

テンソル力と三体力の不定性と 核反応の記述

河野 通郎 九州歯科大学

種々の2核子間相互作用モデルとテンソル力の差異

■ きっかけ

- いくつかのグループの微視的光学模型ポテンシャル(核子-核相互作用)の差異の原因は
- 宮崎(永田)グループ、大阪市大・山本グループ、Hamburg Group , M3Y, …
- 計算方法の差異か、物理的描像の違いか。

■ 標的核は通常独立粒子模型で記述。

(核力のもとでの独立粒子模型の根拠は別に議論)

- 核子-原子核反応を記述するポテンシャルは、標的核の記述と consistent な相互作用を畳み込む。

ファインマン物理学 V 量子力学 (1965年)

第15章 独立粒子近似 (p. 315)

- 原子核のなかでは、陽子と中性子が非常に強く相互作用している。それなのに、このときにも独立粒子模型が核構造の解析に利用される。……
- 中性子と陽子が強く相互作用をすることはよく知られている。したがって、独立粒子模型によって、最初の数個の魔法の数をもつような殻構造の存在が予測されることが発見されたとき、人はみな全くびっくりしたのであった。……
- 独立粒子近似は一固体物理学から、化学、生物学、核物理学にいたるまでの一広い領域にわたる問題に対して有効であることが分かった。それは極めて荒っぽい近似にすぎない場合が多いのであるが……

原子核の独立粒子描像成立の根拠

- 短距離（高運動量成分）斥力を処理した後の相互作用は摂動で扱うことができる。
- Brueckner theory（Pauli blocking と dispersion 効果を取り入れた G 行列の導入、healing distance の概念）
- 最近は少し異なる観点による $V_{\text{low } k}$ や SRG 法で処理した相互作用で多体問題を扱う。
 - 飽和性の定量的理解は（おそらく）未解決。

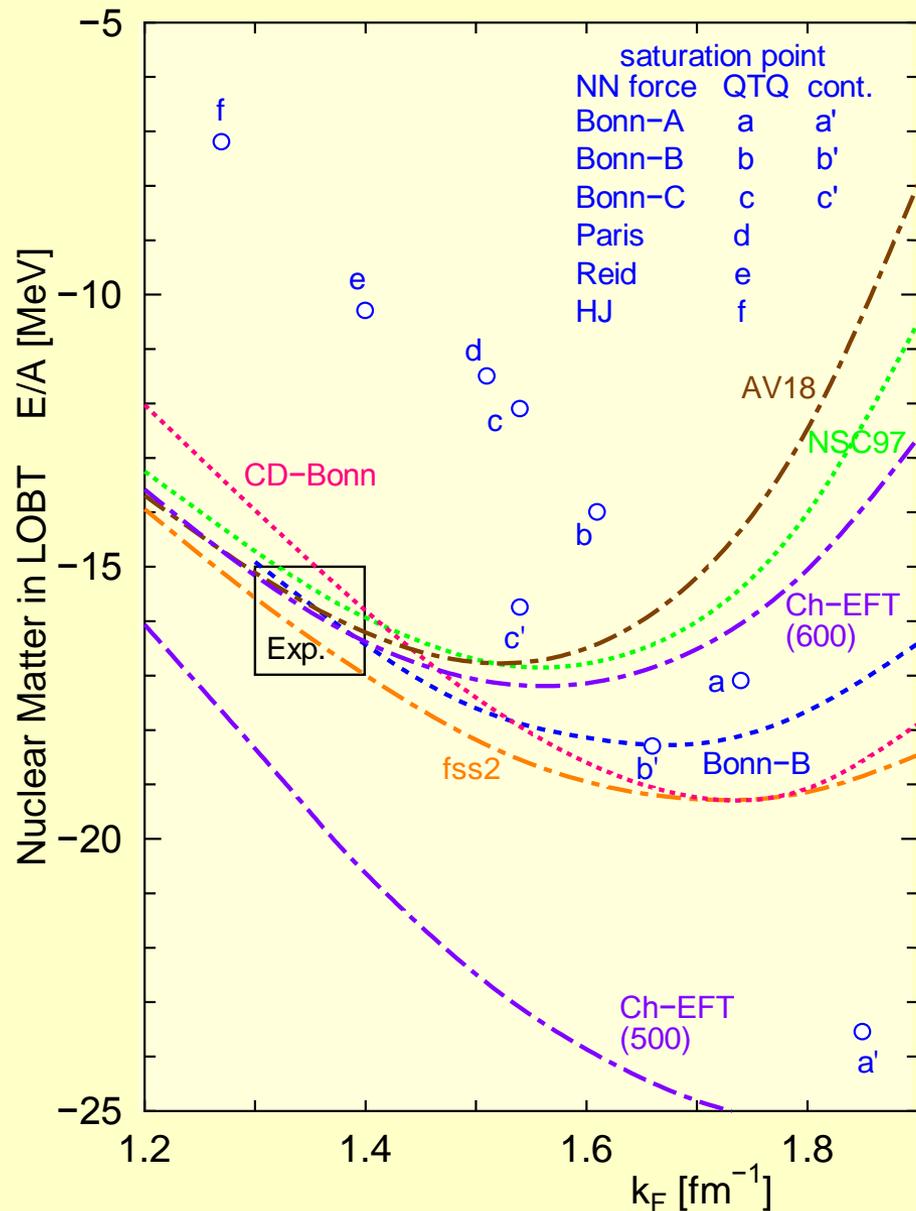
Melbourne と大阪市大の違いは？

$$G(\omega) = v + v \frac{Q}{\omega - (T+U)} G(\omega) \text{ に基づく枠組みは同じ}$$

| | Melbourne | 大阪市大 |
|-------------------|---|---|
| Bare int | Bonn-B (k-space) 比較的弱いテンソル成分 p-h 励起 小 $\rightarrow U^{\text{imag}}$ 小 | Nijmegen ESC (r-space) 比較的強いテンソル成分 p-h 励起 大 $\rightarrow U^{\text{imag}}$ 大 |
| U^{imag} | 調節不要 | k -mass をかける*) 過大 (factor ~ 0.7) |
| U^{real} | effective mass 近似 k の大きい領域で斥力的 | $(1 - \kappa)$ の取り入れ $U(k)$ の k 依存性が弱く 虚部を大きくする効果 (ただし、飽和性を再現する斥力を加えれば逆の効果があるはず) |

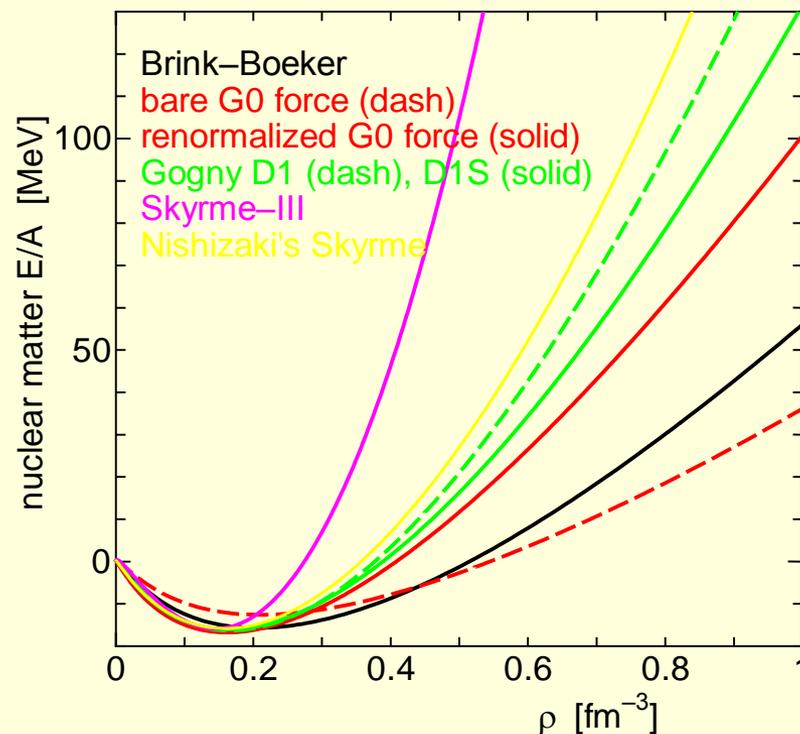
- ◆ CD-Bonn, AV18, NSC97 potential の nuclear matter での s.p. (optical) potential を比較
 - ◆ CD-Bonn: relatively weak tensor
 - ◆ AV18, NSC97: relatively strong tensor
- ◆ continuous choice for intermediate spectrum
- ◆ $k_F = 1.3 \text{ fm}^{-1}$ での計算。B.E. はほぼ同じ。
 - ◆ CD-Bonn と AV18, NSC97 で U^{imag} への 3S1, 3D1 の寄与がかなり異なる。

symmetric nuclear matter saturation curve



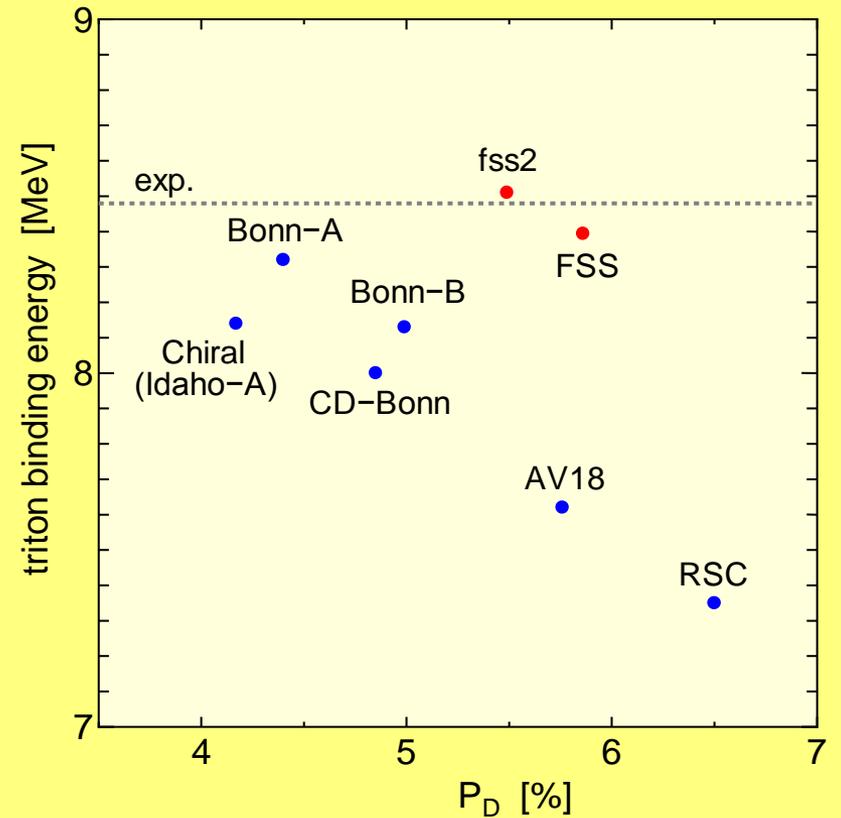
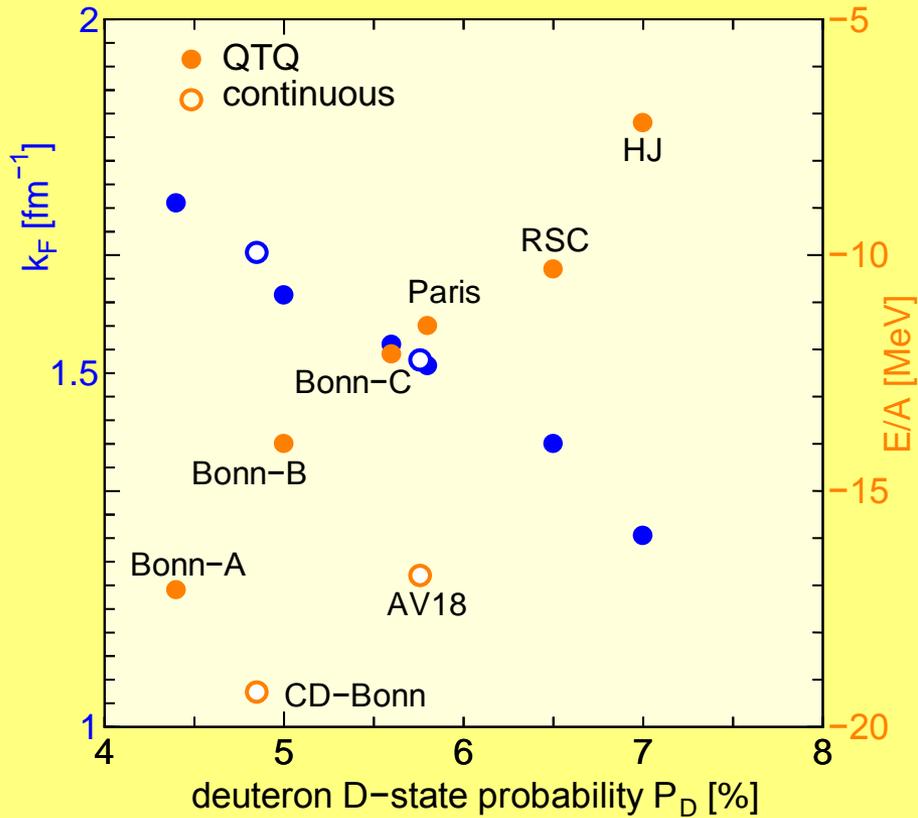
curve は continuous prescription を用いた計算。

(参考) 現象論的相互作用の飽和曲線。(bare G0 は Reid pot. の G-行列に基づく)



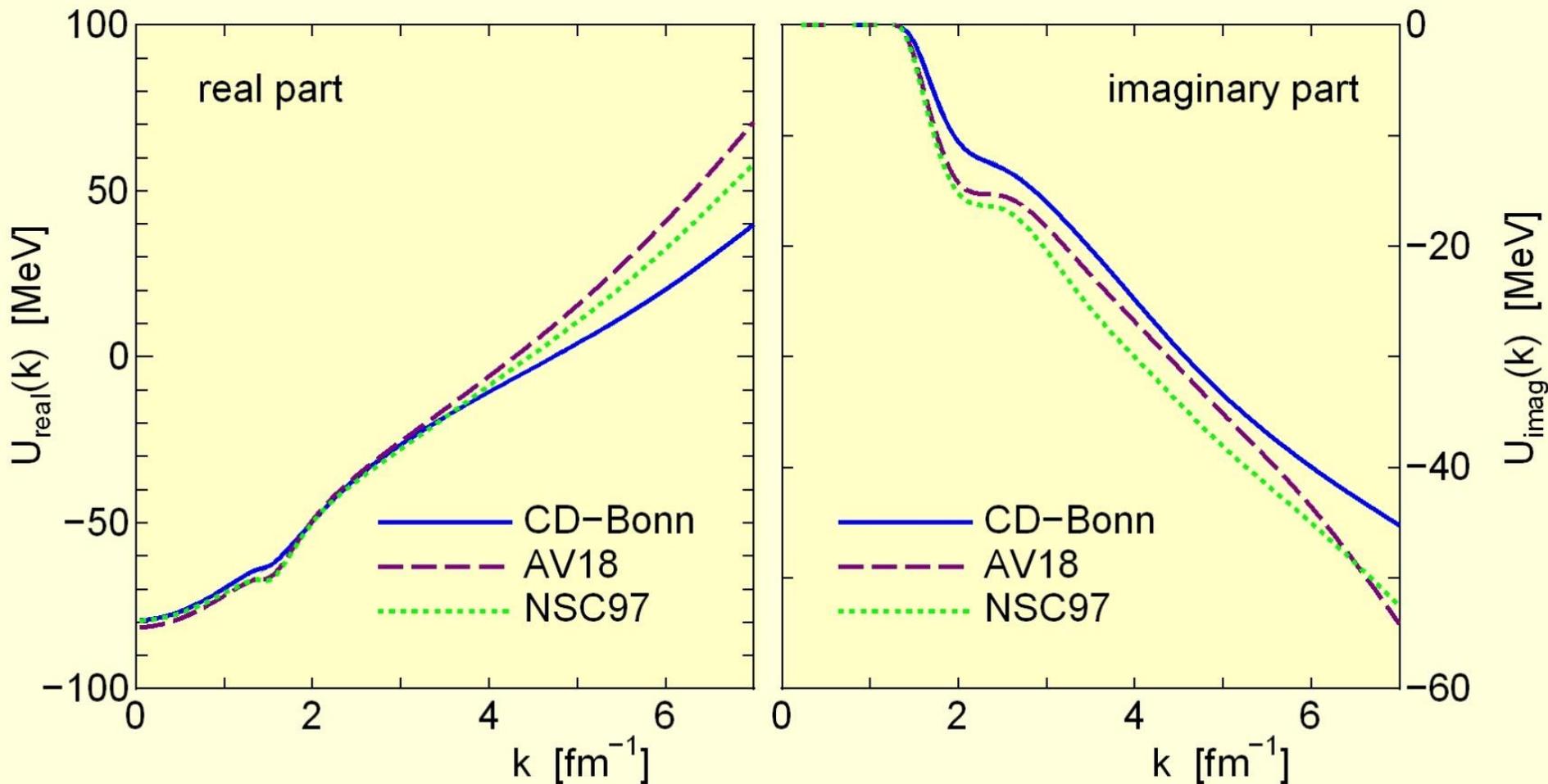
P_D vs. k_F , E/A , and B.E.(^3H)

nuclear matter saturation point vs. P_D

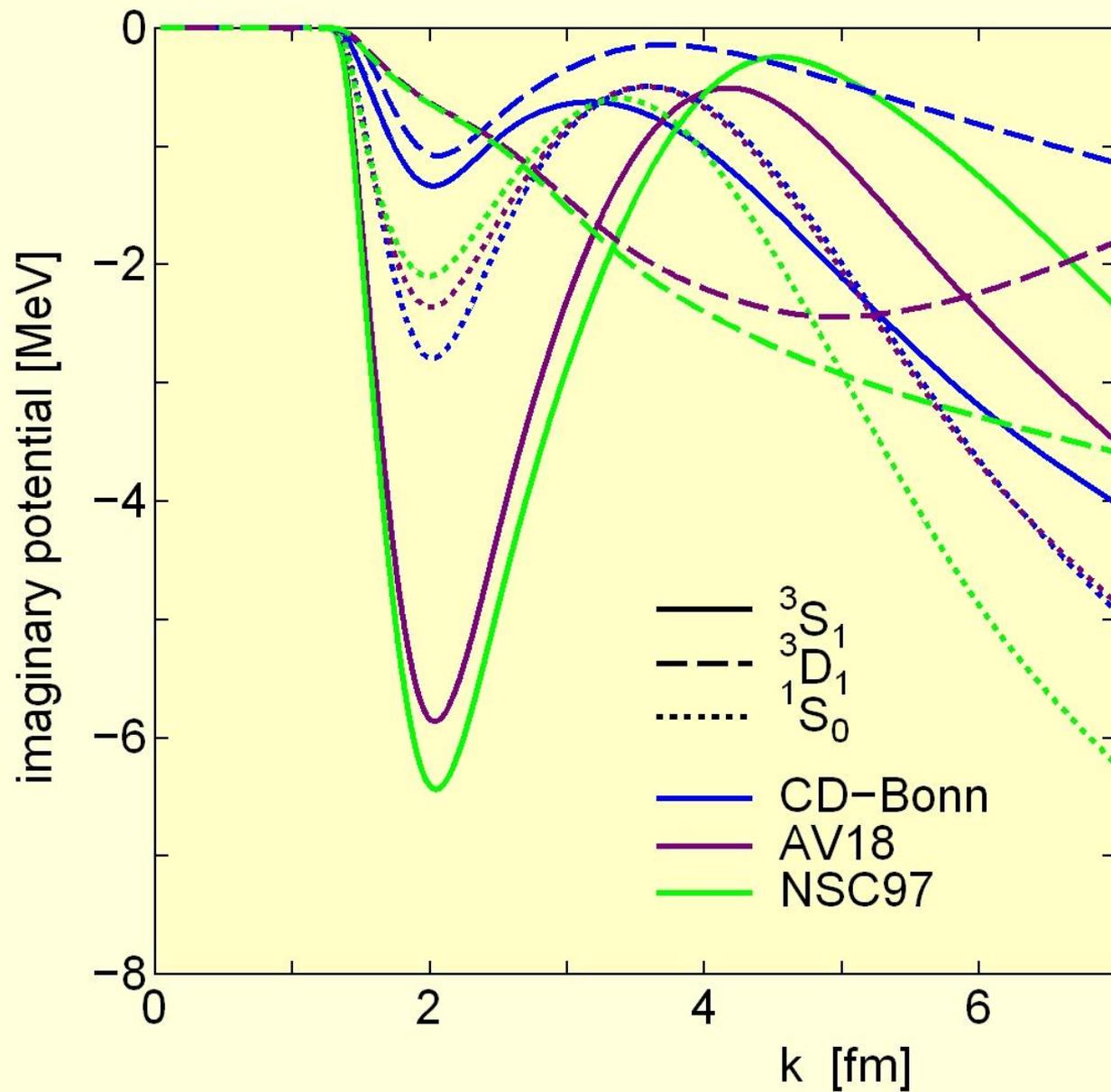


nucleon single particle potential in symmetric nuclear matter at $k_F=1.3 \text{ fm}^{-1}$

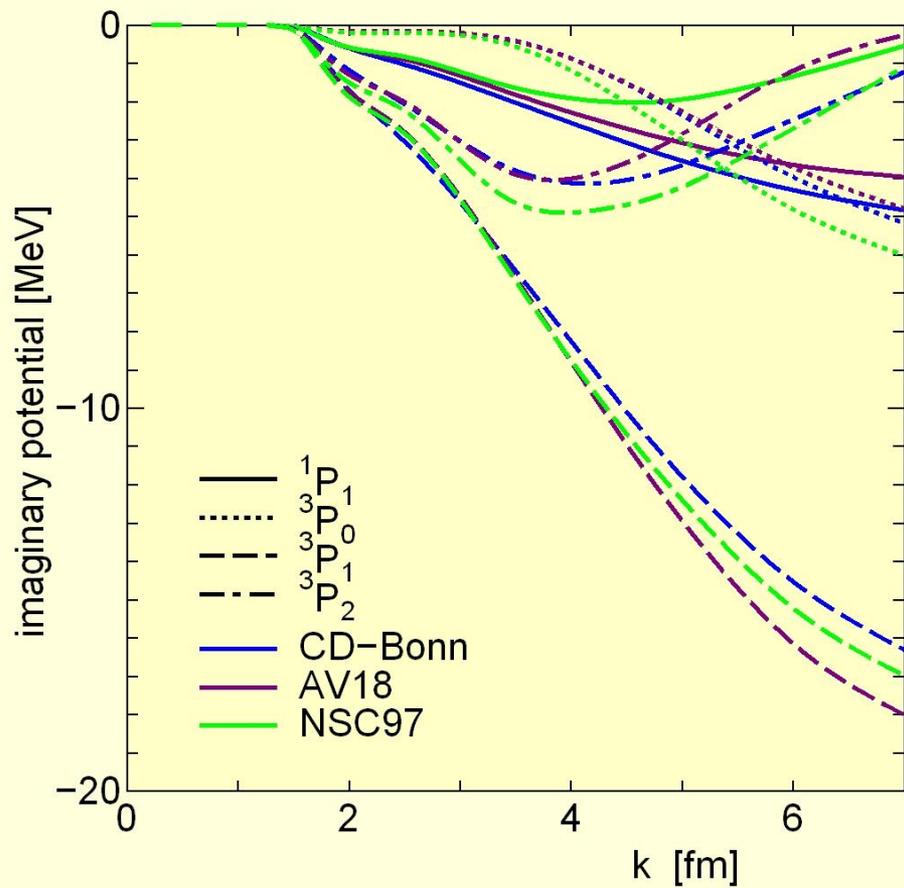
CD-Bonn: (relatively) weak tensor, NSC97, AV18: (relatively) strong tensor



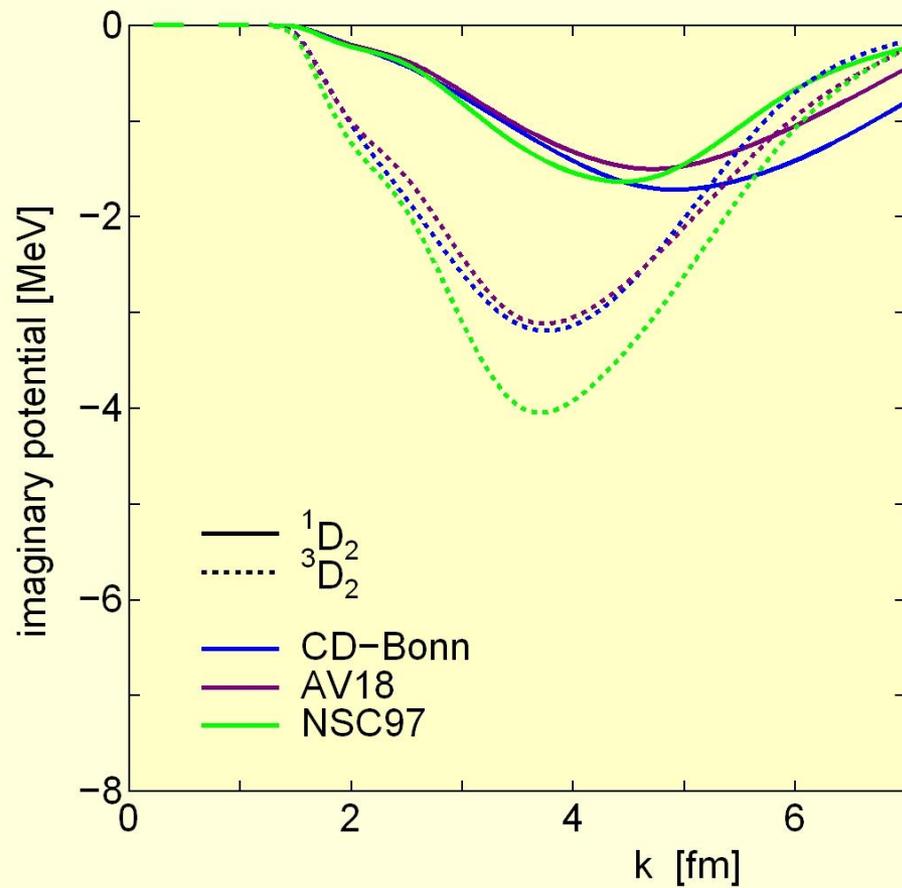
S (D) wave contributions



P wave contributions

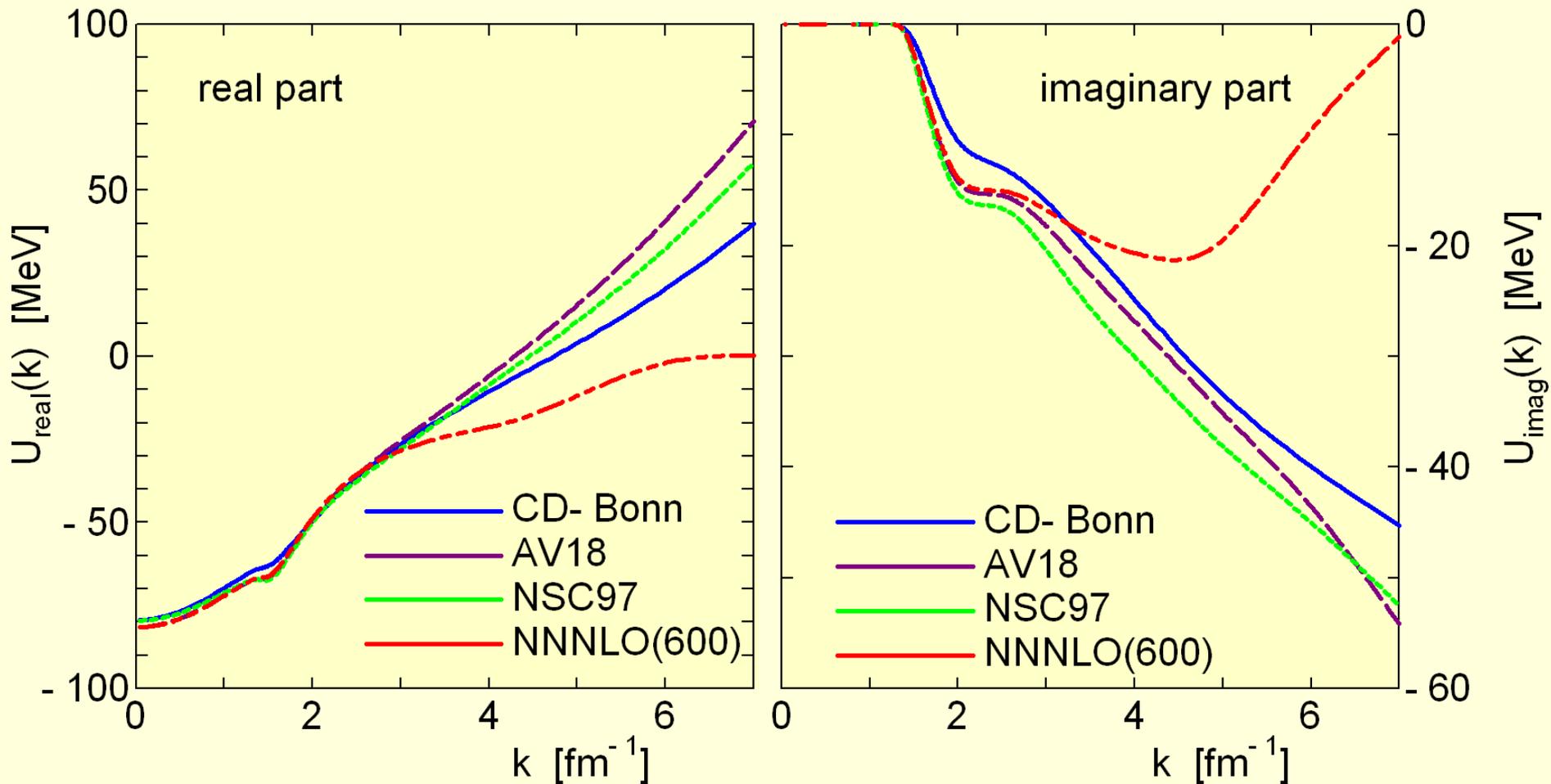


D wave contributions



nucleon single particle potential in symmetric nuclear matter at $k_F=1.3 \text{ fm}^{-1}$

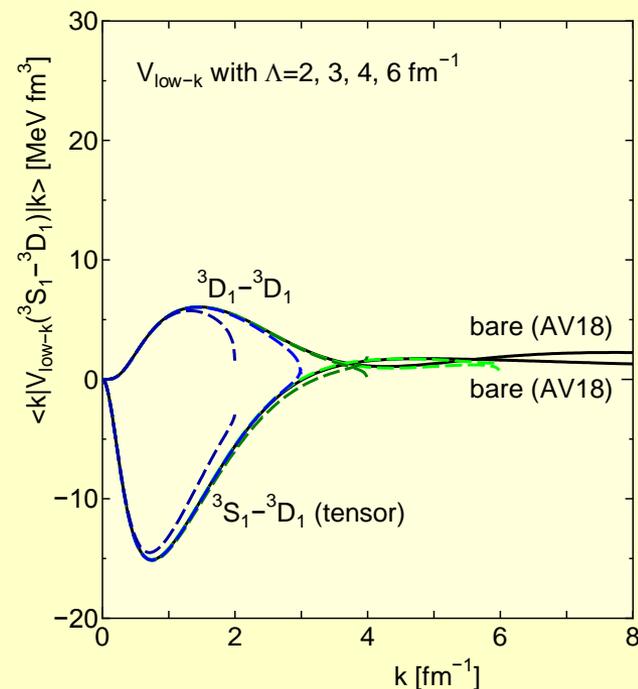
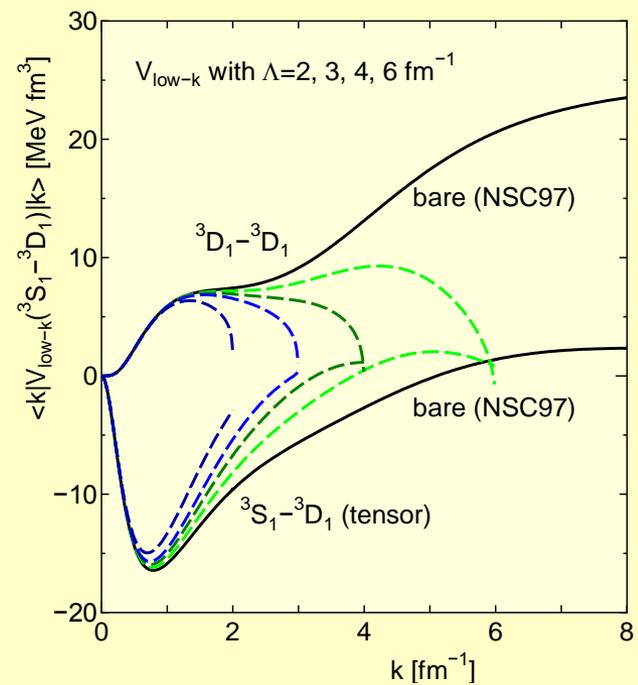
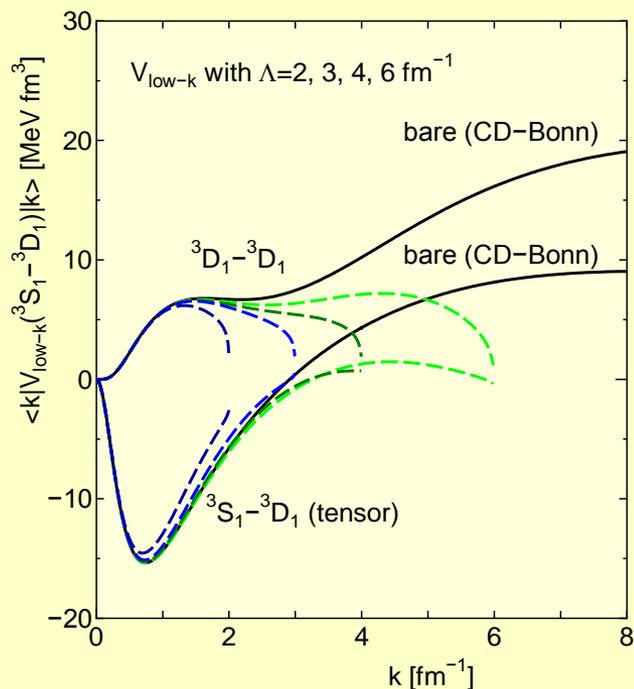
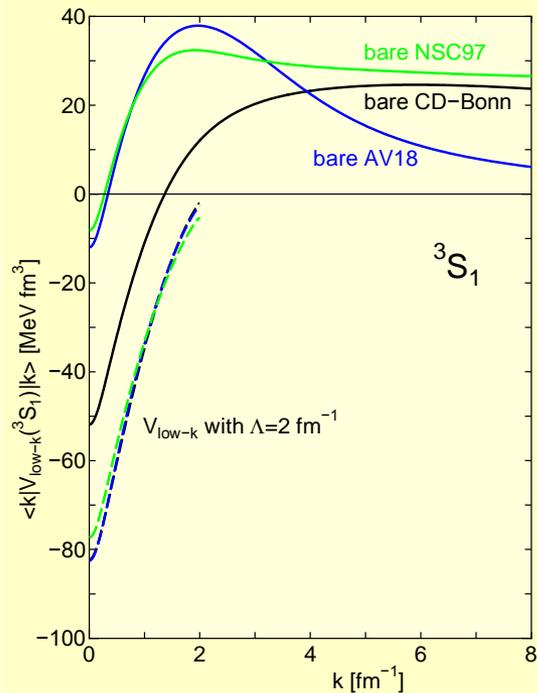
CD- Bonn: (relatively) weak tensor, NSC97, AV18: (relatively) strong tensor



◆ 行列要素 ($V_{low k}$) で
 大きな差は見えない
 bare と $V_{low k}$ の比較

3S_1

${}^3S_1 - {}^3D_1$

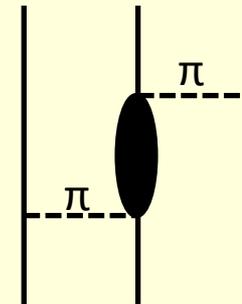


まとめ (1)

- tensor の強さは短距離斥力の記述と相関。ただし tensor 成分は低エネルギー空間等価相互作用に変換してもほとんど変わらない。
- tensor の強さを決めることができるか。deuteron P_D は有用であるが観測量ではない。(unitary 変換でいくらでも変えられる。)
- 短距離の見えない物理は、現象論的パラメーターで置き換えるべきという議論。
- 微視的光学ポテンシャルの虚部の強さは、現象論的調節で済ませてよいか。

三体力の考慮

- 核媒質中で反核子・アイソバー Δ_{33} を経由する過程
 - A. Klein, Phys. Rev. 90 (1953) 1101. 他
 - Fujita-Miyazawa, P.T.P. 17 (1957) 360.
- 飽和性の定量的理解には不可欠
(incompressibility $K \approx 220$ MeV)
- 日本では、'70年代初めに北大グループの計算
 - P.T.P. Suppl. 56 (1974)
- 散乱の記述： 近年、大阪市大グループの試み
 - T. Furumoto, Y. Sakuragi, Y. Yamamoto, Phys. Rev. C78, 044610 (2008) 等
- 近年、Ch-EFT による系統的(2体力と consistent な)3体力のパラメーター化と、それを利用した計算が多くなっている。



注)ここでは、「陽子-重陽子散乱と三体力」等には全く触れない

三体力の寄与: CCM の表式を用いた議論

Hamiltonian:

$$H = \sum_i \frac{\hbar^2}{2m} \mathbf{k}_i^2 - T_G + \sum_{i<j} v_{ij} + \sum_{i<j<k} v_{ijk}$$

Ground state:

$$|\Phi_0\rangle = e^{\sum_i s_i + \sum_{i<j} s_{ij} + \sum_{i<j<k} s_{ijk} + \dots + s_{12\dots n}} |\Phi_0\rangle$$

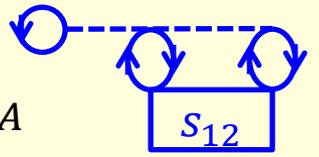
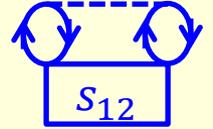
Schrödinger equation: $H e^S |\Phi_0\rangle = E_0 e^S |\Phi_0\rangle$

$$e^{-S} H e^S |\Phi_0\rangle = E_0 |\Phi_0\rangle$$

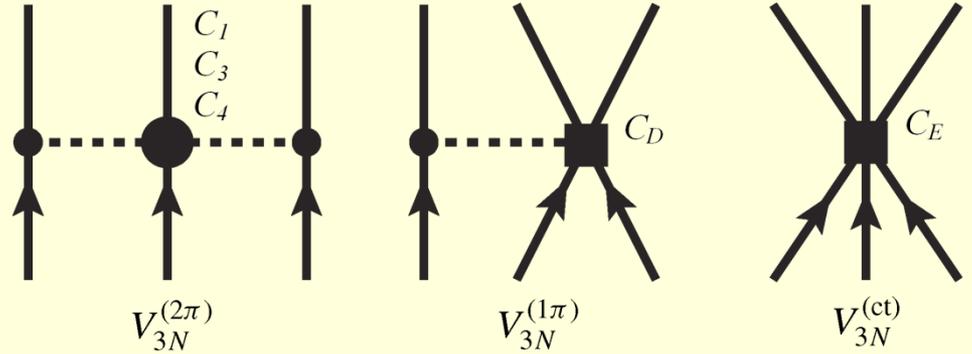
$$E_0 = \langle \Phi_0 | e^{-S} H e^S | \Phi_0 \rangle$$

G-行列との粗い対応 $G \approx v(1 + s_{12})$ or $s_{12} \approx \frac{Q}{\omega - H_0} G$

$$\begin{aligned}
E_0 = & \sum_h \langle h | t_1 (1 + s_1) | h \rangle + \frac{1}{2} \sum_{hh'} \langle hh' | v_{12} | hh' \rangle_A \\
& + \frac{1}{2} \sum_{hh'p} 2 \langle hh' | v_{12} | ph' \rangle_A \langle p | s_1 | h \rangle \\
& + \frac{1}{2} \sum_{hh'} \frac{1}{2} \sum_{pp'} 2 \langle hh' | v_{12} | pp' \rangle_A \langle p | s_1 | h \rangle \langle p' | s_1 | h' \rangle \\
& + \frac{1}{2} \sum_{hh'} \frac{1}{2} \sum_{pp'} 2 \langle hh' | v_{12} | pp' \rangle_A \langle pp' | s_{12} | hh' \rangle_A \\
& + \frac{1}{6} \sum_{hh'h''} \langle hh'h'' | v_{123} (1 + s_{123}) | hh'h'' \rangle_A \\
& + \frac{1}{6} \sum_{hh'h''} \sum_p 3 \langle hh'h'' | v_{123} | ph'h'' \rangle_A \langle p | s_1 | h \rangle \\
& + \frac{1}{6} \sum_{hh'h''} \frac{1}{2} \sum_{pp'} 6 \langle hh'h'' | v_{123} | pp'h'' \rangle_A \langle p | s_1 | h \rangle \langle p' | s_1 | h' \rangle \\
& + \frac{1}{6} \sum_{hh'h''} \frac{1}{2} \sum_{pp'} 3 \langle hh'h'' | v_{123} | pp'h'' \rangle_A \langle pp' | s_{12} | hh' \rangle_A \\
& + \frac{1}{6} \sum_{hh'h''} \frac{1}{6} \sum_{pp'p''} 9 \langle hh'h'' | v_{123} | pp'p'' \rangle_A \langle pp' | s_{12} | hh' \rangle_A \langle p'' | s_1 | h'' \rangle
\end{aligned}$$



Ch-EFT の三体力



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

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

$$\vec{q}_i = \vec{p}_i' - \vec{p}_i$$

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

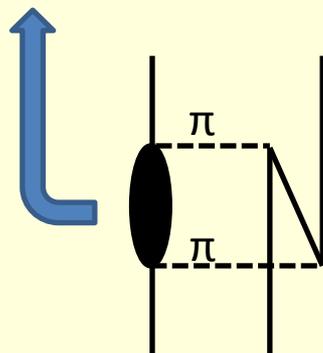
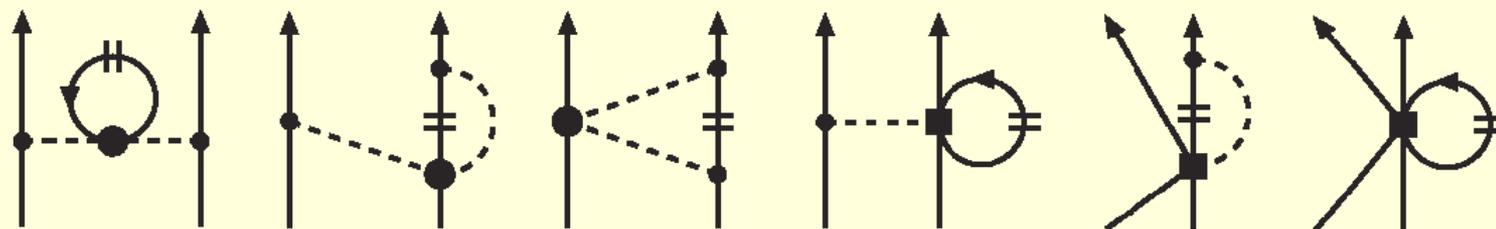
$$V_{3N}^{(ct)} = \sum_{i \neq j \neq k} \frac{c_E}{2f_\pi^4 \Lambda_\chi} \vec{\tau}_i \cdot \vec{\tau}_j,$$

$$\Lambda_\chi = 700 \text{ MeV}, m_\pi = 138.04 \text{ MeV}$$

三体力の二体力化

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

Weise グループの書き方では次のダイアグラム



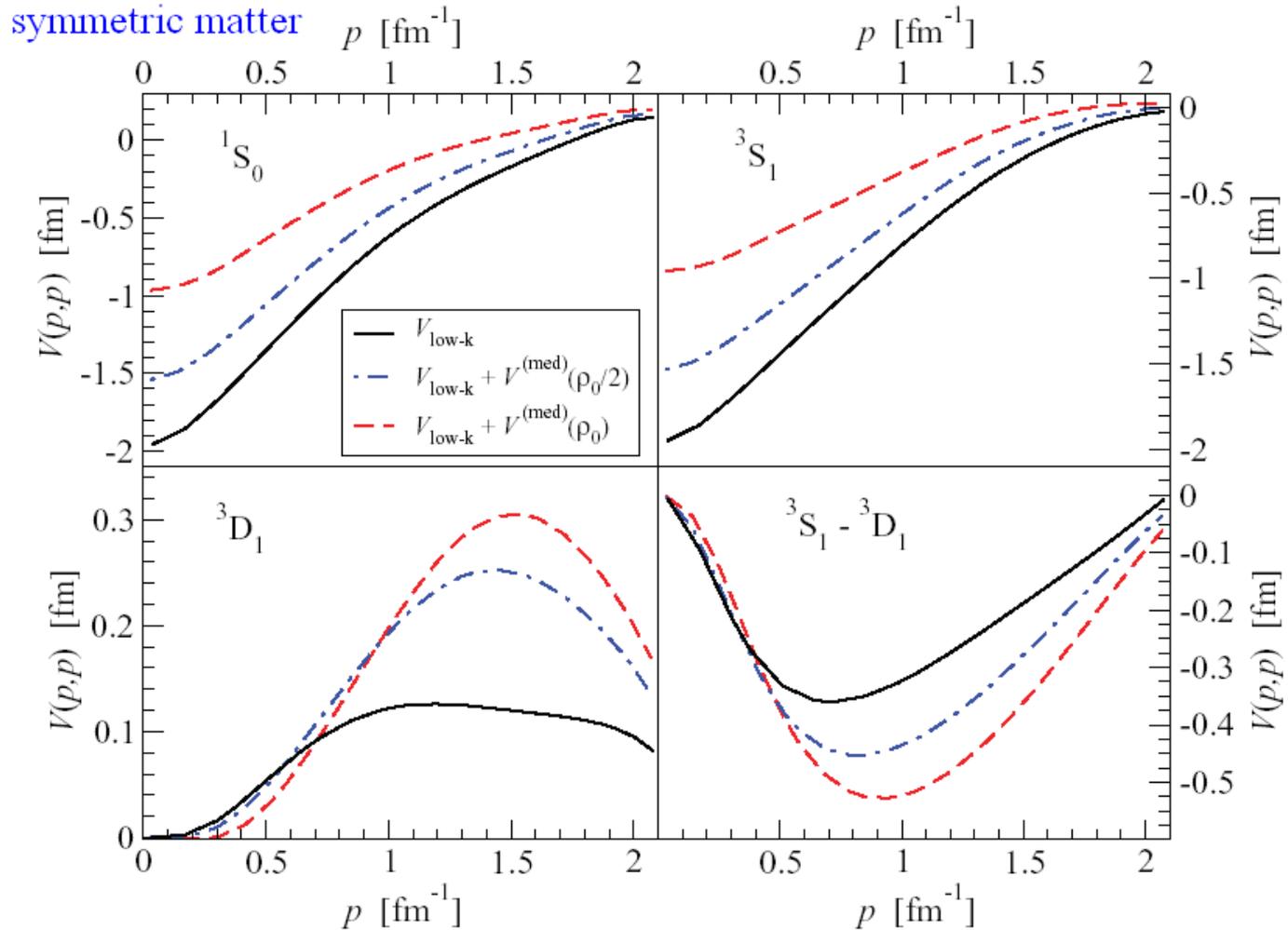
この Pauli blocking
が大きな斥力を与
える項。

$\Lambda = 2.1 \text{ fm}^{-1}$ の $V_{low\ k}$ に加えた結果 (対称核物質)

後述の factor の問題があるかもしれない

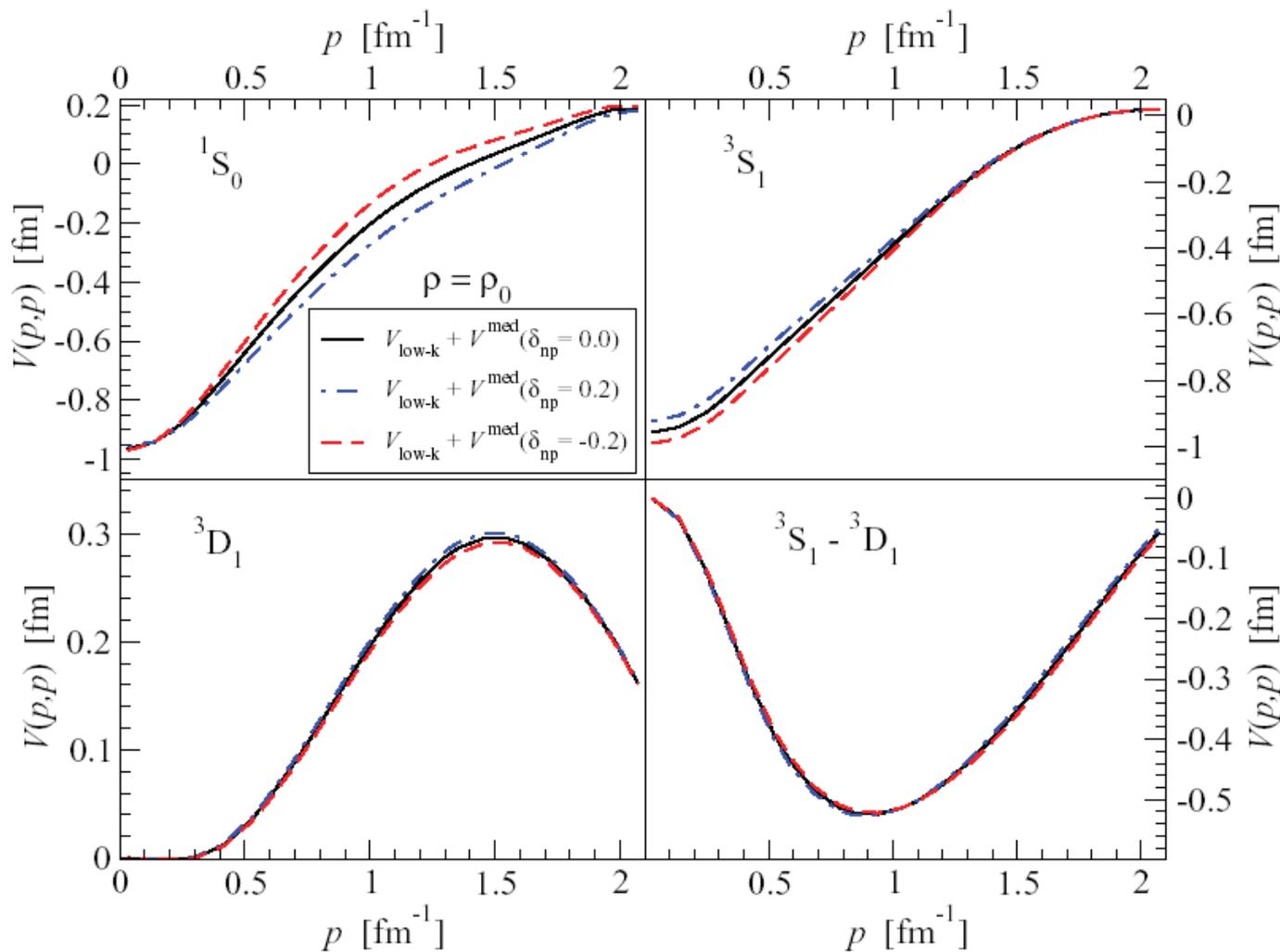
Density-dependent effective nucleon-nucleon interaction from chiral three-nucleon forces

J. W. HOLT, N. KAISER, AND W. WEISE, PHYSICAL REVIEW C **81**, 024002 (2010)



$\Lambda = 2.1 \text{ fm}^{-1}$ の $V_{\text{low } k}$ に加えた結果 (非対称性には依存しない)

asymmetric matter, $\delta_{\text{np}} = (\rho_{\text{n}} - \rho_{\text{p}}) / \rho$



CCM のエネルギー表式で $\langle ab|v_{12(3)}|cd\rangle_A \equiv \sum_h \langle abh|v_{123}|cdh\rangle_A$
 を用いて書き換えると

$$\begin{aligned}
 E_0 = & \sum_h \langle h|t_1(1+s_1)|h\rangle + \frac{1}{2} \sum_{hh'} \left\langle hh' \left| v_{12} + \frac{1}{3} v_{12(3)} \right| hh' \right\rangle_A \\
 & + \frac{1}{2} \sum_{hh'p} 2 \left\langle hh' \left| v_{12} + \frac{1}{3} v_{12(3)} \right| ph' \right\rangle_A \langle p|s_1|h\rangle \\
 & + \frac{1}{2} \sum_{hh'} \frac{1}{2} \sum_{pp'} 2 \langle hh' | v_{12} + v_{12(3)} | pp' \rangle_A \langle p|s_1|h\rangle \langle p'|s_1|h'\rangle \\
 & + \frac{1}{2} \sum_{hh'} \frac{1}{2} \sum_{pp'} \langle hh' | v_{12} + v_{12(3)} | pp' \rangle_A \langle pp'|s_{12}|hh'\rangle_A \\
 & + \frac{1}{6} \sum_{hh'h''} \langle hh'h'' | v_{123} s_{123} | hh'h'' \rangle_A \\
 & + \frac{1}{6} \sum_{hh'h''} \frac{1}{6} \sum_{pp'p''} 9 \langle hh'h'' | v_{123} | pp'p'' \rangle_A \langle pp'|s_{12}|hh'\rangle_A \langle p''|s_1|h''\rangle
 \end{aligned}$$

核物質エネルギーへの寄与のオーダー評価

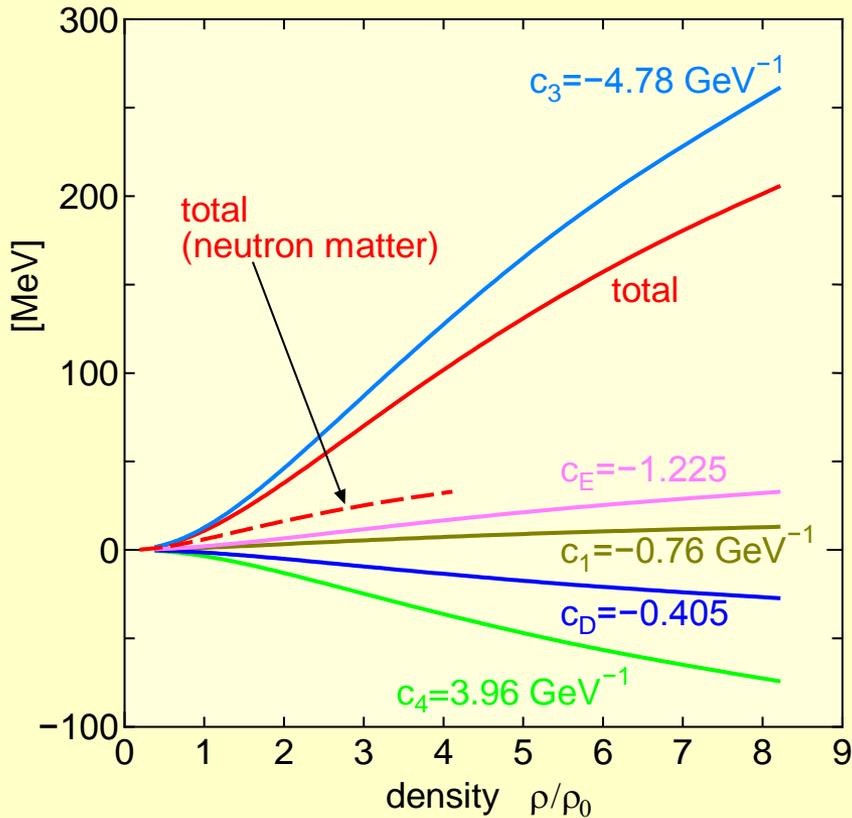
form factor ($\Lambda_{3NF} = 2.0 \text{ fm}^{-1}$)

$$f_R(p, q) = \exp \left[-\frac{\left(p^2 + \frac{3}{4}q^2\right)^2}{\Lambda_{3NF}^4} \right]$$
$$= \exp \left[-\frac{\frac{1}{36} \left((\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)^2 + (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)^2 + (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)^2 \right)^2}{\Lambda_{3NF}^4} \right]$$

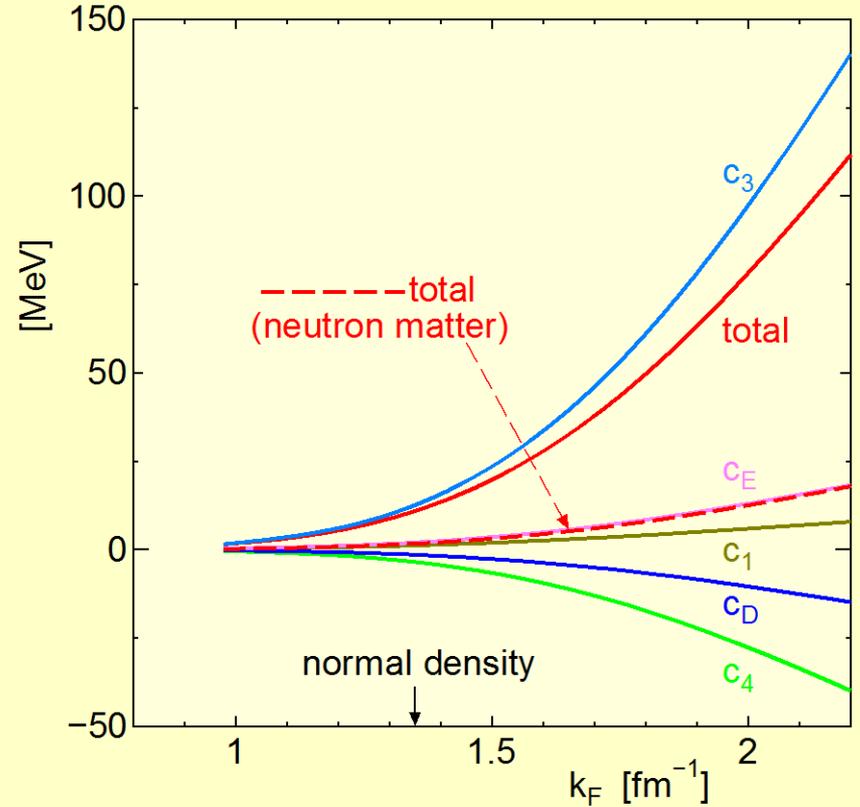
を入れて $E = \frac{1}{6} \sum_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3}^{k_F} \langle \mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3 | v_{123} | \mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3 \rangle_A$
を核物質で計算。

核物質での $E_{3-body} = \frac{1}{6} \sum_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3}^{k_F} \langle \mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3 | v_{123}^{Ch-EFT} | \mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3 \rangle_A$

contributions to nuclear (neutron) matter energy from Ch-EFT three-body force



contributions to nuclear (neutron) matter energy from Ch-EFT three-body force



まとめ (2)

- 三体力を定量的に議論するのはこれからの課題。
 - Ch-EFT 三体力を部分波展開し、G 行列計算を行って有効相互作用を求める計算を準備中。 ➡ 反応へも適用。
- 三体力の斥力の主要原因: アイソバー励起過程の Pauli blocking.
 - M1 励起、Gamow-Teller 励起で効果・役割が大きい。
- Ch-EFT や $V_{low k}$ ではくりこみパラメーターとして扱う短距離成分の物理が、中間エネルギー核反応で議論できるか。