

ストレンジネス核物理 2010

2010年12月2日～4日

中性子過剰ハイパー核 ${}_{\Lambda}^9\text{He}$ の構造

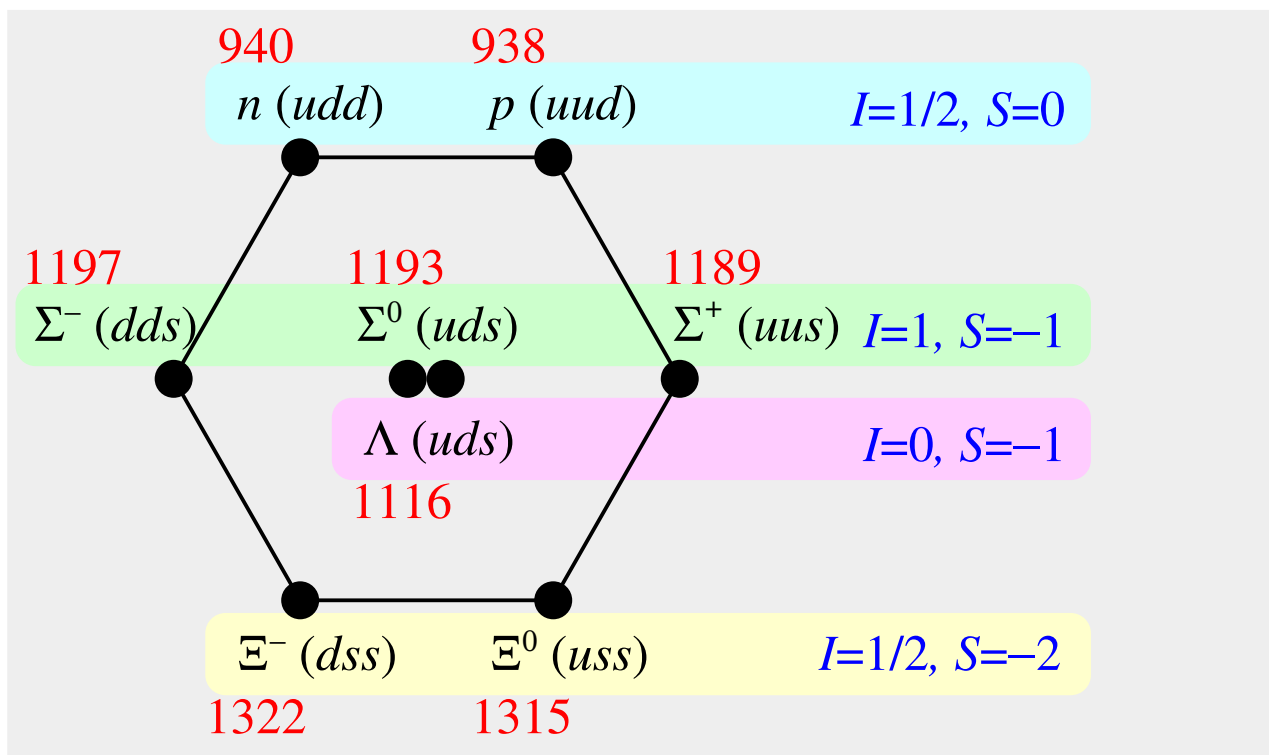
梅谷 篤史 (理研仁科センター)

明 孝之 (大阪工業大学)

肥山 詠美子 (理研仁科センター)

ハイパー核物理の目的

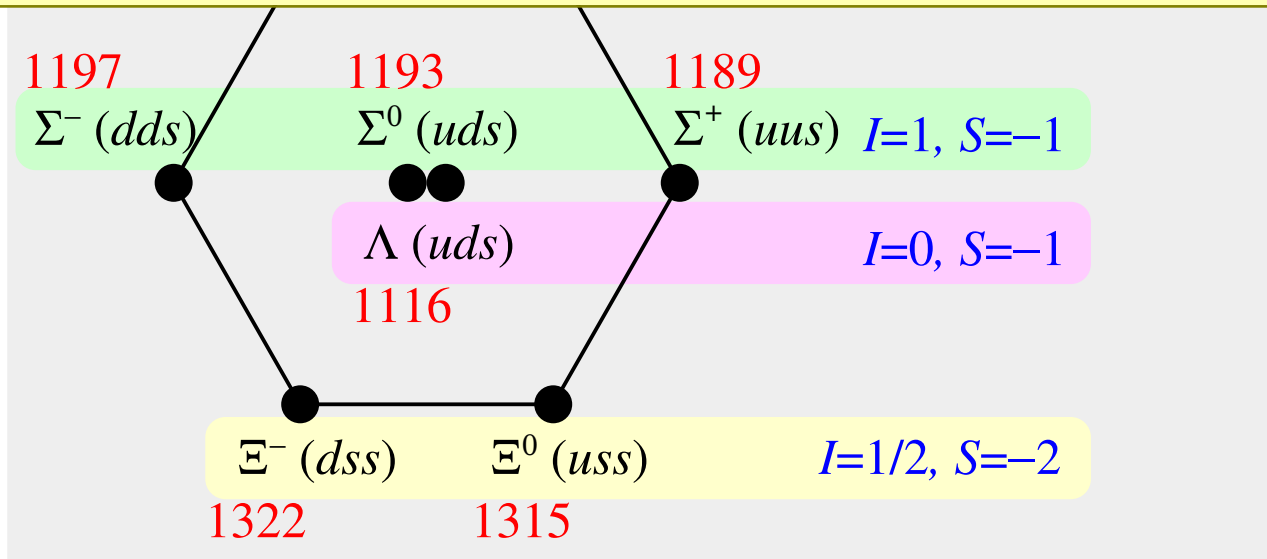
バリオン間相互作用の統一的理解



ハイパー核物理の目的

バリオン間相互作用の統一的理解

$S = -1$ セクター (ΛN 相互作用, ΣN 相互作用, ΛN - ΣN 結合相互作用)



ハイパー核物理の目的

バリオン間相互作用の統一的理解

$S = -1$ セクター (ΛN 相互作用, ΣN 相互作用, ΛN - ΣN 結合相互作用)

有効 ΛN 相互作用 Hypernuclear γ -ray data since 1998

$$V_{\Lambda N}^{\text{eff}} = V_0 + V_{\sigma\sigma} \sigma_N \cdot \sigma_\Lambda + V_{\text{SLS}} \ell_{\Lambda N} \cdot (s_\Lambda + s_N) + V_{\text{ALS}} \ell_{\Lambda N} \cdot (s_\Lambda - s_N) + V_{\text{Tensor}} S_{12}$$

- Millener (*p*-shell model) **Nucl. Phys. A 804, 84 (2008).**
- Hiyama (Few-body) **Prog. Part. Nucl. Phys. 63, 339 (2009).**

ハイパー核物理の目的

バリオン間相互作用の統一的理解

$S = -1$ セクター (ΛN 相互作用, ΣN 相互作用, ΛN - ΣN 結合相互作用)

有効 ΛN 相互作用 Hypernuclear γ -ray data since 1998

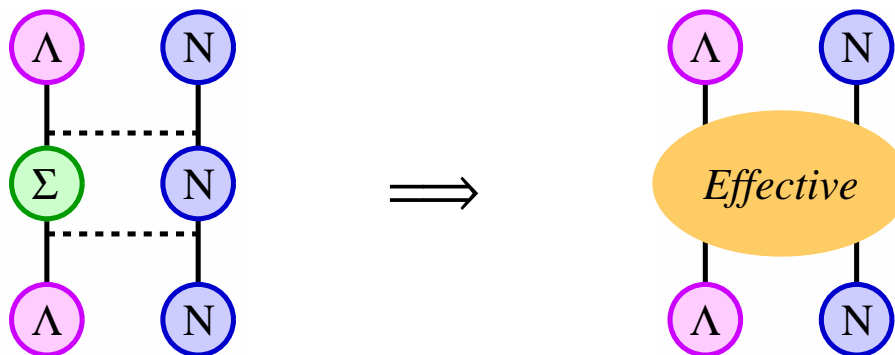
$$V_{\Lambda N}^{\text{eff}} = V_0 + V_{\sigma\sigma} \sigma_N \cdot \sigma_\Lambda + V_{\text{SLS}} \ell_{\Lambda N} \cdot (s_\Lambda + s_N) + V_{\text{ALS}} \ell_{\Lambda N} \cdot (s_\Lambda - s_N) + V_{\text{Tensor}} S_{12}$$

- Millener (*p*-shell model) **Nucl. Phys. A 804, 84 (2008).**
- Hiyama (Few-body) **Prog. Part. Nucl. Phys. 63, 339 (2009).**

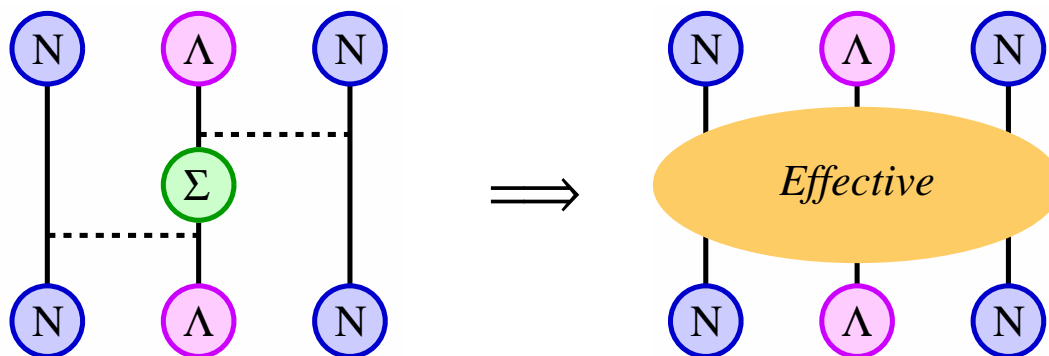
残された課題の 1 つ \rightarrow ΛN - ΣN 結合相互作用

ΛN - ΣN 結合相互作用

ΛN - ΣN 結合 \implies 中性子星の研究に大きく寄与



Effective 2-body ΛN interaction



**Effective 3-body ΛNN interaction
(Fujita-Miyazawa type)**

ΛN - ΣN 結合の強さ \rightarrow まだよくわかっていない

ΛN - ΣN 結合の先行研究 s 殻ハイパー核

- Y. Akaishi *et al.*, Phys. Rev. Lett. 84, 3539 (2000).
- E. Hiyama *et al.*, Phys. Rev. C 65, 011341(R) (2001).
- A. Nogga *et al.*, Phys. Rev. Lett. 88, 172501 (2002).
- H. Nemura *et al.*, Phys. Rev. Lett. 89, 142504 (2002).

 p 殻ハイパー核 (殻模型計算)

- D. Halderson, Phys. Rev. C 77, 034304 (2008).
- A. Umeya, T. Harada, Phys. Rev. C 79, 024315 (2009).

中性子過剰核における ΛN - ΣN 結合

中性子過剰核は ΛN - ΣN 結合を調べるのに適している

Σ ハイペロン: アイソスピン $I = 1$

中性子過剰核: 大きなアイソスピン

⇒ 大きな Σ 混合

中性子過剰核における ΛN - ΣN 結合

中性子過剰核は ΛN - ΣN 結合を調べるのに適している

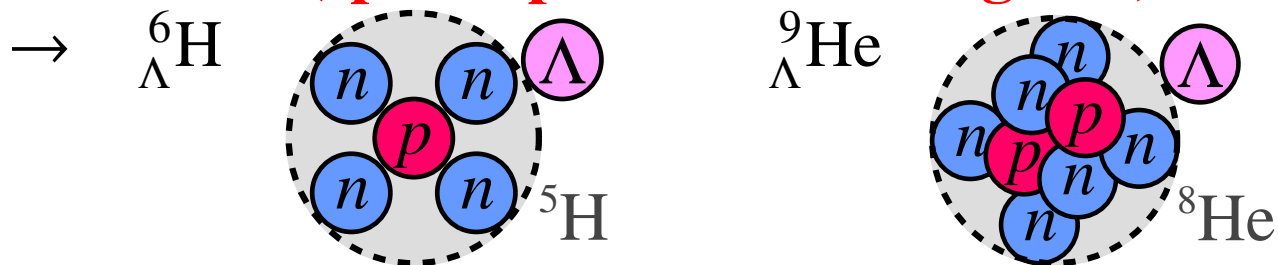
Σ ハイペロン: アイソスピン $I = 1$

中性子過剰核: 大きなアイソスピン

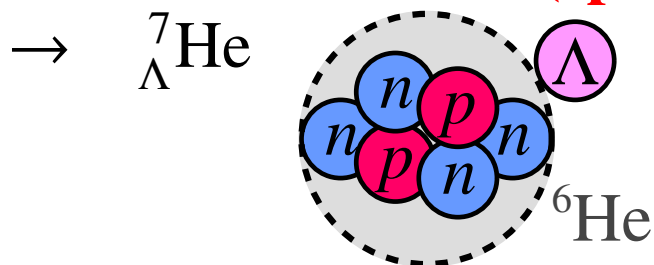
⇒ 大きな Σ 混合

中性子過剰ハイパー核の生成実験

- J-PARC E10 (spokes person: A. Sakaguchi)



- JLab Hall C E01-011 (spokes person: S.N. Nakamura)



この研究でやりたいこと (この数年で目指すこと)

中性子過剰ハイパー核に対する ΛN - ΣN 結合をあらわに入れた 計算
現実的相互作用を用いた
ab initio な

対象とする核: ${}_{\Lambda}\text{He}$ isotope \Rightarrow ${}_{\Lambda}\text{Li}$ isotope \Rightarrow ${}_{\Lambda}\text{Be}$ isotope \Rightarrow ...

方法: Tensor-Optimized Shell Model (TOSM)

T. Myo et al., Prog. Theor. Phys. 117, 257 (2007).

Gaussian Expansion Method (GEM)

E. Hiyama et al., Prog. Part. Nucl. Phys. 51, 223 (2003).

in collaboration with Myo and Hiyama

この研究でやりたいこと (この数年で目指すこと)

中性子過剰ハイパー核に対する ΛN - ΣN 結合をあらわに入れた 計算
 現実的相互作用を用いた
ab initio な

対象とする核: ${}_{\Lambda}\text{He}$ isotope \Rightarrow ${}_{\Lambda}\text{Li}$ isotope \Rightarrow

方法: Tensor-Optimized Shell Model (TOSM) \leftarrow
 T. Myo *et al.*, Prog. Theor. Phys. 117, 257 (2007)

Gaussian Expansion Method (GEM)

E. Hiyama *et al.*, Prog. Part. Nucl. Phys. 51, 223 (2003).

質量数を変えて
 ($A = 3 \sim 10$)
 系統的に調べる
 のに適する

in collaboration with Myo and Hiyama

なぜ TOSM か (TOSM の説明はあとで)

行いたいこと：**中性子過剰ハイパー核**の構造計算を通じて
 ΛN - ΣN 結合相互作用を明らかにする
質量数を変えながら調べる

現実的相互作用を用いた *ab initio* 計算

質量数を変える・ p 殻領域を扱う → 現状では厳しい

クラスター模型

α を固めて行う ← Σ ハイペロンは α を壊す

殻模型

模型空間の制約 ← 模型空間内で記述できない Σ の効果は？



Accuracy が犠牲になるが, TOSM を用いるのが現状では妥当

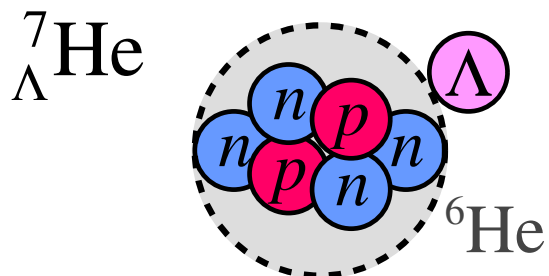
今回の発表

He 同位体に着目

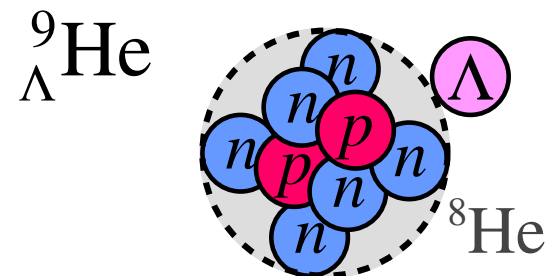
今回の発表

He 同位体に着目

${}^4_{\Lambda}\text{He}$, ${}^5_{\Lambda}\text{He}$, ${}^7_{\Lambda}\text{He}$, ${}^9_{\Lambda}\text{He}$ のエネルギー準位の計算



JLab Hall C E01-011
 (spokes person: S.N. Nakamura)

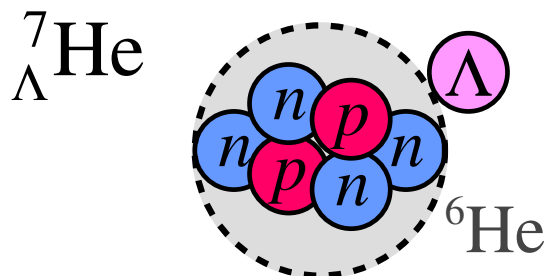


J-PARC E10
 (spokes person: A. Sakaguchi)

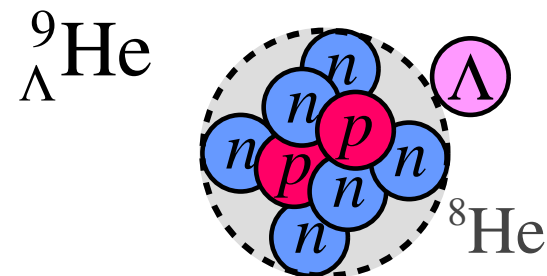
今回の発表

He 同位体に着目

${}^4_{\Lambda}\text{He}$, ${}^5_{\Lambda}\text{He}$, ${}^7_{\Lambda}\text{He}$, ${}^9_{\Lambda}\text{He}$ のエネルギー準位の計算



JLab Hall C E01-011
(spokes person: S.N. Nakamura)



J-PARC E10
(spokes person: A. Sakaguchi)

- TOSM と同じ方法 (同じ配位の取り方)
- Λ ハイペロンのみ (Σ をあらわに入れない)
- 中心力のみ (テンソル力を入れない)

近い将来ちゃんと ΛN - ΣN 結合相互作用を入れた計算を行う

用いた相互作用

NN 相互作用: Minnesota potential

D.R. Thompson *et al.*, Nucl. Phys. A 286, 53 (1977).

ΛN 相互作用: Minnesota potential と同じ式の形で与えられたもの

H. Nemura *et al.*, Prog. Theor. Phys. 103, 929 (2000).

$$V_C = \left\{ V_R + \frac{1}{2} (1 + P^\sigma) V_t + \frac{1}{2} (1 - P^\sigma) V_s \right\} \left\{ \frac{1}{2} u + \frac{1}{2} (2 - u) P^r \right\}$$
$$V_R = V_{0R} \exp(-\rho_R r^2), \quad V_t = -V_{0t} \exp(-\rho_t r^2), \quad V_s = -V_{0s} \exp(-\rho_s r^2)$$

- テンソル力 → あらわには入っていない
- ΛN - ΣN 結合 → あらわには入っていない → ΛN 側に繰り込んである

用いた相互作用

中心力のみ, ${}^2\text{H} \sim {}^4\text{He}$ のエネルギーを再現

NN 相互作用: Minnesota

D.R. Thompson *et al.*, Nucl. Phys. A 286, 53 (1977).

ΛN 相互作用: Minnesota potential と同じ式の形で与えられたもの

H. Nemura *et al.*, Prog. Theor. Phys. 103, 929 (2000).

$$V_C = \left\{ V_R + \frac{1}{2} (1 + P^\sigma) V_t + \frac{1}{2} (1 - P^\sigma) V_s \right\} \left\{ \frac{1}{2} u + \frac{1}{2} (2 - u) P^r \right\}$$

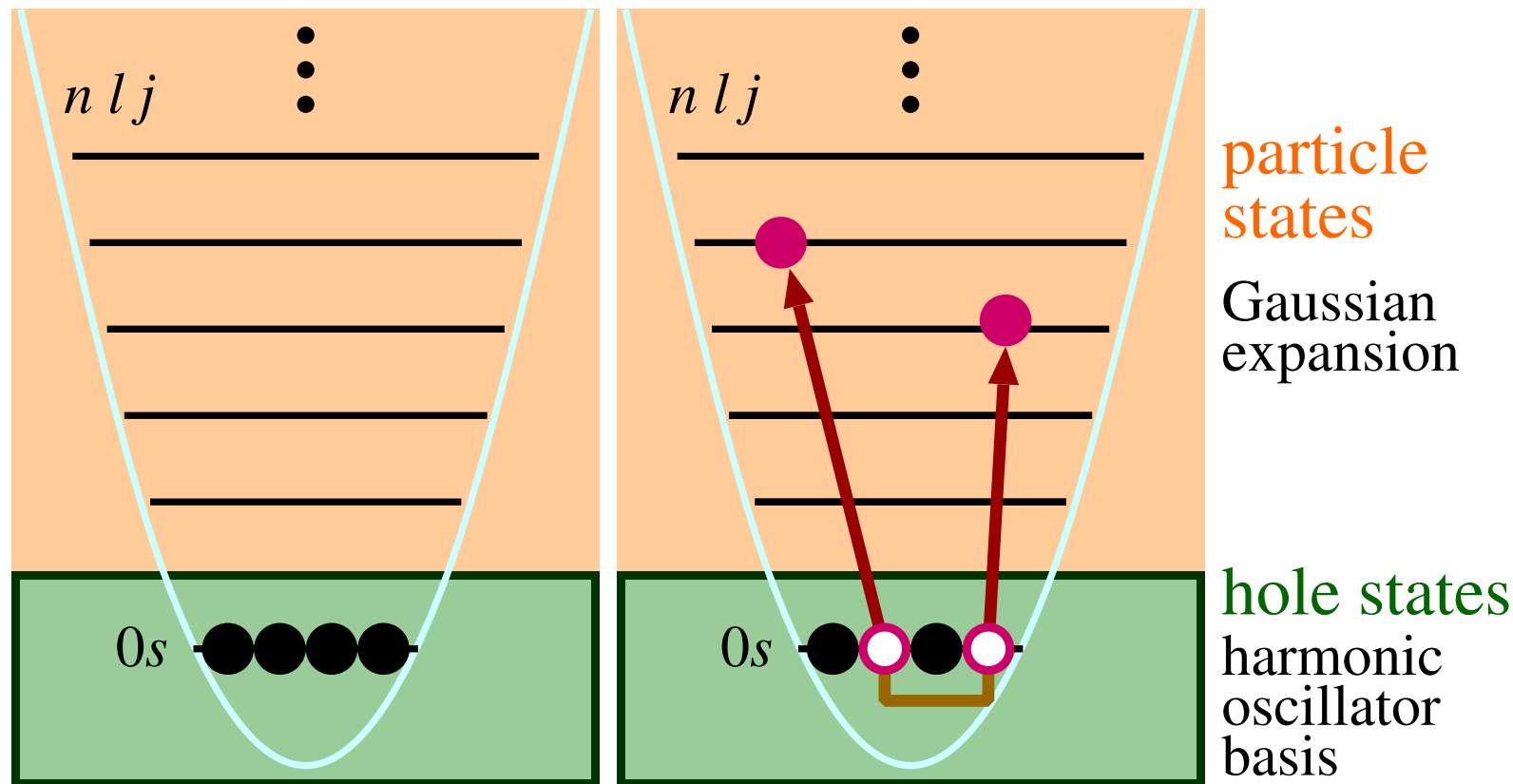
$$V_R = V_{0R} \exp(-\rho_R r^2), \quad V_t = -V_{0t} \exp(-\rho_t r^2), \quad V_s = -V_{0s} \exp(-\rho_s r^2)$$

- テンソル力 → あらわには入っていない
- ΛN - ΣN 結合 → あらわには入っていない → ΛN 側に繰り込んである

Tensor-Optimized Shell Model (TOSM)

T. Myo *et al.*, Prog. Theor. Phys. 117, 257 (2007).

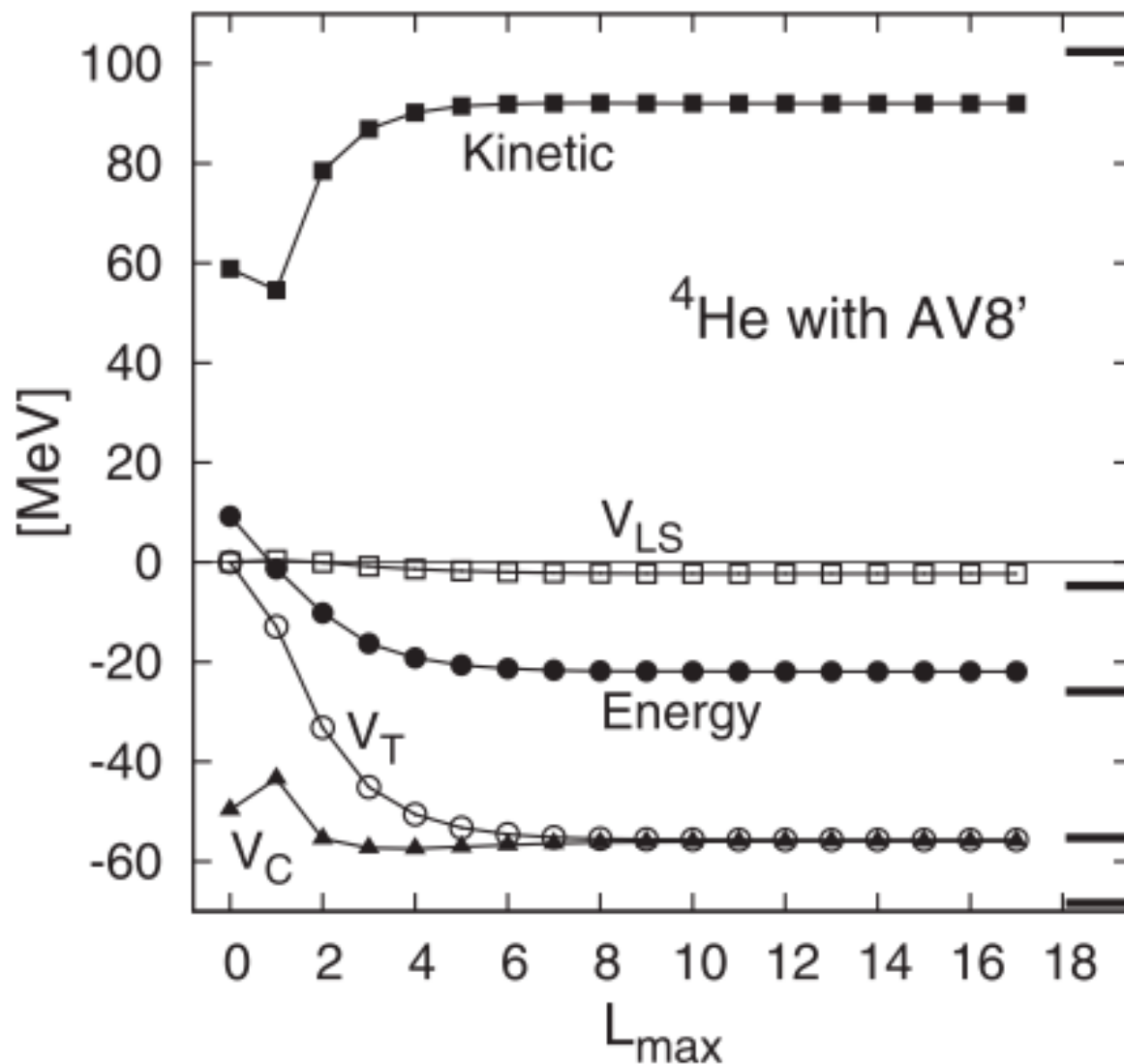
^4He の場合



hole state からの 2 核子励起で記述される高運動量の成分を取り入れる

- 模型空間 $\rightarrow l$ をどのくらいの大きさまでとるか
- particle states の記述 \rightarrow Gaussian を何本くらいとるか

Tensor-Optimized Shell Model (TOSM) の計算例 (${}^4\text{He}; 0^+$)



$(0s)_{00}^4$	82.48
$(0s)_{10}^{-2}(0p_{1/2})_{10}^2$	2.54
$(0s)_{10}^{-2}[(1s_{1/2})(0d_{3/2})]_{10}$	2.34
$(0s)_{10}^{-2}[(0p_{3/2})(0f_{5/2})]_{10}$	1.90
$(0s)_{10}^{-2}[(0p_{1/2})(0p_{3/2})]_{10}$	1.55
$(0s)_{10}^{-2}[(0d_{5/2})(0g_{7/2})]_{10}$	0.79
$(0s)_{10}^{-2}(0d_{3/2})_{10}^2$	0.44
remaining part	7.96

Tensor-Optimized Shell Model (TOSM) の計算例 (${}^4\text{He}; 0^+$)

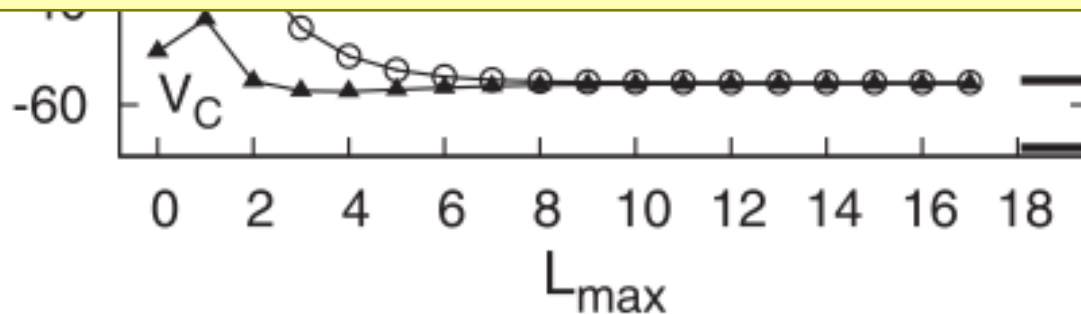
TOSM with AV8' T. Myo *et al.*, *Prog. Theor. Phys.* **121**, 511 (2009).

-22.3 MeV

Benchmark test calculation *Phys. Rev. C* **64**, 044001 (2001).

-25.9 MeV

Minnesota potential の場合は 200 keV くらい less bound



Tensor-Optimized Shell Model (TOSM) の計算例 (${}^4\text{He}; 0^+$)

TOSM with AV8' T. Myo *et al.*, Prog. Theor. Phys. 121, 511 (2009).

-22.3 MeV

Benchmark test calculation Phys. Rev. C 64, 044001 (2001).

-25.9 MeV

Minnesota potential の場合は 200 keV くらい less bound

中性子過剰ハイパー核に適用できるように拡張

(p 殻, ハイペロンの自由度)

He 同位体ラムダハイパー核への適用

- $l = 8$ まで, Gaussian の数は軌道ごとに 6 本
- 相互作用は中心力のみ
- Σ ハイペロンの自由度なし

どの程度の accuracy かを ${}^4_{\Lambda}\text{H}$, ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ でチェック

	$B_{\Lambda}({}^4_{\Lambda}\text{H}; 0^+)$	$B_{\Lambda}({}^4_{\Lambda}\text{H}^*; 1^+)$	$B_{\Lambda}({}^5_{\Lambda}\text{He}; \frac{1}{2}^+)$
This Work	1.66	0.22	3.98
Stochastic Variational Method ^(a)	2.24	1.10	4.98
Expt. ^(b)	2.04	1.00	3.12

(a) H. Nemura *et al.*, Prog. Theor. Phys. 103, 929 (2000).

(MeV)

(b) M. Jurič *et al.*, Nucl. Phys. B 52, 1 (1973),

M. Bedjidian *et al.*, Phys. Lett. B 83, 252 (1979).

500 keV ~ 1 MeV くらいの不定性

He 同位体ラムダハイパー核への適用

- $l = 8$ まで, Gaussian の数は軌道ごとに 6 本
- 相互作用は中心力のみ
- Σ ハイペロンの自由度なし

どの程度の accuracy かを ${}^4_{\Lambda}\text{H}$, ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ でチェック

	$B_{\Lambda}({}^4_{\Lambda}\text{H}; 0^+)$	$B_{\Lambda}({}^4_{\Lambda}\text{H}^*; 1^+)$	$B_{\Lambda}({}^5_{\Lambda}\text{He}; \frac{1}{2}^+)$
This Work	1.66	0.22	3.98

${}^4_{\Lambda}\text{H}$ と ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ に対して, 今回の計算ではまったく同じエネルギーを与える

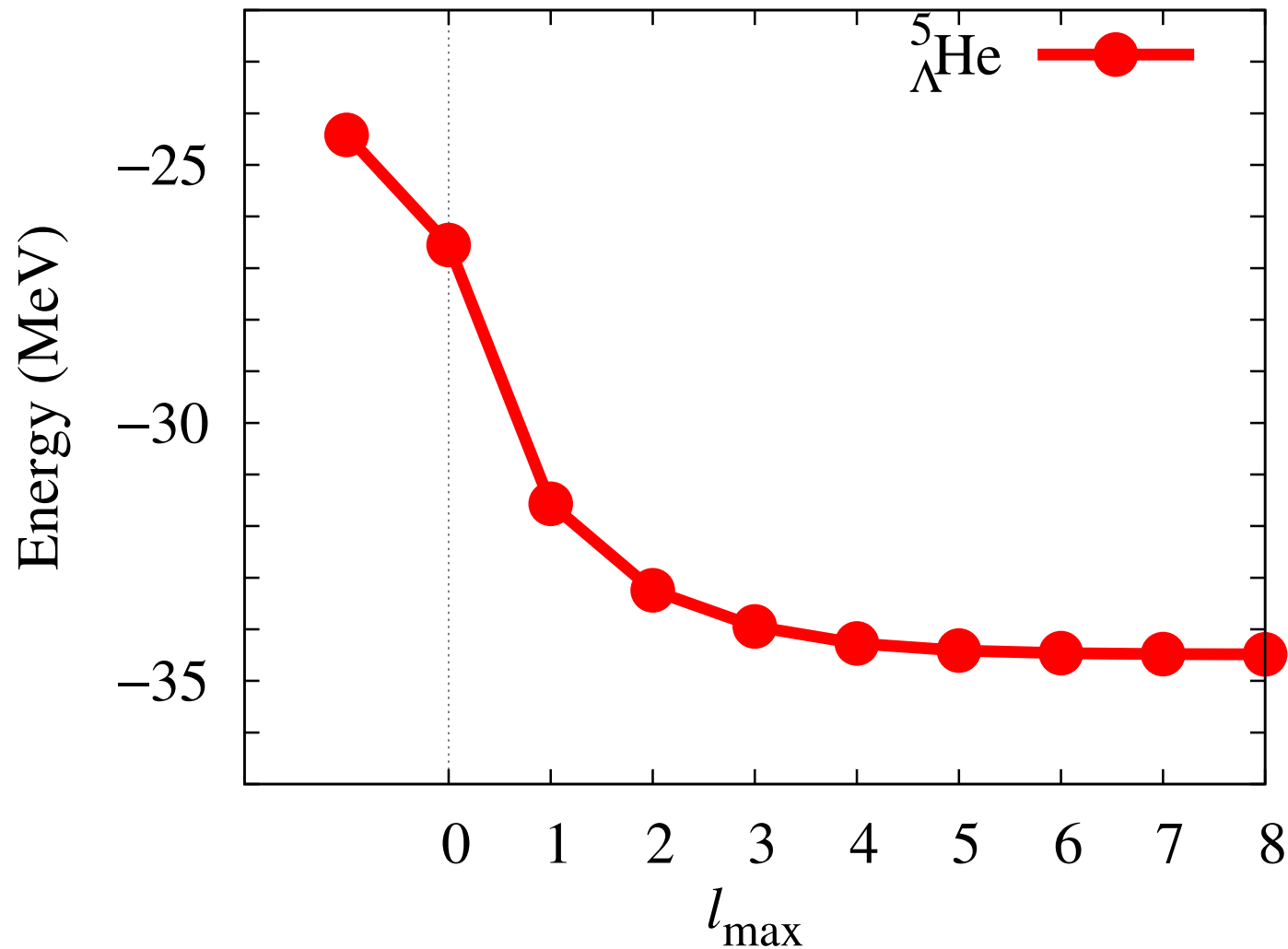
(a) H. Nemura *et al.*, Prog. Theor. Phys. 103, 929 (2000). (MeV)

(b) M. Jurič *et al.*, Nucl. Phys. B 52, 1 (1973),
M. Bedjidian *et al.*, Phys. Lett. B 83, 252 (1979).

500 keV ~ 1 MeV くらいの不定性

収束性のチェック

${}^5_{\Lambda}\text{He} (1/2^+)$ を例に l_{\max} (模型空間) の大きさに対して



相互作用のパラメタの調整

 NN 相互作用

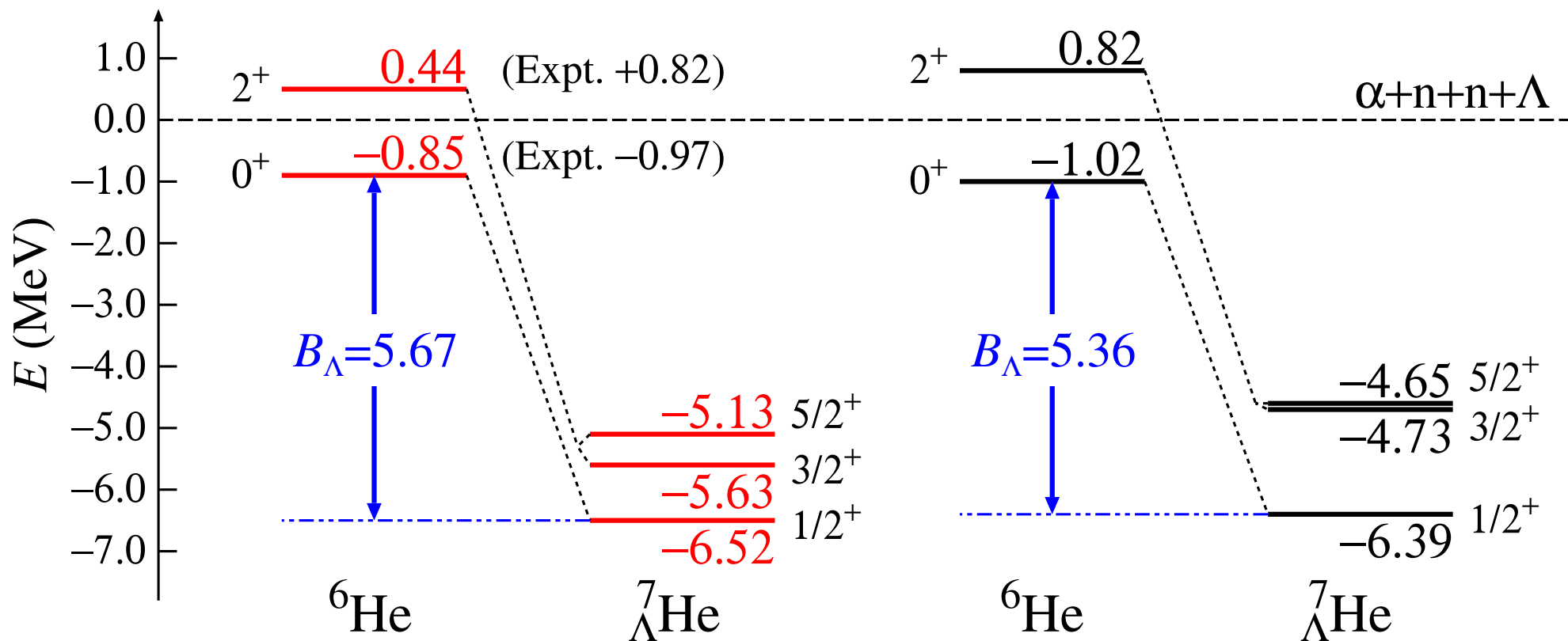
- Minnesota potential には odd channel の強さに関してパラメタがある
- ${}^7_{\Lambda}\text{He}$ に対しては ${}^6\text{He}$ の束縛エネルギーを再現するようにパラメタを調整
- ${}^9_{\Lambda}\text{He}$ に対しては ${}^8\text{He}$ の束縛エネルギーを再現するようにパラメタを調整

 ΛN 相互作用

- Jlab E01-011 で得られている ${}^7_{\Lambda}\text{He}$ の B_{Λ} を再現するように相互作用の強さを調整

${}^7_{\Lambda}\text{He}$ のエネルギー準位の計算結果

$l = 8$ まで, Gaussian の数は軌道ごとに 6 本



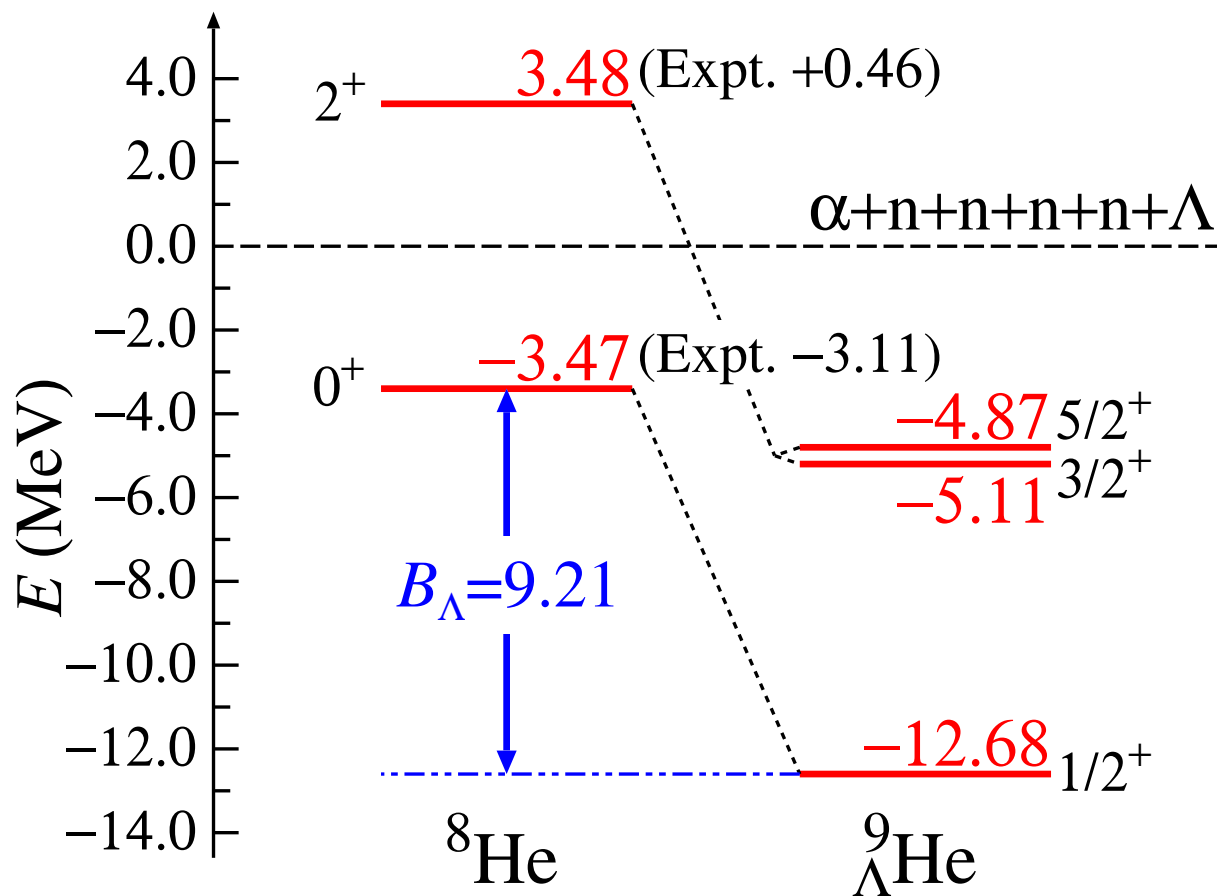
This Work

E. Hiyama *et al.*, PRC80, 054321 (2009).

Expt.: $B_{\Lambda} = 5.7 \pm 0.2 \pm 0.2$ MeV (Preliminary, Jlab E01-011)

${}^9_{\Lambda}\text{He}$ のエネルギー準位の計算結果

$l = 8$ まで, Gaussian の数は軌道ごとに 6 本



**First
Calculation
of ${}^9_{\Lambda}\text{He}!!$**

This Work

500 keV ~ 1 MeV くらいの不定性

まとめ

He 同位体のエネルギー準位を系統的に計算した

(${}^4_{\Lambda}\text{He}$, ${}^5_{\Lambda}\text{He}$, ${}^7_{\Lambda}\text{He}$, ${}^9_{\Lambda}\text{He}$)

とくに ${}^9_{\Lambda}\text{He}$ に関して実験に先駆けて prediction を行った

ただし, 中心力のみ有効相互作用を用い,
 Σ ハイペロンの自由度はあらわには入っていない

今後

中性子過剰ハイパー核に対する

テンソル力および ΛN - ΣN 結合の入った

現実的相互作用を用いた *ab initio* 計算

- 方法 : Tensor-Optimized Shell Model (TOSM)
- 原子核 : ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ ${}^6_{\Lambda}\text{He}$ ${}^7_{\Lambda}\text{He}$ ${}^8_{\Lambda}\text{He}$ ${}^9_{\Lambda}\text{He}$
- 相互作用 : AV8' (for NN), Nijmegen (for YN)

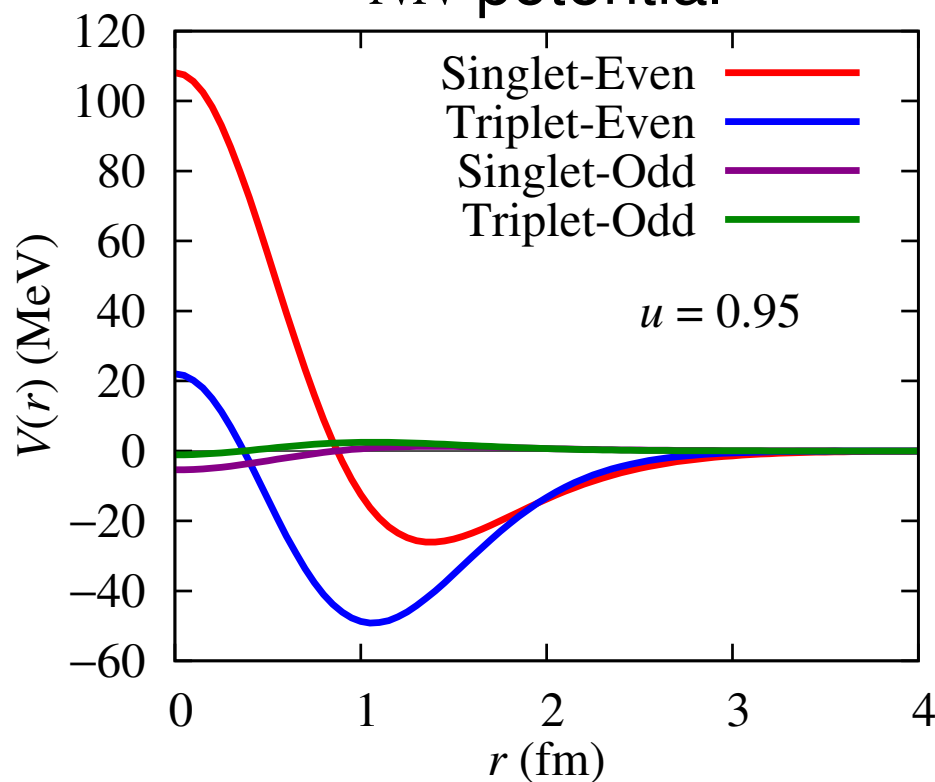
Backup

相互作用ポテンシャル

$$V_C = \left\{ V_R + \frac{1}{2} (1 + P^\sigma) V_t + \frac{1}{2} (1 - P^\sigma) V_s \right\} \left\{ \frac{1}{2} u + \frac{1}{2} (2 - u) P^r \right\}$$

$$V_R = V_{0R} \exp(-\rho_R r^2), \quad V_t = -V_{0t} \exp(-\rho_t r^2), \quad V_s = -V_{0s} \exp(-\rho_s r^2)$$

NN potential



ΛN potential

