

QCDによるバリオン間相互作用

石井理修 (筑波大)

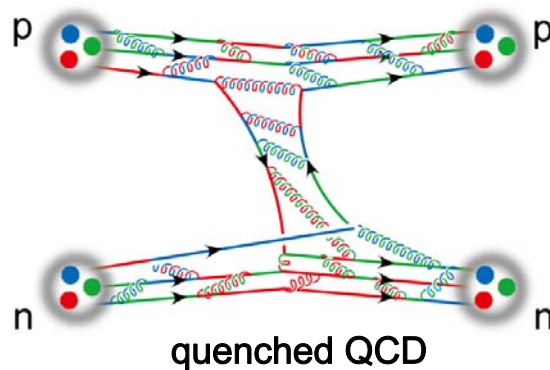
共同利用 07b-6

共同研究者:

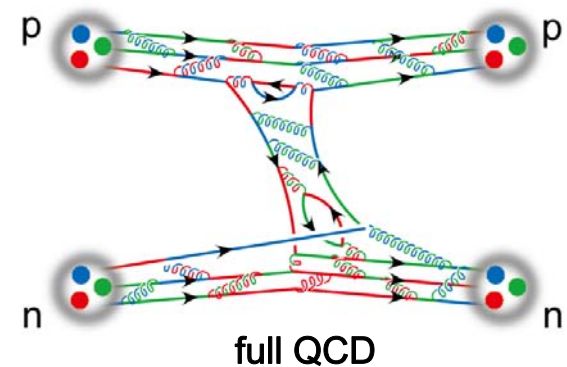
青木慎也 (筑波大)

初田哲男 (東京大)

根村英克 (理研)



PACSCS



目次:

- (1) 背景(これまでのquenched QCDの結果を紹介)
- (2) PACSCSでの核力計算の目的と前年度の結果。
- (3) まとめと今後の課題。

START

1.背景

核力 (陽子と中性子間に働く力) は原子核物理においてもっとも基本的な概念である。

✓ **長距離領域 ($r > 2\text{fm}$)**

OPEP (one pion exchange) [H.Yukawa (1935)]

✓ **中間距離領域 ($1\text{fm} < r < 2\text{fm}$)**

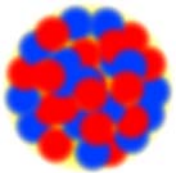
multi pion and heavier meson exchanges (“ σ ”, ρ , ω , ...)

The **attractive pocket** is responsible for bound nuclei.

✓ **近距離領域 ($r < 1\text{fm}$)**

Strong **repulsive core** [R.Jastrow (1951)]

The repulsive core plays an important role for



物質の安定性



超新星爆発



高密度星の上限質量

斥力芯存在の直観的理解の問題は現在も未解決である。

(1) **vector meson exchange model**

(2) **constituent quark model**

Pauli forbidden states and color magnetic interaction

(3) etc.

この領域においては核子が重なり合うため、斥力芯は

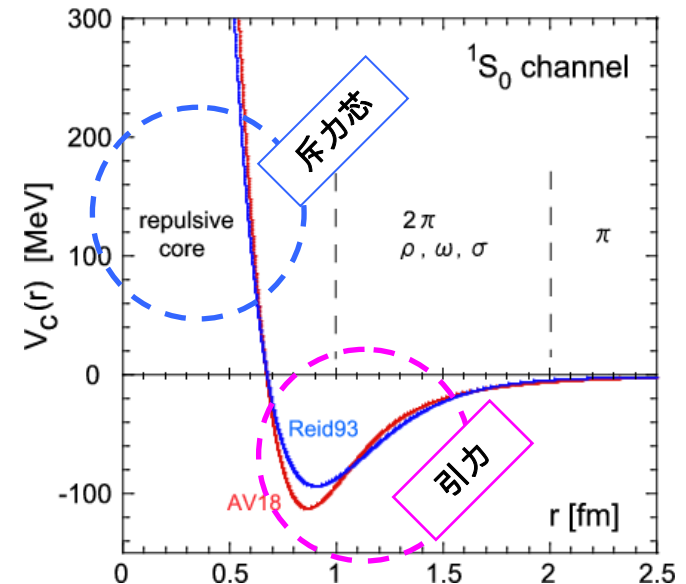
核子のquark/gluonの言葉による内部構造

を反映したものになるはず。

⇒ **QCD 第一原理計算による核力の研究が長い間切望されてきた。**

強い相互作用を支配する究極の理論 [D.J.Gross, H.D.Polizer, F.Wilzcek (1973)]

The nuclear force



Reid93 is from

V.G.J.Stoks et al., PRC49, 2950 (1994).

AV16 is from

R.B.Wiringa et al., PRC51, 38 (1995).

背景 (続き) : Nuclear force from lattice QCD

S.Aoki et al.(CP-PACS Collab.),
Phys. Rev. D71,094504(2005).

我々は格子QCDにおいて、
これらの性質を同時に再現できる非常に有望な方法に到達した。

拡張

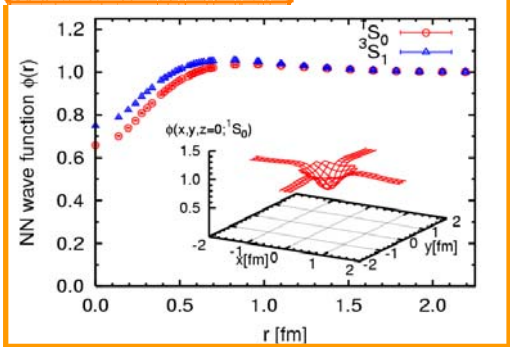
N.Ishii, S.Aoki, T.Hatsuda, Phys.Rev.Lett.99,022001('07).

- 波動関数からポテンシャルを構成する方法 :**
- ① 格子QCDでNN波動関数 (BS波動関数) を作る。
 - ② Schrodinger-typeの方程式を逆方向に使う、波動関数からNNポテンシャルを逆算する。

lattice QCD

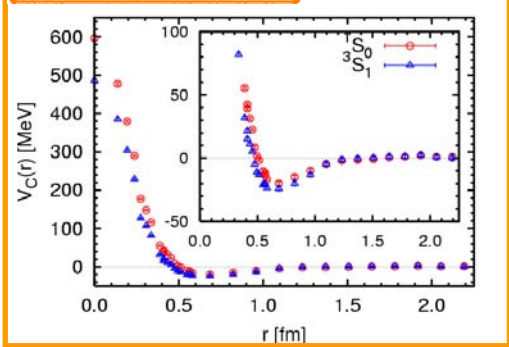


wave function



Schrodinger 方程式

NN potential



$$V(r) = \frac{(E - H_0) \psi(\vec{x})}{\psi(\vec{x})}$$

さまざまな拡張

拡張1: クォーク質量依存性

拡張2: 非中心力(テンソル力)

拡張3: ハイペロン相互作用

拡張4: より実験に忠実な核力と様々な問題点

拡張5: 軽いクォーク質量を使った full QCD計算

背景(続き) : BS波動関数

- QCDにおいて量子力学のNN波動関数は近似的な概念でしかない。
- この概念に最も近いものが、**同時刻 Bethe-Salpeter(BS)波動関数**である。

$$\psi_{\alpha\beta}(\vec{x} - \vec{y}) \equiv \lim_{t \rightarrow +0} \langle 0 | T [p_{\alpha}(\vec{x}, t) n_{\beta}(\vec{y}, 0)] NN \rangle$$



$$p(x) \equiv \varepsilon_{abc} (u_a^T C \gamma_5 d_b) u_c(x)$$

$$n(y) \equiv \varepsilon_{abc} (u_a^T C \gamma_5 d_b) d_c(y)$$

- ✓ この式は、xに3つのクォーク、yに別の3つのクォークを見つけるamplitudeに対応する。
- ✓ $|x-y| \rightarrow \text{大}$ で次の漸近形を持つ。

$$\psi(r) \approx e^{i\delta_0(k)} \frac{\sin(kr + \delta_0(k))}{kr} + \dots \quad (\text{s-wave})$$

- ✓ 次のSchrodinger-likeな方程式を満たすことが示せる。

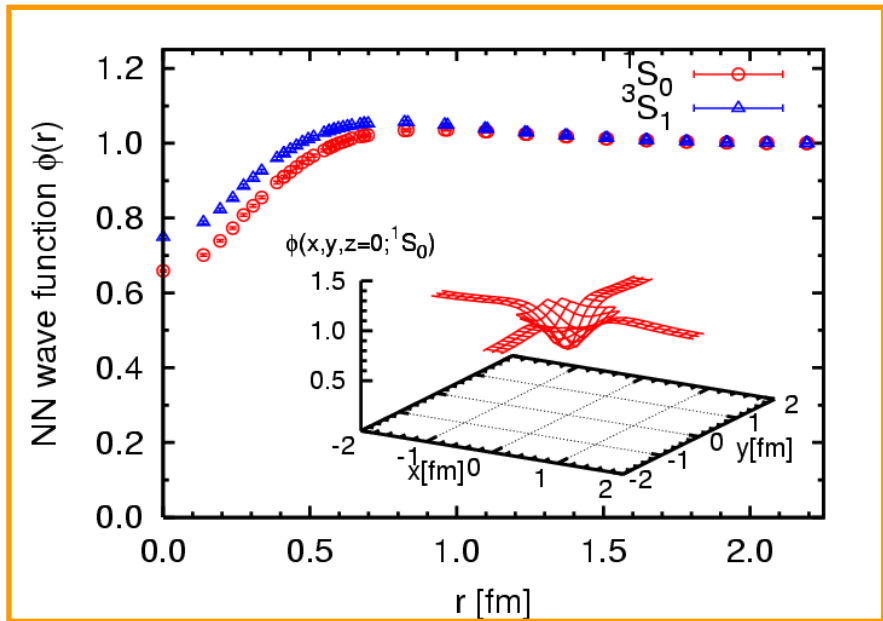
$$(\vec{\nabla}^2 + k^2) \psi_E(\vec{r}) = m_N \int d^3 r' U(\vec{r}, \vec{r}') \psi_E(\vec{r}')$$

- 同時刻BS波動関数は、格子QCDでは核子の4点correlatorのlarge t領域から計算される。

$$F_{NN}(\vec{x}, \vec{y}, t) \equiv \langle 0 | T [p(\vec{x}, t+0) n(\vec{y}, t) \bar{p}(0) \bar{n}(0)] | 0 \rangle \quad (\text{for } t > 0)$$

$$= \sum_m \langle 0 | p(\vec{x}) n(\vec{y}) | m \rangle e^{-E_m t} \langle m | \bar{p}(\vec{0}) \bar{n}(\vec{0}) | 0 \rangle$$

$$= A_0 e^{-E_0 t} \psi_{E_0}(\vec{x} - \vec{y}) + \dots \quad (\text{エネルギーの高い状態の寄与は指数関数的に抑制される})$$



背景(続き) : (有効)中心力

- 対称性からくる様々な要請を課し、微分展開

$$U(\vec{r}, \vec{r}') = (V_C(r) + V_T(r)S_{12} + V_{LS}(r)\vec{L} \cdot \vec{S} + O(\vec{\nabla}^2))\delta(\vec{r} - \vec{r}')$$

$$S_{12} \equiv 3(\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{r})(\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{r})/\vec{r}^2 - \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2$$

- $J^P = 0^+$ case ($^{2S+1}L_J = ^1S_0$ のみ寄与)
このchannelでは、 $V_C(r)$ のみ生き残る。
Schrodinger 方程式を変形すると

$$V_C(r; ^1S_0) = \frac{(E - H_0) \psi(\vec{x}; ^1S_0)}{\psi(\vec{x}; ^1S_0)}$$

- $J^P = 1^+$ case ($^{2S+1}L_J = ^3S_1, ^3D_1$ が結合)

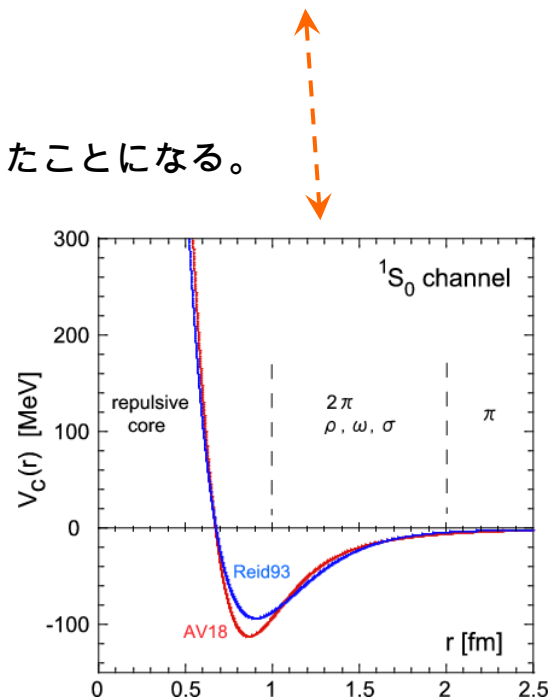
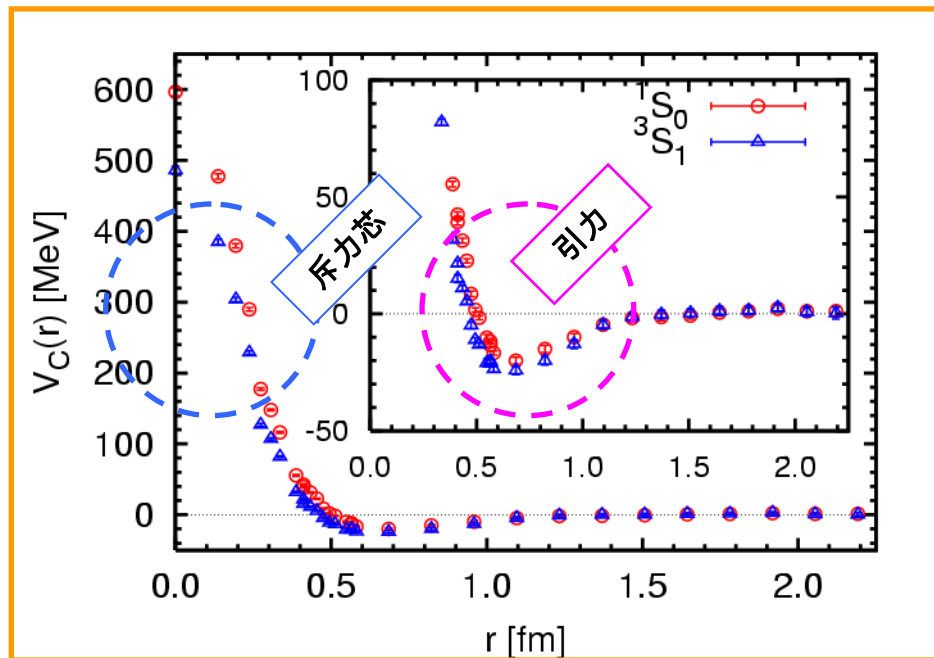
今回は、 $V_T(r), V_{LS}(r)$ も寄与するが、最初の試みとして、これらを無視し上の公式をそのまま使う。

「単独でexactな 3S_1 波動関数を生成する中心力」=「有効中心力」が求まったことになる。

$$V_C^{\text{eff}}(r; ^3S_1) = \frac{(E - H_0) \psi(\vec{x}; ^3S_1)}{\psi(\vec{x}; ^3S_1)}$$

- 近距離の斥力心と中間距離の引力の両方を同時に持つ核力ポテンシャルが得られた。

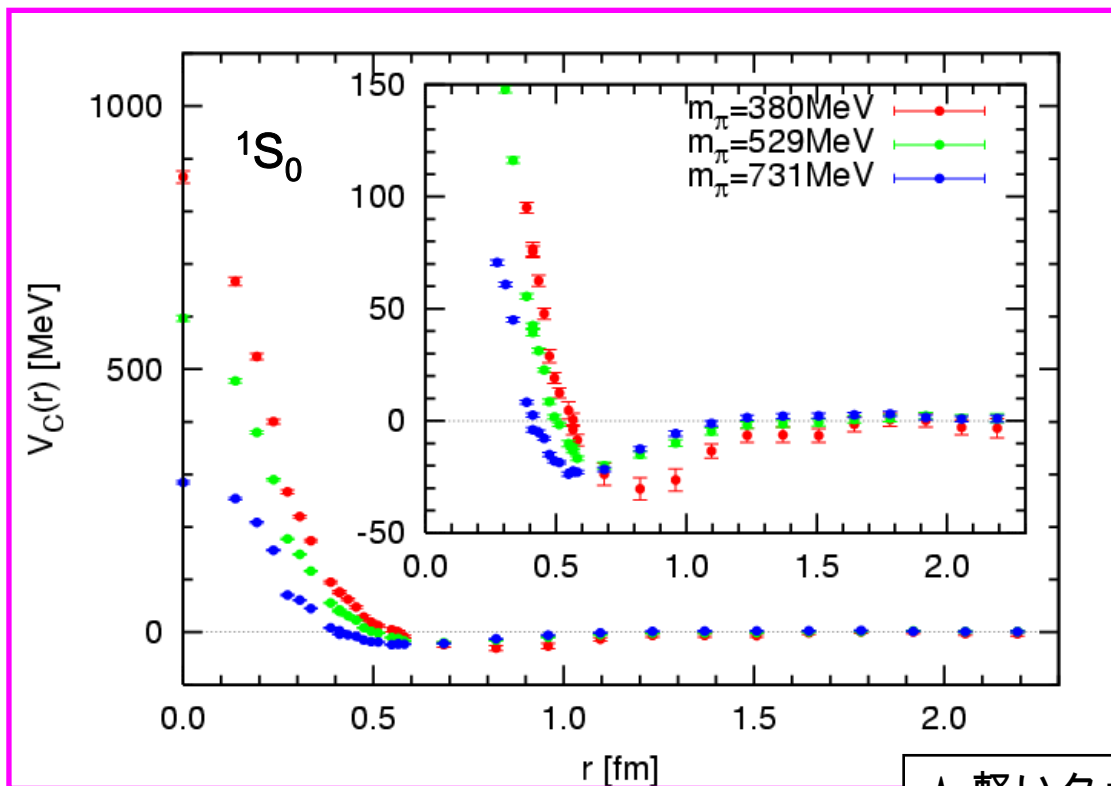
しかしながら、どちらも一般に予想されているよりも小さい。
原因は中心力のクォーク質量依存性の図を見ると明らかになる。



背景 (続き) :

拡張 1 : 中心力 のクォーク質量依存性

- ▶ 現在は直接計算できない physical quark mass での NNポテンシャルを予想するのに必要。
- ▶ 斥力芯の起源に対する手がかりを与える。



- (1) $m_\pi = 380$ MeV: Nconf=2034
[28 exceptional configurations have been removed]
- (2) $m_\pi = 529$ MeV: Nconf=2000
- (3) $m_\pi = 731$ MeV: Nconf=1000

- ★ 軽いクォーク質量領域で、
- ✓ 近距離の斥力芯は急激に成長。
- ✓ 中間距離の引力は、なだらかに外に広がる。
- ★ 軽いクォーク質量を使った格子QCD Monte Carlo 計算が非常に重要である。

背景(続き):

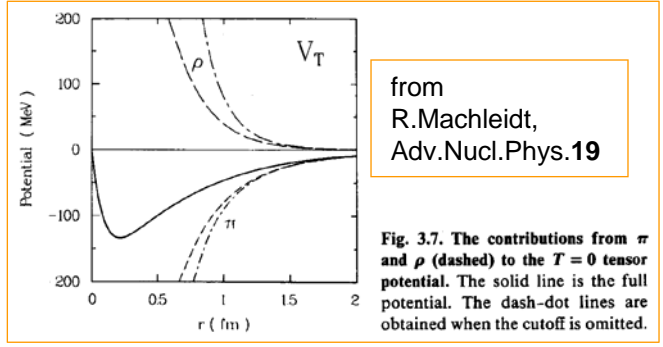
$$J^P = 1^+$$

拡張 2 : 非中心力 (テンソル力)

- 斥力芯と相俟って、物質の安定性に重要な影響力。
- deuteronを始めとする原子核の構造の理解に重要。
- 最近の核構造理論では、テンソル力の影響で single particle spectrumが変化して、魔法数に変化が現れる可能性が指摘されている。
- centrifugal barrierのため、近距離で実験的情報が得にくく不定性が高い。(芯存在の有無についても諸説ある)

- s-wave と d-waveを連立させて、LS力を無視する事によって、中心力(3S_1)とテンソル力を求める。

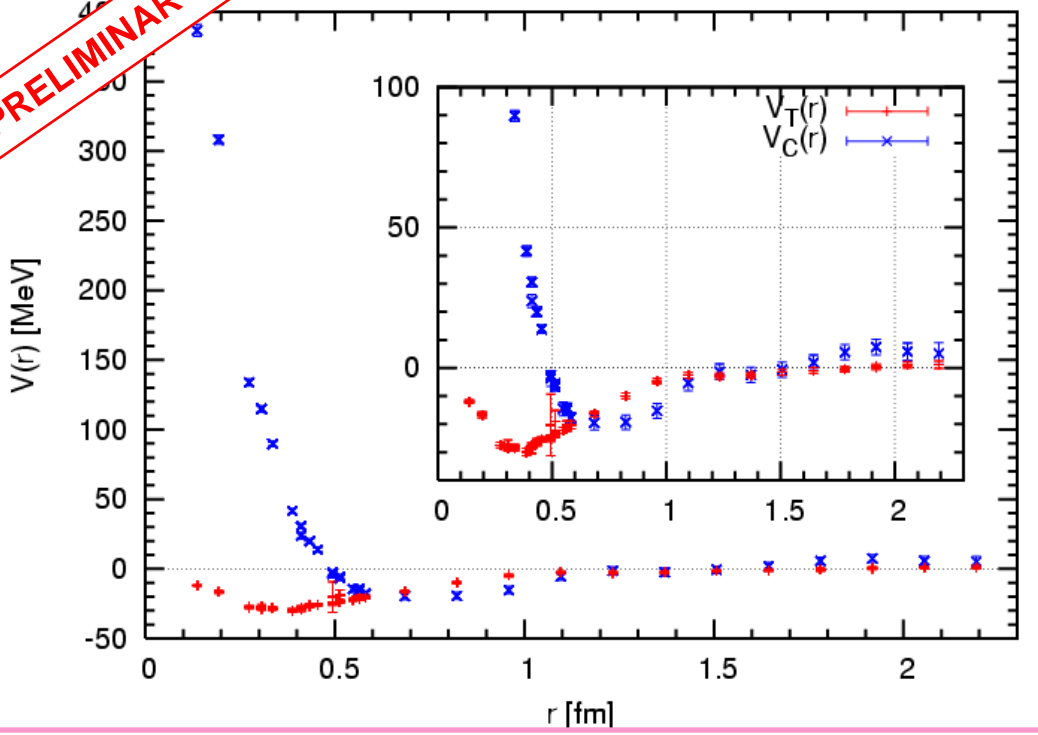
$$V(\vec{r}, \vec{r}') = V_C(r) + V_T(r) S_{12} + V_{LS}(r) \vec{L} \cdot \vec{S} + O(\vec{V}^2)$$



from
R.Machleidt,
Adv.Nucl.Phys.19

Fig. 3.7. The contributions from π and ρ (dashed) to the $T=0$ tensor potential. The solid line is the full potential. The dash-dot lines are obtained when the cutoff is omitted.

PRELIMINARY

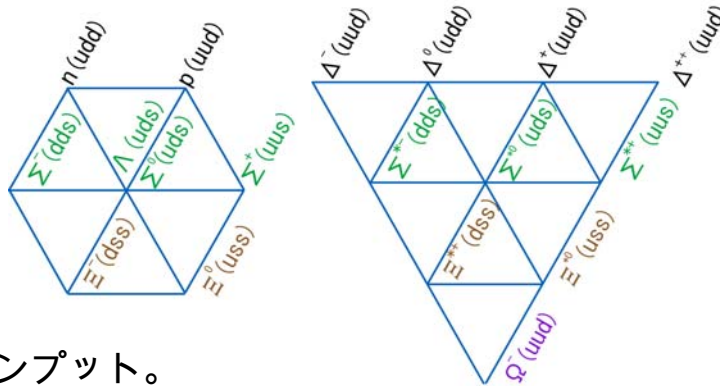


背景(続き):

拡張3: ハイペロン相互作用

ストレンジクォークを含んだバリオン

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom



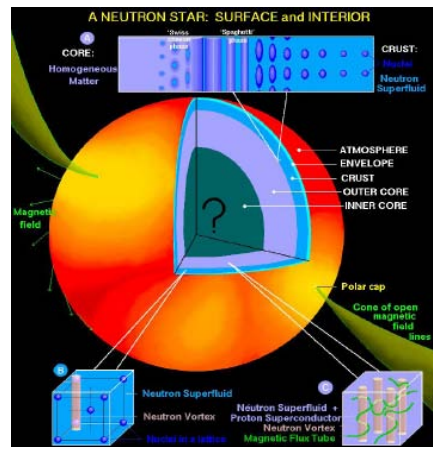
J-PARC (今年度稼働開始)



- ハイパー核物理のインプット。
ハイペロンを含んだ原子核を扱う物理学

- 直接のハイペロンビームが存在しないため、実験的情報は極めて限られている。

- 中性子星内部に現われるハイペロン物質の議論に必要な情報。

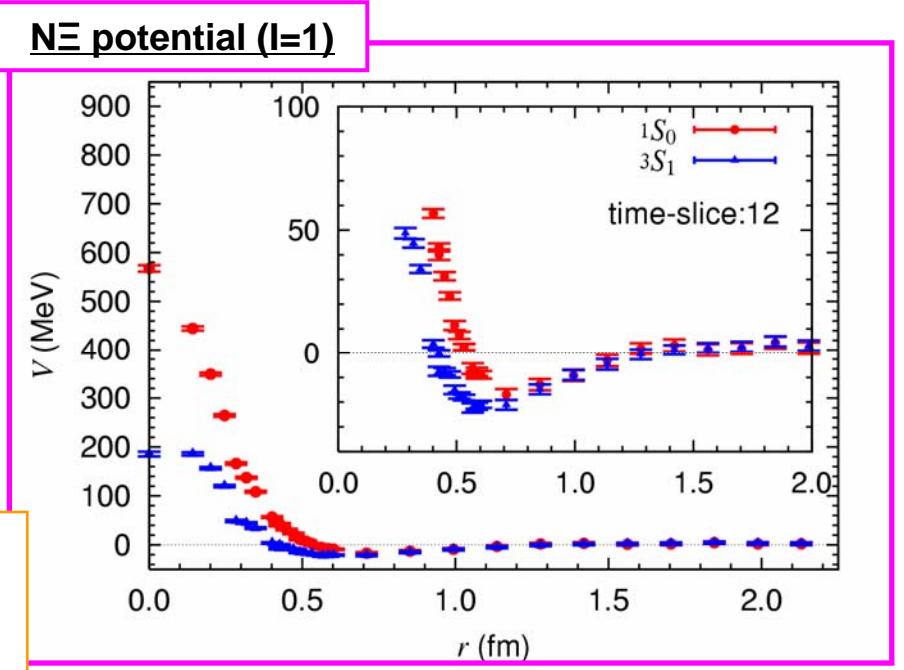


- 今年度稼働するJ-PARCにおける核物理の主要テーマと直結。

Basic data:
 $m_\pi = 509.8(5)$ MeV, $m_K = 603.7(5)$ MeV, $m_\rho = 859(2)$ MeV
 $m_N = 1297(4)$ MeV, $m_\Xi = 1415(4)$ MeV
 $a \sim 0.142$ fm ($1/a \sim 1.39$ GeV)

★ $N\Xi$ ポテンシャル ($l=1$)

- ✓ J-PARC DAY-1 experiment の主要ターゲット。
- ✓ 現在実験データに乏しい。



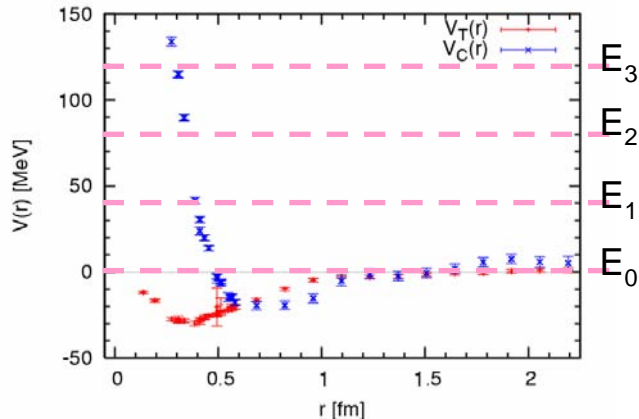
背景(続き) :

拡張4 : より実験に忠実な核力と様々な問題点

様々なエネルギーのBS波動関数を同時に使って、
energy independent なポテンシャルを逆算する

⇒

よりNN散乱実験に忠実なポテンシャルが得られる。
(⇔ 位相差の情報がどんどん正しくなる)



➤ BS波動関数は長距離で次の漸近形を持つ。

$$\phi(r) \approx e^{i\delta_0(k)} \frac{\sin(kr + \delta_0(k))}{kr} + \dots \quad (\text{s-wave})$$

➤ 我々のポテンシャルは、使われた波動関数を同時にexactに再現するように構成されている。

⇒

波動関数が使われたすべてのエネルギーで、
散乱位相差を同時にexactに再現できる。

★ この問題は逆散乱理論を介して、

- 近距離において核子の歪みをどう考えるかという問題。
(QCD的には、nucleon fieldの選び方に起因する近距離での不定性の問題)
- Bethe-Salpeter波動関数の直行性の問題。
- ポテンシャルのnon-localityの問題。
- ポテンシャルのエネルギー依存性の問題。

等、我々の方法の根幹部分と密接に関連している。

これらの問題を解決し、方法論として整備していくことは、今後の重要な課題である。

2 . PACSCSでの核力計算の目的と前年度の結果

拡張5 : 軽いクォーク質量を使った full QCD 計算

PACSCSにおける目的 = full QCD化 :

これまでquenched QCDを使って準備してきた計算を、軽いクォーク質量でfull QCD化することで、実験と比較できるポテンシャルを生成することである。

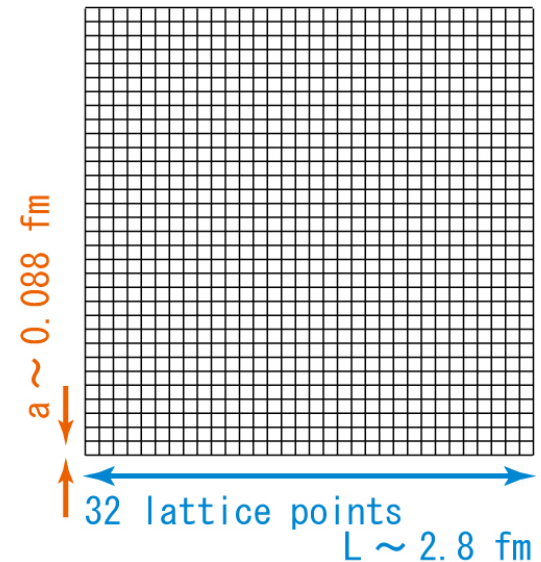
★ Lattice QCD setup:

➤ ゲージ配位

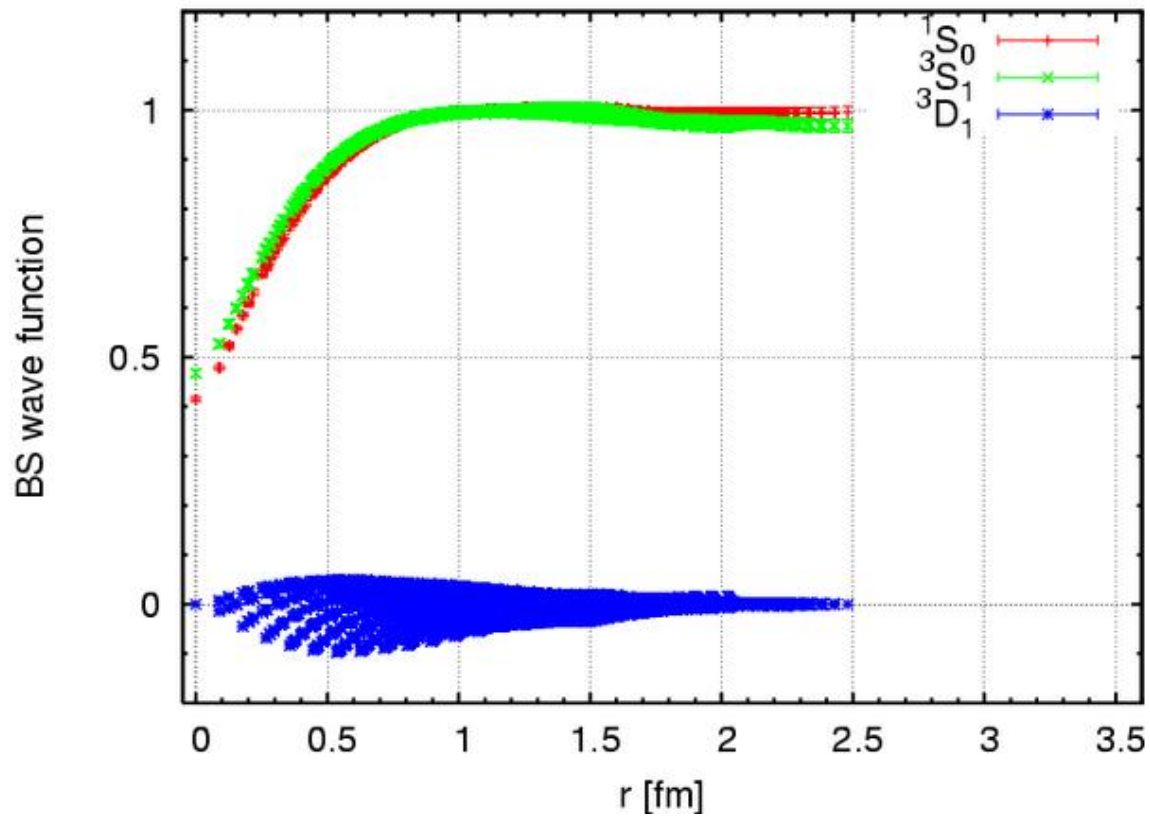
- ✓ PACSCS Collaborationにより生成された $N_F=2+1$ full QCDゲージ配位。
- ✓ Iwasaki gauge action at $\beta=1.90$ on $32^3 \times 64$ lattice
- ✓ $O(a)$ improved Wilson quark (clover) action
with a non-perturbatively improved coefficient $c_{SW}=1.715$, $\kappa_{ud}=0.13770$, $\kappa_s=0.13640$.
- ✓ $a \sim 0.088$ fm [$1/a \sim 2.25$ GeV].
- ✓ $m_\pi \sim 305$ MeV, $m_{ud}^{AWI} \sim 11.7$ MeV, $m_s^{AWI} \sim 84.8$ MeV.
- ✓ Y.Kuramashi for the PACS-CS Collaboration, arXiv:0711:3938[hep-lat] 参照。

➤ NN波動関数

- ✓ $N_{conf} = 138$ gauge configurations [2007年度3月の計算から]
- ✓ Dirichlet BC(時間方向) on time-slice $t=0$ 、periodic BC(空間方向)
- ✓ wall source on time-slice $t=t_0=10$



波動関数



- time-slice $t - t_0 = 3$ より。
- ground state saturation が満たされることが期待されるのは、
 $t - t_0 = 5 \sim 10$ (次のスライド参照)
この領域では、まだまだ統計誤差が大きい。

波動関数のground state saturation (2S+1L_J 毎)

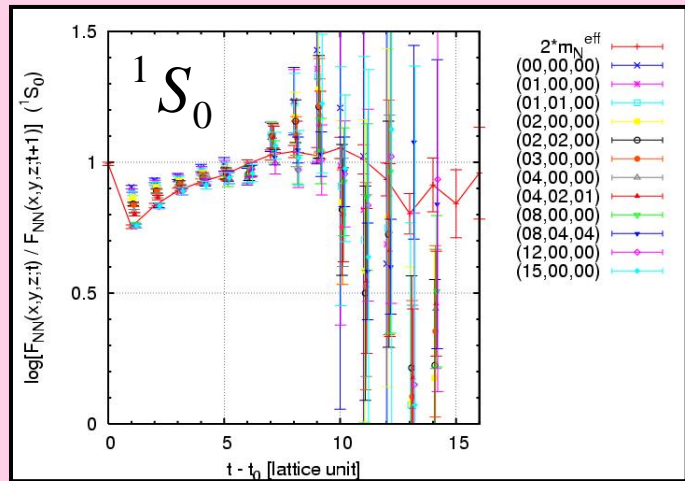
波動関数の各点(空間)ごとのtに関する effective mass plot:

ground state saturationが達成されると、
共通の高さにplateauが現れる。

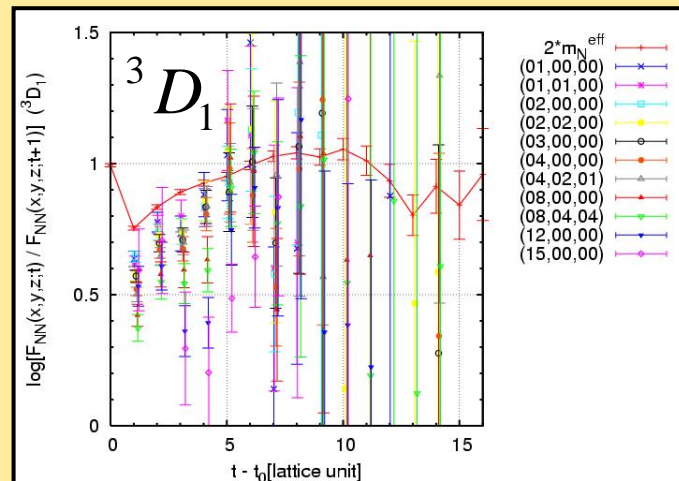
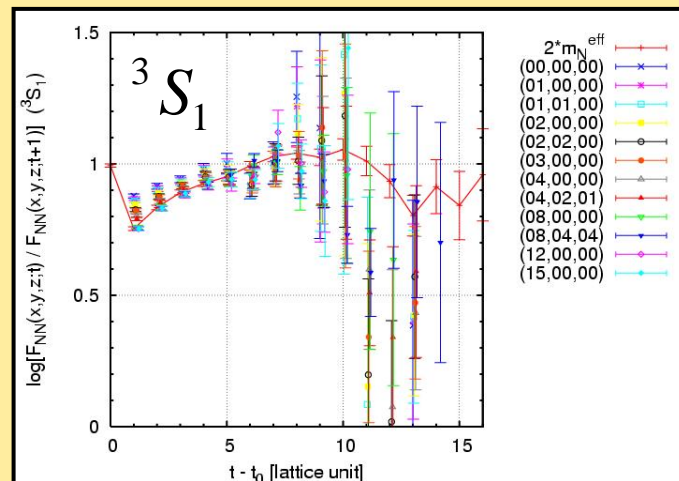
$$m_{\text{eff}}(\vec{x}, t) \equiv \log(F_{NN}(\vec{x}, t) / F_{NN}(\vec{x}, t+1))$$

$$F_{NN}(\vec{x}, t) = A_0 \psi_{E_0}(\vec{x}) e^{-E_0 t} + \dots$$

$J^P = 0^+$



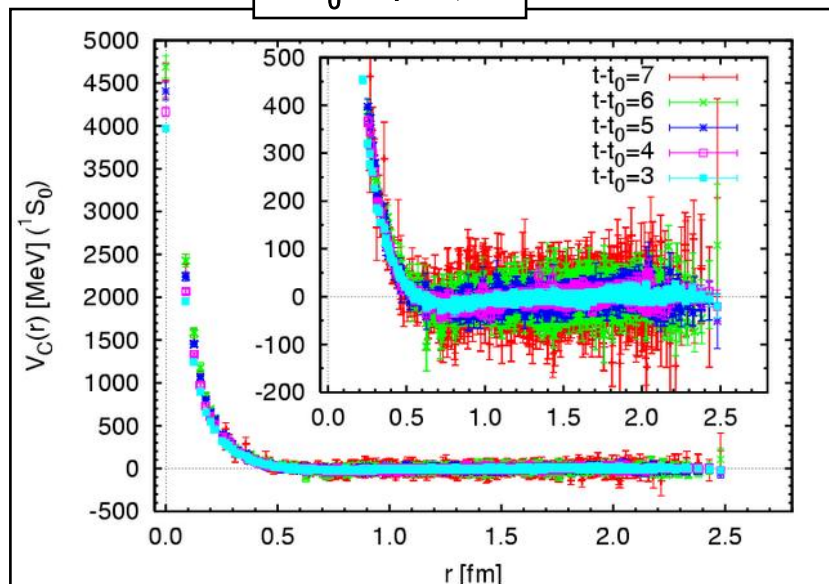
$J^P = 1^+$



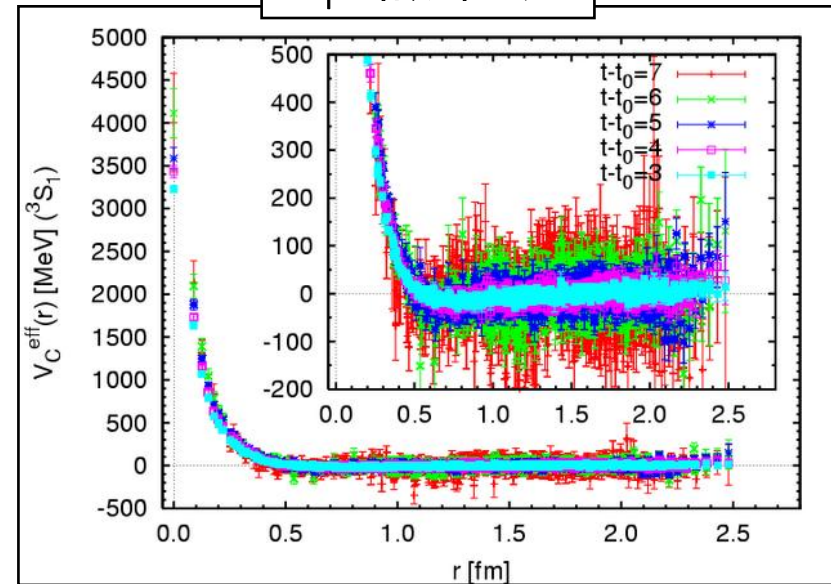
- $1S_0$ と $3S_1$ は、 $t - t_0 = 5 \sim 10$ あたりにplateauが現れそうである。(でももっと統計が必要)
- $3D_1$ は徹底的に統計を増やす必要がある。
Ground state saturationはまだ議論できない。

NNポテンシャル：(有効)中心力

1S_0 の中心力



3S_1 の有効中心力



- 斥力芯がこれまでに比べて際立って大きい。

現在、連続極限に近いためにこうなった可能性を疑っている。

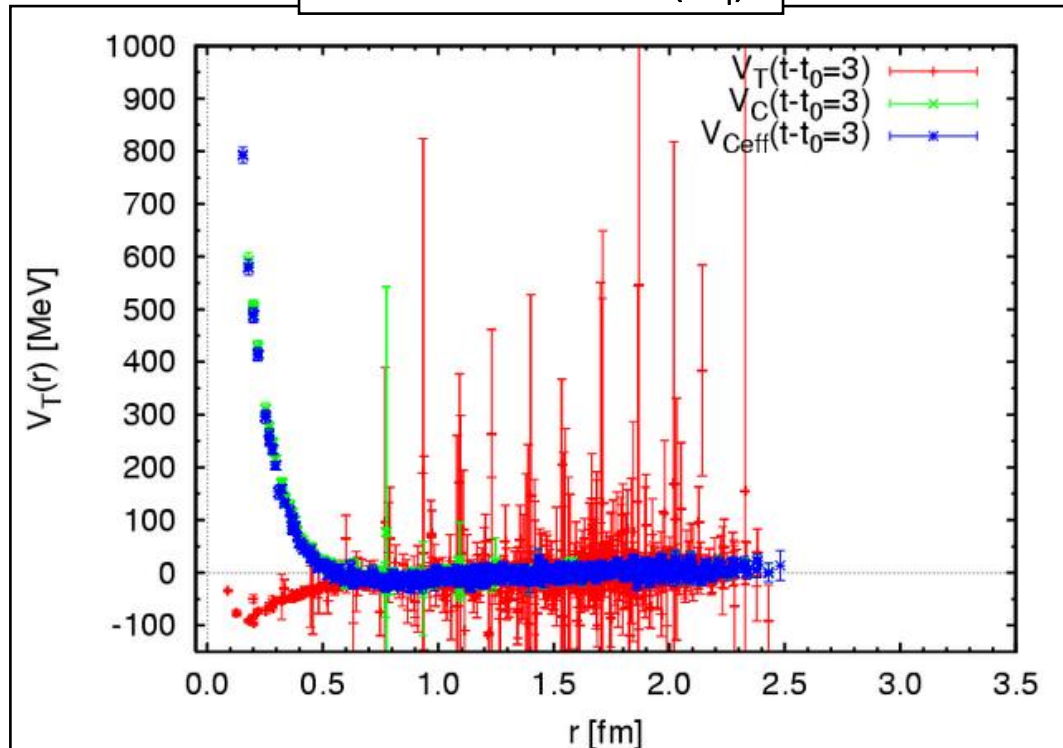
はっきりさせるためには、operator product expansionを使った解析が必要。

- もっと統計が必要。

ground state saturationが期待される領域： $t - t_0 = 5 \sim 10$ あたりの統計誤差が現在の段階では大きすぎる。

NNポテンシャル：テンソルカ

テンソルカと中心カ(3S_1)



- $t - t_0 = 3$ の波動関数を使った結果。
- 徹底的に統計を増やす必要がある。Ground state saturationの議論はまだできない。

3. まとめと今後の課題

1. これまでバリオン間ポテンシャルに関して、quenched QCDを使って準備してきた計算

NNポテンシャル：(有効)中心力、中心力のクォーク質量依存性、テンソル力。

ハイペロン力： $NE(I=1)$ 系のポテンシャル。

を背景として紹介した。

2. これらの結果を軽いクォーク質量を採用したfull QCDゲージ配位を使ってfull QCD化し、現実の実験と比較できるポテンシャルを構成するのがPACSCSでの最大の目的である。
3. PACSCS Collaborationによって、昨年度までに生成された $m_\pi \sim 300\text{MeV}$ のゲージ配位を使い昨年度3月に計算した核力のpreliminaryな結果を紹介した。
 - a. (有効)中心力とテンソル力に関する現在までの結果を紹介した。
 - b. これまでに比べ際立って大きな斥力芯を保持した中心力が得られた。連続極限に近い場合こうした可能性を疑っている。はっきりさせるためには、operator product expansion を使った解析が必要である。
 - c. いずれもまだまだ統計をためる必要がある。今年度は考えられる様々な方法を駆使して統計を改善していく必要がある。