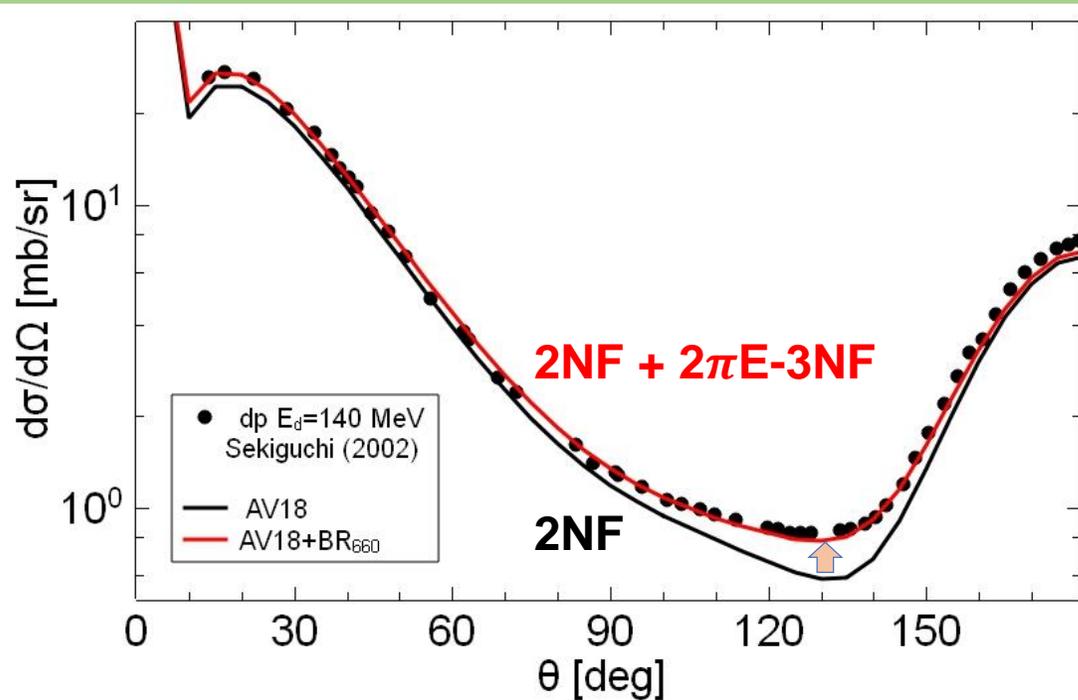


3核子散乱の偏極観測量と3体力

石川壮一@法政大学

1. はじめに

${}^1\text{H}(d, d)p$ $E_d = 140 \text{ MeV}$
[$E/A = 70 \text{ MeV}$]



Data: K. Sekiguchi et al. PRC65, 034003 (2002)

3体力の必要性

(1) 3核子の結合エネルギー(3N-BE)

$$\text{BE}({}^3\text{H}) = 8.482 \text{ MeV}, \quad \text{BE}({}^3\text{He}) = 7.718 \text{ MeV}$$

(2) 核子-重陽子(ND)弾性散乱断面積

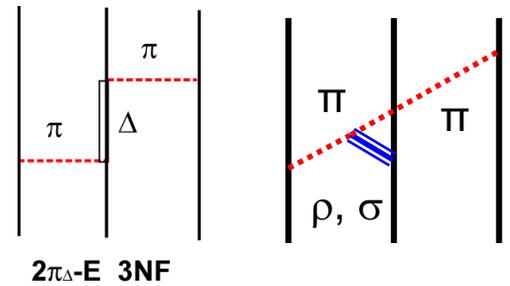
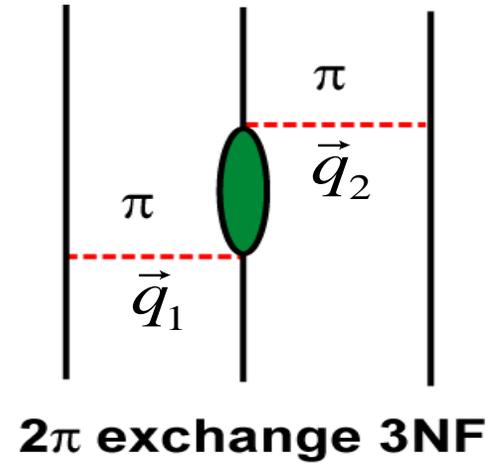
2核子間力(2NF)だけを用いた計算と実験データとの間に見られる差異を、2個のパイオンの交換に基づく3体力(2πE-3NF)の導入により解消することが可能

2π交換型3体力 (2πE-3NF)

πN散乱振幅

$$V_{2\pi E}(\vec{q}_1, \vec{q}_2) = \frac{1}{(2\pi)^6} \left(\frac{f_\pi}{m_\pi} \right)^2 \frac{(\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{q}_1)(\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{q}_2)}{\vec{q}_1^2 + m_\pi^2 \vec{q}_2^2 + m_\pi^2}$$

$$\times [(\vec{\tau}_1 \cdot \vec{\tau}_2)\{-a + b(\vec{q}_1 \cdot \vec{q}_2)\} + (i\vec{\tau}_3 \cdot \vec{\tau}_1 \times \vec{\tau}_2)(i\vec{\sigma}_3 \cdot \vec{q}_1 \times \vec{q}_2)d]$$



Model	a (μ ⁻¹)	b (μ ⁻³)	d(μ ⁻³)
Fujita-Miyazawa	-0.24	-1.24	-0.31
Tucson-Melbourne(99)	-1.12	-2.80	-0.753
Brazil	-1.05	-2.29	-0.768
Δ		-1.49	-0.373
ρ			-0.395
σ	-1.05	-0.80	
Brazil O(q ⁴)	-0.981	-2.617	-0.854
χEFT (N ² LO)	-0.99	-2.89	-1.05

2πE-3NFの主要部分は、実験的には既知のπN散乱振幅であるので、モデルへの依存性は小さい。

$2\pi E-3NF$ の問題点(1)

1. ND弾性散乱偏極量の再現性が悪い

(“Analyzing power puzzle”):

* 寄与が小さい(ベクトル分解能: $A_y(\theta)$, $iT_{11}(\theta)$)

* 寄与が逆方向(テンソル分解能: $T_{21}(\theta)$)

→ 正しいスピン依存性を反映していない。

2. 高いエネルギー($E > 150 \text{ MeV/nucleon}$)でのND弾性散乱における後方角微分断面積を再現できない。

pd 弹性散乱 @ $E_p = 3$ MeV

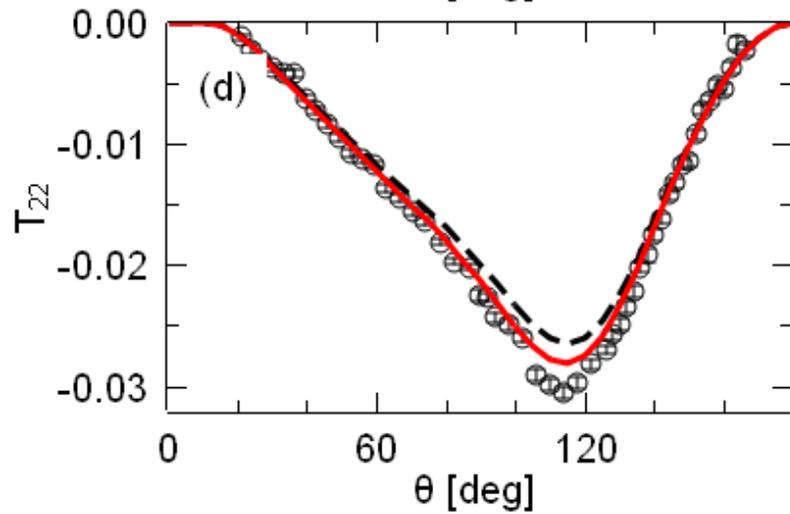
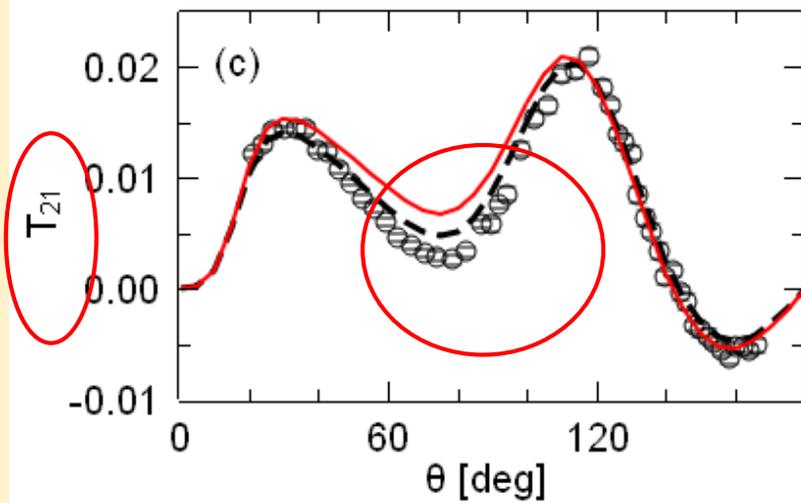
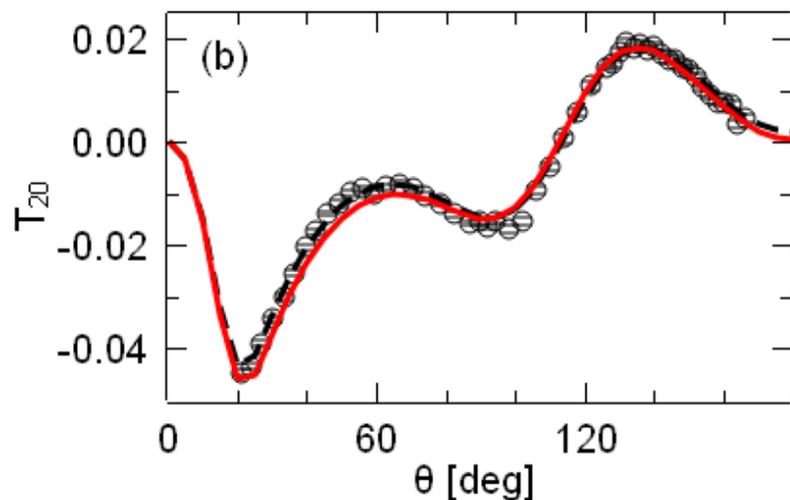
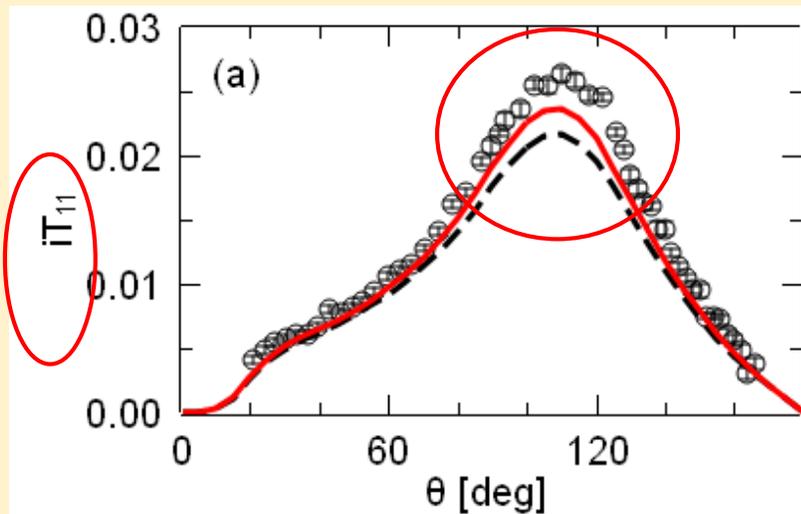
---- AV18

----- AV18+BR₆₆₀

Brazil 2π E-3NF model ($\Lambda = 660$ MeV)

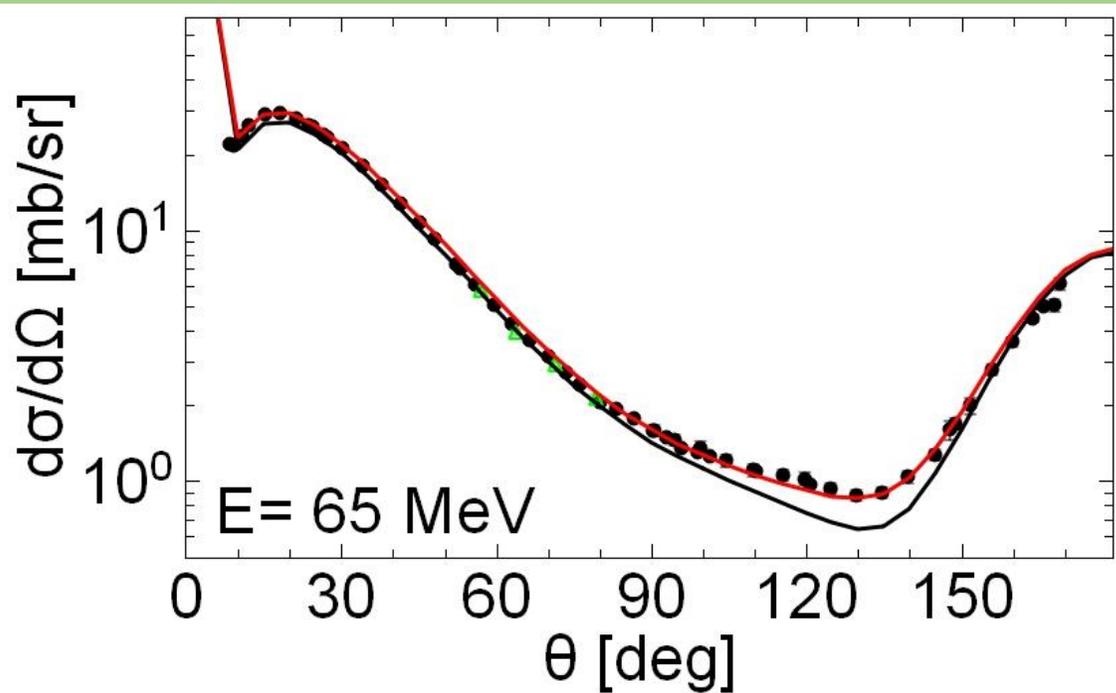
$iT_{11}(\theta)$ $T_{20}(\theta)$

$T_{21}(\theta)$ $T_{22}(\theta)$



pd 弹性散乱断面積 @ $E_p = 65$ MeV and $E_p = 170$ MeV

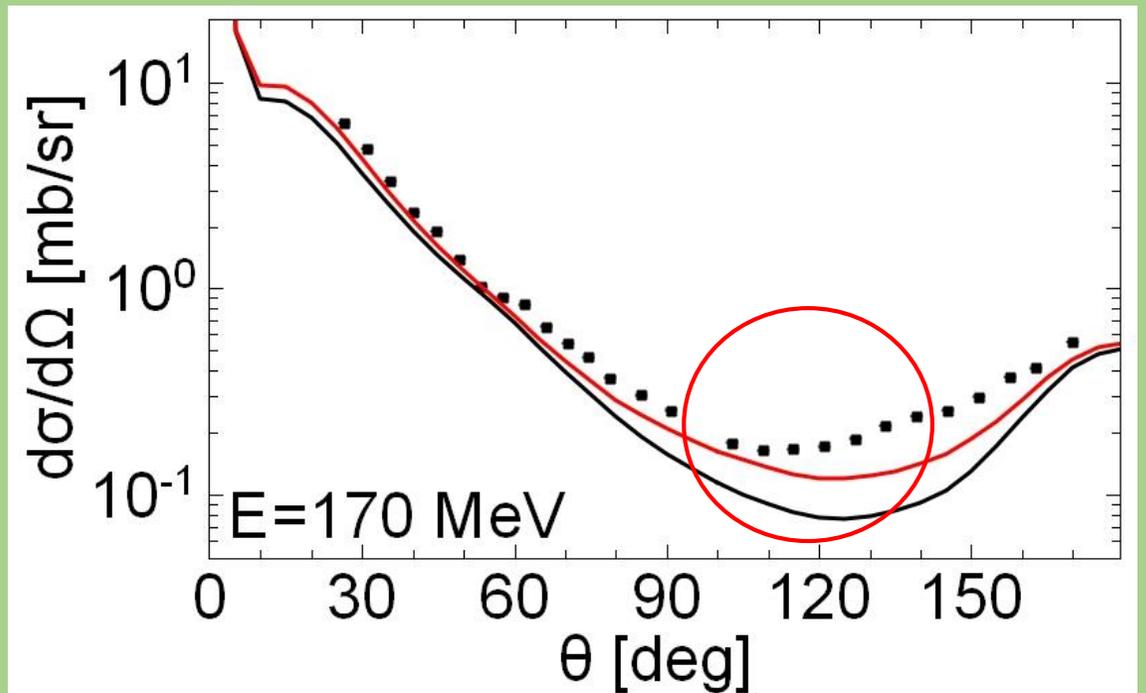
${}^2\text{H}(p,p)d$ $E_p = 65$ MeV



---- AV18

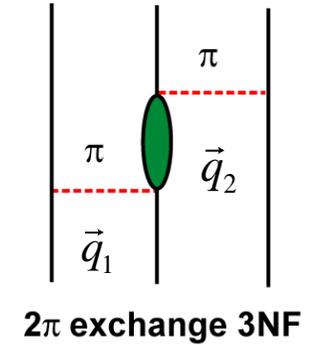
---- AV18+BR₆₆₀: Brazil $2\pi E$ -3NF model ($\Lambda = 660$ MeV)

${}^2\text{H}(p,p)d$ $E_p = 170$ MeV



2πE-3NFの問題点(2)

3. 2πE-3NFの強すぎる引力を形状因子で弱めている
 → 形状因子は3体力の短距離成分を正しく反映しているのか？



$$V(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = F.T. [V_{2\pi E}(\vec{q}_1, \vec{q}_2) \times F_\Lambda(\vec{q}_1^2) F_\Lambda(\vec{q}_2^2)]$$

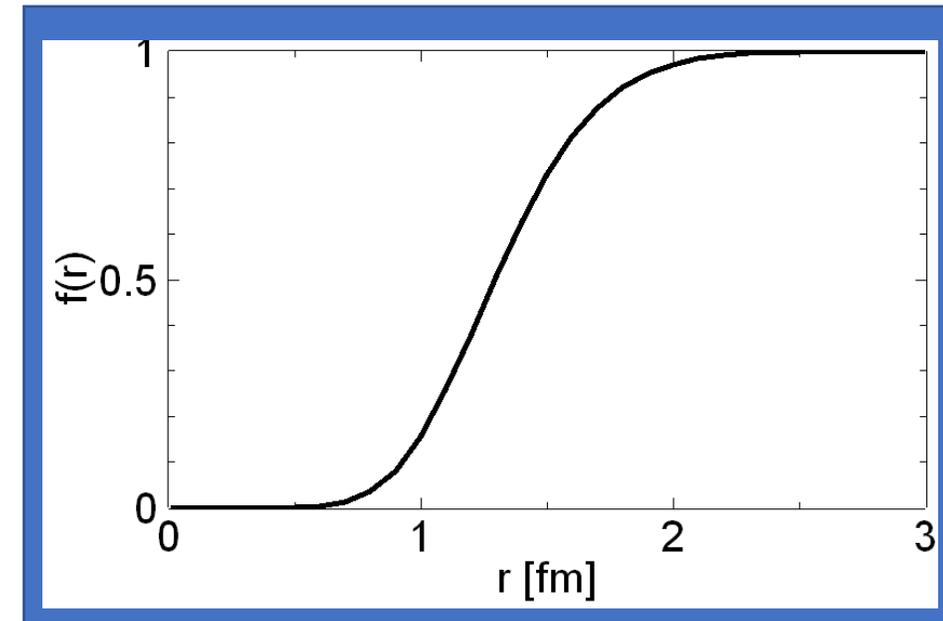
形状因子 $F_\Lambda(q^2) = \left(\frac{\Lambda^2 - m_\pi^2}{\Lambda^2 + q^2} \right)^2$ Λ : 切断質量

3N-BEを再現する切断質量 $\Lambda = 660\text{MeV}$
 座標空間では1~1.5 fmでの切断に対応

$$V(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = F.T. [V_{2\pi E}(\vec{q}_1, \vec{q}_2)] \times f(r_1) f(r_2)$$

$$f_R(r) = \left[1 - e^{-r^2/R^2} \right]^6$$

$$\text{BR}_{660} \leftrightarrow f_1(r, R = 0.87\text{fm})$$



以下の内容

- 形状因子(切断質量)とND後方微分断面積
S. Ishikawa, FBS **60**, 39 (2019)
- ND弾性散乱偏極量の改良を目指して
現象論的3体力
パイオン-スカラーボゾン交換

2. 形状因子とND後方断面積

- 形状因子: $V(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = F.T. [V_{2\pi E}(\vec{q}_1, \vec{q}_2) \times F_\Lambda(\vec{q}_1^2) F_\Lambda(\vec{q}_2^2)]$

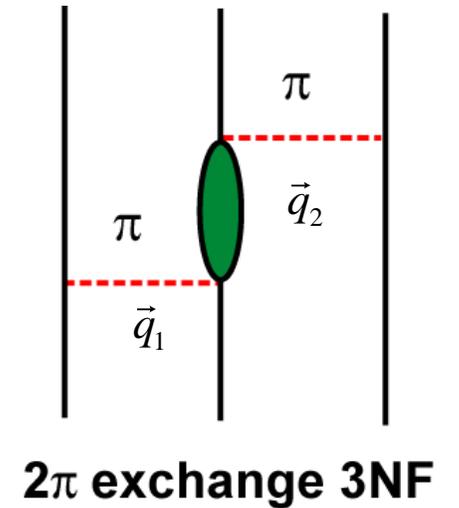
$$\text{Form factor: } F_\Lambda(q^2) = \left(\frac{\Lambda^2 - m_\pi^2}{\Lambda^2 + q^2} \right)^2 \quad \Lambda: \text{切断質量}$$

- 実験データとの(相対)差

$$\Delta(\theta, E) = \frac{d\sigma^{cal} - d\sigma^{exp}}{d\sigma^{cal}} \quad [\%]$$

- 計算 $\frac{E}{A} = 65 \text{ MeV} \sim 250 \text{ MeV}$

- 2体力のみ: AV18
- 2 π E-3NF [Brazil $O(q^4)$] のみで3N-BEを再現: $\Lambda = 660 \text{ MeV}$ AV18+BR₆₆₀
- $\Lambda = 1000 \text{ MeV}$ として、Gauss型3体斥力で3N-BEを調整 AV18+BR₁₀₀₀+W_R



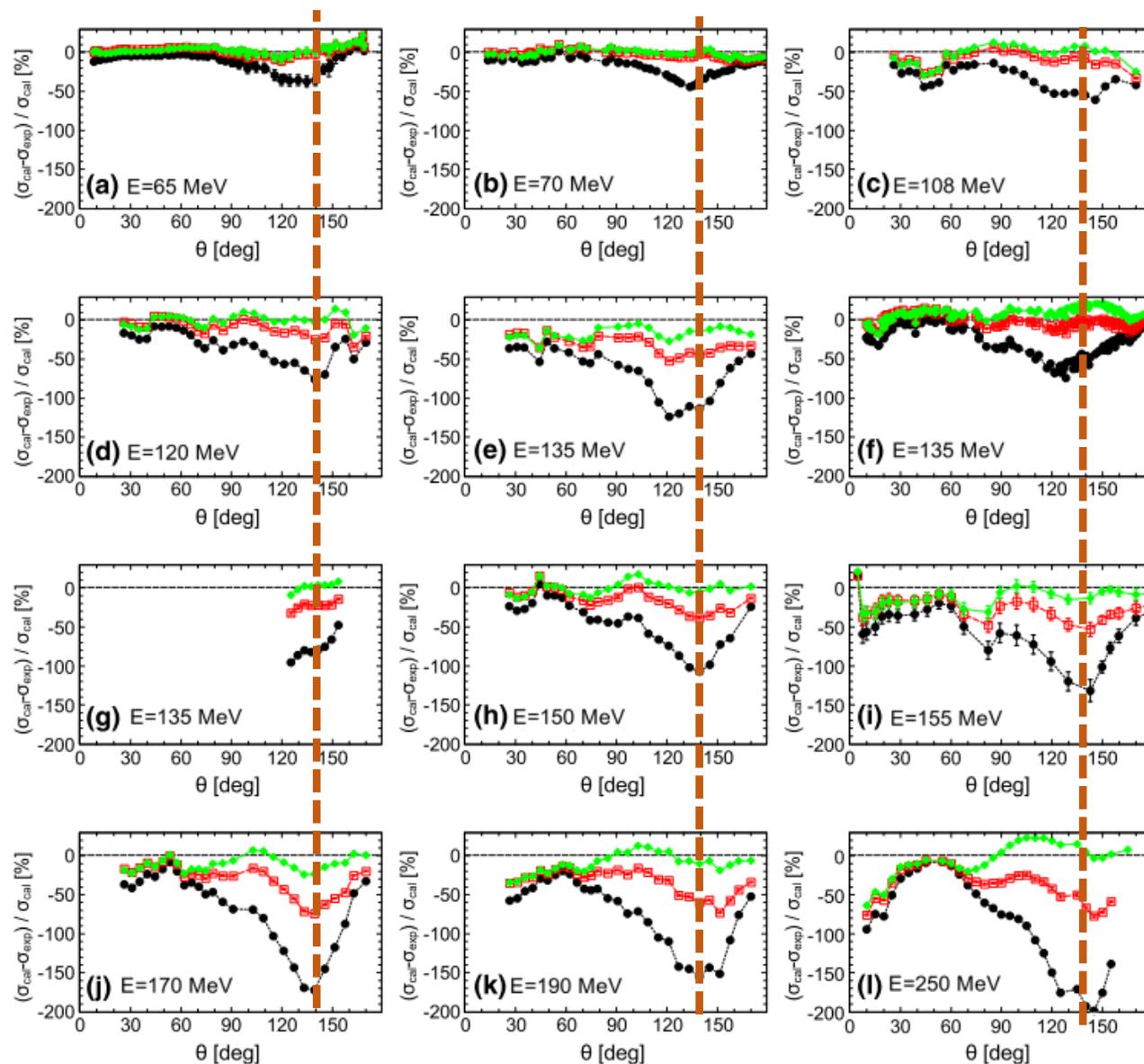


Fig. 3 (Color online) Relative difference between experimental data and calculations of the p - d cross section. In each figure, solid circles connected by dotted lines (black) denotes for AV18, empty circles connected by dashed lines (red) for AV18+BR₆₆₀, and solid diamonds connected by full lines (green) for AV18+BR(C)₁₀₀₀. Experimental data are from Refs. [22] for a; [20] for b; [21] for c, d, e, h, j, and k; [23] for f; [24] for g; [25] for i; and [26] for l

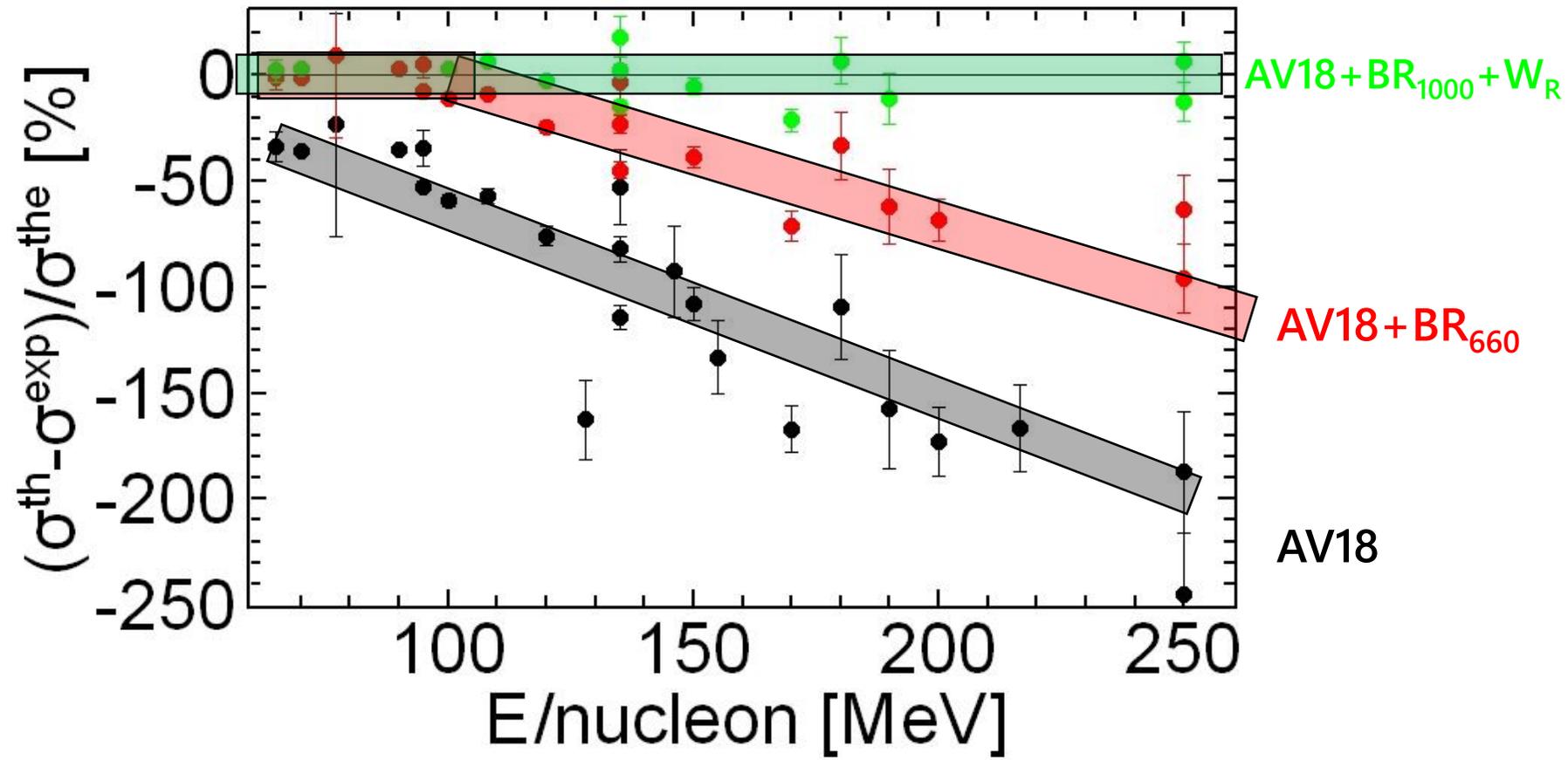
$$\Delta(\theta, E) = \frac{d\sigma^{cal} - d\sigma^{exp}}{d\sigma^{cal}} [\%]$$

$$\theta = 140^\circ$$

- - - - AV18
 - - - - AV18+BR₆₆₀
 - - - - AV18+BR₁₀₀₀+W_R

S. I., FBS 60, 39 (2019)

$$\Delta(\theta = 140^\circ, E) = \frac{d\sigma^{cal} - d\sigma^{exp}}{d\sigma^{cal}} \quad [\%]$$



3. ND弾性散乱偏極量(1)

- pd弾性散乱 @ $E_p = 70 \text{ MeV} \ \& \ 135 \text{ MeV}$

- 偏極量(偏極重陽子)

ベクトル分解能 $iT_{11}(\theta)$

テンソル分解能 $T_{20}(\theta), T_{21}(\theta), T_{22}(\theta)$

Data: K. Sekiguchi et al. PRC**65**, 034003 (2002)

1. 2体力のみ: AV18

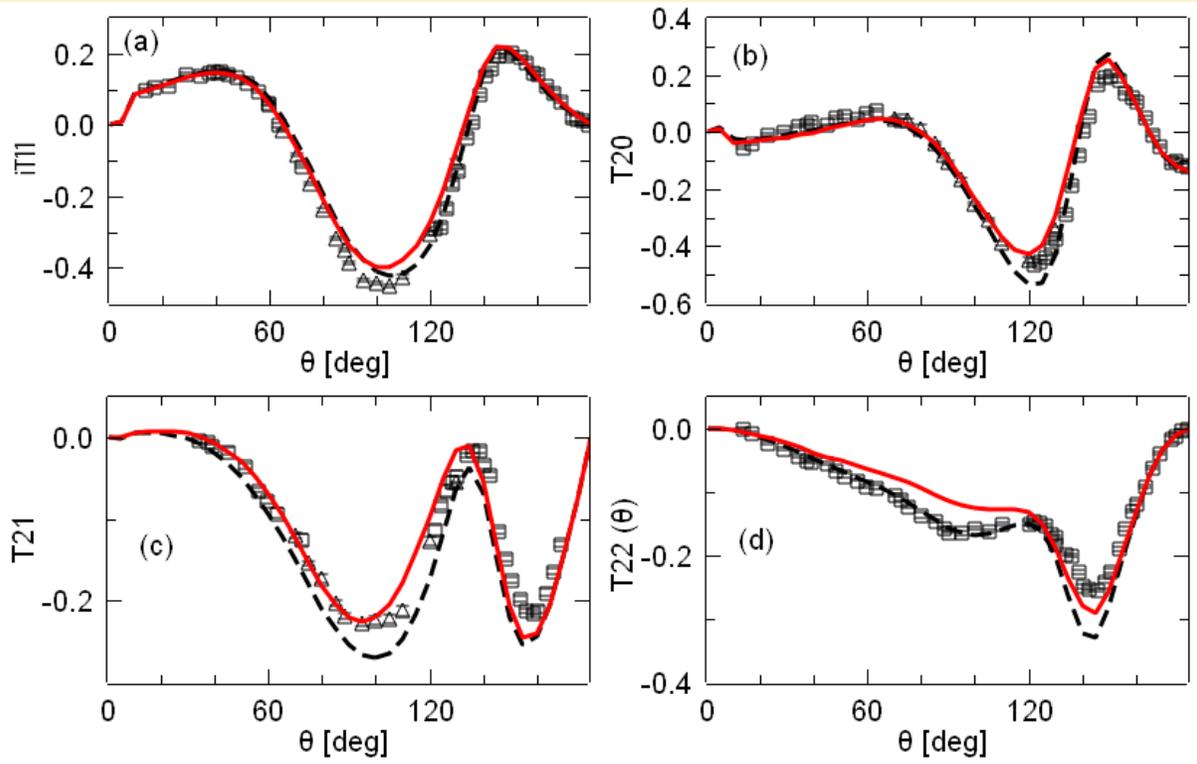
2. $2\pi E$ -3NF [Brazil $O(q^4)$] のみで3N-BEを再現: $\Lambda = 660 \text{ MeV}$ AV18+BR₆₆₀

3. $\Lambda = 1000 \text{ MeV}$ として、Gauss型3体斥力で3N-BEを調整 AV18+BR₁₀₀₀+W_R

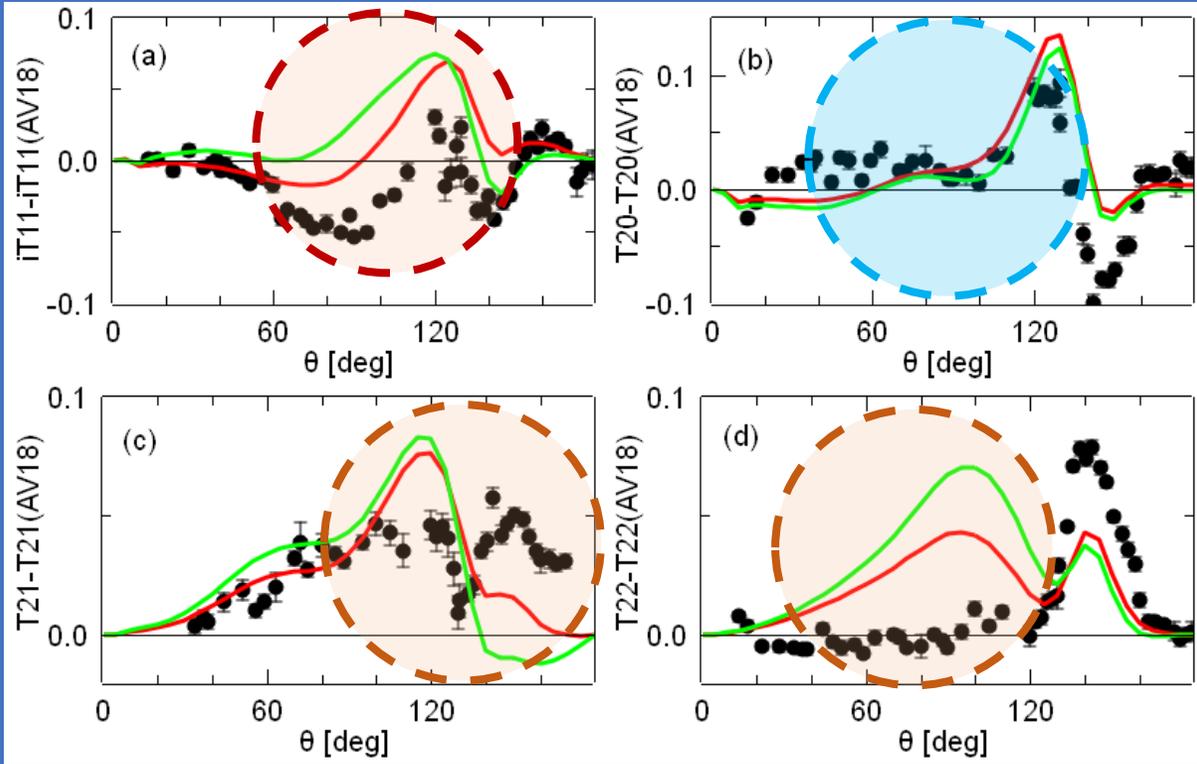
切断質量への依存性 pd @ 70 MeV

- AV18
- AV18+BR₆₆₀
- AV18+BR₁₀₀₀ + W_R

$iT_{11}(\theta)$ $T_{20}(\theta)$
 $T_{21}(\theta)$ $T_{22}(\theta)$



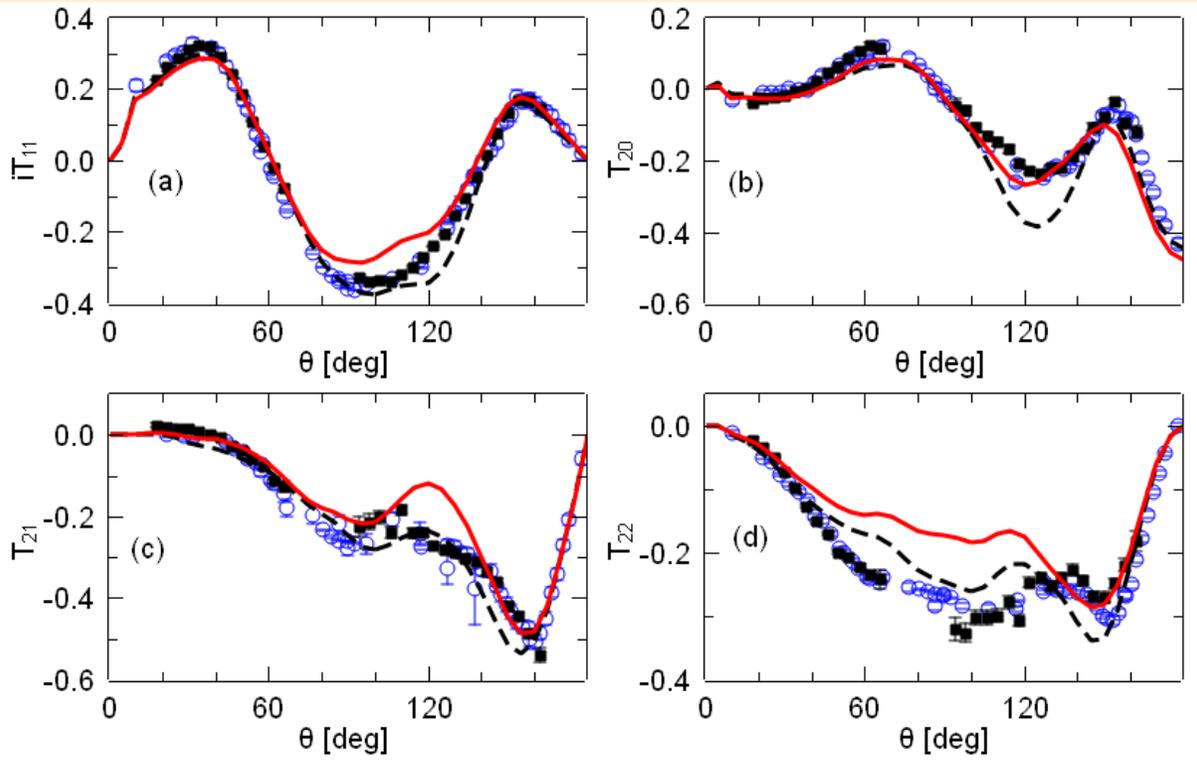
$\Delta O = O - O[\text{AV18}]$



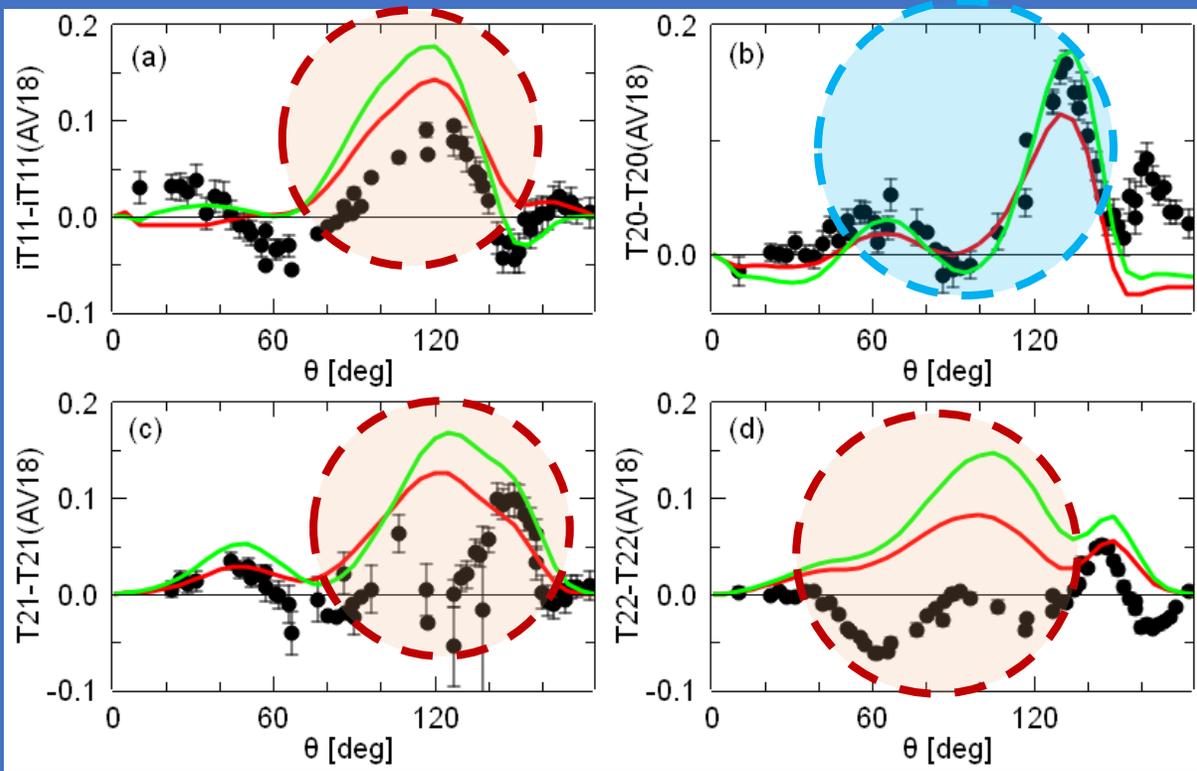
切断質量への依存性 pd @ 135 MeV

- - - - AV18
 - - - - AV18+BR₆₆₀
 - - - - AV18+BR₁₀₀₀ + W_R

$iT_{11}(\theta)$ $T_{20}(\theta)$
 $T_{21}(\theta)$ $T_{22}(\theta)$



$\Delta 0 = 0 - 0[\text{AV18}]$



切断質量への依存性

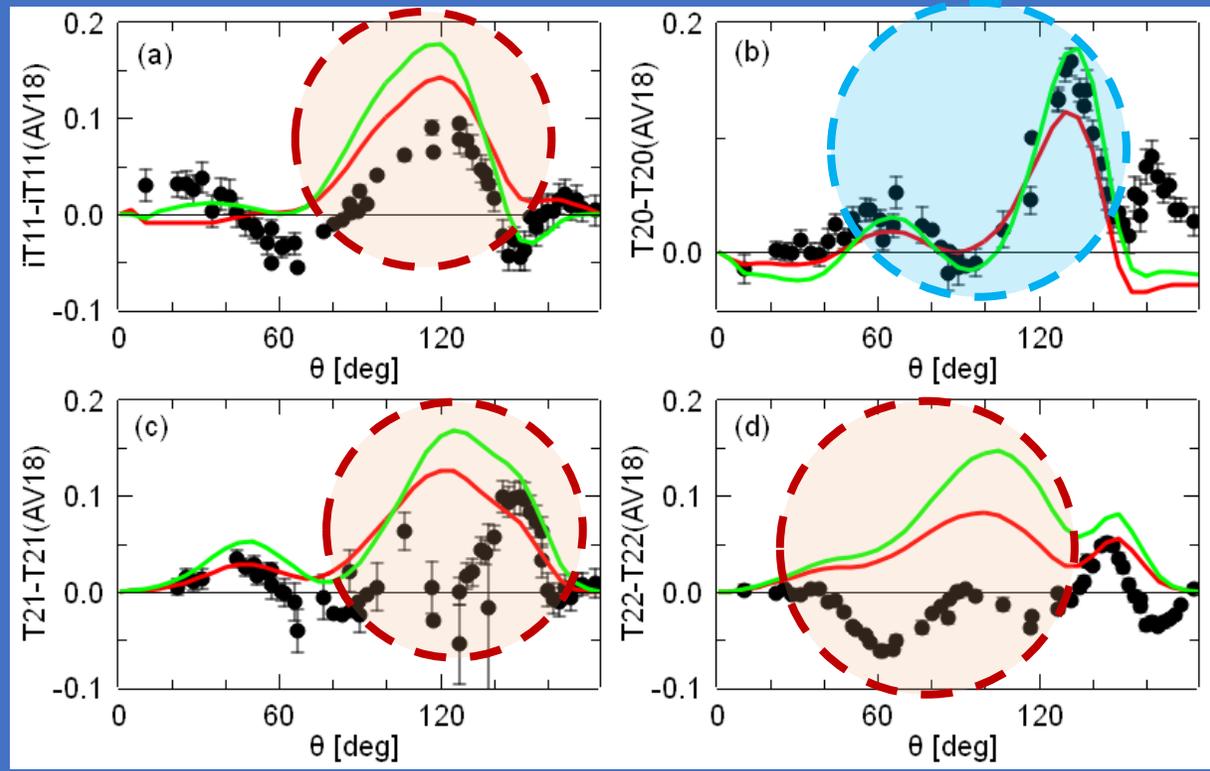
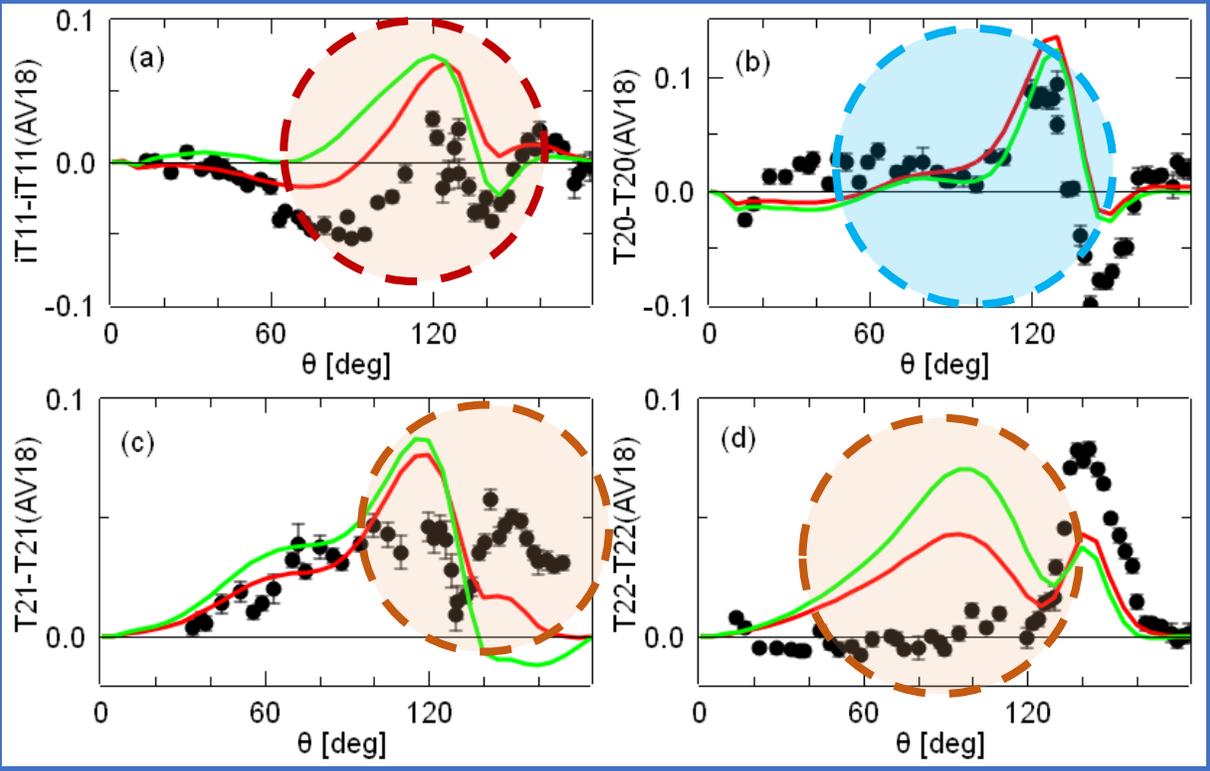
pd@70MeV, 135 MeV

$iT_{11}(\theta)$	$T_{20}(\theta)$
$T_{21}(\theta)$	$T_{22}(\theta)$

- AV18
- AV18+BR₆₆₀
- AV18+BR₁₀₀₀ + W_R

$\Delta 0 = 0 - 0$ [AV18] @70MeV

$\Delta 0 = 0 - 0$ [AV18] @135 MeV



4. ND弾性散乱偏極量(2)

1. 切断質量 $\Lambda = 1000 \text{ MeV}$ とした $2\pi E-3NF$ (BR_{1000}) $AV18 + BR_{1000}$
2. 3N-BE、 $[iT_{11}(\theta), T_{21}(\theta)] @ E_p = 3 \text{ MeV}$ を再現するために現象論的3体力を追加導入する。

$$V^{phe} = V_c + V_T \text{ (テンソル力)} + V_{SO} \text{ (スピン軌道力)}$$

taken from Kievsky ('99)

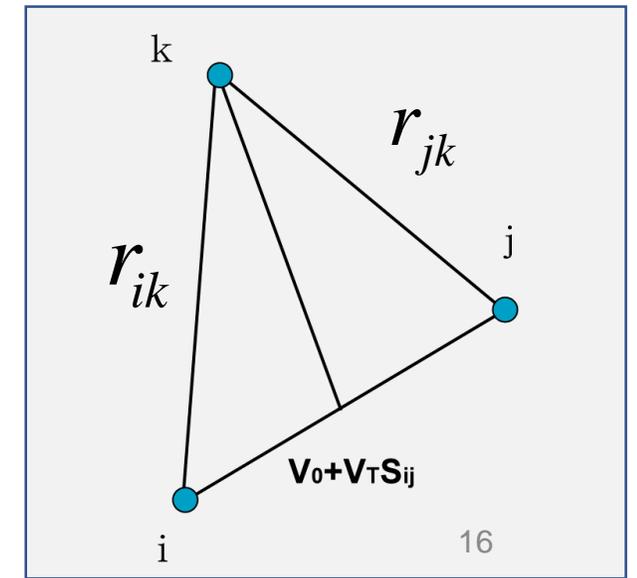
$$V^{phe} = \sum_{i \neq j \neq k} e^{-\left(\frac{r_{ik}}{R_0}\right)^2 - \left(\frac{r_{jk}}{R_0}\right)^2} \left[V_c + V_T S_T(ij) \hat{P}_{11} \right] + V_{SO} e^{-\alpha \rho} \sum_{i \neq j} \left[\vec{L}_{ij} \cdot (\vec{S}_i + \vec{S}_j) \right] \hat{P}_{11}$$

\hat{P}_{11} : Projection on spin-isospin triplet state

$$\rho = \sqrt{\frac{2}{3} (r_{12}^2 + r_{23}^2 + r_{31}^2)}, \quad R_0 = 1 \text{ fm}, \quad \alpha = 1.5 \text{ fm}^{-1}$$

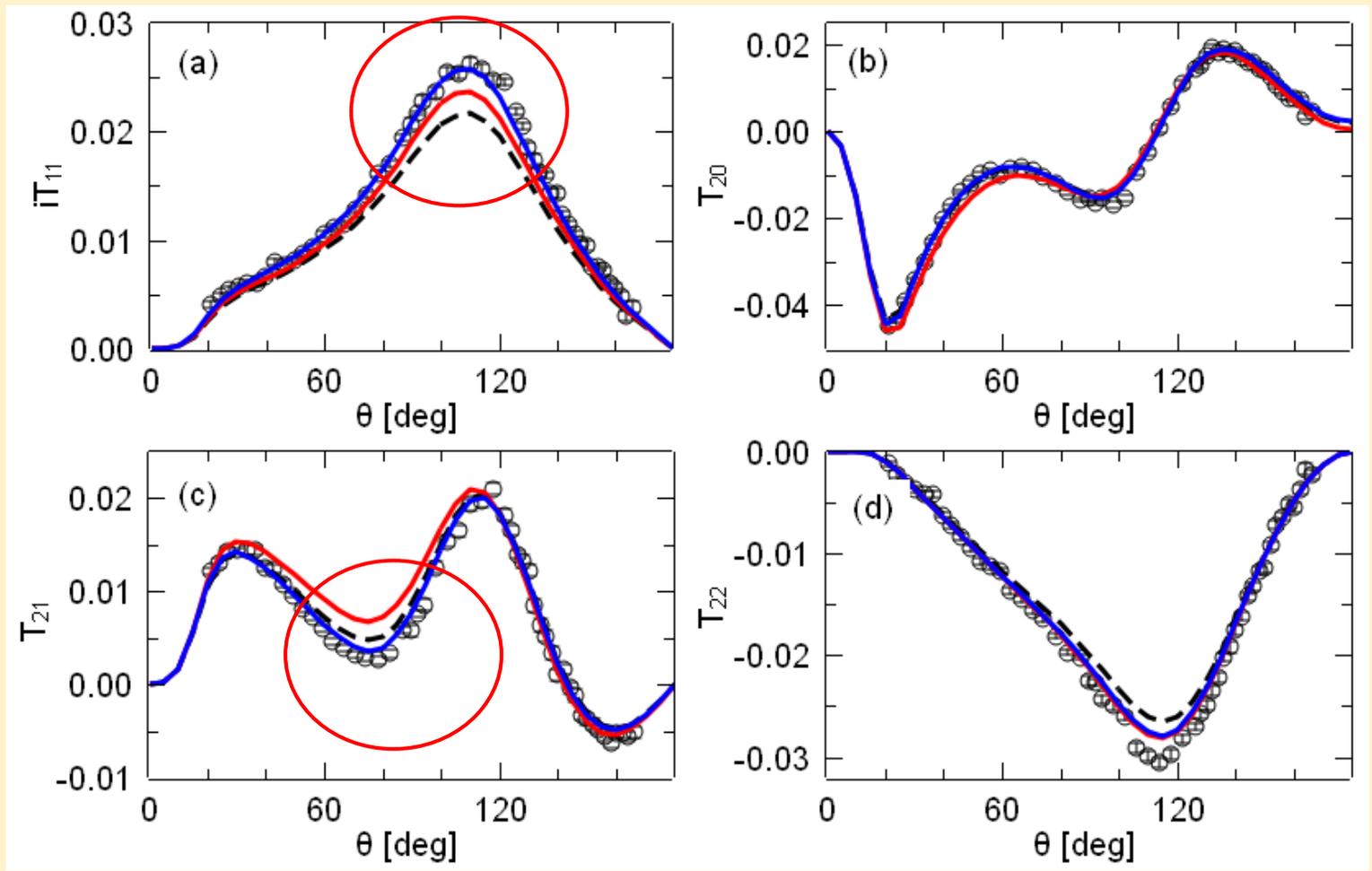
$$(V_c, V_T, V_{SO}) = (+122, -140, -8) \text{ [MeV]}$$

$2\pi E-3NF$ と同等な3体力にするには $V_T > 0$



現象論的3体力の導入 pd@ 3MeV

$iT_{11}(\theta)$ $T_{20}(\theta)$
 $T_{21}(\theta)$ $T_{22}(\theta)$



----- AV18
 ----- AV18+BR₆₆₀

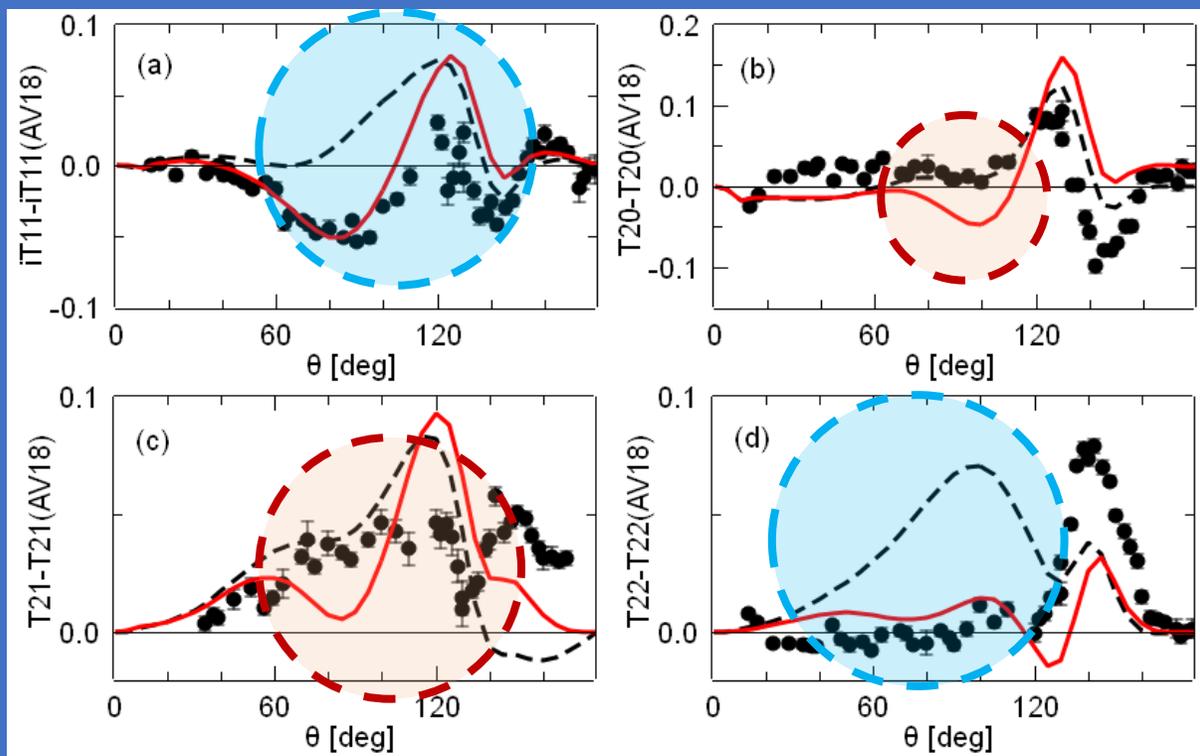
パラメーター
 $V_T \rightarrow T_{21}(\theta)$
 $V_{SO} \rightarrow iT_{11}(\theta)$
 ----- AV18+BR₁₀₀₀+V^{phe}

現象論的3体力の効果

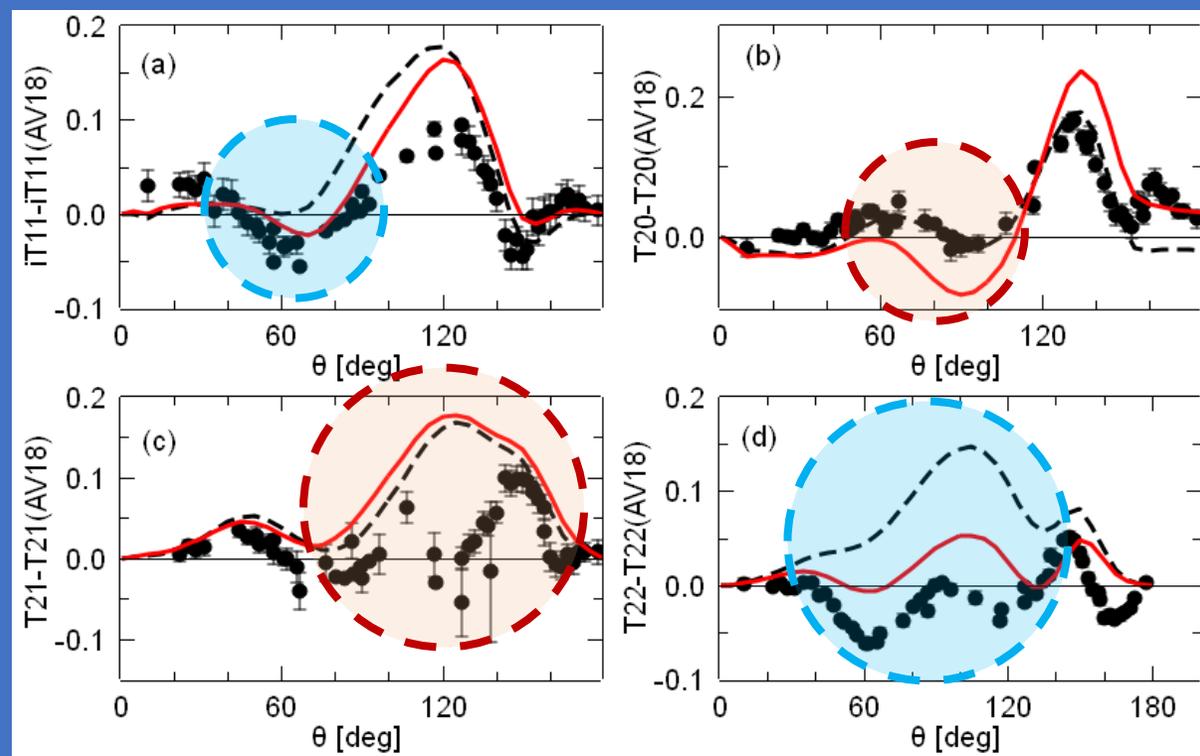
pd@70MeV, 135 MeV

----- AV18+BR₁₀₀₀+V_c
 ----- AV18+BR₁₀₀₀+V^{phe}

$\Delta 0 = 0 - 0$ [AV18] @70MeV



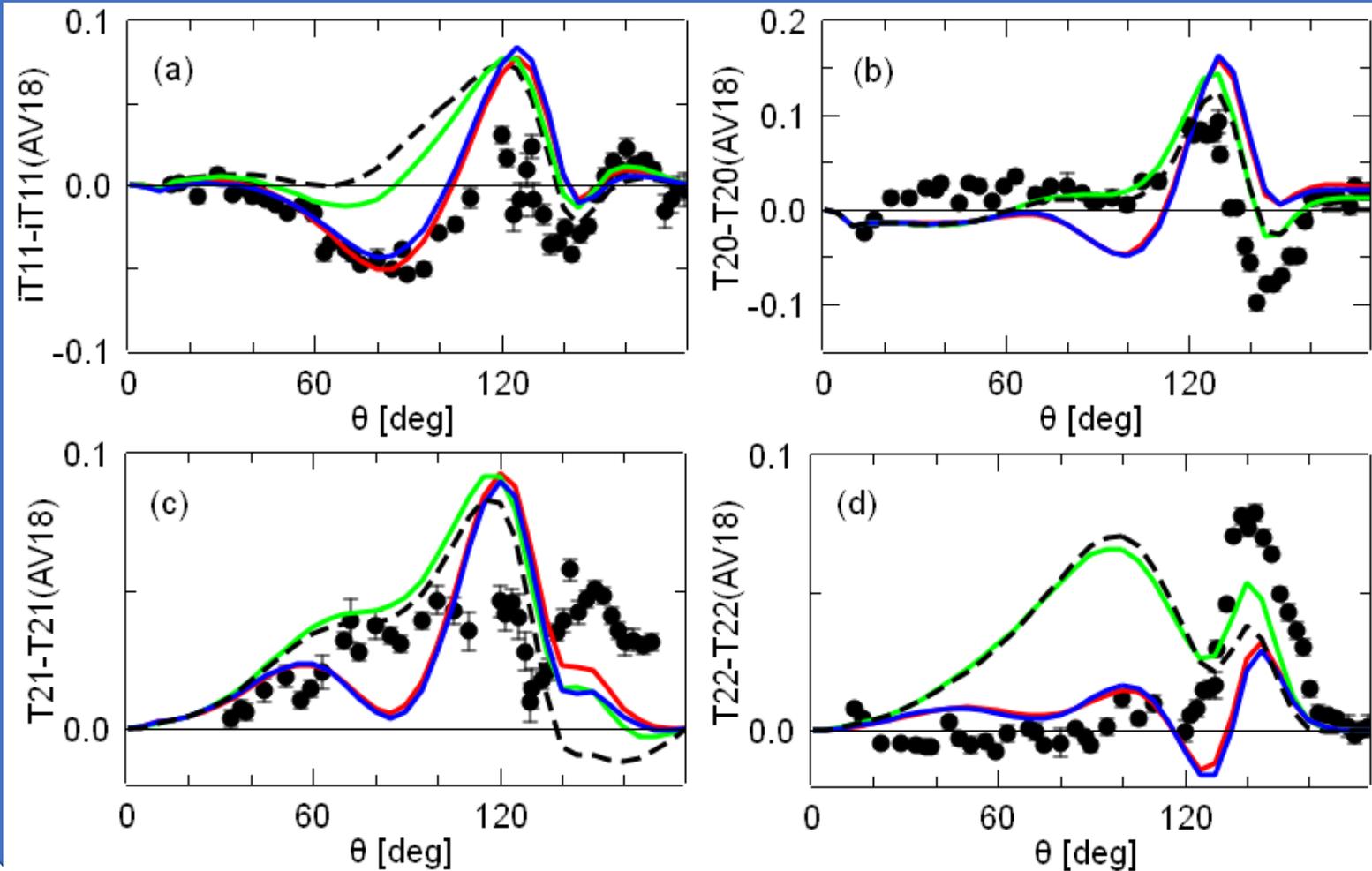
$\Delta 0 = 0 - 0$ [AV18] @135 MeV



現象論的3体力の効果の内訳: スピン軌道力 V_{SO} 、テンソル力 V_T

pd @70 MeV

$\Delta 0 = 0 - 0$ [AV18] 70MeV

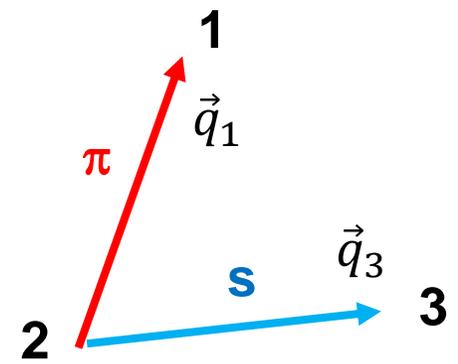
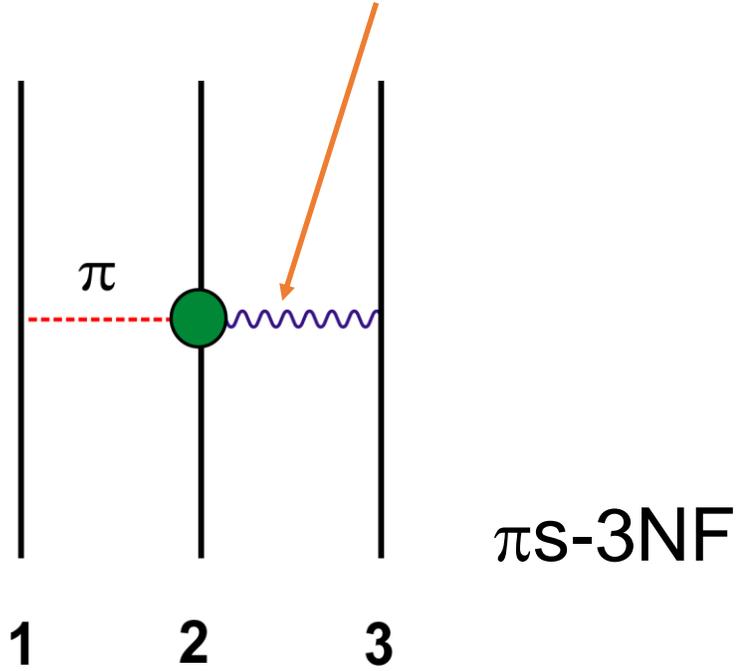


- AV18+BR₁₀₀₀+ V_c
- AV18+BR₁₀₀₀+ V_c + V_{SO}
- AV18+BR₁₀₀₀+ V_c + V_T
- AV18+BR₁₀₀₀+ V^{phe}

V_{SO} の寄与は小さい

5. ND弾性散乱偏極量(3)

Scalar-Isoscalar object



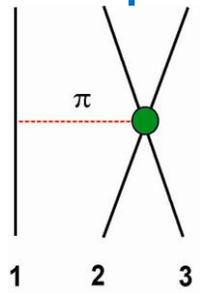
パイオン-"スカラーボゾン"交換型3体力(π S-3NF)

一般形

$$V_{\pi S}(\vec{q}_1, \vec{q}_2) = (\vec{\tau}_1 \cdot \vec{\tau}_2) \frac{1}{\vec{q}_1^2 + m_\pi^2} \frac{1}{\vec{q}_3^2 + m_S^2} \times [V_a(\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{q}_1)(\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{q}_1) + V_b(\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{q}_1)(\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{q}_3)]$$

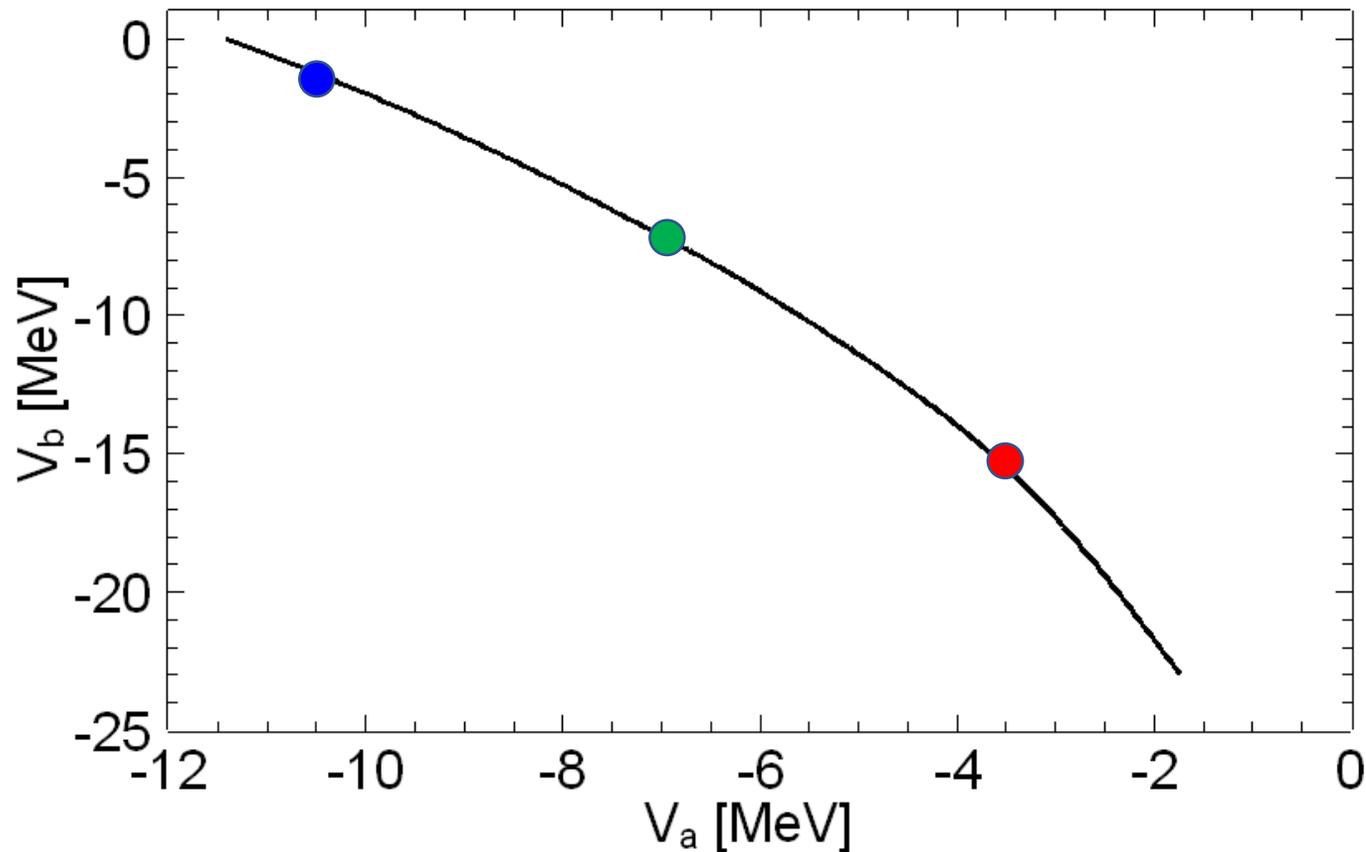
- Scalar bosons (σ)
 S. A. Coon et al., PRC **52**, 2925 (1995)
 J. Adam et al., PRC **69**, 034008 (2004)
- Effective 2π -exchange
 C. M. Maekawa et al., PRC **61**, 064002 (1998)
- "Short-range" (χ EFT-NNLO)
 E. Epelbaum et al., PRC **66**, 064001 (2002)

$$V_D(\vec{q}_1, \vec{q}_2) = -\frac{g_A^D}{8F_\pi^2} (\vec{\tau}_1 \cdot \vec{\tau}_2) \frac{(\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{q}_1)}{\vec{q}_1^2 + m_\pi^2} (\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{q}_1)$$



AV18+BR₁₀₀₀+ π s-3NF (V_a, V_b)

3N-BEを再現する(V_a, V_b)の組み合わせ



(V_a, V_b) in MeV

I: (-3.5, -15.6)

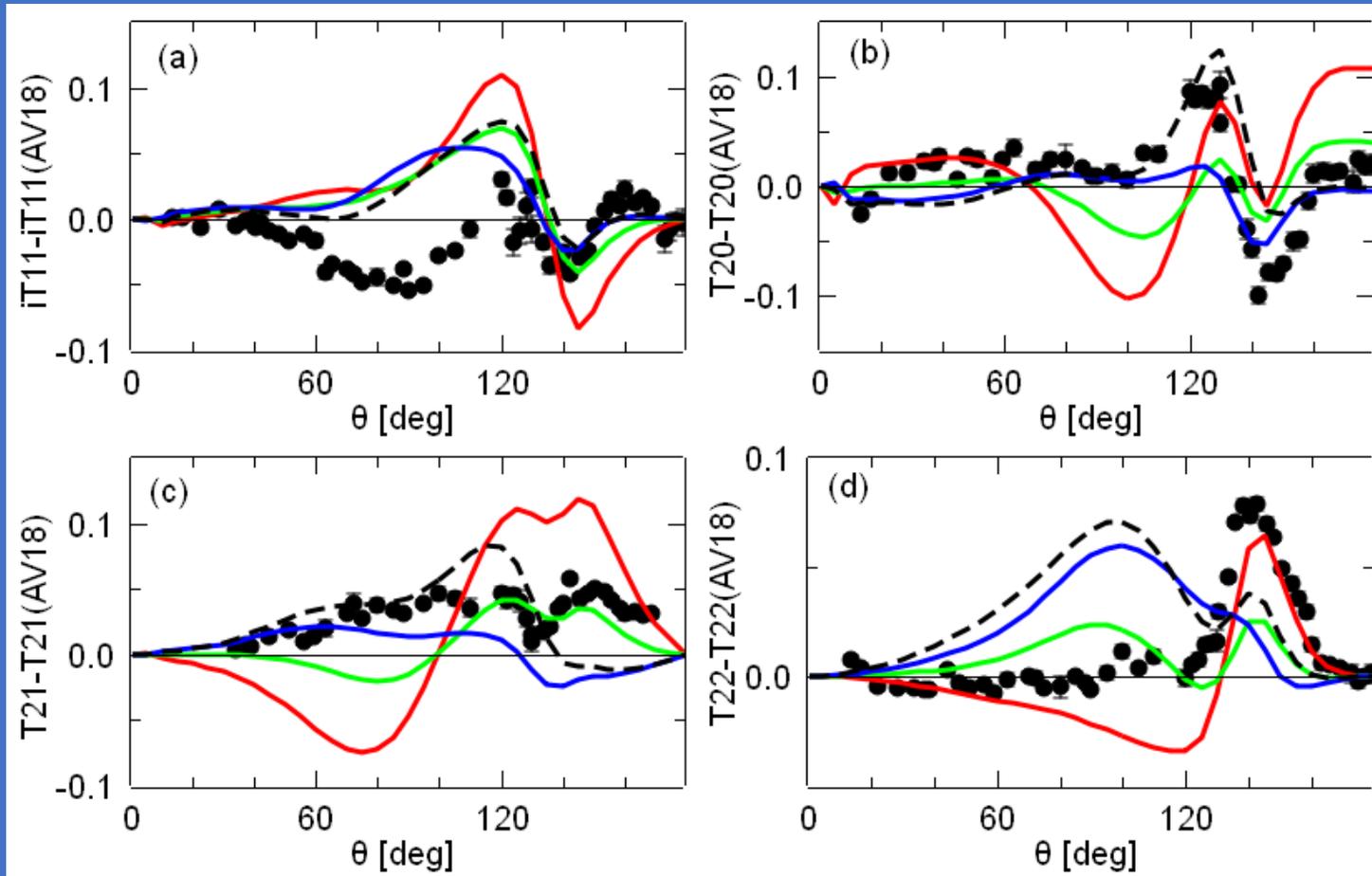
II: (-6.9, -7.2)

III: (-10.4, -1.4)

pd observables at $E_p = 70$ MeV

AV18+BR₁₀₀₀+ π S-3NF

$\Delta O = O - O[\text{AV18}] @ 70\text{MeV}$



AV18+BR₁₀₀₀+ W_R

$m_s = 500$ MeV

AV18+BR₁₀₀₀+ π S-3NF
(V_a, V_b) in MeV

I: (-3.5, -15.6)

II: (-6.9, -7.2)

III: (-10.4, -1.4)

6. まとめ

1. 2π 交換型3体力の切断質量値を大きく取り、 $r \sim 1$ fmでの π 交換効果を取り入れることにより、中高エネルギーのND弾性散乱後方断面積の問題を解消することが可能である。
2. 2π 交換型3体力中のテンソル力成分は、低エネルギー(3MeV)ND散乱のテンソル分解能 T_{21} に対して、実験値を再現する方向とは逆方向の寄与をなす。
3. 2. の寄与を修正するように導入した現象論的3体力は、高いエネルギー(70MeV, 135MeV)での弾性散乱偏極量を部分的に改善する。
 iT_{11} 、 $T_{22} \rightarrow \text{O}$ 、 T_{20} 、 $T_{21} \rightarrow \text{X}$
4. パイオン-”スカラーボゾン”交換型3体力は、(まだ不確定性が大きい)偏極量の再現性は良くない。