



# 物理的クォーク質量における 2+1フレーバー格子QCD

筑波大学計算科学研究センター  
藏増 嘉伸



## Contents

1. 物理的背景とH20年度までの成果
2. H21年度の成果
  - reweighting法による物理点計算
  - SF法による非摂動的runningクォーク質量計算
  - He原子核の直接構成
3. まとめと今後の展開



## メンバー一覧

筑波大: 青木慎也、石塚成人、宇川彰、金谷和至、  
藏増嘉伸、谷口裕介、吉江友照、  
浮田尚哉、滑川裕介、山崎剛、  
村野啓子、Nguyen Oanh Hoanh

広島大: 大川正典、石川健一

金沢大: 武田真滋

BNL : 出淵卓



## 物理的背景

### 格子QCDによる強い相互作用の解明

- QCD理論の検証と基本定数(結合定数、クォーク質量)の決定
- 有限温度・有限密度における相構造
- QCDに基づいた原子核の第一原理計算
- 素粒子標準模型およびそれを超える物理に関わる

ハドロン物理量の決定

### 分野開闢以来30年にわたる懸案

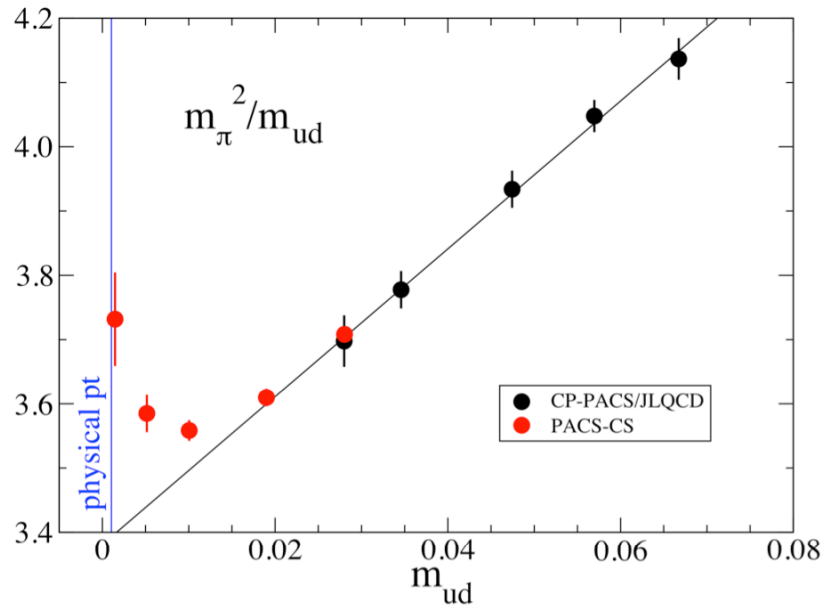
- 物理的質量における軽いクォーク(up,down,strange)の真空偏極効果を取り入れた格子QCDシミュレーション
- 十分な大きさの体積を保ちつつ格子間隔を小さくしていくことにより連続時空の極限をとること



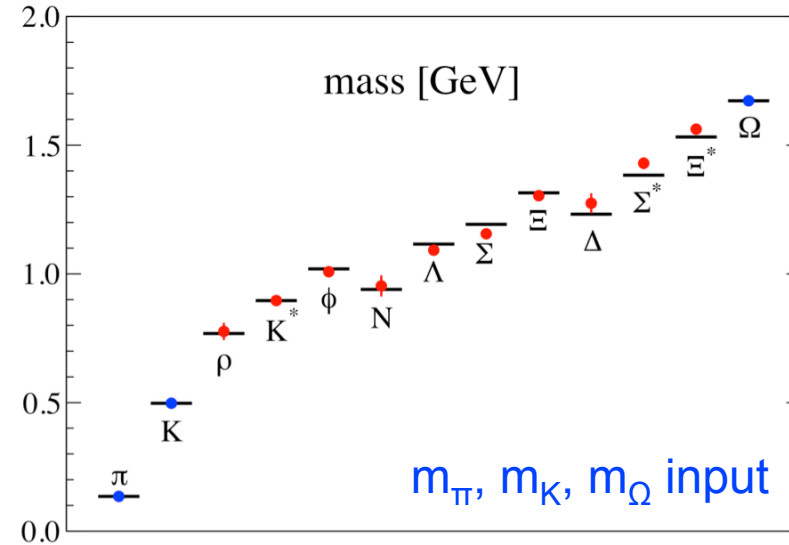
## H20年度までの成果

領域分割HMC(DDHMC)アルゴリズムによる計算コストの大幅削減により物理点近傍まで到達

非自明なクォーク質量依存性  
⇒ 物理点直接計算の重要性



ハドロン質量の実験値との比較  
2-3%の範囲内で一致





## H21年度の成果(その1)

PRD81(2010)074503

reweighting法による物理点へのfine-tuning:

simulation:  $(m_{ud}, m_s) \Rightarrow$  physical point:  $(m'_{ud}, m'_s)$   
with  $m_{ud} \approx m'_{ud}$  and  $m_s \approx m'_s$

$$\langle \mathcal{O}[A_\mu](m'_{ud}, m'_s) \rangle_{(m'_{ud}, m'_s)} = \frac{\langle \mathcal{O}[A_\mu](m'_{ud}, m'_s) R_{ud}[A_\mu] R_s[A_\mu] \rangle_{(m_{ud}, m_s)}}{\langle R_{ud}[A_\mu] R_s[A_\mu] \rangle_{(m_{ud}, m_s)}}$$

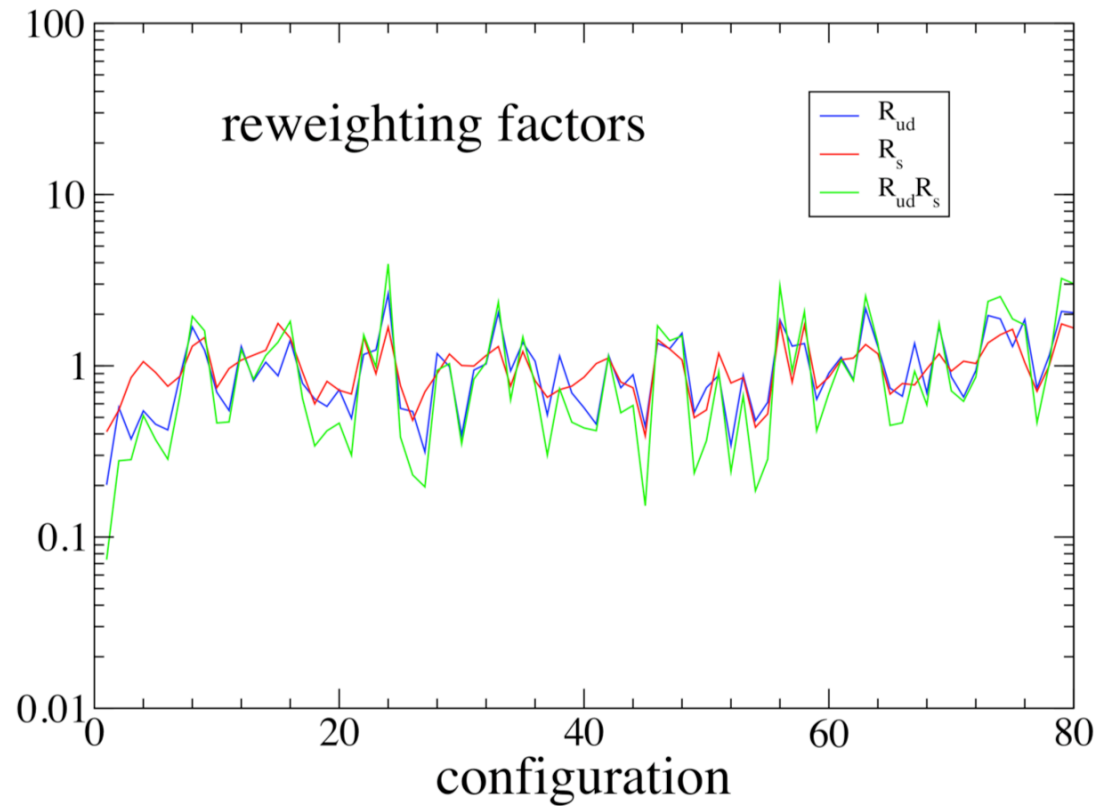
reweighting factors

$$R_{ud}[A_\mu] = \left| \det \left[ \frac{D_{m'_{ud}}[A_\mu]}{D_{m_{ud}}[A_\mu]} \right] \right|^2, \quad R_s[A_\mu] = \det \left[ \frac{D_{m'_s}[A_\mu]}{D_{m_s}[A_\mu]} \right]$$



## H21年度の成果(その1)

reweighting factorの配位依存性

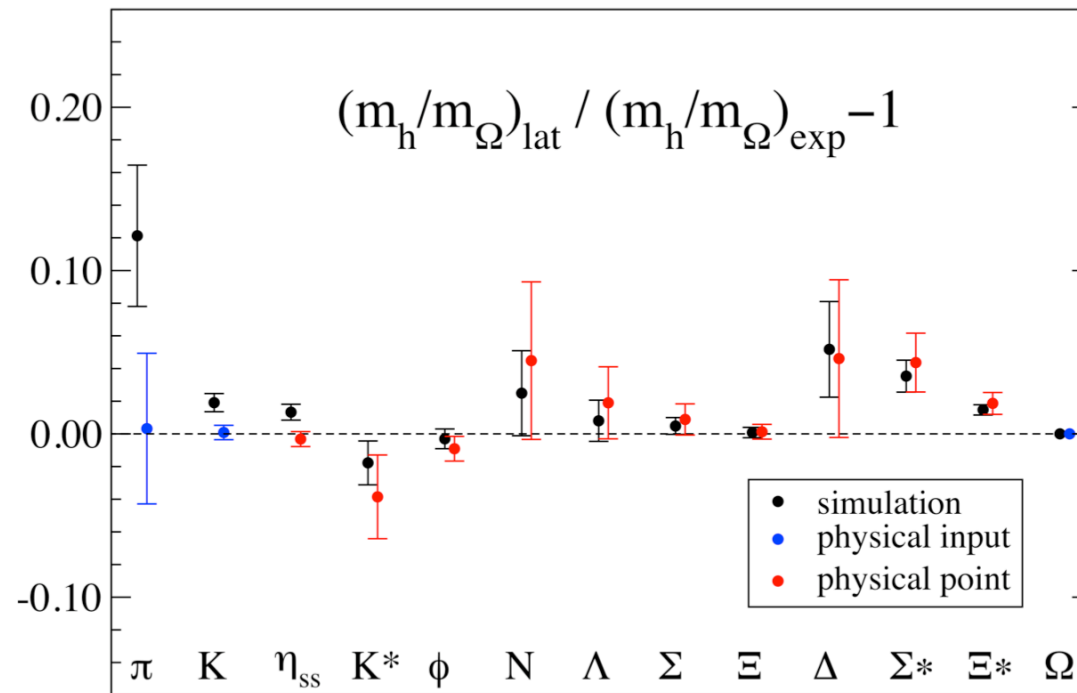


ゆらぎは10倍を超えない程度に抑えられている



## H21年度の成果(その1)

### ハドロン質量の実験値との比較



$m_\pi/m_\Omega$ ,  $m_K/m_\Omega$  are properly tuned ( $\Delta m_{ud} < 1$  MeV,  $\Delta m_s < 3$  MeV)





## H21年度の成果(その2)

投稿準備中

SF schemeにおける非摂動的runningクォーク質量の計算

QCD Lagrangian:

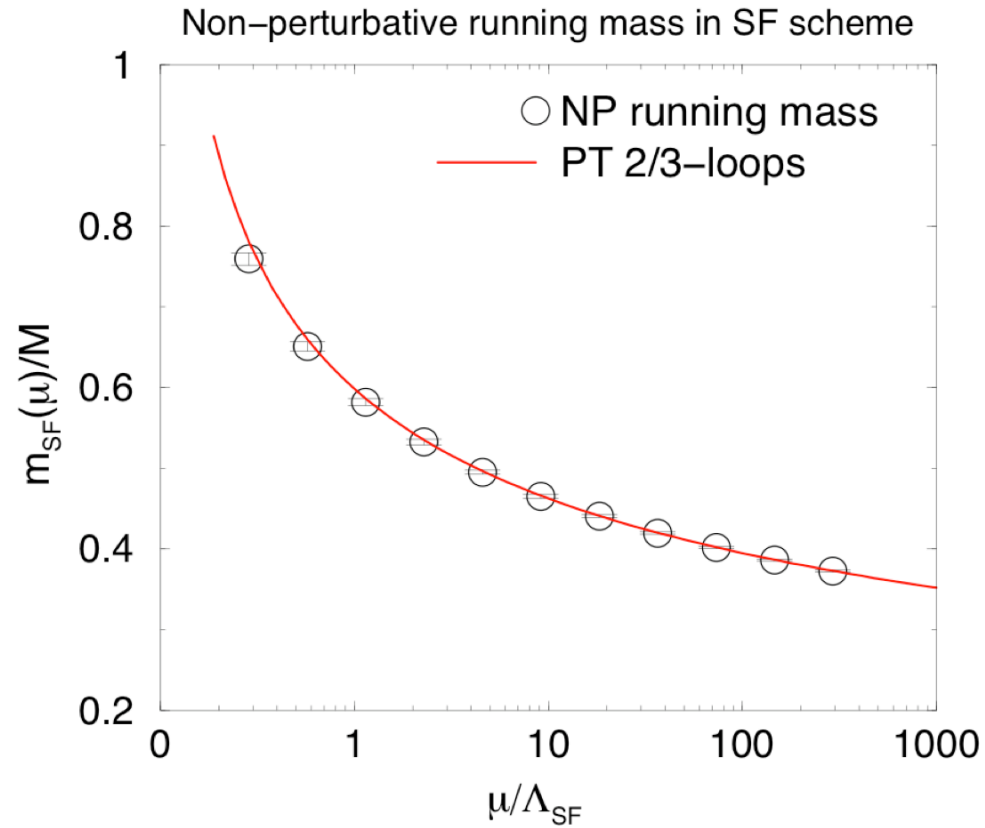
$$\mathcal{L} = \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F_{\mu\nu} + \sum_{q=u,d,s,c,b,t} \bar{q} [\gamma_{\mu} (\partial_{\mu} - ig A_{\mu}) + m_q] q$$

結合定数 $g$ とクォーク質量 $m_q$ はフリーパラメータ

繰り込みscheme依存性を非摂動的に評価する必要性



## H21年度の成果(その2)



⇒他のschemeで定義されたクォーク質量との詳細な比較が可能になる

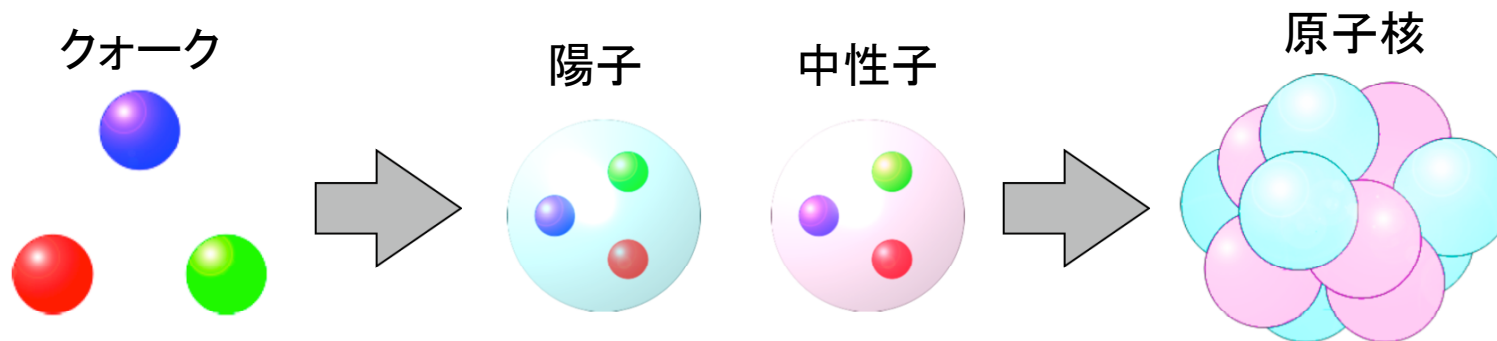


## H21年度の成果(その3)

arXiv: 0912.0843

格子QCDによる原子核の直接計算

階層的物質構造をクォークの力学であるQCDのみによって解明することは、マルチスケールフィジックスを目指す計算科学にとっての挑戦



計算コスト $\propto$ 原子核の伝播関数におけるクォーク場の縮約数

${}^4\text{He}$ の場合 $(6!)^2=518400$ 通り $\Rightarrow O(1000)$ 通りまで縮減

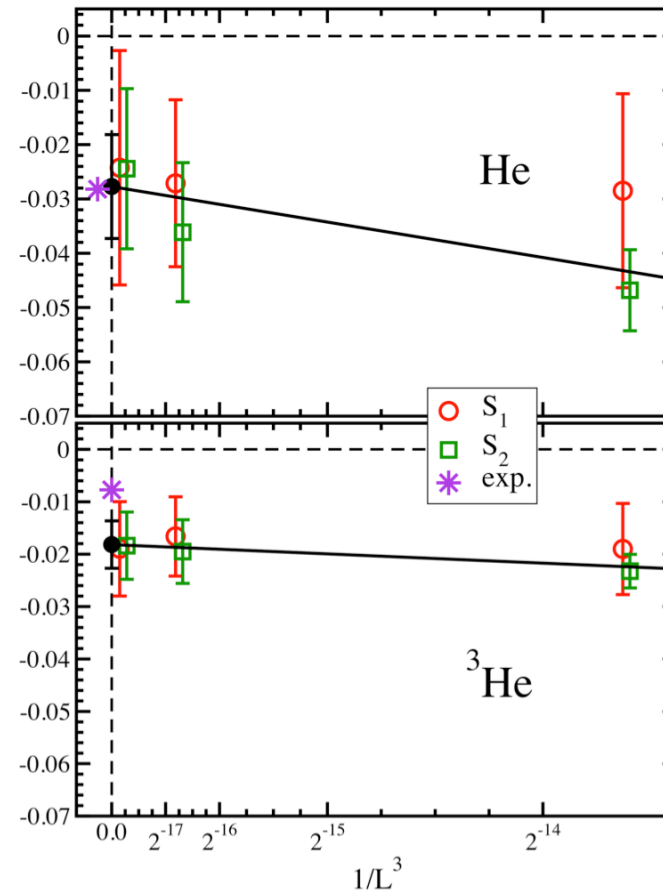


## H21年度の成果(その3)

He原子核のfeasibility study

- ・クエンチ近似
- ・核子質量 $m_N=1.62\text{GeV}$

$1/L^3 \rightarrow 0$  極限で $\Delta E = m_{\text{He}} - 4m_N \neq 0$   
 $\Rightarrow$  He原子核の束縛状態を確認





## まとめと今後の展開

格子QCDによる強い相互作用の解明

- QCD理論の検証と基本定数(結合定数、クォーク質量)の決定  
強い相互作用のみの2+1フレーバー物理点計算



電磁相互作用を入れた1+1+1フレーバー物理点計算  
(u、d、sクォーク質量の決定)

- 有限温度・有限密度における相構造  
符号問題の克服
- QCDに基づいた原子核の第一原理計算  
 ${}^4\text{He} \Rightarrow {}^{12}\text{C}$ まで拡張 (計算量  $\propto (6!)^2 \Rightarrow (18!)^2$ )
- 素粒子標準模型およびそれを超える物理に関わる  
ハドロン物理量の決定  
 $\rho \rightarrow \pi\pi$ 崩壊、重いクォークの物理、核力(石井) etc.