

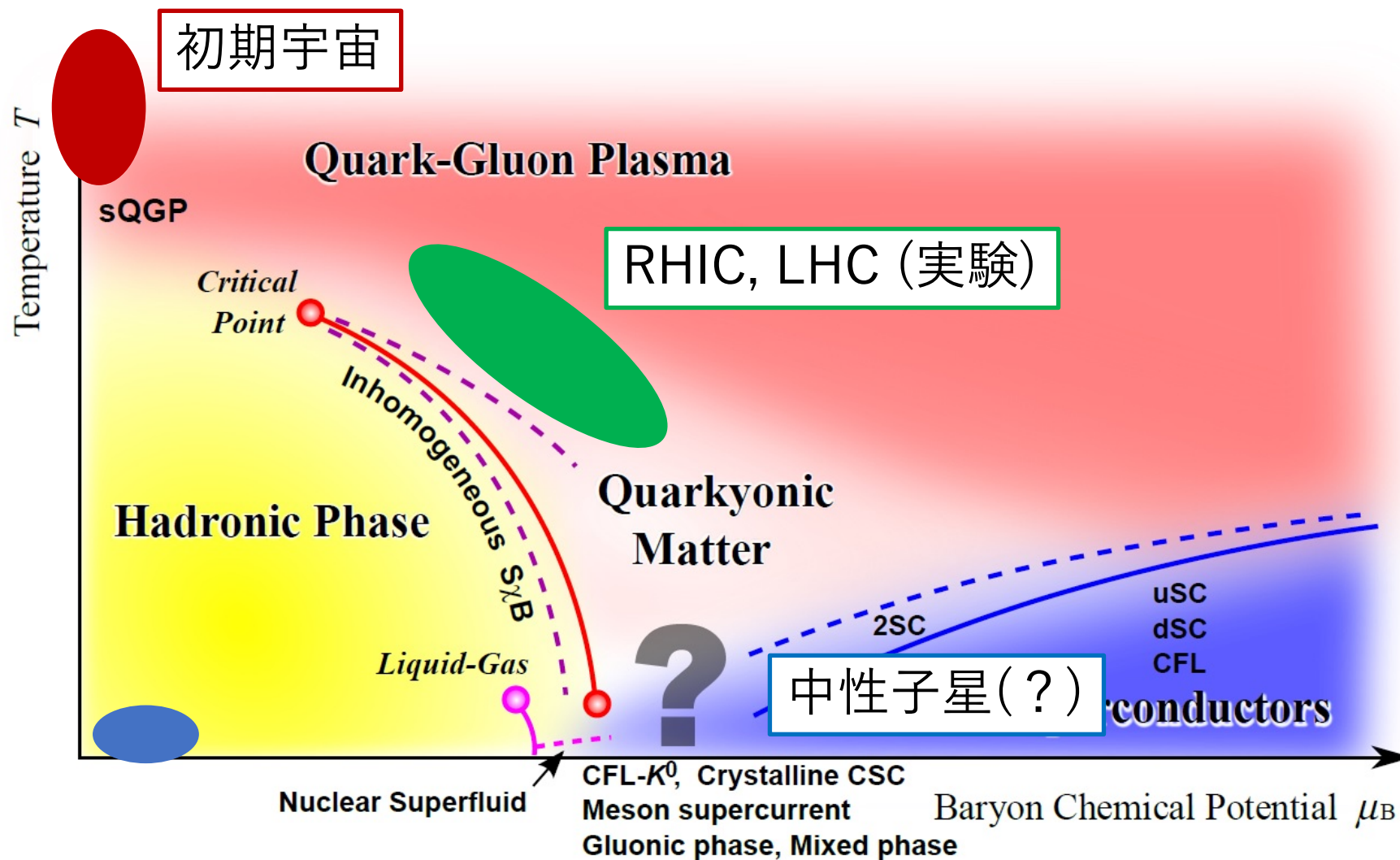
QCD Phase Transition with Chiral Quarks and Physical Quark Masses

HotQCD Collaboration

PRL 113, 082001 (2014) [arXiv: 1402.5175[het-lat]]

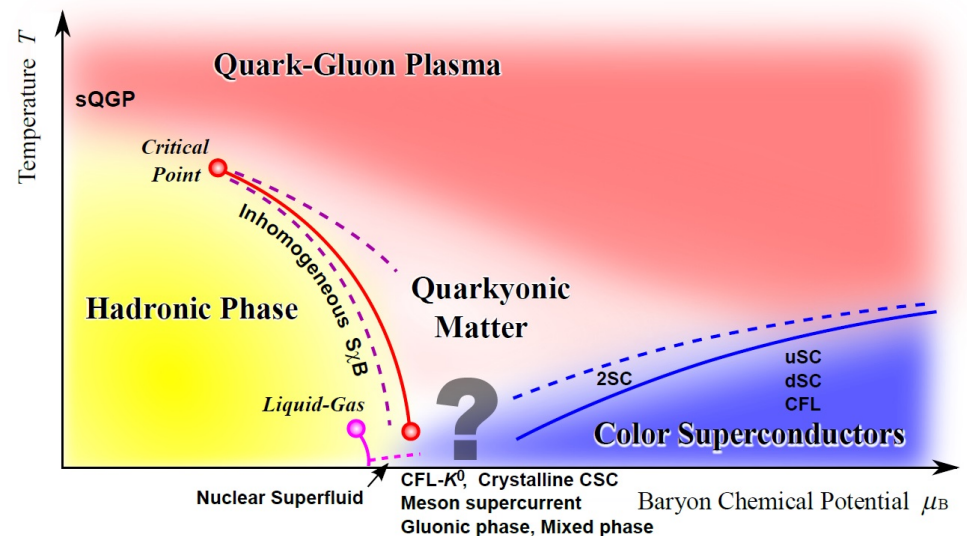
Journal club 2019/12/20 馬場

有限温度(・密度)QCD



有限温度QCD

- ・ 状態方程式
熱力学量（エネルギー、圧力、エントロピー等）
- ・ 相図探索
相転移温度、critical (end) point
- ・ QGP物性
輸送係数（viscosity, conductivity等）



相転移温度

高温：QGP相
低温：ハドロン相

閉じ込め-非閉じ込め相転移
=カイラル相転移？

Nf-flavor QCDの持つ対称性の破れ

$$\frac{SU(N_f)_R \times SU(N_f)_L \times U(1)_V \times \boxed{U(1)_A}}{\text{SSB}} \quad \text{anomaly}$$
$$SU(N_f)_V$$

高温でこれらが回復することで、相転移が起こる
転移温度 T_c の探し方？

相転移温度

Order parameter

$$\sigma_f = \frac{T}{V} \frac{\partial \ln Z}{\partial m_f} = \langle \bar{\psi}_f \psi_f \rangle$$

Susceptibility

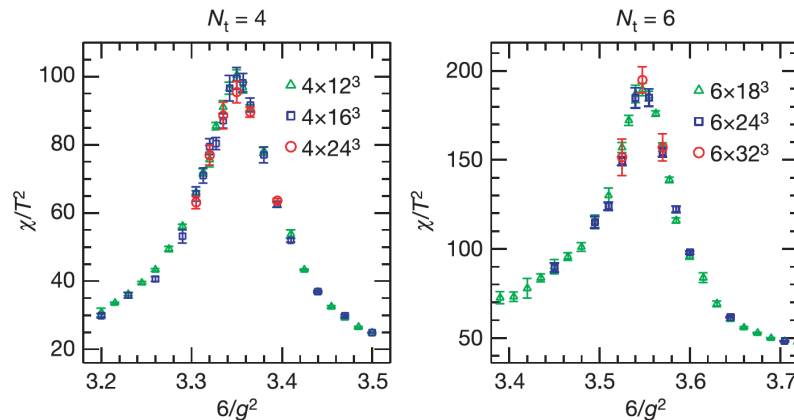
$$\chi_f = \frac{T}{V} \frac{\partial^2 \ln Z}{\partial m_f^2} = \langle (\bar{\psi}_f \psi_f)^2 \rangle - \langle \bar{\psi}_f \psi_f \rangle^2$$

Susceptibilityのピークから相転移温度を推定する

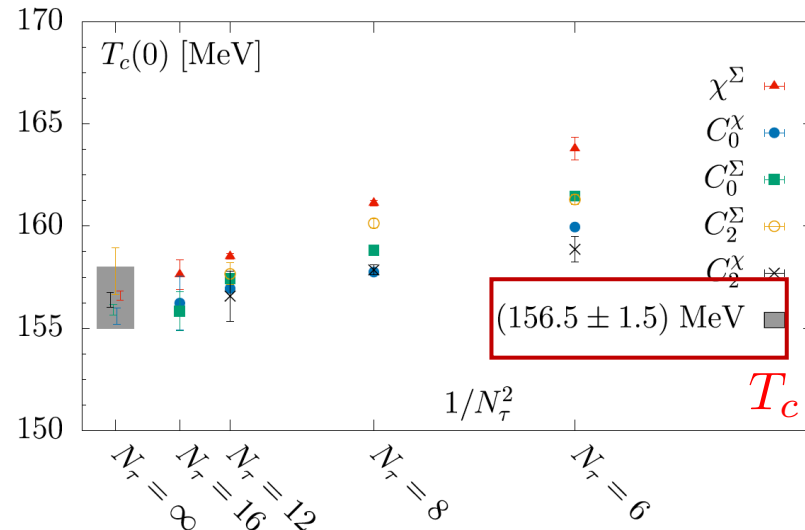
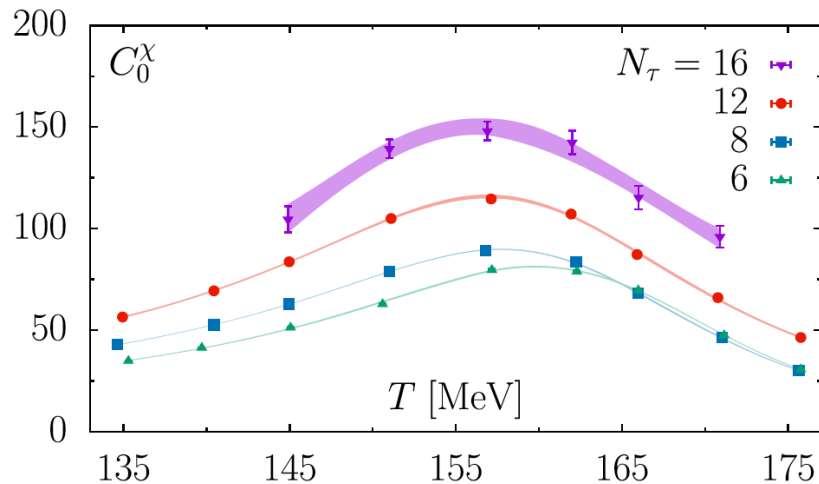
相転移温度

Y. Aoki, G. Endödi, Z. Fodor, S. D. Katz and K. K. Szabo
Nature volume 443, pages 675–678 (2006)

Staggered



相転移がcrossover



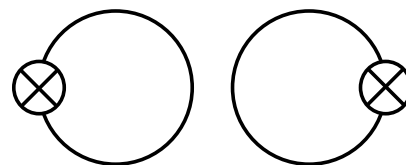
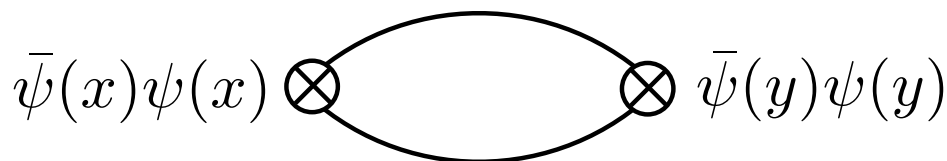
HotQCD Collaboration
Phys. Lett. B 795, 15 (2019) HISQ

Chiral susceptibility

但し、

$$\chi_f = \underbrace{\langle (\bar{\psi}_f \psi_f)^2 \rangle}_{\text{conn}} - \langle \bar{\psi}_f \psi_f \rangle^2$$

$$\langle (\bar{\psi}_f \psi_f)^2 \rangle_{\text{conn}} + \langle (\bar{\psi}_f \psi_f)^2 \rangle_{\text{disc}}$$



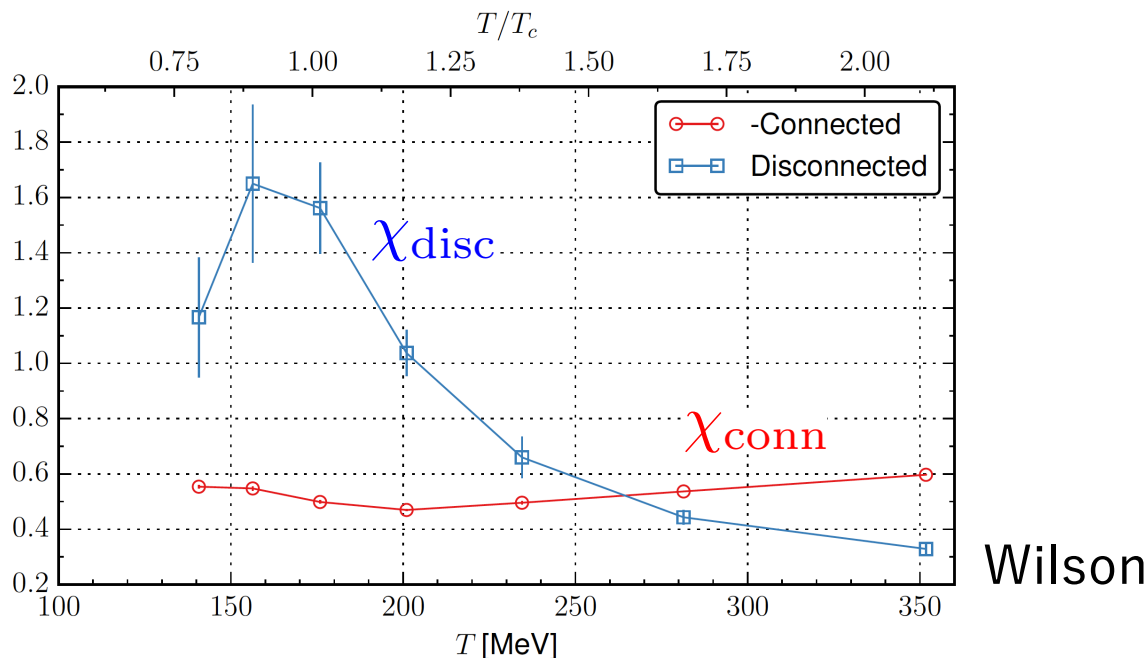
Connected partを分離

$$\begin{cases} \chi_f^{\text{disc}} = \langle (\bar{\psi}_f \psi_f)^2 \rangle_{\text{disc}} - \langle \bar{\psi}_f \psi_f \rangle^2 \rightarrow \text{これが使われている} \\ \chi_f^{\text{conn}} = \langle (\bar{\psi}_f \psi_f)^2 \rangle_{\text{conn}} \end{cases}$$

えっ、いいの？

Chiral susceptibility

Connected partは温度に対して応答が悪い



G. Aarts C. Allton, A Amato, P. Giudice, S. Hands and J-I. Skullerud
JHEP 1502, 186 (2015)

Connected partは $U(1)_A$ の情報を引きずってる

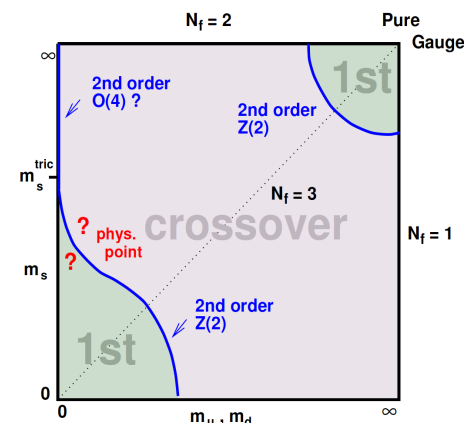
S. Aoki, H. Fukaya and Y. Taniguchi, PRD 86, 114512 (2012) ?

$U(1)_A$ の回復

確かに、 $SU(N_f)_R \times SU(N_f)_L$ と $U(1)_A$ の回復が同時に起こる必然性はない

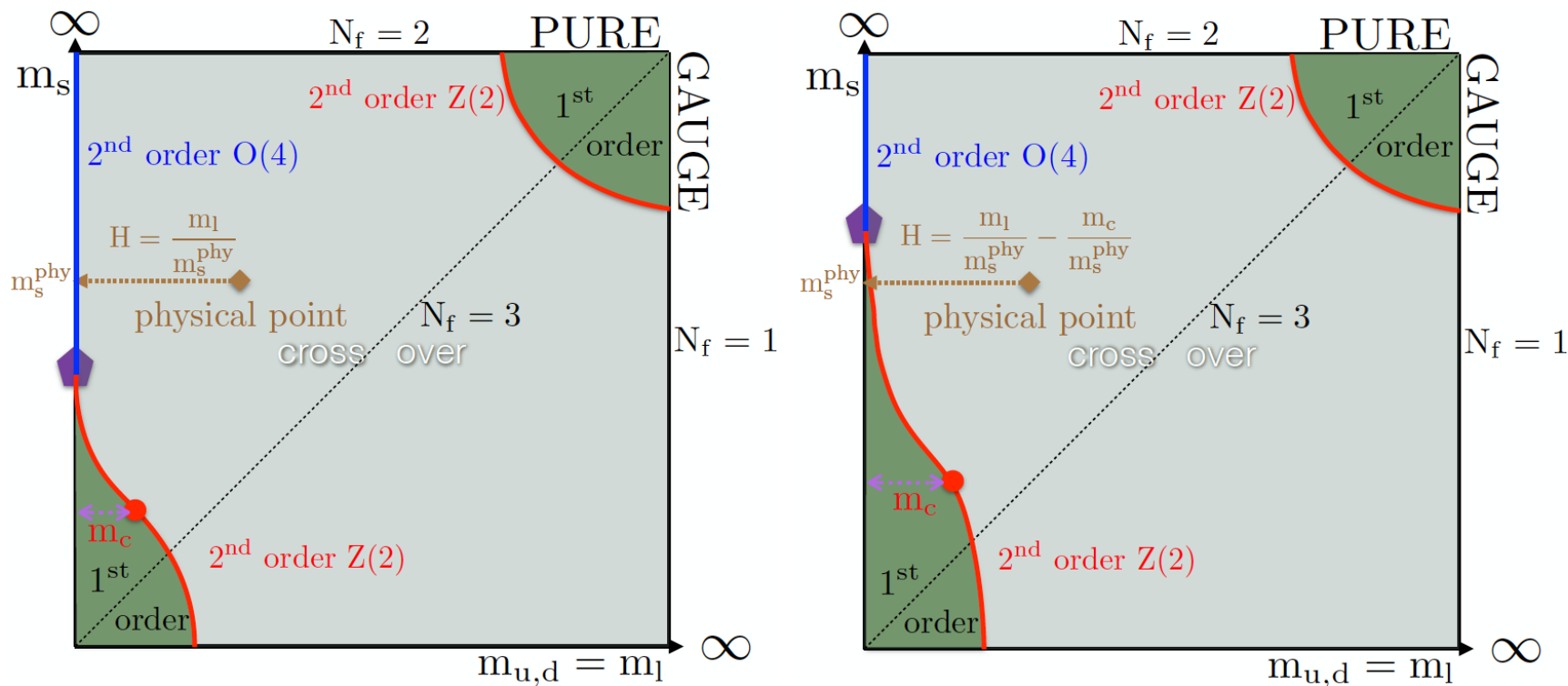
- Dirac spectrum
- Susceptibility
- Meson screening mass

$m_{ud} \rightarrow 0 ?$



Physical point

Colombia plot

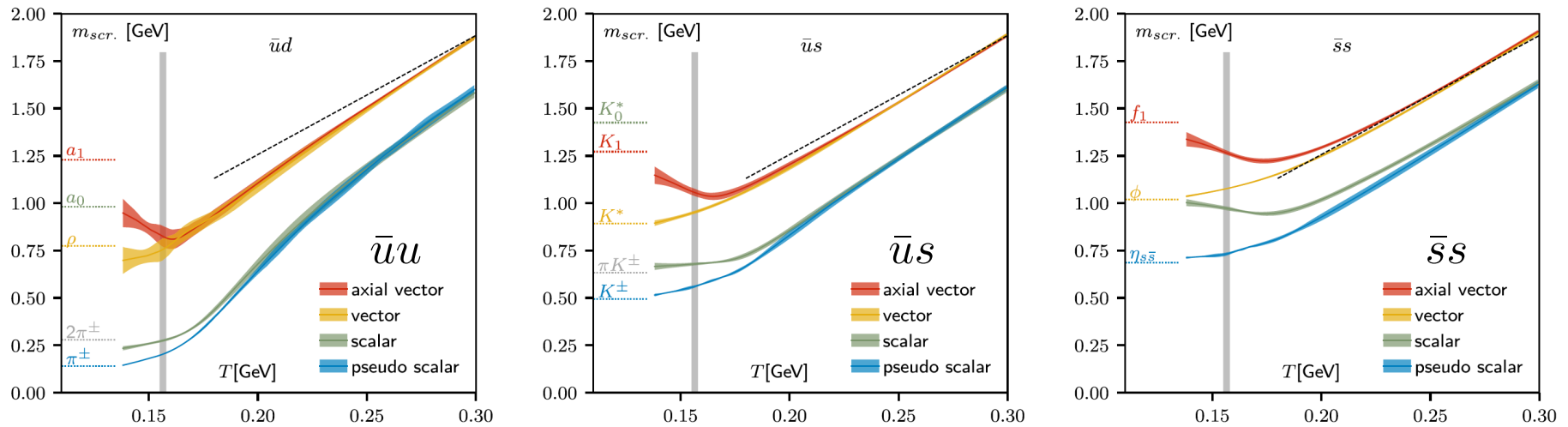


$m_{ud} = 0$ での $U(1)_A$ の振る舞いで
universality classの判別をする

Meson screening mass

HotQCD Collaboration, PRD 100, 094510 (2019)

HISQ



$U(1)_A$ で移り合う mode の mass spectrum

Scalar $\leftrightarrow$ Pseudo-Scalar

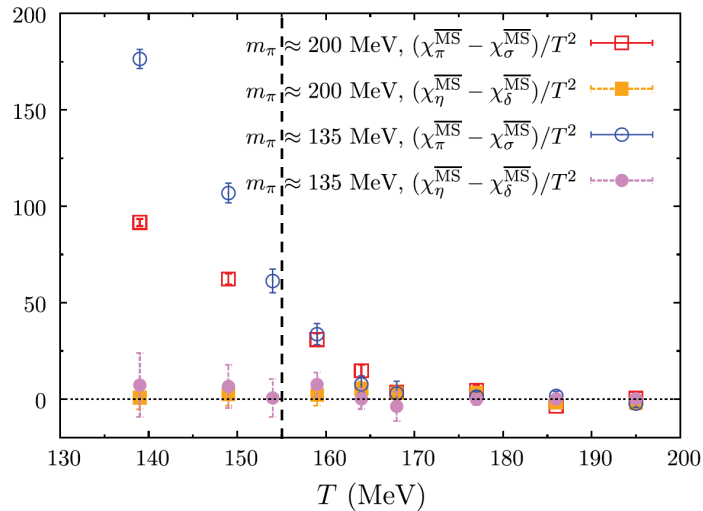
Vector $\leftrightarrow$ Axial-Vector

が一致するところ = $U(1)_A$ restoration

Susceptibility

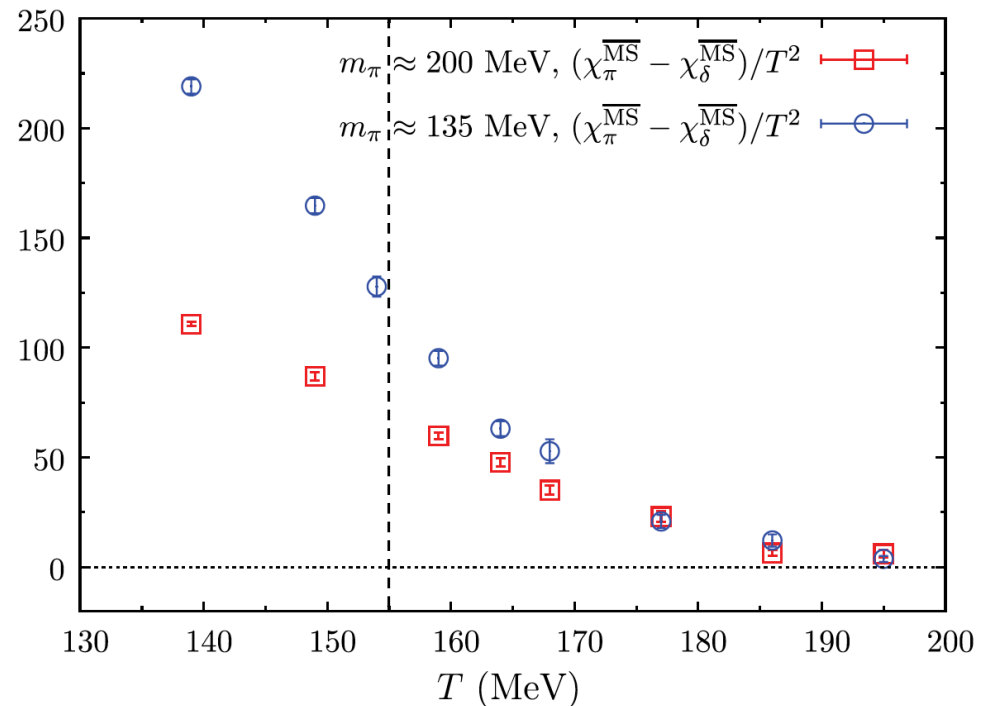
HotQCD Collaboration, PRL 113, 082001 (2014)

Möbius DWF



$U(1)_A$ の回復

$SU(N_f)_R \times SU(N_f)_L$ の回復



まとめ

- 有限温度での $U(1)_A$ の回復について解析を行った論文を見た。
- それぞれの解析において、 $T \sim 1.3T_c$ 以上で $U(1)_A$ の回復の兆候が見えた。
- ただし、Dirac spectrumから計算している人たち(ex: JLQCD)は $T \sim T_c$ 近傍で $U(1)_A$ が回復していると主張している。
- かなり混沌とした状況であるらしい。