

# Эффекты грибовских копий в максимальной абелевой калибровке

Илья Кудров, Виталий Борняков

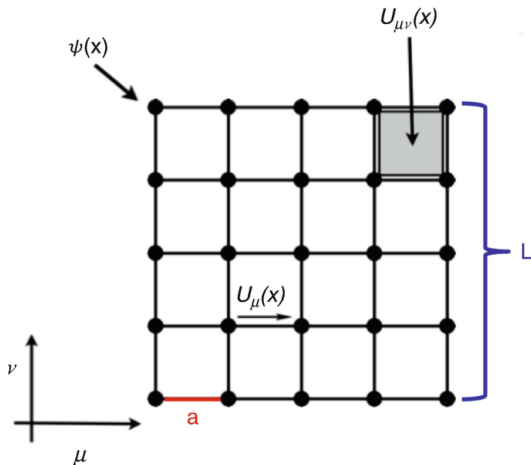
05.04.2024

- 1 Модель дуального сверхпроводника для механизма конфинмента
- 2 Монополи и максимальная абелевая калибровка
- 3 Декомпозиция калибровочного поля в МА калибровке
- 4 Эффекты грибовских копий для декомпозиции статического потенциала
- 5 Выводы

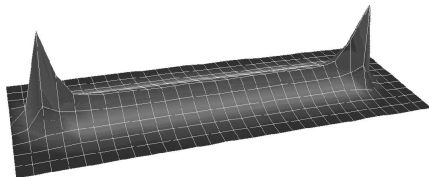
# Решеточная регуляризация КХД

$$U_\mu(x) = P \exp \left( i \int_{C_{x, x+\hat{\mu}}} A_\mu(s) ds \right) \approx 1 + iaA_\mu(x) + O(a^2)$$

$$S_G = \beta \sum_{x, \mu < \nu} \left( 1 - \frac{1}{N} \text{ReTr} U_{\mu\nu} \right) = \frac{\beta}{4} \sum_{x, \mu < \nu} \text{Tr}[F_{\mu\nu}^2] + O(a^2), \quad \beta = \frac{2N_c}{g^2}$$



# Проблема конфайнмента



Конфайнмент кварков подтвержден экспериментально и в решеточных расчетах. На решетке конфайнмент был обнаружен как линейная зависимость от расстояния потенциала взаимодействия между статическими кварками. В эксперименте конфайнмент был обнаружен, например, в свойствах траекторий Редже, в свойствах спектра кваркониев, как отсутствие цветных состояний. Однако до сих пор конфайнмент не был доказан строго аналитически. Один из вариантов объяснения конфайнмента - рассмотрение вакуума КХД как дуального сверхпроводника, что было предложено т' Хофтом и Мандельштамом.

# Максимальная Абелева калибровка в $SU(3)$ глюодинамике

Калибровочный функционал

$$F_{SU(3)} = \frac{1}{12V} \int d^4x \sum_{\mu, a} (A_\mu^a(x))^2, \quad a \neq 3, 8$$

$$(\partial_\mu \delta^{ab} - gf^{abi} A_\mu^i) A_\mu^b = 0, \quad i = 3, 8; a, b \neq 3, 8$$

На решетке калибровочный функционал имеет вид

$$F_{SU(3)}^{latt} = 1 - \frac{1}{12V} \sum_{x, \mu} [ |U_\mu^{11}|^2 + |U_\mu^{22}|^2 + |U_\mu^{33}|^2 ] \\ \approx a^2 F_{SU(3)}$$

Формализм Фаддеева-Попова:

$$\langle O \rangle = \frac{1}{Z} \int \mathcal{D}A e^{-S(A)} \Delta(A) \delta(f(A)) O(A)$$

Непертурбативная фиксация калибровки (D. Zwanziger, Nucl. Phys. (1994)):

$$\langle O \rangle = \frac{1}{Z} \int \mathcal{D}A e^{-S(A)} I^{-1}(A) \int \mathcal{D}g e^{-\lambda F(A^g)} O(A^g)$$

где

$$I(A) = \int \mathcal{D}g e^{-\lambda F(A^g)}$$

# Абелевая проекция

$$A_\mu(x) = \sum_{a \neq 3,8} A_\mu^a(x) \lambda_a + A_\mu^3(x) \lambda_3 + A_\mu^8(x) \lambda_8 \equiv A_\mu^{\text{off}}(x) + A_\mu^{\text{abel}}(x)$$

$$U_\mu(x) = C_\mu(x) U_\mu^{\text{abel}}(x),$$

где  $U_\mu^{\text{abel}}(x) \in U(1) \times U(1)$ , а  $C_\mu(x) \in SU(3)/(U(1) \times U(1))$

$$U_\mu^{\text{abel}}(x) = \text{diag}(e^{i\theta_\mu^1(x)}, e^{i\theta_\mu^2(x)}, e^{i\theta_\mu^3(x)}), \quad -\pi < \theta_\mu^k(x) \leq \pi$$

Используя абелевы углы  $\theta_\mu^k(x)$  определяем абелевы плакеты

$$\theta_{\mu\nu}^k(x) = \partial_\mu \theta_\nu^k(x) - \partial_\nu \theta_\mu^k(x), \quad k = 1, 2, 3$$

Плакет разделяется на регулярную  $-\pi \leq \bar{\theta}_{\mu\nu}^k(x) < \pi$  и сингулярную  $m_{\mu\nu}^k(x) \in \mathbb{Z}$  части

$$\theta_{\mu\nu}^k(x) = \bar{\theta}_{\mu\nu}^k(x) + 2\pi m_{\mu\nu}^k(x)$$

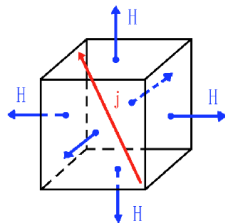
Определение для компактной  $U(1)$  (DeGrand, Toussaint, Phys. Rev. D (1980)). Если плакет по модулю превышает  $\pi$ , через него проходит Дираковская струна с магнитным потоком  $2\pi$ , а ток магнитных зарядов можно определить как

$$j_{\mu}^k(s) = \frac{1}{2} \varepsilon_{\mu\nu\alpha\beta} \partial_{\nu} m_{\alpha\beta}^k(x) = -\frac{1}{4\pi} \varepsilon_{\mu\nu\alpha\beta} \partial_{\nu} \bar{\theta}_{\mu\nu}^k(x)$$

Закон сохранения:

$$\sum_{\mu} \partial_{\mu} j_{\mu}^k(s) = 0$$

где  $j_{\mu}^k(s)$  определены на ребрах дуальной решетки,  $s^{\alpha} = x^{\alpha} + \frac{1}{2}$ .





# Декомпозиция для группы SU(3)

Декомпозиция для абелевой компоненты:

$$\theta_\mu^k(x) = \theta_\mu^{mon,k}(x) + \theta_\mu^{ph,k}(x)$$

Выражение для  $\theta_\mu^{mon,k}(x)$  (Smit, van der Sijs, Nucl. Phys. B (1991)):

$$\theta_\mu^{mon,k}(x) = -2\pi \sum_y D(x-y) \partial'_\nu m_{\nu\mu}^k(y)$$

Декомпозиция векторного потенциала (Поликарпов, Борняков и др., Nucl.Phys.B Proc.Suppl. (2006)):

$$A_\mu(x) = A_\mu^{mod}(x) + A_\mu^{mon}(x)$$

Определение модифицированного векторного потенциала:

$$A_\mu^{mod}(x) = A_\mu^{off}(x) + A_\mu^{ph}(x)$$

# Декомпозиция для потенциала

Декомпозиция на решетке:

$$U_\mu(x) = U_\mu^{mod}(x) U_\mu^{mon}(x)$$

где

$$U_\mu^{mod}(x) \equiv U_\mu(x) U_\mu^{\dagger mon}(x)$$

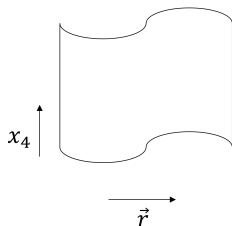
Потенциал взаимодействия статических кварков:

$$V(R) = - \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \log [W(R, T)]$$

Демонстрируется выполнение соотношения

$$V(R) \approx V_{mon}(R) + V_{mod}(R)$$

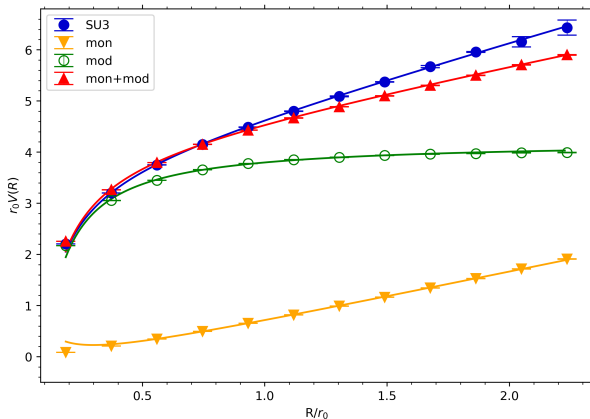
как на больших, так и на малых расстояниях  $R$



# Декомпозиция потенциала в $SU(3)$ глюодинамике

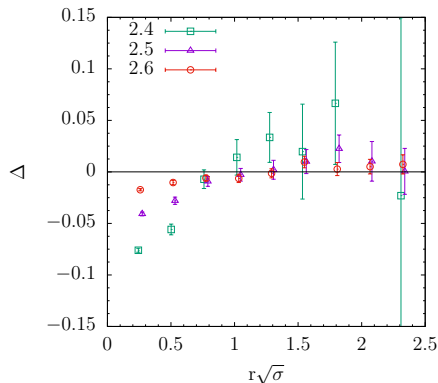
Борняков, Кудров, 2023

$$a = 0.093 \text{ fm } (\beta = 6.0)$$



# Относительное отклонение в $SU(2)$ глюодинамике

$$\Delta(R) = \frac{V(R) - (V_{mon}(R) + V_{mod}(R))}{V(R)}.$$

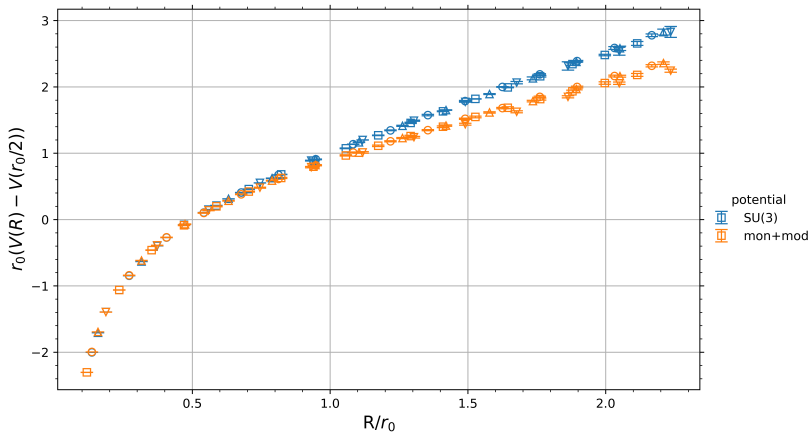


Аппроксимация  $V(R) \approx V_{mon}(R) + V_{mod}(R)$  улучшается с уменьшением шага решетки.

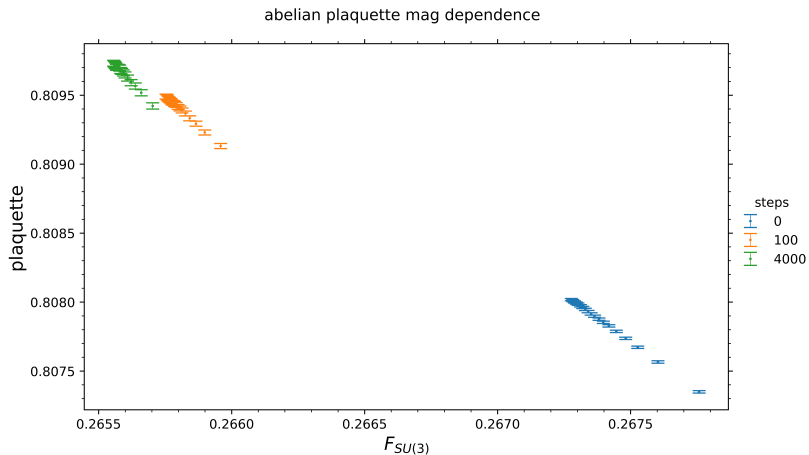
Борняков, Кудров, 2022

# Декомпозиция потенциала в $SU(3)$ глюодинамике

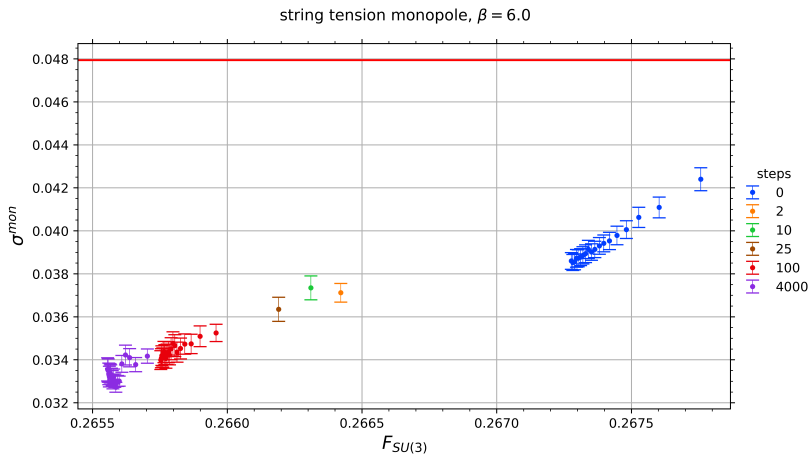
Для шагов решетки  $a = 0.093, 0.079, 0.068, 0.059$  Фм.



# Абелевый плакет, $\beta = 6.0$

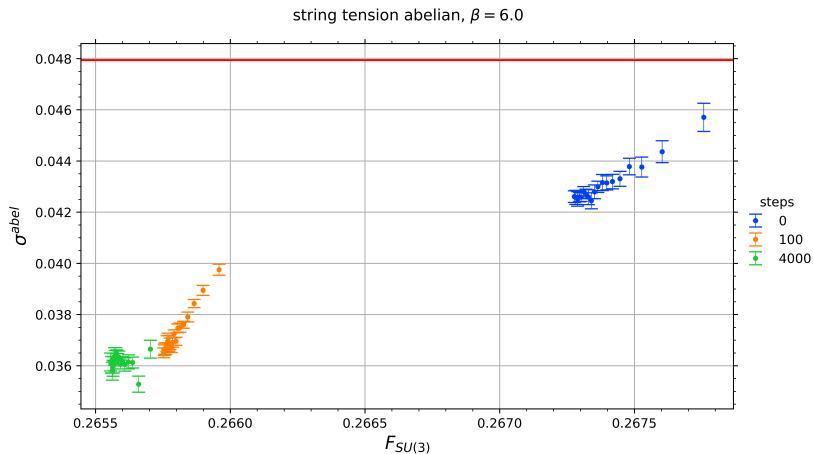


# Монопольное натяжение струны, $\beta = 6.0$



# Абелево натяжение струны, $\beta = 6.0$

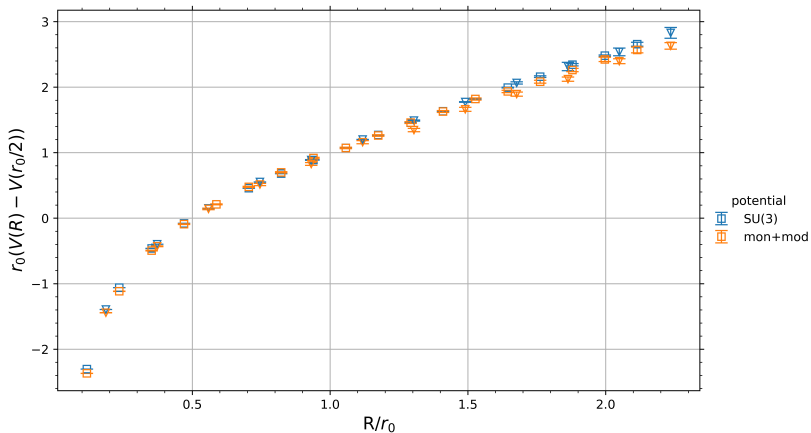
H. Suganuma, Perfect Abelian dominance of quark confinement in SU(3) QCD (2014)





# Улучшенная декомпозиция в $SU(3)$ глюодинмике

Для шагов решетки  $a = 0.093, 0.059$  фм.



В  $SU(3)$  глюодинамике показано, что существуют грибовские копии в МА калибровке, для которых декомпозиция калибровочного поля

$$A_\mu(x) = A_\mu^{mon}(x) + A_\mu^{mod}(x) \quad (1)$$

приводит к декомпозиции потенциала взаимодействия статических кварков

$$V(R) \approx V_{mon}(R) + V_{mod}(R) \quad (2)$$

Планы:

- 1 Исследовать декомпозицию (1) в решеточной КХД
- 2 Исследовать декомпозицию для других наблюдаемых, например, для кирального конденсата, адронного спектра

Спасибо за внимание!

$$\mathcal{M}^{\alpha\beta}(A) = -\mathcal{D}_{\mu}^{\alpha\delta}\mathcal{D}_{\mu}^{\delta\beta} - g^2\varepsilon^{\alpha\delta}\varepsilon^{\beta\sigma}A_{\mu}^{\delta}A_{\mu}^{\sigma}$$