

RCNP 研究会 「核子・ハイペロン多体系におけるクラスター現象」

2013 年 7 月 26 日 ~ 27 日

# テンソル最適化殻模型による ハイパー核のテンソル構造の理解に向けて

梅谷 篤史 (日本工業大学)

明 孝之 (大阪工業大学)

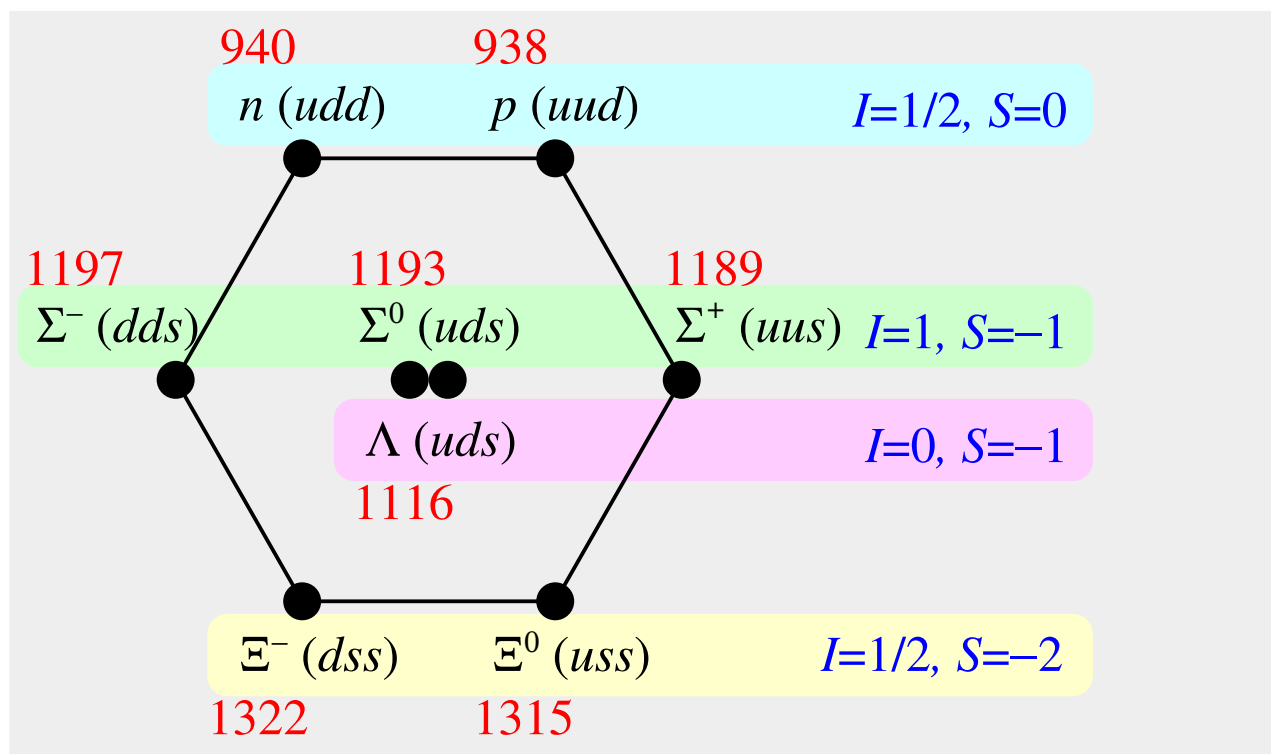
肥山 詠美子 (理研仁科センター)

土岐 博 (大阪大学 RCNP)

池田 清美 (理研仁科センター)

## ハイパー核物理の目的

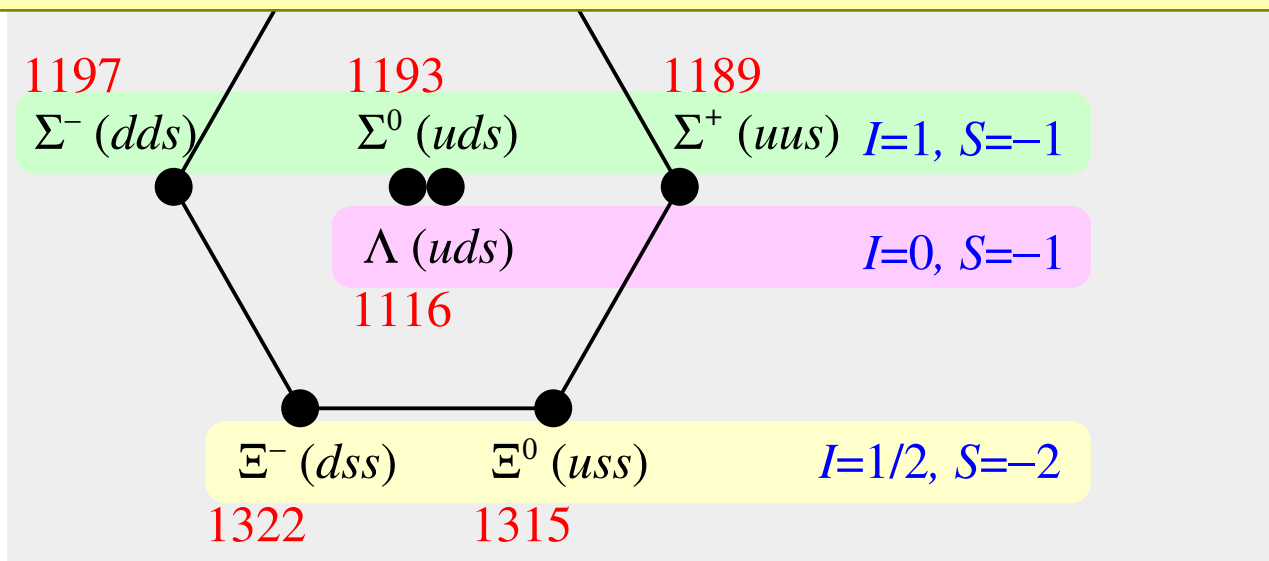
## バリオン間相互作用の統一的理解



## 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 ( $\Lambda N$  相互作用,  $\Sigma N$  相互作用,  $\Lambda N$ - $\Sigma N$  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 ( $\Lambda N$  相互作用,  $\Sigma N$  相互作用,  $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合相互作用)

**有効  $\Lambda N$  相互作用** Hypernuclear  $\gamma$ -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

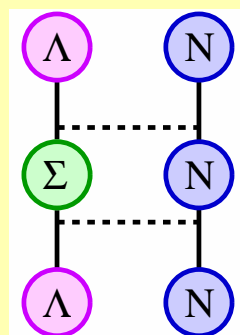
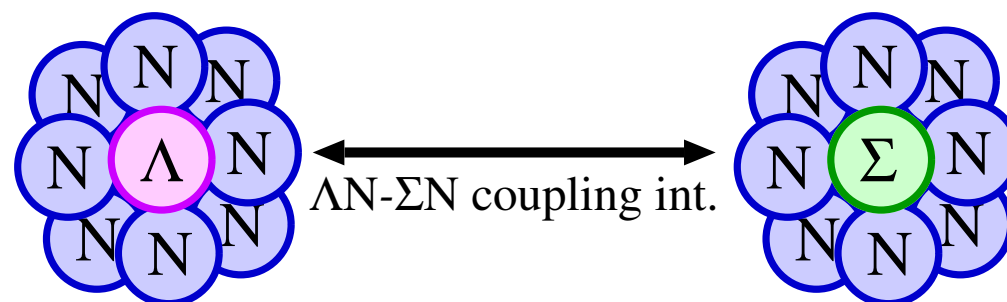
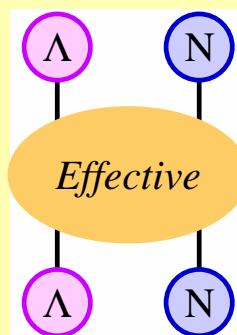
$S = -1$  セクター ( $\Lambda N$  相互作用,  $\Sigma N$  相互作用,  $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合相互作用)

**有効  $\Lambda N$  相互作用** Hypernuclear  $\gamma$ -ray data since 1998

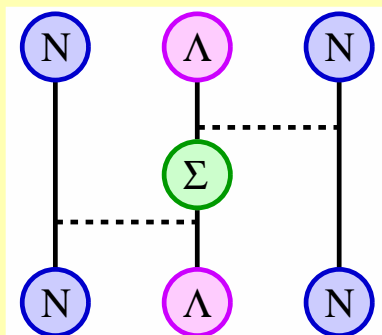
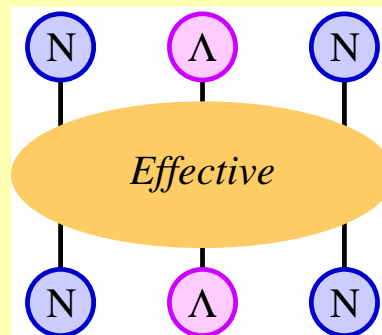
$$V_{\Lambda N}^{\text{eff}} = V_0 + V_{\sigma\sigma} \sigma_N \cdot \sigma_\Lambda + V_{\text{SLS}} \ell_{\Lambda N} \cdot (s_\Lambda + s_N) + V_{\text{ALS}} \ell_{\Lambda N} \cdot (s_\Lambda - s_N) + V_{\text{Tensor}} S_{12}$$

- 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**  $\rightarrow$   $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合相互作用

$\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合相互作用
 $\Rightarrow$ 


**Effective 2-body**  
 $\Lambda N$  interaction


 $\Rightarrow$ 


**Effective 3-body**  
 $\Lambda NN$  interaction  
(Fujita-Miyazawa type)

$\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合の強さ  $\rightarrow$  定量的に未知な部分が多い。

## $\Lambda N$ - $\Sigma N$ 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).

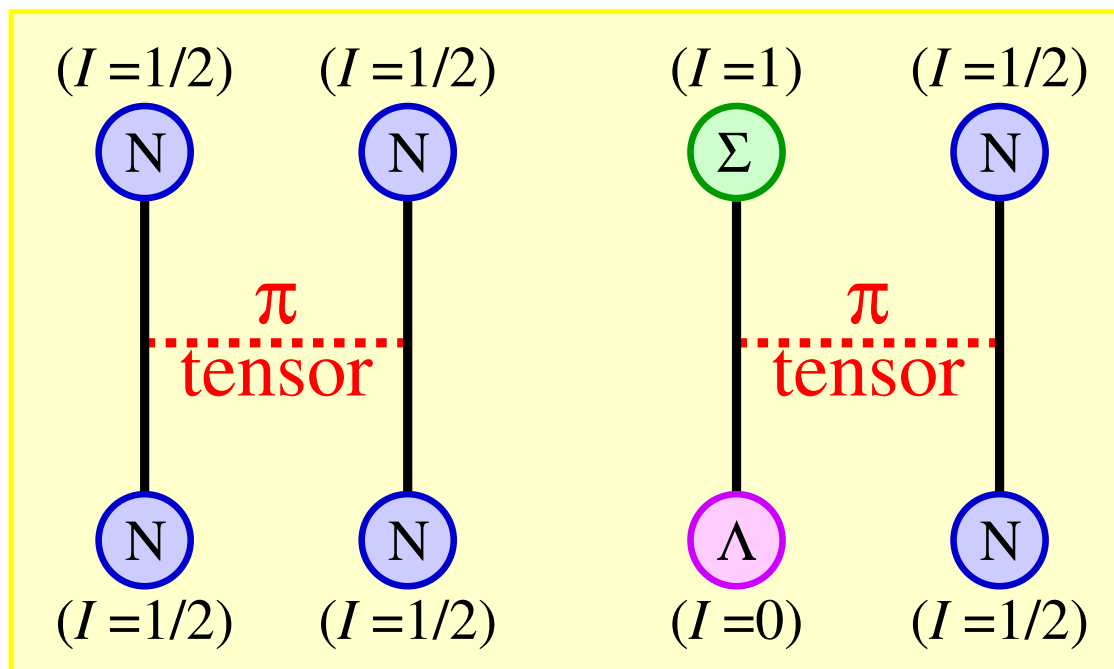
### $p$ 殻ハイパー核 (殻模型計算)

- D. Halderson, Phys. Rev. C 77, 034304 (2008).
- D.J. Millener, Nucl. Phys. A 804, 84 (2008).
- A. Umeya, T. Harada, Phys. Rev. C 79, 024315 (2009).
- A. Umeya, T. Harada, Phys. Rev. C 83, 034310 (2011).

$\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合の強さ → 定量的に未知な部分が多い。

$\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合の特徴

$\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合はおもに  $\pi$  粒子の交換によってもたらされる。



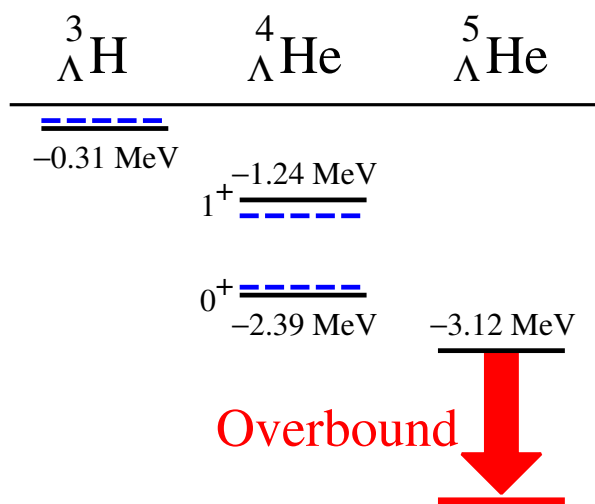
- $NN$  相互作用と同じ機構
- 強いテンソル力をもつ
- 殻模型などであらわに扱うのが難しい



## コヒーレントな $\Lambda N$ - $\Sigma N$ 結合

**Akaishi *et al.*, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 3539.**

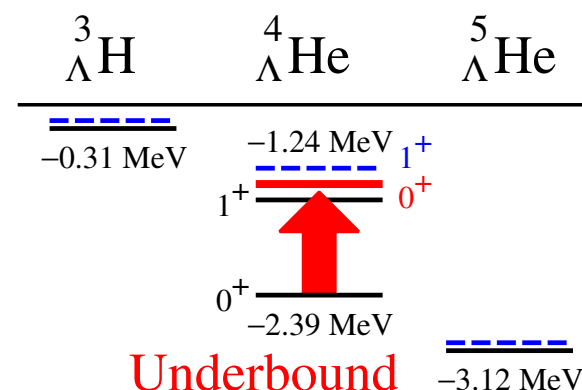
The Overbinding Problem



$\Lambda N$  single-channel calc.

Dalitz *et al.*, NP B47 (1972) 109.

The Underbinding Problem



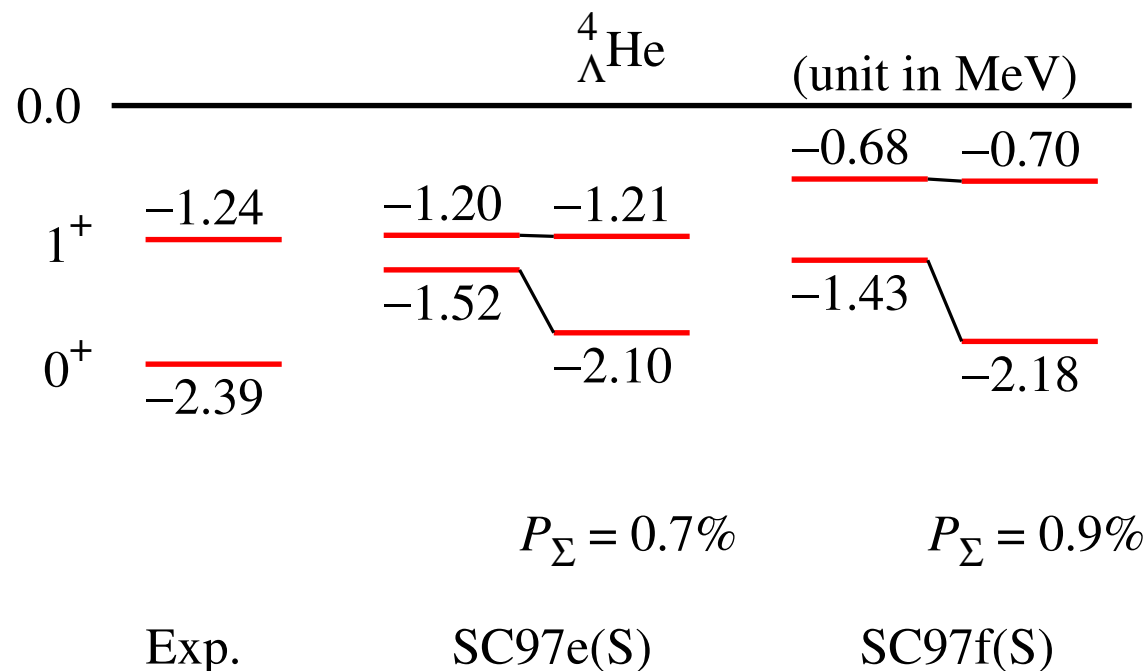
G-matrix calc. with  $\Lambda N$ - $\Sigma N(D2)$

Akaishi *et al.*, PRL 84 (2000) 3539.

- コヒーレントな  $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合によって,  ${}^5_{\Lambda}\text{He}$  の overbinding 問題もしくは  ${}^4_{\Lambda}\text{He}$  の underbinding 問題が解決する。
- コヒーレントな  $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合による引力は, **中性子が過剰な環境でより大きく** なる と期待される。

## コヒーレントな $\Lambda N$ - $\Sigma N$ 結合

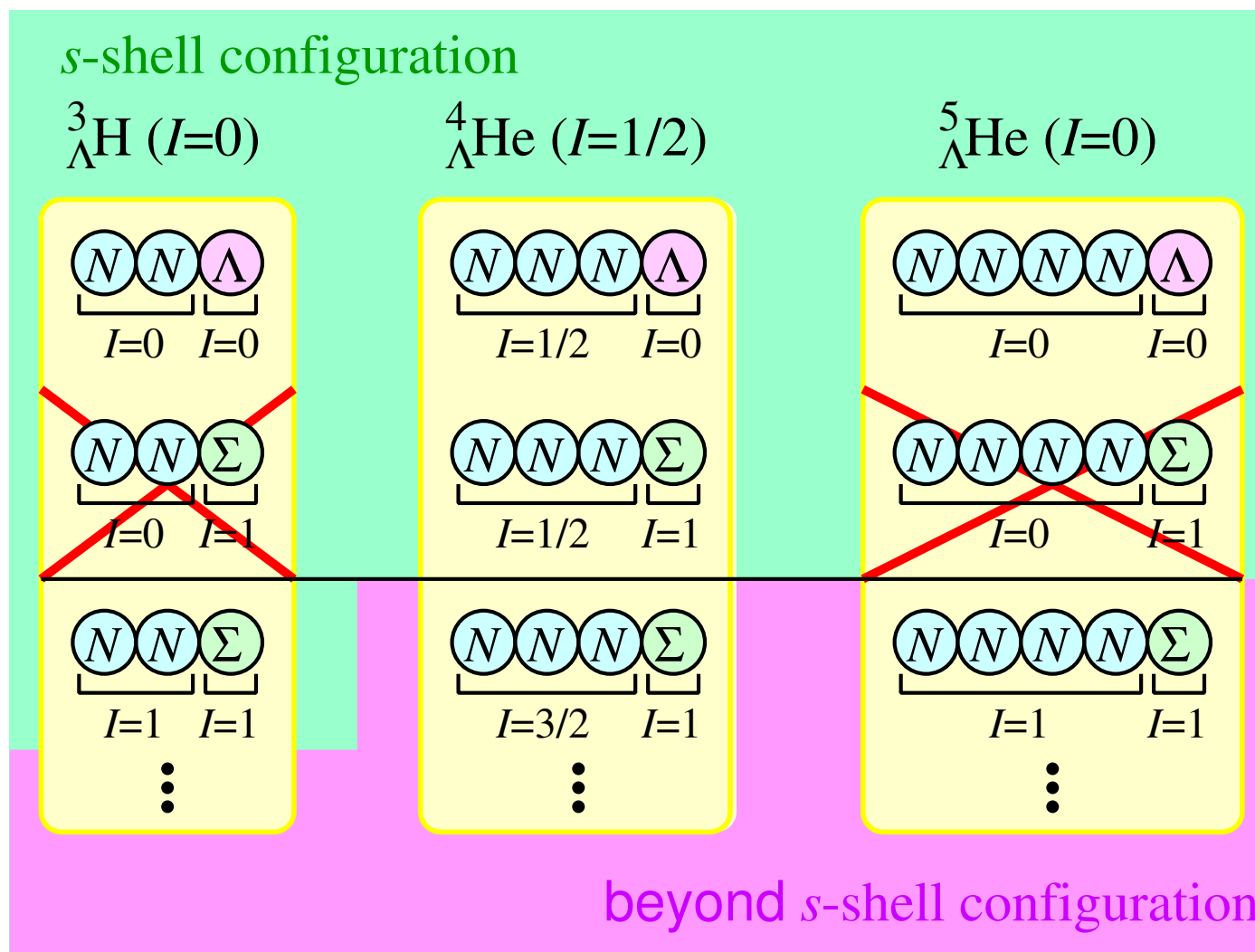
Akaishi *et al.*, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 3539.



Akaishi *et al.*, PRL 84 (2000) 3539.

- コヒーレントな  $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合によって,  ${}^5_{\Lambda}\text{He}$  の overbinding 問題もしくは  ${}^4_{\Lambda}\text{He}$  の underbinding 問題が解決する。
- コヒーレントな  $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合による引力は, **中性子が過剰な環境でより大きくなる**と期待される。

## コヒーレントな $\Lambda N$ - $\Sigma N$ 結合の殻模型による解釈



${}^4_{\Lambda}\text{He}$  には *s* 殻のみの模型空間で記述できる  $\Sigma$  を含む状態がある。

## 中性子過剰核における $\Lambda N$ - $\Sigma N$ 結合

中性子過剰核は  $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合を調べるのに適している

$\Sigma$  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  $\Sigma$  混合**

## 中性子過剰核における $\Lambda N$ - $\Sigma N$ 結合

中性子過剰核は  $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合を調べるのに適している

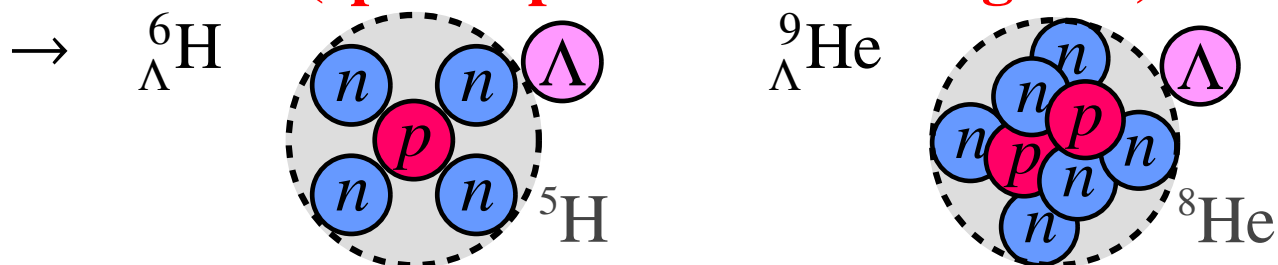
$\Sigma$  ハイペロン: アイソスピン  $I = 1$

中性子過剰核: 大きなアイソスピン

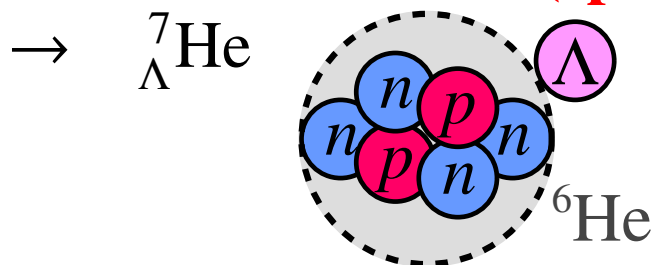
⇒ 大きな  $\Sigma$  混合

## 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)



## 中性子過剰ハイパー核に対する殻模型計算

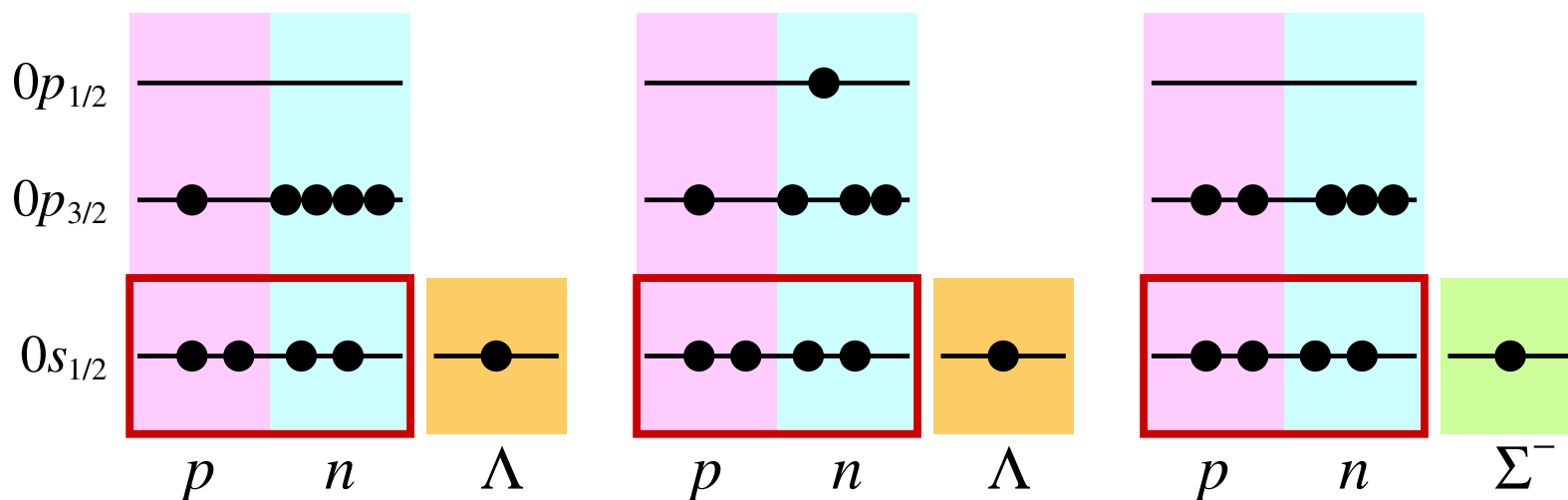
A. Umeya, T. Harada, Phys. Rev. C 83, 034310 (2011).

${}_{\Lambda}^{\text{Li}}$  ハイパー核の同位体に対して  $\Sigma$  混合率  $P_{\Sigma}$  を調べた

### 模型空間

- コア核： 4 個の核子は  ${}^4\text{He}$  コアにして固める  
( $A - 5$ ) 個の核子  $p$  殻の軌道内で動く
- ハイペロン： $\Lambda$  もしくは  $\Sigma$  は  $0s_{1/2}$  軌道にいると仮定

${}_{\Lambda}^{10}\text{Li}$  case:



## 中性子過剰ハイパー核に対する殻模型計算

A. Umeya, T. Harada, Phys. Rev. C 83, 034310 (2011).

${}_{\Lambda}\text{Li}$  ハイパー核の同位体に対して  $\Sigma$  混合率  $P_{\Sigma}$  を調べた

	ground state			1st excited state	
	$I$	$J^{\pi}$	$P_{\Sigma}(\%)$	$J^{\pi}$	$P_{\Sigma}(\%)$
${}_{\Lambda}^7\text{Li}$	0	$\frac{1}{2}^{+}$	0.10	$\frac{3}{2}^{+}$	0.02
${}_{\Lambda}^8\text{Li}$	$\frac{1}{2}$	$1^{-}$	0.17	$2^{-}$	0.01
${}_{\Lambda}^9\text{Li}$	1	$\frac{3}{2}^{+}$	0.21	$\frac{5}{2}^{+}$	0.09
${}_{\Lambda}^{10}\text{Li}$	$\frac{3}{2}$	$1^{-}$	0.34	$2^{-}$	0.17
${}_{\Lambda}^{11}\text{Li}$	2	$\frac{1}{2}^{+}$	0.52	$\frac{3}{2}^{+}$	0.28
${}_{\Lambda}^{12}\text{Li}$	$\frac{5}{2}$	$1^{-}$	0.65	$2^{-}$	0.41
${}_{\Lambda}^4\text{He}$	$\frac{1}{2}$	$0^{+}$	2.08	$1^{+}$	1.03

$\Sigma$  混合率  $\sim 0.1\%$   $\rightarrow$  中性子数の増加に伴って大きくなる

## 中性子過剰ハイパー核に対する殻模型計算

A. Umeya, T. Harada, Phys. Rev. C 83, 034310 (2011).

${}_{\Lambda}^7\text{Li}$  ハイパー核の同位体に対して  $\Sigma$  混合率  $P_{\Sigma}$  を調べた

	$I$	ground state		1st excited state	
		$J^{\pi}$	$P_{\Sigma}(\%)$	$J^{\pi}$	$P_{\Sigma}(\%)$
${}_{\Lambda}^7\text{Li}$	0	$1^{+}$	0.10	$3^{+}$	0.03
${}_{\Lambda}^7\text{He}$	$\frac{1}{2}$	$0^{+}$	2.08	$1^{+}$	1.03

- コア励起は直接扱われていない
- 励起した  $\Sigma$  を含む配位は直接扱われていない
- テンソル力の効果のほとんどは有効相互作用の中心力に繰り込まれている

$\Sigma$  混合率  $\sim 0.1\%$   $\rightarrow$  中性子数の増加に伴って大きくなる



## この研究でやりたいこと

中性子過剰ハイパー核に対する  $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合をあらわに入れた 計算  
現実的相互作用を用いた

方法: Tensor-Optimized Shell Model (TOSM)

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

- $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合は強いテンソル力をもつ
- テンソル力をあらわに取り込めるようにした殻模型

+

Unitary Correlation Operator Method (UCOM)

*H. Feldmeier et al., Nucl. Phys. A 632, 61 (1998).*

- $NN$ ,  $YN$  相互作用には short-range correlation が含まれる
- Correlation function を用いて  
short-range correlation をうまく取り扱う方法

He の同位体 *T. Myo, AU, H. Toki, K. Ikeda, Phys. Rev. C 84, 034315 (2011).*

Li の同位体 *T. Myo, AU, H. Toki, K. Ikeda, Phys. Rev. C 86, 024318 (2012).*

この研究でやりたいこと

中性子過剰ハイパー核に対する  $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合をあらわに入れた 計算  
現実的相互作用を用いた

方法: Tensor Optimized Shell Model (TOSM)

今回の発表では...

ハイパー核に対する TOSM 計算のチェックとして  
 $s$  殻のハイパー核を計算する。

short-range correlation をよく取り扱う方法

He の同位体 T. Myo, AU, H. Toki, K. Ikeda, Phys. Rev. C 84, 034315 (2011).  
Li の同位体 T. Myo, AU, H. Toki, K. Ikeda, Phys. Rev. C 86, 024318 (2012).

## なぜ TOSM か？

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  
 $\Lambda N$ - $\Sigma N$  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**

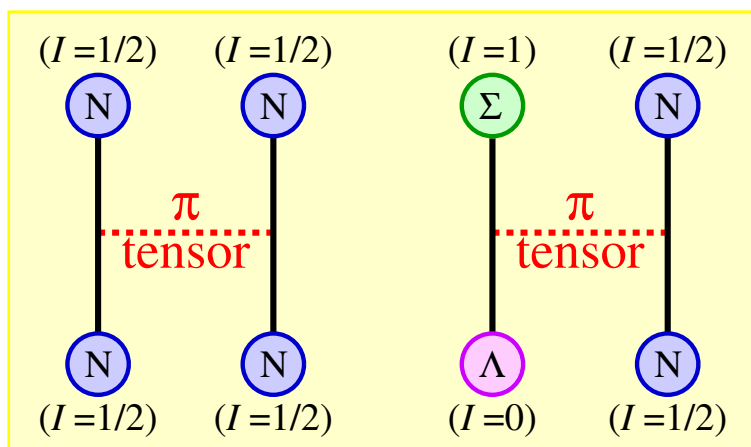
クラスター模型  $\alpha$  を固めて行う ←  $\Sigma$  ハイペロンは  $\alpha$  を壊す

殻模型 模型空間の制約 ← 模型空間内で記述できない  $\Sigma$  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

$\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合はおもに  $\pi$  粒子の交換によってもたらされる

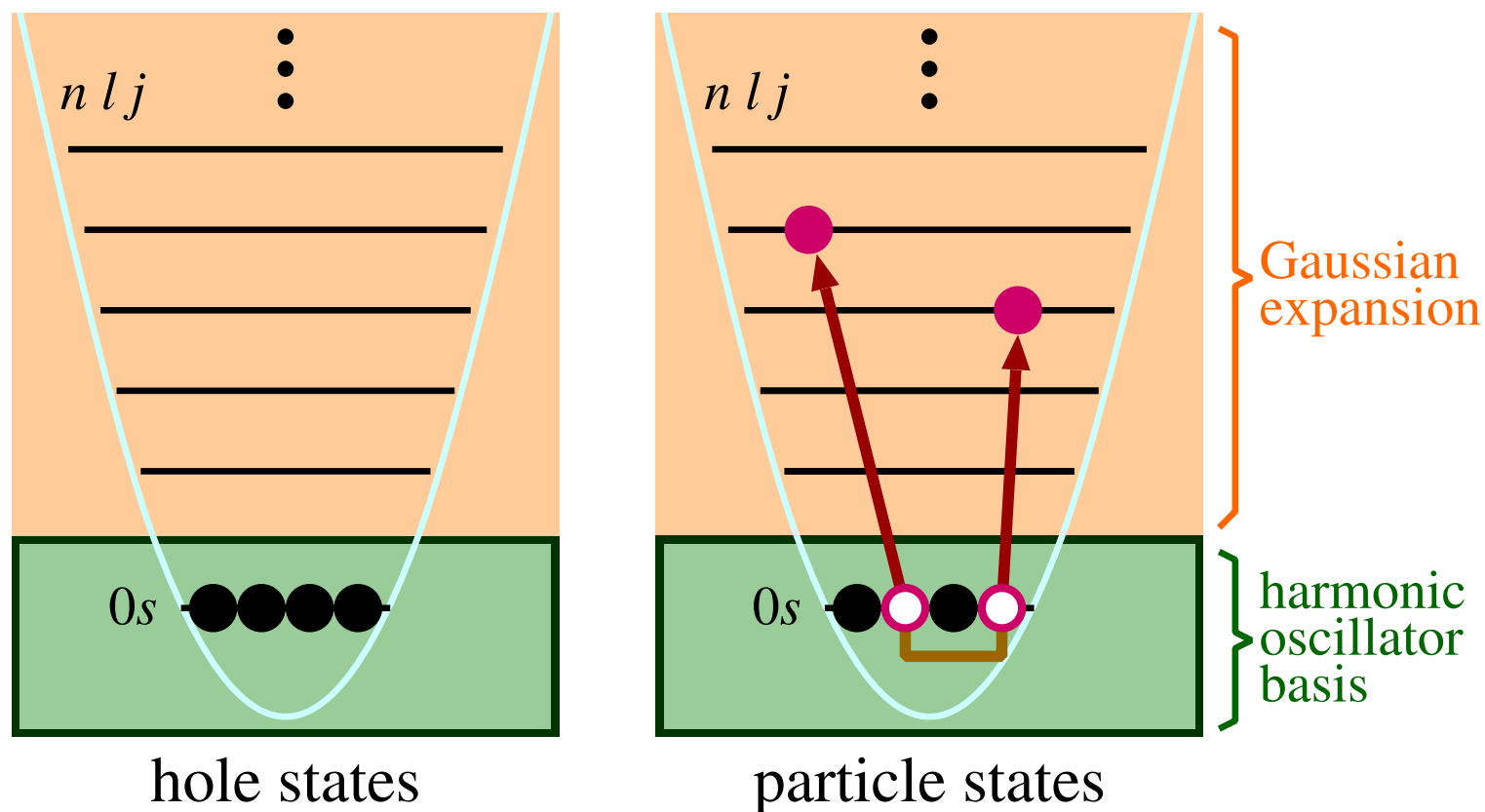


- $NN$  相互作用と同じ機構
- 強いテンソル力をもつ
- 殻模型などであらわに扱うのが難しい

## Tensor-Optimized Shell Model (TOSM)

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

${}^4\text{He}$  の場合

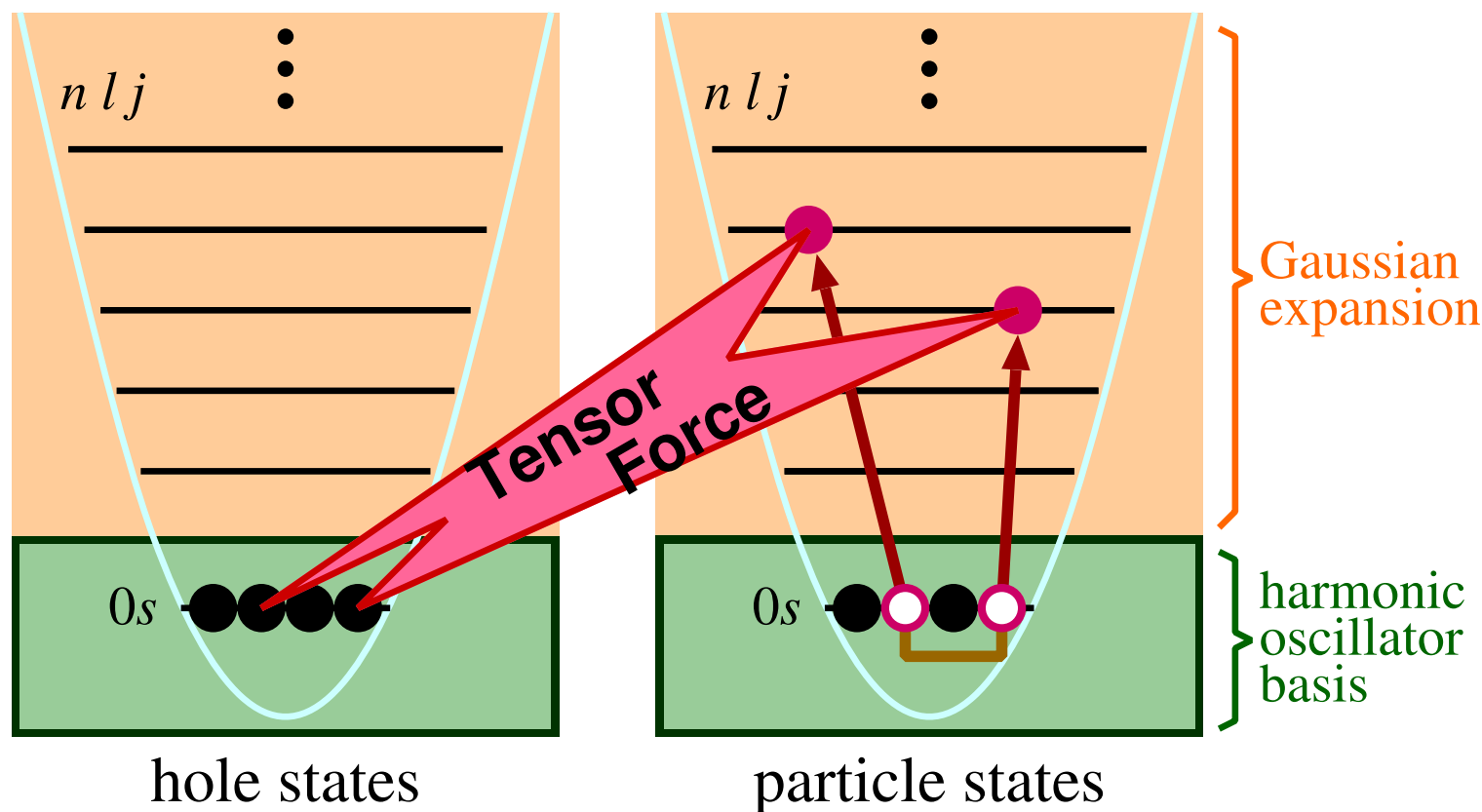


- hole state は通常の殻模型で記述される状態
- hole state からの 2 核子励起で記述される高運動量の成分を取り入れる

## Tensor-Optimized Shell Model (TOSM)

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

$^4\text{He}$  の場合

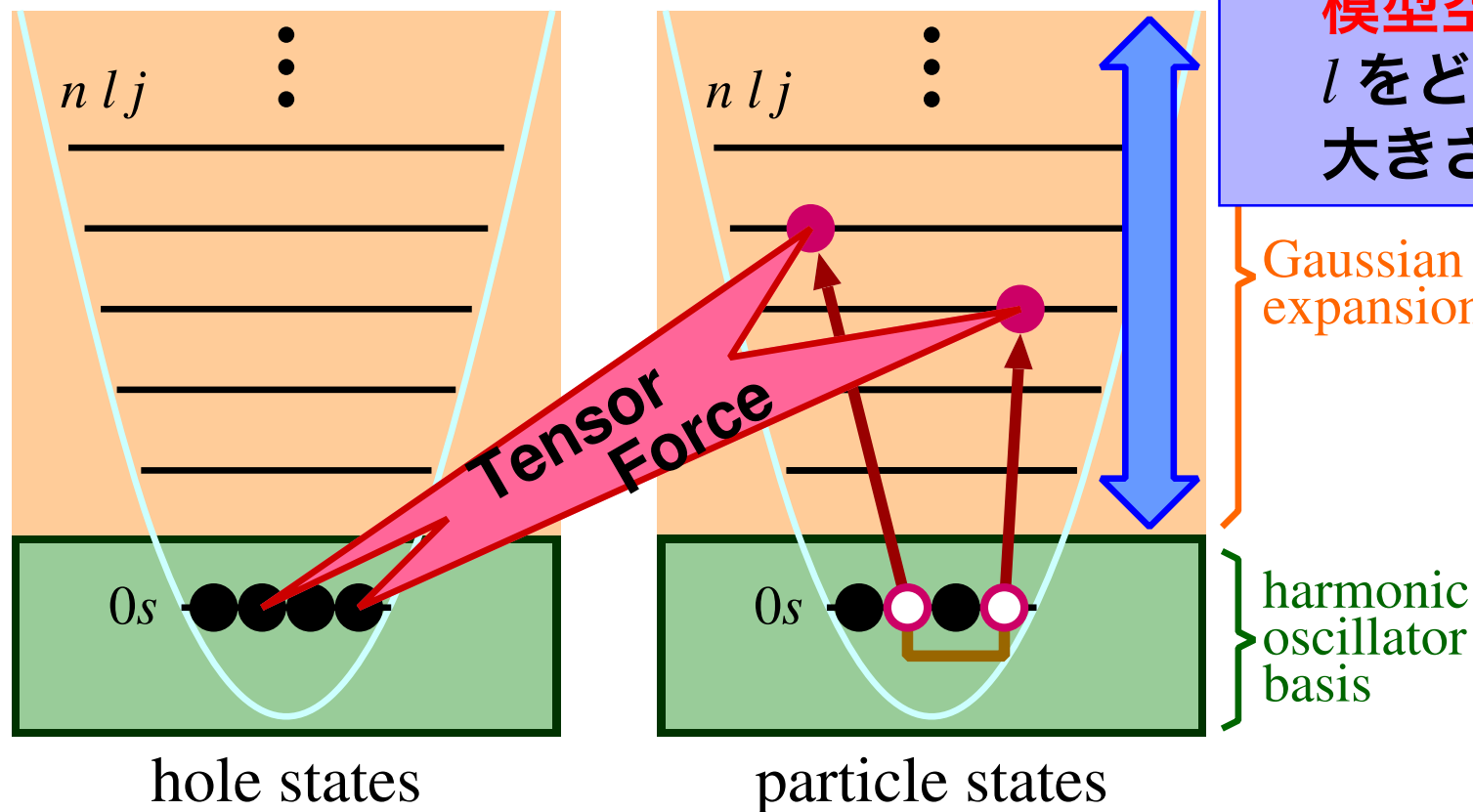


- hole state は通常の殻模型で記述される状態
- hole state からの 2 核子励起で記述される高運動量の成分を取り入れる
- 高運動量の成分はテンソル力によって強く hole state と結びつく

## Tensor-Optimized Shell Model (TOSM)

${}^4\text{He}$  の場合

T. Myo et al., Prog. T



• 計算する上で重要な点 (1)

**模型空間**

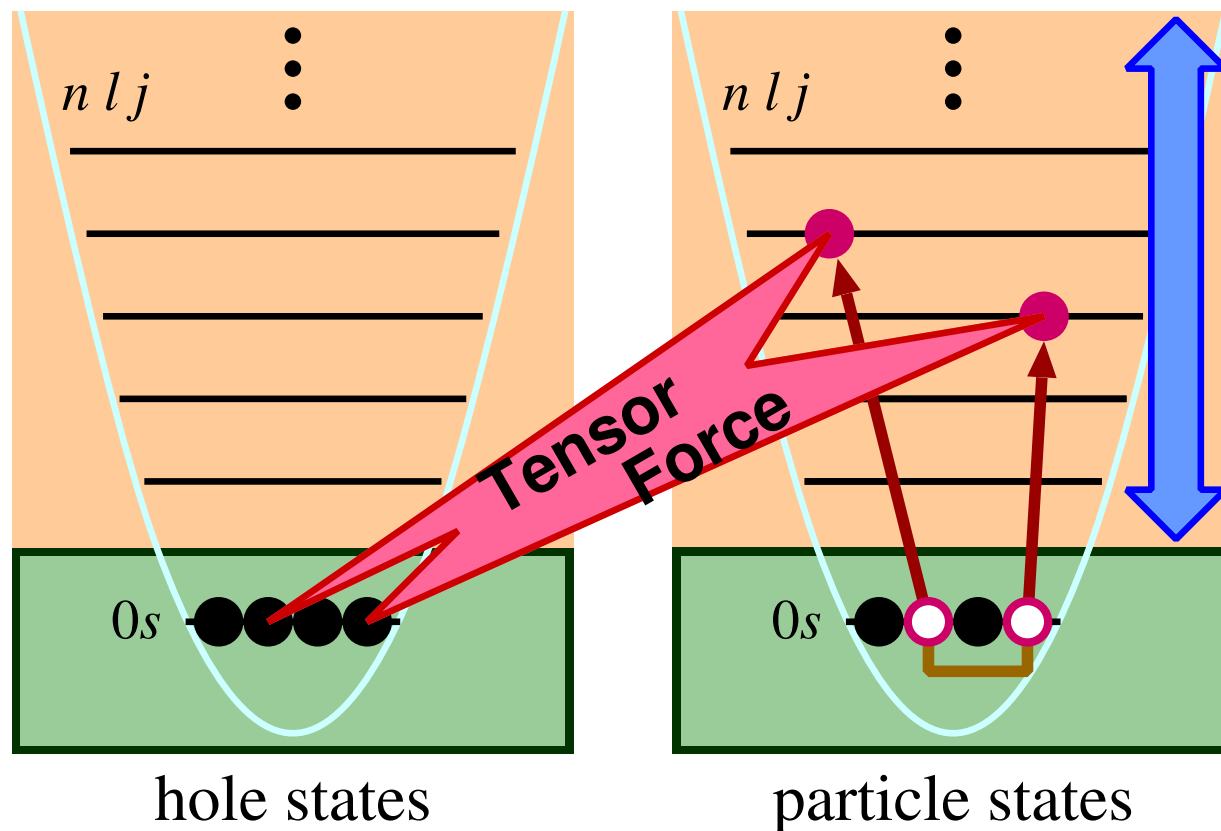
$l$ をどのくらいの  
大きさまでとるか

- hole state は通常の殻模型で記述される状態
- 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
- 高運動量の成分はテンソル力によって強く hole state と結びつく

## Tensor-Optimized Shell Model (TOSM)

${}^4\text{He}$  の場合

T. Myo et al., Prog. T



- 計算する上で重要な点 (1)

**模型空間**

$l$ をどのくらいの  
大きさまでとるか

Gaussian  
expansion

- 計算する上で重要な点 (2)

**高運動量成分の波動関数**  
どのようなレンジの  
Gaussian を何本使うか

- hole state は通常の殻模型で記述される状態
- 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
- 高運動量の成分はテンソル力によって強く hole state と結びつく

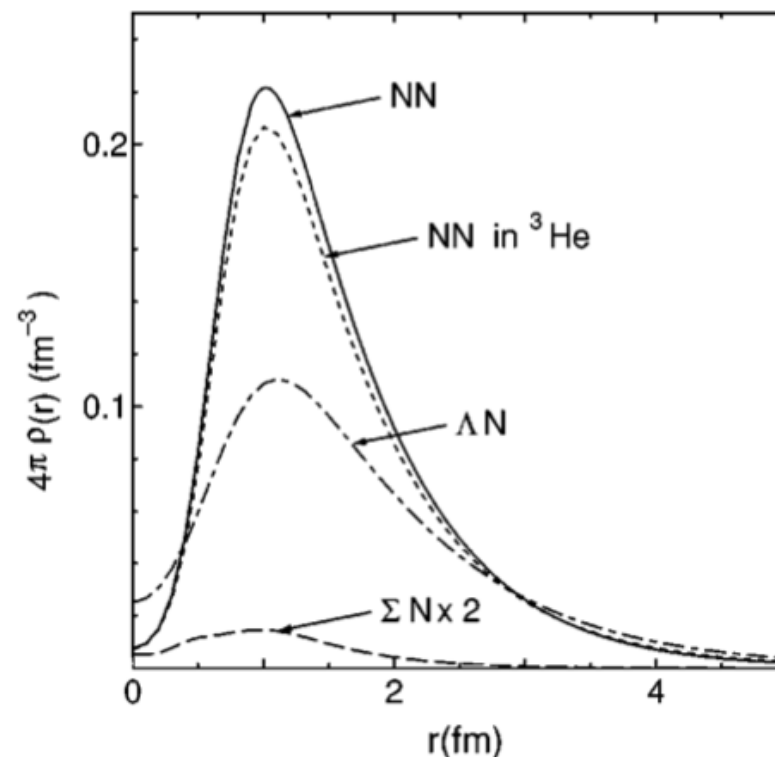
## Unitary Correlation Operator Method (UCOM)

H. Feldmeier *et al.*, Nucl. Phys. A 632, 61 (1998).

- 殻模型波動関数は short-range correlation の扱いが苦手
- UCOM によって short-range correlation の効果を相互作用に含ませる

### 注意点

- correlation function の形にあわせて UCOM の最適なパラメタが決まる
- $NN$  相互作用の correlation function と  $\Lambda N$  相互作用の correlation function は形が異なるので UCOM の最適なパラメタも当然異なる



Correlation functions in  ${}^4_{\Lambda}\text{He}$

E. Hiyama *et al.*, Phys. Rev. C 65, 011301(R) (2001).



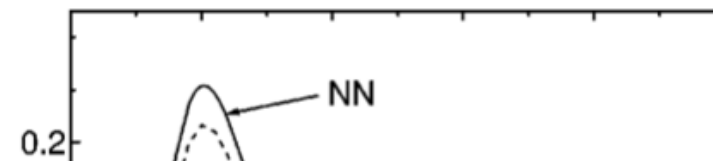
## Unitary Correlation Operator Method (UCOM)

**H. Feldmeier *et al.*, Nucl. Phys. A 632, 61 (1998).**

- 殻模型波動関数は short-range correlation の扱いが苦手
- UCOM によって short-range correlation の効果を相互作用に含ませる

### 注意点

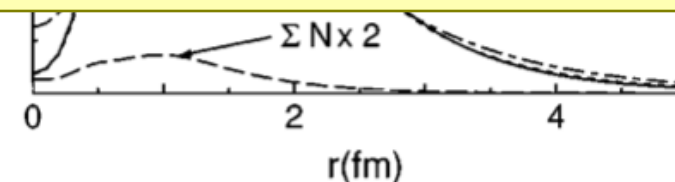
- correlation function の形に



今回は

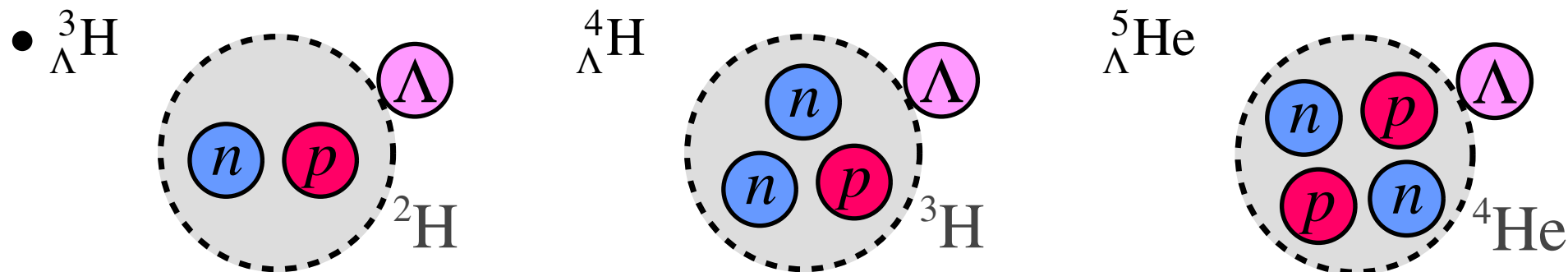
- $NN$  にのみ UCOM を適用
- $YN$  については UCOM なし

異なるので UCOM の最適な  
パラメタも当然異なる



Correlation functions in  ${}^4_{\Lambda}\text{He}$

**E. Hiyama *et al.*, Phys. Rev. C 65, 011301(R) (2001).**

$s$  殻ハイパー核の TOSM 計算

- 束縛エネルギーへの  $YN$  相互作用の寄与を成分ごとに調べる

## 用いた相互作用

- $NN$  間 **G3RS** **R. Tamagaki, Prog. Theor. Phys. 39, 91 (1968).**

- $YN$  間  $V_{YN} = V_0^{YN} + \sigma \cdot \sigma V_{\sigma}^{YN} + \ell \cdot s V_{\ell s}^{YN} + S_{12} V_{\text{tensor}}^{YN}$

made by S. Shinmura

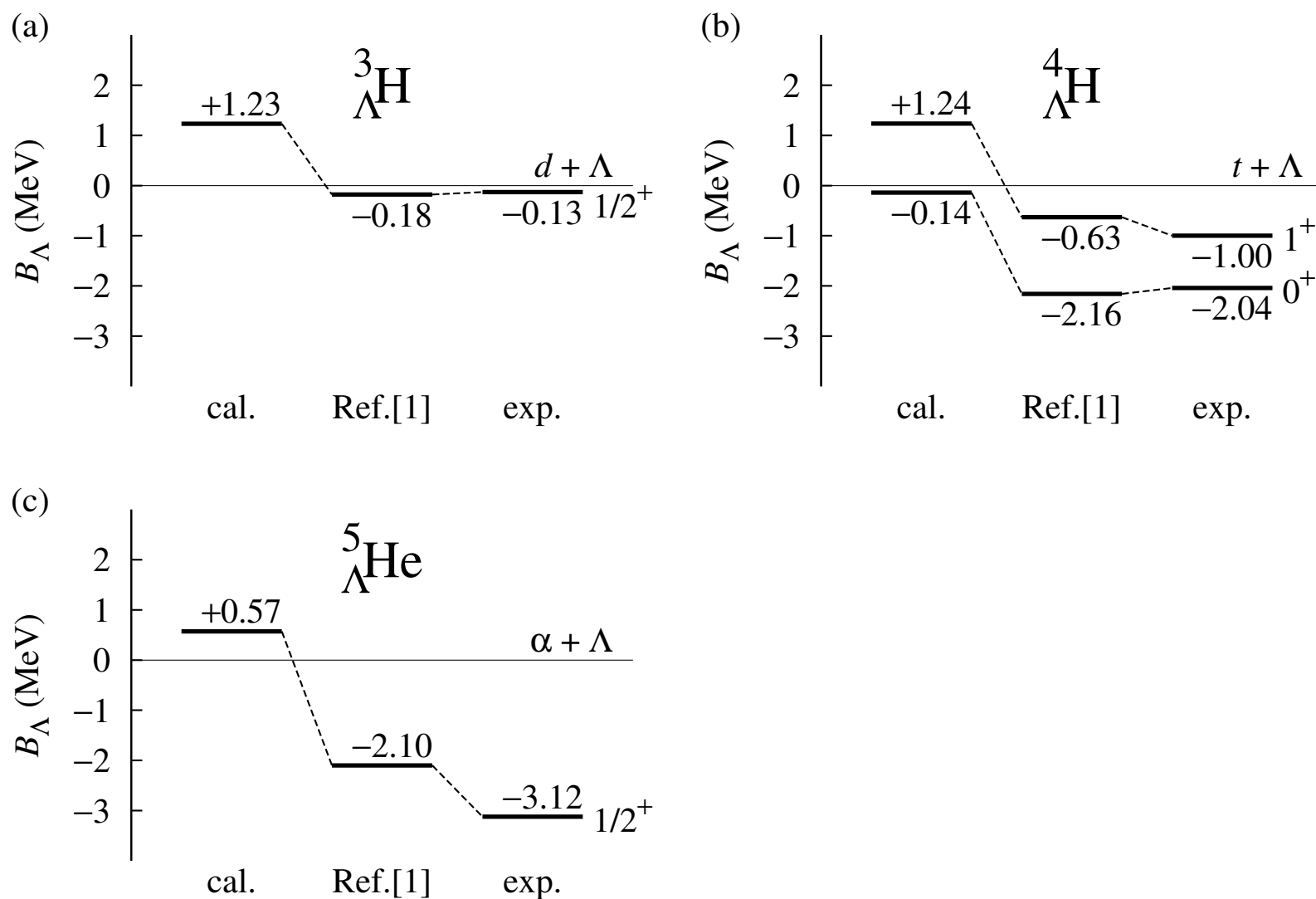
NSC97f を simulate したもの (original の NSC97f ではない)

Few-body 計算で使われている

**E. Hiyama *et al.*, Phys. Rev. C 65, 011301(R).**

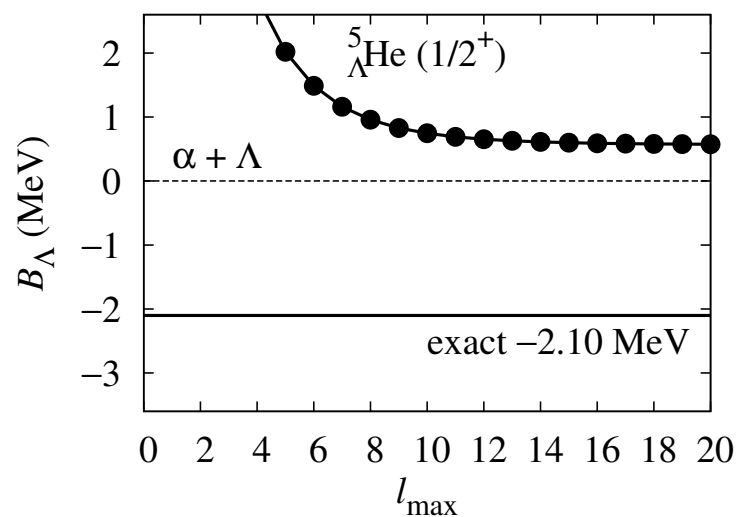
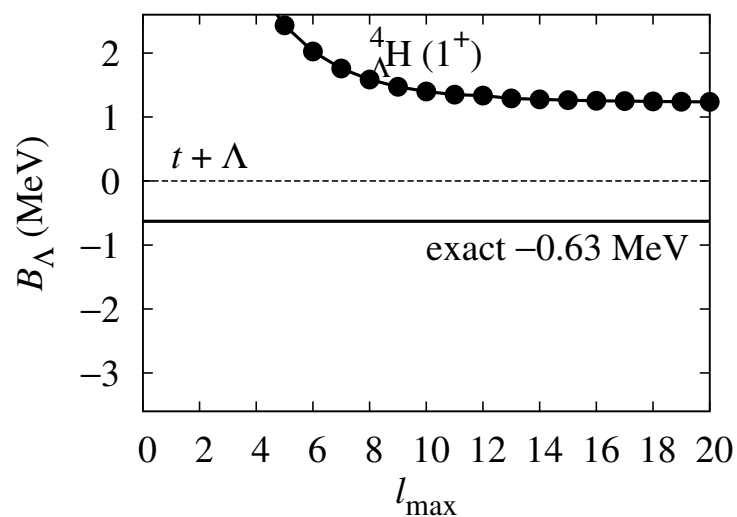
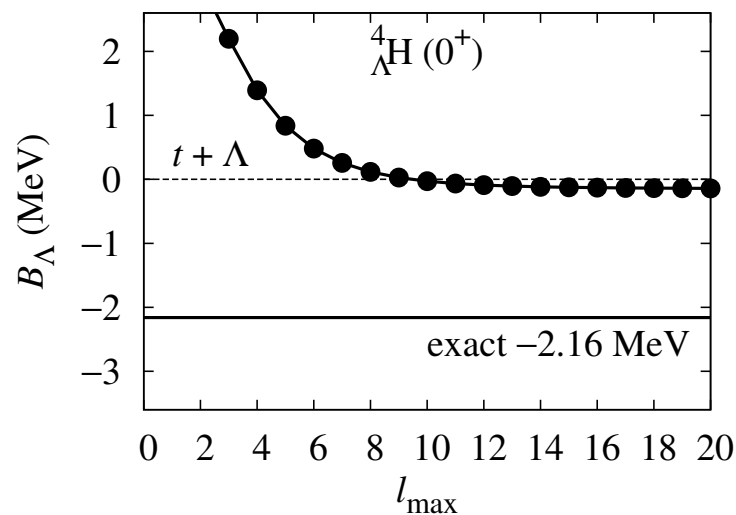
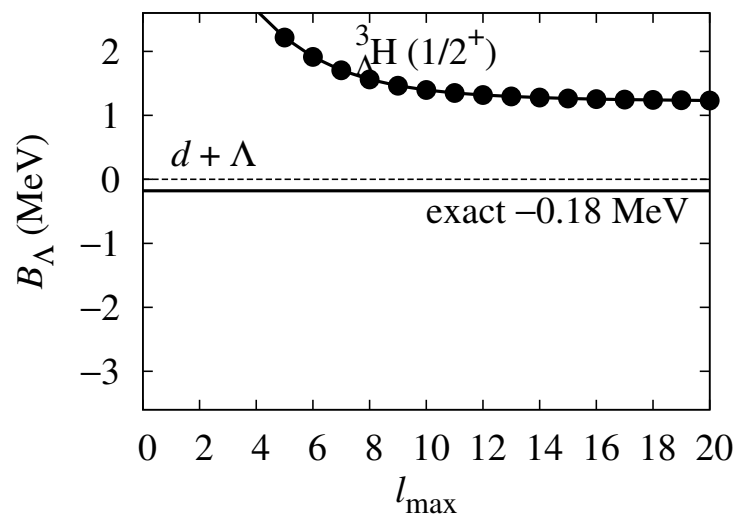
**H. Nemura *et al.*, Phys. Rev. Lett. 89, 142504 (2002).**

## 計算結果 $s$ 殻ハイパー核のエネルギー準位



[1] H. Nemura *et al.*, Phys. Rev. Lett. 89, 142504 (2002).

## 計算結果 模型空間の大きさと $B_\Lambda$ の収束性



- $l_{\max} = 20$  で十分に収束している

## 計算結果 $\Lambda N$ - $\Sigma N$ 結合の役割

$YN$  相互作用の各成分の束縛エネルギーへの寄与

$\langle V_{YN} \rangle$ in ${}^3_{\Lambda}\text{H}; 1/2^+$ (MeV)				$\langle V_{YN} \rangle$ in ${}^4_{\Lambda}\text{H}; 0^+$ (MeV)			
	Central	Tensor	LS		Central	Tensor	LS
$\Lambda N$	-3.31	-0.27	-0.04	$\Lambda N$	-3.45	-0.93	-0.13
$\Lambda N$ - $\Sigma N$	-0.33	<b>-1.65</b>	0.04	$\Lambda N$ - $\Sigma N$	-1.20	<b>-6.75</b>	0.14
$\Sigma N$	0.14	-0.08	-0.08	$\Sigma N$	0.51	-0.25	-0.37

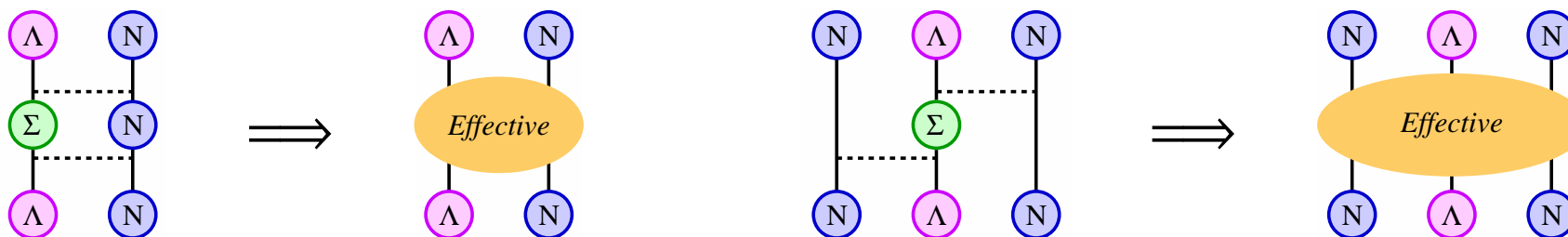
$\langle V_{YN} \rangle$ in ${}^4_{\Lambda}\text{H}; 1^+$ (MeV)				$\langle V_{YN} \rangle$ in ${}^5_{\Lambda}\text{He}; 1/2^+$ (MeV)			
	Central	Tensor	LS		Central	Tensor	LS
$\Lambda N$	0.43	-0.64	-0.04	$\Lambda N$	0.24	-0.86	-0.05
$\Lambda N$ - $\Sigma N$	-1.46	<b>-9.64</b>	0.10	$\Lambda N$ - $\Sigma N$	-2.10	<b>-13.67</b>	0.12
$\Sigma N$	0.89	0.18	-0.57	$\Sigma N$	1.46	0.45	-0.85

- $\Lambda N$ - $\Sigma N$  結合相互作用のテンソル成分が大きい

## まとめと今後

### $s$ 殻ハイパー核 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ , ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ , ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ の TOSM + UCOM 計算

- 2 MeV 程度 underbound
  - (1)  $l_{\max}$  は 20 で十分
  - (2)  $YN$  相互作用に対する UCOM パラメタの検討
  - (3)  $4p$ - $4h$  状態の効果の検討
- $\Lambda N$ - $\Sigma N$  相互作用の役割



### 中性子過剰ハイパー核の TOSM 計算

- $\alpha$  クラスターを仮定しない  $\Sigma$  をあらわに取り入れた計算
- 質量数  $A = 9$  まで進めて  ${}_{\Lambda}\text{He}$  同位体について系統的に分析