

重イオン核融合反応のダイナミクス： 結合チャンネル法の現状と課題

萩野浩一

東北大学大学院理学研究科



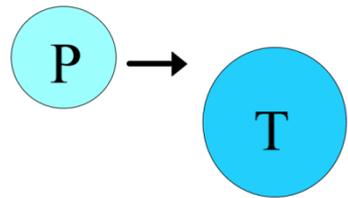
TOHOKU
UNIVERSITY

1. 重イオン核融合反応とチャンネル結合効果
2. どのようなチャンネルを考慮するのか?
～集団励起と非集団励起～
3. 多核子移行反応の取扱い
4. まとめ

重イオン核融合反応に関するレビュー論文:

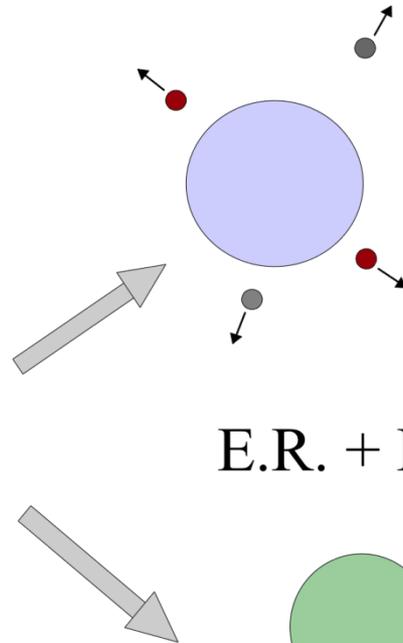
K. Hagino and N. Takigawa, Prog. Theo. Phys.128 ('12)1061.

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

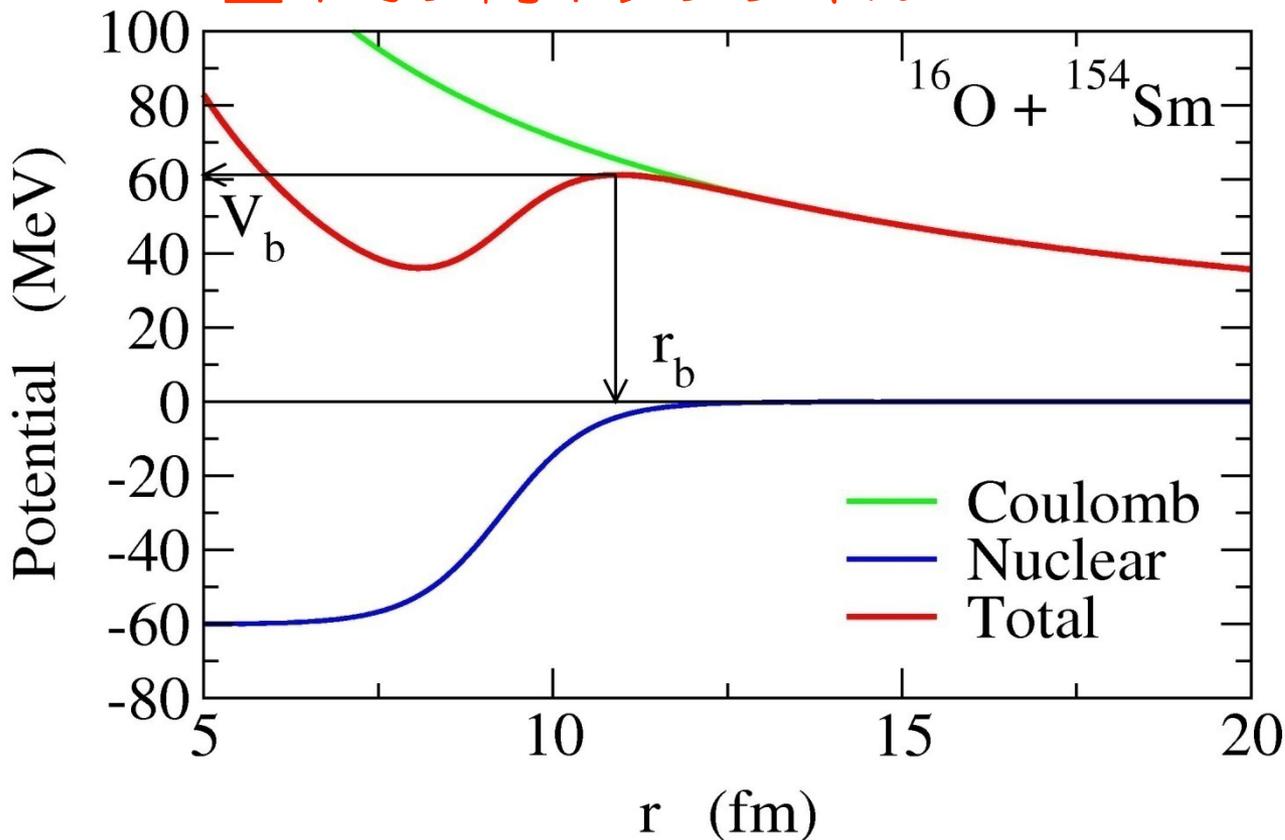
E.R. + F ($220 > A_{CN} > 170$)

F ($A_{CN} > 220$)

核分裂

Fission

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

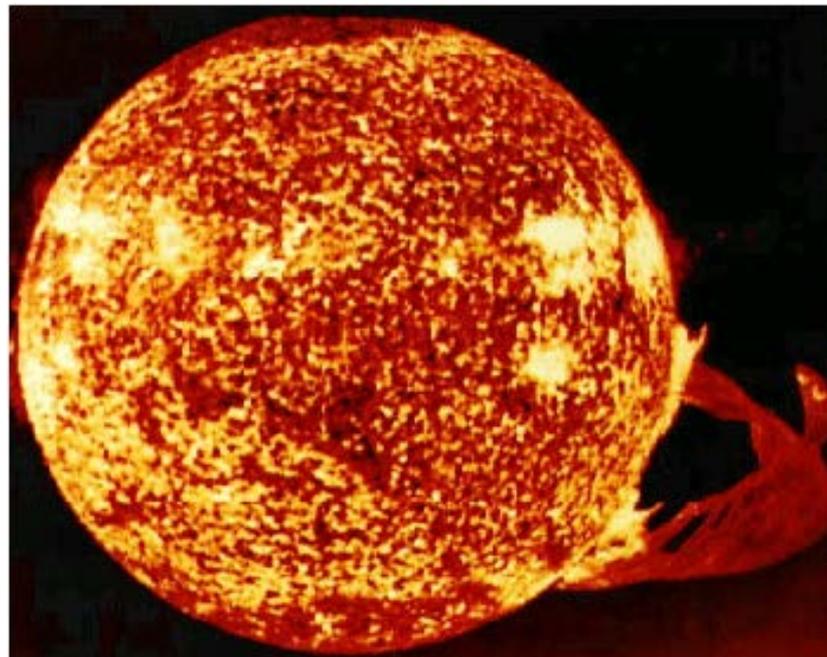
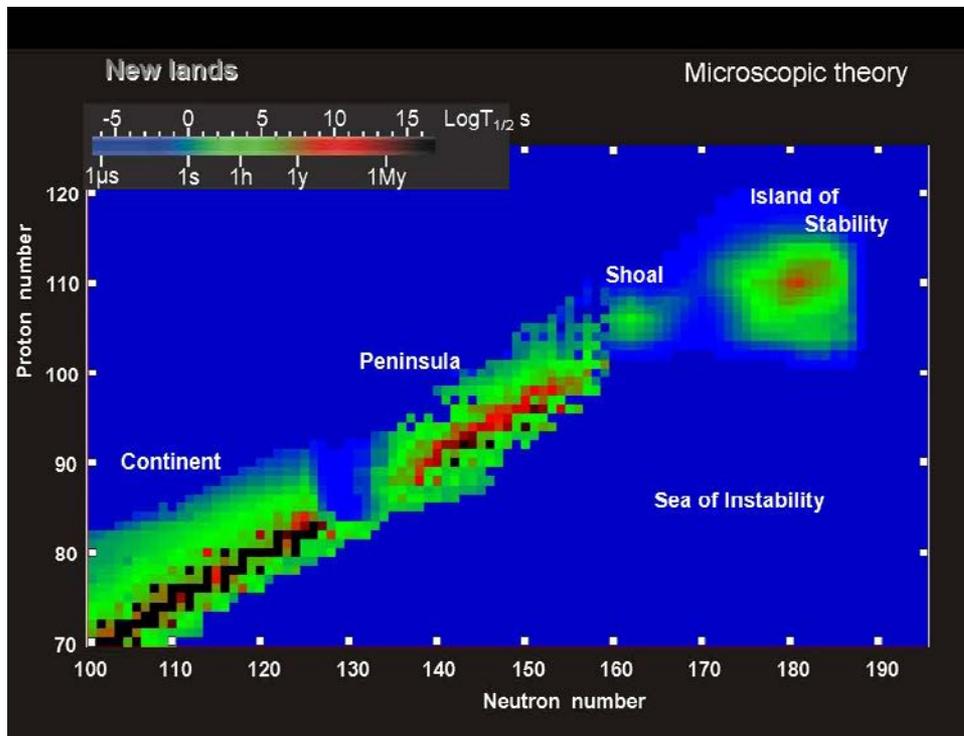


両者の打ち消しあいによりポテンシャル障壁が形成
(クーロン障壁)

- 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 588 000 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)

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
- ✓ 天体核物理

他の理由:

✓ 反応機構

核反応と核構造の強い結合(結合チャンネル効果)

cf. 高エネルギー反応: 反応機構はより単純

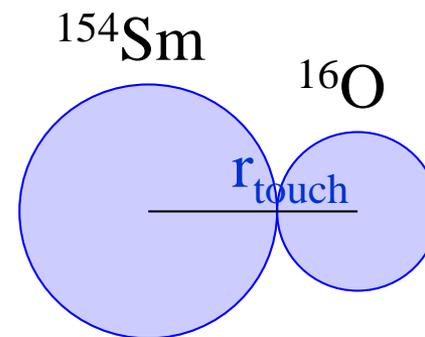
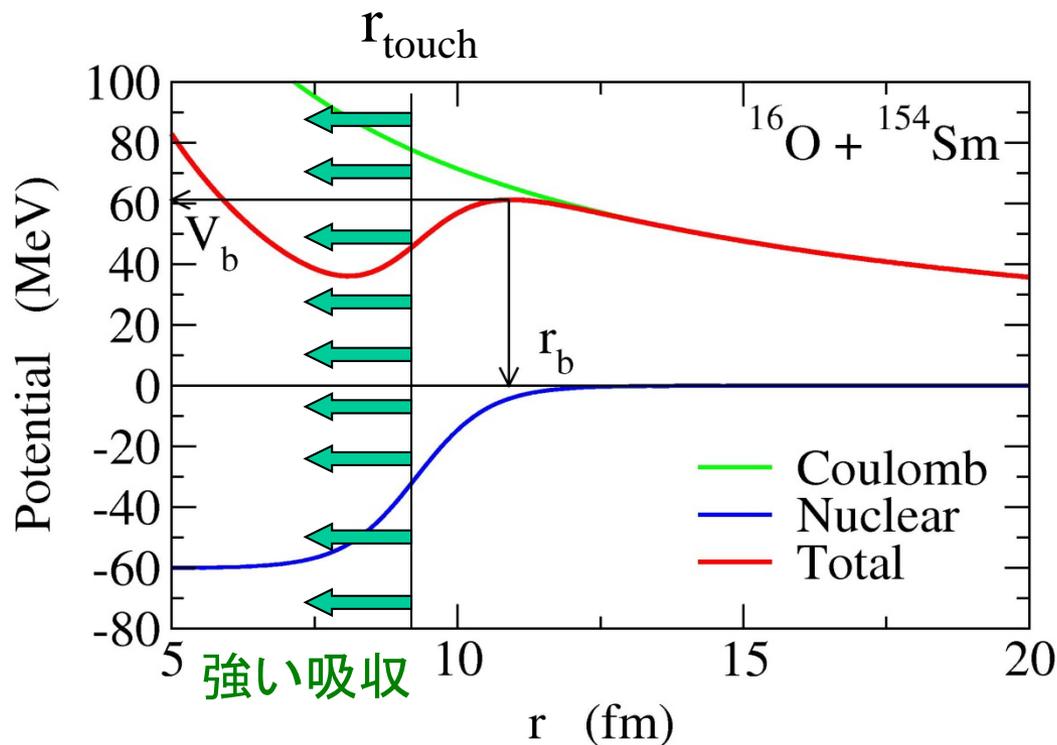
✓ 多粒子系の量子トンネル現象

cf. ・ α 崩壊: エネルギーが固定されている

・原子衝突におけるトンネル現象

: 内部自由度の種類が原子核ほど豊富ではない

核融合反応の計算における大きな仮定： 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)

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

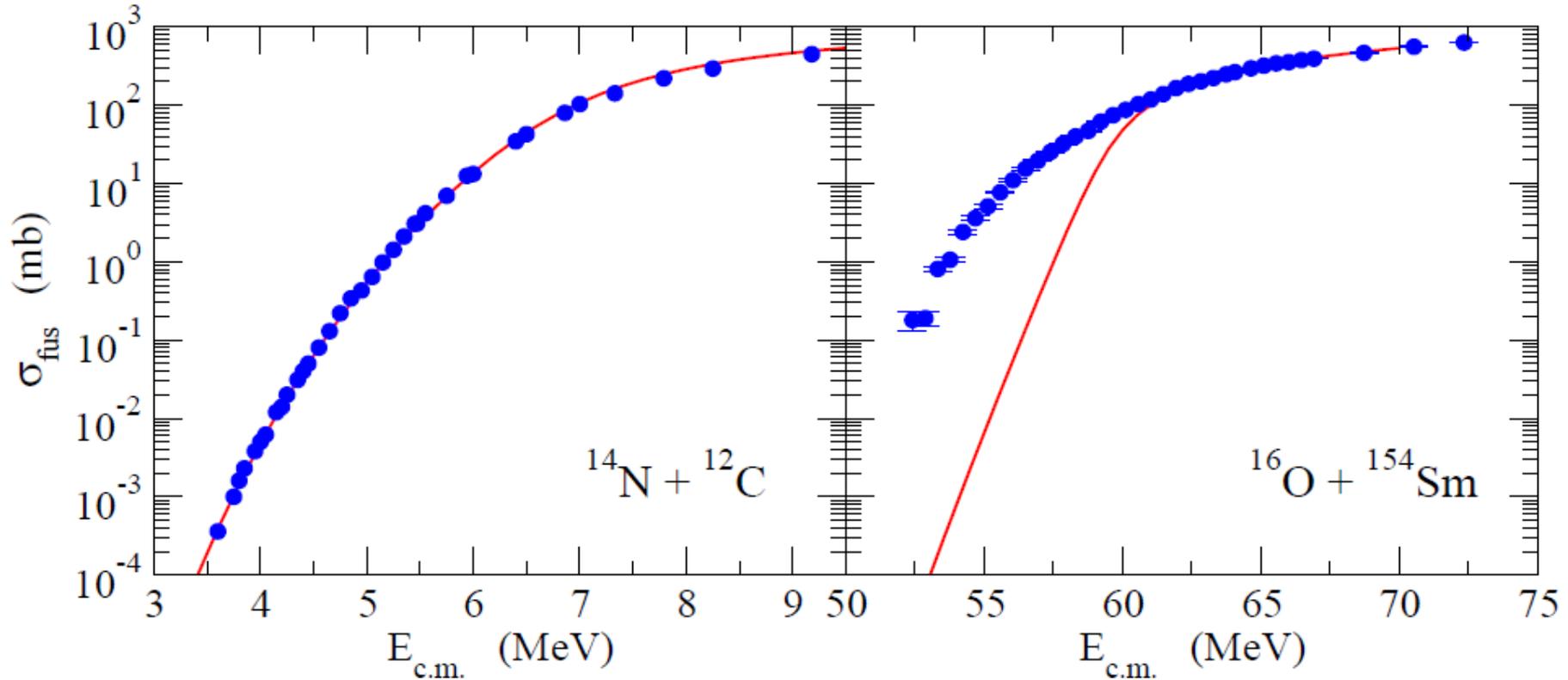
P_l

(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

ポテンシャル模型

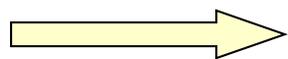
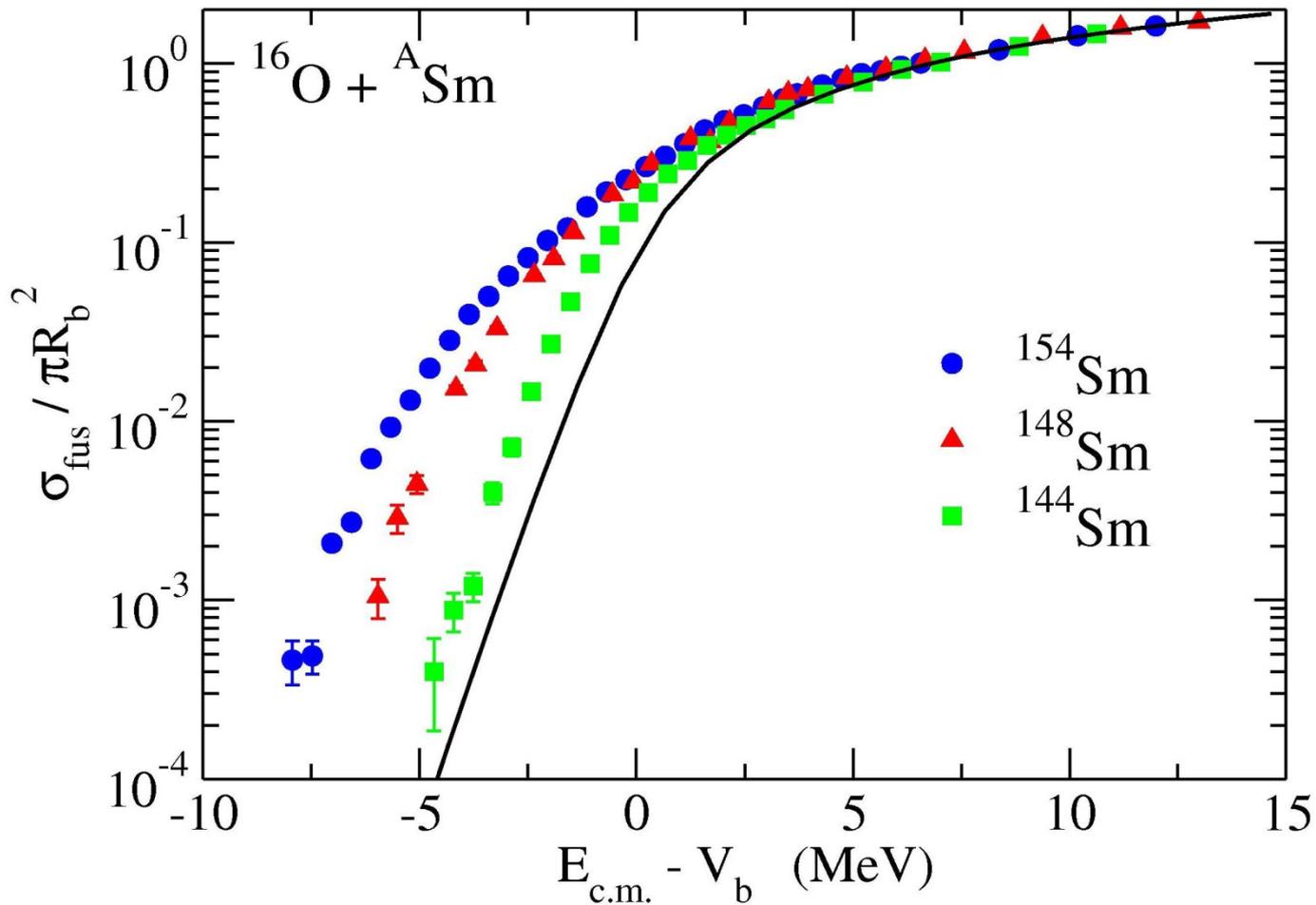
2つの原子核に構造がないとして、適当なポテンシャルを用いて計算



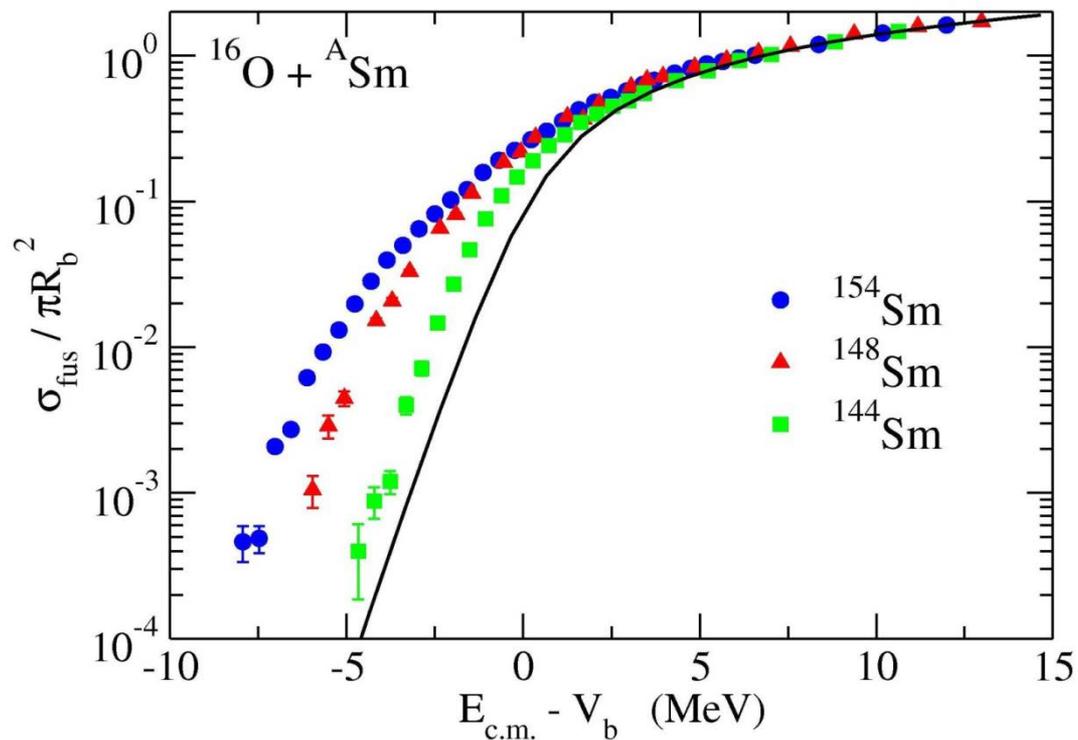
単純なポテンシャル模型:

- 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)

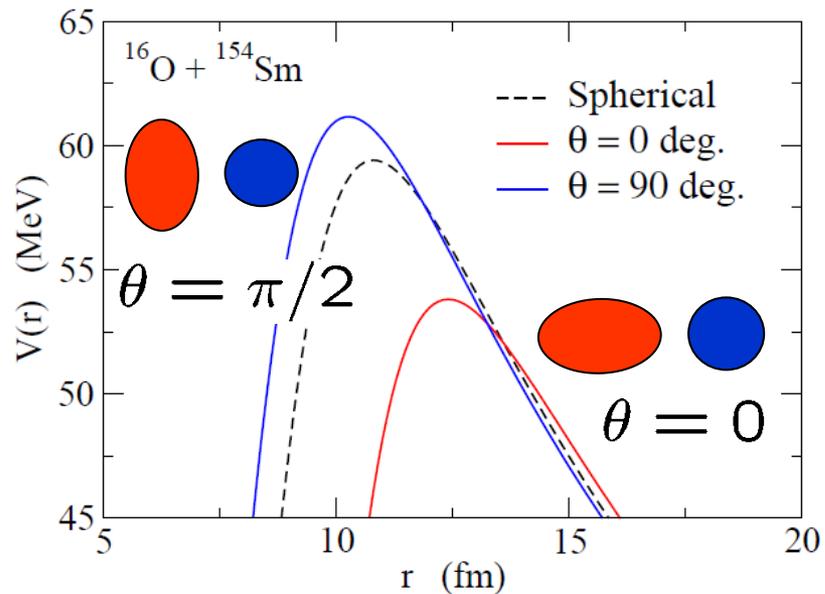
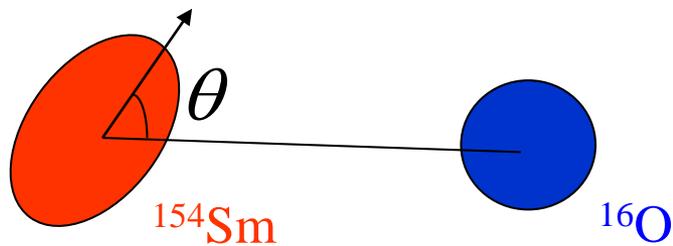
0.90 — 8^+
0.54 — 6^+
0.27 — 4^+
0.082 — 2^+
0 — 0^+

0 — 0^+
 ^{144}Sm

0 — 0^+
 ^{148}Sm

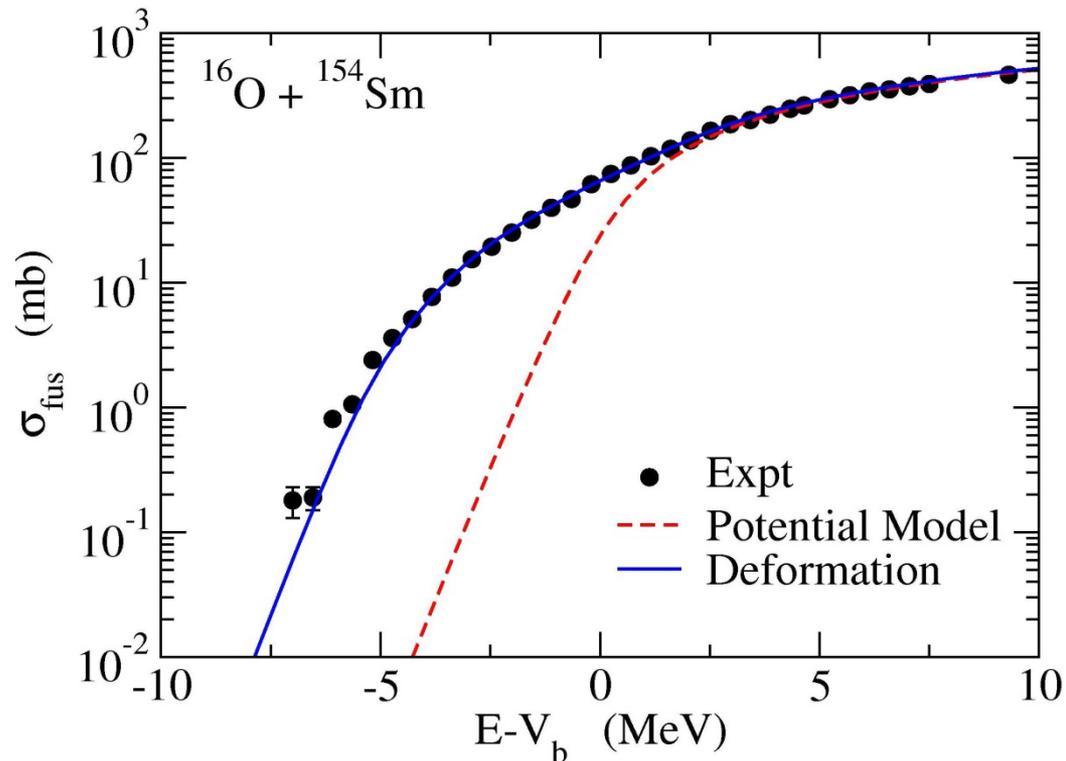
^{154}Sm

核融合反応に対する変形の効果



$\theta = 0$ では障壁が下がる。
 $\theta = \pi/2$ では障壁が上がる。

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



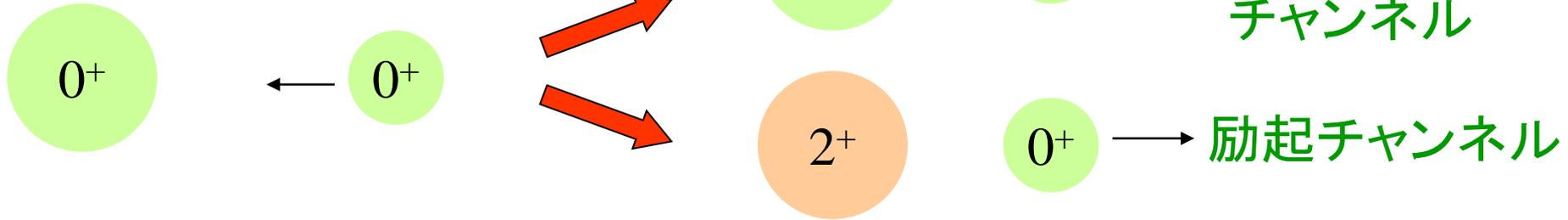
変形の効果: 核融合断面積が 10~100 倍増大

⇒ **核融合反応:** 核構造に対する興味深いプローブ

より量子的な扱い: 結合チャンネル法

内部励起を考慮した量子散乱理論

相対運動と内部励起の結合



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

励起エネルギー

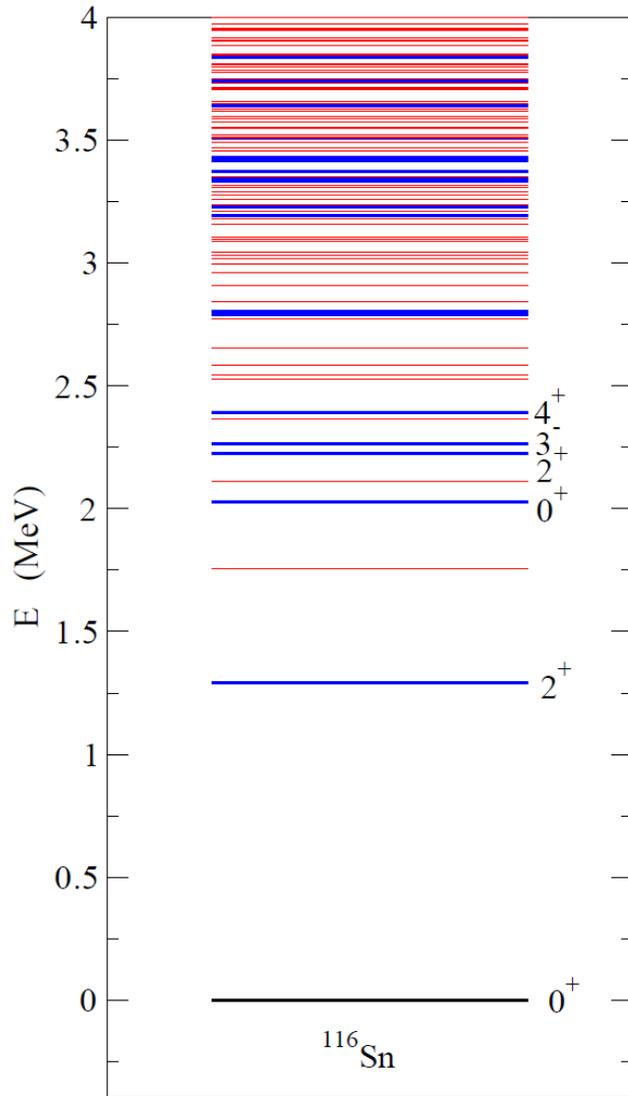
励起オペレーター

重イオン核融合反応の解析で標準的なツール

e.g. CCFULL, K.H., N. Rowley, A.T. Kruppa, CPC123 ('99) 143

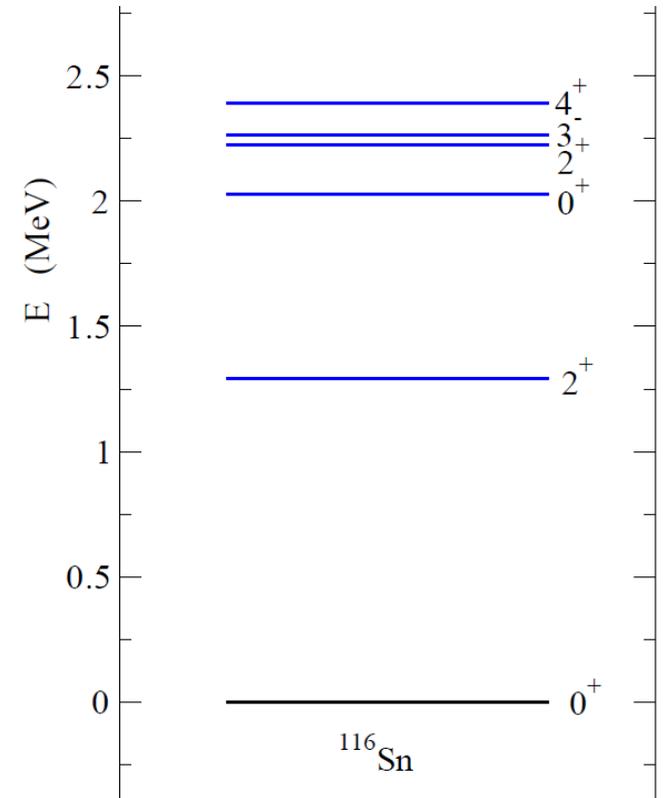
どのように結合チャンネル法で解析をするのか?

1. モデル化: 取り入れる励起状態を選択



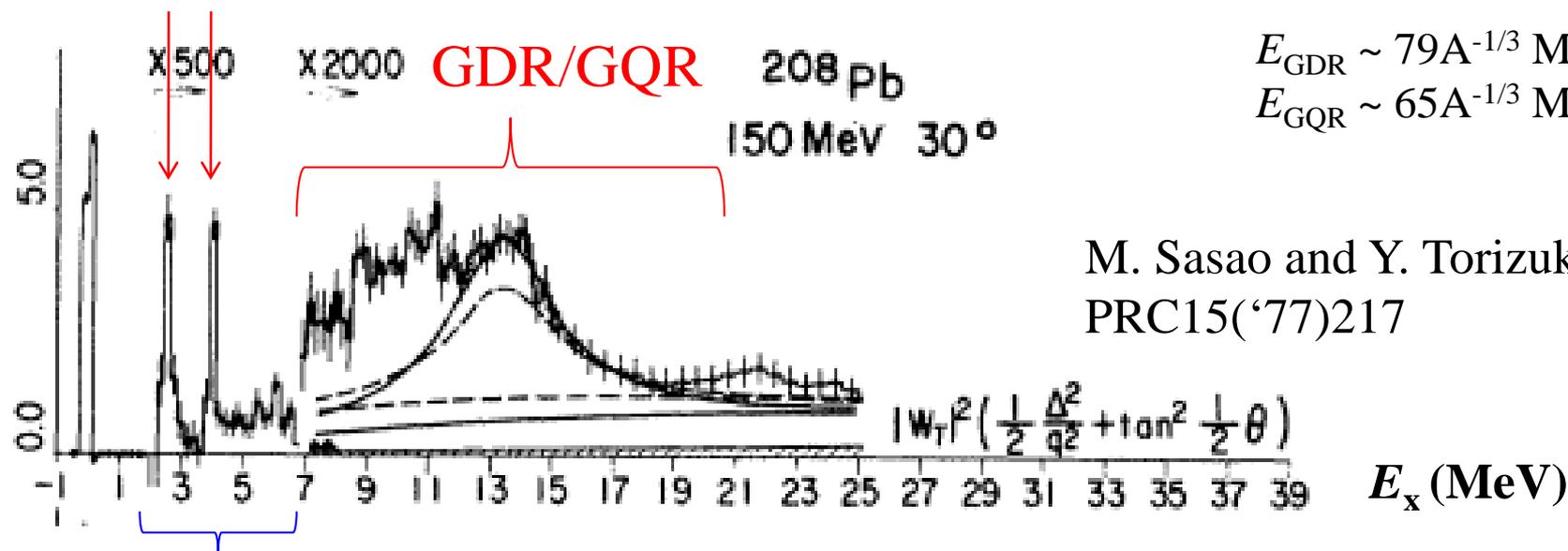
低励起集団
励起状態
のみ

S. Raman et al.,
PRC43('91)521



典型的な励起スペクトル: 電子散乱のデータ

低励起集団励起



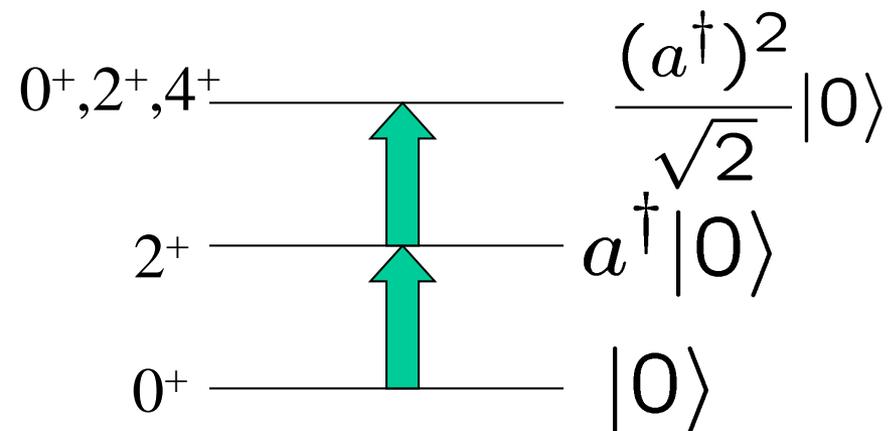
低励起非集団励起

- 巨大共鳴: E_x 大, なめらかな質量数依存性
→ 核間ポテンシャルに繰り込む
- 低励起集団励起: 障壁分布、強い原子核依存性
- 非集団励起: 完全に無視、
または、光学ポテンシャルの虚部として考慮
← (後ほど議論)

2. 集団励起の性質: 振動(調和振動子)? or 回転励起(変形)?

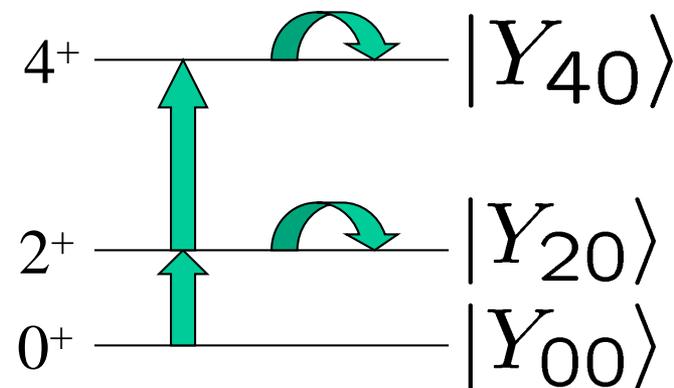
振動励起

$$\hat{O} = \frac{\beta}{\sqrt{4\pi}}(a + a^\dagger)$$



回転励起

$$\hat{O} = \beta Y_{20}(\theta)$$



3. 結合の強さ及び結合ポテンシャル

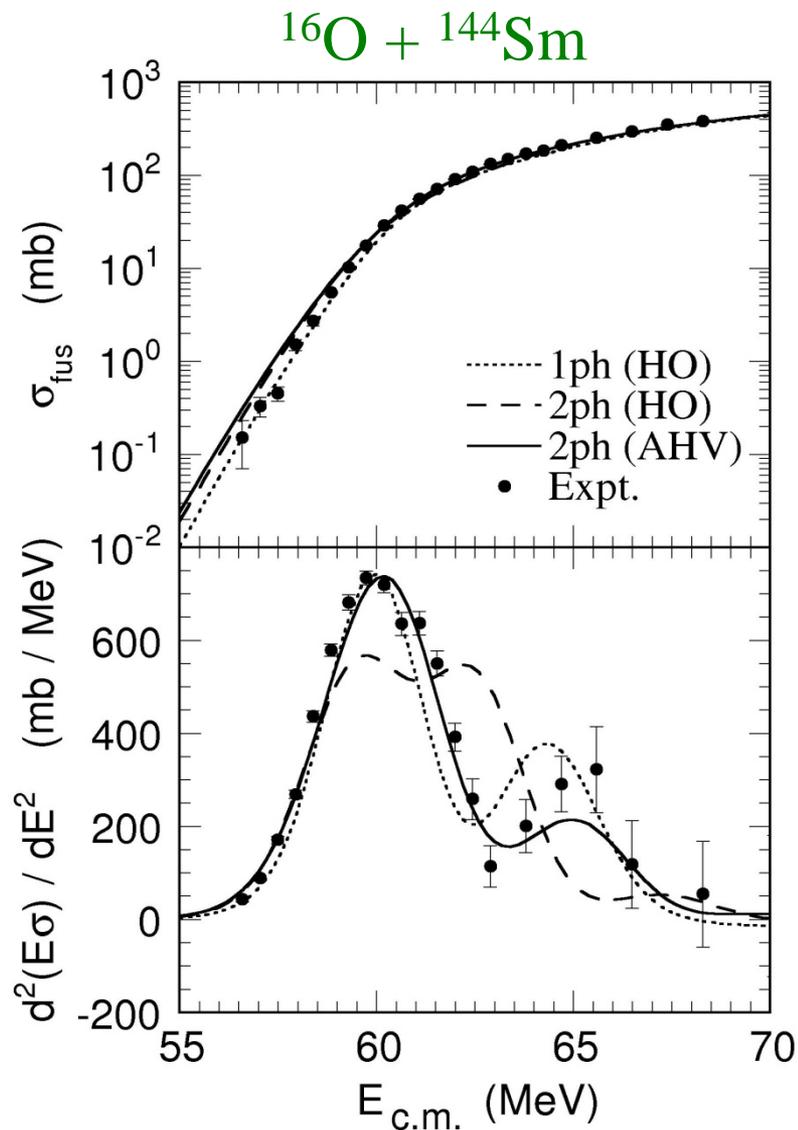
変形 Woods-Saxon ポテンシャル

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

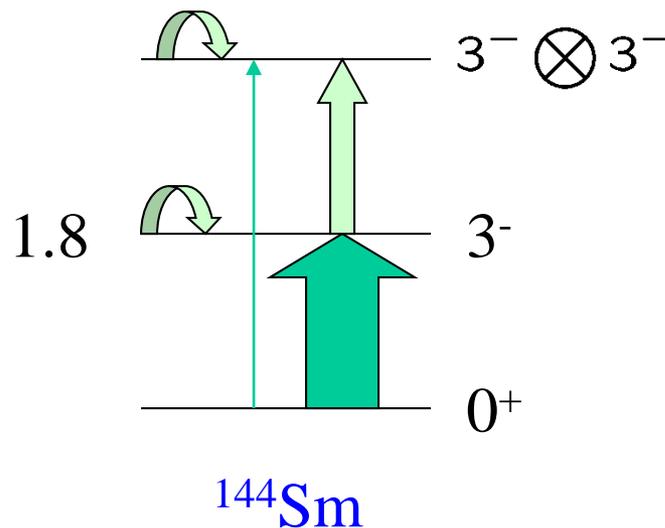
励起オペレーター

$$R_T \rightarrow R_T \left(1 + \sum_{\mu} \alpha_{\lambda\mu} Y_{\lambda\mu}^*(\theta, \phi) \right)$$

結合チャンネル計算の例



八重極非調和振動



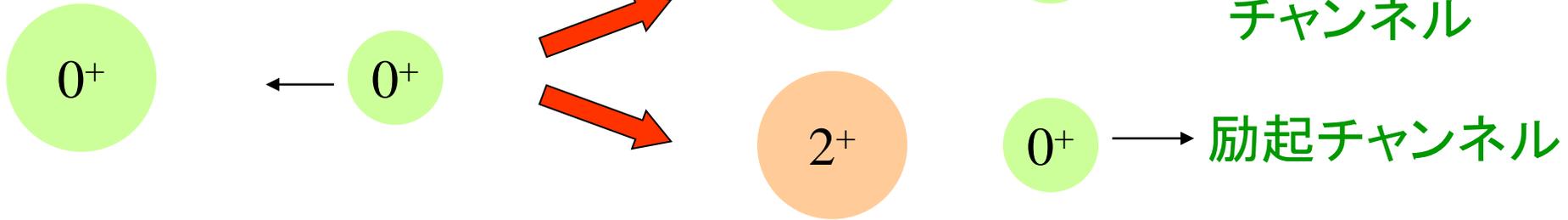
Quadrupole moment:
 $Q(3^-) = -0.70 \pm 0.02\text{b}$

K.Hagino, N. Takigawa, and S. Kuyucak,
 PRL79('97)2943

より量子的な扱い: 結合チャンネル法

内部励起を考慮した量子散乱理論

相対運動と内部励起の結合



残された問題

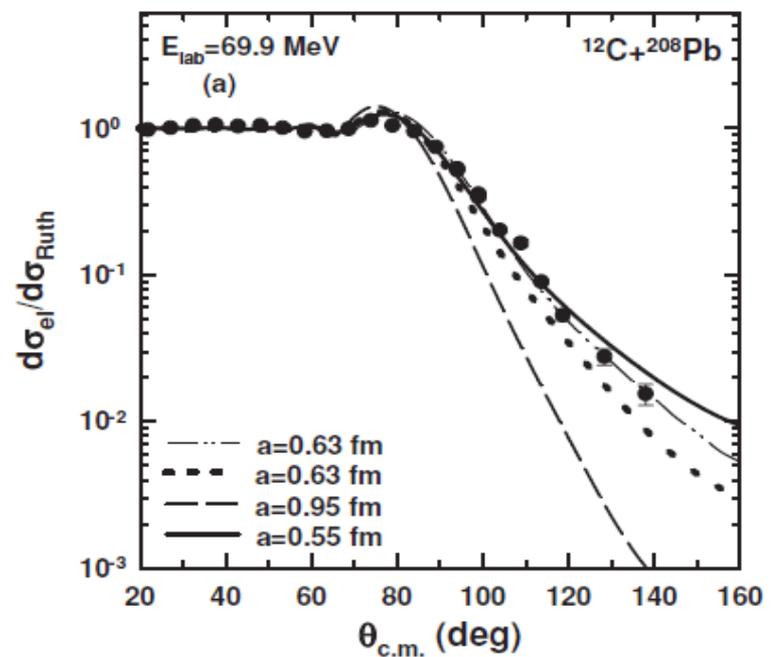
- ✓ 重イオン間ポテンシャルの表面のぼやけ
/ 極低エネルギーでの核融合断面積の“抑制”
 - エネルギー散逸との関係?
- ✓ 不安定核の核融合反応?
 - 分解過程 + 核子(対)移行過程
- ✓ (多核子)移行過程をどのように取り扱うか?

極低エネルギー核融合反応と表面のぼやけの問題

(非)弾性散乱:

二重畳みこみポテンシャル
Woods-Saxon ($a \sim 0.63$ fm)

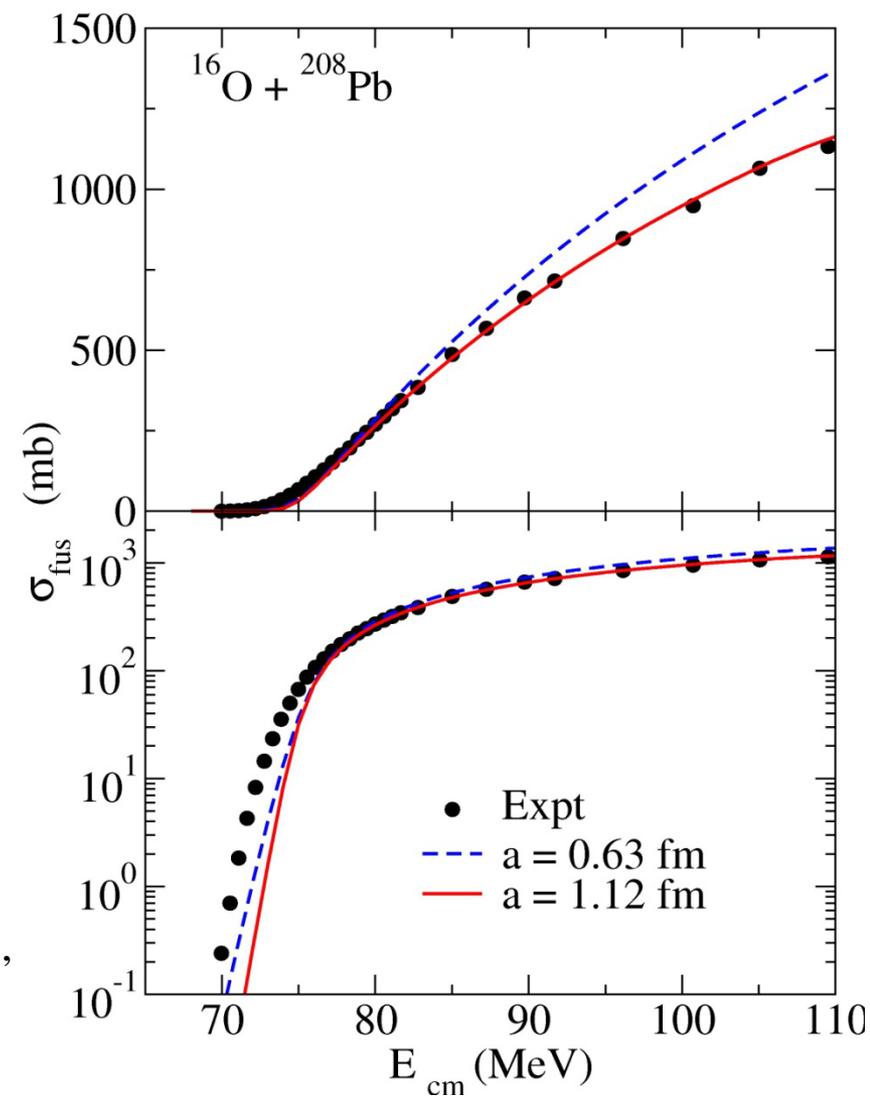
→ うまくいく

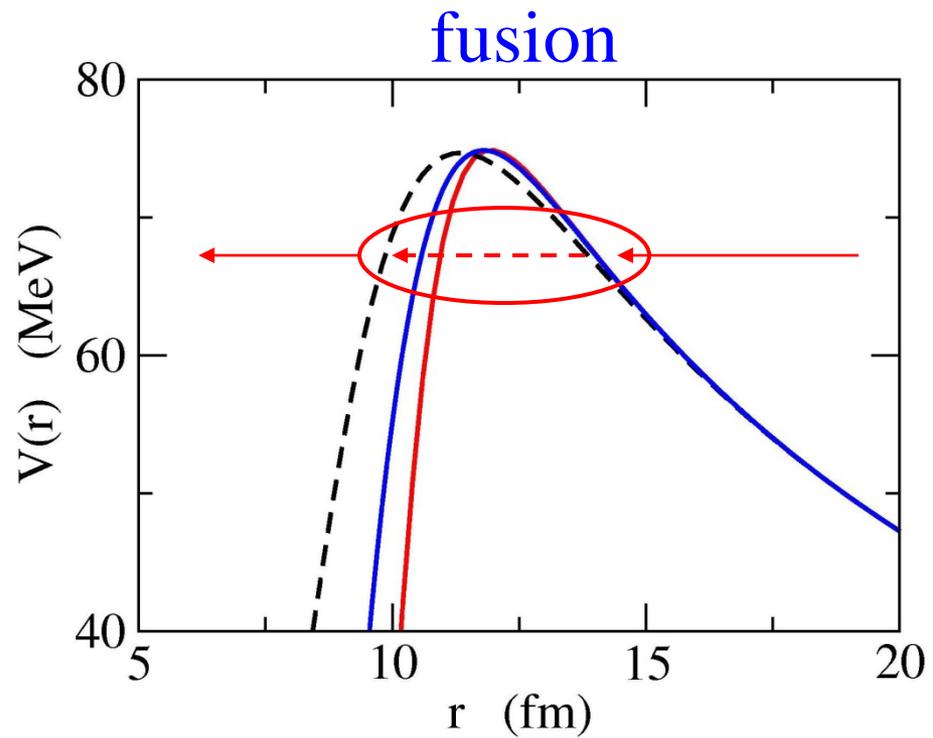
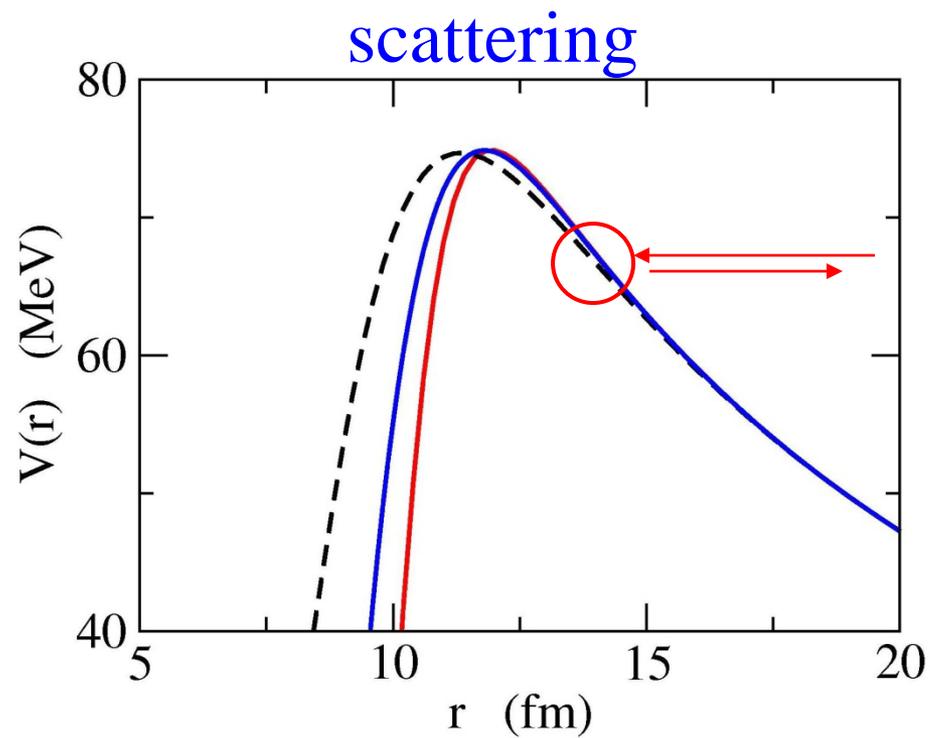


A. Mukherjee, D.J. Hinde, M. Dasgupta, K.H., et al.,
PRC75('07)044608

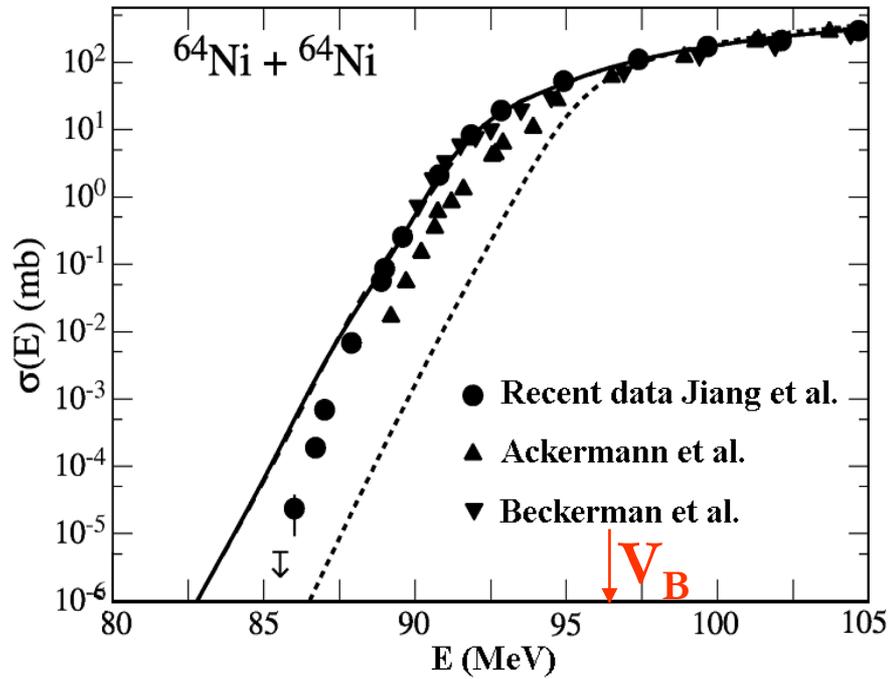
核融合: うまくいかない

→ $a \sim 1.0$ fm が必要 (Woods-Saxon の場合)

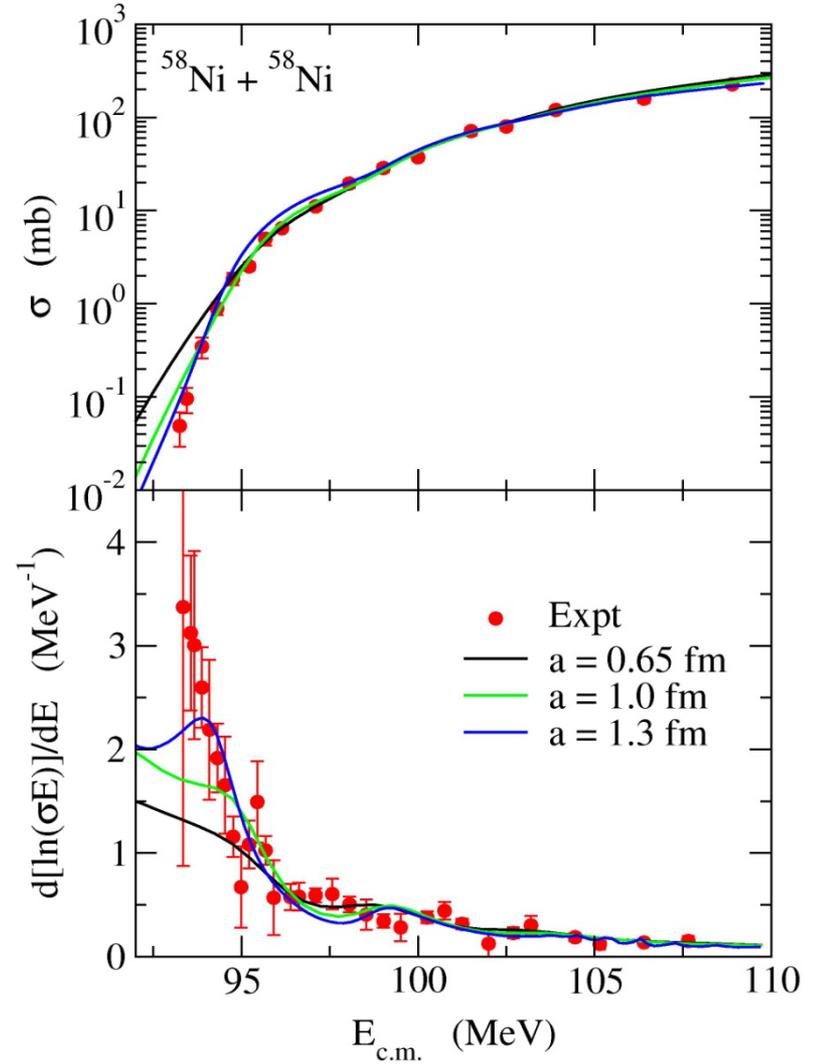




Deep subbarrier data

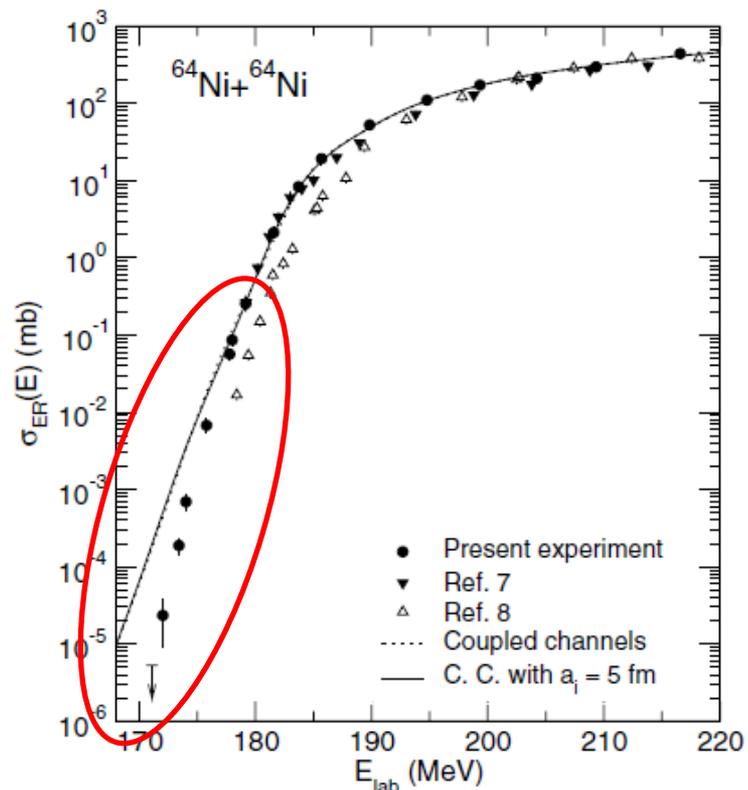


C.L. Jiang et al., PRL93('04)012701

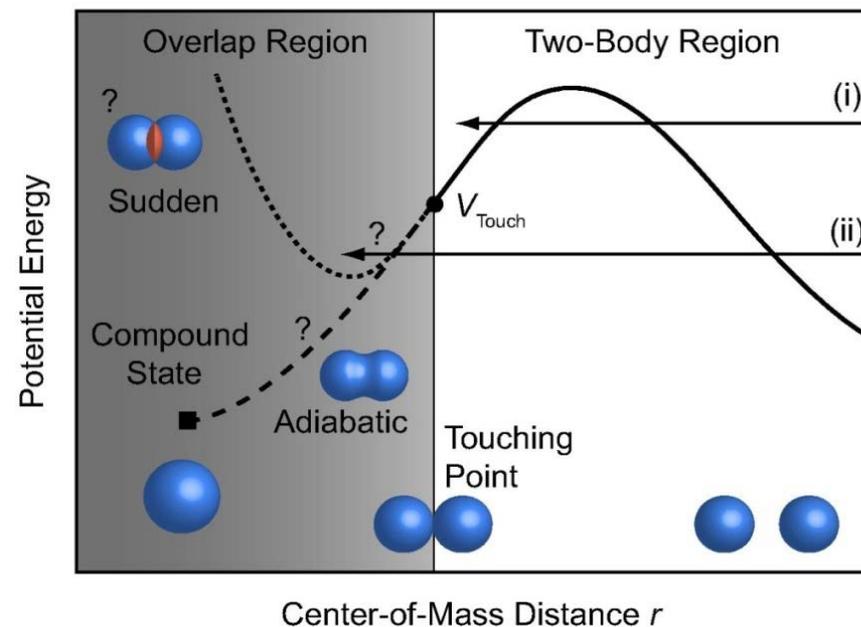


K. H., N. Rowley, and M. Dasgupta,
 PRC67('03)054603

極低エネルギーにおける核融合反応断面積の“抑制”



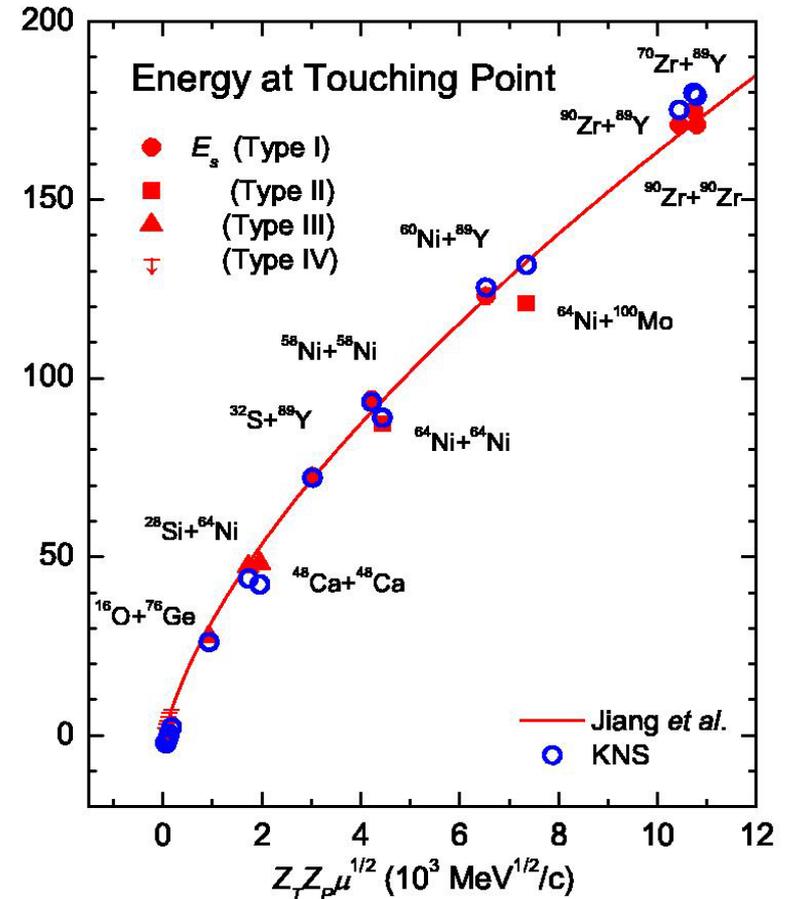
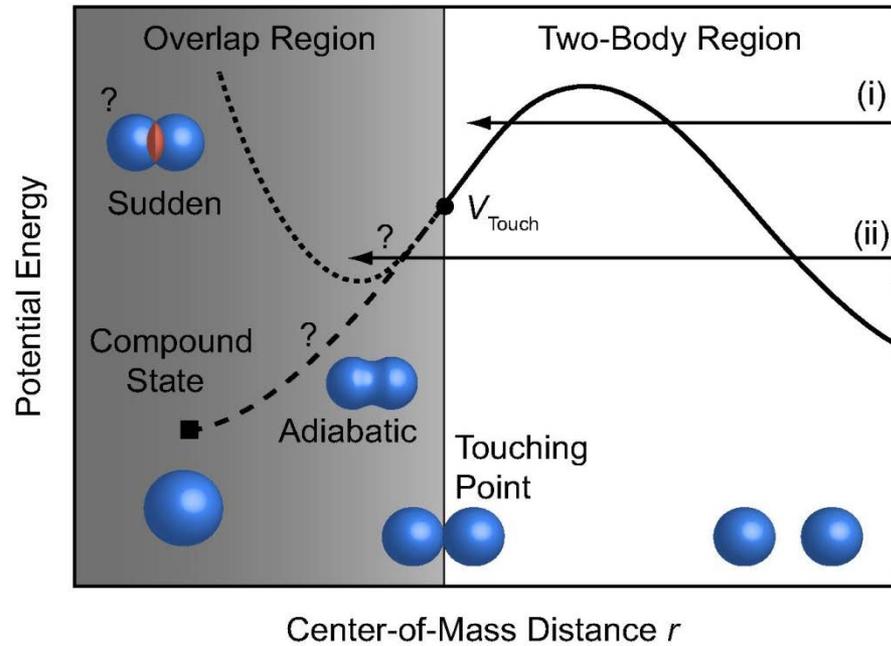
C.L. Jiang et al., PRL89('02)052701;
PRL93('04)012701



Theory:

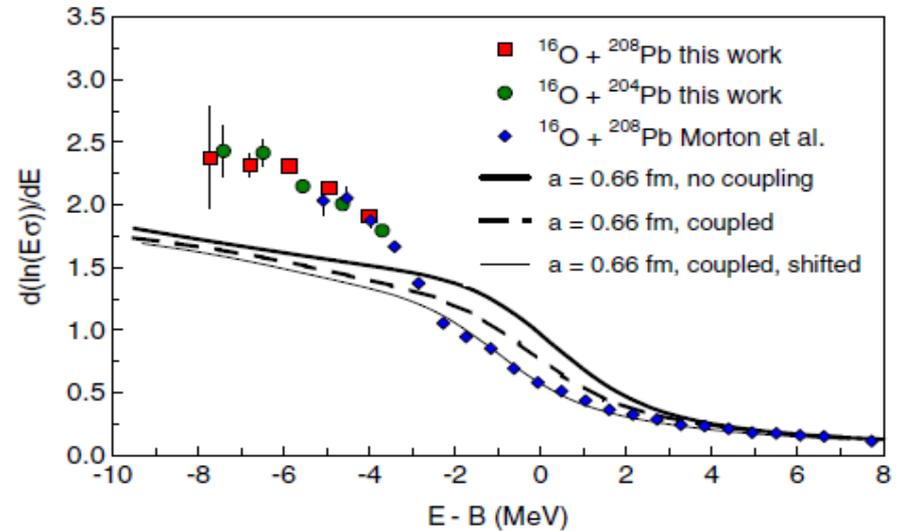
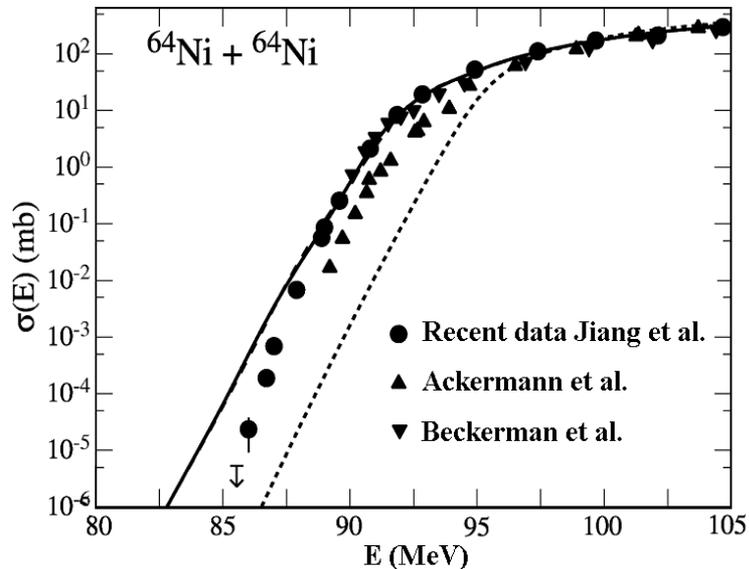
- ✓ S. Misicu and H. Esbensen,
PRL96('06)112701
- ✓ T. Ichikawa, K.H., and A. Iwamoto,
PRC75('07)057603,
PRL103('09)202701

接触点のエネルギーの系統性と極低エネルギー核融合反応



T. Ichikawa, K.H., A. Iwamoto,
 PRC75('07) 064612 & 057603

極低エネルギー核融合反応



C.L. Jiang et al., PRL93('04)012701

M.Dasgupta et al., PRL99('07)192701

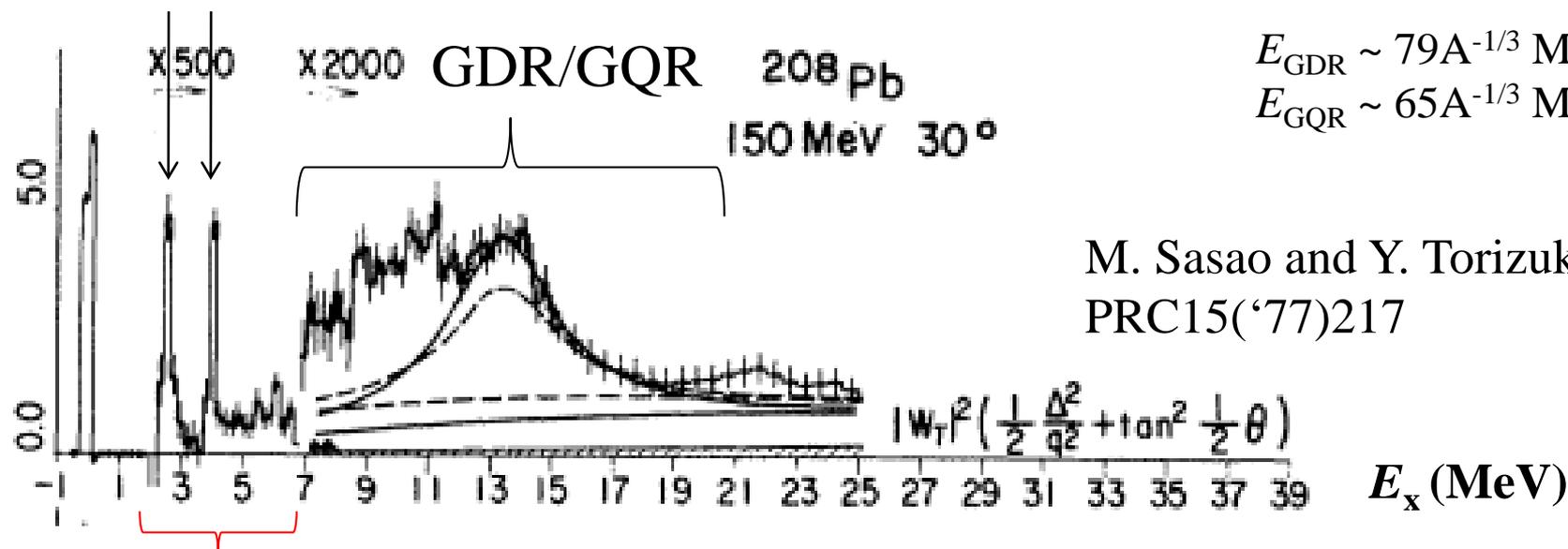
“核融合反応断面積の急激な落ち込み”



- C.C. 計算にとりこまれていない動的効果?
- エネルギー&角運動量の散逸?
- 弱結合状態との結合? ← このセミナー

典型的な励起スペクトル: 電子散乱のデータ

低励起集団励起

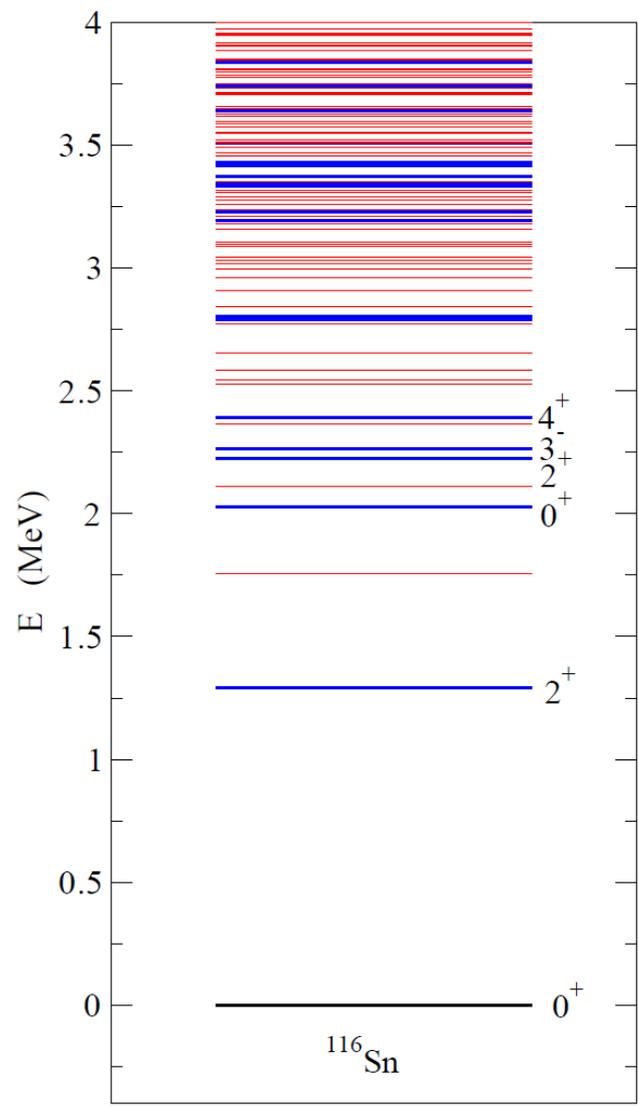


低励起非集団励起

- 巨大共鳴: E_x 大, なめらかな質量数依存性
→ 核間ポテンシャルに繰り込む
- 低励起集団励起: 障壁分布、強い原子核依存性
- 非集団励起: 完全に無視、
または、光学ポテンシャルの虚部として考慮
← (後ほど議論)

非集団励起の効果

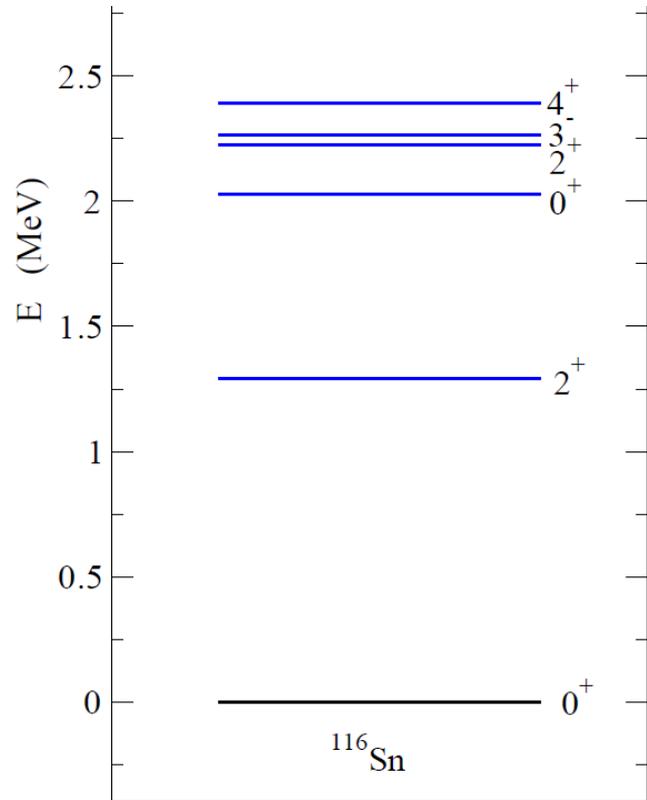
例: ^{116}Sn 核の場合



低励起集団
励起状態
のみ

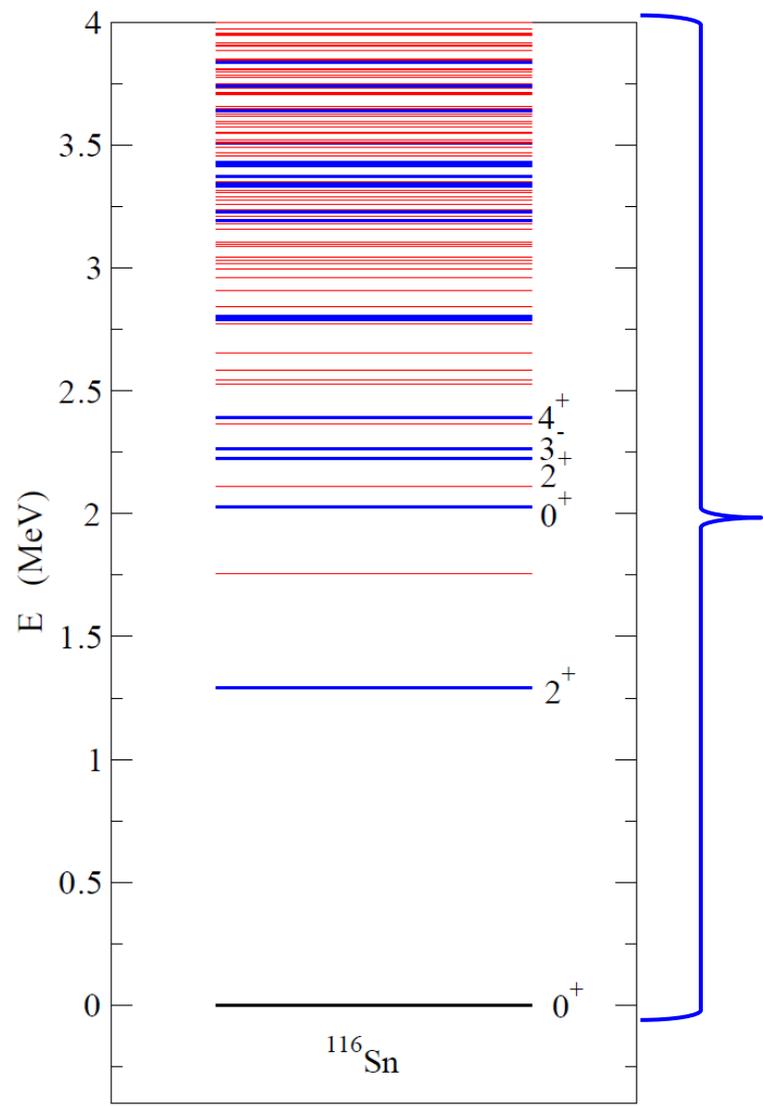
S. Raman et al.,
PRC43('91)521

典型的な結合チャンネル計算の模型空間



非集団励起の効果

例: ^{116}Sn 核の場合



4.1 MeV までに112本の準位
(93本の非集団準位)
ほぼ「完全な」レベルスキーム



反応機構において、これらの
非集団準位の果たす役割?

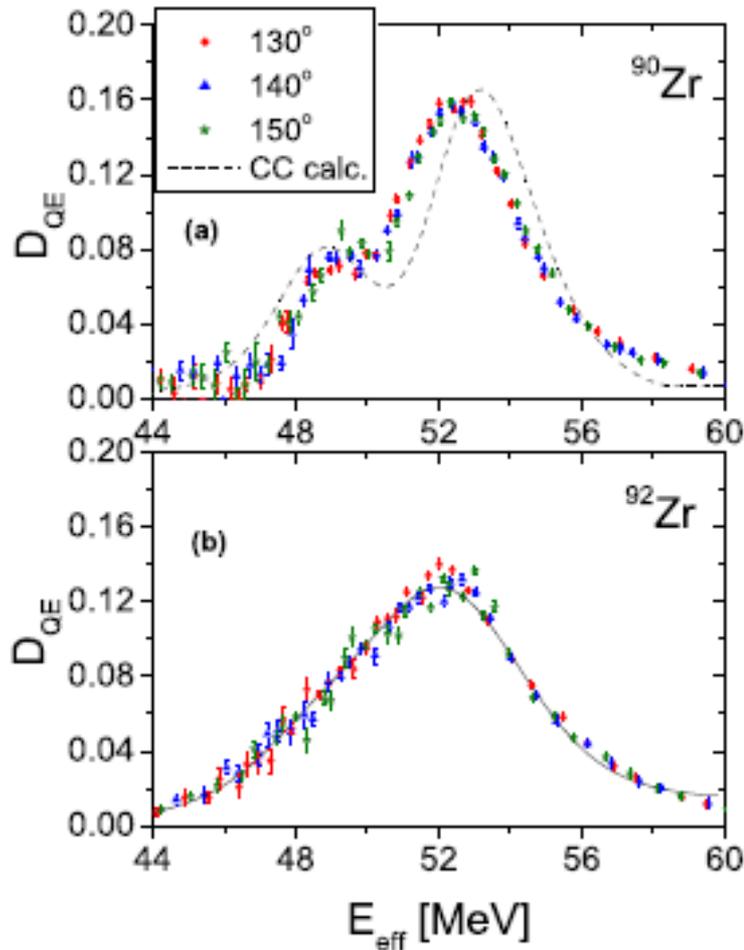
弱結合、ただし多数の準位

非集団励起のシグナル: $^{20}\text{Ne}+^{90}\text{Zr}$ と $^{20}\text{Ne}+^{92}\text{Zr}$ 準弾性散乱の比較

準弾性散乱障壁分布

$$D_{\text{qel}}(E) = -\frac{d}{dE} \left(\frac{\sigma_{\text{qel}}(E, \pi)}{\sigma_R(E, \pi)} \right)$$

QEL = elastic + inelastic + transfer

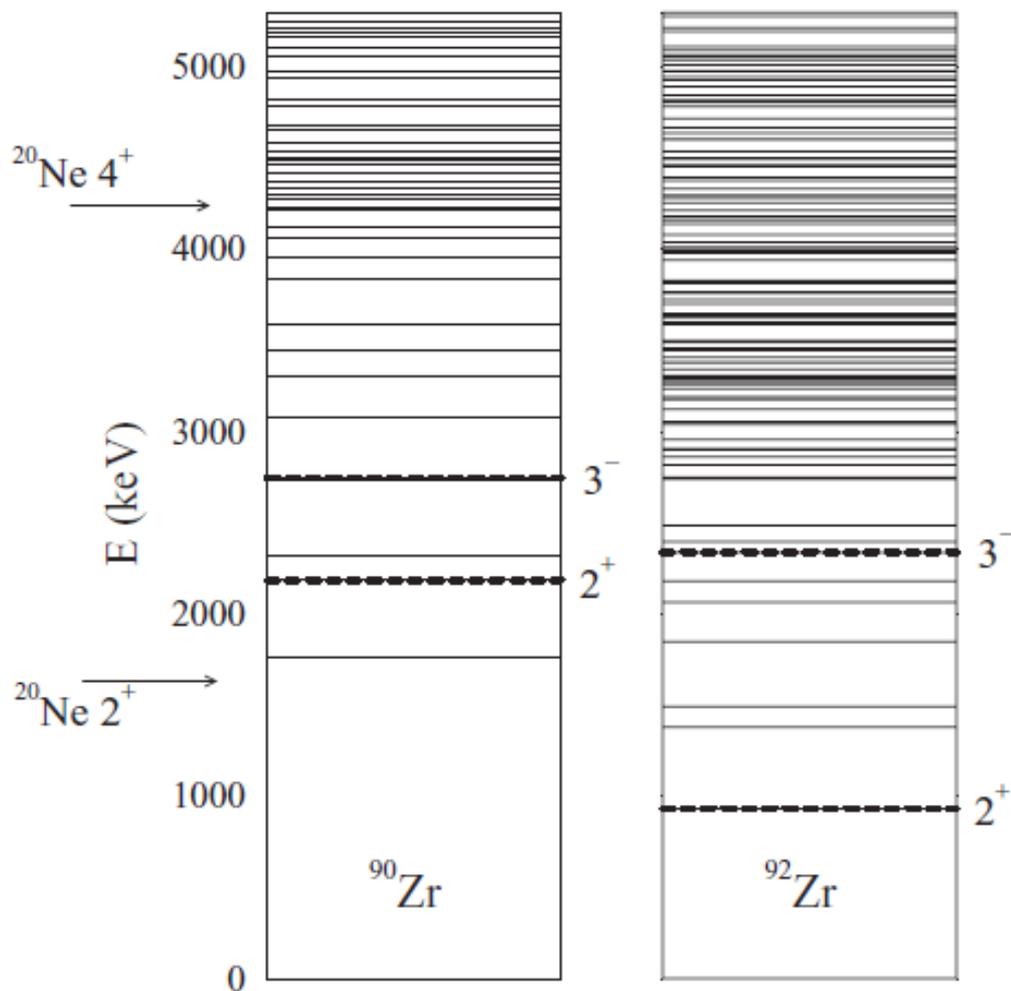


- C.C. 系は2つの系でほぼ同じ (^{20}Ne が主要な寄与)
- 実験データは2つの系で大きな違い



非集団励起の効果?

E. Piasecki et al.,
PRC80('09)054613



^{90}Zr ($Z=40$ sub-shell closure,
 $N=50$ shell closure)

$$^{92}\text{Zr} = ^{90}\text{Zr} + 2n$$

困難: 非集団準位の性質はよくわかっていない
 (励起エネルギーのみ、一部はスピン、パリティも)
 → 基底状態との結合定数はほとんど情報なし

乱雑行列モデル

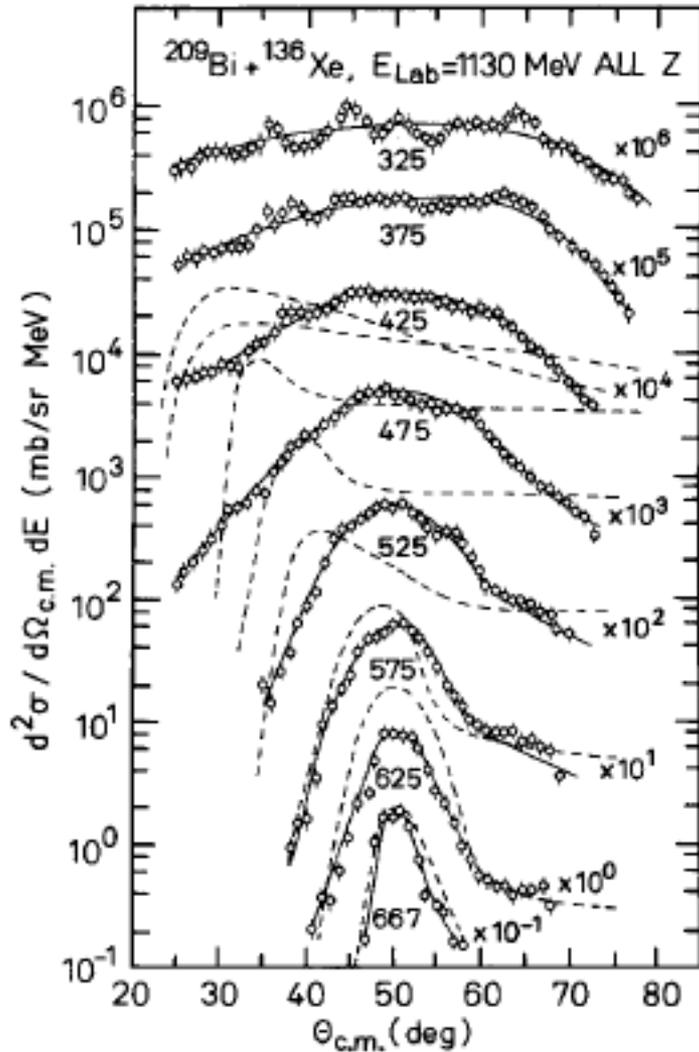
結合チャンネル方程式:

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

$|\phi_k\rangle$: 複雑な非集団励起状態

結合行列の要素 $V_{kk'} = \langle \phi_k | V_{\text{coup}} | \phi_{k'} \rangle$
を(ガウス分布をする)乱数とみなす:

$$\begin{aligned} \overline{V_{ij}(r)} &= 0, \\ \overline{V_{ij}(r)V_{kl}(r')} &= (\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) \frac{w_0}{\sqrt{\rho(\epsilon_i)\rho(\epsilon_j)}} \\ &\quad \times e^{-\frac{(\epsilon_i - \epsilon_j)^2}{2\Delta^2}} \cdot e^{-\frac{(r-r')^2}{2\sigma^2}} \cdot h(r)h(r') \end{aligned}$$



重イオン反応に対する乱雑行列モデル:

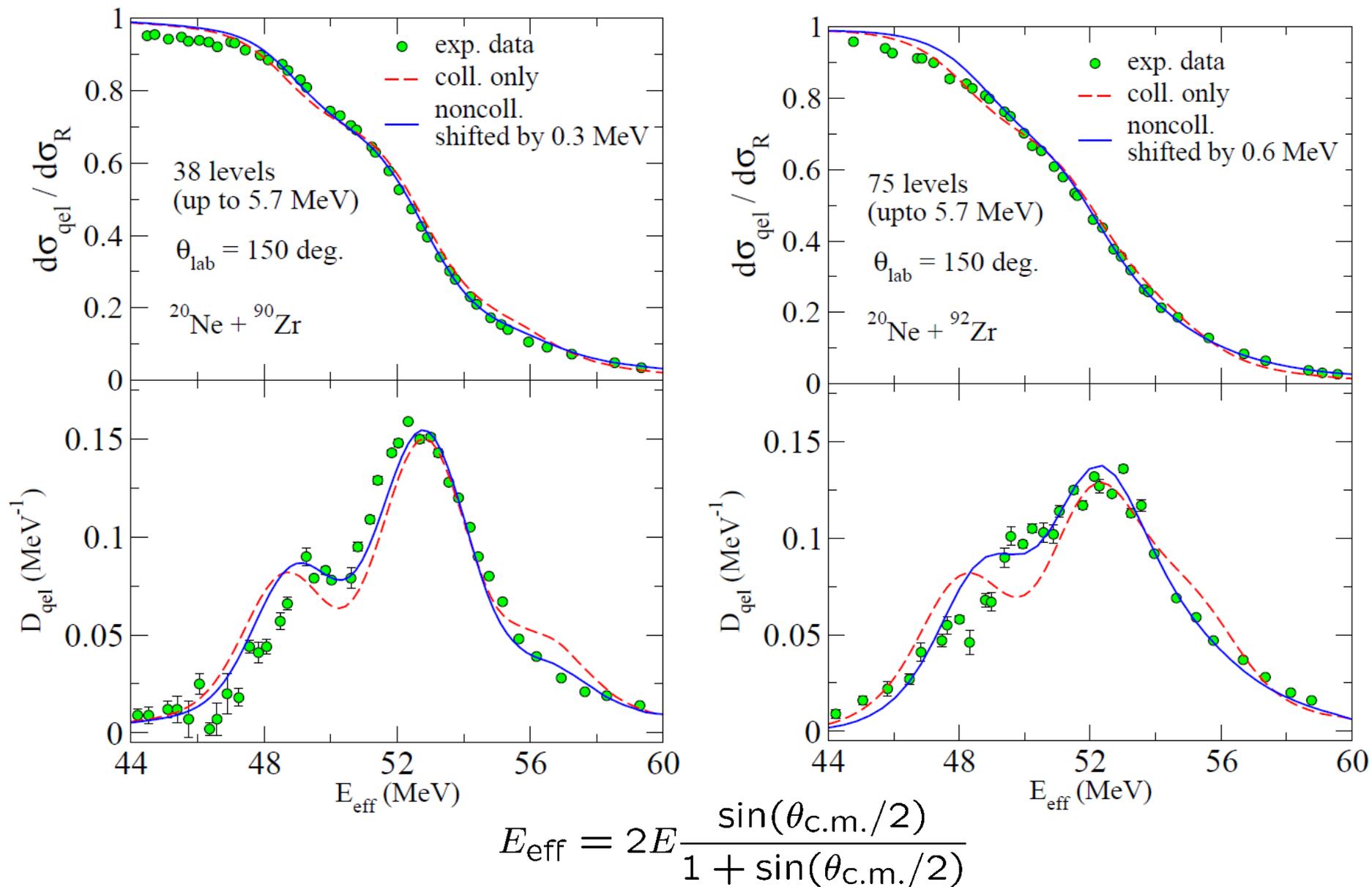
✓ 深部非弾性散乱(DIC)を解析するために Weidenmuller らにより考案

✓ 同様のモデルは量子散逸を議論するためにも用いられた

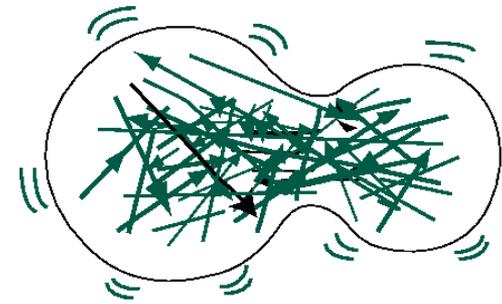
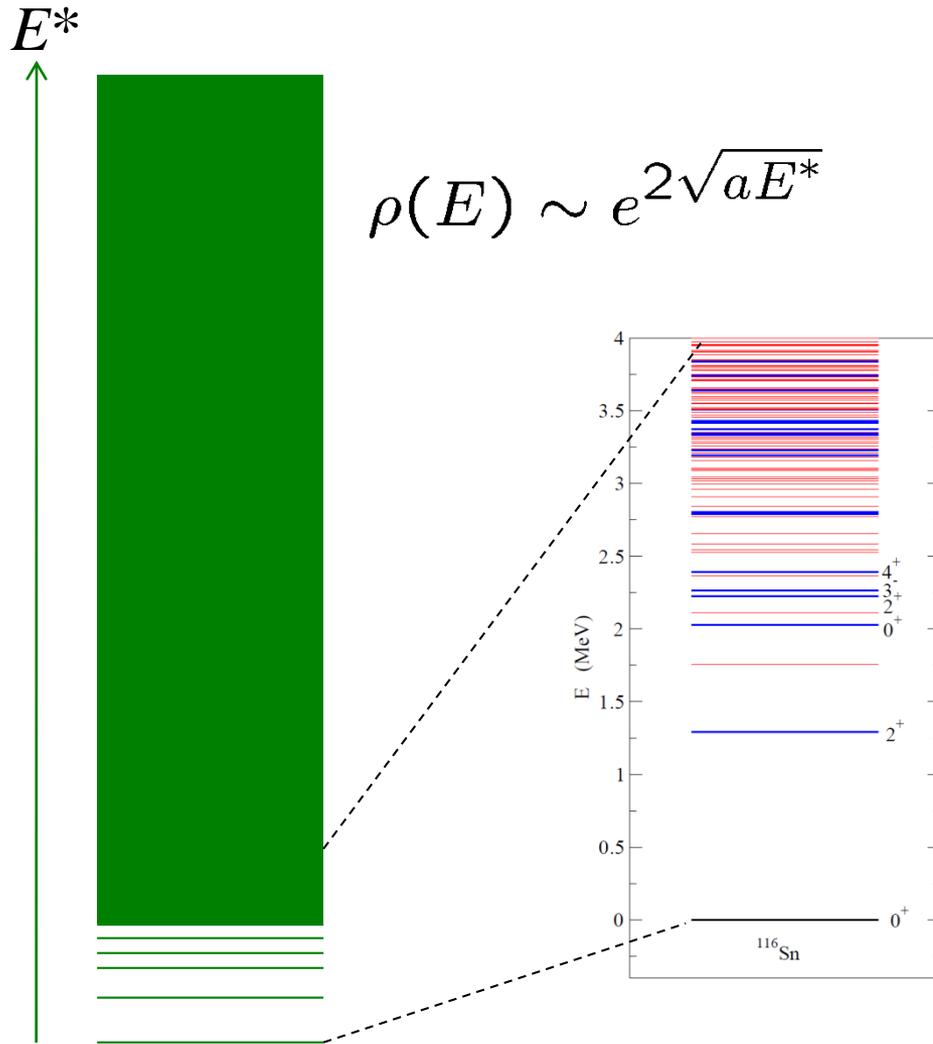
- M. Wilkinson, PRA41('90)4645
- A. Bulgac, G.D. Dang, and D. Kusnezov, PRE54('96)3468
- S. Mizutori and S. Aberg, PRE56('97)6311

D. Agassi, H.A. Weidenmuller, and C.M. Ko, PL 73B('78)284

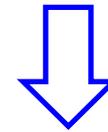
非集団励起を入れた結合チャンネル計算の結果



原子核の摩擦と重イオン核融合反応



これらの無数の状態は核反応の途中で複雑に励起



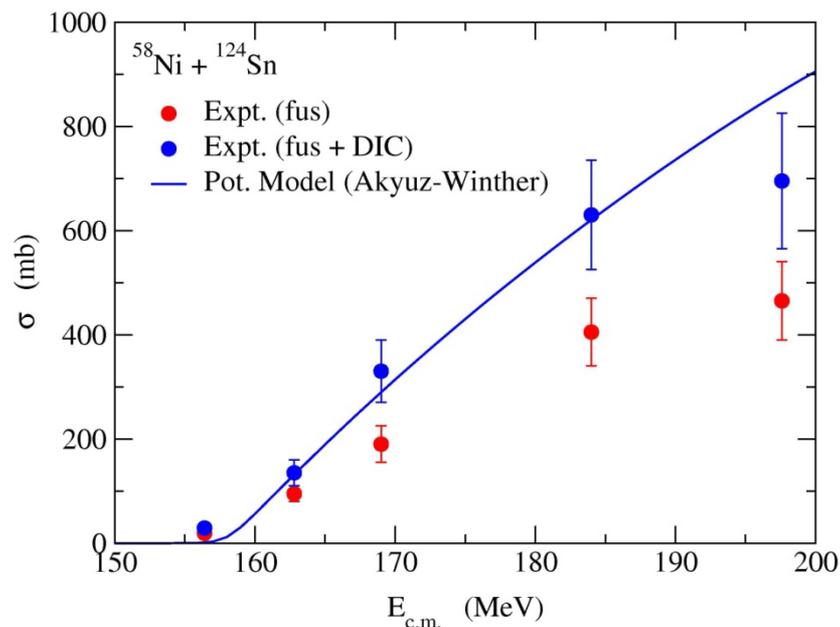
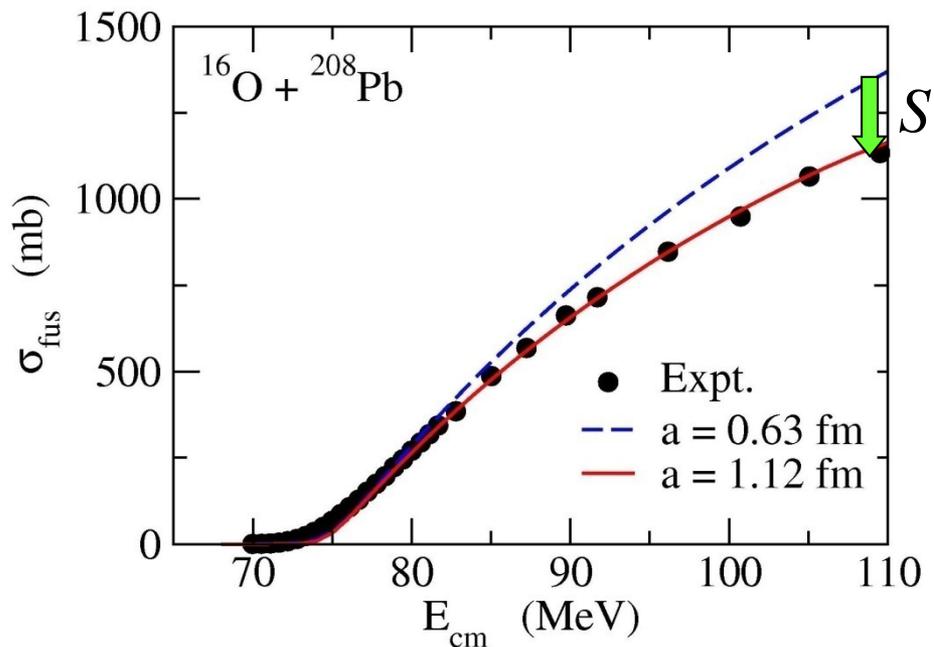
原子核の内部自由度は核反応に対して「環境」のように振舞う
「内的環境自由度」

原子核のスペクトル

環境との結合 \longleftrightarrow 散逸、摩擦

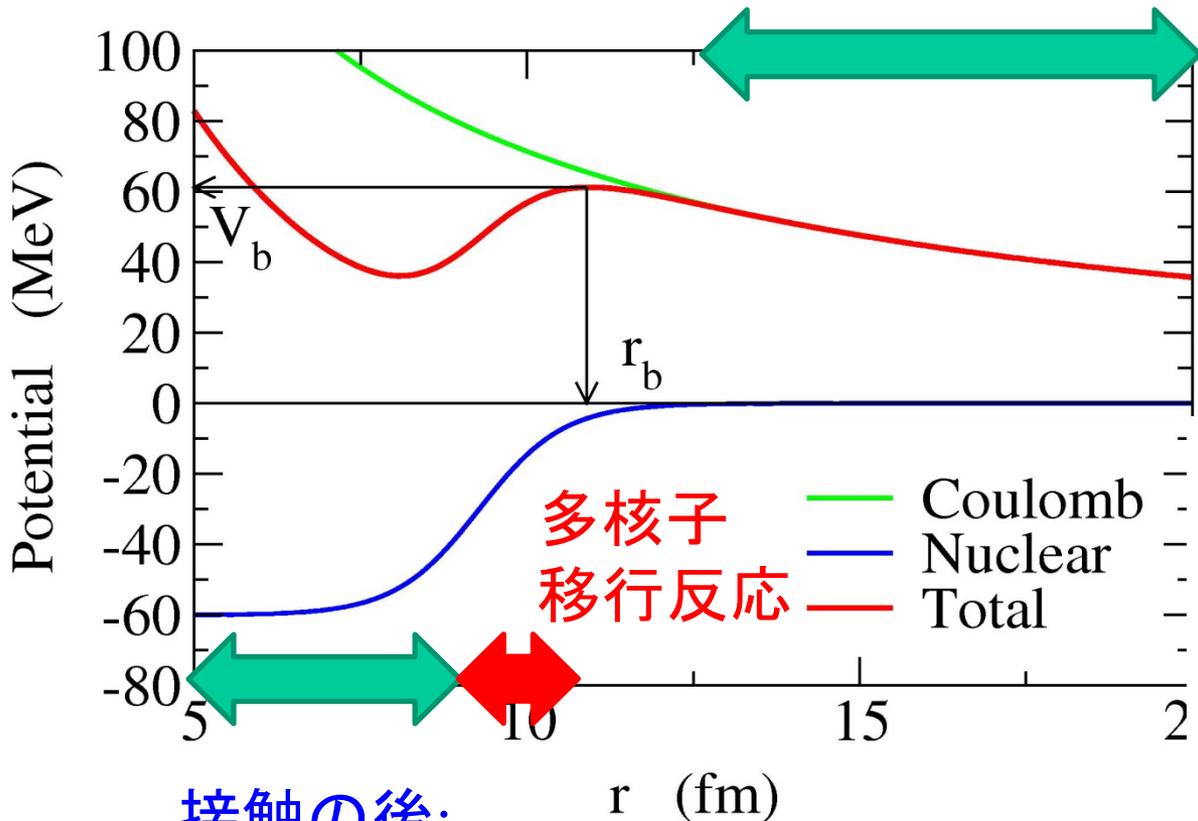
どのくらい我々は「摩擦」を理解しているのか?

核融合の理論 \longrightarrow friction free: 障壁内部での強い吸収のみ

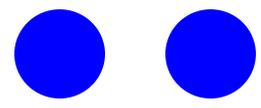


核融合反応に対するエネルギー散逸の問題を再検討すべき

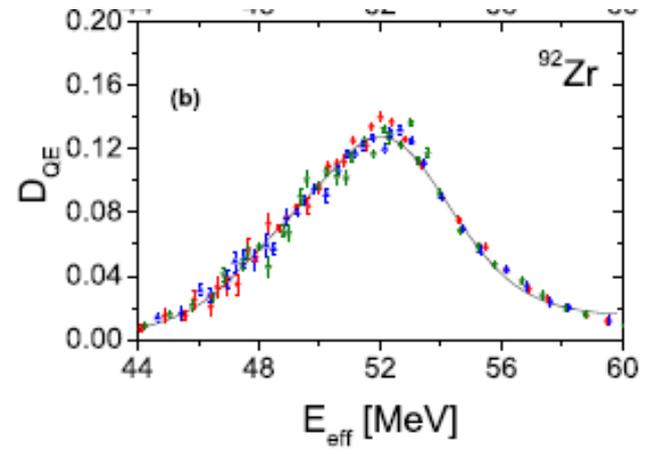
- DIC の実験データの再解析: 有用かもしれない
- 散逸的量子トンネル効果を取り入れた理論モデルの構築



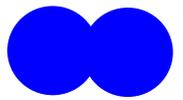
それぞれの原子核の
非集団励起



$^{20}\text{Ne} + ^{92}\text{Zr}$



接触の後:
一体系の非集団励起



• 極低エネルギー核融合

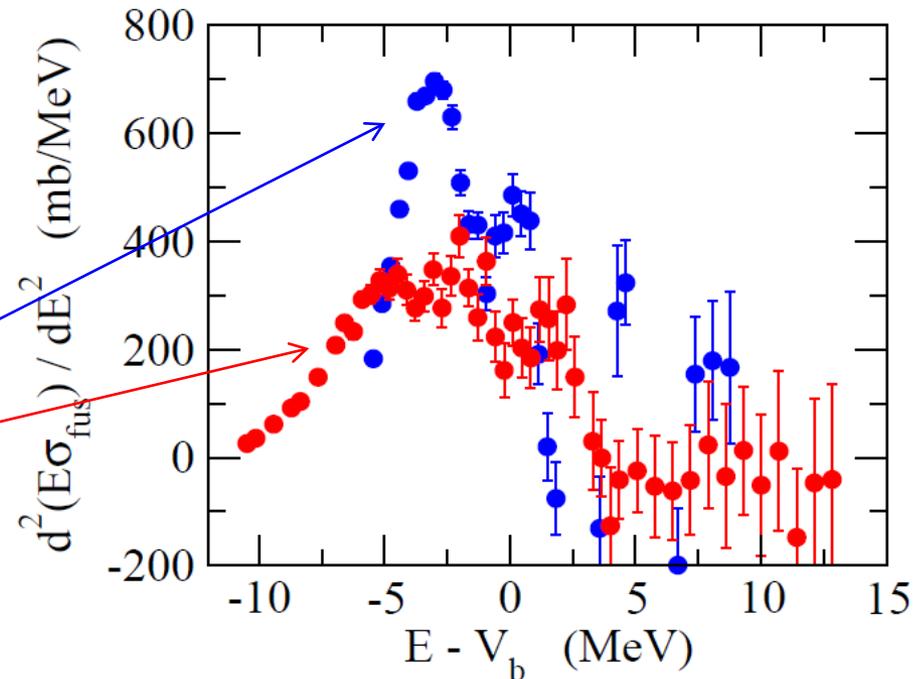
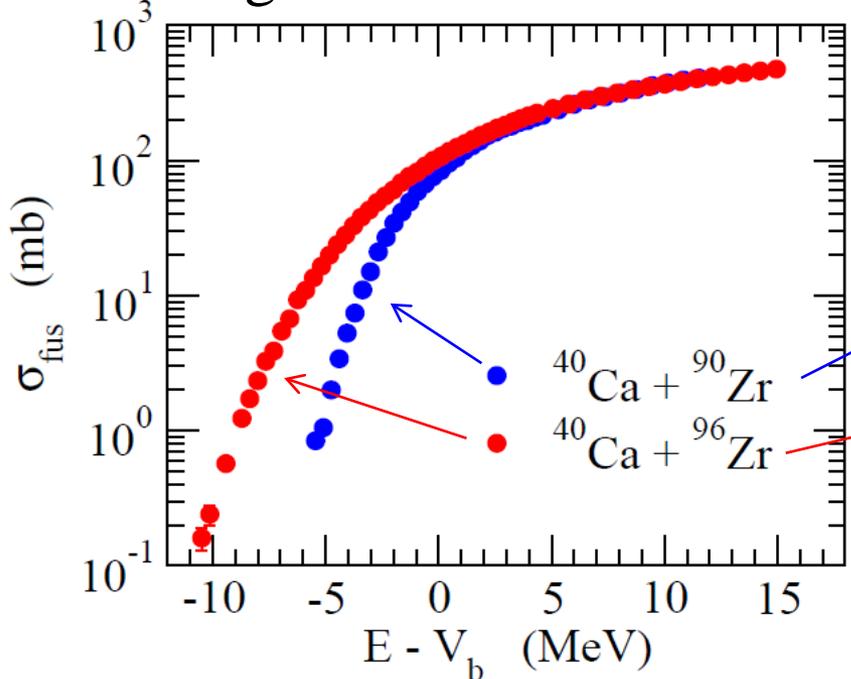
• 乱雑行列モデル?

核融合反応(クーロン障壁近傍と以下)と DIC の統一模型?

cf. 超重元素生成反応

重イオン核融合反応における多核子移行過程の効果

Legnaro data for $^{40}\text{Ca} + ^{90,96}\text{Zr}$



H. Timmers et al., NPA633('98)421

$^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$

- 核融合反応断面積のより大きな増大
- より平坦な障壁分布

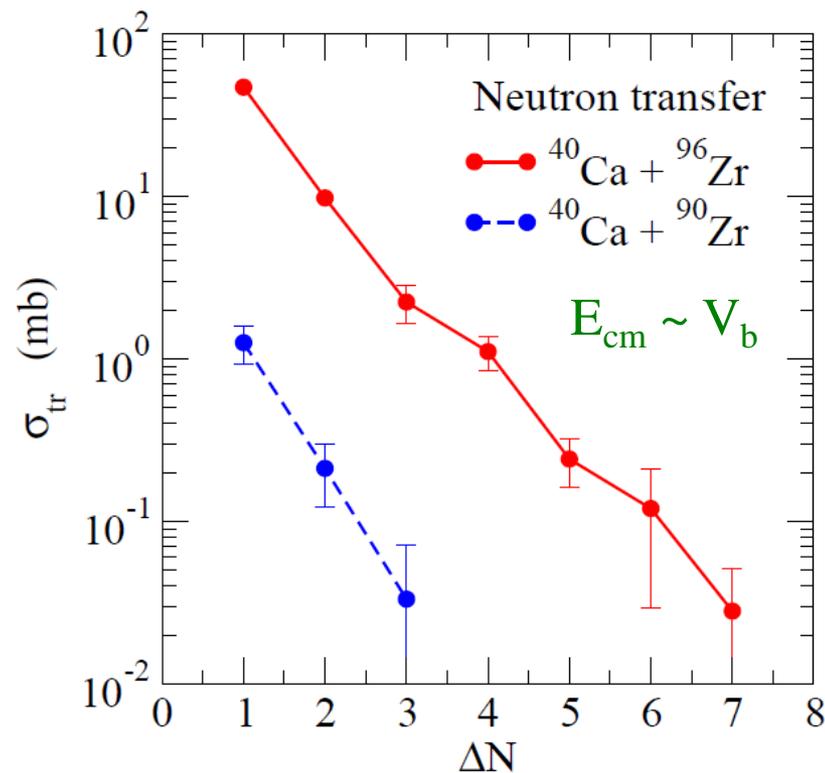
多中性子移行反応のQ-値

Q_{gg} (MeV)

	$^{40}\text{Ca} + ^{90}\text{Zr}$	$^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$
+1n	-3.61	+0.51
+2n	-1.44	+5.53
+3n	-5.86	+5.24
+4n	-4.17	+9.64
+5n	-9.65	+8.42
+6n	-9.05	+11.62

cf. $Q_{gg}(-1n) = -8.45$ MeV for $^{40}\text{Ca} + ^{90}\text{Zr}$

全核子移行断面積 の実験データ



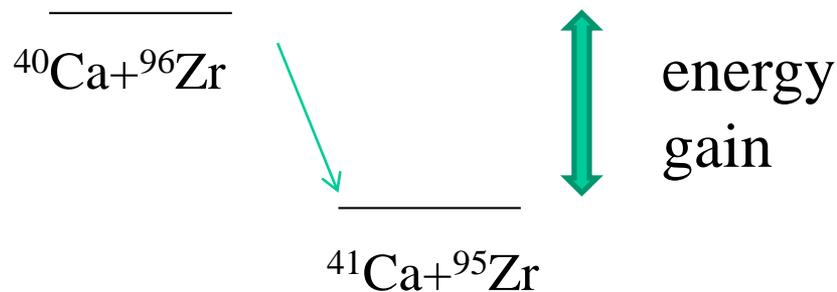
G. Montagnoli et al.,
J. of Phys. G23('97)1431

どのように多核子移行反応を取り扱うか? : 既存の方法

1. Stelson model: P.H. Stelson, PLB205('88)190
2. GRAZING: G. Pollarolo and A. Winther, PRC62('00)054611
3. Zagrebaev's model: V.I. Zagrebaev, PRC67('03)061601(R)

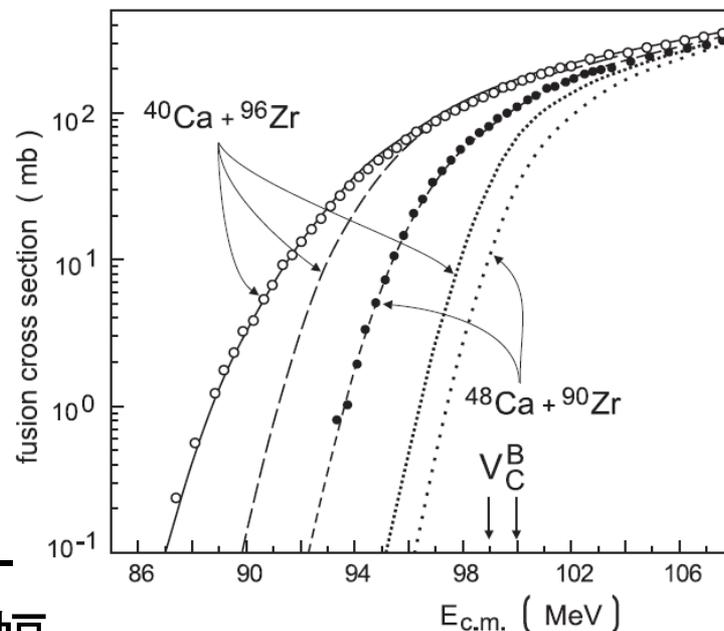
$$\sigma(E) \sim \sum_k \int_{-E}^{Q_{gg}(k)} dQ \underbrace{\alpha_k(Q)}_{\text{Q-value distribution}} \underbrace{\sigma_{CC}(E+Q)}_{\text{fusion at } E+Q}$$

Q-value distribution fusion at $E+Q$



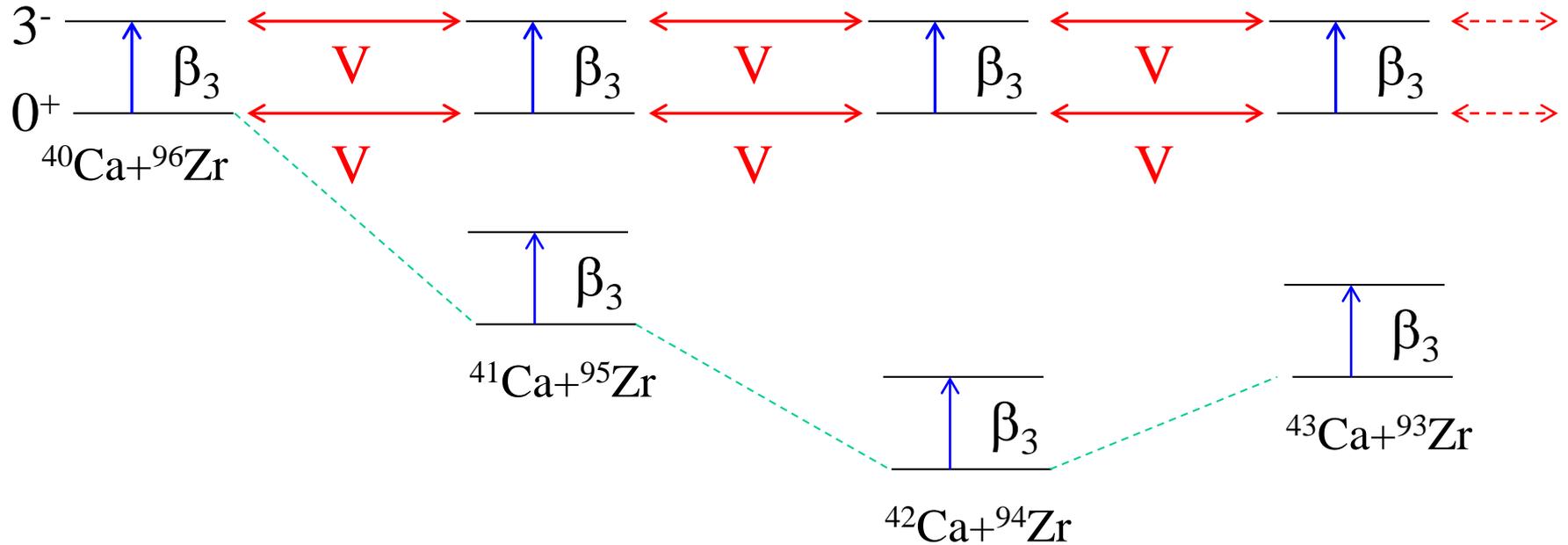
 too naive

cf. 3- 状態の励起: 相対エネルギーは減少するが大きな σ_{fus} の増幅



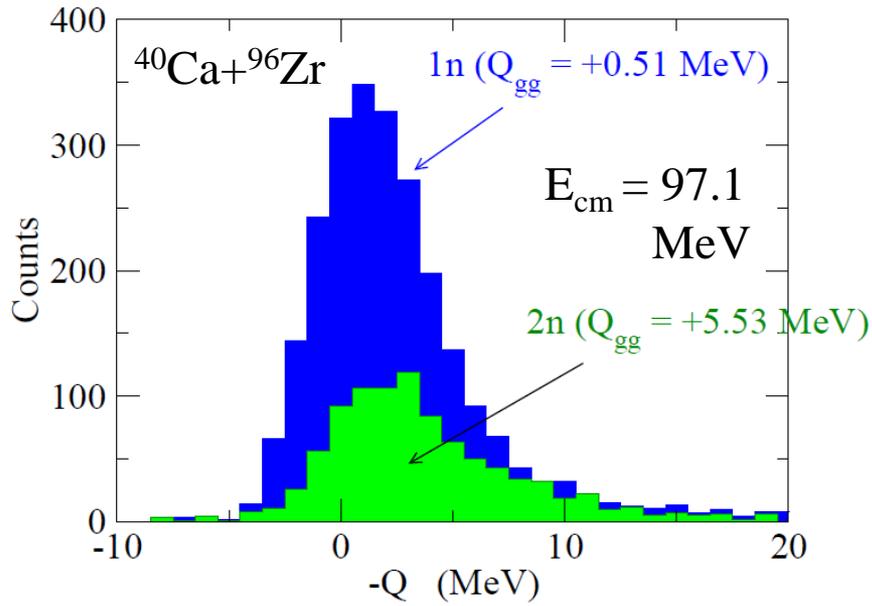
どのように多核子移行反応を取り扱うか? :新しい方法

K.H., N. Sekine, and N. Rowley, in preparation.

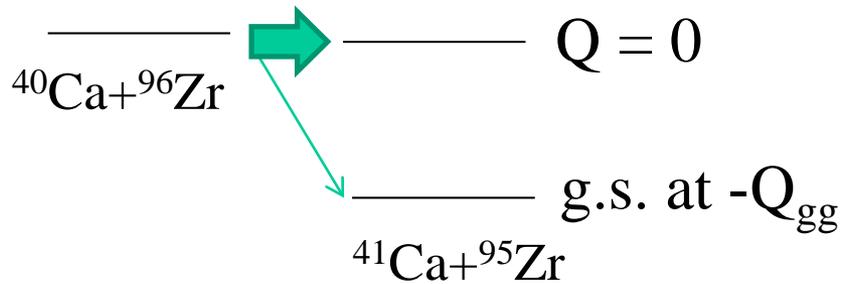


- 核子移行過程と非弾性励起は独立の自由度
- 核子移行は $Q=0$ で起こると仮定
- 核子移行に関して結合は定数

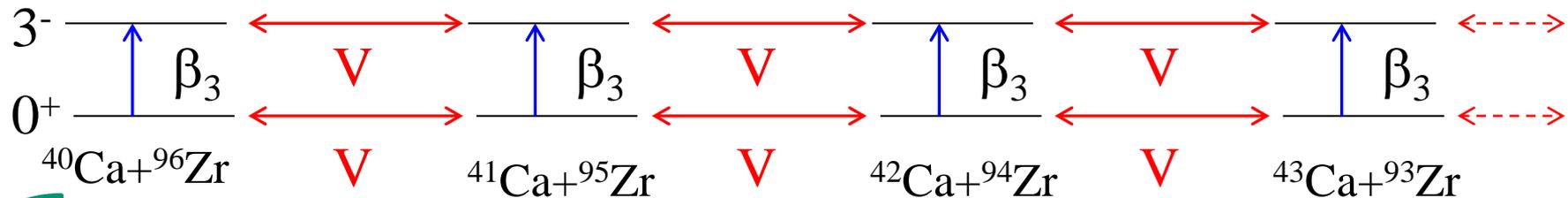
Q-值分布



L. Corradi et al., PRC84('11)034603
(Recent data with PRISMA)



Q-value matching



固有チャンネル (eigen-channel) アプローチ

$$\sigma_{\text{fus}}(E) = \sum_i w_i \sigma_{\text{CC}}(E + \lambda_i)$$

既存のCCコード
のアウトプット

既存の結合チャンネル計算コードの単純な拡張でOK

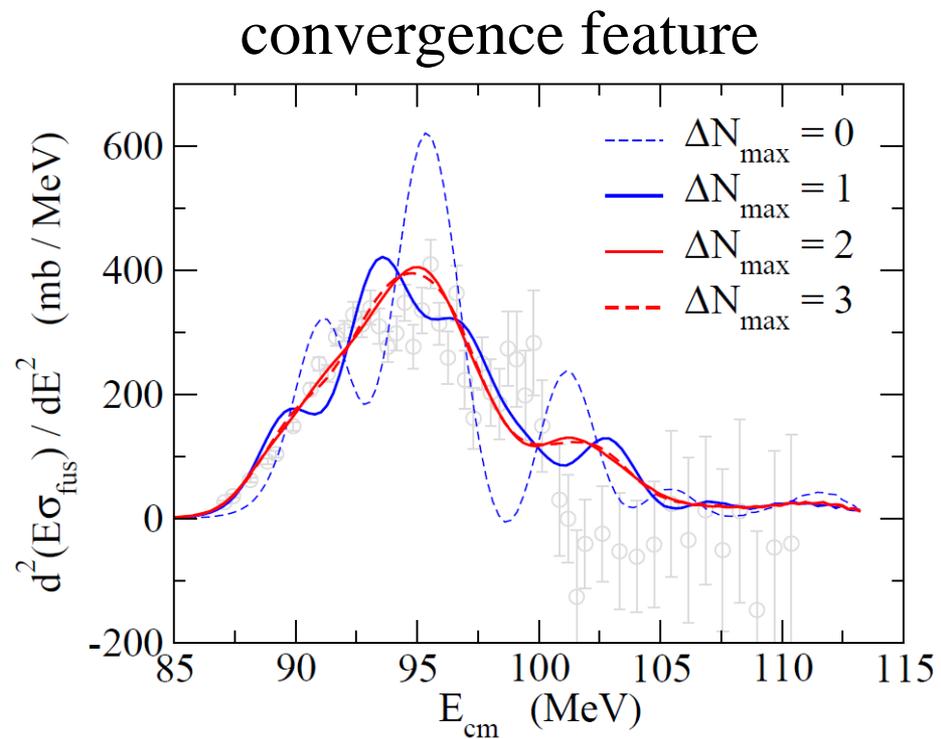
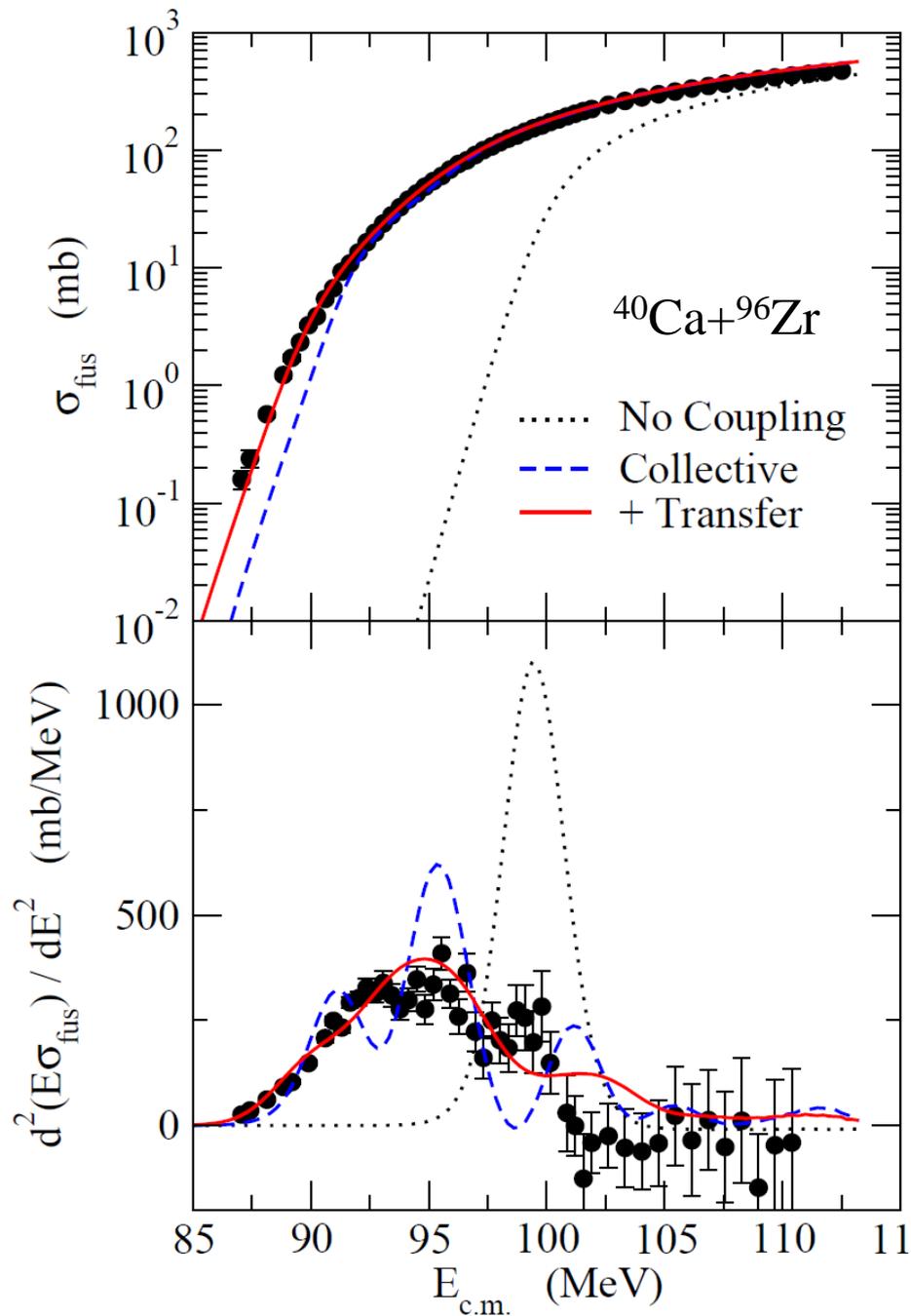
$$V \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots \\ 1 & 0 & 1 & \cdots \\ 0 & 1 & 0 & \cdots \\ \cdots & & & \end{pmatrix}$$

対角化

固有値 λ_α
固有ベクトル $|\lambda_\alpha\rangle$

$$w_\alpha = |\langle 1 | \lambda_\alpha \rangle|^2$$

1つのみの調整パラメーター: V を含んだ模型



まとめ

クーロン障壁近傍における重イオン核融合反応

- ✓核反応と核構造の強いつながり
- ✓種々の内部自由度を持つ系の量子トンネル現象

残された課題

- ✓多粒子系のトンネル現象をどのように理解する?
 - 関連した話題: 核分裂、 α 崩壊、2陽子放出崩壊
大振幅集団運動
- ✓非集団励起の効果?
 - 摩擦、散逸
- ✓低エネルギー核融合反応の微視的理解?
 - 多核子移行反応
- ✓核融合反応と深部非弾性散乱の統一理論?
 - 超重核領域の核融合反応