

SU(3)カイラル有効場理論による ハイペロン核子間相互作用に基づいた 核物質中のハイペロン

Asanosuke Jinno (神野朝之丞, Kyoto Univ.)

in collaboration with **Johann Haidenbauer (FZ Jülich)**
Ulf-G. Meißner (Univ. Bonn, FZ Jülich, Univ. Beijing)

[AJ](#), J. Haidenbauer, and U.-G. Meißner, Phys. Rev. C 112, 065209 (2025).

- Motivation for studying hyperons in matter
- Baryon interactions within SU(3) chiral EFT
- Λ and Σ single-particle potentials by YN force at N2LO

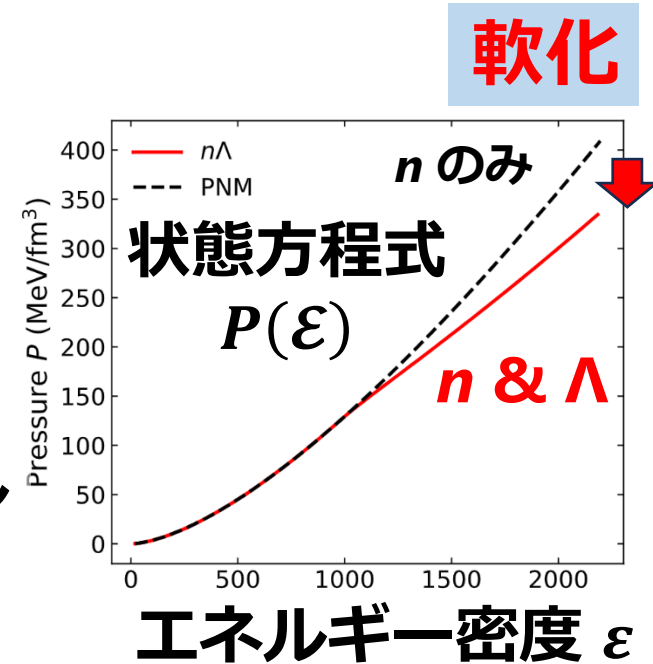
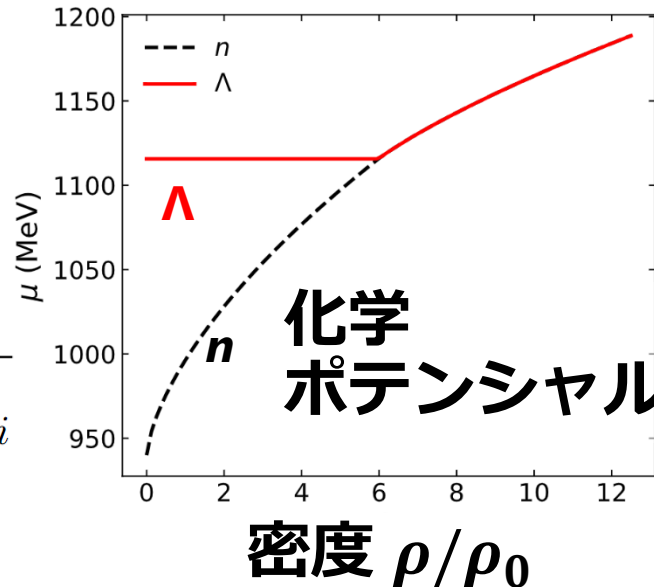
核力・ハドロン間相互作用と量子多体計算の進展, Feb. 16-18, 2026.

- ハイペロン：ストレンジクォークを1つ以上含むバリオン
例: $\Lambda \sim 1115 \text{ MeV}$, $\Sigma^{0,\pm} \sim 1190 \text{ MeV}$ ($p, n \sim 940 \text{ MeV}$)
- 中性子のフェルミ面が上昇するとハイペロンの出現がナイーブには予想される
- 例: 自由フェルミガス模型 with 中性子 (n) and Λ
(Cf. A. Ambartsumyan & G. S. Saakyan (1960))

$$\mathcal{E}_{\text{free}}(\rho_n, \rho_\Lambda) = g \sum_{i=n,\Lambda} \int_{|\mathbf{k}| < k_{Fi}} \frac{d^3\mathbf{k}}{(2\pi)^3} \sqrt{m_i^2 + \mathbf{k}_i^2},$$

$$P(\rho) = \rho^2 \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{\mathcal{E}_{\text{free}}}{\rho} \right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta \text{平衡条件: } \mu_n = \mu_\Lambda, \quad \mu_i = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \rho_i} = \sqrt{m_i^2 + k_{Fi}^2} \\ \text{密度条件: } \rho = \rho_n + \rho_\Lambda \end{array} \right.$$

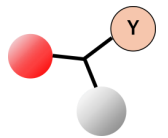


- (1990-) ハイペロン現象論: $2 - 4 \rho_0$ でハイペロンが出現。ただ、状態方程式は軟化。
e.g. N. K. Glendenning & S. A. Moszkowski PRL 67, 2414 (1991); R. Knorren, M. Prakash, & P. J. Ellis, PRC 52, 3470 (1995); S. Balberg & A. Gal, NPA 625, 435 (1997); S. Nishizaki, T. Takatsuka, and Y. Yamamoto, PTP 108 (2002) 703.

- (2010-) 大質量中性子星 (2倍の太陽質量) の報告。
現象論と観測の矛盾? ハイペロンパズル

- 解決案の例:

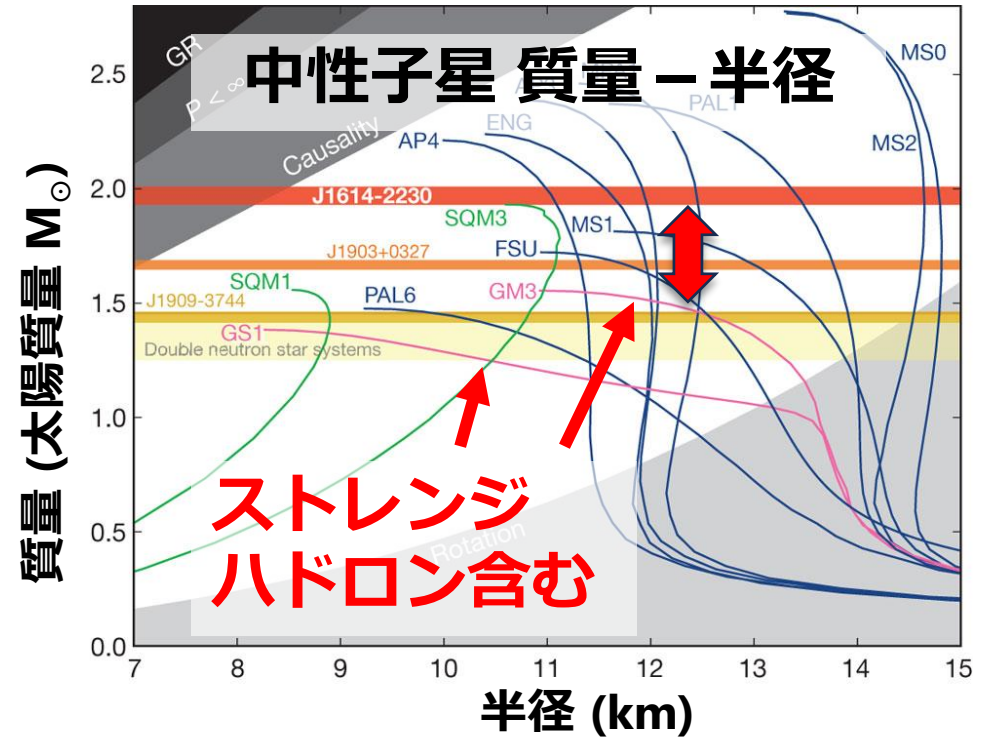
ハイペロン核子間3体力 (YNN)



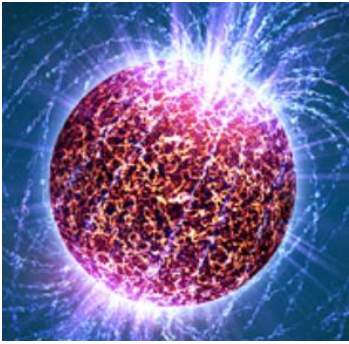
e.g. D. Lonardoni, A. Lovato, S. Gandolfi, & Francesco Pederiva (2015).

クォーク相とハドロン相とのクロスオーバー転移

e.g. G. Baym, T. Hatsuda, T. Kojo, P. D. Powell, Y. Song, & T. Takatsuka (2018).



P. Demorest et al. Nature (2010).



観測「ハイペロン
無いんちゃう？」

- 今の原子核物理の知見を組み合わせた際、ハイペロンは本当に現れないのか？
- どの物理量に焦点を当てるべきか？

Q. 最も軽いハイペロンであるラムダ粒子 Λ が中性子星物質中に現れる条件は？

A. (中性子フェルミエネルギー) > (Λ 質量 + 1粒子ポテンシャル)

状態方程式、特に
対称エネルギー (Symmetry energy)

~ハイペロン・媒質核子間相互作用の平均値

Nuclear Matter



◎ Λ ハイパー核のナイーブなフィッティング: $U_\Lambda(\rho_0) \approx -30 \text{ MeV}$

E.g. D. J. Millener, C. B. Dover, and A. Gal, (1988).

△ シグマ原子などを元にした現象論: $U_\Sigma(\rho_0) = 30 \pm 20 \text{ MeV}$

A. Gal, E. V. Hungerford, & D. J. Millener (2016).

• Λ ハイパー核のより詳細な解析

[AJ](#), K. Murase, Y. Nara, & A. Ohnishi, PRC 108, 065803 (2023).

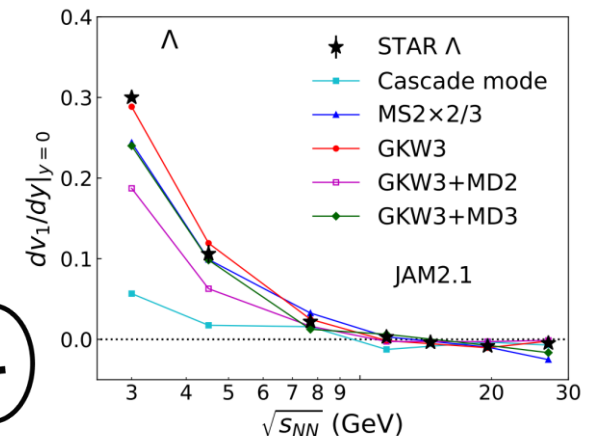
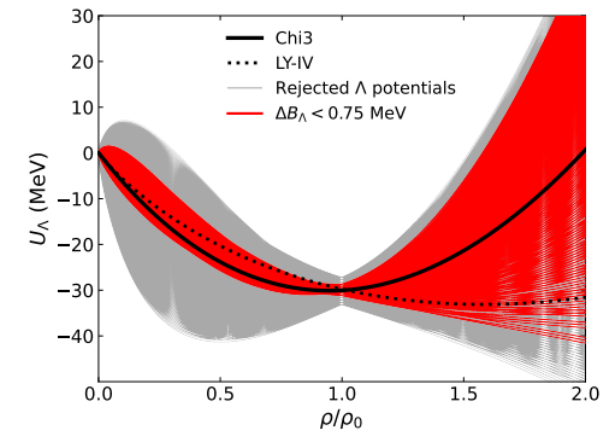
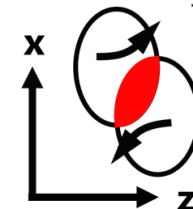
外挿領域 $U_\Lambda(1 - 2\rho_0)$ はバラつきが大きい。

• 重イオン衝突における Λ 側方フロー

Y. Nara, [AJ](#), K. Murase, and A. Ohnishi, PRC 106 (2022) 044902.

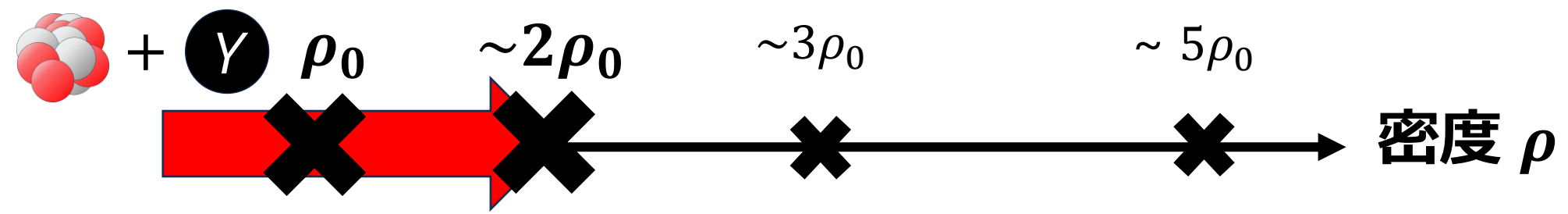
まず運動量依存性を決めなければ、密度依存性にはアクセスできない

$\rho > \rho_0$ は制限が乏しい!

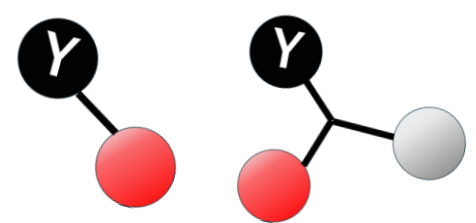


カイラル有効場理論による最新のバリオン間相互作用(N2LO)
により、飽和密度 ρ_0 を超えた領域におけるハイペロン1粒子
ポテンシャルに対しての、より良い予言を試みる!

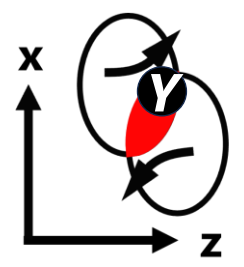
ハイパー核



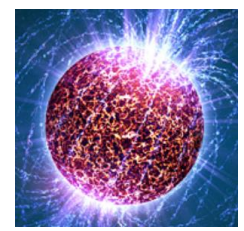
カイラル有効場理論



重イオン衝突

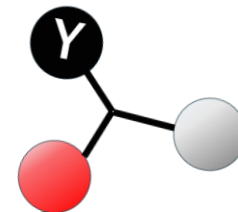
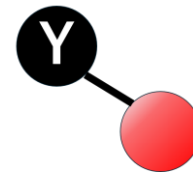
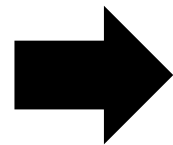


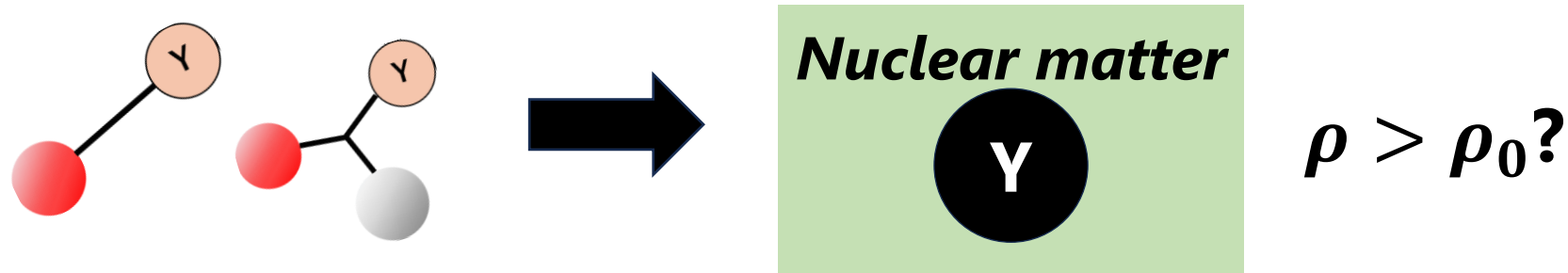
中性子星



Baryon interactions within SU(3) Chiral EFT

Chiral Lagrangian





- ボソン交換 (e.g. Nijmegen, Jülich)やクォークモデル (e.g. FSS, fss2):
 - ✓ 物理的直観に基づく構成 △ 取り入れていない効果の不定性が曖昧
- 格子QCD (e.g. HAL QCD法)
 - ✓ QCDに基づく第一原理計算 △ $\Lambda N/\Sigma N$ や3体力は現状難しい
- カイラル有効場理論
 - ✓ 系統的な摂動展開により、高い予言能力を持つ。多体力を統一的に記述可能。
 - △ 低エネルギー有効理論であるため、高密度 (通常核物質では $\geq 2\rho_0$) で破綻する。

- 低エネルギー (massless) QCDでは $SU(3)_R \times SU(3)_L \rightarrow SU(3)_V$ と破れ、Nambu-Goldstone (NG) ボソン $\pi(\pi^+, \pi^0, \pi^-), K(K^+, K^-, K_0, \bar{K}_0), \eta$ が出現
- カイラル有効場理論 (EFT): NGボソン + Matter field (バリオン) (+外場)

S. Weinberg, "Phenomenological Lagrangians", Physica A96, 327 (1979).

"Folk theorem". EFTの理念

if one writes down the most general possible Lagrangian, including all terms consistent with assumed symmetry principles, and then calculates matrix elements with this Lagrangian to any given order of perturbation theory, the result will simply be the most general possible S -matrix consistent with analyticity, perturbative unitarity, cluster decomposition and the assumed symmetry principles.

次数勘定 (power counting) により、低い運動量で重要となるダイアグラムを抜き出す S. Weinberg, Physica A96, 327 (1979). → **系統的な摂動展開を可能にする!**

Adopted from E. Epelbaum's slide

q : 運動量スケール		BB force	3B force	4B force
$\mathcal{O}(q^0)$	LO		—	—
$\mathcal{O}(q^2)$	NLO		—	—
$\mathcal{O}(q^3)$	N ² LO			—

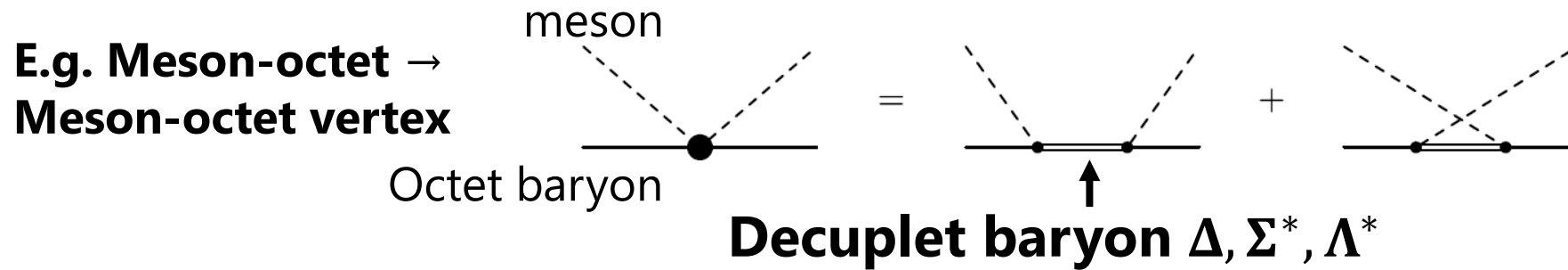
具体的な構成には、regulator cutoff (500-650 MeV) およびスキーム (non-local, SMS など) の選択、実験データへのフィットによる接触項の低エネルギー定数の決定などが要求される。(2体力はBB散乱データで先に決め、3体力はその残りで決める)

- **N2LO 3BFs within SU(3) have too many low-energy constants (LECs).**

S. Petschauer, N. Kaiser, J. Haidenbauer, U. G. Meißner, & W. Weise (2016)

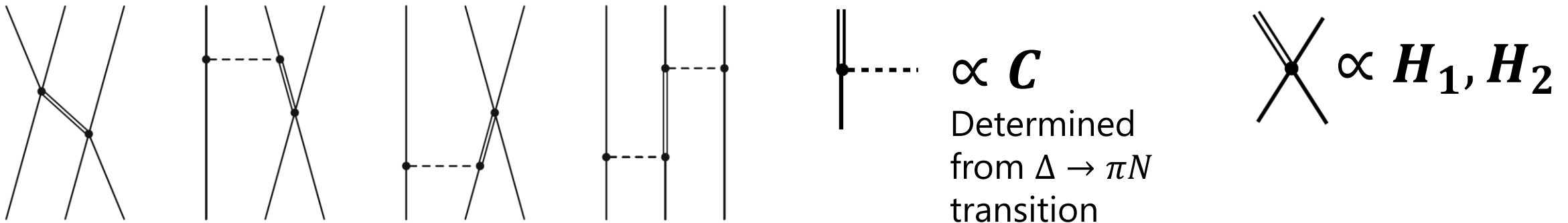
- **Decuplet saturation: inserting decuplet baryons**

S. Petschauer, J. Haidenbauer, N. Kaiser, U. G. Meißner, & **W. Weise (2017)**



Decuplet saturated 3BF (**Only 3 LECs!**)

For hyperon in matter: **D. Gerstung, N. Kaiser, and W. Weise (2020).**



例: YNN within SU(3) chiral EFT (1/2)

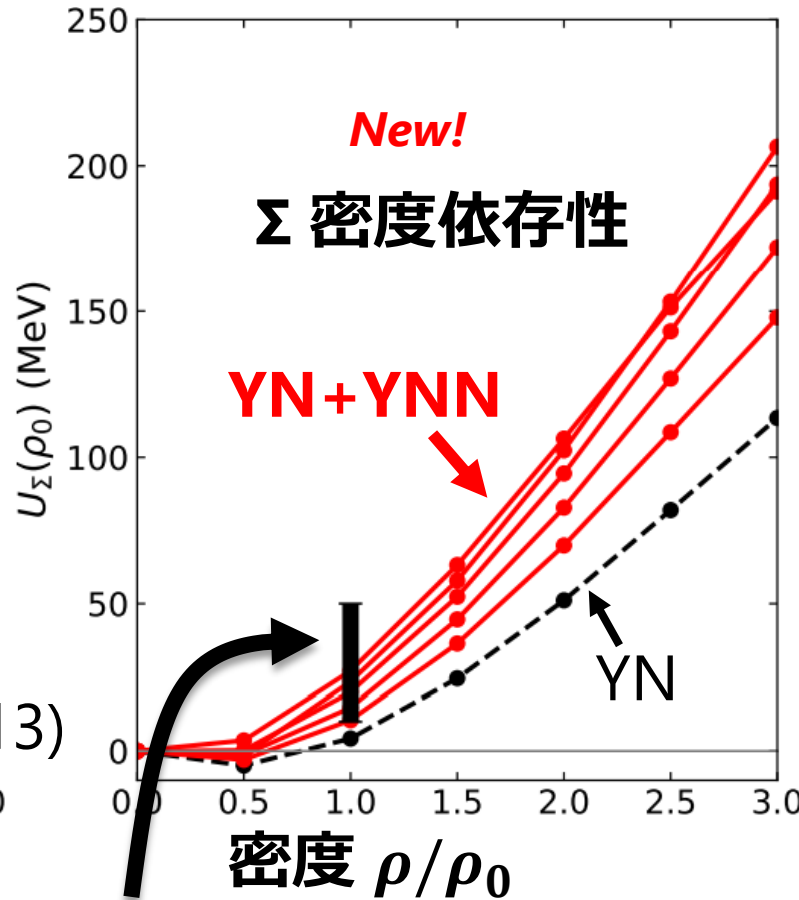
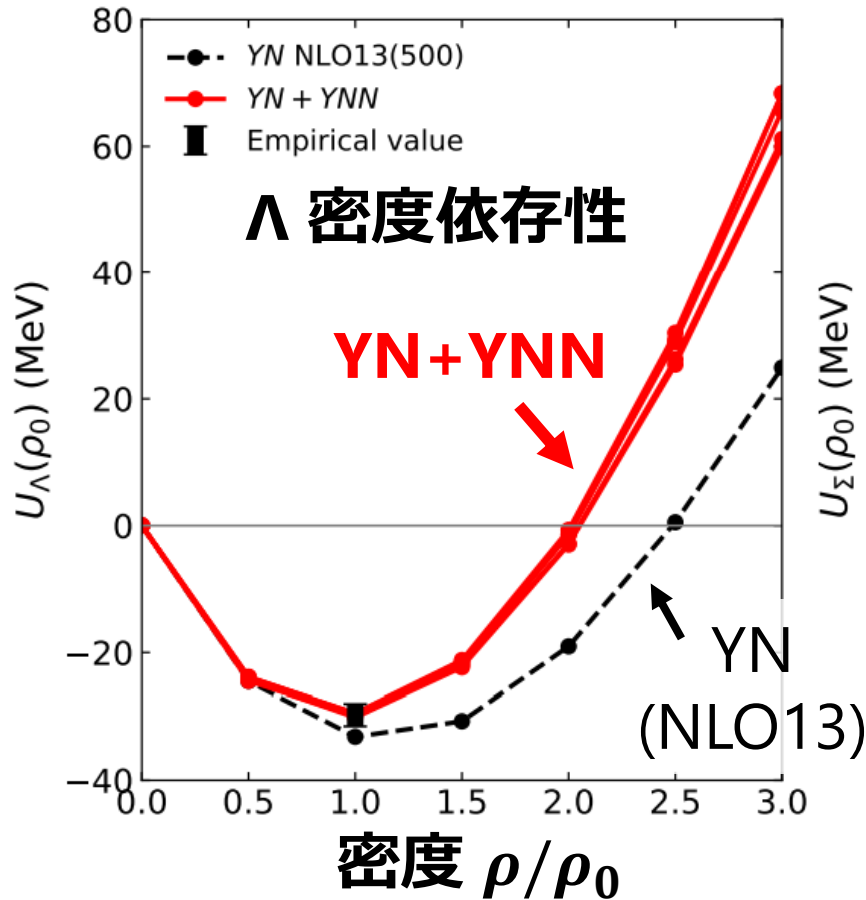
12/24

[AJ](#), K. Murase, and Y. Nara, PoS EXA-LEAP2024, 034 (2025).

Symmetric nuclear matter

有効質量 $m_{\Lambda}^*/m_{\Lambda} = 0.7$

(Λ ハイパー核: $0.95 > m_{\Lambda}^*/m_{\Lambda} > 0.65$)



3BFの低エネルギー定数は以下の条件を満たすように選べる:

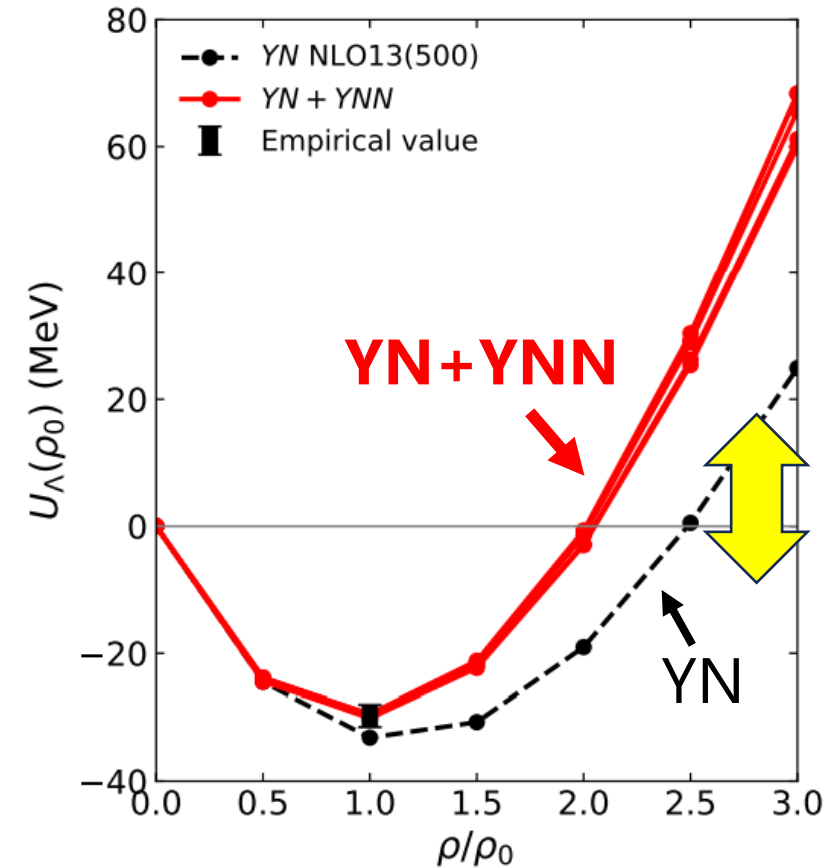
- 中性子星内にハイペロンが現れない
 - Λ ハイパー核の制限
 - Σ 1粒子ポテンシャルの現象論的な値
- D. Gerstung, N. Kaiser, & W. Weise (2020)

Σ原子データなどを元にした現象論: $U_{\Sigma}(\rho_0) = 30 \pm 20$ MeV

A. Gal, E. V. Hungerford, & D. J. Millener (2016).

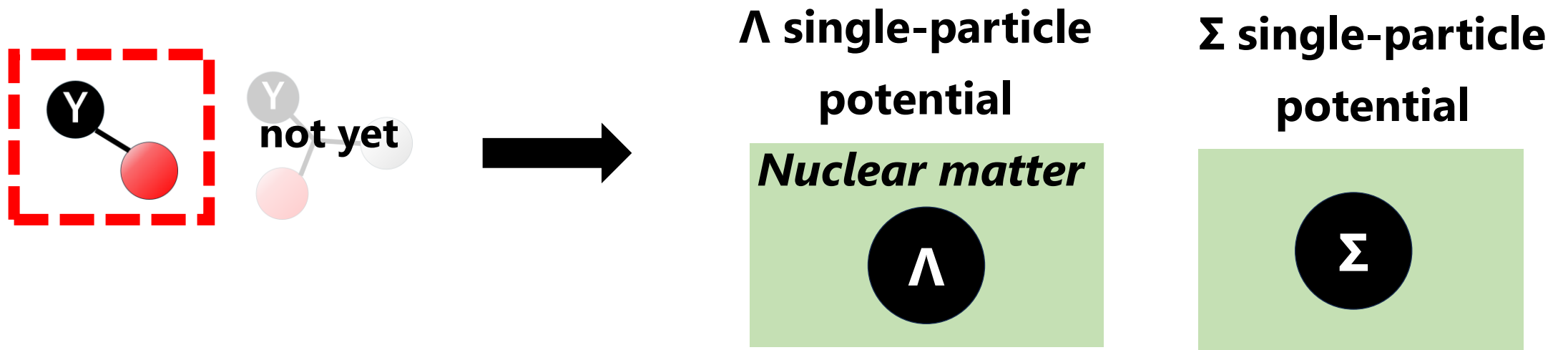
とても良さそう...?

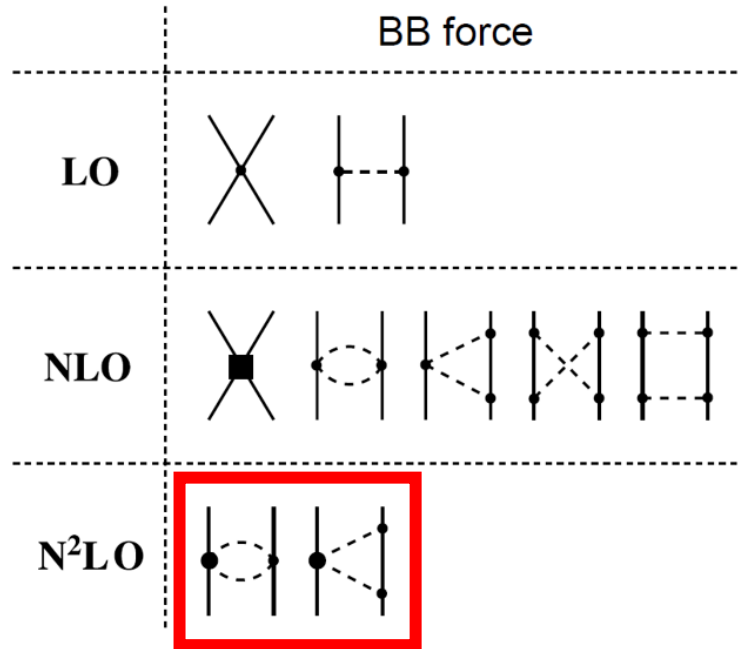
- 2体力として、NLO13(500) およびNLO19(500)のみを使用している。本来なら、複数のカットオフ (500 – 600) を使用するべきである。
- さらに、2023年に、よりオーダーの一つ高い **N2LO**の相互作用が構築された。まず2体力から、これまでの描像がどれほど変わりうるかを議論しよう！



Λ and Σ single-particle potentials by YN force at N2LO

[AJ](#), J. Haidenbauer, and U.-G. Meißner, Phys. Rev. C 112, 065209 (2025).





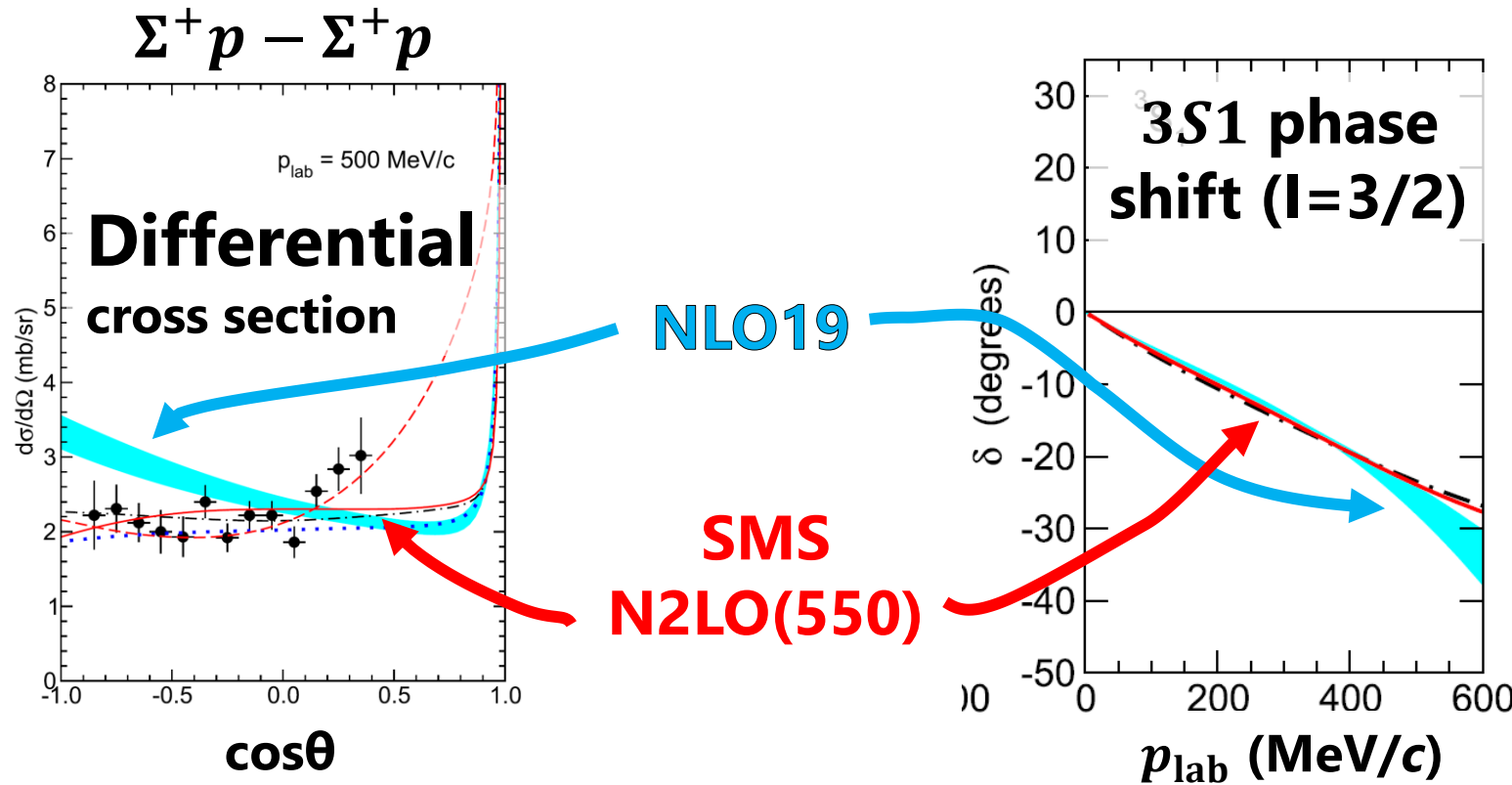
- LO in 2006: H. Polinder, J. Haidenbauer, & U.-G. Meißner.
- First version up to NLO (**NLO13**) in 2013
J. Haidenbauer, S. Petschauer, N. Kaiser, U.-G. Meißner, A. Nogga, & W. Weise
- Alternative version up to NLO (**NLO19**) in 2019
J. Haidenbauer, U.-G. Meißner, & A. Nogga
- **N2LO in 2023!**
J. Haidenbauer, U.-G. Meißner, A. Nogga, & H. Le, Eur. Phys. J. A 59, 63 (2023).

N2LO YN force has several extensions from the NLO13 and NLO19 YN forces.

Review: J. Haidenbauer, Ulf-G. Meißner, & A. Nogga, arXiv:2508.05253

- J-PARC E40 data impose further constraints on **3S1 channel**.

- $\Sigma^+ p$: Nanamura et al., PTEP 2022, 093D01 (2022).
- $\Sigma^- p$: Miwa et al., Phys. Rev. C 104, 045204 (2021).



Black dash-dotted: SMS NLO(550)
 Red solid: SMS N2LO(550)a
 Red dashed: SMS N2LO(550)b. Readjusted P-wave LECs to produce an overall angular dependence
 Cyan band: NLO19
 Blue Dotted: NLO19(600) with a readjusted 3S1-3D1 LEC
 Circle: J-PARC E40 data

How do hyperons in matter behave?

A better regularization scheme called Semi-local momentum space regularization (SMS) is applied.

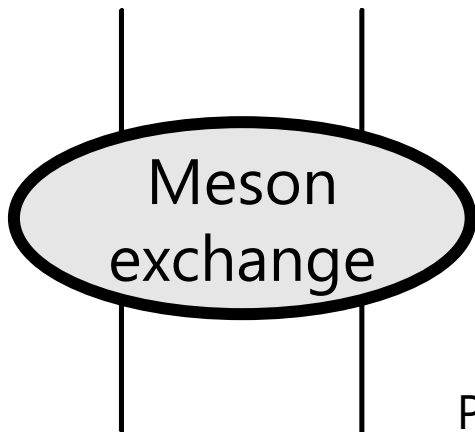
P. Reinert, H. Krebs, and E. Epelbaum, Eur. Phys. J. A 54 (2018) 5.

- **NLO13 and NLO19: all potentials are non-locally regularized as**

$$V_{\text{reg}}(p, p'; \Lambda) = V(p, p') \exp\left[-\frac{p^4 + p'^4}{\Lambda^4}\right]$$

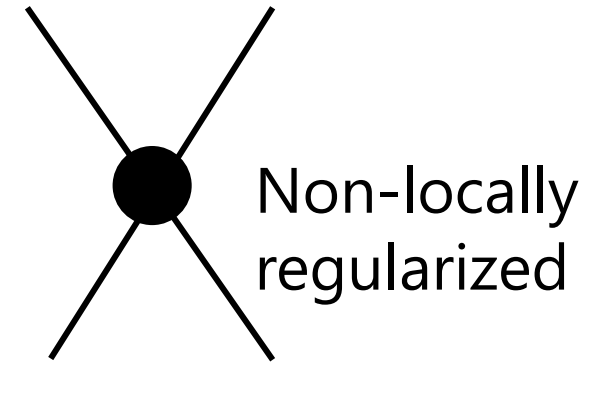
- **SMS N2LO:** Eg. 1π exchange

$$V_{\text{reg}}^{1\pi}(q; \Lambda) \propto \frac{1}{q^2 + m_\pi^2} \exp\left(-\frac{q^2 + m_\pi^2}{\Lambda^2}\right)$$



- ✓ **NOT disturbing the long-range behavior**
- ✓ **Realizing the construction of NN N4LO⁺. (Better convergence!)**

P. Reinert, H. Krebs, and E. Epelbaum, Eur. Phys. J. A 54 (2018) 5.



- NN: up-to-date chiral interaction SMS N4LO⁺(450)
P. Reinert, H. Krebs, and E. Epelbaum. Eur. Phys. J. A54(5), 86 (2018).
- YN: SMS up to N2LO
NLO13 and NLO19 for comparison
- Brueckner theory is utilized to evaluate the single-particle potentials.
E.g. M. Kohno et al., NPA 674, 225 (2000), S. Petschauer et al., EPJA 52, 15 (2016).

$$G = v^{(2)} + v^{(2)} \frac{Q}{e} G,$$

$$U_Y = \sum_{m \leq A} \langle Y m | G(\omega = \epsilon_Y + \epsilon_m) | Y m \rangle$$

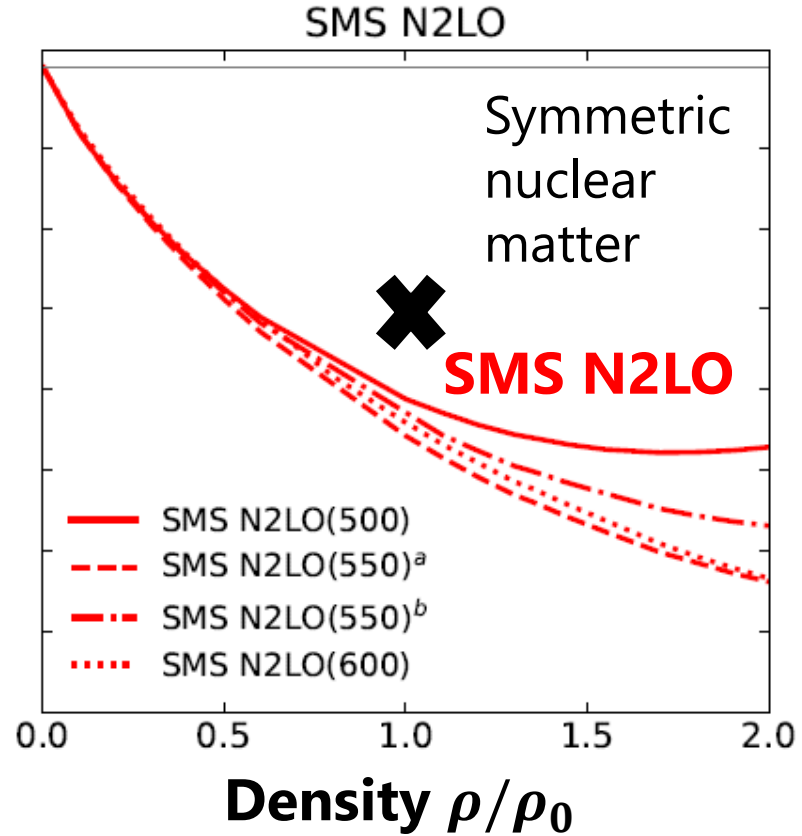
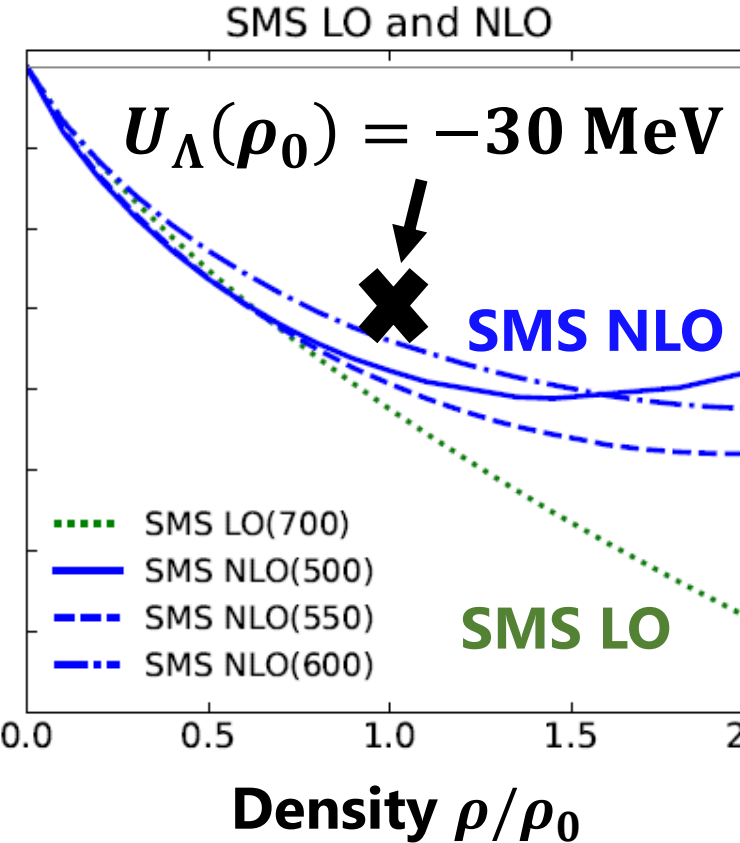
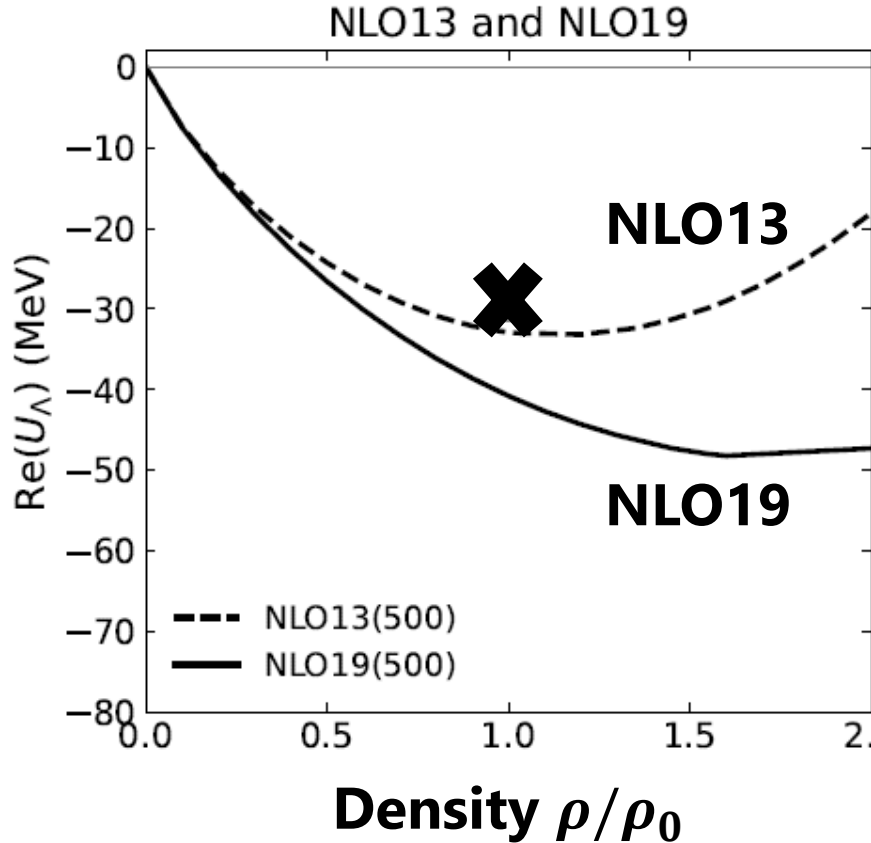
Pauli op.

$$Q |pq\rangle = \begin{cases} |pq\rangle & \text{for } p, q > A \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad e(\omega) = \omega - H_0$$

Continuous choice ($U_B(k) \neq 0$ for $k > k_F$) is employed,
a better choice than gap choice ($U_B(k) = 0$ for $k > k_F$)

Λ density dependence

19/24



NLO19, SMS NLO and N2LO show similar trend, $U_\Lambda(\rho_0) = -45$ to -35 MeV

Cf. A recent phenomenological analysis:

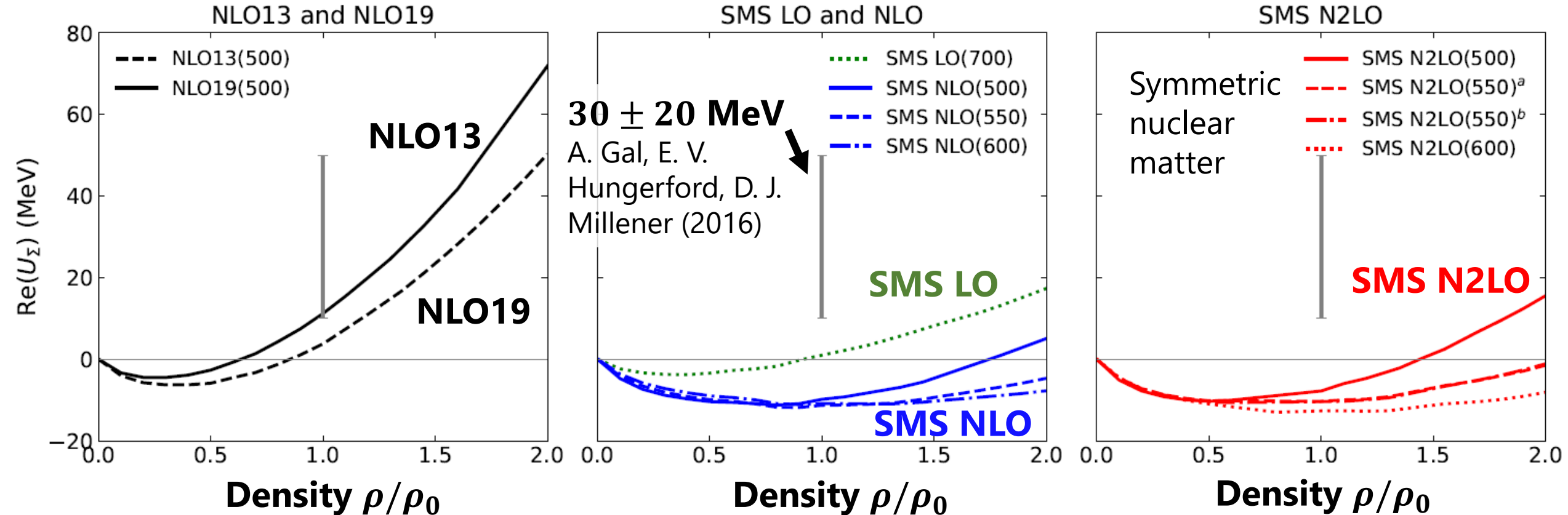
$$U_\Lambda^{(\text{Two-body force})}(\rho_0) = -38.6 \pm 0.8 \text{ MeV}$$

E. Friedman and A. Gal, Nucl. Phys. A 1039, 122725 (2023).

YNN should make ≈ 10 MeV of repulsion at ρ_0 .

Σ density dependence

20/24



SMS NLO and N2LO yield more attractive $U_\Sigma(\rho_0) \approx -10$ MeV than NLO13 and NLO19, $U_\Sigma(\rho_0) \approx 10$ MeV.

(Note) Extraction of $U_\Sigma(\rho_0)$ from exp. data has many discussions: Cf. E. Oset et al., Phys. Rept. 188, 79 (1990); M. Kohno et al., PRC 74, 064613 (2006); T. Harada and Y. Hirabayashi, Phys. Rev. C, 107, 054611 (2023)

Σ partial-wave decomposition

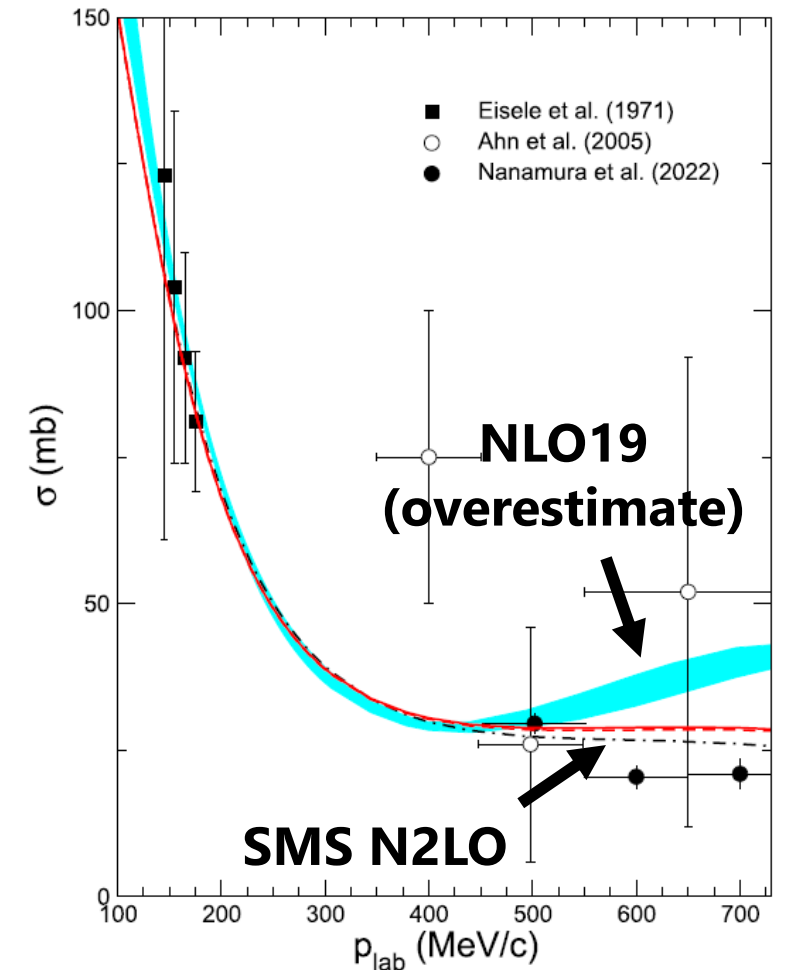
21/24

	Isospin $I_0 = 1/2$			Isospin $I_0 = 3/2$		
	1S_0	$^3S_1 + ^3D_1$	P	1S_0	$^3S_1 + ^3D_1$	P
SMS LO(700)	7.1	-16.7	-1.9	-10.4	24.7	-1.5
SMS NLO(550)	8.0	-25.0	-0.3	-10.7	20.3	-3.4
SMS N ² LO(550) ^a	7.5	-24.9	3.4	-11.0	20.0	-4.4
SMS N ² LO(550) ^b	7.5	-24.8	3.6	-11.0	20.0	-5.0
NLO13(500)	6.2	-26.2	3.7	-11.1	32.5	-0.8
NLO19(500)	6.0	-19.5	3.8	-10.4	32.7	-0.8

J-PARC E40 data constraint on the $\Sigma^+ p$ cross section leads to less repulsive isospin 3/2 channel ($\equiv \Sigma^+ p$).

$\Sigma^+ p$ data: Nanamura et al., PTEP 2022, 093D01 (2022).

$\Sigma^+ p$ elastic cross section



Uncertainty estimate (Truncation error) 22/24

- Within chiral expansion, an observable X up to i th order is expressed as

$$X^{(i)} = X^{\text{LO}} + \Delta X^{\text{NLO}} + \Delta X^{\text{N}^2\text{LO}} + \dots \Delta X^i$$

$$\mathcal{O}(Q^0) \quad \mathcal{O}(Q^2) \quad \mathcal{O}(Q^3)$$

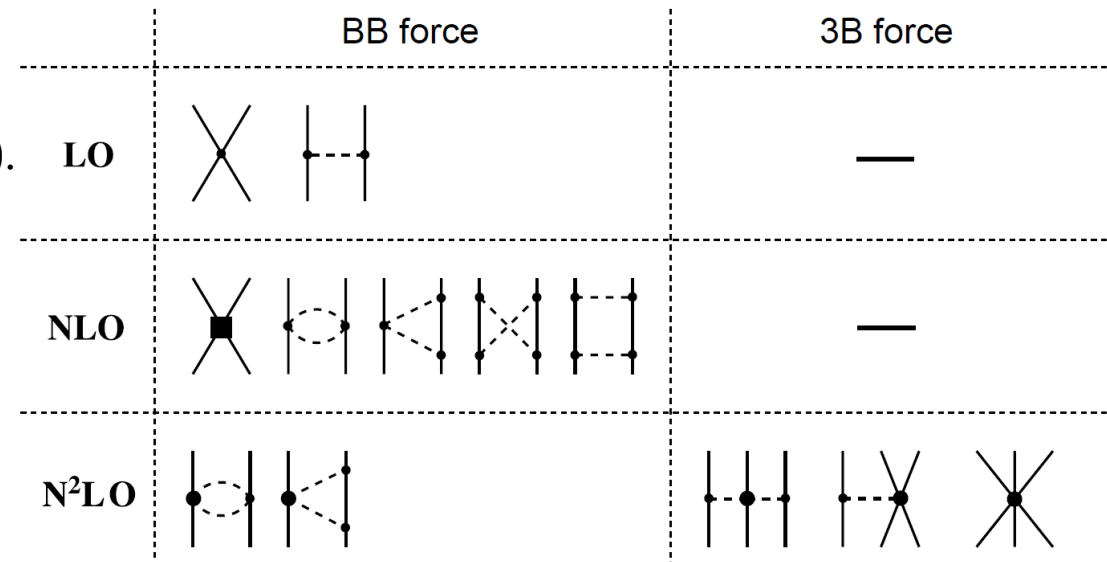
- Error at i th order would be estimated as

E. Epelbaum, H. Krebs, and U.-G. Meißner, PRL, 115, 122301 (2015).

$$\delta X^{\text{LO}} = Q^2 |X^{\text{LO}}|,$$

$$\delta X^{\text{NLO}} = \max \left(Q^3 |X^{\text{LO}}|, Q |X^{\text{NLO}} - X^{\text{LO}}| \right),$$

$$\delta X^{\text{N}^2\text{LO}} = \max \left(Q^4 |X^{\text{LO}}|, Q^2 |X^{\text{NLO}} - X^{\text{LO}}|, \right. \\ \left. Q |X^{\text{N}^2\text{LO}} - X^{\text{NLO}}| \right),$$

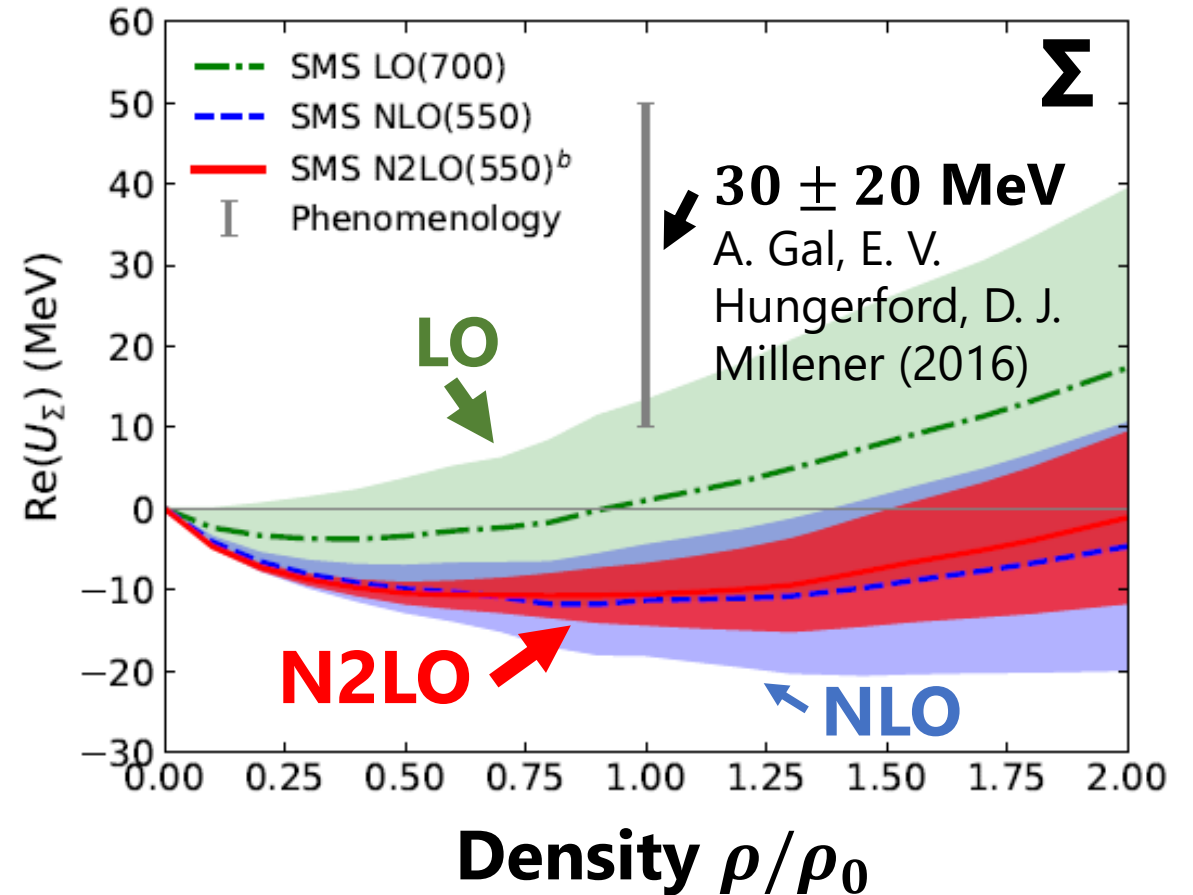
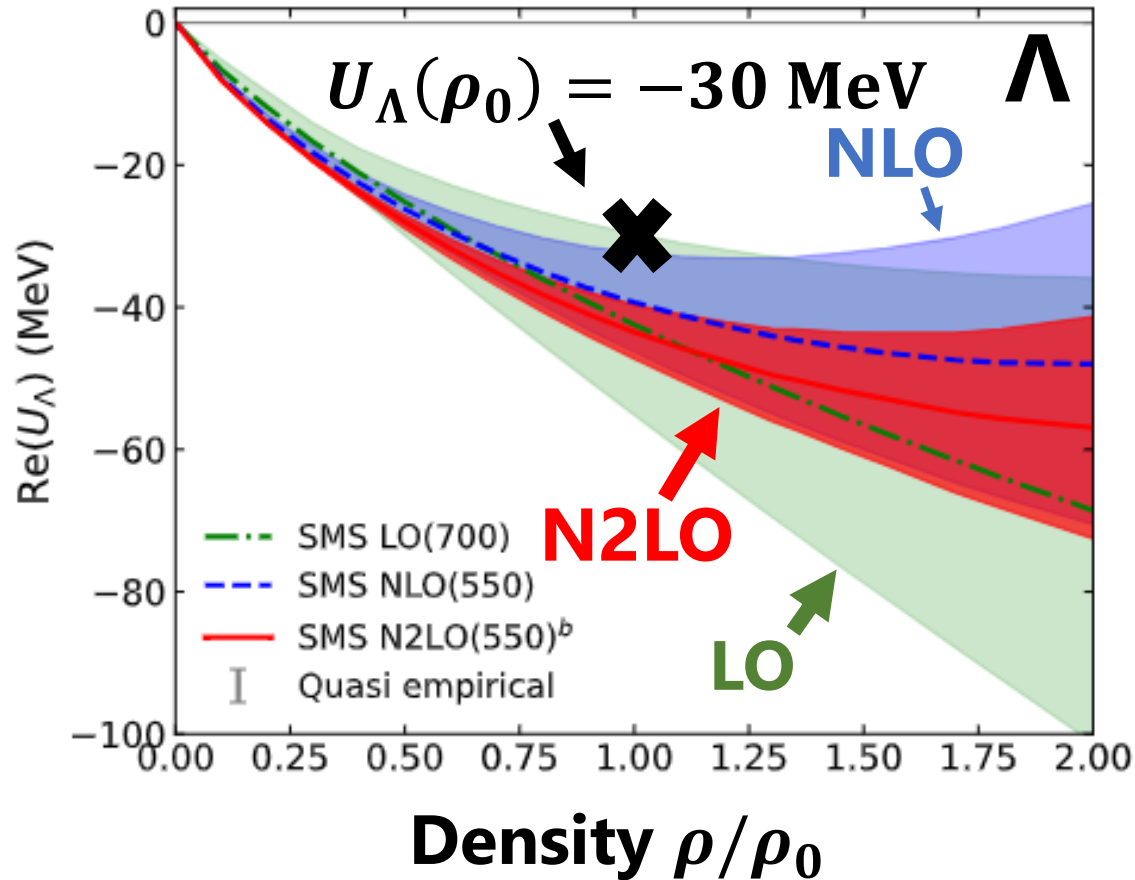


Adopted from E. Epelbaum's slide

- $Q = \max(p/\Lambda_b, M_\pi/\Lambda_b)$, p : Fermi momentum.

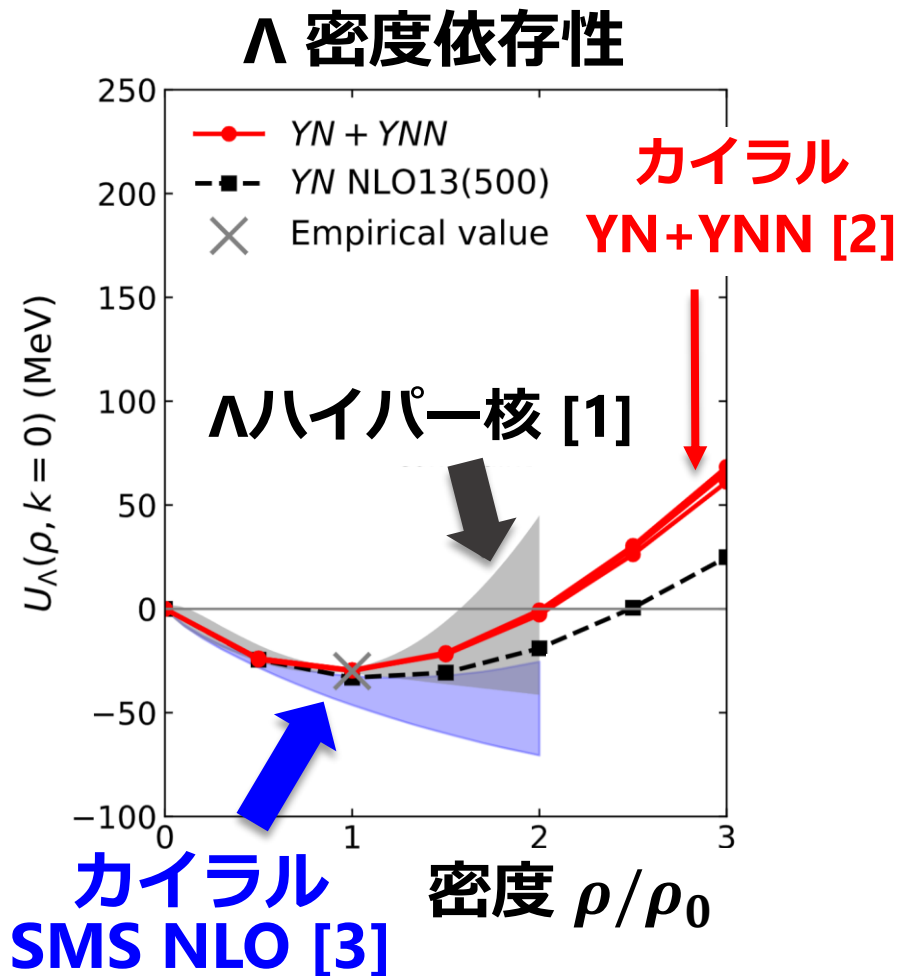
$\Lambda_b = 480$ MeV as inferred from a Bayesian method on nuclear matter

J. Hu, P. Wei, and Y. Zhang, Phys. Lett. B 798, 134982 (2019).



- NLO error provides a glimpse on the size of YNN first appears at N2LO.
- YNN must create a repulsion at ρ_0 , as one can see from the N2LO error.

Summary



- ラムダ1粒子ポテンシャル U_Λ は、中性子星中心部でハイペロンの出現する密度に直結。
- **カイラルNLO(YN+YNN)**: ハイペロンパズルを生まないほど、高密度側で斥力的。現状の $\Lambda \cdot \Sigma$ 1粒子ポテンシャルの現象論的な値と整合。
- **カイラルNLO**: Λ ハイパー核の制限と無矛盾。一方、従来のYN+YNNとは非整合。
- (Future work) 少数 Λ ハイパー核から決めたYNN（密度依存2体力）の導入
H. Le, J. Haidenbauer, U.-G. Meißner, and A. Nogga, Phys. Rev. Lett. 134, 072502, (2025)

[1] [AJ](#) et al., PRC 108, 065803 (2023).

[2] [AJ](#) et al., PoS EXA-LEAP2024, 034 (2025).

[3] [AJ](#) et al., PRC 112, 065209 (2025).