

---

# Теория струн и квантовая хромодинамика.

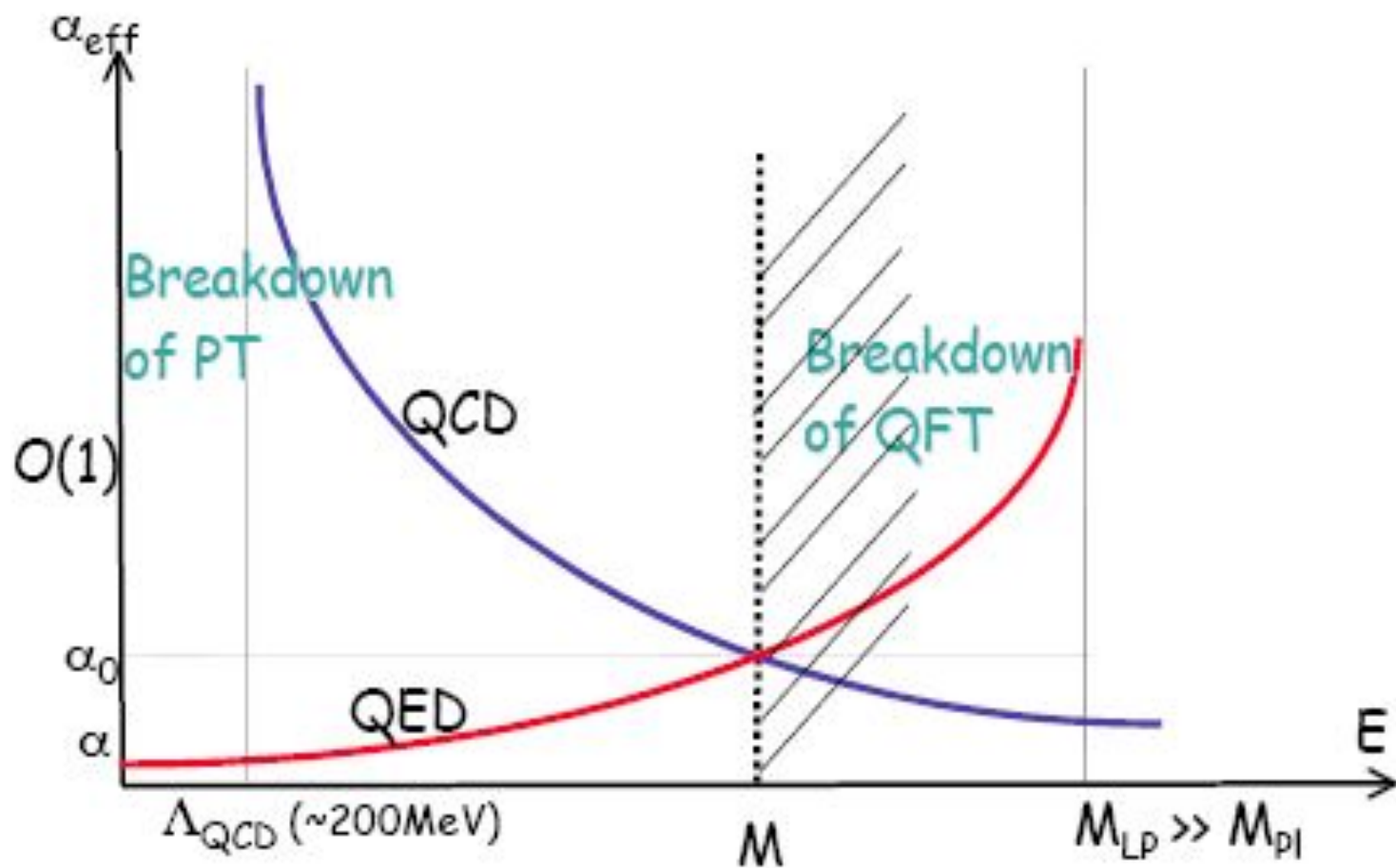
---

Александр Горский, ИТЭФ

# Что мы знаем о КХД

- Теория сильных взаимодействий, совместная с доступными экспериментальными данными
- В области высоких энергий в силу асимптотической свободы режим слабой СВЯЗИ

$$\alpha_s(E/\Lambda_{QCD}) = \frac{6\pi}{(33 - 2n_f)\log(E/\Lambda_{QCD})}$$



- При низких энергиях - непертурбативная физика; конфайнмент цветных степеней свободы, спонтанное нарушение киральной симметрии.
- Параметры порядка - конденсаты

$$\langle 0 | \bar{q}q | 0 \rangle = -(260 \text{ MeV})^3 \quad \langle 0 | \frac{\alpha_s}{\pi} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a | 0 \rangle = 0.012 \text{ GeV}^4$$

- Эффективное описание – киральная теория возмущений, в которой эффективные степени свободы - легкие мезоны. Барионы в киральном лагранжиане - солитоны

- 
- Фазовая диаграмма в КХД ( $\mu$ ,  $T$ )
  - При высоких температурах фазовый переход конфайнмент-деконфайнмент и восстановление киральной симметрии. При высоких плотностях новые нетривиальные фазы; color-flavor locking phase, color superconductivity
  - КХД на решетках – указание на существенный вклад протяженных объектов в вакуумные характеристики
-

---

# Что мы не знаем про КХД?

- Как устроено основное состояние, вакуум ?
  - Много моделей, но нет количественного описания
  - Какое соотношение между температурами различных фазовых переходов?
  - Какова роль высоких порядков теории возмущений ?
  - Какова природа КХД струны?
  - 2 типа струн, «магнитные» и «электрические»?
-

# Гипотеза дуальности (Maldacena 97, Поляков 77-97)

- Струна в нетривиальном 10-мерном пространстве дуальна калибровочной теории поля с максимально возможной суперсимметрией в 4-х измерениях
- Метрика 10-ти мерного пространства  $AdS_5$  имеет вид

$$ds^2 = \frac{r^2}{R^2}(-dt^2 + dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2) + R^2 \frac{dr^2}{r^2} + R^2 d\Omega_5^2$$

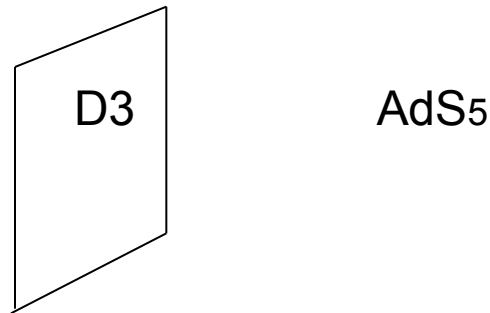
$$R^4 = 4\pi g_s \alpha'^2 N_c.$$

# Интерпретация дополнительных измерений

- 5-я координата в  $AdS_5$  отвечает масштабу в 4-х мерной теории поля на границе в голографическом описании. Остальные координаты в  $S_5$  соответствуют вакуумным значениям скалярных полей суперсимметричной теории
  - В теории с меньшей суперсимметрией вместо  $S_5$  более сложная геометрия, задающая параметры теории



- Дуальность-явная реализация сценария «мира на бране»(Рубаков-Шапошников,83)



- N солитонных объектов в теории струн – D3 бран индуцируют в многомерном пространстве метрику и внешнее поле. 4-х мерное пространство, «наш мир», определен на солитоне в многомерном пространстве. Струна - «пробник» 4-х мерной физики на бране.

---

Соответствие между параметрами струны  
и параметрами калибровочной теории

$$4\pi g_s = g_{YM}^2, \quad T = \frac{1}{2\pi} \sqrt{g_{YM}^2 N_c} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\lambda}$$

Таким образом, в режиме сильной связи  
натяжение струны велико и она может  
быть описана квазиклассически. С другой  
стороны режим слабой связи в теории поля  
соответствует квантовой струне.

---

- 
- Каково соответствие между состояниями струны и объектами в калибровочной теории?
  - Состояние струны = оператор в калибровочной теории
  - Энергия струны = аномальная размерность оператора, которая определяет зависимость физических величин от энергии процесса
-

## Дуальность и результаты в теории поля

### ■ Пертурбативный режим в КХД

1. Струнное(твисторное) описание позволило сформулировать новую эффективную диаграммную технику в теории Янга-Миллса (MHV формализм). (Cachazo, Witten, Swrchk 04, Rosly, A.G. 06). С её помощью вычислены новые петлевые вклады в амплитуды с участием глюонов.
2. Обнаружена скрытая интегрируемость уравнений эволюции в КХД. Она отвечает интегрируемости струны в 10-ти мерии в дуальном описании. Основные результаты для SUSY ЯМ, но есть результаты и в КХД. Новые симметрии в теории возмущений в КХД!  
(Lipatov 93, Faddeev Korchemsky 94, Braun Derkachev Manashov 98, Minahan-Zarembo 02)

---

3. Струнное описание теории возмущений позволяет провести суммирование ряда теории возмущений для некоторых величин!

Пример: аномальная размерность оператора твиста 2 с большим спином (в N=4 теории). В обычной КХД она определяет зависимость момента структурной функции от энергии.

Предсказание для аномальной размерности, следующее из струнного описания

$$\Delta = s + f(g) \log(s) + O(s^0).$$

$$\begin{aligned}
f(g) = & 8g^2 - \frac{8}{3}\pi^2 g^4 + \frac{88}{45}\pi^4 g^6 - 16 \left( \frac{73}{630}\pi^6 + 4\zeta(3)^2 \right) g^8 \\
& + 32 \left( \frac{887}{14175}\pi^8 + \frac{4}{3}\pi^2 \zeta(3)^2 + 40\zeta(3)\zeta(5) \right) g^{10} \\
& - 64 \left( \frac{136883}{3742200}\pi^{10} + \frac{8}{15}\pi^4 \zeta(3)^2 + \frac{40}{3}\pi^2 \zeta(3)\zeta(5) \right. \\
& \quad \left. + 210\zeta(3)\zeta(7) + 102\zeta(5)^2 \right) g^{12} \\
& + 128 \left( \frac{7680089}{340540200}\pi^{12} + \frac{47}{189}\pi^6 \zeta(3)^2 + \frac{82}{15}\pi^4 \zeta(3)\zeta(5) + 70\pi^2 \zeta(3)\zeta(7) \right. \\
& \quad \left. + 34\pi^2 \zeta(5)^2 + 1176\zeta(3)\zeta(9) + 1092\zeta(5)\zeta(7) + 4\zeta(3)^4 \right) g^{14} \\
& \mp \dots
\end{aligned}$$

Первые 4 члена разложения совпадают с недавними явными вычислениями фейнмановских диаграмм!(Beisert-Eden-Staudacher 06, Bern-Kosover-Dixon-Smirnov 06 4-loops, Lipatov et.al 04 3-loops)

## Непертурбативная КХД

1. Информация о IR масштабе неабелевой калибровочной теории зашифрована в геометрии 10-мерного пространства с горизонтом (Witten 98).
2. Впервые получен киральный лагранжиан в теории Янга-Миллса с кварками «из первых принципов»! Предполагается, что  $N_c \gg N_f$ , то есть  $N_c$  задают фоновую геометрию в которой распространяются  $N_f$  флэйворных бран. Киральный лагранжиан возникает как теория на мировой поверхности флэйворных бран с калибровочной группой

$$U(N_f)_L \times U(N_f)_R$$

- Теория на мировой поверхности флейворных бран сводится к 5-ти мерной калибровочной теории (Sakai-Sugimoto 05)

$$S_{\text{DBI}}^{\text{D8}} = \kappa \int d^4x dz \text{tr} \left[ \frac{1}{2} K^{-1/3} F_{\mu\nu}^2 + K F_{\mu z}^2 \right],$$

$$\kappa \equiv \frac{\lambda N_c}{108\pi^3}, \quad K(z) \equiv 1 + z^2.$$

Z – радиальная «ренормгрупповая» координата, по которой вводится разложение по модам

$$A_\mu(x^\mu, z) = \sum_{n=1}^{\infty} B_\mu^{(n)}(x^\mu) \psi_n(z),$$

$$A_z(x^\mu, z) = \varphi^{(0)}(x^\mu) \phi_0(z) + \sum_{n=1}^{\infty} \varphi^{(n)}(x^\mu) \phi_n(z),$$



- Для гармоник получаем 4-х мерное действие

$$S_{D8}^{DBI} \Big|_{v_\mu^2 = a_\mu^2 = \mathcal{V}_\mu = A_\mu = 0} = \int d^4x \left( \frac{f_\pi^2}{4} \text{tr} (U^{-1} \partial_\mu U)^2 + \frac{1}{32e_S^2} \text{tr} [U^{-1} \partial_\mu U, U^{-1} \partial_\nu U]^2 \right)$$

где киральное мезонное поле  $U$  возникает из z-компоненты

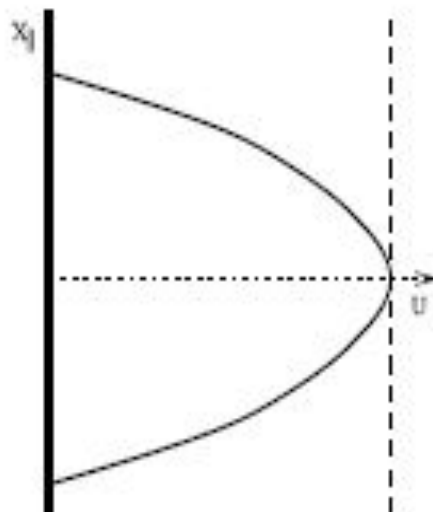
калибровочного поля , а константы имеют вид

$$f_\pi^2 \equiv \frac{4}{\pi} \kappa = \frac{1}{27\pi^4} \lambda N_c ,$$

$$e_S^{-2} \equiv \kappa \int dz K^{-1/3} (1 - \psi_0^2)^2$$

Барион автоматически оказывается солитонным объектом D4 – браной, намотанной на цикл, а барионный заряд совпадает с топологическим зарядом на флэйворной бране

## 2. Вычисление Вильсоновских петель



Вильсоновская петля- граница мировой поверхности струны, протяженной в радиальном направлении. Задача эффективно сводится к вычислению площади мировой поверхности струны во внешней метрике(Maldacena, Lee Rey 98)

- 2 типа струн в КХД: «электрические» и «магнитные»
- В теории струн есть «подходящие» объекты – фундаментальная (электрическая) струна ( $T \sim g$ )
- D1 (магнитная) струна ( $T \sim 1/g$ ) которая имеет большое натяжение в режиме слабой связи. Она является «родственником» абрикосовской струны
- В последнее время были обнаружены новые неабелевы струны в калибровочных теориях со скалярами. (Hanany, Tong, Shifman-Yung, A.G 04-07)
- Струны Абрикосова и  $Z_n$  струны -абелевы и могут рассматриваться как связанное состояние неабелевых струн. Найден новый объект-монополь в фазе Хиггса, локализованный на поверхности неабелевой струны.
- Очень близко к результатам в КХД на решетке!

Введение температуры в калибровочную теорию в дуальном описании отвечает метрике чёрной дыры в 10-геометрии.

Фазовый переход конфайнмент-деконфайнмент эквивалентен фазовому переходу Хокинга-Пэйджа в гравитации

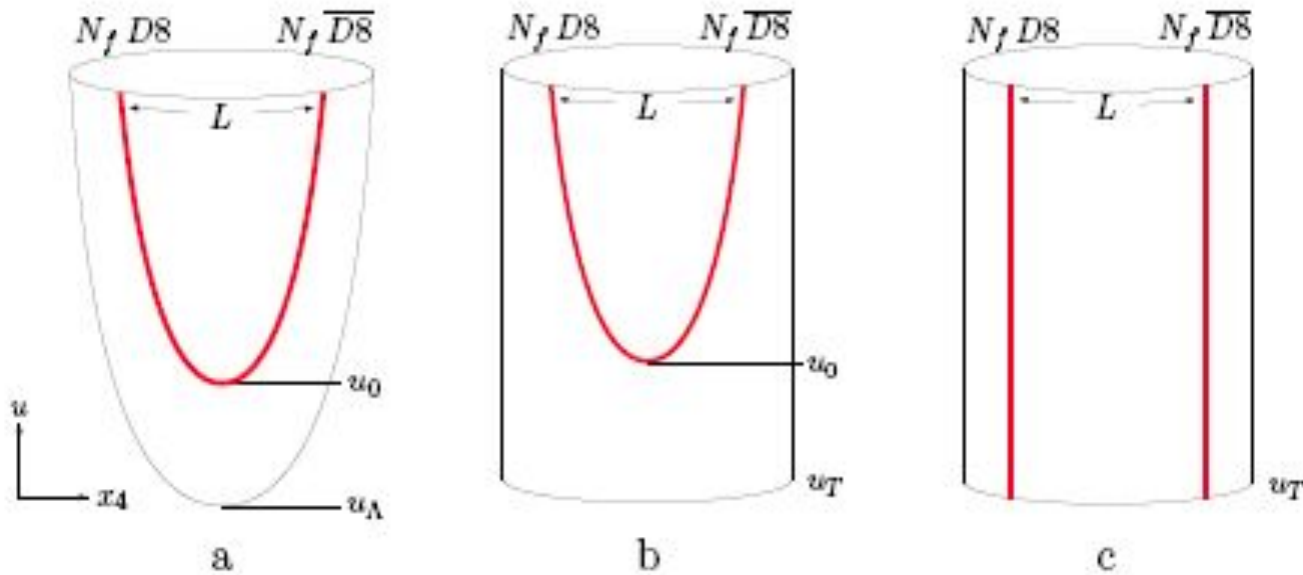


Figure 1: The 8-brane-anti-8-brane configuration at finite temperature: (a) confining phase (b) deconfinement with broken chiral symmetry (c) deconfinement with restored chiral symmetry.

Дуальное описание даёт аргументы в пользу того, что фазовые переходы К-Д и переход с восстановлением киральной симметрии разнесены по энергии

Неожиданное предсказание для отношения вязкости к энтропии в калибровочной теории в гидродинамическом режиме

$$\eta = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{1}{2\omega} \int dt d\vec{x} \langle T_{xy}(t, \vec{x}), T_{xy}(0, 0) \rangle e^{i\omega t}$$

$$\frac{\eta}{s} = \frac{\hbar}{4\pi k_B}$$

Kovtun, Son, Starinets 04

S-плотность энтропии, экспериментально наблюдаемое отношение. Гипотеза - это нижняя граница в общей ситуации

- Введение хиппотенциала эквивалентно введению U(1) связности на флэйворной бране  
Предсказание - в КХД с хиппотенциалом возникает смешивание векторных и аксиальных мезонов из члена CS

$$\mu \epsilon^{ijk} (\rho_i^a \partial_j a_k^a + a_i^a \partial_j \rho_k^a)$$

Harvey 07

---

# Заключение

- В последние годы происходил серьёзный прогресс в дуальном описании КХД
  - Можно ожидать больших неожиданностей в ближайшие годы
-