

ノックアウト反応の正確な描述に基づく 核内重陽子・ダイニュートロンクラスターの実証

「重陽子・ダイニュートロンは原子核のサブユニットたり得るか？」
という問に対する核反応理論からのアプローチ

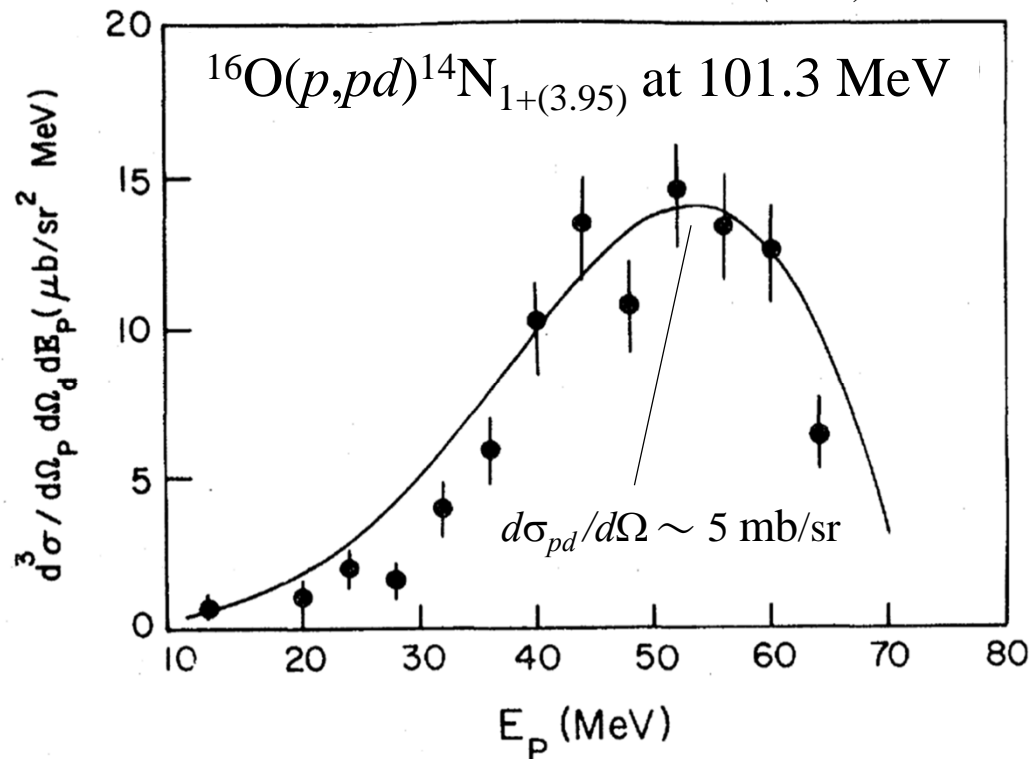


Kazuyuki Ogata

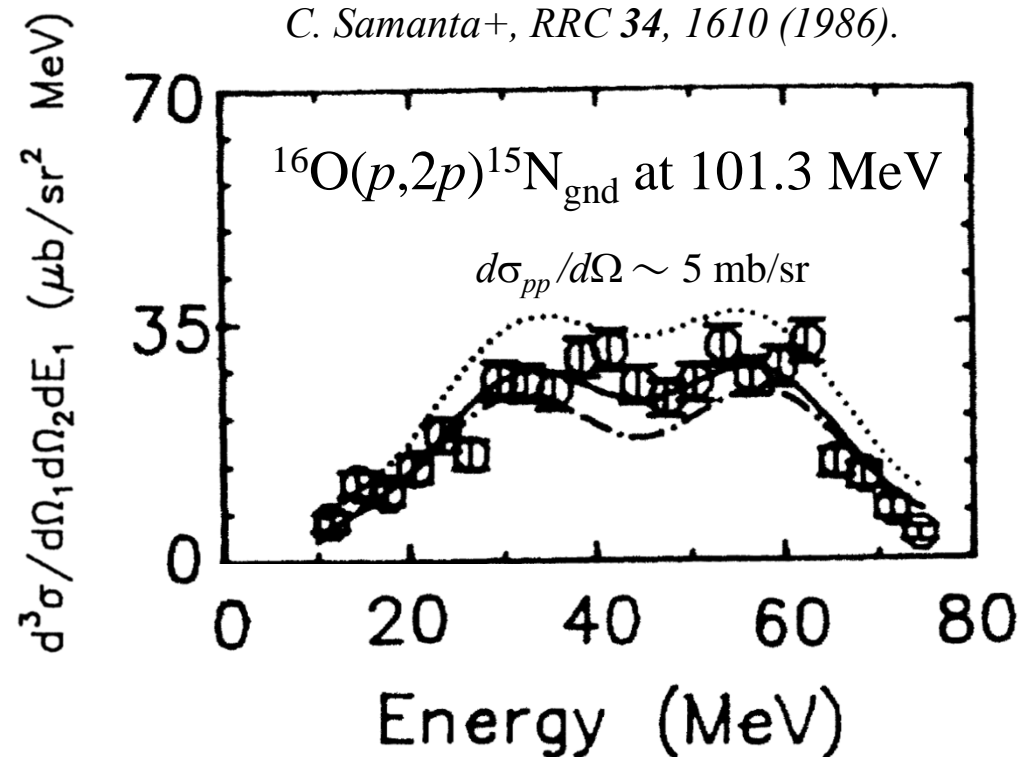
RCNP, Osaka University

そもそものきっかけ(実験事実)

C. Samanta+, RRC 26, 1379 (1982).



C. Samanta+, RRC 34, 1610 (1986).



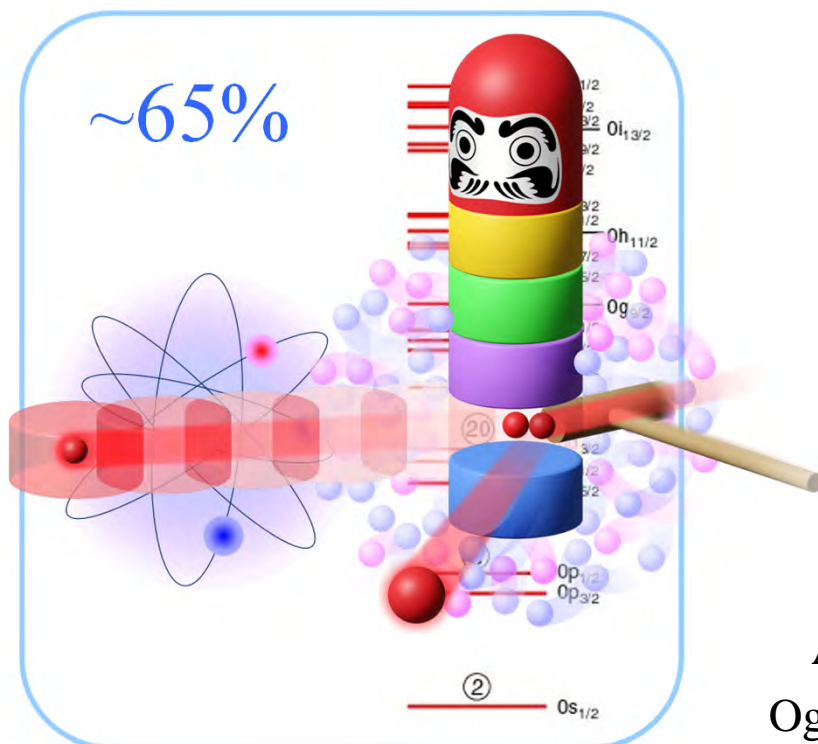
この“異常に”大きな重陽子ノックアウト断面積は、核内重陽子の存在確率の大きさを表しているとみなしてよいのか？

cf. $^{11}\text{Li}(p,pd)$ の予備実験結果

Knock it out of the nucleus

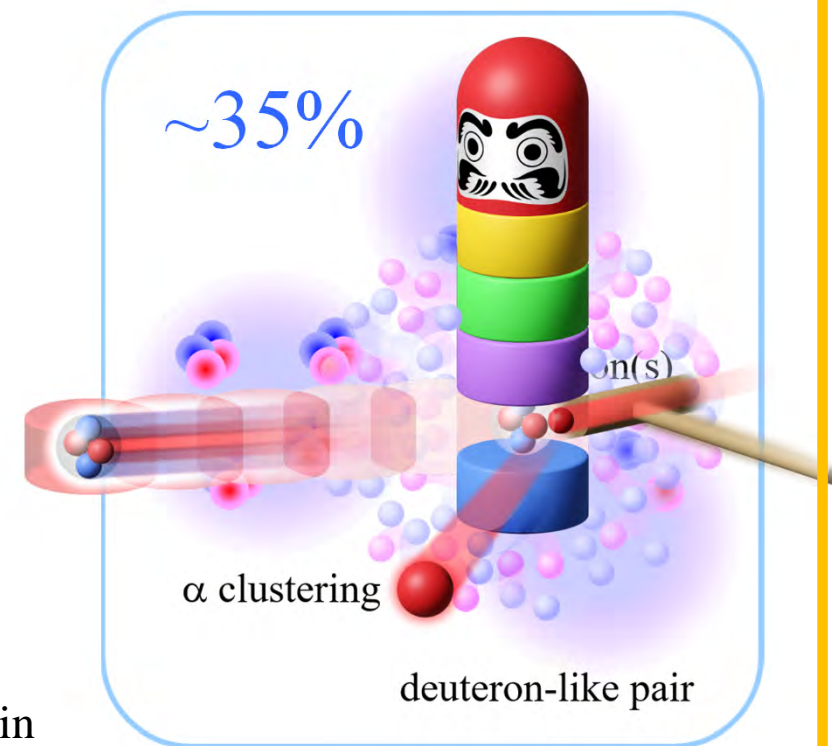
SEASTAR Project (RIBF)

e.g. Double Magicity of ^{78}Ni (Nature)



Independent Particle nature
(survived from many-body corr.)

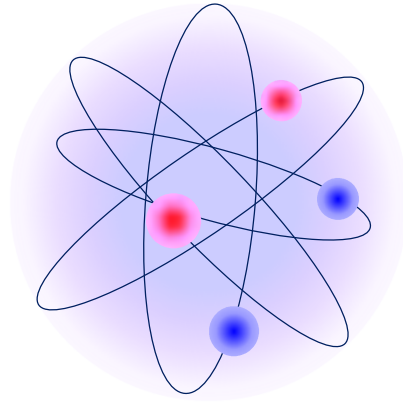
ONOKORO Project (RIBF/RCNP/HIMAC)



Clustering nature
(breaking the IP nature)

A review article (解説) by
Ogata & Uesaka will appear in
the JPS magazine (Sep. 2021).

(p,2p)

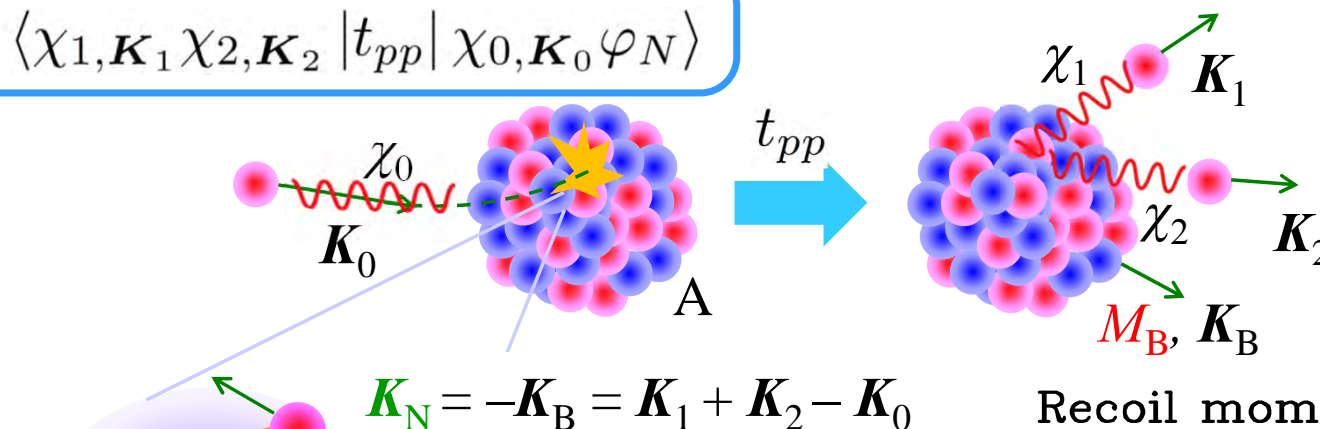


The (p,2p) reaction: a probe for s.p. structure

歪曲波インパルス近似(DWIA)

$$T = \langle \chi_1, \mathbf{K}_1 \chi_2, \mathbf{K}_2 | t_{pp} | \chi_0, \mathbf{K}_0 \varphi_N \rangle$$

T. Wakasa, KO, and T. Noro, PPNP 96, 32 (2017).

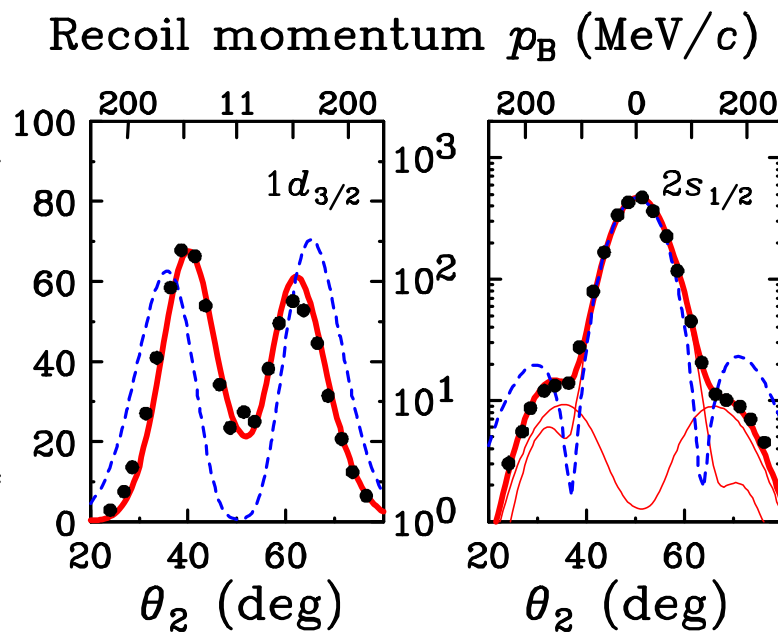


A “snapshot” of proton in a s.p. orbit in momentum space

Triple-diff. X-sec. (TDX)

$$d^3\sigma / d\Omega_1 d\Omega_2 dE_1 \quad (\mu\text{b sr}^{-2} \text{MeV}^{-1})$$

\mathbf{K}_1 : fixed

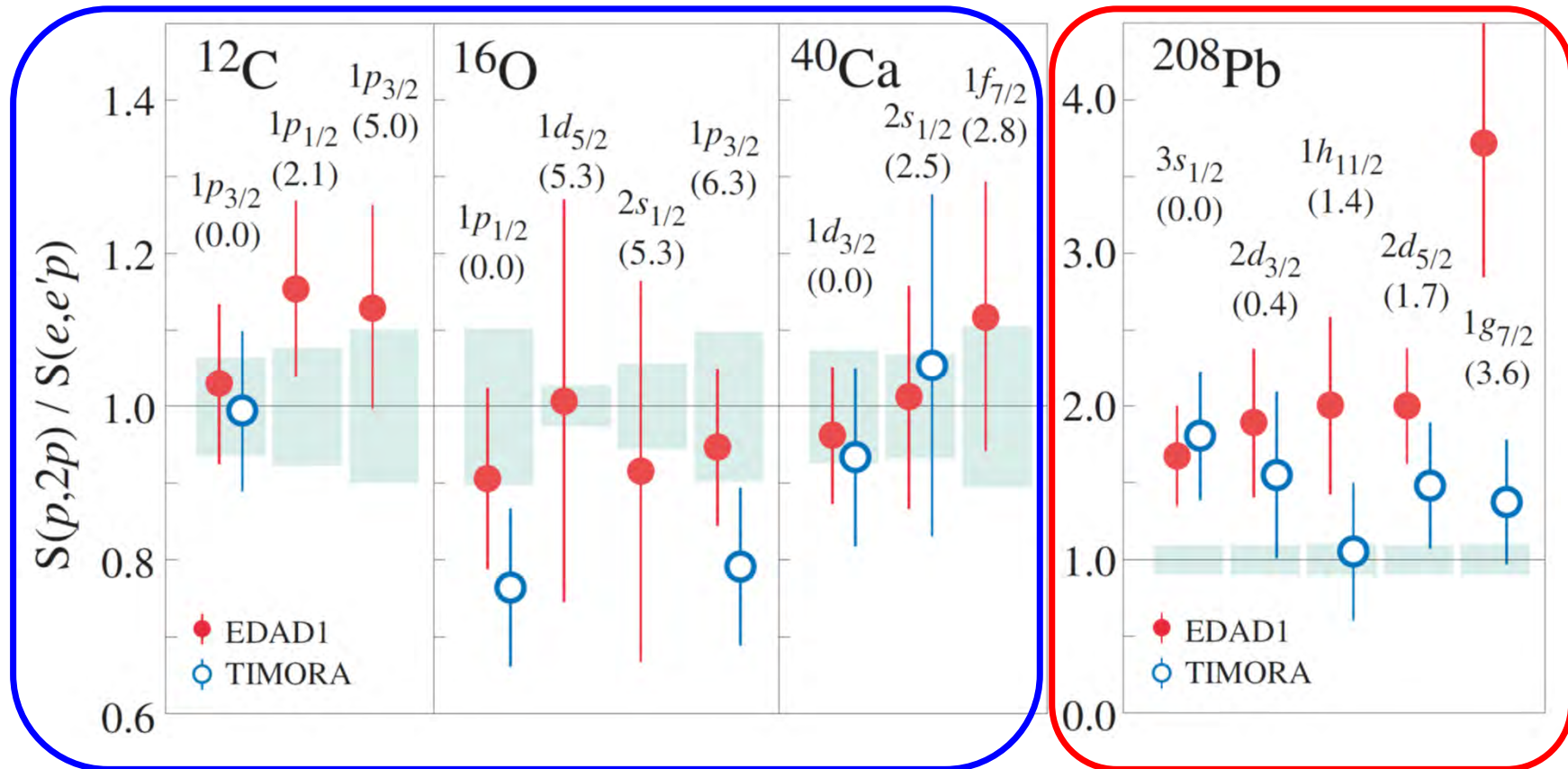


$^{40}\text{Ca}(p,2p)^{39}\text{K}$ @ 392 MeV (RCNP data)

Consistency between S_{p2p} and $S_{ee'p}$

Based on data at 392 MeV taken at RCNP

T. Noro+, PTEP 2020, 093D02.

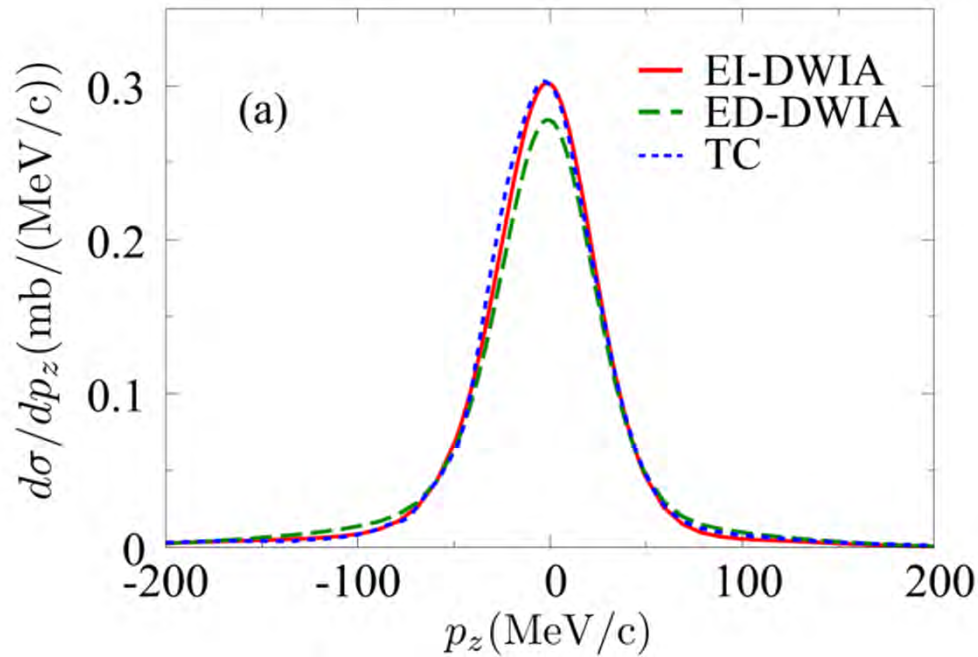


- ✓ They are consistent within uncertainties of 15–20 % **except for ^{208}Pb .**
- ✓ ppN can be applied to n KO and KO for unstable nuclei.

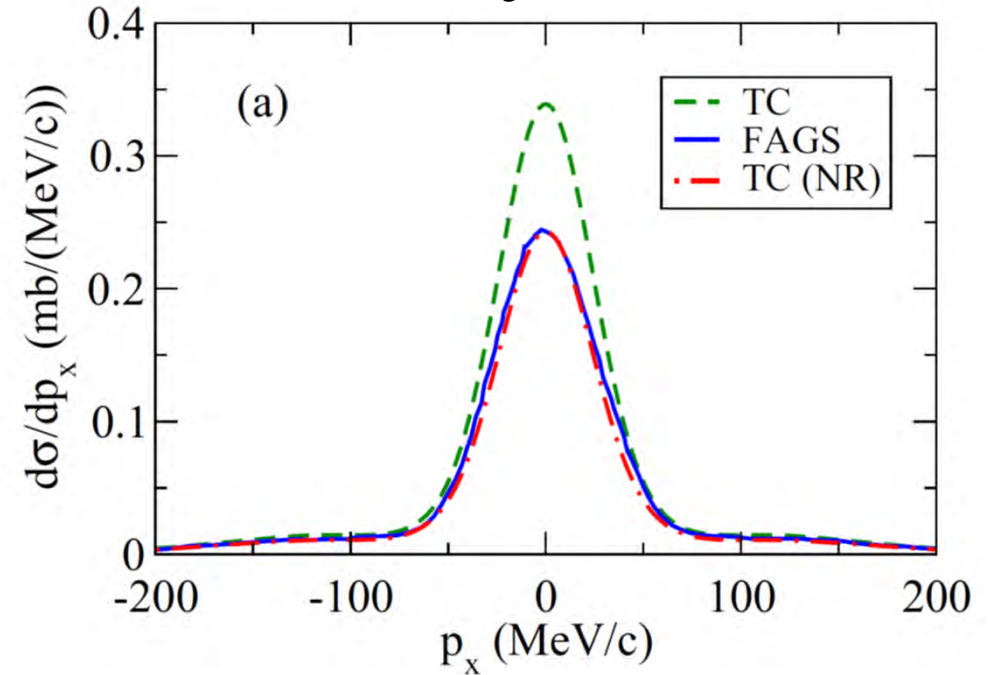
Benchmarking the reaction models

K. Yoshida, M. Gómez-Ramos, KO, and A. M. Moro, PRC 97, 024608 (2018).

$^{15}\text{C}(p,pn)^{14}\text{C}_{\text{g.s.}}$ at 420 MeV/u

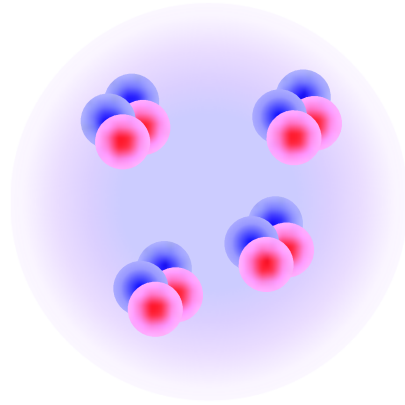


$^{15}\text{C}(p,pn)^{14}\text{C}_{\text{g.s.}}$ at 420 MeV/u



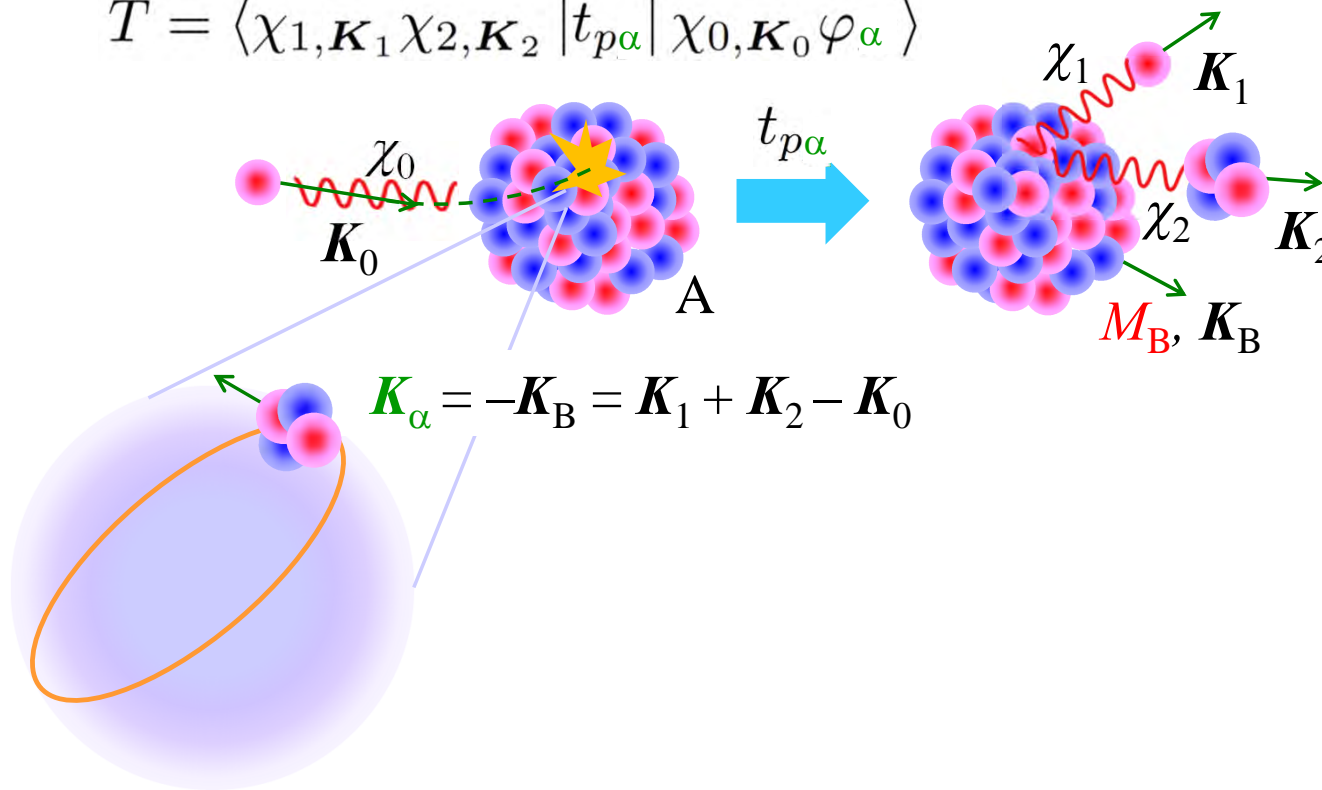
- ✓ Transfer to the Continuum model (TC) justifies the impulse approximation
- ✓ DWIA justifies simplification of optical potentials adopted by TC.
- ✓ Faddeev-AGS validates DWIA and TC.

(p,p α)



The (p,p α) reaction: a probe for α cluster structure

$$T = \langle \chi_1, \mathbf{K}_1 \chi_2, \mathbf{K}_2 | t_{p\alpha} | \chi_0, \mathbf{K}_0 \varphi_\alpha \rangle$$



A “snapshot” of α cluster
in momentum space

重い原子核中に α 粒子はいるか？

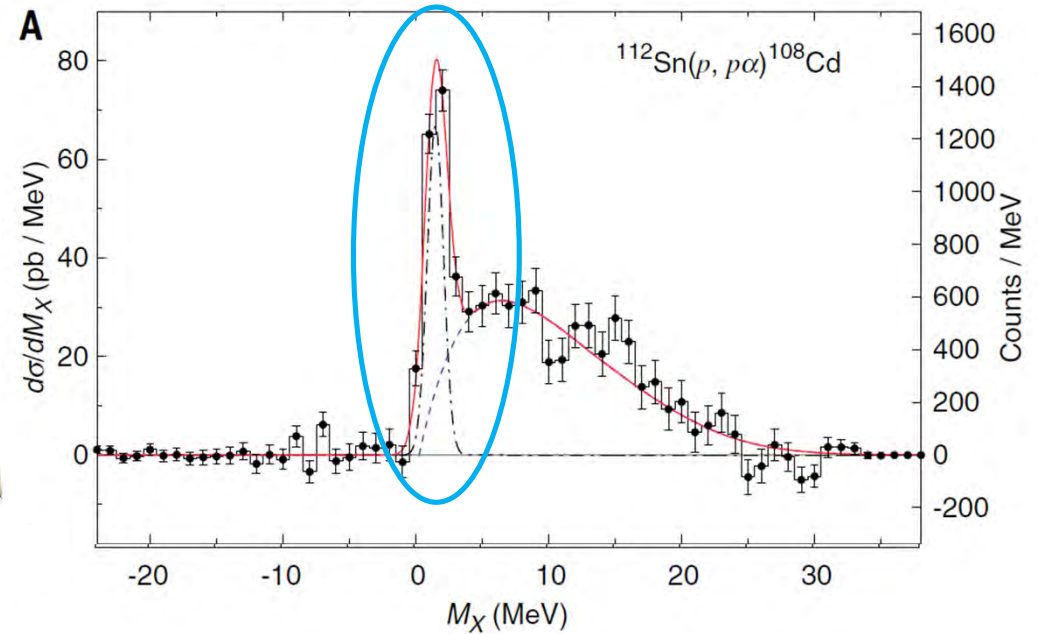
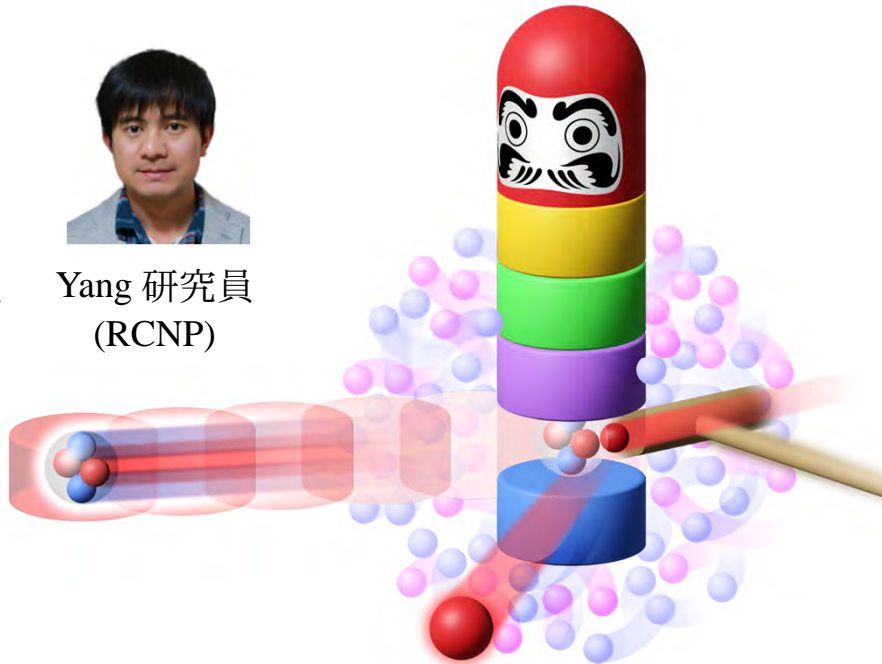
J. Tanaka, Z. Yang+, *Science* 371, 260 (2021).



田中 研究員
(理研)



Yang 研究員
(RCNP)

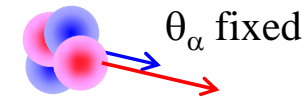
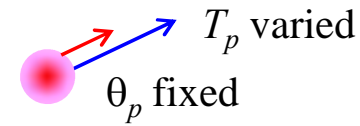
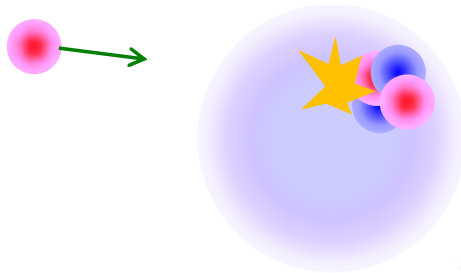


ラザフォードによる α 線の発見(特定)から**110年以上**を経て、
重い原子核中にいる α 粒子の観測に初めて成功。

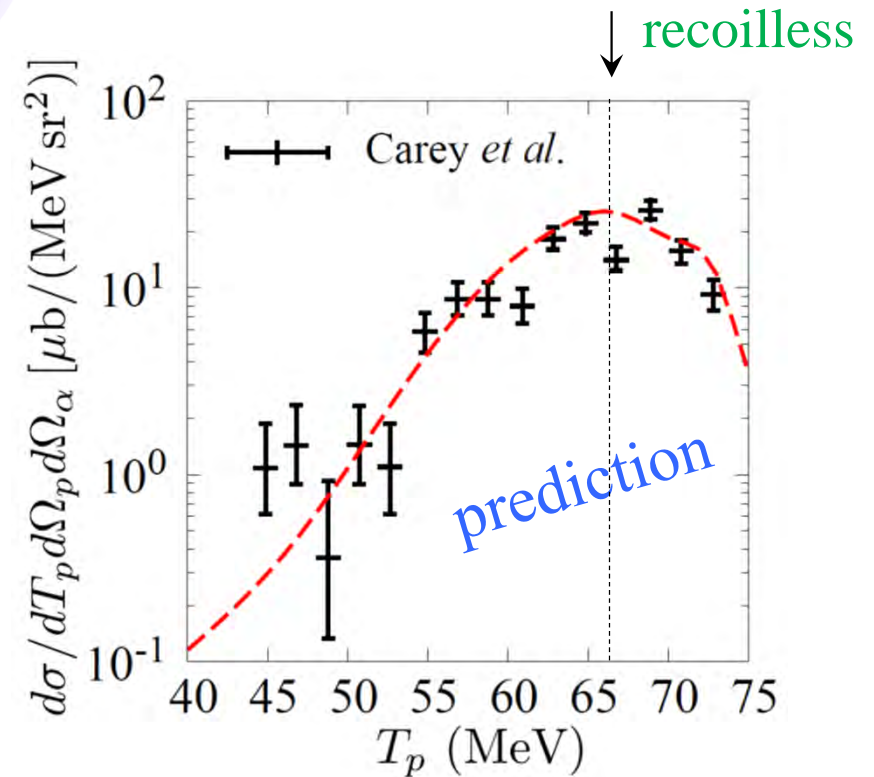
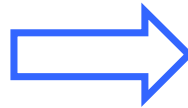
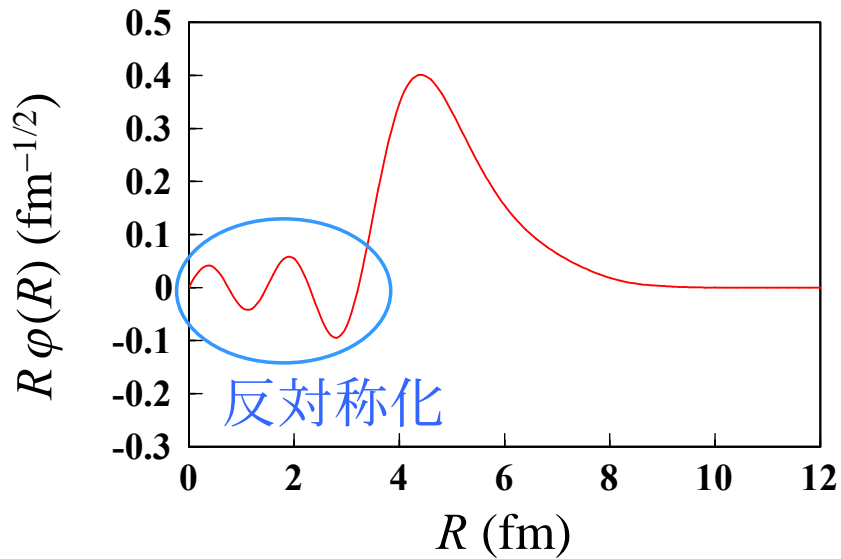
(実験は**大阪大学核物理研究センター**にて実施)

$^{20}\text{Ne}(p,p\alpha)$ at 101.5 MeV

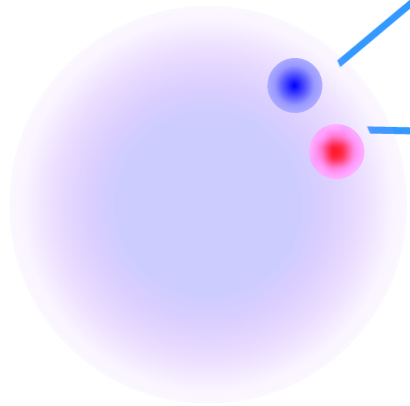
K. Yoshida+, *PRC* **100**, 044601 (2019).



s.p. α wave function AMD (20-body calc.)



$(p, pd)?$



本研究の開発要素

核内重陽子が重陽子のまま叩き出される経路

② 核内重陽子がバラバラになって叩き出される経路

〰〰〰 = Final State Int.

重陽子のまま散乱

(p, pd) 反応

① FSIによる分解

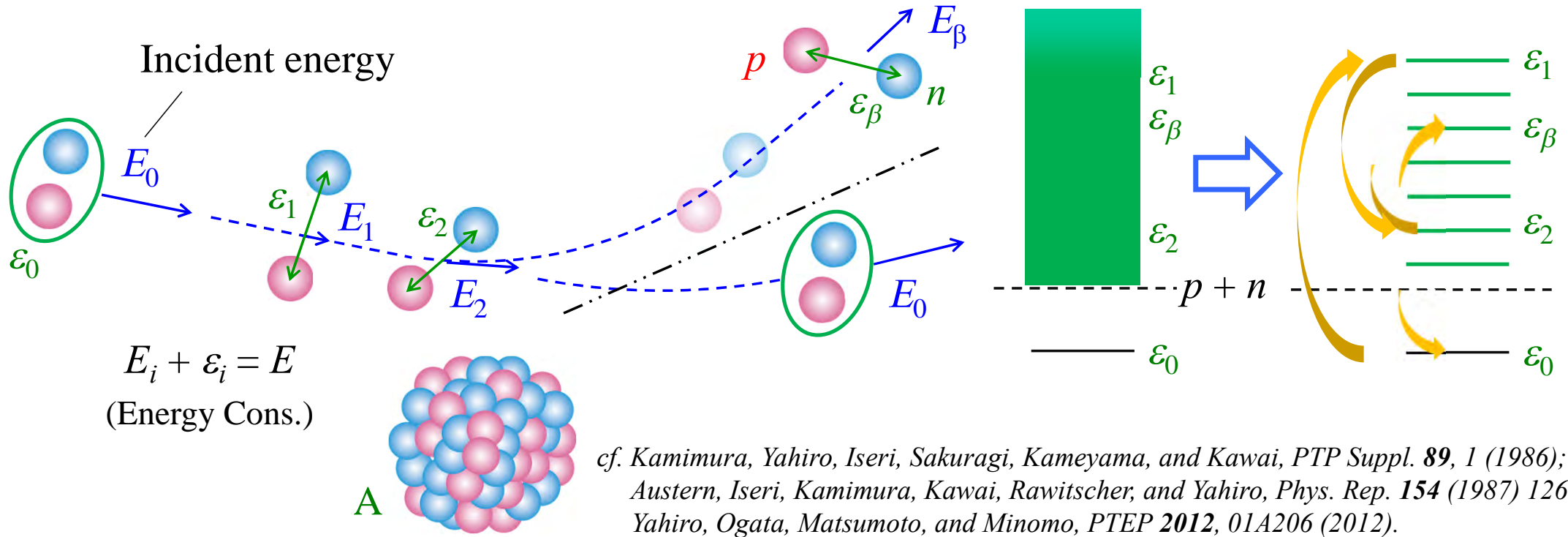
分解率 ~ 再形成率

③ FSIによる重陽子の再形成

バラバラの2核子のまま散乱

(p, ppn) 反応

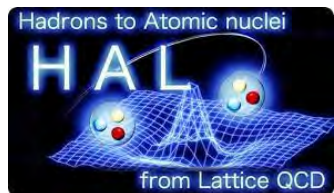
連続状態離散化チャンネル結合法(CDCC)



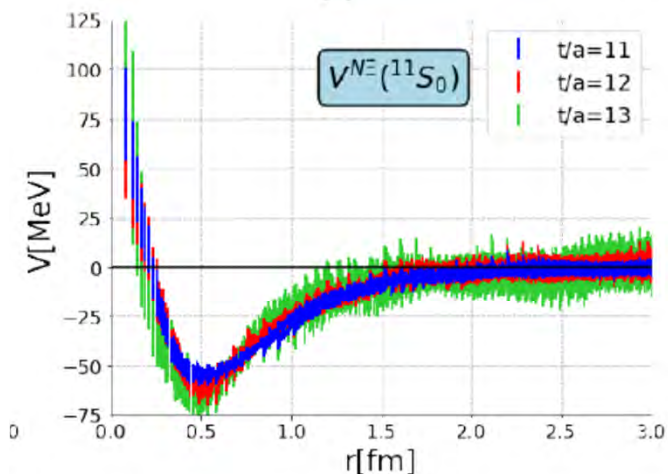
この反応の波動関数を時間反転させたものを放出重陽子の散乱波とする

(参考) CDCC + LQCD for d - Ξ correlation function

K. Sasaki+ (HAL-QCD), Nucl. Phys. A 998, 121737 (2020).



s-wave N- Ξ pot. by LQCD

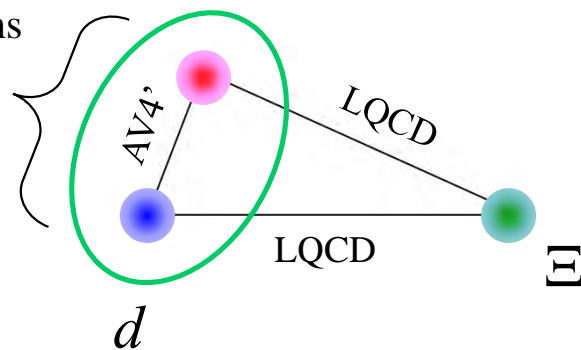


All interactions are isospin-spin dependent

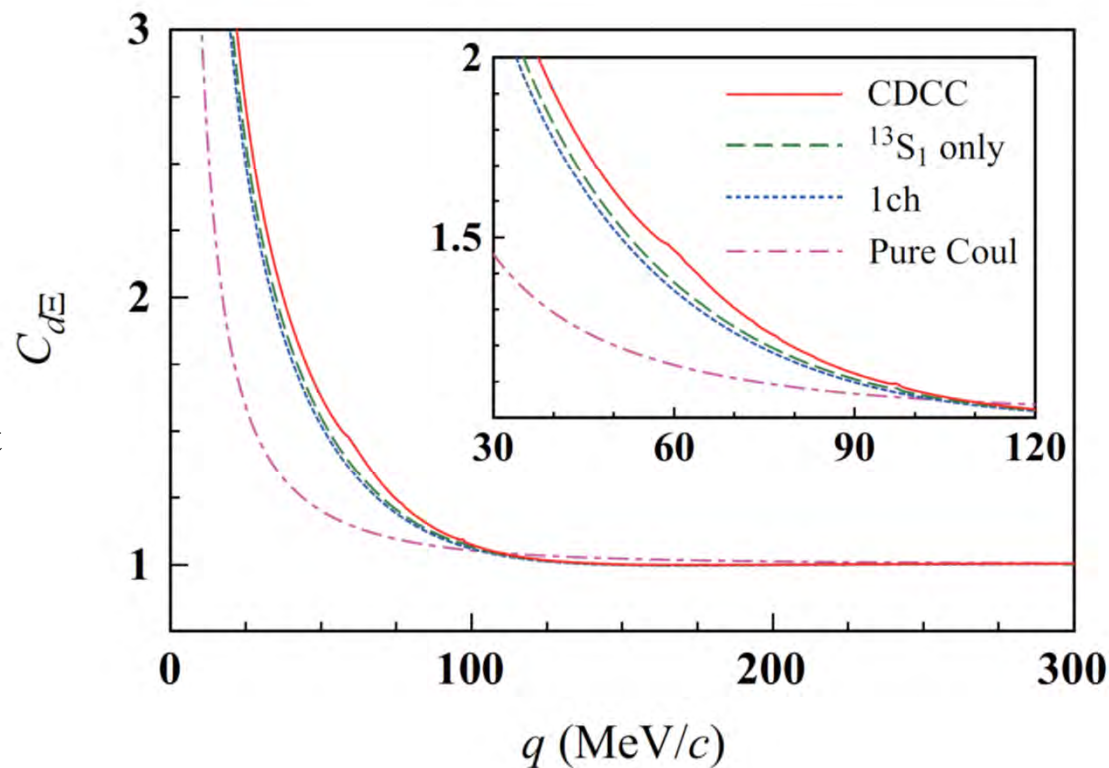
$^{13}S_1$: g.s. + 10 bins

$^{31}S_1$: 400 bins

↓
411 channels



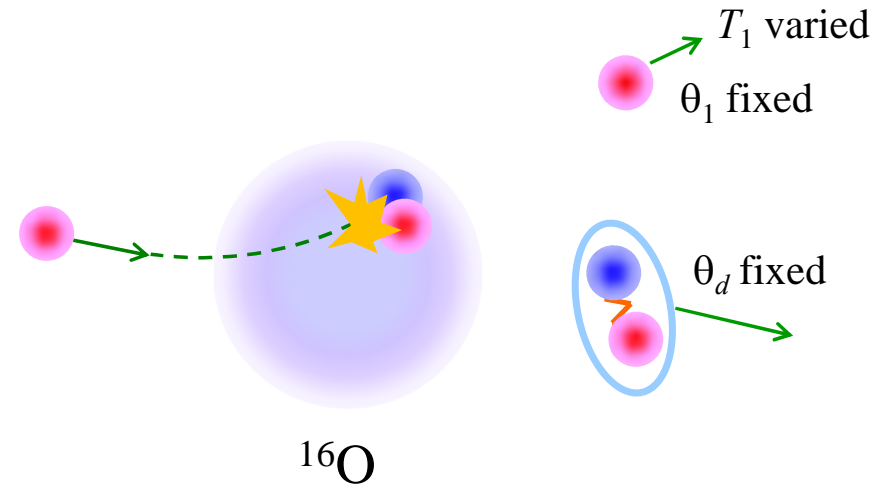
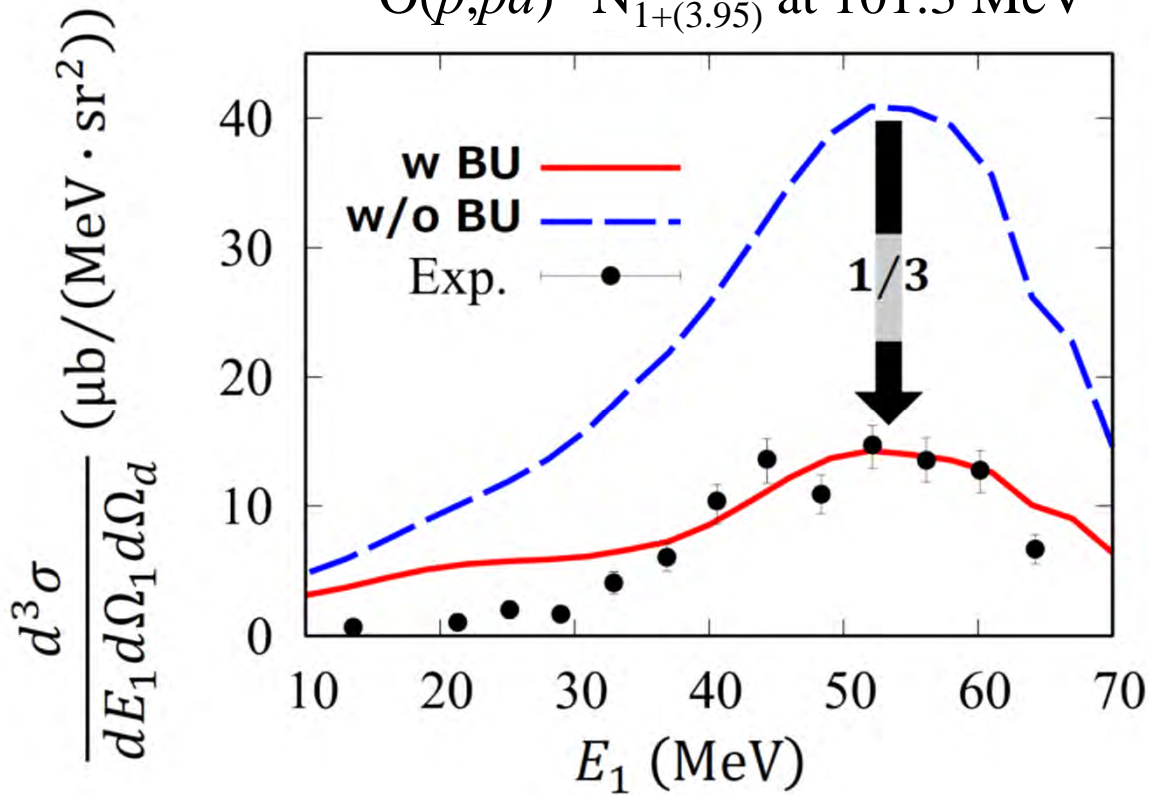
KO, T. Fukui, Y. Kamiya, and A. Ohnishi, to appear in PRC; arXiv2103.00100.



FSI driven breakup effect

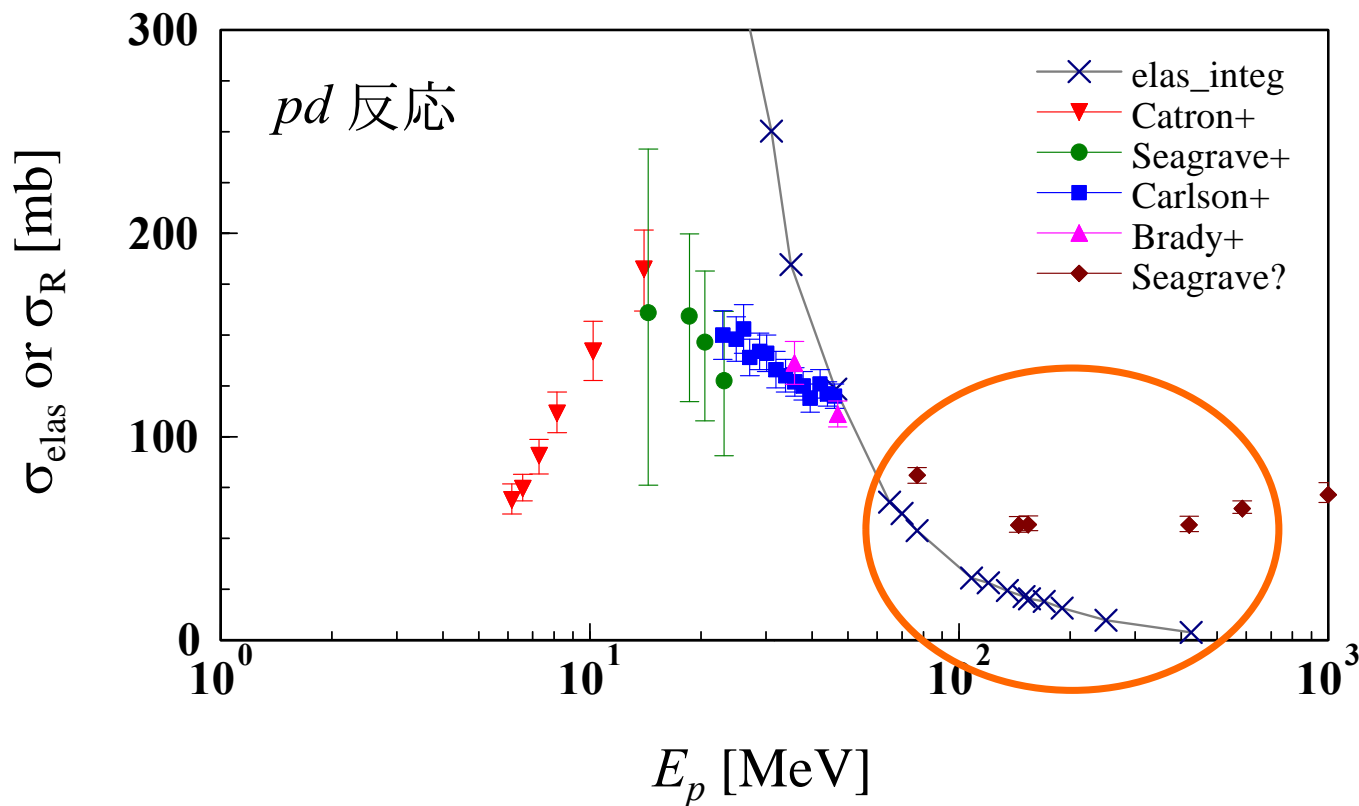
$^{16}\text{O}(p, pd)^{14}\text{N}_{1+(3.95)}$ at 101.3 MeV

Y. Chazono, K. Yoshida, and KO, in preparation.



- FSIによる分解効果は極めて大きい。
- 400 MeV入射ではこの分解効果は小さくなる。しかし...

入射粒子による重陽子の破砕効果



- 入射エネルギーが高くなると**分解断面積が**(圧倒的に)**優勢**となる。
- **(*p,ppn*)**もあわせて測定・議論する方がよさそう。

まとめ

目的: 脆いクラスターのノックアウト断面積の意味を理解する

□ α クラスターノックアウト反応

- ✓ α クラスター構造の実証手段として確立したと考えてよい。
- ✓ 構造の波動関数の反対称化は重要。

□ 重陽子ノックアウト反応(単一粒子として観測可能)

- ✓ 重陽子の壊れやすさを取り入れた反応モデルの構築が必要。
- ✓ CDCC + DWIA = CDCCIAを標準的な反応モデルとする。
- ✓ (p,ppn) 反応もあわせて議論する方がよさそう。→ 2n ノックアウト反応への道
- ✓ “FSI”が必ず存在する。

□ ダイニュートロンノックアウト反応(非束縛粒子)

- ✓ これまで、FSIを最小化する運動学を考えてきた。
- ✓ 重陽子ノックアウトの理解が確立すれば、FSI込みでの議論が可能になると期待。