

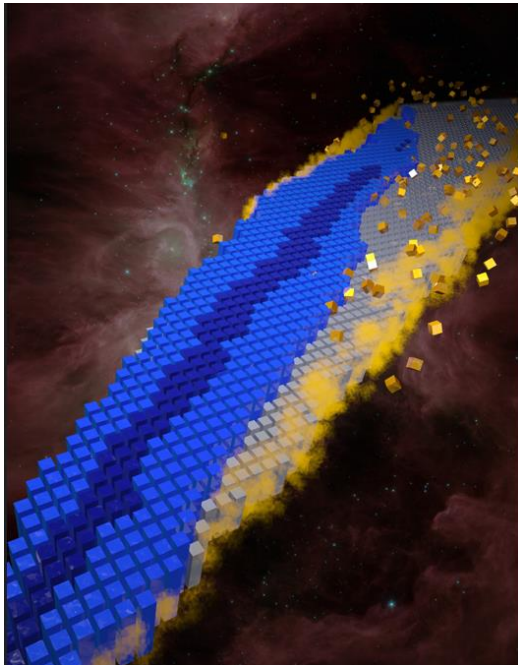


Oddziaływania i symetrie badane w fizyce jądrowej

Elżbieta Stephan

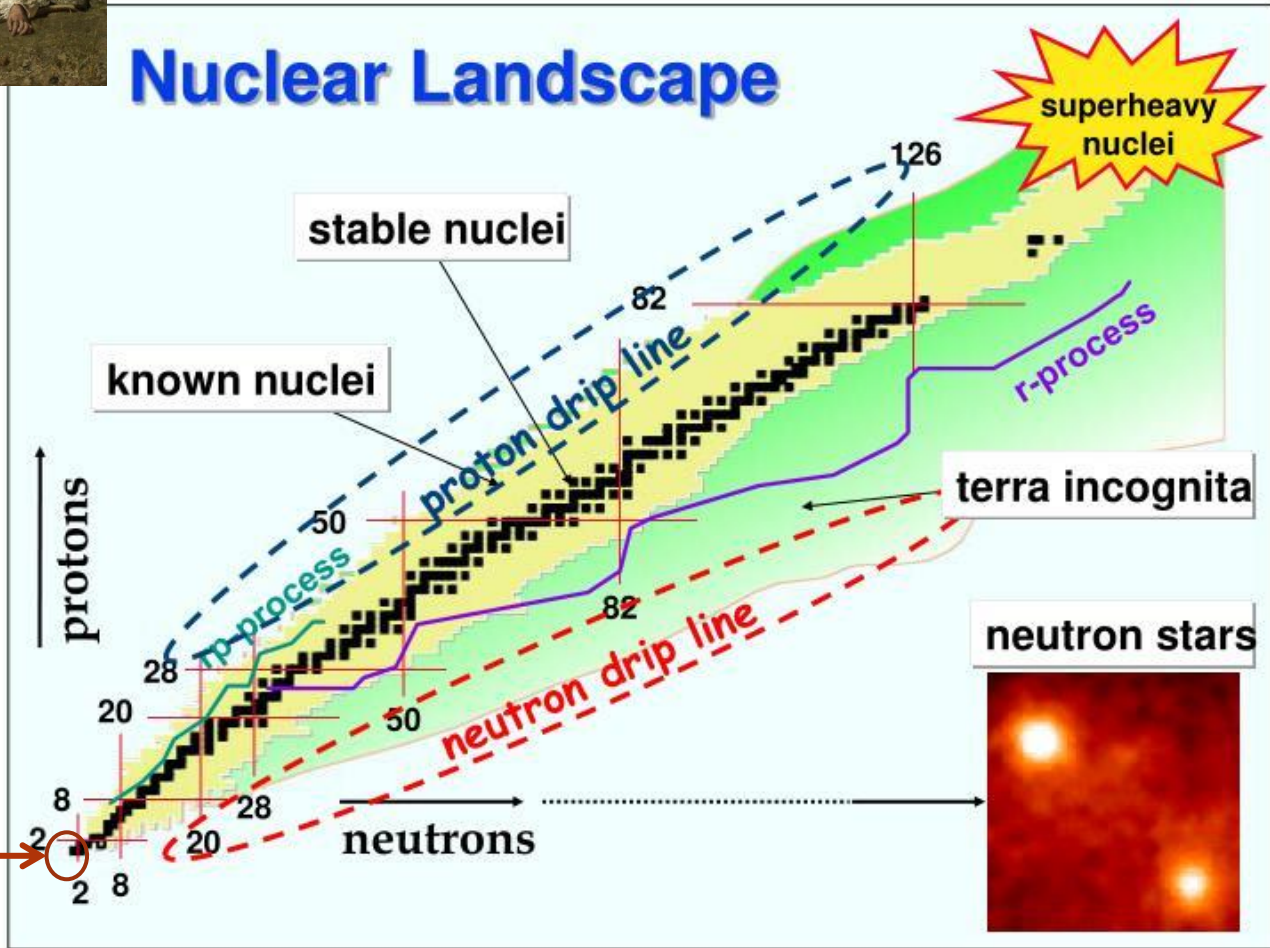


INSTYTUT FIZYKI
UNIWERSYTETU ŚLĄSKIEGO

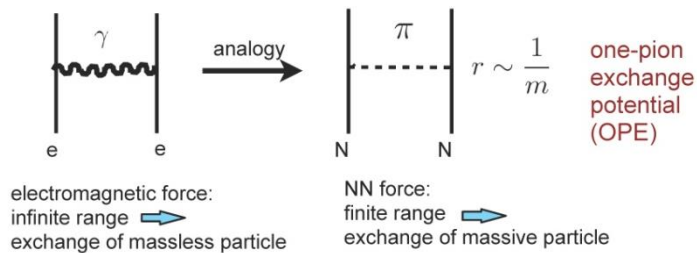




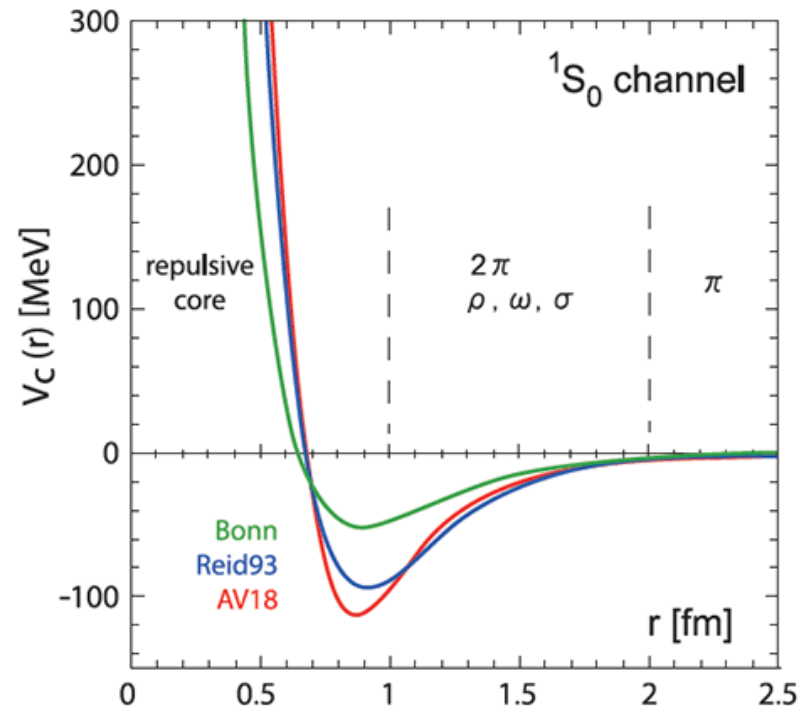
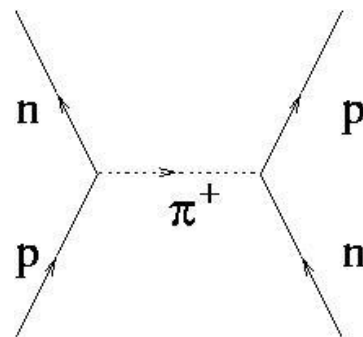
Nuclear Landscape



Yukawa - hipoteza oddziaływania jądrowego jako wymiany masywnej cząstki



Hideki Yukawa
Nobel prize in 1949

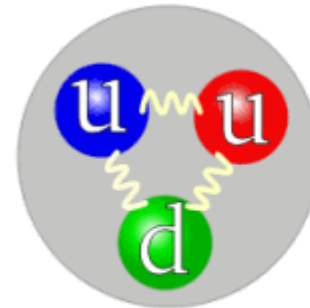


Model kwarkowy- Chromodynamika kwantowa (QCD)

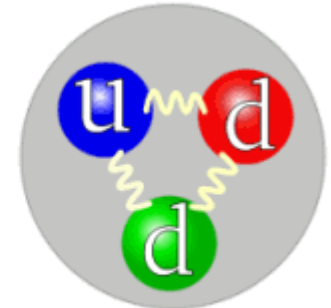
Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)

	I	II	III		
mass	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
SCALAR BOSONS					
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
LEPTONS	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
GAUGE BOSONS					



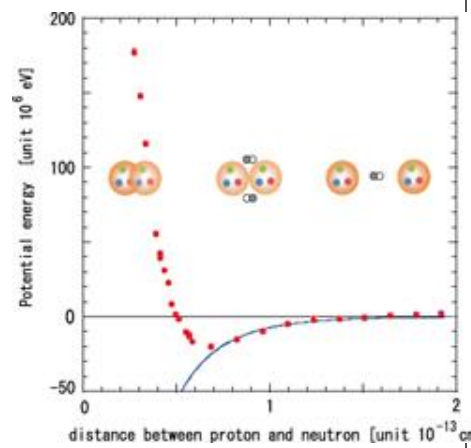
Proton



Neutron

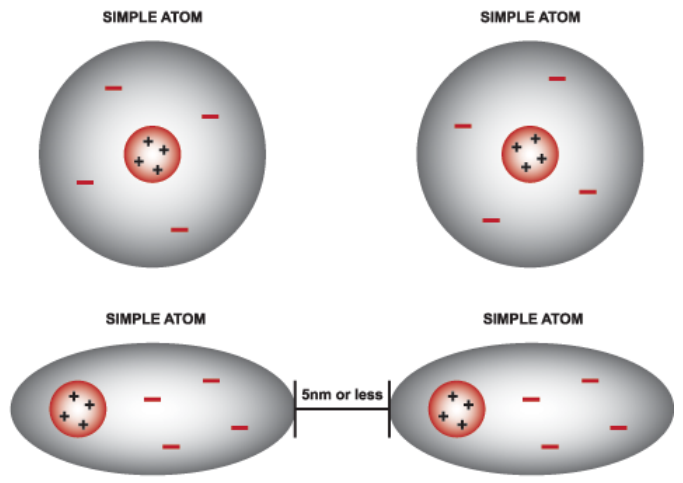
Quark composition of a proton and a neutron (diagrams from Wikipedia)

Kłopotliwe resztki po QCD ?

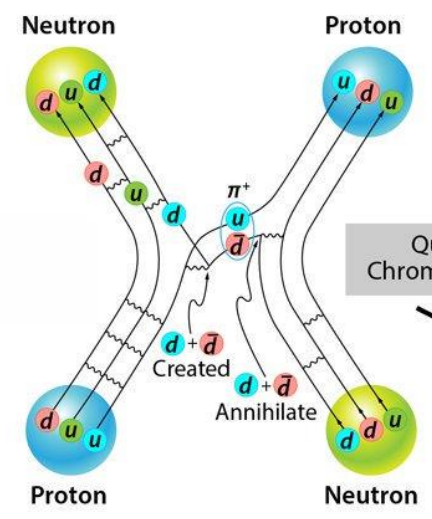


VAN DER WAALS' FORCES (VDW) DIAGRAM

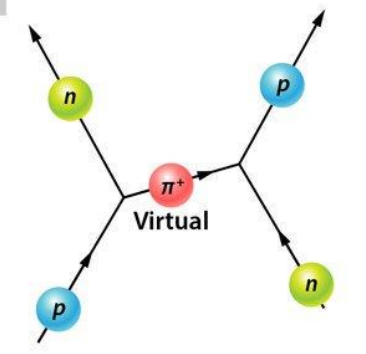
KEY
 + POSITIVE NUCLEUS
 - NEGATIVE CHARGED ELECTRON CLOUD



When two atoms come within 5 nanometers of each other, there will be a slight interaction between them, thus causing polarity and a slight attraction.



Quantum Chromodynamics



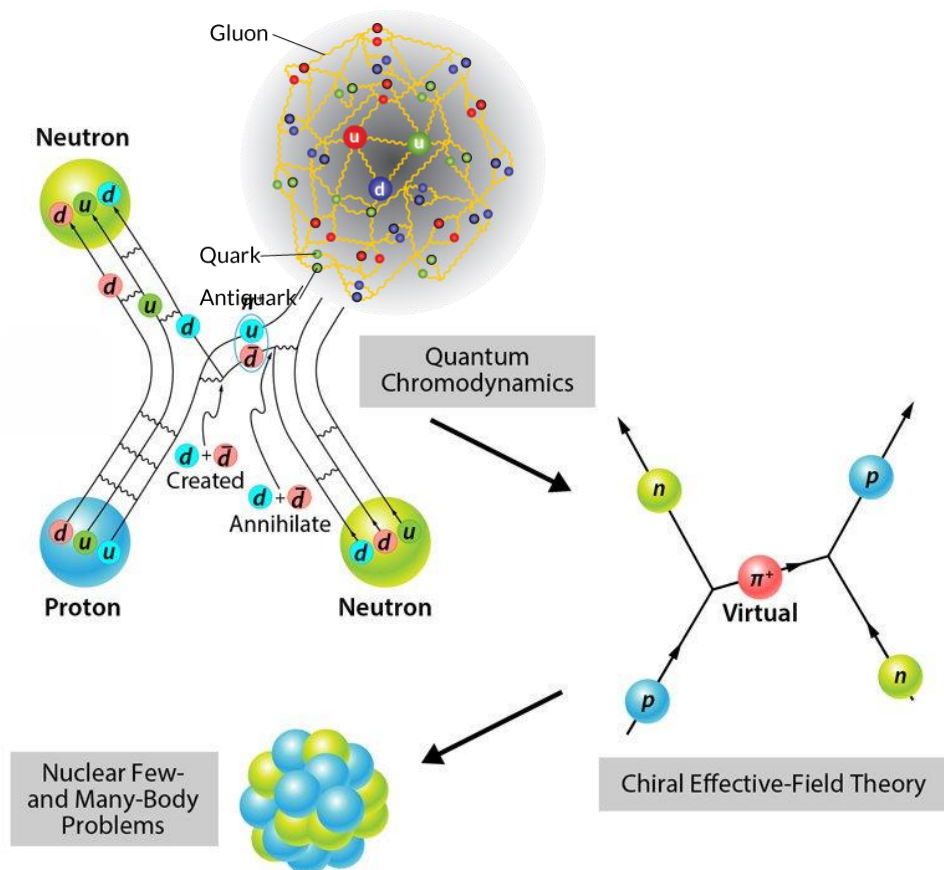
Chiral Effective-Field Theory

Nuclear Few- and Many-Body Problems



niska energia - silne oddziaływanie - obszar nieperturbacyjny QCD

Kłopotliwe resztki po QCD ?

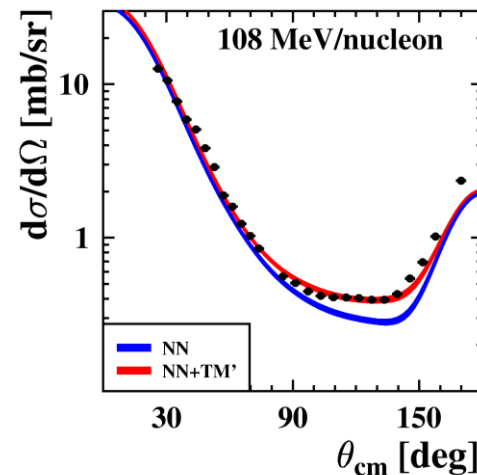


Układy 3 nukleonów

Przewidywania oparte wyłącznie na potencjałach NN:

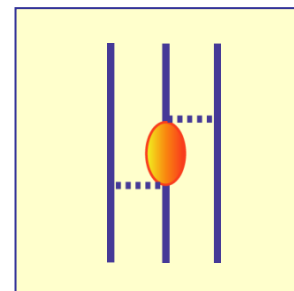
- ❖ nie odtwarzają energii wiązania dla układów 3N, 4N (i cięższych)
- ❖ nie odtwarzają minimum w przekroju czynnym rozpraszania $d(N,N)d$

Binding energy [MeV]	${}^3\text{H}$	${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$
Experimental value	8.48	7.72	28.3
CD Bonn	8.01	7.29	26.3
CD Bonn + TM99	8.48	7.73	29.2



❑ koncepcja siły trójnukleonowej:

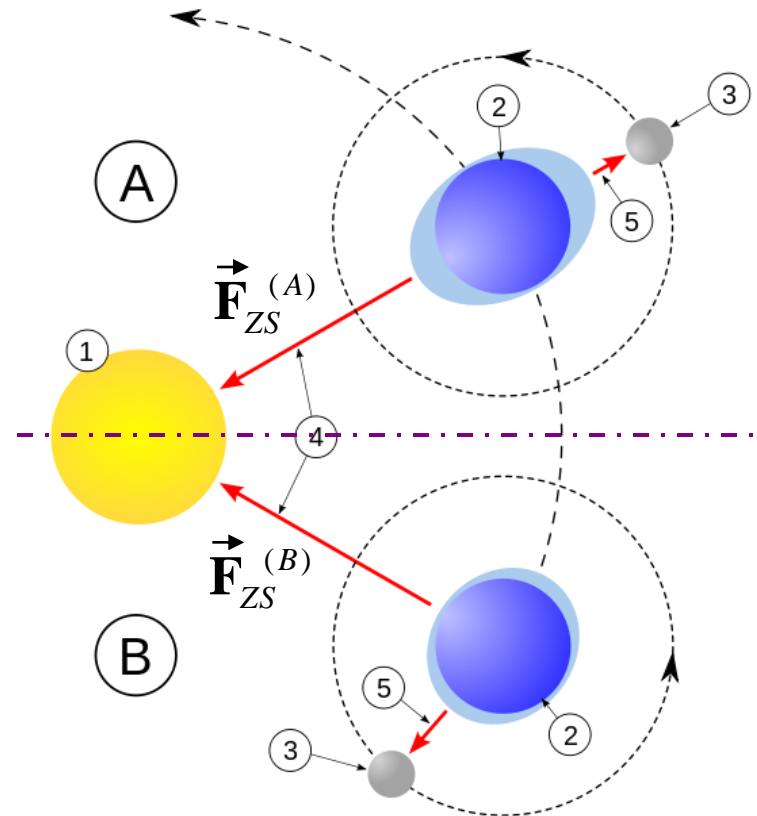
- ❑ nieredukowalne oddziaływanie wynikające z wewn. struktury nukleonów
- ❑ systematyczne podejście w ramach ChEFT



Co to jest siła trzyciałowa ?

Dla obiektów ze strukturą wewnętrzną:
siła w danej parze zależy od obecności
i pozycji trzeciego ciała

$$\vec{F}_{ZS}^{(A)} \neq \vec{F}_{ZS}^{(B)}$$

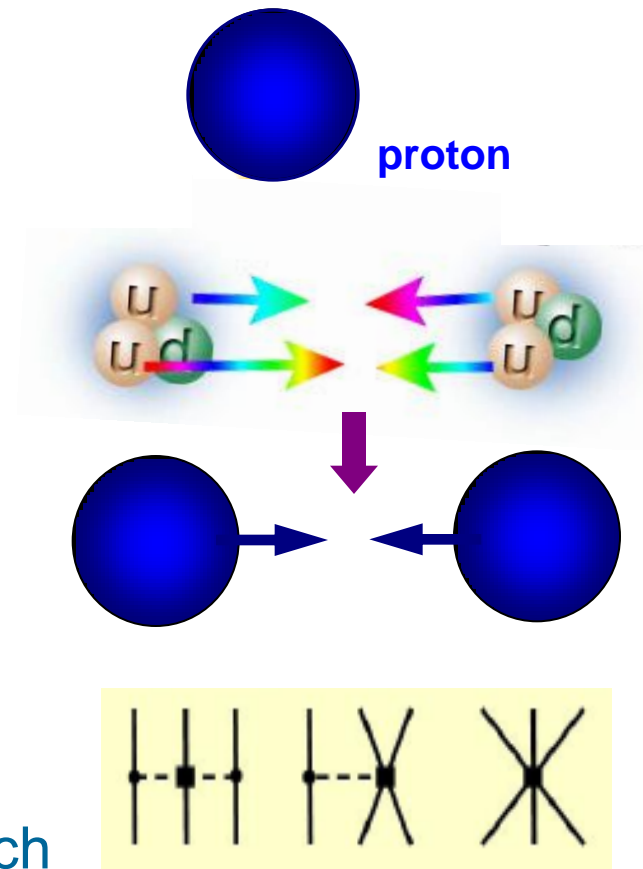


Co to jest siła trójnukleonowa ?

Proton nie jest cząstką elementarną,
posiada wewnętrzne stopnie swobody

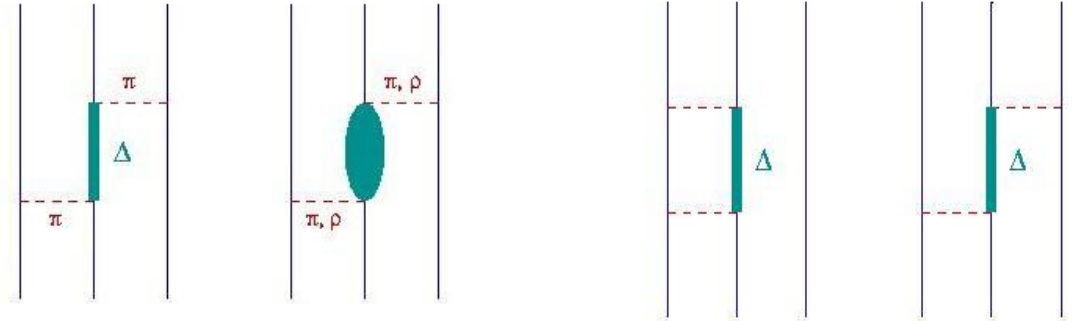
Siły jądrowe są resztkową reprezentacją
elementarnego oddziaływania silnego
(kolorowego)

Wpływ zaniedbanych stopni swobody
odtworzymy poprzez wprowadzenie
efektywnych oddziaływań wielociałowych



Układy 3 nukleonów

Modele 3NF:

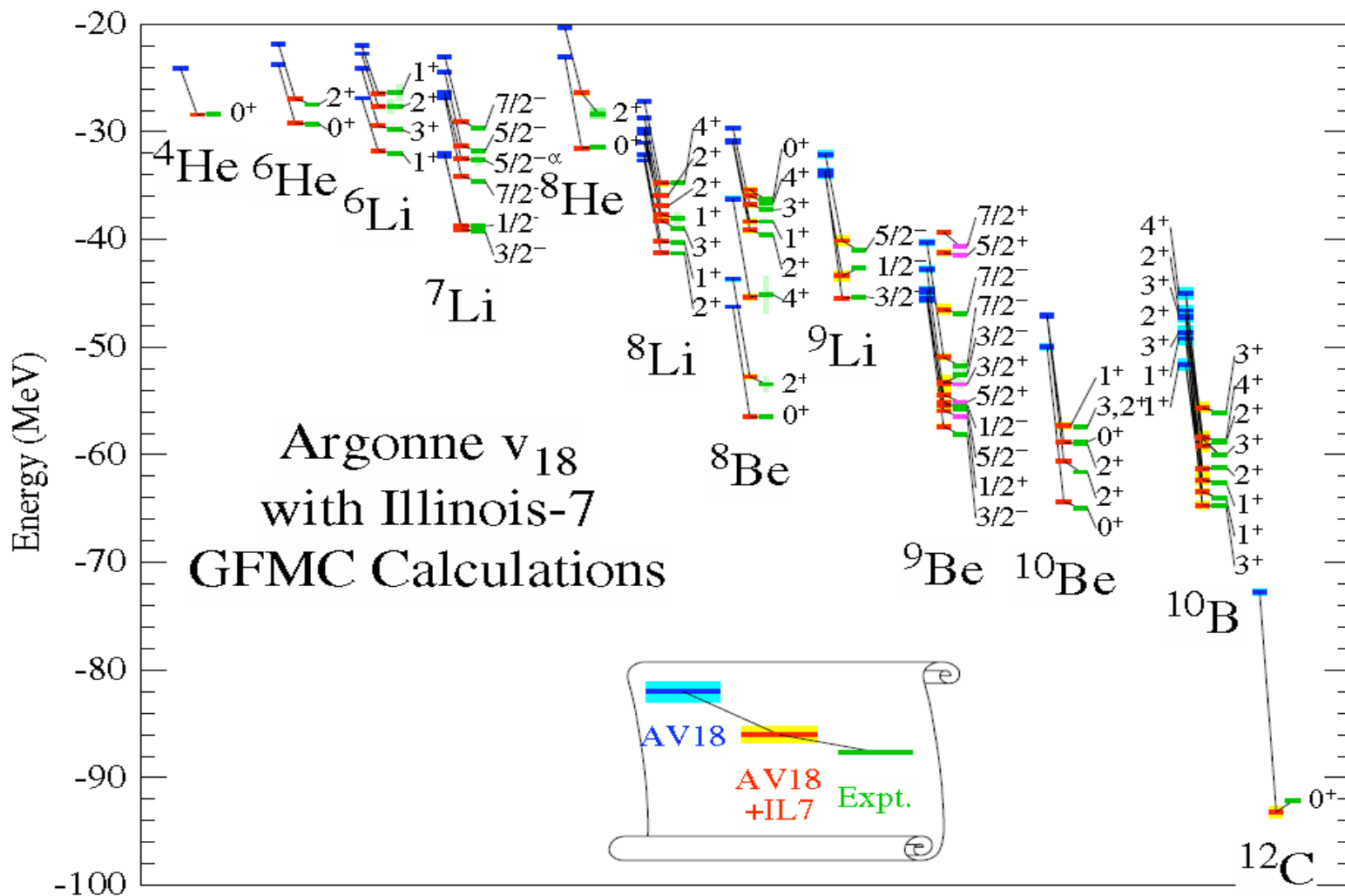


Pojawia się w sposób naturalny w Chiral Effective Field Theory w rzędzie N²LO:

	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				$(Q/\Lambda_\chi)^4$

Układ kilku nukleonów

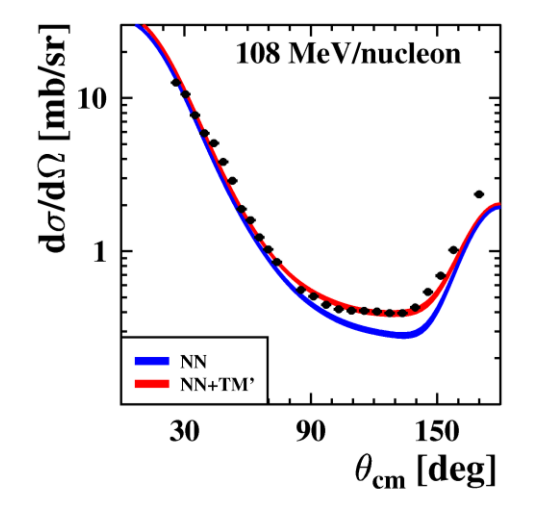
Efekty 3NF – stany związane #2



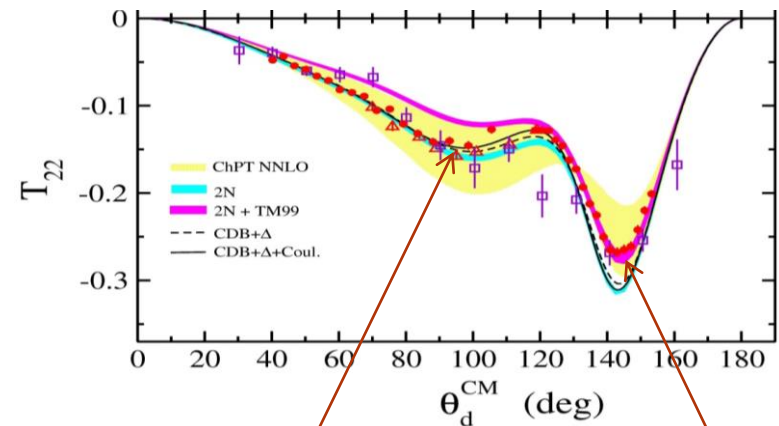
Układy 3N – rozpraszanie sprężyste p-d

- ❖ 3NF znacząco poprawia opis różniczkowego przekroju czynnego.
- ❖ 3NF nie zawsze poprawia opis obserwacji polaryzacyjnych – wiele przykładów przy różnych energiach.
- ❖ Przewidywane efekty kolombowskie i relatywistyczne są niewielkie i ograniczone do niewielkiego obszaru przestrzeni fazowej.

•H. Mardanpour et al., Eur. Phys. Jour. 31, 383 (2007),
•E. Stephan et al., Phys. Rev. 76 057001 (2007)
130 MeV (65 MeV/nucleon)



H. Witała, W. Glöckle, D. Hüber,
J. Golak, and H. Kamada
Phys. Rev. Lett. **81**, 1183 (1998)



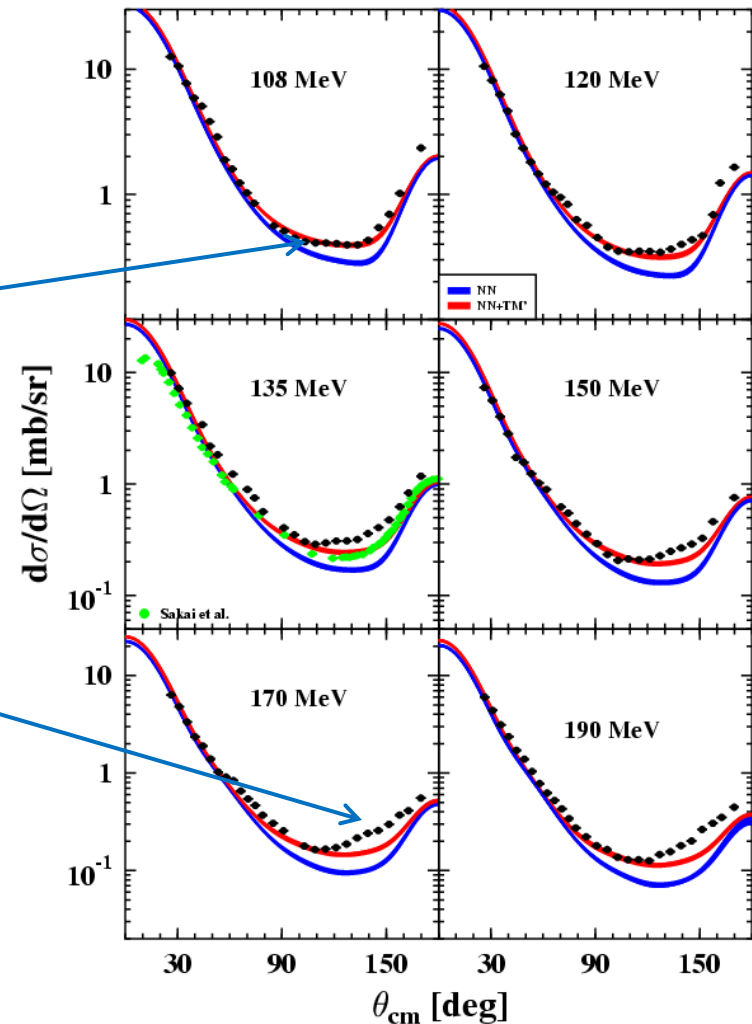
data agree with
NN calculations

data agree
with NN+3NF

Układy 3N - Rozpraszanie Sprężyste

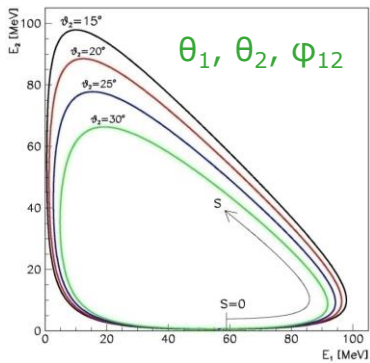
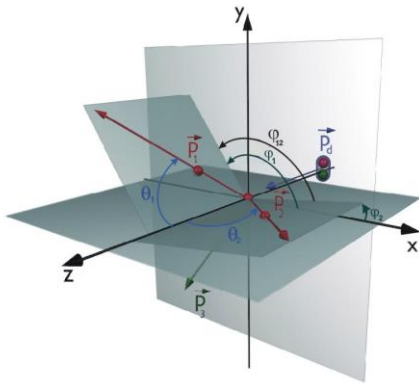
Różniczkowy przekrój czynny

- ✓ dużo danych dla wielu energii
- ✓ 3NF pomaga
- ale wraz ze wzrostem energii rosną odstępstwa - problem modelu 3NF czy inna przyczyna?



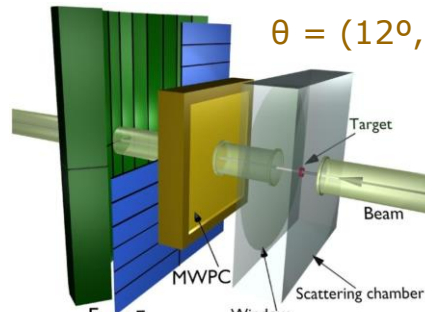
Large Acceptance Detectors

for Studies of Deuteron Breakup in Collision with Proton



SALAD

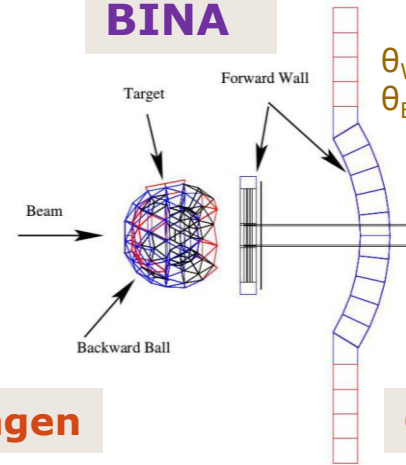
$\theta = (12^\circ, 35^\circ)$



KVI-Groningen

BINA

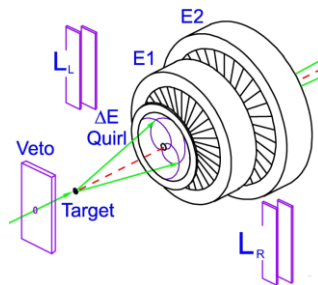
$\theta_{Wall} = (12^\circ, 35^\circ)$
 $\theta_{Ball} = (40^\circ, 180^\circ)$



CCB Krakow

GeWall

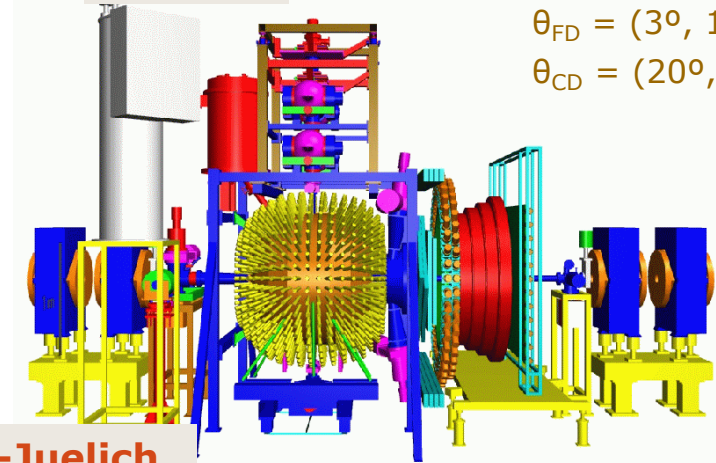
$\theta = (3^\circ, 15^\circ)$



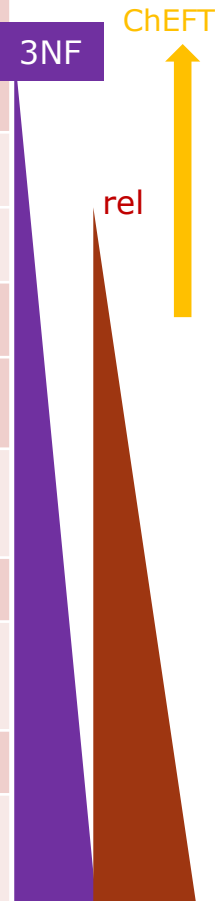
COSY-Juelich

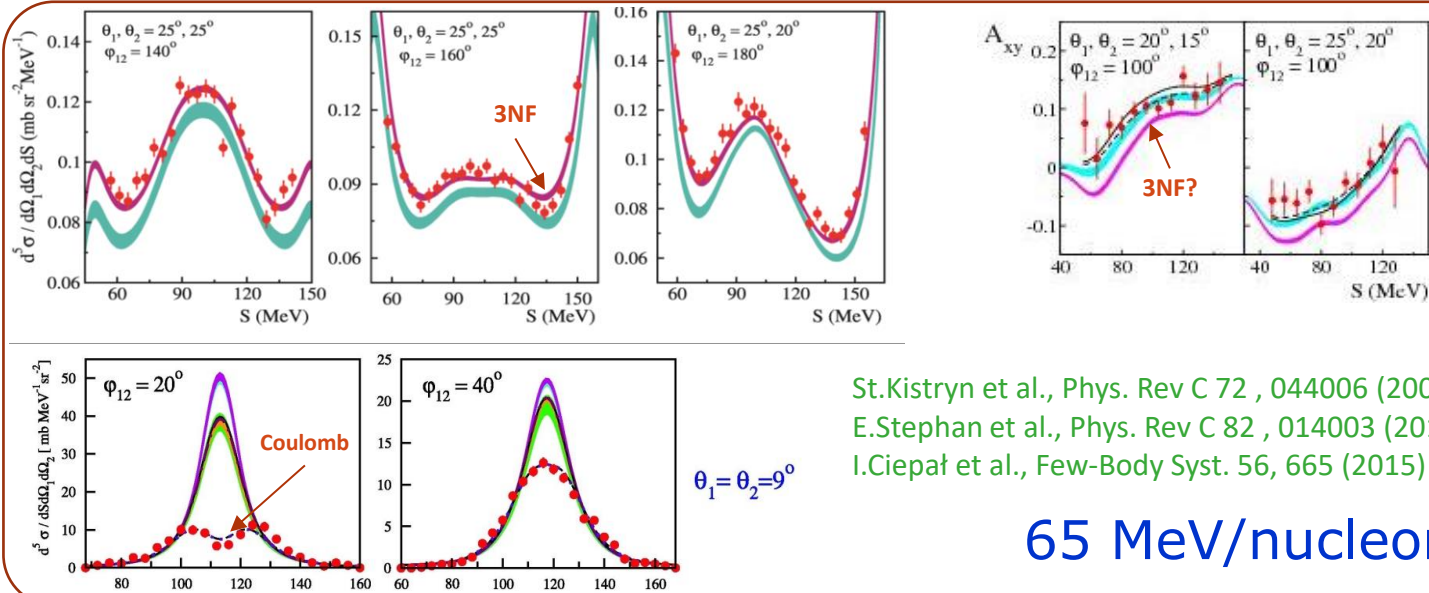
WASA

$\theta_{FD} = (3^\circ, 18^\circ)$
 $\theta_{CD} = (20^\circ, 169^\circ)$



Energy [MeV/nucl]	Detector @ Laboratory	Angular range	Reaction	Observables about 1000 data points per observable	
50	BINA @ KVI	4π Wall: 12°-35°	$^1\text{H}(\text{d},\text{pp})\text{n}$	σ	$A_x^{\text{d}}, A_y^{\text{d}}, A_{xy}, A_{xx}, A_{yy}$
65	SALAD @ KVI	12°-35°	$^1\text{H}(\text{d},\text{pp})\text{n}$	σ	$A_x^{\text{d}}, A_y^{\text{d}}, A_{xy}, A_{xx}, A_{yy}$
	GeWall @ FZ-Juelich	5°-13°	$^1\text{H}(\text{d},\text{pp})\text{n}$	σ	$A_x^{\text{d}}, A_y^{\text{d}}$
80	BINA @ KVI	4π Wall: 12°-35°	$^1\text{H}(\text{d},\text{pp})\text{n}$	σ	
			$^1\text{H}(\text{d},\text{pn})\text{p}$	σ	
108	BINA @ CCB	4π Wal: 12°-35°	$^1\text{H}(\text{d},\text{pp})\text{n}$	σ	
135, 195	BINA @ KVI	4π	$^2\text{H}(\text{p},\text{pp})\text{n}$	σ	A_x, A_y
150	WASA@ FZ-Juelich	4π	$^1\text{H}(\text{d},\text{pp})\text{n}$	σ	
160	BINA @ CCB	4π	$^2\text{H}(\text{p},\text{pp})\text{n}$	σ	
170, 190, 200	WASA@ FZ-Juelich	4π FD: 5°-13°	$^1\text{H}(\text{d},\text{pp})\text{n}$	σ	



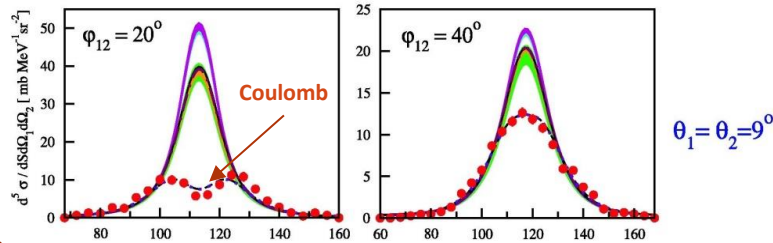
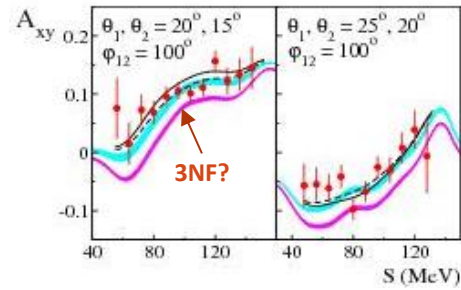
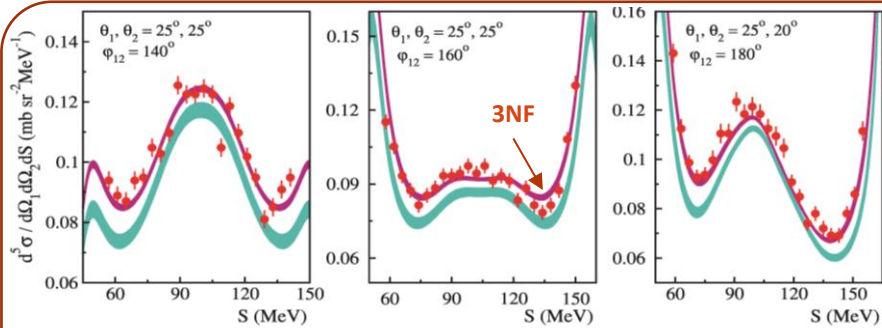


St.Kistryn et al., Phys. Rev C 72 , 044006 (2005)
 E.Stephan et al., Phys. Rev C 82 , 014003 (2010)
 I.Ciepał et al., Few-Body Syst. 56, 665 (2015)

65 MeV/nucleon

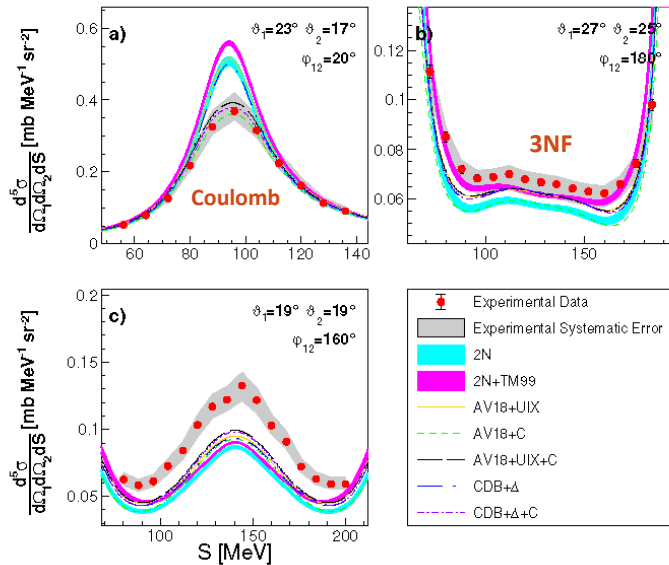
Kilkaset punktów dla każdej obserwacji.

- ❖ 3NF istotnie poprawia opis przekroju czynnego (szczególnie w pewnych rejonach kinematycznych).
- ❖ 3NF nie zawsze poprawia opis obserwacji polaryzacyjnych.
- ❖ Znaczący wpływ odpychania kulombowskiego w stanie końcowym – lokalnie dominujący!



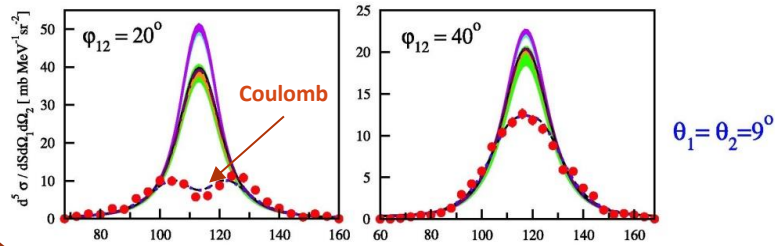
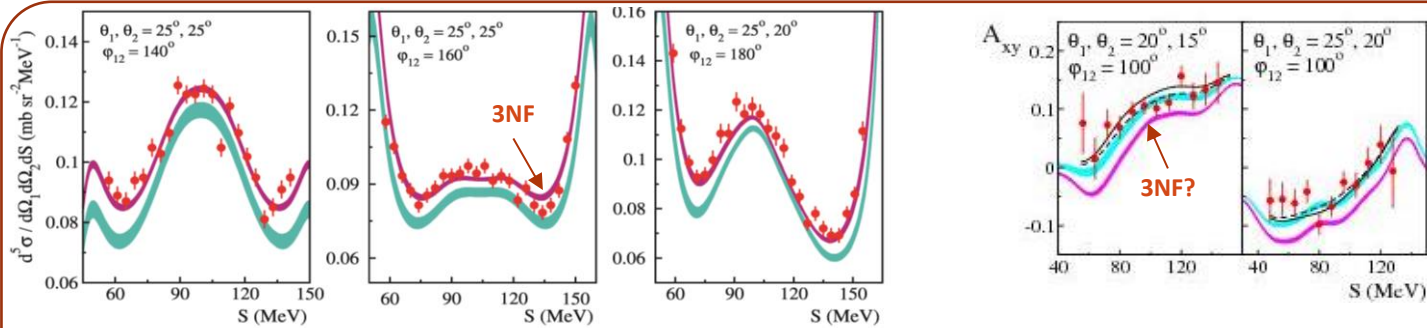
St.Kistryn et al., Phys. Rev C 72 , 044006 (2005)
 E.Stephan et al., Phys. Rev C 82 , 014003 (2010)
 I.Ciepał et al., Few-Body Syst. 56, 665 (2015)

65 MeV/nucleon



W. Parol et al., Phys. Rev C 102 , 054002 (2020)

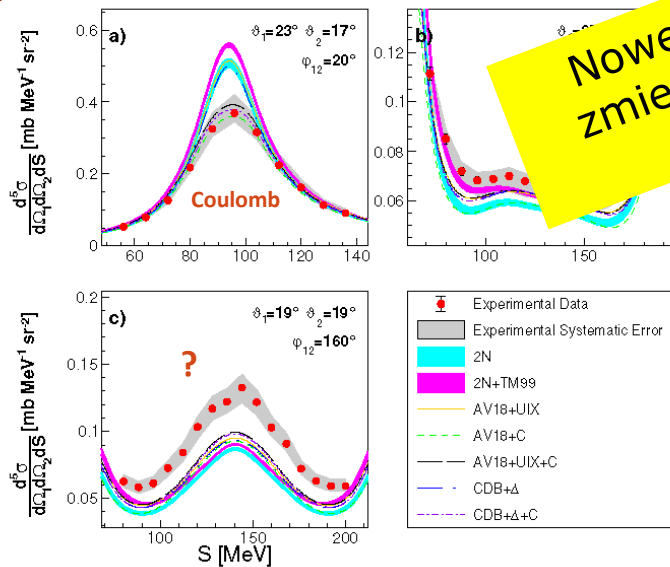
80 MeV/nucleon



St.Kistryn et al., Phys. Rev C 72 , 044006 (2005)
 E.Stephan et al., Phys. Rev C 82 , 014003 (2010)
 I.Ciepał et al., Few-Body Syst. 56, 665 (2015)

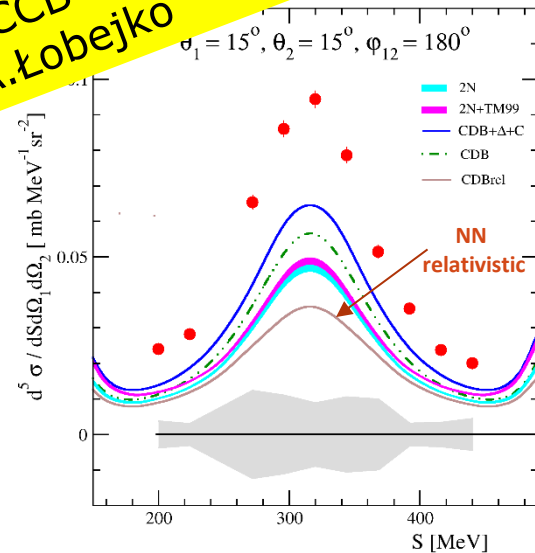
V/nucleon

Nowe wyniki dla 108 MeV
 zmierzone w CCB IFJ PAN-
 plakat A.Łobejko



W. Parol et al., Phys. Rev C 102 , 054002 (2020)

80 MeV/nucleon



B.Łtos WASA@COSY, Phys. Rev C 101 , 044001 (2020)

170 MeV/nucleon

Wpływ 3NF na strukturę jąder

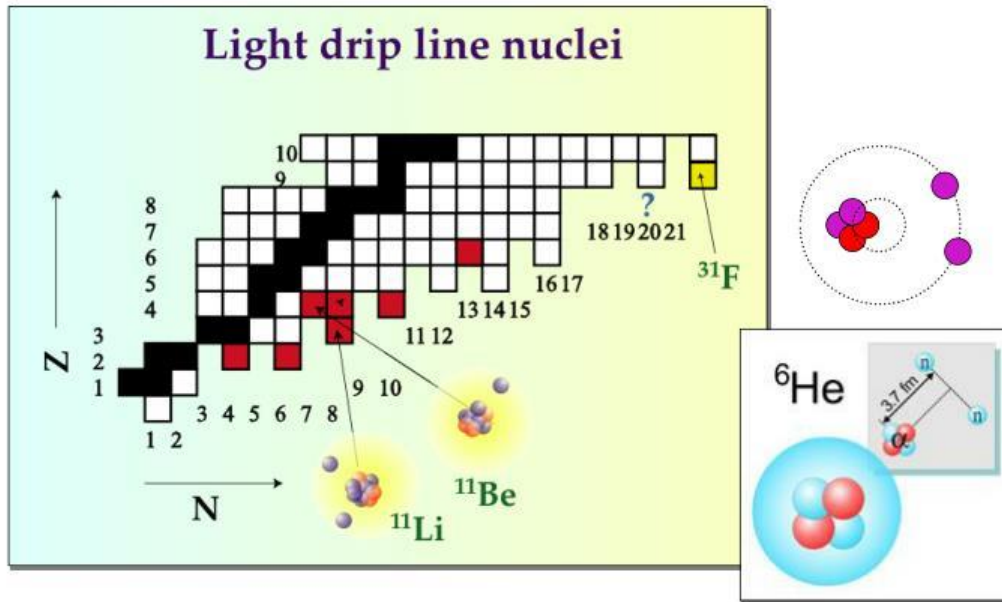
Określa się energie wiązania i promienie lekkich i „średnich” jąder.

- ❖ Wkład od 3NF (ChEFT) jest szczególnie ważny dla opisu jąder neutrono-nadmiarowych
- ❖ ... dla stabilności w pobliżu linii odpadnięcia neutronu
- ❖ ... dla odtworzenia wysycenia w materii jądrowej

Wpływ 3NF

Jądra z halo neutronowym

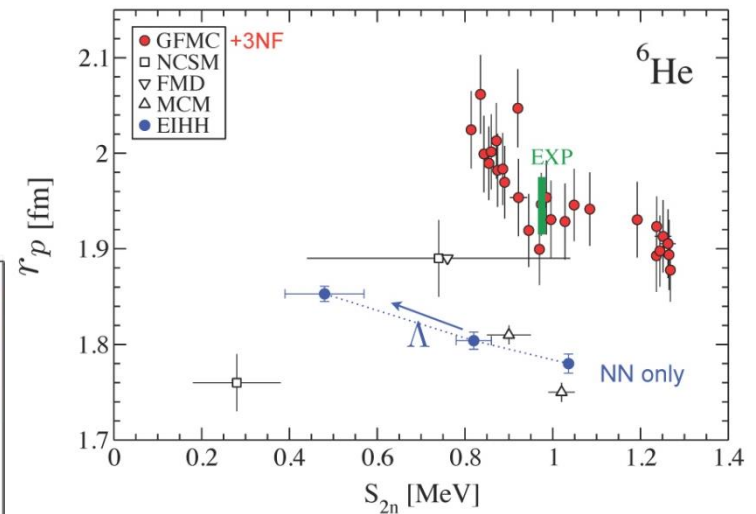
Outlaw nuclei of the nuclear
borderland



Separation energies from TITAN, Penning trap @ TRIUMF

M. Brodeur *et al.*, PRL **108**, 052504 (2012)

S.B. *et al.*, PRC **86**, 034321 (2012)

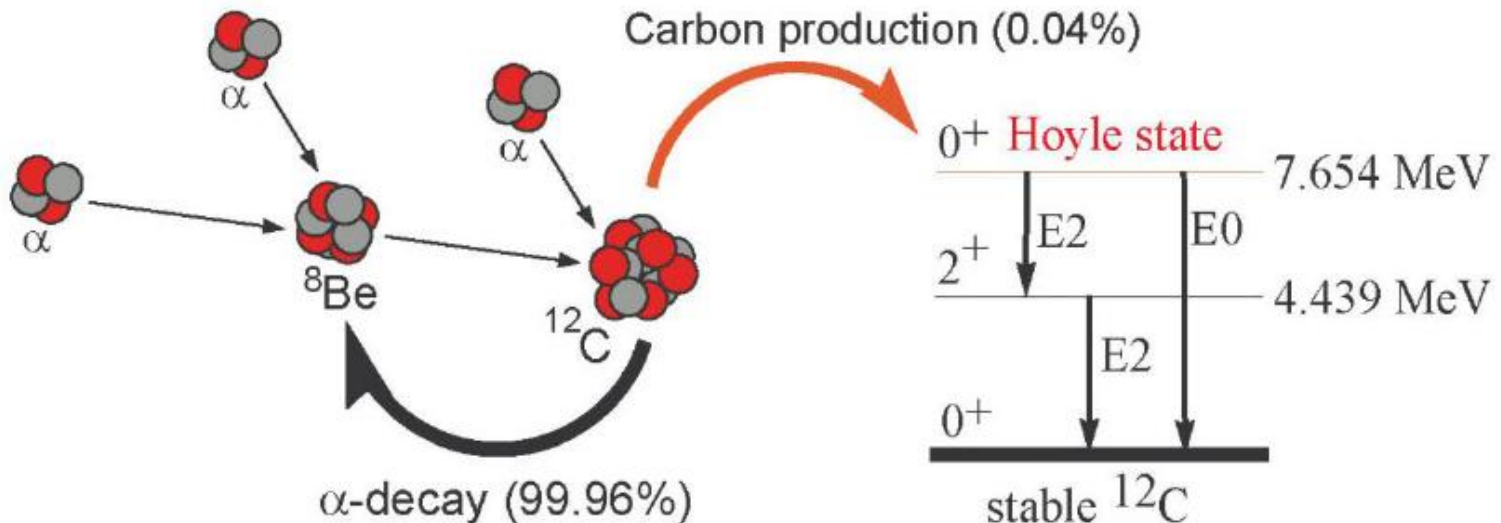
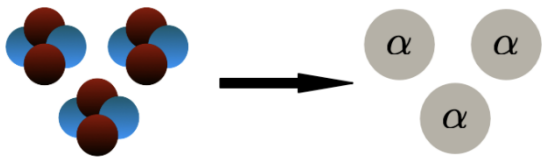


Układ kilku nukleonów

Efekty 3NF – stan Hoylea ^{12}C

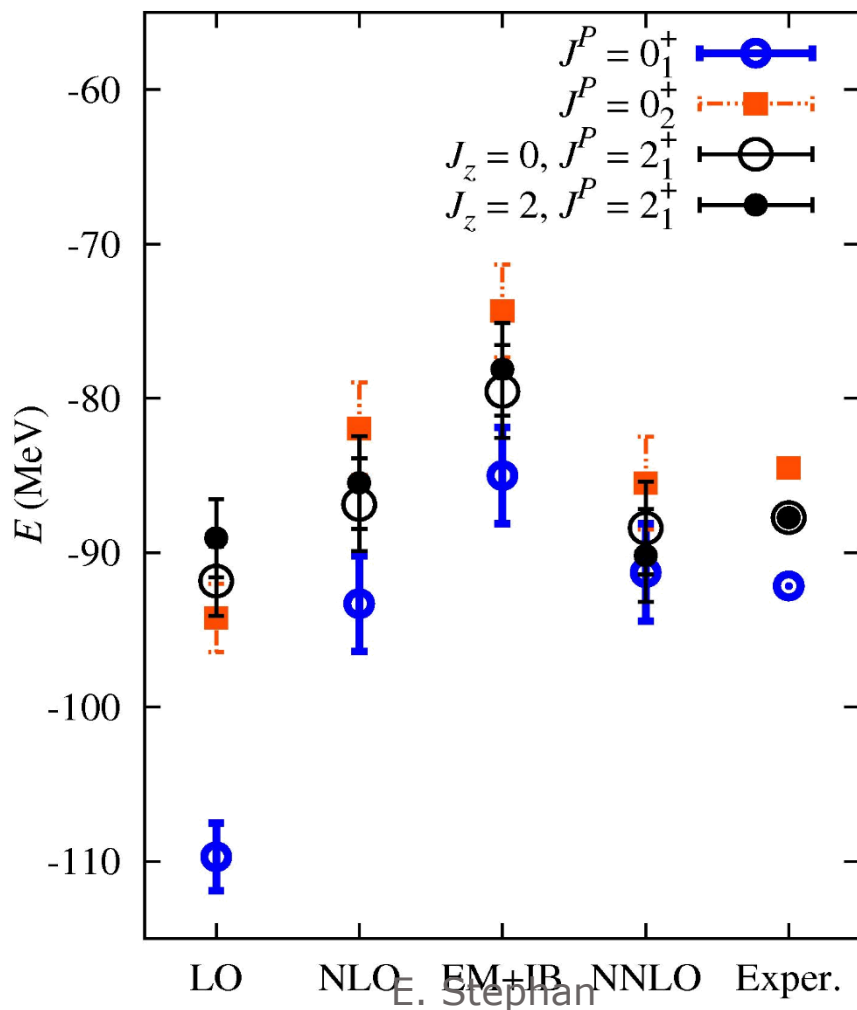


Stan w ^{12}C dzięki któremu zachodzi fuzja $3\alpha \rightarrow ^{12}\text{C}$ we wnętrzu gwiazd (^{12}C katalizatorem w CNO)



Układ kilku nukleonów

Efekty 3NF – stan Hoyla ^{12}C

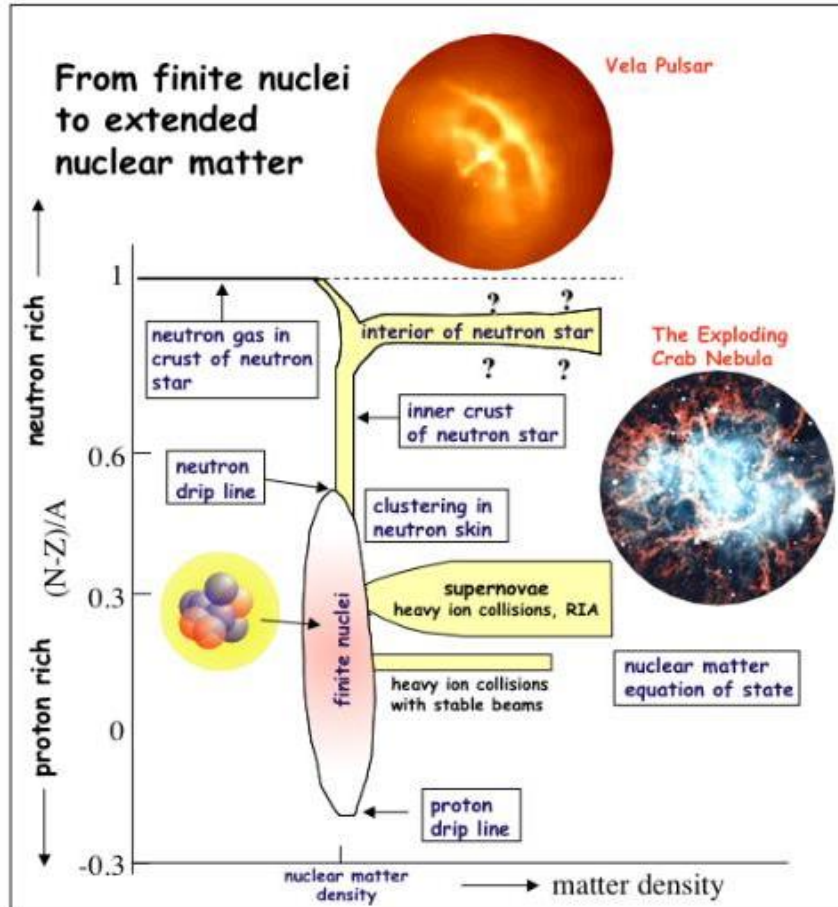


Stan w ^{12}C dzięki któremu zachodzi fuzja $3\alpha \rightarrow ^{12}\text{C}$ we wnętrzu gwiazd (^{12}C katalizatorem w CNO)

Nuclear Lattice Simulations

Jedynie przy uwzględnieniu efektów sił Coulomba oraz **sił trójciałowych** (komponent NNLO) można bez dopasowania (*ab initio*) otrzymać właściwą sekwencję poziomów

Jądra atomowe/materia jądrowa



Gwiazdy neutronowe są naturalnymi laboratoriami do badania równania stanu (EoS) asymetrycznej materii jądrowej. Promień gwiazdy neutronowej o przeciętnej masie jest bardzo czuły na gradient ciśnienia w materii jądrowej.

Z drugiej strony pomiary fal grawitacyjnych wytworzonych w wyniku połączenia się dwu gwiazd neutronowych (GW 170817) dają nowe ograniczenia na promienie tych gwiazd.

ChEFT: wyznaczenie EoS dla asymetrycznej materii jądrowej

obserwacje, m.in. pomiary fal grawitacyjnych wytworzonych w wyniku połączenia się dwu gwiazd neutronowych (GW 170817) dają nowe ograniczenia na promienie tych gwiazd

MODEL GWIAZDY NEUTRONOWEJ

tworzenie wysokich ciśnień w laboratorium: zderzenia („dosyć centralne”) ciężkich jonów, pomiary emisji n/p oraz pionów

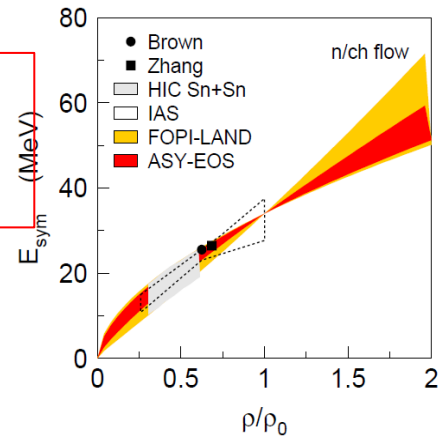
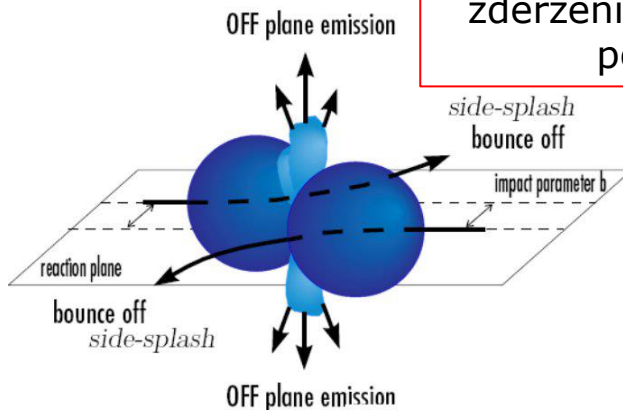
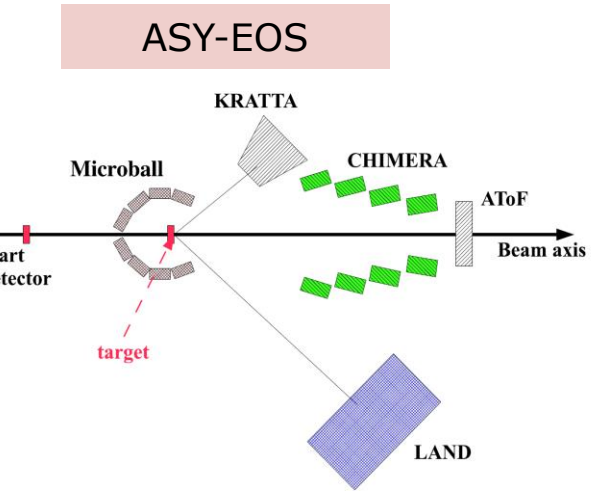
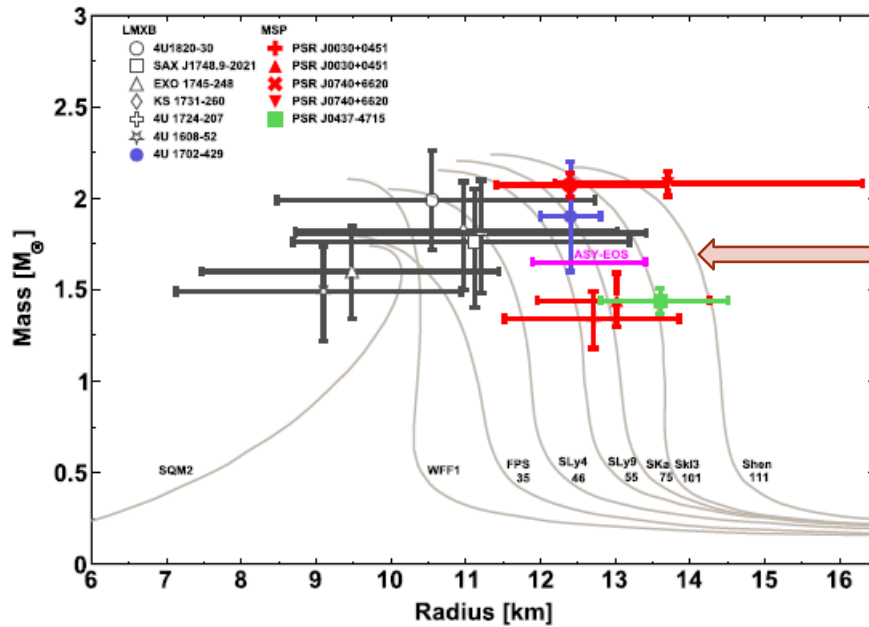


FIG. 19: (Color online) Constraints deduced for the density dependence of the symmetry energy from the present data in comparison with the FOPI-LAND result of Ref. [5] as a function of the reduced density ρ/ρ_0 . For reference, the low-density results of Refs. [66–69] as presented in Ref. [70] are included.



Testy nowego detektora KRAB w CCB

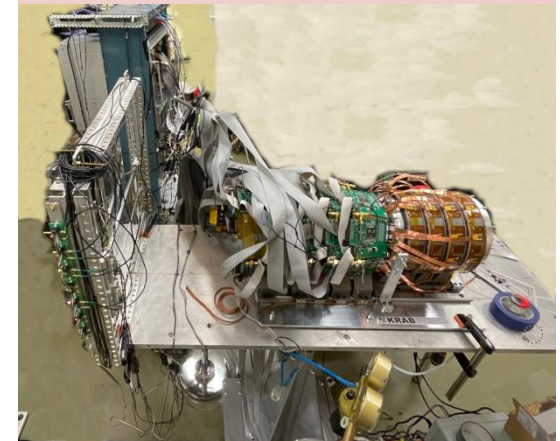
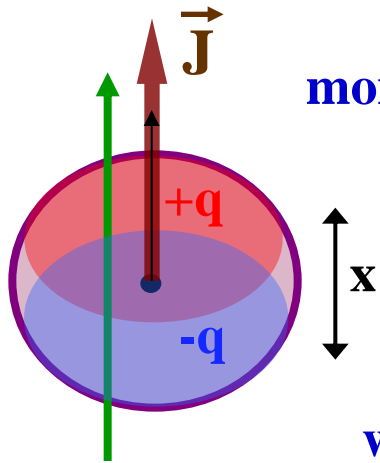


Fig. 19 Masses and radii for selected individual NS. The data for LMXB were taken from [199] (open symbols) and from [200] (filled blue circle). The data for millisecond pulsars measured by NICER (red symbols) were taken from [19] and [212] for J0030 and J0740 (filled crosses) and from [20] and [213] (filled triangles) for the same pulsars, respectively). The data point for J0437 MSP measured by HST+ROSAT (green filled square) was taken from [211]. The radius range labeled as ASY-EOS was obtained by translating the symmetry energy slope parameter range obtained from the ASY-EOS heavy-ion experiment [36] to the NS radius range [222]. It corresponds to a NS mass of $1.4 M_{\odot}$ but has been displaced arbitrarily in vertical direction for clarity. The labeled gray lines represent the M-R relations for selected EoSs. The lines for SQM2 and WFF1 were taken from [185]. The line for FPS was taken from [231] and the remaining lines were taken from [232] (see these references for description of the lines). The numbers below the acronyms of the EoSs (where available) denote the corresponding values of the symmetry energy L parameter in MeV

Badanie symetrii:

EDM (elektryczny moment dipolowy)



moment dipolowy:

$$\vec{d} = d \hat{J}$$

$$d = q x$$

w polach zewnętrznych:

$$H_{\text{int}} \sim -\vec{d} \circ \vec{E} - \vec{\mu} \circ \vec{B} = -(\vec{d} \vec{E} \circ \vec{J} + \vec{\mu} \vec{B} \circ \vec{J})/J$$

$$\mathcal{P}: \vec{J} \rightarrow \vec{J} ; \vec{E} \rightarrow -\vec{E} ; \vec{B} \rightarrow \vec{B}$$

$$\mathcal{T}: \vec{J} \rightarrow -\vec{J} ; \vec{E} \rightarrow \vec{E} ; \vec{B} \rightarrow -\vec{B}$$

↳ $\vec{E} \circ \vec{J}$ nieparzyste względem \mathcal{P} i \mathcal{T}

$d \neq 0$ implikuje łamanie \mathcal{T}

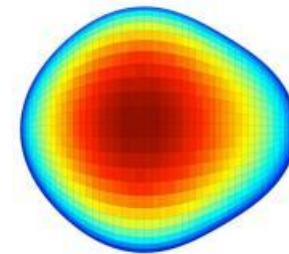
Potencjał badawczy nEDM:

- testowanie mechanizmów łamania symetrii \mathcal{T} poza modelem standardowym
- asymetria materia-antymateria we Wszechświecie wymaga mechanizmu łamania CP

$$\frac{d\vec{s}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B} + \vec{d} \times \vec{E}$$

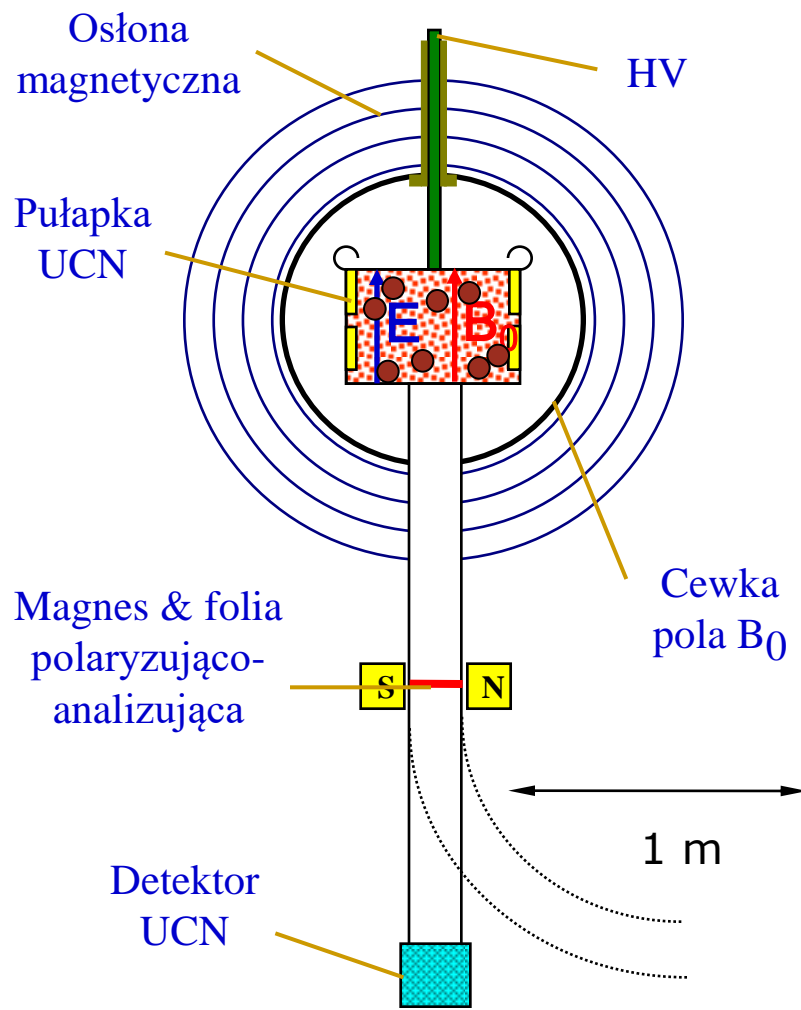
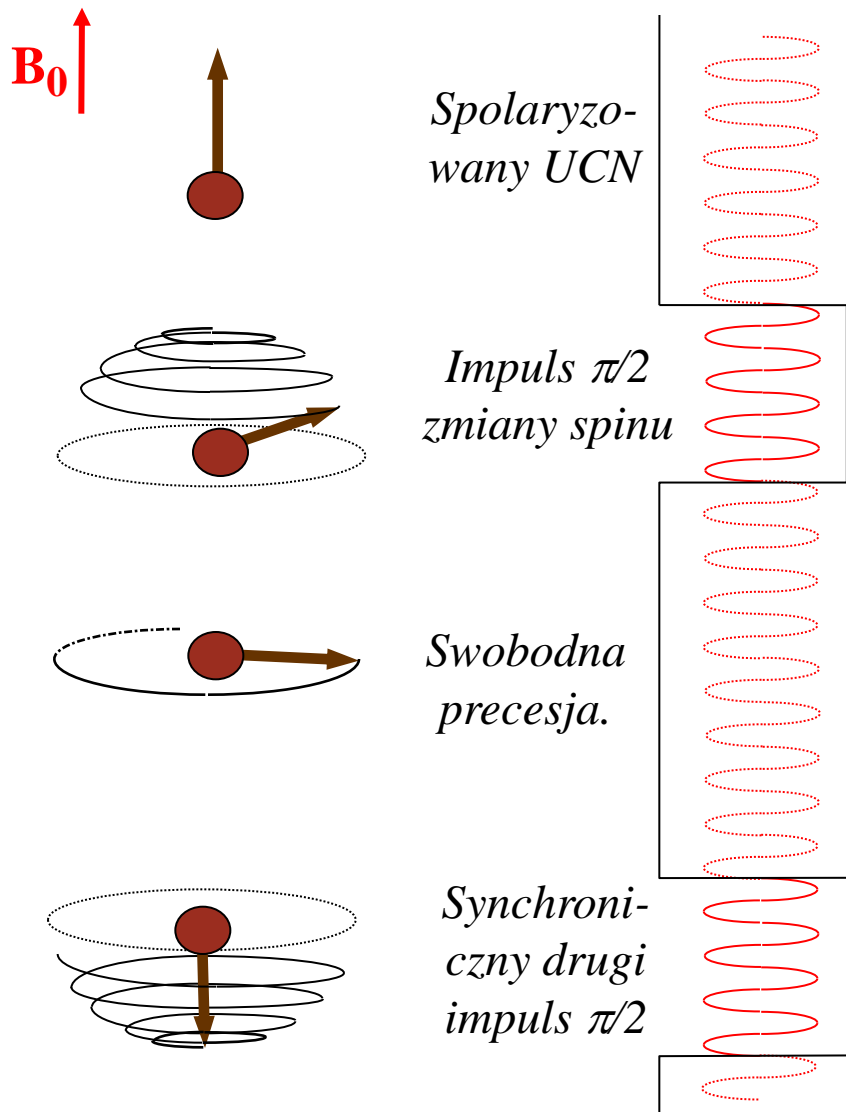
EDM a fizyka jądrowa

- Układy proste: n, p, d.
- Pomiary w ciężkich atomach diamagnetycznych np:
 - ^{199}Hg ,
 - potencjalny kandydat ^{225}Ra – wzmocnienie związane z deformacją oktupolową.



L.P. Gaffney (...M. Kowalczyk, P. Napiorkowski, K. Wrzosek-Lipska, M. Zlelińska) et al., Nature 497, 199 (2013)

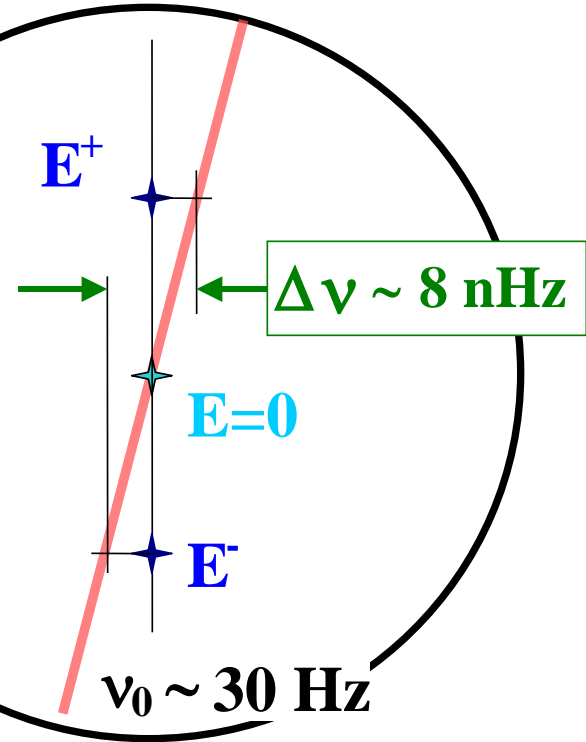
Ultrazimne neutrony: pomiar EDM metodą Ramseya



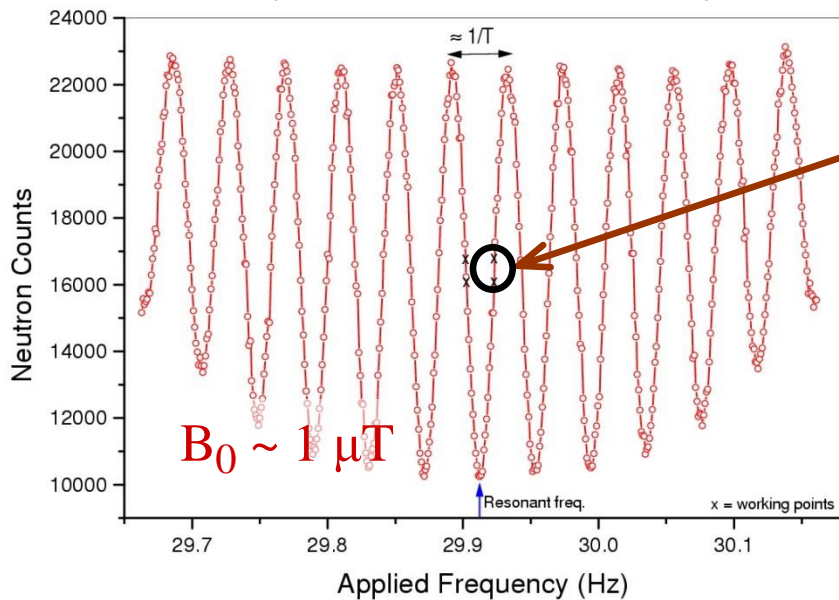


Pomiar EDM

$d = 10^{-27} e \cdot \text{cm}$
 $E = 15 \text{ kV/cm}$



Krzywa rezonansowa Ramseya



< 1 pełny obrót na rok !

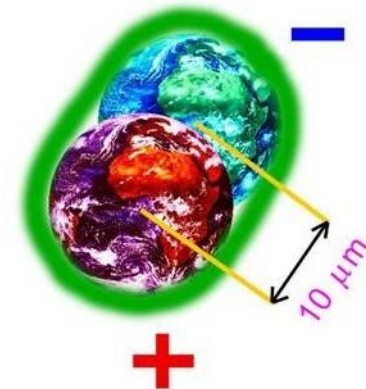
nEDM - wyniki

$$d < 1.8 \times 10^{-26} e \cdot \text{cm} \text{ (90\% c.l.)}$$

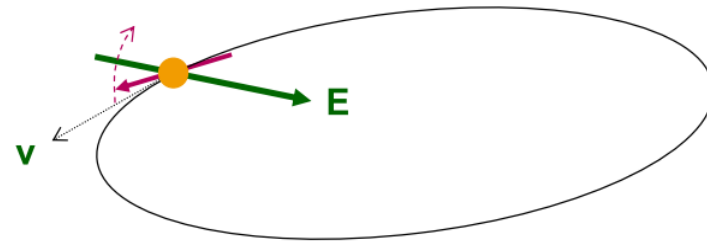
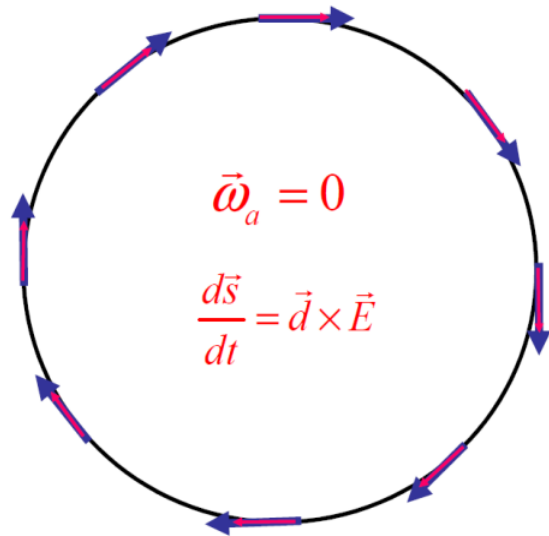
C. Abel (...K.Bodek, A.Kozela, D.Rozpędzik, J.Zejma) et al.,
Phys.Rev.Lett. 124, 081803 (2020)

Gdyby neutron był rozmiaru Ziemi ...

... obecne ograniczenie na wartość
nEDM oznacza, że separacja
ładunków dodatniego i ujemnego
jest mniejsza niż $10 \mu\text{m}$!



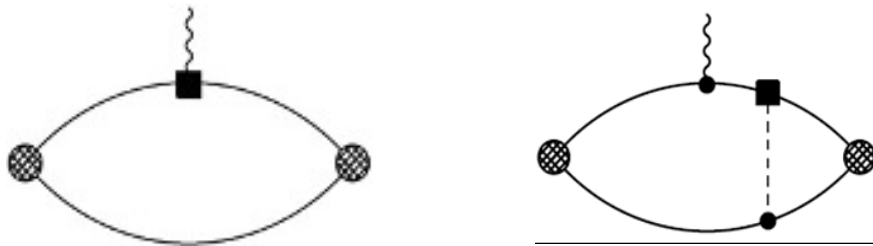
EDM protonu – magiczny pierścień akumulacyjny



„Zamrożenie” precesji w płaszczyźnie
pierścienia, poszukiwanie składowej pionowej

nEDM, pEDM, dEDM, ...

- EDM deuteronu (dEDM) można wyznaczyć na podstawie:
 - EDM dla protonu i neutronu
 - oraz obliczeń ChEFT dla dodatkowych grafów.
- dEDM jest bardzo czuły na źródła łamania CP, które łamią równocześnie symetrię izospinową.



z prezentacji Jordy de Vries, University of Amsterdam

Poszukiwanie cząstek aksjonopodobnych poprzez pomiar oscylującego EDM

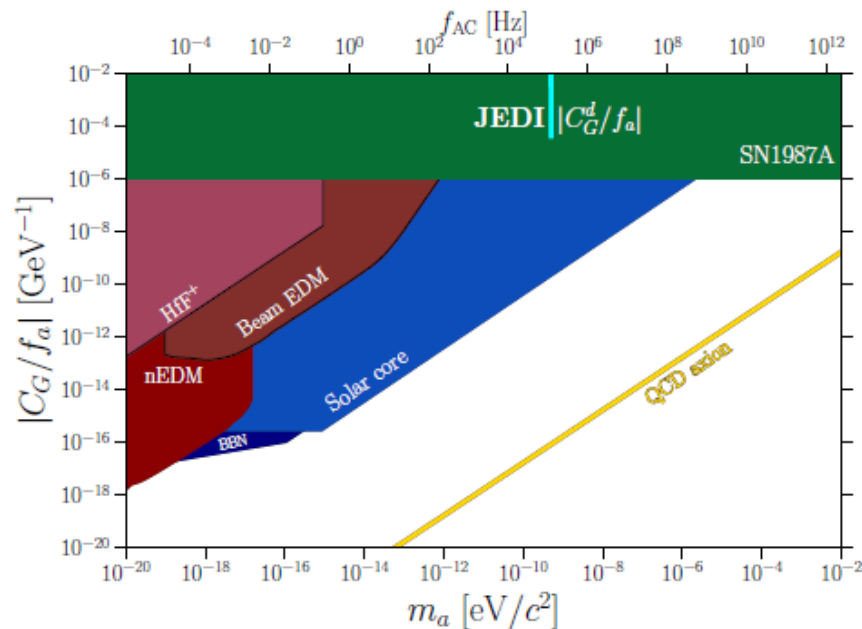


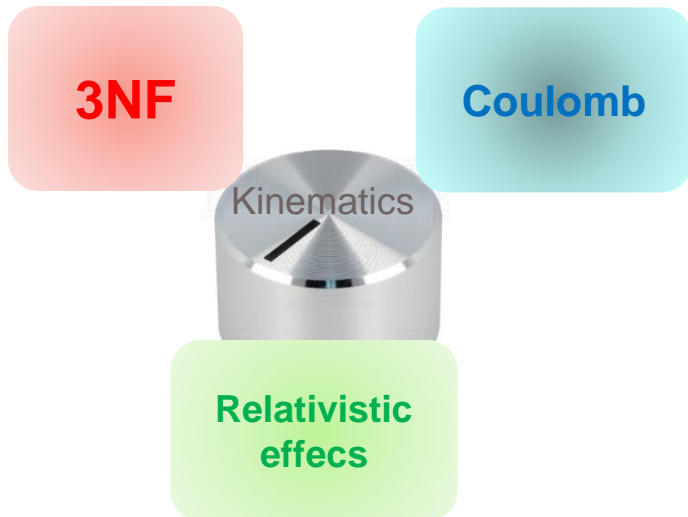
Figure 9.4: The plot depicts the 90% upper limit on the $|C_G^d/f_a|$ obtained from this experiment in cyan colour. This is compared with the bounds on $|C_G/f_a|$ (in various shades of red) from the nEDM [109], the Beam EDM [111], and Hf^{++} electron EDM [112]. The limits obtained from astrophysical calculations such as supernova SN1987A [18], solar core [115, 116], and Big Bang nucleosynthesis [117] are also displayed in green, lighter blue, and darker blue, respectively. Figure adapted from [108].

S. Karanth (... , A. Wrońska, A. Aggarwal, A. Magiera..) et al. (JEDI Collaboration), Phys. Rev. X 13, 031004 (2023)

Dziękuję za uwagę!

Cross Section for d-p Breakup Reaction

Conclusions



Sensitivity to a specific effect changes with kinematics – „selectivity” – but in many cases all dynamic contributions are important.

- **3NF effects** are significant, **confirmed**, rising with energy.
- **Coulomb** effects large, in particular **at pp FSI**.
- At higher energies – **problem** with description of cross section data
 - Relativistic effects?
 - Deficiencies of 3NF?

3N Systems - Reactions

what can be studied experimentally?

➤ Processes:

- ❖ Elastic scattering: $N + d \rightarrow N + d$
- ❖ **Breakup: $N + d \rightarrow N + n + p$**
- ❖ and electromagnetic processes

➤ Observables

- ❖ differential cross section
- ❖ vector&tensor analyzing powers
- ❖ polarization transfer, correlations

➤ Energy range - why "medium" and what does it mean?

- ❖ measurable 3NF effects
- ❖ below pion production threshold

➤ Technique:

- ❖ spectrometers
- ❖ **large acceptance detectors**

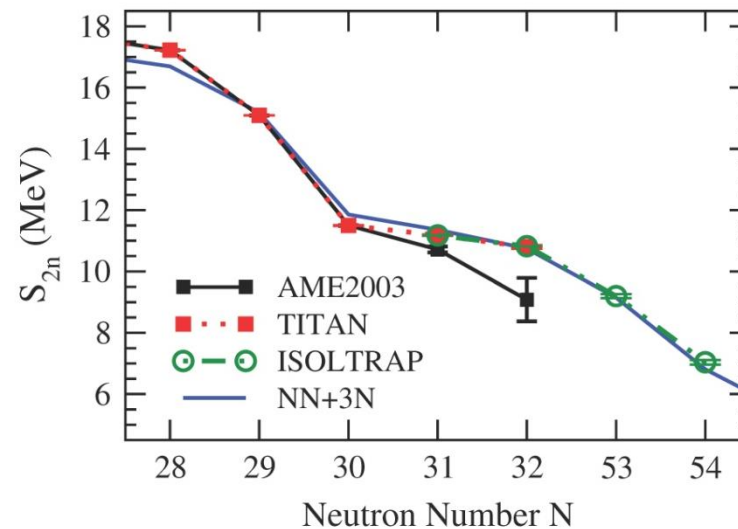
Czy siła 3N ma szersze znaczenie?

model powłokowy z siłą 3N

Calcium Isotope Chain

J. D. Holt, et al., J. Phys. G 39, 085111 (2012)

F. Wienholtz, et al., Nature 498, 346 (2013).



With three-body forces one reproduces precise mass data from the traps