

PQM模型における 0および 虚数化学ポテンシャルにおける相転移

森田健司 (京大基研)

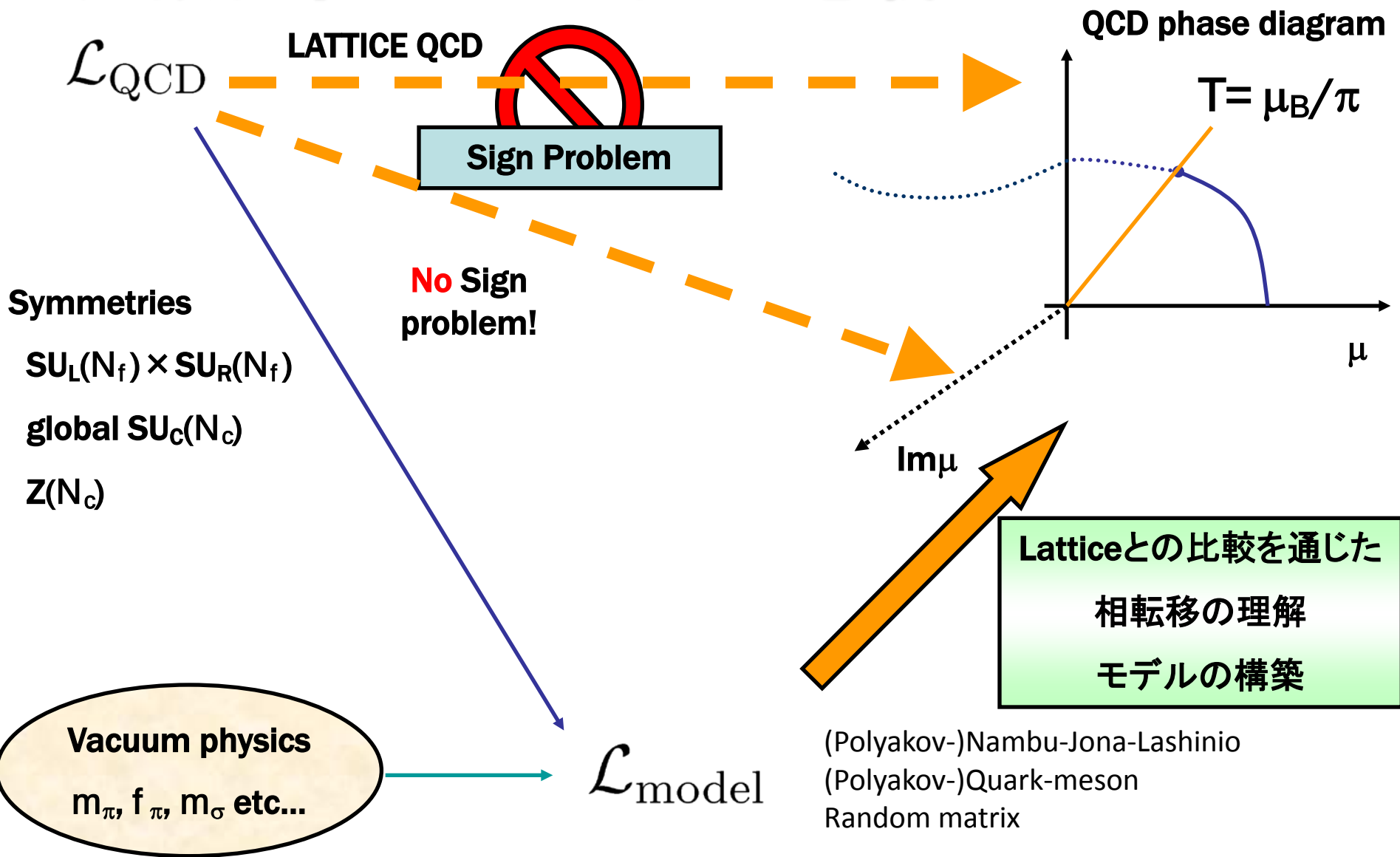
共同研究者

V. Skokov (GSI), B. Friman (GSI), K. Redlich (Wroclaw)

References : 1107.2273, 1108.0735

1. 虚数化学ポテンシャル
2. カイラルモデルにおける相構造
3. 平均場近似と汎関数繰り込み群によるゆらぎの効果

虚数化学ポテンシャルの意義



PQM模型

(Schäfer-Pawlowski-Wambach '07)

■ Quark-meson模型

● QCDの低エネルギー有効模型

➤ カイラル対称性: O(4)線形σ模型

➤ Global SU_c(3)

$$\frac{\lambda}{4}(\sigma^2 + \vec{\pi}^2 - v^2)^2 - h\sigma$$


$$\mathcal{L}_{\text{QM}} = \bar{q}[i \not{\partial} - g(\sigma + i\gamma_5 \vec{\tau} \cdot \vec{\pi})]q + \frac{1}{2}(\partial_\mu \sigma)^2 + \frac{1}{2}(\partial_\mu \vec{\pi})^2 - U(\sigma, \vec{\pi})$$

➤ ...No confinement

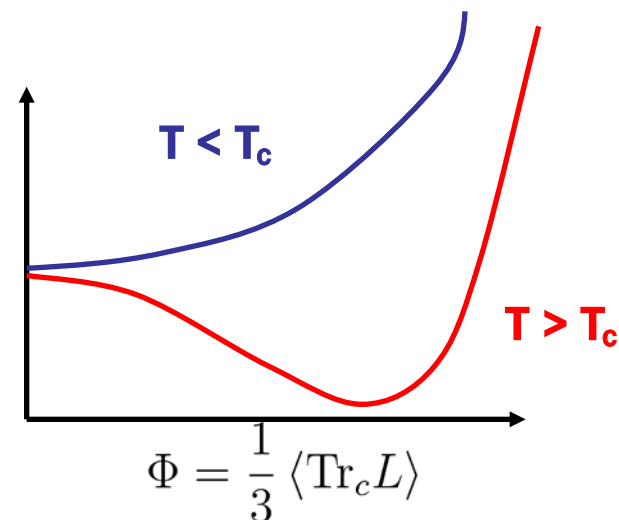
■ Polyakov-loop-extended version $\not{\partial} \rightarrow \not{D}$

$$\mathcal{L}_{\text{PQM}} = \mathcal{L}_{\text{QM}} + \bar{q}\gamma_0 A_0 q + \mathcal{U}(\Phi, \Phi^*; T)$$

● Z(3)有効ポテンシャルでゲージ部分

● “Statistical confinement”

➤ $\Phi \sim 0$ では3 quarkでのみ寄与

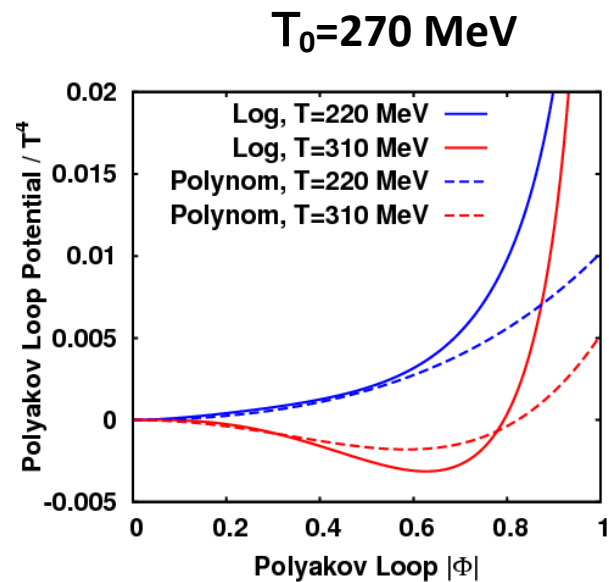


Polyakov Loop Potential

■ “Polynomial” (Ratti et al., '06)

$$\frac{\mathcal{U}_{\text{poly}}}{T^4} = -\frac{b_2(T)}{2}\Phi^*\Phi - \frac{b_3}{6}(\Phi^3 + (\Phi^*)^3) + \frac{b_4}{4}(\Phi^*\Phi)^2$$

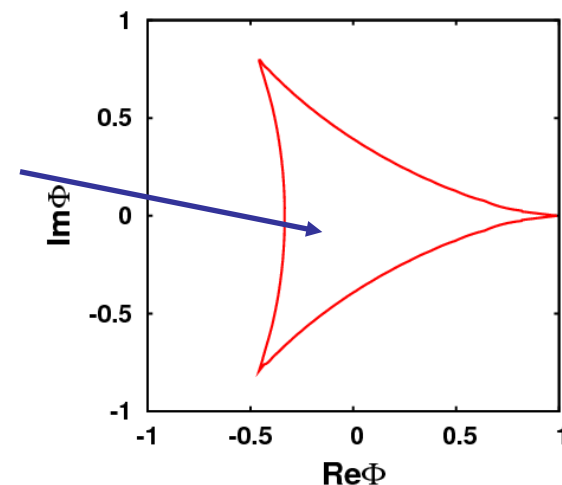
$$b_2(T) = a_0 + a_1 \frac{T_0}{T} + a_2 \left(\frac{T_0}{T}\right)^2 + a_3 \left(\frac{T_0}{T}\right)^3$$



■ “Logarithmic” (Ratti et al., '07)

$$\frac{\mathcal{U}_{\text{log}}}{T^4} = -\frac{a(T)}{2}\Phi^*\Phi + b(T) \times \log[1 - 6\Phi^*\Phi + 4(\Phi^3 + (\Phi^*)^3) - 3(\Phi^*\Phi)^2]$$

$$a(T) = a_0 + a_1 \frac{T_0}{T} + a_2 \left(\frac{T_0}{T}\right)^2, \quad b(T) = b_3 \frac{T_0}{T}.$$



■ Real μ での結果の違いは小さい

モデルにおける相構造の理解

■ 解析手順

熱力学ポテンシャル

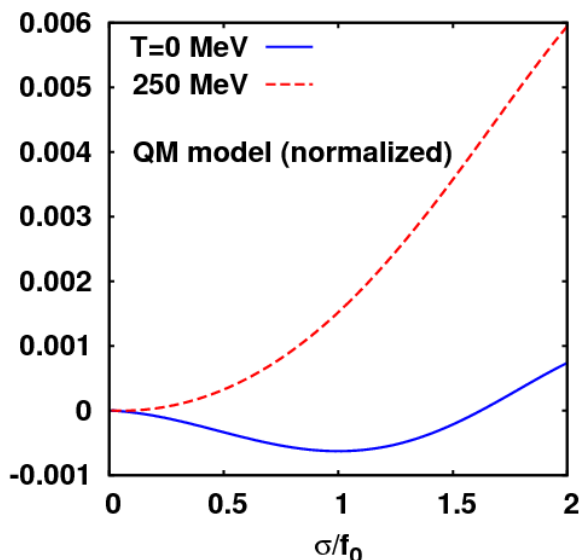
$$\Omega = \Omega(X_i; T, \mu)$$

(有効)秩序変数

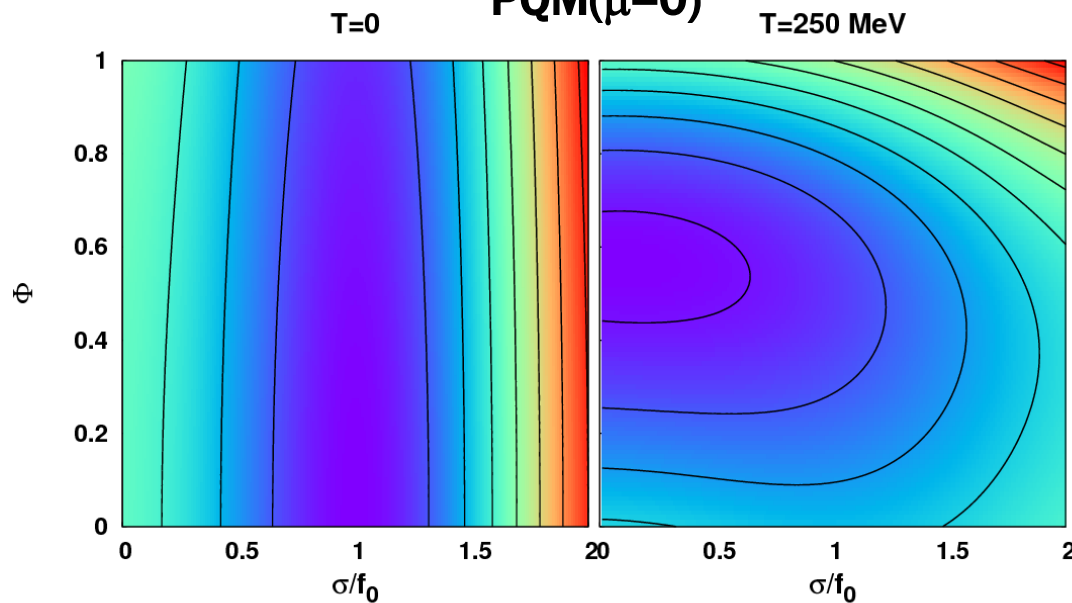
$$X_i = \langle \bar{q}q \rangle, \Phi, \Phi^*$$

運動方程式 (ギャップ方程式) $\frac{\partial \Omega(\{X_i\}; T, \mu)}{\partial X_i} = 0$
→ポテンシャルの極小値のサーチ

QM($\mu=0$)



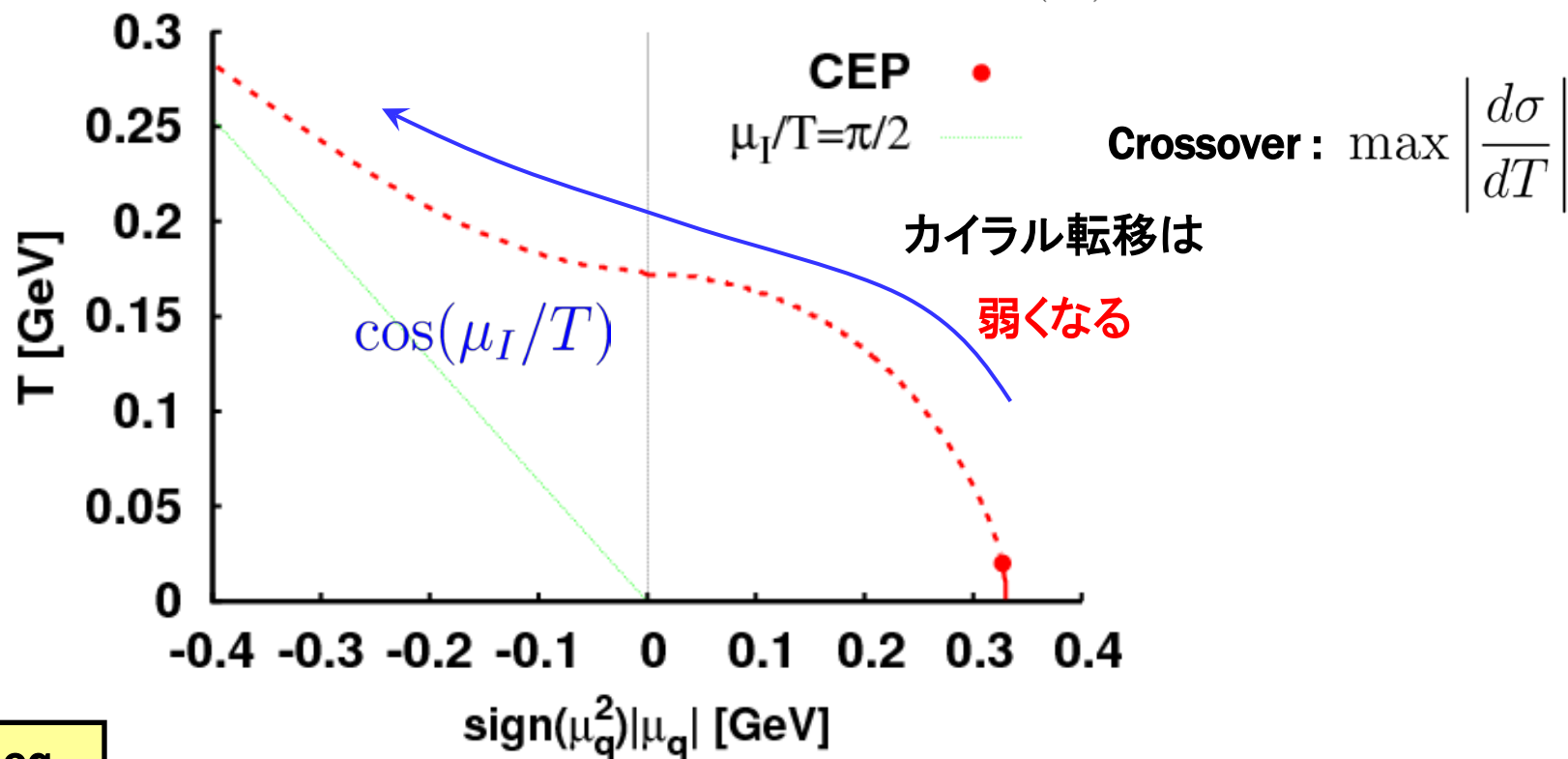
PQM($\mu=0$)



モデルにおける相構造の理解 (平均場)

■ カイラル転移 (QM/NJL)

$$\Omega = U_\sigma + \Omega_{\text{vac}} - 6N_f T \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} \ln[1 + e^{-\beta(E_p - \mu)}] + (\mu \rightarrow -\mu)$$



Gap eq.

$$0 = \frac{\partial U_\sigma}{\partial \sigma} + \frac{\partial \Omega_{\text{vac}}}{\partial \sigma} - * \cosh(\mu/T) K_1(g\sigma/T)$$

モデルにおける相構造の理解 (平均場)

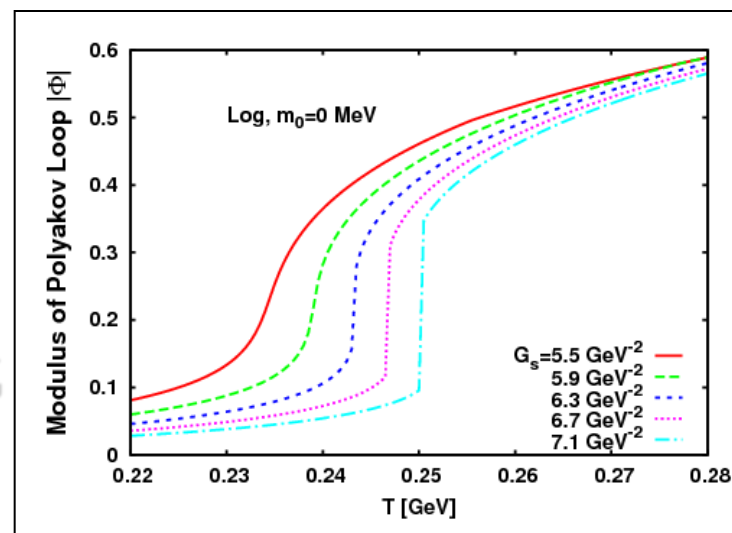
閉じ込め転移 (PQM/PNJL)

- Pure gauge (重いクォーク質量極限) : $\mathcal{U}(\Phi, \Phi^*; T)$

$$\Phi = \frac{1}{N_c} \langle \text{Tr}_c L(\vec{x}) \rangle, \quad \Phi^* = \frac{1}{N_c} \langle \text{Tr}_c L^\dagger(\vec{x}) \rangle$$

- PNJL : large $G_s \rightarrow$ large M

- 1次相転移 $\rightarrow$ クォーク質量が減少
すると2次(CEP) $\rightarrow$ クロスオーバーと変化



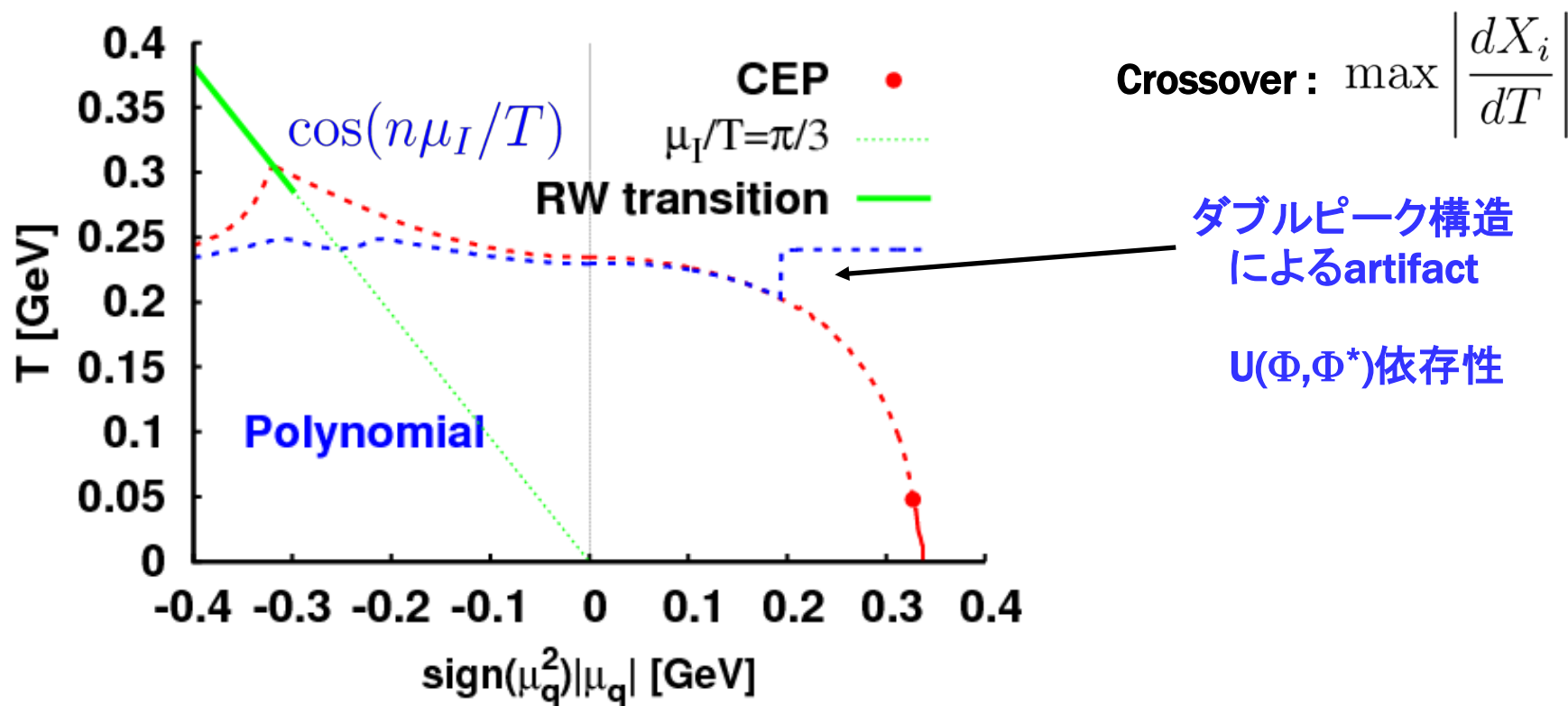
- $\mu \neq 0$ では Polyakov loop の自由度は 2

➤ μ 実数 : $\Phi \neq \Phi^* \in \text{Reals}$

➤ μ 虚数 : $\Phi = |\Phi|e^{i\phi}, \quad \Phi^* = |\Phi|e^{-i\phi}$

モデルにおける相構造の理解 (平均場)

■ カイラル/閉じ込め転移 (PQM/PNJL)

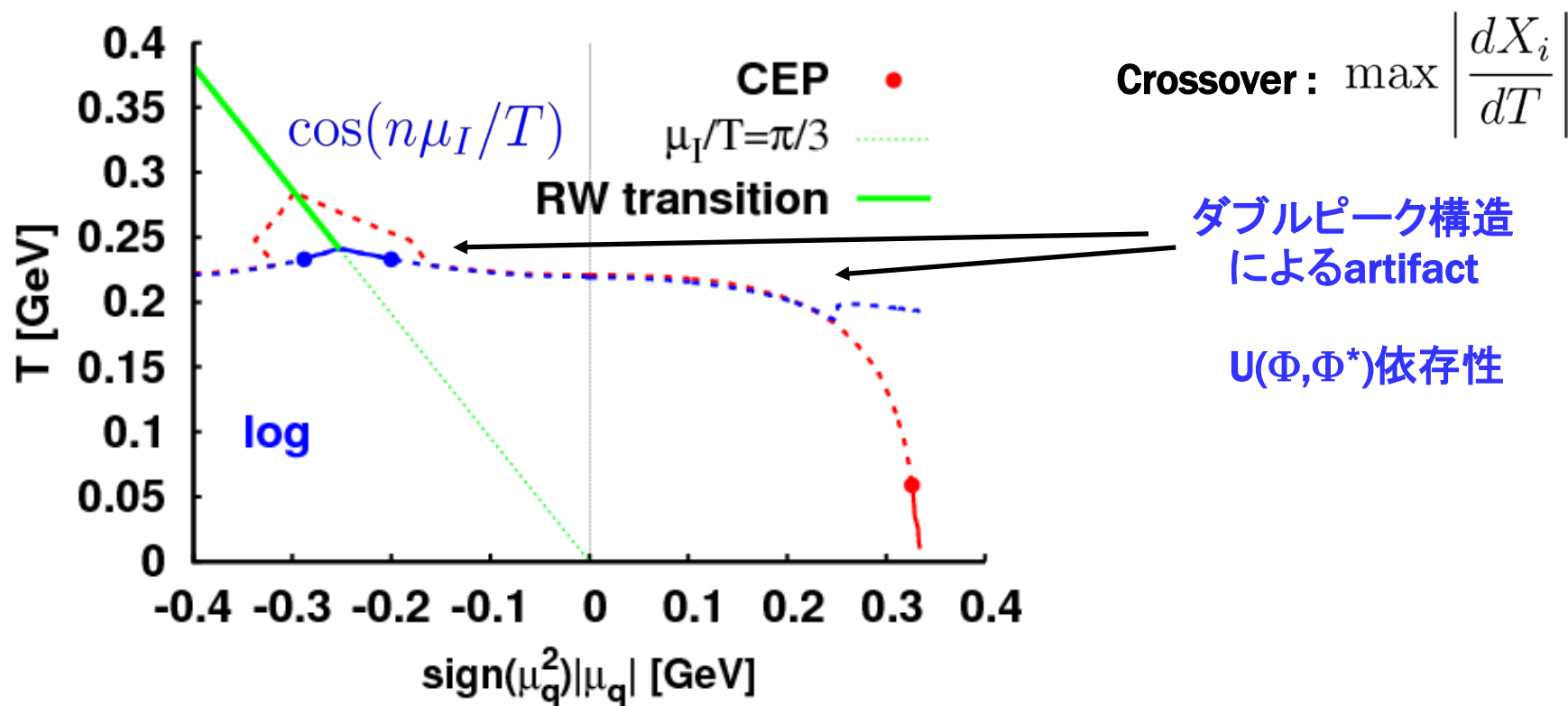


Gap eq. for σ

$$0 = \frac{\partial U_\sigma}{\partial \sigma} + \frac{\partial \Omega_{\text{vac}}}{\partial \sigma} - \sum_{n=1}^3 L_n(\Phi, \Phi^*) \cosh(n\mu/T) K_1(g\sigma n/T)$$

モデルにおける相構造の理解 (平均場)

■ カイラル/閉じ込め転移 (PQM/PNJL)



Gap eq. for σ

$$0 = \frac{\partial U_\sigma}{\partial \sigma} + \frac{\partial \Omega_{\text{vac}}}{\partial \sigma} - \sum_{n=1}^3 L_n(\Phi, \Phi^*) \cosh(n\mu/T) K_1(g\sigma n/T)$$

揺らぎの効果

■ Lattice(fully quantum theory)との比較？

■ Tool – 汎関数くりこみ群 (FRG)

→ Talks by Nakano, Skokov (8/24)

■ FRG+ PQM Skokov et al., PRC82,015206 ('10)

$$\Omega(\Phi, \Phi^*; T, \mu) = \Omega_{k \rightarrow 0}(\Phi, \Phi^*; T, \mu) + \mathcal{U}_{\text{pol}}(\Phi, \Phi^*; T).$$

↑
Flow 方程式 (LPA) を解く

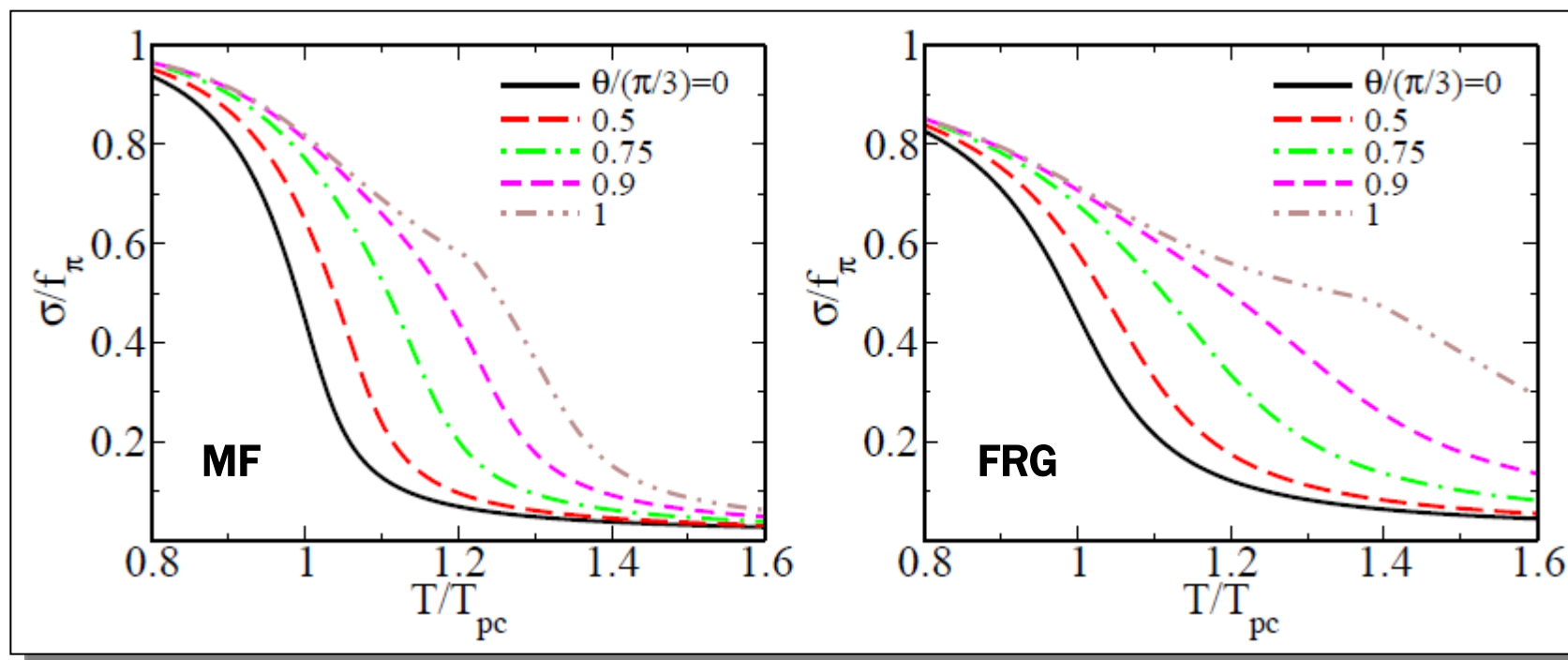
↑
平均場的な扱い

$$\begin{aligned} \partial_k \Omega_k(\Phi, \Phi^*; T, \mu) = & \frac{k^4}{12\pi^2} \left\{ \frac{3}{E_\pi} \left[1 + 2n_B(E_\pi; T) \right] + \frac{1}{E_\sigma} \left[1 + 2n_B(E_\sigma; T) \right] \right. \\ & \left. - \frac{4N_c N_f}{E_q} \left[1 - N(\Phi, \Phi^*; T, \mu) - \bar{N}(\Phi, \Phi^*; T, \mu) \right] \right\} \end{aligned}$$

Meson part
quark part

カイラル秩序変数

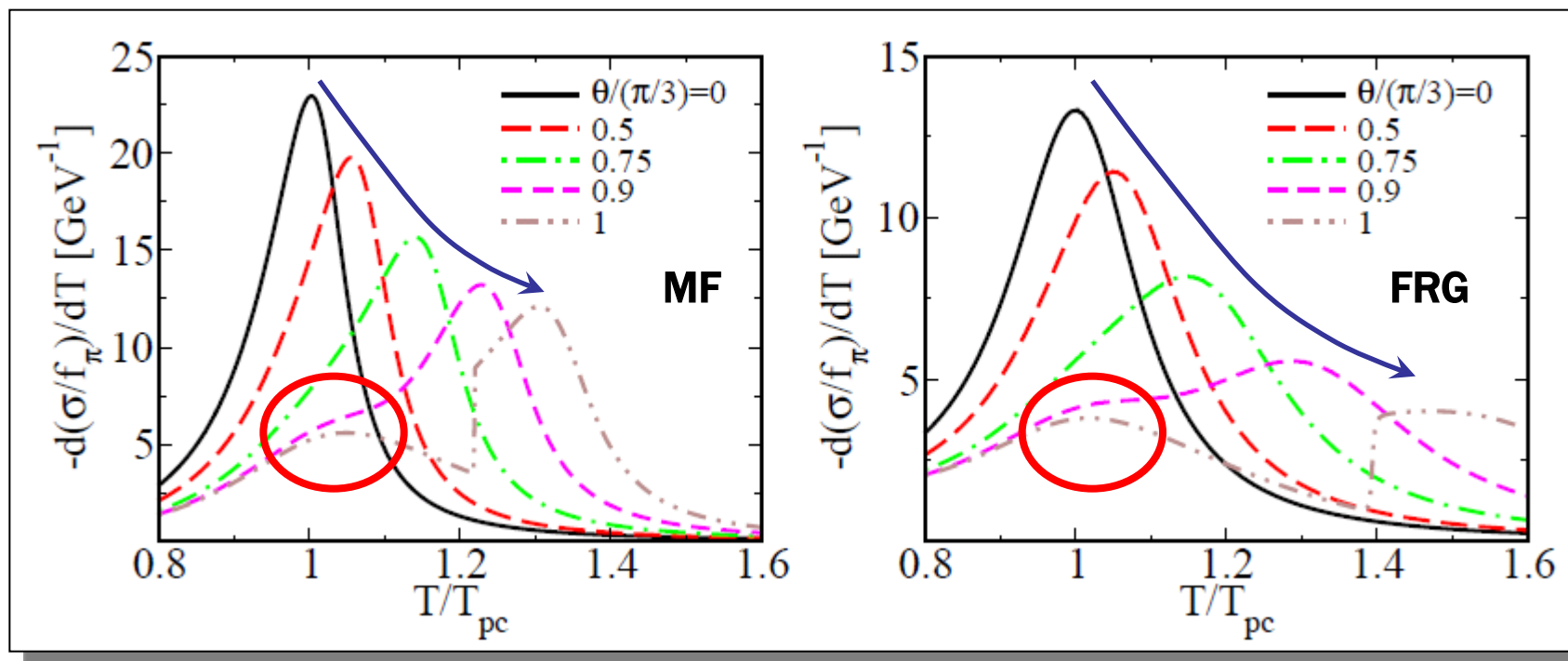
$$\theta = \mu_l / T$$



■ よりゆるやかに変化

■ $T_{pc} = 234 \text{ MeV}$

カイラル転移

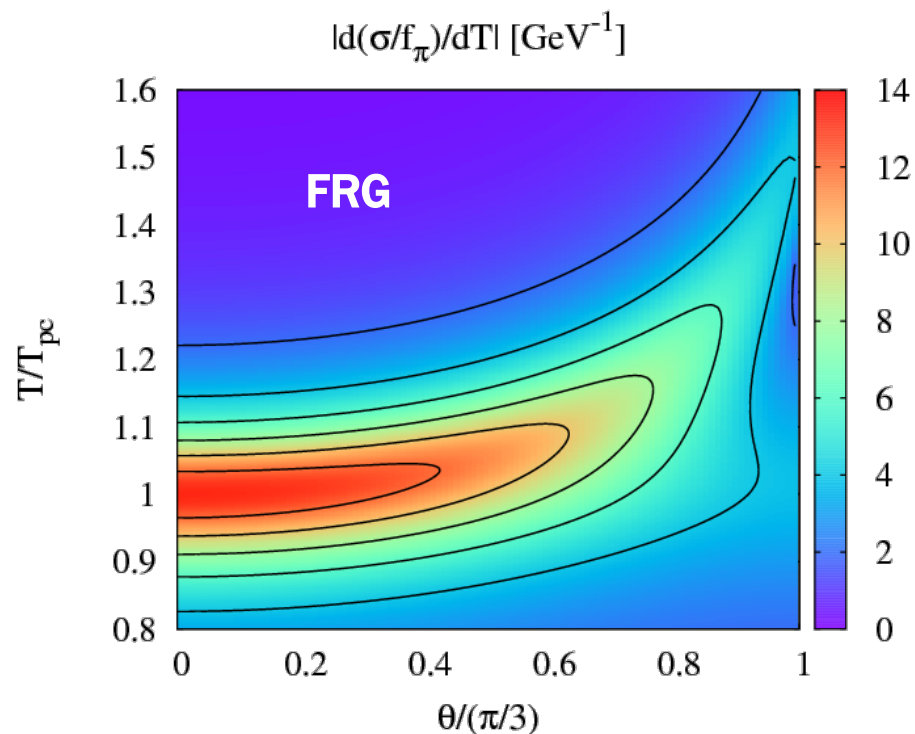
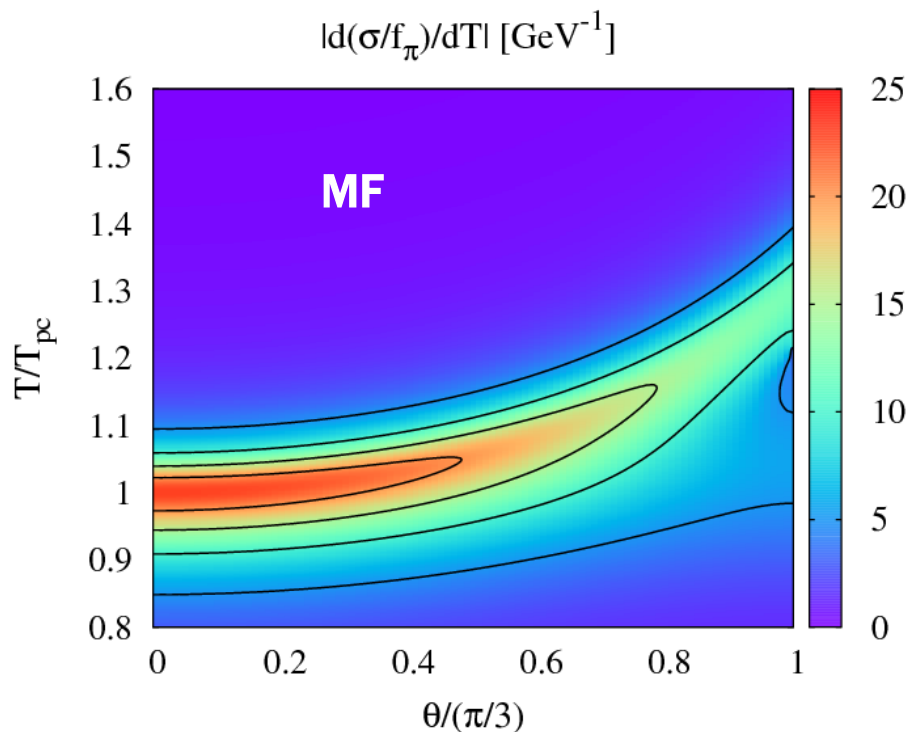


■ 緩やかな変化→ピークの高さはほぼ半分

■ Larger T_{pc} as $\theta \uparrow$

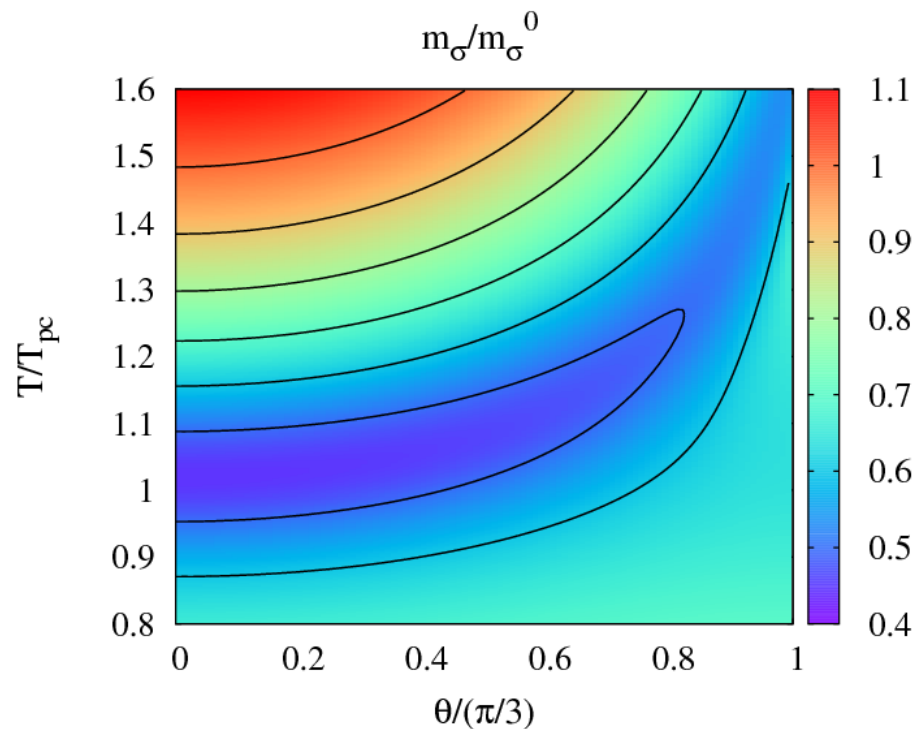
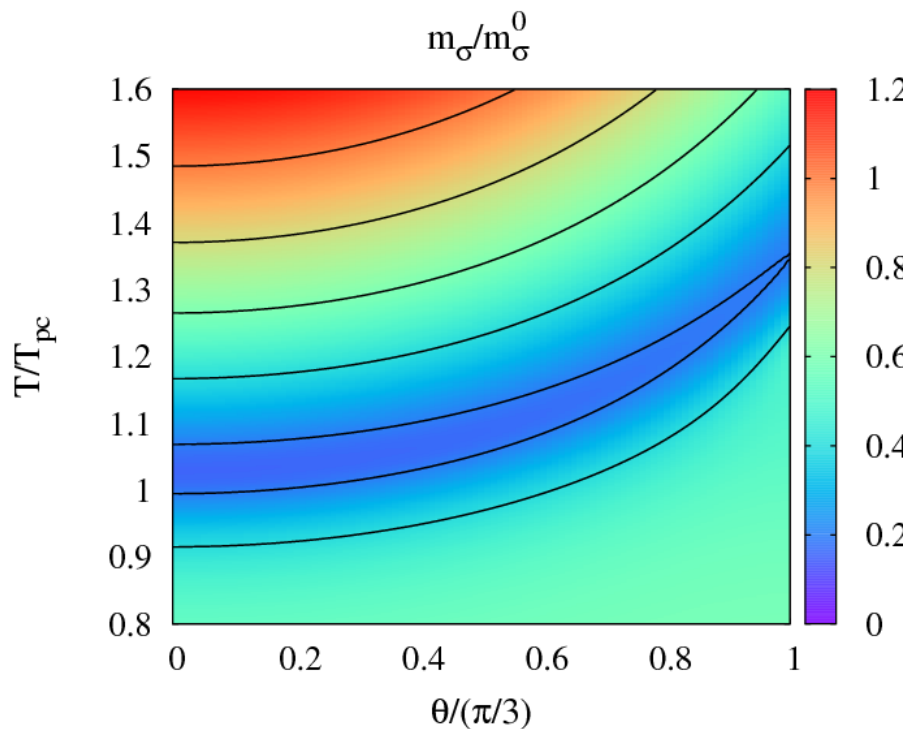
■ Polyakov loopの影響

カイラル転移



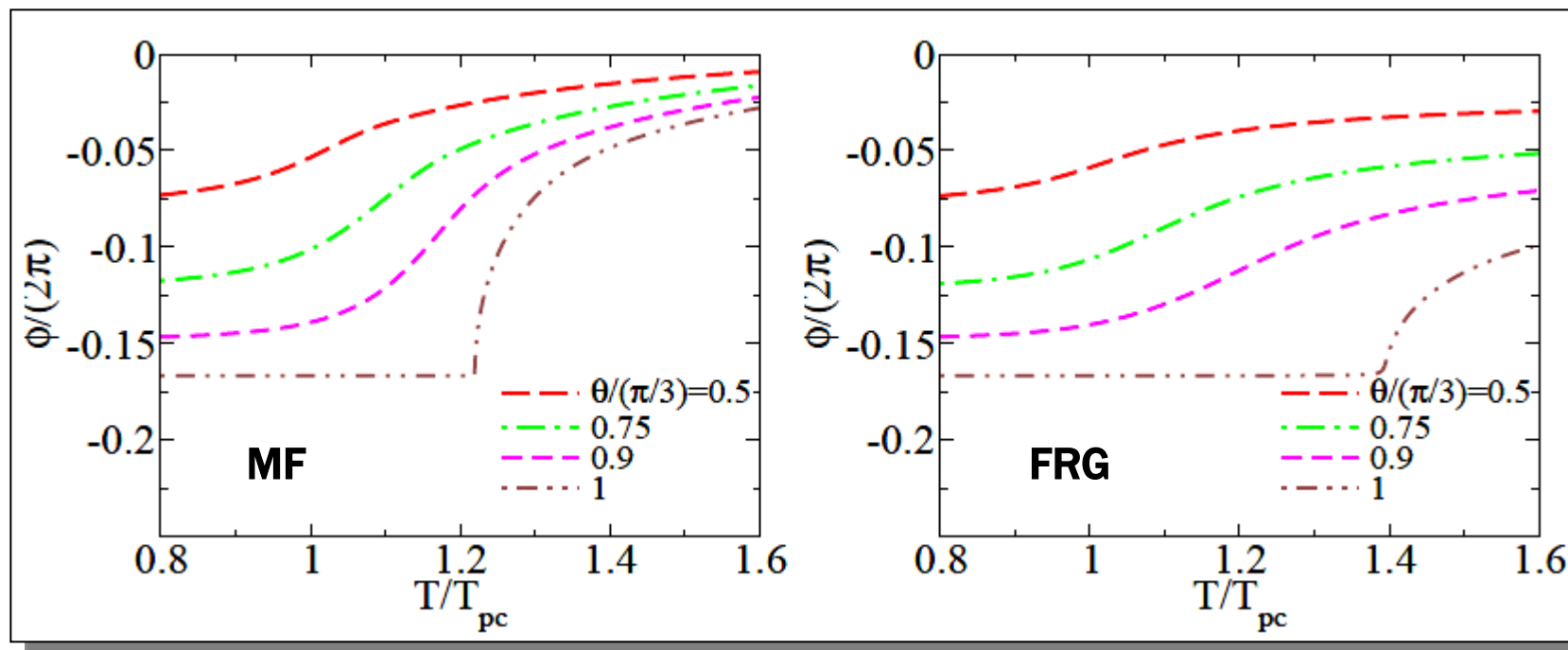
Critical lineの変化

カイラル転移 (m_σ)



■ Critical lineの変化

RW endpoint

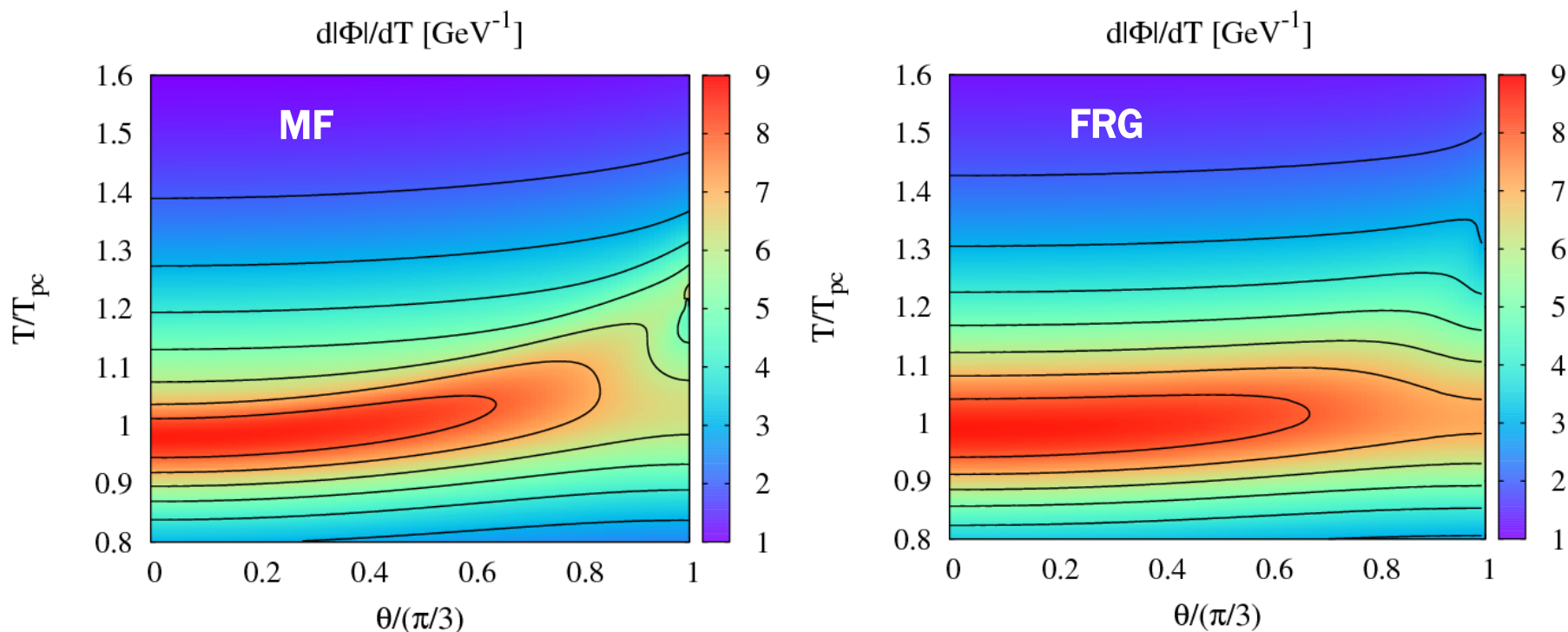


■ T_{RW} : 大きくなる

● 解釈: σ が滑らか $\rightarrow M_q$ がなかなか減らない

● Z(3)転移: 1 quark項が支配的なときに 1 次(RW転移)

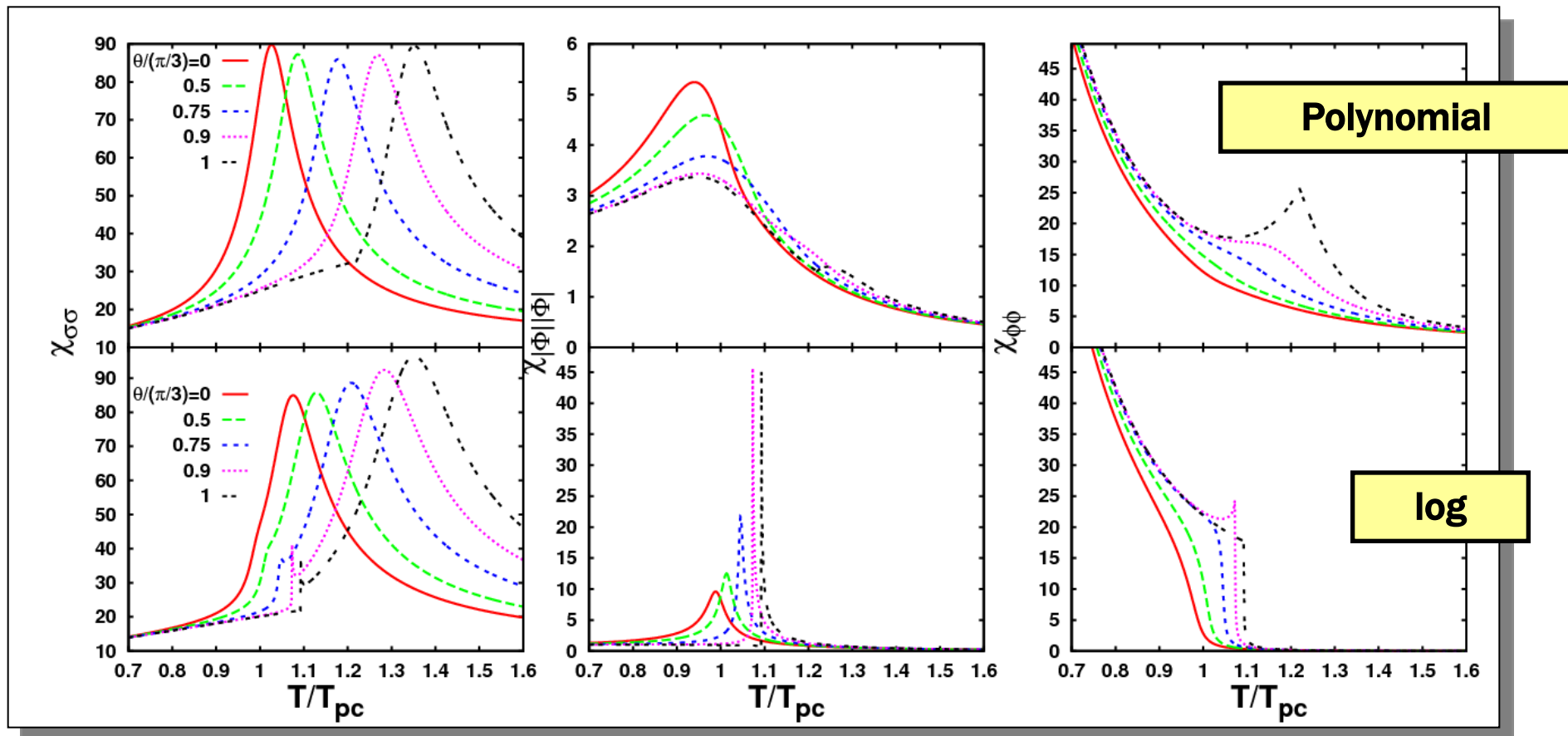
閉じ込め—非閉じ込め転移



■ ダブルピーク構造の消失

■ Polynomial では ϕ と $|\Phi|$ の転移が分岐する

Susceptibilities (平均場)



まとめと議論

■ PQM 模型での虚数化学ポテンシャル相図

- カイラル有効模型での一般的構造

■ FRGによるゆらぎの効果

- σ の変化がゆるやかに $\rightarrow$ 臨界線の曲率に変化
- 閉じ込め, $z(3)$ とともに臨界線に変化
- クロスオーバー : susceptibility を使う必要性

■ 議論

- Logarithmic potential では影響は小さい
 - ✦ クロスオーバーが重なったとき、「強い」方が支配的
- RW endpoint vs quark mass
- Entanglement in PQM? ($\rightarrow$ talks by Sakai, Sasaki)