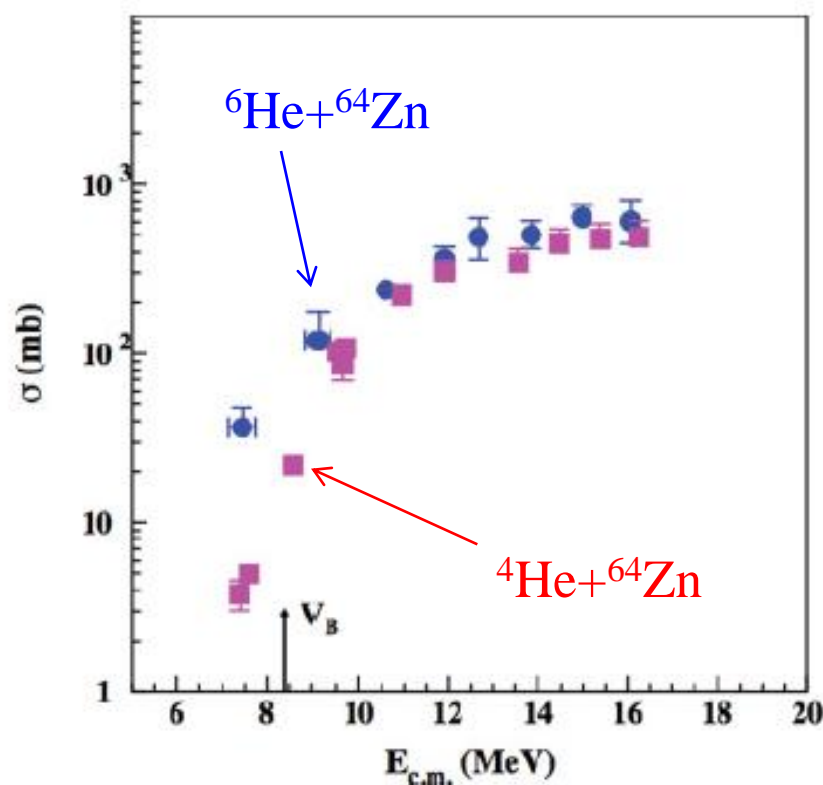
- 分解すると障壁の低下がなくなるので核融合反応断面積は減少?
- 安定核と同様、結合チャンネル効果により断面積は増大?
- もっと複雑な分解の動的な効果?

複雑な反応プロセス



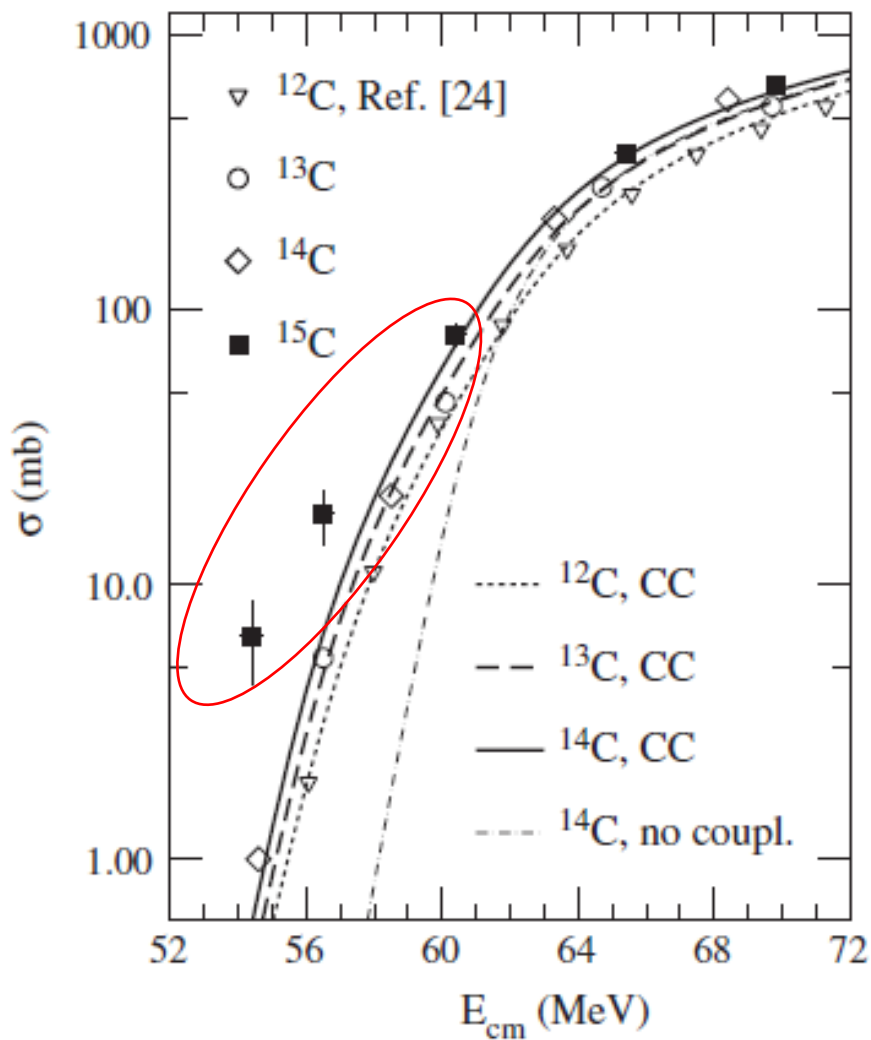
DCF=Direct Complete Fusion
 SCF=Sequential Complete Fusion
 ICF=Incomplete Fusion

実際の実験データ



V. Scideri (Catania) et al., PRC84('11)064604

- 障壁の違いを補正すると同じような断面積
- 断面積の増大は主に密度分布の広がりの効果 (分解の効果は小)
- エネルギーが更に小さくなったらどうなる?



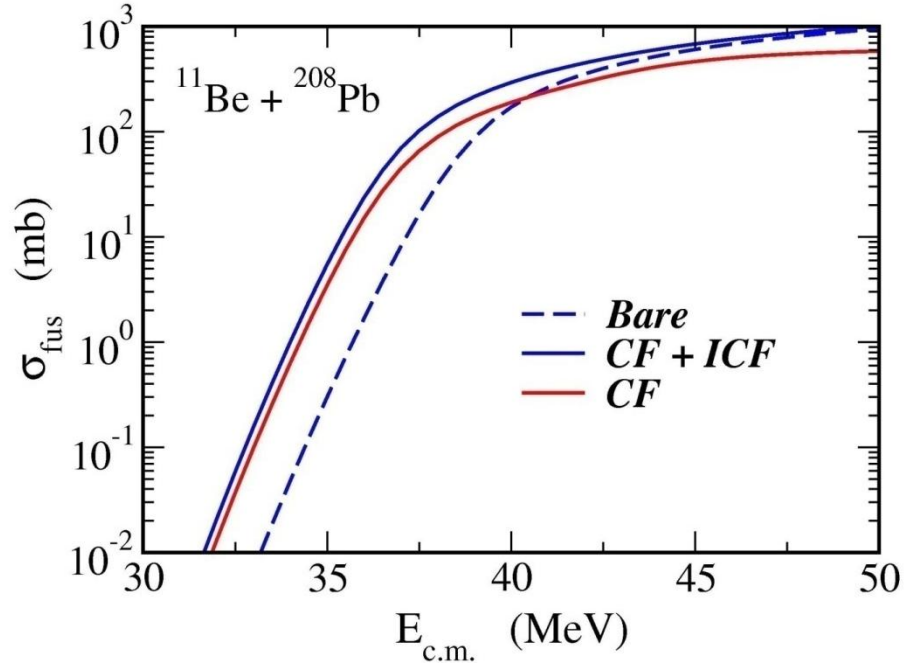
$^{15}\text{C} + ^{232}\text{Th}$ の断面積が増大

CC計算よりも増大

→ 分解の効果?
核子移行の効果?

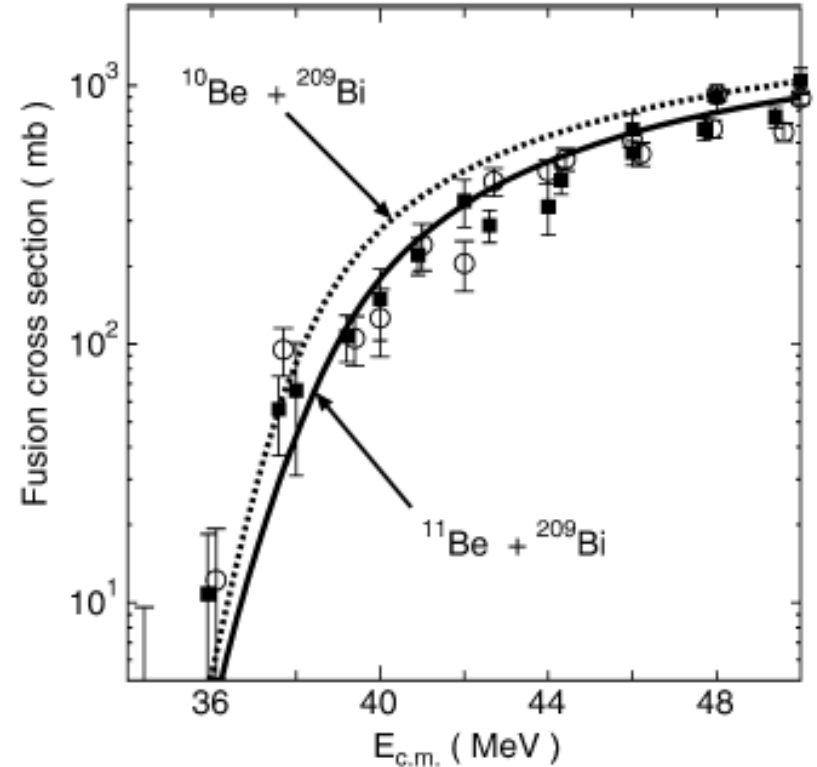
M. Alcorta et al.,
PRL106('11)172701

理論計算では、連続状態の効果と移行反応の効果をきちんと取り入れる必要がある。(中々大変。)



CDCC的な計算

ただし連続状態間の結合なし

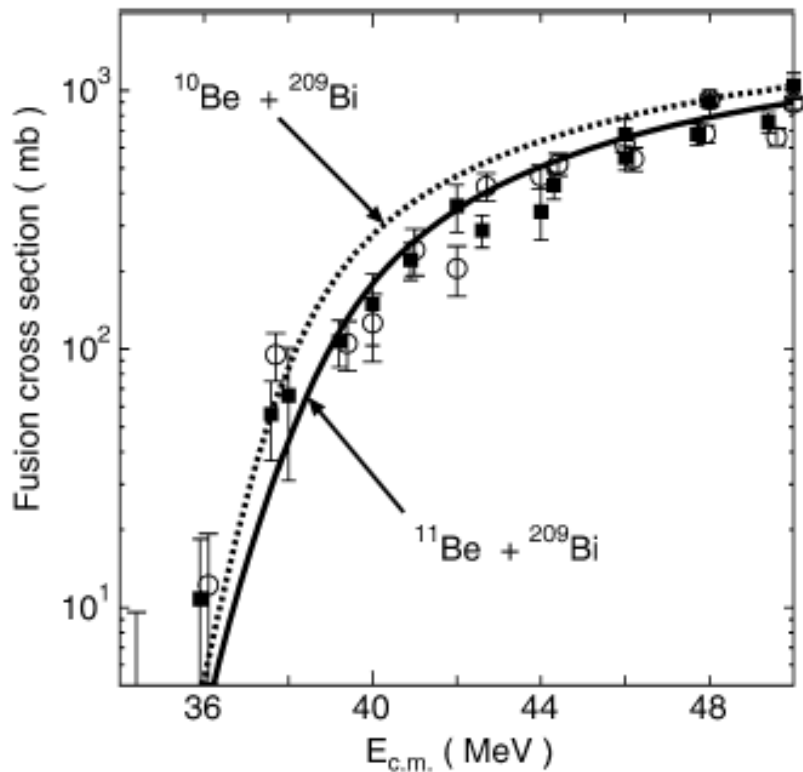


時間依存アプローチ

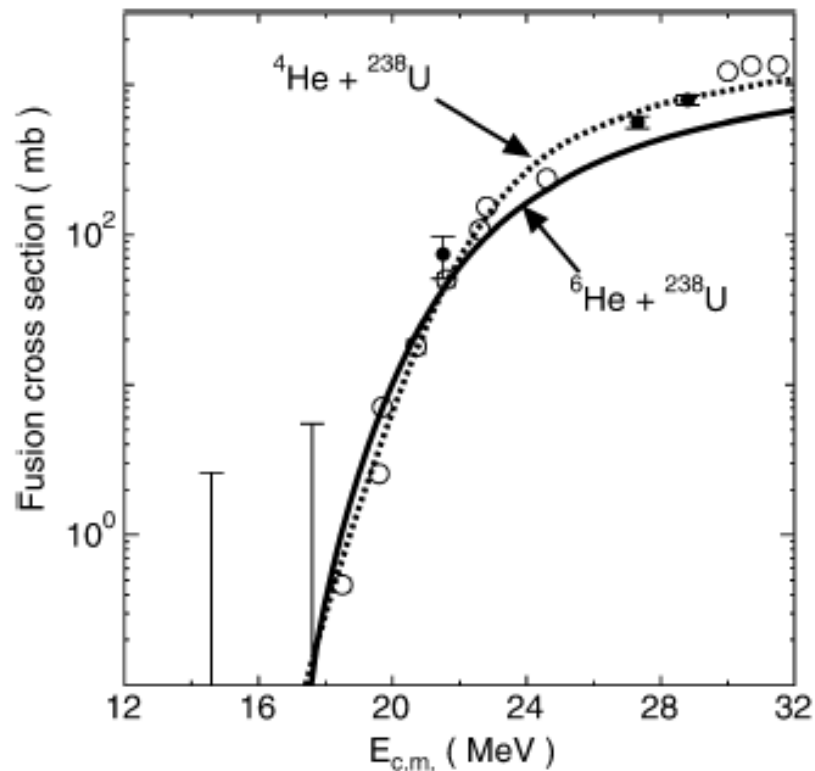
分解、移行の効果は自動的に入る

K. Hagino, A. Vitturi, C.H. Dasso,
and S.M. Lenzi, Phys. Rev. C61 ('00) 037602

M. Ito, K. Yabana, T. Nakatsukasa,
and M. Ueda, PLB637('06)53



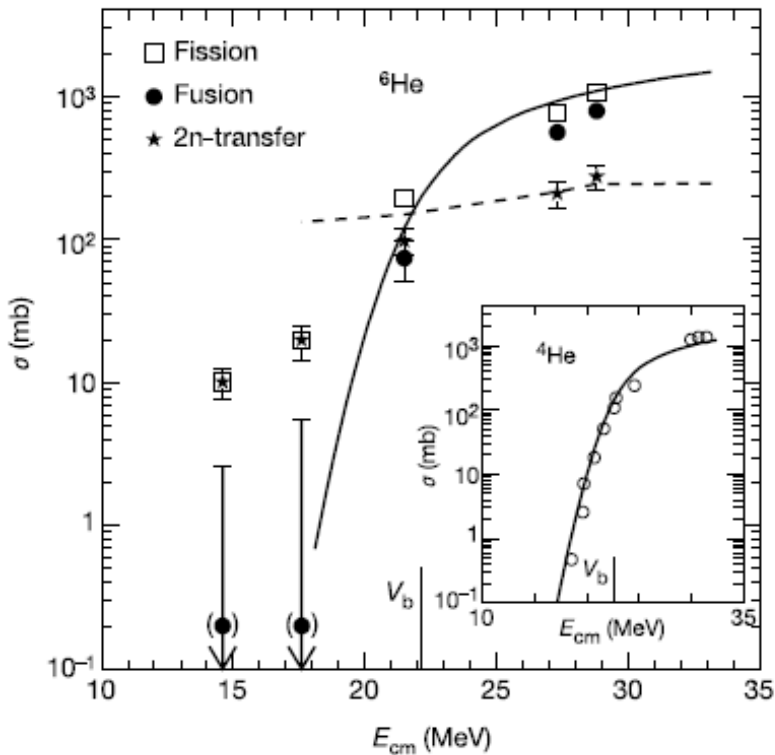
時間依存アプローチ
 分解、移行の効果は
 自動的に入る



(dineutron クラスタモデル)

M. Ito, K. Yabana, T. Nakatsukasa,
 and M. Ueda, PLB637('06)53

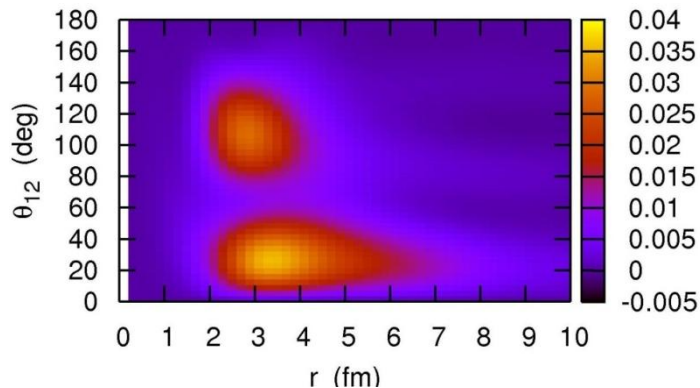
対移行反応



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

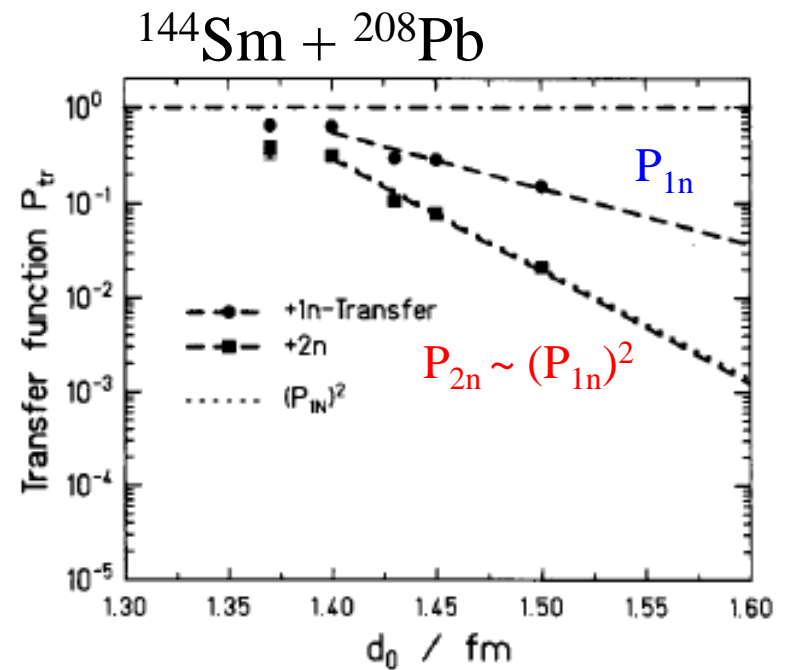
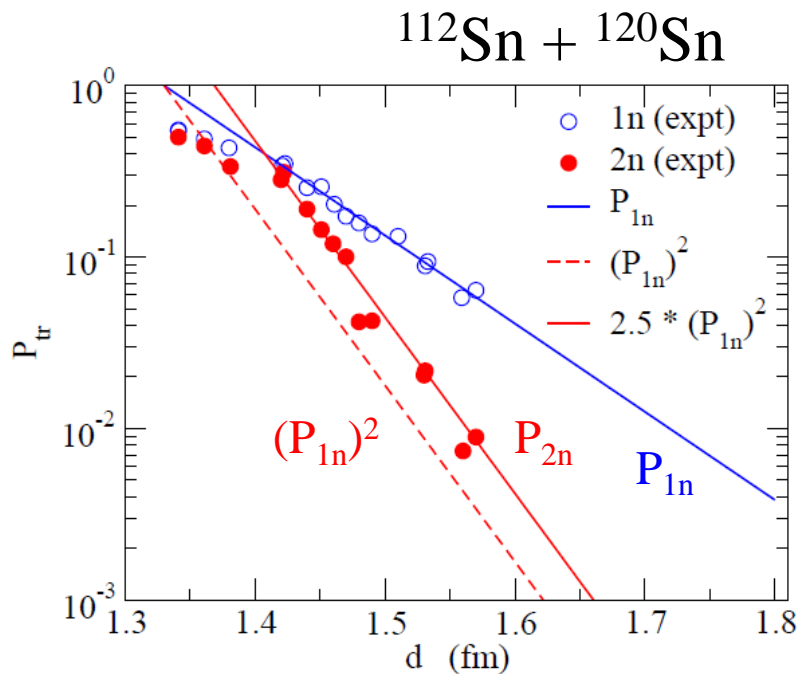


特に双中性子相関との関係で
対移行反応は今後ますます
重要な研究課題

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: $P_{tr} \sim \frac{d\sigma_{tr}}{d\sigma_R}$

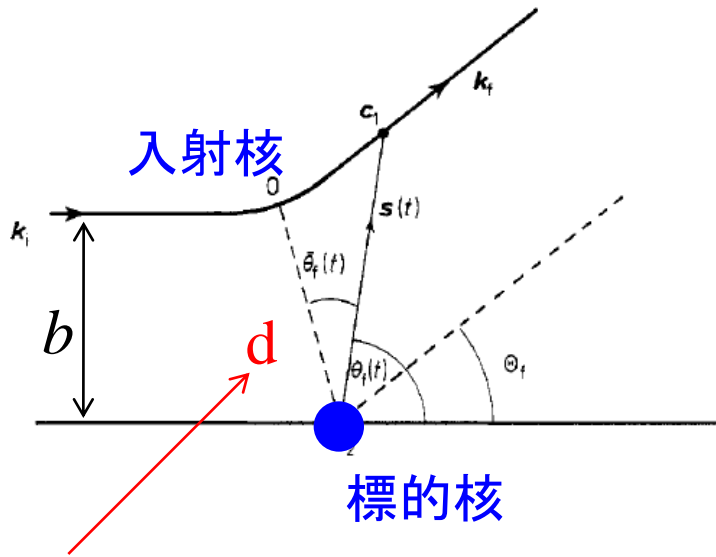


W. von Oertzen et al., Z. Phys. A326('87)463

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



クーロン力

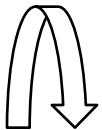
$$V_c(r) = \frac{Z_P Z_T e^2}{r}$$

による古典的な軌道

最近接距離 (the distance of closest approach)

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

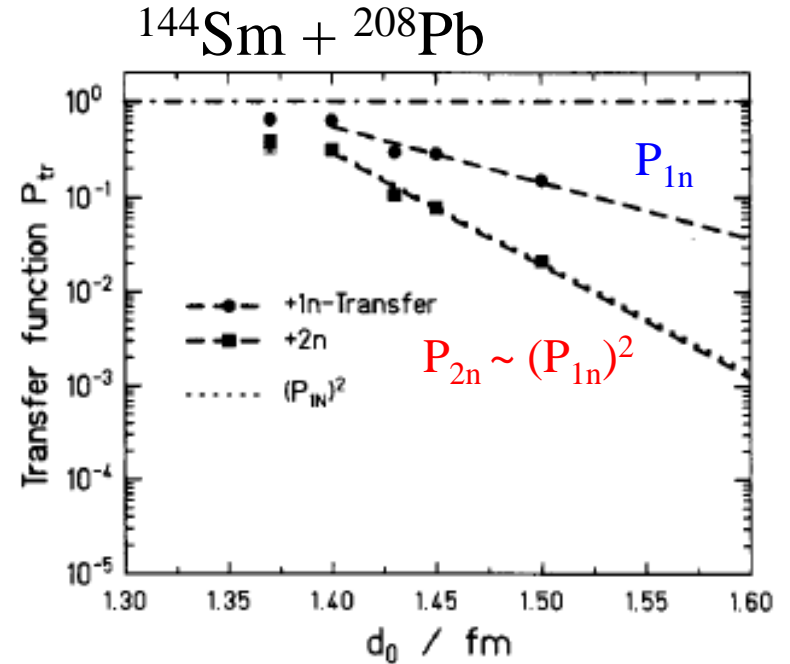
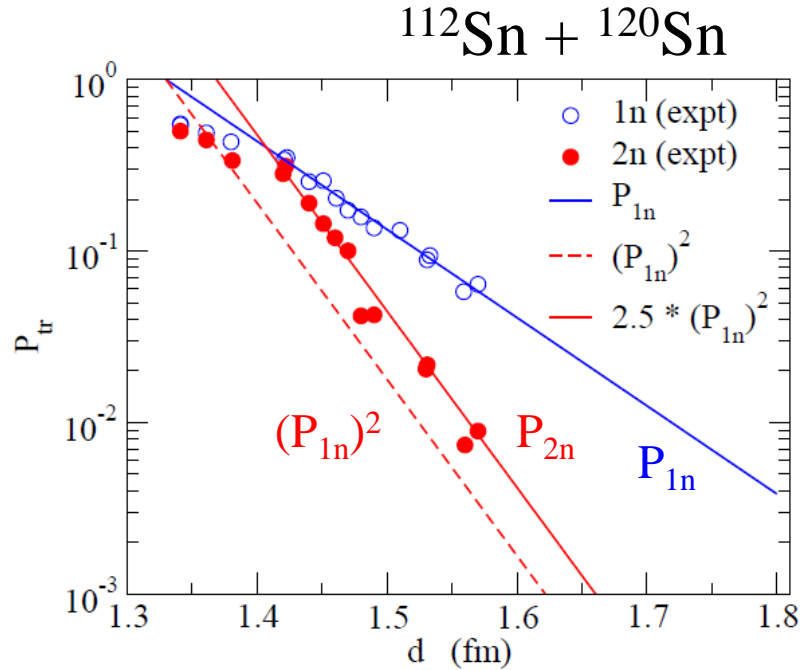
θ は散乱角



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



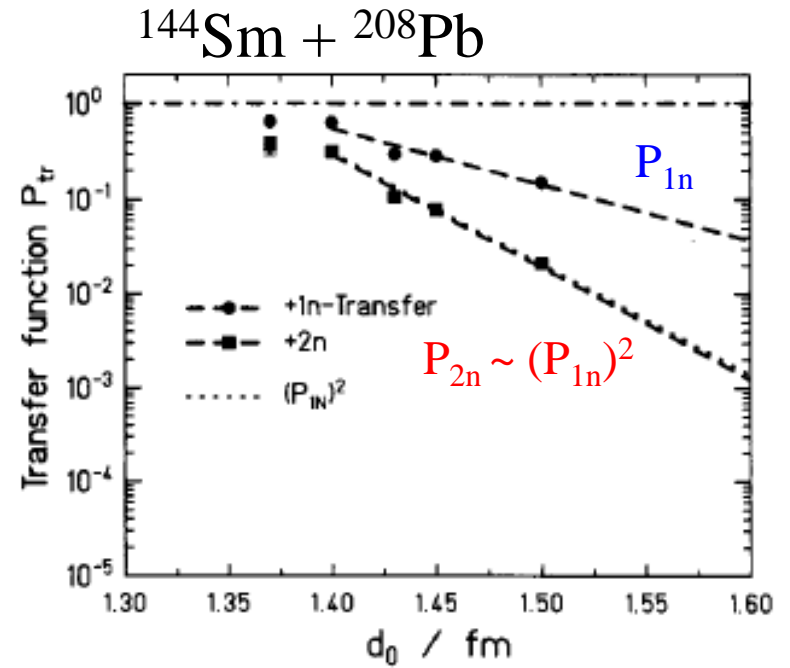
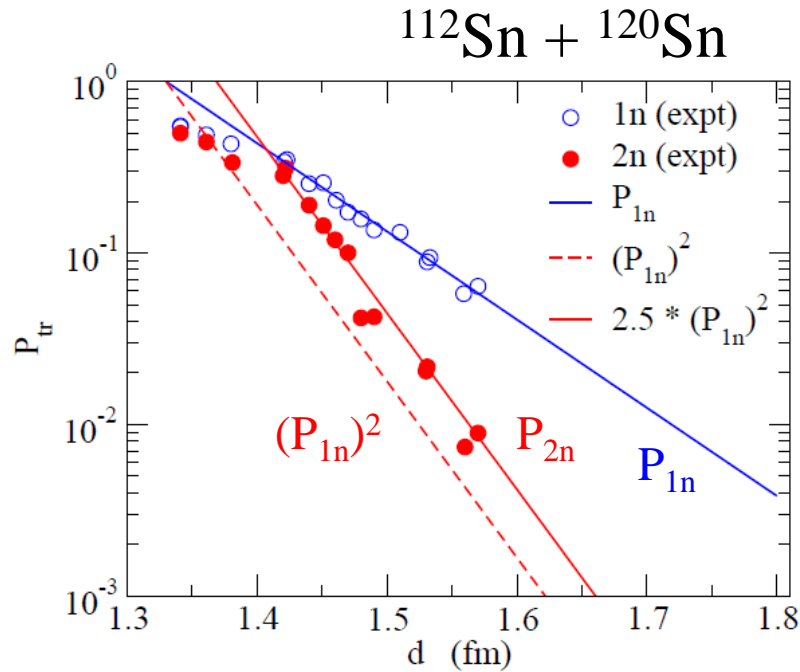
- $^{112}\text{Sn} + ^{120}\text{Sn}$ 反応では、単純な $(P_{1n})^2$ に比べて2中性子移行確率が増大
- 対相関が働かない(セミ)魔法数の原子核は2中性子移行確率の増大は見られない



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

$^{62}\text{Ni} + ^{206}\text{Pb}$ 多中性子移行反応

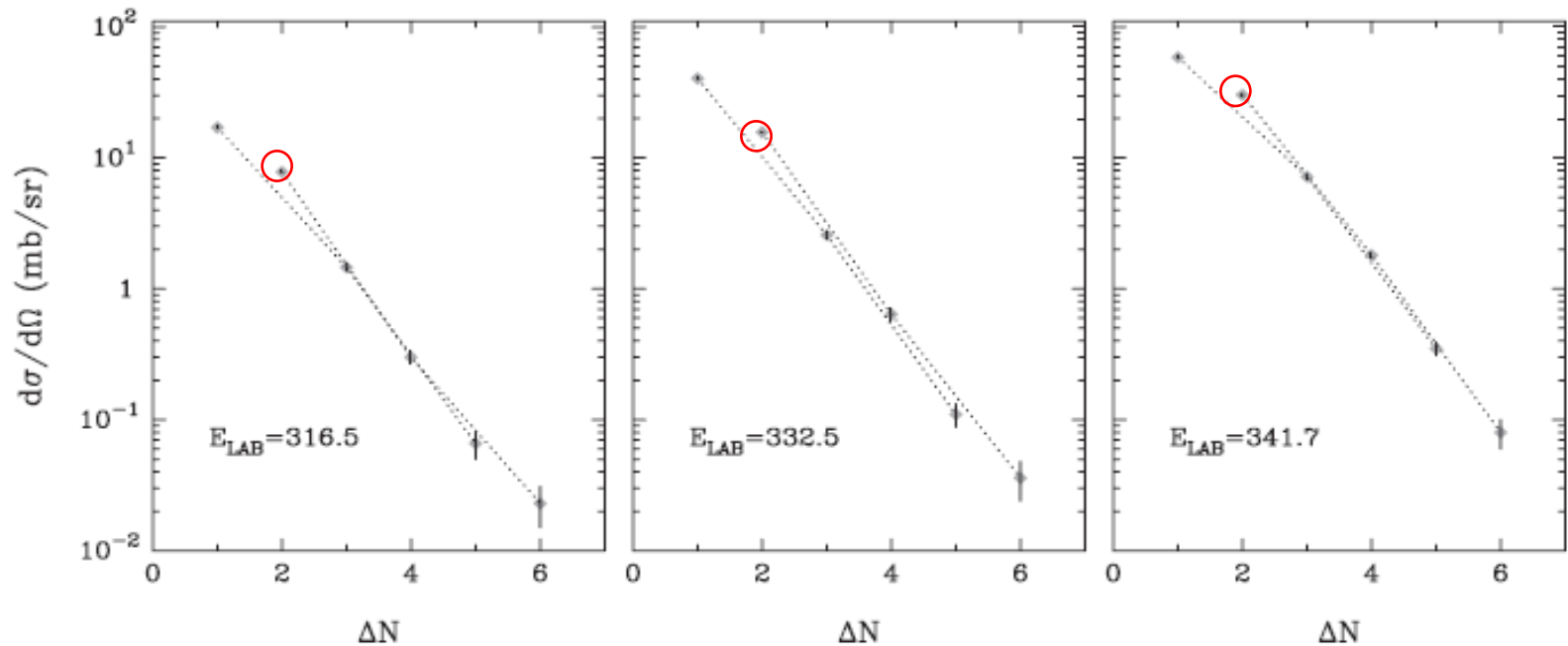


Figure 38. Results for the one- to six-neutron transfers from the reaction $^{62}\text{Ni} + ^{206}\text{Pb}$ at different energies covering overlap parameters up to $d_0 = 1.4$ fm. The small enhancement of the two-neutron transfer can be seen. The deviation of the higher-order transfers from the exponential fall-off defined by the 1n transfer defines here the enhancement factor EF (see also figures 23 and 46).

W. von Oertzen and A. Vitturi,
Rep. Prog. Phys. 64('01)1247

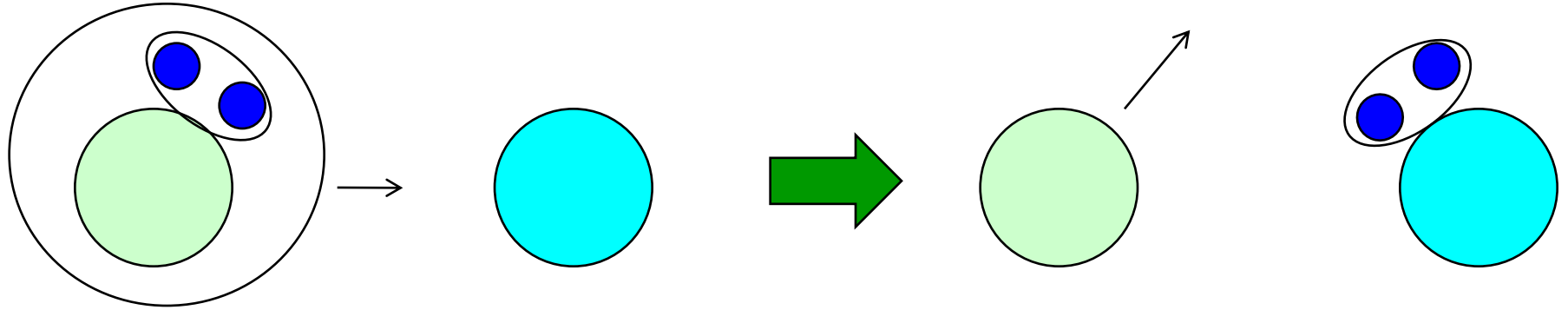
2n 移行確率の増大

↔ di-neutron 相関との関係は?

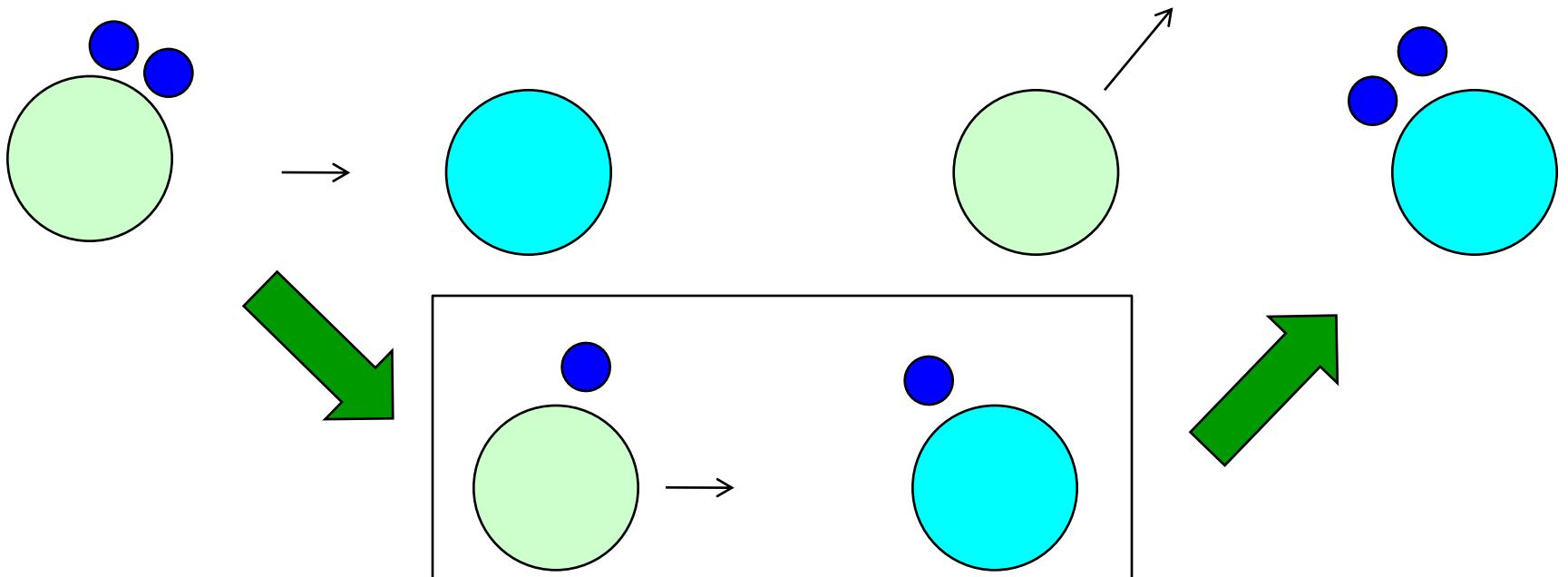
→ これからの課題

1ステップか2ステップか?

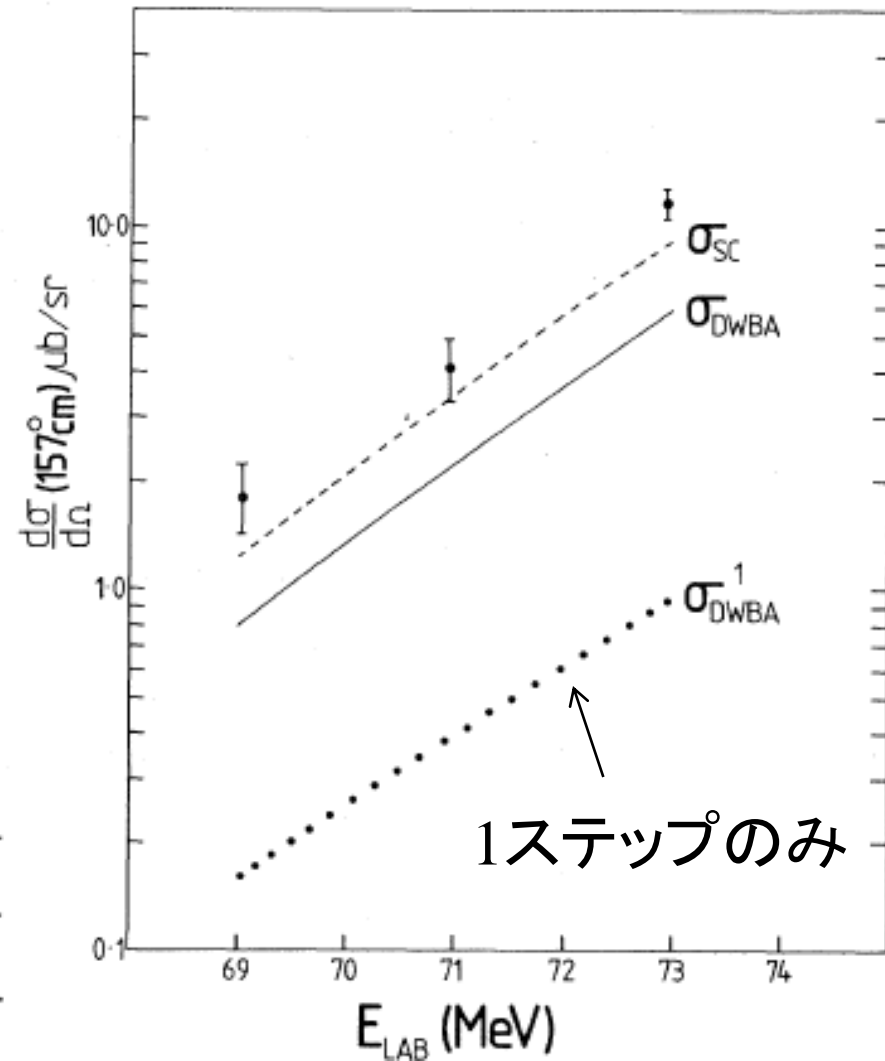
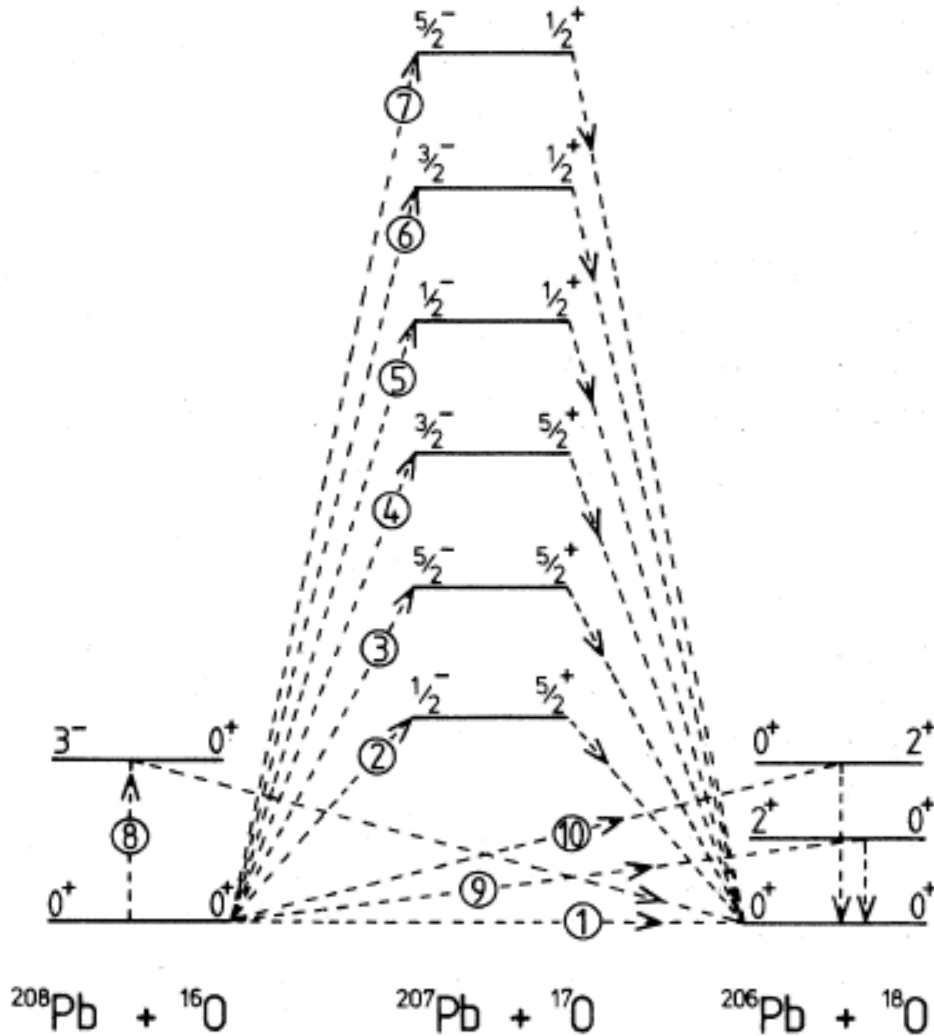
1ステップ (simultaneous/direct)



2ステップ (sequential):



1ステップか2ステップか?



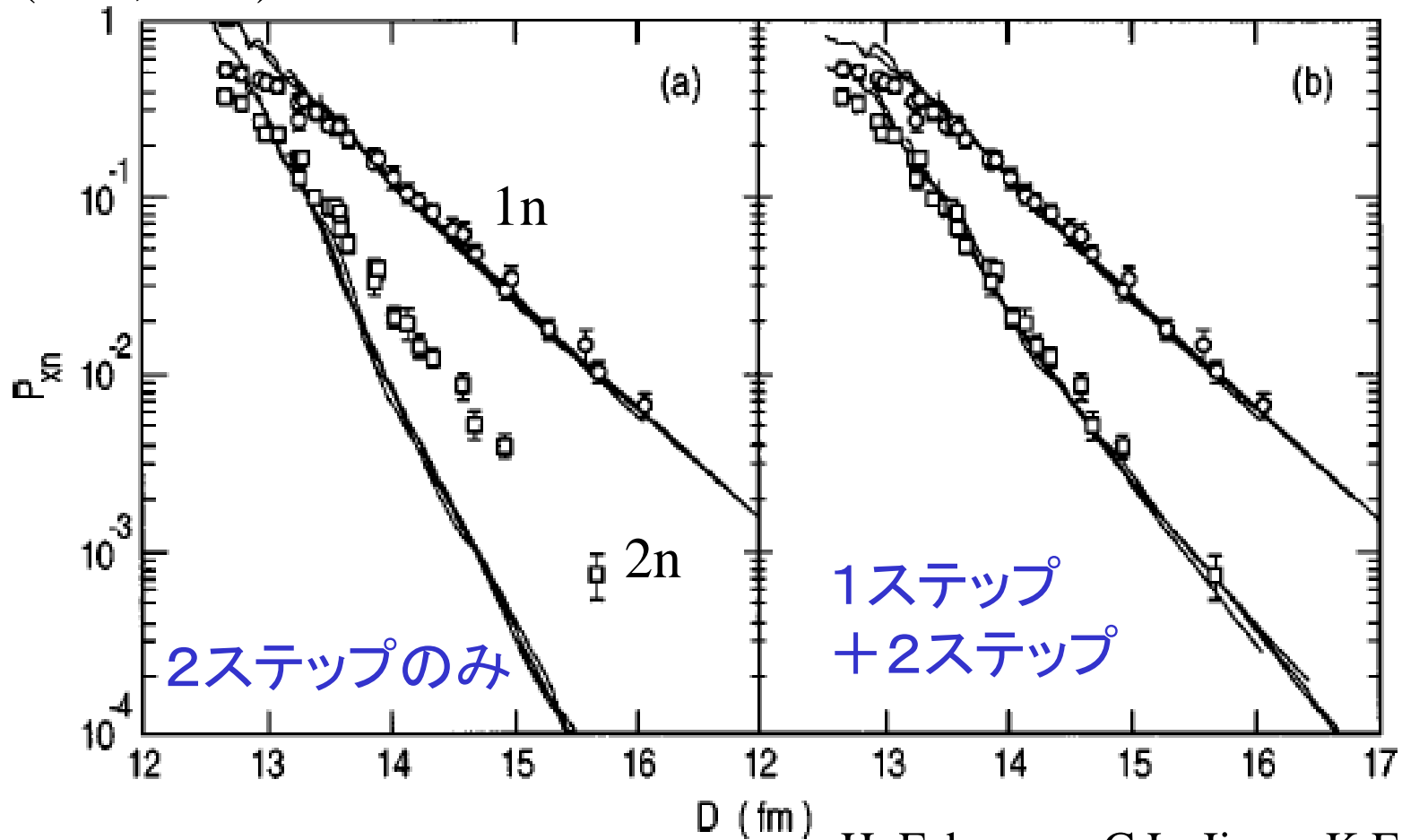
M.A. Franey et al.,
PRL41('78)837

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?

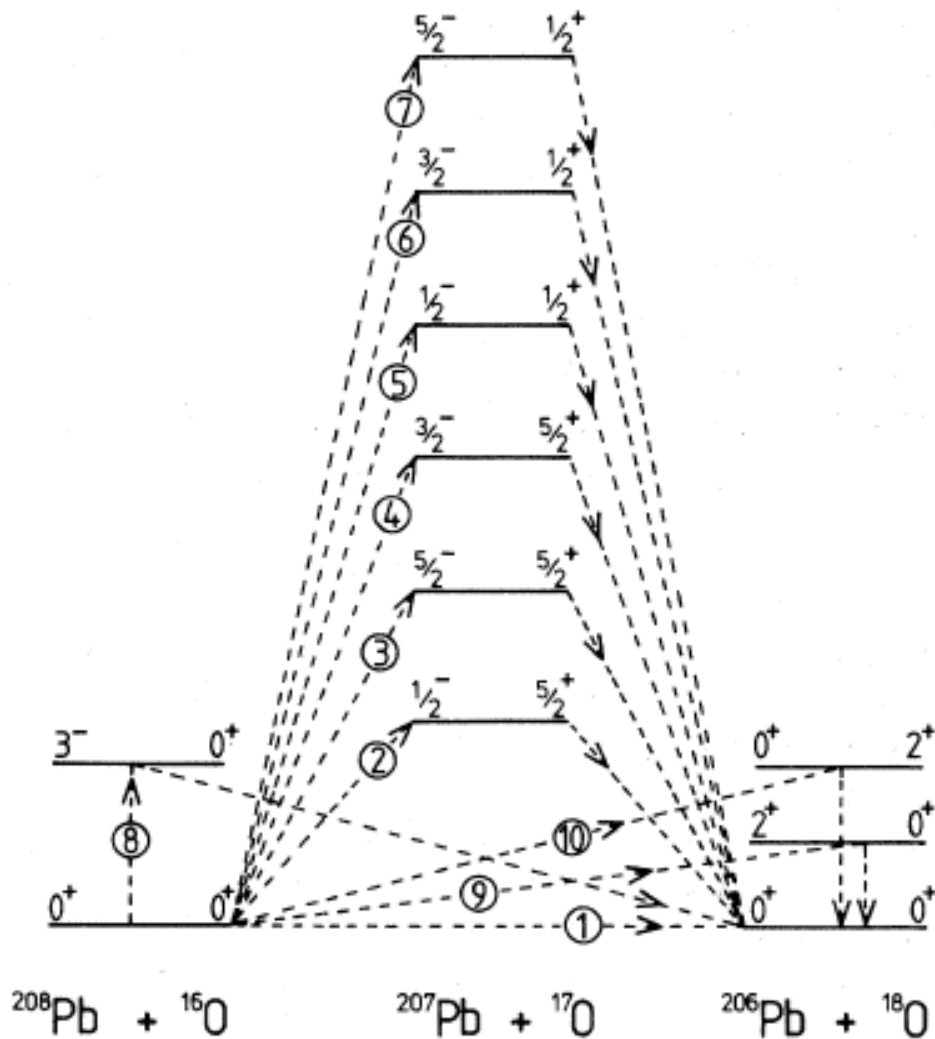
$^{124}\text{Sn}(^{58}\text{Ni}, ^{60}\text{Ni})^{122}\text{Sn}$ 反応



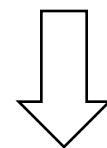
H. Esbensen, C.L. Jiang, K.E. Rehm,
PRC57('98)2401

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



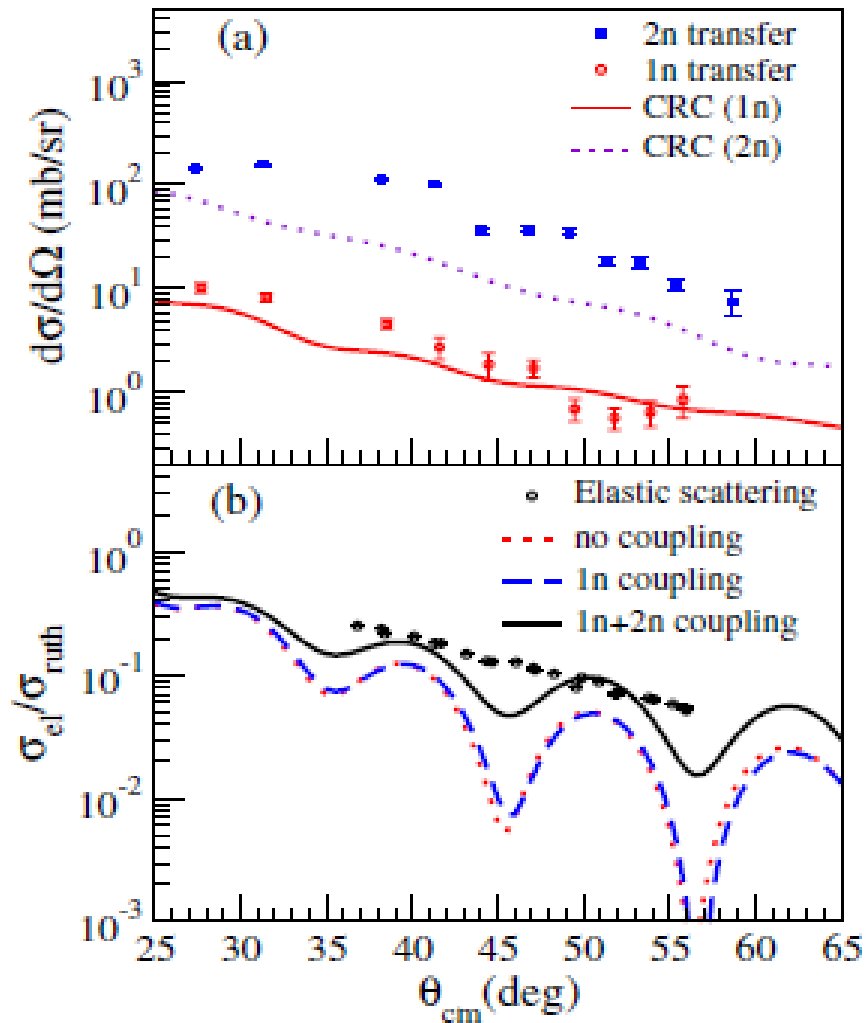
反応機構はどう変わる?



これからの課題

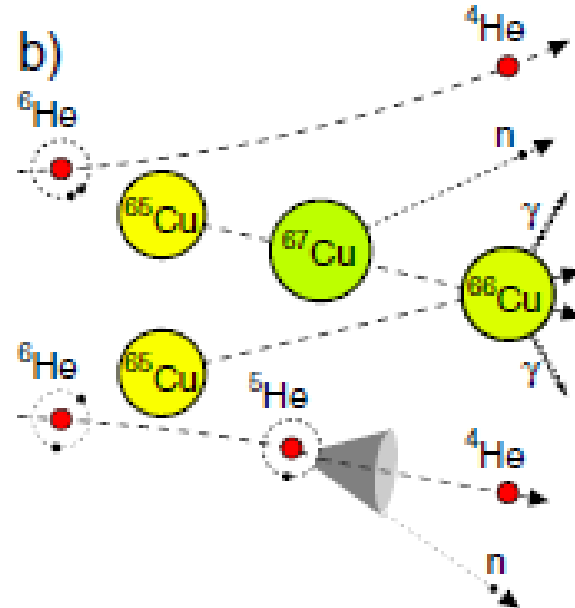
ボロミアン核の対移行反応: 実験データ (i)

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



$E_{\text{lab}} = 22.6 \text{ MeV}$

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

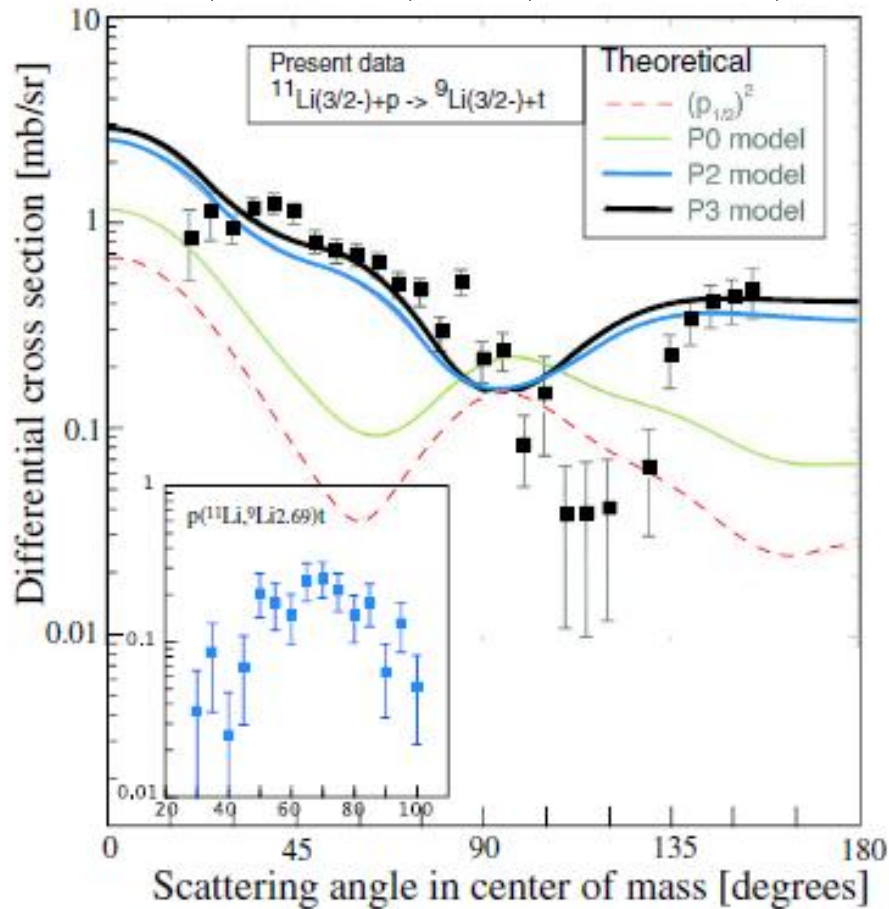


n と α の角度相関を見ることによって
 $1n$ 移行と $2n$ 移行を分離
 ($1n$ 移行は ${}^5\text{He}$ の分解から n が出る
 ので n と α が強く相関)

- $1n$ 移行に比べて $2n$ 移行が主
- これはボロミアン核の特徴
 (安定核では $1n$ 移行が主)

ポロミアン核の対移行反応: 実験データ (ii)

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



➤ 相関なしの計算は実験データを再現せず

➤ $(s_{1/2})^2$ の割合が 31% (P2 model), 45% (P3 model) のモデルでは前方領域をよく再現。

➤ ただし、後方の合いはいまいち。
(光学ポテンシャル? 中間状態?)

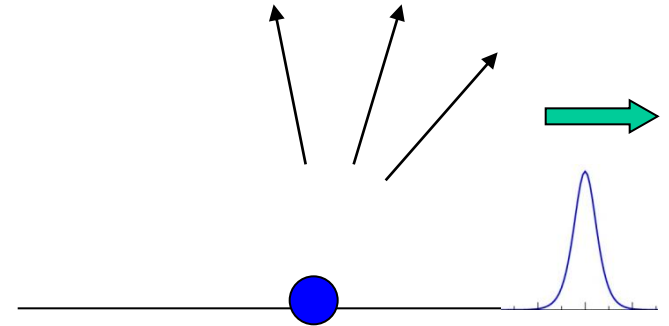
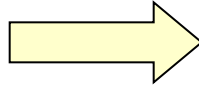
↑
中間状態として ${}^{10}\text{Li}$ の
 $1/2^+$ 状態と $1/2^-$ 状態

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

弾性散乱

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)



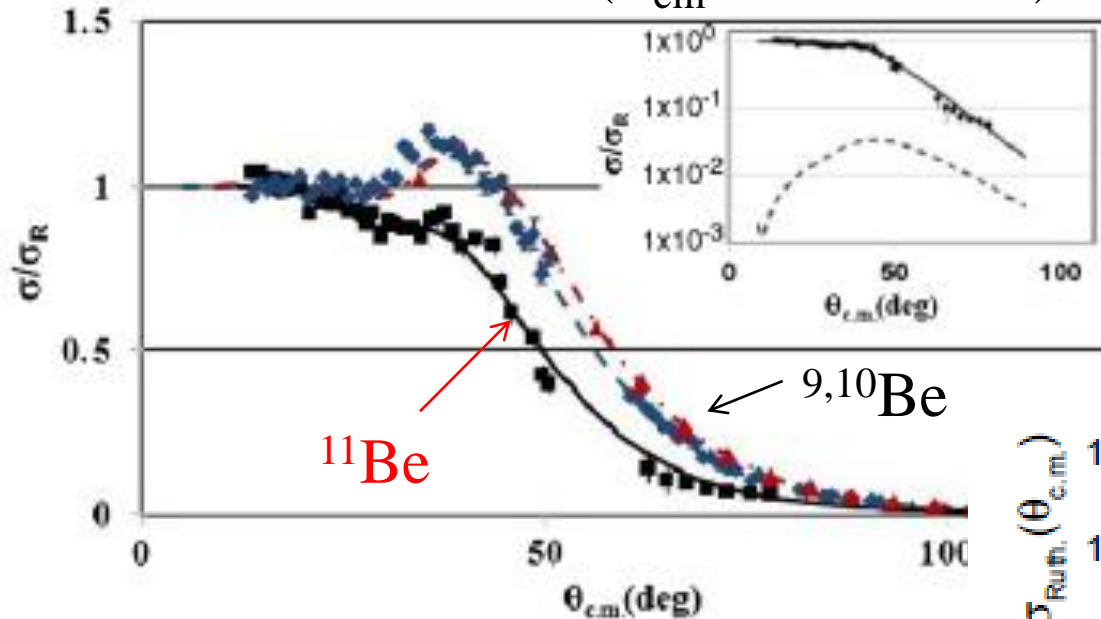
弾性フラックスの減少(吸収)

光学ポテンシャル

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

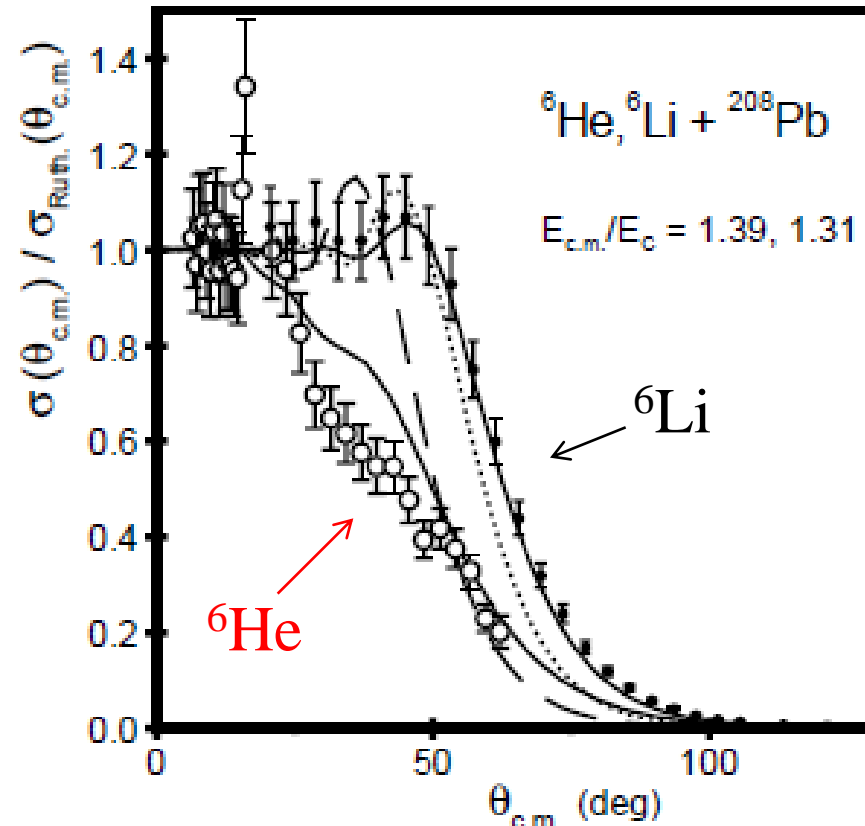
ハロー核の弾性散乱

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



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

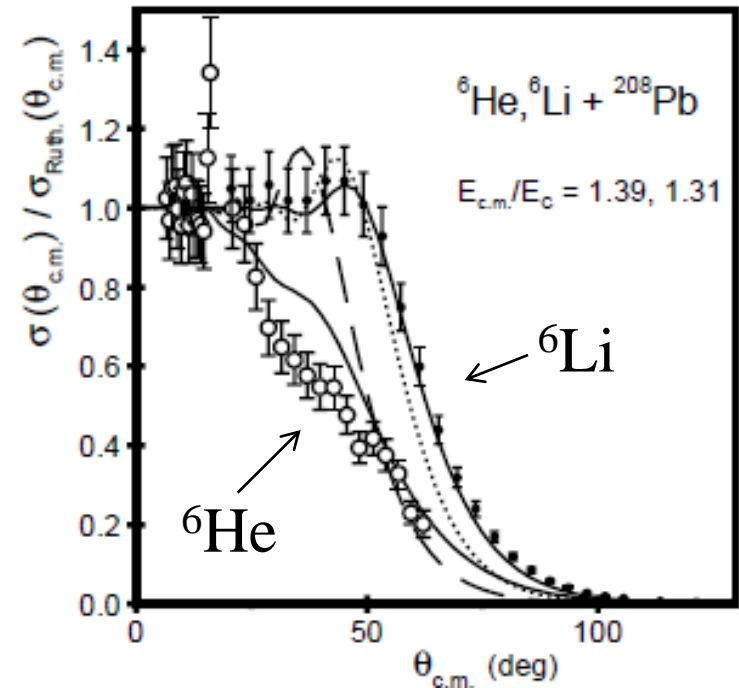
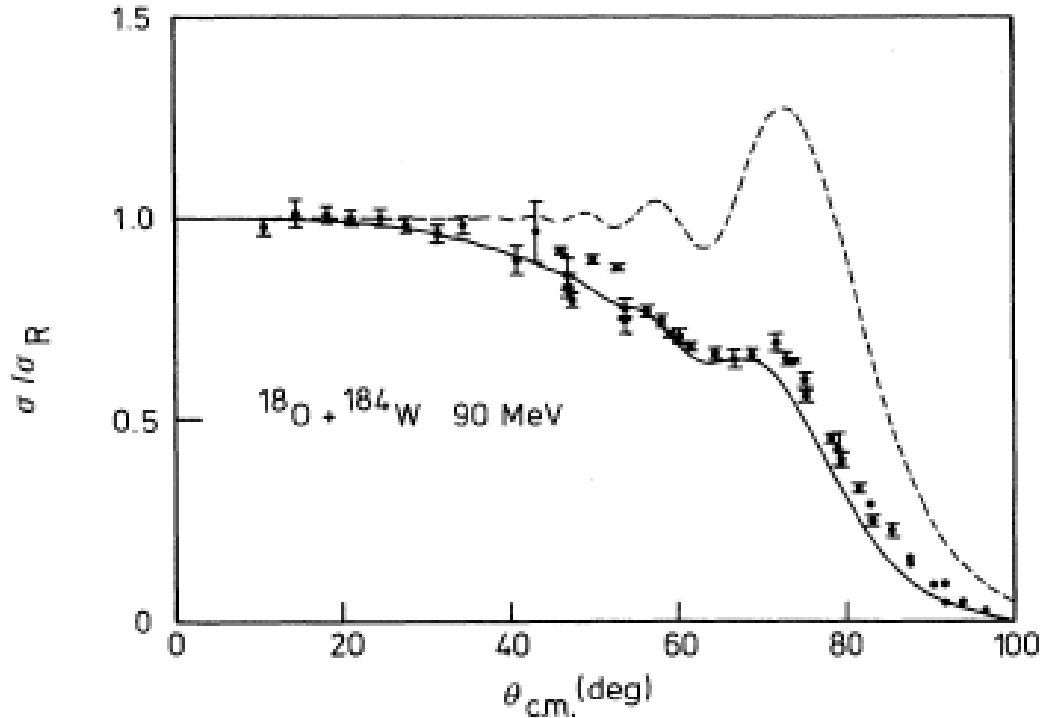
K. Rusek et al.,
PRC67('03)041604(R)



ハロー核を用いると弾性散乱
の断面積が大きく減少

ハロー核の弾性散乱

同様の弾性散乱断面積の減少
(フレネル・パターンからの大きなずれ)は
安定な変形核ではすでによく知られていた



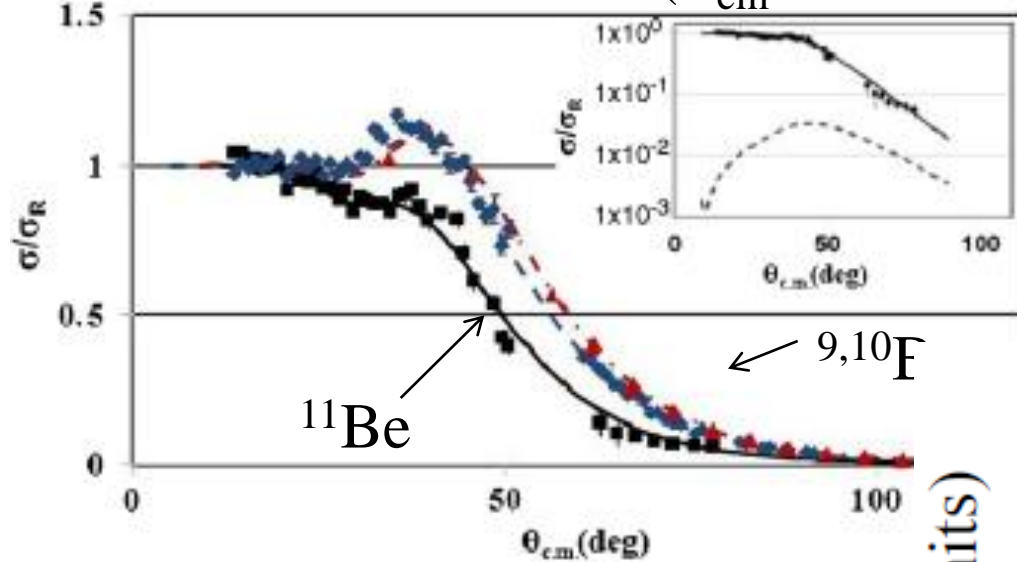
N. Takigawa, F. Michel,
A.B. Balantekin, G. Reidemeister,
PRC44('91)477

回転励起のエネルギーは小 → (クーロン)励起されやすい

long range な吸収ポテンシャルを導入することにより角度分布が
説明される (W.G. Love, T. Terasawa, G.R. Satchler, NPA291('77)183)

ハロー核の弾性散乱

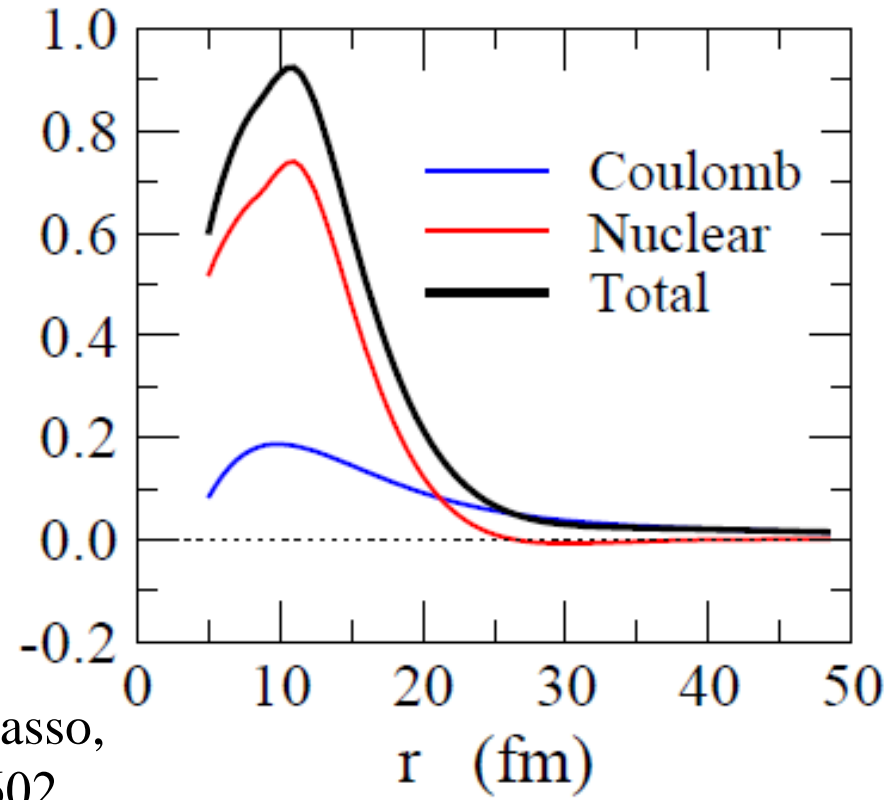
$9,10,11\text{Be} + {}^{64}\text{Zn}$ ($E_{\text{cm}} = 24.5 \text{ MeV}$)



${}^{11}\text{Be}$ の分解チャンネルとの結合ポテンシャルも同様に long range ➔

$F(r)$ (arb. units)

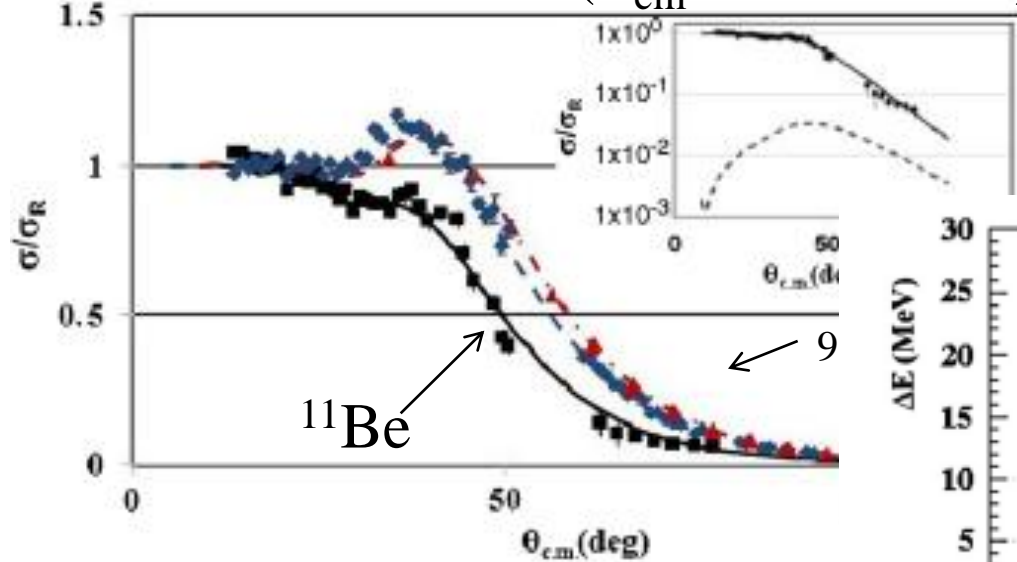
${}^{11}\text{Be} + {}^{208}\text{Pb}$ 反応
 $2s_{1/2}$ から $E_c = 0.9 \text{ MeV}$ にある $p_{3/2}$ 状態への結合ポテンシャル



K. Hagino, A. Vitturi, C.H. Dasso, S.M. Lenzi, PRC61('00)037602

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:

- $\sigma_R = 1090 \text{ mb}$ (${}^9\text{Be}$)
- 1260 mb (${}^{10}\text{Be}$)
- 2730 mb (${}^{11}\text{Be}$)

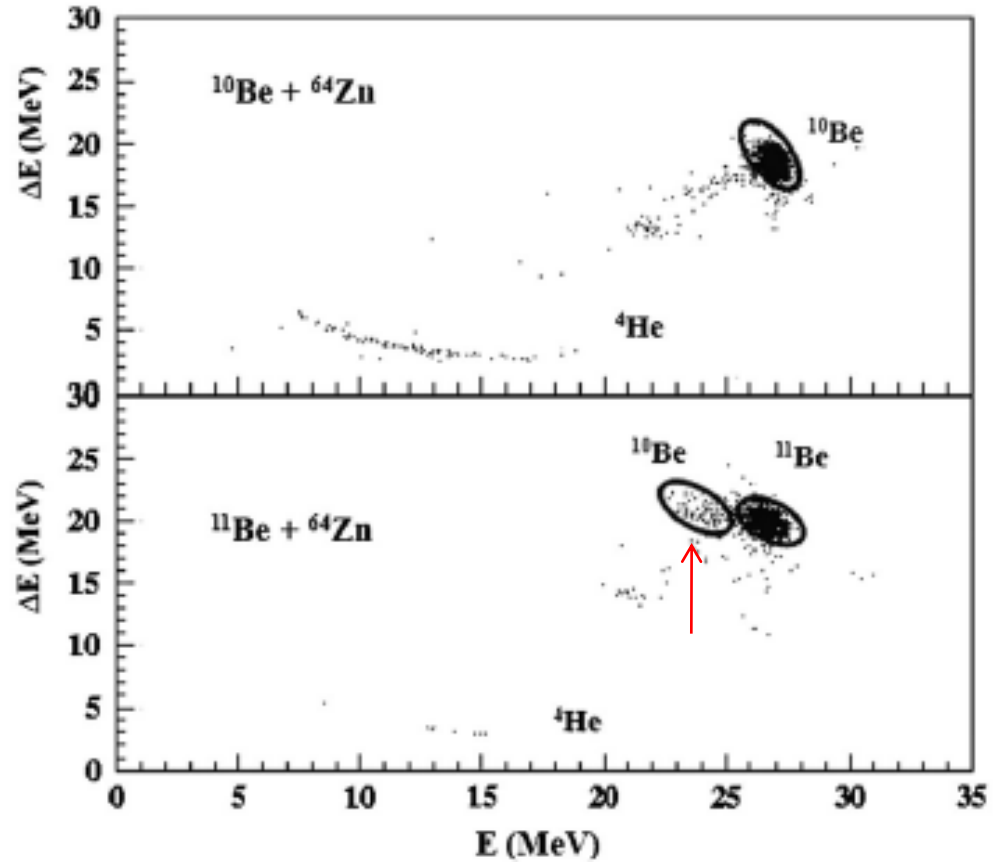


FIG. 2. ΔE - E scatter plots for the reactions ${}^{10}\text{Be} + {}^{64}\text{Zn}$ (top) and ${}^{11}\text{Be} + {}^{64}\text{Zn}$ (bottom), at $\theta = 35^\circ$.