



Układy kilku nukleonów jako laboratorium do badania oddziaływań jądrowych

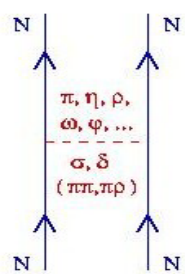


Elżbieta Stephan

Instytut Fizyki, Uniwersytet Śląski, Katowice

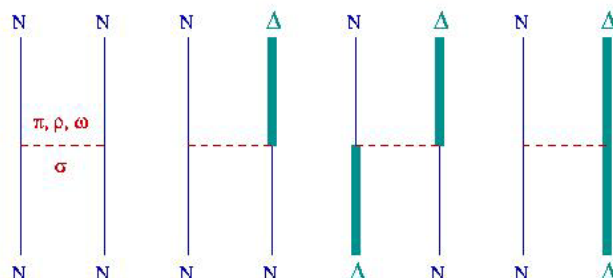
Punkt wyjścia: 2 Nukleony

- ❑ Potencjały realistyczne oparte o wymianę mezonów - *nukleonowe stopnie swobody* (CD Bonn, Nijm I, Nijm II, AV18)
- ❑ CD Bonn + explicit Δ -izobar - obliczenia metodą kanałów sprzężonych
- ❑ Chiral Effective Field Theory – **ChEFT** - rozwinięcie potencjału w potęgach v $(Q/\Lambda_\chi)^v$, skala $\Lambda_\chi \approx 1$ GeV

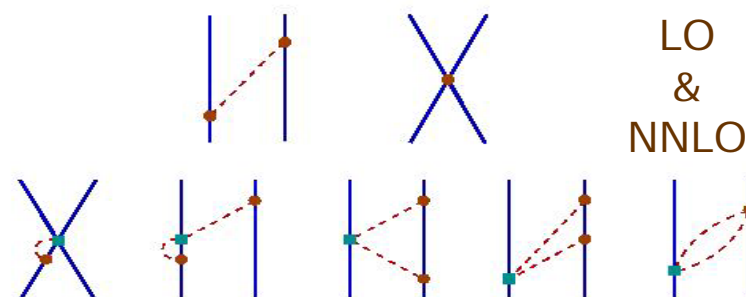


Realistic Potentials

E. Stephan UŚI



Coupled-Channels Potential (single Δ)



Chiral Perturbation Theory Potential (2n exchanges & contact terms)

Warszawa 2017

Punkt wyjścia: 2 Nukleony

- ❑ bogata baza danych eksperymentalnych: ~3000 punktów dla pp poniżej 350 MeV
- ❑ analiza przesunięć fazowych - phase shift analysis Nijmegen group (PWA93)
- ❑ wysoka jakość dopasowania: χ^2 bliskie 1

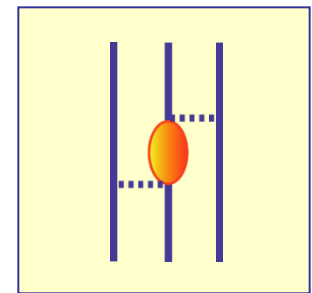
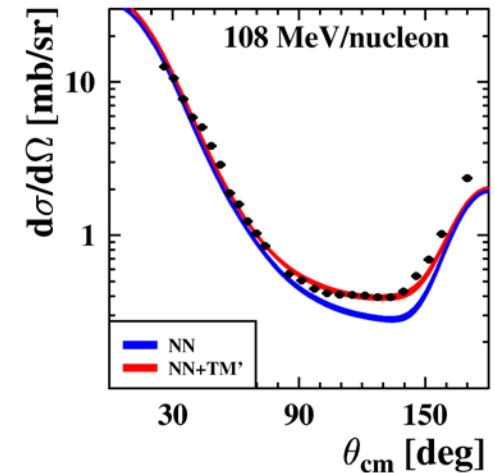
Układ 3 nukleonów

Przewidywania w oparciu **potencjały NN**:

- ❖ **nie odtwarzają** energii wiązania dla układów 3N, 4N i cięższych
- ❖ **nie odtwarzają** przekroju czynnego rozpraszania sprężystego $d(N,N)d$ w zakresie minimum

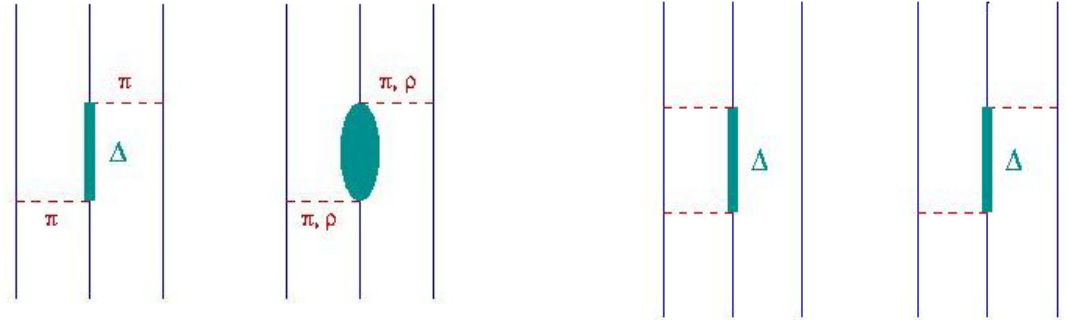
Koncepcja **siły 3-nukleonowej**

Systematyczne podejście w ramach ChEFT



Kolejny krok: układ 3 nukleonów

Modele 3NF:



Naturalnie pojawia się w rzędzie N²LO ChEFT:

	2N force	3N force	4N force	
LO		—	—	$(Q/\Lambda_\chi)^0$
NLO		—	—	$(Q/\Lambda_\chi)^2$
N ² LO			—	$(Q/\Lambda_\chi)^3$
N ³ LO				$(Q/\Lambda_\chi)^4$

3N i więcej...

- Energie wiązania:

✓ 3NF pomaga

	${}^3\text{H}$	${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$
Experiment	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

Modele of NN+3NF w obliczeniach dla jąder atomowych i materii jądrowej

- ❖ Energie wiązania i promienie jąder lekkich i o pośrednich masach
 - ❖ Wkład od 3NFs (ChEFT) jest istotny w obliczeniach struktury powłok jąder neutrono-nadmiarowych
 - ❖ ... stabilność jąder bliskich linii odpadnięcia (drip line) neutronu
 - ❖ ... wysycenie w materii jądrowej
- ❑ Stosowane potencjały powinny zostać starannie przetestowane **w układach kilku nukleonów**, gdzie możliwe są dokładne obliczenia obserwabli !

Układy 3N

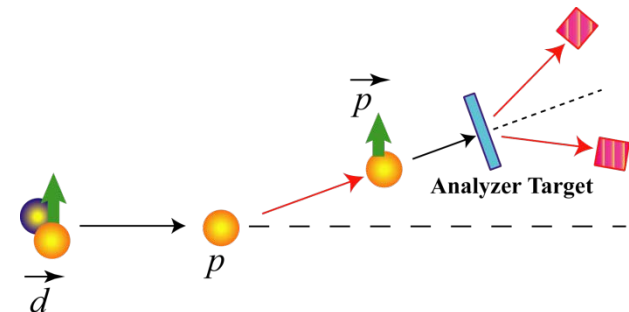
badania eksperymentalne

➤ Procesy:

- ❖ Rozpraszanie sprężyste: $N + d \rightarrow N + d$
- ❖ Breakup: $N + d \rightarrow N + N + N$
- ❖ procesy elektromagnetyczne

➤ Obserwable:

- ❖ różniczkowy przekrój czynny
- ❖ wektorowe&tensorowe zdolności analizujące
- ❖ współczynniki transferu polaryzacji, korelacje



➤ Zakres energii - dlaczego "średnie" i co to właściwie oznacza?

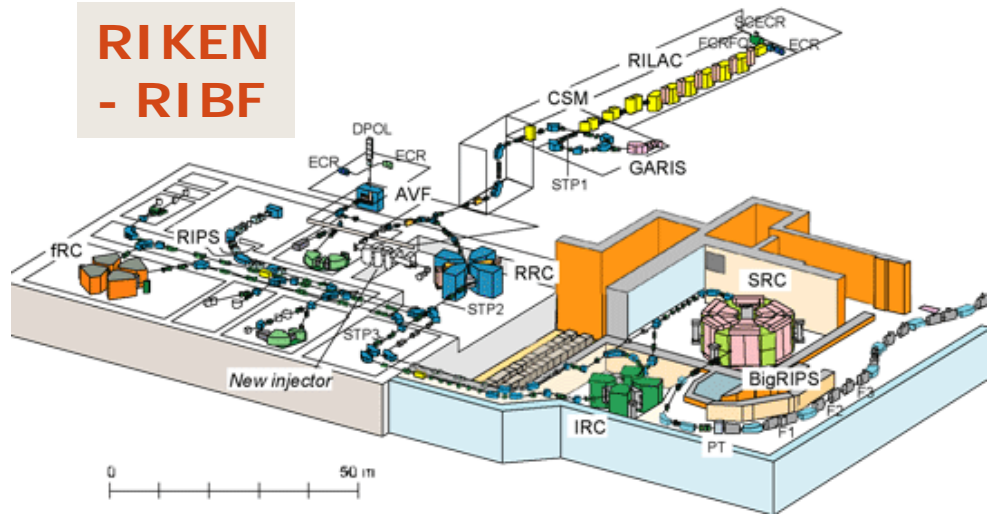
- ❖ mierzalny wpływ 3NF
- ❖ poniżej progu na produkcję pionów - precyzyjne obliczenia do porównania

➤ Techniki detekcji:

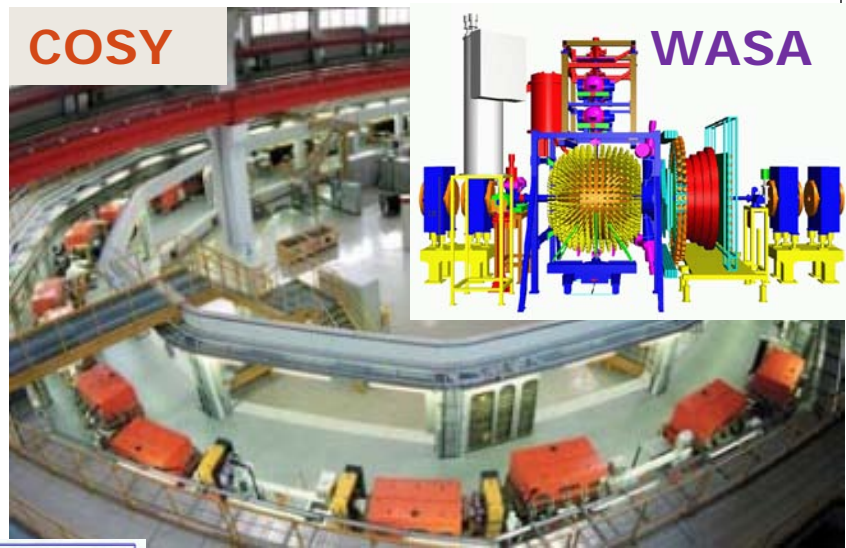
- ❖ spektrometry magnetyczne
- ❖ układy detekcyjne o znacznej akceptancji

Experimental Facilities

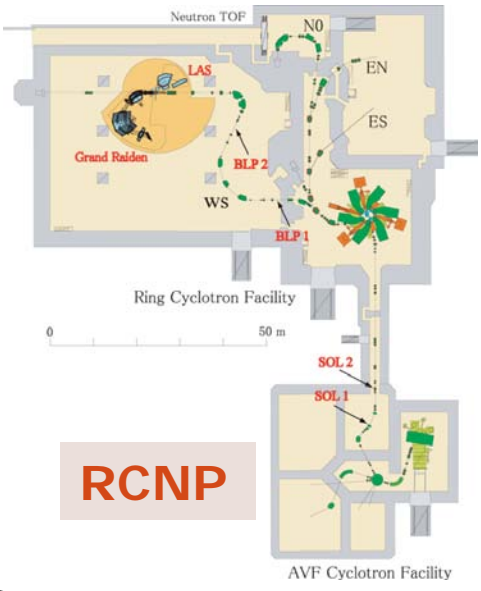
**RIKEN
- RIBF**



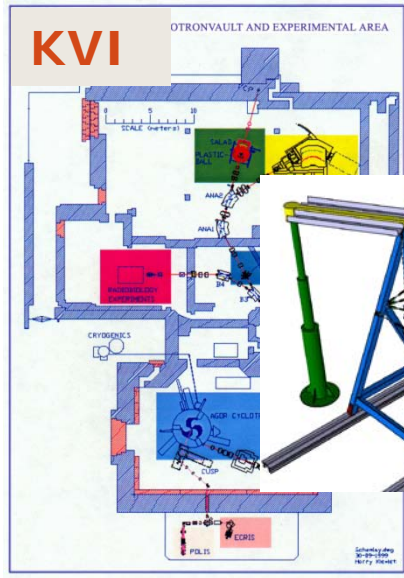
COSY



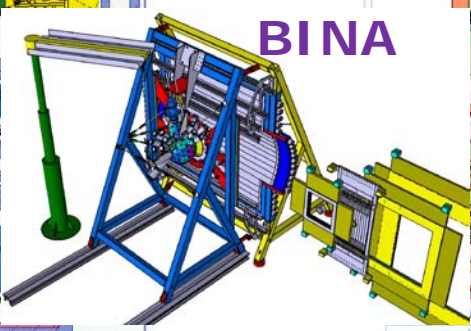
WASA



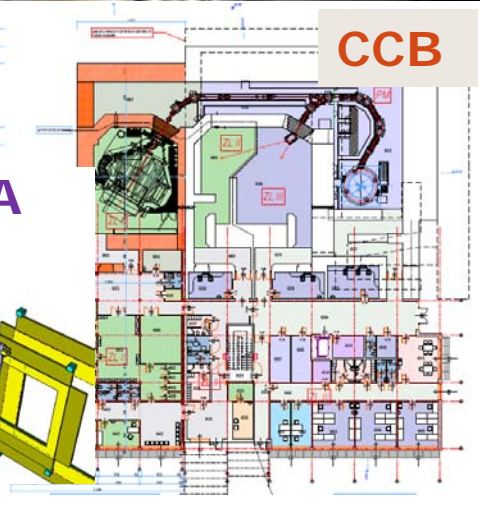
RCNP



BINA



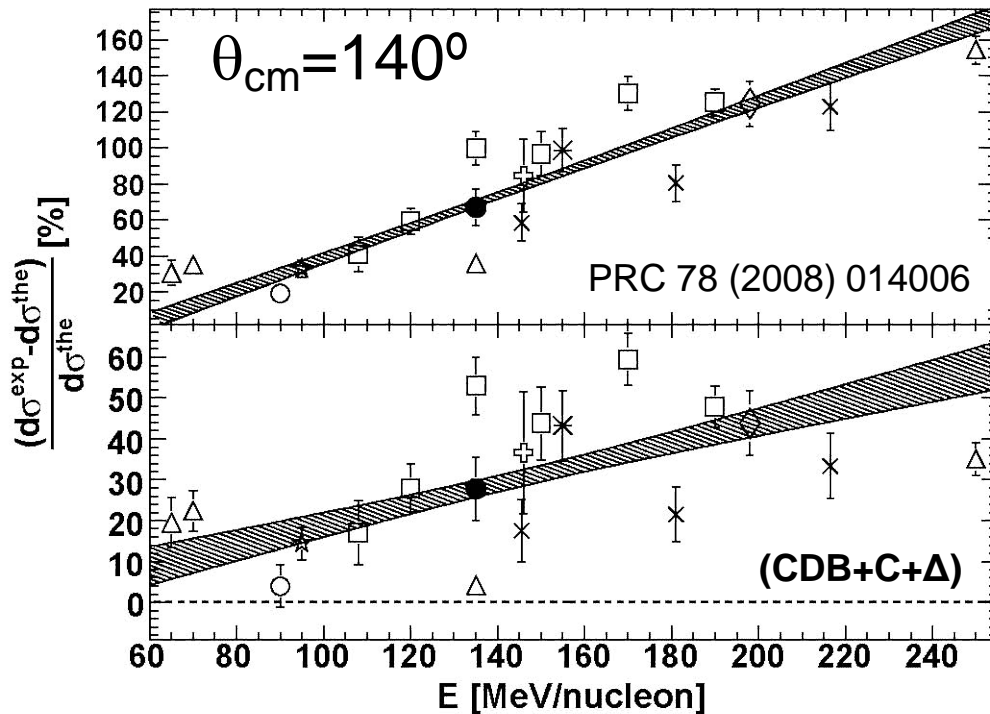
CCB



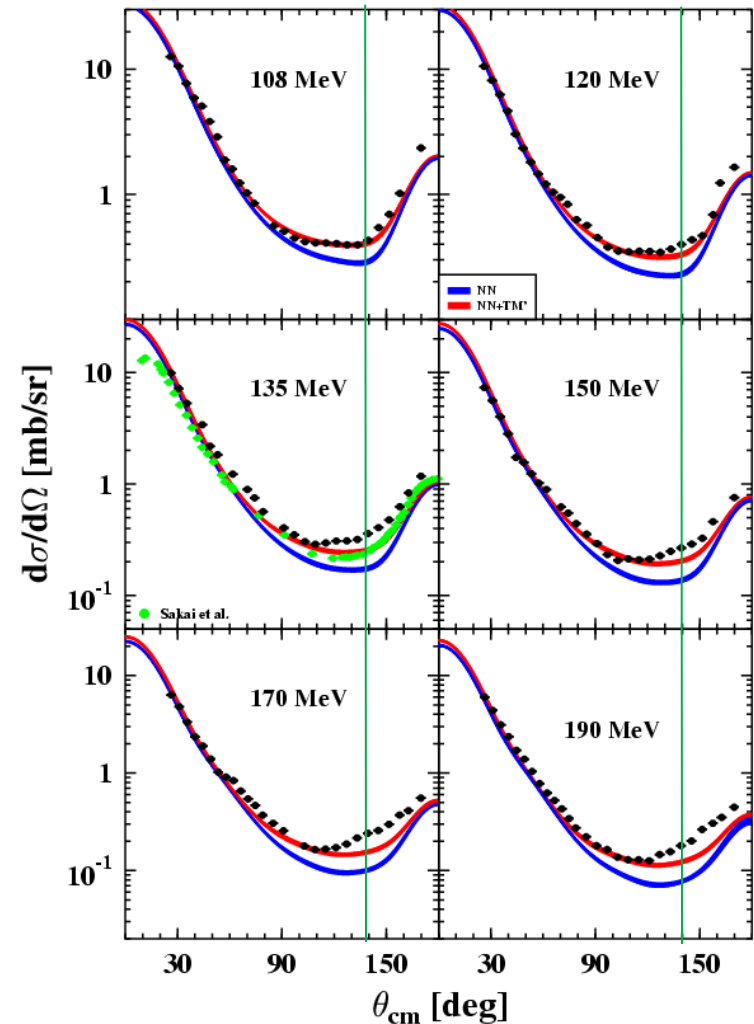
Układy 3N - Rozpraszanie Sprężyste przekrój czynny

✓ dużo danych dla wielu energii

✓ 3NF pomaga , ale...



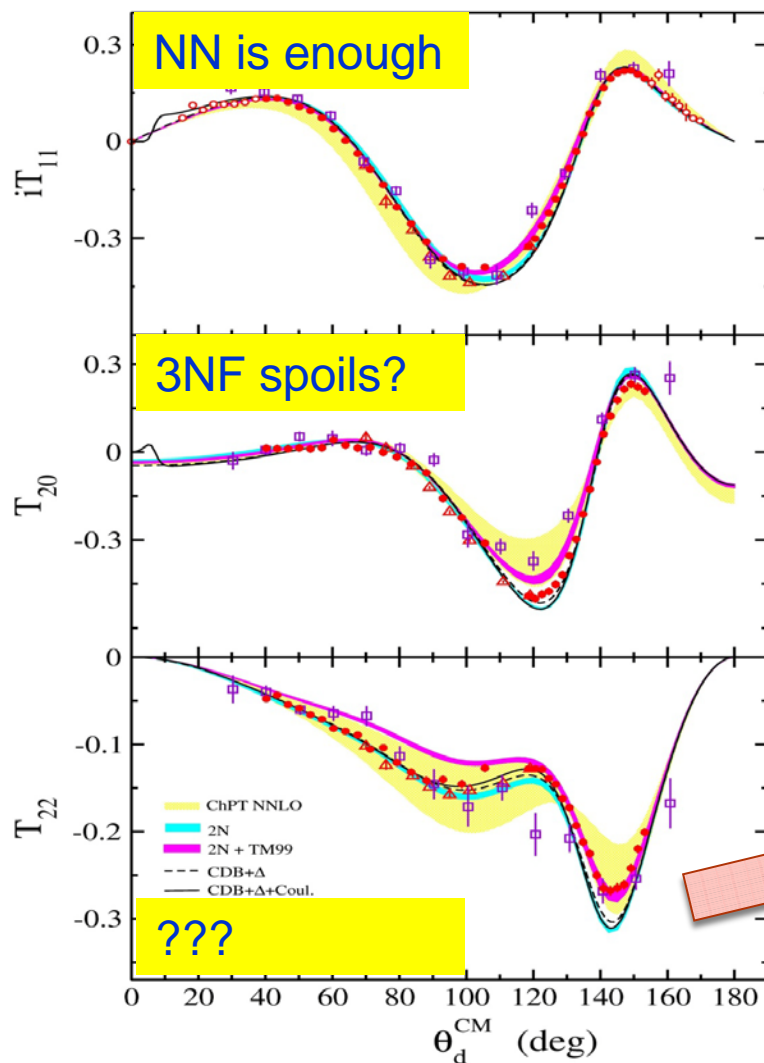
E. Stephan UŚI



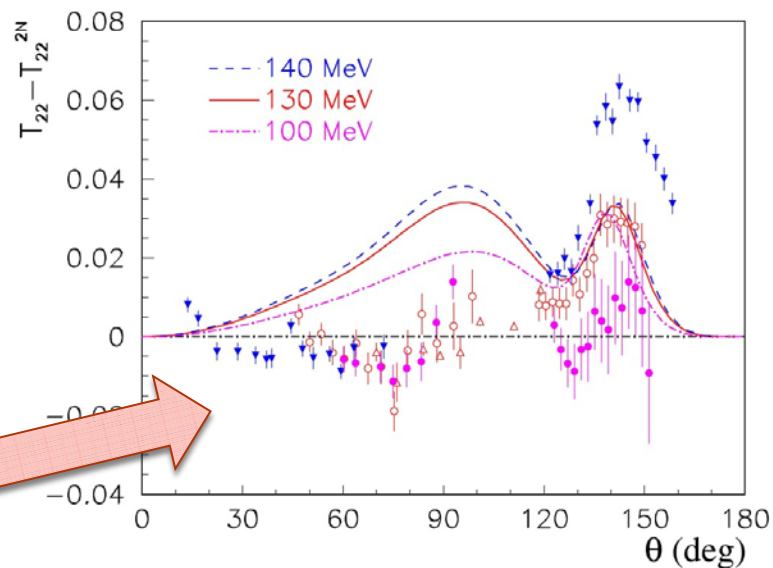
Warszawa 2017

3N – Rozpraszanie sprężyste d-p 130 MeV

Wektorowe & Tensorowe Zdolności Analizujące



- **140 MeV** - K. Sekiguchi et al., Phys. Rev. C 70, 014001 (2004)
- **130 MeV** - H. Mardanpour et al., Eur. Phys. Jour. 31, 383 (2007), E. Stephan et al., Phys. Rev. 76 057001 (2007)
- **100 MeV** E. Stephan et al

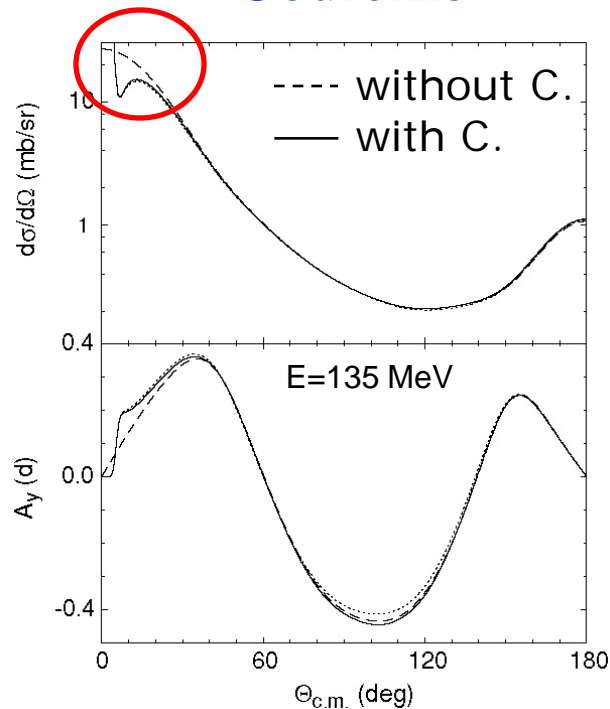


Przekrój czynny - inne efekty dynamiczne ?

Coulomb / relatywistyka

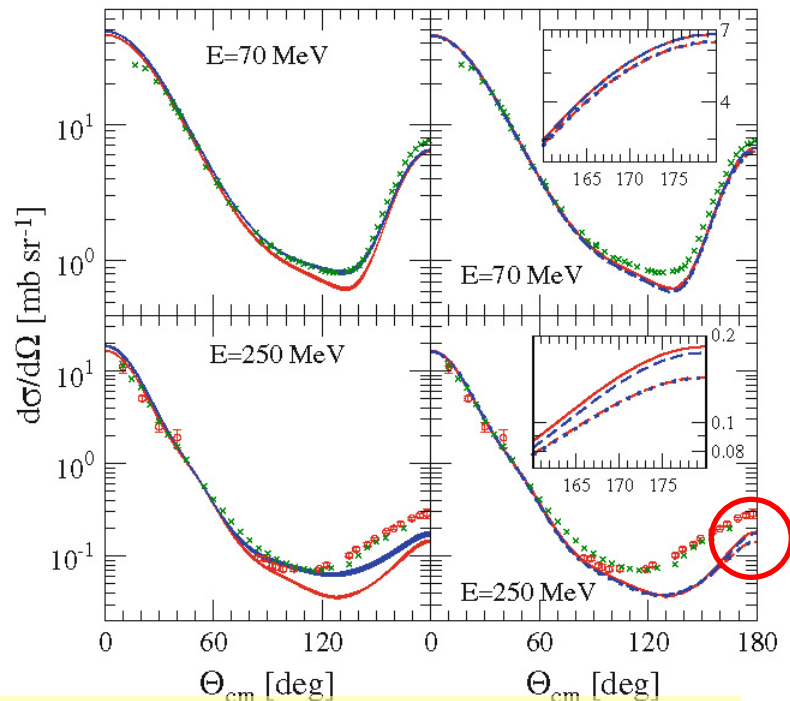
rozpraszanie sprężyste N-d

Coulomb



3NF

relativ.

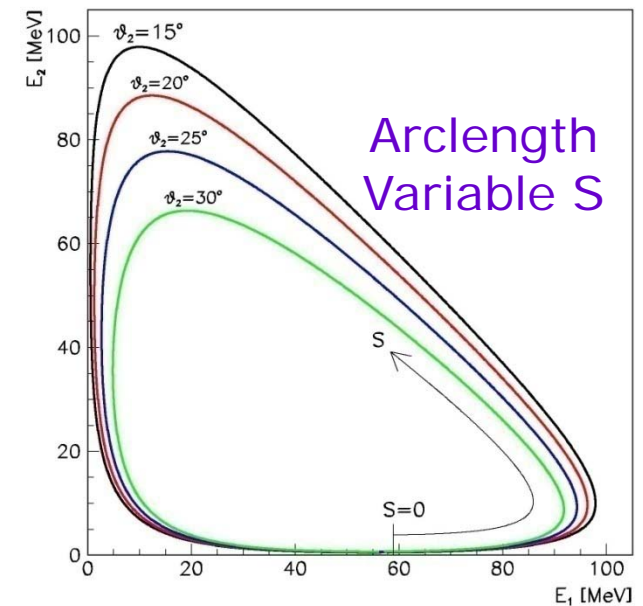
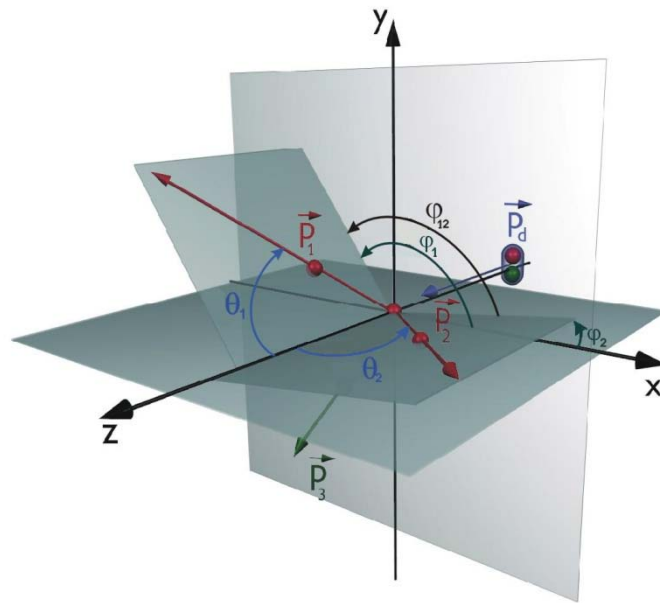


mały wpływ i tylko dla skrajnych kątów!

Komplementarne badania -Breakup

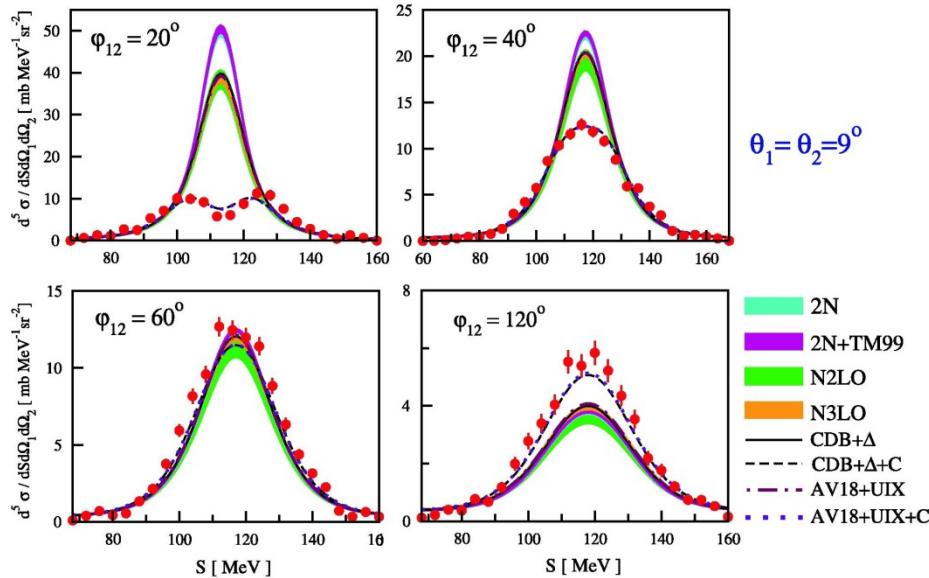
- trzy swobodne nukleony w stanie końcowym
- prawa zachowania E/p – 4 równania
- 5 niezależnych zmiennych kinematycznych

${}^1\text{H}(d,pp)n$
pomiar pary
protonów:
 θ_1, ϕ_1, E_1
 θ_2, ϕ_2, E_2



$^1\text{H}(d,pp)n$, $^2\text{H}(p,pp)n$ Różniczkowy rzekrój czynny

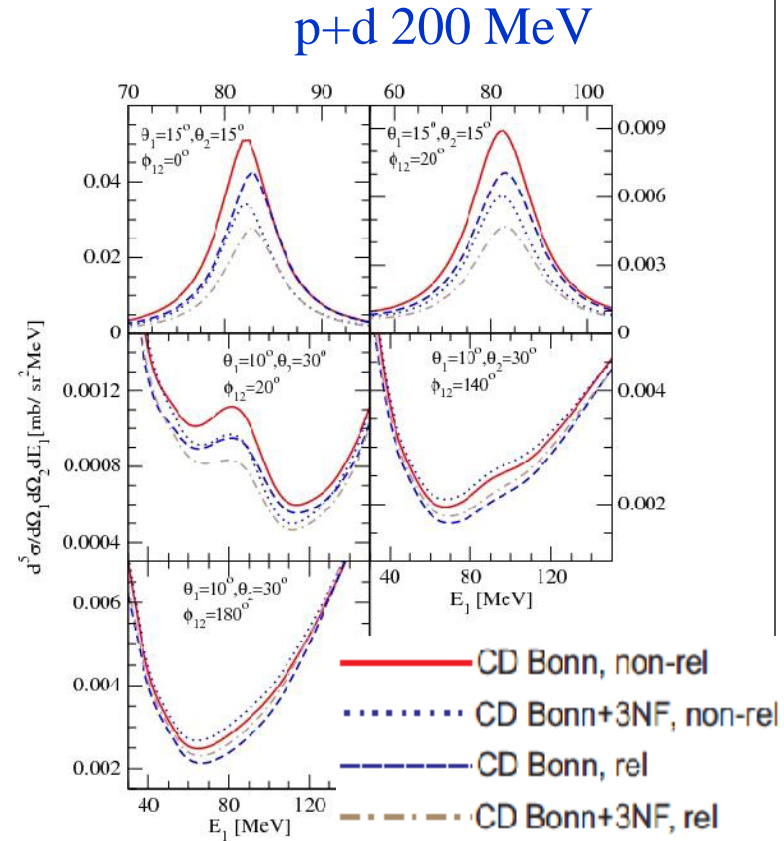
3NF+Coulomb / 3NF+Relatywistyczne



d+p 130 MeV (75 MeV/nucleon)
data: GeWall @COSY

A. Deltuva et al.,
Phys. Rev. C80, 064002, (2009)

E. Stephan UŚI



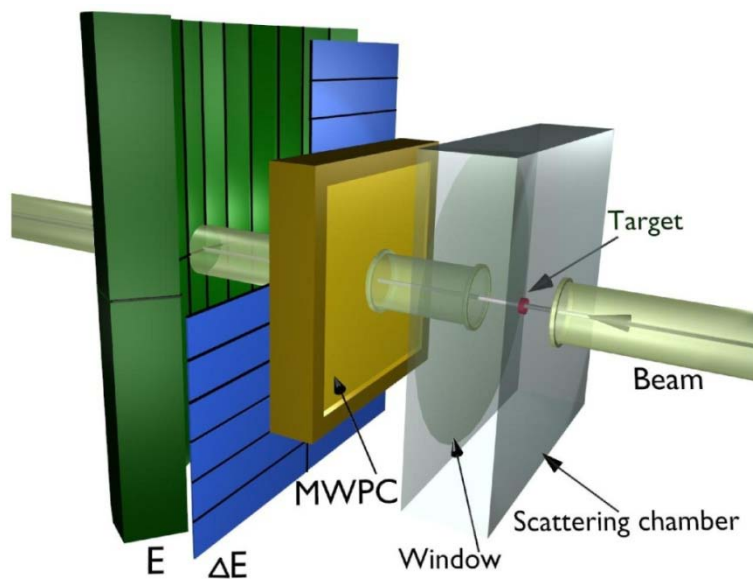
H. Witała et al.,
Phys. Rev. C83, 044001, (2011)

Warszawa 2017

Detektory o dużej akceptancji katowej

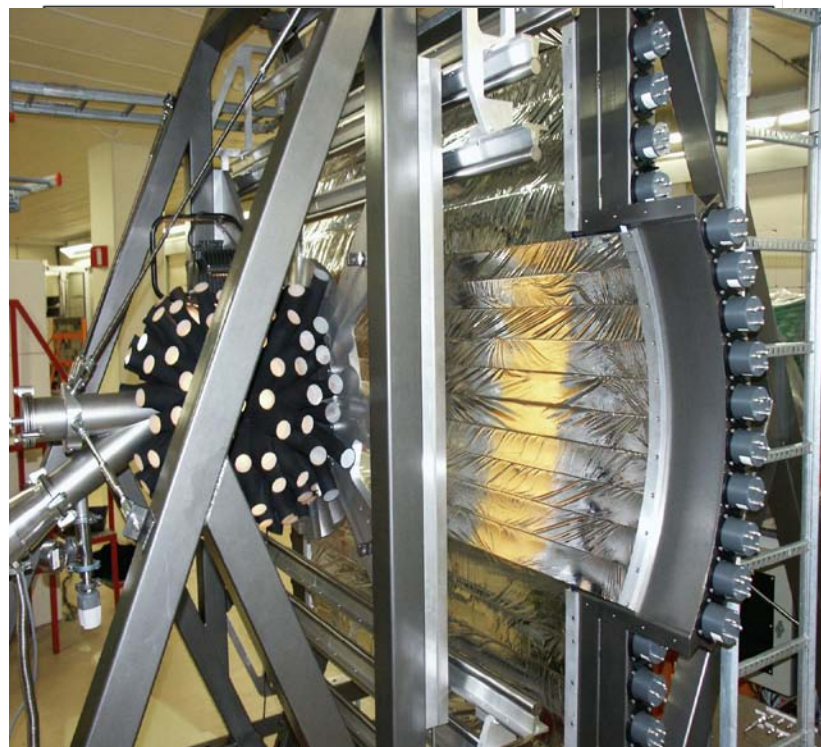
SALAD

- ✓ 140 ΔE -E telescopes
- ✓ 3 plane MWPC
- angular acceptance:
 $\theta = (12^\circ, 38^\circ)$, $\varphi = (0^\circ, 360^\circ)$



BINA

- ✓ *Wall* - very similar to SALAD
- ✓ *Ball* - system of 149 phoswitches
- angular acceptance: nearly 4π



$^1\text{H}(\vec{d}, pp)n$, $^2\text{H}(\vec{p}, pp)n$ Eksperymenty w KVI

Experiment	dp130 + GeWall	dp100	dp160	pd135	pd190
Beam energy	130 MeV 65 MeV/ A	100 MeV 50 MeV/ A	160 MeV 80 MeV/ A	135 MeV	190 MeV
Average current	50 pA	8 pA	10 pA	10 pA	10 pA
Polarization	vector & tensor (7 states)	vector & tensor (5 states)	NO	vector (1 state)	vector (2 states)
Target	LH ₂	LH ₂	LH ₂	LD ₂	LD ₂
Detector	SALAD (GeWall-FZ- Judich)	BINA	BINA	BINA	BINA

- ❑ 400-1000 punktów na observable - analiza dla siatki kątów emisji protonów i S
- ❑ równoczesny pomiar rozpraszania sprężystego - normalizacja, polaryzacja
- ❑ trwa analiza części danych

Pomiary¹ $H(\vec{d}, pp)n$ przy energii 130 MeV

Przekrój czynny - wpływ 3NF

Faddeev calculations

Realistic NN potentials
 CD Bonn, NijmI, NijmII,
 Av18

3NF models: TM99, UIX

Coupled channel pot.

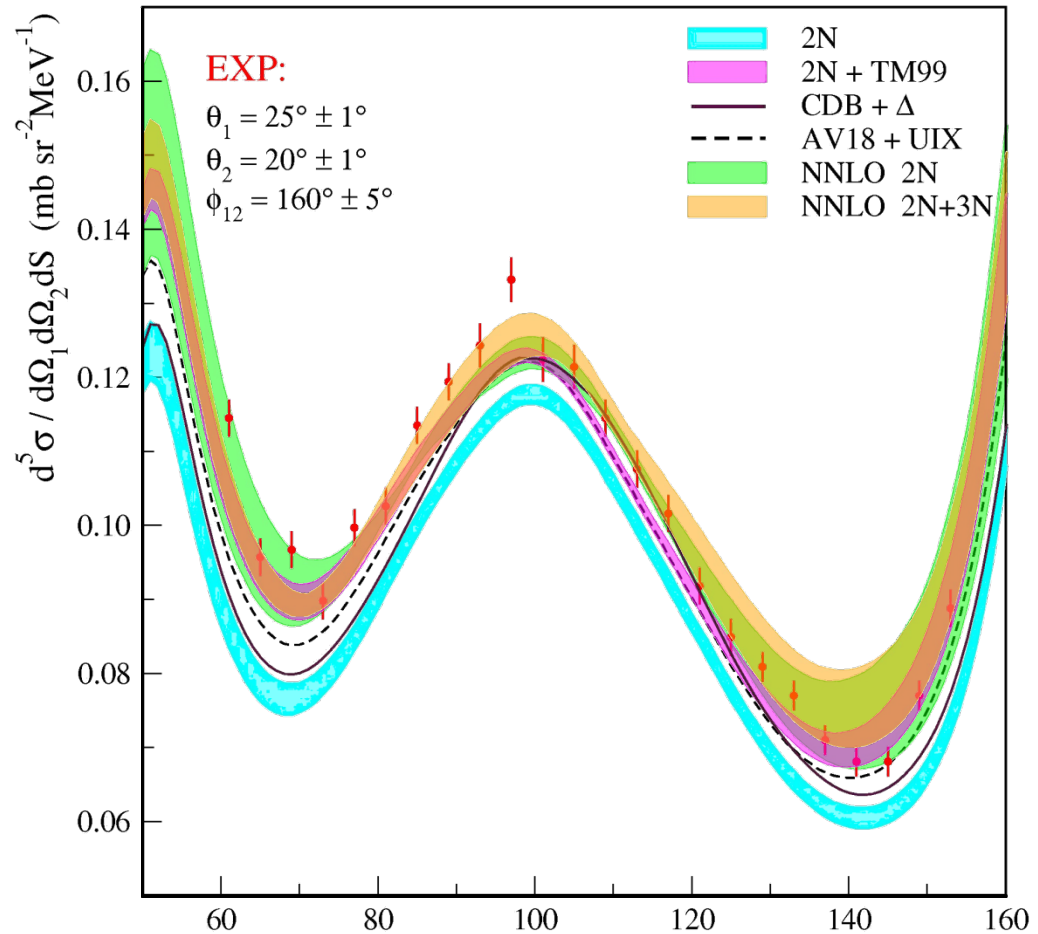
CD Bonn (mod) + Δ

EFT/ChPT potentials

NNLO – 2N only

NNLO – 2N + 3N

E. Stephan UŚI



S (MeV)
 Warszawa 2017

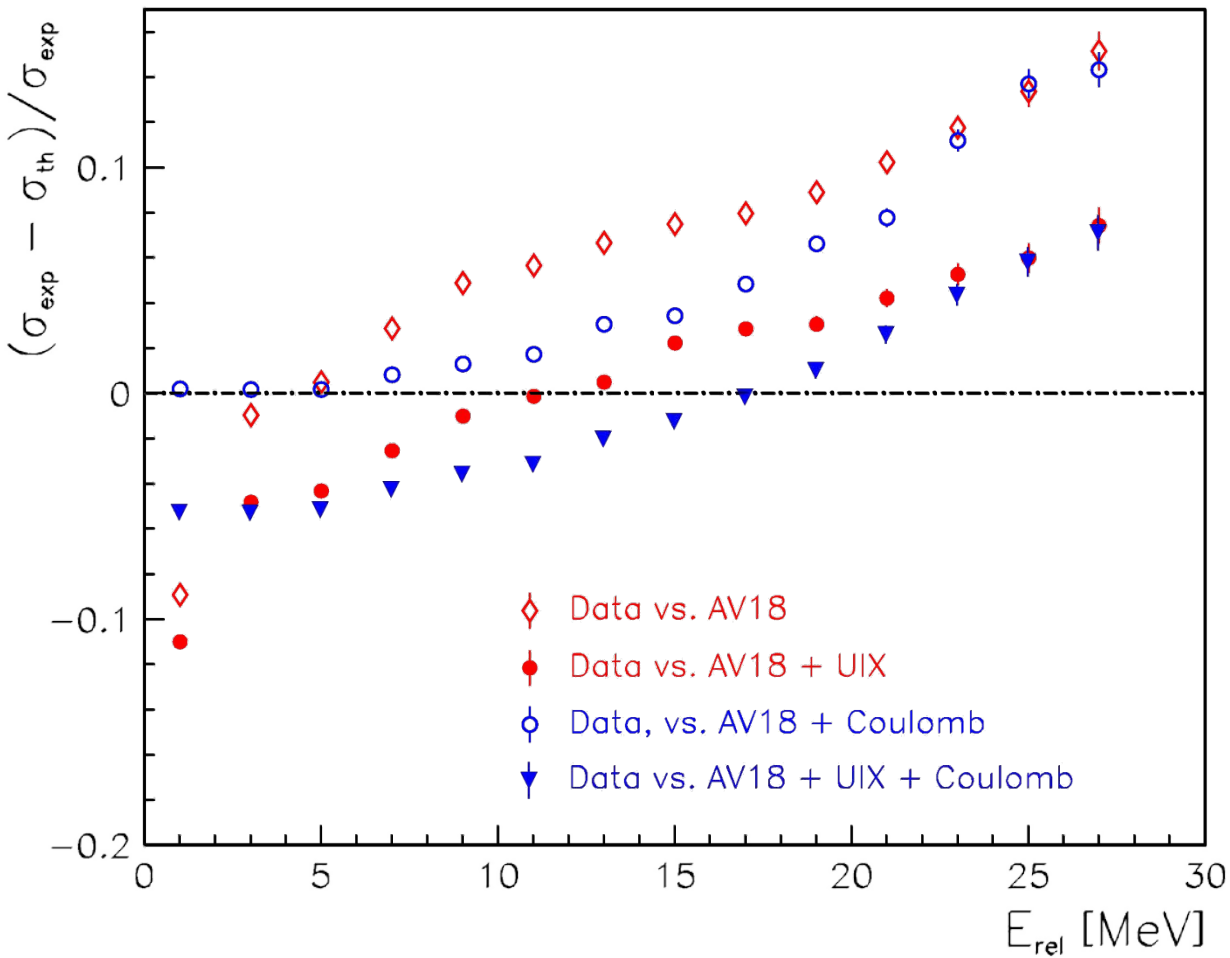


Pomiary¹ H(d,pp)n przy energii 130 MeV

Przekrój czynny - wpływ 3NF i oddziaływania kulombowskiego

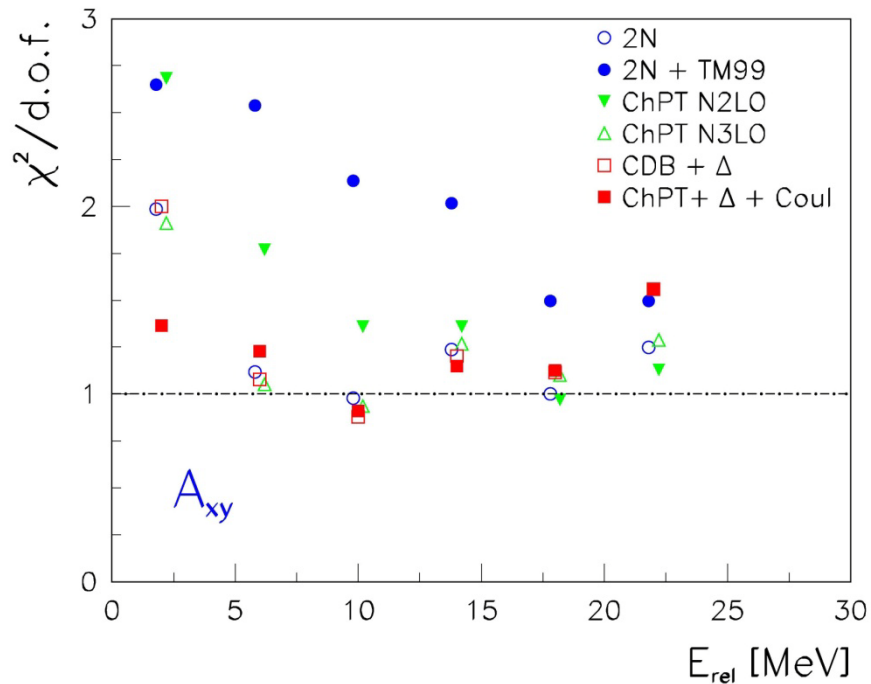
włączenie oddziaływania kulombowskiego poprawia zgodność dla małych E_{rel}

Najlepsza zgodność dla obliczeń Coulomb + 3NF !



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

Tensorowa
zdolność analizująca

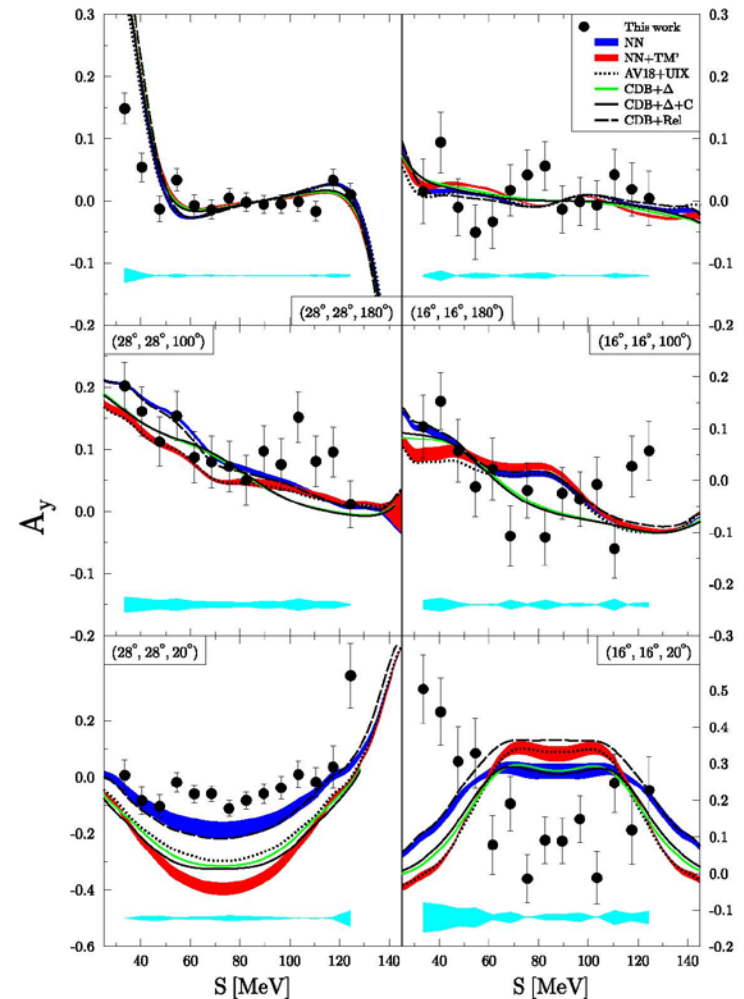


Problem z TM99 3NF

E. Stephan UŚI

$^2\text{H}(\vec{p}, pp)n$ @ 135 MeV

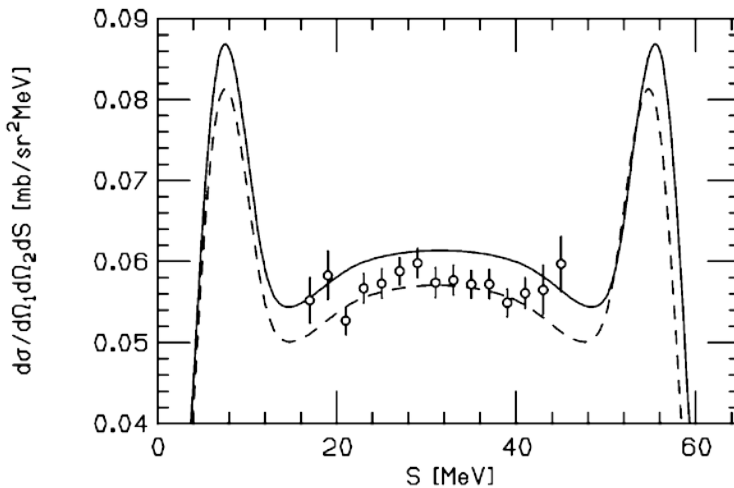
Wektorowa (protonowa)
zdolność analizująca



Eksperymentalne badanie $^1\text{H}(d,pp)n$

Przekroje czynne – efekty relatywistyczne

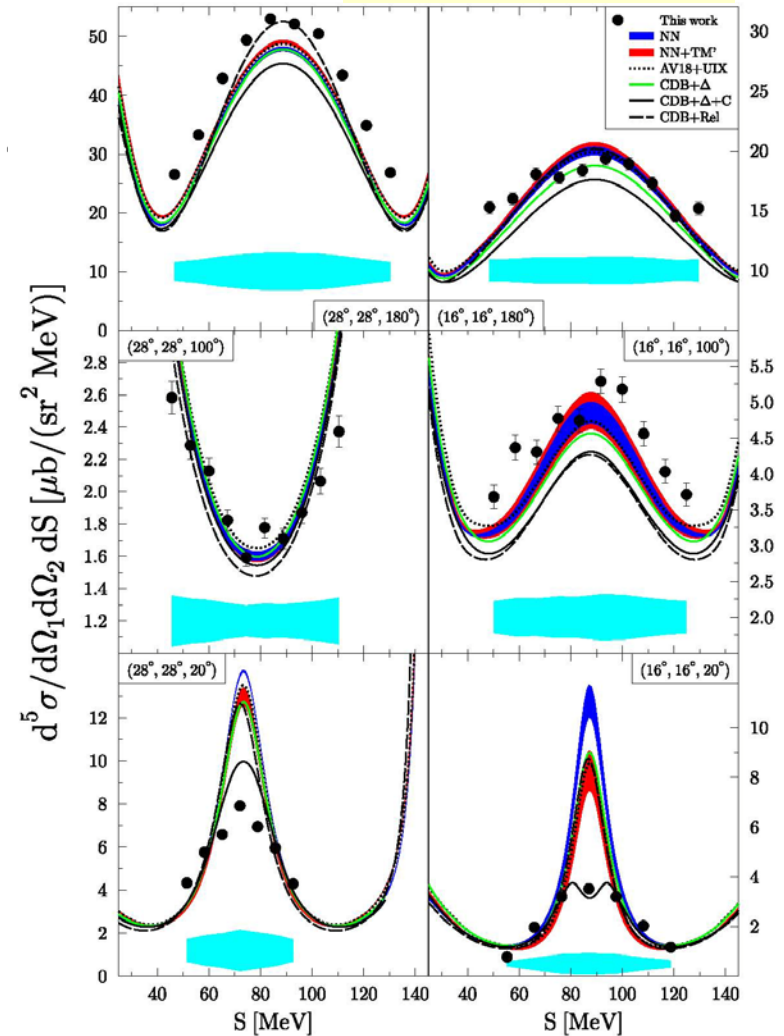
135 MeV (KVI)



przy 65 MeV (PSI)

$$\theta_1 = \theta_2 = 54^\circ, \varphi_{12} = 120^\circ$$

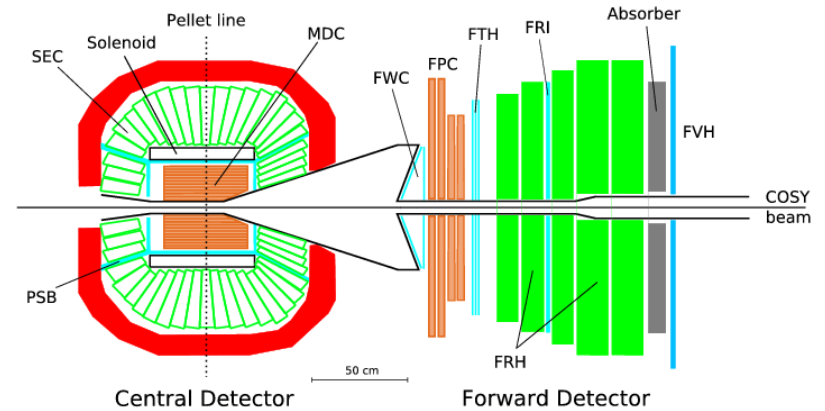
Niedawne wyniki obliczeń z
potencjałem CD Bonn:
nierelatywist. (ciągłe) /
relatywistyczne (przerywane)



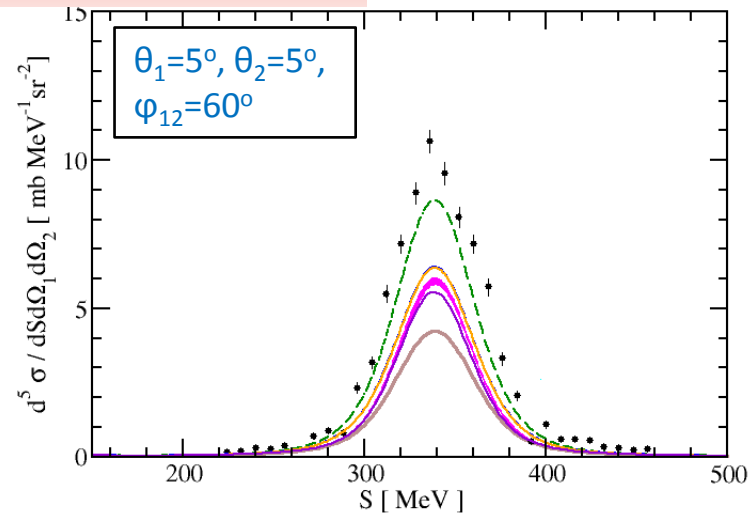
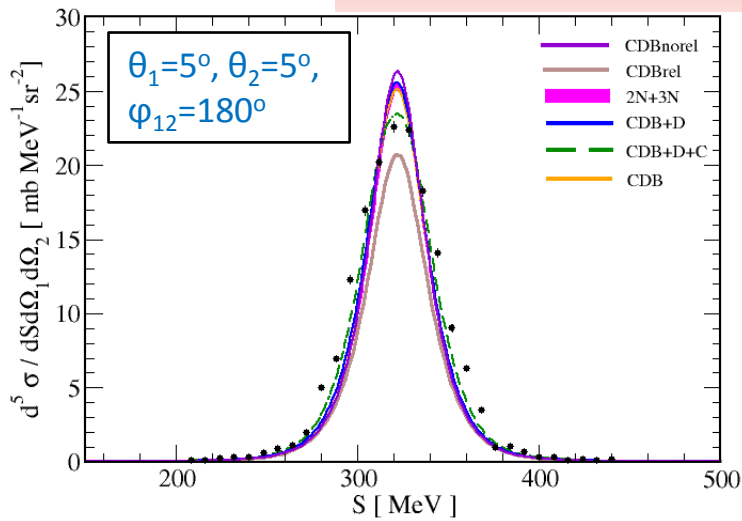


3N System - d+p Breakup Reaction WASA@COSY

- ❑ Wiązka deuteronowa: 340, 380, 400 MeV
(170, 190, 200 MeV/nucleon)
- ❑ Tarcza H pelletowa
- ❑ Detektor WASA
 - ❑ forward: 3°-18°
 - ❑ central: 20°-169°



340 MeV, 10% danych, wstępne wyniki

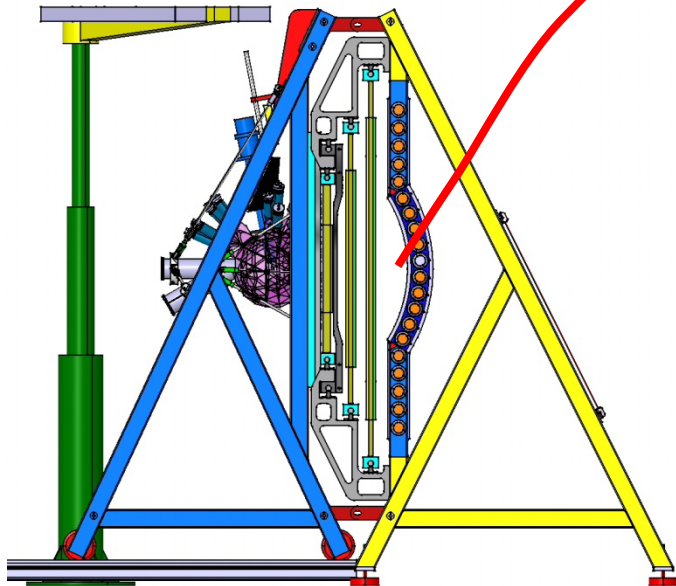


Badania układów 3N w IFJ PAN

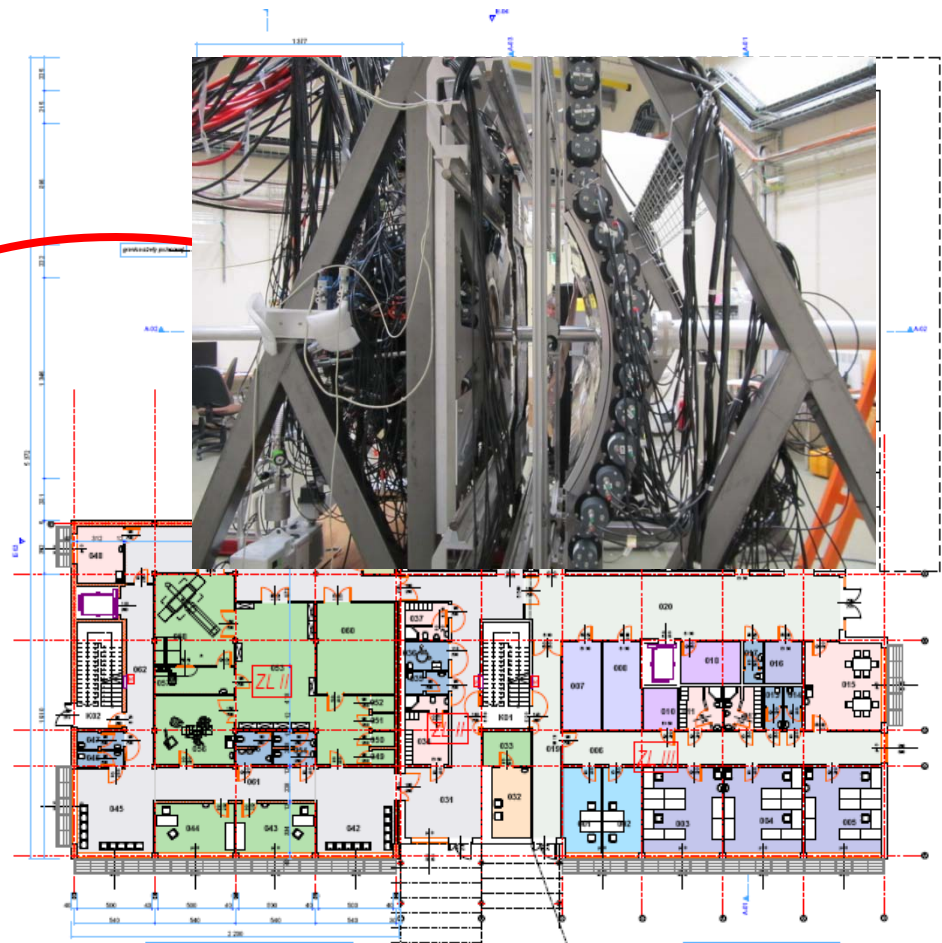
BINA w Centrum Cyklotronowym Bronowice

Cyclotron Proteus C-235:

- ❑ Energia protonów 230 MeV (degradacja do 70 MeV)
- ❑ $\Delta E/E < 0.7\%$
- ❑ Prąd wiązki 500 nA – 0.1 nA



E. Stephan UŚI



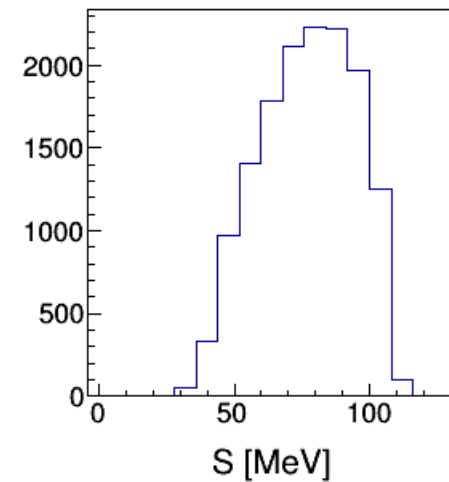
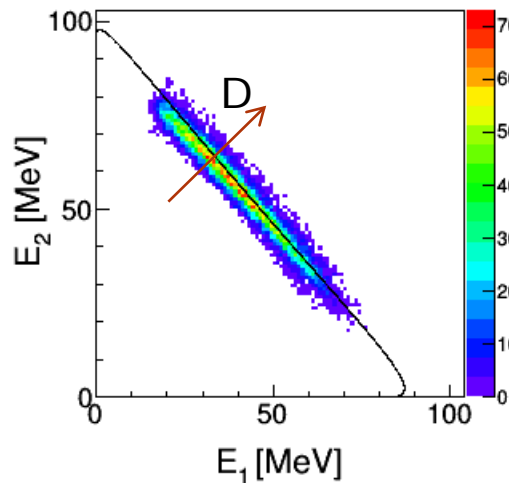
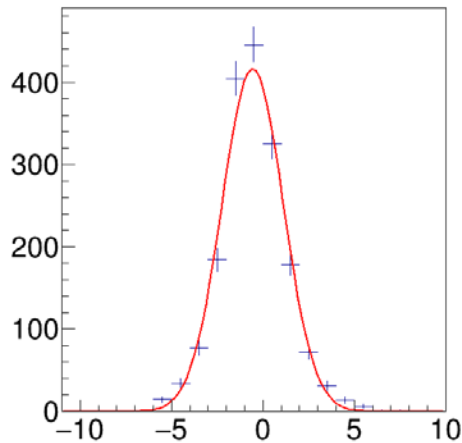
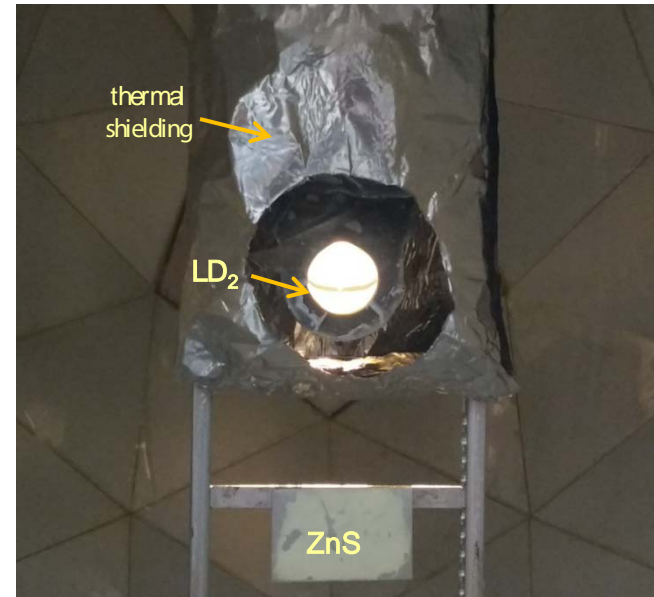
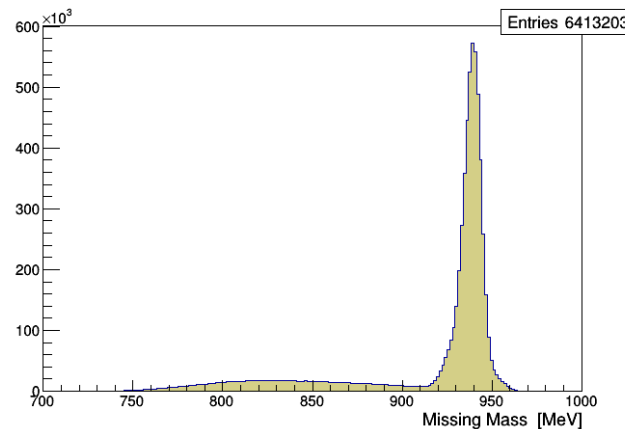
Warszawa 2017

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

BINA @ CCB (maj-czerwiec 2016)

- ❑ Wiązka protonowa: 108, (135, 160) MeV
- ❑ Tarcza ciekła LD_2
- ❑ BINA

$$\theta_1=27^\circ, \theta_2=17^\circ, \\ \varphi_{12}=140^\circ$$



E. Stephan UŚI

pd Breakup Reaction at 50–250 MeV/A

Observable	ChPT	1 Coul+ 3NF	3NF+ relat.	300
$\frac{d\sigma}{d\Omega}$				
\vec{p}				
\vec{d}				
$\vec{d} \rightarrow \vec{p}$				
$\vec{p}\vec{d}$				

WASA

KVI

CCB

π threshold

Breakup deuteronu w zderzeniu z protonem

Współrzędne niezmiennicze

4-pędy:

- kanał wejściowy: proton p_p , deuteron p_d ,
- kanał wyjściowy: protony p_{p1} , p_{p2} i neutron p_n

$$s_{pp} = (p_{p1} + p_{p2})^2$$

$$s_{pn} = (p_{p1} + p_n)^2$$

$$t_n = (p_d / 2 - p_n)^2$$

$$t_p = (p_p - p_{p2})^2$$

deuteron traktowany jak para proton-neutron

przejdźcie do *intuicyjnych* wartości energii

$$E_{rel}^{pp} = \sqrt{s_{pp}} - 2m_p$$

$$E_{rel}^{pn} = \sqrt{s_{pn}} - m_p - m_n$$

$$E_{tr}^p = \frac{-t_p}{2m_p}$$

$$E_{tr}^n = \frac{-t_n}{2m_n}$$

$$\text{FSI: } E_{rel}^{pp} = 0$$

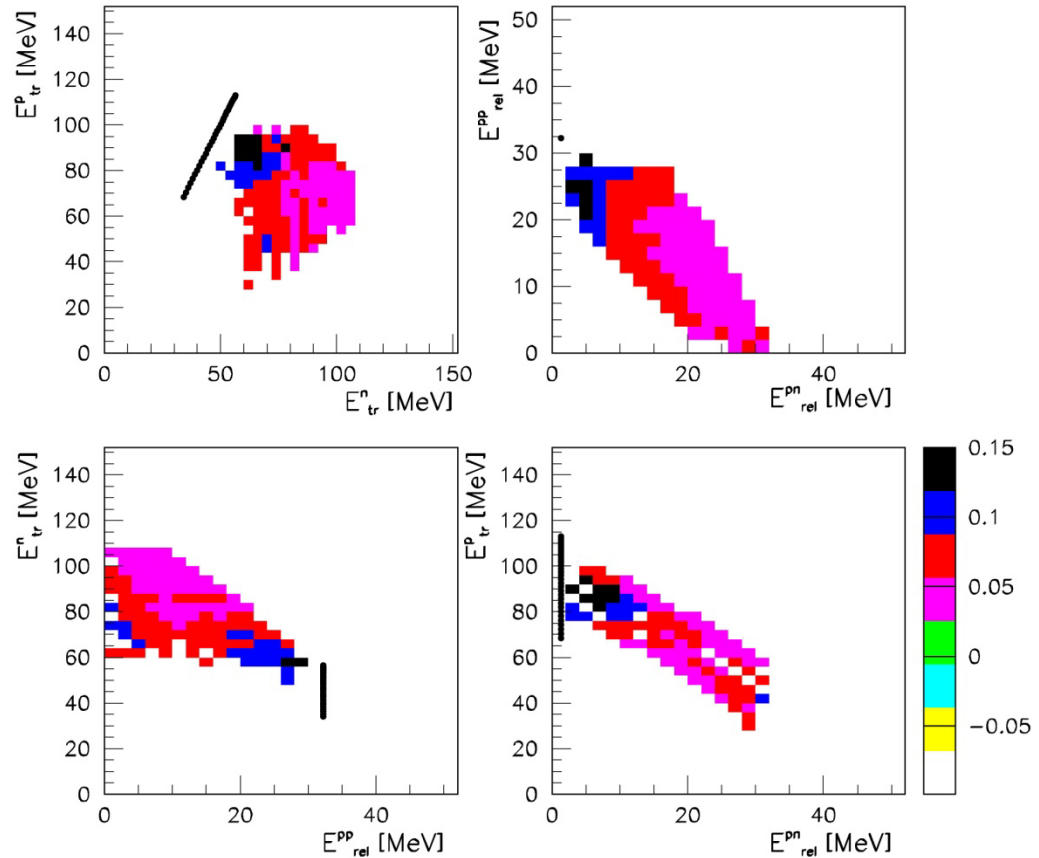
$$E_{rel}^{pn} = 0$$

$$\text{QFS: } E_{tr}^p = 0$$

$$E_{tr}^n = 0$$

Breakup $^1\text{H}(d,pp)n$ przy energii 130 MeV przewidywany wpływ 3NF - współrzędne niezmiennicze

- przekrój czynny
- wybrany obszar kinematyki, dla którego są dane zmierzone detektorem SALAD
- NN : AV18 + Coulomb
- badany wpływ siły 3N: UrbanaIX
- największy wpływ w pobliżu pn FSI



Układy 3 N: Rozpraszanie sprężyste/Breakup

Podsumowanie

	Rozpraszanie sprężyste p-d	Breakup deuteronu p-d
3NF - wpływ na przekrój czynny	znaczny, potwierdzony problem dla energii >100 MeV	znaczny, potwierdzony ? (pojawiają się efekty relatywistyczne)
3NF - obserwowalne polaryzacyjne	brak jednoznacznego potwierdzenia, czasem pogorszenie opisu	brak jednoznacznego potwierdzenia, czasem pogorszenie opisu
Coulomb - wpływ na przekrój czynny	praktycznie zaniedbywalny	istotny, blisko pp FSI dominujący, potwierdzony
efekty relatywistyczne	praktycznie zaniedbywalne	przewidywane znaczne, wymagają potwierdzenia eksperymentalnego

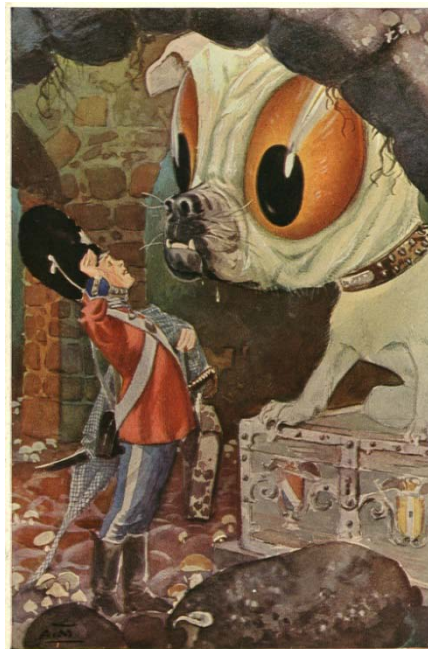
Układy 3N

oczekiwany rozwój obliczeń teoretycznych

- ChPT
 - Obliczenia w rzędzie **N³LO** (pełne, czyli z uwzględnieniem grafów odpowiadających za siłę 3N)
- Pełne obliczenia z **3NF**, oddziaływaniem **kulombowskim**, przeprowadzone **relatywistycznie**

Następny krok: układy 4N

- ❖ różnorodność kanałów reakcji
- ❖ możliwość badania zależności **izospinowych**
- ❖ potencjalnie większa (niż w 3N) **czułość na 3NF**
- ❖ obliczenia *ab initio*?
- ❖ rola 4NF?



H.C. Andersen
Krzesiwo

Oczy jak:

- filiżanki
- młyńskie koło
- Okrągła Wieża

Następny krok: układy 4N

❖ IUCF

- rozpraszanie sprężyste $d+d \rightarrow d+d$ przy energii 241 MeV

❖ KVI - BBS

- rozpraszanie sprężyste $d+d \rightarrow d+d$ przy energii 135 MeV

❖ KVI - BINA

- $d+d \rightarrow d+p+n$; 135 MeV
- $d+d \rightarrow d+p+n$; 160 MeV

❖ Planowane (CCB):

- ❖ $p+{}^3\text{He} \rightarrow d+p+p$ (i inne kanały)

