

Смягчение фазового перехода КХД во внешнем гравитационном поле

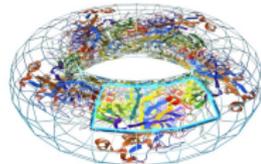
М.Н. Чернодуб, В.А. Гой, А.В. Молочков,
Д.В. Степанов, А.С. Починок

Тихоокеанский квантовый центр, Дальневосточный федеральный университет,
690922, Владивосток

Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий»,
посвященная 70-летию В.А. Рубакова
17 – 21 февраля 2025

[Принята в PRL (2025), arXiv:2409.01847]
[При поддержке гранта № FZNS-2024-0002]

**PACIFIC QUANTUM
CENTER**

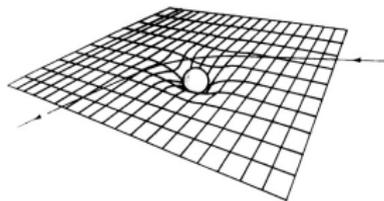


- Актуальность.
- Аналогия с температурой.
- Задание неоднородной температуры на решетке.
- Результаты.
- Заключение.

КТП/Стандартная модель

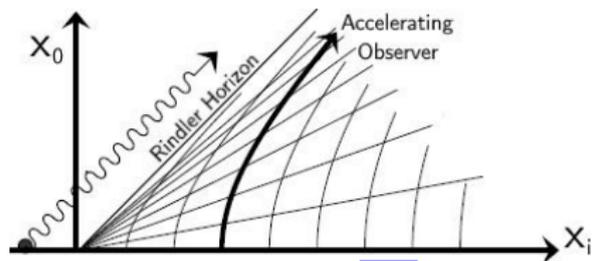


ОТО/Гравитация



Эффект Унру

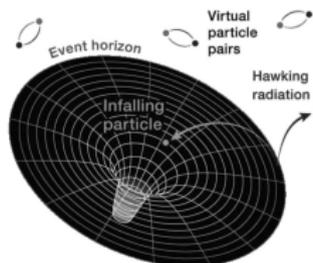
[Phys. Rev. D 14, 870 (1976)]



$$T_U = \frac{\hbar}{kc} \cdot \frac{|a|}{2\pi}$$

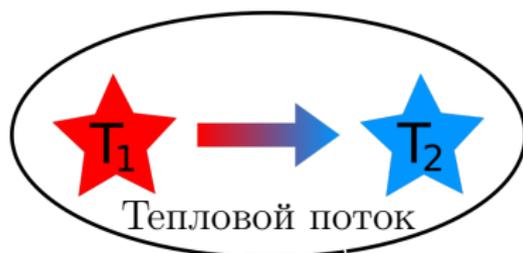
Излучение Хокинга

[Nature 248, 30-31 (1974)]



$$T_{BH} = \frac{\hbar c^3}{k} \cdot \frac{\kappa}{2\pi}, \quad \kappa = \frac{1}{4GM}$$

Ускорение и аналогия с температурой



Если $a_0 = const \Rightarrow$ глобальное тепловое равновесие с $T(z)$.

[Phys. Rev. 36, 1791–1798 (1930); Phys. Rev. 135, A1505–A1514 (1964)]

Такую систему можно описать с помощью $\beta^\mu(x) \equiv u^\mu(x)/T(x)$:

$$\partial_\mu \beta_\nu + \partial_\nu \beta_\mu = 0 \quad \Rightarrow \quad \beta^\mu(x) \partial_\mu = (1/T_0)[(1 + a_0 z) \partial_t + a_0 t \partial_z].$$

$$T(t, z) = \frac{T_0}{\sqrt{(1 + a_0 z)^2 - (a_0 t)^2}},$$

$$a^\mu(t, z) \partial_\mu = a_0 \frac{T^2(x)}{T_0^2} [a_0 t \partial_t + (1 + a_0 z) \partial_z].$$

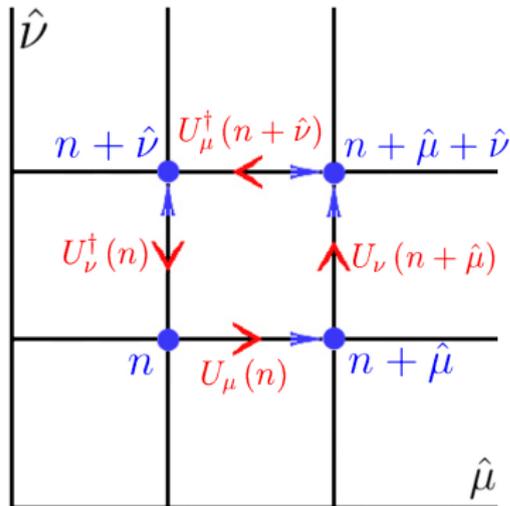
$$T(z) = \frac{T_0}{1 + a_0 z}$$

Ускорение в евклидовом времени

Сложности в КТП:

- расходимости (UV и IR)
- непертурбативные эффекты играют ключевую роль в КХД

КТП на решетке:

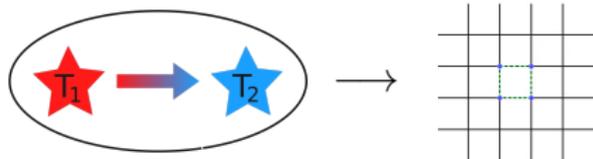


- Стат. сумма: $Z \sim e^{-S_G[U]}$
- Ребра – калибровочные поля
 $A_\mu(x) \rightarrow U_\mu(n) = \exp\left(ig \int_n^{n+\hat{\mu}} dx_\nu A_\nu\right)$
 Плакет $U_{\mu\nu}(n) = \exp\left(iga^2 F_{\mu\nu}(n) + \dots\right)$
 $U_\mu(n) U_\nu(n + \hat{\mu}) U_\mu^\dagger(n + \hat{\nu}) U_\nu^\dagger(n)$
- Ускорение $\mathbf{a} = \partial \mathbf{v} / \partial t \equiv \partial^2 \mathbf{x} / \partial t^2$

$$\mathbf{a} \rightarrow \mathbf{a}_E = -\mathbf{a}$$

$$S_G = \frac{\beta}{N_c} \sum_{\square} \text{Re Tr} (1 - U_{\square})$$

[K. Wilson, Phys. Rev. D10 2445 (1974)]

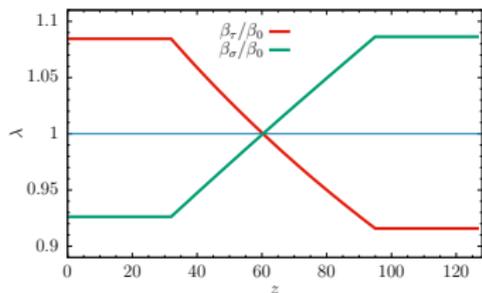
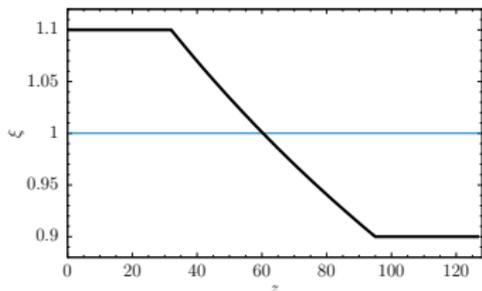


Задание неоднородной температуры на решетке

$$S_G = \sum_x \sum_{i>j=1}^3 \beta_\sigma(z) (1 - \mathcal{P}_{x,ij}) + \sum_x \sum_{i=1}^3 \beta_\tau(z) (1 - \mathcal{P}_{x,4i})$$

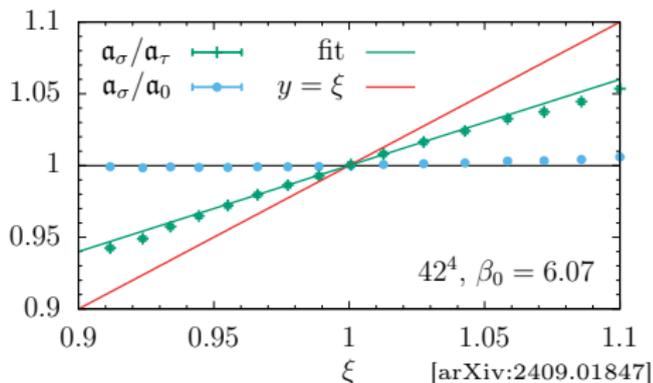
$$\mathcal{P}_{x,\mu\nu} = \frac{1}{3} \text{Re Tr } U_{x,\mu\nu}$$

[F. Karsch, Nucl. Phys. B 205, 285–300 (1982)]

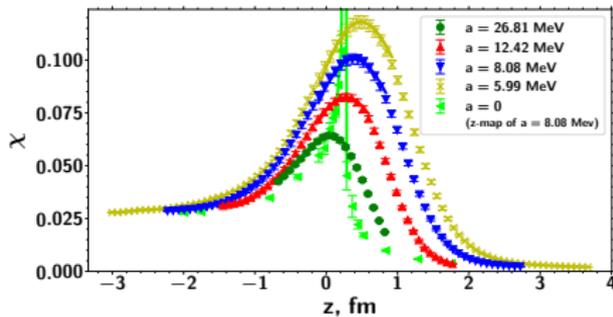
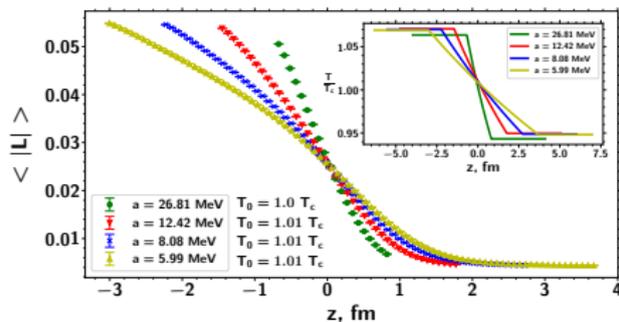


$$\beta_\sigma(\beta, \xi) = \frac{\beta}{\xi} + \frac{6}{\xi} c_\sigma(\xi), \quad \xi = \frac{a_\sigma}{a_\tau} = \frac{T}{T_0}.$$

$$\beta_\tau(\beta, \xi) = \beta\xi + 6\xi c_\tau(\xi),$$



Поляковская петля

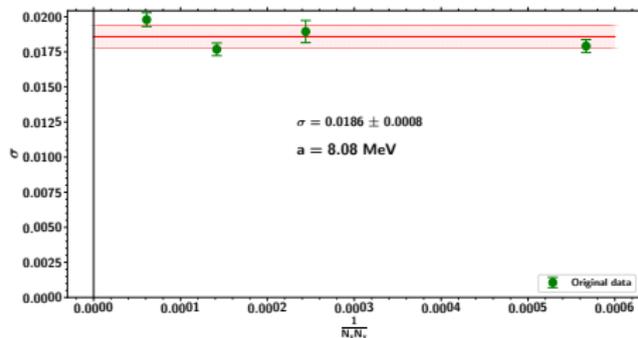
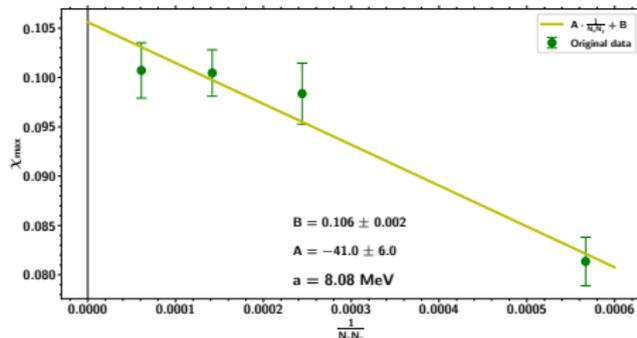
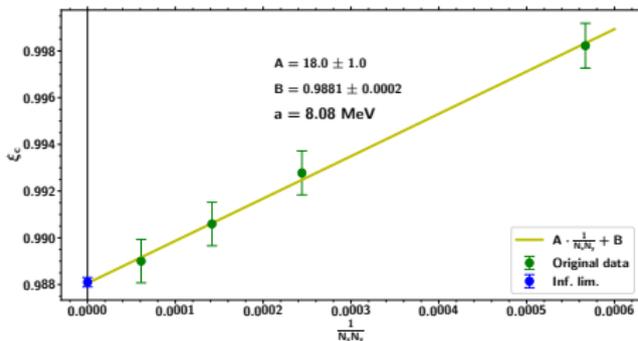


$$L(z) = \langle |L_z| \rangle \sim e^{-F(z)/T},$$

$$L_z = \left\langle \frac{1}{3} \text{Tr} \prod_{\tau=0}^{N_\tau-1} U_{x,\tau} \right\rangle_{x,y}.$$

- Поляковская петля – параметр порядка.
- Тип перехода: I род \rightarrow мягкий и широкий кроссовер.

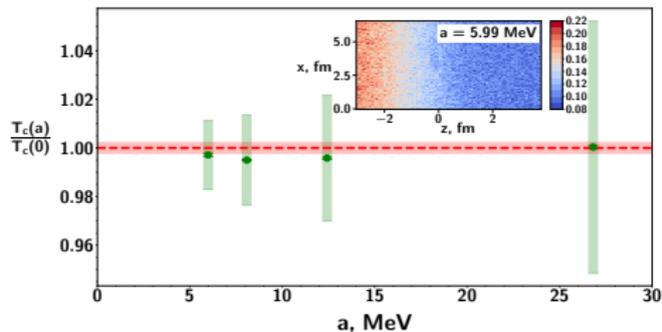
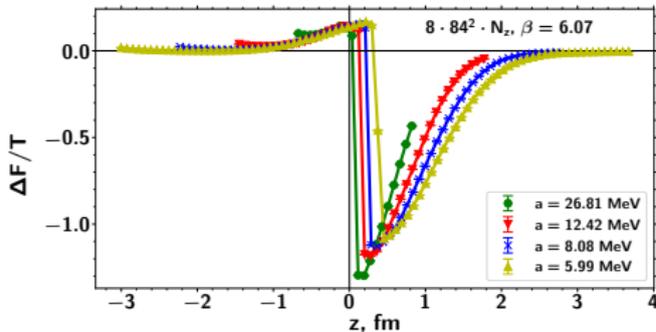
Предел бесконечного объема



$$\chi(\xi) = \chi_{max} \exp\left(-\frac{(\xi - \xi_c)^2}{2\sigma^2}\right)$$

- ξ_c, χ_{max} – линейны с объемом⁻¹, конечны.
- σ – константа.

Свободная энергия и фазовая структура



$$L(z) \sim e^{-F(z)/T}, \quad \Delta F(z) = -T_{\text{bulk}} \ln \left. \frac{L_{\text{acc}}(z, a)}{L_{\text{bulk}}(T_{\text{bulk}})} \right|_{T_{\text{bulk}}=T(z, a)}.$$

Заключение

- В рамках решеточной КХД изучена система с неоднородной зависимостью $T = T(z)$.
 - $T(z)$ удовлетворяет соответствию Латтинжера (Толмана-Эренфеста) между градиентом температуры и ускорением.
 - Получено, что даже **самое слабое** ускорение $a \simeq 6$ МэВ радикально смягчает переход конфайнмент-деконфайнмент.
- 1 Тип перехода: I род \rightarrow мягкий и широкий кроссовер.
 - 2 Температура перехода: не отличается от соответствующей T_c .
 - 3 $\exists a = a_c$: фазовый переход I рода превращается в кроссовер.
- Ранняя Вселенная.
 - Ст. тяжелых ионов.

[Спасибо за внимание]