# 格子QCDによるLS力・反対称LS力

# 石井理修(筑波大CCS 神戸分室)



### <u>核力の様々な成分</u>

◆ 二体の核力(微分展開: up to NLO)

 $V(\vec{r}, \vec{\nabla}) = \mathbb{P}^{(+)} \left( V_{C;S=0}^{(+)}(r) \mathbb{P}^{(S=0)} + V_{C;S=1}^{(+)}(r) \mathbb{P}^{(S=1)} + V_{T}^{(+)}(r) S_{12}(\hat{r}) + V_{LS}^{(+)}(r) \vec{L} \cdot \vec{S} + \cdots \right) \\ + \mathbb{P}^{(-)} \left( V_{C;S=0}^{(-)}(r) \mathbb{P}^{(S=0)} + V_{C;S=1}^{(-)}(r) \mathbb{P}^{(S=1)} + V_{T}^{(-)}(r) S_{12}(\hat{r}) + V_{LS}^{(-)}(r) \vec{L} \cdot \vec{S} + \cdots \right)$ 

◆ 単一の回転不変な wall sourceを用いる計算(←これまでの計算)で求まるのは、 青い部分のみ(正パリティの二つの中心力とテンソル力)

	O(∇º)	O(∇¹)	O(∇²)	
正パリティ	Wall sourceで可	×	×	×
負パリティ	×	×	×	×

◆ "Momentum wall source"を駆使する事で、ほかの成分(赤い部分)が計算可能になる。

◆中心力とテンソルカに加えて、 LS 力。 正パリティセクタに加えて、 負パリティセクタ。

ここまでは標準的に必要。

### <u>NNセクタのLS力</u>

◆ NN セクタのLS力(スピン・軌道力)は非常に強い。

$$V_{NN} = V_0(r) + V_\sigma(r)\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2 + V_T(r) \left( 3(\hat{r} \cdot \vec{\sigma}_1)(\hat{r} \cdot \vec{\sigma}_2) - \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2 \right) + V_{SLS}(r)\vec{L} \cdot (\vec{s}_1 + \vec{s}_2) + O(\nabla^2)$$

#### 現象論的に重要な影響力

原子核の魔法数

<sup>3</sup>P<sub>2</sub> neutron 超流動→中性子星クーリング



### <u>ハイペロンセクタの反対称LS力</u>

◆ ANセクタ  $V^{(\pm)}(\vec{r}, \vec{\nabla}) = V_{C;S=0}^{(\pm)}(r)\mathbb{P}^{(S=0)} + V_{C;S=1}^{(\pm)}(r)\mathbb{P}^{(S=1)} + V_{T}^{(\pm)}(r)S_{12}(\hat{r}) \iff O(\nabla^{0}):LO$   $+V_{LS}^{(\pm)}(r)\vec{L}\cdot(\vec{s}_{\Lambda}+\vec{s}_{N}) + V_{ALS}^{(\pm)}(r)\vec{L}\cdot(\vec{s}_{\Lambda}-\vec{s}_{N})$  $+O(\nabla^{2})$  New term(反対称LS力)

- ♦意義
  - ◆ ハイパー核の物理を通常の原子核と同様に進めるためには、 正負両パリティで0(▽)のLS力・反対称LS力までのポテンシャルが必要。
  - ◆ Spin-Orbit Puzzle(通常原子核 v.s. ハイパー核)



<u>ハイペロンカの決定:実験 v.s. 理論</u>

- ◆ 実験に基づくハイペロンカ決定
   ◆ ハイペロンの寿命は短い
   → 直接散乱実験は困難。
  - ◆ 核力決定の時と同じ方法は使えず難題。
  - ◆ J-PARC核物理の最重要課題。



### ▶ 理論に基づくハイペロンカ決定

- ◆ HAL QCD method by using LQCD: Nambu-Bethe-Salpeter(NBS)波動関数 → ハドロン間ポテンシャル。
- ◆ 散乱位相差に忠実。
- ◆ 既に多くのシステムに応用されている。 NN, NY, YY (including coupled channnel), and NNN potentials in the parity-even sector and MM, MB, etc.
- ◆ 負パリティセクタやLSカへの応用も最近可能になった。 (K.Murano et al., arXiv:1305.2293)
- ◆格子QCDによりこの方法を使って理論的に、 正負両パリティセクタで、核力・ハイペロンカをO(▽)まで求めきる事が、我々の目標。

## <u>NN セクタ</u> <u>負パリティセクタの核力・LSカ</u>

#### **Source Operators**

# ◆ Wall source:

$$\overline{\mathcal{J}}_{\alpha\beta} \equiv \sum_{\vec{x}_1, \cdots, \vec{x}_6} \overline{N}_{\alpha}(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{x}_3) \overline{N}_{\beta}(\vec{x}_4, \vec{x}_5, \vec{x}_6) \\ N_{\alpha}(x_1, x_2, x_3) \equiv \begin{cases} q_{abc} (u_a(x_1) C \gamma_5 d_b(x_2)) u_{c;\alpha}(x_3) & (\text{proton}) \\ q_{abc} (u_a(x_1) C \gamma_5 d_b(x_2)) d_{c;\alpha}(x_3) & (\text{neutron}) \end{cases}$$

生成可能なチャンネル: J<sup>P</sup> = A<sub>1</sub><sup>+</sup>(~0<sup>+</sup>)とT<sub>1</sub><sup>+</sup>(~1<sup>+</sup>)。

→ 正パリティセクタの中心力とテンソル力のみ計算可能。

### Momentum wall source:

$$\overline{\mathcal{J}}_{\alpha\beta}(\vec{p}) \equiv \sum_{\vec{x}_1, \cdots, \vec{x}_6} \overline{N}_{\alpha}(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{x}_3) \overline{N}_{\beta}(\vec{x}_4, \vec{x}_5, \vec{x}_6) \cdot \exp\left(i \vec{p} \cdot (\vec{x}_3 - \vec{x}_6)\right)$$

$$\overline{\mathcal{J}}_{\alpha\beta}^{\Gamma}(|\vec{p}|) \equiv \frac{1}{48} \sum_{g \in O_h} \chi^{(\Gamma)}(g^{-1}) \cdot \overline{\mathcal{J}}_{\alpha'\beta'}(g \cdot \vec{p}) S_{\alpha'\alpha}(g^{-1}) S_{\beta'\beta}(g^{-1}) \xrightarrow{\mathbb{N}^{1/2}} \overline{\mathcal{J}}_{\beta'\beta}(g^{-1})$$

様々な cubic group表現を生成可能: JP=F.

→ 正負量パリティセクタで、様々なポテンシャルを計算可能。

### <u>負パリティセクタの核力</u>





- ◆ おおむねよい。しかし、
  - ◆ 強さが弱い (Quark mass is too heavy)
  - ◆ <sup>3</sup>P<sub>0</sub> で低エネルギーの引力がない。 ← weak tensor force (pion mass is heavy)



<u>ハイペロンセクタ(flavor SU(3) limit)</u> <u>負パリティセクタのハイペロン力・LS及び反対称LS力</u> <u>負パリティセクタのハイペロンカ</u>

◆大局的振る舞いを概観するため  $8 \otimes 8 = 27 \oplus 8_S \oplus 1 \oplus 10 \oplus 10 \oplus 8_A$ フレーバーSU(3)極限が便利。



### <u>負パリティ・ハイペロンポテンシャル(フレーバーSU(3)極限)</u>





### Qualitative behaviors are reproduced.



### <u>負パリティ・ハイペロンカ(フレーバーSU(3)極限)</u>

Flavor 10 rep (Parity-odd Potentials) 0 V(r) [MeV] -50  $\sim$ N $\Sigma$ (I=3/2) V<sub>C</sub>(r) -100 0.5 1.5 1 0 **r** [fm]



◆ 斥力芯なし。(クォーク模型と consistent)

### <u>負パリティ・ハイペロンカ(フレーバーSU(3)極限)</u>



◆ 二つの中心カに斥カ芯はなし。(クォーク模型とconsistent)

- ♦ 弱いテンソルカ。
- ◆弱い(対称)LS力。
- ◆ 強い反対称LS力。(NNセクタのLS力と同じ程度の強さ)

### <u>負パリティのAN間ポテンシャル</u>

◆ フレーバーSU(3) 既約表現:8, 10^\*, 27の線形結合→ANポテンシャル



### 2体バリオン間力進捗状況

◆ 核力 黒:安定化(m<sub>pi</sub>>400 MeV) ◆ 正パリティセクタ 青:最近の発展 ◆ 中心力・テンソルカ(LS力はまだ) 禄: coming soon ◆ 負パリティセクタ 赤:TODO ◆ 中心力・テンソル力・LS力  $V(\vec{r},\vec{\nabla}) = \mathbb{P}^{(+)} \left( V_{\text{C};\text{S}=0}^{(+)}(r) \mathbb{P}^{(S=0)} + V_{\text{C};\text{S}=1}^{(+)}(r) \mathbb{P}^{(S=1)} + V_{\text{T}}^{(+)}(r) S_{12}(\hat{r}) + V_{\text{LS}}^{(+)}(r) \vec{L} \cdot \vec{S} + \cdots \right)$  $+\mathbb{P}^{(-)}\left(V_{C;S=0}^{(-)}(r)\mathbb{P}^{(S=0)}+V_{C;S=1}^{(-)}(r)\mathbb{P}^{(S=1)}+V_{T}^{(-)}(r)S_{12}(\hat{r})+V_{LS}^{(-)}(r)\vec{L}\cdot\vec{S}+\cdots\right)$ ▶ ハイペロン力 ◆ 正パリティセクタ ◆ 中心力・テンソルカ(LS力はまだ) • Single channel: NA, N $\Sigma$ ••• ◆ 結合チャンネル化 ◆ 負パリティセクタ ◆ 中心力・テンソル力・LS力・反対称LS力 Single channel(flavor SU(3) limit) ◆ 結合チャンネル化  $V(\vec{r},\vec{\nabla}) = \mathbb{P}^{(+)} \left( V_{\text{C};\text{S}=0}^{(+)}(r) \mathbb{P}^{(S=0)} + V_{\text{C};\text{S}=1}^{(+)}(r) \mathbb{P}^{(S=1)} + V_{\text{T}}^{(+)}(r) S_{12}(\hat{r}) + V_{\text{LS}}^{(+)}(r) \vec{L} \cdot \vec{S}_{+} + V_{\text{ALS}}^{(+)}(r) \vec{L} \cdot \vec{S}_{-} + \cdots \right)$  $+\mathbb{P}^{(-)}\left(V_{C;S=0}^{(-)}(r)\mathbb{P}^{(S=0)}+V_{C;S=1}^{(-)}(r)\mathbb{P}^{(S=1)}+V_{T}^{(-)}(r)S_{12}(\hat{r})+V_{LS}^{(-)}(r)\vec{L}\cdot\vec{S}_{+}+V_{ALS}^{(-)}(r)\vec{L}\cdot\vec{S}_{-}+\cdots\right)$ ◆ 課題1生成の巨大体積物理点ゲージ配位を採用した計算 正パリティセクタの核力・ハイペロン力についてもうすぐ開始。

(16)