2021/12/09
基研研究会　“核力に基づいた原子核の構造と反応”

陽子-^{3}He散乱による三体核力の研究

東北大学大学院 理学研究科
渡邉　跡武

Collaborators

- ***Tohoku University***

  A. Watanabe, S. Nakai, K. Sekiguchi, T. Akieda, D. Etoh, M. Inoue, Y. Inoue, K. Kawahara, H. Kon, K. Miki, T. Mukai, D. Sakai, S. Shibuya, Y. Shiokawa, T. Taguchi, H. Umetsu, Y. Utsuki, Y. Wada, M. Watanabe

- ***CYRIC, Tohoku University***

  M. Itoh

- ***National Institute of Radiological Science***

  T. Wakui

- ***RCNP, Osaka University***

  K. Hatanaka, H. Kanda, H. J. Ong, D. T. Tran

- ***University of Miyazaki***

  Y. Maeda, K. Nonaka

- ***RAP, RIKEN***

  Y. Ikeda, Y. Otake, A. Taketani, Y. Wakabayashi

- ***KEK***

  T. Ino

- ***Hosei University***

  S. Ishikawa

- ***Vilnius University***

  A. Deltuva

- ***Kyushu University***

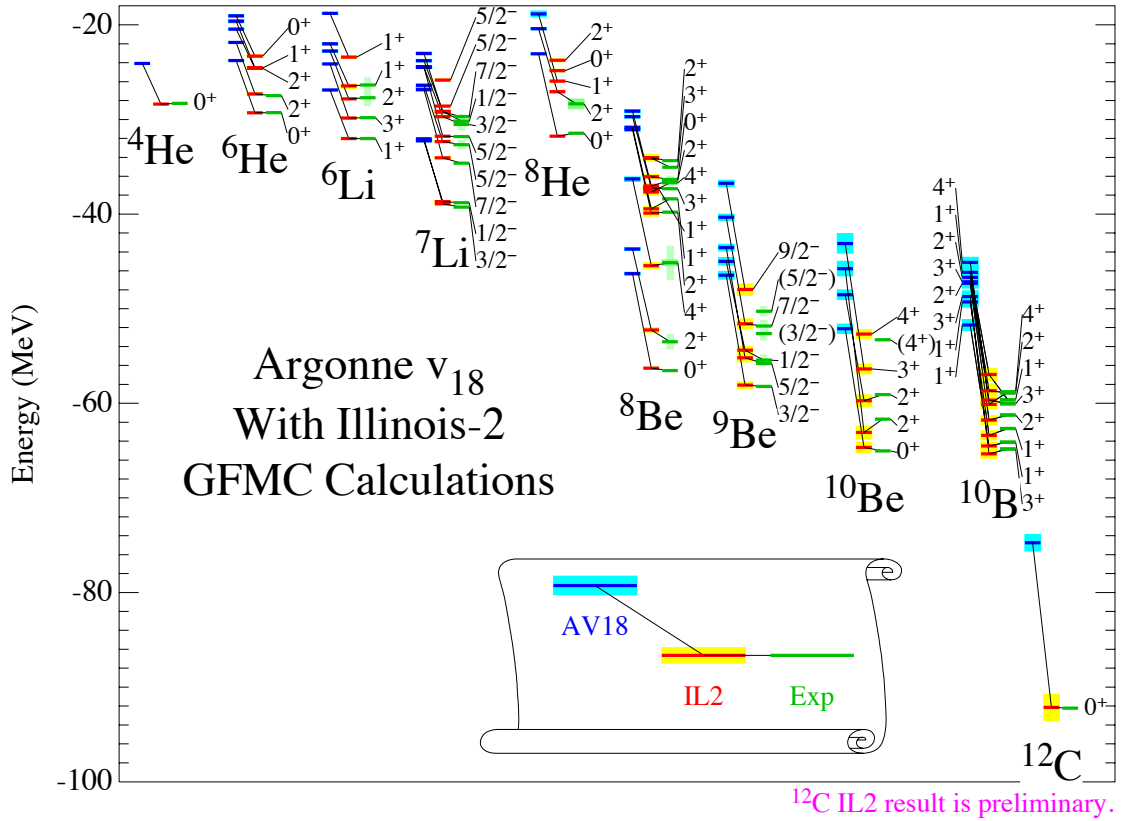
  S. Goto, Y. Hirai, D. Inomoto, H. Kasahara, S. Mitsumoto, H. Oshiro, T. Wakasa

- ***RIKEN Nishina Center***

  H. Sakai, T. Uesaka

$T = 3/2$ channel of 3NF

- *Nd* 散乱系ではtotal isospin T=1/2に制限
- 3NFの$T = 3/2$ channel → 中性子過剰核、非対称核物質において重要な役割

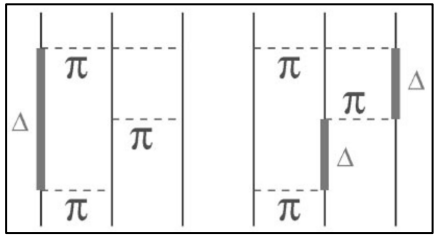


S. C. Pieper *et al.*, NPA **751**, 516 (2005).

- 軽核の B.E. の Green's Function Monte Carlo (GFMC) 計算
  - **Illinois-II (IL2) 3NF** :

    2π-exchange 3NF + 3π-ring with Δ-isobar

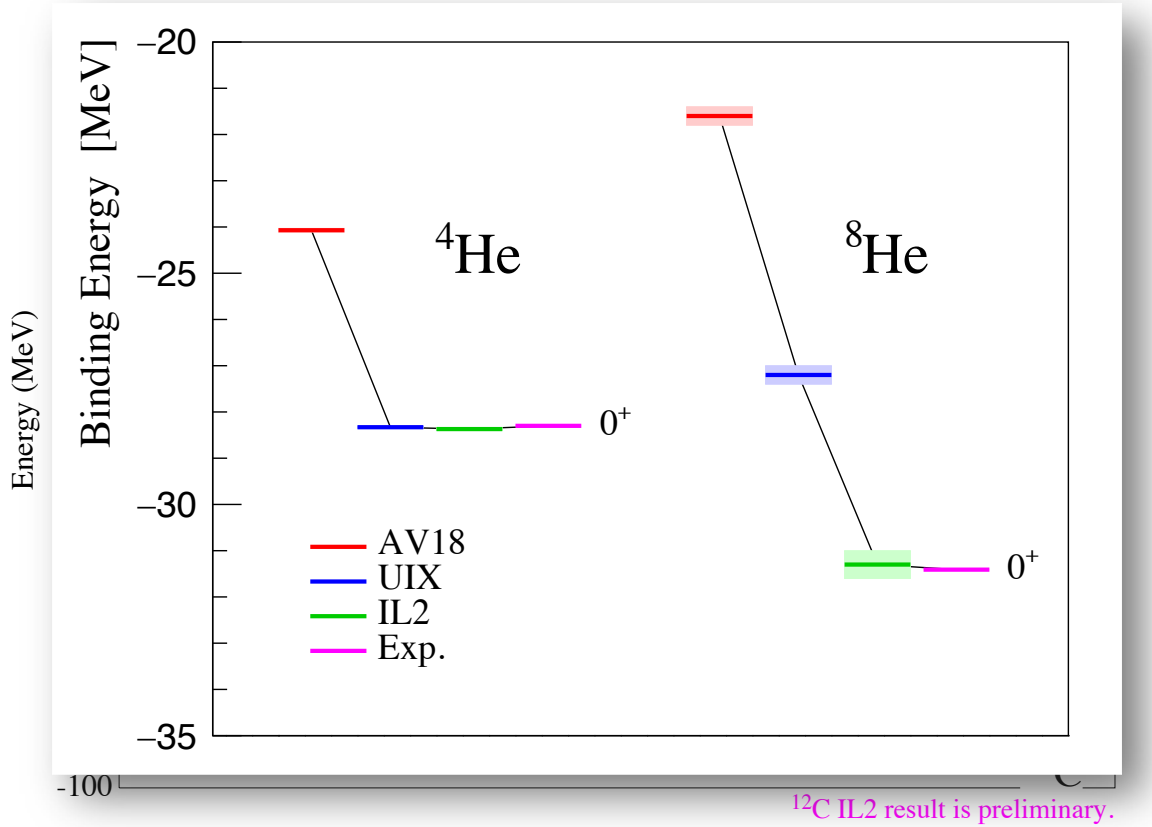
3NF の $T = 3/2$ 成分を含む



- 中性子核物質（中性子星）の性質
  - 3NF の $T = 3/2$ 成分のみが寄与
  - IL2 3NF でも理解が不十分

$T = 3/2$ channel of 3NF

- *Nd* 散乱系ではtotal isospin T=1/2に制限
- 3NFの$T = 3/2$ channel → 中性子過剰核、非対称核物質において重要な役割

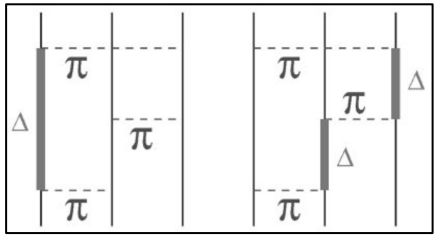


S. C. Pieper *et al.*, NPA **751**, 516 (2005).

- 軽核の B.E. の Green's Function Monte Carlo (GFMC) 計算
  - **Illinois-II (IL2) 3NF** :

    2π-exchange 3NF + 3π-ring with Δ-isobar

3NF の $T = 3/2$ 成分を含む



- 中性子核物質（中性子星）の性質
  - 3NF の $T = 3/2$ 成分のみが寄与
  - IL2 3NF でも理解が不十分

3NF Study via p-^{3}He Scattering

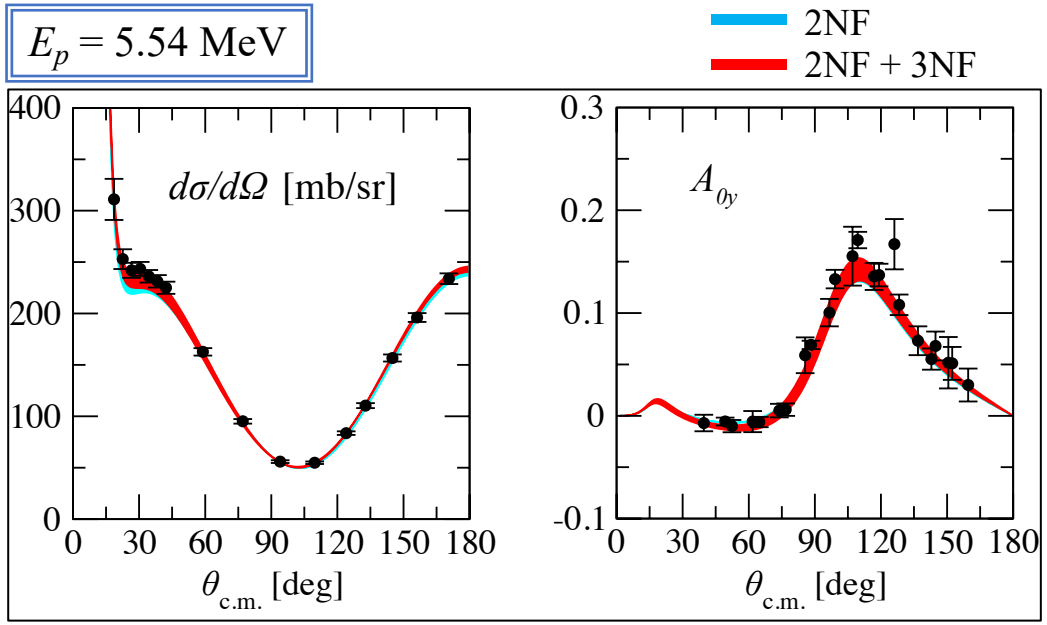
Measurement of p + ^{3}He system ($E_p \geq 65$ MeV)

- 少数系から多体系へのFirst Step
  - ✓ Verifying 3NFs determined from *Nd* scattering system.
- $T = 3/2$ 3NFsへのアプローチ
- Theory in progress…

Observables

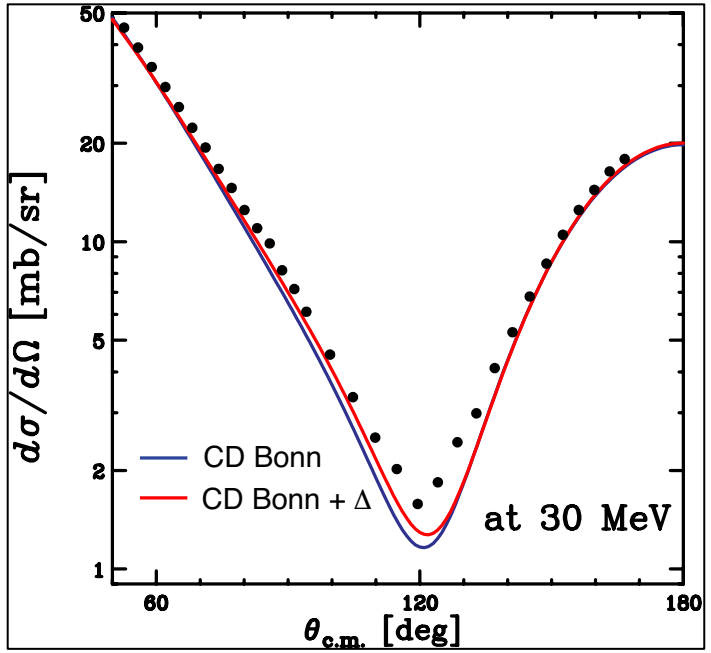
Cross section,
Analyzing powers,
Spin correlation coefficients.

E_p = 5.54 MeV



M. Viviani *et al.*, PRL **111**, 172302 (2013).

up to 30 MeV



A. Deltuva and A. C. Fonseca,PRC **87**, 054002 (2013).

3NF Study via p-^{3}He Scattering

Measurement of p + ^{3}He system ($E_p \geq 65$ MeV)

- 少数系から多体系へのFirst Step
  - ✓ Verifying 3NFs determined from *Nd* scattering system.
- $T = 3/2$ 3NFsへのアプローチ
- Theory in progress…

Observables

Cross section,
Analyzing powers,
Spin correlation coefficients.

本発表では…

- NNポテンシャルによる厳密理論計算との比較
- CD-Bonn+Δポテンシャルでの**Δ-isobar effect**の議論
- *Nd* 散乱との性質・傾向の違い

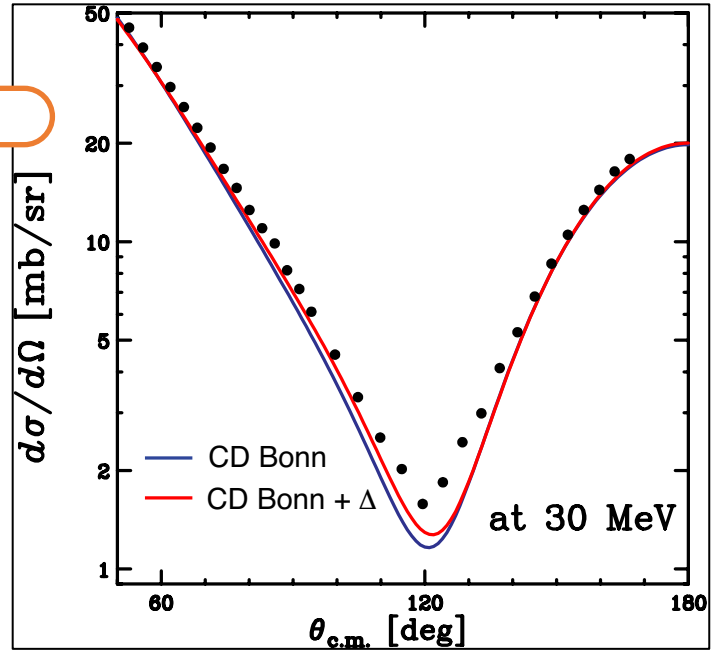
E_p = 5.54 MeV

2NF

$\theta_{c.m.}$ [deg]

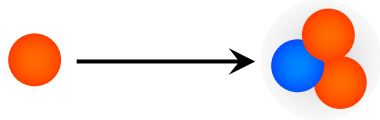
M. Viviani *et al.*, PRL **111**, 172302 (2013).

up to 30 MeV



A. Deltuva and A. C. Fonseca,PRC **87**, 054002 (2013).

Measurements of proton-^{3}He Scattering

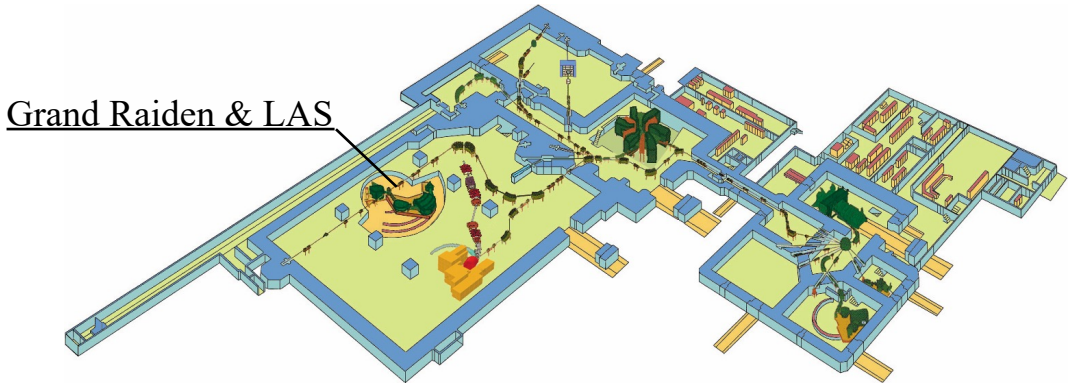


Reported in "AW *et al.*, Phys. Rev. C **103**, 044001 (2021)".

Summary of Measurements for p+^{3}He

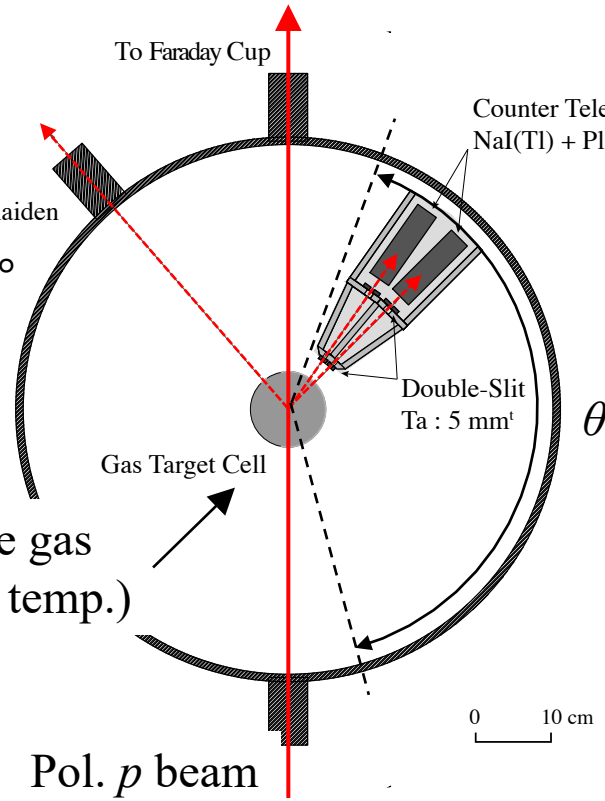
Incident Energy	70 MeV	65 MeV	65 MeV	100 MeV
Beam	p	pol. p	pol. p	pol. p
Observables	$A_y(^3\mathrm{He})$	$d\sigma/d\Omega$, $A_y(p)$	$A_y(p)$, $A_y(^3\mathrm{He})$, $C_{y,y}$	$A_y(p)$, $A_y(^3\mathrm{He})$, $C_{y,y}$
Measured Angles ($\theta_{\mathrm{c.m.}}$)	46°– 141°	27°– 170°	46°– 133°	47°– 149°
Facility	**CYRIC**, Tohoku Univ.	**RCNP**, Osaka Univ.	**RCNP**, Osaka Univ.	**RCNP**, Osaka Univ.
Exp. Course	41 course	WS course	ENN course	ENN course

CYRIC (AVF cyclotron)



RCNP

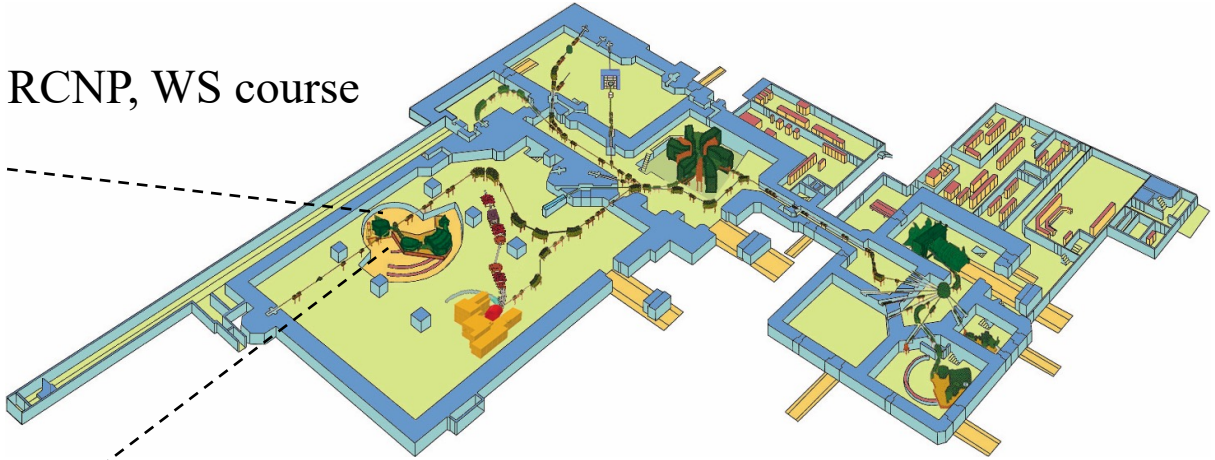
Measurement of Differential Cross Section



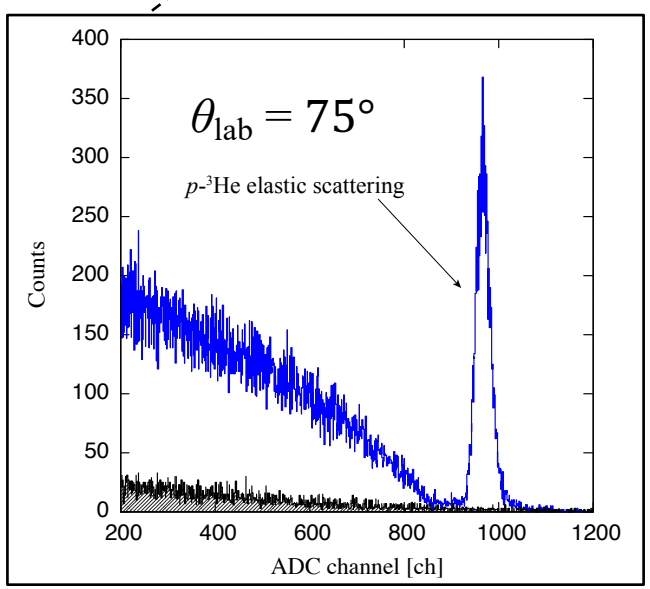
Target : ^{3}He gas
(1 atm, room temp.)

Exp. setup

RCNP, WS course

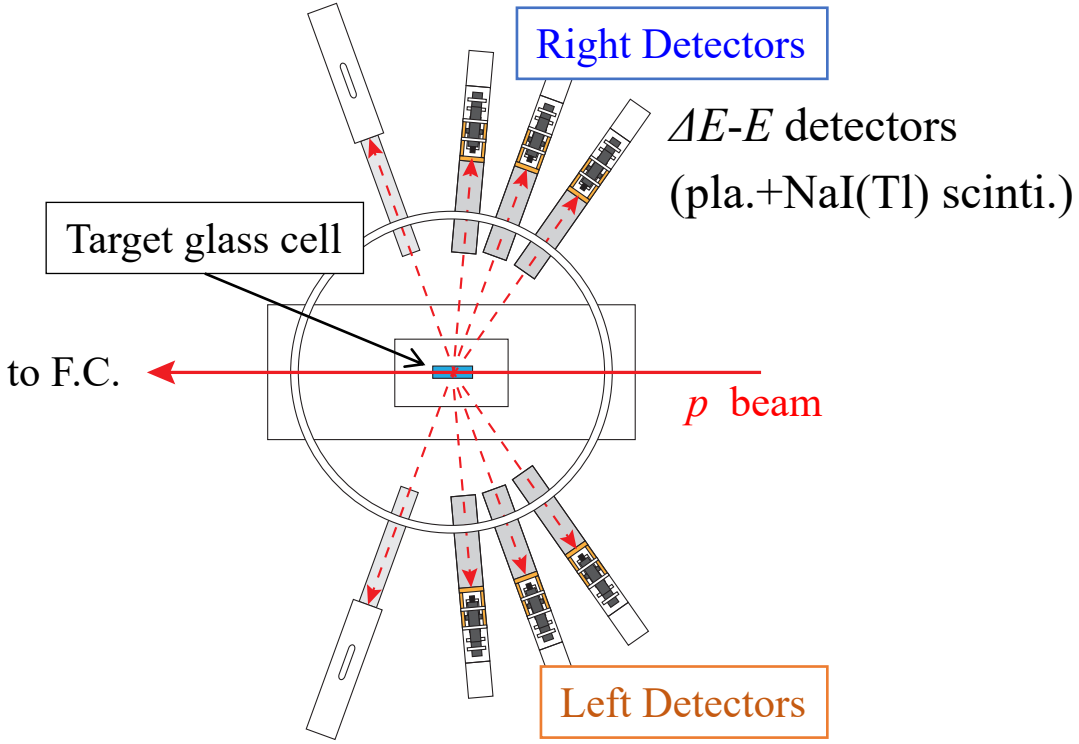


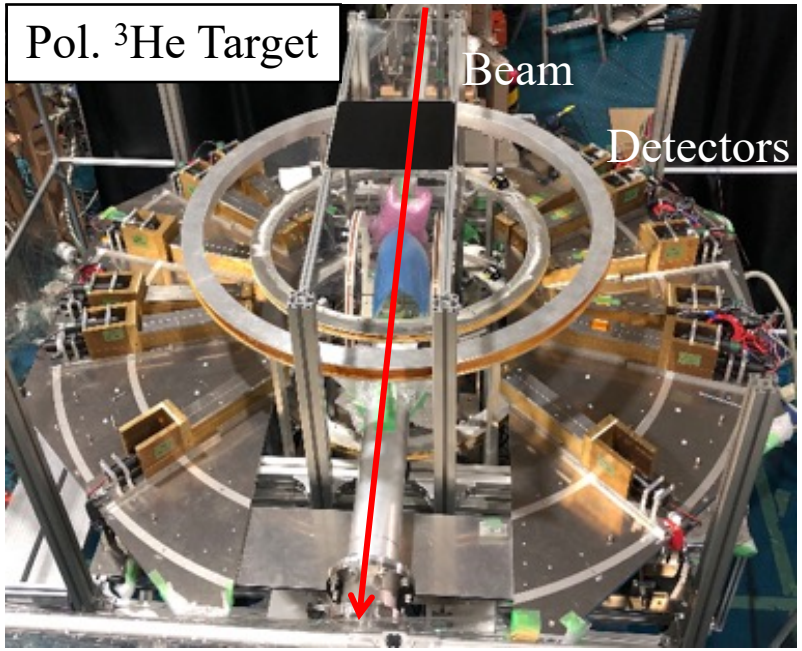
$\theta_{lab} = 20° – 165°$



Grand Raiden & LAS

Experimental Setup with Pol. ^{3}He Target @CYRIC, RCNP





$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 (1 + p_y A_y)$$

Left Right

$$A_{0y} = \frac{1}{p_y}\frac{n_{\mathrm{L}}^{\uparrow} - n_{\mathrm{L}}^{\downarrow}}{n_{\mathrm{L}}^{\uparrow} + n_{\mathrm{L}}^{\downarrow}} = \frac{1}{p_y}\frac{n_{\mathrm{R}}^{\downarrow} - n_{\mathrm{R}}^{\uparrow}}{n_{\mathrm{R}}^{\uparrow} + n_{\mathrm{R}}^{\downarrow}}$$

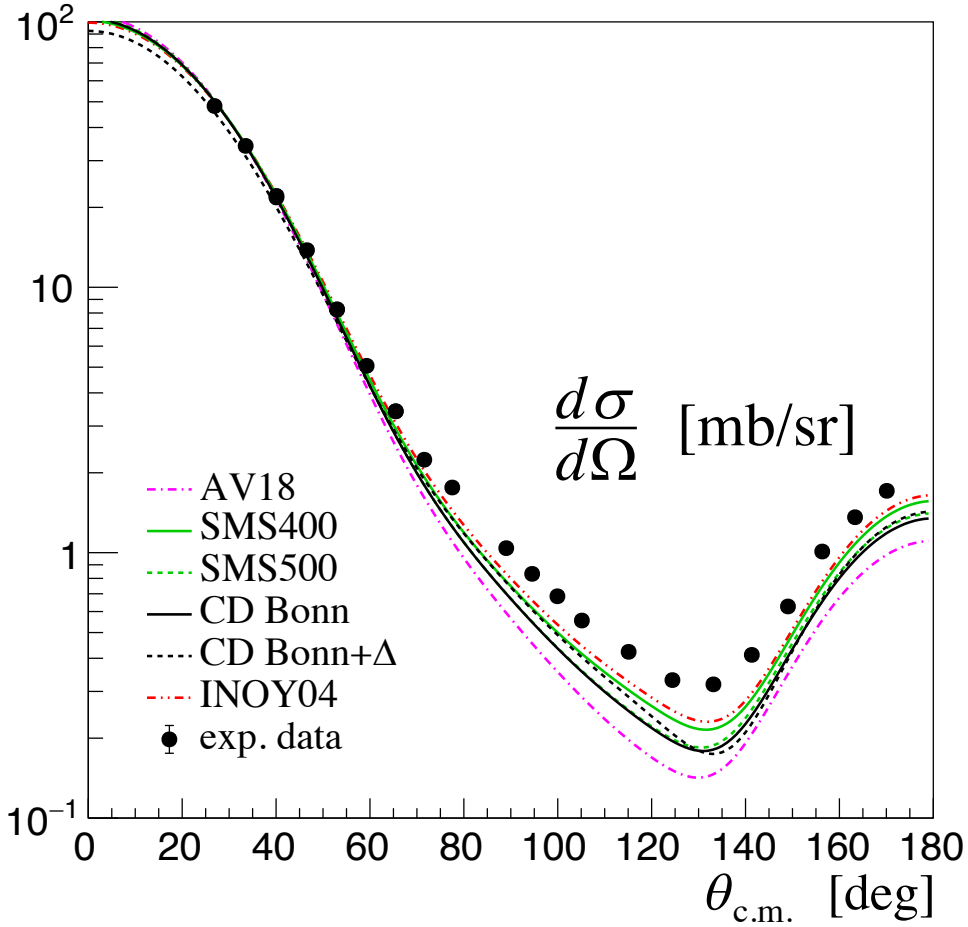
p_y : Target polarization

A_{0y} : ^{3}He analyzing power

$n^{\uparrow,\downarrow}$: Normalized yield at spin up (↑)/down (↓)

Differential Cross Section for p+^{3}He @65 MeV

*Calculations : A. Deltuva, private communications



AV18, CD-Bonn : 現実的核力ポテンシャル

INOY04 : 3NF 無しで ^{3}H, ^{3}He の B.E. 再現

SMS : Chiral EFT (2NF, N^{4}LO+)

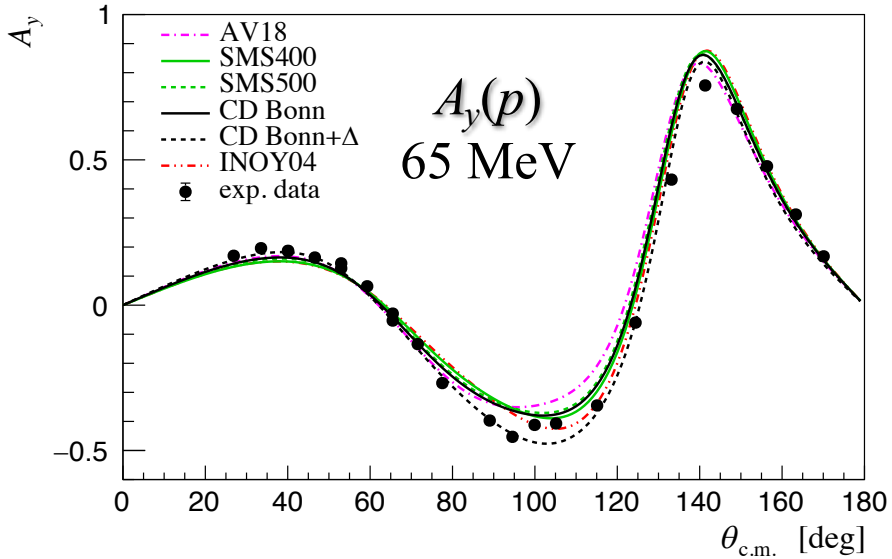
CD-Bonn+Δ : Δ-isobar dof を含む

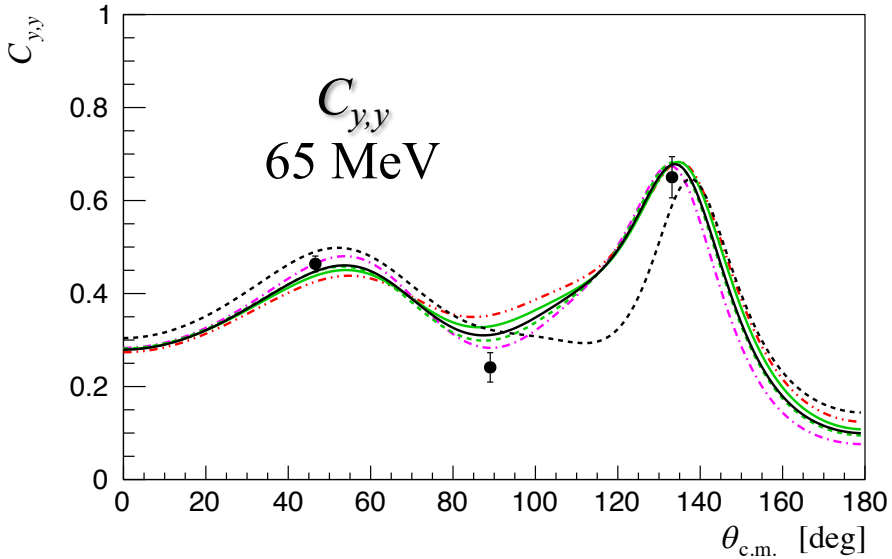
*クーロン力は考慮していない

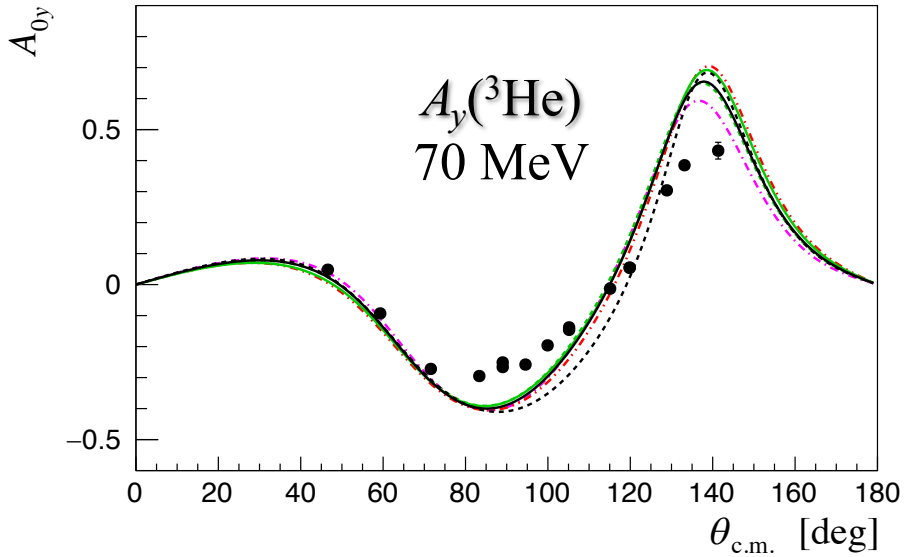
- AGS equationによる厳密理論計算と比較
- NNポテンシャルはどれも$\theta_{c.m.} \gtrsim 80°$で実験値を下回る
- 最小値付近で大きな差 → 20–30%
- Δ-isobar effectは非常に小さい？

Spin Observables for p+^{3}He @65, 70 MeV

*Calculations : A. Deltuva, private communications







- $A_y(p)$: 実験データをおおよそ再現
- A_{0y}(^{3}He) : 最小値、最大値付近で差が見られる
- $C_{y,y}$:
  - 実験データをおおよそ再現
    （ただしデータ数少ない）
  - 明確なΔ-isobar effectが示唆

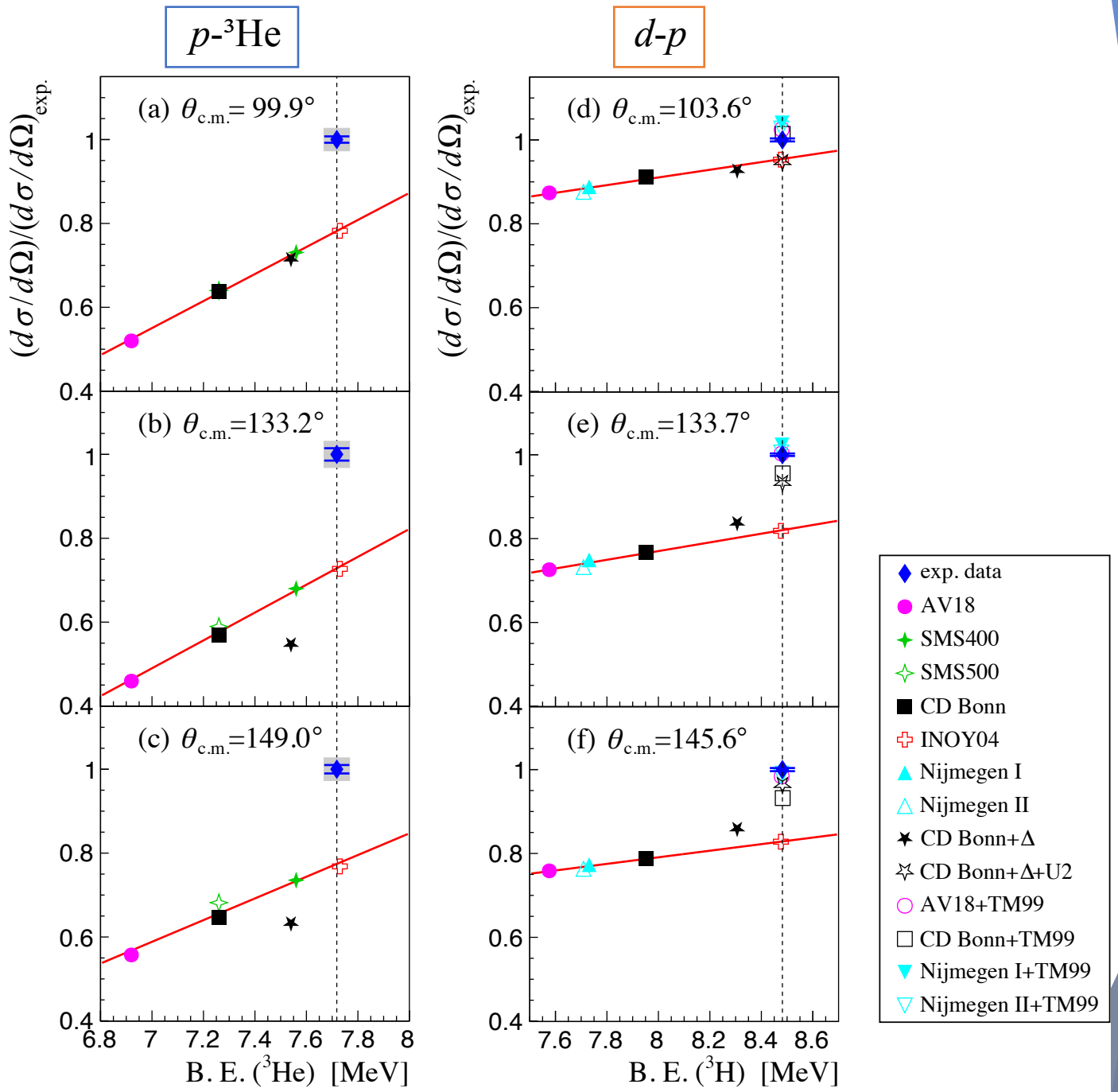
$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ vs. 3N B.E.

p-^{3}He @65 MeV/nucleon

- 実験値を1として各ポテンシャルの理論計算と比較
- NN ポテンシャルで線形相関
- 3N B.E.を再現する値と20–30%の差

d-*p* @70 MeV/nucleon

- 同様の相関が確認
- 3N B.E.を再現する値と10–20%の差
- 3NFの考慮によって再現



$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ vs. 3N B.E.

NN ポテンシャル依存性

p-^{3}He : 0.3 /MeV
d-p : 0.1 /MeV

d-p @70 MeV/nucleon

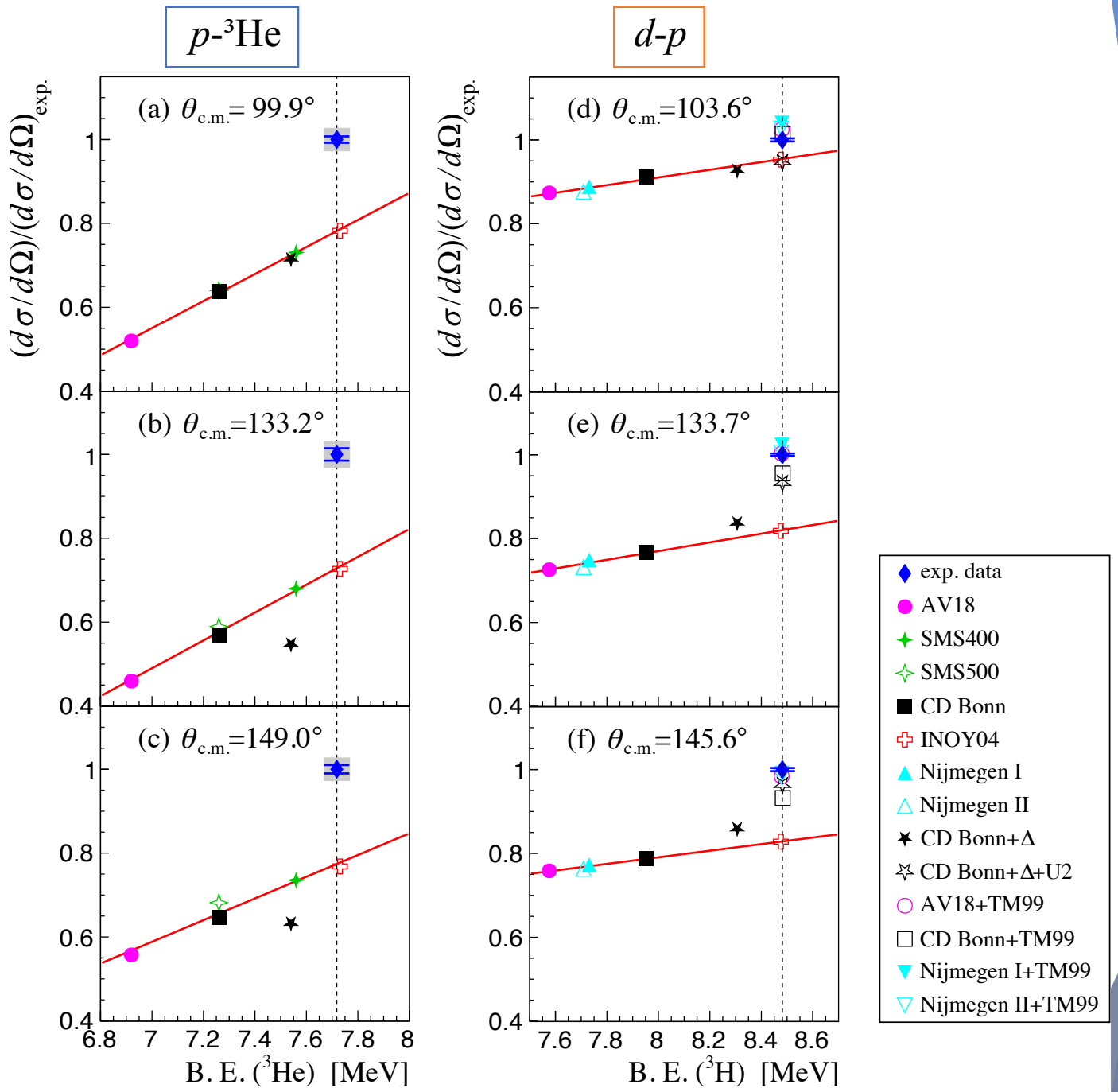
- スピン四重項状態 (S=3/2) が支配的
- Pauli効果により長距離成分が見えやすい？

p-^{3}He @65 MeV/nucleon

- 系の全スピン：0 or 1
- 核力の近中距離成分の効果？

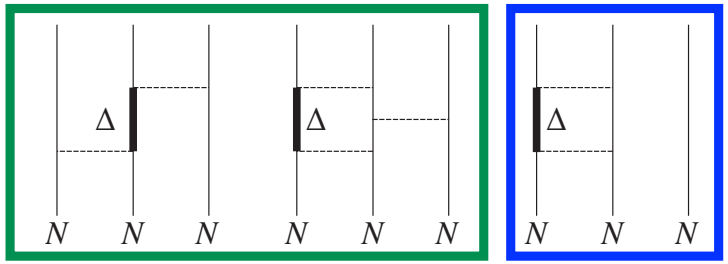
Δ-isobar effectの発現性

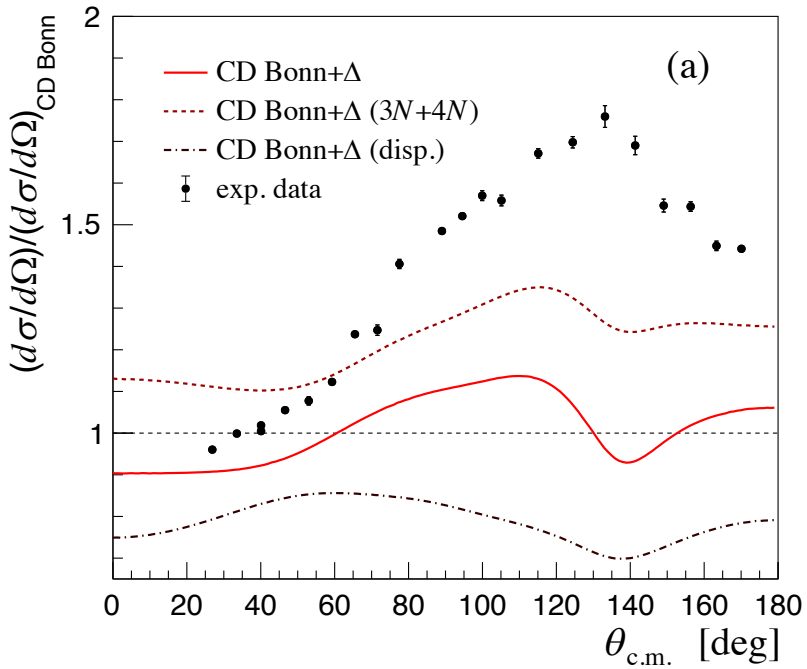
p-^{3}He : 実験値から外れる
d-p : 再現する方向へシフト

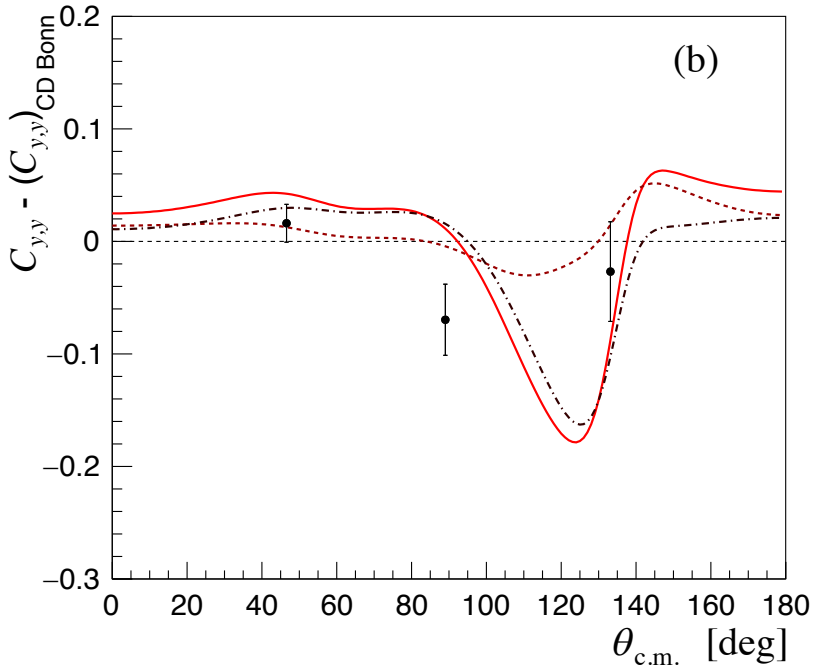


Δ-Isobar Effects for Scattering Observables

- Δ-isobar effectを2N起因 (dispersive effect) と3, 4NFsに分解
  - Dispersive effect : Δ-isobarを含む二体相互作用
  - 3, 4NFs : Δ-isobar自由度によるEffectiveな3, 4NFs
- $d\sigma/d\Omega$: dispersive effectによって3, 4NFsがキャンセル
- $C_{y,y}$: dispersive effectが支配的







Nd散乱系とは異なるΔ-isobar effect

Δ-isobar effectのstudyに有効な観測量

Summary and Outlook

中間エネルギー領域 ($E/A \geq 65$ MeV) におけるp-^{3}He弾性散乱による3NF研究

- Few to manyへのFirst step
- 3NFのアイソスピン$T = 3/2$ channelへのアプローチ

65, 70, 100 MeVにおけるp-^{3}He弾性散乱測定 @CYRIC, RCNP

- $d\sigma/d\Omega$, $A_y(p)$, $A_{0y}(^3\mathrm{He})$, $C_{y,y}$のnew dataを取得
- NNポテンシャルに基づく厳密理論計算と比較
  - ✓ 2NFのみでは実験値を**再現しない**（Δ-isoba effectも同様）
  - ✓ ***d-p*散乱系とは異なる性質**（NNポテンシャル依存性、Δ-isobar effect）
  - ✓ $C_{y,y}$においてΔ-isobarによるdispersive effectが顕著

実験プローブとしての有効性を示唆

Future Plan

p-^{3}He scattering : Complete set of spin correlation coefficients

→ Dispersive effectを含むΔ-isobar effectのstudy,
$T = 3/2$ 3NFの詳細な議論

Thank you for your attention.