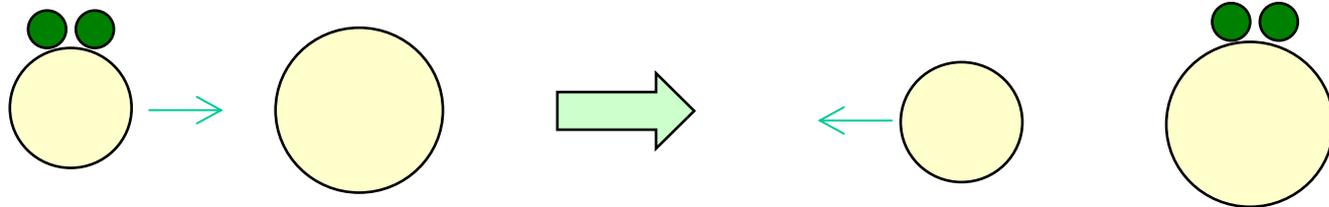


対相関と対移行反応

萩野浩一

京都大学大学院理学研究科

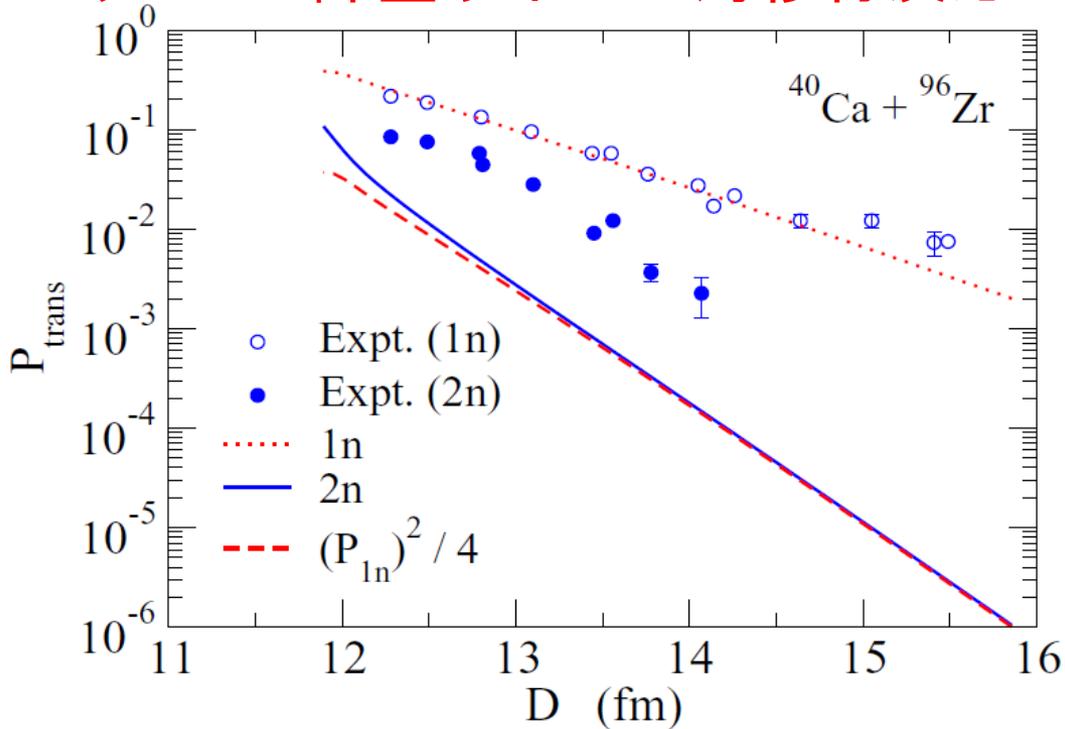


対移行反応で対相関をどのようにプローブできるのか？

1. 対移行反応概観
2. 対相関(対凝縮)の情報をどう引き出すのか？
3. 1次元3体模型を用いた計算
4. まとめ

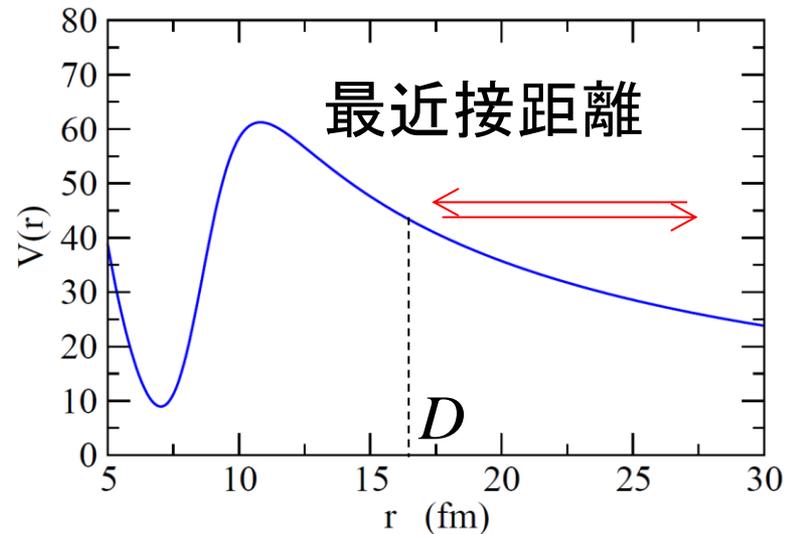
対移行反応と対相関

クーロン障壁以下での対移行反応



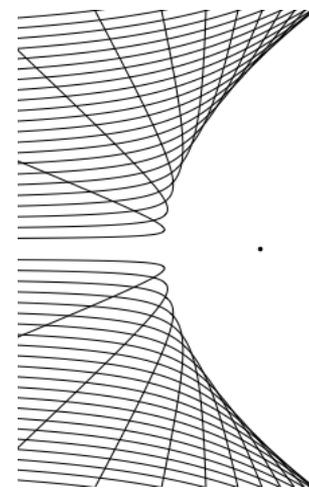
1n transfer: $40\text{Ca} + 96\text{Zr} \rightarrow 41\text{Ca} + 95\text{Zr}$

2n transfer: $40\text{Ca} + 96\text{Zr} \rightarrow 42\text{Ca} + 94\text{Zr}$



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

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

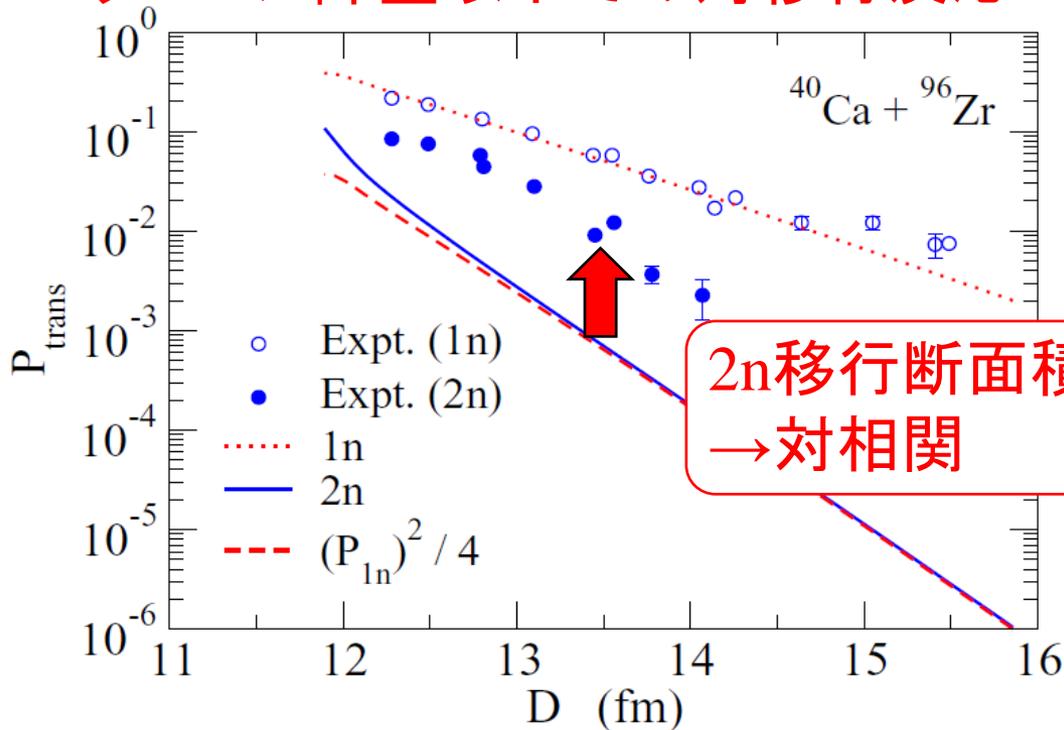


計算: K.Hagino and G. Scamps, PRC92 ('15) 064602

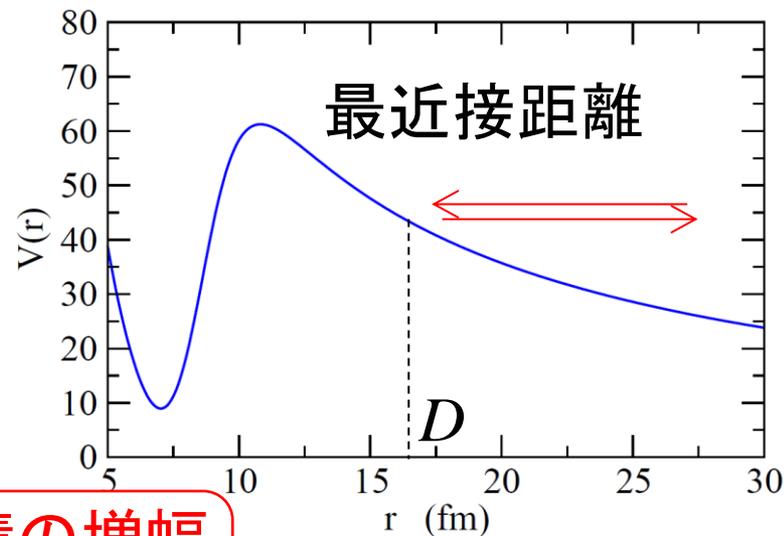
実験: L. Corradi et al., PRC84 ('11) 034603

対移行反応と対相関

クーロン障壁以下での対移行反応



2n移行断面積の増幅
→ 対相関



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

1n transfer: $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{41}\text{Ca} + ^{95}\text{Zr}$

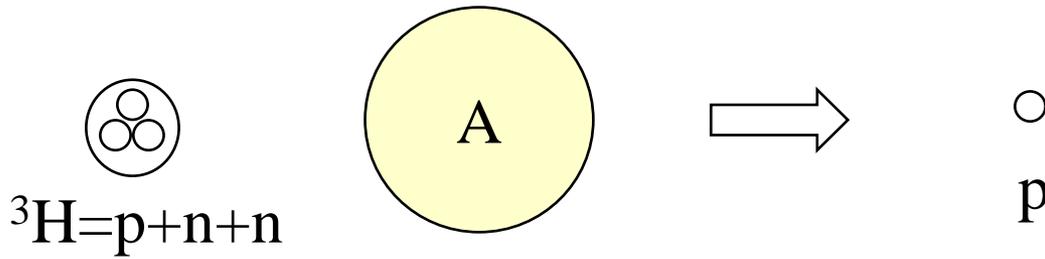
2n transfer: $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{42}\text{Ca} + ^{94}\text{Zr}$

計算: K.Hagino and G. Scamps, PRC92 ('15) 064602

実験: L. Corradi et al., PRC84 ('11) 034603

(t,p)及び (p,t) 反応に対する one-step DWBAによる見積もり

吉田思郎さん



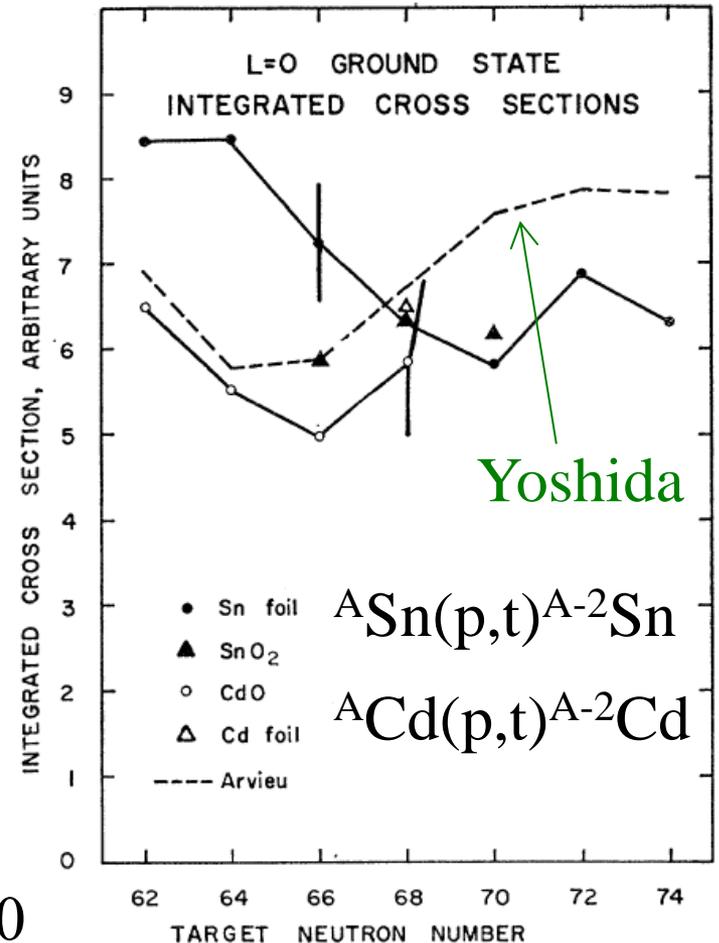
$$\frac{\sigma(\text{BCS} \rightarrow \text{BCS})}{\sigma_{\text{sp}}} = \frac{1}{j + 1/2} \left(\frac{\Delta}{G} \right)^2$$

S. Yoshida, Nucl. Phys. 33 ('62) 685

(例えば)

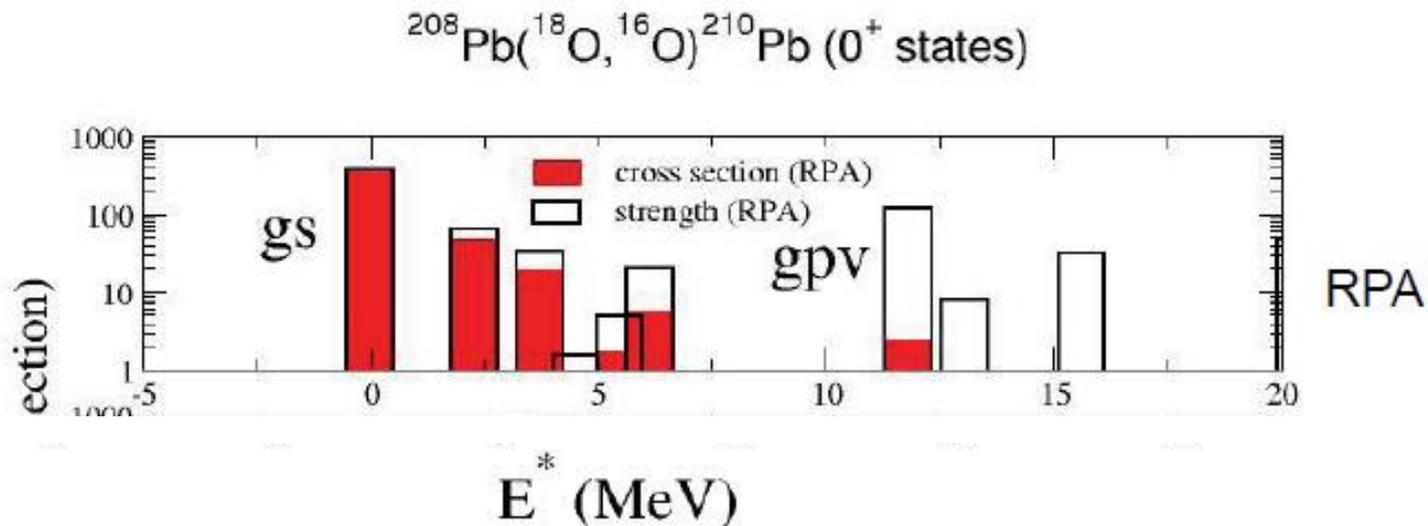
$\Delta \sim 1 \text{ MeV}$, $G \sim 0.15 \text{ MeV}$, $j = 5/2$ とすると
15倍程度の増幅

G. Bassani et al.,
Phys. Rev. 139 ('65) B830



対移行反応と対相関

対移行反応：反応機構が複雑で、対移行断面積から対相関の情報を引き出すのはそれほど単純ではない



Andrea Vitturi
(1949-2024)

白：対追加強度

$$S = |\langle ^{210}\text{Pb} | \psi^\dagger \psi^\dagger | ^{208}\text{Pb} \rangle|^2$$

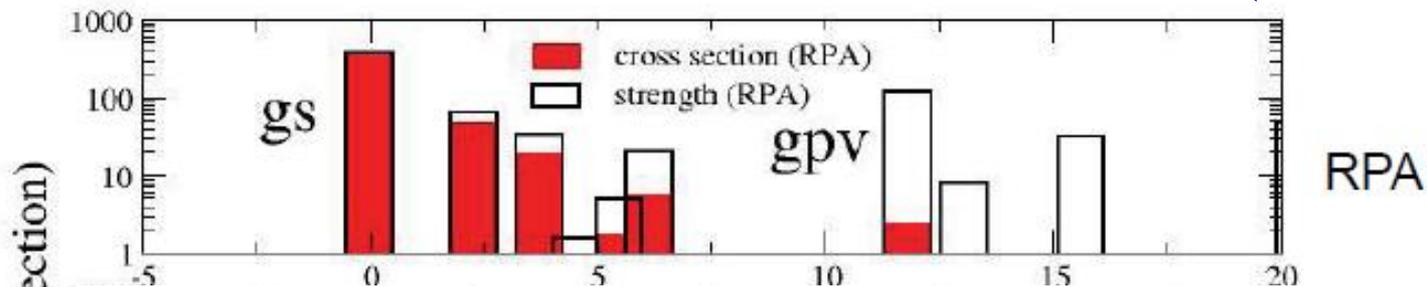
A. Vitturi and H.M. Sofia,
PTP Suppl. 196 ('12) 72

赤：対移行断面積

強度が大きくても断面積が大きいわけではない
→ 反応ダイナミックスのため (Q値マッチングなど)

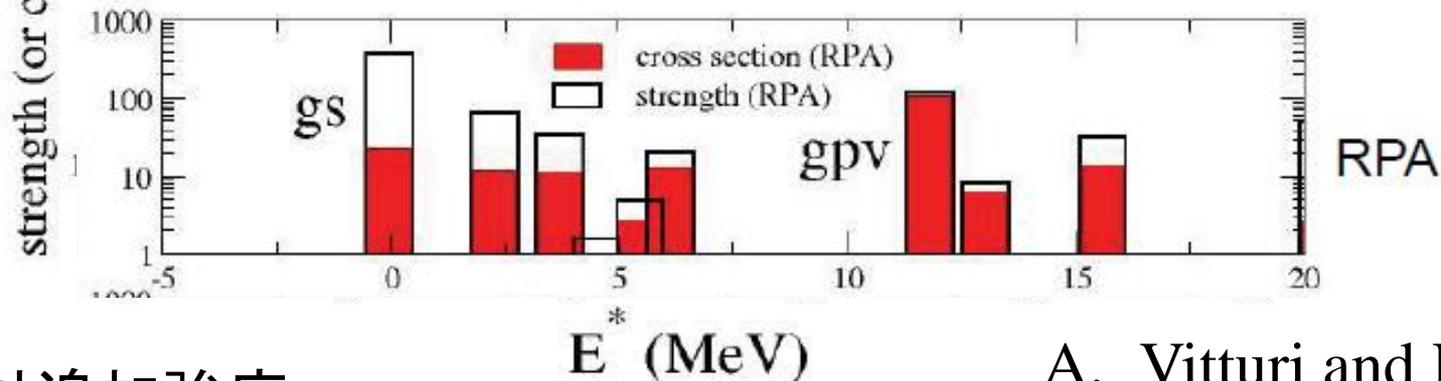
$^{208}\text{Pb}(^{18}\text{O}, ^{16}\text{O})^{210}\text{Pb} (0^+ \text{ states})$

$^{208}\text{Pb} (^{18}\text{O}, ^{16}\text{O})^{210}\text{Pb} (0^+)$



$^{208}\text{Pb}(^6\text{He}, ^4\text{He})^{210}\text{Pb} (0^+ \text{ states})$

$^{208}\text{Pb} (^6\text{He}, ^4\text{He})^{210}\text{Pb} (0^+)$



白: 対追加強度

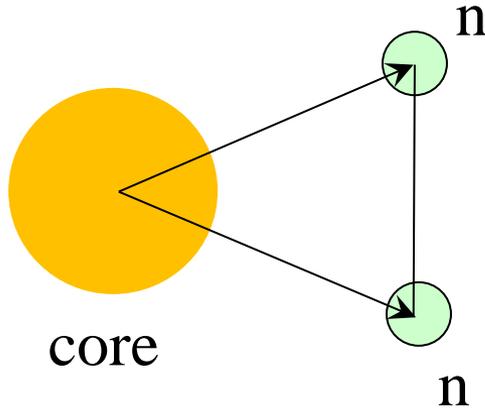
$$S = |\langle ^{210}\text{Pb} | \psi^\dagger \psi^\dagger | ^{208}\text{Pb} \rangle|^2$$

赤: 対移行断面積

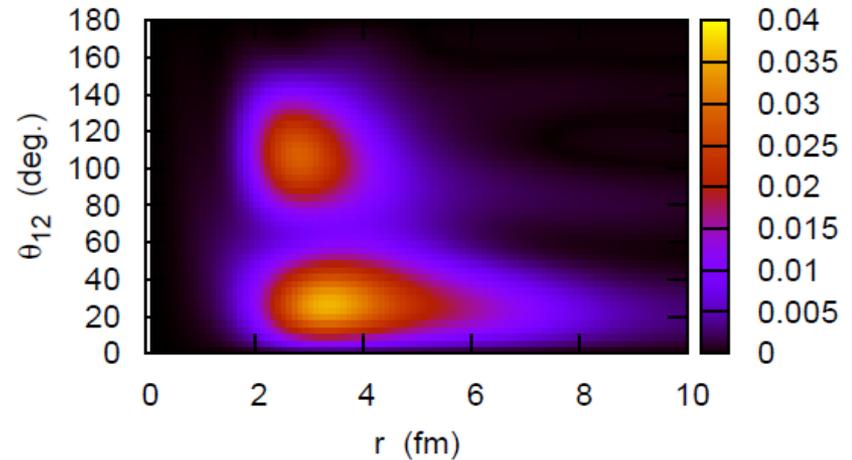
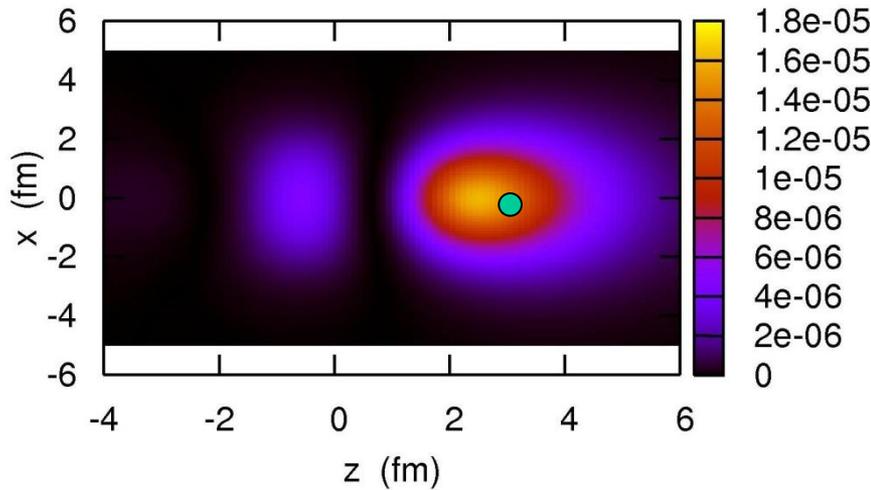
A. Vitturi and H.M. Sofia,
PTP Suppl. 196 ('12) 72

強度が大きくても断面積が大きいわけではない
→ 反応ダイナミックスのため (Q値マッチングなど)

更に考慮しなければならない点: 対移行反応とダイニュートロン相関

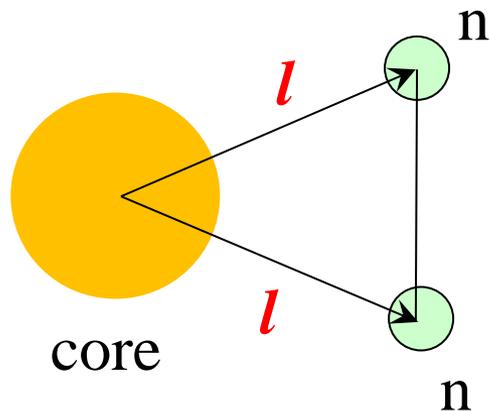


2中性子の空間的な相関
「ダイニュートロン相関」



更に考慮しなければならない点: 対移行反応とダイニュートロン相関

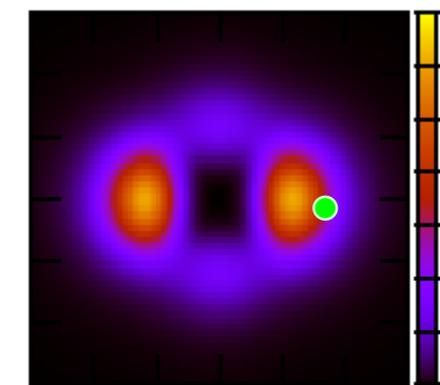
$$^{18}\text{O} = ^{16}\text{O} + n + n \rightarrow \rho_2(\mathbf{r}) = |\Psi_{\text{g.s.}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')|_{\mathbf{r}'=z_0}^2$$



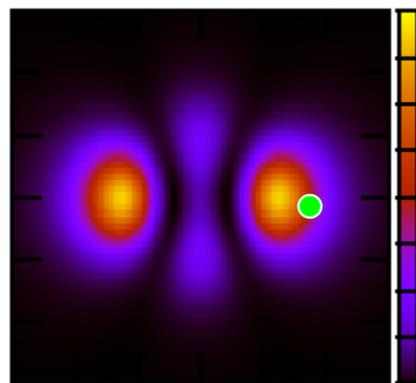
single- l

multi- l , but
even l only

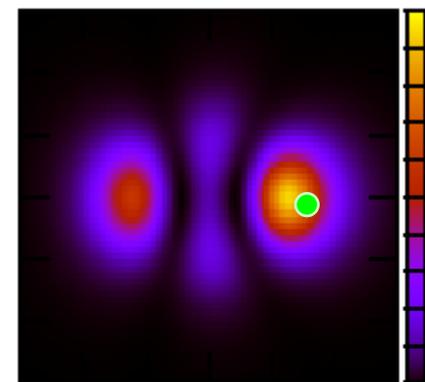
multi- l ,
both even and odd l



-6 -4 -2 0 2 4 6
z (fm)

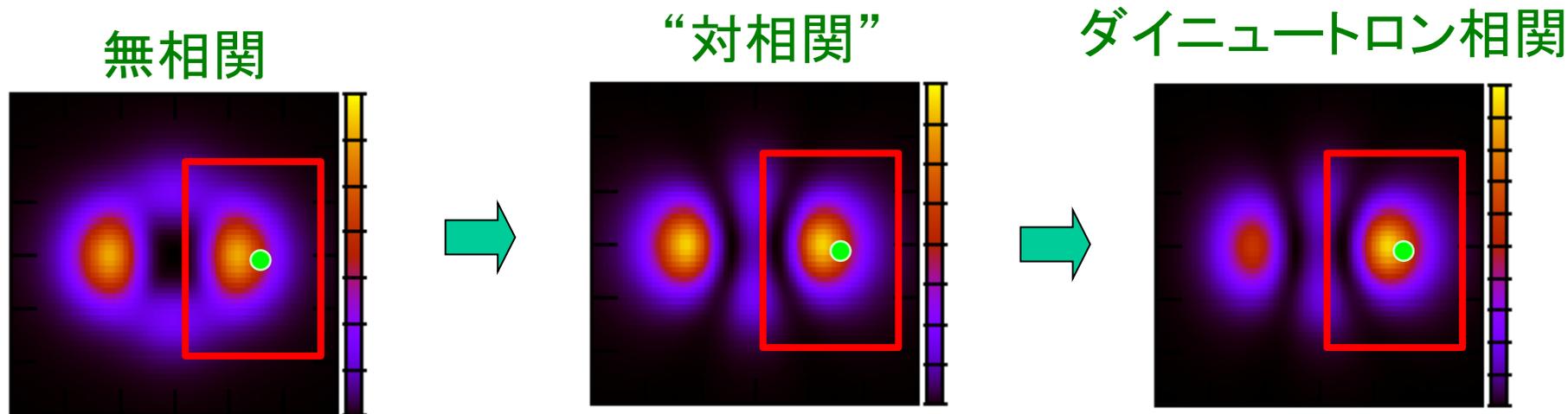


-6 -4 -2 0 2 4 6



-6 -4 -2 0 2 4 6
z (fm)

更に考慮しなければならない点: 対移行反応とダイニュートロン相関



赤い四角: 対移行反応でプローブする領域だとすると

→ 対移行は「無相関」と「“対相関”」は区別するが、
「“対相関”」と「ダイニュートロン相関」は区別しない(かも?)

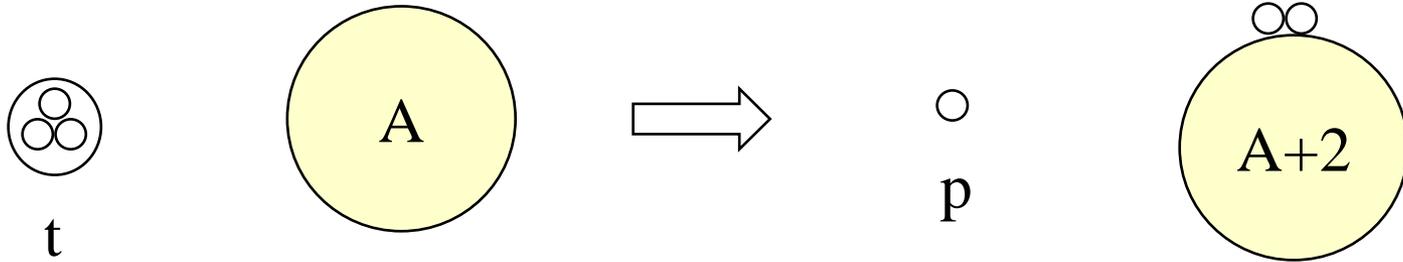
cf. A. Insolia, R.J. Liotta, and E. Maglione,
J. of Phhys. G15 ('89) 1249

→ 新たな視点での研究が必要(これからの課題)

cf. (^4He , ^6He) 反応 @ OEDO

また更に考慮しなければならない点

そもそも、1ステップの対移行がメインではない



注意事項

- * 1ステップ、2ステップというのは摂動論に立脚した用語
- * 各プロセスの重要性は post form か prior form にかによっても違う可能性がある

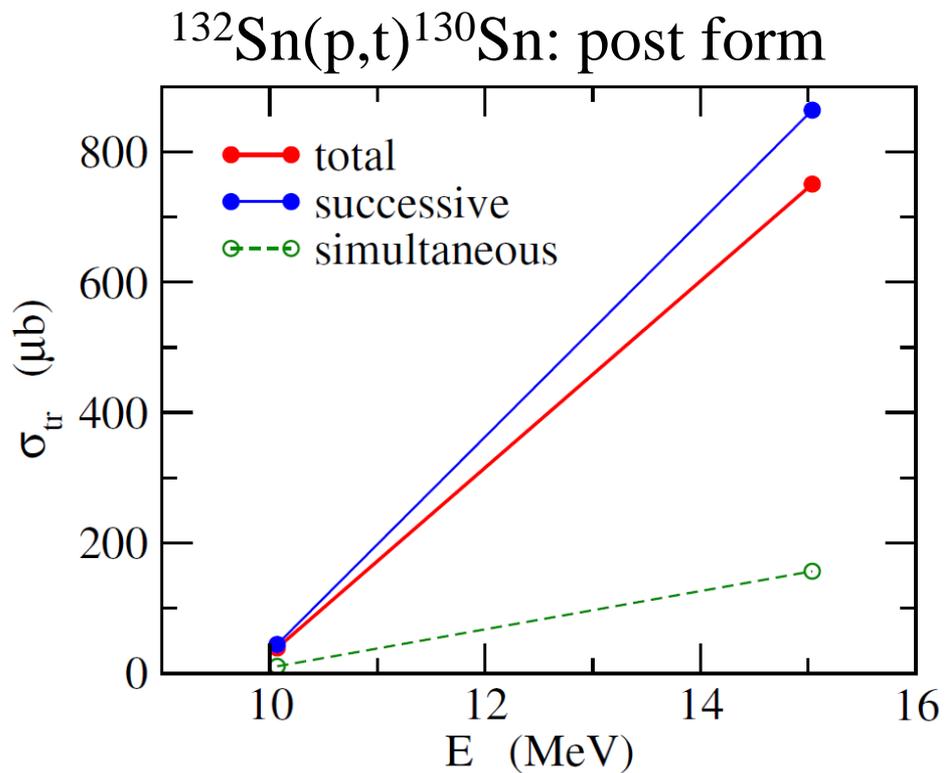
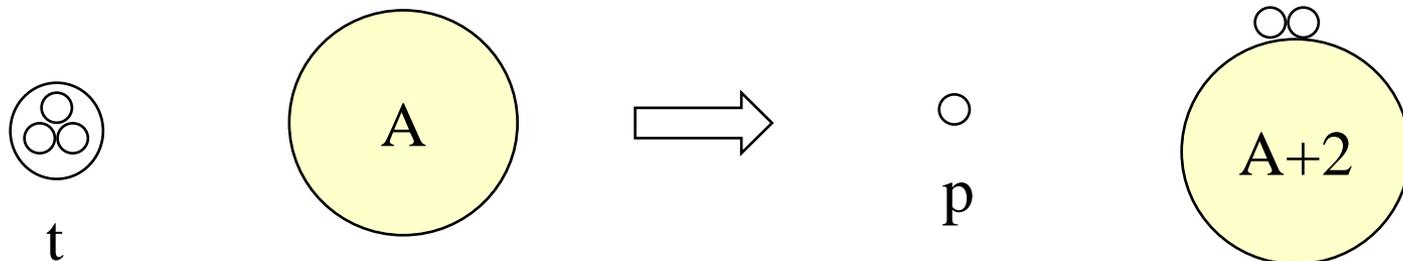
$$h = \underline{t} + \underline{V_T(r)} + \underline{V_P(r)}$$

Broglia et al.,

$$\begin{aligned} a_{tr} &= a_{sim} + a_{succ} + a_{non-orthog} \sim a_{succ} \\ &= \tilde{a}_{sim} + \tilde{a}_{succ} + \tilde{a}_{non-orthog} \end{aligned}$$

また更に考慮しなければならない点

そもそも、1ステップの対移行がメインではない

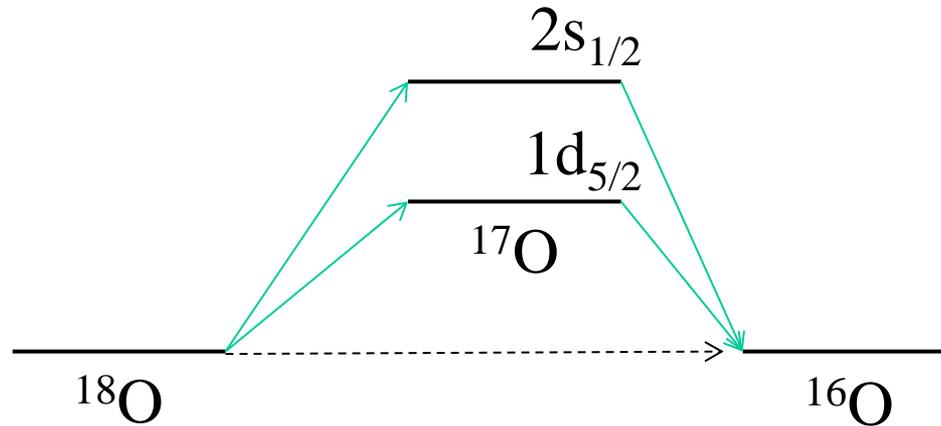


G. Potel et al.,
PRL107, 092501 (2011).

また更に考慮しなければならない点

そもそも、1ステップの対移行がメインではない

→メインプロセスは連続的1粒子移行反応



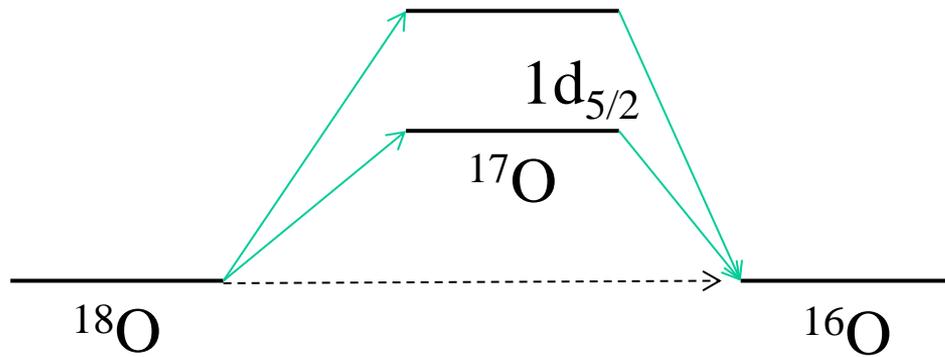
$$0.8 (1d_{5/2})^2 \\ + 0.6 (2s_{1/2})^2$$

対相関→複数の1粒子移行プロセスのコヒーレントな重ね合わせ

* 実際には、相手側の原子核の超流動性も考慮しなければならない

入射エネルギー依存性?

中性子過剰核を用いた対移行反応

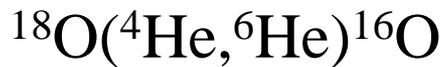


中性子過剰核を用いると、
中間状態(の多くが)非束縛

反応機構はどう変わる?

→ これからの課題

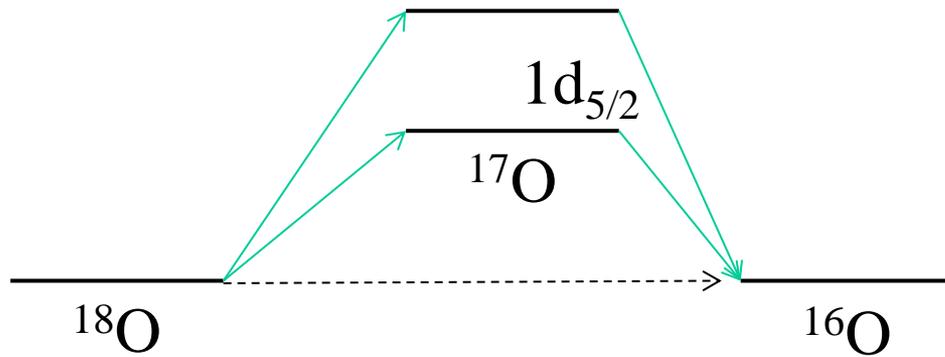
G. Singh, L. Fortunato, and A. Vitturi, PLB834, 137413 ('22)



Case	Δ (MeV)	$E_l=21$ MeV				σ_{1n}
		$-g$	σ_{2n}	σ_{2n} (u)	$\sigma_{2n}/\sigma_{2n}(u)$	
$S_n = 0.1$ MeV	0.775	1037	6.95	6.89	1.01	3.28
Continuum	2.356	10430	0.94	0.51	1.84	2.08

$E_l=100$ MeV					σ_{1n}
$-g$	σ_{2n}	σ_{2n} (u)	$\sigma_{2n}/\sigma_{2n}(u)$		
992	147	125	1.18	2.21	
7827	44	8.6	5.12	5.95	

中性子過剰核を用いた対移行反応

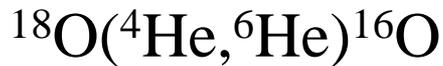


中性子過剰核を用いると、
中間状態(の多くが)非束縛

反応機構はどう変わる?

→ これからの課題

G. Singh, L. Fortunato, and A. Vitturi, PLB834, 137413 ('22)



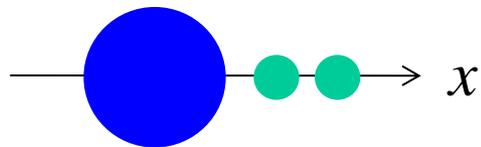
Case	Δ (MeV)	$E_l=21$ MeV				σ_{1n}
		$-g$	σ_{2n}	σ_{2n} (u)	$\sigma_{2n}/\sigma_{2n}(u)$	
$S_n = 0.1$ MeV	0.775	1037	6.95	6.89	1.01	3.28
Continuum	2.356	10430	0.94	0.51	1.84	2.08

cf. $^6\text{He} + ^{65}\text{Cu}$ (GANIL) の実験

$1n$ 移行に比べて $2n$ 移行が主 (安定核とは逆)

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

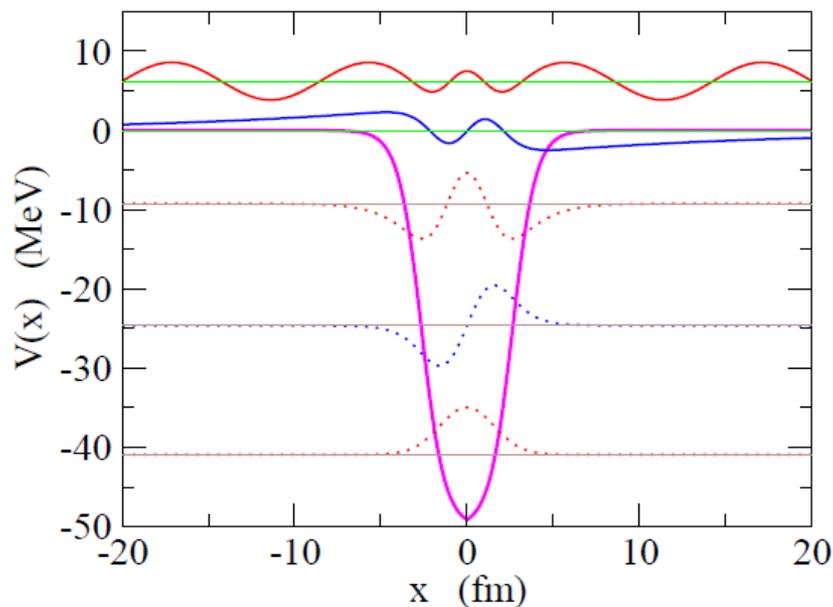
1次元3体模型による対移行反応



K.H., A. Vitturi, F. Perez-Bernal,
and H. Sagawa,
J. of Phys. G38 ('11) 015105
に基づく計算



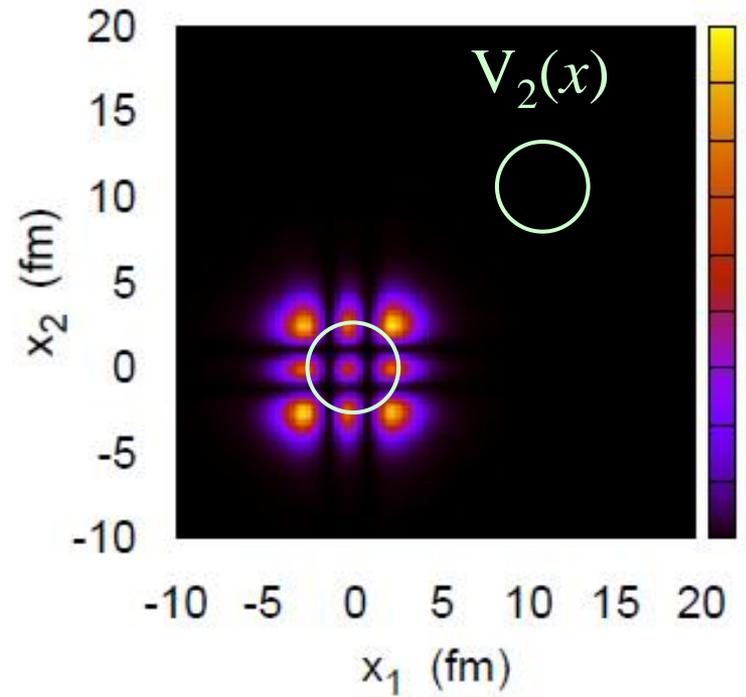
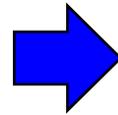
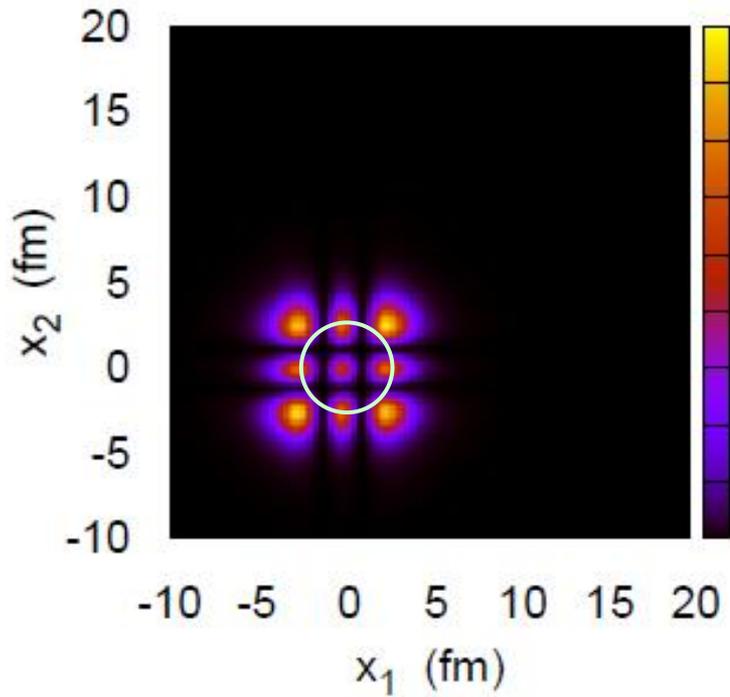
$$H = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + V(x_1) - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + V(x_2) + v_{nn}(x_1, x_2)$$



$$v_{nn}(x_1, x_2) = -g \left(\frac{V(\bar{x})}{V_0} \right) \delta(x_1 - x_2)$$

原子核内部でのみ対相関
がはたらく

$$\rho(x_1, x_2) = |\Psi_{\text{gs}}(x_1, x_2)|^2$$



$$H_0 = \sum_i \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} + V_1(x_i) \right) + v_{nn}(x_1, x_2)$$

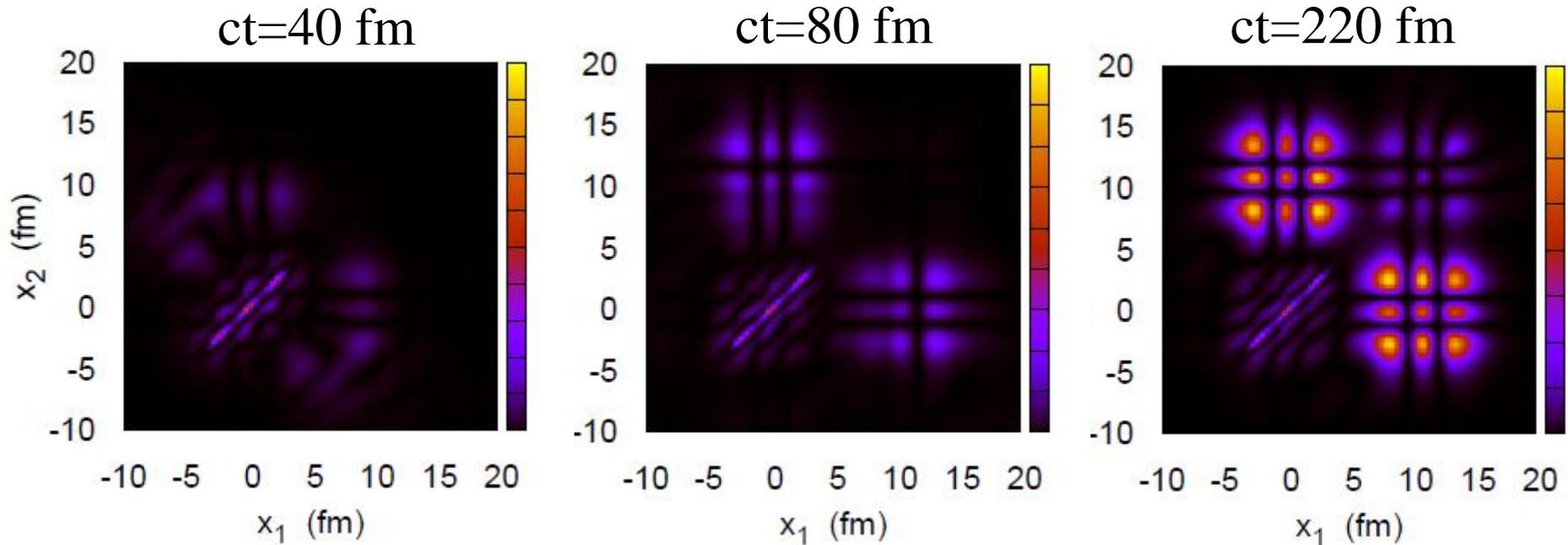
$$H = H_0 + \sum_i V_2(x_i)$$

→時間発展

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x_1, x_2, t) = H \Psi(x_1, x_2, t)$$

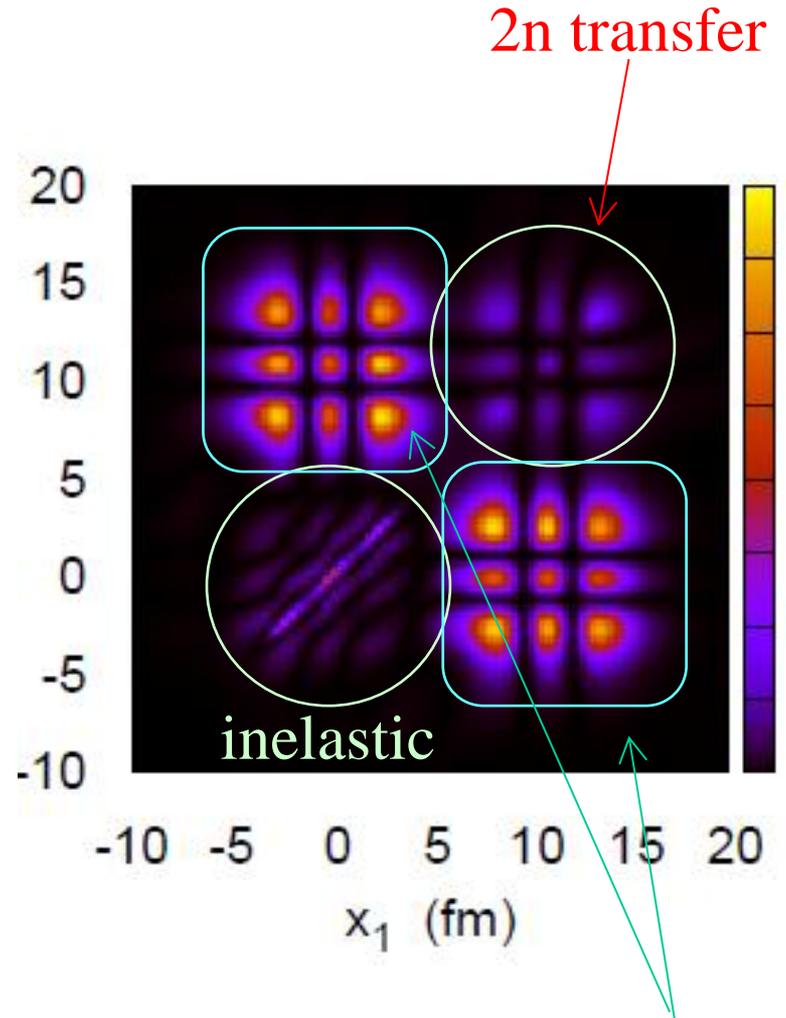
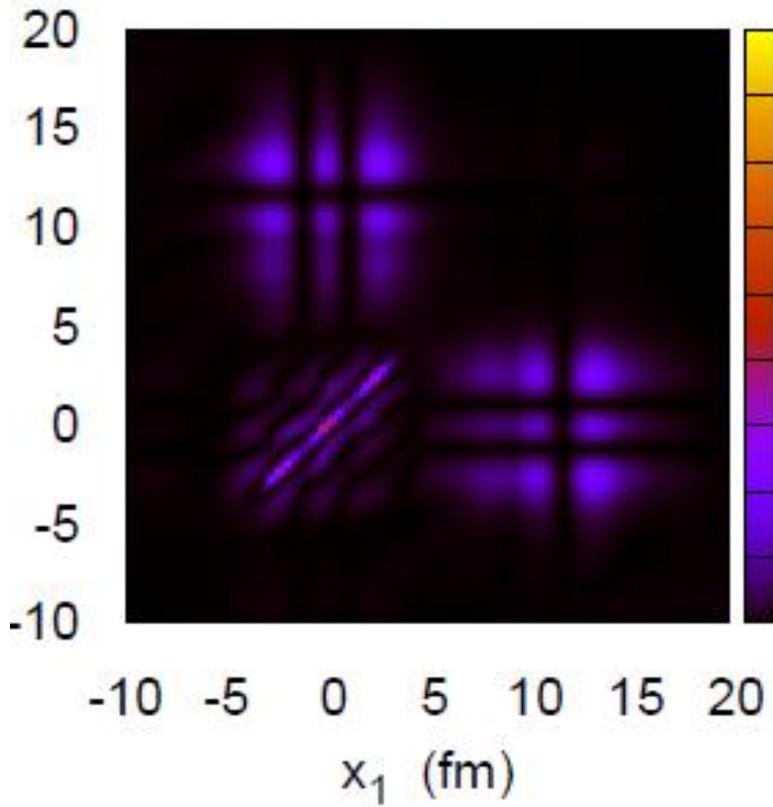
$$\Psi(x_1, x_2, t) = \alpha\Psi_{\text{gs}}(x_1, x_2) + \tilde{\Psi}(x_1, x_2, t)$$

$$\rightarrow \tilde{\rho}(x_1, x_2, t) = |\tilde{\Psi}(x_1, x_2, t)|^2$$



$$\Psi(x_1, x_2, t) = \alpha\Psi_{\text{gs}}(x_1, x_2) + \tilde{\Psi}(x_1, x_2, t)$$

$$\rightarrow \tilde{\rho}(x_1, x_2, t) = |\tilde{\Psi}(x_1, x_2, t)|^2$$

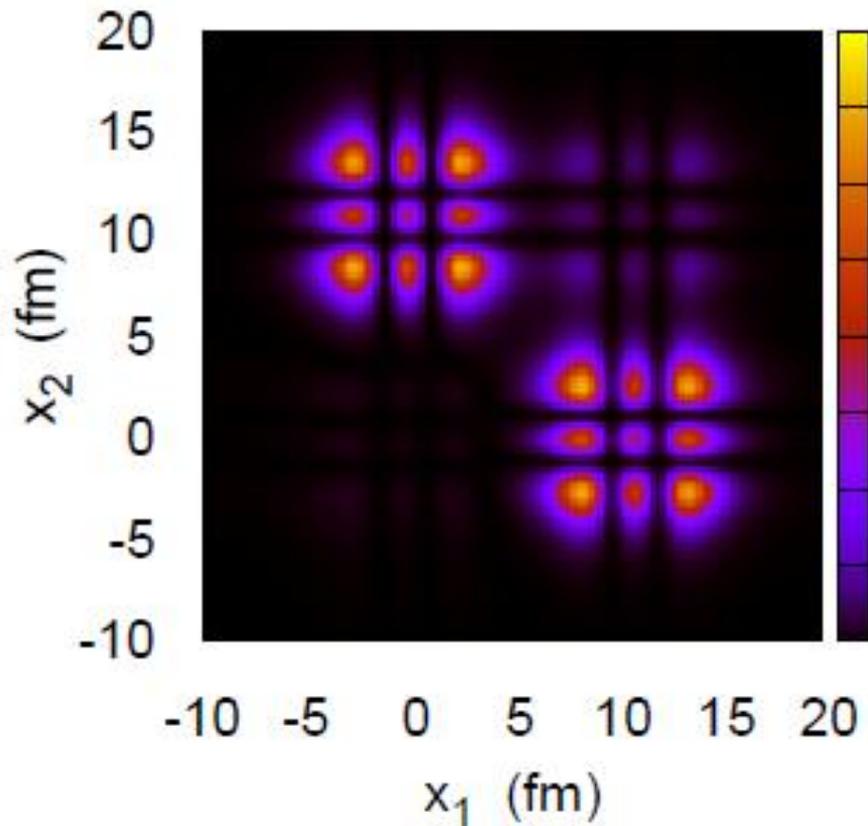


sequential がメインなプロセス

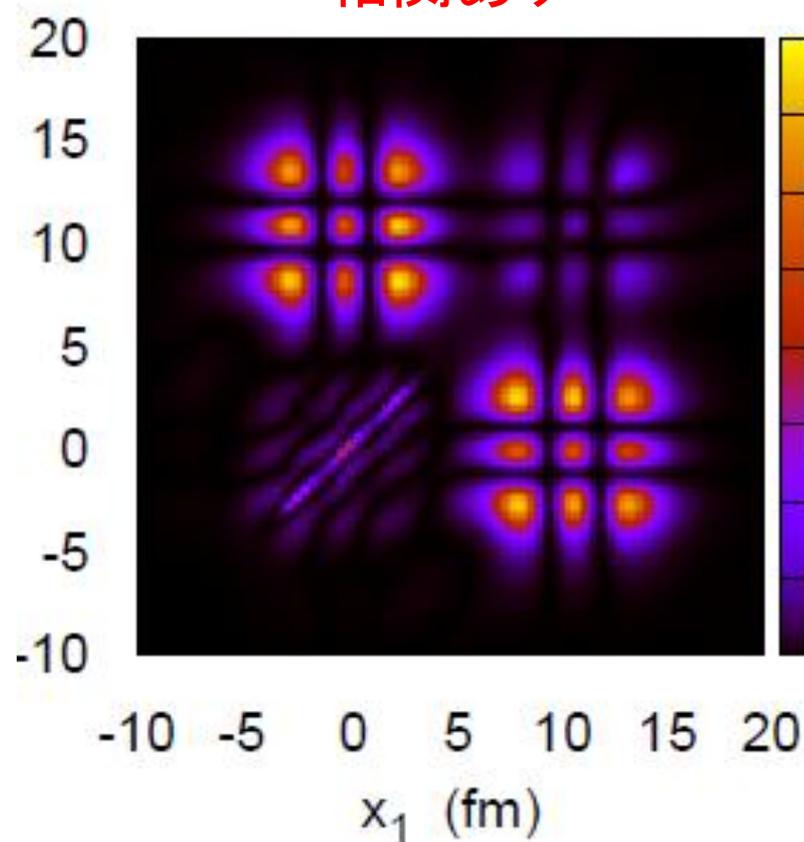
1n transfer

ct=220 fm

相関なし



相関あり

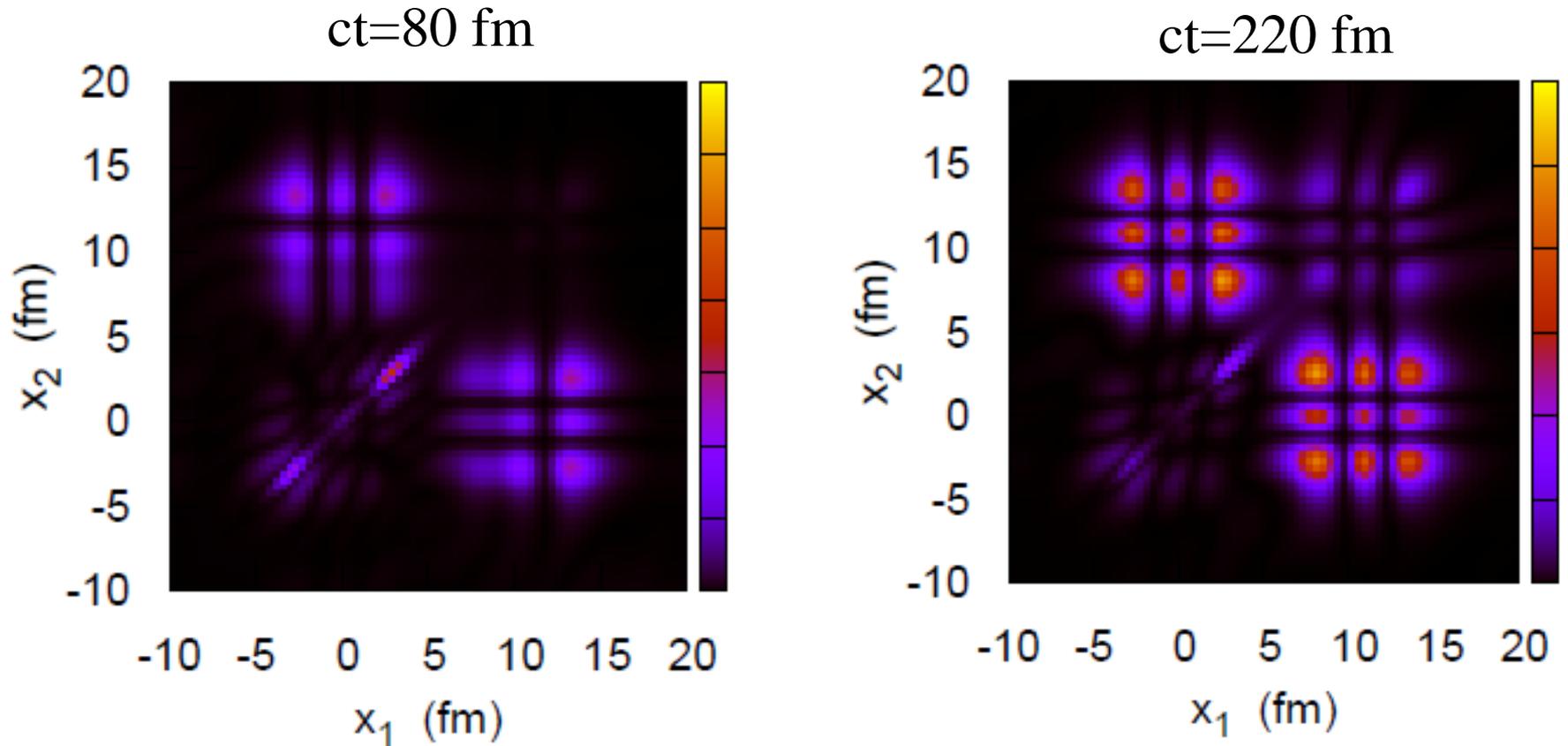


相関により、

- ・非弾性散乱
- ・2中性子移行反応

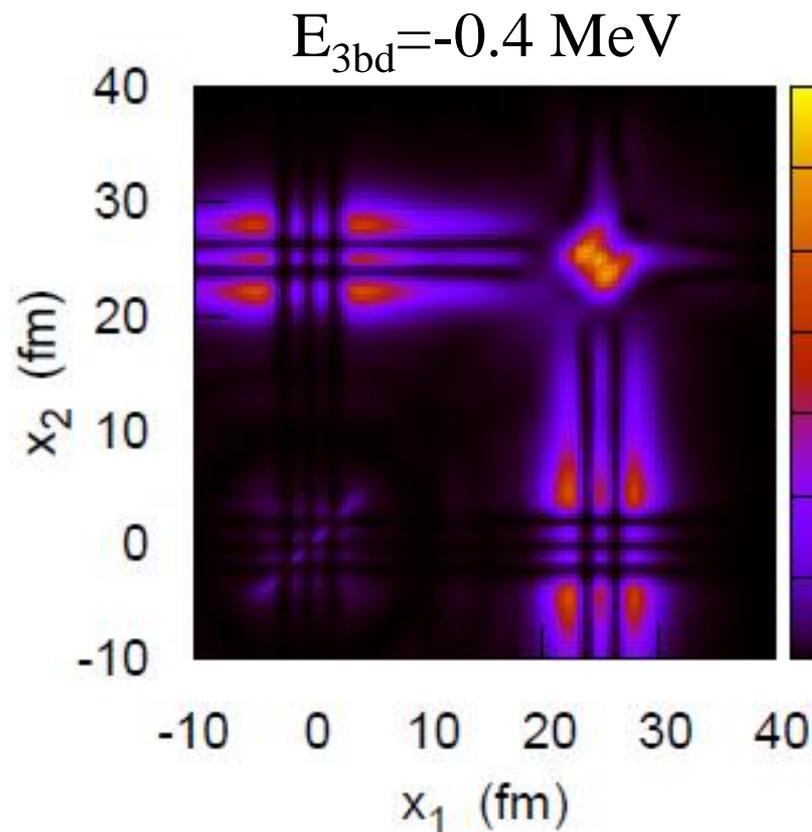
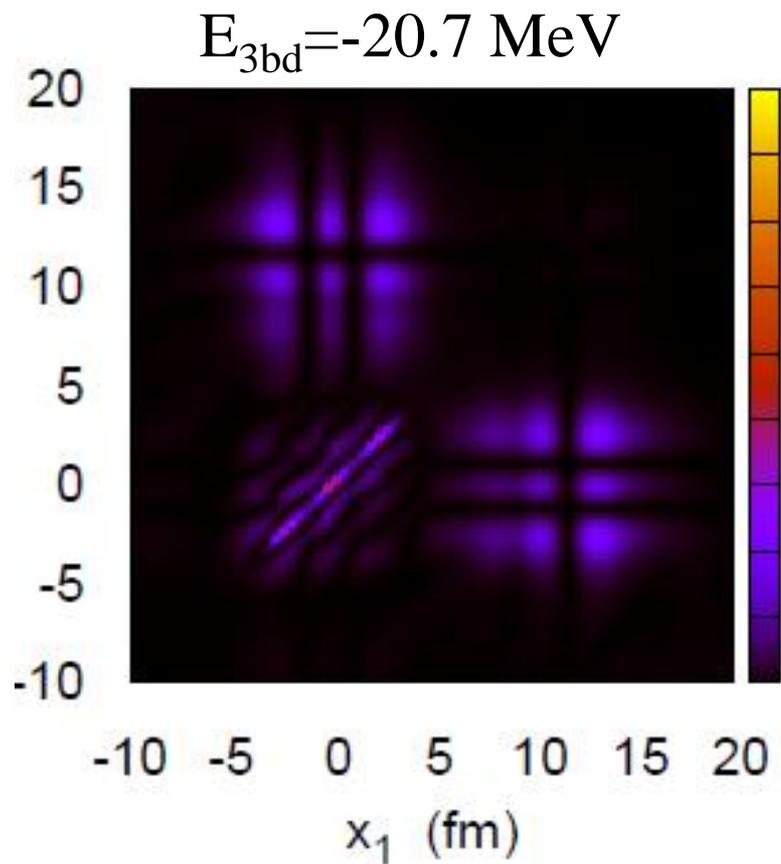
の確率が増大

□ 1次元3体模型で、核外でも2中性子が束縛している場合の計算



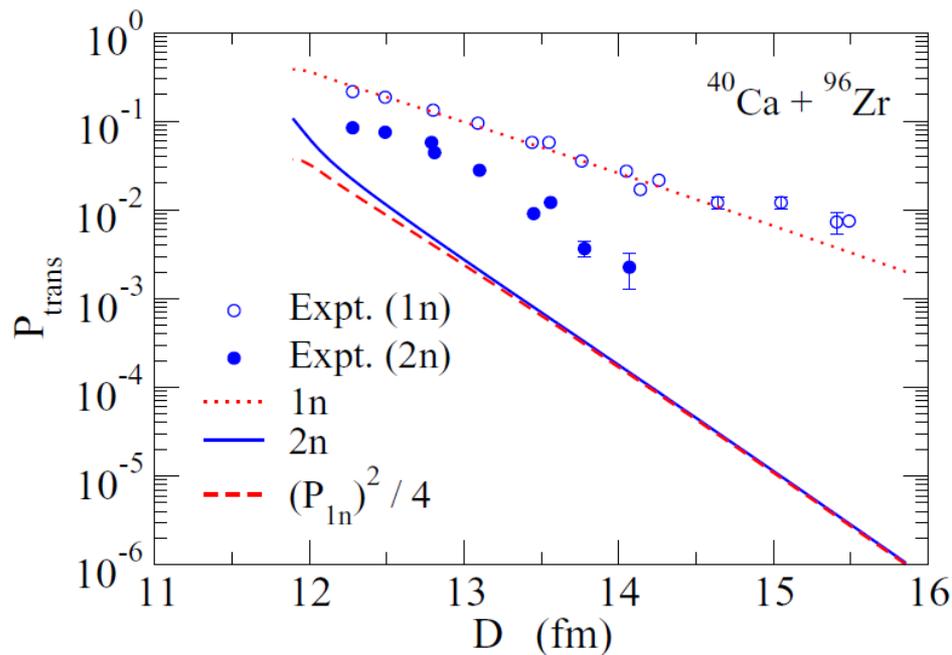
この場合でも、2ステップの寄与が大きい

ct=80 fm



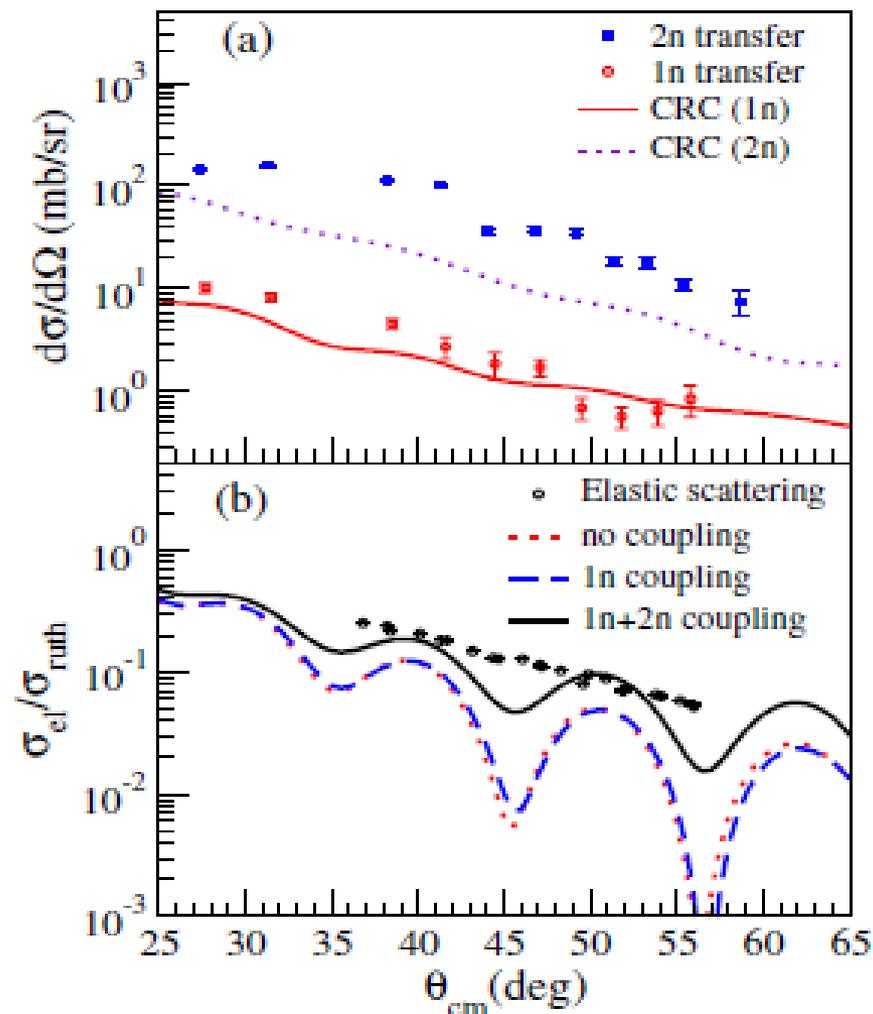
弱束縛になると $P_{2n} > P_{1n}$ (実験データと整合)

安定核の場合 ($^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$)



L. Corradi et al.,
PRC84 ('11) 034603

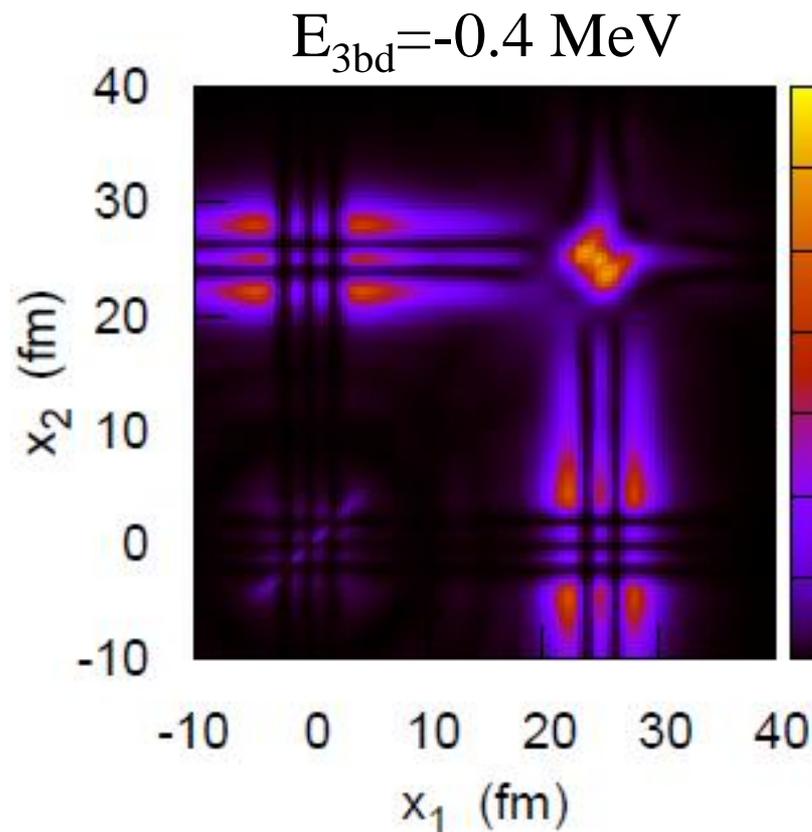
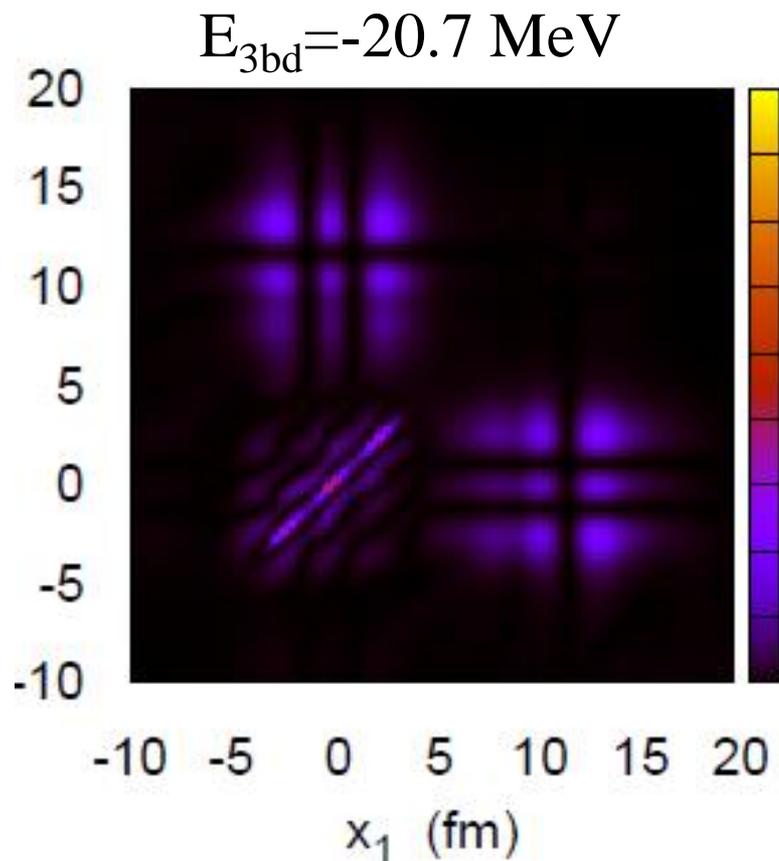
不安定核の場合 ($^6\text{He} + ^{65}\text{Cu}$)



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

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

ct=80 fm



弱束縛になると $P_{2n} > P_{1n}$ (実験データと整合)

時間依存アプローチ: 複雑な対移行反応を理解するための有効な手段

- 3次元化
- 2番目のWSポテンシャルを動かす

まとめ

➤ 2核子移行反応: 対相関に敏感

✓ ただし、反応機構が複雑で、対相関との関りは直接的ではない

➡ 今後の課題: どのように対凝縮の情報をクリアに引き出す？

➤ 反応機構 → 2ステップDWBA

- 中間状態の扱い方
- 特に、連続状態 ← 中性子過剰核

時間に依存するアプローチは有効かもしれない

1次元→3次元化が必要

反応機構は複雑: 中性子過剰核を見据えた
より系統的な研究が必要