#### 有限温度QCDの相構造

#### 大野浩史 *筑波大学計算科学研究センター*

#### 筑波大学宇宙史研究センター 2022年度第2回構成員会議成果報告&交流会 November 28, 2022

## 量子色力学 (Quantum Chromodynamics, QCD)

- ・強い相互作用に関する基礎理論
- 特徴的な性質
  - クォーク・グルーオンの閉じ込め
  - 漸近的自由性
  - カイラル対称性の自発的破れ
- 高温・高密度状態で相転移が起こると期待
   閉じ込め・非閉じ込め
  - カイラル対称性の自発的破れと回復
  - クォーク・グルーオン・プラズマ

### カイラル対称性

- フェルミオン場の左巻きスピン成分と右巻きスピン成分を独立に回転させる変換 (カイラル変換) に対する対称性
- ゼロ質量のフェルミオン場について成り立つ

$$\psi \rightarrow e^{ilpha\gamma_5}\psi, \quad \bar{\psi} \rightarrow \bar{\psi}e^{ilpha\gamma_5}$$
:カイラル変換  $\{\gamma_\mu, \gamma_5\} = 0$   
 $\mathcal{L}_F = \bar{\psi}(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi$   $P_{R/L} \equiv \frac{1\pm\gamma_5}{2}, \quad \psi_{R/L} \equiv P_{R/L}\psi, \quad \bar{\psi}_{R/L} \equiv \bar{\psi}P_{L/R}$   
 $= \bar{\psi}_L(i\gamma^\mu\partial_\mu)\psi_L + \bar{\psi}_R(i\gamma^\mu\partial_\mu)\psi_R - m(\bar{\psi}_L\psi_R + \bar{\psi}_R\psi_L)$ 

Massless N<sub>f</sub> フレーバーのフェルミオン場のカイラル対称性

$$SU(N_f)_L imes SU(N_f)_R imes U(1)_A o SU(N_f)$$
自発的対称性の破れ

アノマリー (量子効果) で 顕わに破れる  $\langle \bar{\psi}\psi \rangle \neq 0$ 

#### QCD相図



Tapan K. Nayak 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1602 012003

大野 浩史 TCHoU 2022年度第2回構成員会議

# QCD相転移の次数

- クォークのフレーバー数 (N<sub>f</sub>) と質量に依存
- N<sub>f</sub> = 0 (quenched QCD)
  - 1<sup>st</sup> order (閉じ込め・非閉じ込め相転移)
- $N_{\rm f} = 1$ 
  - 相転移なし
- Massless  $N_{\rm f}$  = 2
  - U(1)<sub>A</sub>が有効的に回復した場合: 1<sup>st</sup> order
  - U(1)<sub>A</sub>が有効的に回復しない場合: 2<sup>nd</sup> order
  - まだ明確な結論は得られていない
- Massless  $N_{\rm f} \ge 3$ 
  - 1<sup>st</sup> order
- N<sub>f</sub> = 3 の臨界終点 (m<sub>E</sub>)
  - 一次相転移とクロスオーバの境界の二次相転移点
  - まだ場所が特定できていない

大野 浩史 TCHoU 2022年度第2回構成員会議

#### 有限温度QCDの相構造

R. D. Pisarski and F. Wilczek, PRD 29 (1984) 338



# 格子QCD計算に基づく N<sub>f</sub> = 3 臨界終点の結果

- 連続極限に近づくほど m<sub>E</sub> は小さくなる
- 格子フェルミオンの種類によって結果が大きく異なる



O. Philipsen, Eur. Phys. J. ST 152 (2007) 29

大野 浩史

TCHoU 2022年度第2回構成員会議

## 格子上のフェルミオン場の定式化についての補足

• 格子上の場は定式化に不定性がある

- 連続極限で消えてしまう項はいくら付け加えてもよい

- ・ 定式化の例
  - Naïve fermion

連続理論を単純に離散化して得られる。ダブラーと呼ばれる、連続理論にはない余計な自由度が現れる

- Wilson fermion

Wilson項と呼ばれるカイラル対称性を顕わに破る項を加えてダブラーの寄与を落とす定式化。

Staggered fermion

ダブラーの自由度をフレーバーに読み替えて積極的に利用する定式化。カイラル対称性の一部が残る。 4フレーバーのフェルミオンになるので、それ以外の場合 rooting が必要。最も計算コストが小さい。



### 本研究の目的

- ・ ウィルソン型フェルミオン作用を用いた格子QCD計算で臨界終点を探索
- $N_{\rm f} = 3$ 
  - より正確な連続極限
  - $-N_{\rm t} = 12$
- $N_{\rm f} = 4$ 
  - N<sub>f</sub> = 3の結果を別の角度から検証
  - スタッガード型フェルミオンが自然に定義できる (rooting問題がない)
     → ウィルソン型フェルミオンとの違いをより正確に検証可能
  - $N_{f} = 3$ と比べて  $m_{E}$  がより大きいと期待 → より少ない計算コストで連続極限を調べられる可能性がある



## 臨界終点の決定法:有限サイズスケーリング

- ・ 自由エネルギーの格子サイズに対するスケーリング  $F(t,h,L^{-1}) = F(tL^{y_t},hL^{y_h},1)$
- 尖度 (Kurtosis)

$$K_{\rm M}(t,0,L^{-1}) = \frac{\frac{\partial^4}{\partial h^4} F(t,0,L^{-1})}{\left[\frac{\partial^2}{\partial h^2} F(t,0,L^{-1})\right]^2} \\ = \frac{\frac{\partial^4}{\partial h^4} F(tL^{y_t},0,1)}{\left[\frac{\partial^2}{\partial h^2} F(tL^{y_t},0,1)\right]^2}$$

 $\rightarrow tL^{y_t}$ が小さいとき

$$K_{\rm M}(t,0,L^{-1}) = \frac{\frac{\partial^4}{\partial h^4} F(0,0,1)}{\left[\frac{\partial^2}{\partial h^2} F(0,0,1)\right]^2} + c_K t L^{1/\nu} + O((tL^{1/\nu})^2)$$
 1/\nu = y\_t

大野 浩史 TCHoU 2022年度第2回構成員会議

有限温度QCDの相構造

t : reduced temperature  $\frac{T - T_c}{T}$ 

*h*:外部磁場

I: 格子サイズ





臨界終点では尖度の体積依存性が無い →様々な体積で尖度を計算し、交点を求める



#### N<sub>f</sub> = 3の結果: カイラル凝縮の感受率と尖度

Y. Kuramashi, Y. Nakamura, HO and S. Takeda, Phys. Rev. D 101 (2020) 5, 054509



к: ホッピングパラメタ~1/m

大野 浩史 TCHoU 2022年度第2回構成員会議

## N<sub>f</sub> = 3の結果: 裸のパラメータ (β, κ) 平面での相図

Y. Kuramashi, Y. Nakamura, HO and S. Takeda, Phys. Rev. D 101 (2020) 5, 054509



大野 浩史 TCHoU 2022年度第2回構成員会議

# N<sub>f</sub> = 3 の結果: 連続極限

- ・ 臨界終点の温度 T<sub>E</sub>の連続極限の不定性は小さい
- ・ 臨界終点のπ中間子質量 m<sub>PS,E</sub>
   の連続極限は不定性が大きい
- →線形外挿の結果を上限値とする

 $\rightarrow m_{\rm E} \leq 110 \; {\rm MeV}$ 

大野 浩史

TCHoU 2022年度第2回構成員会議



Y. Kuramashi, Y. Nakamura, HO and S. Takeda, Phys. Rev. D 101 (2020) 5, 054509

#### N<sub>f</sub> = 3 の結果: まとめ

大野 浩史

TCHoU 2022年度第2回構成員会議

- 以前の計算 (N<sub>t</sub> ≤ 10) に加えて、より細かな格子間隔 (N<sub>t</sub> = 12) での計算を行った
- ・ 臨界終点におけるπ中間子質量 m<sub>PS,E</sub> の連続極限の 不定性は依然小さくないもの、より小さな m<sub>PS,E</sub> を得た

 $m_{\rm E} \leq 110 \, {\rm MeV}$ 



Y. Kuramashi, Y. Nakamura, HO and S. Takeda, Phys.Rev.D 101 (2020) 5, 054509

#### Nf = 4の結果: 裸のパラメータ (β, κ) 平面での相図



Y. Kuramashi, Y. Nakamura, HO and S. Takeda, in preparation

大野 浩史 TCHoU 2022年度第2回構成員会議

## N<sub>f</sub> = 4 の結果: 連続極限

- 臨界終点の温度 T<sub>E</sub>の連続極限の
   不定性は小さい
- ・ 臨界終点のπ中間子質量 m<sub>PS,E</sub> の連続極限は不定性が大きい
- $N_f = 4 \sigma_T_E t N_f = 3 \ E F \ E F \ E$
- N<sub>f</sub> = 4の m<sub>PS,E</sub> は N<sub>f</sub> = 3 よりも大きい

Y. Kuramashi, Y. Nakamura, HO and S. Takeda, in preparation



大野 浩史 TCHoU 2022年度第2回構成員会議

スタッガードフェルミオンの結果との比較

Y. Kuramashi, Y. Nakamura, HO and S. Takeda, in preparation



- ウィルソンフェルミオンの結果は、N<sub>f</sub>=3,4 共にスタッガードフェルミオンよりも大きい
- この違いはスタッガードフェルミオンの rooting の有無では説明できない

大野 浩史 TCHoU 2022年度第2回構成員会議

#### まとめと今後の展望

- ウィルソン型フェルミオンを用いて 3、4 フレーバー QCD の臨界終点を探索
- ・臨界終点の温度の連続極限は不定性が小さく、その値は各フレーバーで ほぼ等しい値となった
- ・臨界終点におけるπ中間子質量の連続極限は不定性が大きかった
- スタッガード型フェルミオンとウィルソン型フェルミオンの結果は、どのフレ ーバーにおいても大きな違いが見られた
  - → 少なくとも、この違いは rooting の有無では説明できない
- •より正確な連続極限のためにより細かい格子上での計算が必要
- ・ より大きなフレーバー数への拡張