

2006年 KEK 研究会

「現代の原子核物理」

カイラル対称な RMF 模型による
ハイパー核の解析

椿原康介，前川秀基，大西明
北海道大学 理学院 宇宙理学専攻

Introduction

- Relativistic Mean Field (RMF)
 - $L_{RMF} = L_{B-Mcoupl.} + L_M + L_B$ を自己無矛盾に解く手法
 - 原子核、核物質双方の特徴を良く再現
 - 高密度物質での状態方程式 (EOS) の計算
- ハイペロンを含む RMF 模型
 - 高密度側：エネルギー的にハイペロン有利
 - ハイペロンを含む EOS: ハイペロンの相互作用には不確定性が残る [1]
 - RMFをハイパー核の情報を再現するよう決定
 - 「対称性」：フレーバー対称性やカイラル対称性

[1] Yamamoto-Nishizaki-Takatsuka, NPA 691 (2001) 432.

Chiral symmetric RMF model

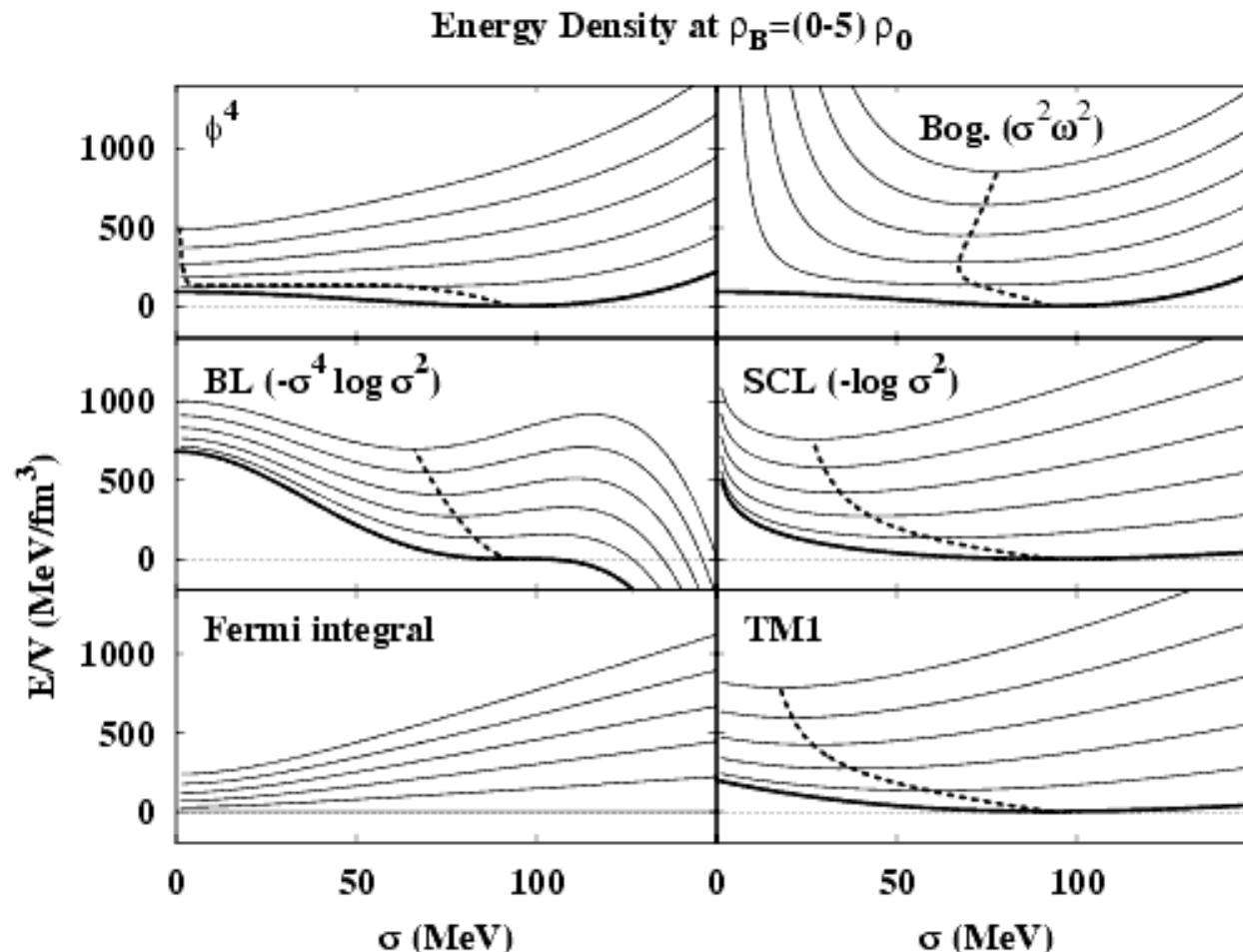
- ハドロンの質量：カイラル対称性の破れ
- 今までのカイラル対称な RMF 模型：
 ϕ^4 、Fermion loop 等からの有効相互作用
→問題点：カイラル対称性の低密度での回復、
硬い EoS
- 我々の RMF 模型：
強結合近似格子 QCD[2] からの有効相互作用

$$U_\sigma = -\frac{a}{2} \log(\det(M^\dagger M)) + b \operatorname{tr}(M^\dagger M) + C_\sigma \sigma$$

$$U_\sigma = -2a \left\{ \log\left(1 + \frac{\sigma}{f_\pi}\right) + \frac{\sigma}{f_\pi} - \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma}{f_\pi}\right)^2 \right\} + \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 + \frac{1}{2} m_\pi^2 \pi^2 \quad a = \frac{f_\pi^2}{4} (m_\sigma^2 - m_\pi^2)$$

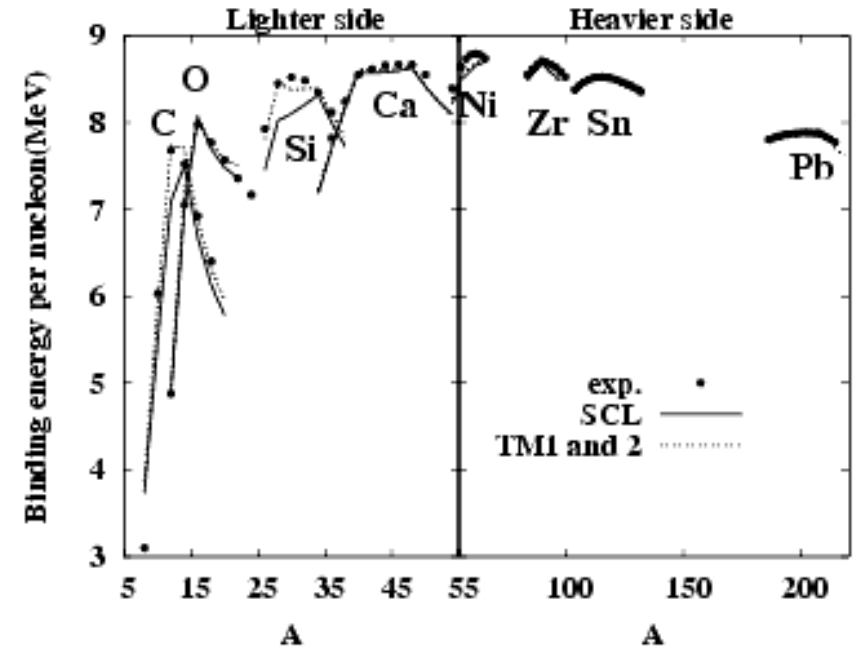
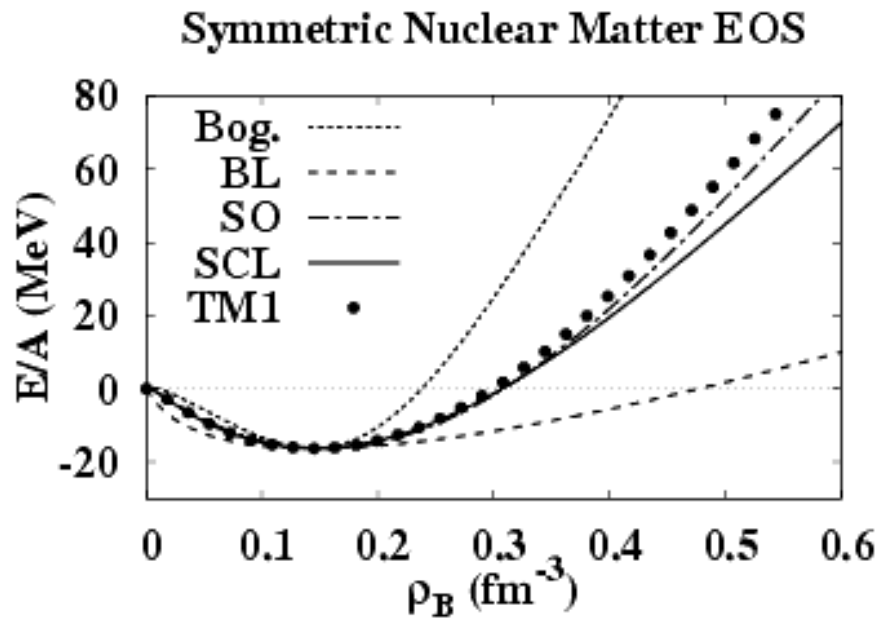
[2]Kawamoto-Smit, NPB 190 (1981) 100.

Density dependence



- カイラル対称性の早過ぎる回復を抑制
- σ の期待値の変化 \rightarrow abnormal な真空に落ち込むのを防ぐ
- TM1 模型と定性的に一致

SU(2) chiral RMF model



- 現象論的に優れたモデル(TM1)と、状態方程式が良い一致
- 有限核の束縛エネルギーを広い範囲で再現

SU(3) chiral potential

- ハイペロンを導入する際の拡張

- SU(2) カイラル対称な有効相互作用を SU(3) へと拡張し、ハイパー核の情報を再現する

$$U_{\sigma\zeta} = -\frac{a}{2} \log(\det(M_{SU(3)}^\dagger M_{SU(3)})) + b \operatorname{tr}(M_{SU(3)}^\dagger M_{SU(3)}) + C_\sigma \sigma + C_\zeta \zeta + d(\det(M_{SU(3)}^\dagger) + \det(M_{SU(3)}))$$

$$U_{\sigma\zeta} = -a \left[2 \left\{ \log\left(1 + \frac{\sigma}{f_\pi}\right) + \frac{\sigma}{f_\pi} - \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma}{f_\pi}\right)^2 \right\} + \log\left(1 + \frac{\zeta}{f_\zeta}\right) + \frac{\zeta}{f_\zeta} - \frac{1}{2} \left(\frac{\zeta}{f_\zeta}\right)^2 \right] + \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 + \frac{1}{2} m_\zeta^2 \zeta^2 + \frac{1}{2} m_\pi^2 \pi^2 + \frac{1}{2} m_K^2 K^2 + \xi_{\sigma\zeta} \sigma \zeta$$

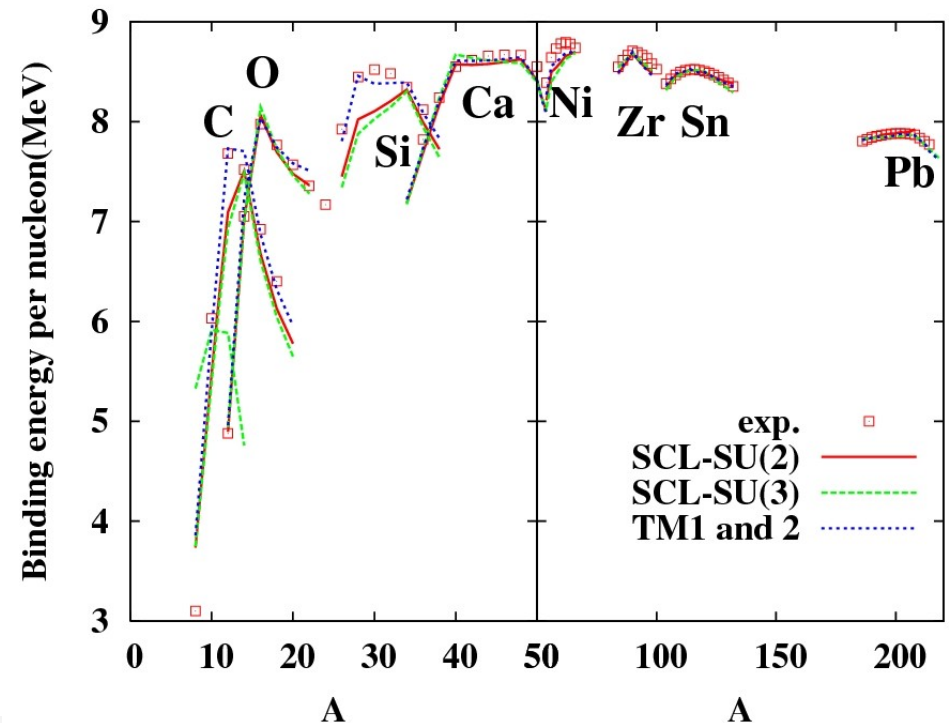
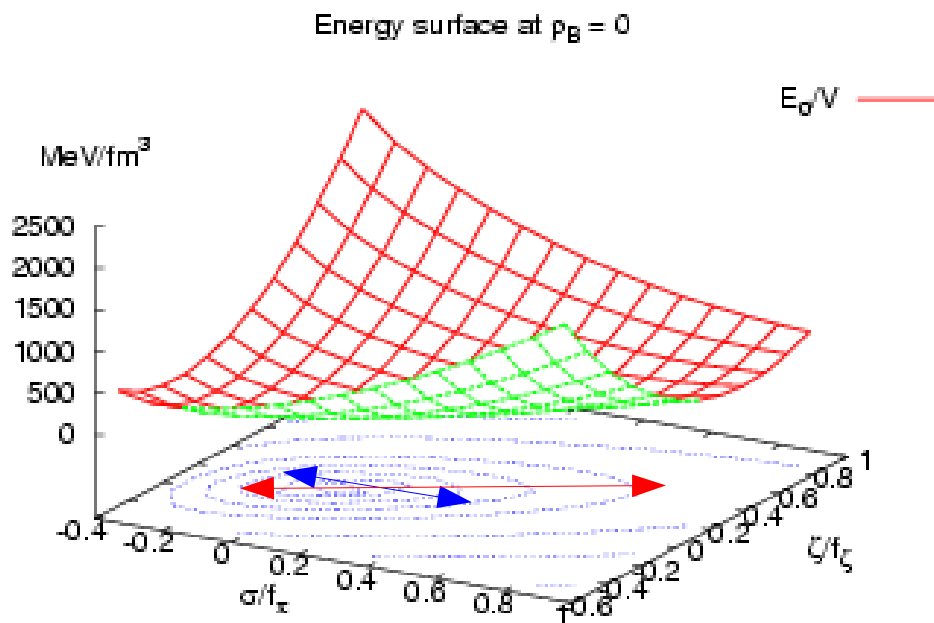
- Parameters: $m_\sigma, m_s, a, \xi_{\sigma\zeta} (\propto d)$

- Constraints: $m_\pi, m_K, M_\zeta (=980\text{MeV})$ $a = \frac{f_\pi^2}{4} (m_\sigma^2 - m_\pi^2)$

- m_σ で有効相互作用の強さが決まる

“Strange” normal nuclei

- ss の成分を含む核物質、有限核



- ストレンジネスの自由度を考慮すると状態方程式が軟化
→有限核を合わせると $K \sim 220$ MeV 程になった
(SU(2) ~ 280 MeV 程度)

Hypernuclei

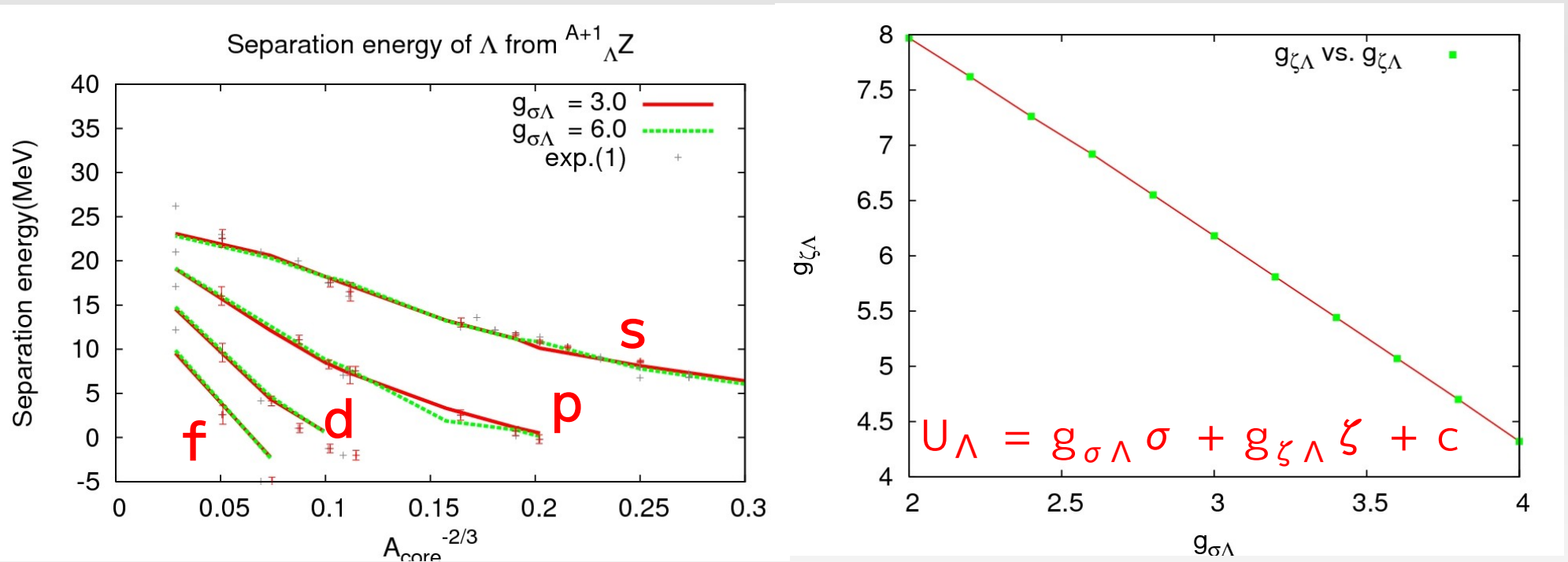
- ハイパー核の束縛エネルギー
 - パラメータ： $g_{\omega\Lambda}$ $g_{\phi\Lambda}$ $g_{\sigma\Lambda}$ $g_{\zeta\Lambda}$
 - ベクトルメソンに関する二つ：quark model における関係を考慮して固定 [7]
 - スカラーメソンに関する二つ：
 Λ ハイパー核の実験結果を再現するように決める

シングル、ダブル Λ ハイパー核の実験結果の両方を再現するようモデルを決定する必要がある

- Λ の $1s$ splitting の小ささが表現できるか？

Single Λ hypernuclei

- Λ の分離エネルギー



- Λ の分離エネルギーの傾向を再現
- 更にダブル Λ ハイパー核中の束縛を再現し得るかを確認するべき

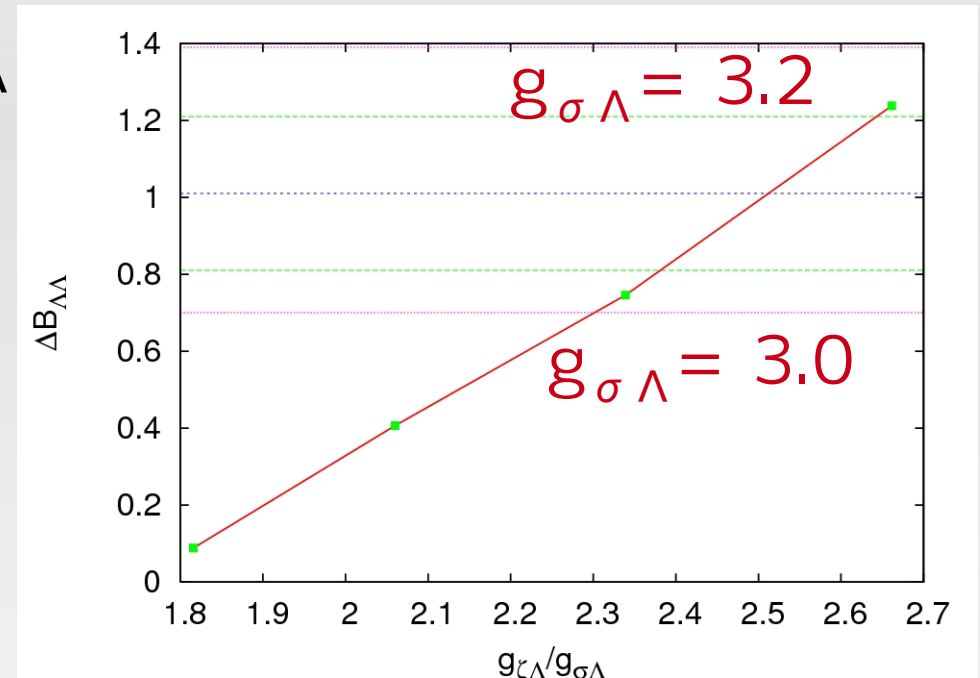
Double Λ hypernucleus

- ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ における $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$

$$\Delta B_{\Lambda\Lambda} = B_{\Lambda\Lambda} - 2B_{\Lambda}$$

$$\Delta B_{\Lambda\Lambda} = 1.01 \pm 0.20^{+0.18}_{-0.11} \text{ MeV}$$

in ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ (NAGARA event)
[8]



シングル、ダブル Λ ハイパー核双方の
実験結果からモデルを定めることが出来る

Summary

- SU(3) カイラル対称な有効相互作用を用いて Λ ハイパー核中の Λ の束縛を調べた
 - シングル、ダブル Λ ハイパー核の両方の結果からパラメータを決定できるであろうことを示した
- Future work:
 - Σ 、 Ξ ハイパー核を重い核種まで含めて統一的に調べる。
 - ハイパー核で定めたモデルを高密度物質へと適用し、その効果を調べる。

That's all.

Thank you for listening!!

Discussion

- Λ の $1s$ splitting

$1s$ splitting [MeV] ($g_{\sigma\Lambda} = 3.0$ の場合)

角運動量	$^{12}\Lambda\text{C}$	$^{13}\Lambda\text{C}$	$^{51}\Lambda\text{V}$	$^{209}\Lambda\text{Pb}$
p	0.89	1.04	0.64	0.15
d	-	-	1.13	0.32
f	-	-	-	0.6

Core のリアレンジメント？
テンソル型の結合の導入の必要性？