

格子QCDを用いた
チャーモニウム-核子相互作用の研究

プロジェクト名 「チャーモニウム原子核の可能性を探る」

研究代表者：佐々木 勝一（東京大学）

メンバー：河内 太一（東京大学）

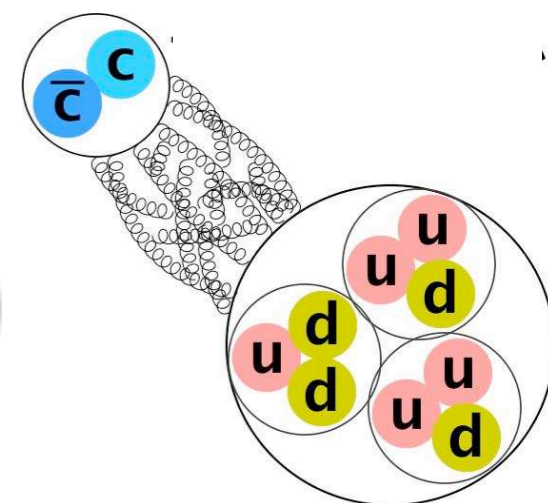
これまでの研究成果

- 国内研究会、学会での発表 2回
- 国際会議での発表 2回（うち1回はポスター）
- 東京大学大学院修士論文（河内太一）

現在、投稿論文も執筆中

はじめに

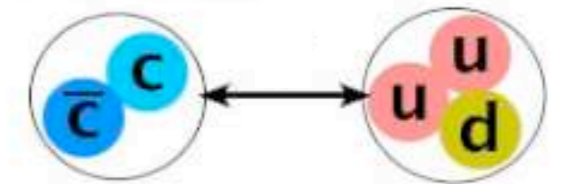
- 広がる”エキゾチック原子核”の世界
 - ハイパー核 (Σ, Λ , 三粒子 + 原子核)
 - K中間子-原子核束縛状態
 - η 中間子, ϕ 中間子原子核
 - 反物質を含む原子核
 - チャーモニウム ($c\bar{c}$) 原子核、



チャーモニウム原子核は銅鉄主義か？

＊チャーモニウムと陽子の2体相互作用の特徴

- 陽子(uud)とチャーモニウム(cc^{bar})は共通のフレーバーを持たない



- 中間子交換による相互作用よりグルーオン多重交換による相互作用が支配的
 - 相互作用が陽にQCD(クォーク・グルーオン相互作用)に依っている
- ➡ カラー・ファンデルワールス力の問題

チャーモニウム原子核は銅鉄主義か？

＊チャーモニウムと陽子の2体相互作用の特徴

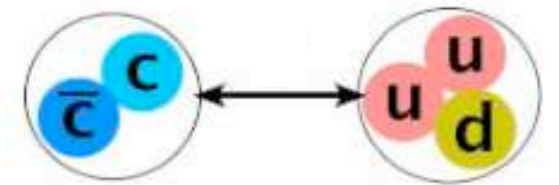
- 陽子(uud)とチャーモニウム(cc^{bar})は共通のフレーバーを持たない
- η_c 粒子($J^P=0^-$)、 J/ψ 粒子($J^P=1^-$)は比較的長寿命 (DD^{bar}に崩壊しない)

➡ 原子核内においてチャーモニウムはパウリ排他原理起源の斥力や原子核吸収などの複雑な多体効果はおおよそ無視できる

チャーモニウム原子核は理想的な系

- ❖ 原子核内においてチャーモニウムはパウリ排他原理起源の斥力や原子核吸収などの複雑な多体効果はおおよそ無視できる

- ✓ チャーモニウムと陽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：



- $A \geq 3$ 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 $O(10)$ MeV

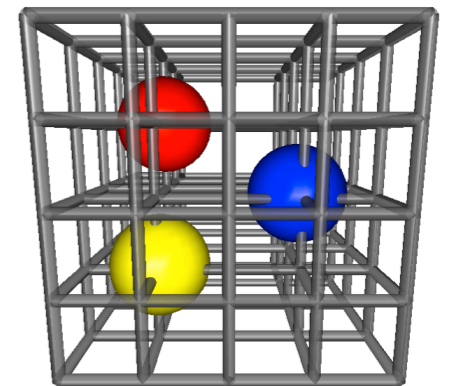
Brodsky et al. PRL64 (90) 1011, Luke et al. PLB288 (92) 355

- ✓ 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カギとなる

本研究の目的

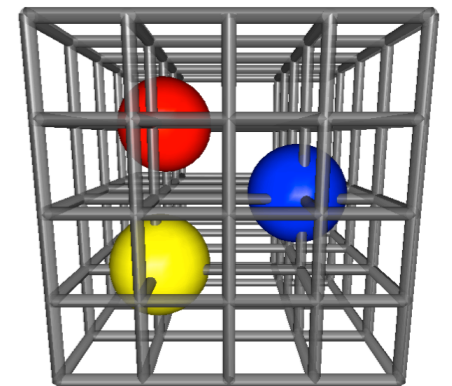
格子QCD計算により低エネルギーのチャーモニウム核子間相互作用の詳細を決定

- S波中心力ポテンシャル
- S波散乱位相（散乱長、有効到達距離）



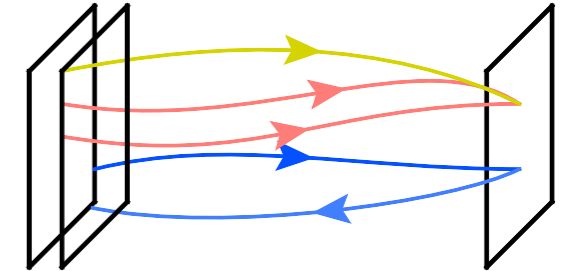
本研究の目的

格子QCD計算により低エネルギーのチャーモニウム核子間相互作用の詳細を決定



- S波中心力ポテンシャル
- S波散乱位相（散乱長、有効到達距離）

ベーテ・サルペータ (BS) 波動関数



- 1 粒子の計算 (2点関数)

$$\langle 0 | \phi(\vec{x}, t) \phi(\vec{0}, 0) | 0 \rangle = \sum_n \langle 0 | \phi(\vec{x}) | E_n \rangle e^{-E_n \cdot t} \langle E_n | \phi(\vec{0}) | 0 \rangle$$

定数

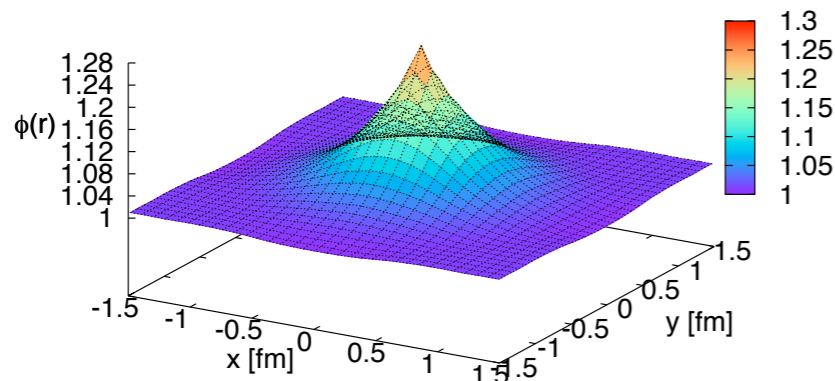
- 2 粒子の計算 (4点関数) $\psi(\vec{x}, \vec{y}; t) = \phi_1(\vec{x}, t) \phi_2(\vec{y}, t)$

$$\langle 0 | \psi(\vec{x}, \vec{y}; t) \psi(\vec{0}, \vec{0}; 0) | 0 \rangle = \sum_n \langle 0 | \psi(\vec{x}, \vec{y}) | E_n \rangle e^{-E_n \cdot t} \langle E_n | \psi(\vec{0}, \vec{0}) | 0 \rangle$$

定数

$$= \varphi_{E_n}(\vec{x}, \vec{y})$$

ベーテ・サルペータ (BS) 振幅



相対部分

$$\vec{r} = \vec{x} - \vec{y}$$

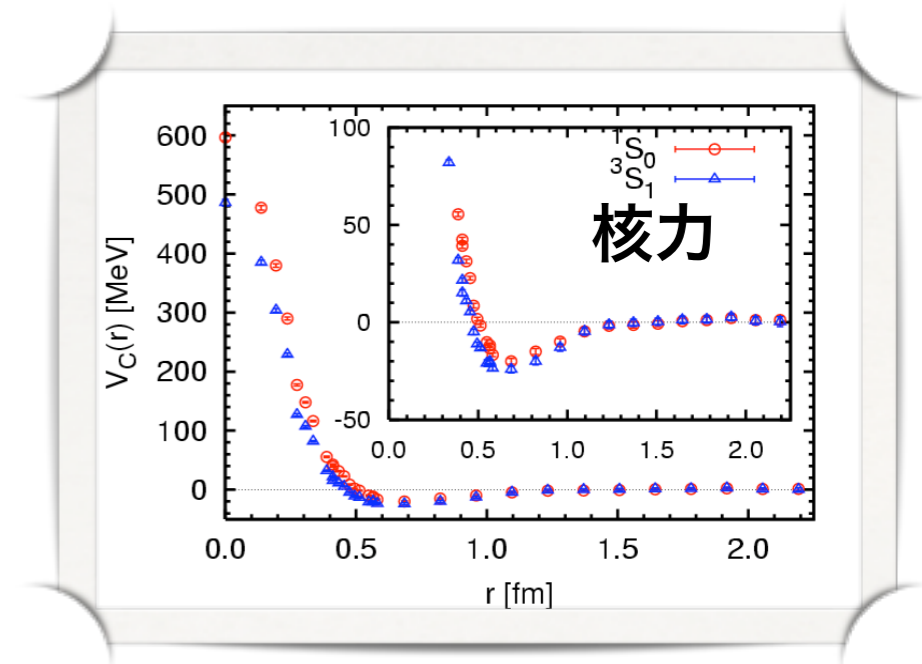
BS波動関数からポテンシャルへ

- * BS振幅(波動関数)が定常Schrödinger方程式を満足することを要請：

$$E\varphi_{\text{BS}}(r) + \frac{\nabla^2}{2M_{\text{red}}}\varphi_{\text{BS}}(r) = V(r)\varphi_{\text{BS}}(r)$$

✓ INPUT : $E, M_{\text{red}}, \varphi_{\text{BS}}(r)$

✓ OUTPUT : $V(r)$



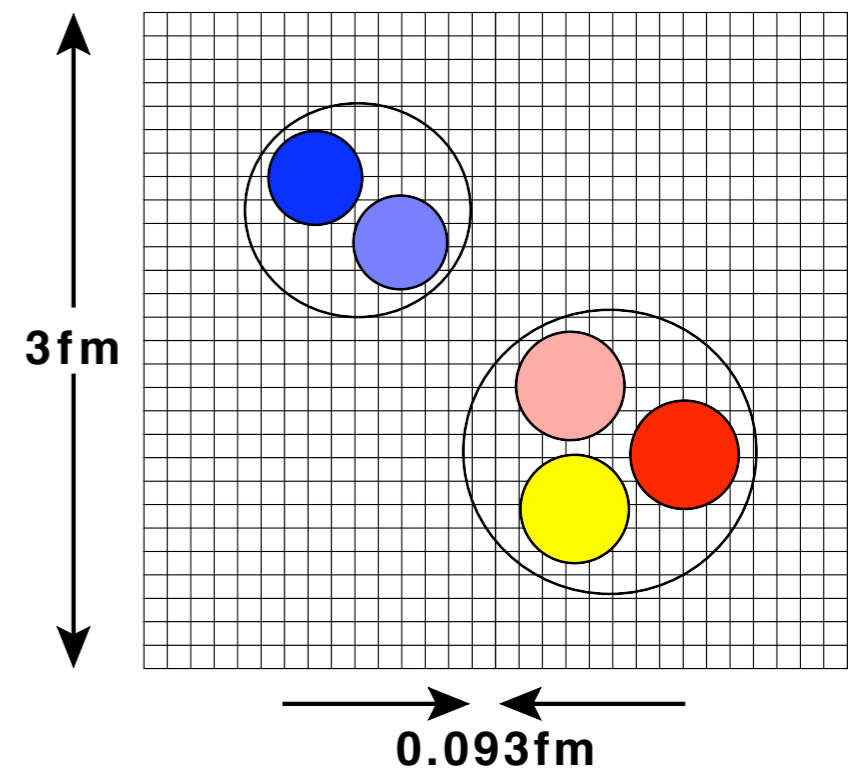
格子QCD計算のセットアップ (昨年度)

- **クエンチ近似**(クォーク真空偏極を無視)
- 格子サイズ: $L^3 \times T = 32^3 \times 48$, $16^3 \times 48$ at $6/g^2 = 6.0$
- Plaquetteゲージ作用
 - + Clover作用(u,d クォーク)
 - + RHQ作用(charm クォーク)
- 統計(ゲージ配位数) = 600

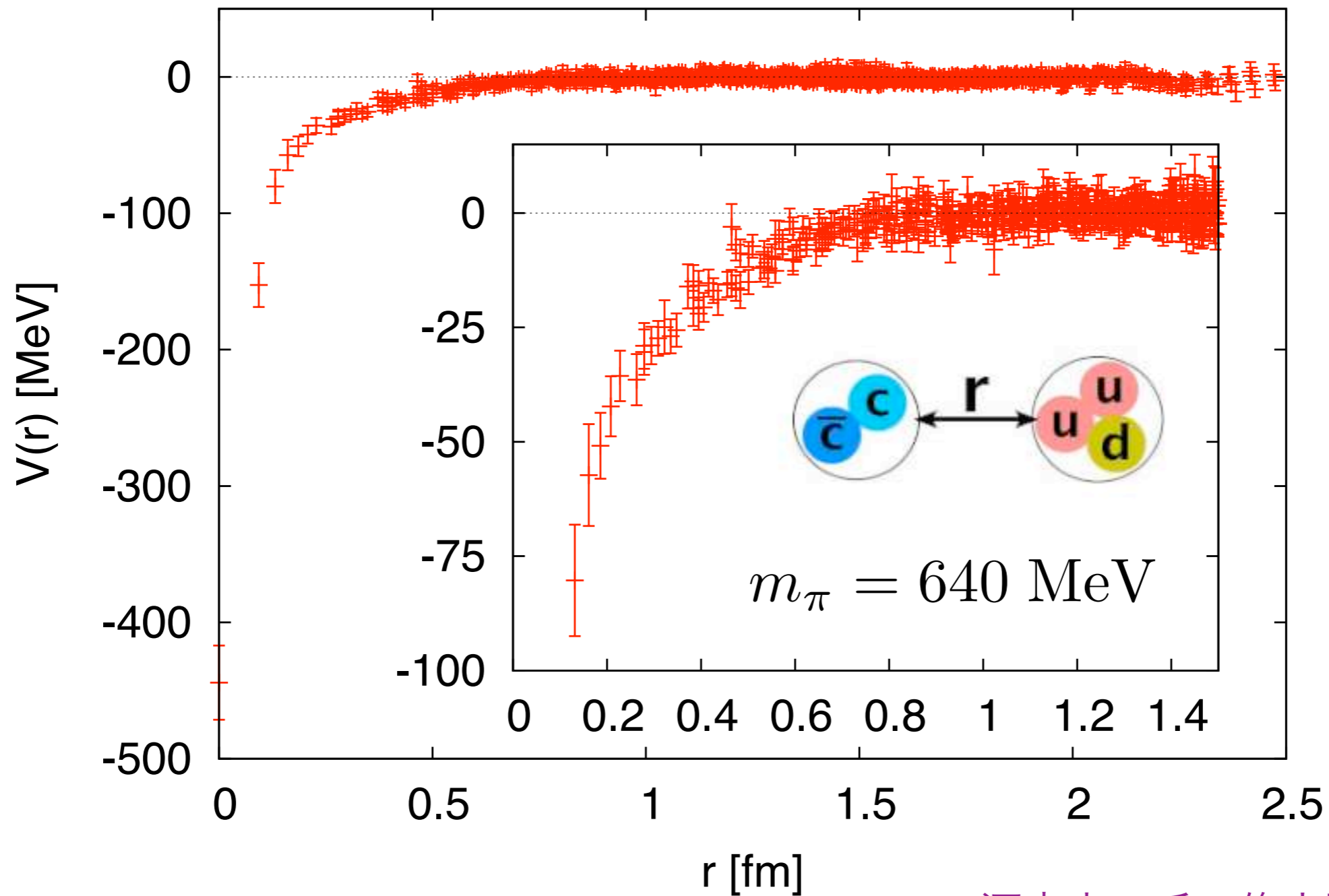
charm: $\kappa = 0.09495$ $m_{\eta_c} = 3.47 \text{ GeV}$

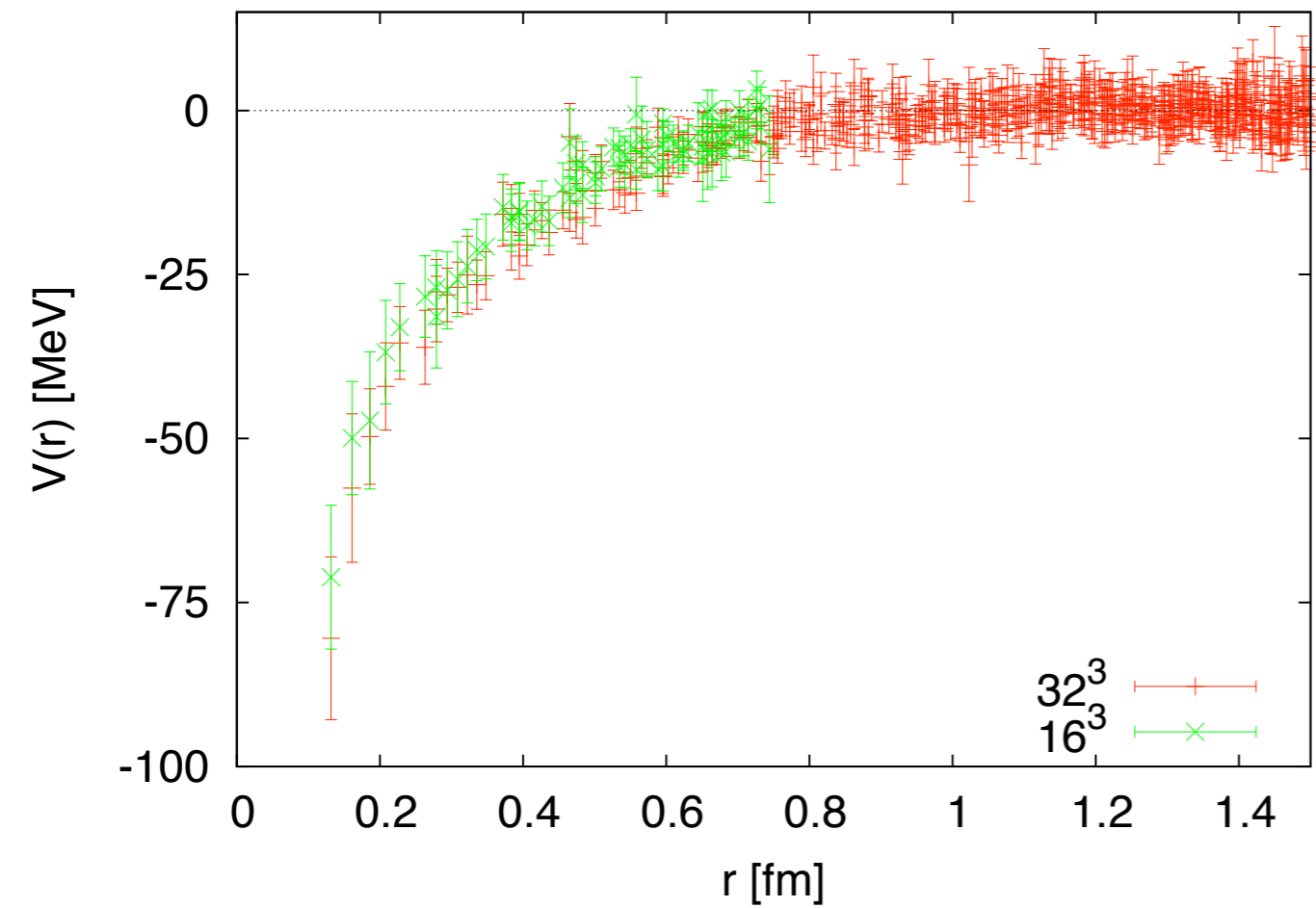
light:

κ	0.1342	0.1339	0.1333
m_π [GeV]	0.64	0.73	0.87
m_N [GeV]	1.43	1.52	1.70

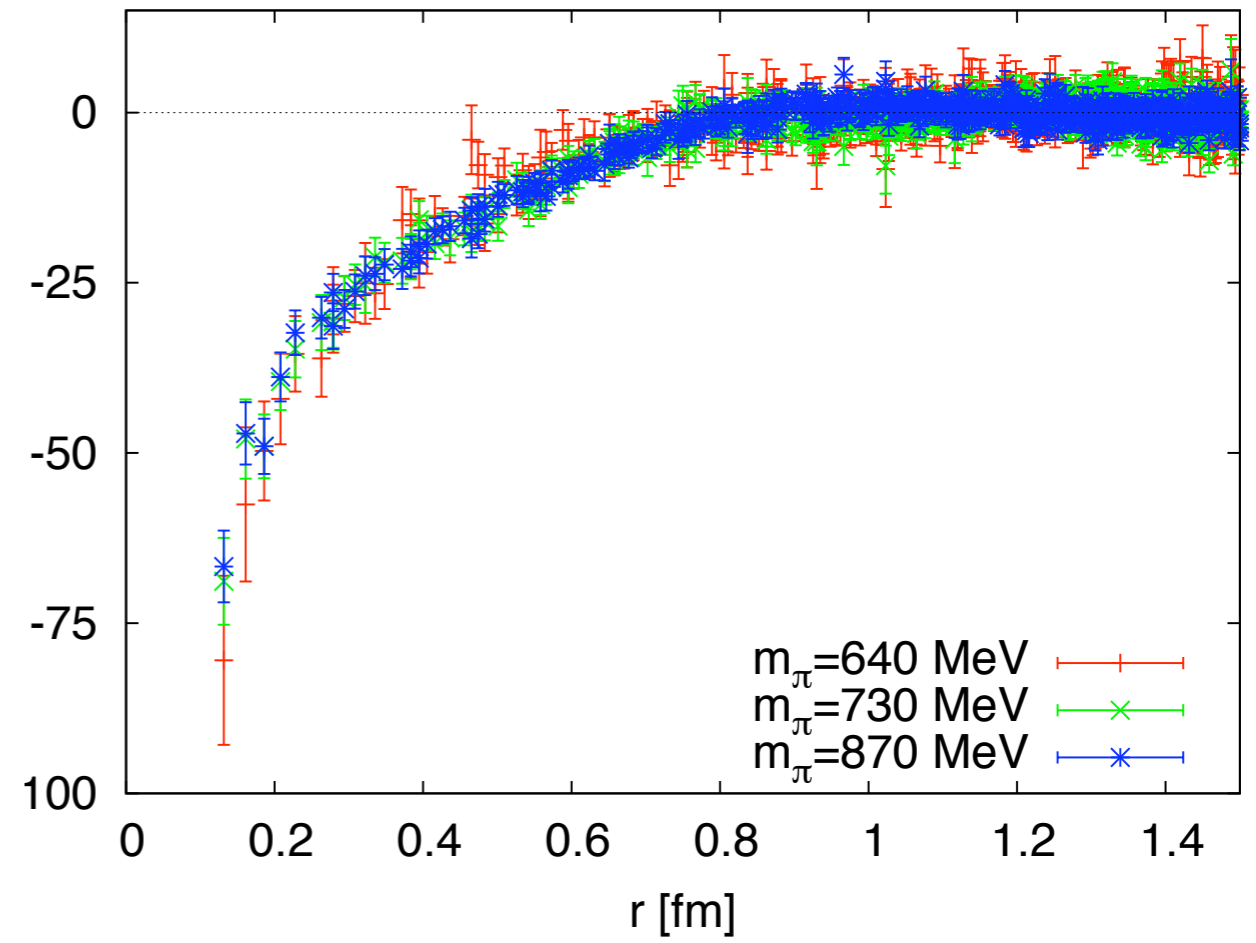


η_c -核子ポテンシャル





体積依存性なし



クォーク質量依存性なし

河内太一氏の修士論文より

2粒子系のエネルギーの有限体積効果

$$E_{2\text{-body}} = M_1 + M_2 + \Delta E \neq M_1 + M_2$$

$$\Delta E = \underbrace{-\frac{2\pi a_0}{M_{\text{red}} L^3}}_{\text{ユバーサル}} \left[1 + \underbrace{c_1 \frac{a_0}{L} + c_2 \left(\frac{a_0}{L}\right)^2}_{\text{系の形、境界条件にのみ依存}} \right] + \mathcal{O}(L^{-6})$$

$M_{\text{red}} = M_1 M_2 / (M_1 + M_2)$

L³箱形+周期境界条件：
Lüscher (86)

ツイストした境界条件：Bedaque (04)

$$E_{2\text{-body}} = E_1(\theta) + E_2(\theta) + \Delta E_\theta$$

$$\Delta E_\theta = -\frac{2\pi b}{M_{\text{red}} L^3} \left[1 + c_1(\theta) \frac{b}{L} + c_2(\theta) \left(\frac{b}{L}\right)^2 \right] + \mathcal{O}(L^{-6})$$

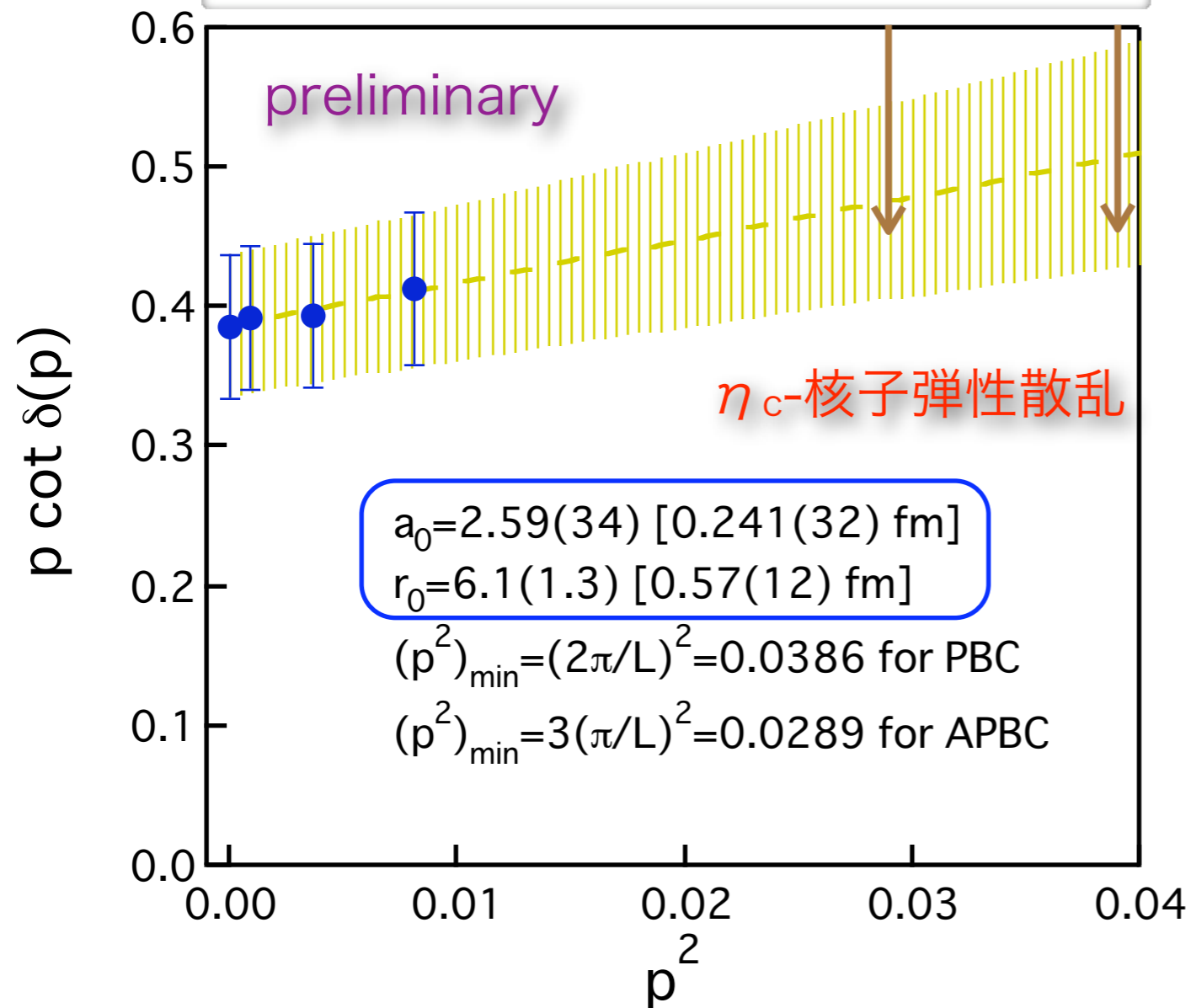
$$b = (p \cot \delta(p))^{-1} \Big|_{p^2 = \theta^2 / L^2} \approx a_0 + \mathcal{O}(\theta^2)$$

新しい試み：

ツイストした境界条件下でのLüscher有限体積法

低エネルギー極限での有効距離展開

$$p \cot \delta(p) = \frac{1}{a_0} + \frac{1}{2} r_0 p^2 + \mathcal{O}(p^4)$$



2体系エネルギーの有限体積効果

\Leftrightarrow 2粒子散乱位相

ツイストした境界条件

Bedaque (04)

$$\psi(x + L) = e^{i\theta} \psi(x)$$

$\Theta = 0$: 周期境界条件(PBC)

$\Theta = \pi$: 反周期境界条件(APBC)

量子化された運動量

$$p = \frac{2\pi}{L} \left(n + \frac{\theta}{2\pi} \right)$$

散乱長： $a_0 \sim 0.2$ fm

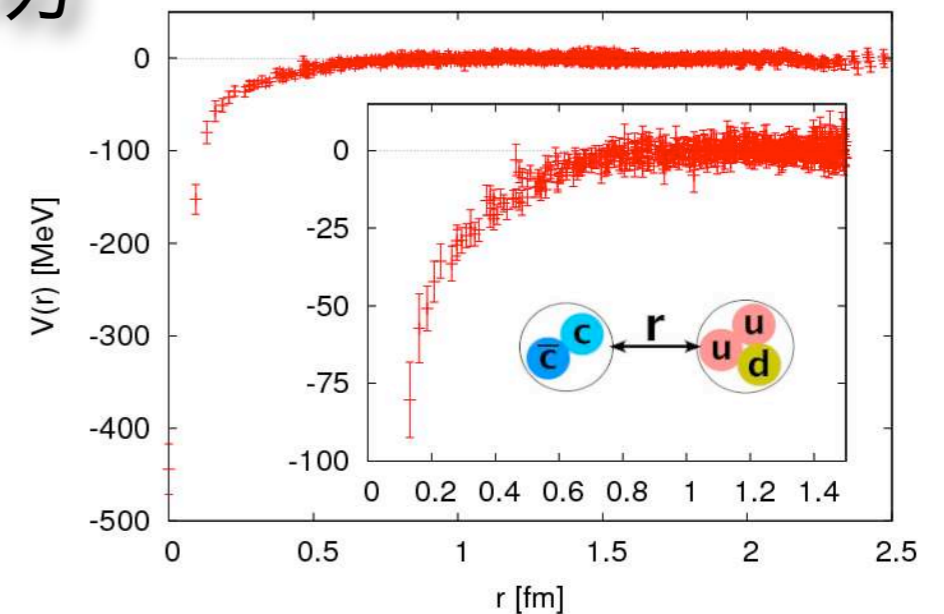
有効距離： $r_0 \sim 0.6$ fm

まとめ

- クエンチ近似の格子QCD計算により **チャーモニウム核子間ポテンシャル**の導出に成功

＊ 全領域で**引力的**

＊ 1 fm程度で遮蔽される**近距離力**



- 新しい試み「ツイストした境界条件」を利用して散乱長だけでなく**有効距離**の計算にも初めて成功

予備計算では、 $a_0=0.24(3)$ fm, $r_0=0.57(12)$ fm

- ❖ 注意：クエンチ近似でかつ π 中間子が 640 MeV 以上とクォークが重い領域での計算。ただし、その領域で明白なクォーク質量依存性はみつかっていない。

2010年度の展望

◆ より精密にチャーモニウム核子間相互作用を決定

＊ クォーク真空偏極を含んだフル格子QCD計算

＊ クォーク質量のより軽い計算 ($m_\pi < 400$ MeV)

(PACS-CSゲージ配位の利用)

◆ 4月より、PACS-CS 128ノードで計算が進行中