

# TDHF 計算による 核子移行反応の記述

関澤 一之

筑波大学 原子核理論研究室 (M2)

共同研究者 矢花 一浩

# 1. 導入

## 大きな目標

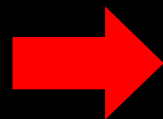
量子多体系で実現する構造・ダイナミクスを  
微視的に記述し、定量的に理解すること

原子核：有限個の核子が核力によって結びついた量子多体系

原子核衝突：実験的に原子核の性質を探る手段

核力によって緊密に結びついた自己束縛系同士の衝突に伴う  
非線形・非平衡のダイナミクスが調べられる

原子核衝突を微視的に記述することができる理論



時間依存Hartree-Fock法 (TDHF)

# 1. 導入

原子核衝突の微視的記述を行うことで、量子多体系に発現するダイナミクスに対する微視的理解を得ることを試みる

原子核衝突を微視的に記述する理論

→ 時間依存 Hartree-Fock 法 (TDHF)

原子核の励起・応答・反応を  
統一的に扱える理論として発展

- ・ 核構造と同じ枠組み(反応に関するパラメータを含まない)
- ・ 比較的軽い核から重い核まで扱える
- ・ 不安定核を含めた系統的計算が可能

これまでの研究：核融合反応、深部非弾性散乱など・・・平均化された量

→ TDHF計算によって**核子移行反応確率**を求める方法が提案される[1]

**核子移行反応**： 移行核子数毎に終状態を特定した反応確率の計算が必要

[1] C. Simenel, Phys. Rev. Lett. **105**, 192701 (2010)

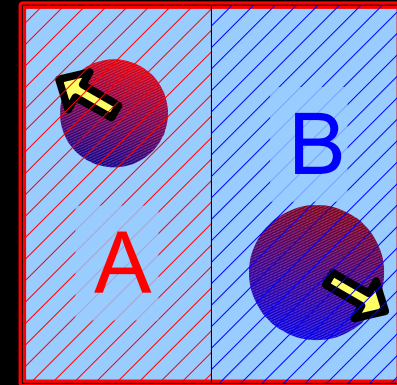
## 2. 計算方法

粒子数射影演算子を用いた  
核子移行確率の計算

[1] C. Simenel, Phys. Rev. Lett. **105**, 192701 (2010)

### 粒子数射影演算子

$$\delta(n - \hat{N}_A) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\theta e^{i(n - \hat{N}_A)\theta}$$

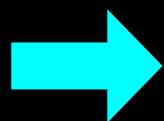


領域 A に  $n$  個、領域 B に  $N-n$  個の核子が存在する確率 終状態  $\Phi_f$

$P_A(n) = \langle \Phi_f | \delta(n - \hat{N}_A) | \Phi_f \rangle$  粒子数射影演算子の期待値

$$= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\theta e^{in\theta} \det \{ \langle \phi_i | \phi_j \rangle_B + e^{-i\theta} \langle \phi_i | \phi_j \rangle_A \}$$

従来の方法に比べ、計算コストを大幅に削減



重イオン衝突 ( $A > 100$ ) に伴う核子移行反応を  
現実的計算コストで実行することが可能に

# 3. 実験データ

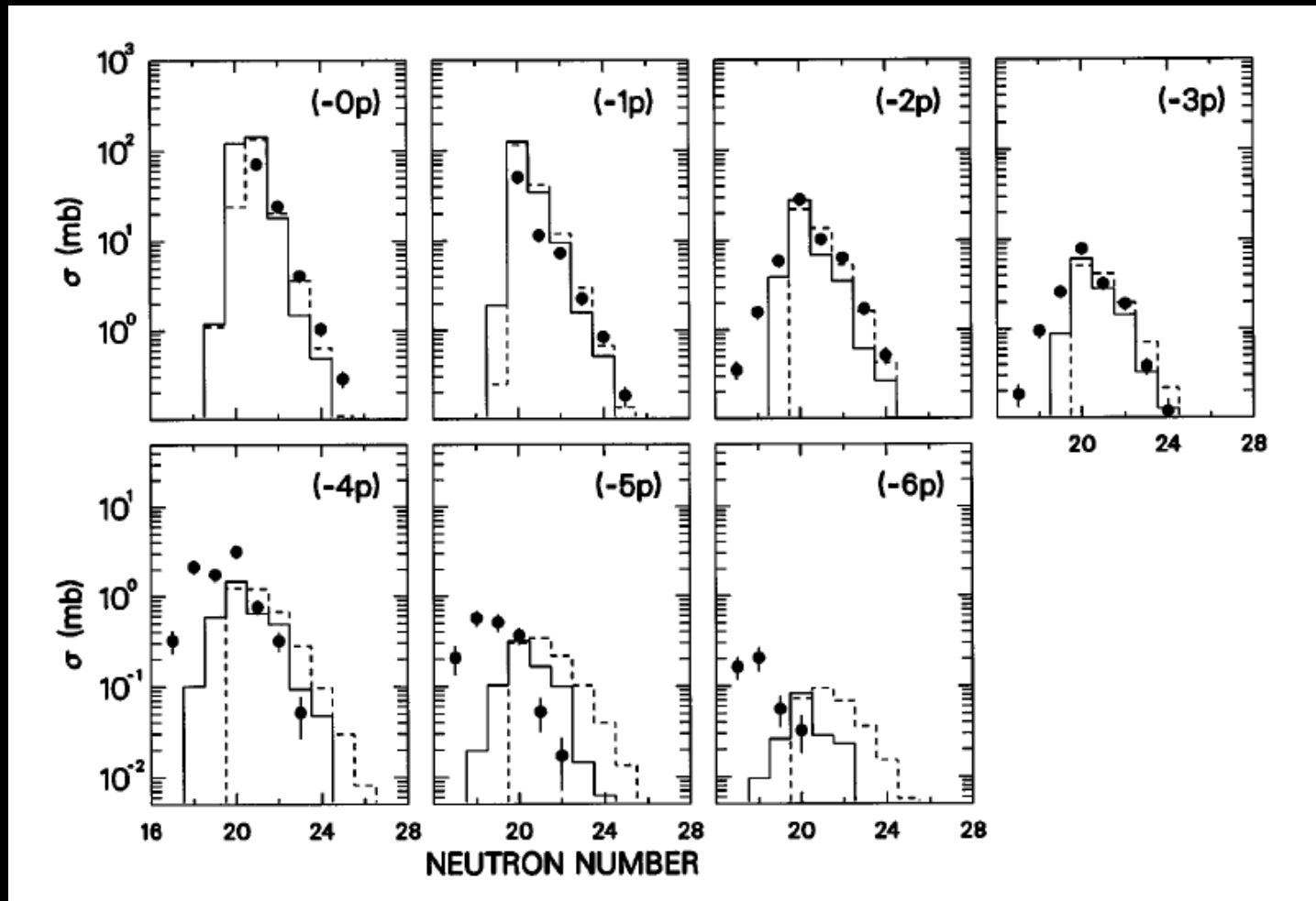
L. Corradi et.al. Phys. Rev. C 54, 201 (1996)

## 核子移行反応断面積

$^{40}\text{Ca} + ^{124}\text{Sn}$ ,  $E_{\text{lab}} = 170$  [MeV]

- 各 proton stripping channel 毎の移行反応断面積
- Full line; GRAZING

- ★ 全核子数164個
- ★ 最大5-6個の移行



# 4. 結果; $^{40}\text{Ca} + ^{124}\text{Sn}$ , $E_{\text{lab}} = 170$ [MeV]

計算の詳細

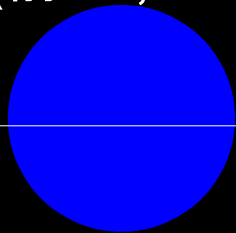
- ◆ Skyrme interaction; SLy5
- ◆ 3D Cartesian coordinate; discretized into a uniform mesh
- ◆ grid size;  $60 \times 60 \times 26$  ( $x \times y \times z$ )
- ◆ mesh spacing; 0.8 [fm]
- ◆ time step; 0.2 [fm/c]
- ◆ impact parameter; 3.7-10.0 [fm]

計算領域  
48 [fm] × 48 [fm] × 20.8 [fm]

実験室系

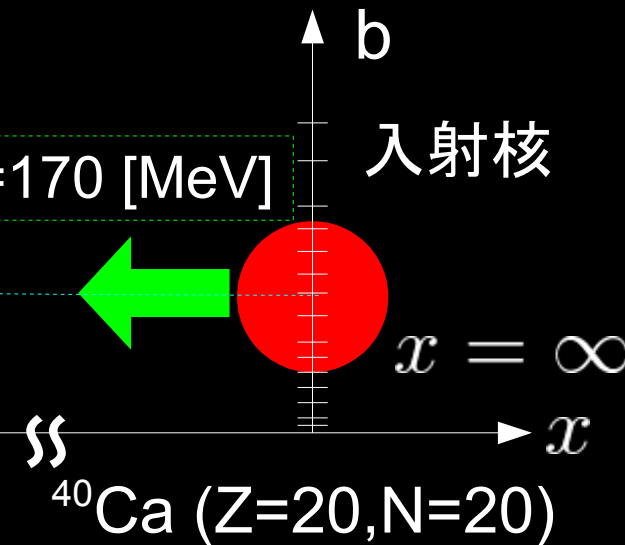
標的核 (静止,  $t = t_0$ )

$^{124}\text{Sn}$  ( $Z=50, N=74$ )



$E_{\text{lab}} = 170$  [MeV]

入射核



TDHF計算の初期位置まではRutherford軌道を仮定

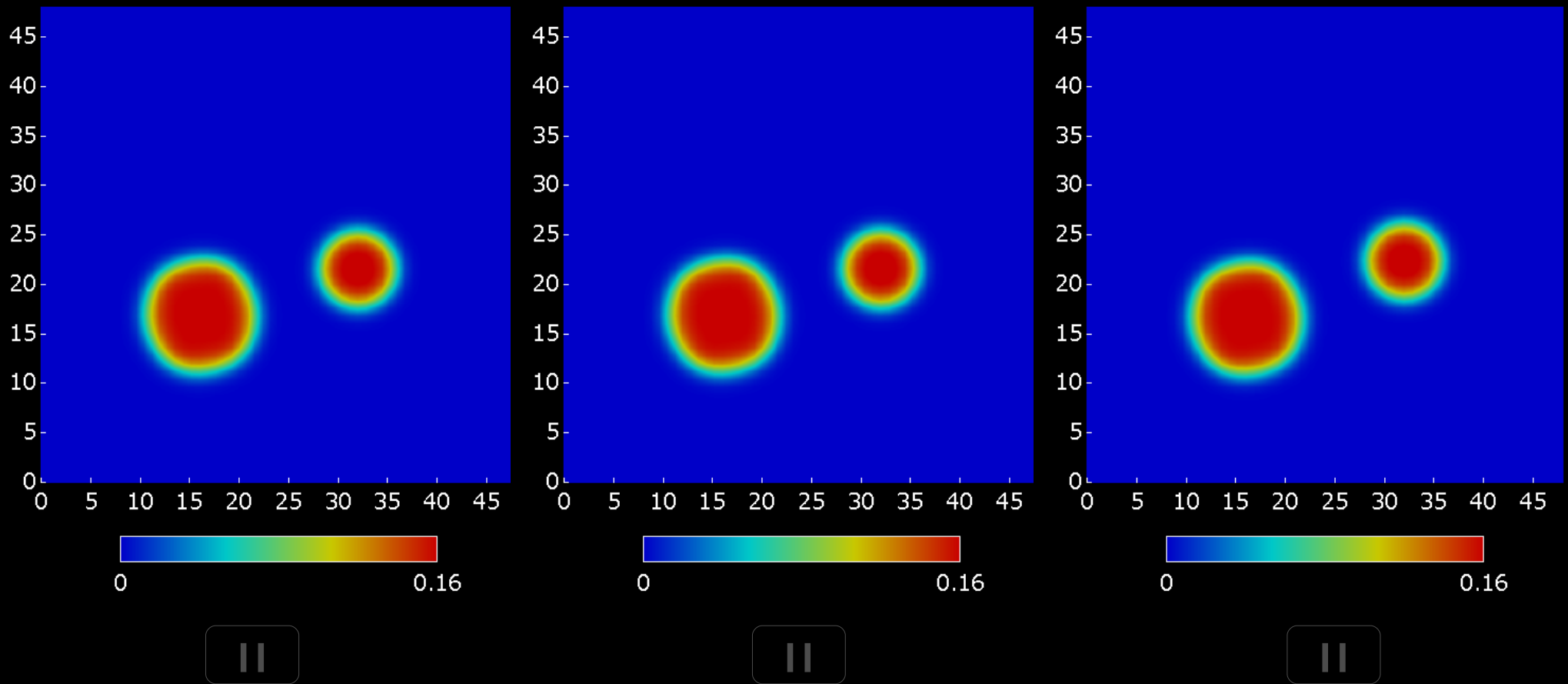
# 4. 結果; $^{40}\text{Ca} + ^{124}\text{Sn}$ , $E_{\text{lab}} = 170$ [MeV] $^{40}\text{Ca}$ (Z=20, N=20) $^{124}\text{Sn}$ (Z=50, N=74)

TDHF計算によって求められた密度分布の時間発展の様子

$b = 3.65$  [fm]

$b = 3.70$  [fm]

$b = 4.50$  [fm]



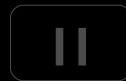
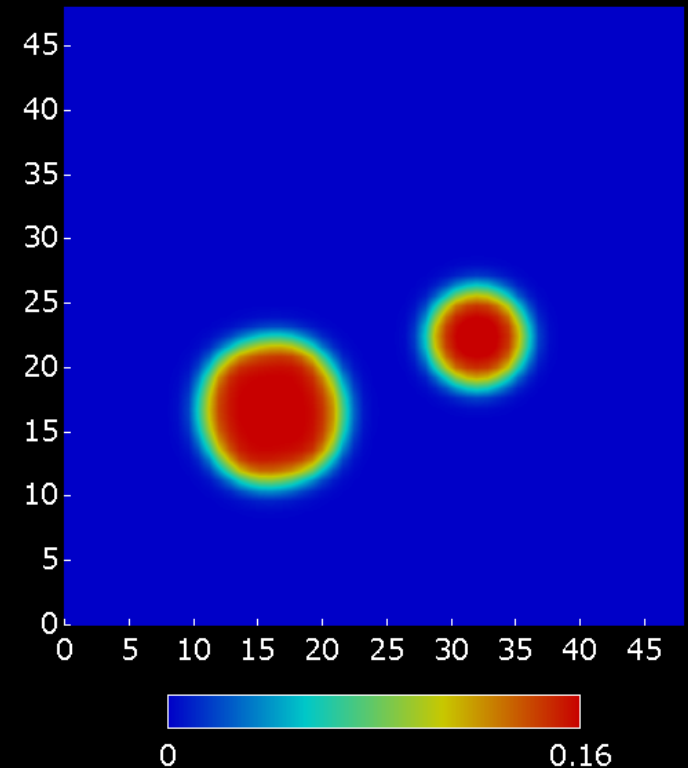
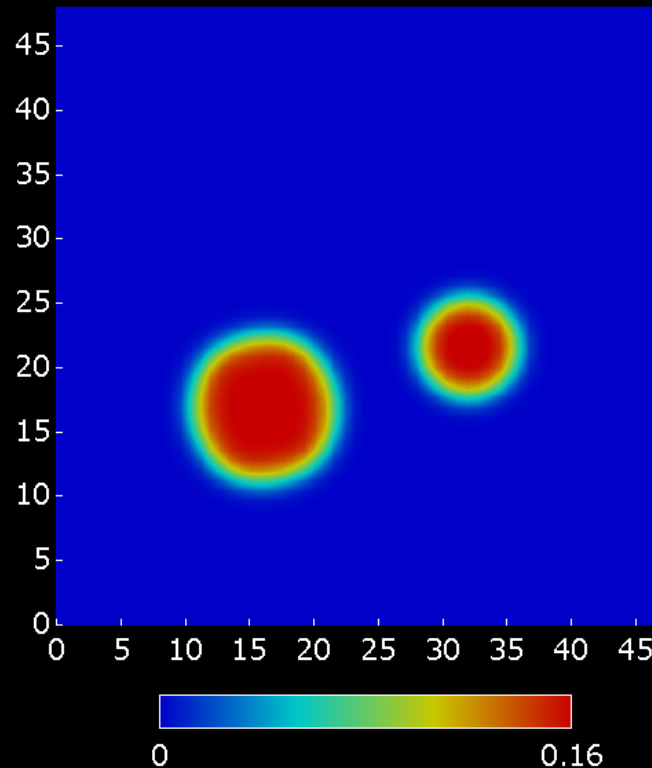
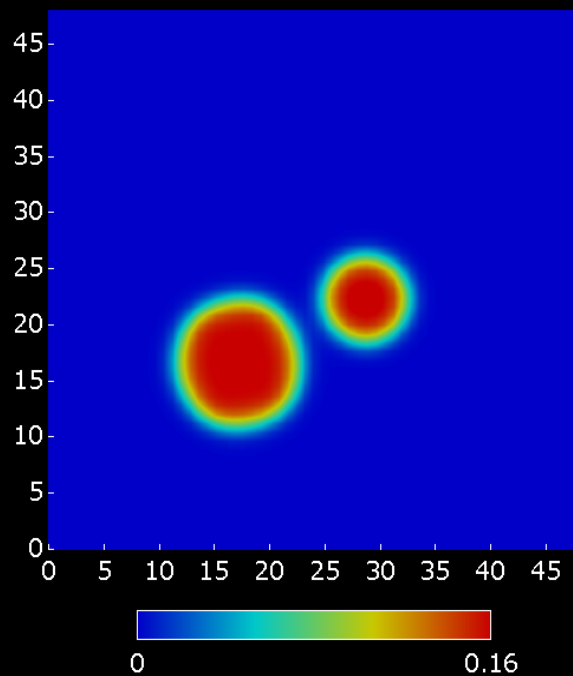
# 4. 結果; $^{40}\text{Ca} + ^{124}\text{Sn}$ , $E_{\text{lab}} = 170$ [MeV] $^{40}\text{Ca}$ (Z=20, N=20) $^{124}\text{Sn}$ (Z=50, N=74)

TDHF計算によって求められた密度分布の時間発展の様子

$b = 3.65$  [fm]

$b = 3.70$  [fm]

$b = 4.50$  [fm]





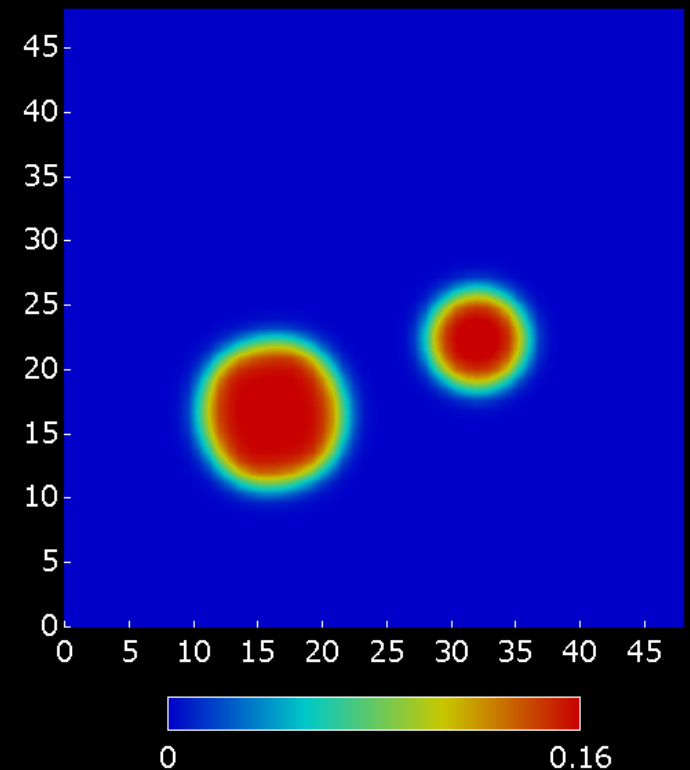
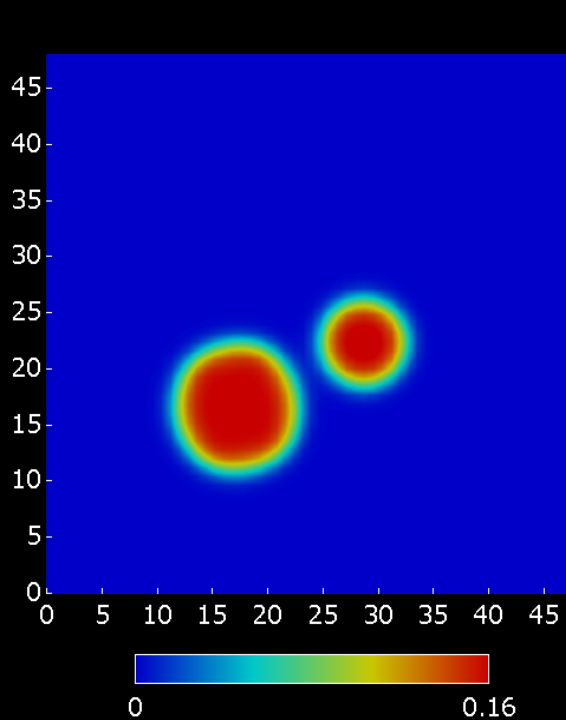
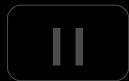
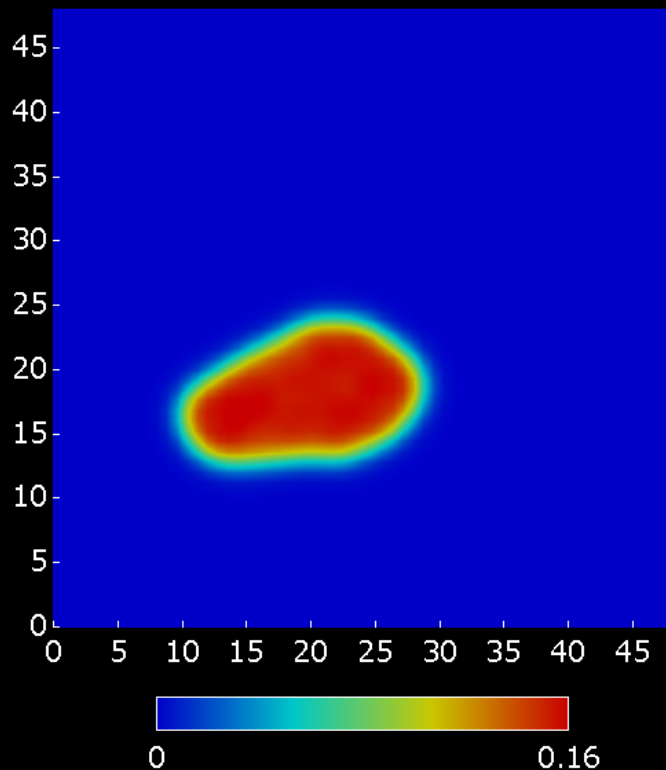
# 4. 結果; $^{40}\text{Ca} + ^{124}\text{Sn}$ , $E_{\text{lab}} = 170$ [MeV] $^{40}\text{Ca}$ (Z=20, N=20) $^{124}\text{Sn}$ (Z=50, N=74)

TDHF計算によって求められた密度分布の時間発展の様子

b=3.65 [fm]

b=3.70 [fm]

b=4.50 [fm]



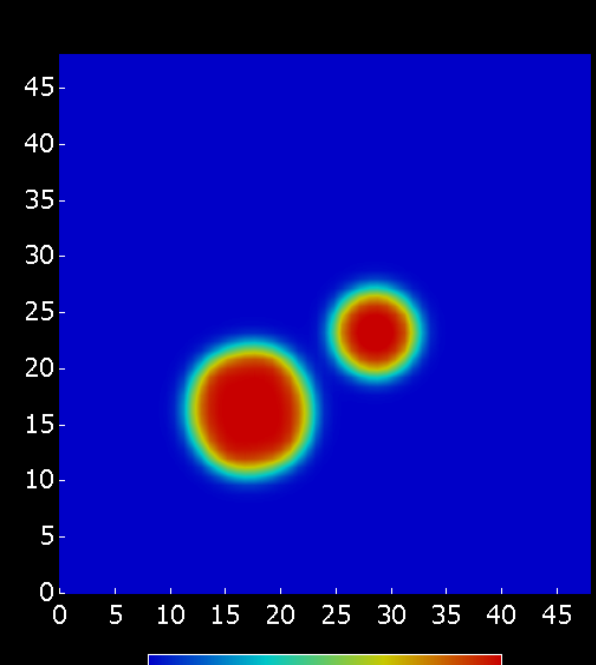
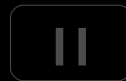
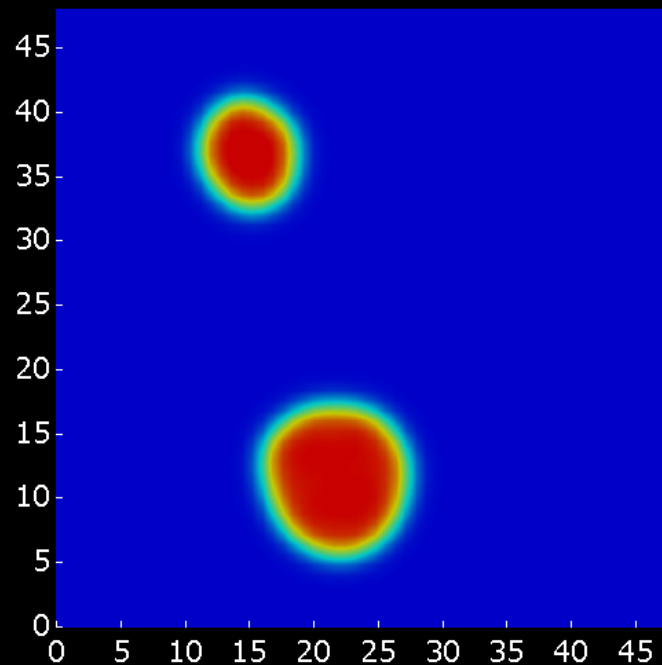
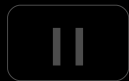
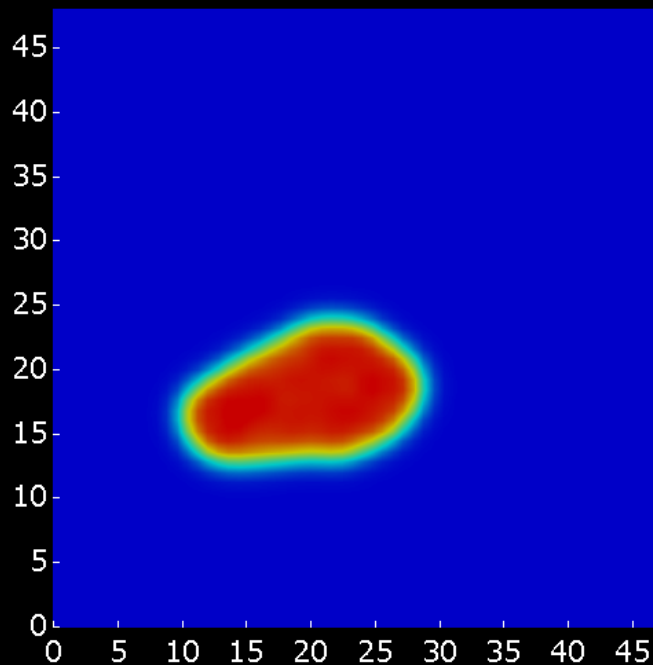
# 4. 結果; $^{40}\text{Ca} + ^{124}\text{Sn}$ , $E_{\text{lab}} = 170$ [MeV] $^{40}\text{Ca}$ (Z=20, N=20) $^{124}\text{Sn}$ (Z=50, N=74)

TDHF計算によって求められた密度分布の時間発展の様子

b=3.65 [fm]

b=3.70 [fm]

b=4.50 [fm]



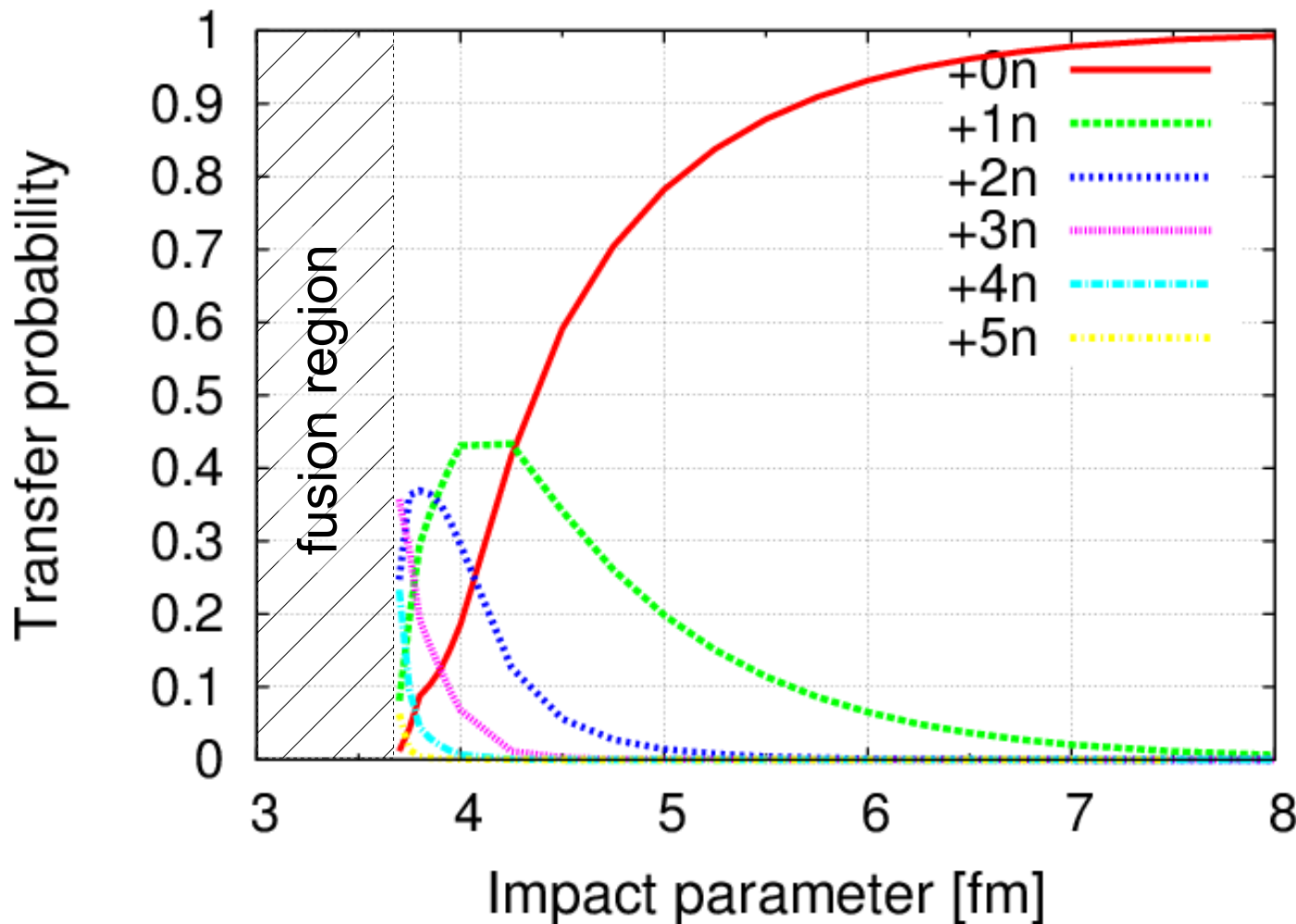
# 4. 結果; $^{40}\text{Ca} + ^{124}\text{Sn}$ , $E_{\text{lab}} = 170$ [MeV]

$^{40}\text{Ca}$  (Z=20, N=20)  $^{124}\text{Sn}$  (Z=50, N=74)

中性子移行確率

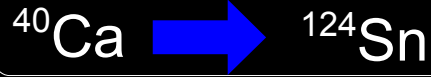


$$P_{\text{P}}(n) = \langle \Phi_f | \delta(n - \hat{N}_{\text{P}}) | \Phi_f \rangle$$

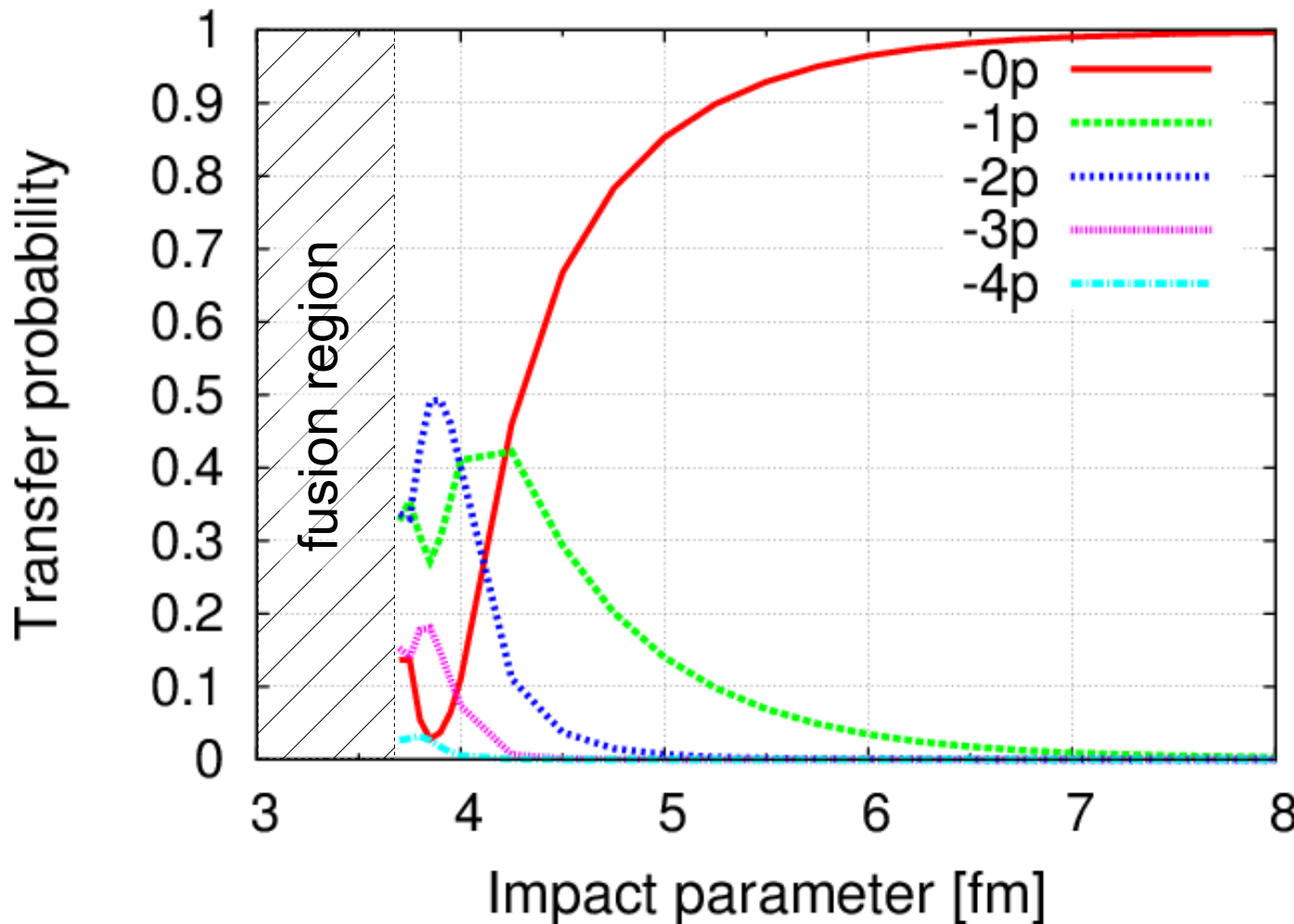


# 4. 結果; $^{40}\text{Ca} + ^{124}\text{Sn}$ , $E_{\text{lab}} = 170$ [MeV] $^{40}\text{Ca}$ (Z=20, N=20) $^{124}\text{Sn}$ (Z=50, N=74)

陽子移行確率



$$P_{\text{P}}(n) = \langle \Phi_f | \delta(n - \hat{N}_{\text{P}}) | \Phi_f \rangle$$

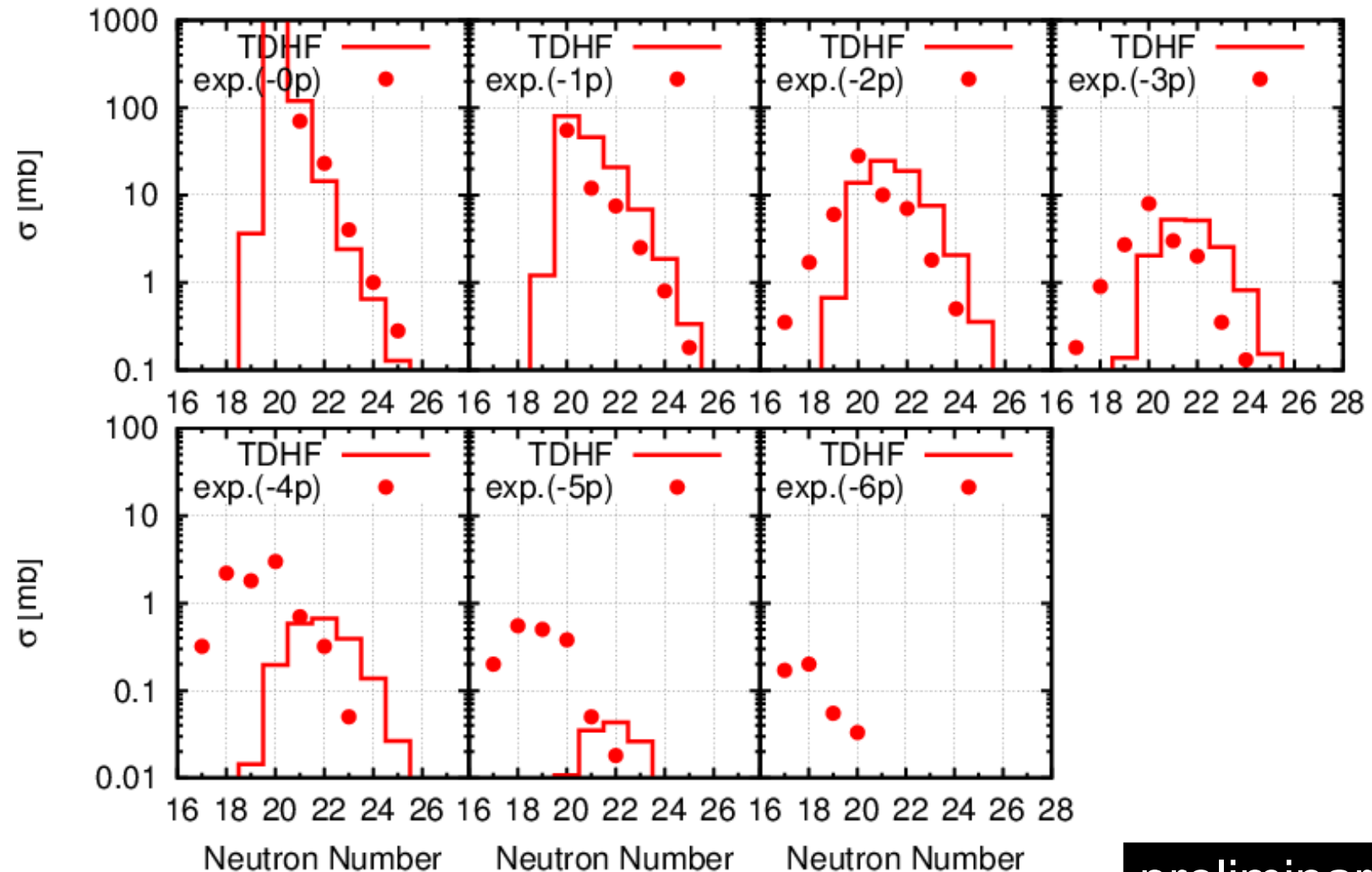


# 4. 結果; $^{40}\text{Ca} + ^{124}\text{Sn}$ , $E_{\text{lab}} = 170$ [MeV]

$^{40}\text{Ca}$  (Z=20, N=20)  
 $^{124}\text{Sn}$  (Z=50, N=74)

## 核子移行反応断面積

$$\sigma_{\text{tr}}(n) = \int_{b_{\text{min}}}^{b_{\text{max}}} 2\pi b P_{\text{P}}(n) db$$



preliminary

# 5. まとめと今後の展望

## まとめ

- ✓ 終状態の多体の波動関数から核子移行確率を計算する方法を示した
- ✓  $^{40}\text{Ca} + ^{124}\text{Sn}$  原子核衝突のTDHF 計算を実行し、核子移行反応断面積を求め、実験値との比較を行った
- ✓ 陽子の移行が少ない反応については実験値と近い値が得られたが  
陽子が多く取れるにつれて、実験値とのずれが見られた

## 今後の展望

- 多核子移行反応が観測されている異なる核種の衝突についても同様に TDHF 計算を実行し、理論の定量性の確認
- 反応後の核子の蒸発 (evaporation) の効果の見積もり