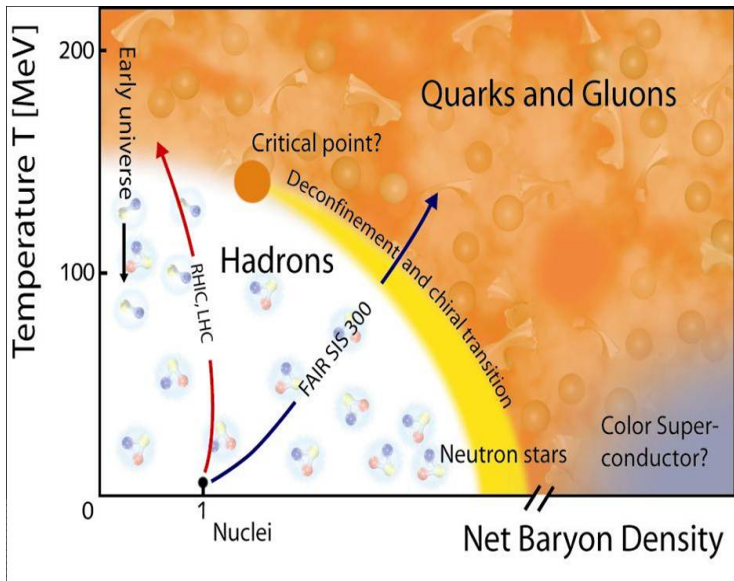


Изучение фазовой диаграммы $SU(2)$ КХД с
ненулевой барионной плотностью в рамках
решеточного моделирования

Брагута В.В.

15 Марта, 2016

ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА КХД



SU(3) КХД

- $Z = \int DUD\bar{\psi}D\psi \exp(-S_G - \int d^4x \bar{\psi}(\hat{D} + m)\psi) = \int DU \exp(-S_G) \times \det(\hat{D} + m)$
- Собственные числа оператора $\hat{D} : \pm i\lambda \Rightarrow \det(\hat{D} + m) = \prod_{\lambda} (\lambda^2 + m^2) > 0$
т.е. можно использовать метод решеточного моделирования
- Вводим химический потенциал:
 $\det(\hat{D} + m) \rightarrow \det(\hat{D} - \mu\gamma_4 + m) \Rightarrow$
детерминант становится комплексным, метод решеточного моделирования не работает (проблема знака)

SU(2) КХД

$\det(\hat{D} - \mu\gamma_4 + m) > 0$, проблема знака отсутствует!

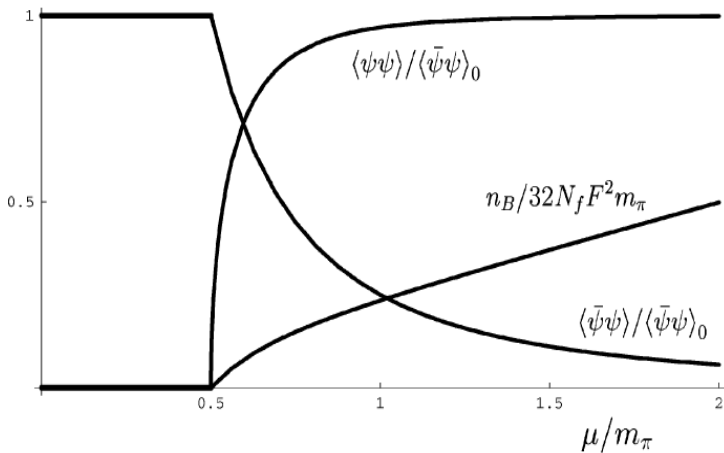
$$\mathcal{L} = \bar{\psi} \gamma_\nu D_\nu \psi = i \begin{pmatrix} \psi_L^* \\ \psi_R^* \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \sigma_\nu D_\nu & 0 \\ 0 & -\sigma_\nu^\dagger D_\nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_L \\ \psi_R \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{L} = i \begin{pmatrix} \psi_L^* \\ \tilde{\psi}_R^* \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \sigma_\nu D_\nu & 0 \\ 0 & \sigma_\nu D_\nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_L \\ \tilde{\psi}_R \end{pmatrix} = i \Psi^\dagger \sigma_\nu D_\nu \Psi,$$

$$\Psi \equiv \begin{pmatrix} \psi_L \\ \sigma_2 \tau_2 \psi_R^* \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \psi_L \\ \tilde{\psi}_R \end{pmatrix}$$

Лагранжиан имеет симметрию $SU(2N_f)$
 в отличие от $SU_R(N_f) \times SU_L(N_f)$ для $SU(3)$ КХД
 Голдстоуновские бозоны ($N_f = 2$) $\pi^+, \pi^-, \pi^0, d, \bar{d}$

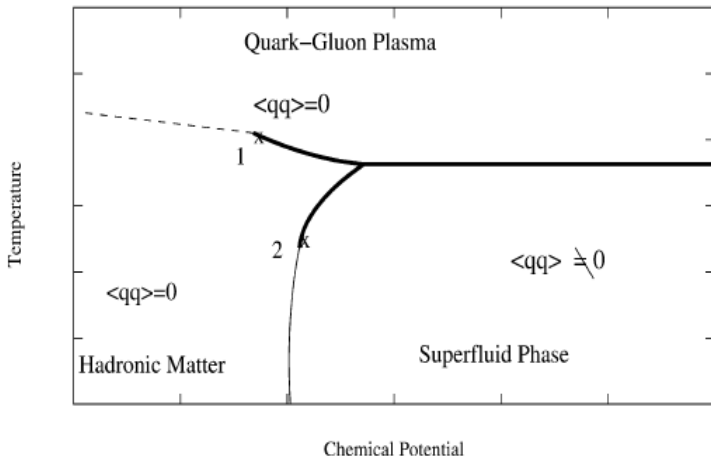
Предсказания СНРТ



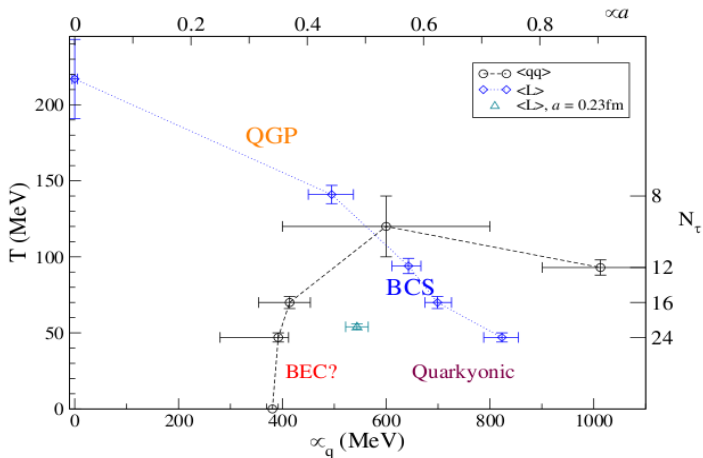
Фазовая диаграмма при $N_c \rightarrow \infty$

- Адронная фаза при $\mu < M_N/3$ ($E \sim O(N_c)$)
- Разряженный газ барионов $\mu > M_N/3$ (Ширина $\delta\mu \sim \frac{\Lambda}{N_c^2}$)
- Quarkionic фаза $\mu > \Lambda$ ($E \sim N_c$)
 - Нет кирального нарушения симметрии
 - Конфайнмент
 - Ферми сфера (внутри – кварки, на поверхности – барионы)
- Деконфайнмент ($E \sim N_c^2$)

Staggered fermions $N_f = 4$



Wilson fermions $N_f = 2$



Цель работы:

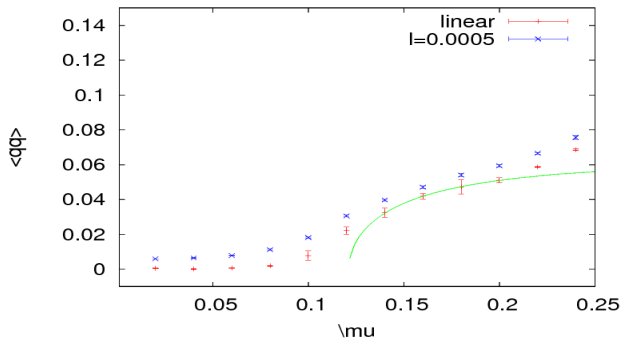
- Изучить фазовую диаграмму $SU(2)$ КХД
- Используя полученные результаты, предсказать свойства фазовой диаграммы $SU(3)$ КХД

Параметры расчетов:

- В расчетах использовались динамические staggered $N_f = 2$ фермионы
- $a = 0.12$ fm, $16^3 \times 36$, $T = 50$ MeV
- В действие введен дикварковый источник λ

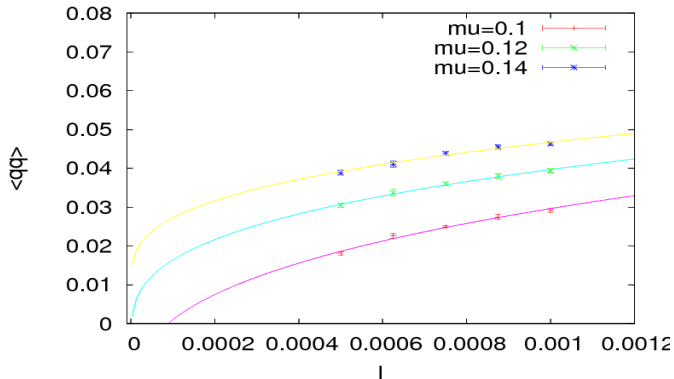
Единственная в мире программа, которая выполняет такие расчеты!

Дикварковый конденсат



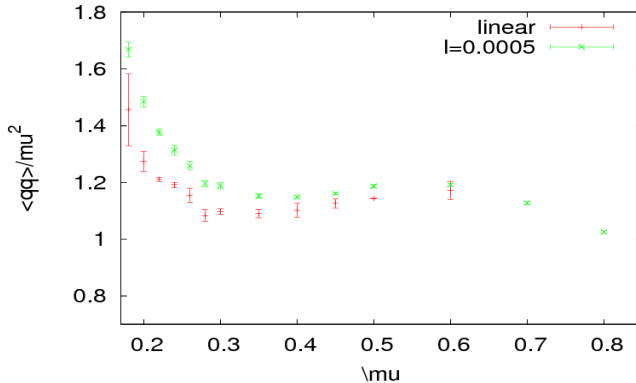
- Согласие с СНРТ $\langle \psi\psi \rangle / \langle \bar{\psi}\psi \rangle_0 = 1 - m_\pi^4 / \mu^4$
- Фазовый переход при $\mu \sim m_\pi / 2$
- ВЕС фазы $\mu \in (0.14, 0.2)$

Дикварковый конденсат



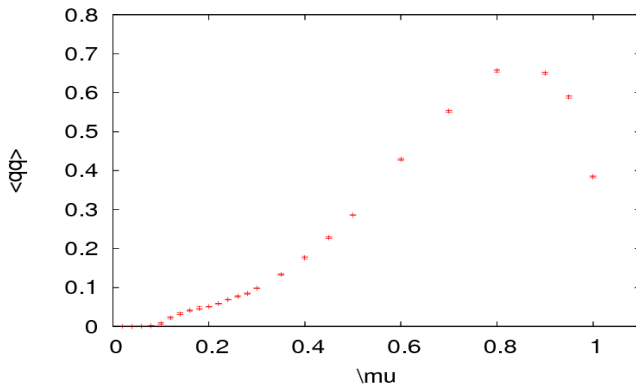
- Фитируем $\langle \psi\psi \rangle = a + b\lambda^{1/3}$
- В точке перехода $\langle \psi\psi \rangle = \lambda^{1/3}$

Дикварковый конденсат

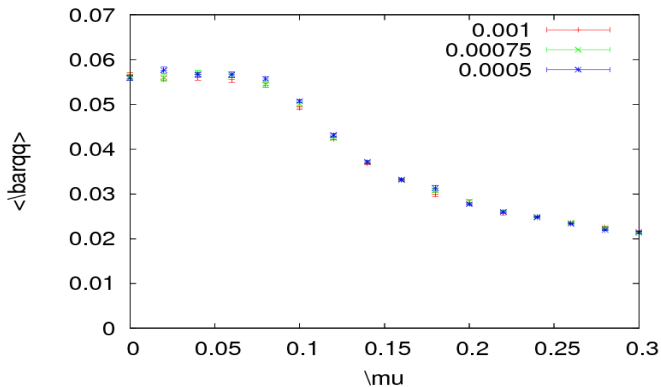


- BCS фаза $\mu > 0.3$, $\langle \psi \psi \rangle \sim \mu^2$

Дикварковый конденсат

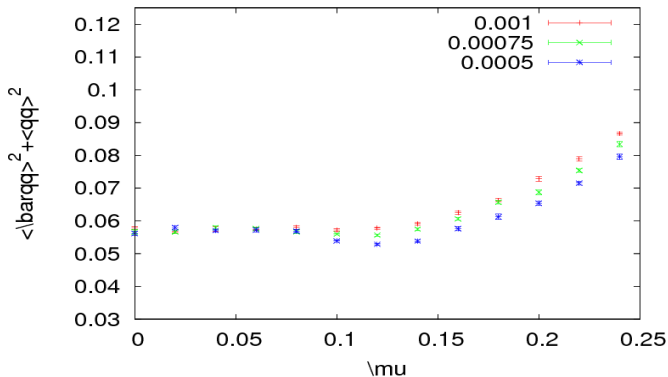


Киральный конденсат



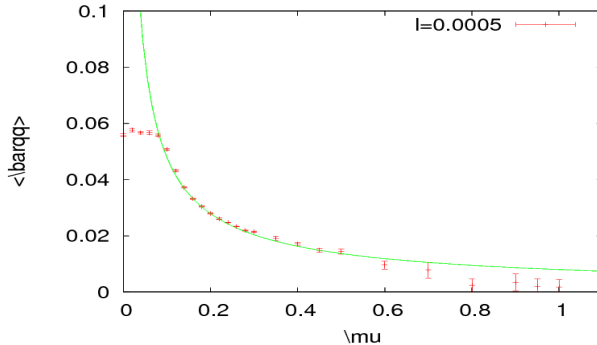
Разумное согласие с СНРТ

Киральный конденсат



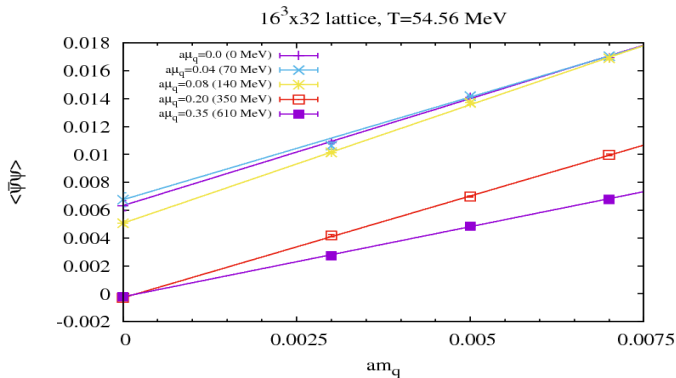
Проверка предсказания $\langle \bar{\psi}\psi \rangle^2 + \langle \psi\psi \rangle^2 = const$

Киральный конденсат



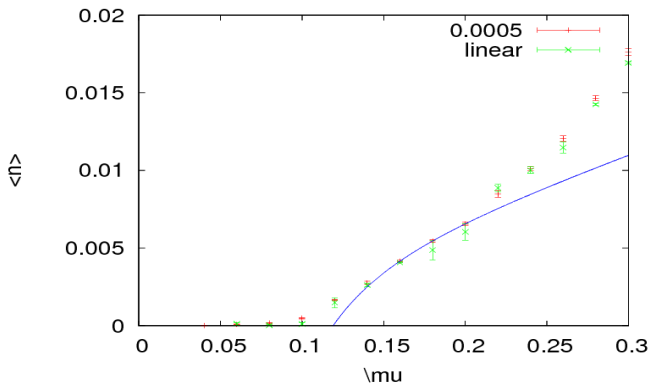
- Предсказание СНРТ $\langle \bar{\psi}\psi \rangle \sim \frac{m^2}{\mu^2}$
- В реальности $\langle \bar{\psi}\psi \rangle \sim \frac{1}{\mu^\alpha}$, $\alpha \sim 0.6 - 1.0$

Киральный конденсат (киральный предел $m \rightarrow 0$)



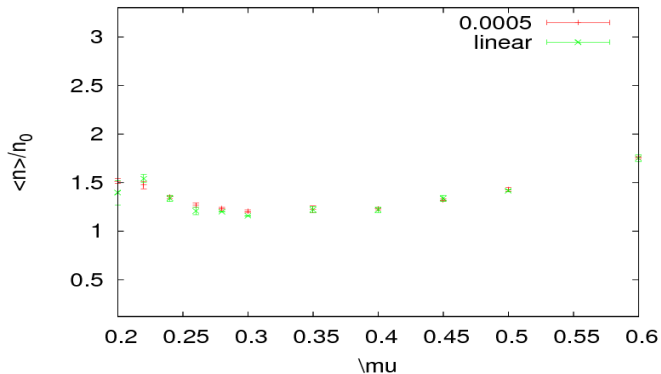
Вывод: при $\mu > m_\pi/2$ кирального нарушения симметрии нет

Барийонная плотность



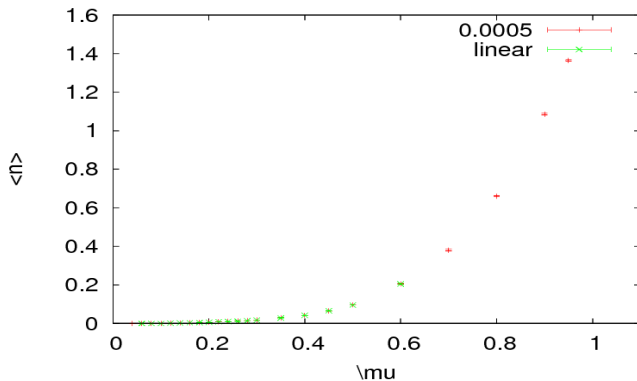
- Согласие с СНРТ $n \sim \mu - \frac{m_\pi^4}{\mu^3}$
- Фазовый переход при $\mu \sim m_\pi/2$

Барионная плотность



- $n \sim \mu^3$
- BCS фаза

Барионная плотность



Выводы:

- При $\mu < m_\pi/2$ адронная фаза
- Переход в фазу с ненулевым дикварковым конденсатом $\mu \simeq m_\pi/2$ (BEC)
- При $\mu > m_\pi/2, \mu < m_\pi/2 + 150$ MeV разряженный газ барионов
- BCS фаза $\mu \sim 600$ MeV, переход из BEC \rightarrow BCS плавный
- Киральный конденсат нарушает предсказание СНРТ
- В фазе $\mu > m_\pi/2$ нет кирального нарушения симметрии
- BCS очень похожа на quarkionic-фазу
- Наши результаты согласуются с предсказаниями $N_c \rightarrow \infty$ за исключением:
- Мы не видим переход системы в деконфайнмент