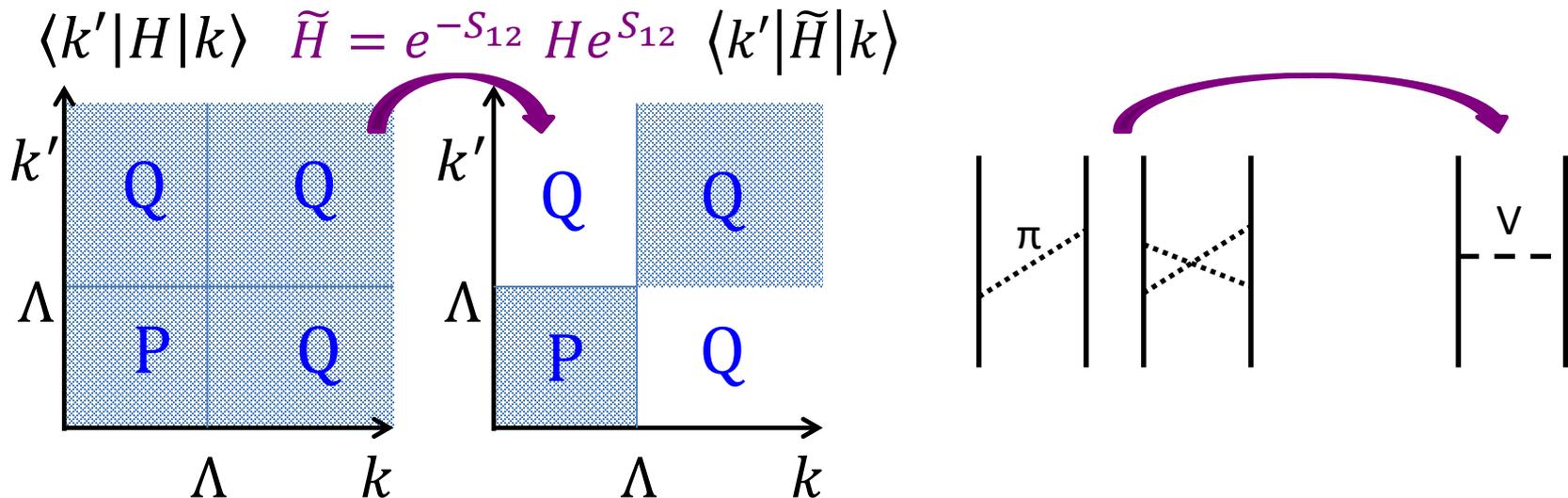


# バリオン多体系と3体力

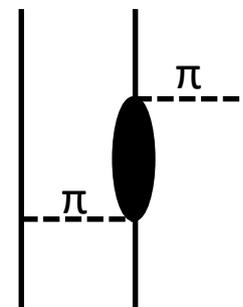
河野通郎 (RCNP, 大阪大学)

- 3体力概念: 2体レベルで消去した自由度が関わる、多体空間での効果
  - 核力の場合: パイオン、アイソバー、核子励起状態に関する媒質効果
  - 低運動量空間(模型空間)内等価(有効)相互作用の場合: 誘起3体力
- 原子核の飽和性の定量的な理解には3体力の寄与が決定的に重要
  - 斥力芯や、テンソル相関のパウリ抑制による説明は定量的には不十分
- 最近の計算の示唆: これまでの少数系で決定した3体力は、重い核・核物質を良く記述しない(ChEFTでも、Illinoi等でも)
- 模型空間内有効相互作用に対する誘起3体力は無視できない
  - ab initio 計算での誘起3体力の考慮は不可欠(SRG法, UMOA)
  - 主要効果は、(密度・構造依存)正規順序化2体力として扱えるだろう
    - (SkyrmeやDFTのような)密度依存有効相互作用による記述との接点
- 中性子物質中のハイペロンに対する3体力効果を、ChEFT pot. で考察

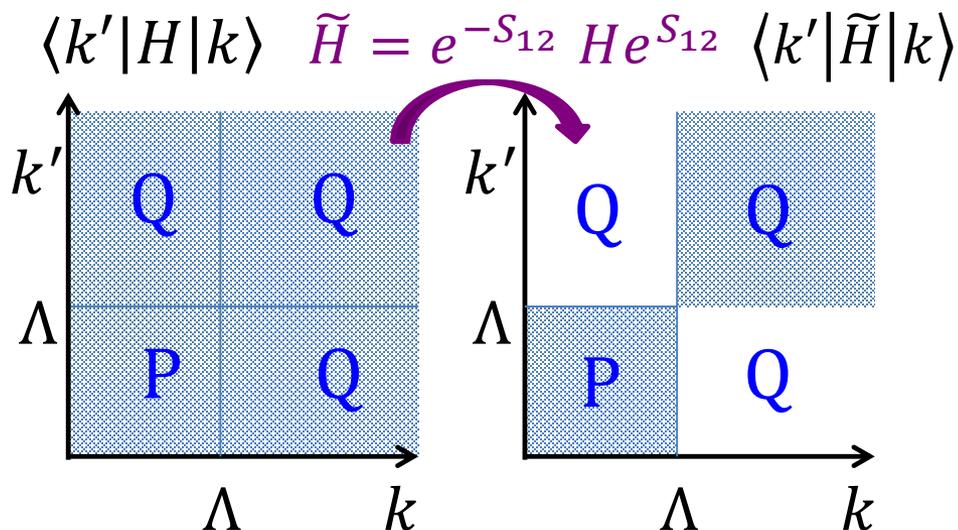
# 核子間ポテンシャル: メゾン自由度の消去



- 2核子間に瞬間的に作用するポテンシャルは、ユニタリ変換によりメゾンの自由度を消去して構成される [Okubo, PTP64 (1958)]
- ユニタリ変換  $e^{S_{12}}$  は、2核子の空間からメゾンを含む空間を分離する条件  $\langle Q|\tilde{H}|P\rangle = \langle P|\tilde{H}|Q\rangle = 0$  を満たす
- 多核子空間では、ユニタリ変換により多体力が誘起される
  - 典型的な例: Fujita-Miyazawa 3体力



# 制限された空間（模型空間、低運動量空間）内の等価相互作用

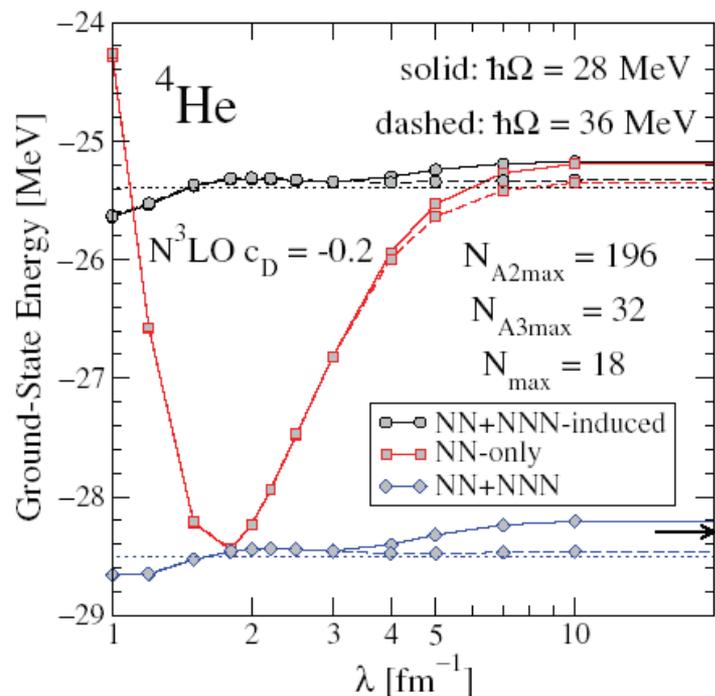
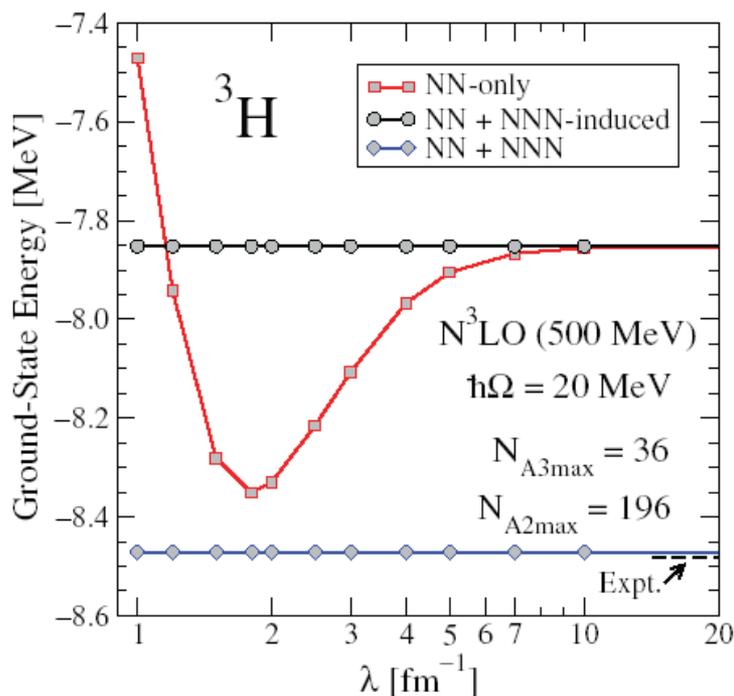


- ハミルトニアン  $H$  にユニタリ変換  $e^{S_{12}}$  を施し、模型空間  $P$  内の等価相互作用  $\tilde{H}$  を導入  
[Suzuki and Lee, PTP64 (1980)]

- 次の分離条件を満たす2体空間でのユニタリ変換  $e^{S_{12}}$   
 $\langle Q|\tilde{H}|P\rangle = \langle P|\tilde{H}|Q\rangle = 0$  （ブロック対角化）
  - 特異性を持つ高運動量成分の除去
- 固有値、すなわち模型空間  $P$  内の on-shell の性質は無変化
  - Off-shell の性質は変化する
- 多体空間では、ユニタリ変換により多体力が誘起される

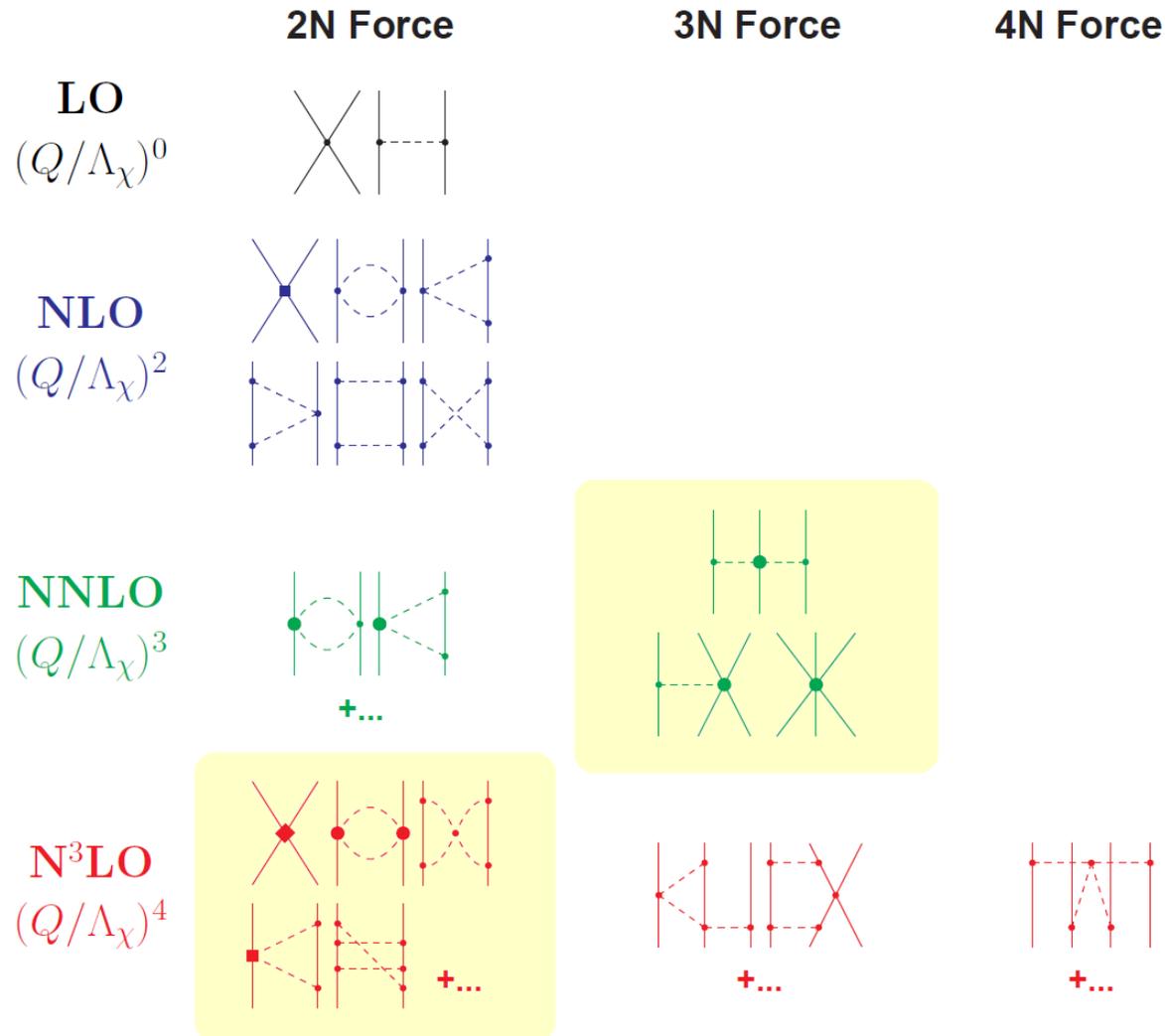
# SRG 法による計算での誘起3体力の寄与の例

- 赤い線: SRG 法による低運動量空間2体相互作用を用いた計算結果
- 誘起3体力を取り入れると、正確な多体計算の結果を再現
  - $\lambda$  は低運動量空間のスケール
  - 実験値の再現のためには、本当の(引力的)3体力が必要

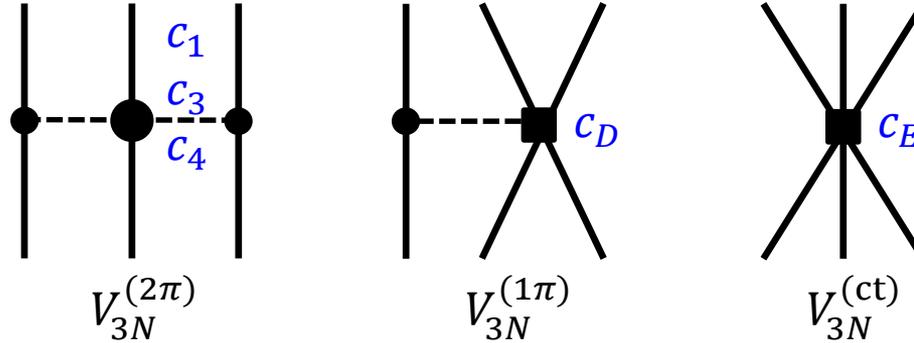


E.D. Jurgenson, P. Navratil, and R.J. Furnstahl, Phys. Rev. C83, 034301 (2011)  
 "Evolving nuclear many-body forces with the similarity renormalization group"

# カイラル有効場理論による核力記述



# NNLO 3NFs in Ch-EFT



$$V_{3N}^{(2\pi)} = \sum_{i \neq j \neq k} \frac{g_A^2}{8f_\pi^4} \frac{(\boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathbf{q}_i)(\boldsymbol{\sigma}_j \cdot \mathbf{q}_j)}{(\mathbf{q}_i^2 + m_\pi^2)(\mathbf{q}_j^2 + m_\pi^2)} F_{ijk}^{\alpha\beta} \tau_i^\alpha \tau_j^\beta$$

$$F_{ijk}^{\alpha\beta} = \delta^{\alpha\beta} [-4c_1 m_\pi^2 + 2c_3 \mathbf{q}_i \cdot \mathbf{q}_j] + c_4 \epsilon^{\alpha\beta\gamma} \tau_k^\gamma \boldsymbol{\sigma}_k \cdot (\mathbf{q}_i \times \mathbf{q}_j)$$

$$V_{3N}^{(1\pi)} = - \sum_{i \neq j \neq k} \frac{g_A c_D}{8f_\pi^4 \Lambda_\chi} \frac{\boldsymbol{\sigma}_j \cdot \mathbf{q}_j}{(\mathbf{q}_j^2 + m_\pi^2)} \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathbf{q}_j \boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j$$

$$V_{3N}^{(ct)} = \sum_{i \neq j \neq k} \frac{c_E}{2f_\pi^4 \Lambda_\chi} \boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j$$

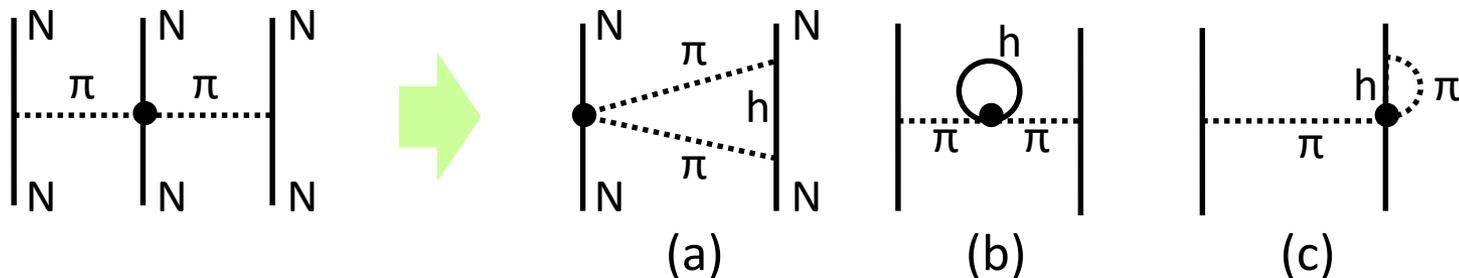
$$\mathbf{q}_i = \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_i, \Lambda_\chi = 700 \text{ MeV}$$

$c_1 = -0.81 \text{ GeV}^{-1}$ ,  $c_3 = -3.4 \text{ GeV}^{-1}$ , and  $c_4 = 3.4 \text{ GeV}^{-1}$  are fixed in NN sector.  $c_D$  and  $c_E$  are to be determined in many-body systems.

# 3体力の正規順序2体力化

- 3体力の一つの自由度を核子の占有状態で積分して2体力化

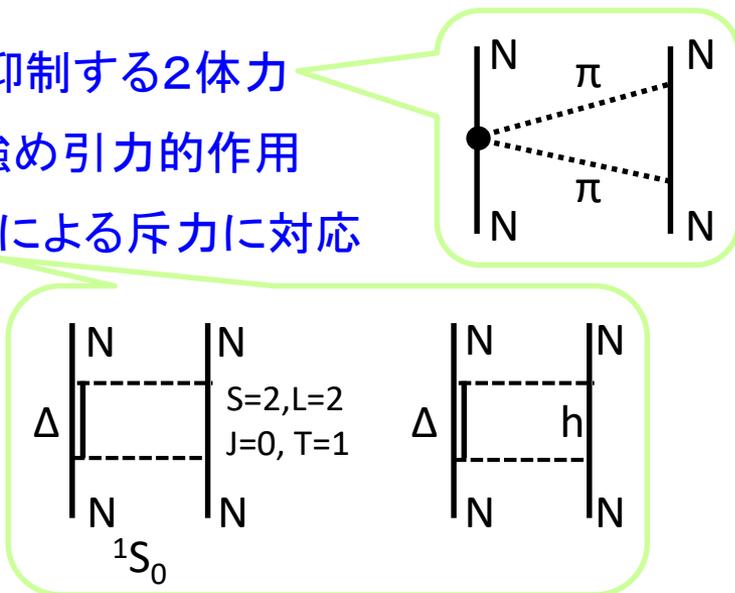
$$\langle ab|v_{12(3)}|cd\rangle_A \equiv \sum_h \langle abh|v_{123}|cdh\rangle_A$$



- (a)  ${}^3S_1$ - ${}^3D_1$  では、one-pion-exchange の tensor を抑制する2体力  
 に対する、媒質内パウリ効果  $\rightarrow$  tensor 力を強め引力的作用  
 ${}^1S_0$ ,  ${}^3P_1$  では、 $\Delta$  励起引力に対するパウリ効果による斥力に対応

- (b) pion 波動関数(質量)に対する核媒質効果  
 (c)  $\pi NN$  バーテックスに対する核媒質効果

[注] (b) と (c) の寄与はキャンセルする傾向



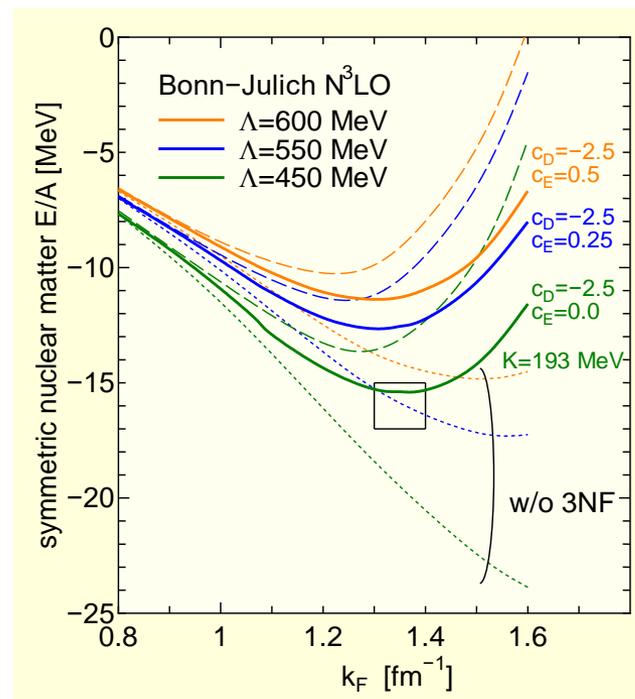
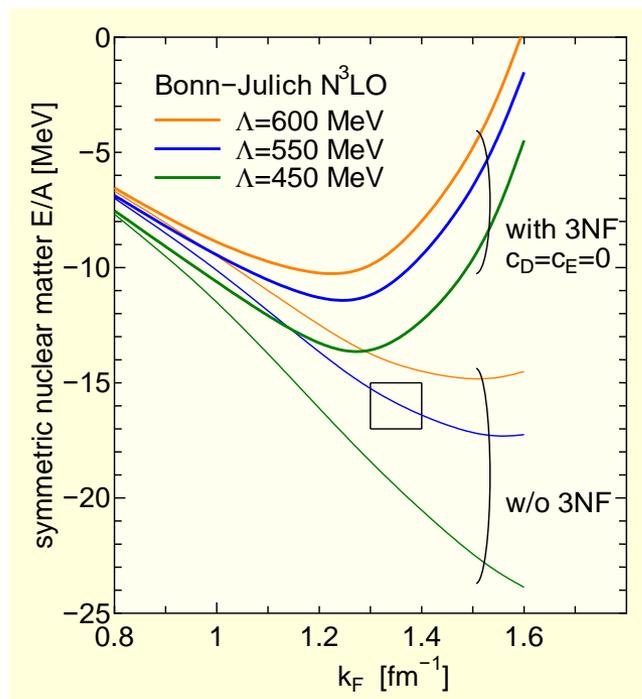
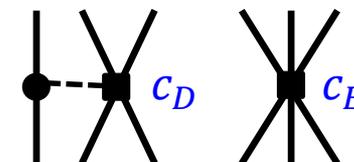
# ChEFT の NN+”3NF” を用いた LOBT 計算

## 3種類の cutoff $\Lambda$ を用いた対称核物質飽和曲線

■  $c_D = c_E = 0$  の場合

■ Pauli 効果としての、3体力の斥力的寄与は非常に大きい

■  $c_D, c_E$  を調節



少数系で決定した  $c_D, c_E$  が核物質の飽和性を再現しないことは知られている。重い核と核物質の性質を再現するように、NNLO レベルでパラメーターを決めることが試みられている。[NNLO<sub>sat</sub>, Ekström et al., Phys.Rev. C91 (2015) 051301]

# ChEFT 3体力の寄与のまとめ

- 現象論的調節は最小限
  - 3体力を口実にした(1970年代の密度依存 HF 法で行われたような)現象論的調節を避ける
- ChEFT の3体力効果
  - 飽和性の記述が大きく改善される
    - テンソル相関のパウリ抑制効果は重要だが決定的ではない
  - スピン-軌道力が 20% 程度強められる
    - それでも、経験的な強さと比べると、不足(テンソル力とも関係する)
  - テンソル力が 15% 程度強められる
    - 微視的テンソル力の強さは、最近の Skyrme HF で用いられる強さと逆符号
  - 散乱を記述する optical model potential の虚部が強められる
- 3体力に関する最近の研究
  - $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$  の量子変分計算の結果は、少数系をよく記述する3体力は斥力が強く、束縛エネルギーが小さく広がりすぎることを示す
  - ChEFT の場合、少数系で決定した3体接触項パラメーター  $c_D, c_E$  では、(ab initio SRFG+CCM 計算の結果)重い核が再現できない

## 3体力自身の核媒質依存性

- Ch-EFT では、3体セクターのパラメーター  $c_D, c_D$  は少数系で決められるが、それを用いた重い核の性質や核物質の飽和性は良い結果にならない
  - 重い核・核物質の性質を再現するようにパラメーターを調節する  
[Ekström et al., Phys.Rev. C91, 051301 (2015) : NNLO<sub>sat</sub>]
- $A \leq 12$  で成功していた AV18 + Illinois-7 3BF を用いた量子モンテカルロ計算は、 $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$  を再現しない [Lonardonì et al., Phys.Rev. C96, 024326 (2017)]
  - 束縛エネルギーは不足し、半径は大きすぎる
  - 少数系で決定した3体力は、重い核には不十分
- 消去した自由度自身に対する媒質効果の存在 ➡ 多体力は媒質依存
  - アイソバー  $\Delta$  を陽に扱う定式化の試み [Ekström et al., arXiv: 1707.09028]
    - ChEFT では pion に対する w.f. renormalization と vertex correction の変化は、3体力によりある程度取り入れられる

# Cluster Variational Monte Carlo 計算 (1)

“Variational calculation of the ground state of closed-shell nuclei up to  $A = 40$ ”,  
 Lonardonì, Lovato, Pieper, and Wiringa, P.R.C **96**, 024326 (2017)

Nucl.	Obs.	Potential	CVMC	Expt.	Unit	VMC	GFMC
${}^4\text{He}$	$\langle E/A \rangle$	AV18	-5.73	-7.07	MeV	-5.93	-6.02
		AV18+UIX	-6.70			-6.95	-7.08
	$\langle r_{ch}^2 \rangle^{1/2}$	AV18	1.725	1.676	fm	1.734	---
		AV18+UIX	1.573			1.665	1.661

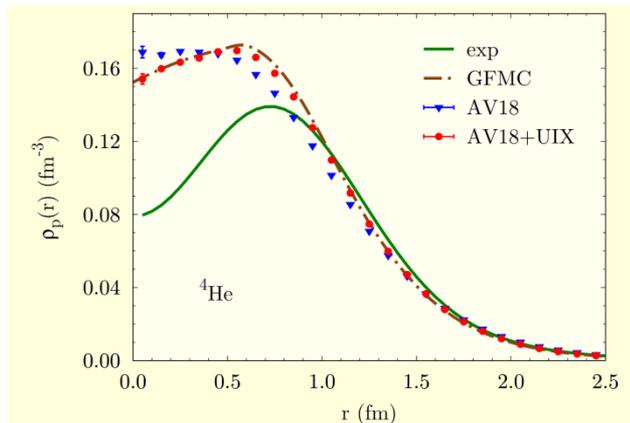


FIG. 1. Point proton densities in  ${}^4\text{He}$ . The solid green line refers to the “experimental” result; see text for details. The dash-dotted brown line is the GFMC result for AV18+UIX [55].

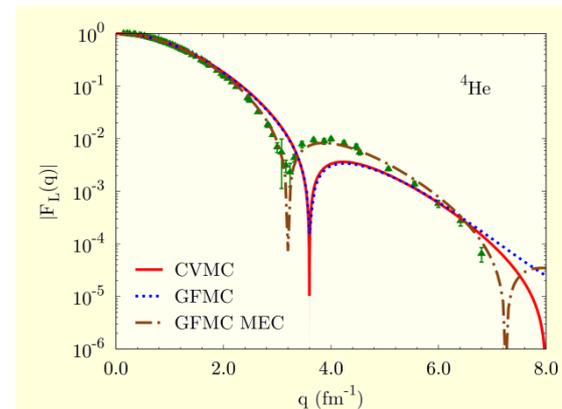


FIG. 17. Longitudinal elastic form factors for  ${}^4\text{He}$ . Results employing the AV18+UIX potential are reported for CVMC and GFMC, the latter with and without MECs. Experimental results are the same as in Fig. 16.

# Cluster Variational Monte Carlo 計算 (2)

Nucl.	Obs.	Potential	CVMC	Expt.	Unit
$^{16}\text{O}$	$\langle E/A \rangle$	AV18	-5.51	-7.98	MeV
		AV18+UIX	-5.15		
	$\langle r_{ch}^2 \rangle^{1/2}$	AV18	2.538	2.699	fm
		AV18+UIX	2.745		
$^{40}\text{Ca}$	$\langle E/A \rangle$	AV18	-5.88	-8.55	MeV
		AV18+UIX	-4.92		
	$\langle r_{ch}^2 \rangle^{1/2}$	AV18	3.361	3.478	fm
		AV18+UIX	3.617		

- $^{16}\text{O}$  と  $^{40}\text{Ca}$  では underbound, 対称核物質で束縛エネルギーが不足 (-11.85 MeV) することに対応
- 結局、(これまでの)核力と3体力は、軽い核は再現していたが、重い核を記述できない。

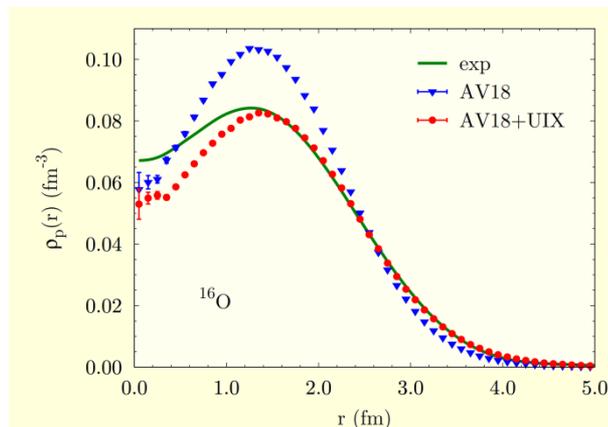


FIG. 2. Point proton densities in  $^{16}\text{O}$ . The green line refers to the “experimental” result; see text for details.

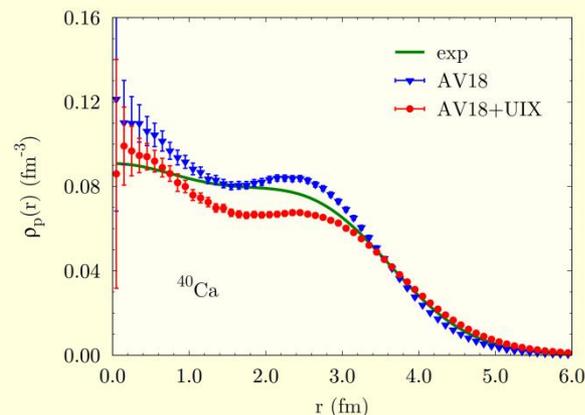


FIG. 3. Point proton densities in  $^{40}\text{Ca}$ . The green line refers to the “experimental” result; see text for details.

# ストレンジネスセクターの課題と中性子星物質

- ハイパー核研究
  - 実験データが少ない中での YN ポテンシャル構築
    - Nijmegen, Jülich, Kyoto-Niigata, その他
  - これらの YN 相互作用は、 $2\sim 3\rho_0$  の中性子物質で  $\Lambda$  が析出することを予測
  - $1.4M_{\odot}$  の標準的中性子星も説明できない → 3体力などの必要性
  - カイラル有効場理論による YN, YNN のパラメータ化が行われている
- 最近の観測による新情報
  - ①  $2M_{\odot}$  中性子星の発見, ② 2つの中性子星の合体からの重力波観測
- 中性子星物質の EOS 研究の活性化
  - 硬い EOS が必要であり、単純なハイペロン析出は望ましくない
  - YN 相互作用、YNN 3体相互作用の新たな課題
- 中性子星物質の EOS には、多くの(現象論的)研究・パラメータ化が存在し、不定性が大きい(中性子星観測データによる制限が期待される)
- カイラル有効場理論は、低エネルギー有効理論であり、適用範囲はせいぜい標準密度の2倍までであるが、標準密度の2倍以下でも、不定性の少ない理論考察は重要

# ストレンジネスセクターの ChEFT による YN と YNN 相互作用

- Bonn-Jülich-München group による構築

- Lowest order:

- Polinder, Haidenbauer, and Meißner, Nucl. Phys. A779, 244 (2006)
- Parameters:  $f_{NN\pi} = \frac{g_A}{2f_\pi}$  and  $\alpha = \frac{F}{F+D}$ , also five low-energy constants:

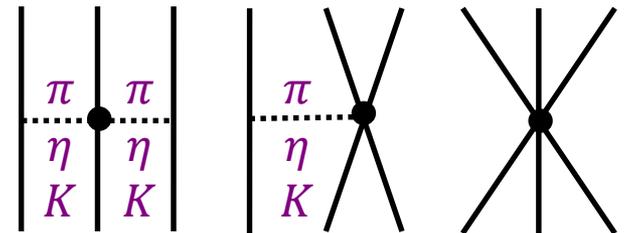
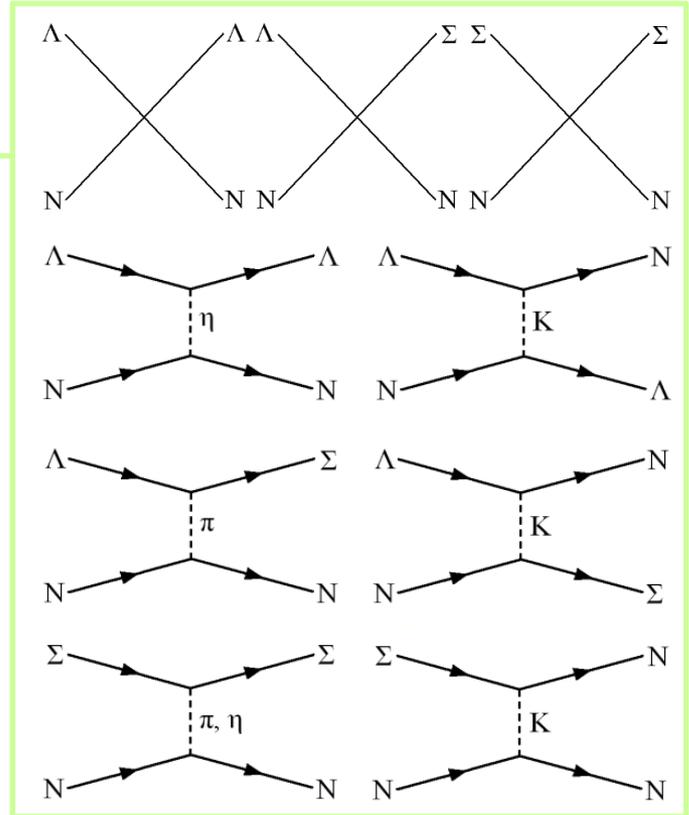
$$C_{1S0}^{\Lambda\Lambda}, C_{3S1}^{\Lambda\Lambda}, C_{1S0}^{\Sigma\Sigma}, C_{3S1}^{\Sigma\Sigma}, C_{3S1}^{\Lambda\Sigma}$$

- Next-to-Leading order

- Haidenbauer, Petschauer, Kaiser, Meißner, Nogga, and Weise, Nucl. Phys. A915, 24 (2013)

- Leading three-baryon forces (NNLO)

- Petschauer, Kaiser, Haidenbauer, Meißner, and Weise, Phys. Rev. C93, 014001 (2016)
- 低エネルギー一定数の評価は decouplet dominance 描像による



## 2-pion 交換の $\Lambda NN$ 3体力と2体化

- $2\pi$  exchange  $\Lambda NN$  3-body interaction  $V_{\Lambda NN}^{TPE}$

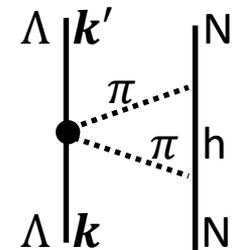
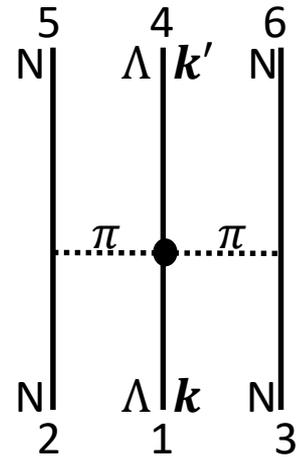
$$\frac{g_A^2}{3f_0^2} (\boldsymbol{\tau}_2 \cdot \boldsymbol{\tau}_3) \frac{(\boldsymbol{\sigma}_3 \cdot \mathbf{q}_{63})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{q}_{52})}{(\mathbf{q}_{63}^2 + m_\pi^2)(\mathbf{q}_{52}^2 + m_\pi^2)} \{-Am_\pi^2 + B\mathbf{q}_{63} \cdot \mathbf{q}_{52}\}$$

Petschauer による評価  $A = 0, B = -3.0 \text{ GeV}^{-1}$

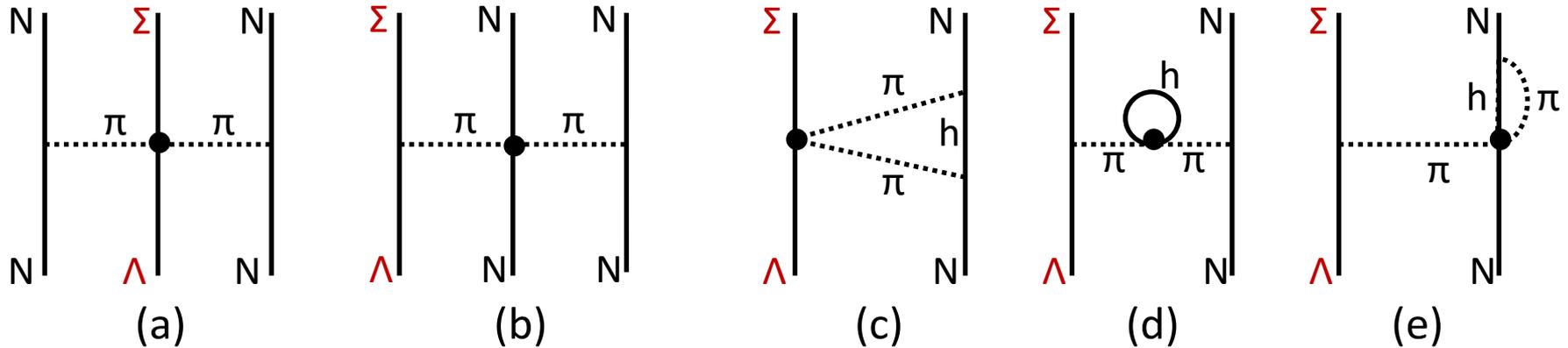
- 核物質での正規順序2体力

$$\begin{aligned} & \langle \mathbf{k}' \sigma_{\Lambda'}, -\mathbf{k}' \sigma' \tau' | V_{\Lambda N(N)} | \mathbf{k} \sigma_{\Lambda}, -\mathbf{k} \sigma \tau \rangle \\ & \equiv \frac{1}{2} \sum_{\mathbf{k}_h, \sigma_h, \tau_h} \langle \mathbf{k}' \sigma_{\Lambda'}, -\mathbf{k}' \sigma' \tau', \mathbf{k}_h, \sigma_h, \tau_h | V_{\Lambda NN} | \mathbf{k} \sigma_{\Lambda}, -\mathbf{k} \sigma \tau, \mathbf{k}_h, \sigma_h, \tau_h \rangle_A \end{aligned}$$

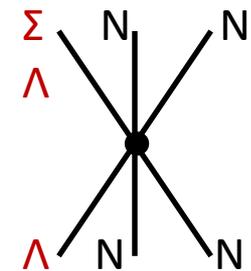
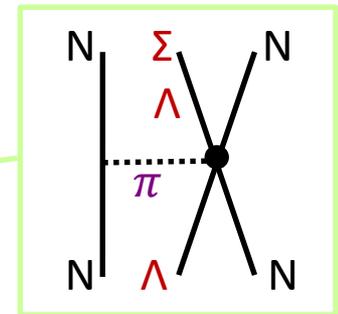
- 密度に依存する LS, ALS 成分
- テンソル成分は生じない
- 統計因子  $\frac{1}{2}$  が必要
- パウリブロックによる斥力効果をもたらす
- 部分波展開を行い、G-行列計算



## 2-pion 交換の $\Lambda$ NN- $\Sigma$ NN 3体力と2体化

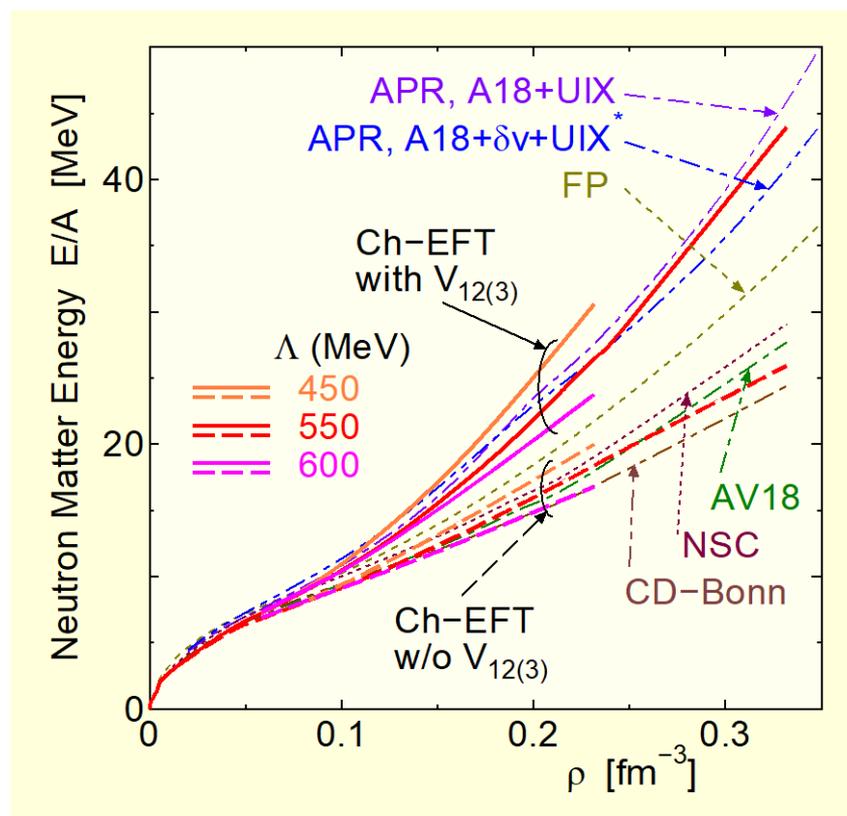


- $\Lambda$ NN- $\Sigma$ NN の場合、パウリブロッキング型の他に、核子の場合と同様、(d)と(e)が生じる
- $1\pi$  交換3体力は、結合定数の符号の選び方により斥力にも引力にもなる。ここでは取り入れていない。



# ChEFTによる中性子物質

- 中性子物質のEOSは中性子星研究の基礎
  - 3体力が与える斥力の必要性

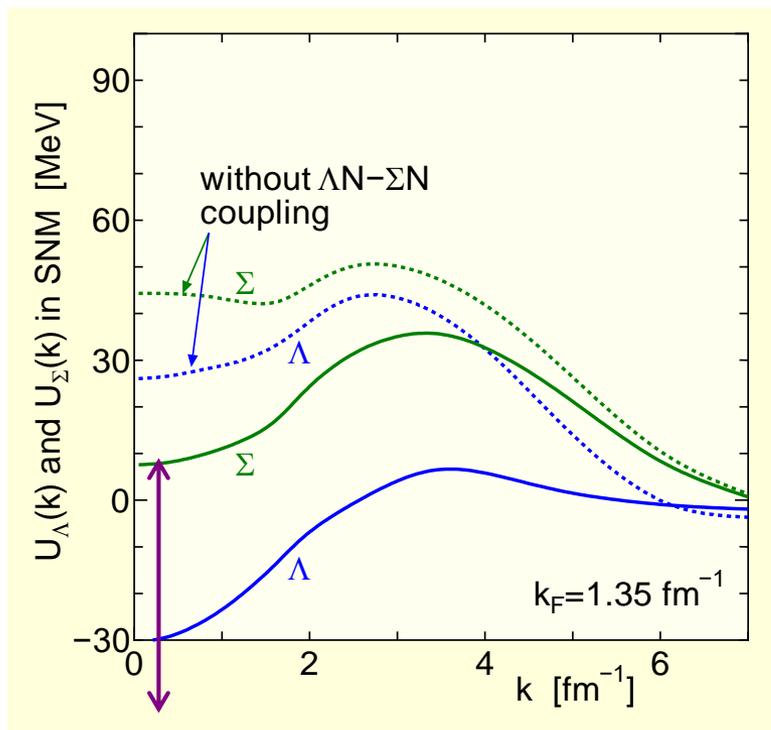


- 中性子物質では ${}^3E$ のテンソル相関がなく、2体核力依存性は小さい
- ChEFTの3体力が与える斥力は、( $c_D$ と $c_E$ の接触項は寄与しない) APRが求めた結果とほぼ同じ
  - ChEFTは $\rho > 2\rho_0$ の高密度領域には適用不可

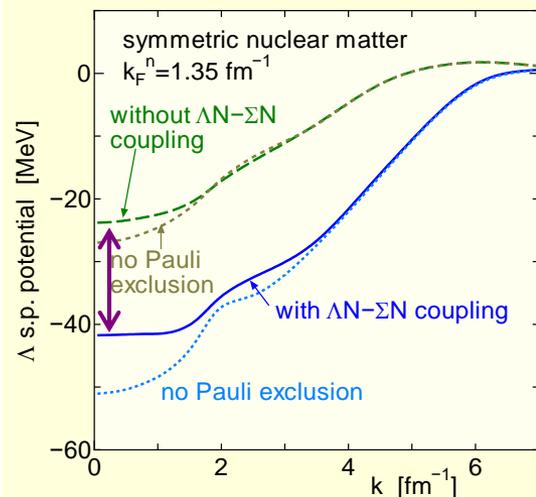
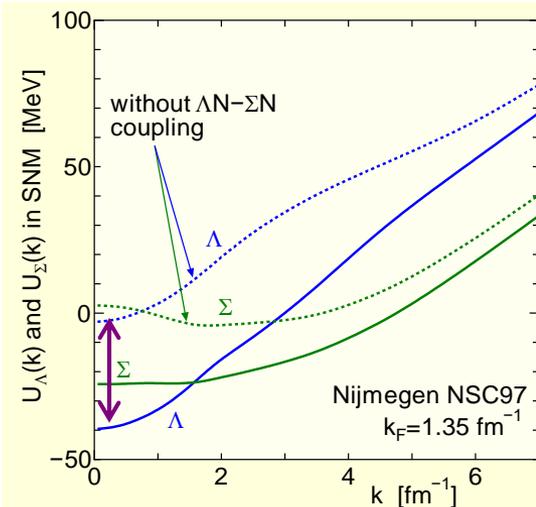
APR: Akmal, Pandharipande, and Ravenhall, PRC58, 1804 (1998)

# 対称核物質中の $\Lambda$ と $\Sigma$ ポテンシャル: 2体力のみ

- $\Lambda N$  の引力には、 $\Lambda N$  -  $\Sigma N$  結合が重要  
( $\pi$  交換テンソル力)
- ChNLO は結合が特に強い

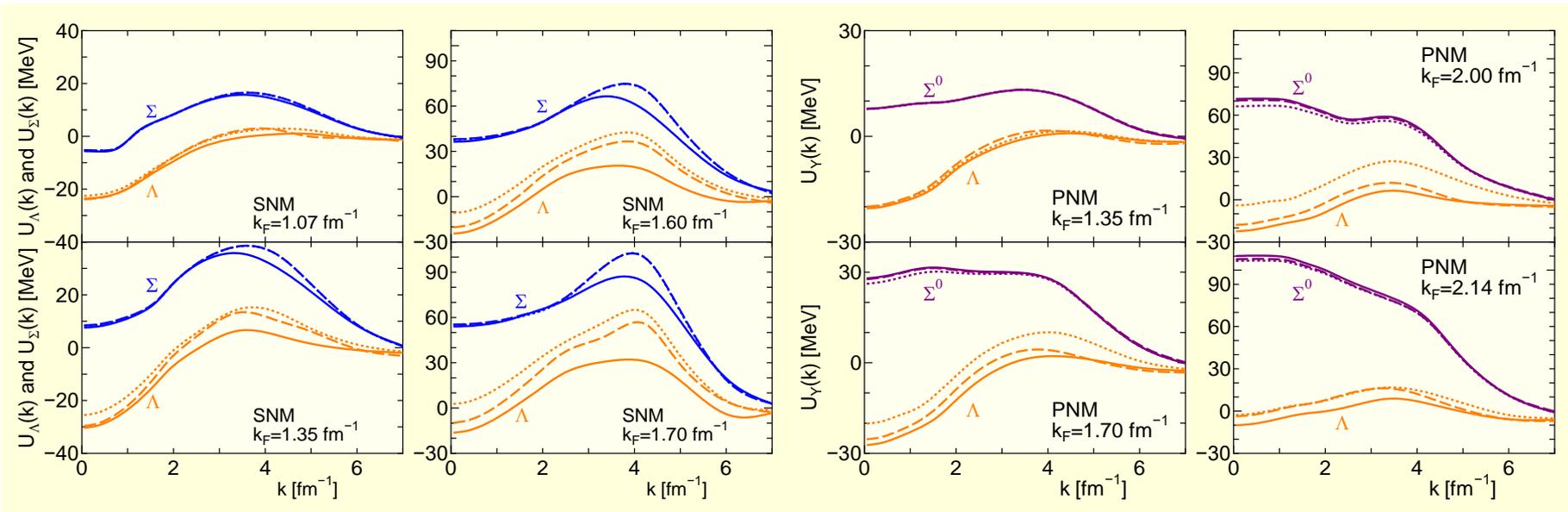


Cf: Nijmegen と fss2 の場合



# ChEFT による核物質中の $\Lambda$ のポテンシャル

- (SNM  $\rho = \frac{1}{2}\rho_0, \rho_0, 1.66\rho_0, 2\rho_0$ ) と (PNM  $\rho = \frac{1}{2}\rho_0, \rho_0, 1.63\rho_0, 2\rho_0$ ) の計算結果  
ChEFT YN (実線) +  $2\pi$  交換  $\Lambda$ NN (点線) +  $2\pi$  交換  $\Lambda$ NN- $\Sigma$ NN (破線)

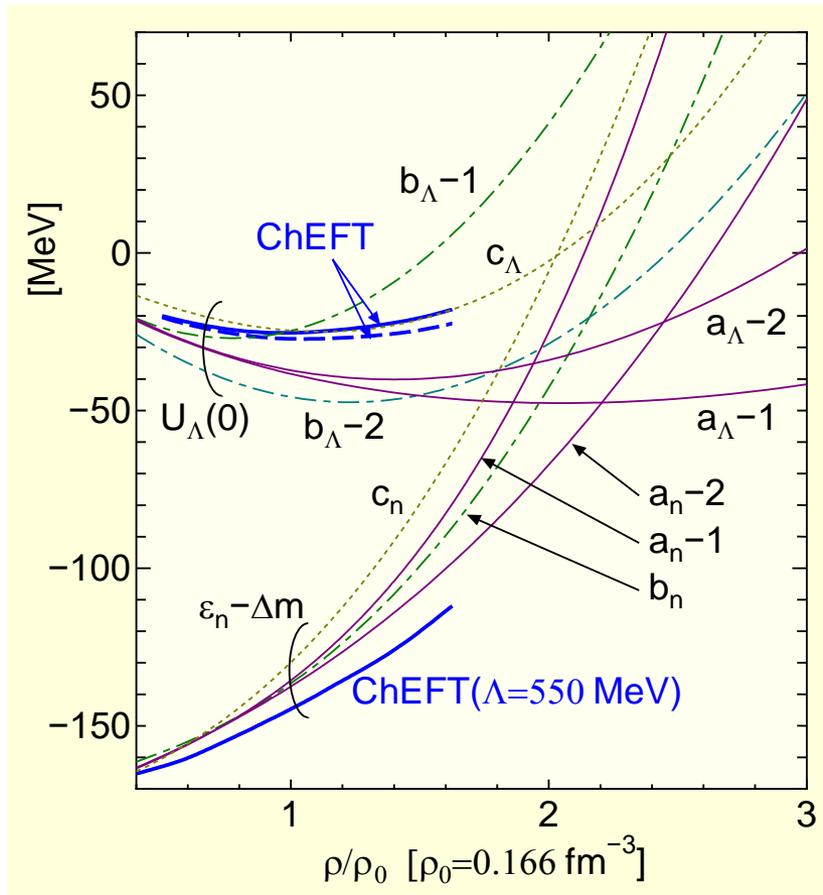


- $\Lambda$  の引力ポテンシャル ( $\rho_0$  で  $-30$  MeV) は、強い  $\Lambda$ N- $\Sigma$ N 結合による
- 特徴:  $\Lambda$  のポテンシャル  $U_\Lambda(0)$  は、密度が高くなっても深くない

# 中性子物質の $\Lambda$ ハイペロンの析出密度

- 中性子物質中で $\Lambda$ が析出する素朴な条件

$$U_{\Lambda}(0) < \frac{\hbar^2}{2m_n} k_{F_n}^2 + m_n - m_{\Lambda} + U_n(k_{F_n})$$



a: Schulze and Rijken,  
Phys. Rev. C84, 035801 (2011)  
[AV18 + TBF + ESC08,  
AV18+UIX'+NSC89]

b: Lonardonì-Lovato-Gandolfi  
-Pederiva, Phys. Rev. Lett.  
114, 092301 (2015).  
auxiliary field diffusion Monte  
Carlo  
[AV8'+UIX+Bodmer et al.]

c: Yamamoto-Furumoto  
-Yasutake-Rijken  
Phys. Rev. C29, 684 (1984).  
[ESC+Pheno.3BF]

# まとめ

- 3体力概念: 2体レベルで消去した自由度が関わる、多体空間での効果
  - 核力の場合: パイオン、アイソバー、核子励起状態に関する多体効果
  - 低運動量空間(模型空間)内等価(有効)相互作用の場合: 誘起3体力
- 原子核の飽和性の定量的な理解には3体力の寄与が決定的に重要
  - 斥力芯は、はるかに高い密度でなければ寄与しない
  - H-J pot. [N.P. 34, 382(1962)] による計算で示唆された、テンソル相関のパウリ抑制による説明は定量的には不十分。精密核力では、 ${}^3S_1$  引力は飽和しない。
  - (既存の)少数系で決定する3体力は重い核・核物質の記述には不十分
    - 3体力自身の原子核依存性      アイソバーを陽に扱う計算が試みられている
  - 模型空間内有効相互作用に対する誘起3体力は無視できない
    - ab initio 計算での誘起3体力の考慮は不可欠(SRG 法)
    - 主要効果は、(密度・構造依存)正規順序化2体力として扱えるだろう
      - (Skyrme や DFT のような)密度依存有効相互作用を用いた記述との接点
  - ハイパー核・中性子星物質中のハイペロンに関する3体力効果を、カイラル有効場理論ポテンシャルで考察