

Решеточное моделирование теории сильных взаимодействий на суперкомпьютере "Говорун"

В.В. Брагута

ОИЯИ

14 июня, 2024

Таблица элементарных частиц

THE STANDARD MODEL					
	Fermions			Bosons	
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	Force carriers
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon	

Доклад посвящен изучению кварков, глюонов и их взаимодействий

Теория сильных взаимодействий (КХД)

- ▶ КХД похожа на электродинамику
Неабелева калибровочная теория (группа $SU(3)$)
- ▶ Уравнения Максвелла
 - ▶ КЭД: линейные
 - ▶ КХД: нелинейные
- ▶ Константы связи
 - ▶ КЭД: $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} = \frac{1}{137}$
 - ▶ КХД: $\alpha_s = \frac{g^2}{4\pi\hbar c} \sim 1$
- ▶ КХД сильно взаимодействующая нелинейная теория
- ▶ Множество приложений:
ядерная физика, астрофизика, космология, элементарные частицы...

Теория сильных взаимодействий (КХД)

- ▶ КХД похожа на электродинамику
Неабелева калибровочная теория (группа $SU(3)$)
- ▶ Уравнения Максвелла
 - ▶ КЭД: линейные
 - ▶ КХД: нелинейные
- ▶ Константы связи
 - ▶ КЭД: $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} = \frac{1}{137}$
 - ▶ КХД: $\alpha_s = \frac{g^2}{4\pi\hbar c} \sim 1$
- ▶ КХД сильно взаимодействующая нелинейная теория
- ▶ Множество приложений:
ядерная физика, астрофизика, космология, элементарные частицы...

Одна из самых сложных физических теорий!

Теория сильных взаимодействий (КХД)

Лагранжиан КХД

- ▶ Степени свободы
 - ▶ Кварки q (электрон в КЭД)
 - ▶ Глюоны A, F_a (фотон в КЭД)
- ▶ Лагранжиан КХД

$$L = -\frac{1}{4} \sum_{a=1}^8 F_a^{\mu\nu} F_{\mu\nu}^a + \sum_{f=u,d,s,\dots} \bar{q}_f (i\gamma^\mu \partial_\mu - m) q_f + g \sum_{f=1}^{N_f} \bar{q} \gamma^\mu \hat{A}_\mu q$$

- ▶ Лагранжиан КХД хорошо известен, однако не позволяет делать теоретических предсказаний

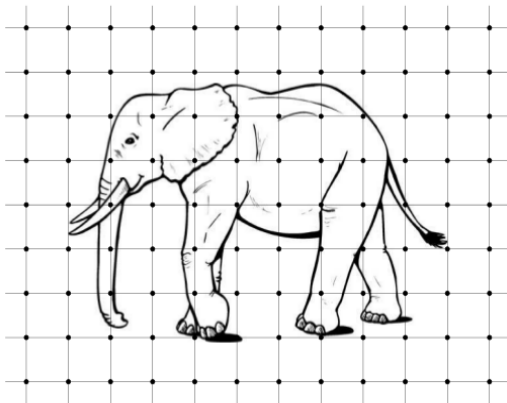
Теория сильных взаимодействий (КХД)

Лагранжиан КХД

- ▶ Степени свободы
 - ▶ Кварки q (электрон в КЭД)
 - ▶ Глюоны A, F_a (фотон в КЭД)
- ▶ Лагранжиан КХД

$$L = -\frac{1}{4} \sum_{a=1}^8 F_a^{\mu\nu} F_{\mu\nu}^a + \sum_{f=u,d,s,\dots} \bar{q}_f (i\gamma^\mu \partial_\mu - m) q_f + g \sum_{f=1}^{N_f} \bar{q} \gamma^\mu \hat{A}_\mu q$$

- ▶ **Лагранжиан КХД хорошо известен, однако не позволяет делать теоретических предсказаний**
 - ▶ **В частности:** Вывод явления конфайнмент из лагранжиана КХД - задача тысячелетия

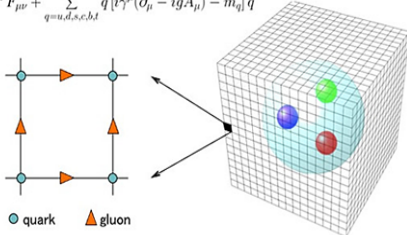


Метод решеточного моделирования

- ▶ Позволяет изучать системы с сильным взаимодействием
- ▶ Основан на первопринципах КТП
- ▶ Самый перспективный метод благодаря современным суперкомпьютерам и алгоритмам

Построение решеточной КХД

QCD Lagrangian

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \sum_{q=u,d,s,c,b,t} \bar{q} [i\gamma^\mu(\partial_\mu - igA_\mu) - m_q] q$$


● quark ▲ gluon

- ▶ Вводим 4х мерную решетку $N_s \times N_s \times N_s \times N_t = N_s^3 \times N_t$
- ▶ Шаг решетки— a
- ▶ Степени свободы
 - ▶ **Глюоны:** Матрицы 3×3 $U \in SU(3)$ на линках
 - ▶ **Кварки:** Столбцы q, \bar{q} , на узлах

Решеточное моделирование КХД

- ▶ Вычисляем статистическую сумму
(термодинамическое равновесие!)
$$Z_l \sim \int DU e^{-S_G(U)} \prod_i \det(\hat{D}_i(U) + m_i) = \int DU e^{-S_{eff}(U)}$$
- ▶ Вычисления методом Гибридного Монте-Карло
(генерация глюонных конфигураций с весом $e^{-S_{eff}(U)}$)
- ▶ Проводим экстраполяцию $a \rightarrow 0$
- ▶ Метод основан на первопринципах. Не содержит каких-либо предположений!
- ▶ Параметры: g и массы кварков
- ▶ Статистические и систематические (эффекты дискретизации и эффекты конечного объема) ошибки можно систематически уменьшать

$$Z_l \sim \int DU e^{-S_G(U)} \prod_{i=u,d,s,\dots} \det(\hat{D}_i(U) + m_i)$$

- ▶ Решетки
 - ▶ 96×48^3
 - ▶ Переменные интегрирования: $96 \cdot 48^3 \cdot 4 \cdot 8 \sim 300 \cdot 10^6$
 - ▶ Работа с матрицами: $100 \cdot 10^6 \times 100 \cdot 10^6$
- ▶ Расчеты с динамическими u, d, s, c -кварками
- ▶ Физические массы u, d, s, c кварков
- ▶ Шаг решетки вплоть до $a \sim 0.05$ fm

Приложения

- ▶ Спектроскопия
- ▶ Матричные элементы, корреляционные функции
- ▶ Термодинамические свойства КХД
- ▶ Транспортные свойства КХД
- ▶ Фазовые переходы в КХД
- ▶ Ядерная физика
- ▶ Свойства КХД в экстремальных условиях (магнитное поле, барионная плотность, изоспиновая плотность, вращение,...)
- ▶ Топологические свойства/объекты в КХД
- ▶ Расширения СМ в сильной связи
- ▶ ...

Решеточное моделирование в России

- ▶ Вычисления проводятся на суперкомпьютере "Говорун"
- ▶ **Вычислительные системы, коды и алгоритмы мирового уровня**
 - ▶ Расчеты с динамическими u , d , s , c -кварками
 - ▶ Физические массы u , d , s , c кварков
 - ▶ Шаг решетки вплоть до $a \sim 0.05$ fm
- ▶ **Множество важных результатов впервые получены в нашей группе!**

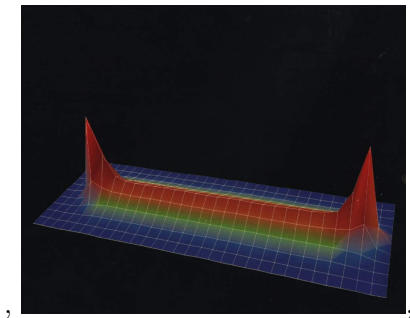
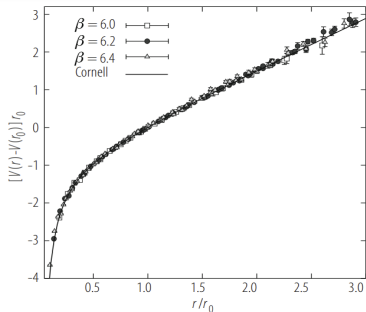
Направления исследований

- ▶ Термодинамические свойства КХД
- ▶ Транспортные свойства КХД
- ▶ Фазовые переходы в КХД
- ▶ Свойства КХД в экстремальных условиях (магнитное поле, барионная плотность, изоспиновая плотность, киральная плотность, вращение,...)
- ▶ Топологические свойства/объекты в КХД

Впервые исследовано в нашей группе

- ▶ $SU(2)$ КХД при сверхвысокой барионной плотности
- ▶ КХД при ненулевой киральной плотности
- ▶ КХД при ненулевой барионной плотности во внешнем магнитном поле
 - ▶ Фазовая диаграмма
 - ▶ Уравнение состояния
- ▶ Транспортные свойства КХД
 - ▶ Проводимость КГП при ненулевой барионной плотности
 - ▶ Киральный магнитный эффект и магнитосопротивление
- ▶ Влияние релятивистского вращения на свойства КХД
 - ▶ КХД в сильном внешнем гравитационном поле
 - ▶ Фазовая диаграмма
 - ▶ Уравнение состояния и момент инерции
 - ▶ Пространственные фазовые переходы в КГП

Конфайнмент в численных расчетах



- ▶ Задача тысячелетия - конфайнмент
- ▶ Современными методами решается за 1 час на ноутбуке

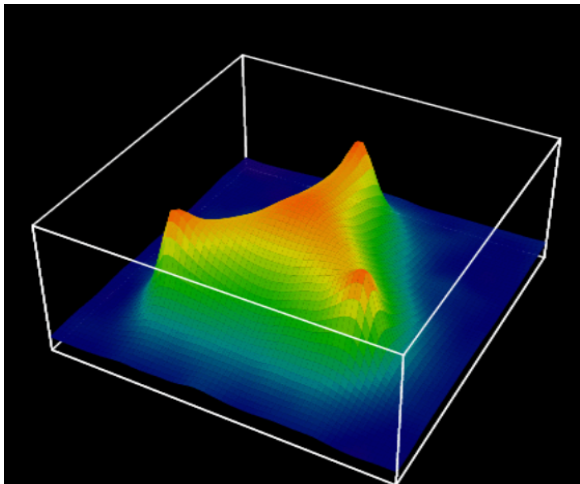
Из чего состоит материя?

- ▶ В окружающей нас природе хорошо выполняется закон
$$M \simeq \sum_i M_i$$
- ▶ В теории сильных взаимодействий
$$p(uud) \quad M_p c^2 = 938 \text{ МэВ} \gg (m_u + m_u + m_d)c^2 = 12 \text{ МэВ}$$
$$n(udd) \quad M_n c^2 = 940 \text{ МэВ} \gg (m_u + m_d + m_d)c^2 = 15 \text{ МэВ}$$

Из чего состоит материя?

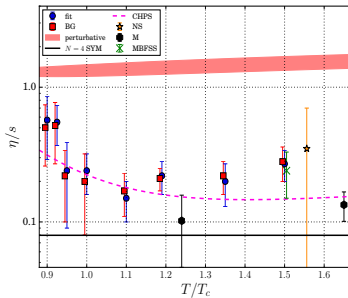
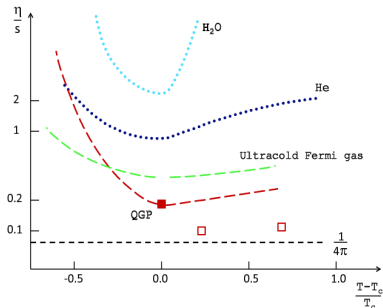
- ▶ В окружающей нас природе хорошо выполняется закон $M \simeq \sum_i M_i$
- ▶ В теории сильных взаимодействий
 $p(uud) \quad M_p c^2 = 938 \text{ МэВ} \gg (m_u + m_u + m_d)c^2 = 12 \text{ МэВ}$
 $n(udd) \quad M_n c^2 = 940 \text{ МэВ} \gg (m_u + m_d + m_d)c^2 = 15 \text{ МэВ}$
- ▶ Где остальная масса?

Хромозлектрические поля в протоне



- ▶ Мы состоим из глюонов на 98%!

Транспортные свойства КХД: вязкость

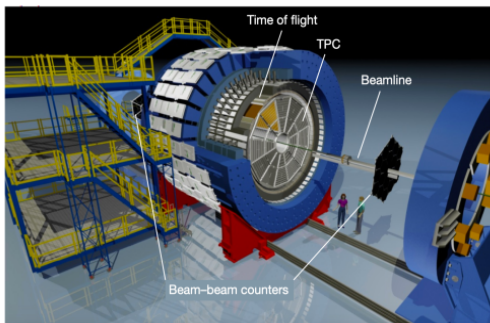


- ▶ КТП не похожа на газ кварков и глюонов
- ▶ Самая сверхтекучая жидкость
- ▶ Результат близок к $N=4$ SYM $\frac{\eta}{s} = \frac{1}{4\pi}$

The most vortical fluid ever observed

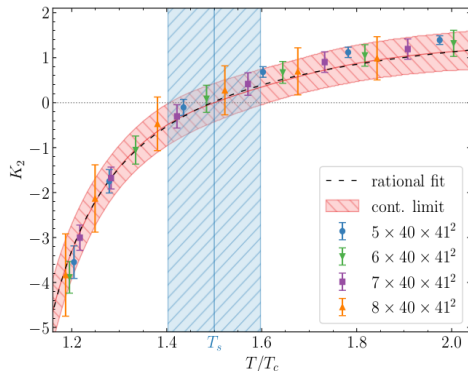
The experimental result for the vorticity:

$$\omega \approx (9 \pm 1) \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$$



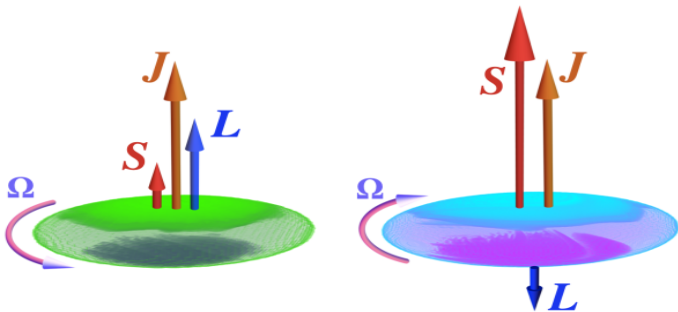
The STAR Collaboration, *Nature* 62, 548 (2017)

Момент инерции кварк-глюонной плазмы



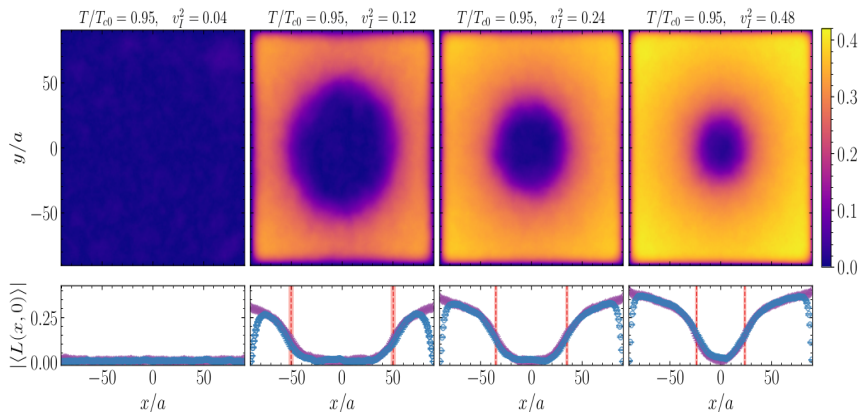
- ▶ Момент инерции КГП отрицателен вплоть до $1.5T_c$
- ▶ $I < 0$ связан с хромомангнитным конденсатом и масштабной аномалией

Отрицательный эффект Барнетта



- ▶ $J = I\Omega = -\left(\frac{\partial F}{\partial \Omega}\right)_T$
- ▶ $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$

Пространственно-неоднородный фазовый переход



- ▶ В КГП центробежная сила разделяет фазы
- ▶ В центре-конфайнмент, на периферии-деконфайнмент

Заключение

- ▶ КХД - теория сильных взаимодействий с очень интересными свойствами
- ▶ Самый перспективный метод изучения КХД - решеточное моделирование
- ▶ **Решеточная группа ОИЯИ успешно проводит исследования на самом передовом мировом научном уровне**

Спасибо за внимание!