

格子QCDに基づく チャーモニウム-核子間相互作用の研究

河内 太一

共同研究者：佐々木勝一



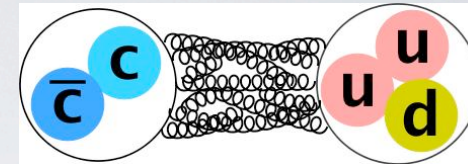
2010.12.02 研究会『ストレンジネス核物理2010』

なぜ チャーモニウム-核子間相互作用をやるのか？

◆ 陽子(uud)とチャーモニウム(cc^{bar})は共通のフレーバーは持たない。

1) クォーク交換力を含まない。

2) 多重グルーオン交換が支配的。



相互作用が陽にQCDに依っている。

→ カラーファンデルワールス力の問題 (引力的？長距離力？)

H. Fujii and D. Kharzeev PRD60, 114039 (1999)

◆ η_c 粒子 ($J^P = 0^-$)、 J/ψ 粒子 ($J^P = 1^-$) は比較的長寿命。

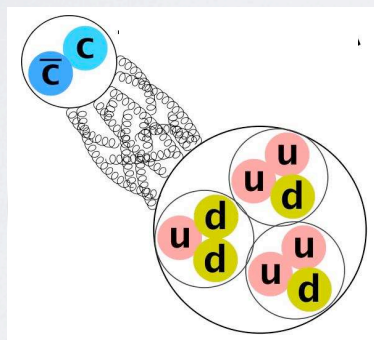
(DD^{bar}に崩壊しない)

原子核内においてチャーモニウムは
パウリの排他律起源の斥力や原子核吸収など、
複雑な多体効果は無視できる。

なぜ チャーモニウム-核子間相互作用をやるのか？

◆ チャーモニウムと核子間相互作用が**引力的**でありさえすれば、核子数 A を増やせばいつか原子核に**束縛する可能性**がある。

- 現象論モデルでは、
 - $A \geq 3$ の原子核に対してチャーモニウムは束縛する。
 - 核物質中におけるチャーモニウムの束縛エネルギーが $O(10)\text{MeV}$



Brodsky, Schmidt, de Teramond, PRL 64 (1990) 1011

D. A. Wasson, PRL 67 (1991) 2237

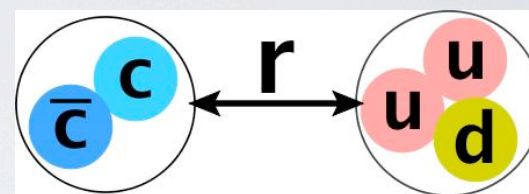
V. B Belyaev et al, NPA 780 (2006) 100

◆ **チャーモニウム-核子間の2体相互作用**がチャーモニウム原子核形成の**直接的な力**となる。

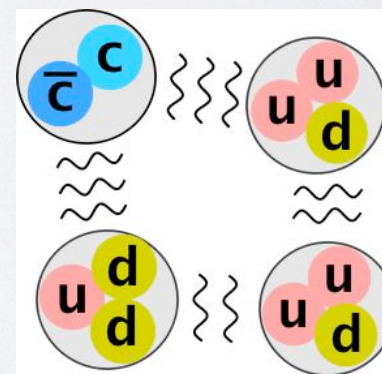
なにを 計算するか？

チャーモニウム-核子ポテンシャル 現在

$V(r)$



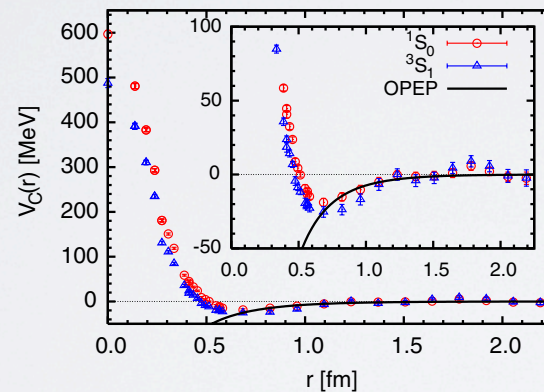
チャーモニウムと小数核子の多体問題



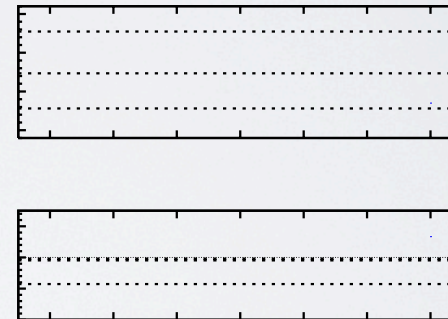
どのように ポテンシャルを計算するか？

格子QCDシミュレーションにより
チャーモニウム-核子ポテンシャルを求める

📌 ハドロン間のBethe-Salpeter振幅からポテンシャルを導出する定式化



N. ishii et al., PRL 90, 022001 (2007)



📌 相対論的重クォーク作用の定式化 (RHQ作用)

チャームクォークの扱い。

A. X. El-Khadra et al., PRD 55 (1997) 3933

どのようにポテンシャルを計算するか？

1 粒子の計算（2点関数）

$$\begin{aligned} & \langle 0 | \phi(\vec{x}, t) \bar{\phi}(0, t_0) | 0 \rangle \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \langle 0 | \phi(\vec{x}) | n \rangle e^{-E_n(t-t_0)} \langle n | \bar{\phi}(0) | 0 \rangle \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} A_n \langle 0 | \phi(\vec{x}) | E_n \rangle e^{-E_n(t-t_0)} \\ &\xrightarrow{t \gg t_0} A_0 \langle 0 | \phi(\vec{x}) | E_0 \rangle e^{-m(t-t_0)} \end{aligned}$$

虚時間遠方の振る舞いから
基底状態を取り出す。

Operator

$$N(y) = \epsilon_{abc} (u_a(y) C \gamma_5 d_b(y)) u_c(y)$$

$$\eta_c(x) = \bar{c}_a(x) \gamma_5 c_a(x)$$

どのようにポテンシャルを計算するか？

2粒子の計算（4点関数から次のようにBS波動関数を定義する。）

$$\begin{aligned} & \langle 0 | \phi(\vec{x}, \vec{y}, t) \bar{\phi}(0, 0, t_0) | 0 \rangle \\ = & \sum_{n=0}^{\infty} \langle 0 | \phi(\vec{x}, \vec{y}) | n \rangle e^{-E_n(t-t_0)} \langle n | \bar{\phi}(0, 0) | 0 \rangle \\ = & \sum_{n=0}^{\infty} A_n \langle 0 | \phi(\vec{x}, \vec{y}) | E_n \rangle e^{-E_n(t-t_0)} \\ \xrightarrow{t \gg t_0} & A_0 \phi_{\eta_c-N}(\vec{x}, \vec{y}) e^{-E_0(t-t_0)} \end{aligned}$$

BS波動関数

M. Luscher, Nucl. Phys. B 354 (1991) 531
N. Ishii et al., PRL, 99 (2007) 022001
S. Aoki et al., PTP, 123 (2010) 89

どのようにポテンシャルを計算するか？

N. Ishii et al., PRL, 99 (2007) 022001
S. Aoki et al., PTP, 123 (2010) 89

BS振幅(波動関数)が定常Schrödinger方程式を満足するとすると

$$E\phi_{\eta_c-N}(\vec{r}) + \frac{\nabla^2}{2m_{\text{red}}}\phi_{\eta_c-N}(\vec{r}) = V(\vec{r})\phi_{\eta_c-N}(\vec{r})$$

Input; E , m_{red} , $\Phi_{\eta_c N}(r)$

Output; $V(r)$

計算結果

- クエンチ近似(クォークの真空偏極を無視)の結果
- 2+1フレーバー フルQCDシミュレーションの結果

セットアップ(クエンチ近似)

- クォークの真空偏極を無視
- 格子サイズ

$$L^3 \times T = \mathbf{32^3 \times 48} \ (\sim 3\text{fm}^3)$$

- Plaquette作用+

Clover作用(u,dクォーク)+

RHQ作用(charmクォーク)

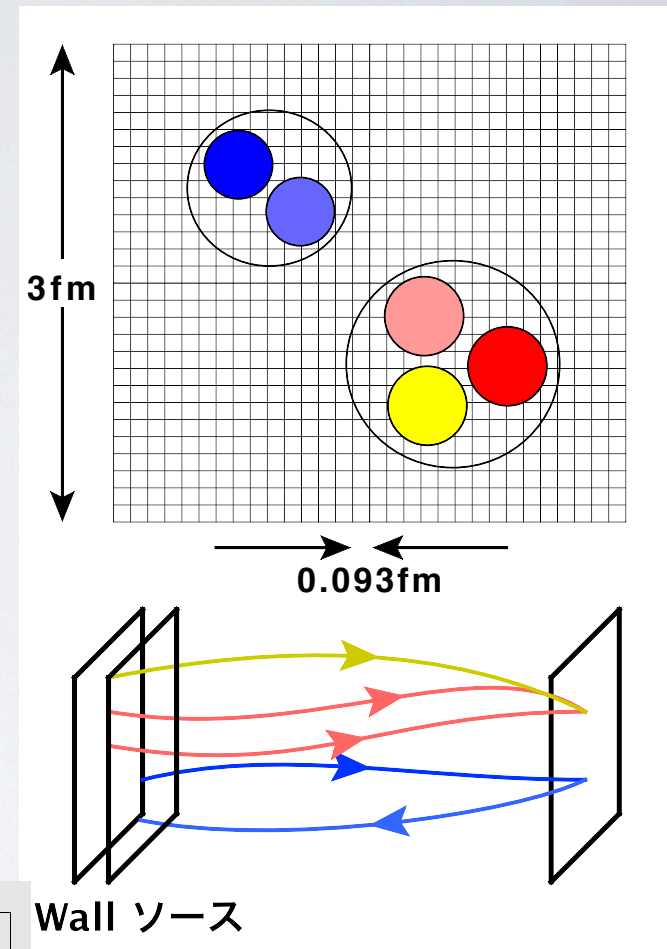
- 統計(ゲージ配位) 602

- クォーク質量

Charm ; $\kappa=0.10190$ $m_{\eta_c}=2.92\text{GeV}$

Light ;

κ_{ud}	0.1342	0.1339	0.1333
m_{π} [GeV]	0.64	0.72	0.87
m_N [GeV]	1.43	1.52	1.70



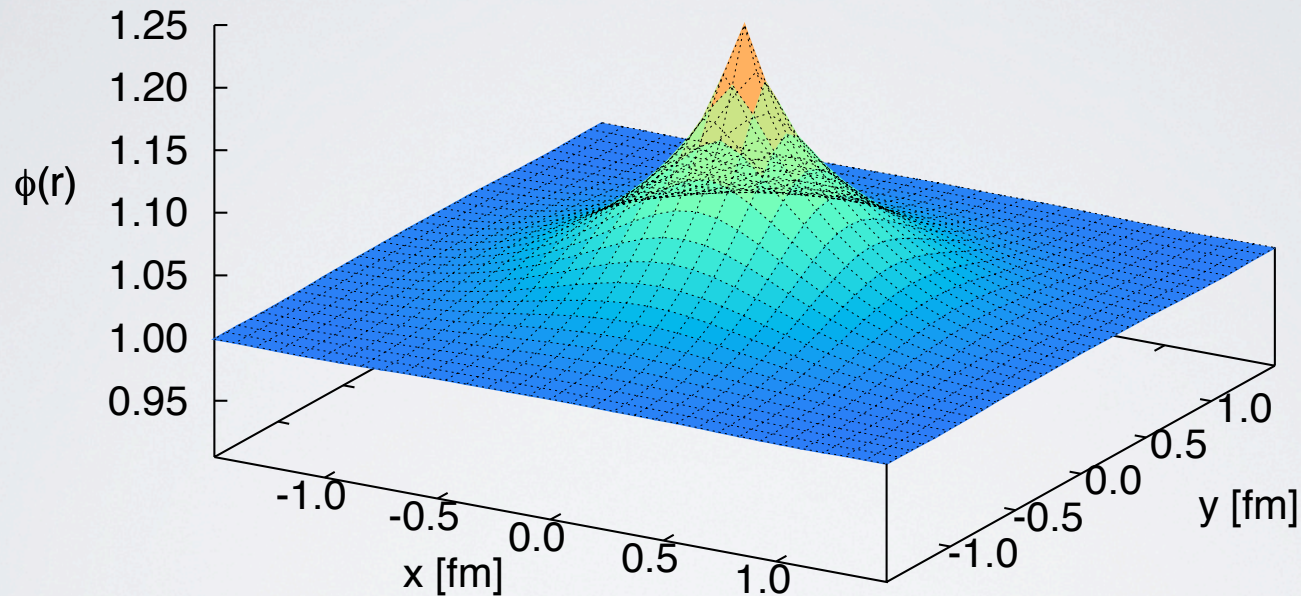
結果; チャーモニウム-核子間ポテンシャル

T. Kawanai and S. Sasaki, Phys. Rev D82, 091501(R) (2010)

T. Kawanai and S. Sasaki, arXiv:1011.1322 [hep-lat].

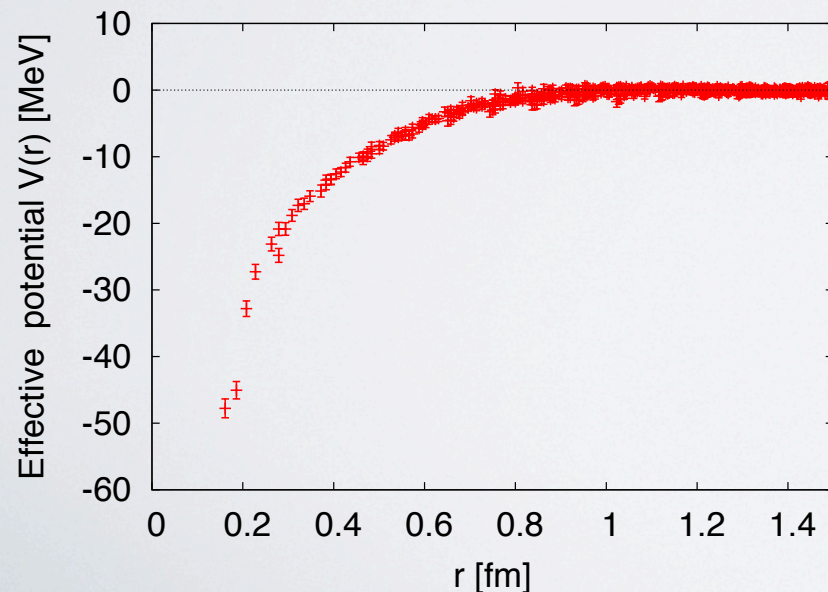
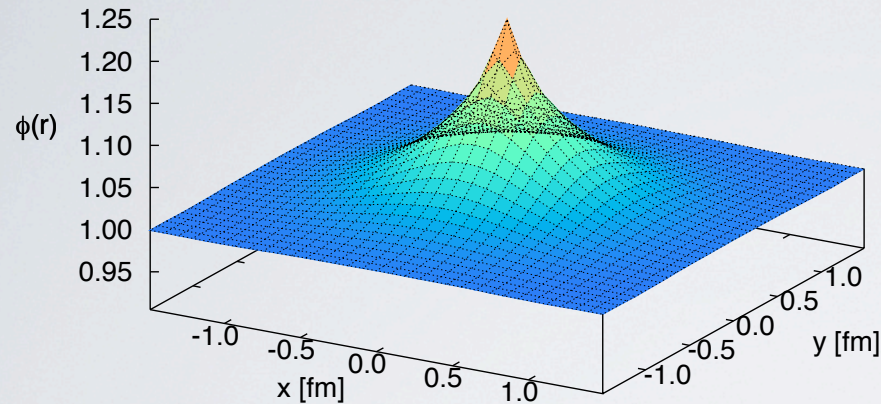
(クエンチ近似)

η_c -Nの波動関数 ($m_\pi=640\text{MeV}$)

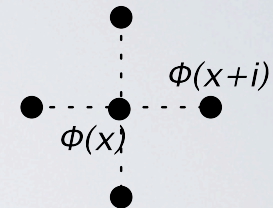


- ◆ 原点付近の値が大きい → 引力的
- ◆ 遠方まで広がった波動関数 → 散乱状態。cc^{bar}-Nでは束縛しない。

結果; チャーモニウム-核子間ポテンシャル (クエンチ近似)



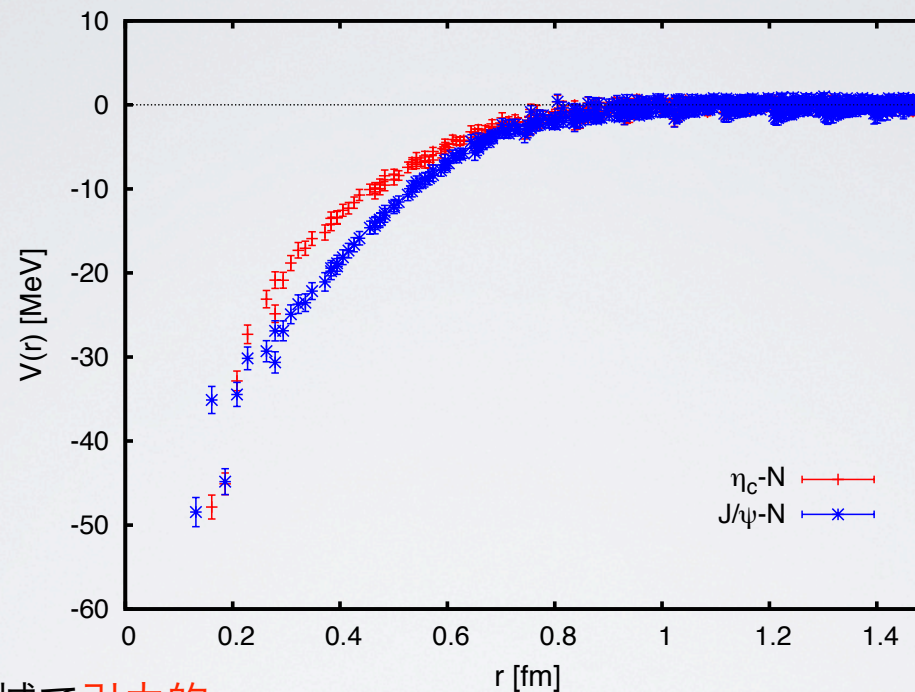
- ▶ 換算質量 m_{red} は2点関数から決める
- ▶ ∇^2 は離散化されたラプラシアン



$$\frac{1}{2m_{\text{red}}} \frac{\nabla^2 \phi(r)}{\phi(r)} = V(r) - E$$

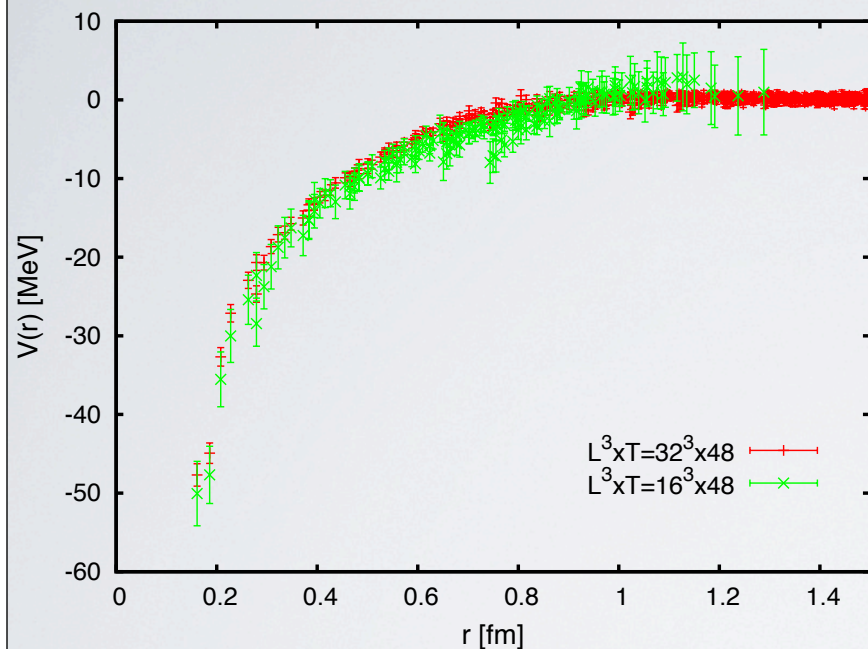
- ▶ $r > 1\text{fm}$ で $V(r)=0$ となることを利用して
零点調整することで E も決まる。

結果; チャーモニウム-核子間ポテンシャル (クエンチ近似)

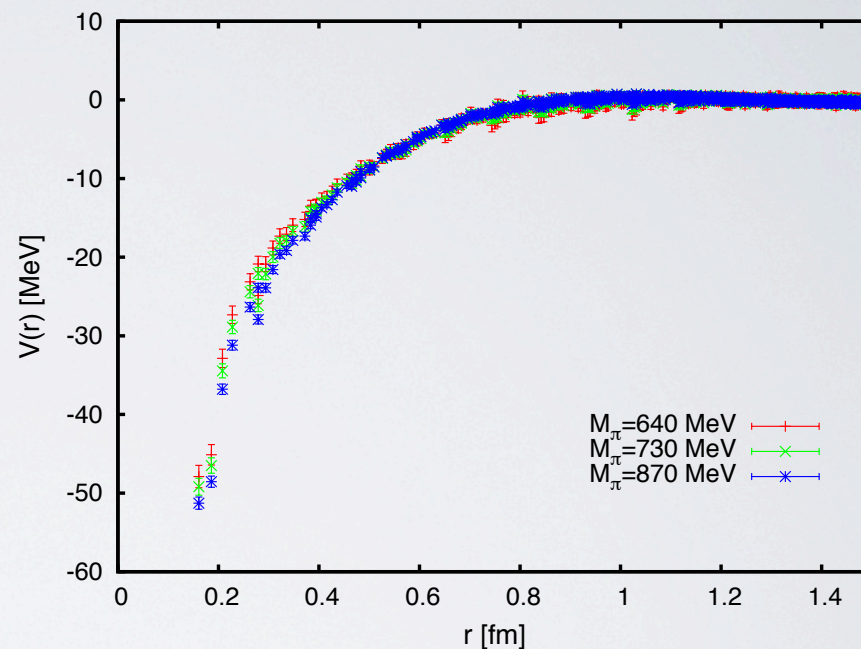


- ◆ 全領域で**引力的**
- ◆ ハドロンのスケール(~ 1 fm)で遮蔽される**近距離力**。
- ◆ 湯川型ポテンシャル($-\gamma \exp(-\alpha r)/r$)でフィットすると $\gamma \sim 0.1$, $\alpha \sim 0.6 \text{ GeV}$
現象論的モデル($\gamma=0.6$, $\alpha=0.6 \text{ GeV}$)より弱いポテンシャル。
- ◆ J/ψ -N ポテンシャルの方が引力が強い。→ ハドロンのサイズに関係？

結果; チャーモニウム-核子間ポテンシャル (クエンチ近似)

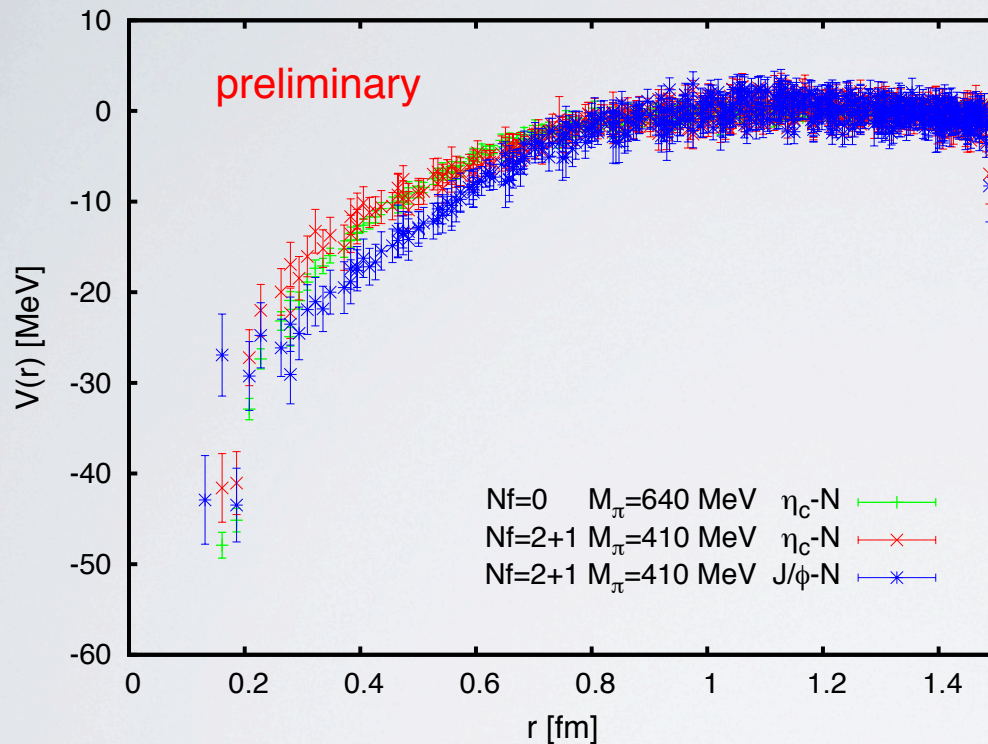


体積依存なし



クォーク質量依存なし

結果; チャーモニウム-核子間ポテンシャル (Nf2+1 フルQCD)



▶ PACS-CS Nf 2+1 ゲージ配位

S.Aoki et al., PRD 79, 034503 (2009)

▶ クォーク質量:

$$m_\pi = 0.41 \text{ GeV} \quad (m_N = 1.2 \text{ GeV})$$

$$m_{J/\psi} = 3.10 \text{ GeV}, \quad m_{\eta_c} = 2.99 \text{ GeV}$$

▶ 格子サイズ;

$$L^3 \times T = 32^3 \times 64 \quad (L_a \approx 3.0 \text{ fm})$$

▶ 統計; 450

- ◆ クォークの真空偏極の効果は少ない。
- ◆ 現実のクォーク質量近傍では、核子の大きさが大きくなることにより、引力が強まる可能性がある。

Summary

- 格子QCD計算によりチャーモニウム-核子ポテンシャルの導出に成功。
 - 全領域で**引力的**
 - 1fm程度で遮蔽される**近距離力**
- $m_\pi \geq 640\text{MeV}$ のクォーク質量ではチャーモニウム-核子ポテンシャルにクォーク質量依存性は確認されない。
- クォークの真空偏極の効果は少ない。

展望

- より軽いクォーク質量での計算($m_\pi < 400\text{MeV}$)
- 少数多体系の精密計算