

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



松尾さんの昨日のトーク:

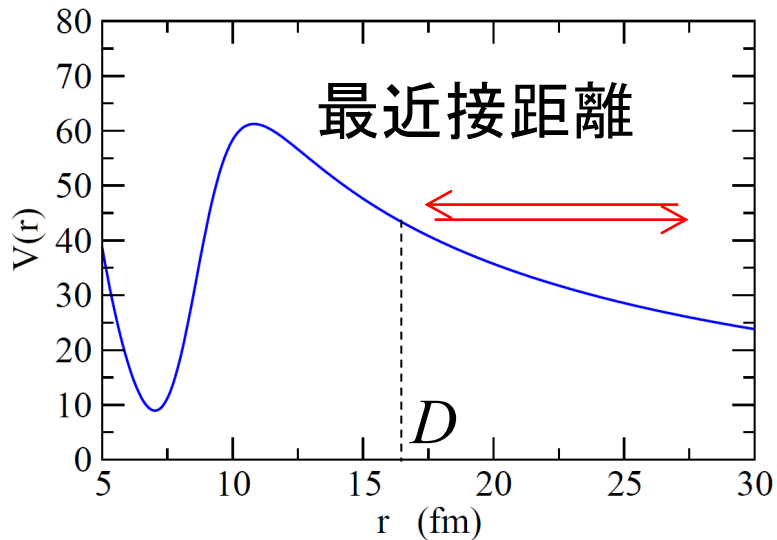
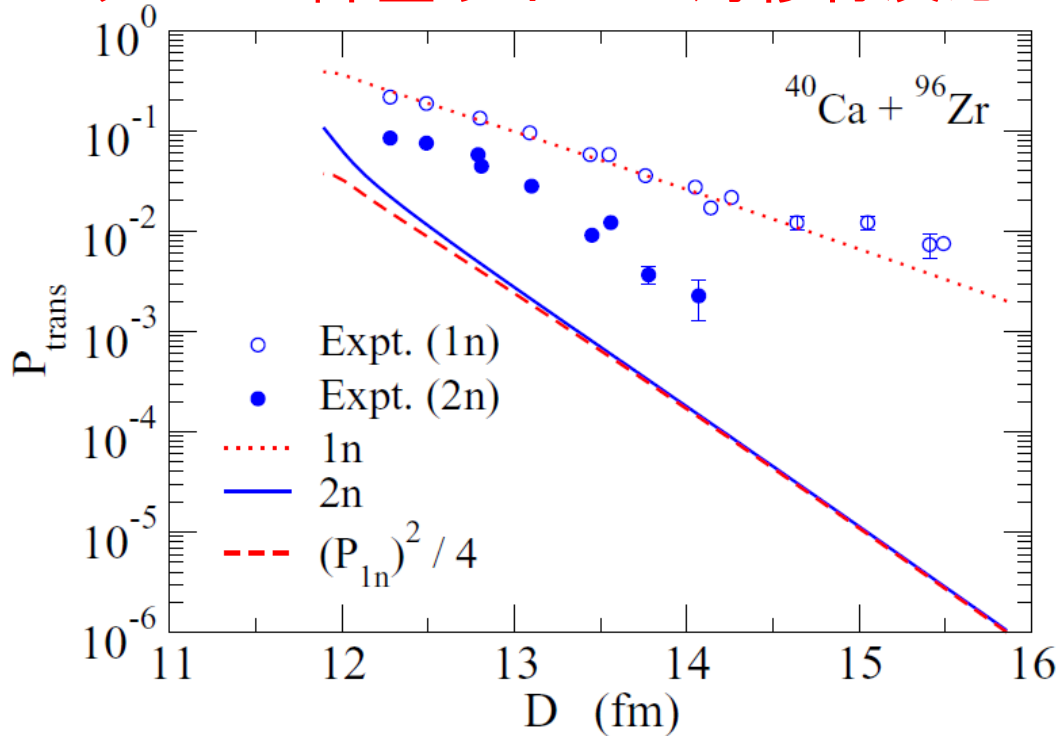
「対移行反応は対相関の直接的なプローブと認識されている。」

→核反応の観点からどのくらいそうなのか？

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. $T=1$ np^{-1} 相関と重陽子移行反応
5. 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



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

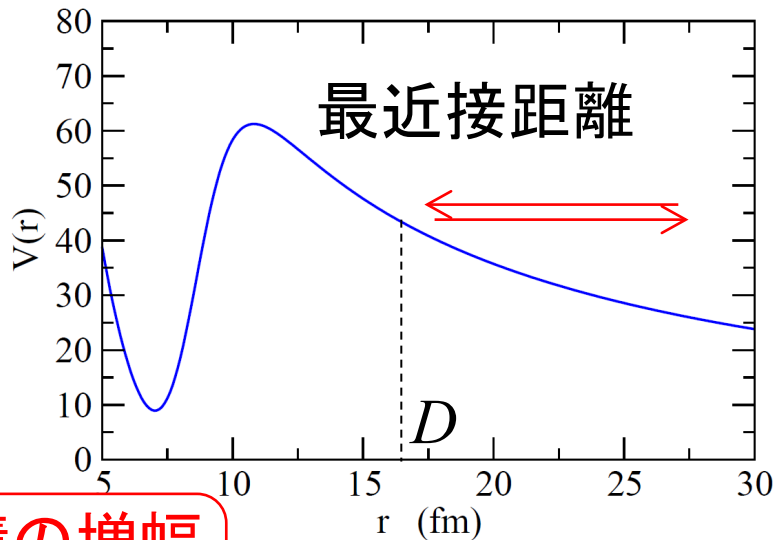
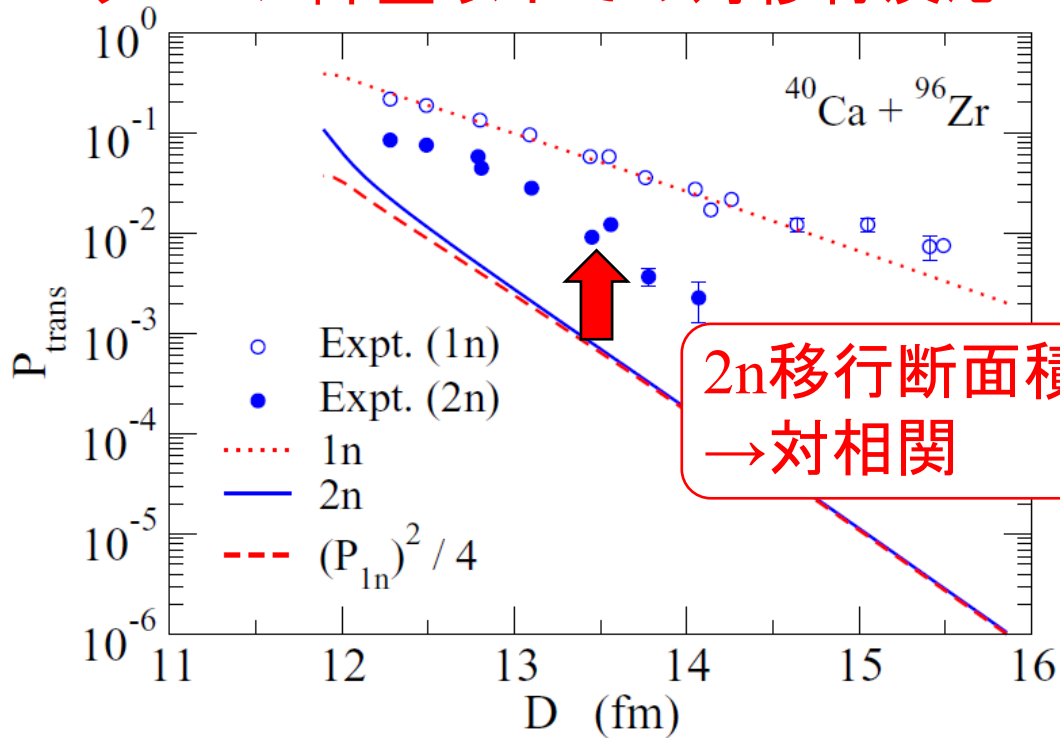
$$P_{\text{tr}} \sim \frac{d\sigma_{\text{tr}}}{d\sigma_R}$$

計算: K.H. 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



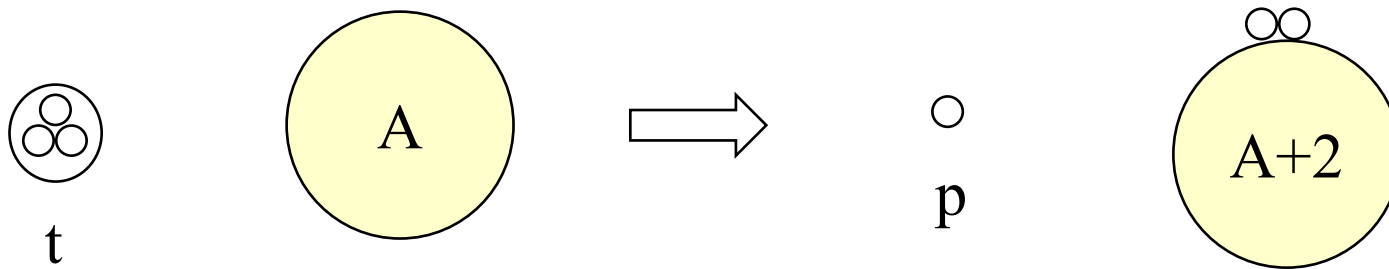
$$P_{\text{tr}} \sim \frac{d\sigma_{\text{tr}}}{d\sigma_R}$$

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

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

c.f. H. Shimoyama and M. Matsuo,
PRC88, 054308 (2013)

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

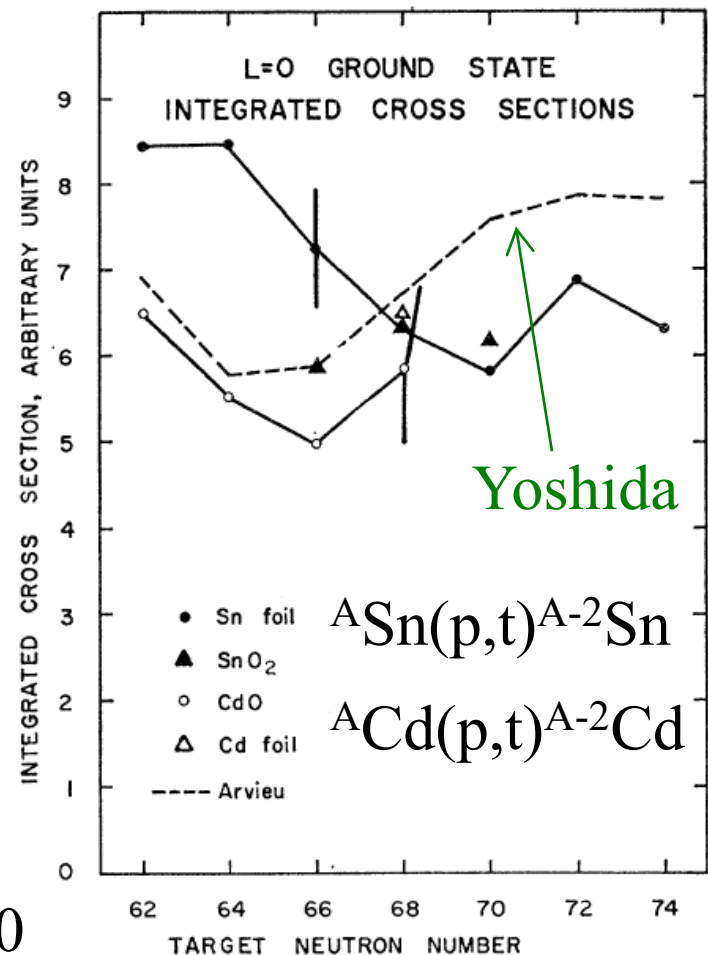


$$\frac{\sigma(\text{BCS} \rightarrow \text{BCS})}{\sigma_{\text{sp}}} = \frac{1}{j + 1/2} \left(\frac{\Delta}{G} \right)^2$$

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

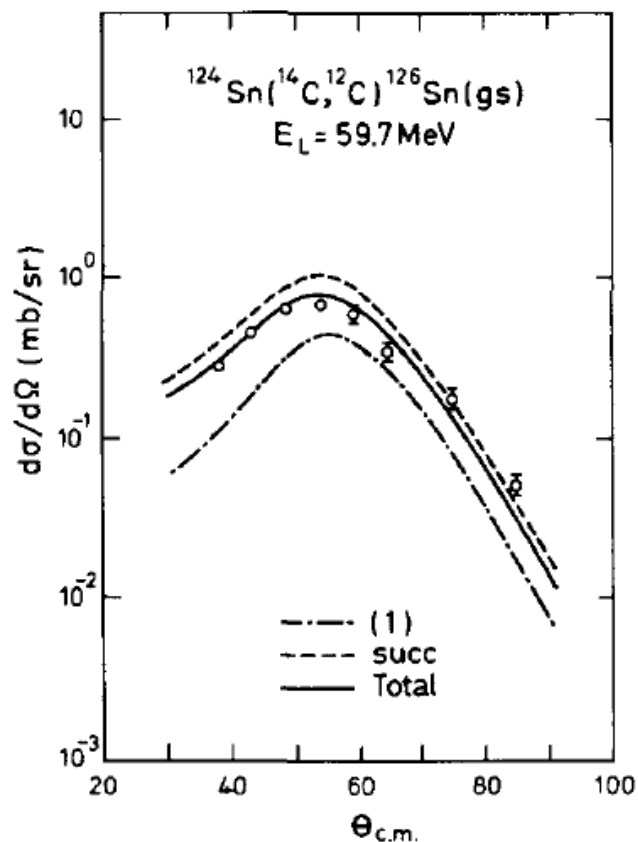
$\Delta \sim 1$ MeV, $G \sim 0.15$ MeV, $j = 5/2$ とすると
15倍程度の増幅

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

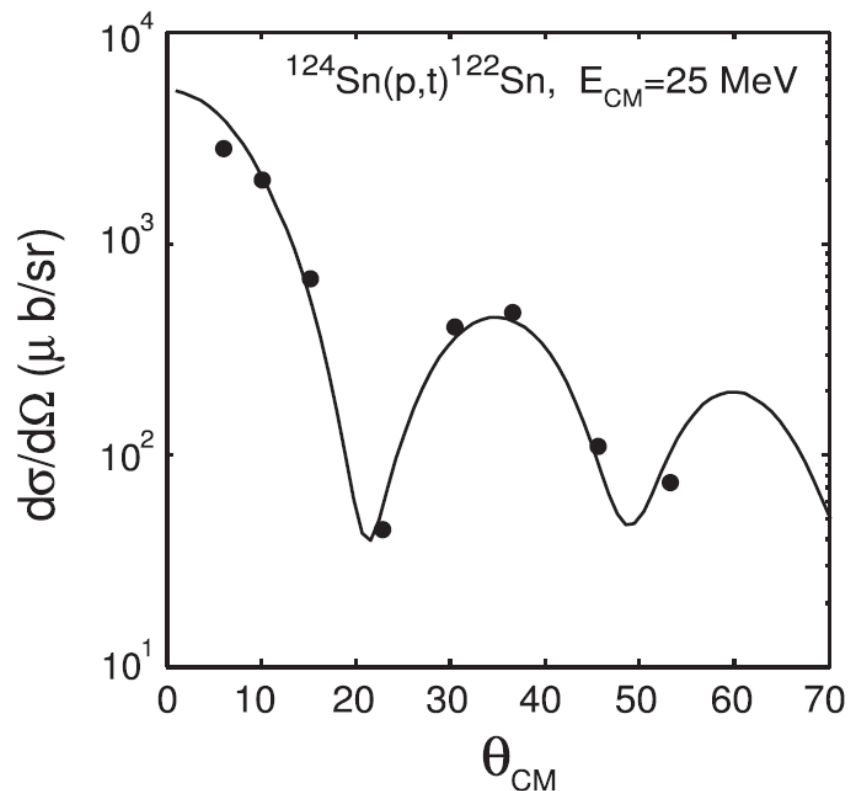


対移行反応と対相関

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



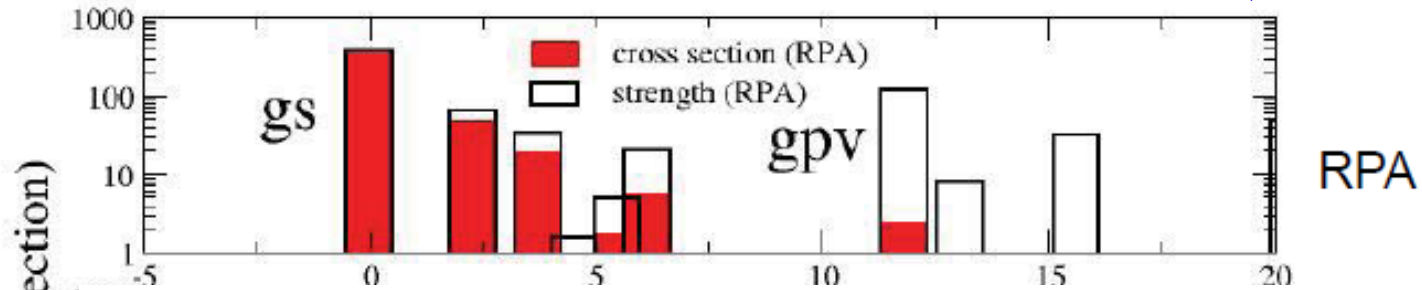
E. Maglione et al.,
Phys. Lett. 162B ('85) 59.



G. Potel et al.,
PRL 107 ('11) 092501

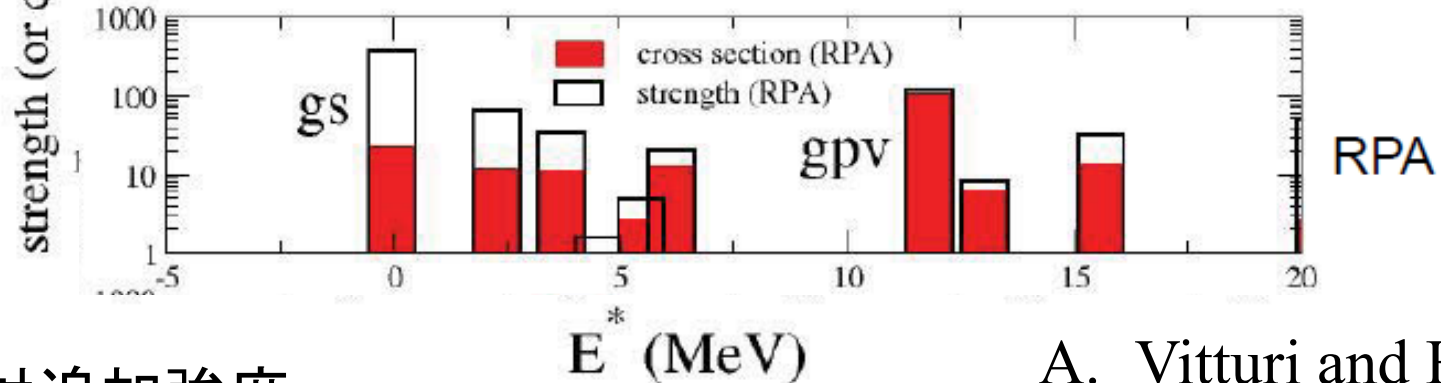
$^{208}\text{Pb}(^{18}\text{O}, ^{16}\text{O})^{210}\text{Pb} (0^+ \text{ states})$

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



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

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



白: 対追加強度

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

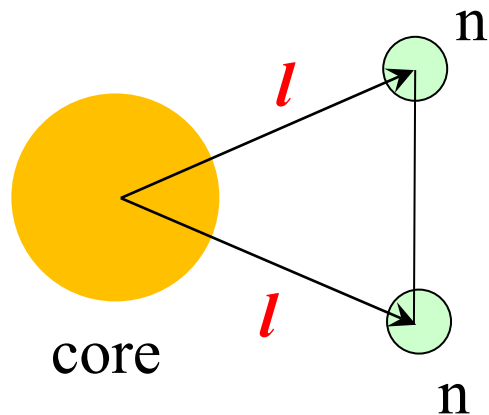
赤: 対移行断面積

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

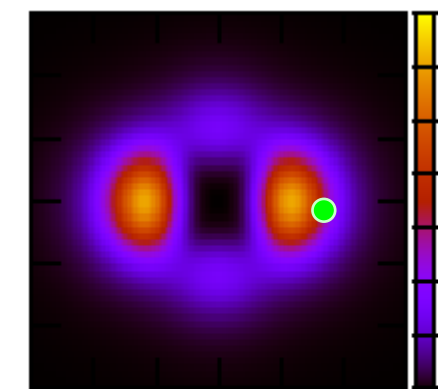
$$^{18}\text{O} = ^{16}\text{O} + n + n \rightarrow \rho_2(\mathbf{r}) = |\Psi_{\text{g.s.}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')|_{\mathbf{r}'=z_0}^2$$



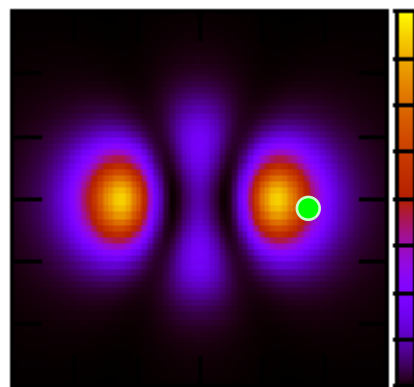
single- l

multi- l , but
even l only

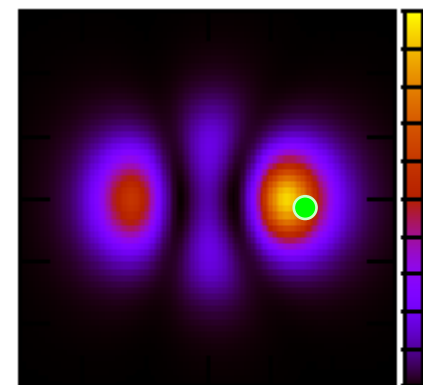
multi- l ,
both even and odd l



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



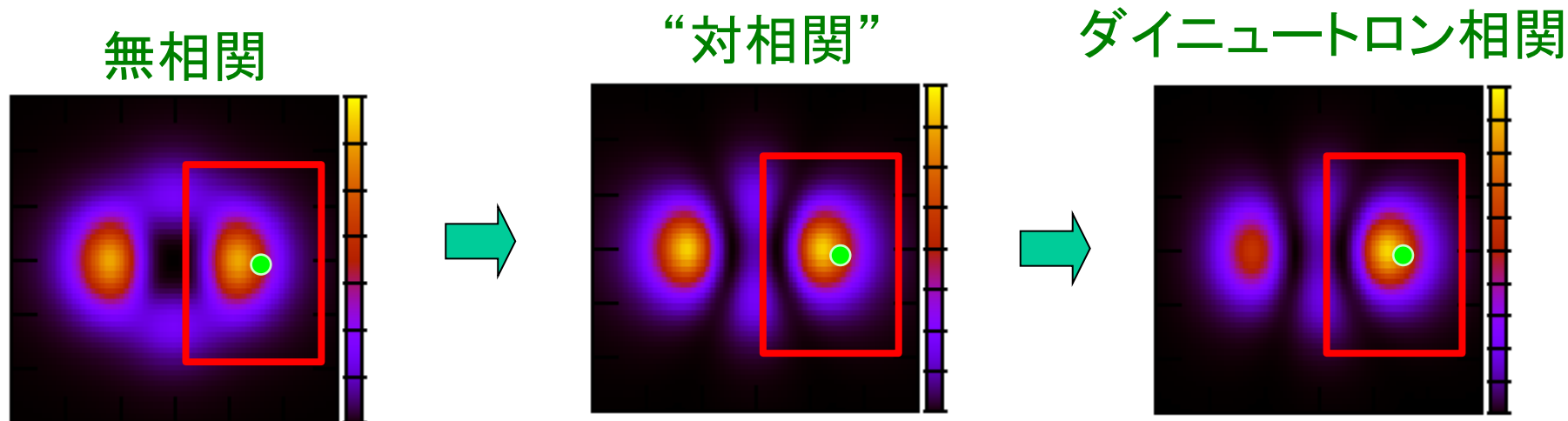
-6 -4 -2 0 2 4 6



-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(?)

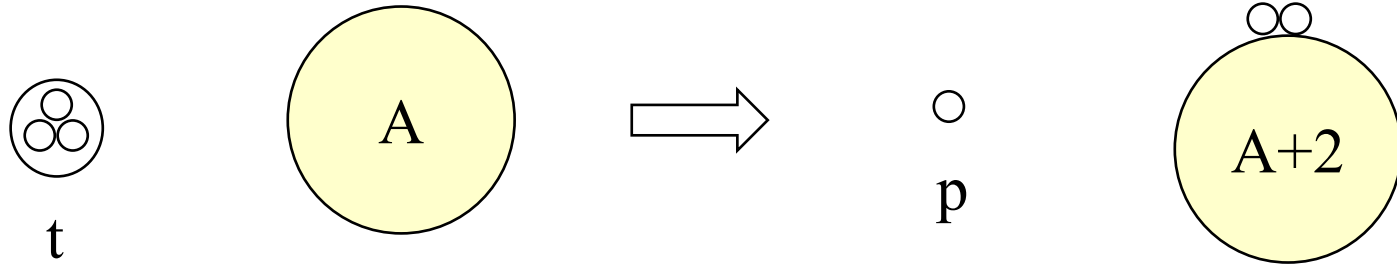
cf. A. Insolia, R.J. Liotta, and E. Maglione,
J. of Phhys. G15 ('89) 1249

→ 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

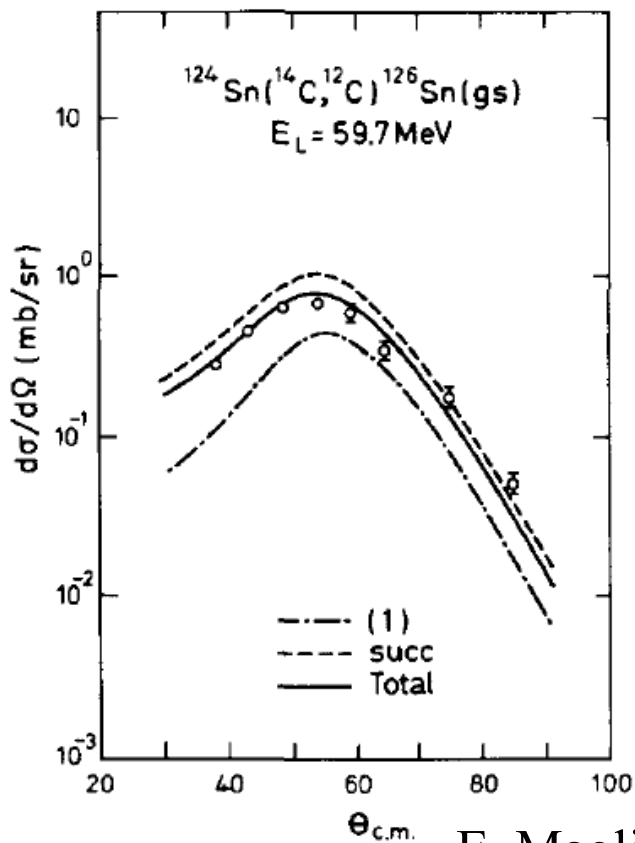
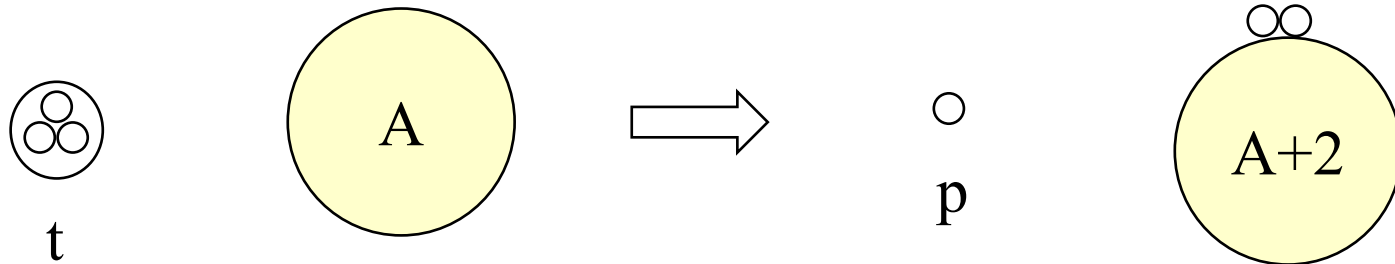
$$h = \underline{t} + \underline{V_T(r)} + \underline{V_P(r)}$$

Broglia et al.,

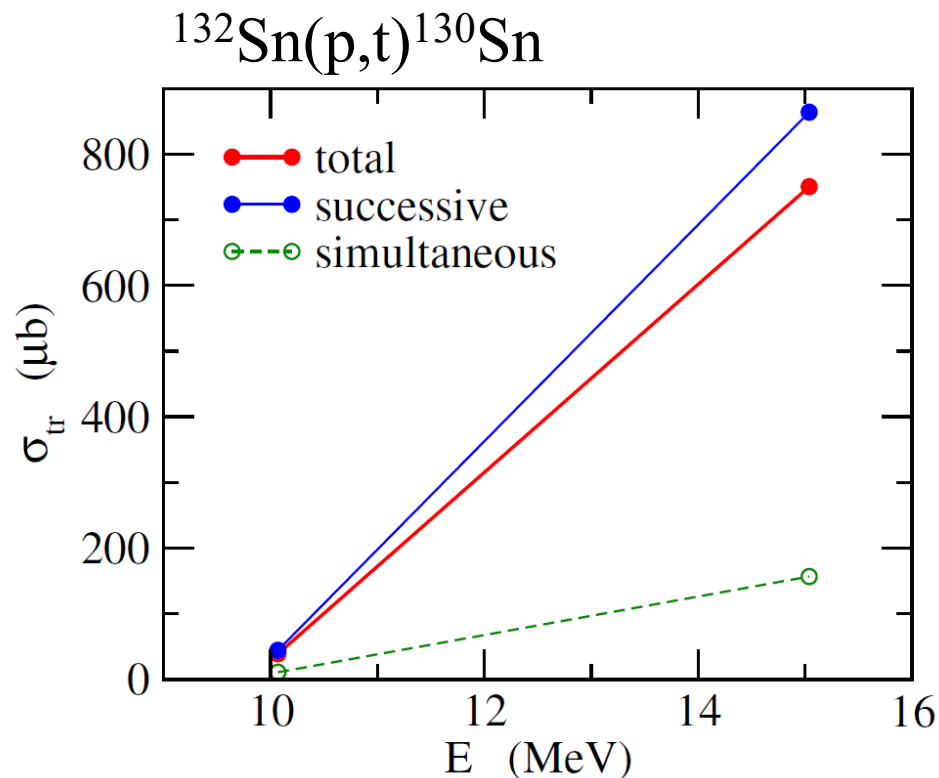
$$\begin{aligned} a_{tr} &= a_{sim} + a_{succ} + a_{non-orthog} \sim a_{succ} \\ &= \tilde{a}_{sim} + \tilde{a}_{succ} + \tilde{a}_{non-orthog} \end{aligned}$$

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



E. Maglione et al. PLB ('85)

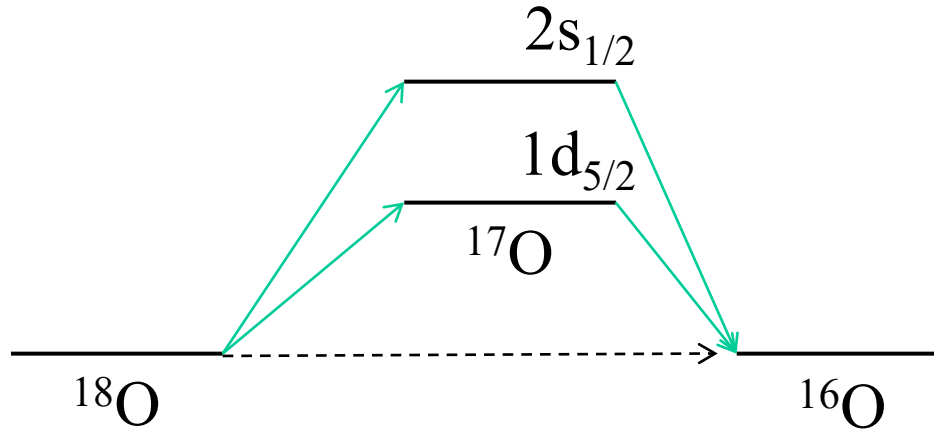


G. Potel et al., PRL ('11)

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



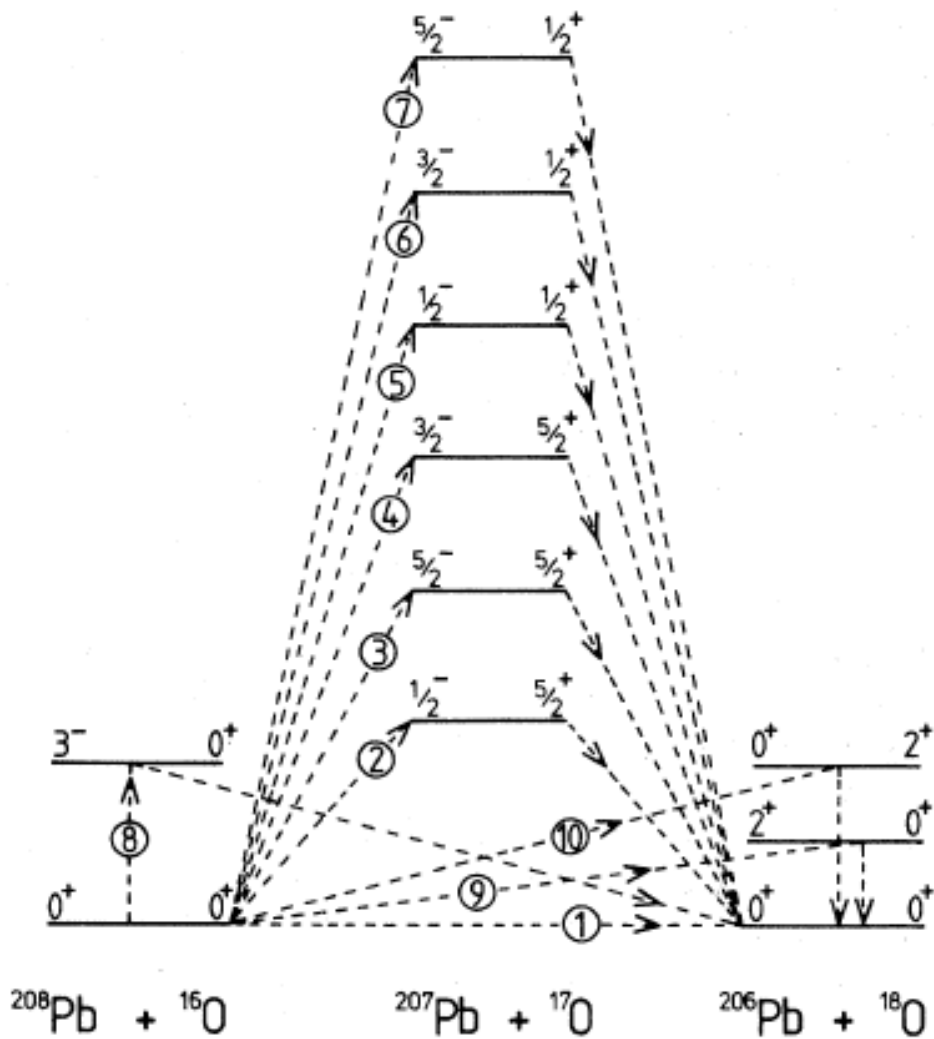
$$0.8 (1d_{5/2})^2 \\ +0.6 (2s_{1/2})^2$$

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

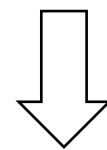
* 実際には、相手側の原子核の超流動性も考慮しなければならない

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



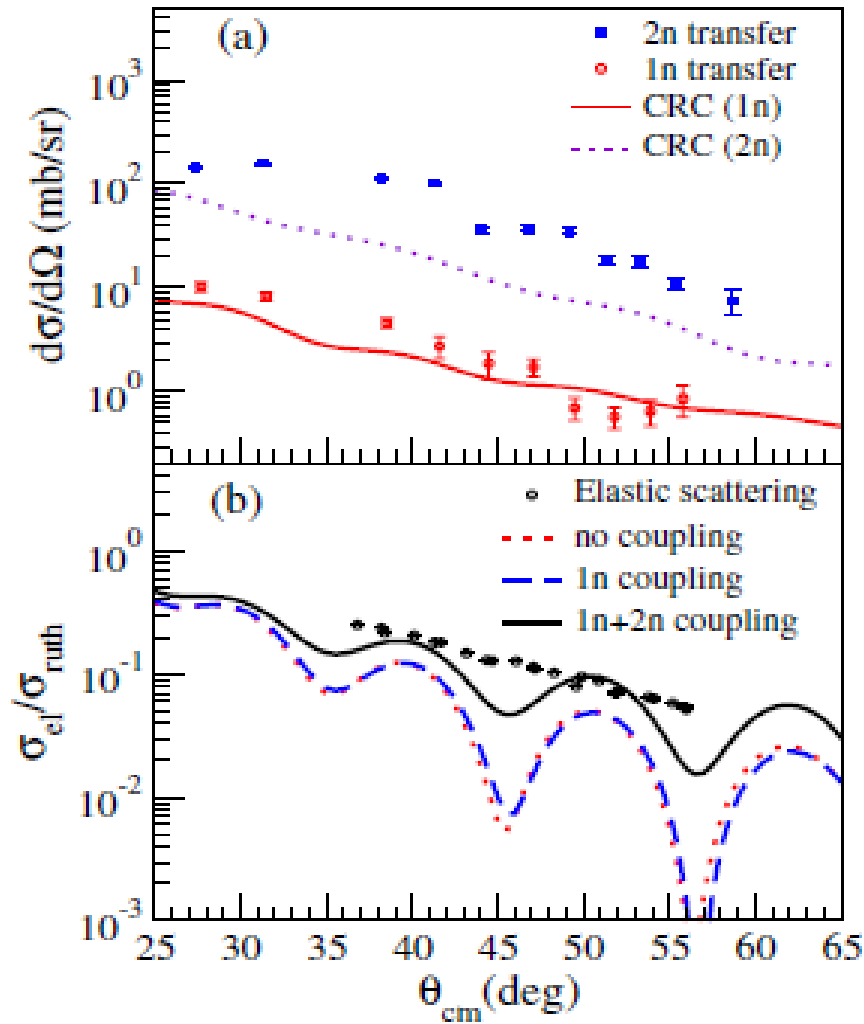
反応機構はどう変わる?



これからの課題

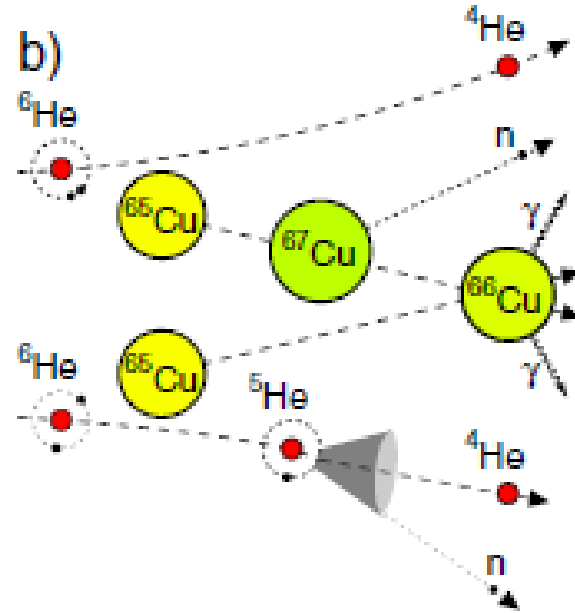
ボロミアン核の対移行反応: 実験データ (i)

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



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

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

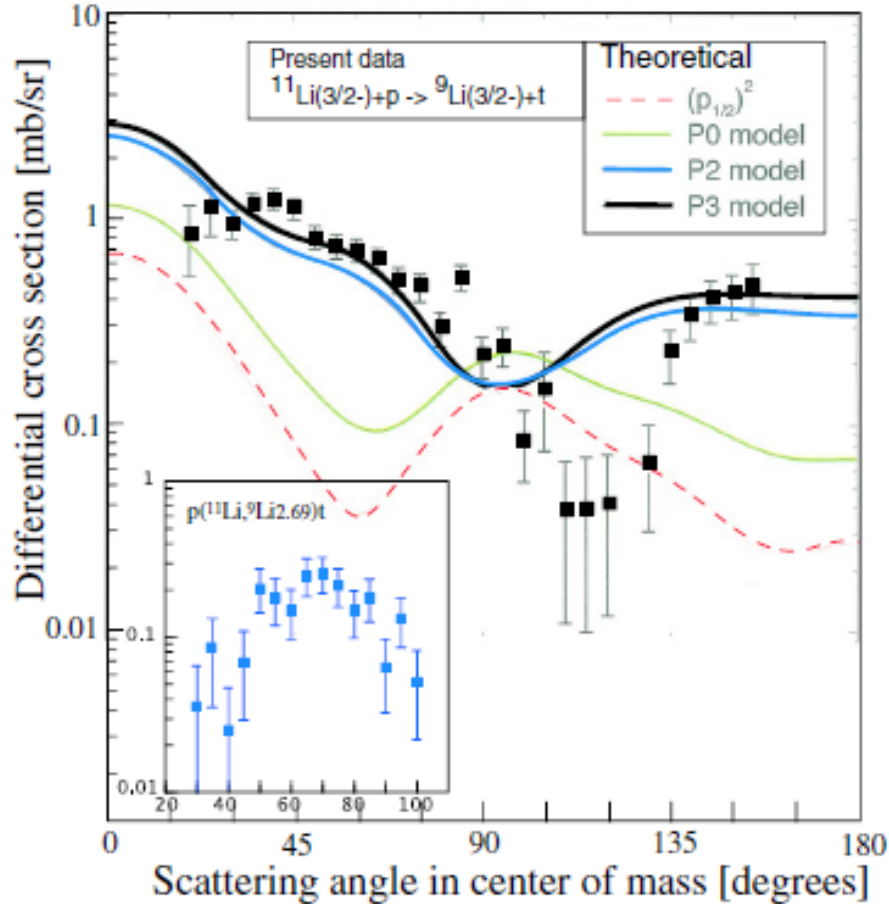


n と α の角度相関を見ることによって
 $1n$ 移行と $2n$ 移行を分離
 ($1n$ 移行は ${}^5\text{He}$ の分解から n が出る
 ので n と α が強く相関)

- $1n$ 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)

ボ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。

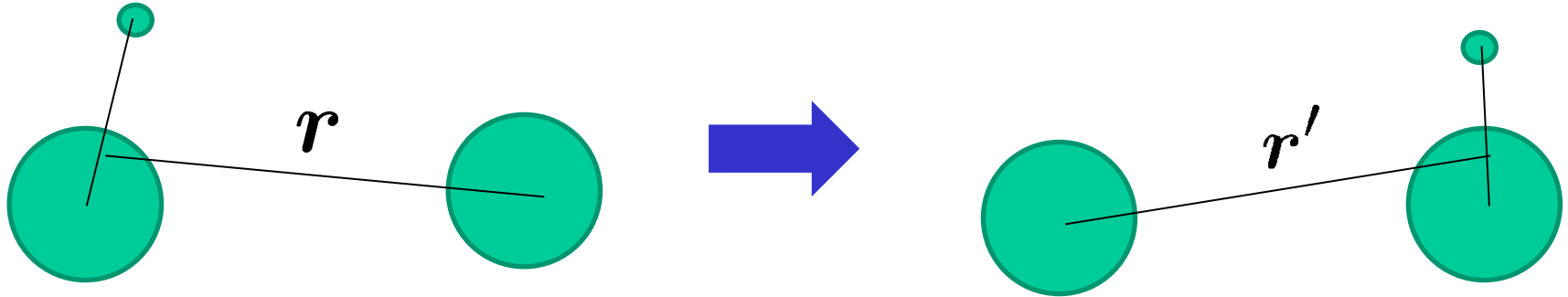
➤ ただし、後方の合いはいまいち。
(光学ポテンシャル? 中間状態?)

↑
中間状態として ${}^{10}\text{Li}$ の取り扱い

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

核子移行反応: 反応論としての難しさ

1. Recoil の効果



Transfer の前後で異なる座標系 → 非局所的ポテンシャル

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu_1} \nabla^2 + V_1(r) - E \right] \psi_1(r) + \int dr' V_{\text{tr}}(r, r') \psi_2(r') = 0$$

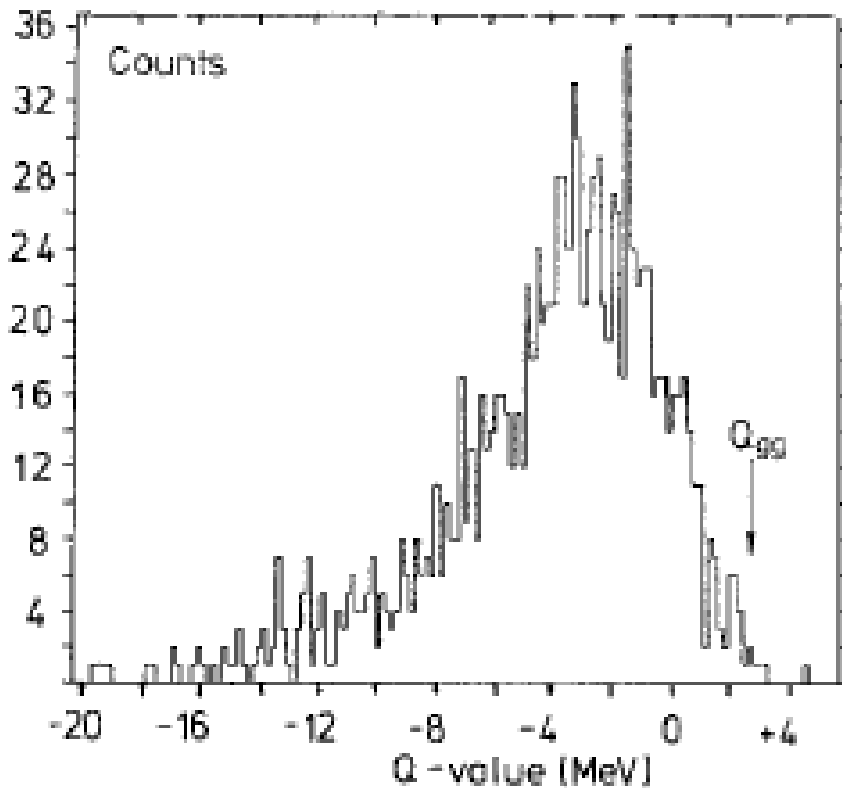
*** 重イオン核子移行反応では no-recoil 近似がOK**

2. チャンネルの多さ

それぞれのチャンネルに対して Spectroscopic factor
を考慮しなければならない

チャンネル数の多さ → Q-value 分布

Q-value 分布の例

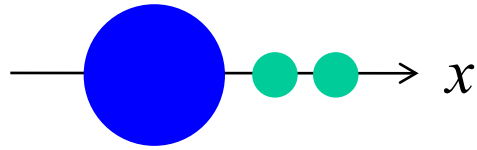


$^{92}\text{Zr}(^{33}\text{S}, ^{34}\text{S})^{91}\text{Zr}$ 反応

L. Corradi et al.,
Z. Phys. A334('90)55

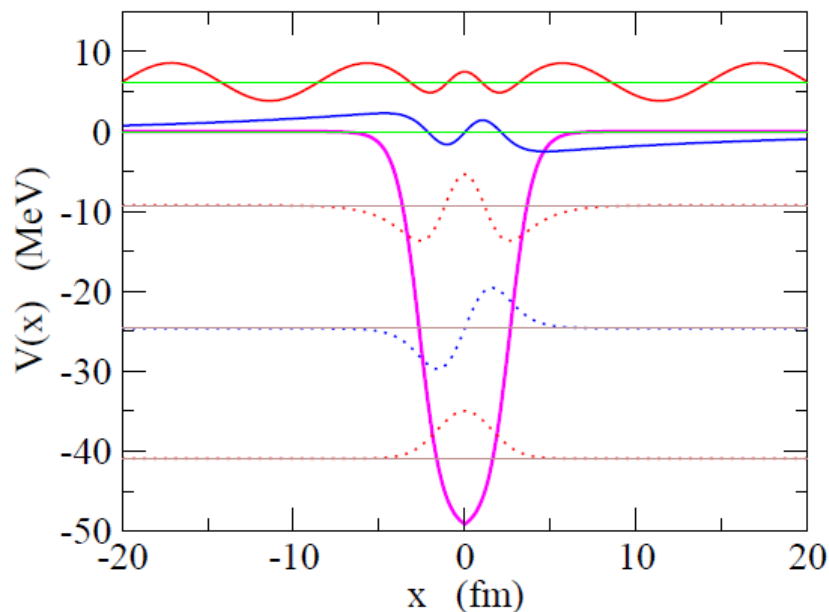
Fig. 6. Q -distribution for one angle of detection (85°) measured at 110.8 MeV for the one-neutron pickup reaction on ^{92}Zr . The Q -distributions for different angles agree within the limits of statistics

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

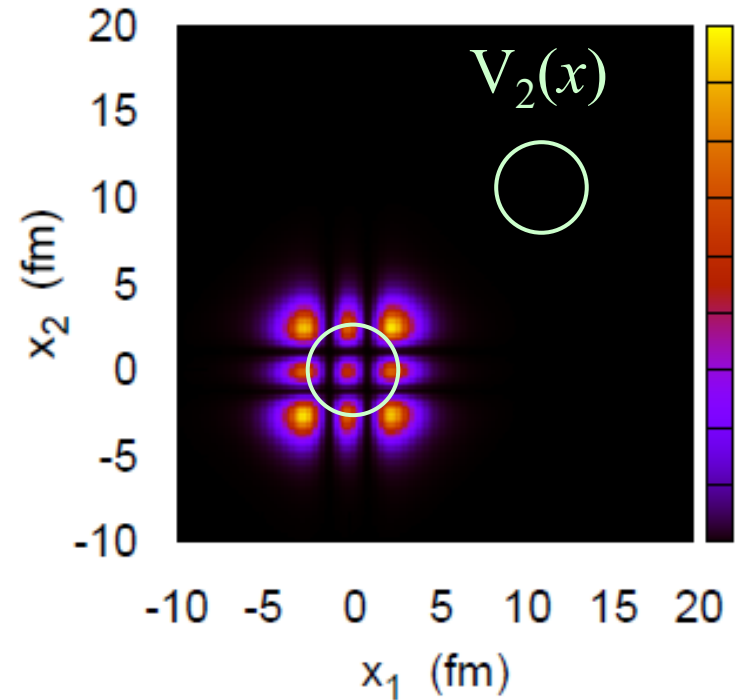
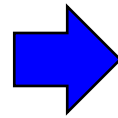
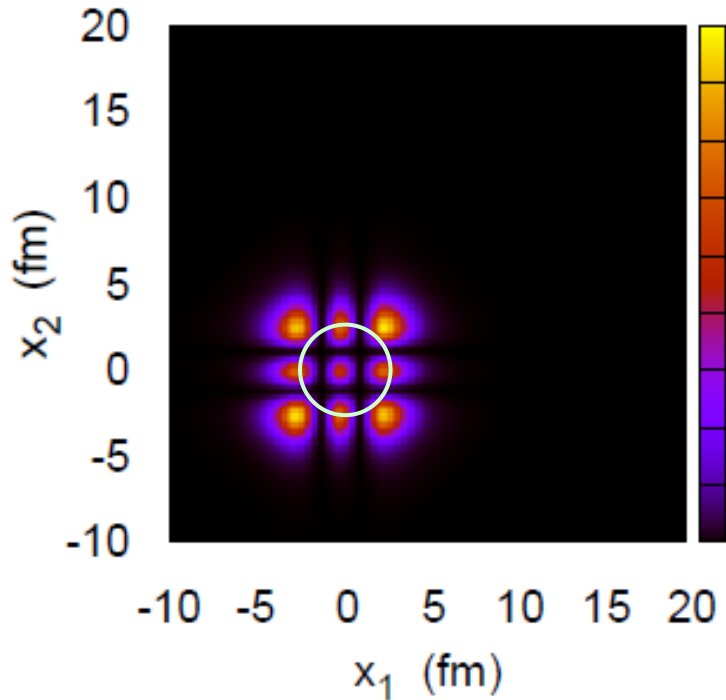
$$H = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + V(x_1) - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + V(x_2) + v_{nn}(x_1, x_2)$$



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

原子核内部でのみ対相関
がはたらく

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

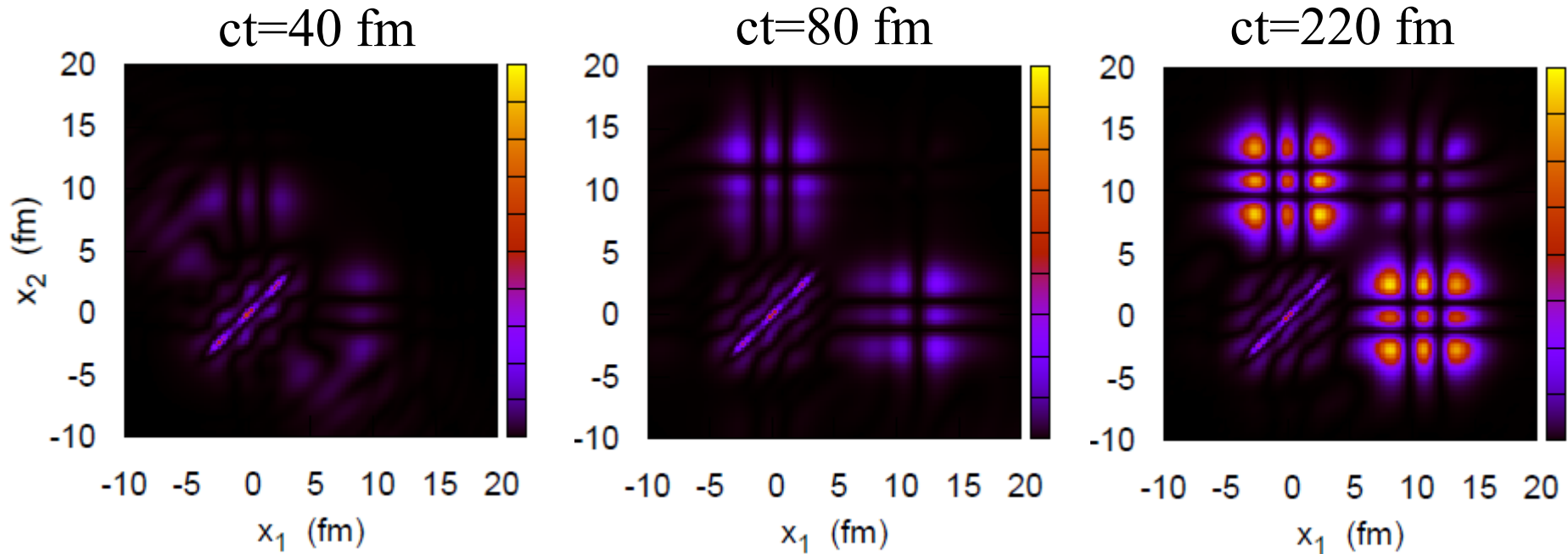


時間発展

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

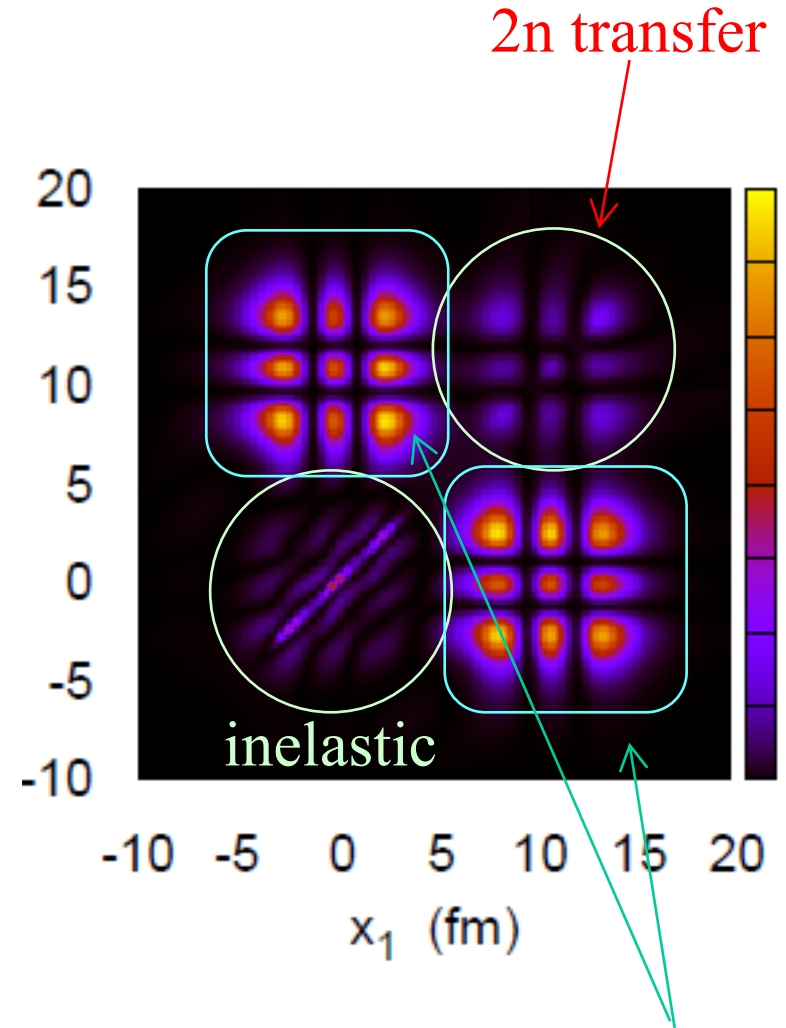
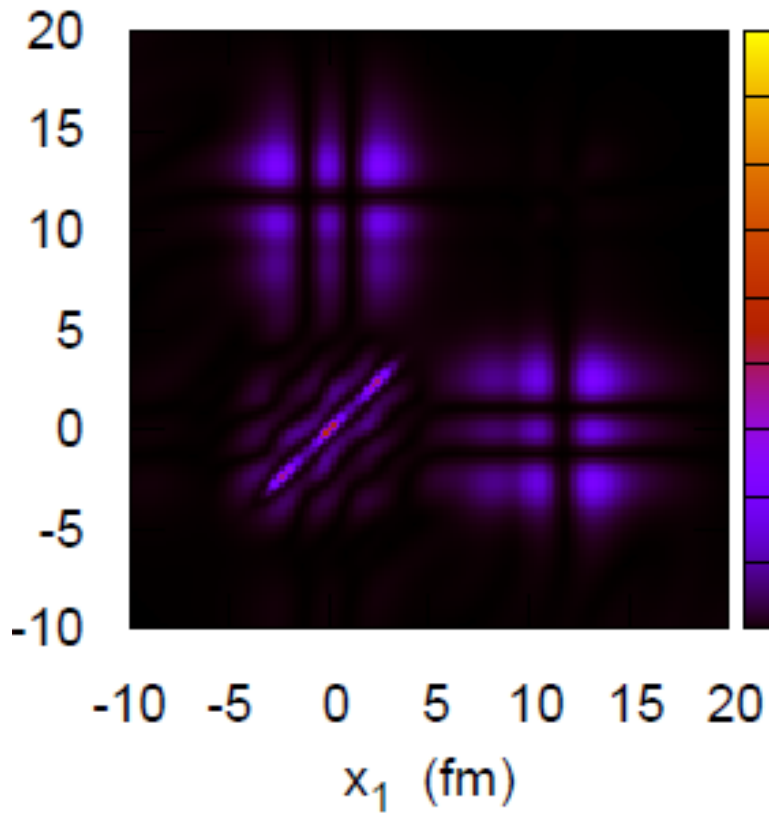
$$\Psi(x_1, x_2, t) = \alpha\Psi_{\text{gs}}(x_1, x_2) + \tilde{\Psi}(x_1, x_2, t)$$

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



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

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

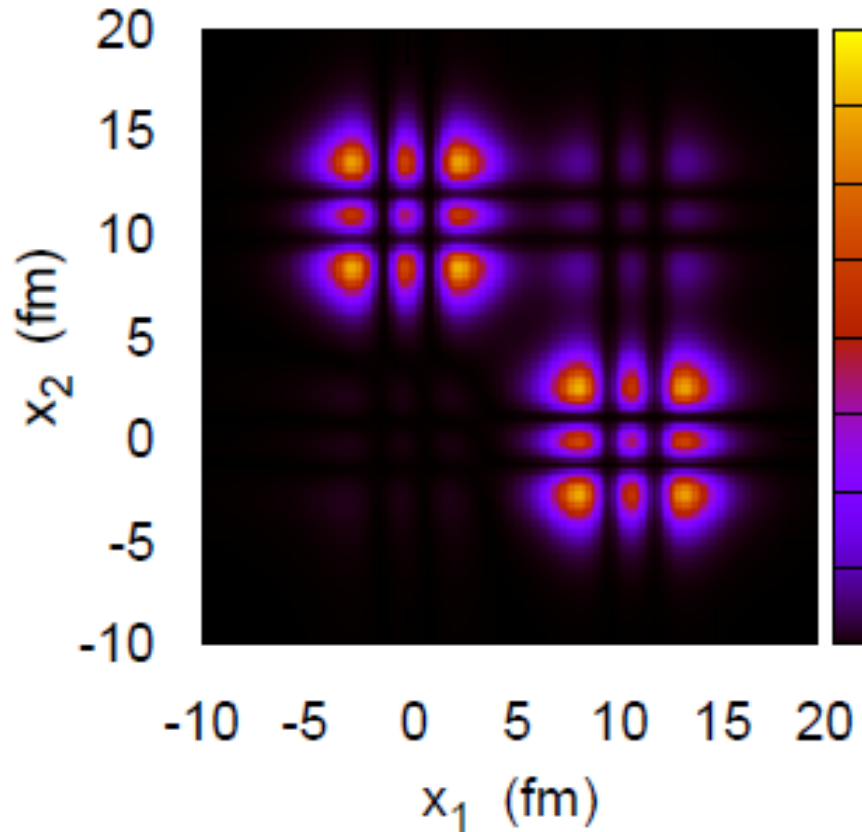


sequential がメインなプロセス

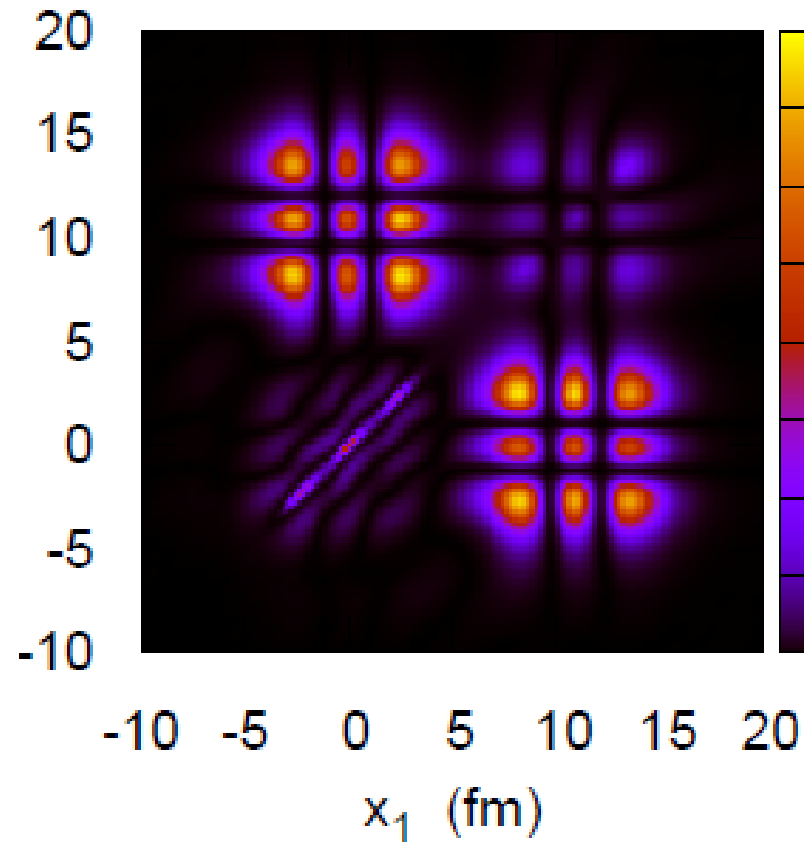
1n transfer

ct=220 fm

相関なし



相関あり

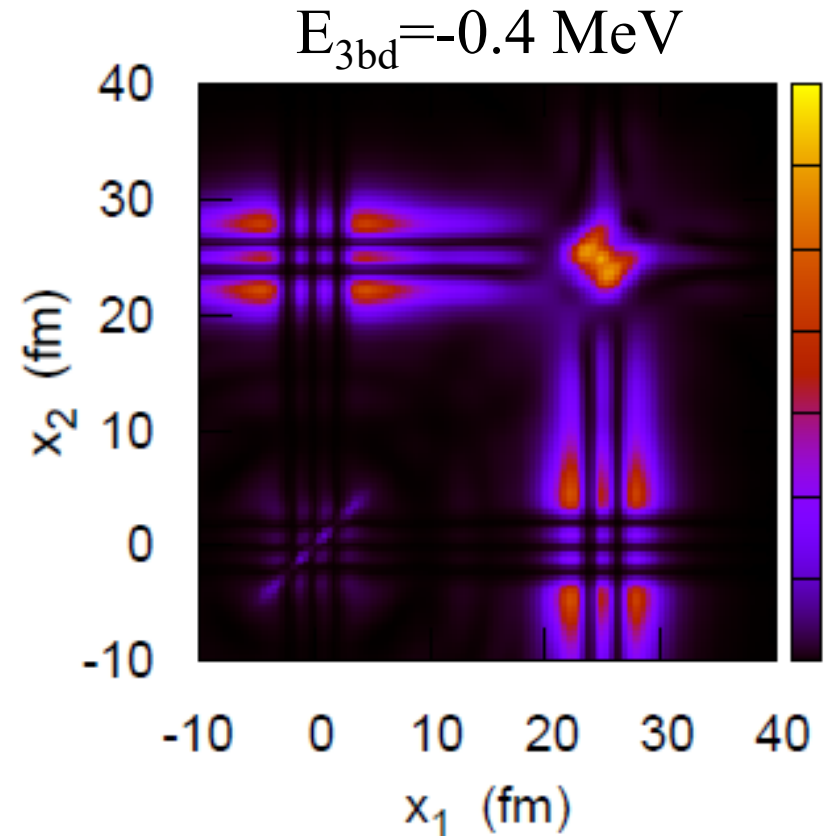
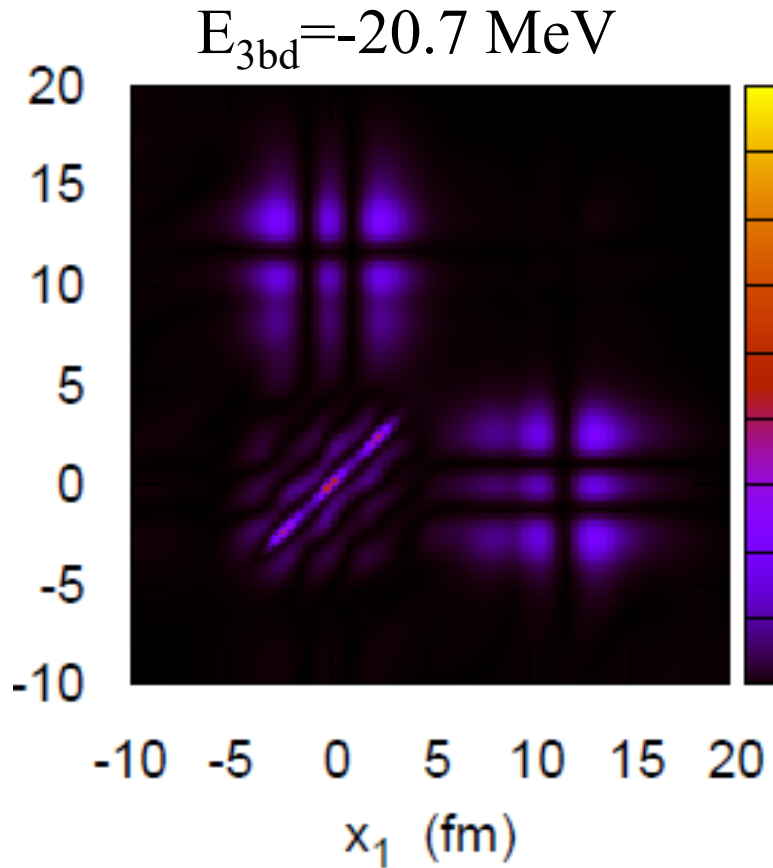


相関により、

- ・非弾性散乱
- ・2中性子移行反応

の確率が増大

ct=80 fm

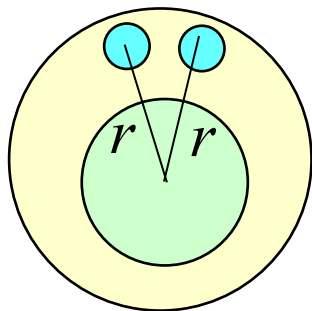


弱束縛になると $P_{2n} > P_{1n}$ (実験データと整合)

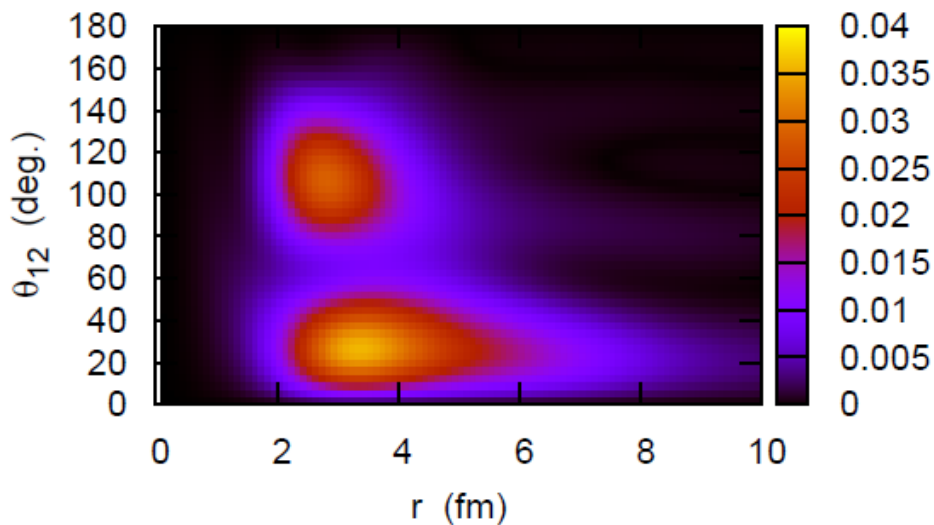
時間依存アプローチ: 複雑な対移行反応を理解するための有効な手段

- 3次元化
- 2番目のWSポテンシャルを動かす

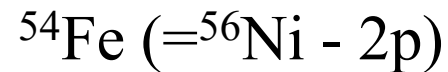
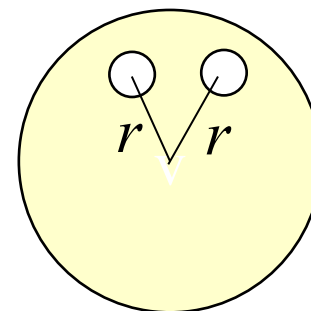
T=1 np⁻¹ 相関と重陽子移行反応



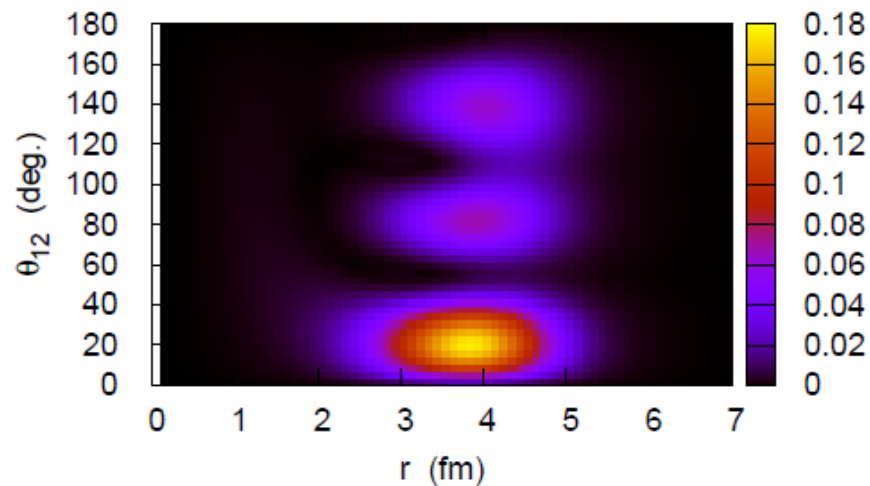
ダイニュートロン相関



K.H. and H. Sagawa,
PRC72 ('05) 044321



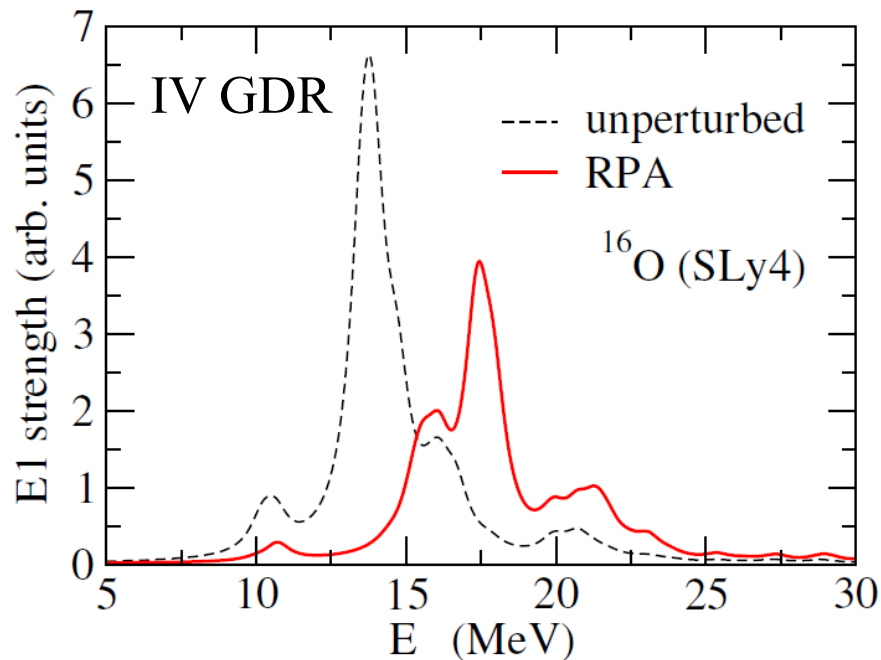
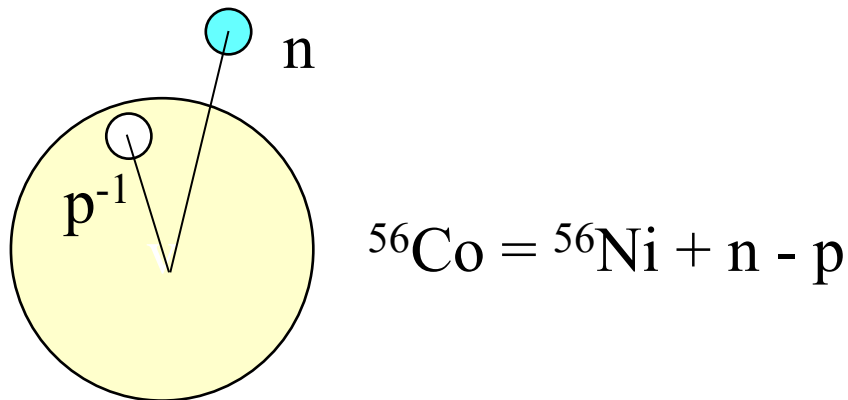
ダイホール(空孔)相関



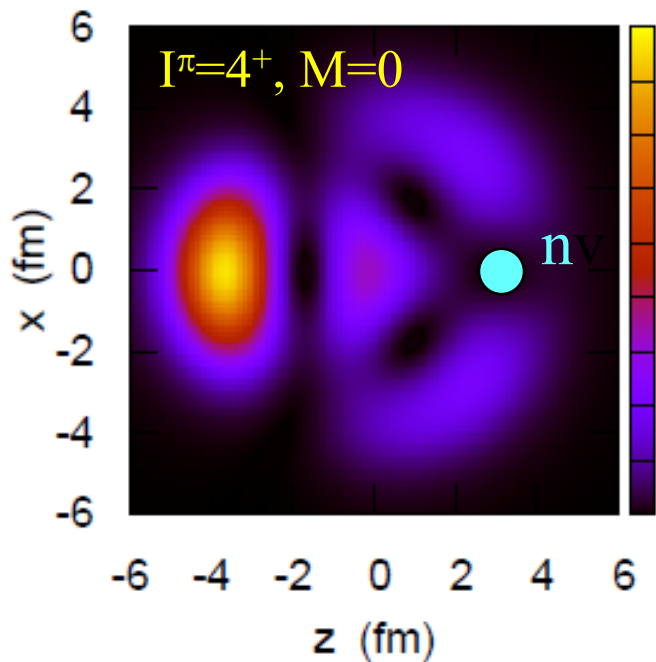
K.H. and H. Sagawa,
PRC106 (2022) 034313

T=1 np⁻¹ 相関と重陽子移行反応

アイソベクトル(T=1)の
粒子空孔相互作用は斥力



陽子空孔の空間分布

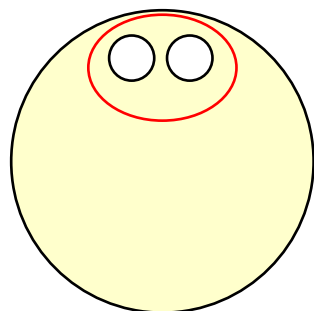


Skyrme TDA (SLy4)

$$|^{56}\text{Co}\rangle = \sum_{p,h} C_{ph} a_{\nu p}^\dagger a_{\pi h} |^{56}\text{Ni}\rangle$$

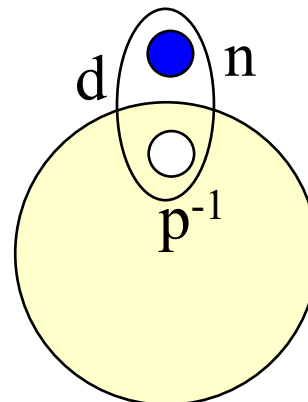
K.H. and H. Sagawa,
PRC106 (2022) 034313

d 移行反応
(1ステップ)

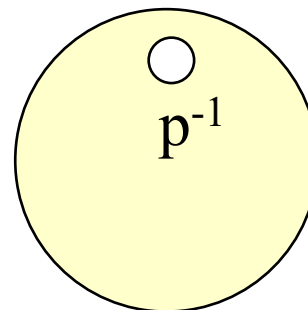


$^{54}\text{Fe} (=^{56}\text{Ni} - 2p)$

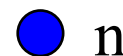
ダイホール相関



励起状態



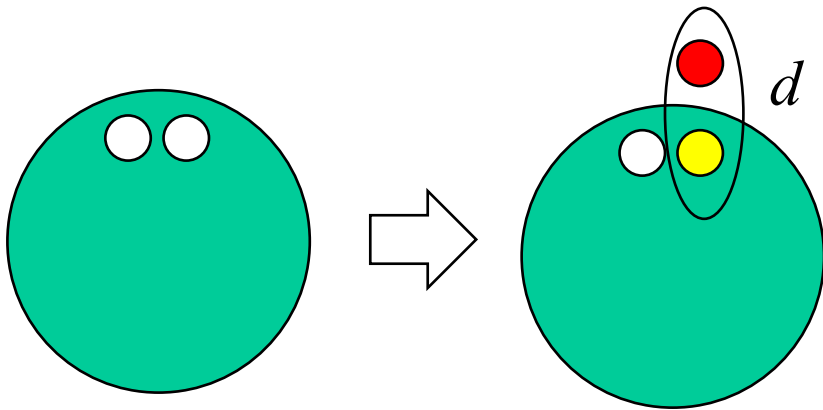
基底状態



$^{56}\text{Co} (^{56}\text{Ni} + n - p)$

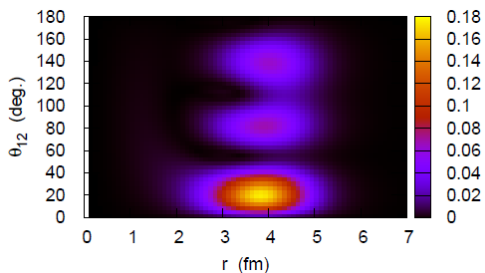
反相関

G.F. Bertsch,
Phys. Lett. 25B ('67) 62

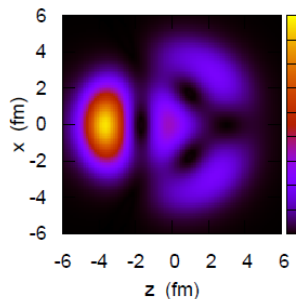


$^{54}\text{Fe} (=^{56}\text{Ni} - 2p)$

^{56}Co



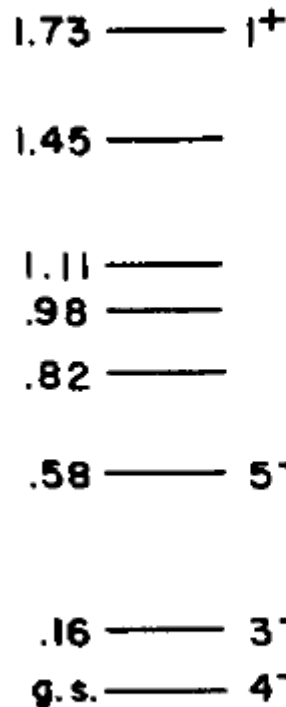
励起状態



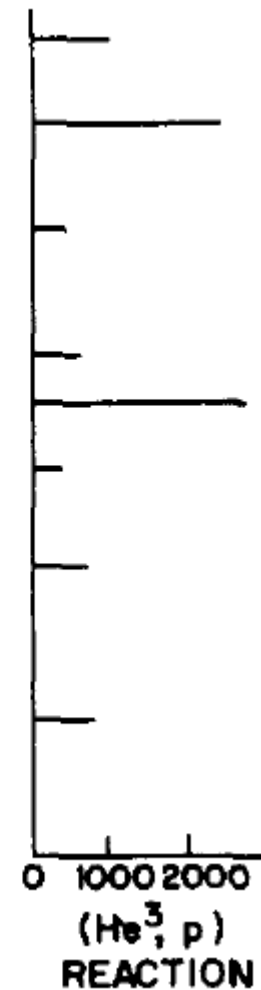
^{56}Co の基底状態への移行が抑制

- 実験データはこの描像に整合(に見える)
- 2ステップの寄与? → これからの課題

ENERGY (MeV)



^{56}Co



実験データ

G.F. Bertsch,
Phys. Lett. 25B ('67) 62

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

➤ $T=1$ np^{-1} 相関と重陽子移行反応

1ステップの寄与: 基底状態への移行が抑制

→2ステップの寄与を考慮するとどうなるのか?

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