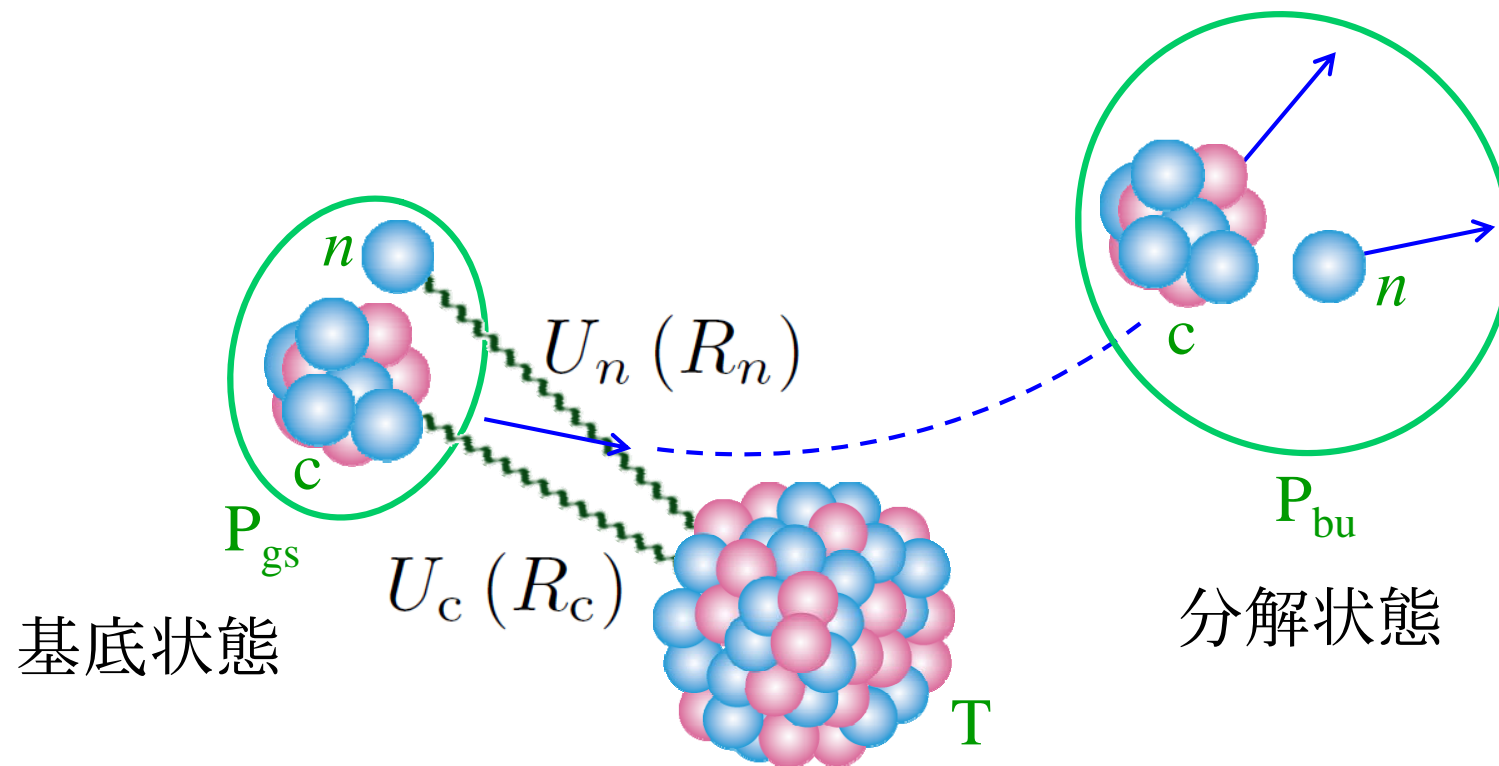


3. 微視的反応論(QCDから核物理へ)

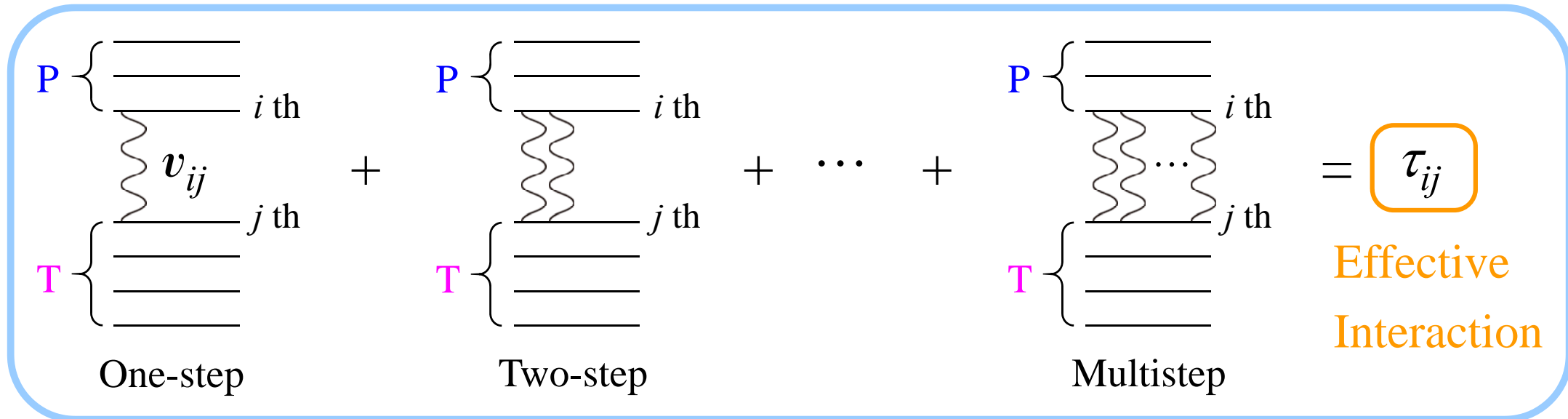
分解反応を記述するひとつの(適切な)モデル



- 分解チャネルはいくつ必要か?
- 分解チャネルをどのように用意するか?
- 一体ポテンシャルはどのようにして与えるか?

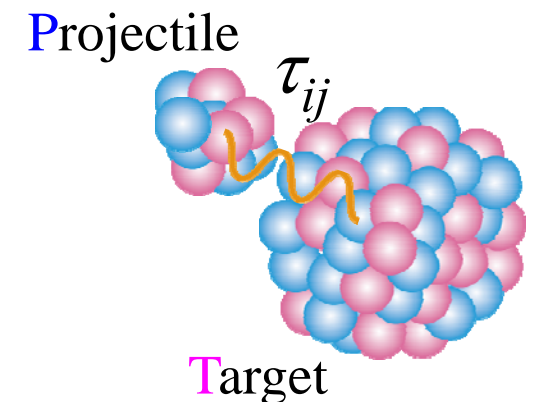
微視的反應論

✓ Multiple-scattering theory for nucleus-nucleus scattering



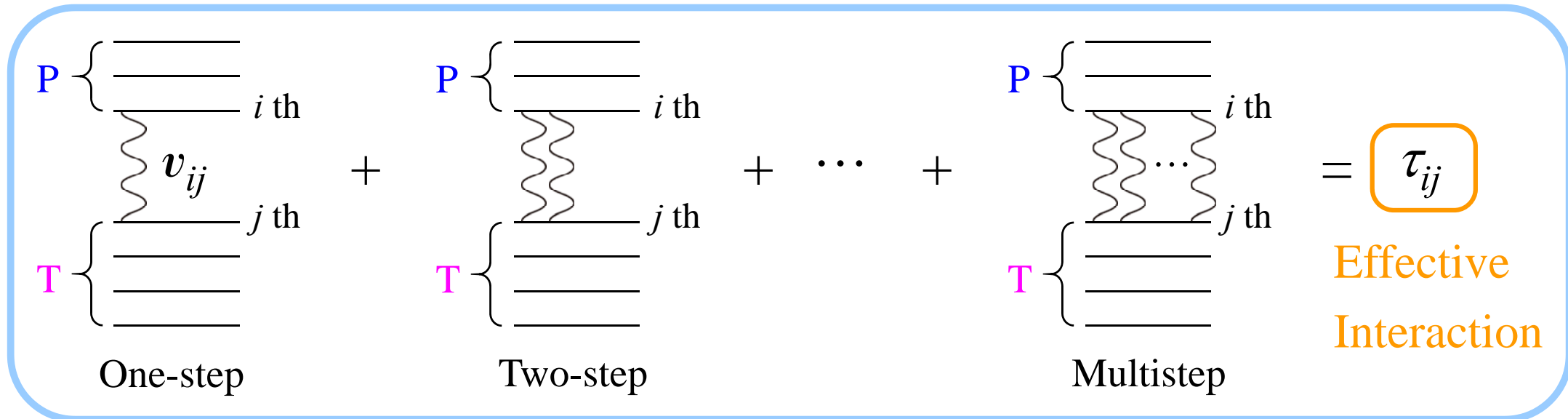
✓ Schrödinger equation

$$\left[K + h_P + h_T + \sum_{i \in P, j \in T} v_{ij} - E \right] \Psi = 0$$



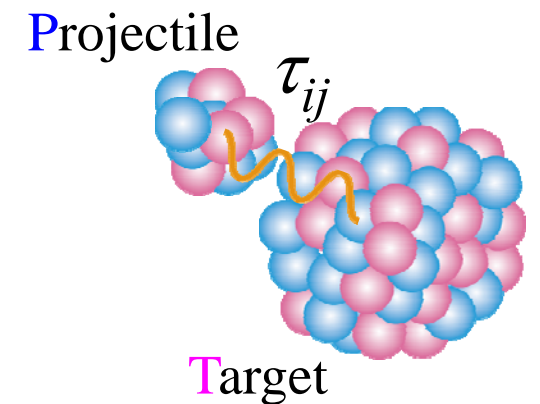
微視的反應論

✓ Multiple-scattering theory for nucleus-nucleus scattering



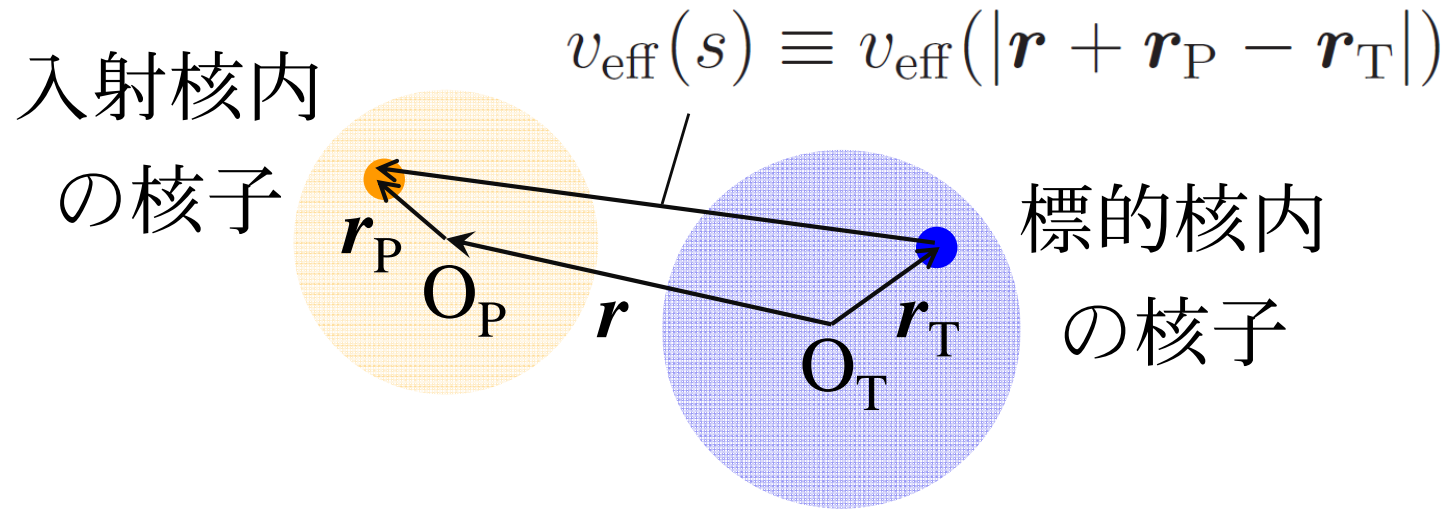
✓ Schrödinger equation with *resummation*

$$\left[K + h_P + h_T + \sum_{i \in P, j \in T} \tau_{ij} - E \right] \Psi = 0$$



2重畳み込みポテンシャル

2核子間有効相互作用の“期待値”を核間相互作用とする。



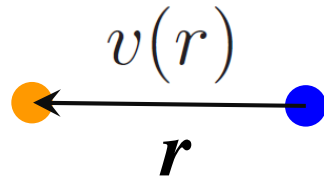
$$U(\mathbf{r}) = \int v_{\text{eff}}(s) \rho_P(\mathbf{r}_P) \rho_T(\mathbf{r}_T) d\mathbf{r}_P d\mathbf{r}_T$$

原子核の密度分布 $\rho_P(\mathbf{r}_P)$, $\rho_T(\mathbf{r}_T)$ は、核構造計算で求められる。

2核子間有効相互作用をどのようにして求めるかが(ここでの)問題。

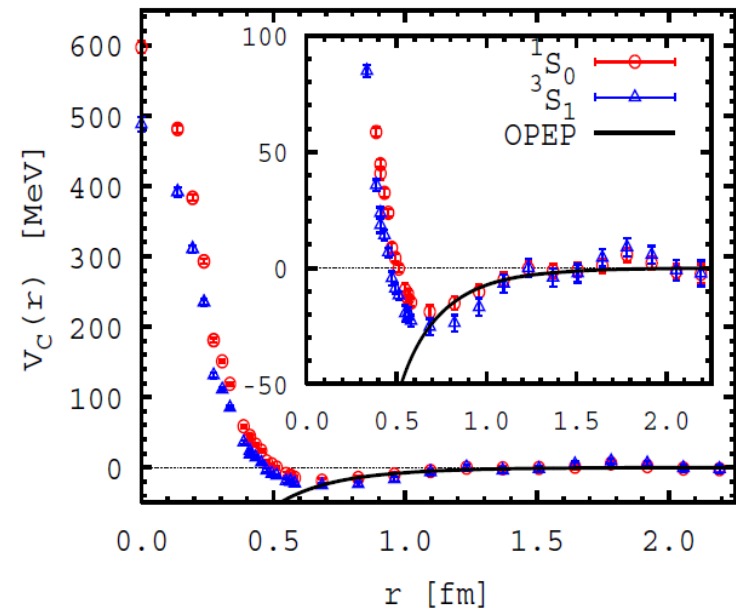
核力による2核子散乱の記述

2核子間にはたらく生の核力 v は非常に良くわかっているとする。
(例えばQCDから決定した v が使える)



シュレディンガー方程式

$$[T_r + v(r) - E] \psi(\mathbf{r}) = 0$$



N. Ishii, S. Aoki, and T. Hatsuda, PRL $\mathbf{99}$, 022001 (2007).

これを解けば、2核子間の相対波動関数 ψ が得られる。

ψ は核力の斥力芯を適切に扱えるほどに正確。

しかし、その正確さを核子多体計算で実現するのは困難。

2核子散乱を記述する有効相互作用

2核子間有効相互作用の定義

$$v(r)\psi(\mathbf{r}) = v_{\text{eff}}(r)e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}$$

自由波(平面波)に核力が無限次作用して正確な波動関数となるプロセスを、1回の相互作用で表現したもの。

(参考)

もとのシュレディンガー方程式と等価で、散乱の境界条件を取り入れたリップマン-シュウインガー方程式

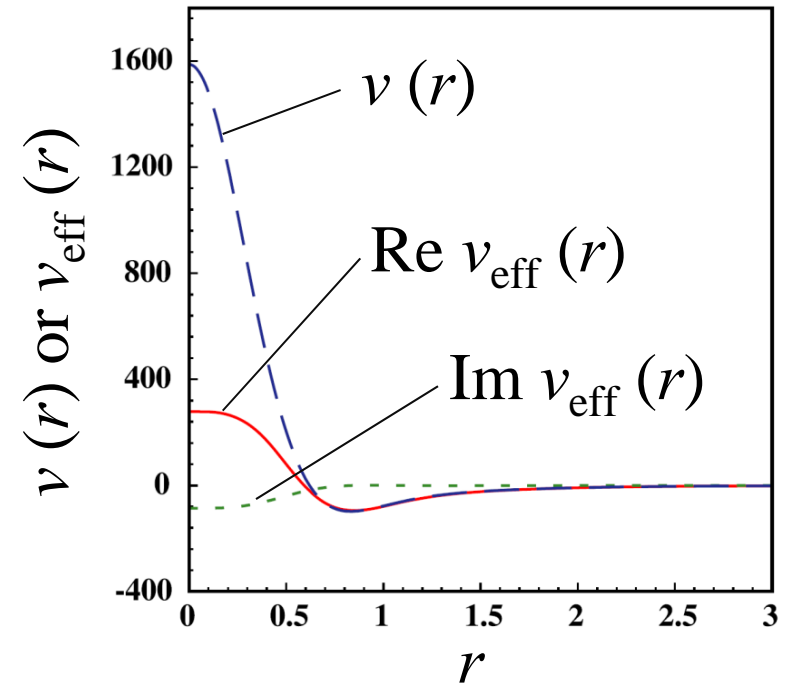
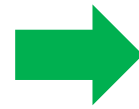
$$\begin{aligned}\psi(\mathbf{r}) &= e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} + \frac{1}{E - T_r + i\epsilon} v(r)\psi(\mathbf{r}) \\ &= e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} + \frac{1}{E - T_r + i\epsilon} v(r) \left[e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} + \frac{1}{E - T_r + i\epsilon} v(r)\psi(\mathbf{r}) \right] = \dots\end{aligned}$$

有効核力の性質と多体補正

- 有効相互作用は斥力芯を持たず、扱いが容易(多体計算向き)。
- エネルギーに依存する複素ポテンシャル。

生の核力と有効核力の比較例

M. Yahiro, Minomo, O, Kawai, PTP120, 767 (2008).



- 原子核-原子核散乱に対応する有効相互作用の厳密計算は極めて困難であるが、**g 行列理論**を用いることで、原子核(有限密度系)の多体効果を近似的に取り入れる事が可能。

g行列

無限に広がった核物質(密度 ρ)の中での2核子間相互作用を、次のベーテ-ゴールドストーン方程式を解いて求める。

$$g(E, \rho) = v + v \frac{\boxed{Q} \text{ パウリの排他演算子}}{E - K_0 - K_1 - \boxed{U_0} - \boxed{U_1} + i\varepsilon} g(E, \rho)$$

— 一体ポテンシャル

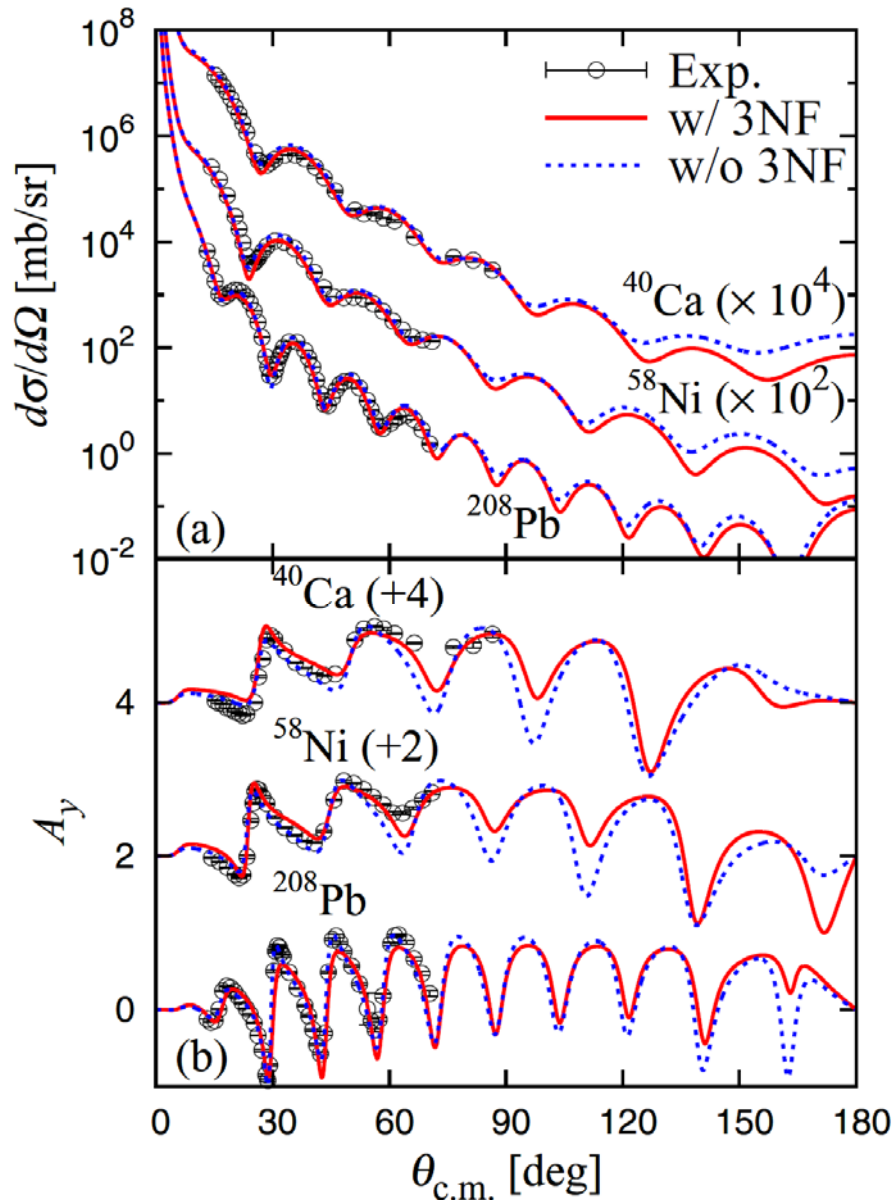
$$U_i = U(\mathbf{k}_i, E_i; \rho) = \sum_{k' \leq \boxed{k_F} \text{ フェルミ波数 } (\propto \rho^{1/3})} \langle \mathbf{k}_i, \mathbf{k}' | g(E_i + e') | \mathbf{k}_i, \mathbf{k}' \rangle$$

$$\equiv V(\mathbf{k}_i, E_i; \rho) + iW(\mathbf{k}_i, E_i; \rho)$$

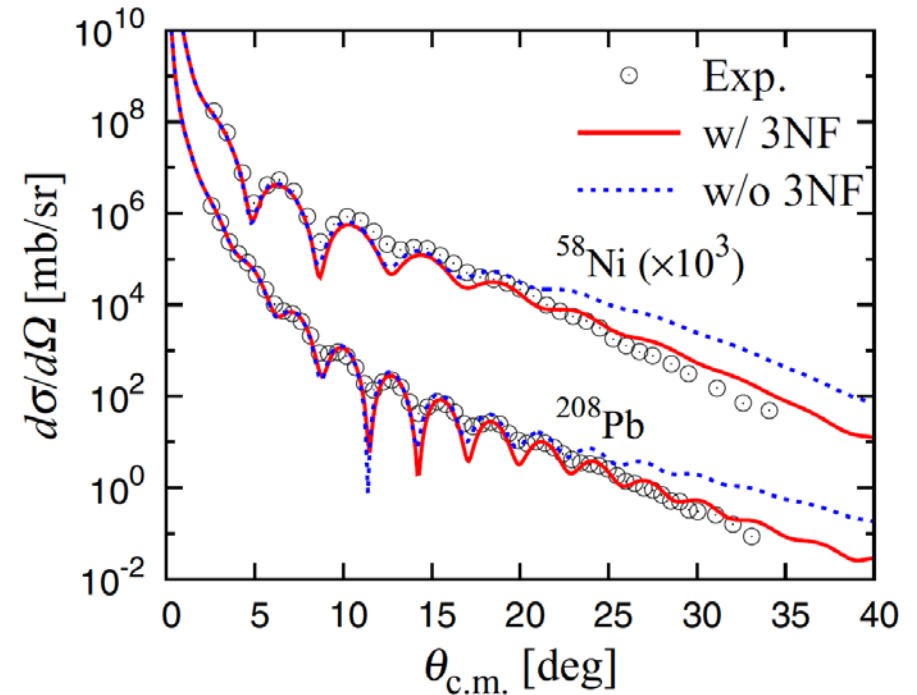
$$e' = \frac{\hbar^2 k'^2}{2m} + V(\mathbf{k}', e'; \rho) \quad E_i = \frac{\hbar^2 k_i^2}{2m} + V(\mathbf{k}_i, E_i; \rho)$$

微視的反応計算の成功例

p scattering at 65 MeV

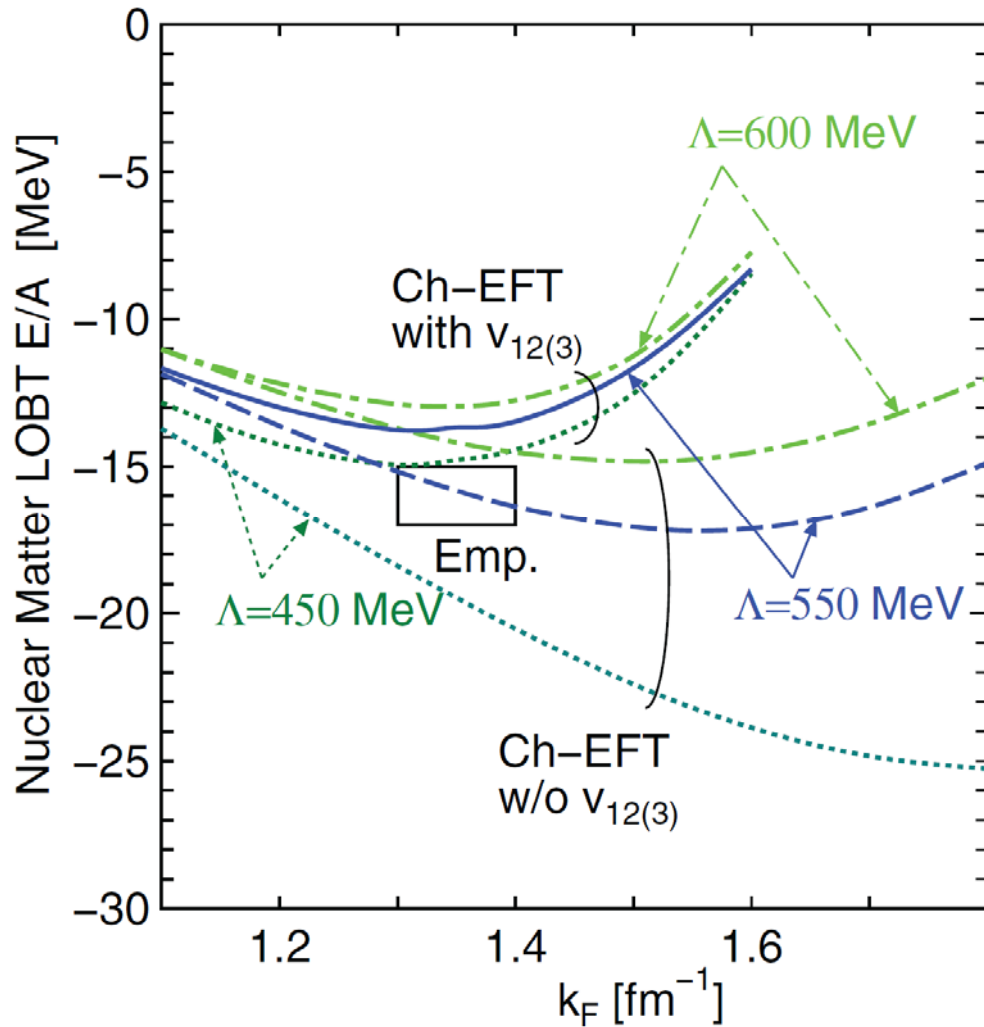


α scattering at 72 A MeV

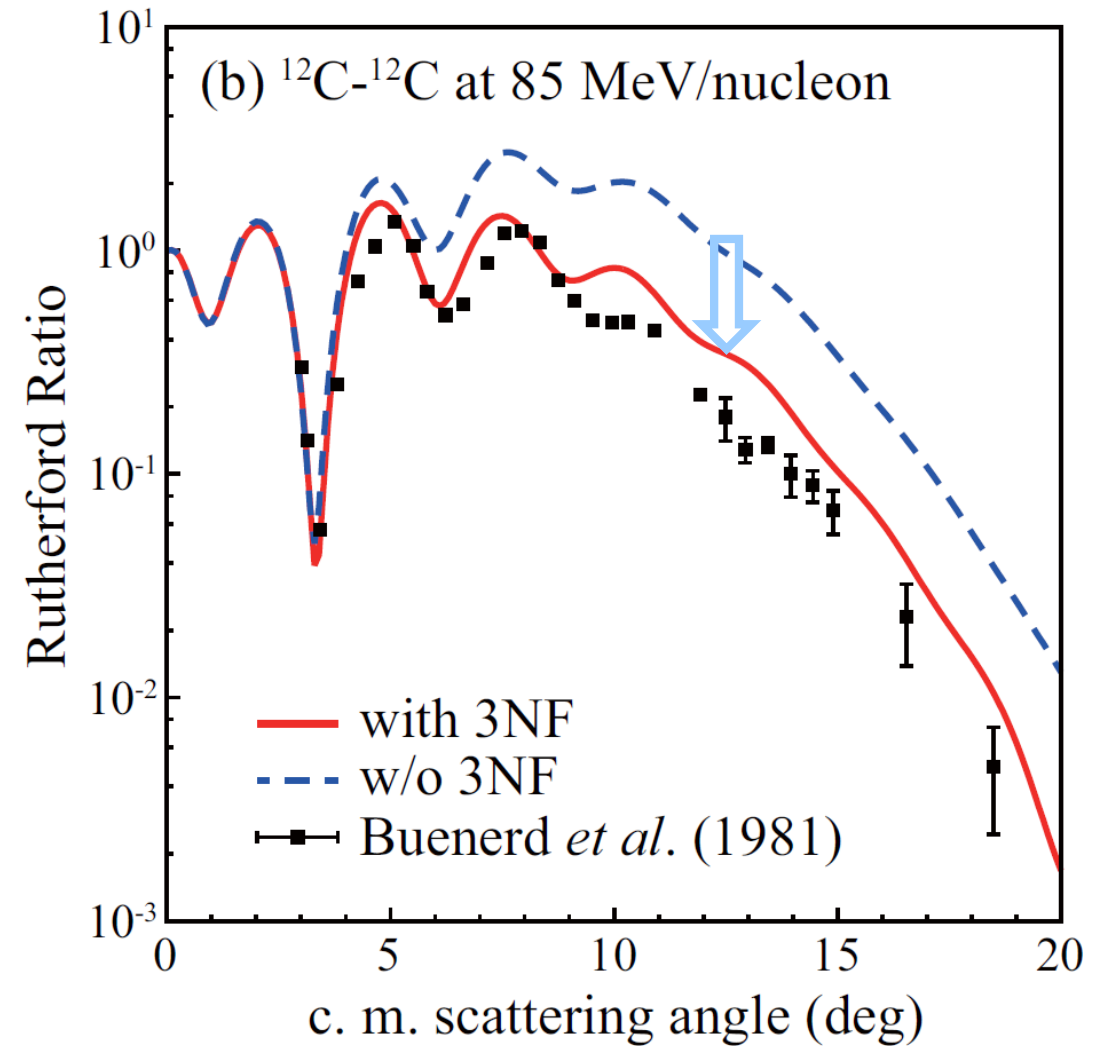


全て、調整パラメータなし

カイラル3核子力効果



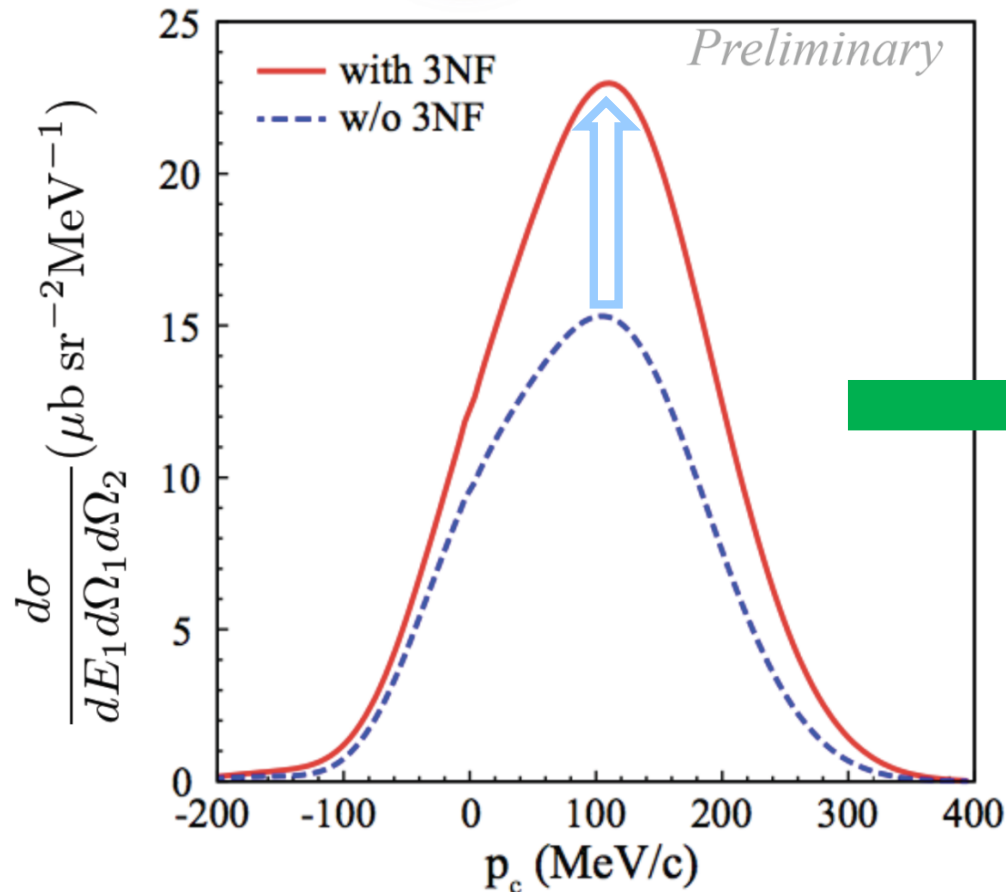
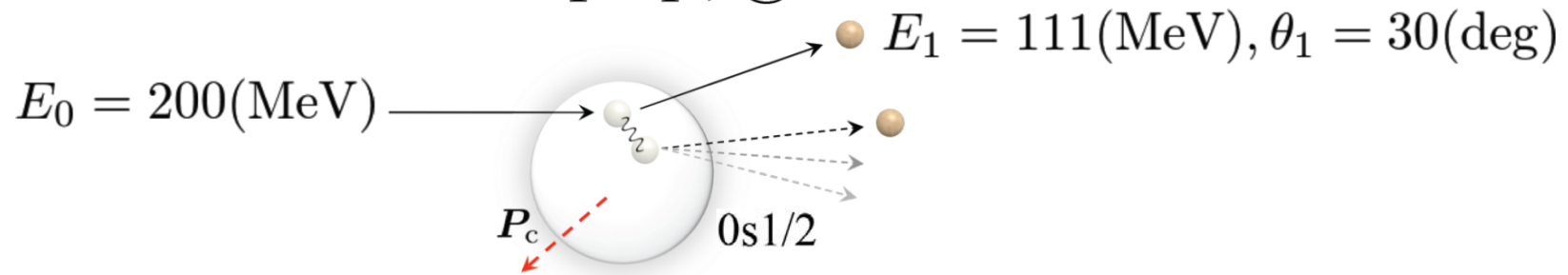
M. Kohno, PRC**88**, 064005 (2013).



K. Minomo, Toyokawa, Kohno, Yahiro, PRC**90**, 051601 (2015).
[see also T. Furumoto, Sakuragi, Yamamoto, PRC**80**, 044614 (2009)]

3核子力効果のプローブとしての(p,2p)反応

$^{40}\text{Ca}(p,2p)@200\text{MeV}$

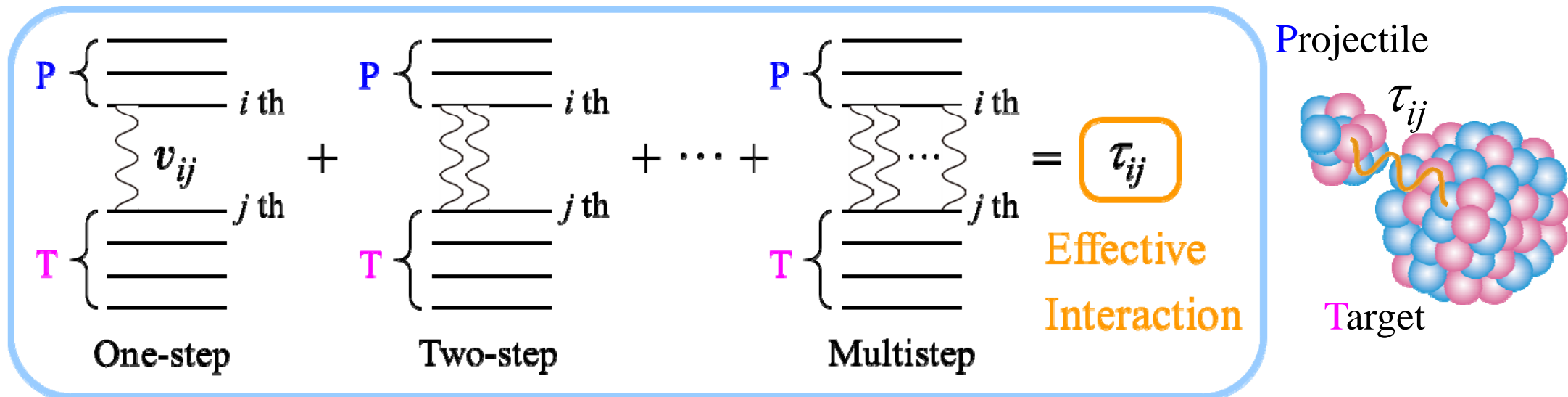


Spin observables?

Phenomenology to Microscopic Theory

TABLE I. Optical-Model Parameters Neutrons

NUCLIDE	ENERGY (MEV)	REAL POTENTIAL			VOL.IMAG. POTENTIAL			SURF.IMAG. POTENTIAL			SPIN-ORBIT POTENTIAL			ST	SR	FIT	NOTE	REF.
		V	R	A	W	RW	AW	WD	RD	AD	VSO	RSO	ASO					
AL	1.	40.	1.25*	0.65*				5.0G*	1.25*	0.98*	10.*	1.25*	0.65*	3520	1340	S3	15	GIL63
AL	1.5	47.4	1.25*	0.46				6.3G	1.25*	0.98*	10.*	1.25*	0.46	3204		S1	10	KOR68
AL	2.47	48.0	1.14	0.65				8.42	1.19	0.48*	8.0*	1.14	0.65	2530	1270	S2	2	HOL71
AL	3.00	47.9	1.13	0.72				7.35	1.08	0.48*	8.0*	1.13	0.72	2520	1250	S2	2	HOL71
AL	3.49	48.7	1.18	0.61				8.46	1.29	0.48*	8.0*	1.18	0.61	2360	1130	S1	2	HOL71
AL	4.00	49.1	1.20	0.62				7.99	1.26	0.48*	8.0*	1.20	0.62	2290	1090	S2	2	HOL71
AL	4.56	50.2	1.18	0.59				8.38	1.26	0.48*	8.0*	1.18	0.59	2060	1020	S1	2	HOL71
AL	6.09	47.8	1.20	0.67				8.23	1.23	0.48*	8.0*	1.20	0.67	1880	1070	S3	2	HOL71
AL	7.	45.5	1.25*	0.65*				9.5G	1.25*	0.98*	8.6	1.25*	0.65*			X3		BJO58
AL	7.05	49.1	1.20	0.68				7.90	1.20	0.48*	8.0*	1.20	0.68	1800	1040	S2	2	HOL71
AL	7.97	49.4	1.20	0.69				12.1	1.30	0.41	9.8	1.20	0.69			S1	2	BRA72

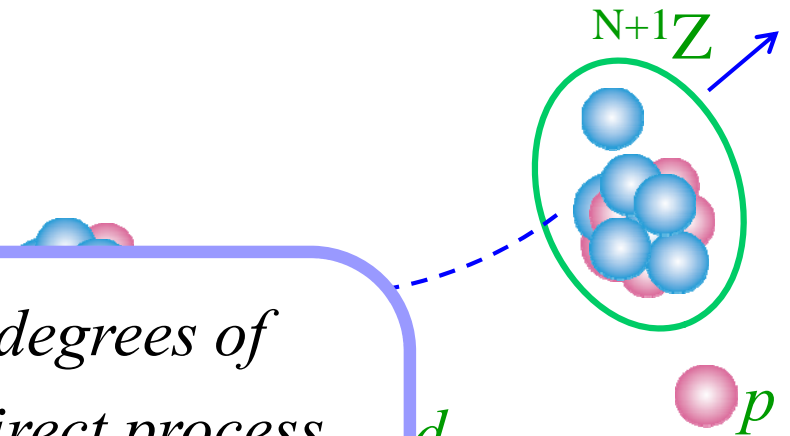


Microscopic Effective Reaction Theory

Inelastic Scattering

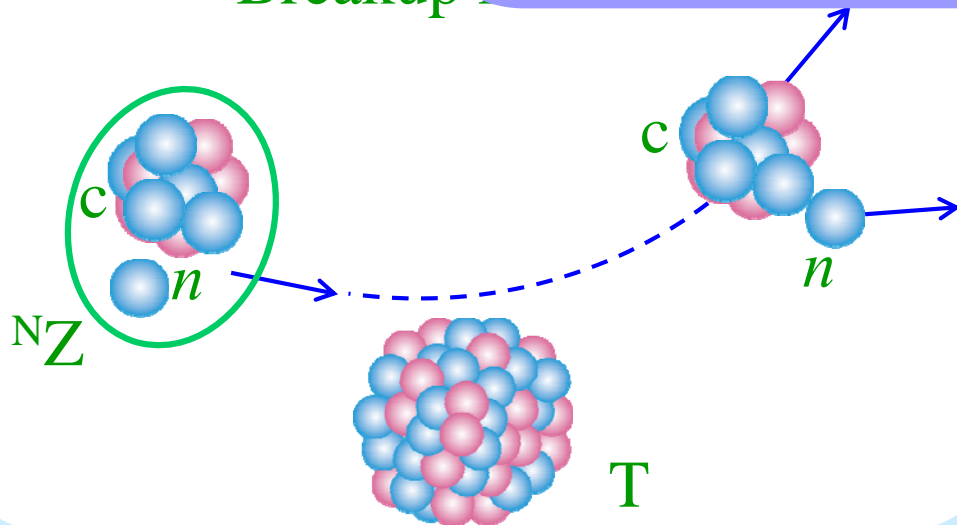


Transfer Reaction

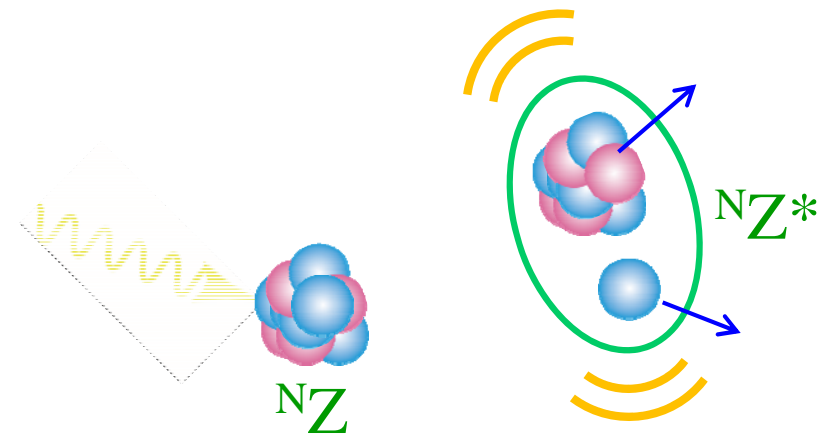


We must select essential degrees of freedom for describing a direct process of interest with a desired accuracy

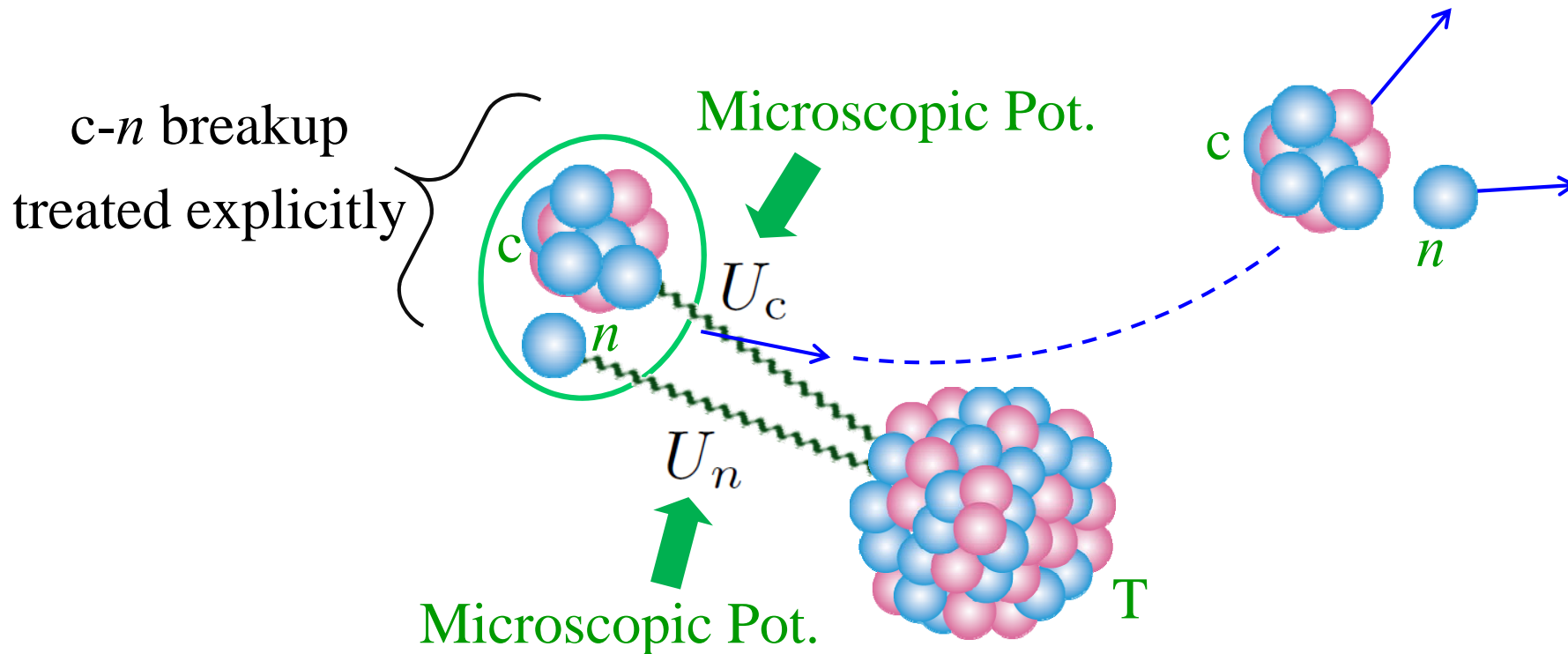
Breakup



Integration



Microscopic CDCC



Microscopic Effective Reaction Theory (MERT)

1. Degrees of freedom selected (= setting model space)
2. Distorting (“Mean-field”) potential generated microscopically
3. Direct process due to residual interaction calculated with 1. and 2.

微視的反応論のまとめ

- 原子核-原子核散乱を記述する多重散乱理論を紹介した。
- 多重散乱理論の主要構成要素は、2核子間の相互作用を無限次くり込んだ有効相互作用である。
- 核内における有効相互作用は、近似的にg行列理論によって求めることができ、高い成功を収めている。
- 核物質の密度の飽和性を再現するという意味での3体力効果が注目され、原子核反応での観測の可能性が示唆されている。
- (近似の範囲で)核力に正しく立脚した核反応論が構築され、微視的核反応研究は大きな潮流となっている。Lattice QCDによって得られた核力や3体力に基づく反応研究の萌芽が期待される。