格子ゲージ理論を用いた量子色力学における強いCP問題の研究

(Study of strong CP problem with lattice gauge theory)

研究代表者：北野 龍一郎 (KEK / SOKENDAI)

Julien Frison (KEK)
山田 憲和 (KEK / SOKENDAI)

山崎 雅仁 (Kavli IPMU)

平成30年度学際共同利用申請ヒアリング 2018/03/02

ゲージ理論のトポロジカルな性質を理解したい！

Main Theme

課題**1**. 位相感受率χ_t＝ 0 とPCAC質量の関係

(Strong CP problem)

課題**2**. 真空エネルギーの θ 依存性

($\theta = \pi$ での自発的CP対称性の破れ)

SU(2) ゲージ理論θ 依存性

方法1、方法２、方法３

θ：経路積分において、トポロジカルに非自明な配位の重みを制御するパラメーター

1. 位相感受率 χ_t = 0 とPCAC質量の関係

- **Strong CP problem ($\theta \ll 1$)に対する 1つの解 "$m_u = 0$"**

"Within the literature there are even suggestions that the up quark could be essentially massless." [PDG2016] ("m_u=0" は排除されていない)

そもそも($m_u \neq m_d \neq m_s$のとき)定義が曖昧

➡ 「"位相感受率 $\chi_t = 0$" の条件下でハドロン質量を再現するか？」

を問うべき

➡ **課題 1 「$\chi_t = 0$を満たすupクォークのPCAC質量は 0 か？」**

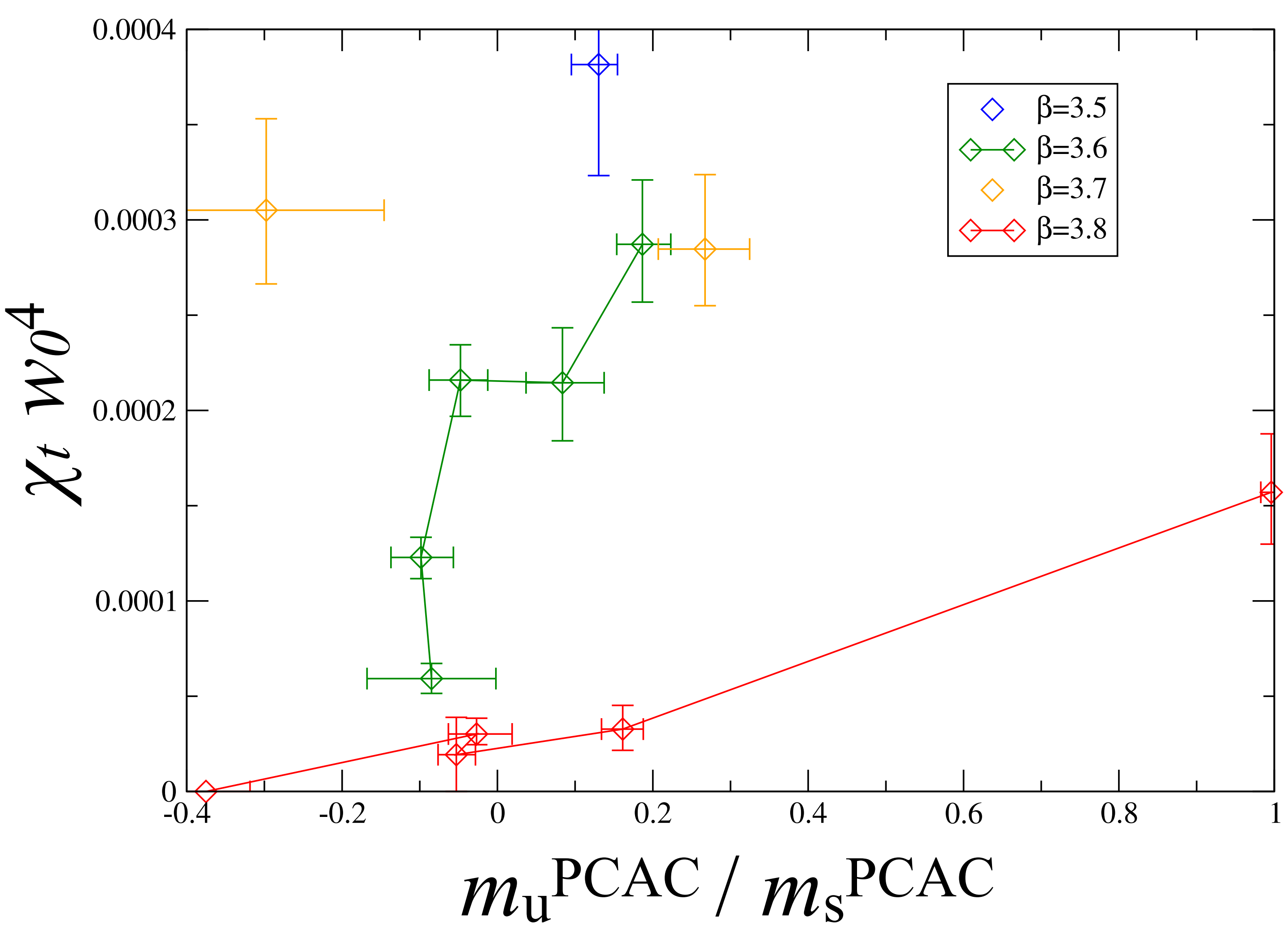
1 (light) + 2 (heavy) フレーバーQCDのシミュレーション

なぜ 1 + 2 ?

- 軽いハドロンがないので $m_u \sim 0$ のシミュレーションが可能
- 't Hooft vertexによる加法的な寄与 O($m_d\, m_s/\Lambda_{QCD}$) が見やすい

課題１: 1+2 フレーバーQCDシミュレーション

Topological susceptibility in N_f=1+2



N_f= 1+2 clover with $m_u \ll m_d = m_s$, V=$16^3\times32$

$\chi_t = \langle Q^2\rangle/V$: 位相感受率, Q: 位相荷

$\chi_t \propto m_u^{\rm pcac}$?

- 計画
  - Fineな格子(β=3.9)の配位生成
  - $V = 24^3\times48$
  - m_d=m_s 固定で m_u を4点
  - ~ 800 configs for each
  - bridge++
- 申請時間の根拠
  - 配位生成

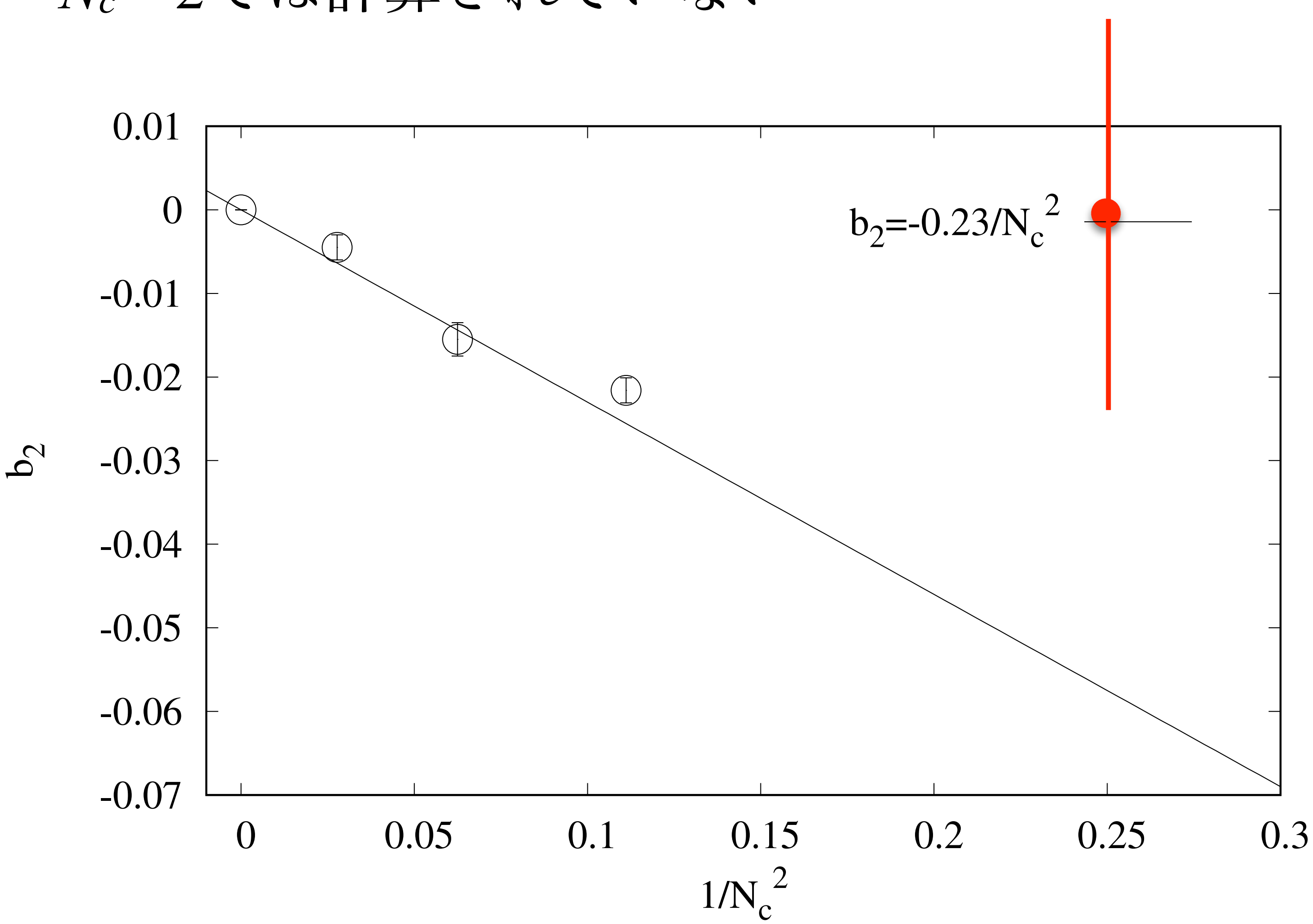
    72,000 s node /conf /(1 m_u)
    for V=$16^3\times32$
    → 388,800 node・hour
  - PCAC質量(4回/conf)とQの測定

    (2,500 + 1,500)s node /conf
    → 72,000 node・hour

課題1計: 450,000 node・hour on OFP

課題２: SU(2)のθ 依存性 (方法１)

- Large N_c ゲージ理論ではθ=πで自発的にCPが破れる[Witten(80,98)]
- $N_c > 2$でも正しそう
- 1/N_c 展開が良いとは思えないN_c＝2ではどうか？
- $E(\theta)-E(0) = \chi_t/2\ \theta^2 (1 + b_2\, \theta^2 + b_4\, \theta^4 + \cdots)$
- θ依存性は b_i が分かると予測できる
- N_c＝2では計算されていない



- 計画(方法１)
  - 3β で配位生成→連続極限
  - 格子サイズ $16^3\times32$ と $24^3\times48$
  - ~ 100,000 configs for each
  - bridge++

- 申請時間の根拠(方法１)
  - 配位生成

    160 s node /conf for V=$16^3\times32$

    → 94,500 node・hour
  - Qの測定

    180 s node /conf

    → 106,313 node・hour

課題2-1計 200,000 node・hour on OFP

課題２: SU(2)のθ依存性 (方法２)

- Large N_c ゲージ理論では$\theta=\pi$で自発的にCPが破れる[Witten(80,98)]
- $N_c > 2$でも正しそう
- $1/N_c$ 展開が良いとは思えない$N_c=2$ではどうか？
- 各Qセクターの作用密度 $s(Q)$ は Q, b_2 , b_4, … の関数として書ける

➡ $s(Q)$ を多くのQで計算すれば、b_i (i=2,4,6) が求まる。

$$s(Q)-s(0) = \frac{d\ln a}{d\beta}\left[\left(\frac{2}{\chi_t V} - \frac{2d_2}{(\chi_t V)^2} + \frac{16d_2^2 - 3d_4}{4(\chi_t V)^3} + \cdots\right)Q^2 + \left(\frac{d_2}{2(\chi_t V)^3} - \frac{7d_2^2 - d_4}{3(\chi_t V)^4} + \cdots\right)Q^4 + \left(\frac{10d_2^2 - d_4}{36(\chi_t V)^5} + \cdots\right)Q^6 + \cdots\right].$$

where $b_2 = 12d_2, \quad b_4 = 360d_4.$

- 計画(方法２)
  - $2\ \beta$, $5\ Q$
  - $V = 16^3\times32$(low β) and $24^3\times48$(high β)
  - ~ 2,000 configs.
  - bridge++

- 申請時間の根拠(方法２)
  - 配位生成(Qを固定する)

  12,000 s node /conf for $V=16^3\times32$

  → 202,083 node・hour

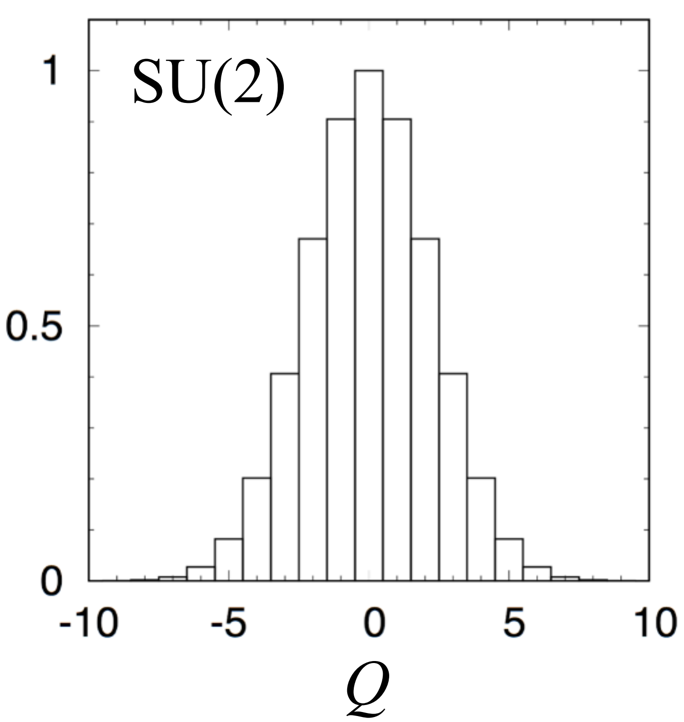
課題2-2計 200,000 node・hour on OFP

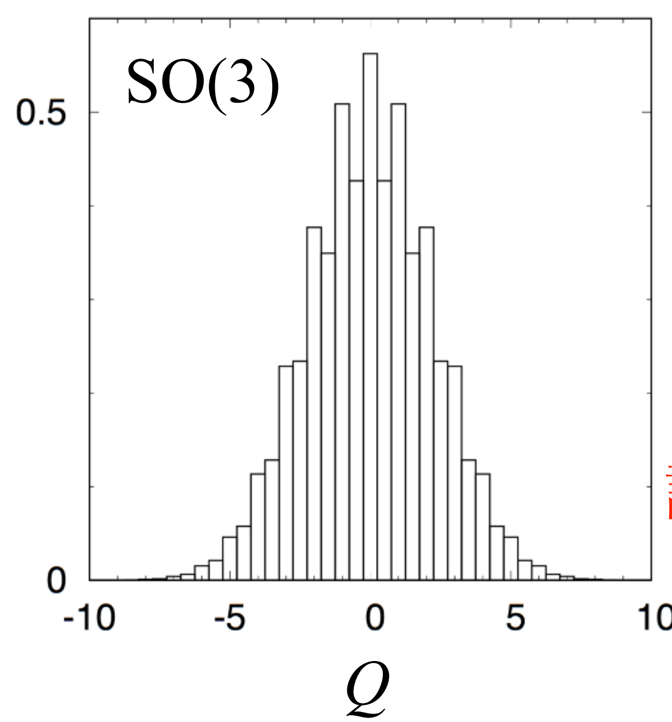
課題２: SU(2)のθ 依存性 (方法３)

1. Localな物理量はSU(N_c)とSU(N_c)/Z_{N_c} で等しい
2. SU(Nc)/Z_{N_c} では非整数の Q が存在し分配関数は θ の2π周期性を失う $Z(\theta) = \sum Z(Q) e^{-i\theta Q}$

- 1, 2から、$\theta = \pi$ で自発的CPの破れがおこることが導かれる [Kitano, Suyama, NY (2017)]

- 非整数 Q のヒストグラムを調べることにより、この考察の妥当性とθ~πでの真空構造に関する知見が得られる





- 計画(方法３)
  - 最も簡単なSU(2)/Z_2 ≃ SO(3)を調べる
  - 2 β、$V = 24^3 \times 48$
  - ~ 5,000 configs
  - 自前のコードとbridge++

- 申請時間の根拠(方法３)
  - 配位生成

    720 s node /conf for V=$24^3 \times 6$
    → 16,000 node・hour
  - Qの測定 (via $D^{\mathrm{adj}}_{\mathrm{ov}}$)

    30,000 s node /conf
    → 83,333 node・hour

課題2-3計 100,000 node・hour on COMA