

МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА

Физический факультет  
Кафедра физики элементарных частиц

Фемтоскопия как метод исследования  
кварк-глюонной плазмы

Курсовая работа студента 212 группы  
Манухова Степана Ильича

Навучный руководитель:  
к. ф.-м. н., ст. н. с. ЛФВЭ  
ОИЯИ, Апарин А. А.

Заведующий кафедры:  
Академик РАН Матвеев В. А.

Москва, 2020 г.

# Содержание

1	Структура адронной материи	2
2	Кварк-глюонная плазма	5
3	Фазовая диаграмма КХД	7
4	Введение в фемтоскопию	9
5	Экспериментальные результаты	9
6	Выводы	9
7	Литература	9

# 1 Структура адронной материи

Для понимания сути явления стоит начать со структуры материи, которая нас окружает. Известно, что все вещество состоит из атомов, которые, в свою очередь состоят из электронных оболочек и ядер. Ядра состоят из нуклонов: протонов или нейтронов. Нуклоны состоят из夸рков.

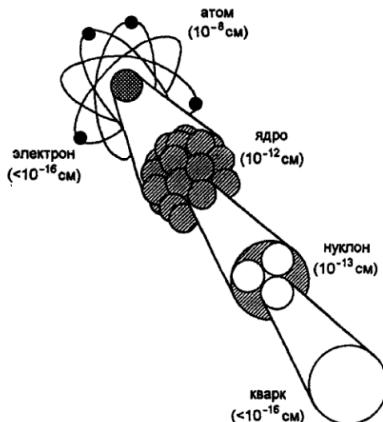


Рис. 1: Структура материи

Нас будет интересовать последний уровень структуры материи, то есть夸рки и частицы, которые из них состоят - адроны, а также их взаимодействие. Всего есть 6夸рков, которые обозначаются буквами u, d, s, c, t и b (от слов up, down, strange, charm, top и bottom). Основные идеи, связанные с моделью夸рков, состоят в следующем:

- Все сильновзаимодействующие частицы состоят из夸рков;夸рки являются фермионами; по современным представлениям они бесструктурны.
- К夸рки имеют внутренние квантовые числа: электрический заряд  $Q$ , спин  $1/2$ , четность  $P$ , барионное число  $B$ , изоспин  $I$ , проекцию изоспина  $I_3$ , странность  $s$ , charm  $c$ , bottomness  $b$ , topness  $t$ . Совокупность этих внутренних квантовых чисел, характеризующих определенный тип夸рка, называется также "ароматом"夸рка. Характеристики夸рков приведены в таблице 1.
- Квантовые числа夸рков определяют характеристики адронов.

- Барионы (фермионы с барионным числом  $B = 1$ ) строятся из трех кварков.
- Антибарионы (фермионы с барионным числом  $B = -1$ ) строятся из трех антикварков.
- Мезоны (бозоны с барионным числом  $B = 0$ ) строятся из кварка и антикварка.
- Квантовое число "цвет" приписывается всем кваркам независимо от типа (аромата). Цвет имеет три значения. Обычно их обозначают красный (K), зеленый (Z), синий (C). Кварк обладает единичным цветовым зарядом K, Z или C. Цвет соответствующего антикварка обозначается  $\bar{K}$  (антикрасный),  $\bar{Z}$  (антизеленый),  $\bar{C}$  (антисиний) и является дополнительным к цвету кварка.
- Известные барионы и мезоны - бесцветны; в них все цвета смешаны равномерно
- Кварки в адронах взаимодействуют с помощью глюонов g.

Таблица 1: Основные характеристики кварков

Тип кварка	d	u	s	c	t	b
Заряд Q	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$
Барионный заряд B	$1/3$	$1/3$	$1/3$	$1/3$	$1/3$	$1/3$
Спин J, $\hbar$	$+1/2$	$+1/2$	$+1/2$	$+1/2$	$+1/2$	$+1/2$
Четность P	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$
Изоспин I	$1/2$	$1/2$	$0$	$0$	$0$	$0$
Пр. изоспина $I_3$	$-1/2$	$+1/2$	$0$	$0$	$0$	$0$
Масса кварка, МэВ	4.8	2.3	95	$1.3 * 10^3$	$4.5 * 10^3$	$174 * 10^3$

Вернемся к понятию цветового заряда (цвета). Цветовым зарядом обладают кварки, а также переносчики сильного взаимодействия, глюоны. Кварки и глюоны взаимодействуют между собой, в некотором смысле, аналогично электрическим зарядам, однако, в отличие от электрических зарядов, у которых два знака, цветов три. Второе принципиальное отличие заключается в том, что цветовым зарядом обладает переносчик сильного взаимодействие - глюон, в то время как фотон, переносчик электромагнитного взаимодействия, электрическим зарядом не обладает. Оказывается, что кварки и глюоны, взаимодействующие описанным образом, могут существовать только как бесцветные структуры. Барион, состоящий из трех кварков, бесцветен, хотя кварки, нахо-

дящиеся внутри него обладают цветовым зарядом (например, в комбинации синий+зеленый+красный, см. рис. 2). Мезон, состоящий двух夸克ов обладает аналогичными свойствами (например, в комбинации красный+антикрасный). После этого становится понятно, почему夸克 в свободном состоянии не наблюдаются - они обладают цветовым зарядом, в то время как все夸ковые структуры для адекватного существования должны быть безцветными.

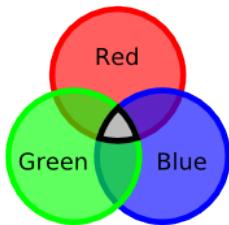


Рис. 2: Образование безцветной структуры из夸克ов, которые обладают цветом

Важной особенностью адронной материи является так называемая асимптотическая свобода夸克ов. Это физическое явление, заключающееся в том, что взаимодействие между夸克ами становится сколь угодно малым при уменьшении расстояния между частицами. При этом чем дальше разнесены夸克и, тем сильнее они взаимодействуют. Может возникнуть вопрос, что будет все-таки происходить, если мы "возьмем" один夸克, и попытаемся его "вытащить" из адрона, постепенно отдаляя от остальных夸克ов в частице? На рисунке 3 изображена подобная ситуация. Один из夸克ов протона ( $u$ -夸克) находится далеко от двух других, поэтому его сильно притягивает к остальным. Если продолжить отдалять  $u$ -夸克, преодолевая это притяжение, то, рано или поздно, окажется энергетически более выгодно создание пары夸к-анти夸к (например,  $s$  и  $\bar{s}$ ), с образованием двух частиц: бариона и мезона. В данном случае это будут  $\Lambda$ -гиперон и  $K^+$ -мезон. Такая ситуация наблюдается в столкновении  $p + p \rightarrow p + \Lambda + K^+$ .

Асимптотическая свобода夸克ов подтверждает невозможность наблюдения свободных夸克ов.

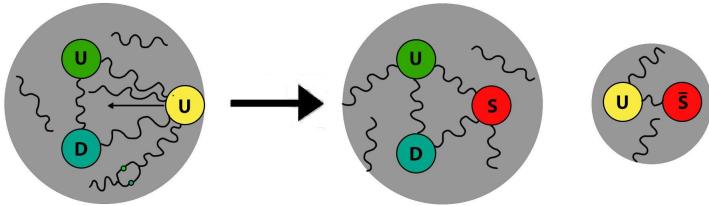


Рис. 3: Асимптотическая свобода кварков

## 2 Кварк-глюонная плазма

Практически одновременно с появлением квантовой хромодинамики (КХД) возникли идеи о том, что адронная материя может существовать в другом состоянии. В состоянии газа свободных夸克ов и глюонов. То есть на столько плотном ( $\sim 10$  ядерных плотностей) и высокоэнергетичном (температура  $T \sim 150\text{--}160$  МэВ) состоянии, что "оболочки" адронов уничтожаются из-за высокого давления, и夸克и, находящиеся в них, становятся свободными. Это не противоречит идеи асимптотической свободы夸克ов, так как夸克и в таком состоянии находятся на столько близко, что взаимодействие между ними, согласно описанной выше модели, спадает на нет.

Для получения кварк-глюонной плазмы (КГП) нужно реализовать или очень высокую температуру, или очень высокое давление, или то, и другое. Этого, оказывается, можно достичь, если взять ядра, желательно тяжелых элементов, и столкнуть их в коллайдере (например, ядра золота при энергии в системе центра масс  $\sqrt{s_{NN}} \sim 200$  ГэВ будет вполне, как показывают результаты, достаточно). В таком случае будут происходить события, условно изображенные на рисунке 4. Ядра элементов, состоящие из большого количества нуклонов, ввиду релятивистского сжатия похожие на диск, будут лежать друг на друга (а). (Шариками показаны нуклоны внутри ядра). Затем произойдет столкновение, в результате которого начнет образовываться горячая материя (б). Далее будет происходить расширение и дальнейшее увеличение области горячей материи (файербола) (с). Затем, в какой-то момент, файербол распадается на отдельные адроны, которые все еще будут взаимодействовать друг между другом (состояние до химической заморозки) (д). Спустя еще какое-то время файербол окончательно распадается на адроны, которые уже не будут взаимодействовать, а смогут только распадаться (состояние после химической заморозки) (е).

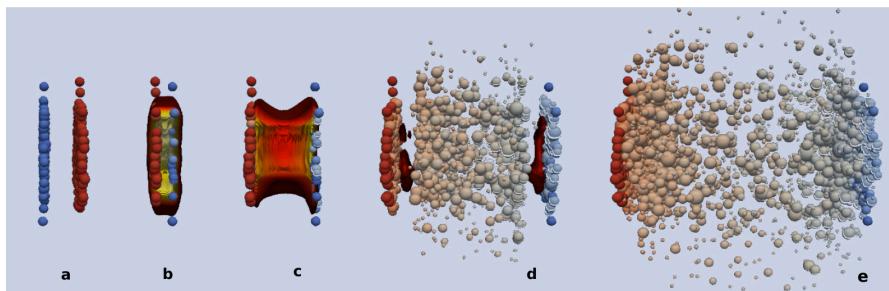


Рис. 4: Соударение ядер тяжелых элементов, образование области горячей материи, дальнейший распад на адроны

На рисунке 4 изображено идеальное центральное столкновение. Важно понимать, что это не всегда так, и, в действительности, когда ядра элементов летят не строго лоб-в-лоб, они лишь частично задевают друг друга. При этом горячая материя получается из области перекрытия. Данная ситуация изображена на рисунке 5. Ввиду закона сохранения момента количества движения, логично предположить, что файербол будет закручен, а значит и движение частиц, образовавшихся после распада файербола, будет скоррелированным. Эту идею мы будем использовать в дальнейшем.

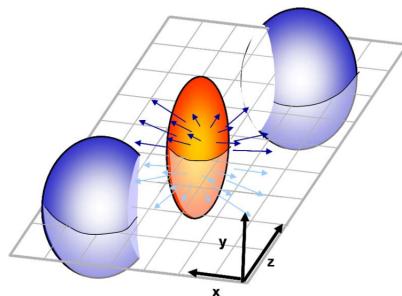


Рис. 5: Нецентральное столкновение ядер

### 3 Фазовая диаграмма КХД

Для того, чтобы охарактеризовать состояние адронной материи, аналогично с веществом, состоящим из атомов и молекул, используют фазовую диаграмму. Но в отличии от привычных координат ( $T, P$ ), где  $T$  - температура, а  $P$  - давление, используют координаты ( $T, \mu$ ), где  $T$  - температура в МэВ, а  $\mu$  - барионный химический потенциал в МэВ. Напомним, что химический потенциал - это термодинамическая функция, применяемая при описании состояния системы, с переменным числом частиц. Химический потенциал равен энергии добавления одной частицы в систему без совершения работы. Из определения следует, что при добавлении в систему  $dN$  частиц энергия этой системы изменяется на  $dE = \mu * dN$ . (Поясним смысл химического потенциала на примере ядерной материи. Мы знаем, что масса покоя образующих ядерную материю частиц, нуклонов, равна, примерно, 940 МэВ. Также известно, что энергия связи в ядре равна  $\sim 10$  МэВ. Значит, при внесении нового нуклона энергия системы изменится на  $dE = \mu * dN = \mu \simeq 940 - 10 = 930$  МэВ.)

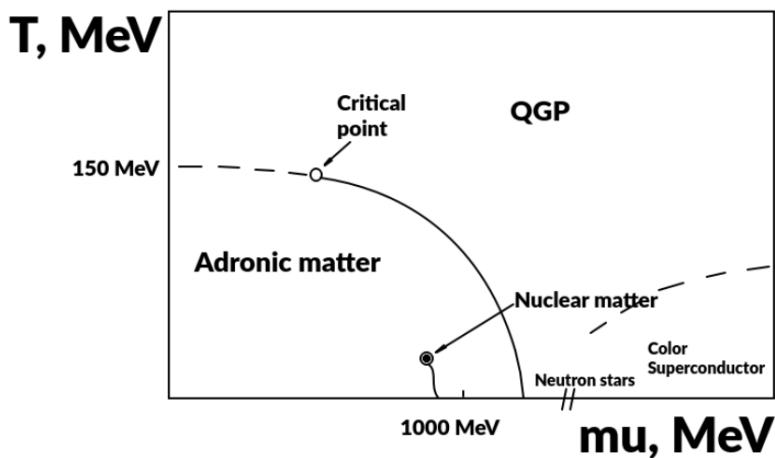


Рис. 6: Фазовая диаграмма КХД

На фазовой диаграмме изображены:

- Адронная материя. В этой области адроны существуют в виде газа частиц, имеющих два или три кварка.

- Ядерная материя. В этой области адроны образуют ядра атомов и молекул.
- Кварк-глюонная плазма. В этой области адронная материя переходит в новое фазовое состояние - газ свободных夸克ов и глюонов.
- Нейтронные звезды, цветная сверхпроводимость и пр. Находится при больших значениях барионного химического потенциала. В работе не рассматривается.

Возможны различные переходы между адронной материи и кварк глюонной плазмой:

- Кроссовер. Это плавный переход из одного фазового состояния в другое, не сопровождающийся резким скачком термодинамических потенциалов (конкретно, потенциала Гиббса), как это происходит в фазовых переходах. (Пример кроссовера - плавление пластилина, которое происходит плавно, без ярко выраженного фазового перехода). Кроссовер при переходе из адронной материи в КГП происходит при температуре  $T \sim 130 \div 180 \text{ МэВ}$  и хим. потенциале  $\mu \rightarrow 0$ . Изображен пунктирной линией.
- Фазовый переход первого рода. Это переход, в котором происходит резкий скачок термодинамических потенциалов, однако их первые производные остаются непрерывными. (Пример - плавление воды). Фазовый переход первого рода из адронной материи в КГП происходит при более высоких значениях хим. потенциала, нежели кроссовер. Изображен сплошной линией.

Существование двух принципиально различных способов перехода гарантирует наличие некоторой критической точки, которая также изображена на диаграмме.

- 4 Введение в фемтоскопию
- 5 Экспериментальные результаты
- 6 Выводы
- 7 Литература

$$\Psi(r, t) = \frac{A_0}{r} e^{i(\omega t + kr + \varphi_0)}$$