

核多体系物理学

担当:大西 明、八田佳孝 (基礎物理学研究所)

- 授業の概要・目的:核子・ハドロン・クォークからなる多体系の性質を量子色力学(QCD)、状態方程式、および核反応論の観点から議論する。強い相互作用の基本理論であるQCDの基本的性質、核物質の状態方程式を記述するために必要となる核多体理論(平均場理論、G-matrix、熱場の理論、強結合格子QCD)、ハイパー核生成反応や重イオン反応を理解する上で必要とされる原子核核反応理論(直接反応、輸送模型等)、等の理論の枠組について解説すると共に、これらについての最近の研究成果についても紹介する。
- 授業計画と内容:量子色力学、および核子・ハドロン・クォーク物質の相互作用と状態方程式について以下の内容で講義する。

1. 量子色力学(QCD)の基本的性質
QCD作用と対称性、摂動論的QCD、発展方程式、カラーグラス描像

八田

2. 状態方程式とQCD相図を記述する理論模型

- ・ 核力と位相差、有効相互作用、核物質の状態方程式、平均場理論、
- ・ 有限温度での場の理論、南部-ヨナラシニヨ模型、強結合格子QCD

3. 原子核反応理論

- ・ 核子-核子散乱、ハドロン-原子核反応、
- ・ 流体力学、輸送理論、
- ・ ハイパー核・中間子核生成反応の概観と直接反応

大西

- 成績評価の方法・基準:履修状況及びレポートにより総合評価する。

参考書 *Quark Gluon Plasma, K.Yagi, T.Hatsuda, Y.Miake (CAMBRIDGE).*
格子上の場の理論、青木慎也(シュプリンガー・ジャパン)
クォーク・ハドロン物理学入門、国広悌二(サイエンス社)

状態方程式や QCD 相図を記述する理論模型

- 2.1 核物質の状態方程式概観 (10/20)
 - なぜ状態方程式か？中性子星パズル、対称エネルギー
 - 状態方程式を記述する理論模型
- 2.2 核力と位相差、有効相互作用 (10/27)
- 2.3 平均場理論：相対論的平均場 (RMF) 模型を中心に。(11/10)
- 2.4 カイラル相転移と南部 - ヨナラシニヨ (NJL) 模型 (11/17)
 - 有限温度・密度の場の理論入門
 - 経路積分表示、ユークリッド時空、松原和、自由場の分配関数
 - カイラル対称性、Nambu-Jona-Lasinio (NJL) 模型、カイラル相転移
- 2.5 格子上の場の理論入門 (→ 青木さんの講義)
 - 格子 QCD、Plaquette 作用、格子 Fermion、リンク積分、
 - 強結合格子 QCD、Area Law、強結合展開、ポリアコフ・ループ
- 2.6 高密度物質の QCD 有効模型 (12/1)
 - Bag 模型、Quark-Meson 模型、Polyakov loop extended Quark-Meson (PQM) 模型、Polyakov loop extended NJL (PNJL) 模型

*Effective Models of QCD
at High Density*

Effective Models of QCD

■ Effective model とは？

- 厳密には ...
注目する自由度以外を積分し、元の理論と同じ観測量を与える模型
- 緩やかな意味では ...
元の理論の対称性などを尊重し、着目する物理量・現象を説明する模型

■ Effective models of QCD

- Quark 模型：構成子クォークとクォーク間の相互作用により、ハドロンのスペクトル・静的な性質を説明
- Bag 模型：内側で摂動論的真空が実現していると考え、current quark によりハドロンのスペクトル・静的な性質を説明
- NJL 模型：クォーク間のカイラル対称な相互作用 \rightarrow χ SSB とその回復
- Quark-Meson 模型：クォークと中間子 \rightarrow χ SSB とその回復
- Polyakov loop extended Quark-Meson (PQM) 模型、Polyakov loop extended NJL (PNJL) 模型 \rightarrow NJL, QM 模型 + ポリアコフループ

Bag 模型

■ Bag model

- カイラル対称性が回復した摂動論的真空となった球の中をクォークが運動

$$M_N = \frac{3x}{R} + \frac{4\pi R^3}{3} B + \dots$$

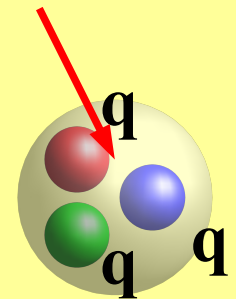
クォークの
運動エネルギー

摂動論的な
真空を作る
エネルギー

相互作用、
カシミア、
周りの中間子
の雲、...

- 球形の bag の中でクォークの Dirac eq. を解いた結果: $x = 2.04 \dots$
- B: カイラル対称性が破れることにより得られるエネルギー密度: $B \sim (220 \text{ MeV})^4$

カイラル対称性が破れていない摂動論的な真空



カイラル対称性が自発的に破れた真空

Chodos, Jaffe, Johnson, Thorn, Weisskopf ('74)

■ Bag model EOS

● 摂動論的真空

→ カイラル対称性が自発的に破れた真空(物理的真空)に比べて高いエネルギー密度

$$L = L_{\text{particle}} - B \rightarrow T^{\mu\nu} = T_{\text{particle}}^{\mu\nu} + g^{\mu\nu} B$$

(ダークエネルギー)

● 粒子からの圧力 (Stefan-Boltzmann 則)

$$-P = \Omega / V = -\frac{\pi^2}{90} T^4 \left(\sum_B g_B + \frac{7}{8} \sum_F g_F \right)$$

● クォーク・グルーオン・プラズマ: クォーク、グルーオンと摂動論的真空

$$P_{QGP} = \frac{37\pi^2}{90} T^4 - B, \quad \epsilon_{QGP} = \frac{37\pi^2}{30} T^4 + B$$

● ハドロン相: 軽い自由度 = 3種類の π 粒子 $P_H = \frac{3\pi^2}{90} T^4, \quad \epsilon_H = \frac{3\pi^2}{30} T^4$

Bag 模型 (cont.)

■ 相転移: 圧力の大きな相が全体を占める

● クォーク・グルーオン・プラズマ

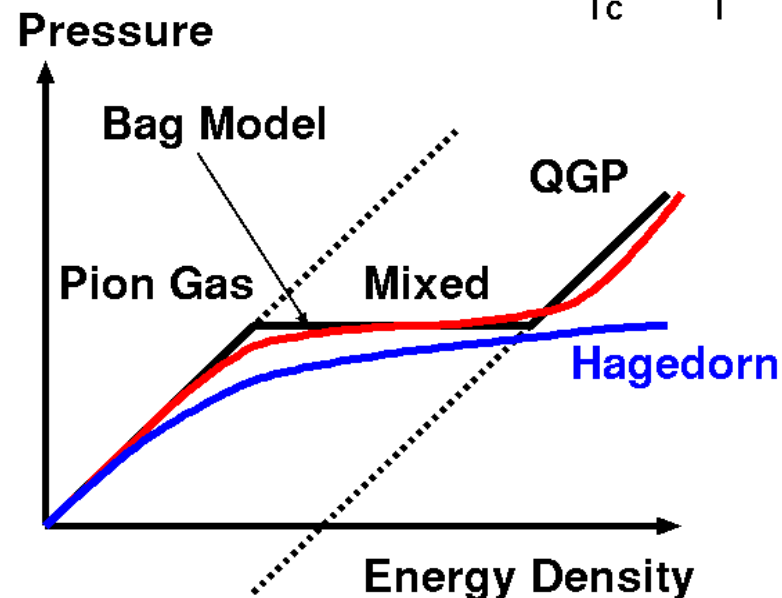
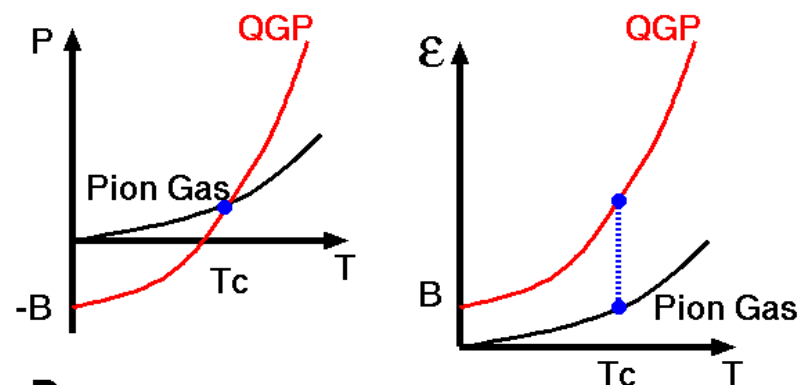
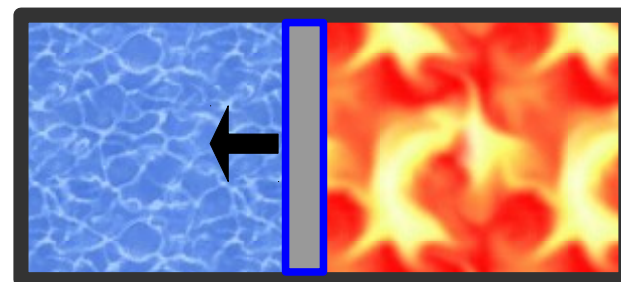
- ▶ 粒子が存在しなければ、摂動論的真空は物理的真空よりも不利 = 負の真空
- ▶ 温度が大きくなれば、大きな自由度のため、圧力は増える

$$\text{DOF} = 2(\text{spin}) \times 2(q, \bar{q}) \times 3(\text{color}) \\ \times 2(\text{flavor}) \times 7/8(\text{Fermion}) \\ + 2(\text{spin}) \times 8(\text{color})$$

● ハドロン相

- ▶ 物理的真空が圧力の基準 (粒子以外の圧力は0)
- ▶ 軽い粒子の自由度は小さい

→ 低温 = ハドロン相、高温 = QGP
 圧力が等しくなったとき相転移
 エネルギー密度は大きく変化



Polyakov loop extended NJL model (PNJL)

■ NJL model + Polyakov loop

K. Fukushima, PLB591('04)277;PRD77('08)114028.

$$\Omega_{\text{NJL}}/V = \frac{1}{2G}(M - m_q)^2 - 2N_c N_f \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} \left\{ E_p + T \ln [1 + e^{-(E_p - \mu)/T}] + T \ln [1 + e^{-(E_p + \mu)/T}] \right\}$$

化学ポテンシャル・グルーオンと Fermion の結合

$$\bar{q} \gamma^0 (igA_0 + \mu) q$$

→ gA_0 は化学ポテンシャルの虚部とみなせる！

$$\exp(\mu/T) \rightarrow \exp[(\mu + igA_0)/T] = e^{\mu/T} \exp\left[i \int_0^\beta g A_0 d\tau\right]$$

$$\Omega/V = V_{\text{glue}}[L] + \frac{1}{2G}(M - m_q)^2 - 2N_c N_f \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} \left\{ E_p + T \frac{1}{N_c} \text{Tr}_c \ln [1 + L e^{-(E_p - \mu)/T}] + T \frac{1}{N_c} \text{Tr}_c \ln [1 + L^\dagger e^{-(E_p + \mu)/T}] \right\}$$

■ 1クォーク、2クォークの励起

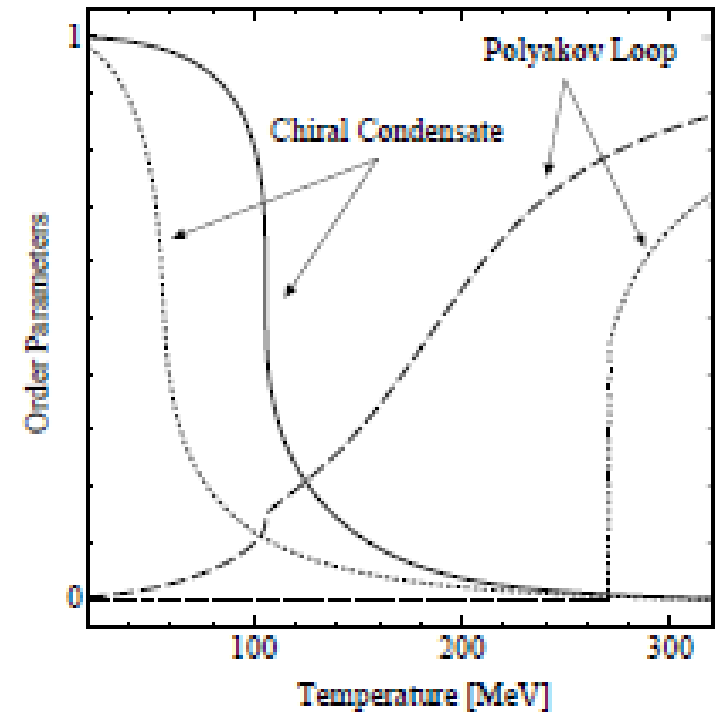
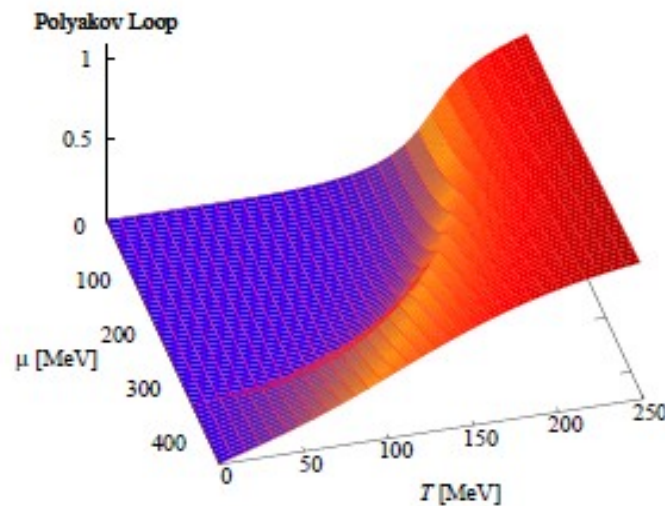
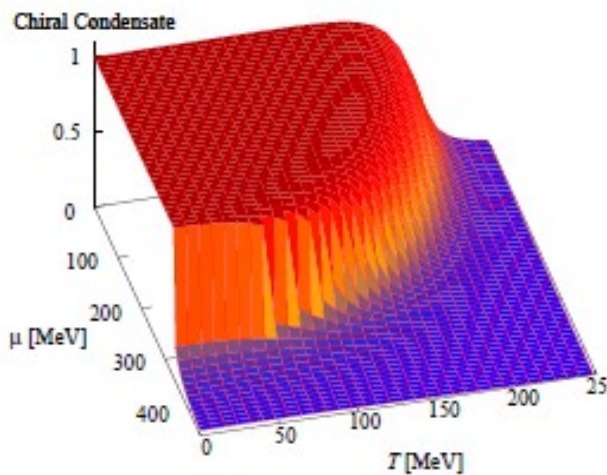
$$L = \text{diag}(\exp(i\theta_1), \exp(i\theta_2), \exp(i\theta_3)) \quad (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 0)$$

$$\rightarrow \det(1 + L \exp(-(E - \mu)/T))$$

$$= \prod_{k=1}^3 [1 + \exp(-X + i\theta_k)] = 1 + N_c l e^{-X} + N_c \bar{l} e^{-2X} + e^{-3X}$$

$$(X = (E - \mu)/T)$$

→ ポリアコフループ l が有限であれば、
1 quark, 2 quark の励起を許す



Quark Meson Model

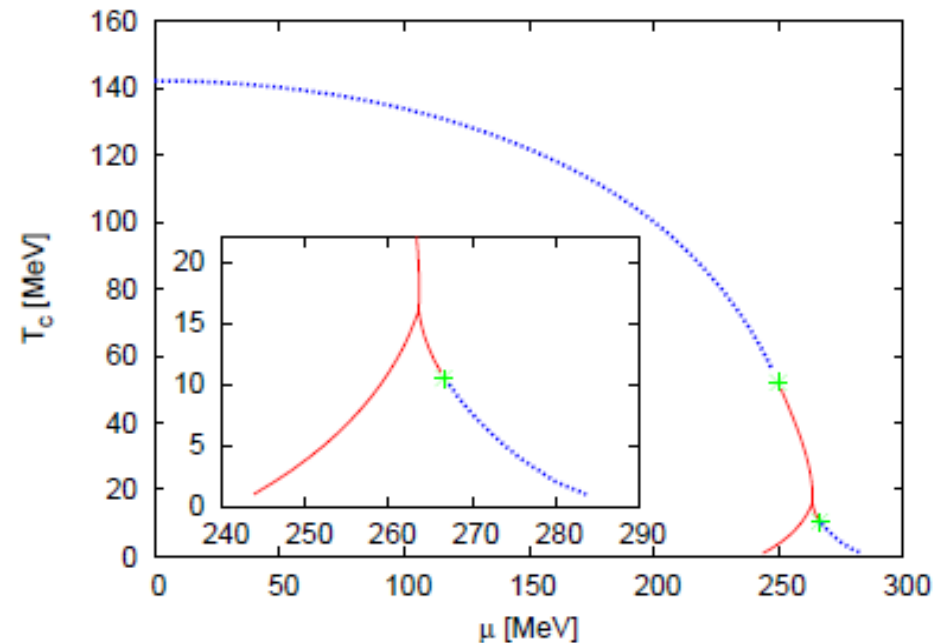
- クォークと中間子を注目する自由度として取り入れる模型
(~ ボソン化した NJL 模型 + ボソンの kinetic term)

B.-J. Schaefer, J. Wambach, NPA757('05)479

$$\Gamma_{\Lambda}[\Phi] = \int d^4x \left\{ \bar{q}[\gamma^{\mu}\partial_{\mu} + g(\sigma + i\vec{\tau}\vec{\pi}\gamma_5)]q + \frac{1}{2}(\partial_{\mu}\sigma)^2 + \frac{1}{2}(\partial_{\mu}\vec{\pi})^2 + V_{\Lambda}(\sigma^2 + \vec{\pi}^2) \right\}$$

$$V_{\Lambda}(\sigma^2 + \vec{\pi}^2) = \frac{m_{\Lambda}^2}{2}(\sigma^2 + \vec{\pi}^2) + \frac{\lambda_{\Lambda}}{4}(\sigma^2 + \vec{\pi}^2)^2$$

- 繰り込み可能。
- 繰り込み群方程式の初期条件等として利用される。



Polyakov Quark Meson model

■ Quark Meson model と Polyakov loop を結合した模型

B.-J. Schaefer, J.M.Pawlowski, J. Wambach, PRD76('07)074023

V. Skokov, B. Friman, E. Nakano, K. Redlich, B.-J. Schaefer, PRD82('10)034029.

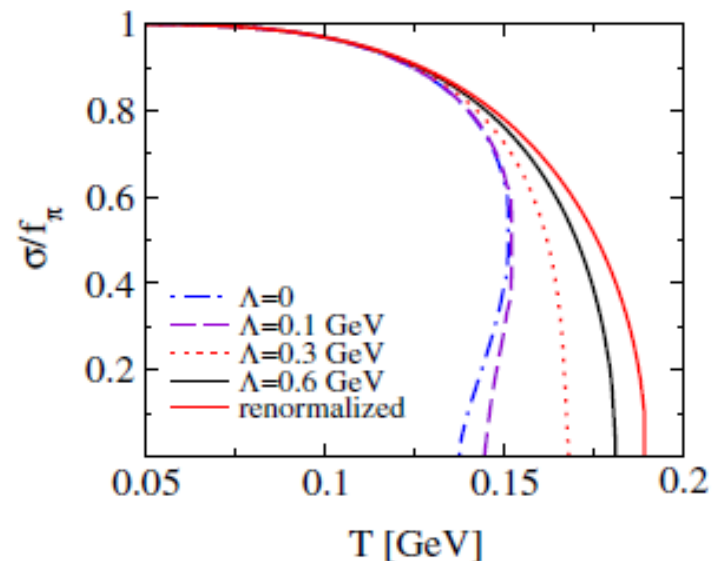
$$\mathcal{L} = \bar{q} (i\not{D} - g(\sigma + i\gamma_5 \vec{\tau} \vec{\pi})) q + \frac{1}{2}(\partial_\mu \sigma)^2 + \frac{1}{2}(\partial_\mu \vec{\pi})^2 - U(\sigma, \vec{\pi}) - \mathcal{U}(\Phi, \bar{\Phi})$$

$$U(\sigma, \vec{\pi}) = \frac{\lambda}{4}(\sigma^2 + \vec{\pi}^2 - v^2)^2 - c\sigma \quad \not{D}(\Phi) = \gamma_\mu \partial_\mu - i\gamma_0 A_0(\Phi)$$

$$\frac{\mathcal{U}(\Phi, \bar{\Phi})}{T^4} = -\frac{b_2}{4} (|\Phi|^2 + |\bar{\Phi}|^2) - \frac{b_3}{6} (\Phi^3 + \bar{\Phi}^3) + \frac{b_4}{16} (|\Phi|^2 + |\bar{\Phi}|^2)^2$$

- ゼロ点エネルギーを取り入れない取り扱い (B.-J. Schaefer et al. ('07)) では、2 flavor のカイラル極限でも1次相転移。

- ゼロ点エネルギーを取り入れると相転移の次数が QCD からの予想と一致。 (V. Skokov et al. ('10))



Model dependence of the critical point

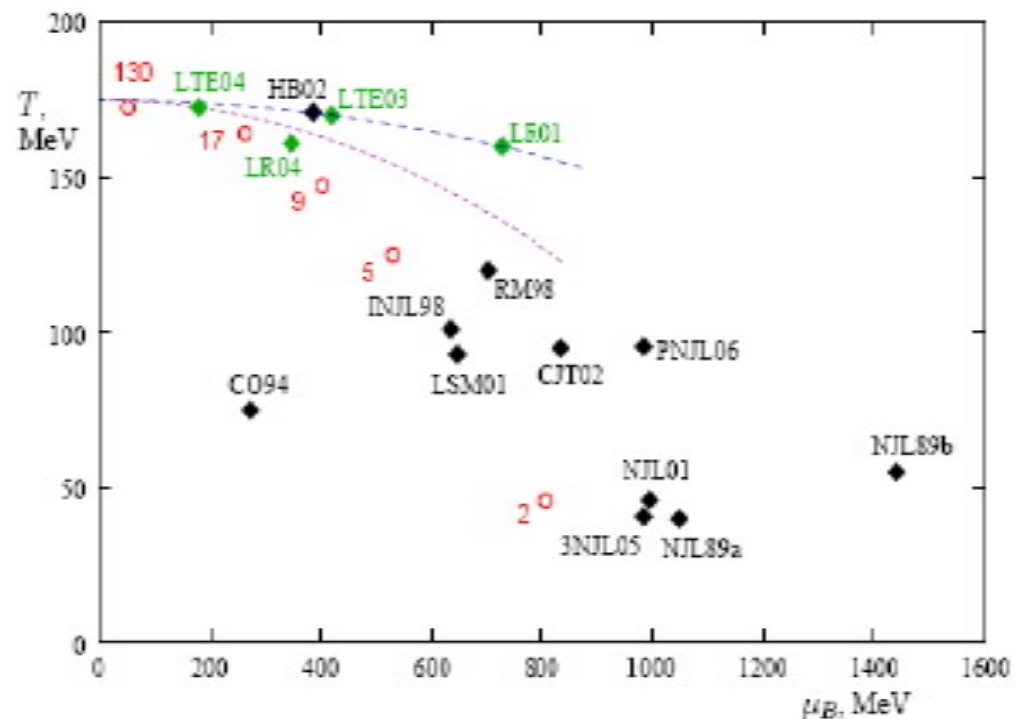
■ Bag model

- ハドロン相と QGP 相を別の自由度で記述
→ QCD 相転移はいつでも一次

■ Chiral Effective models (NJL, PNJL, QM, PQM)

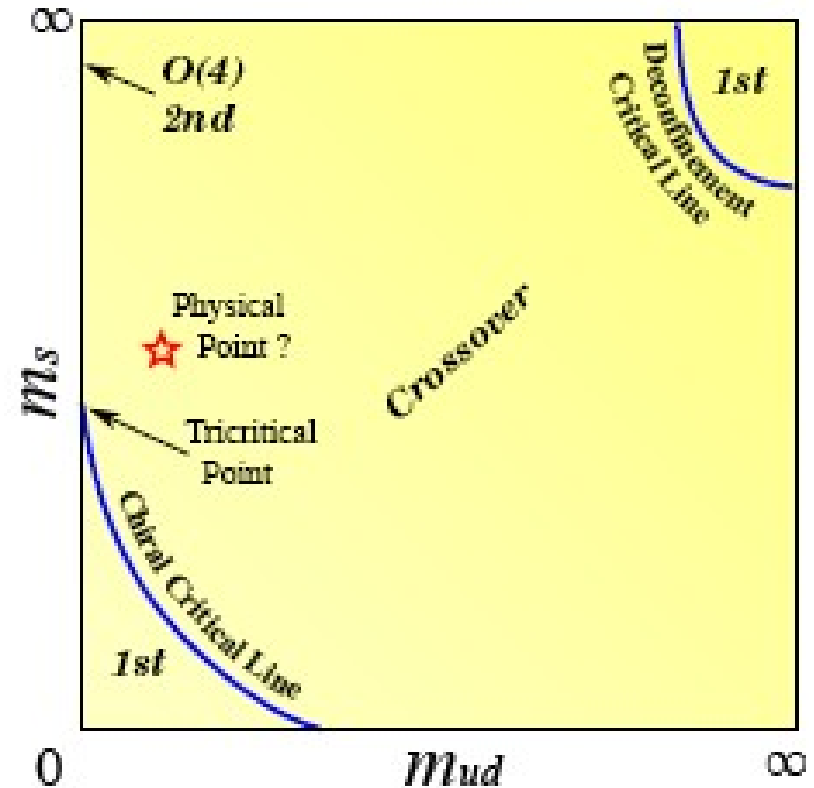
- カイラル対称性を尊重
→ クロスオーバー ($\mu=0$) から1次相転移へ。

■ 模型依存性はまだまだ大きい



高密度物質の QCD 有効模型 Short Summary

- 高密度物質の相図は未解明
→ 多くの模型が提案され、試されている。
- Bag 模型
 - QCD 真空の変化を取り入れた最初のシンプルな模型
 - 相転移は常に1次
- カイラル有効模型
 - 「カイラル対称性の自発的破れ」
 $SU(N_f)_L \times SU(N_f)_R \rightarrow SU(N_f)_V$
を尊重
 - クォーク質量による相転移次数の
移り変わりを説明
 - 臨界点については模型依存性は大



■ 講義内容のおさらい

● 有限温度の場の理論入門

- ◆ 経路積分表示、ユークリッド時空、松原和、自由場の分配関数

● カイラル相転移と NJL 模型

- ◆ カイラル対称性、Nambu-Jona-Lasinio (NJL) 模型、カイラル相転移

● 格子上の場の理論入門

- ◆ 格子 QCD、Plaquette 作用、リンク積分、格子 Fermion

● 強結合格子 QCD

- ◆ 強結合極限での string tension と有効ポテンシャル、強結合展開、ポリアコフ・ループ

● セミナー

強結合格子 QCD から物質の相図と状態方程式へー 現状と展望 -

● 高密度物質の QCD 有効模型

- 強調したこと：経路積分、松原振動数、ゼロ点エネルギー、リンク変数、カイラル対称性、ボソン化、ポリアコフ・ループ、等。