

Применение голографического уравнения состояния для численного моделирования эволюции кварк-глюонной плазмы

А. Ануфриев¹

¹ Санкт-Петербургский Государственный Университет

18 декабря 2024,
Петергоф

Семинар лаборатории физики сверхвысоких энергий

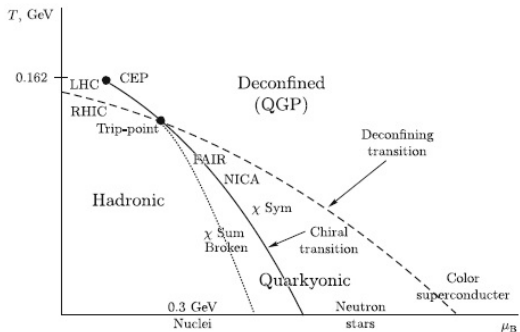
Содержание

- 1 Постановка задачи
- 2 Варианты решения
- 3 Модель
- 4 Практическая реализация преимуществ модели
- 5 Ожидаемые результаты
- 6 Перспективы

Открытые проблемы исследования фазовой диаграммы КХД

Критическая точка фазовой диаграммы - тройная точка?

Рис.: I. Ya. Aref'eva, "On the quarkyonic phase in the holographic approach", Theoret. and Math. Phys., 217, 3 (2023)



Важная проблема: детальное изучение фазовой диаграммы при $\mu_B > 0$.

AdS/CFT-соответствие

1993 - Г. Хофт предложил голографический принцип
Информация о материи в некотором пространстве \rightarrow
"плоская голограмма" (не более одной степени свободы на
планковскую площадь) на границе этого пространства.

1998: AdS/CFT - соответствие (Малдасена):

При некоторых граничных условиях имеет место дуальность
суперсимметричной теории Янга-Миллса и ПВ
суперструнной теории в низкоэнергетическом пределе.

Из решеточных вычислений КХД
- квазиконформно-инвариантна
при $T > 300$ МэВ, а состояние
деконфайнмента приближает её
к суперсимметричной теории
Янга-Миллса.

При некоторых
условиях
голографический
принцип
Мальдасены
применим к КХД.

Имеет место дуальность КХД и классической эйнштейновской
гравитации.

Дуальность термодинамических параметров черной дыры и кварк-глюонной плазмы, голографическое уравнение состояния КГП

Термодинамические характеристики кварк-глюонной плазмы:

T, E, P, μ Уравнение состояния
 $P = P(\varepsilon)$

Параметры деформации пространства AdS_5 :

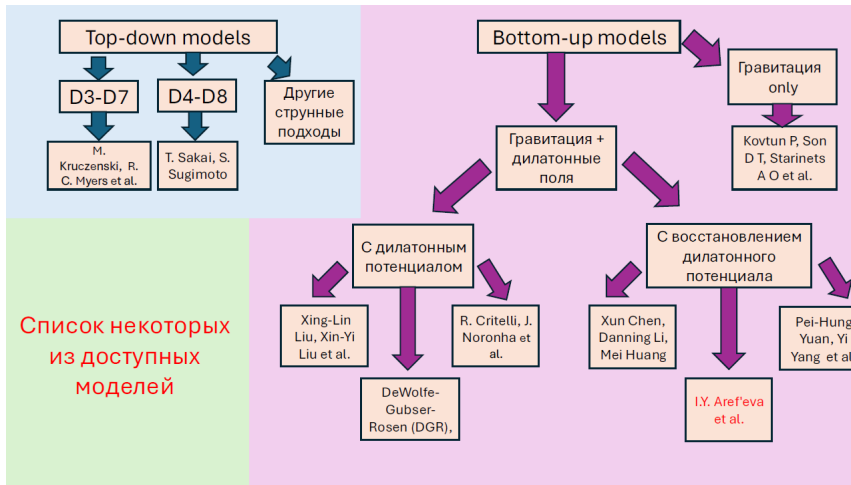
$T(z_h), S(z_h), z_h$ - характерный гравитационный горизонт, T, S - температура и энтропия соответствующей **черной дыры**, которые изучались Хокингом и Бекенштейном.

В 1996 г. Gubser S. S., Klebanov I. R. и Peet A. W. получили соотношения между термодинамическими параметрами черной D3-браны (черной дыры в пространстве $AdS_5 \times S^5$) и соответствующими параметрами в суперсимметричной теории Янга-Миллса

- $\frac{E}{L^3} = \frac{3\pi^3 T^4}{16G_5}$
- $\frac{S}{L^3} = \frac{3\pi^3 T^3}{12G_5}$

Из термодинамических соотношений, таким образом, можно вычислить зависимость $P = P(\varepsilon)$, т.е. голографическое уравнение состояния.

Основные типы голографических моделей



Голографическое уравнение состояния КГП в рамках модели с двойным дилатонным полем (И.Я. Арефьева)

Предлагаемый анзац:

$$ds^2 = \frac{L^2}{z^2} b(z) \left[-g(z) dt^2 + dx^2 + \left(\frac{z}{L}\right)^{2-\frac{2}{\nu}} dy_1^2 + \left(\frac{z}{L}\right)^{2-\frac{2}{\nu}} dy_2^2 + \frac{dz^2}{g(z)} \right],$$

Деформирующий фактор $b(z) = e^{2A(z)}$, L - радиус AdS, $g(z)$ - термодинамическая функция "почернения"

$A(z) = -\ln(bz^2 + 1)$ - модель "легких кварков"

$A(z) = -\frac{cz^2}{4}$ - модель "тяжелых кварков"

Преимущества подхода:

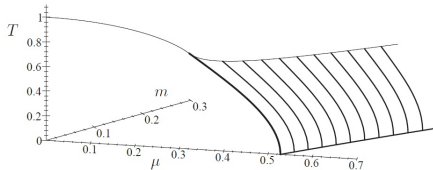
- Параметр анизотропии, введенный в рамках данной модели, позволяет голографически восстановить экспериментально подтвержденную на RHIC и LHC зависимость множественности от энергии с большой точностью [Aref'eva, A. Golubtsova, // JHEP, No. 04, 011 (2015).]
- Один из параметров модели подобран в соответствии с реджевскими спектрами кваркониев (случай тяжелых кварков) и ρ -мезонов (случай легких кварков)
- Остальные параметры модели фитируются с помощью результатов вычислений в рамках решеточной КХД
- Возможность изучения свойств ядерной материи при достаточно больших μ_b

Голографическое уравнение для физических масс кварков

По результатам исследования [M. Halasz et al. // Phys. Rev. D 58, 096007 (1998)] можно сделать вывод о том, что **нет существенного отличия фазовой структуры КХД в хиральном пределе и в случае физических масс кварков** (которые достаточно малы по сравнению с "тяжелым" случаем)

Идея

Параметры модели легких кварков фитируются в соответствии с вычислениями решеточной КХД для масс кварков, наиболее близких к физическим.



Свободные параметры модели легких кварков:

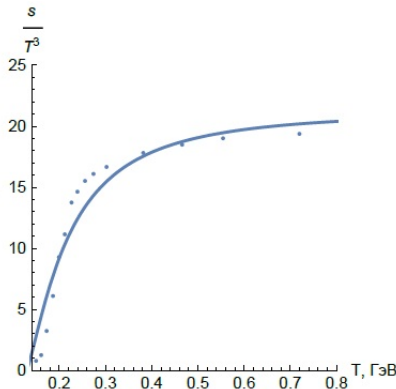
- ν - параметр **анизотропии**. $\nu = 1$ - изотропный случай, $\nu = 4, 5$ - анизотропный, восстанавливающий зависимость множественности от энергии
- c - параметр, отфитированный в [Meng-Wei Li et al. // Phys. Rev. D 96, 066013 (2017)] со значением $c = 0.227$ ГэВ² на **реджевские спектры ρ -мезонов**
- Параметр L - радиус AdS-пространства, который можно считать **характерным масштабом линейных размеров**.
- Безразмерный параметр a и параметр b , фитируемый в единицах ГэВ² появляются в функции взаимодействия дилатонного поля, выбранной в виде $A(z) = -a \ln(1 + bz^2)$

Голографическое уравнение для физических масс кварков

Фит совершался на основе результатов для величины $\frac{s}{T^3}$ в работе [M. Cheng et al.// Phys. Rev. D 77, 014511 (2008)]. В данной статье, посвященной решеточной КХД, наиболее близкие к физическим массы кварков получают путем задания известной массы ρ -мезона. Эта работа - очень популярный источник для фитирования параметров в рамках других голографических термодинамических моделей.

Результаты фита методом наименьших квадратов:

$$L = 1.4, a = 3.969, b = 0.011 \text{ ГэВ}^2.$$



Анизотропная модель

Экспериментальная
зависимость
множественности от
энергии

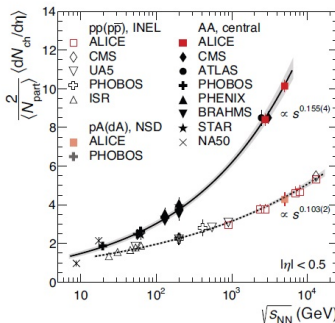
$$M \propto s^{0.15}$$

Результат в изотропных
голографических теориях

$$M \propto s^{\frac{1}{3}}$$

Результат в анизотропном
моделировании методами голографии
в рамках работ И.Я. Арефьевой

$$M \propto s^{\frac{1}{6}} \approx s^{0.16}$$



Настройка модели

И.Я Арефьева использует результаты вычислений на **анизотропной решетке** для настройки модели легких кварков. Аналогичные вычисления для физических масс кварков на данный момент **обнаружены не были**.

Включение голографического уравнения состояния в пакет релятивистской гидродинамики MUSIC

Был написан программный код на основе встроенных в MUSIC (<https://github.com/MUSIC-fluid/MUSIC.git>) методов считывания таблиц по результатам решеточной КХД:

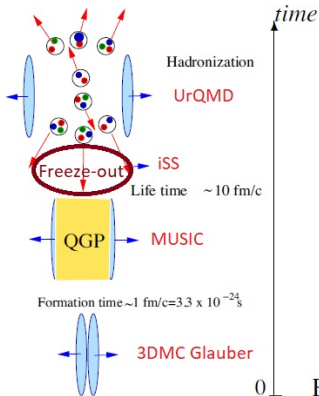
- 1 Строится двумерная таблица термодинамических величин (T, p, μ_b, e) по заданным s и ρ_b на основании формул модели И.Я.Арефьевой
- 2 По некоторому начальному профайлу энергетических и барионных плотностей, полученному в рамках сторонних программ, MUSIC интерполирует значения термодинамических величин в данной точке введенной сетки. Для этого был написан интерполятор, переводящий начальную энергетическую плотность в плотность энтропии.
- 3 По заданной плотности энтропии и барионной плотности с помощью стандартных интерполяторов MUSIC высчитываются температура, барионный потенциал и давление в каждой точке сетки
- 4 Весь этот функционал вшит в специально созданный класс `"eosEOSholo.h"` (`cpp`).input – MUSIC

Эволюция КГП в рамках пакета iEBE-MUSIC

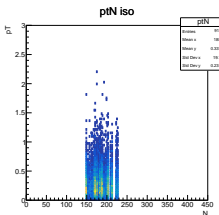
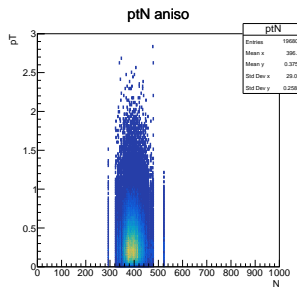
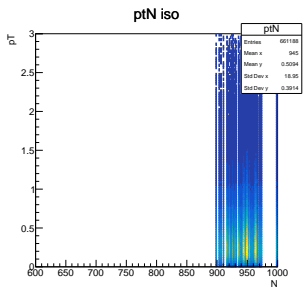
Пакет iEBE включает в себя набор моделей, предназначенных для исследований отдельных промежутов эволюции КГП и предоставляет широкий функционал для всестороннего изучения данного процесса на всех его этапах (<https://github.com/chunshen1987/iEBE-MUSIC.git>).

Структура эволюции КГП в рамках данного исследования:

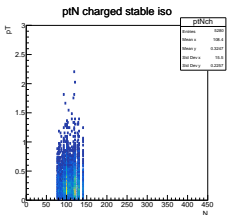
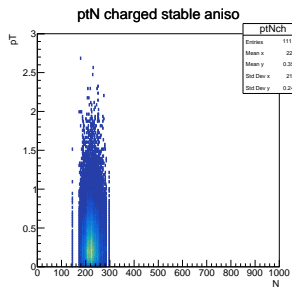
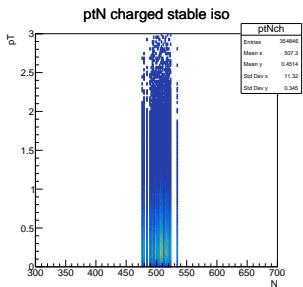
- 1 Начальный профайл энергии и барионной плотности рассчитывается в рамках модели **3D Monte-Carlo Glauber** для заданной кинематической области
- 2 Пакет **MUSIC** (модифицированный, включающий голографическое уравнение состояния) принимает на вход данный профайл и производит эволюцию КГП до наступления заданного фриззута
- 3 Пакет **iSS** производит Монте-Карло сэмплирование для получения конечного набора частиц на основании гиперповерхности на выходе MUSIC
- 4 Транспортная модель **UrQMD** позволяет получить финальный спектр адронов



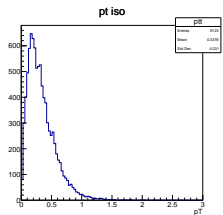
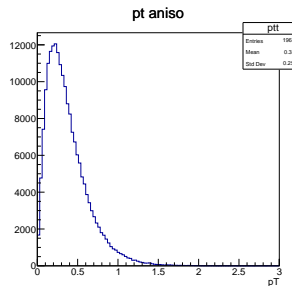
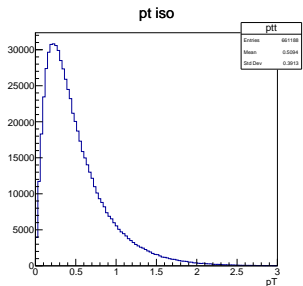
Предварительные результаты вычислений p_T -спектров



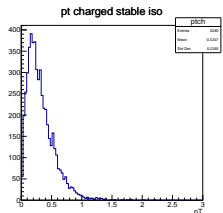
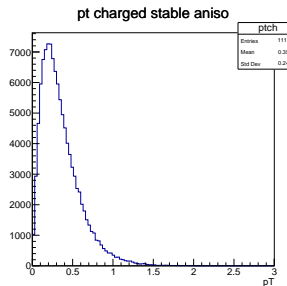
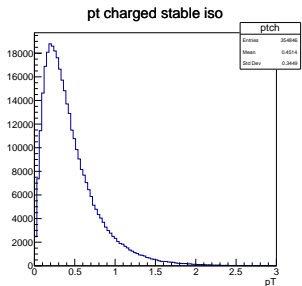
Предварительные результаты вычислений p_T -спектров



Предварительные результаты вычислений p_T -спектров



Предварительные результаты вычислений p_T -спектров



Открытые вопросы и Потенциал дальнейшего развития

1. Необходим поиск вычислений в рамках КХД на анизотропной решетке для физических масс кварков
2. Поиск голографической модели для физических масс кварков, сохраняющих все преимущества подхода И.Я.Арефьевой
3. Существует возможность голографического учета вторичного магнитного поля, порождаемого вылетающими заряженными частицами. Этот вопрос изучался в более поздних работах И.Я. Арефьевой
4. Пакет iEVE может быть модифицирован с помощью голографических моделей для термализации и фризаута

Спасибо за внимание!