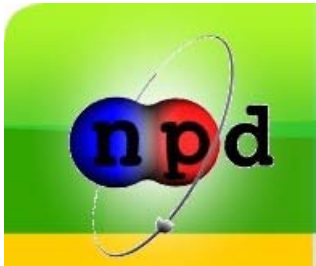




Obserwable polaryzacyjne w zderzeniach deuteronu z protonem



Seminarium Fizyka Jądra Atomowego
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Elżbieta Stephan
Zakład Fizyki Jądrowej i Jej Zastosowań
Instytut Fizyki Uniwersytetu Śląskiego



Obszar badań

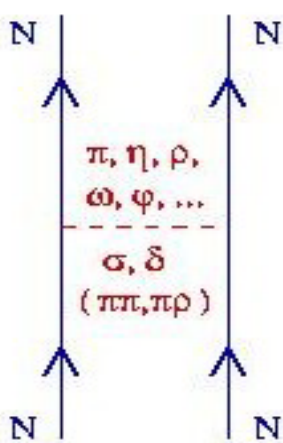
- @ Układ trzech nukleonów
- @ Rozpraszanie elastyczne i reakcja rozszczepienia deuteronu d_p
- @ Obserwable polaryzacyjne



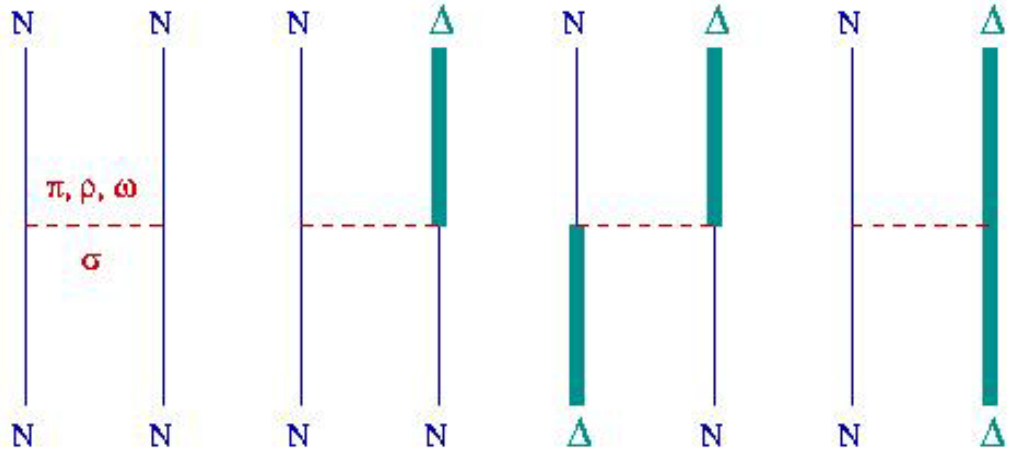
Układ dwu-nukleonowy

Standardowe modele oddziaływania

- Teoria wymiany mezonowej dla sił NN - nukleonowe stopnie swobody (CD Bonn, Nijm I, Nijm II, AV18)
- CD Bonn + jawne uwzględnienie stopni swobody pojedynczego izobaru Δ – barionowe kanały sprzężone



Realistic Potentials



Coupled-Channels Potential



Układ dwu-nukleonowy

Model oddziaływania w efektywnej teorii pola

Chiral Perturbation Theory

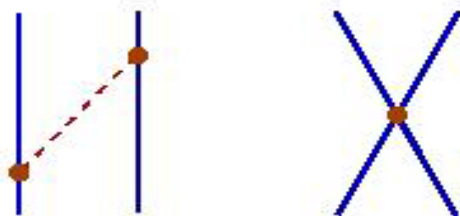
- efektywny potencjał NN otrzymuje się w wyniku systematycznego rozwinięcia na wyrazy charakteryzowane określoną potęgą v zmiennej pędowej Q , $(Q/\Lambda_\chi)^v$, gdzie $\Lambda_\chi \approx 1 \text{ GeV}$ (skala łamania Sym. Ch.); "łatwe" dla amplitudy rozpraszania π - π i π -N, bardziej skomplikowane dla oddziaływania N-N
- Dwa rodzaje przyczynków:
 - wymiana pionu(-ów) (wierzchołki kolejnych rzędów)
 - oddziaływania punktowe (parametry LEC)



Układ dwu-nukleonowy

Model potencjału w EFT / ChPT

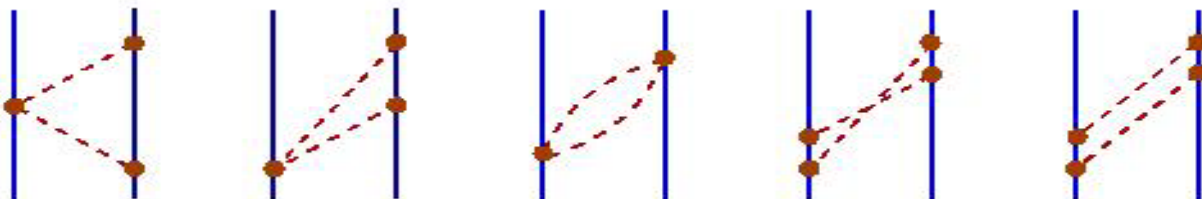
LO:



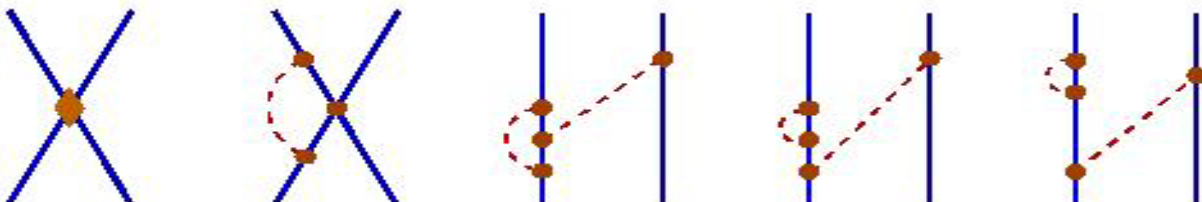
($v=0$) wymiana 1π & 2 LEC

NLO:

($v=2$) wymiany 2π

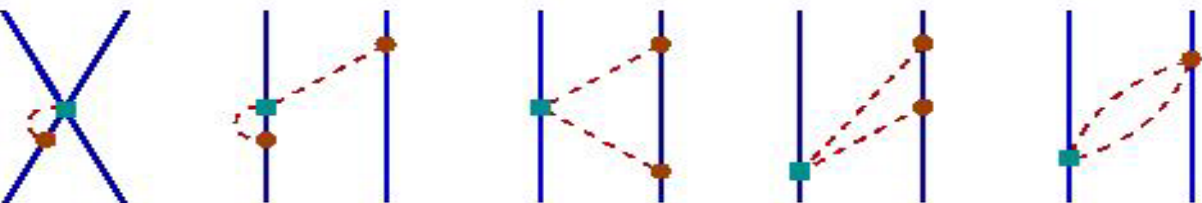


& 7 LEC
& poprawki do
wymiany 1π



NNLO:

($v=3$) wymiany 2π
& poprawki LO, NLO





Układ dwu-nukleonowy

Opis danych eksperymentalnych

Obecne realistyczne potencjały NN dają bardzo dobry opis wszystkich danych dla układu 2N

χ^2 / punkt

| | CD Bonn | NijmI | NijmII | Av18 | Coupl.Ch. |
|-------------------|---------|-------|--------|------|-----------|
| Liczba parametrów | 45 | 41 | 47 | 40 | ~40 |
| dane pp | 1.01 | 1.03 | 1.03 | 1.35 | 1.02 |
| dane np | 1.02 | 1.03 | 1.03 | 1.07 | 1.03 |

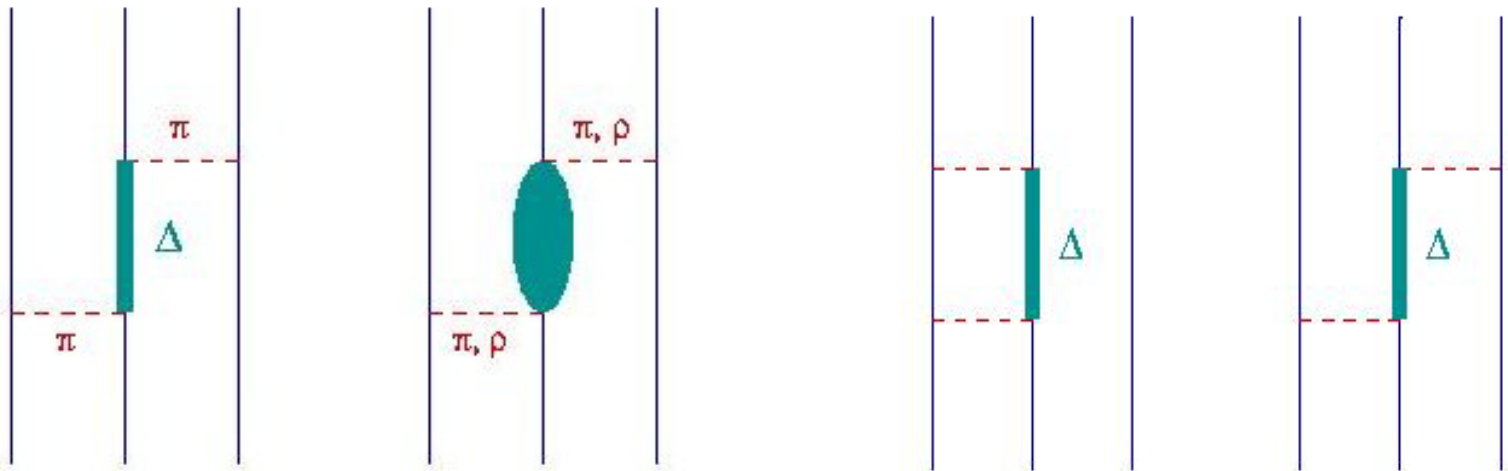
Także formalizm EFT/ChPT, wraz z rosnącym rzędem, opisuje układ 2N bardzo dobrze - znacząca poprawa przy przejściu NLO do NNLO do NNNLO (26 LEC)



Układ trzech nukleonów

Potencjały RP / CC & modele 3NF

- Siły trój-nukleonowe – jedynie **słaby związek** z potencjałami NN (TM99, Urbana IX, Brazil)
- *Konkurencyjne efekty* związane ze wzbudzeniem Δ (dyspersja dwu-nukleonowa i efektywna 3NF) – wypadkowy **wpływ Δ** jest raczej **mało istotny**



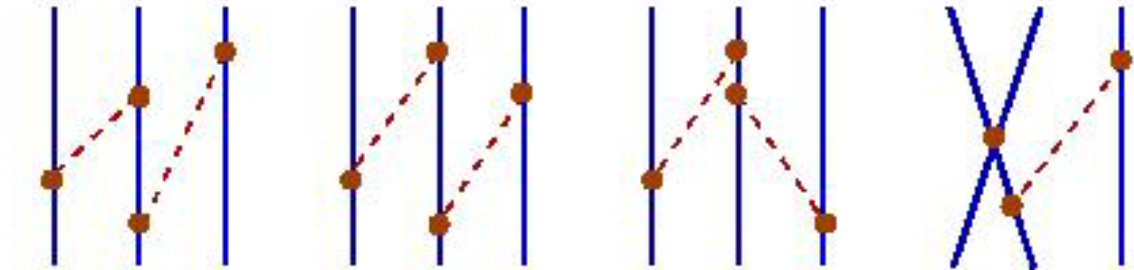


Układ trzech nukleonów

3NF w podejściu ChPT

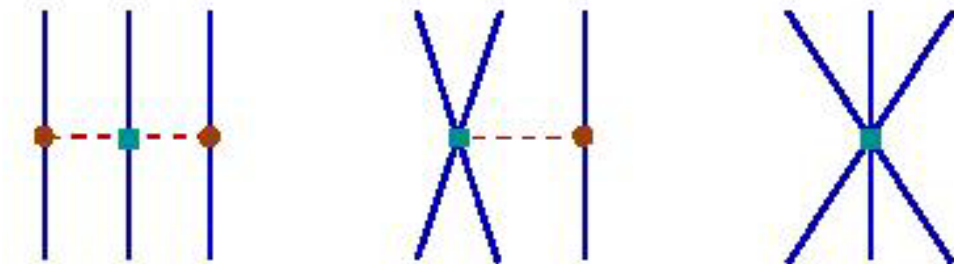
- Siły trój-nukleonowe pojawiają się naturalnie, w pełni konsystentnie z przyczynkami 2N

NLO:



Wszystkie przyczynki się znoszą !

NNLO:



Trzy możliwe topologie



Efekty 3NF

Stany związane kilku nukleonów

Potencjały NN z dodanym modelem 3NF przewidują energie wiązania 3N, 4N ($|E_B|$ [MeV]) znacznie lepiej !

| | ${}^3\text{H}$ | ${}^3\text{He}$ | ${}^4\text{He}$ |
|-----------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Eksperyment | 8.48 | 7.72 | 28.3 |
| CD Bonn | 8.01 | 7.29 | 26.3 |
| NijmII | 7.66 | 7.01 | 24.6 |
| Av18 | 7.62 | 6.92 | 24.3 |
| CD Bonn + TM99 | 8.48 | 7.73 | 29.2 |
| NijmII + TM99 | 8.39 | 7.72 | 28.5 |
| Av18 + TM99 | 8.48 | 7.76 | 28.8 |
| Av18 + UIX | 8.48 | 7.76 | 28.5 |
| CC CD Bonn + Δ | 8.36 | 7.64 | 28.4 |

$E_B({}^3\text{H})$
użyte w
ficie 3NF



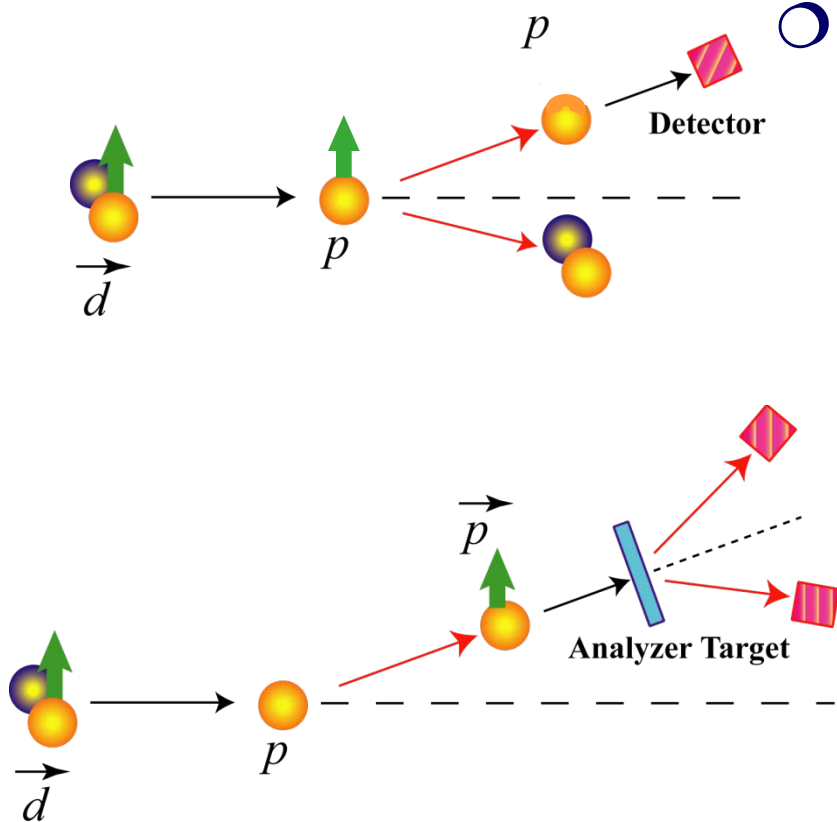
Rozpraszanie elastyczne nukleon-deuter Observable

○ Różniczkowy przekrój czynny

➤ ogólna „siła”

○ Observable polaryzacyjne:

- Wekt. zdolność analizująca iT_{11}
 - oddziaływanie $L \cdot S$
- Tensorowe zdolności analizujące T_{20}, T_{21}, T_{22}
 - oddz. tensorowe (D-state)
 - oddz. $(L \cdot S)^2$
- Współczynniki korelacji $C_{ij}^{k'}$
- Współczynniki transferu $K_{ij}^{k'}$
 - oddz. Spin-Spin

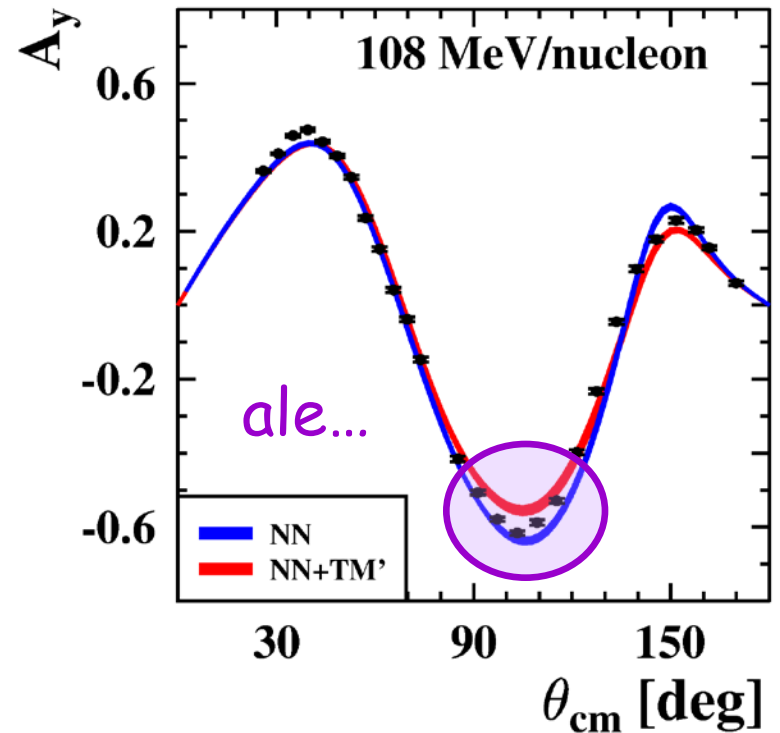
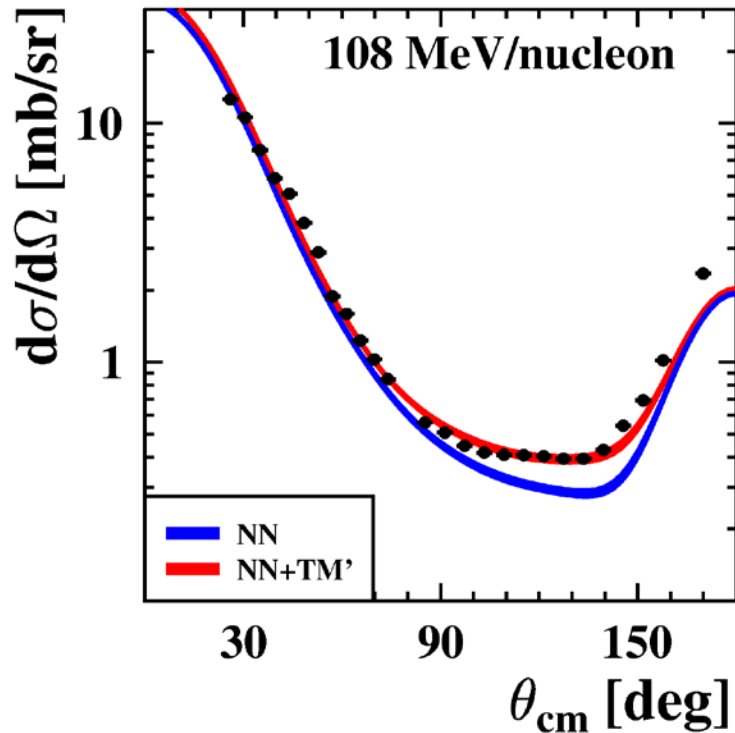




Efekty 3NF

Rozpraszanie sprężyste nukleon-deuter

Potencjały NN z dodanym modelem 3NF lepiej odtwarzają minimum $d\sigma/d\Omega$ rozpraszania $d(N,N)d$

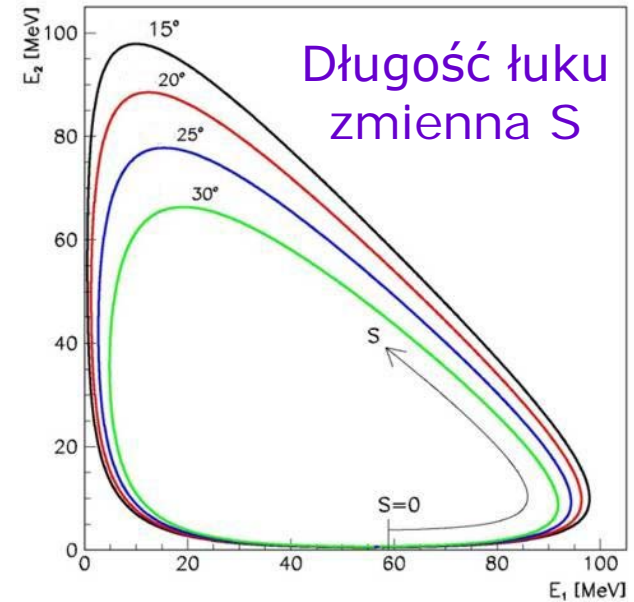
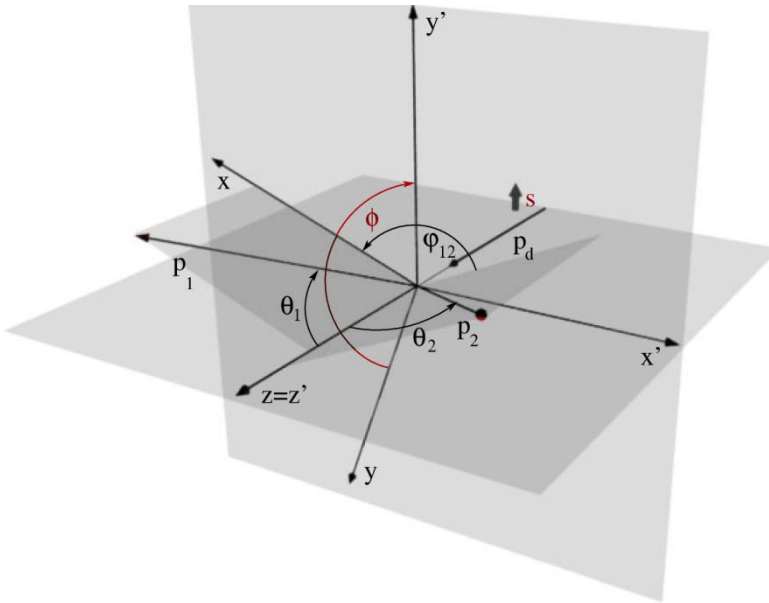




Kinematyka reakcji breakupu

- ❑ Trzy nukleony w stanie końcowym - 9 zmiennych
- ❑ Zachowanie energii i pędu – 4 równania
- Pięć niezależnych zmiennych kinematycznych
 - ✓ Eksp. zupełny kinematycznie (ekskluzywny) – pomiar ≥ 5
 - ✓ Eksperyment inkluzywny – pomiar ≤ 4 parametrów

$^1\text{H}(d,pp)n$
mierzone:
kierunki oraz
energie obu
protonów, t.j.
 θ_1, φ_1, E_1
 θ_2, φ_2, E_2





Układ trzech nukleonów w kontinuum

Przekroje czynne i zdolności analizujące
reakcji breakupu ${}^1\text{H}(\vec{d}, pp)n$ w zakresie średnich energii

- ❑ Niewiele danych dla breakupu w tym obszarze energii (eksperymenty w PSI przy 65 MeV/A – tylko 14 konfiguracji kinematycznych)
- ❑ Do wyciągnięcia wniosków o modelach oddziaływania niezbędne są dane eksperymentalne dla możliwie dużego obszaru przestrzeni fazowej
- ❑ Możliwe badanie różnych efektów
 - Wpływ oddziaływania 3NF
 - Rola siły Coulombowskiej
 - Efekty relatywistyczne



Experiments $^1\text{H}(\vec{d}, pp)n$ i $^2\text{H}(\vec{p}, pp)n$

Kernfysisch Versneller Instituut, Groningen



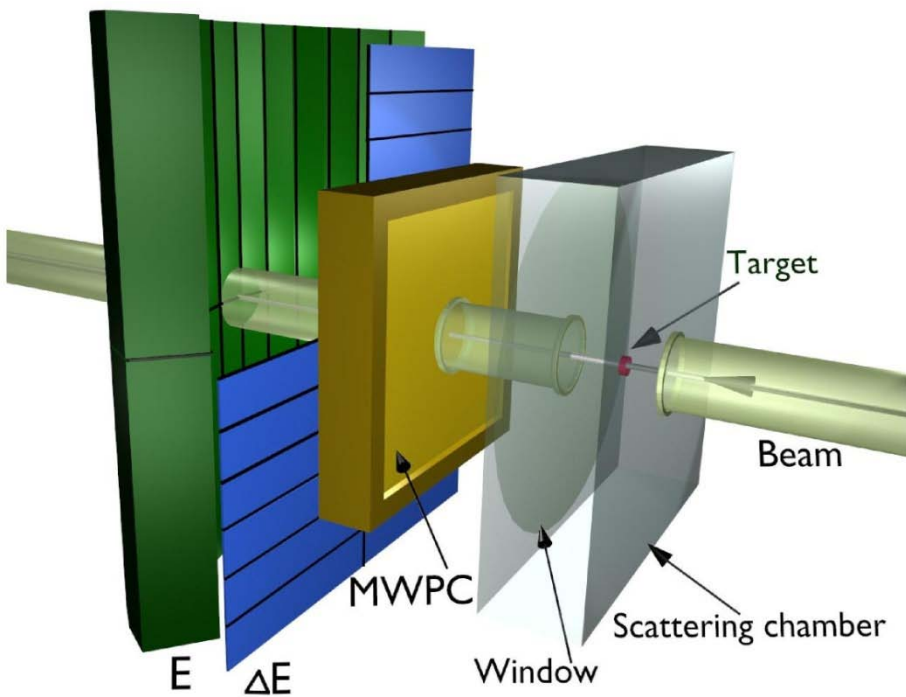
Układy detekcyjne

SALAD

- ✓ 140 teleskopów ΔE -E
- ✓ 3 płaszczyzny MWPC

→ zakres kątowy:

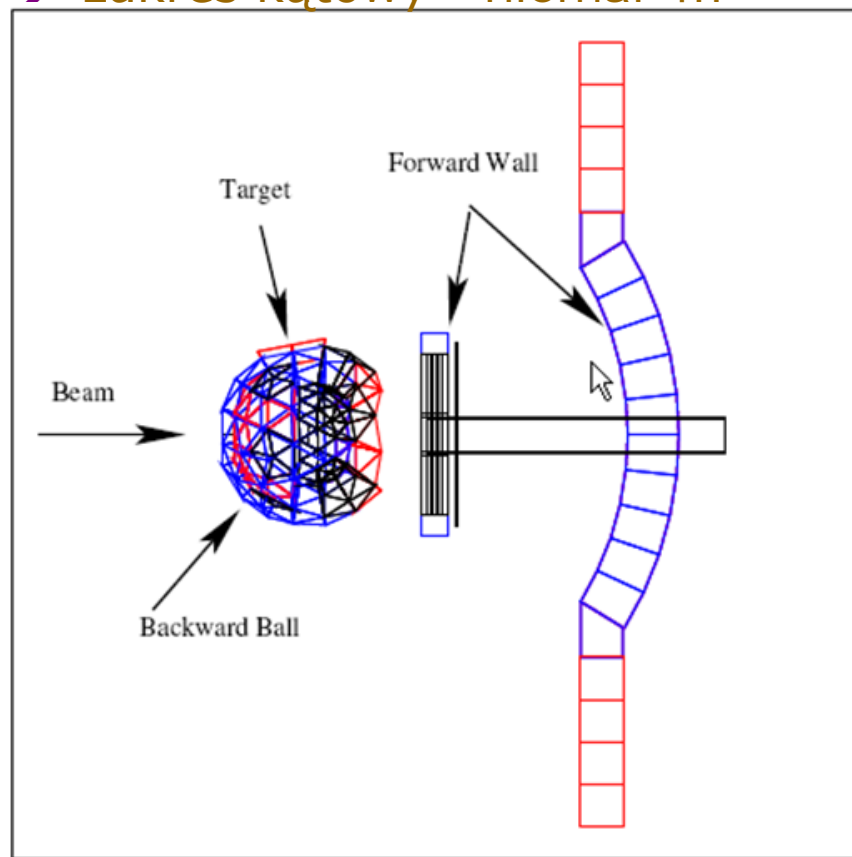
$$\theta = (12^\circ, 38^\circ), \varphi = (0^\circ, 360^\circ)$$



BINA

- ✓ *Wall* - bardzo podobna do SALAD'a
- ✓ *Ball* - 149 detektorów typu phoswich

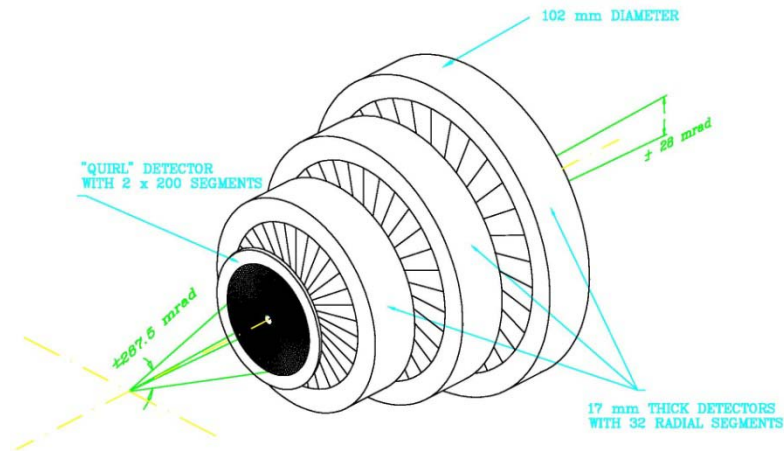
→ zakres kątowy - niemal 4π





Centrum Badawcze Juelich, COSY, 130 MeV

Pomiary przy pomocy GeWall - kąty przednie



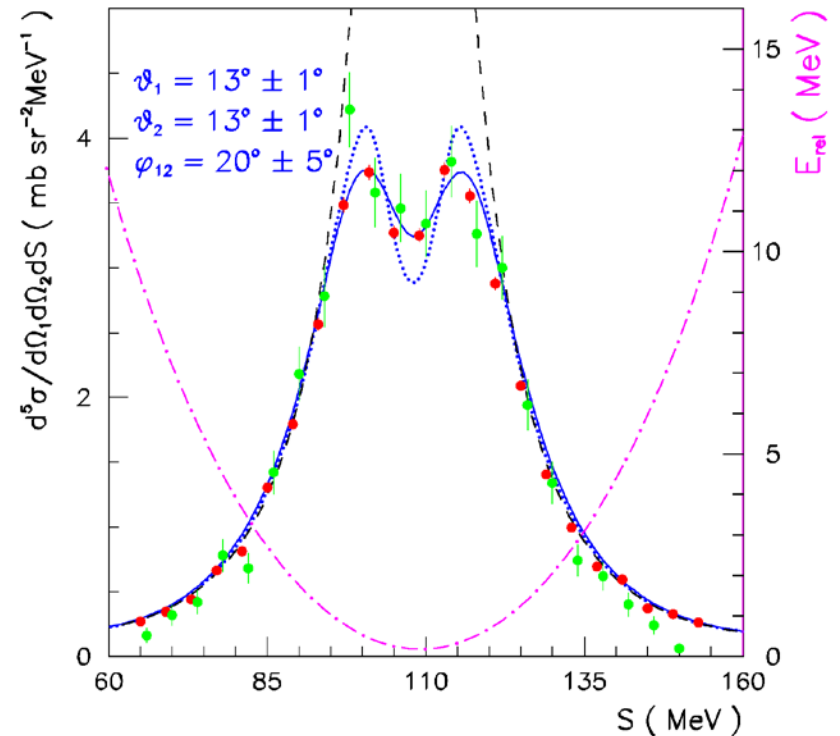
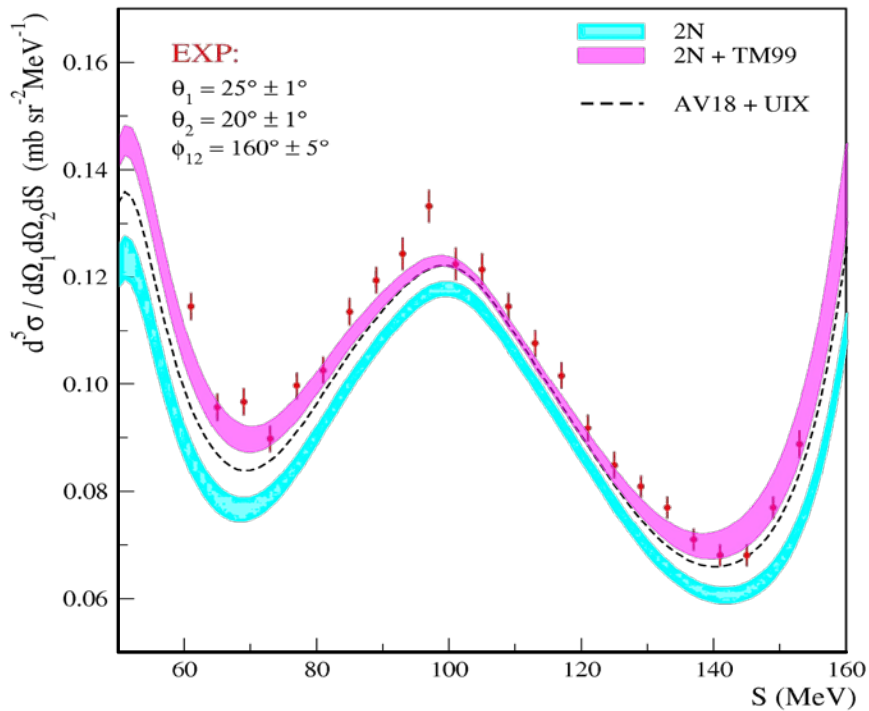
GeWall@COSY

$\Theta: 3^\circ - 14^\circ$

$\varphi: 2\pi$



→ Eksperyment $^1\text{H}(d,pp)n$ przy 130 MeV Wyniki dla przekroju czynnego – przykład



Pomiar $^1\text{H}(\vec{d}, pp)n$ przy energii 130 i 100 MeV

Stany polaryzacji wiązki

| 130 MeV SALAD | | ΔP_z | ΔP_{zz} | 100 MeV BINA | | ΔP_z | ΔP_{zz} |
|----------------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------------|-----------------|--------------|-----------------|
| 7 states: | | 0.008 | 0.05 | 5 states: | | 0.01-0.02 | 0.02-0.07 |
| P_z^{\max} | P_{zz}^{\max} | P_z | P_{zz} | P_z^{\max} | P_{zz}^{\max} | P_z | P_{zz} |
| +1/3 | -1 | 0.256 | -0.757 | | | | |
| +2/3 | 0 | 0.449 | -0.118 | +2/3 | 0 | 0.443 | -0.208 |
| -2/3 | 0 | -0.444 | 0.050 | -2/3 | 0 | -0.548 | 0.035 |
| 0 | +1 | -0.068 | 0.556 | 0 | +1 | -0.067 | 0.550 |
| 0 | -2 | 0.021 | -1.346 | 0 | -2 | 0.004 | -1.430 |
| +1/3 | +1 | 0.198 | 0.672 | | | | |
| 0 | 0 | | | 0 | 0 | | |



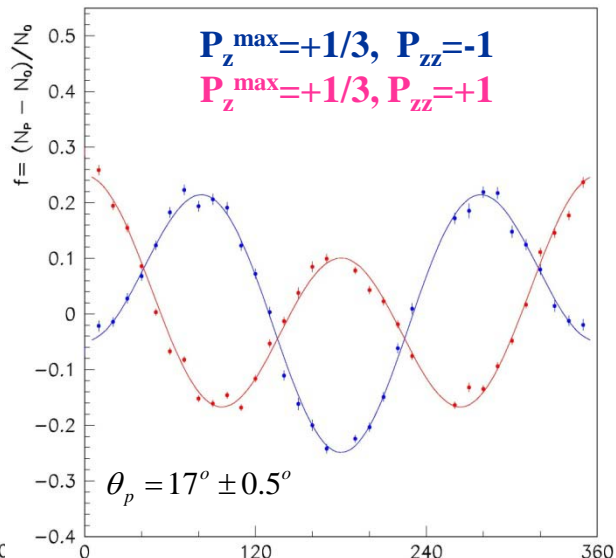
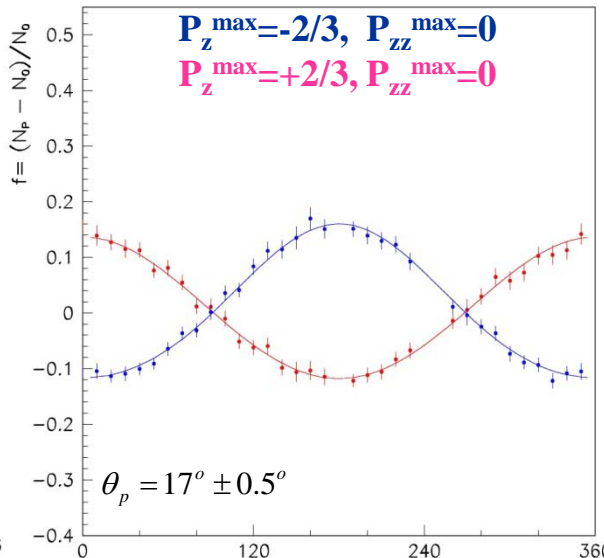
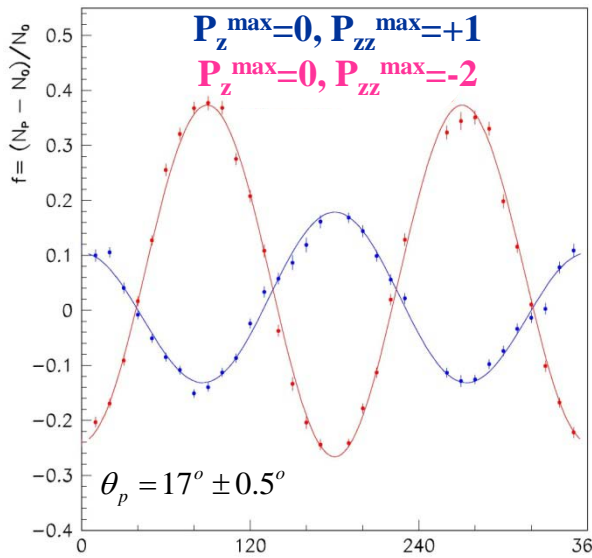
Wyznaczenie polaryzacji wiązki

Rozpraszane sprężyste:

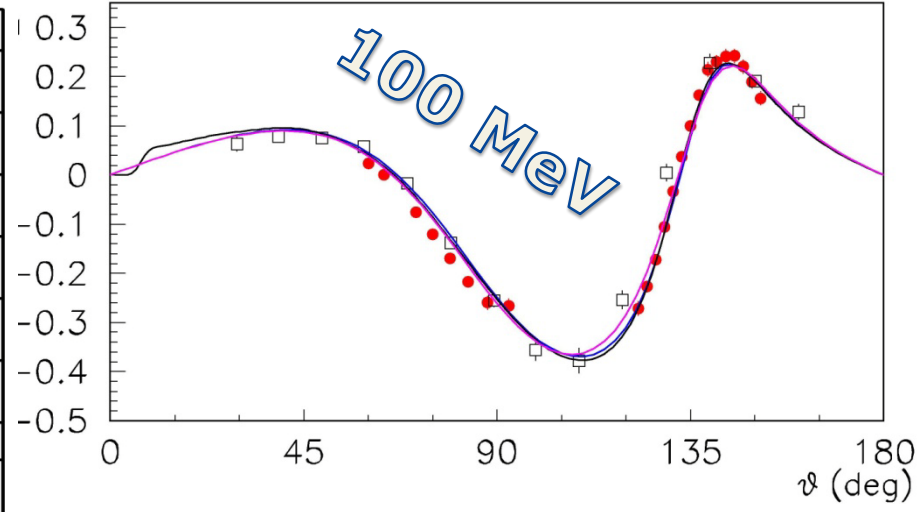
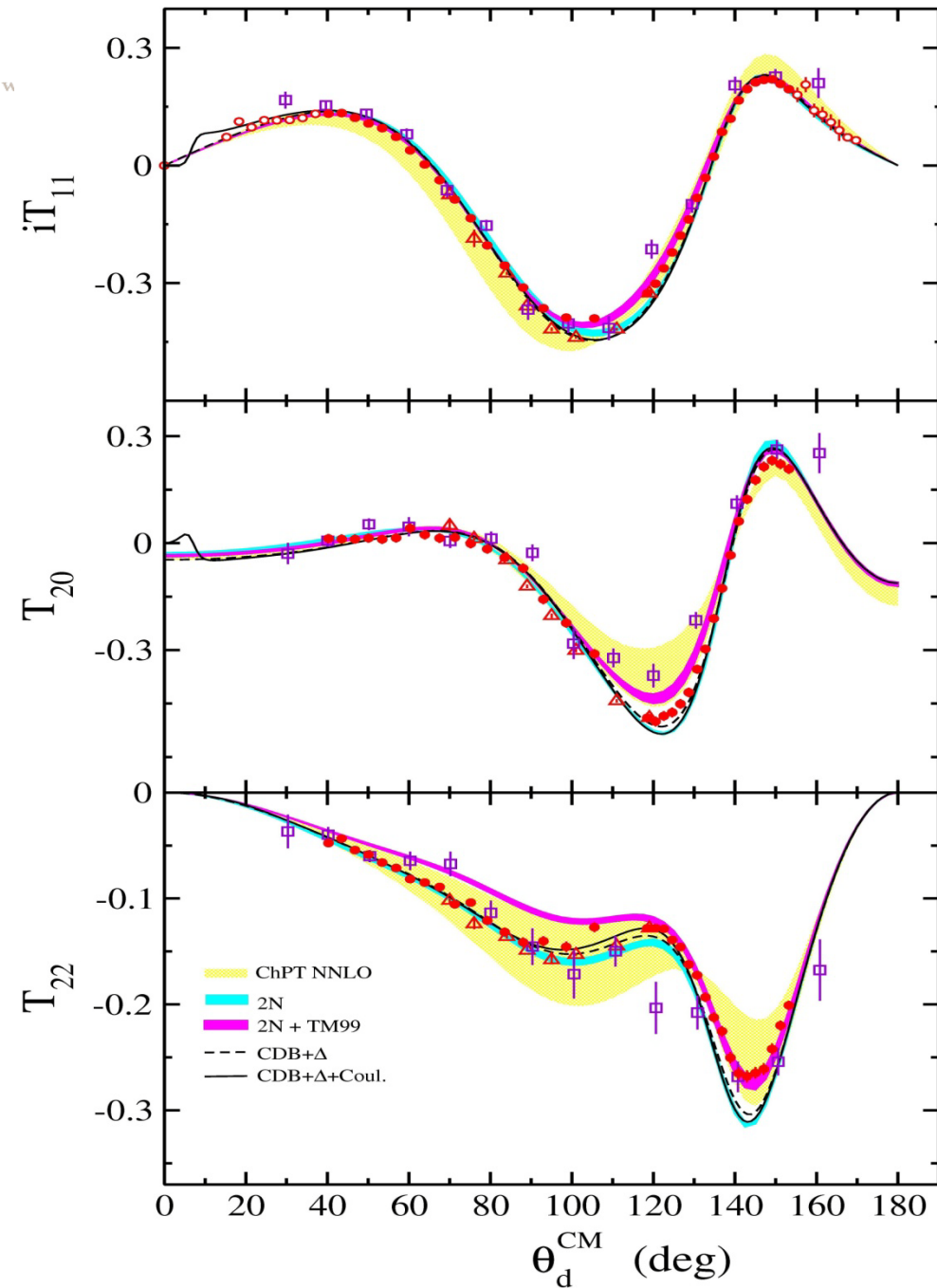
$$\sigma_P(\theta_p, \varphi_p) = \sigma_0(\theta_p) \cdot \left[1 + \sqrt{3} \cdot iT_{11}(\theta_p) \cdot P_z \cdot \cos \varphi_p - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot T_{22}(\theta_p) \cdot P_{zz} \cdot \cos 2\varphi_p - \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot T_{20}(\theta_p) \cdot P_{zz} \right]$$

$$\frac{N_P - N_0}{N_0} = a \cdot \cos \varphi + b \cdot \cos 2\varphi + c$$

iT_{11}, T_{20}, T_{22} : pomiar w RIKEN, Eur. Phys. J. 31, 383 (2007)



φ_p

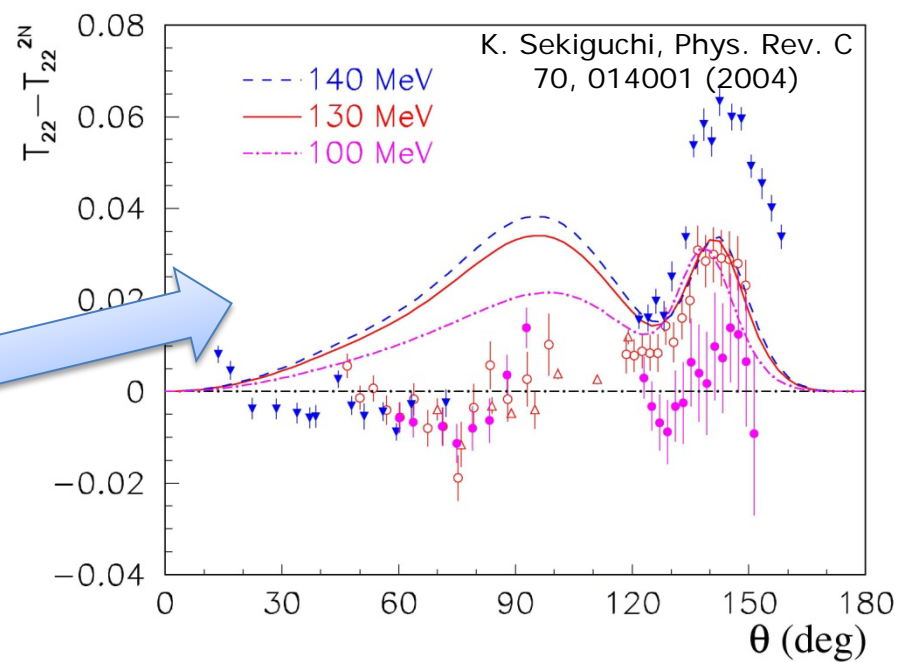
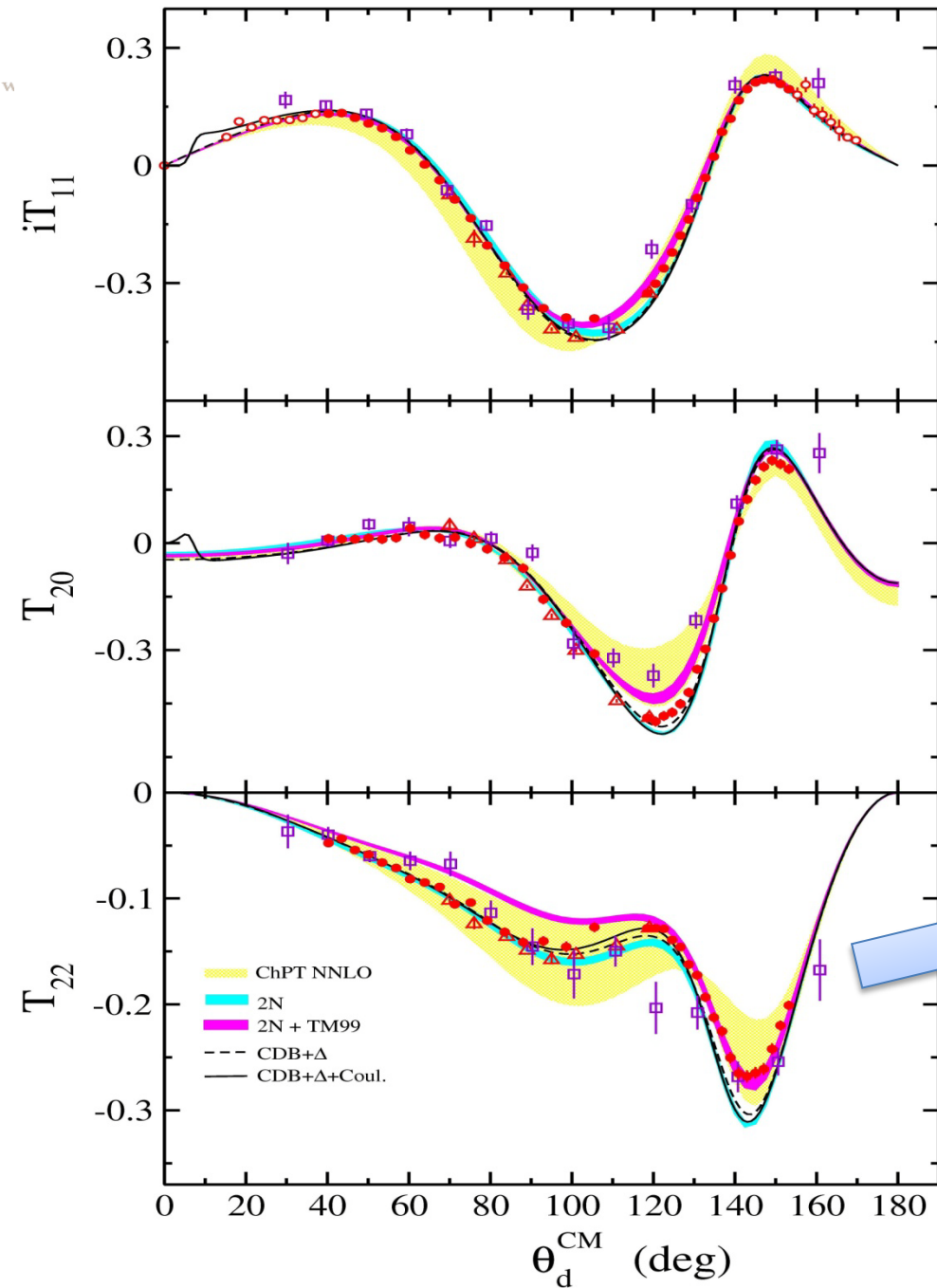


$^1\text{H}(d,d)p$
 $^1\text{H}(d,dp)$

● E. Stephan et al., *Phys. Rev. C* 76, 057001 (2007)
 ○ GeWall @ COSY

▲ H. Mardanpour et al.,
Eur. Phys. J. 31, 383 (2007)

■ H. Witała et al.,
Few-Body Systems 15, 67-85 (1993)





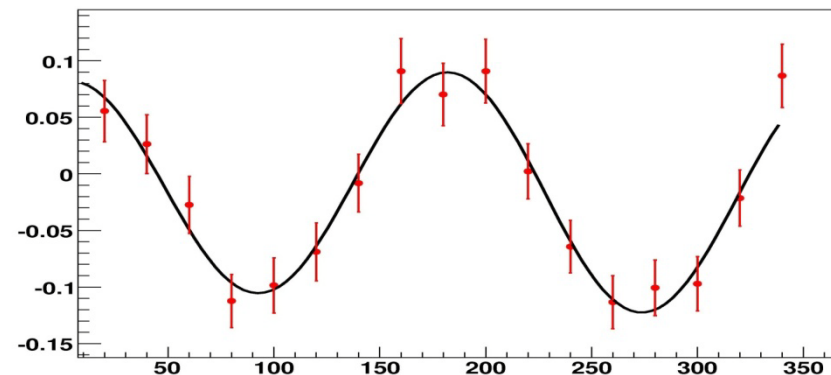
Pomiar $^1\text{H}(d,pp)n$ przy energii 130 MeV

Wyznaczenie zdolności analizujących dla reakcji breakupu

$$f_P = \frac{N_P - N_0}{N_0}$$

$$\zeta' = (\theta_1, \theta_2, S)$$

$$f_p(\zeta', \varphi_{12}, \phi) = \left[P_z \cdot \left(-\frac{3}{2} \sin \phi \cdot A_x + \frac{3}{2} \cos \phi \cdot A_y \right) + P_{zz} \cdot \left(-\frac{1}{2} \sin 2\phi \cdot A_{xy} \right) + P_{zz} \cdot \left(\frac{1}{2} \sin^2 \phi \cdot A_{xx} + \frac{1}{2} \cos^2 \phi \cdot A_{yy} \right) \right]$$

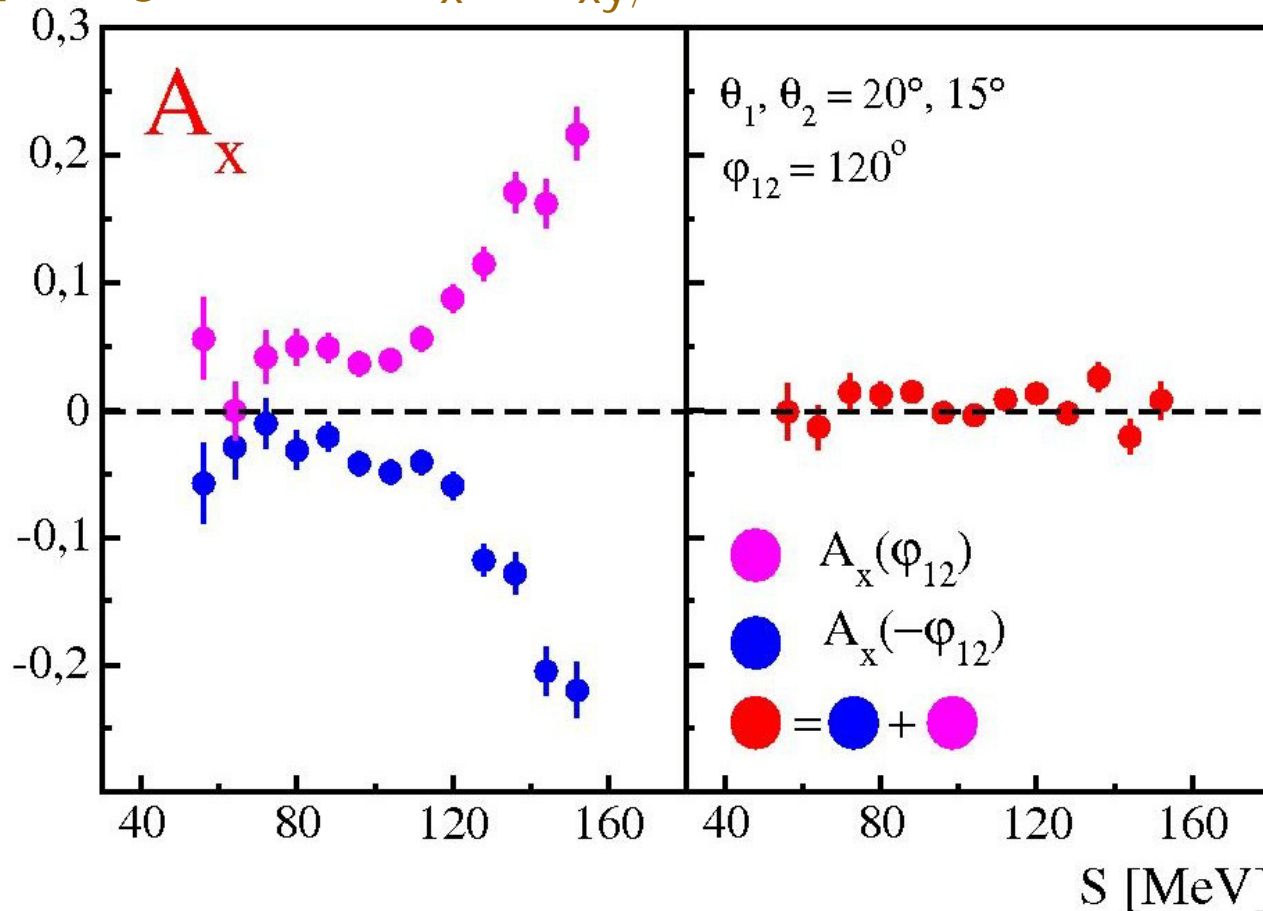




Zdolności analizujące dla reakcji breakupu

relacje wynikające z zachowania parzystości

"parzyste": A_y, A_{xx}, A_{yy} $A_y(\zeta', \varphi_{12}) = A_y(\zeta', -\varphi_{12});$
"nieparzyste": $A_x, A_{xy};$ $A_x(\zeta', \varphi_{12}) = -A_x(\zeta', -\varphi_{12});$



$$\zeta' = (\theta_1, \theta_2, S)$$



Pomiar $^1\text{H}(d,pp)n$ przy energii 130 MeV

Wyznaczenie zdolności analizujących dla reakcji breakupu
fit z uwzględnieniem relacji wynikających z symetrii parzystości

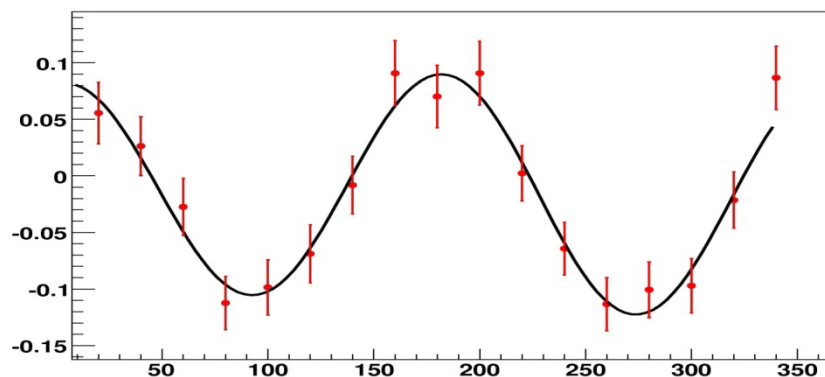
$$f_P = \frac{N_P - N_0}{N_0}$$

$$\zeta' = (\theta_1, \theta_2, S)$$

$$f_p(\zeta', \varphi_{12}, \phi) = \left[P_z \cdot \left(-\frac{3}{2} \sin \phi \cdot A_x + \frac{3}{2} \cos \phi \cdot A_y \right) + \right. \\ \left. P_{zz} \cdot \left(-\frac{1}{2} \sin 2\phi \cdot A_{xy} \right) + P_{zz} \cdot \left(\frac{1}{2} \sin^2 \phi \cdot A_{xx} + \frac{1}{2} \cos^2 \phi \cdot A_{yy} \right) \right]$$

$$\frac{1}{2} (f_p(\zeta', \varphi_{12}, \phi) + f_p(\zeta', -\varphi_{12}, \phi))$$

$$\frac{1}{2} (f_p(\zeta', \varphi_{12}, \phi) - f_p(\zeta', -\varphi_{12}, \phi))$$





Pomiar $^1\text{H}(\vec{d}, pp)n$ przy energii 130 MeV

Zdolności analizujące

- ✓ Wektorowe (A_x, A_y) i tensorowe (A_{xx}, A_{yy}, A_{xy}) zdolności analizujące wyznaczone w szerokim zakresie przestrzeni fazowej
- ✓ Około 800 punktów na obserwabłę
 - $\theta_1, \theta_2 = 15^\circ - 30^\circ$; siatka 5° ; $\Delta\theta = \pm 2^\circ$
 - $\varphi_{12} = 40^\circ - 180^\circ$; siatka 20° ; $\Delta\varphi = \pm 10^\circ$
 - S [MeV] = 40 – 160; siatka 4; $\Delta S = \pm 4$
- niepewność statystyczna 0.01 – 0.05 (dominuje)
- dobra kontrola efektów systematycznych
- ✓ Porównanie z obliczeniami teoretycznymi (χ^2)

} istotny wpływ uśredniania

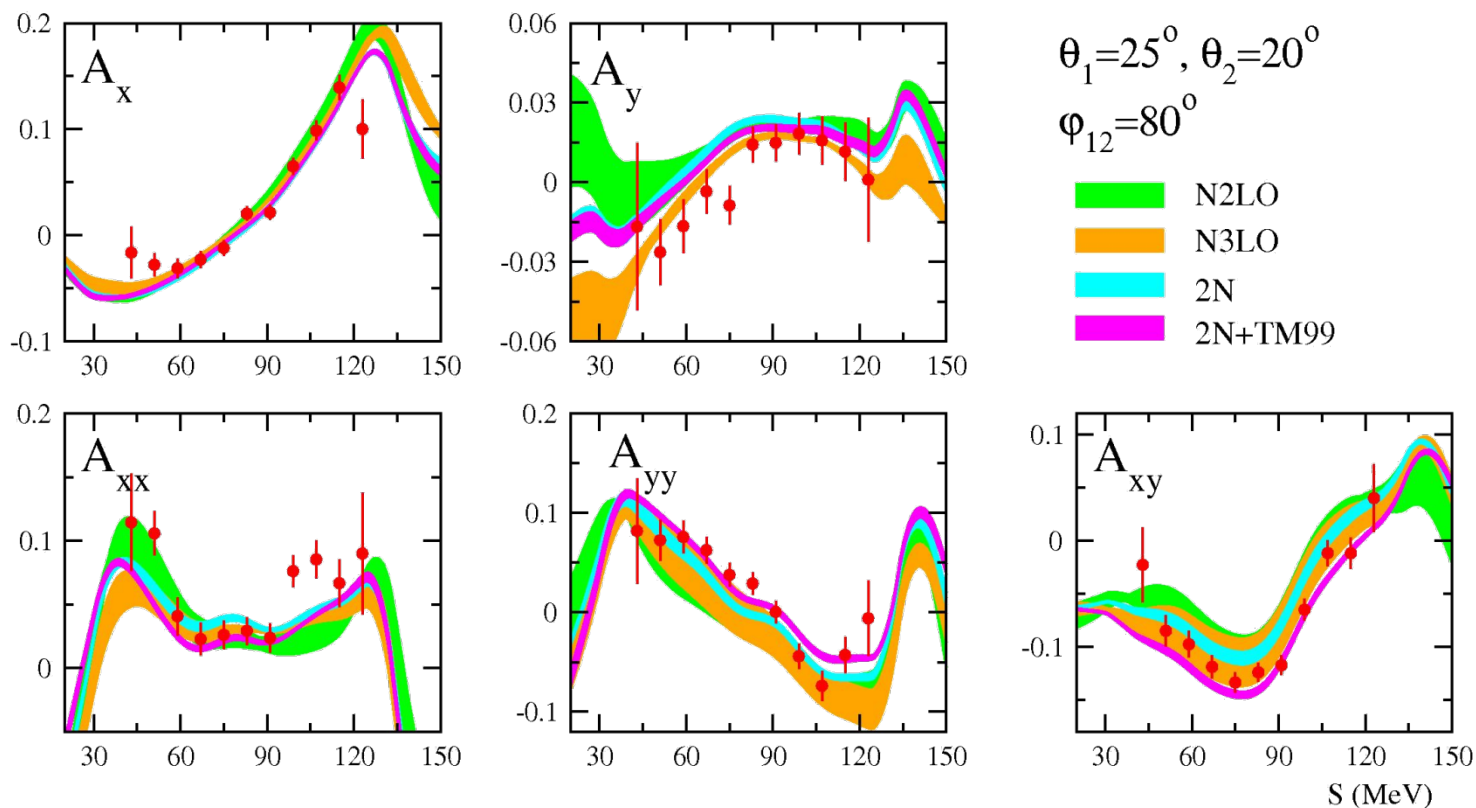
5 x 800 punktów eksperymentalnych

E. Stephan *et al.*, *Phys. Rev. C* 82, 014003 (2010)



Pomiar ${}^1\text{H}(\vec{d}, pp)n$ przy energii 130 MeV

Zdolności analizujące





Pomiar ${}^1\text{H}(\vec{d}, pp)n$ przy energii 100 MeV

Zdolności analizujące

- ✓ Wektorowe (A_x, A_y) i tensorowa (A_{xy}) zdolności analizujące wyznaczone w szerokim zakresie przestrzeni fazowej
- ✓ Około 400 punktów na obserwabłą
 - $\theta_1, \theta_2 = 15^\circ - 30^\circ$; siatka 5° ; $\Delta\theta = \pm 2^\circ$
 - $\varphi_{12} = 40^\circ - 180^\circ$; siatka 20° ; $\Delta\varphi = \pm 10^\circ$
 - S [MeV] = 40 – 160; siatka 4; $\Delta S = \pm 4$
 - niepewność statystyczna 0.01 – 0.05 (dominuje)
 - dobra kontrola efektów systematycznych
- ✓ Porównanie z obliczeniami teoretycznymi (χ^2)

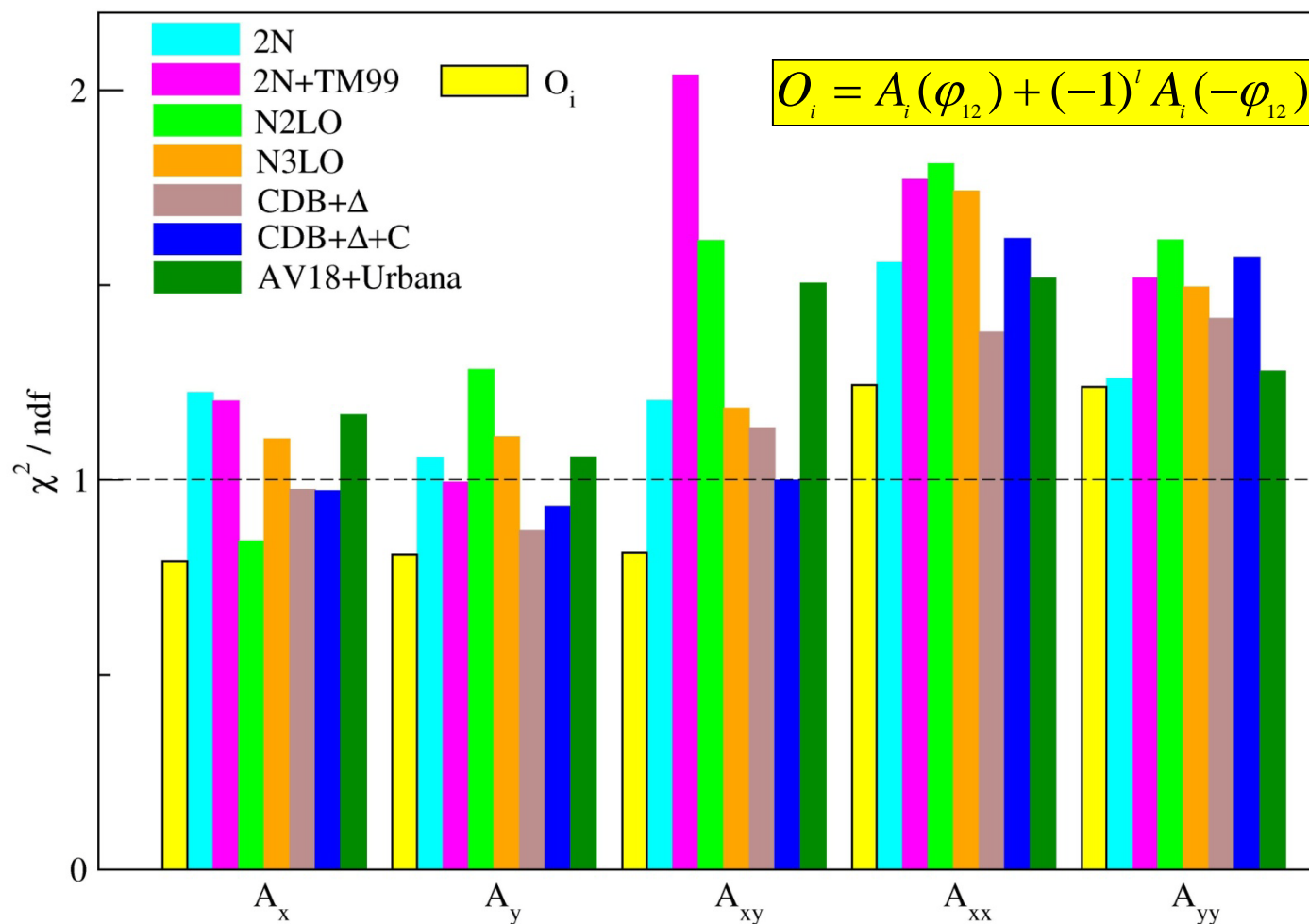
} istotny wpływ uśredniania

3 x 400 punktów eksperymentalnych



Pomiar ${}^1\text{H}(\vec{d}, pp)n$ przy energii 130 MeV

Zdolności analizujące - globalne porównanie z teorią

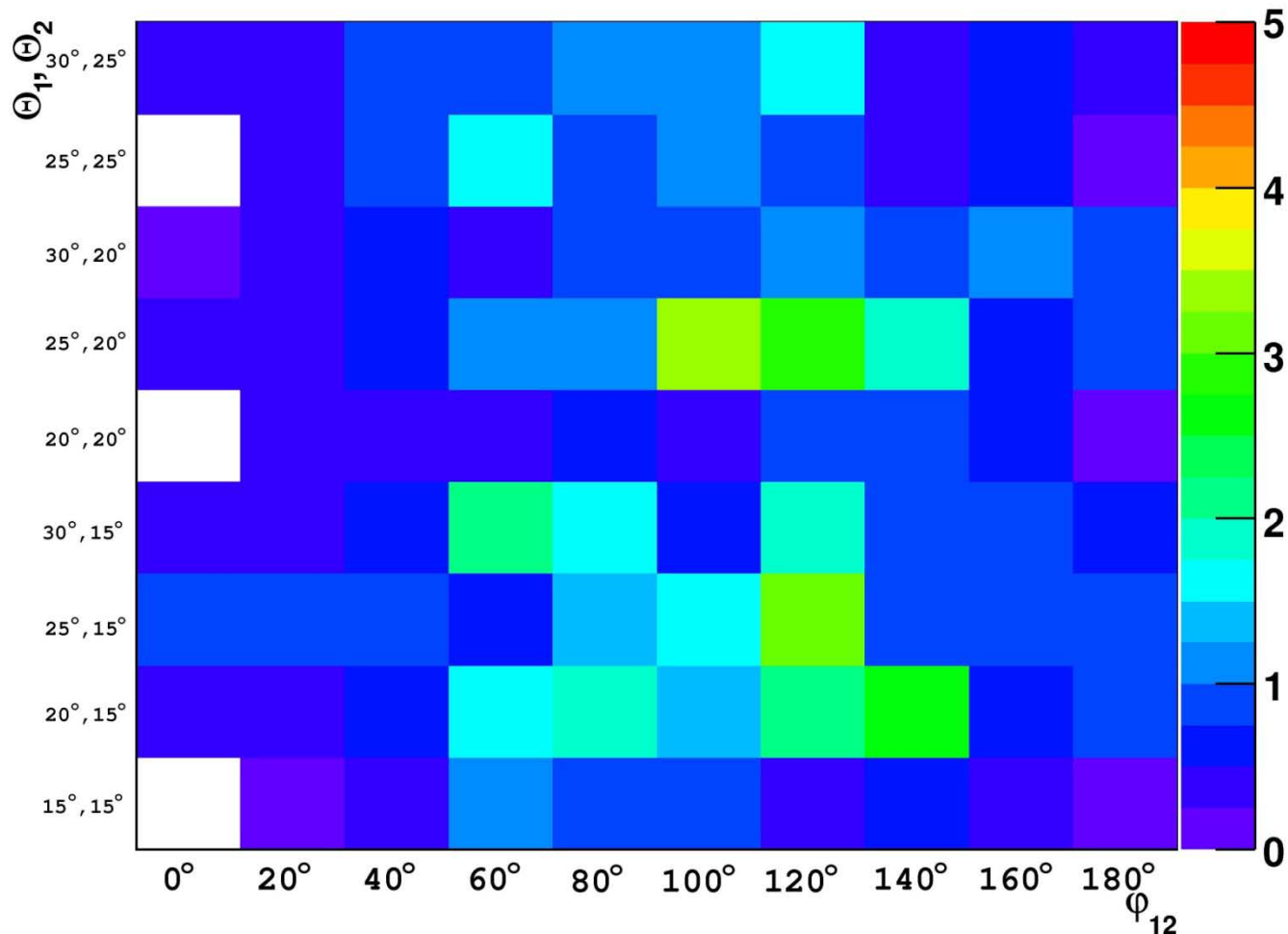


$l=1$ for
"even"
 $l=0$ for "odd"



Pomiar $^1\text{H}(\vec{d}, pp)n$ przy energii 130 MeV

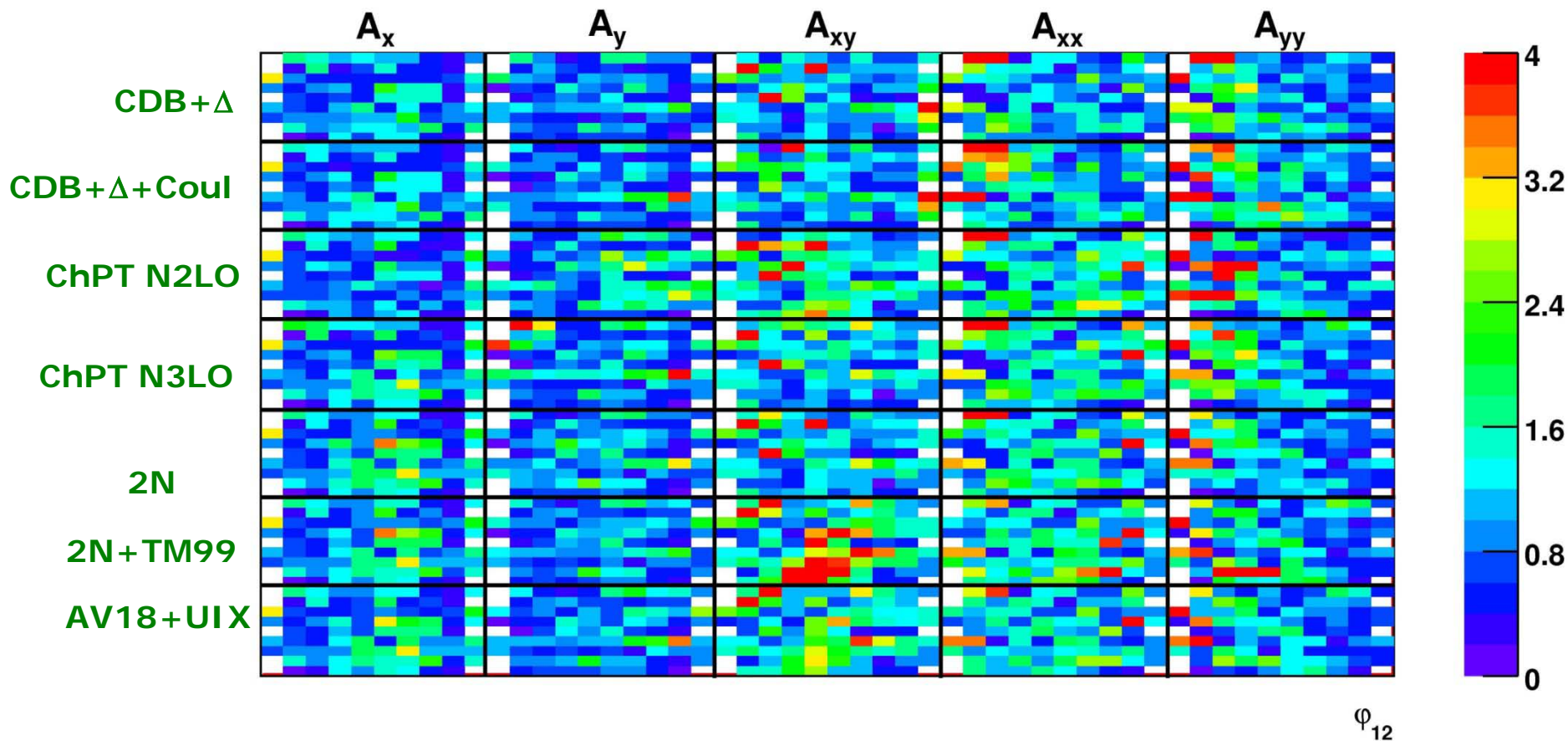
Zdolności analizujące - porównanie z teorią





Pomiar $^1\text{H}(d,pp)n$ przy energii 130 MeV

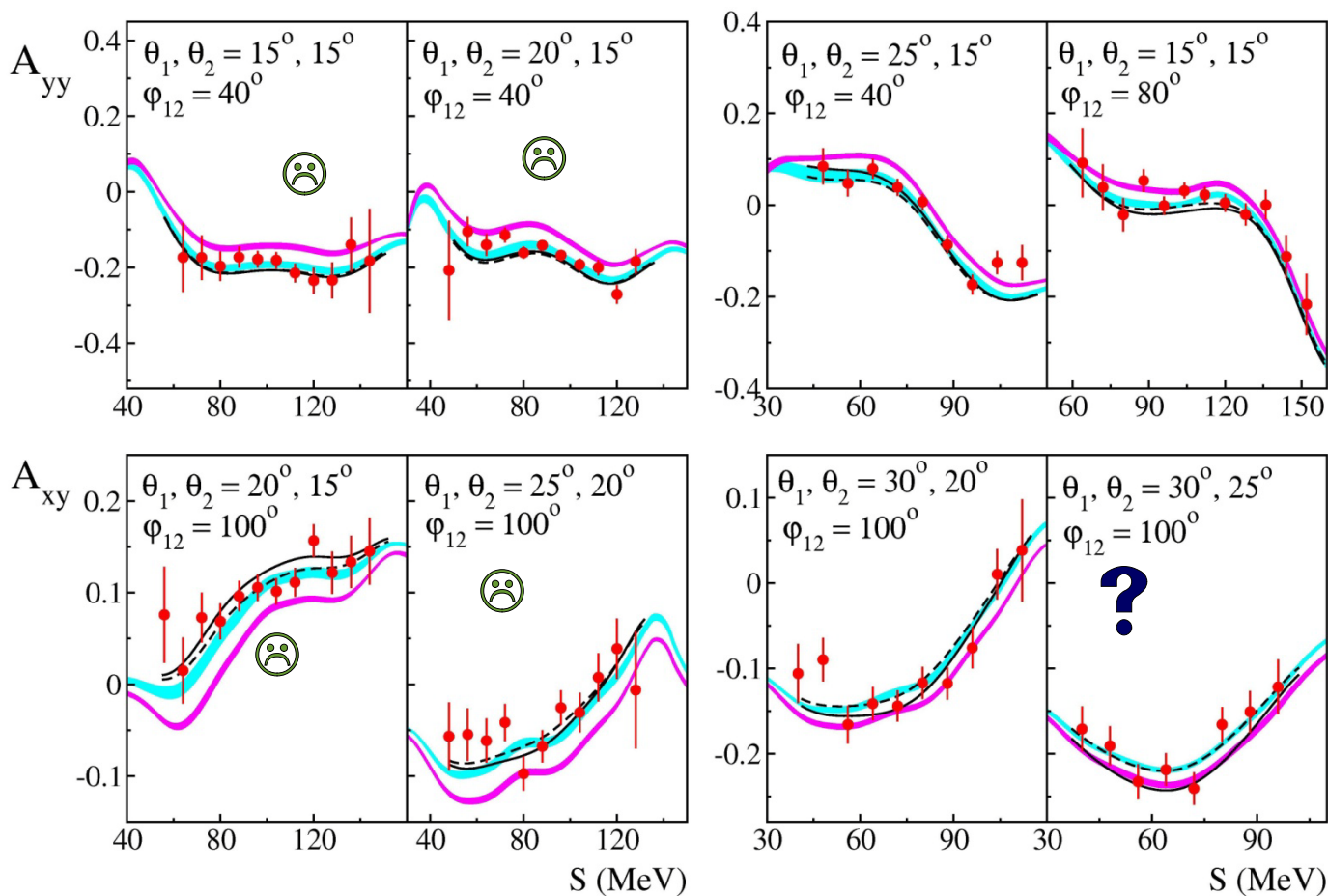
Zdolności analizujące - porównanie z teorią





Tensorowe zdolności analizujące

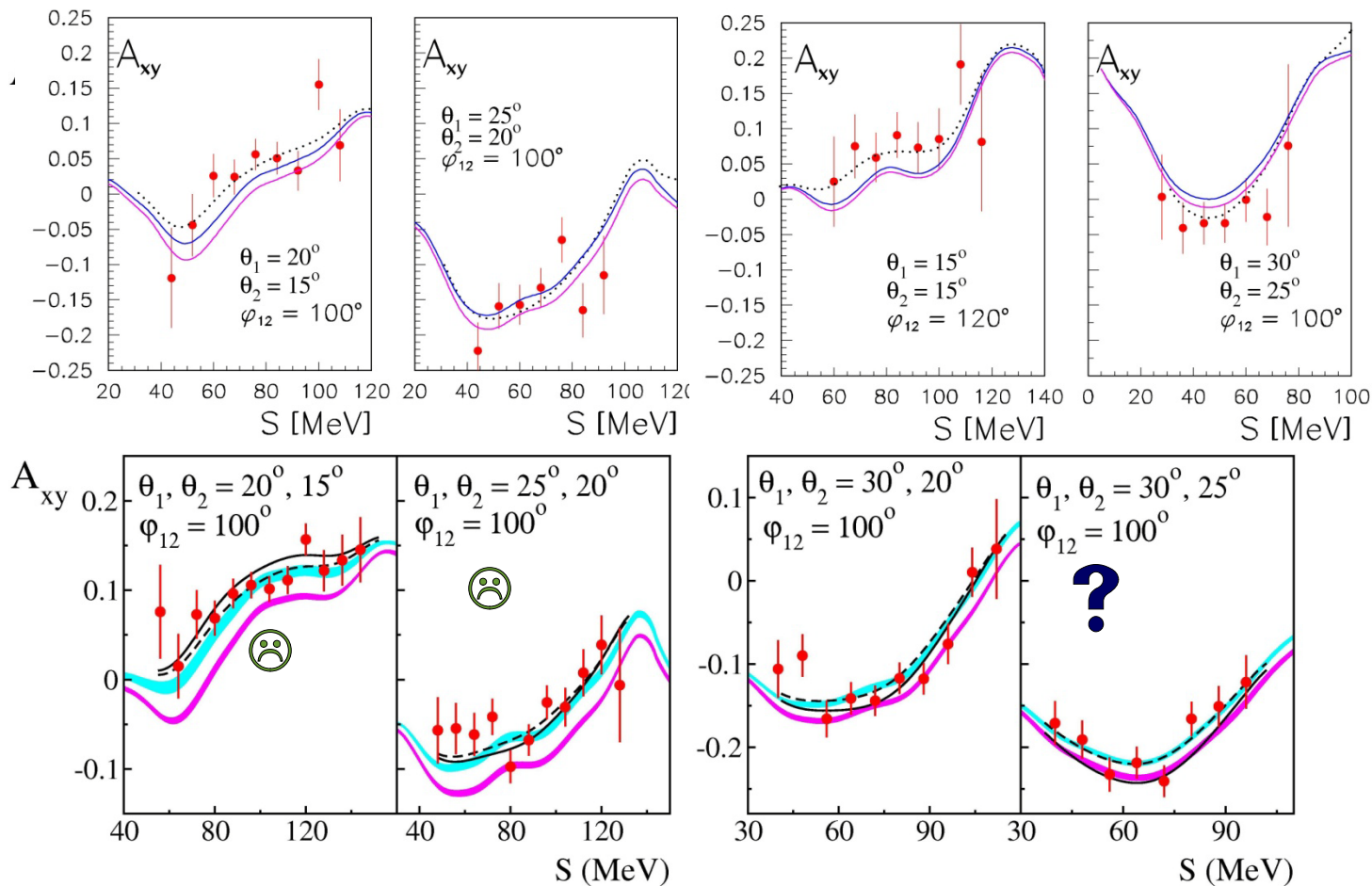
konfiguracje, dla których przewiduje się istotny wpływ 3NF





Tensorowe zdolności analizujące

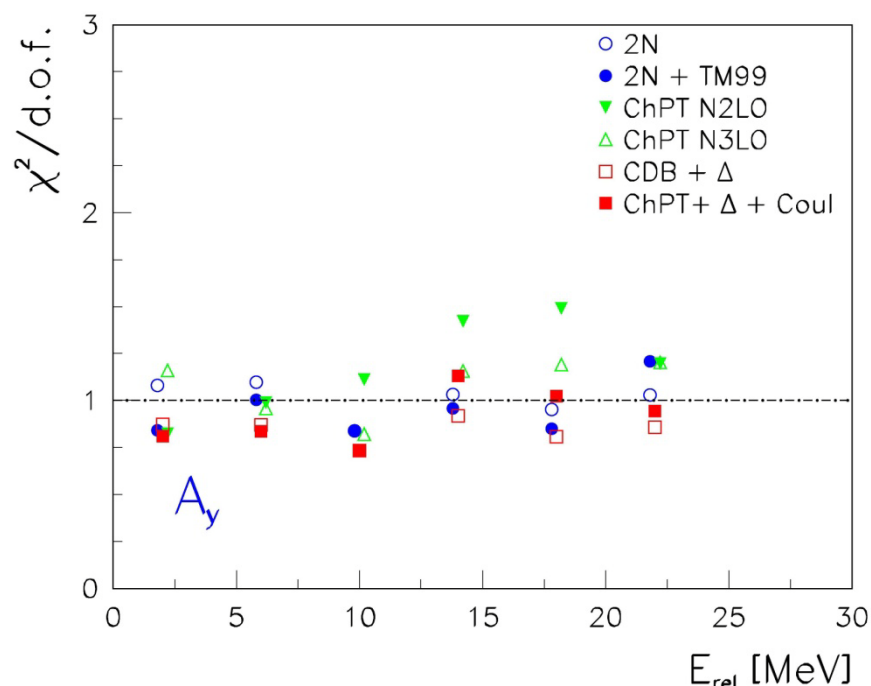
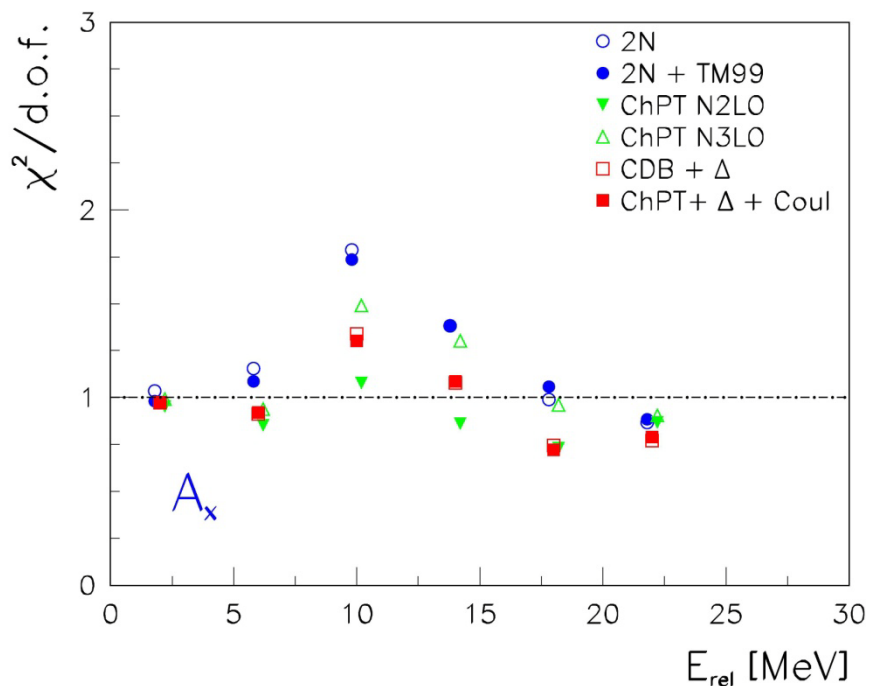
konfiguracje, dla których przewiduje się istotny wpływ 3NF





Pomiar $^1\text{H}(\vec{d}, pp)n$ przy energii 130 MeV

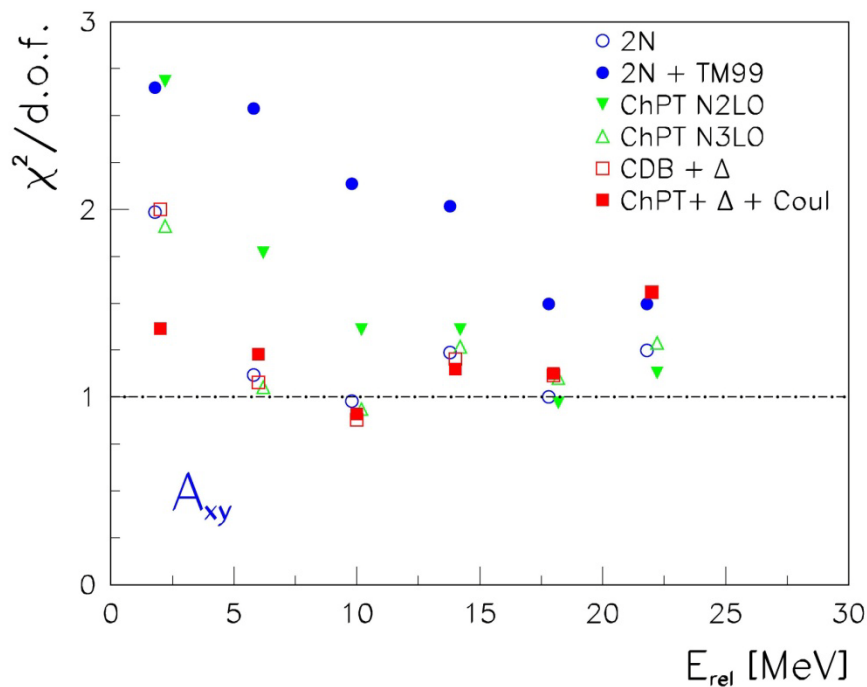
Wektorowe zdolności analizujące





Pomiar ${}^1\text{H}(\vec{d}, pp)n$ przy energii 130 MeV

Tensorowe zdolności analizujące

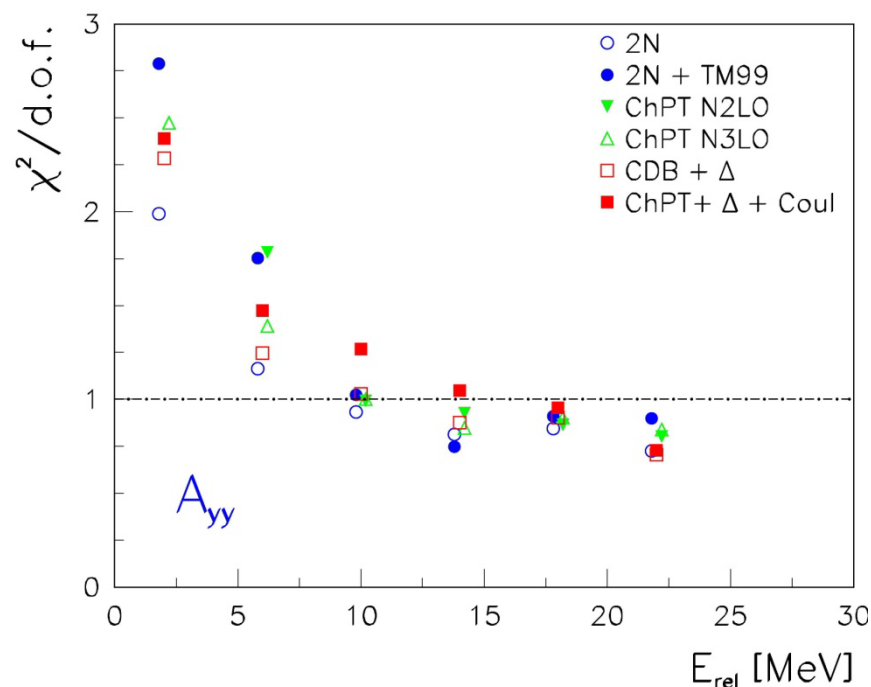
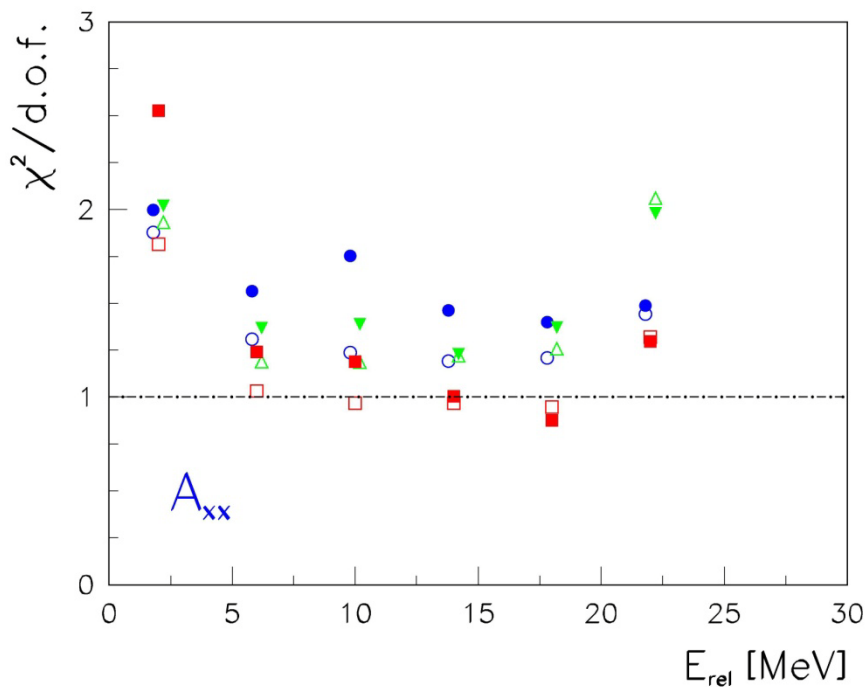


Problem z TM99 3NF



Pomiar ${}^1\text{H}(\vec{d}, pp)n$ przy energii 130 MeV

Tensorowe zdolności analizujące



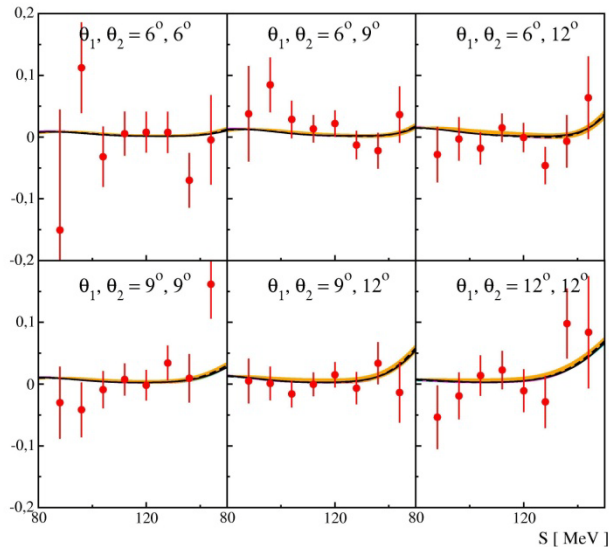
problem przy małych E_{rel} ?

uwzględnienie oddziaływania kulombowskiego nie pomaga!

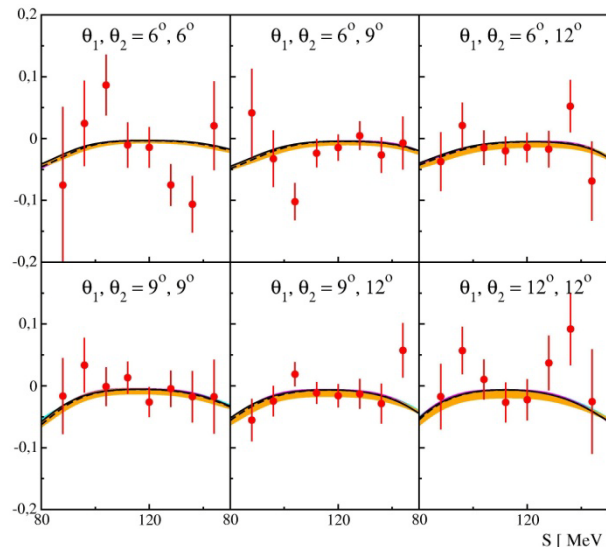
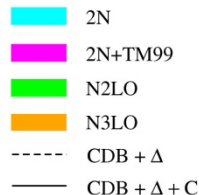


Wektorowe zdolności analizujące (130 MeV)

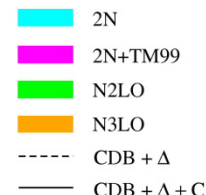
Pomiary przy pomocy GeWall - przykłady



A_x
 $\varphi_{12} = 60^\circ$



A_y
 $\varphi_{12} = 60^\circ$



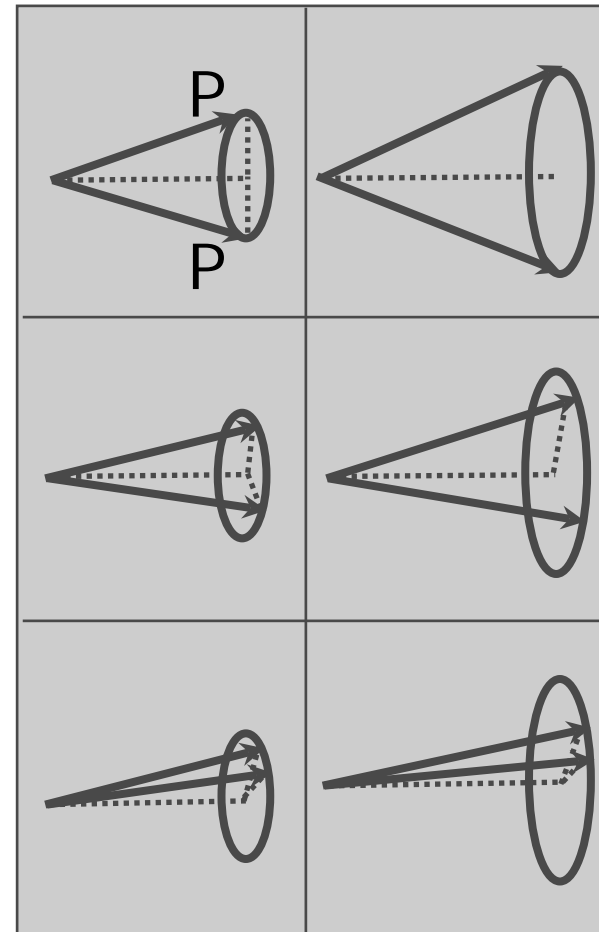
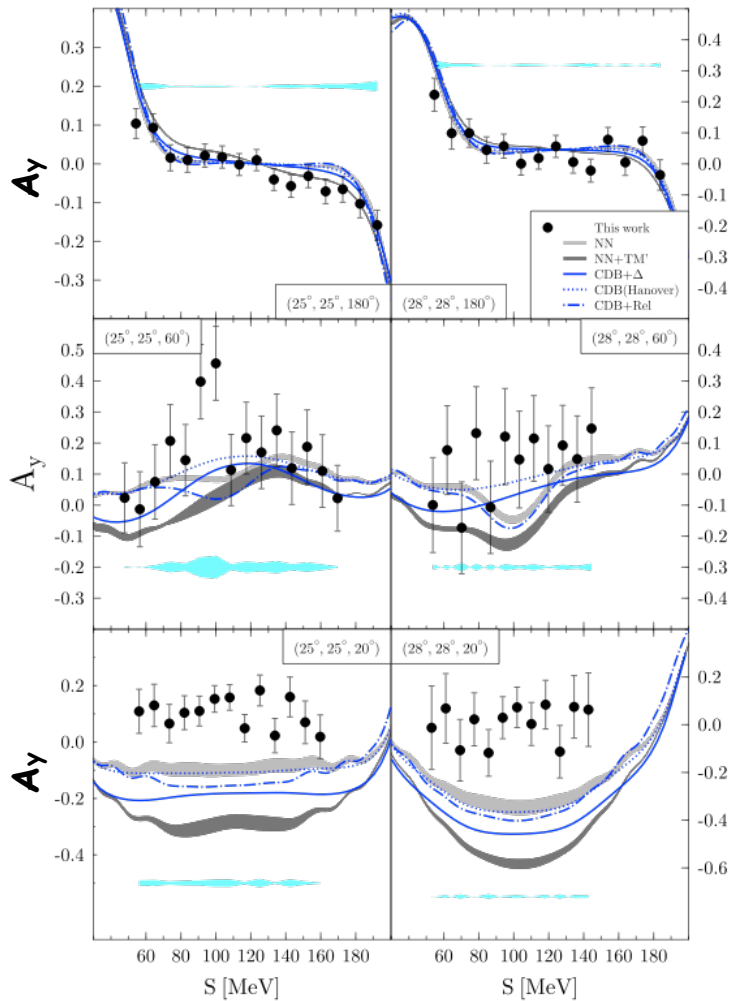
2 x 150 punktów eksperymentalnych



Pomiary $^2\text{H}(p,pp)n$

Wektorowe (protonowe) zdolności analityczne

190 MeV, H. Mardanpour et al.



Elżbieta Stephan, 16.12.2010

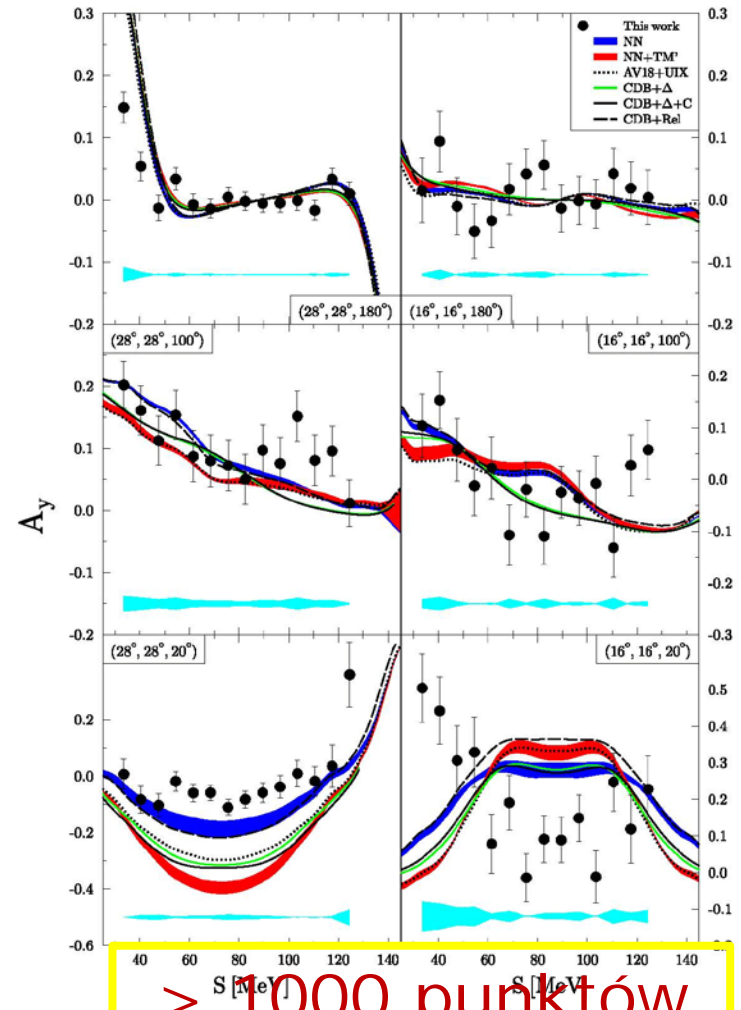
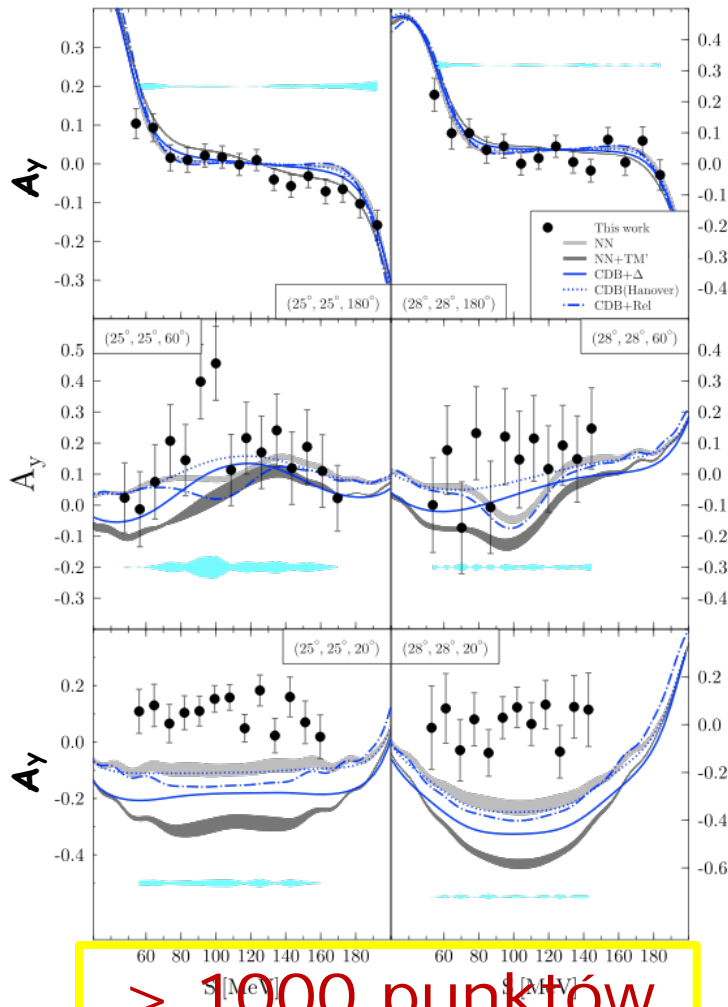


Pomiary $^2\text{H}(p,pp)n$

Wektorowe (protonowe) zdolności analizujące

190 MeV, H. Mardanpour et al.

135 MeV, M. Eslami-Kalantari et al.



Elżbieta Stephan, 16.12.2010



Badanie układu 3N - rozpraszanie elastyczne

Podsumowanie wyników

- ❑ Uzupełniono bazę danych dla rozpraszania elastycznego dp przy energii 130 MeV (SALAD i GeWall@COSY) oraz 100 MeV (BINA):
 - ❑ wektorowa zdolność analizująca dobrze opisane potencjałem NN
 - ❑ problemy z opisem tensorowych zdolności analizujących
 - ❑ inna zależność od energii wiązki przewidywanych i obserwowanych efektów (100, 130 i 140 MeV)



Badanie układu 3N - breakup dp

Podsumowanie wyników

- Uzyskano bogaty zestaw wektorowych zdolności analizujących dla breakup'u dp przy energii wiązki 130 MeV (SALAD i GeWall@COSY) oraz 100 MeV (BINA):
 - obserwable te w badanym zakresie energii są bardzo mało czułe na 3NF i dobrze opisywane przez samo oddziaływanie NN
- Podobny zestaw danych dla tensorowych zdolności analizujących przy energii 130 MeV (SALAD) oraz 100 MeV (BINA):
 - Przewidywana czułość na 3NF rośnie z energią
 - Eksperyment **nie potwierdza**: Uwzględnienie 3NF (TM99 lub Urbana) pogarsza opis danych dla A_{xy} przy energii 130 MeV
 - Istotne efekty kulombowskie obserwowane dla A_{xy} przy energii 100 MeV



Badanie układu 3N - breakup pd

Podsumowanie wyników

- Uzyskano bogaty zestaw wektorowych (protonowych) zdolności analizujących dla breakup'u pd przy energiach wiązki 135 MeV oraz 190 MeV (BINA):
 - bardzo dobry opis A_y dla konfiguracji zbliżonych do koplanarnych
 - problemy z opisem danych dla małych względnych kątów azymutalnych; rozbieżności rosną z energią



pd Breakup Reaction at 50–250 MeV/A

| Observable | 100 | 200 | 300 |
|---|-----|-----|-----|
| $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ | | | |
| \vec{p} A_y^p A_z^p | | | |
| \vec{d} A_y^d A_{yy} A_{xx} A_{xz} | | | |
| $\vec{d} \rightarrow \vec{p}$ $K_{yy}^{y'}$ | | | |
| $\vec{p}\vec{d}$ C_{ij} | | | |

π threshold



Badanie układów 3N/4N

Dalsze perspektywy

- ❑ Dalsza analiza istniejących danych (pozostałe obserwable, koincydencje Wall-Ball, analiza neutronów)
- ❑ Pomiarzy przy innych energiach
 - ❑ Energia 160 MeV (80 MeV/A): **BINA**
 - ❑ Wyższe energie: **WASA@COSY**
 - ❑ Energie od 35 do 50 MeV: **PAX@COSY**
- ❑ Rozwój obliczeń teoretycznych:
 - ❑ równoczesne uwzględnienie wszystkich elementów dynamiki układu (3NF, Coulomb, relatywistyka)
 - ❑ rozwój obliczeń ChPT (pełne obliczenia dla N³LO, "ChPT with explicit Δ ", ...)
- ❑ Pomiarzy (BINA, WASA) i obliczenia dla układu 4N