



Uncovering the mechanism of chiral three-nucleon force in driving spin-orbit splitting

Tokuro Fukui

Kyushu University
28/February/2025

PRESS RELEASE (2024/07/25)



量子キャッチボールの新たな仕組みを解明 —先鋭的理論で解明された3体核力と物質の安定性に関する40年以上の謎—

ポイント

- ① 3体核力は原子核や中性子星など様々な局面で重要な寄与を果たすが、その全容は未解明
- ② 先鋭的理論に基づいて、3体核力が物質を安定にする仕組みを世界で初めて解明
- ③ 宇宙物理、物性物理、量子情報、量子技術など分野を超えた将来研究・波及効果に期待

概要

原子核を構成する核子の間にはたらく力は、核子同士のキャッチボールに喩えられます。3つの核子間のキャッチボール(3体核力※1)は、極微の原子核に留まらず中性子星のような天体に至るまで、物質の安定性に本質的な寄与を果たすことが知られています。その詳細な仕組みは長らく謎でした。40年以上前の先行研究による重要な示唆があるものの、3つの核子間のキャッチボールに関する知識が当時は乏しかったため、決定的な結論を導くことはできていませんでした。

本研究によってこの謎を解明することができました。3つの核子がキャッチボールをするとき、核子は量子力学に従い、いくつかの運動パターンだけが許されます。そして、特にそのうちの1つの運動パターンにおいて3つの核子がお互いを引きつけ合い、物質を安定化させているのです。

九州大学基幹教育院の福井徳朗助教、Università degli studi della CampaniaのGiovanni De Gregorio 研究員、Istituto Nazionale di Fisica NucleareのAngela Gargano研究員からなる国際研究グループは、3つの核子間のキャッチボールの仕組みを理論的に解き明かしました。これを可能にしたのが、先鋭的な核力理論※2とスーパーコンピュータを駆使したシミュレーションです。計算の結果、2つのボール(中間子※3)を使って3つの核子がキャッチボールをすることで引力が働き、原子核中の核子をおとなしくさせている(励起しにくくしている)ことが示されました。

3つの核子が2つのボールを投げ合うと、核子対の反対称なスピン状態と対称なスピン状態※4が区別できなくなるという現象が起こります。この現象は、2つの核子がキャッチボールをする際には決して起こりません。そのため、これまで原子核物理の分野ではあまり注目されていませんでした。しかし、物性物理の分野では類似する現象が知られており、またこの現象は量子もつれ※5と密接に関わっています。したがって、将来的には量子技術などを含めた分野横断的な研究が期待されます。

本研究成果は学術誌「Physics Letters B」に2024年7月14日に掲載されました。



図1. 3体核力をキャッチボールで喩えた概念図

研究者からひとこと：

原子核を構成する核子はフェムトスケール(1フェトメートル = 0.000000000000001メートル)という極微な世界の“住人”です。“性別”を持ち(陽子と中性子)、フィギュアスケーターのように“自転”をしながら(スピン)、規則正しく“走り回って”います(軌道運動)。そしてこのような動きと同時に、複数のボールを使って“キャッチボール”をしているのです(中間子の交換)。とても真似できそうにありません。

[九大ウェブサイト](#)

TECH | > テクノロジー > サイエンス > 九大、原子核の3体の核子間に働く「3体核力」の詳細な仕組みを理論的に解明

九大、原子核の3体の核子間に働く「3体核力」の詳細な仕組みを理論的に解明

掲載日 2024/07/26 18:50

著者：波留久泉



九州大学 科学 ナノテク

九州大学(九大)は7月25日、原子核を構成する核子(陽子と中性子)の間に働く力のうち、3つの核子の間に働く相互作用である「3体核力」について、長らく未解明のままだったが、その詳細な仕組みを理論的に解き明かすことに成功した。

同成果は、九大 基幹教育院の福井徳朗助教、Università degli studi della CampaniaのGiovanni De Gregorio 研究員、Istituto Nazionale di Fisica NucleareのAngela Gargano研究員からなる国際研究グループは、3つの核子間のキャッチボールの仕組みを理論的に解き明かしました。これを可能にしたのが、先鋭的な核力理論※2とスーパーコンピュータを駆使したシミュレーションです。計算の結果、2つのボール(中間子※3)を使って3つの核子がキャッチボールをすることで引力が働き、原子核中の核子をおとなしくさせている(励起しにくくしている)ことが示されました。

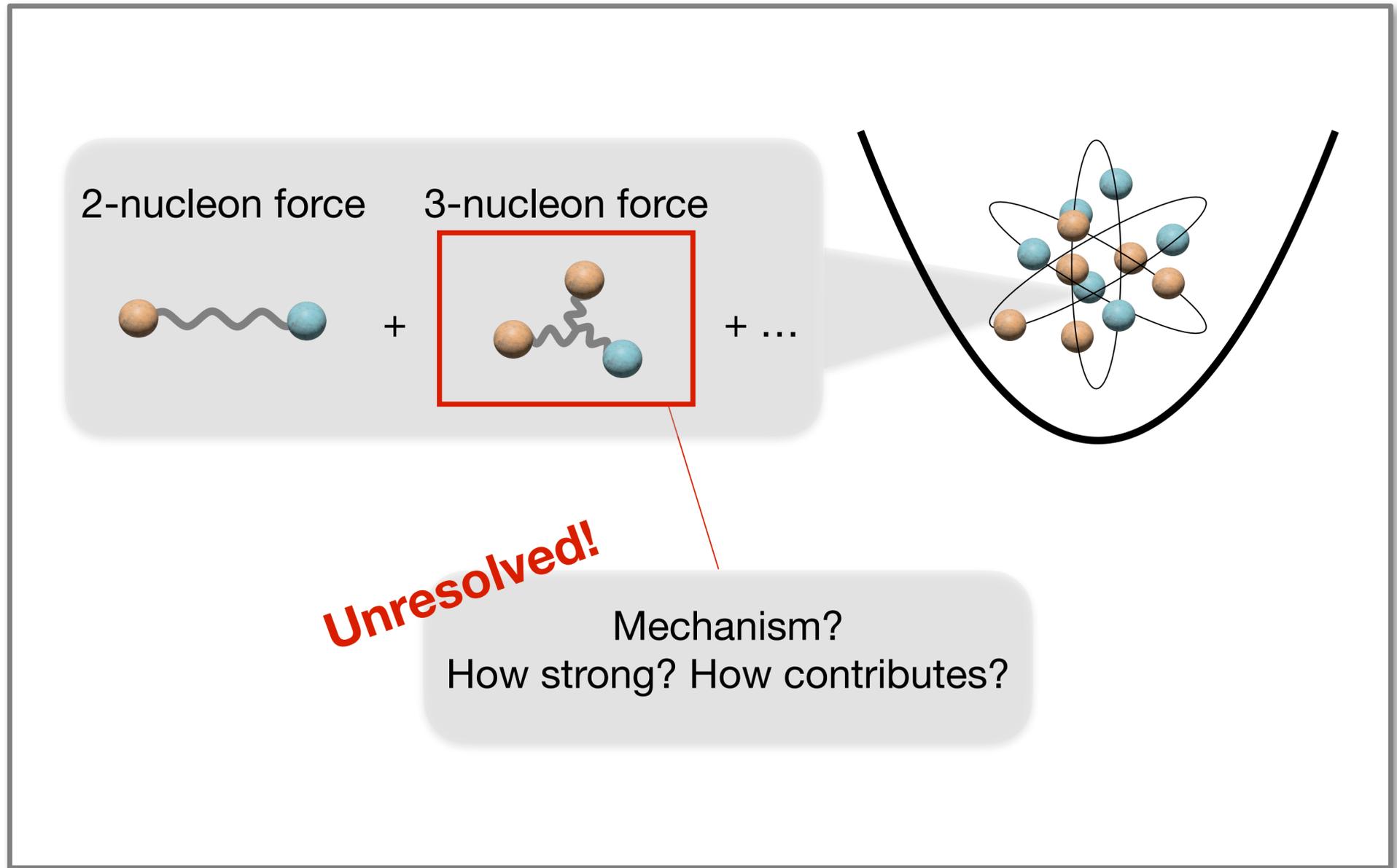


phys.org

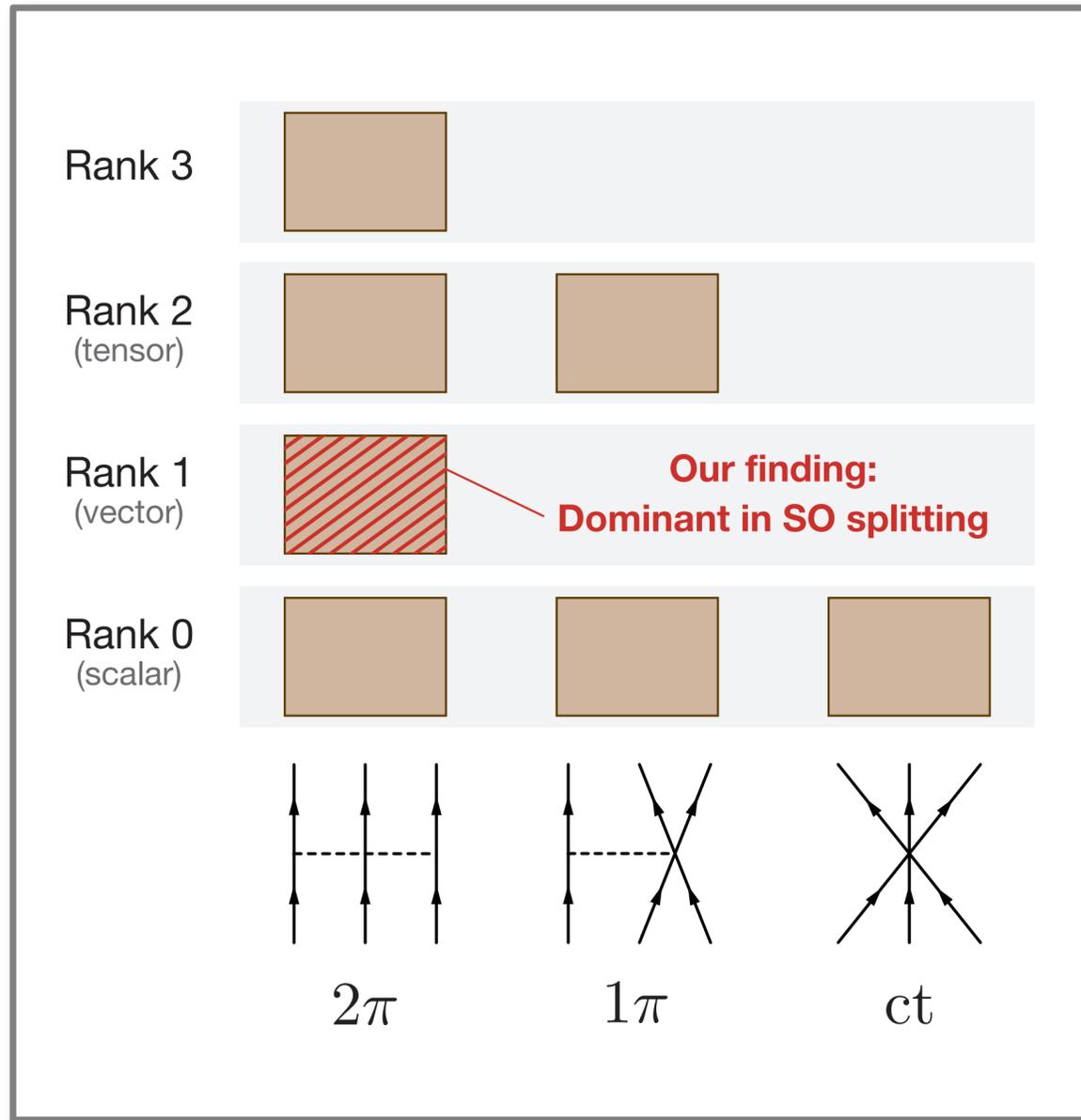
[マイナビニュース](#)

The screenshot shows a news article on the phys.org website. The article title is "An overlooked nuclear force helps keep matter stable, study reveals" by Kyushu University, dated January 28, 2025. The article features three diagrams illustrating different nuclear force models: "Two-nucleon force only" (Small energy gap), "Two-nucleon force and three-nucleon force (rank-1 component only)", and "Two-nucleon force and three-nucleon force (all combinations)" (Large energy gap). The article is categorized under Physics / General Physics and includes social media sharing options and a list of featured articles on the right side of the page.

Target



Main finding

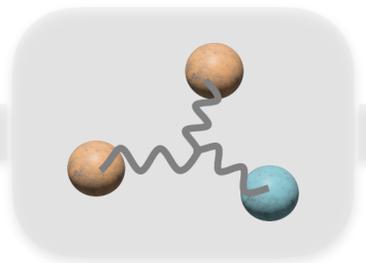


Few-body

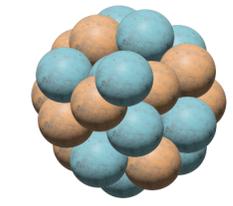


Fundamentals of 3NF

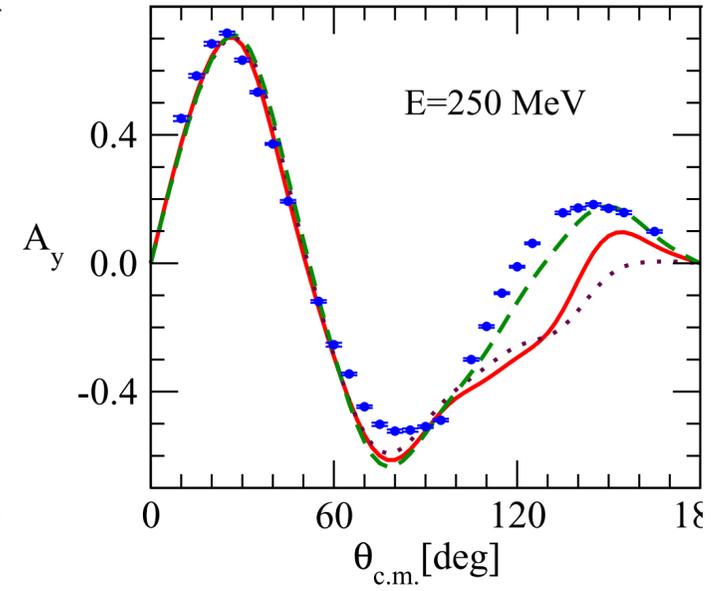
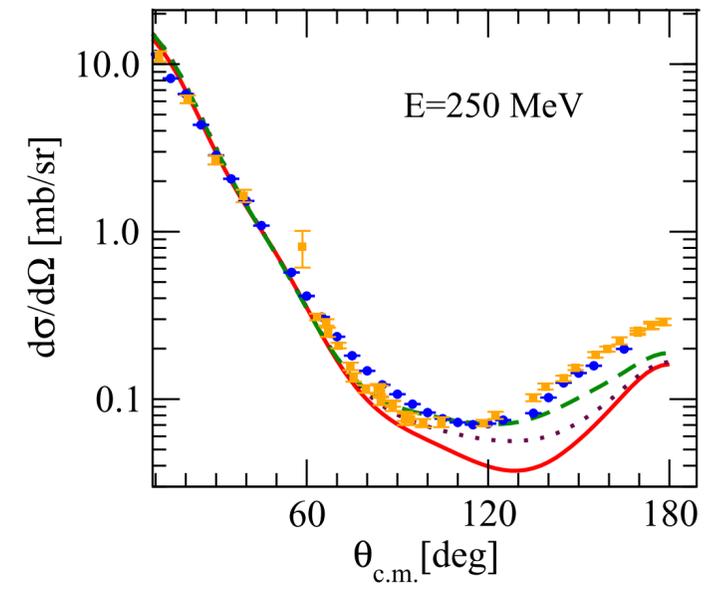
3NF



Many-body (my interest)

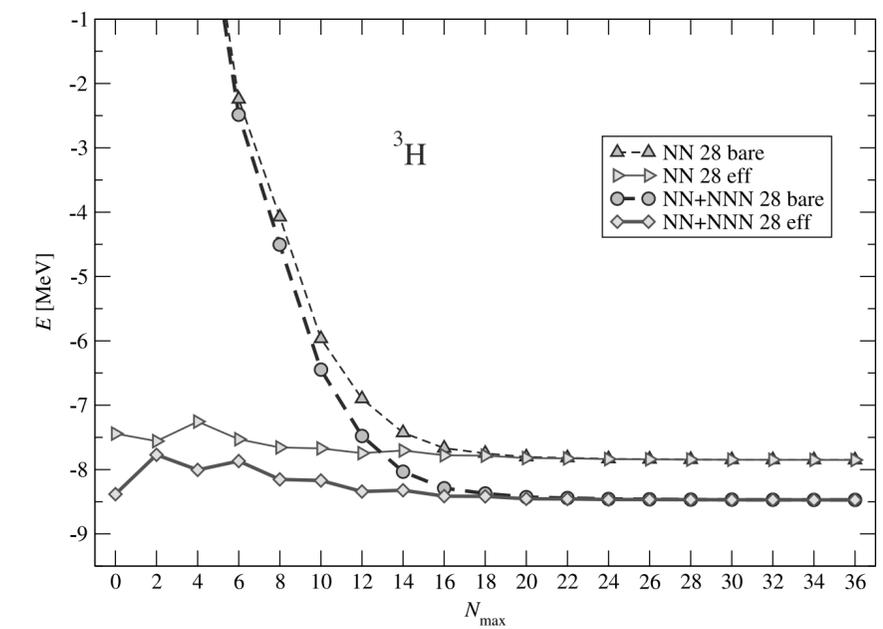


***d* + *p* scattering**

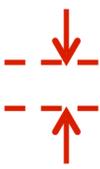


Witała +, PRC 105, 054004 (2022)

³H structure



~1 MeV attraction



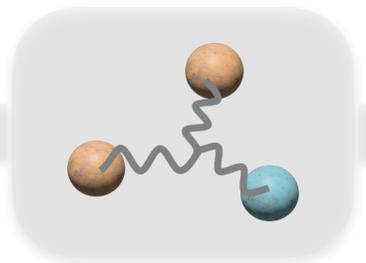
Navrátil, FBS 41, 117 (2007)

Few-body

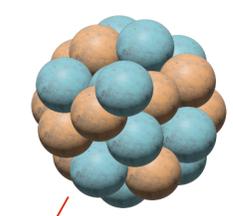


Fundamentals of 3NF

3NF

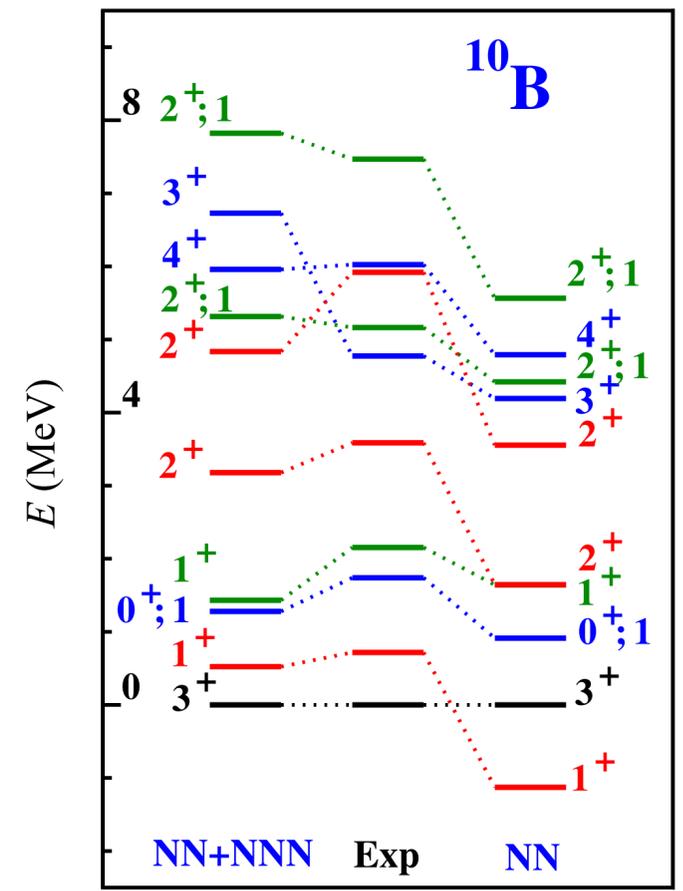


Many-body (my interest)



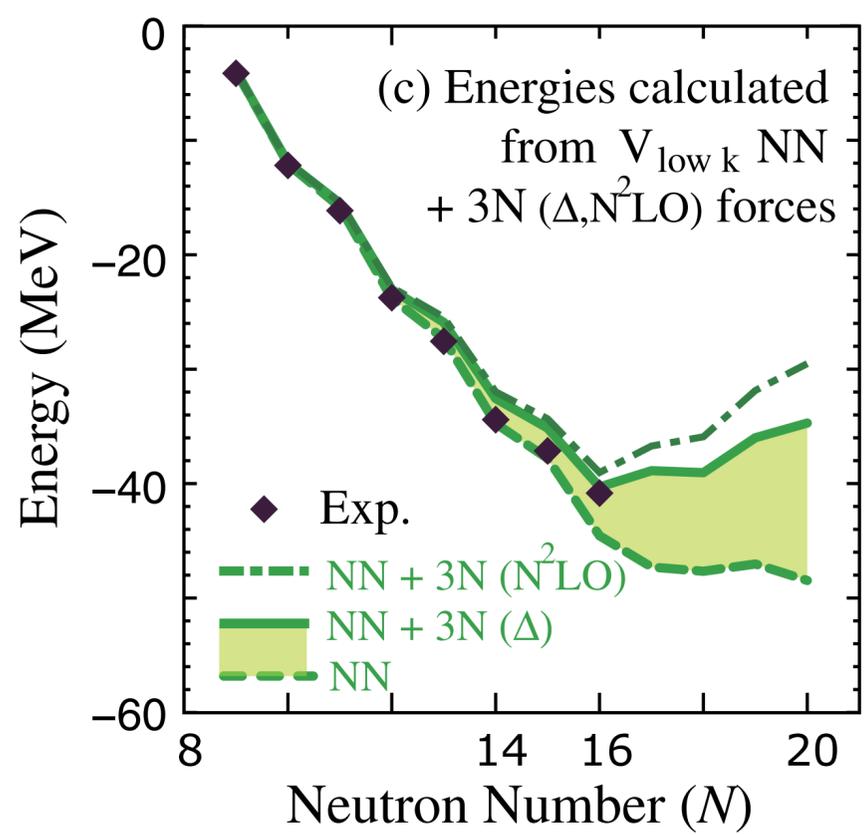
Major playground of 3NF

¹⁰B spectra



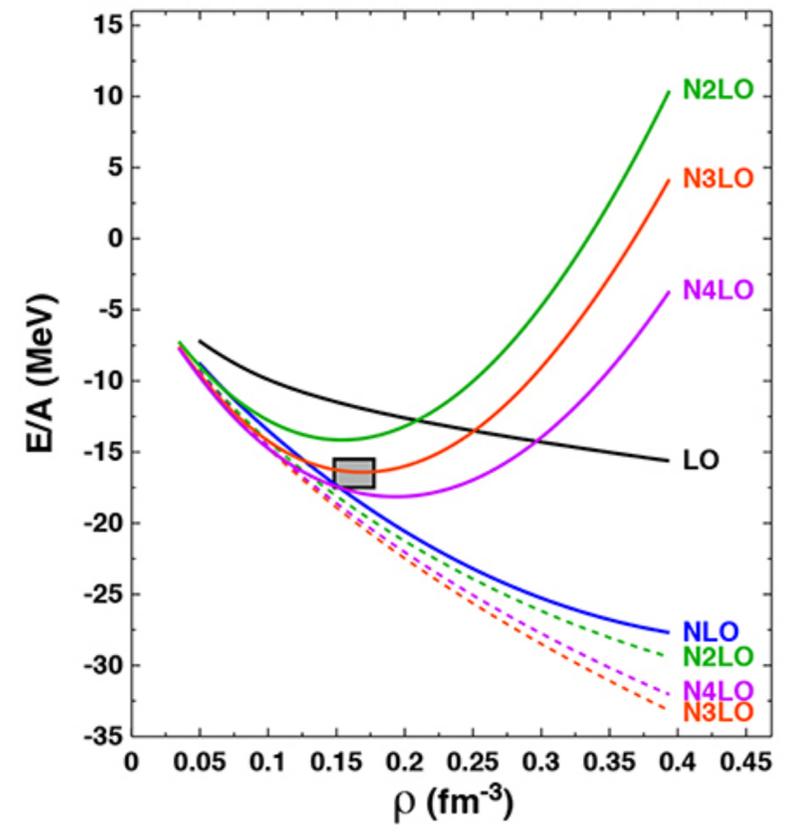
Navrátil +, PRL 99, 042501 (2007)

Oxygen-drip line



Otsuka +, PRL 105, 032501 (2010)

Nuclear matter saturation



Sammarruca & Millerson, Front. Phys. 7, 00213 (2019)

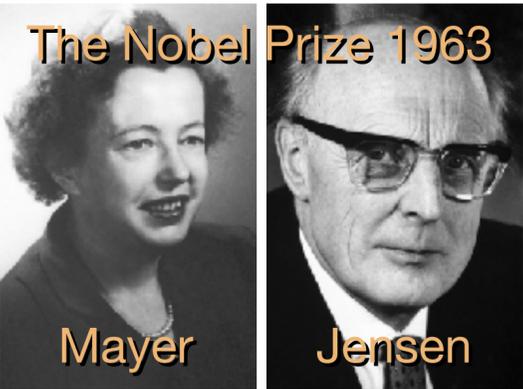
How 3NF contributes to
shell-structure manifestation?

*Microscopic origin
remains elusive*

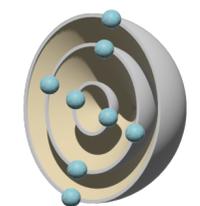
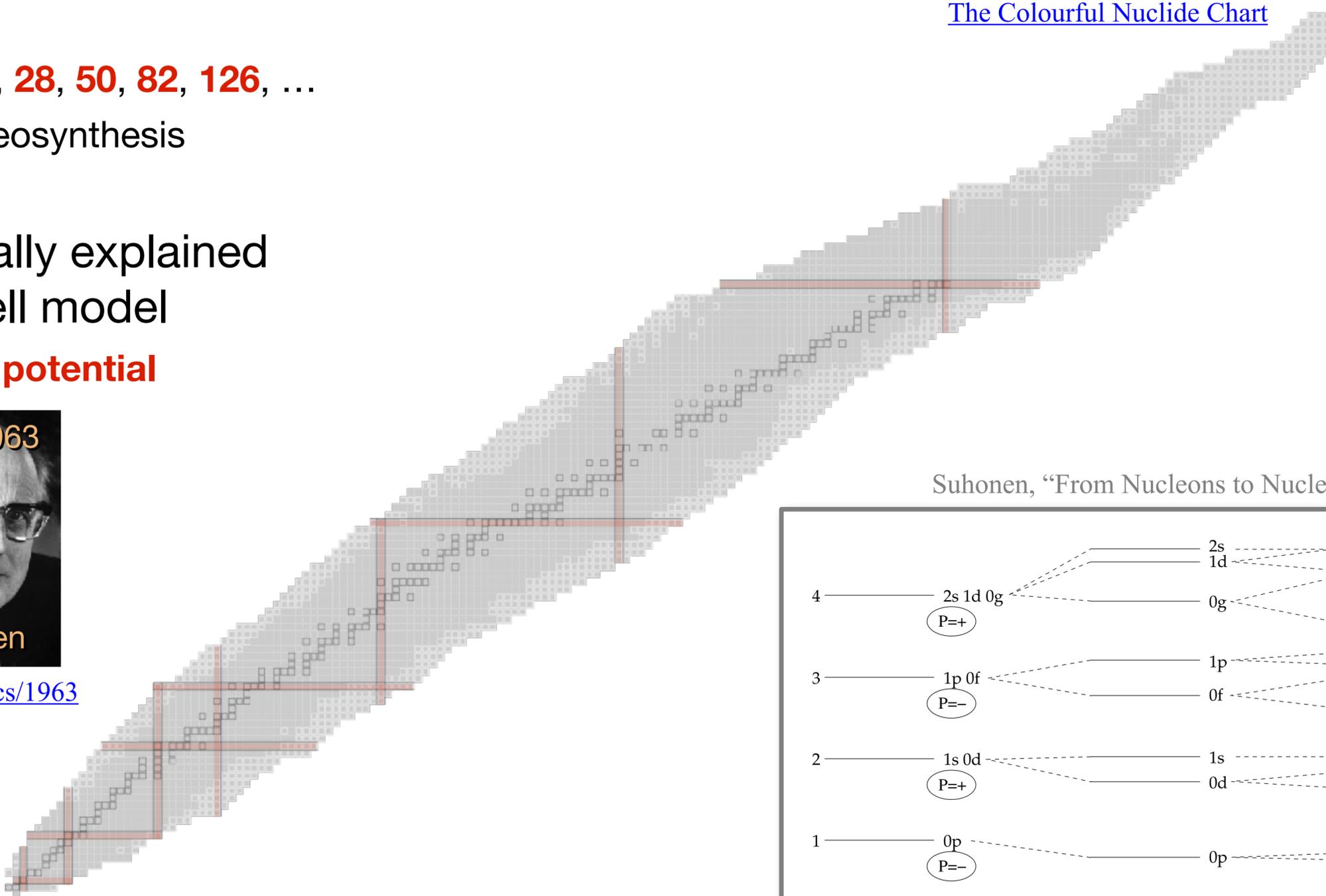
Nuclear shell structure

- ⊗ Magic numbers
 - Stable nuclei: 2, 8, 20, **28, 50, 82, 126**, ...
 - Waiting points in nucleosynthesis

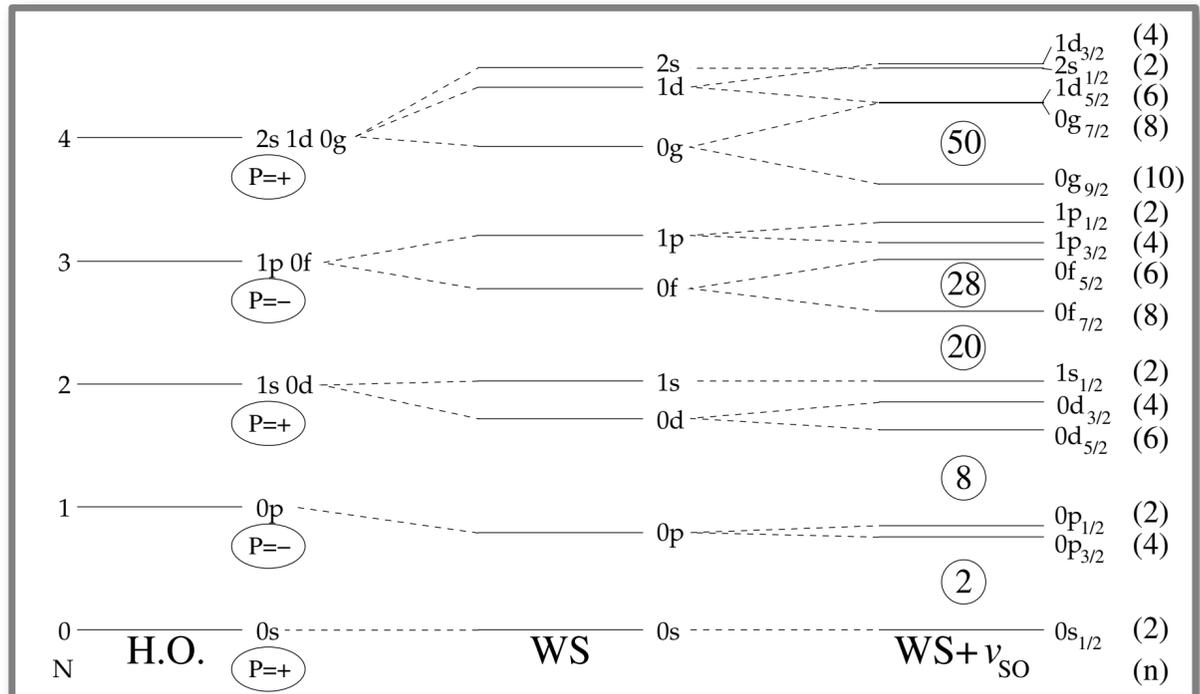
- ⊗ Phenomenologically explained by *jj*-coupling shell model
 - **One-body spin-orbit potential**



nobelprize.org/prizes/physics/1963



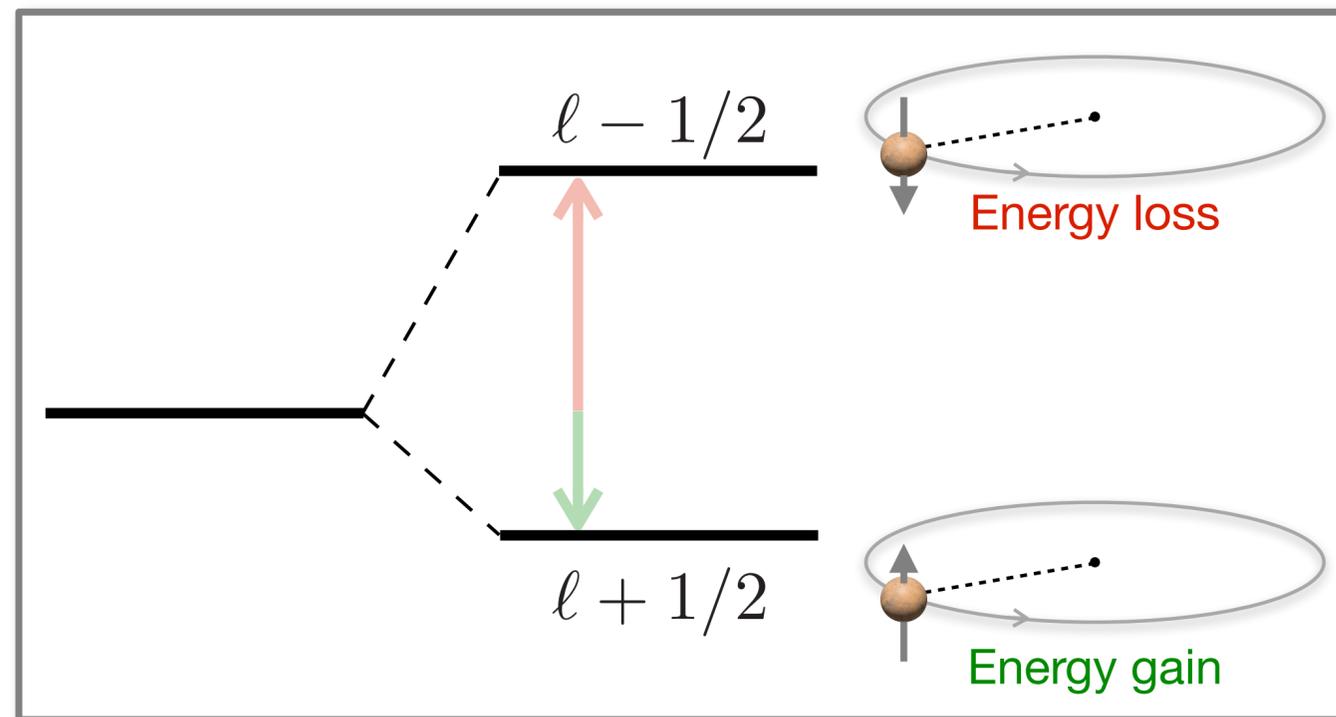
Suhonen, "From Nucleons to Nucleus", Springer (2007)



Spin-orbit splitting

= Emergence of energy gap between spin-orbit partners of single-particle levels

$$\begin{aligned}\langle V_{SO}(\boldsymbol{\ell} \cdot \boldsymbol{s}) \rangle &= \frac{1}{2} \left[j(j+1) - \ell(\ell+1) - \frac{3}{4} \right] \langle V_{SO} \rangle \\ &= \begin{cases} \frac{\ell}{2} \langle V_{SO} \rangle & (j = \ell + 1/2) \\ -\frac{\ell+1}{2} \langle V_{SO} \rangle & (j = \ell - 1/2) \end{cases}\end{aligned}$$



V_{SO} : 1-body spin-orbit pot.
(attractive)

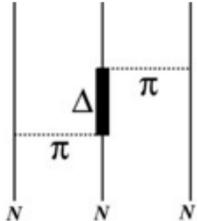
→ Originates from nuclear force

Spin-orbit splitting | Microscopic origin remains elusive

Courtesy: Tomohiro Uesaka (RIKEN)

Uesaka, EPJ Plus 131, 403 (2016)

Scheerbaum, Nucl. Phys. A 257 (1976) 77.
Ando and Bando, Prog. Theor. Phys. 66 (1981) 227.
Pieper and Pandharipande, Phys. Rev. Lett. 70 (1993) 2541.

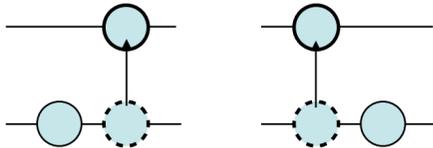


3N force

“Spin-orbit coupling in heavy nuclei”
Fujita and Miyazawa, PTP 17 (1957) 366.

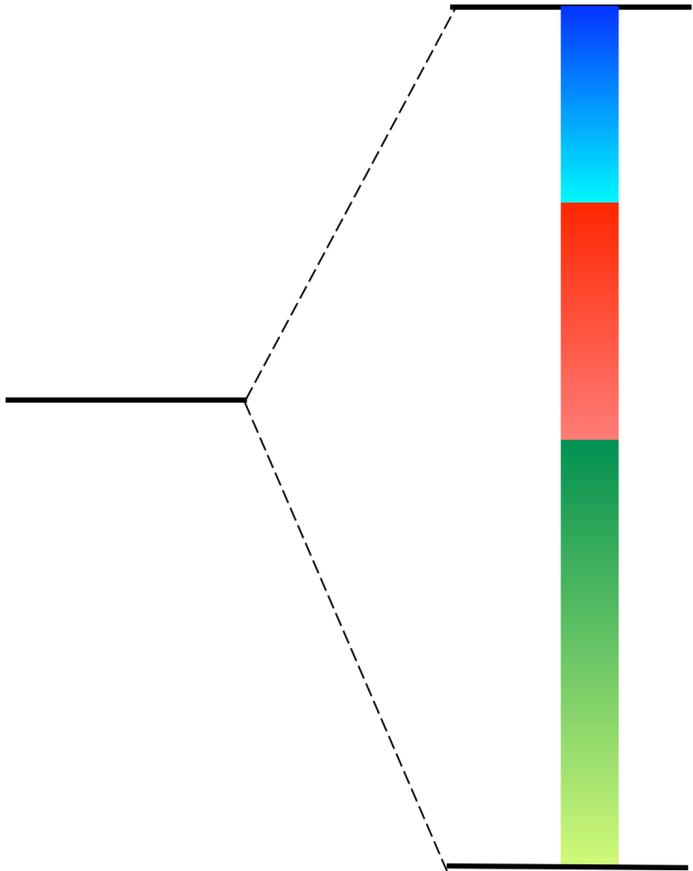
Tensor force

Wigner & Feingold, PR 79 (1950) 221.
Terasawa, PTP 23 (1960) 87.



NN LS interaction

σ and ω exchange
isoscaler in nature



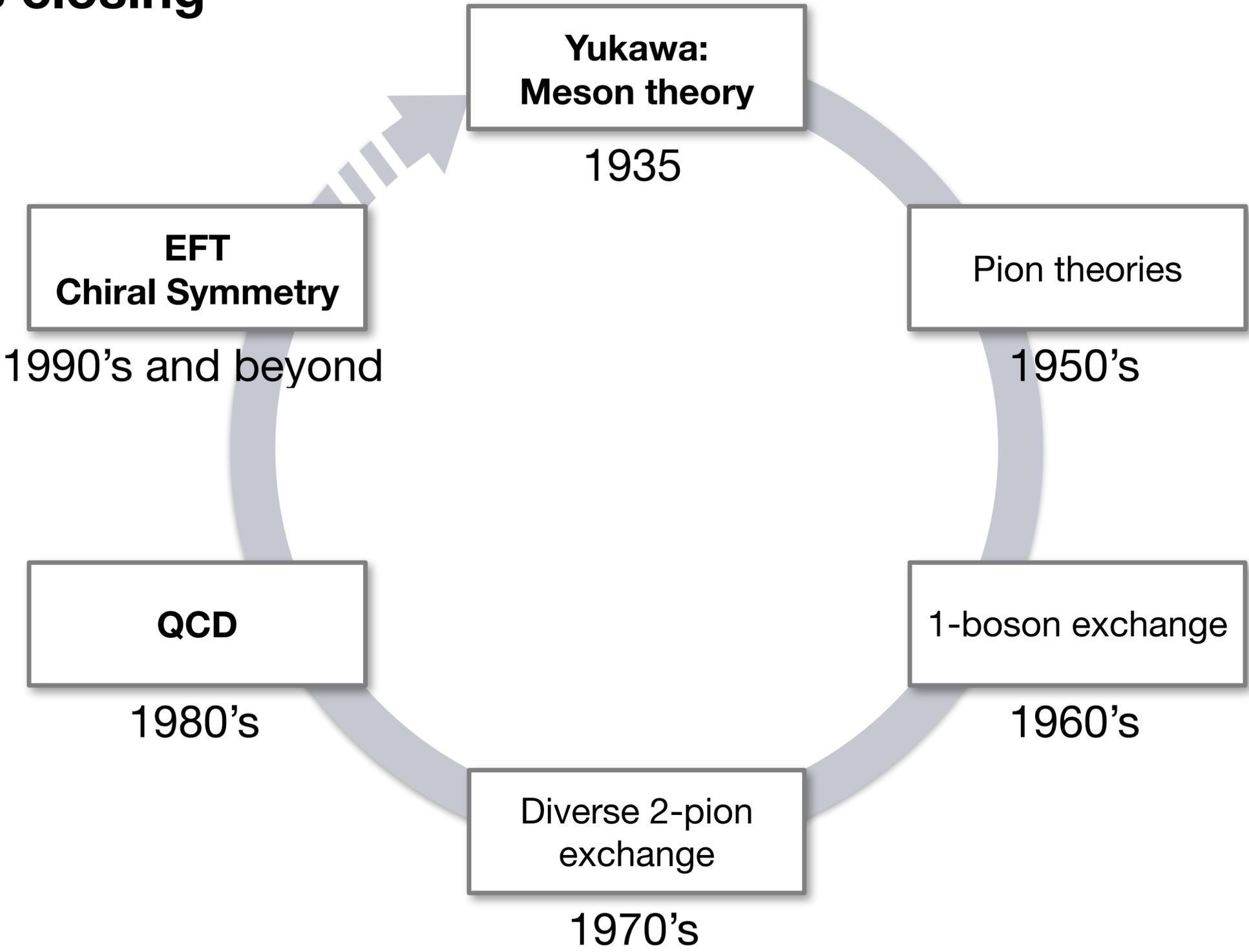
NOT fully understood

Microscopic origin
→ Particularly **3NF**

cf. Fujita & Miyazawa, PTP 17, 366 (1957)
Andō & Bandō, PTP 66, 227 (1981)
Kohno, PRC 86, 061301(R) (2012)

“the circle of history is closing”

Machleidt & Entem, PR 503, 1 (2011)



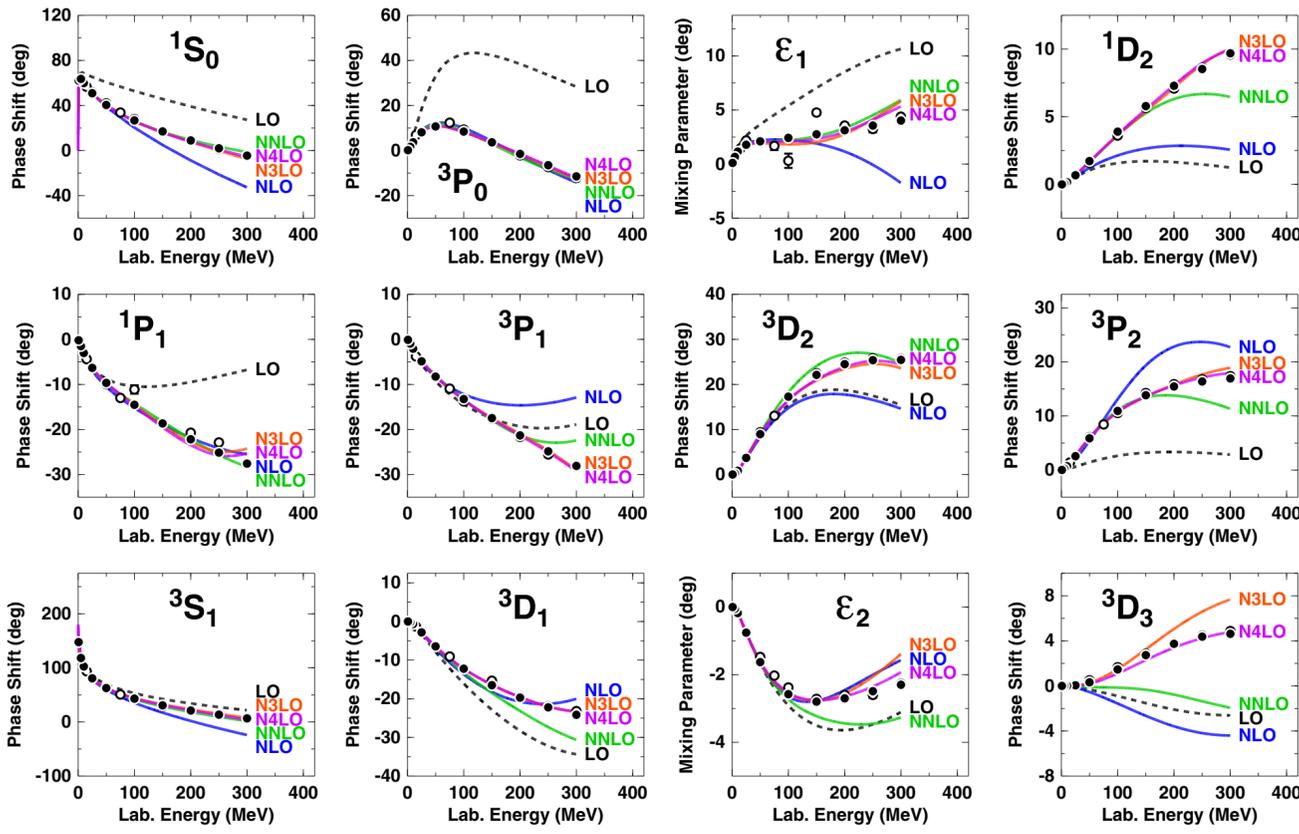
Chiral EFT

	2N Force	3N Force	4N Force
LO $(Q/\Lambda_\chi)^0$			
NLO $(Q/\Lambda_\chi)^2$			
NNLO $(Q/\Lambda_\chi)^3$			
N ³ LO $(Q/\Lambda_\chi)^4$			
N ⁴ LO $(Q/\Lambda_\chi)^5$			
		⋮	

- Hierarchical structure
- Realistic force ($\chi^2 \sim 1$)
- Consistent many-body forces

Weinberg, PA **96**, 327 (1979)
 Epelbaum +, RMP **81**, 1773 (2009)
 Machleidt & Entem, PR **503**, 1 (2011)

Neutron-proton scattering phase shifts



Entem +, PRC **96**, 024004 (2017)

~ 40 parameters optimized

➔ Realistic force ($\chi^2 \sim 1$)

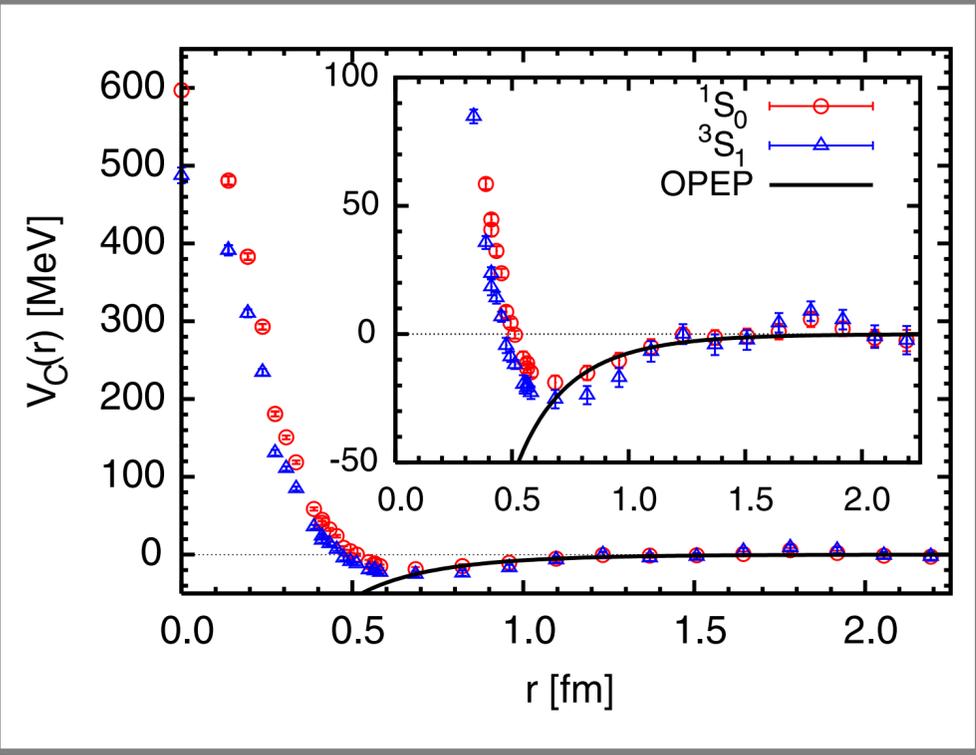
Chiral EFT

	2N Force	3N Force	4N Force
LO (Q/Λ_χ) ⁰			
NLO (Q/Λ_χ) ²			
NNLO (Q/Λ_χ) ³			
N ³ LO (Q/Λ_χ) ⁴			
N ⁴ LO (Q/Λ_χ) ⁵			
	⋮		

- Hierarchical structure
- Realistic force ($\chi^2 \sim 1$)
- Consistent many-body forces

Future
➔

Lattice QCD

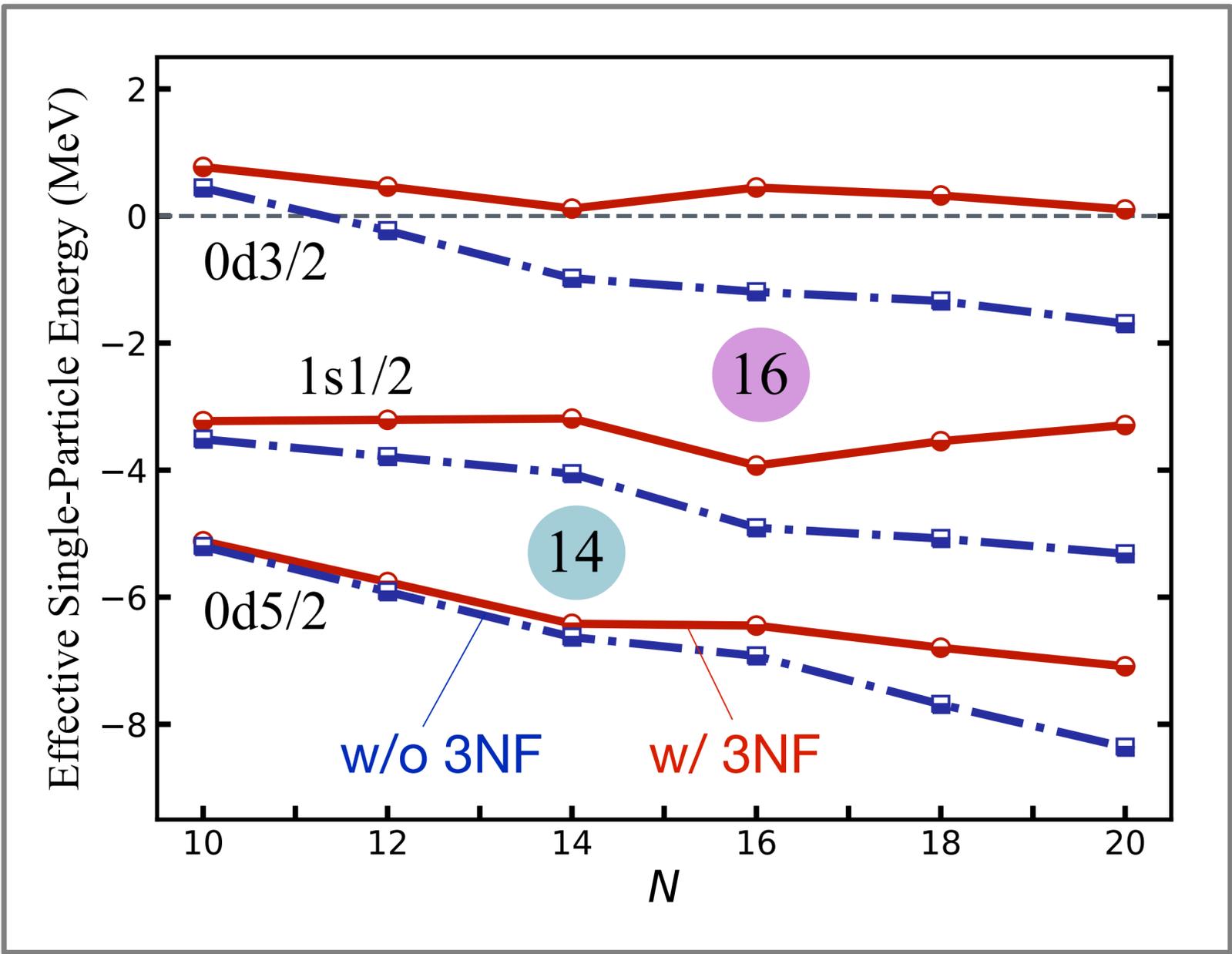


Ishii +, PRL 99, 022001 (2007)

**Only a few parameters,
but low precision currently**

Weinberg, PA 96, 327 (1979)
 Epelbaum +, RMP 81, 1773 (2009)
 Machleidt & Entem, PR 503, 1 (2011)
 Entem +, PRC 96, 024004 (2017)

e.g.) Oxygen isotopes



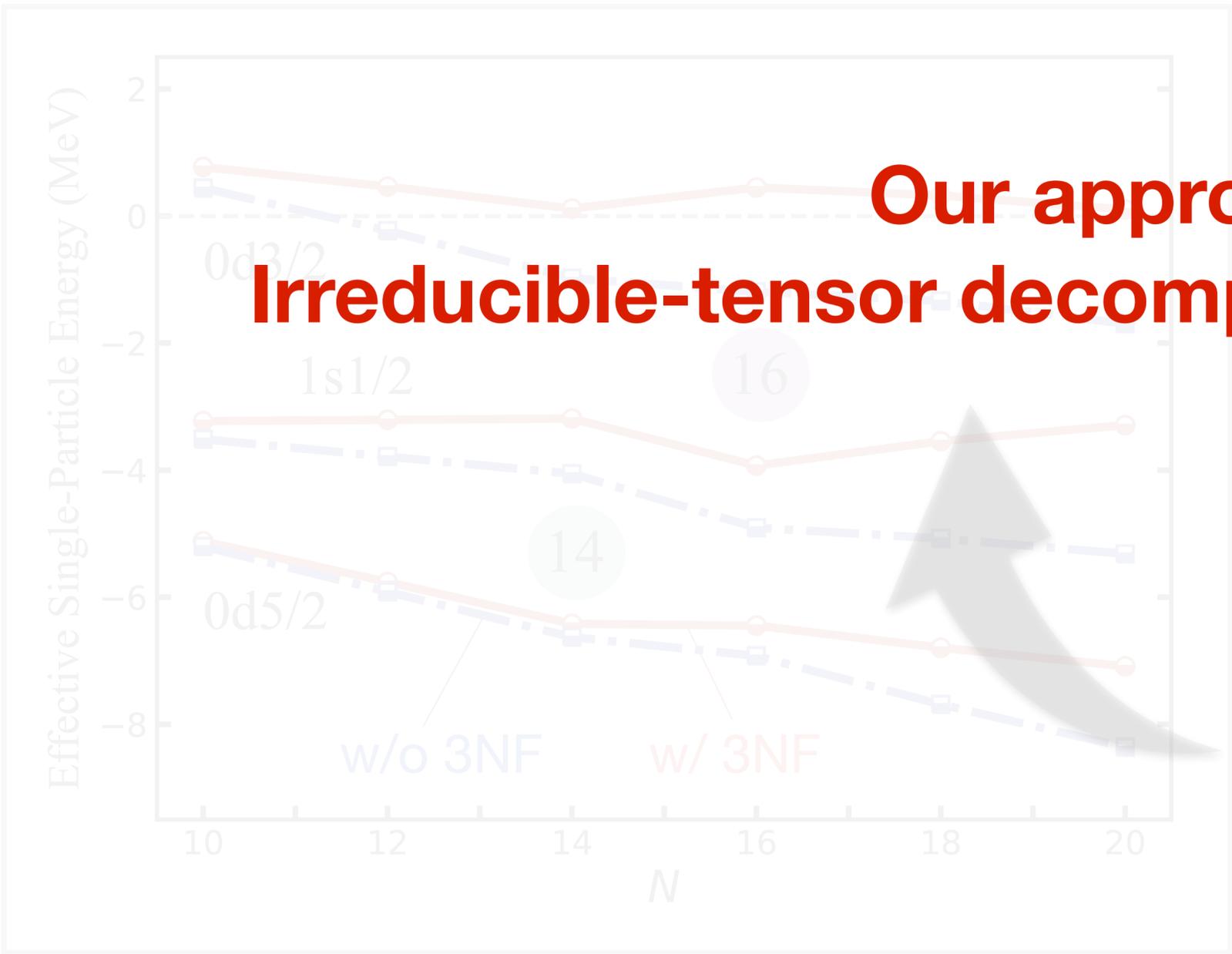
Ma +, PLB 802, 135257 (2020)

Similar results

- p-shell nuclei
Fukui +, PRC 98, 044305 (2018)
- Oxygen isotopes
Otsuka +, PRL 105, 032501 (2010)
- pf-shell nuclei
Holt +, JPG 39 085111 (2012)
Ma +, PRC 100, 034324 (2019)

3NF enhances the SO splitting

e.g.) Oxygen isotopes



**Our approach:
Irreducible-tensor decomposition of chiral 3NF**

Other studies

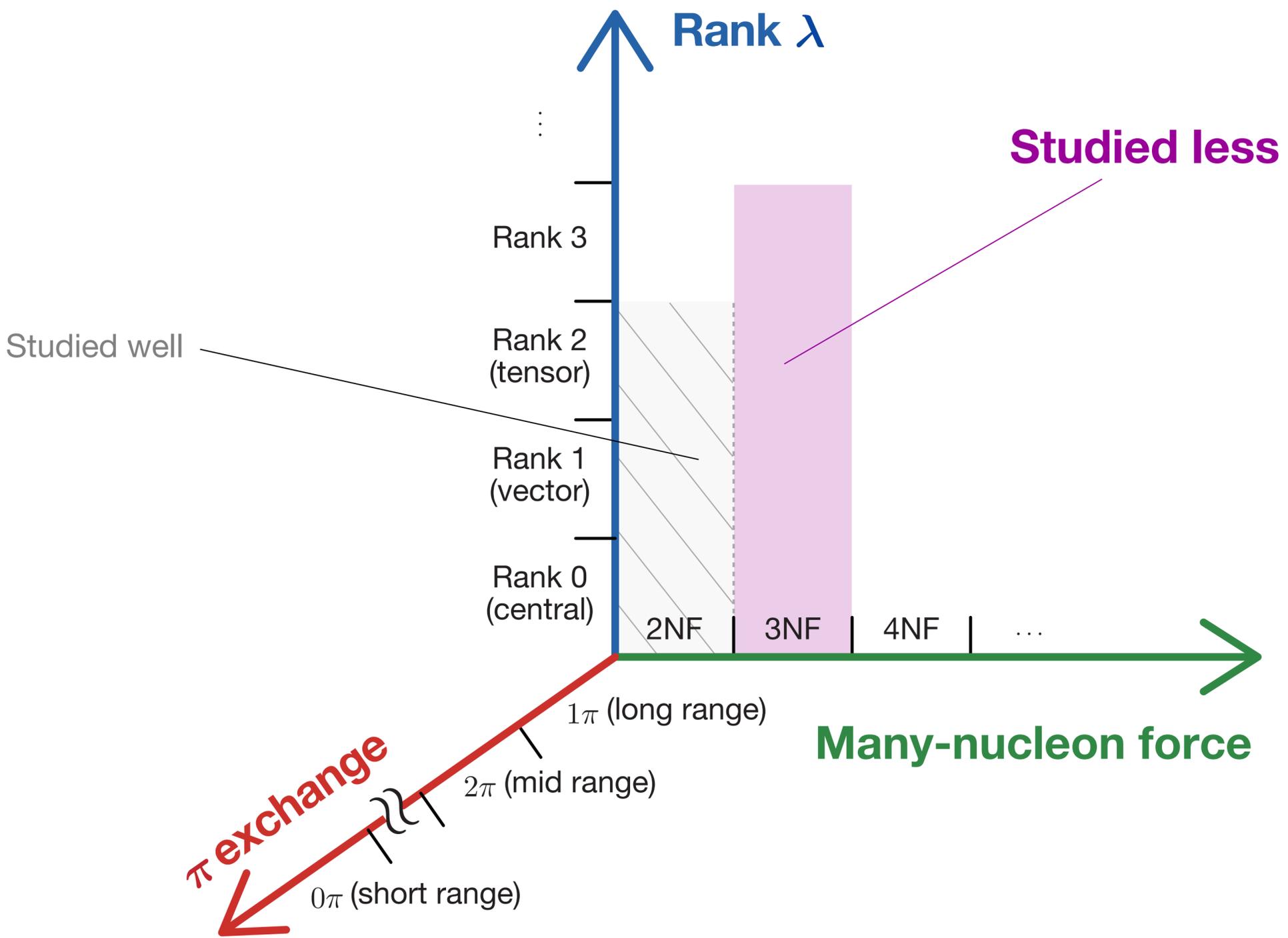


Mechanism?

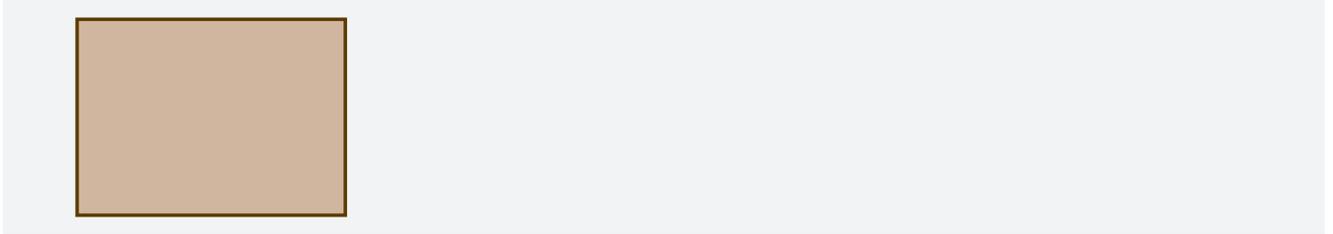
3NF enhances the SO splitting

Ma +, PLB 802, 135257 (2020)

Theoretical framework



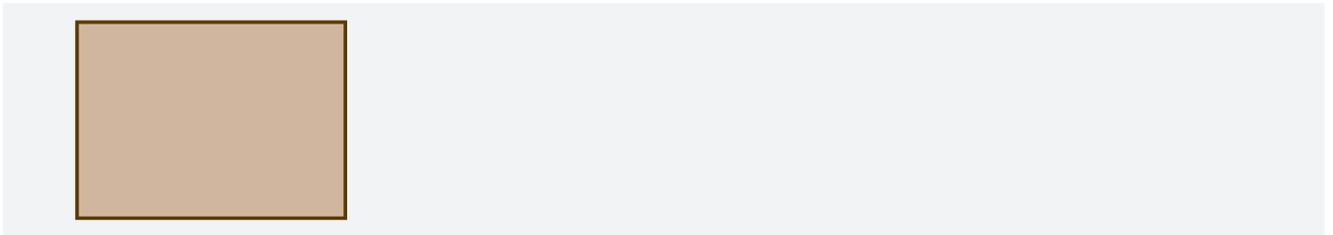
Rank 3



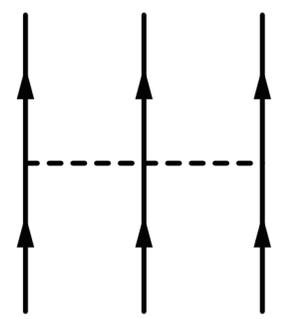
Rank 2
(tensor)



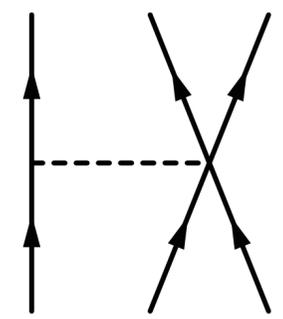
Rank 1
(vector)



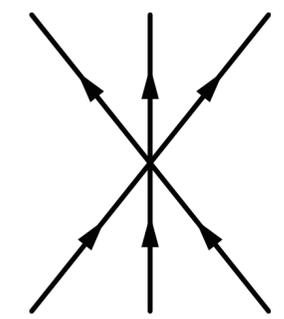
Rank 0
(central)



2π

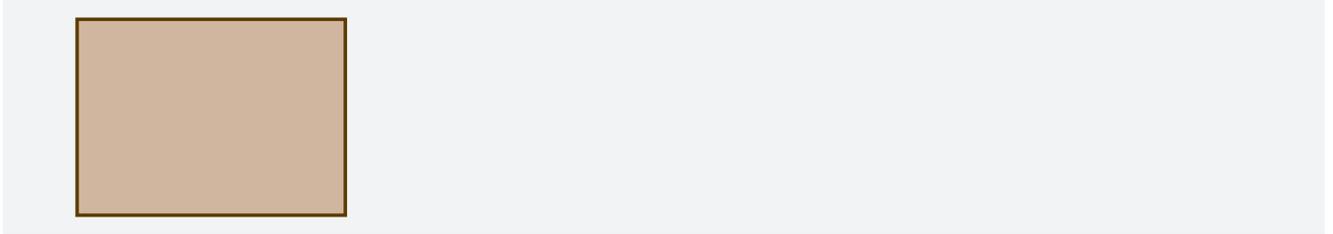


1π



ct

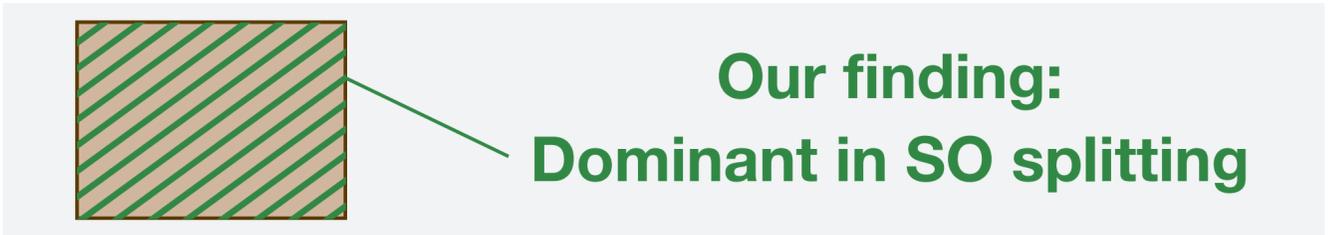
Rank 3



Rank 2
(tensor)

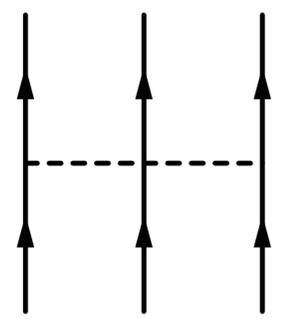


Rank 1
(vector)

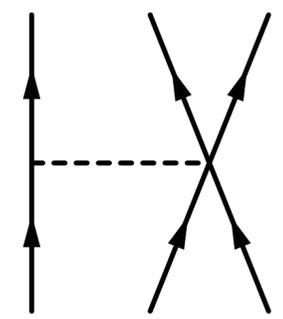


**Our finding:
Dominant in SO splitting**

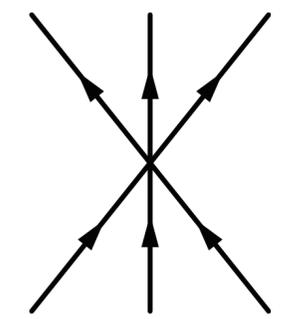
Rank 0
(central)



2π



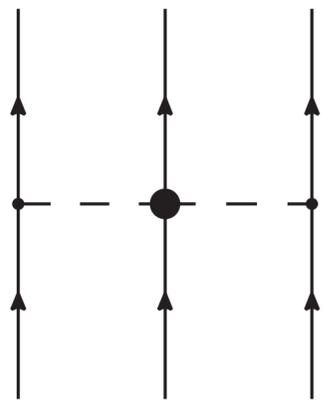
1π



ct

$$v_{3N}^{(c_3)} = \frac{g_A^2 c_3}{4f_\pi^4} \sum_{i \neq j \neq k} (\boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j) \frac{q_i^2 q_j^2}{(q_i^2 + m_\pi^2)(q_j^2 + m_\pi^2)} \left[\mathcal{O}_{ij}^{(0)} + \mathcal{O}_{ij}^{(1)} + \mathcal{O}_{ij}^{(2)} \right]$$

Fukui +, PLB 855, 138839 (2024)



$$\mathcal{O}_{ij}^{(\lambda)} = \begin{cases} \frac{1}{3} (\boldsymbol{\sigma}_i \cdot \boldsymbol{\sigma}_j) (\hat{\mathbf{q}}_i \cdot \hat{\mathbf{q}}_j)^2 & (\lambda = 0), \text{ Rank 0 (central)} \\ \frac{1}{2} (\boldsymbol{\sigma}_i \times \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (\hat{\mathbf{q}}_i \times \hat{\mathbf{q}}_j) (\hat{\mathbf{q}}_i \cdot \hat{\mathbf{q}}_j) & (\lambda = 1), \text{ Rank 1 (antisymmetric SO)} \\ \frac{1}{3} (\hat{\mathbf{q}}_i \cdot \hat{\mathbf{q}}_j) \mathcal{T}_{ij}(\hat{\mathbf{q}}_i, \hat{\mathbf{q}}_j) & (\lambda = 2), \text{ Rank 2 (tensor)} \end{cases}$$

Generalized tensor operator

$$\mathcal{T}_{12}(\hat{\mathbf{q}}, \hat{\mathbf{q}}') = \frac{3}{2} [(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \hat{\mathbf{q}})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \hat{\mathbf{q}}') + (\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \hat{\mathbf{q}})(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \hat{\mathbf{q}}')] - (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2)(\hat{\mathbf{q}} \cdot \hat{\mathbf{q}}')$$

$$\mathcal{T}_{12}(\hat{\mathbf{q}}, \hat{\mathbf{q}}) = \mathcal{S}_{12}(\hat{\mathbf{q}})$$

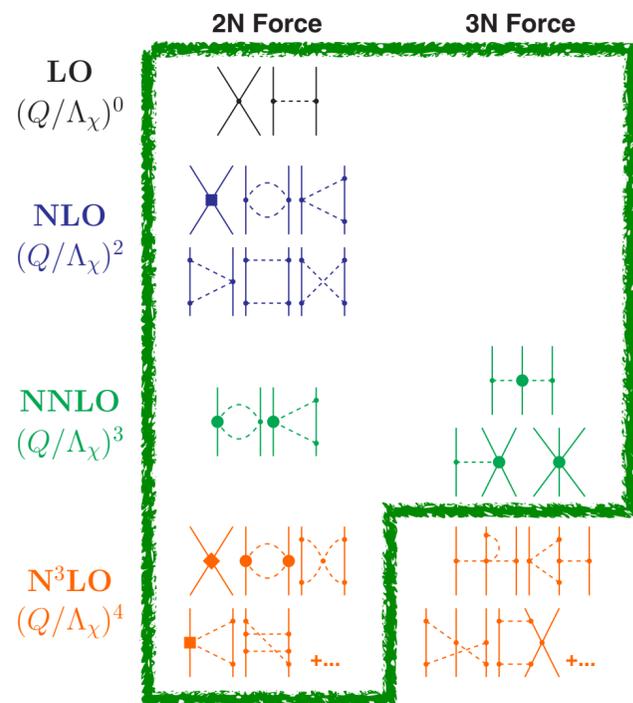
Fujiwara +, PTP 97, 587 (1997)

Realistic Hamiltonian

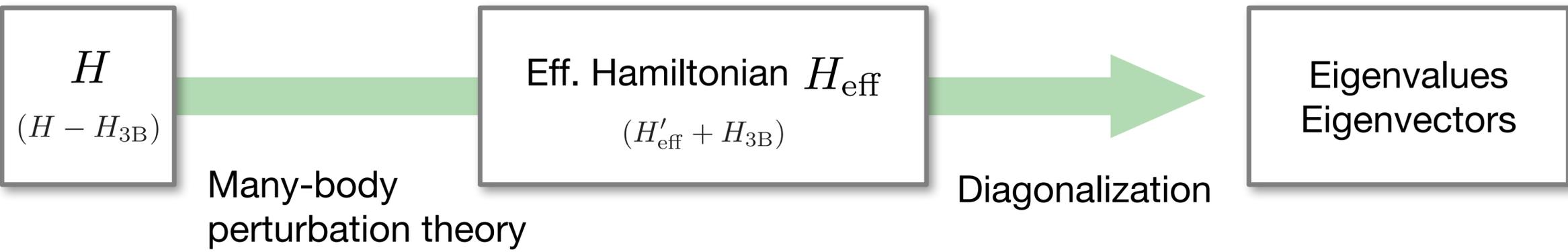
$$H = H_{1B} + H_{2B} + H_{3B}$$

H_{1B} : Single-particle energy
 H_{2B} : Chiral 2NF at N³LO + Coulomb
 H_{3B} : Chiral 3NF at N²LO

Entem +, PRC 96, 024004 (2017)



Realistic shell model



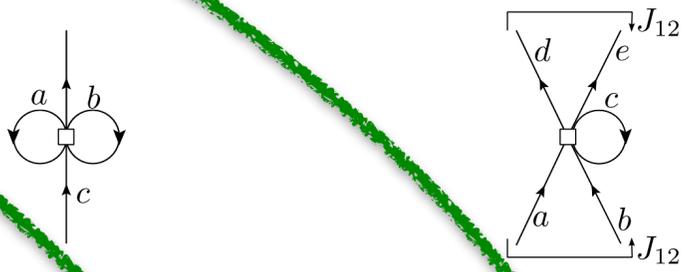
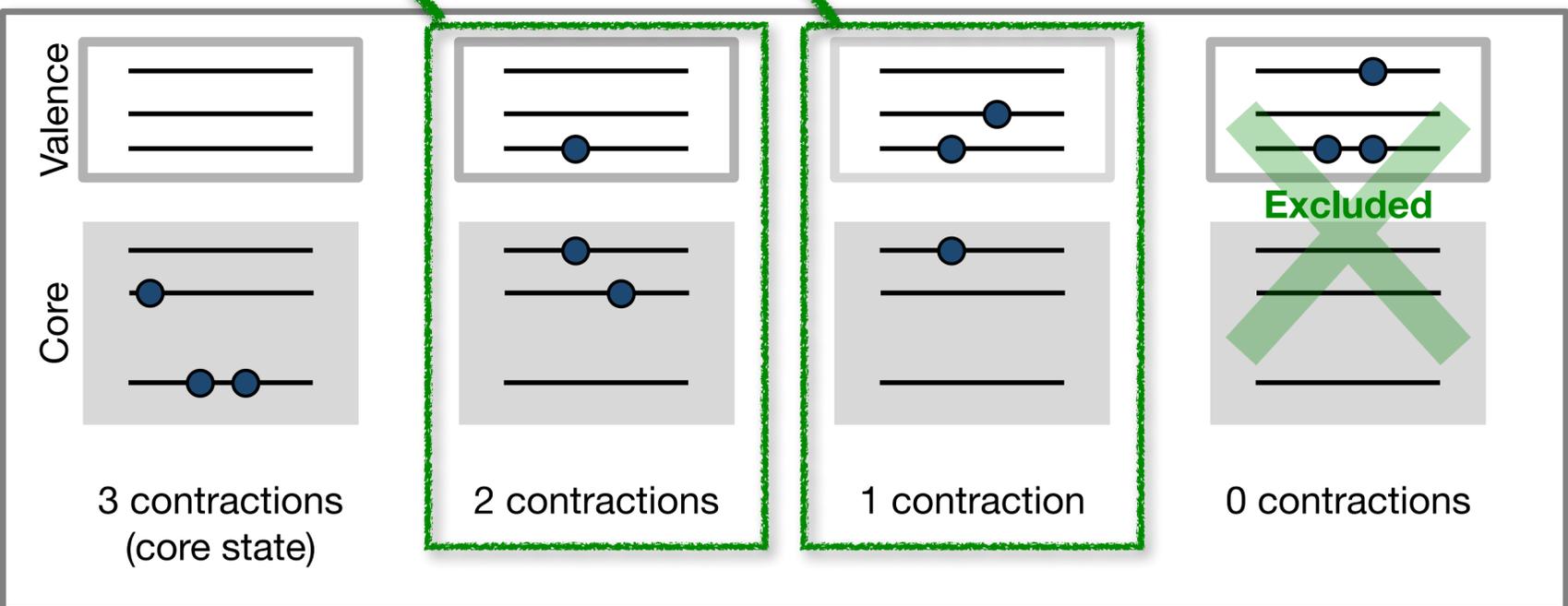
Coraggio +, AP 327, 2125 (2012)

Realistic Hamiltonian

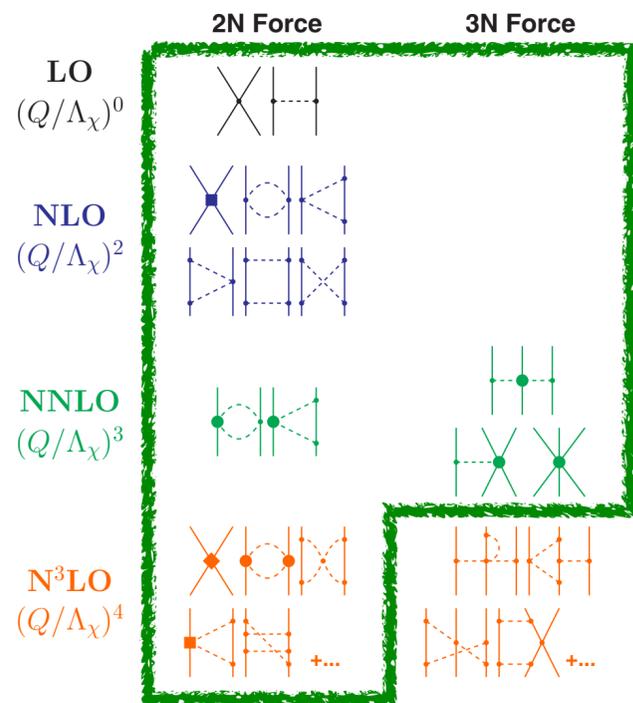
$$H = H_{1B} + H_{2B}$$

H_{1B} : Single-particle energy
 H_{2B} : Chiral 2NF at N³LO + Coulomb

Normal-ordering approx.

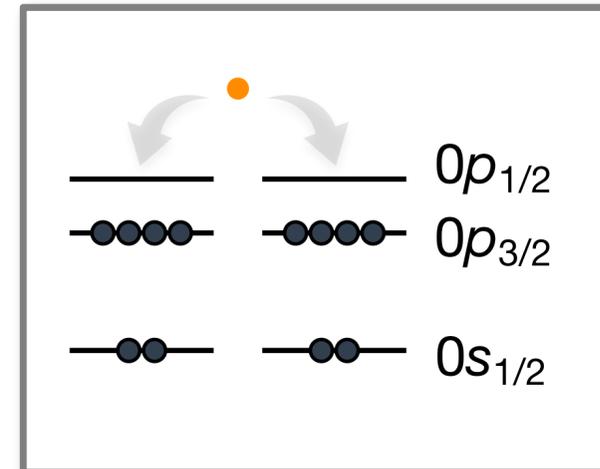
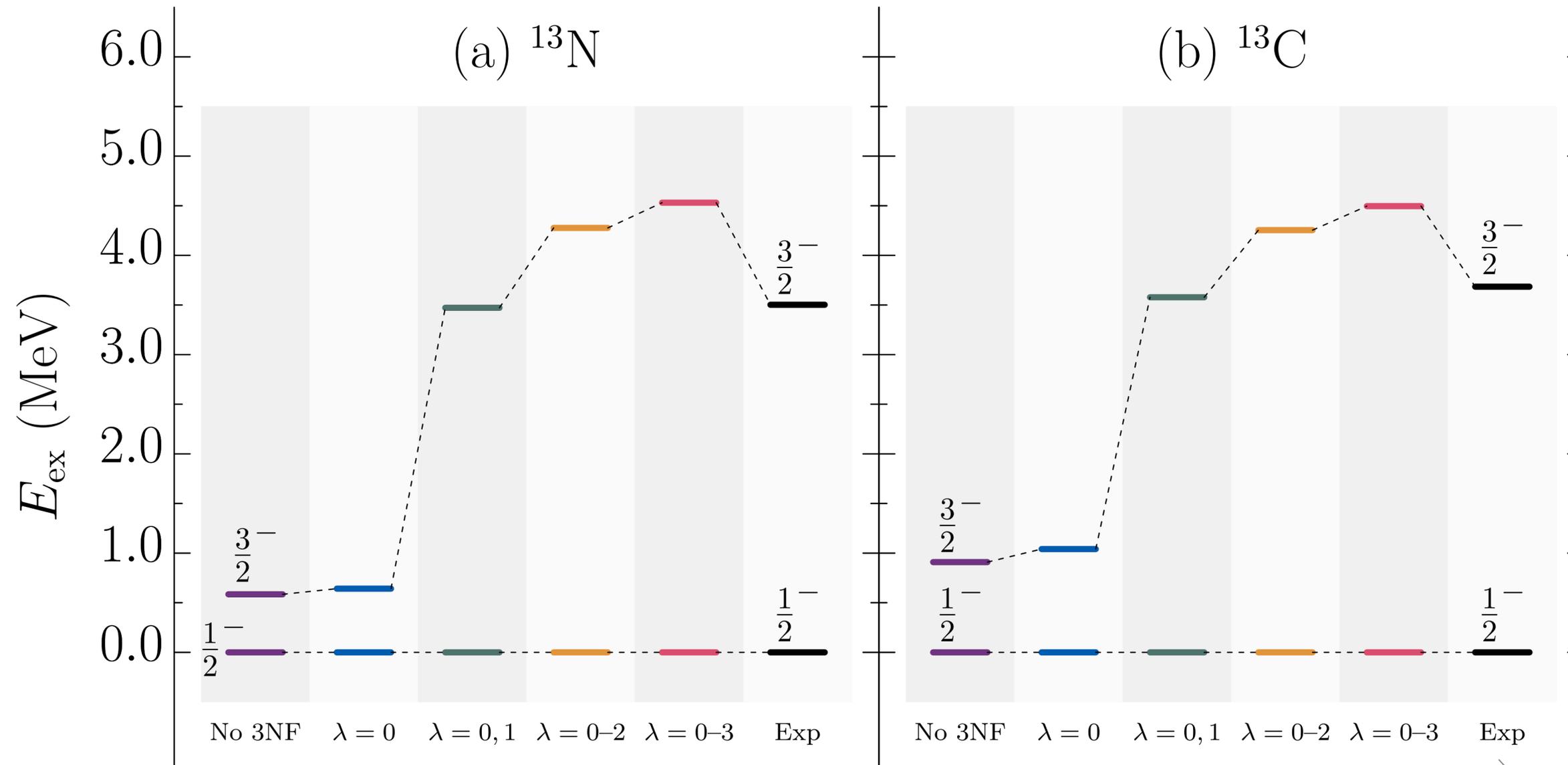


Entem +, PRC 96, 024004 (2017)



Results

Shell-model results | Spectra of ^{13}N and ^{13}C

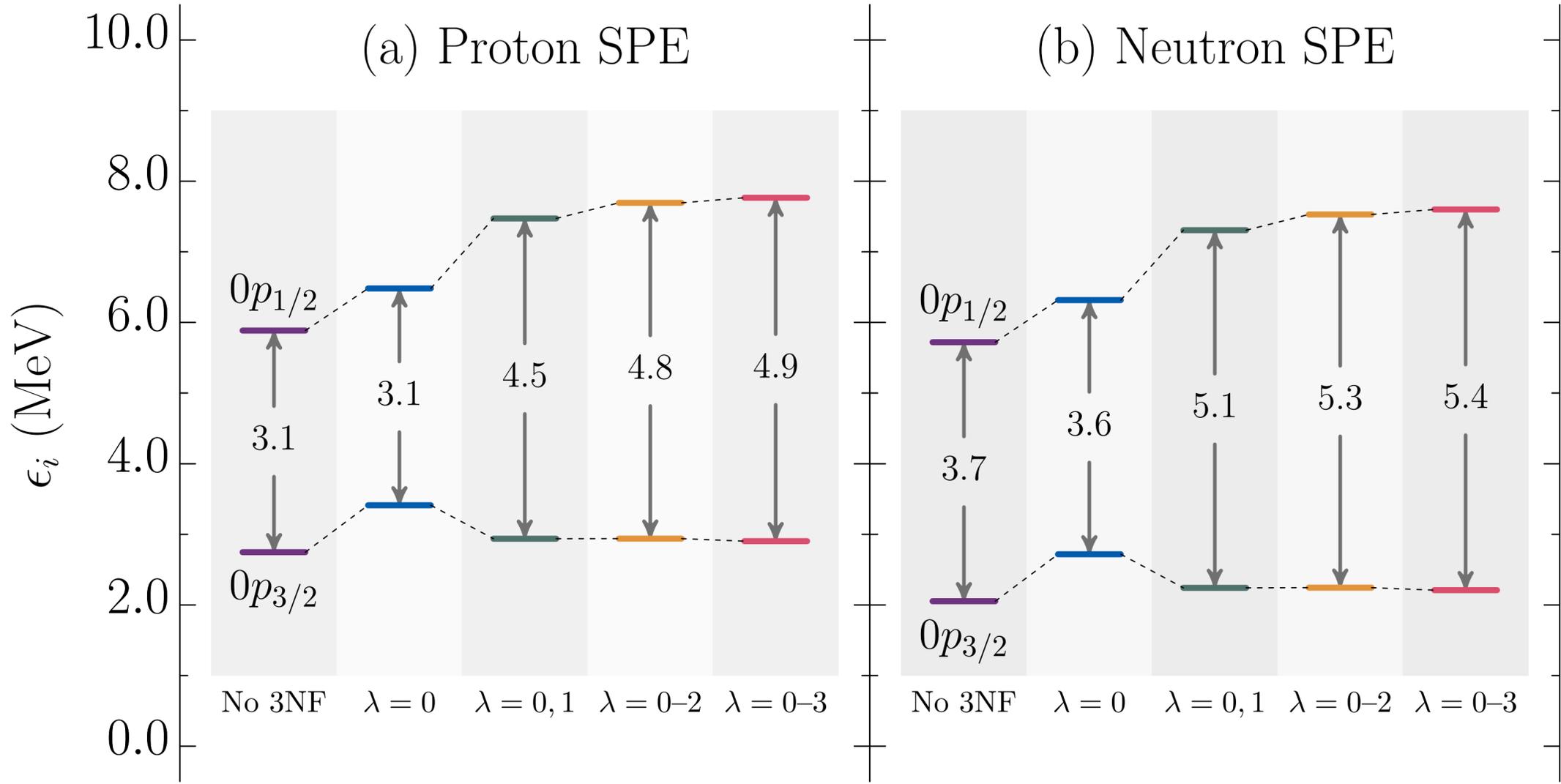


- ✧ **N³LO 2NF**
Entem & Machleidt, PRC **68**, 041001(R) (2003)
- ✧ **N²LO 3NF**
Navrátil +, PRL **99**, 042501 (2007)
- ✧ **Numerical detail**
Fukui +, PLB **855**, 138839 (2024)

- ▶ $3/2^-$ energies: Enhanced by noncentral 3NF
- ▶ Rank-1: Dominant contribution
- ▶ Experimental $3/2^-$: Not perfectly consistent w/ calc.

Ajzenberg-Selove (ENSDF), NPA **523**, 1 (1991)

Spin-orbit splitting and 3NF | Single-particle energies

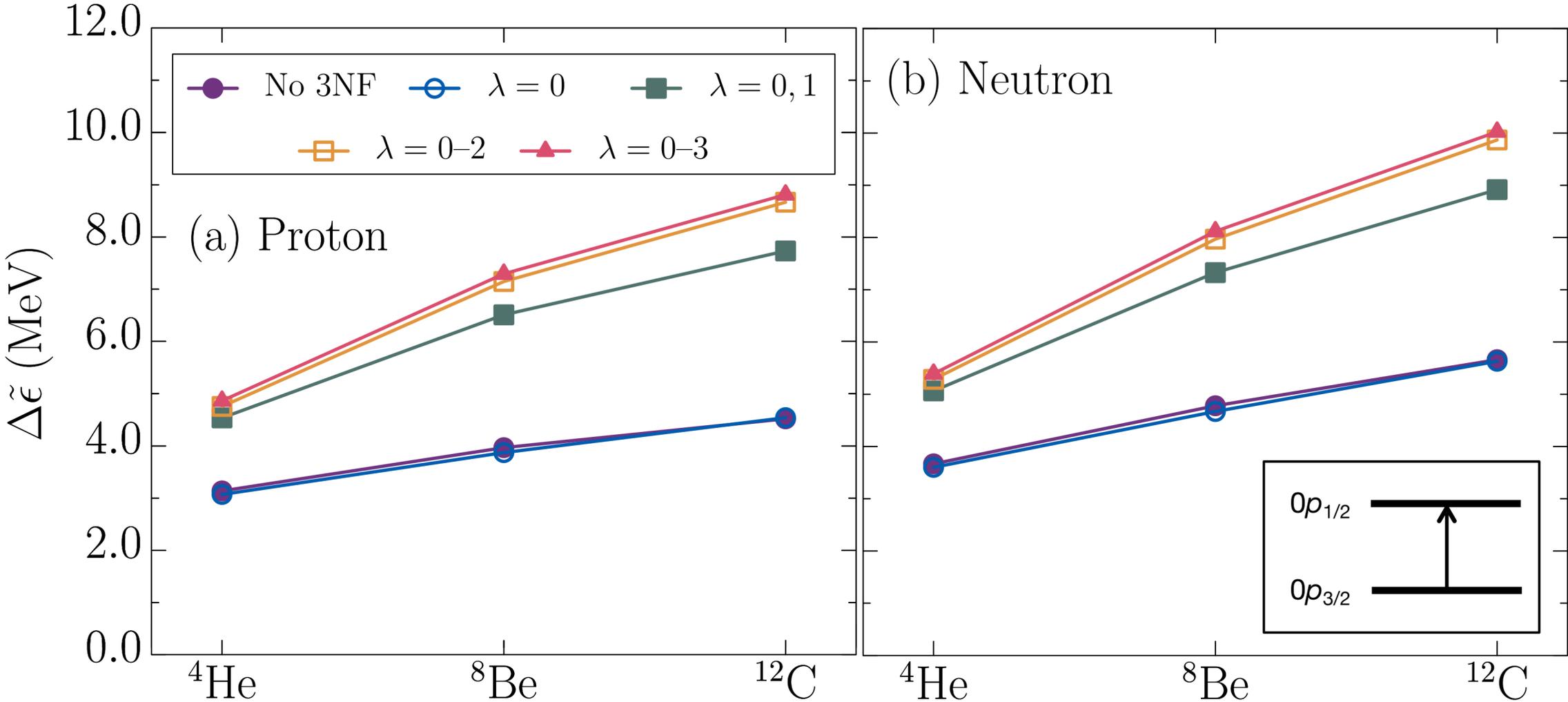


▶ ~40–60% increase by whole 3NF

▶ Rnak-1: \gtrsim 90% contribution

Evolution of ESPEs ($N = Z$ nuclei)

Fukui +, PLB 855, 138839 (2024)



► **Whole 3NF:** ~Doubling SO splitting (^{12}C)

←→
Consistent

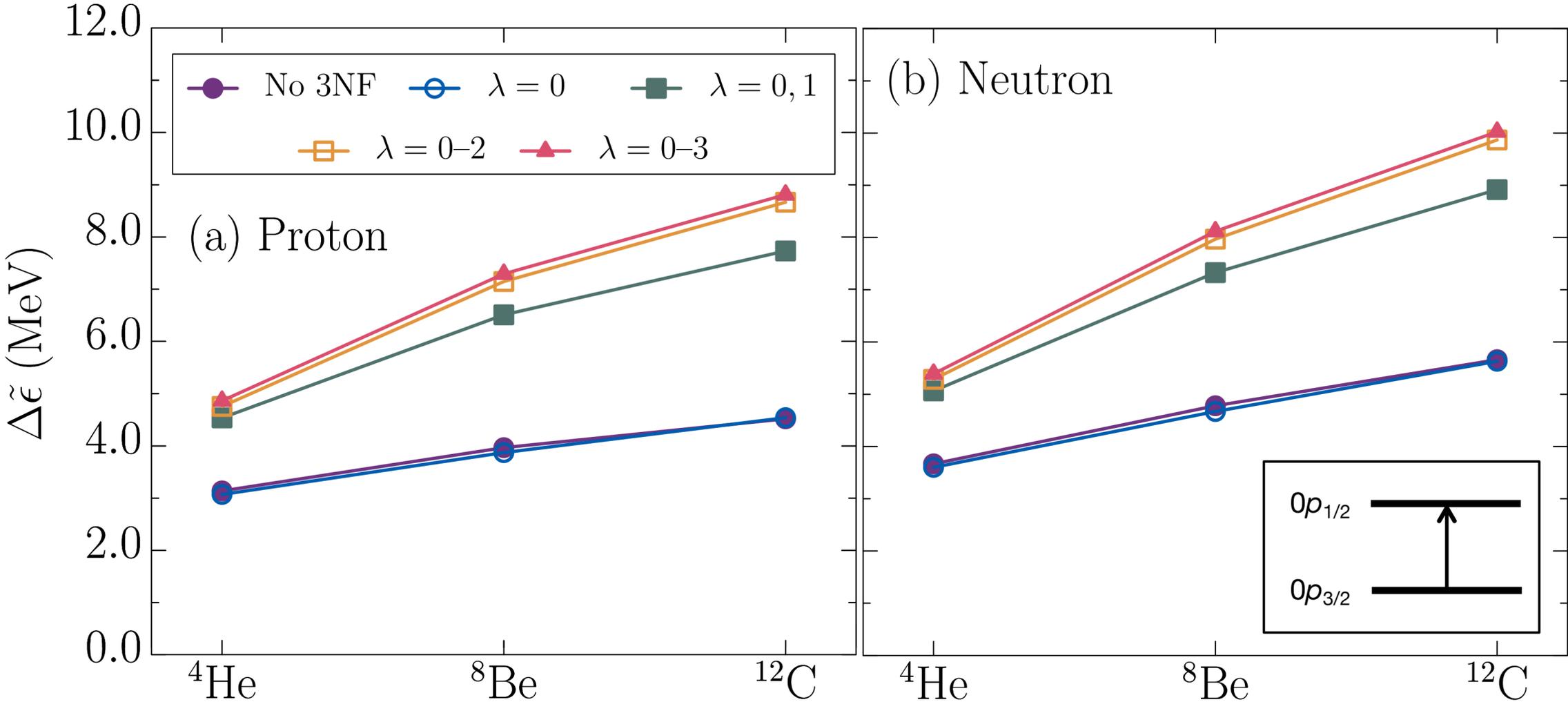
Pieper & Pandharipande

^{15}N -SO splitting: Half from 3NF (Urbana-VII 3NF)

Pieper & Pandharipande, PRL 70, 2541 (1993)
 Schiavilla +, NPA 449, 219 (1986)

Evolution of ESPEs ($N = Z$ nuclei)

Fukui +, PLB 855, 138839 (2024)



- ▶ **Whole 3NF:** ~Doubling SO splitting (^{12}C)
- ▶ **Rank-1:** ~75% contribution (^8Be , ^{12}C)
- ▶ **Rank-2:** ~20% contribution (^8Be , ^{12}C)

Consistent

Pieper & Pandharipande

^{15}N -SO splitting: Half from 3NF (Urbana-VII 3NF)

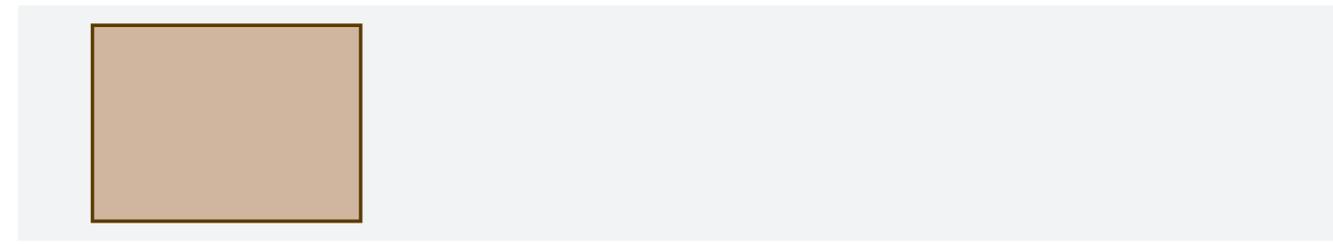
Pieper & Pandharipande, PRL 70, 2541 (1993)
 Schiavilla +, NPA 449, 219 (1986)



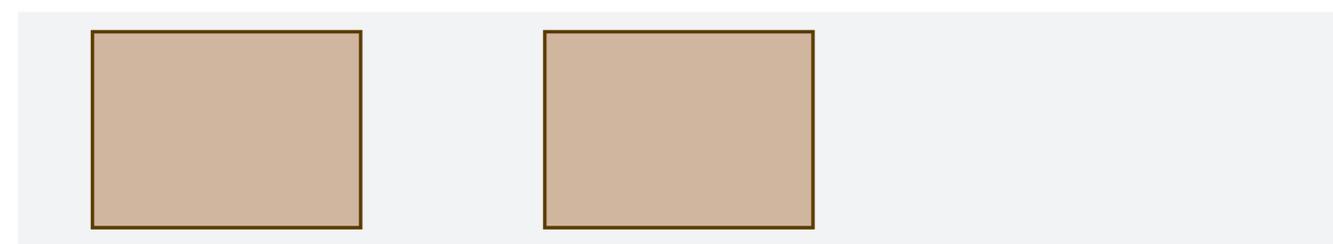
2π -exchange dominance | Rank-1 component exclusively from 2π

**2π -exchange dominance
also for SO splitting**

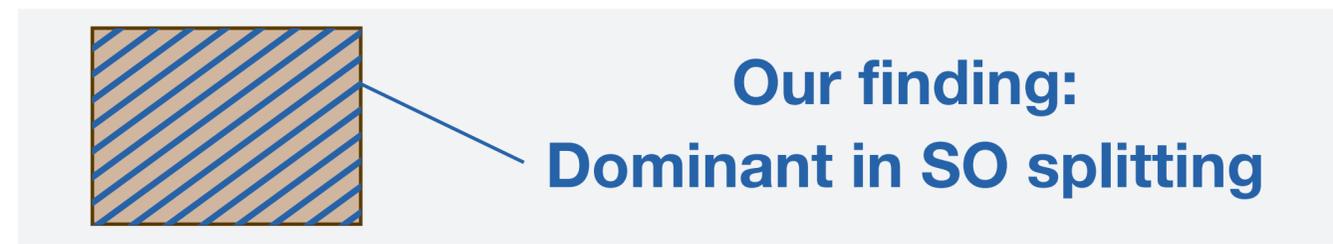
Rank 3



Rank 2
(tensor)

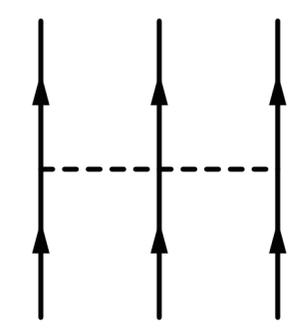


Rank 1
(vector)

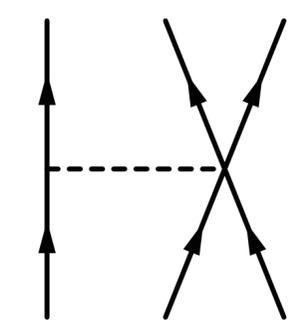


**Our finding:
Dominant in SO splitting**

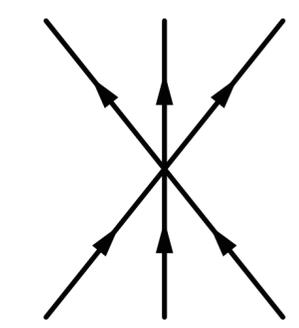
Rank 0
(scalar)



2π



1π



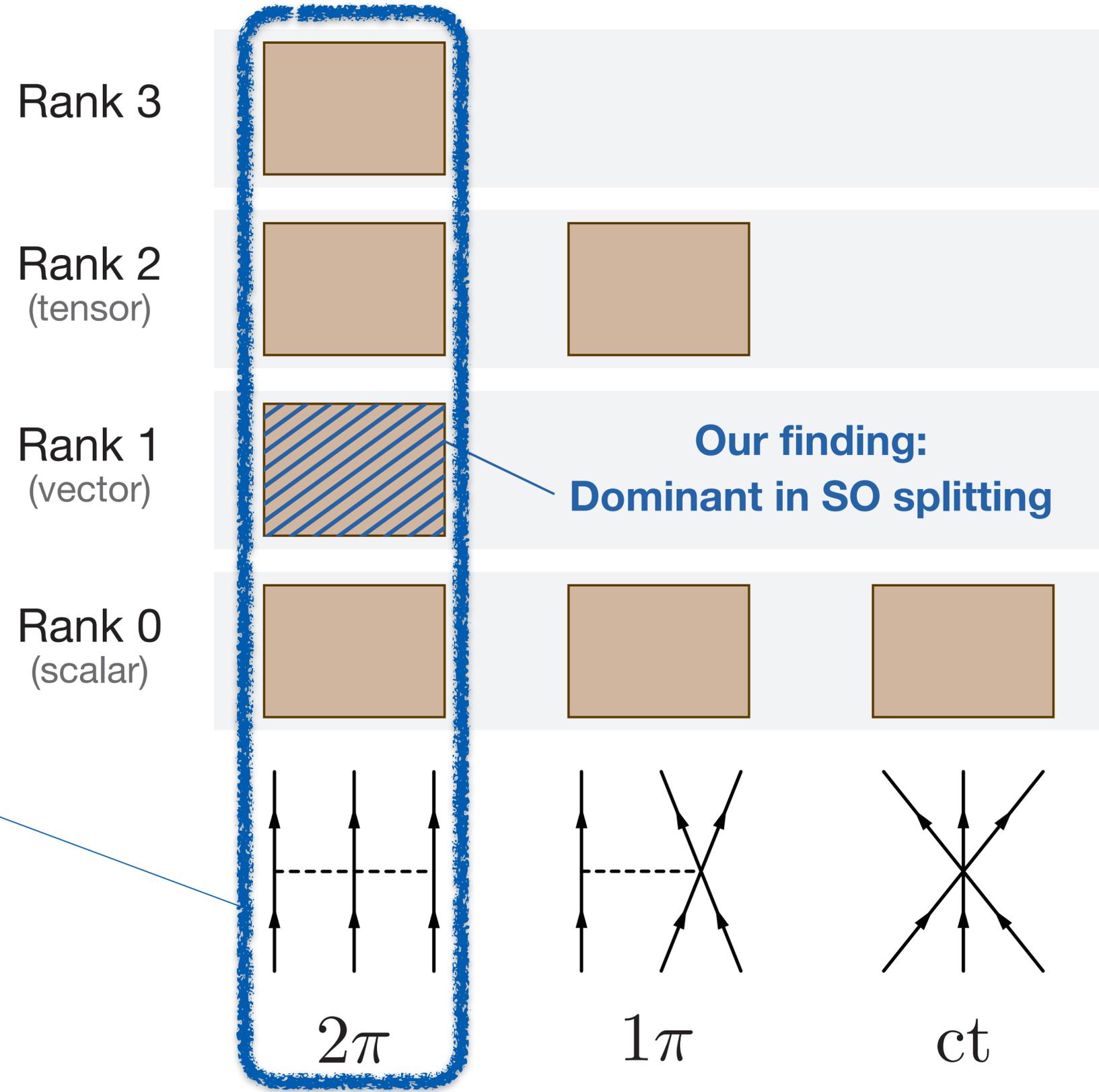
ct

2π -exchange dominance also for SO splitting

π - N LECs:
Well constrained
by Roy-Steiner equation analysis
Hoferichter +, PRL 115, 192301 (2015)

↓

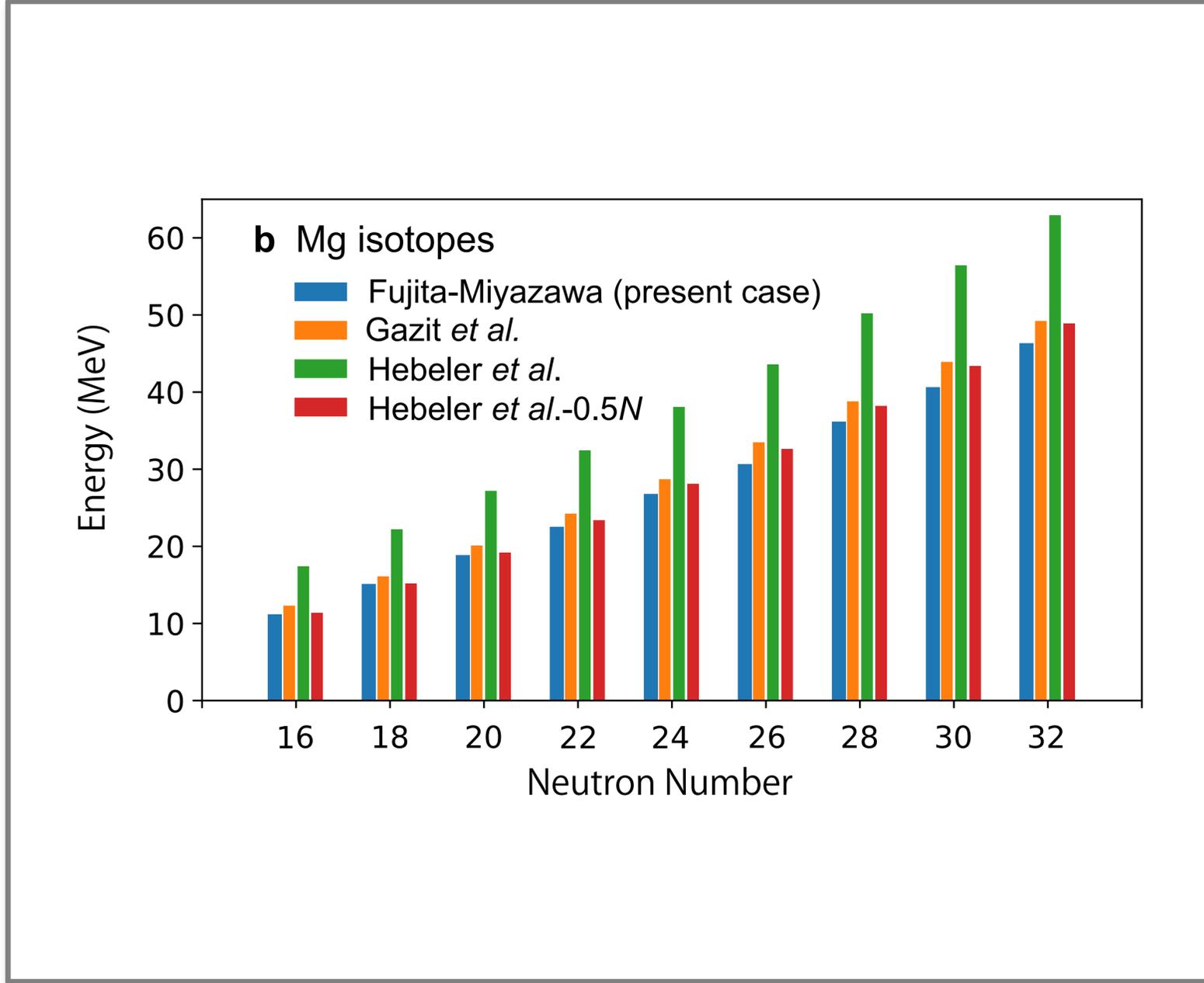
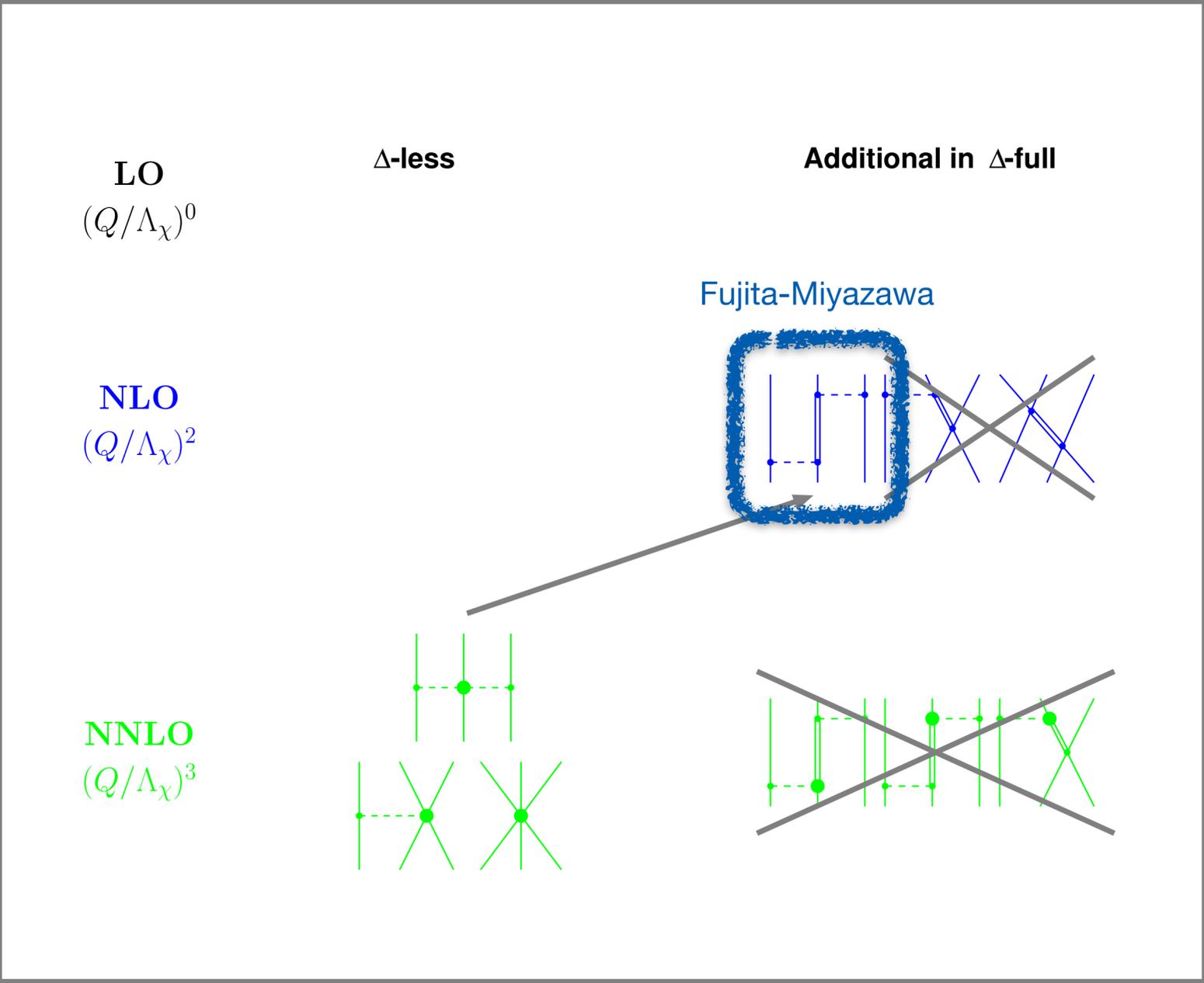
Our conclusions:
Probably independent of contact LECs



Lower-order contribution

Good approx. of chiral 3NF

Δ-full-chiral 3NFs



Fujita & Miyazawa, PTP 17, 360 (1957)
Machleidt & Entem, PR 503, 1 (2011)

Tsunoda +, Nature 587, 66 (2020)

One-body SO potential from rank-1 3NF

$$v_{3N}^{(c_3; \lambda=1)} = \frac{g_A^2 c_3}{8f_\pi^4} \sum_{i \neq j \neq k} (\boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j) \frac{1}{(q_i^2 + m_\pi^2)(q_j^2 + m_\pi^2)} (\boldsymbol{\sigma}_i \times \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (\mathbf{q}_i \times \mathbf{q}_j) (\mathbf{q}_i \cdot \mathbf{q}_j)$$

Andō & Bandō, PTP 66, 227 (1981)

$$\tilde{M}_{\text{TBF}}^{\text{SX}}(a) \simeq \langle \phi_a | B \rho(r) (1/r) (d\rho(r)/dr) \mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\sigma} | \phi_a \rangle$$

One-body SO potential from rank-1 3NF

Andō & Bandō

Rank-1 3NF solely
(Fujita—Miyazawa 3NF/Tucson—Melbourne 3NF)

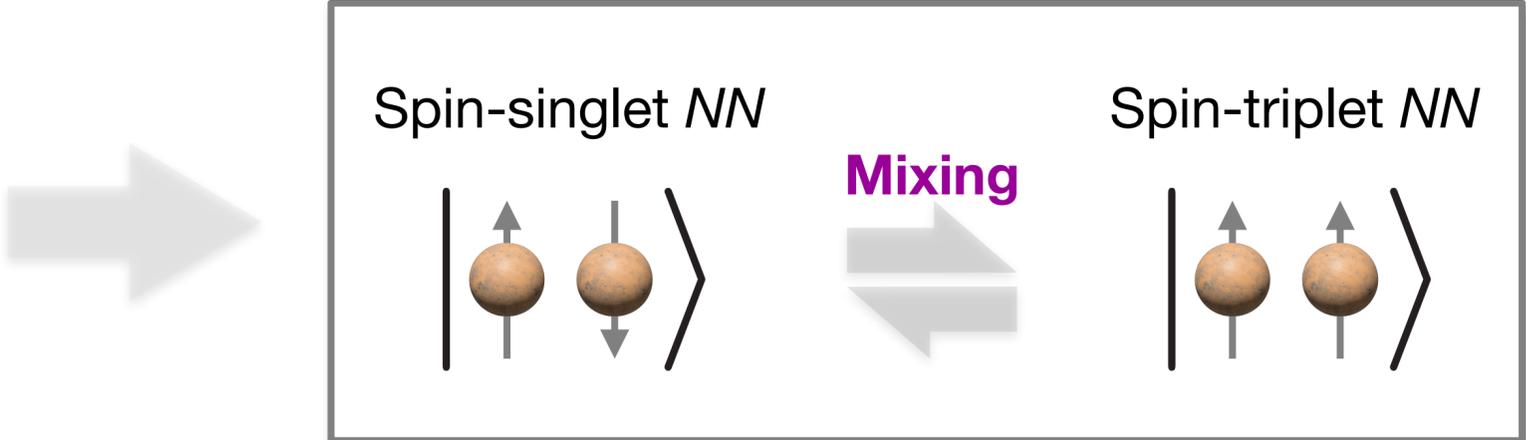
Fujita & Miyazawa, PTP 17, 360 (1957)
Coon, NPA 317, 242 (1979)

**Rank-1 3NF
and
its antisymmetric property**

Structure of rank-1 3NF (2π - c_3 term) | Singlet-triplet mixing

$$v_{3N}^{(c_3; \lambda=1)} = \frac{g_A^2 c_3}{8f_\pi^4} \sum_{i \neq j \neq k} (\boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j) \frac{1}{(q_i^2 + m_\pi^2)(q_j^2 + m_\pi^2)} (\boldsymbol{\sigma}_i \times \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (\mathbf{q}_i \times \mathbf{q}_j) (\mathbf{q}_i \cdot \mathbf{q}_j)$$

Antisymmetric-SO 3NF!

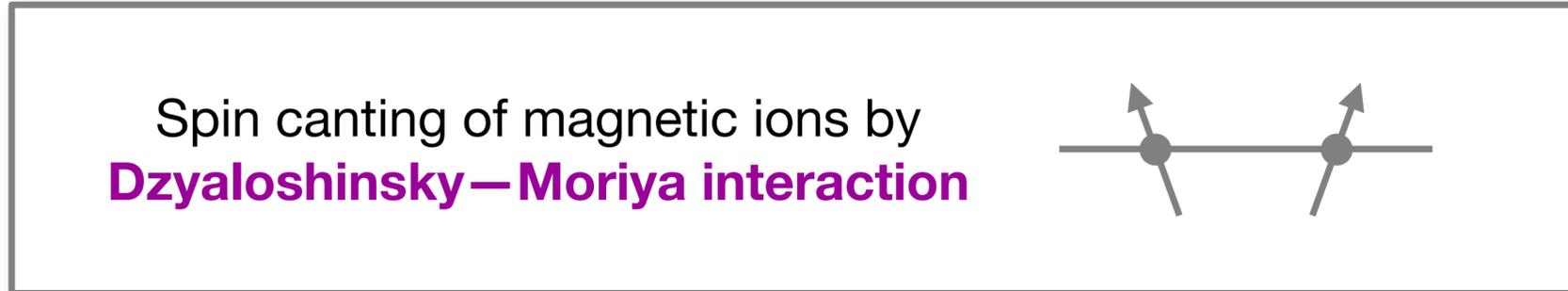


- * 2n correlation?
- * Entanglement/disentanglement?
- ⋮

Structure of rank-1 3NF (2π - c_3 term) | Spin canting

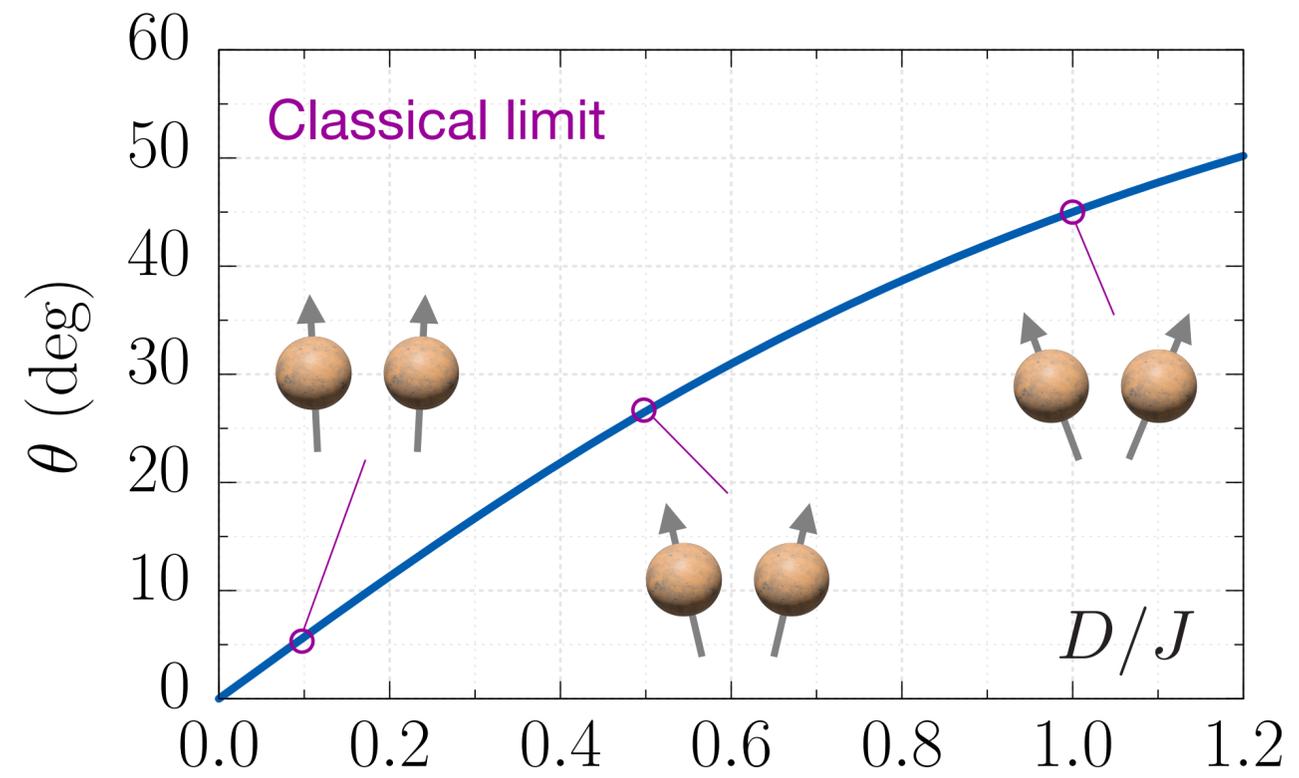
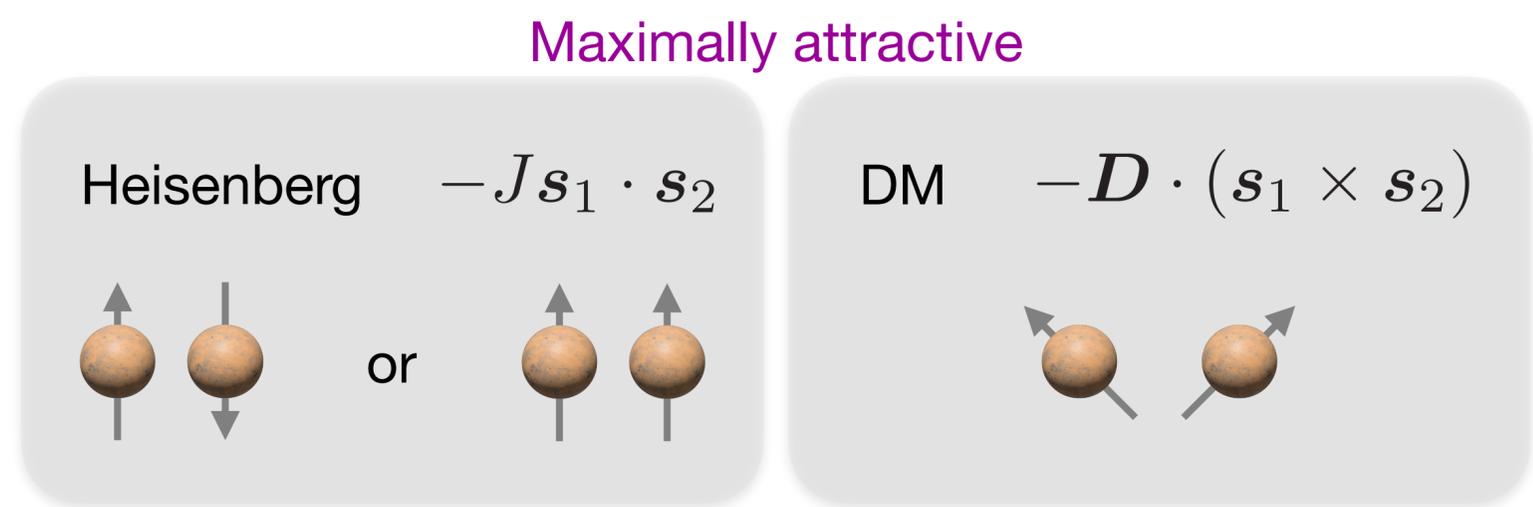
$$v_{3N}^{(c_3; \lambda=1)} = \frac{g_A^2 c_3}{8f_\pi^4} \sum_{i \neq j \neq k} (\boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j) \frac{1}{(q_i^2 + m_\pi^2)(q_j^2 + m_\pi^2)} (\boldsymbol{\sigma}_i \times \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (\mathbf{q}_i \times \mathbf{q}_j) (\mathbf{q}_i \cdot \mathbf{q}_j)$$

Antisymmetric-SO 3NF!

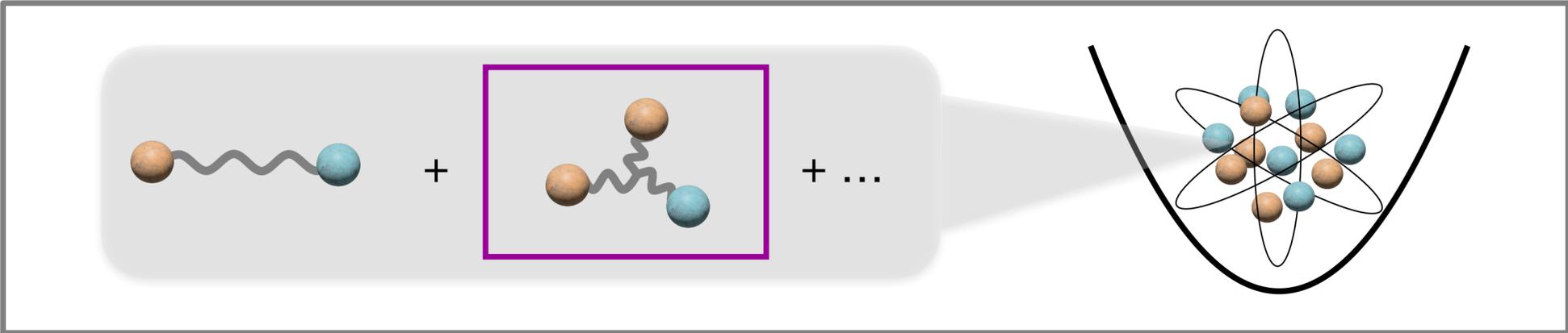


Analogy

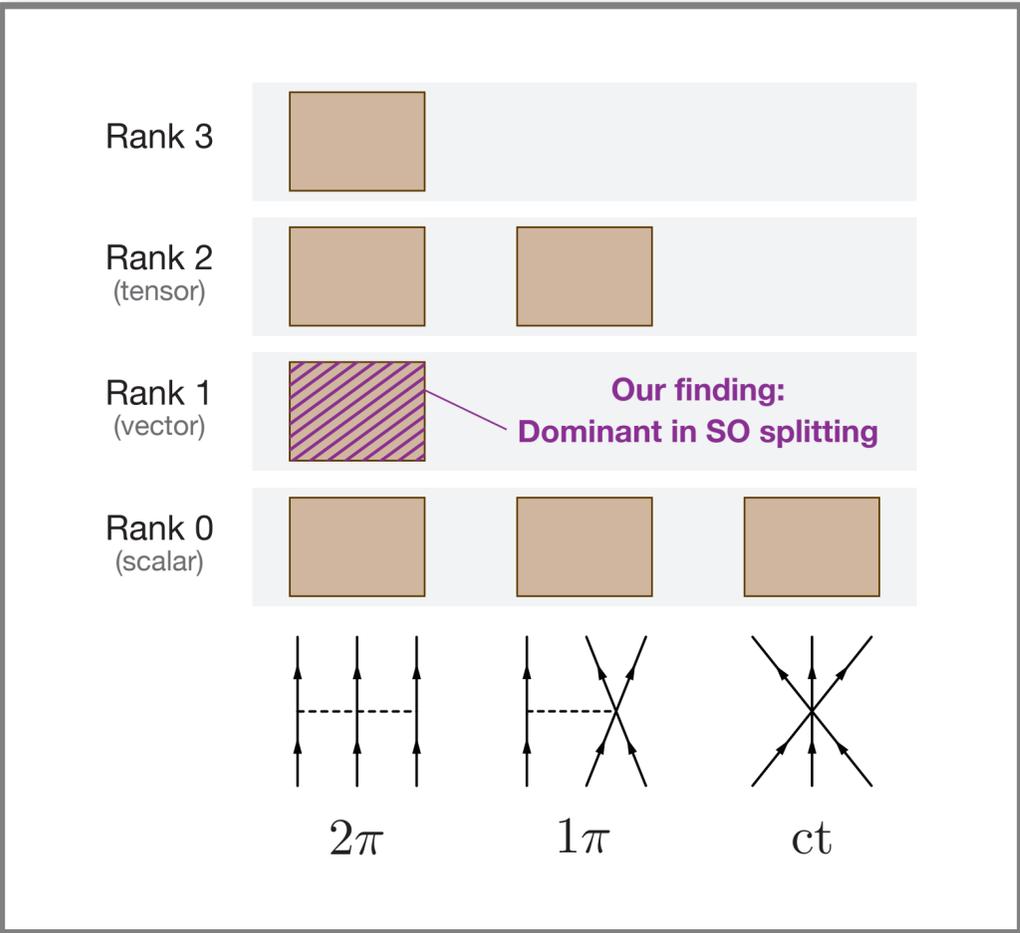
Dzyaloshinsky, JPCS 4, 241 (1958)
Moriya, PRL 4, 228 (1960)
Moriya, PR 120, 91 (1960)



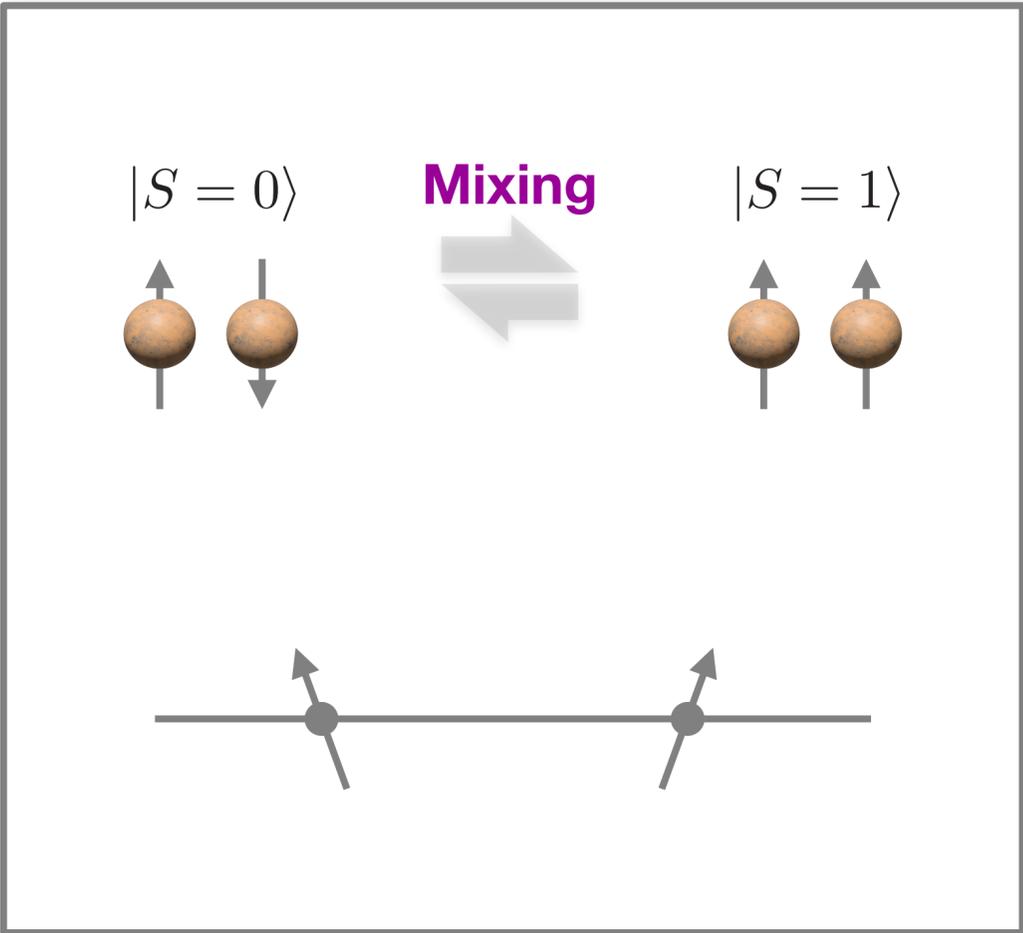
Chiral EFT + Shell model



Main finding



Singlet-triplet mixing & antisym. 3NF



Future

- ✧ Heavier nuclei: Rank-2 3NF becomes relevant?
- ✧ $2n$ correlation, entanglement, and 3NF

**Ongoing projects, future perspective,
and daydream**

ASO 3NF within Skyrme DFT

密度汎関数理論を用いた三体核力に起因する
反対称スピン軌道力の効果

九州大学大学院 理学府
物理学専攻 理論核物理研究室
木田 浩樹
指導教員 湊 太志
共同研究者：福井 徳朗

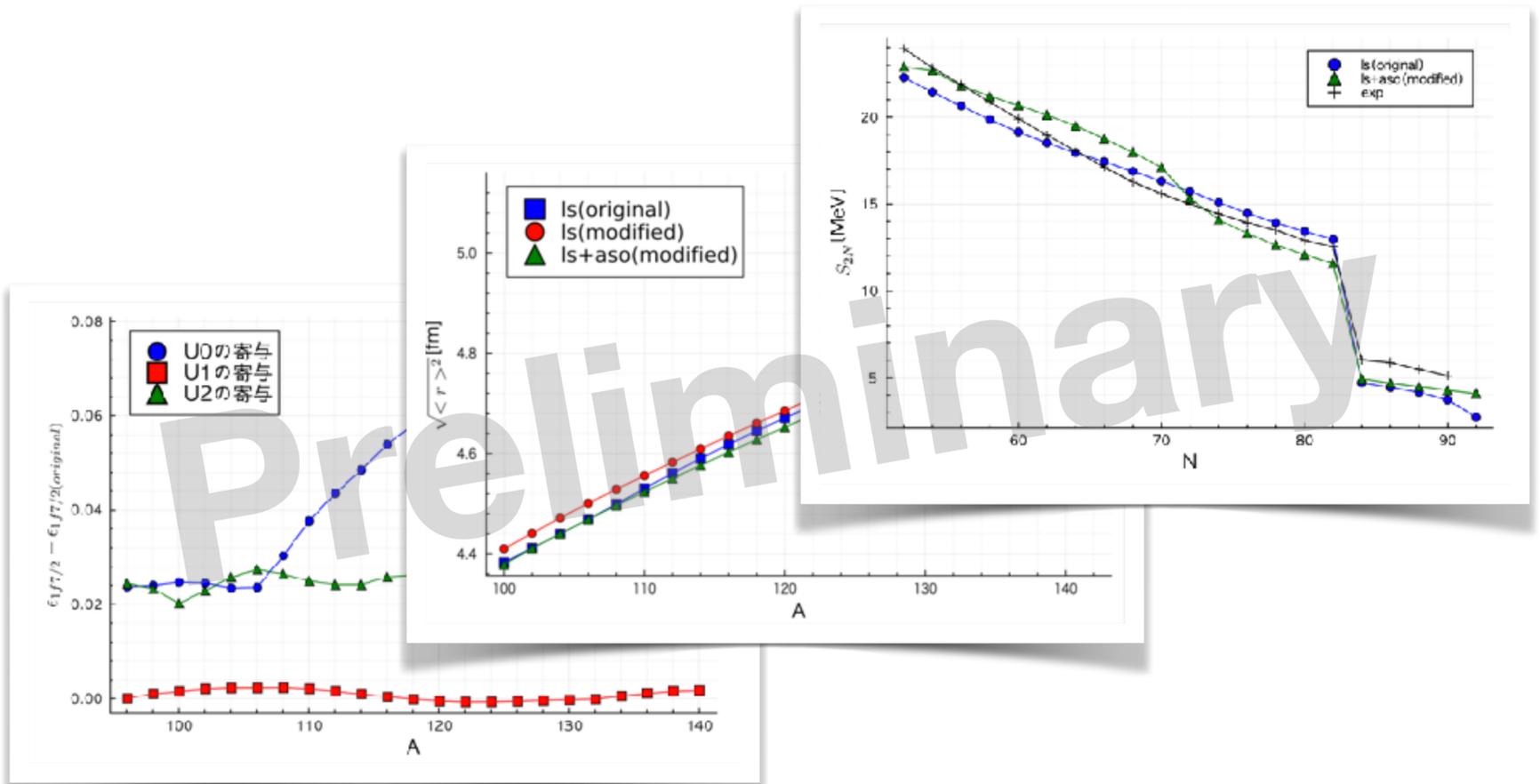


令和 6 年 2 月

Kida, Master Thesis, Kyushu U. (2025)

New term

$$v(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3) = W_1 (\boldsymbol{\sigma}_1 \times \boldsymbol{\sigma}_2) \cdot [(\nabla'_1 + \nabla_1) \times (\nabla'_2 + \nabla_2)] \times \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \delta(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_3)$$



Orthrus (2 flavors)



Cerberus (3 flavors)



PHYSICAL REVIEW C **93**, 014001 (2016)

Leading three-baryon forces from SU(3) chiral effective field theory

Stefan Petschauer,^{1,*} Norbert Kaiser,¹ Johann Haidenbauer,² Ulf-G. Meißner,^{2,3} and Wolfram Weise^{1,4}

📅 18日 U1会場 18aU1 9:00~12:30

理論核物理領域

ハドロン構造・相互作用I

1 高エネルギー衝突での2粒子間相関関数における共鳴状態の影響 (15分)

都立大理

渡辺蒼大, ○兵藤哲雄

2 SU(3)カイラル有効場理論に基づくバリオン3体力の重陽子- Ξ 相関関数に対する影響 (15分)

九大院理^A, 九大基幹^B, 阪大RCNP^C

浦津源^A, 福井徳朗^B, 緒方一介^{A, C}

Next JPS meeting

