

Решеточное моделирование теории сильного взаимодействия (КХД)

В. В. Брагута

24 ноября 2024 г.

Таблица элементарных частиц

Standard Model of Elementary Particles

		three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
		I	II	III		
mass		$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
		u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
		d down	s strange	b bottom	γ photon	
		e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

QUARKS (left side, purple text)

LEPTONS (left side, green text)

SCALAR BOSONS (right side, yellow text)

GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS (right side, red text)

Материя и переносчики взаимодействия



Кварковая модель: барионы

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.

There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Кварковая модель: мезоны

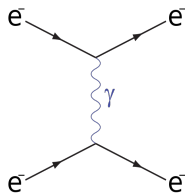
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Сила взаимодействия

- ▶ Потенциал взаимодействия: $V(r)$
- ▶ Сила взаимодействия: $F = -\frac{dV(r)}{dr}$
- ▶ Закон Кулона: $F = \frac{e^2}{r^2}$
- ▶ Сила взаимодействия между электронами определяется константой: e^2
- ▶ Константа связи $\alpha_{em} = \frac{e^2}{\hbar c} \simeq \frac{1}{137}$

Электродинамика

- ▶ Взаимодействие заряженных частиц
- ▶ Переносчик взаимодействия: фотон ($m=0$, $q=0$)
- ▶ Фотоны не взаимодействуют
- ▶ Сила взаимодействия $\alpha_{em} \simeq \frac{1}{137} \ll 1$
- ▶ Физ. величины можно разложить в ряд:
$$f(\alpha_{em}) = f(0) + f'(0)\alpha_{em} + \frac{1}{2}f''(0)\alpha_{em}^2 + \dots$$



Электродинамика и уравнения Максвелла

$$\operatorname{div} E = 4\pi\rho$$

$$\operatorname{div} H = 0$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{1}{c} \frac{\partial H}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} H = \frac{4\pi}{c} j + \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t}$$

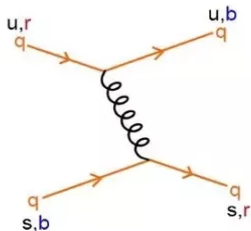
- Уравнения Максвелла - линейные

Теория сильного взаимодействия

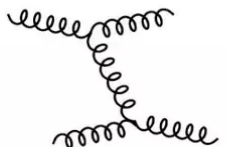
- ▶ Заряд в теории сильного взаимодействия g
- ▶ Закон Кулона $F \sim \frac{g^2}{r^2}$
- ▶ Новое квантовое число - цвет (всего 3 цвета)
- ▶ Кварки могут быть **красными**, **зелеными**, **синими**
- ▶ Поэтому Квантовая Хромодинамика (КХД)
- ▶ Сила взаимодействия $\alpha_s \simeq \frac{g^2}{\hbar c} \sim 1$
- ▶ Поэтому взаимодействие - сильное
- ▶ Физ. величины нельзя разложить в ряд
$$f(\alpha_{em}) = f(0) + f'(0)\alpha_s + \frac{1}{2}f''(0)\alpha_s^2 + \dots$$

Теория сильного взаимодействия

- ▶ Переносчик взаимодействия: глюоны ($m=0$, $Q = g$)
- ▶ Сколько глюонов? цвет \times цвет = $3 \times 3 = 9$
кк, кз, кс, зк, зз, зс, ск, сз, сс
- ▶ На самом деле 8
- ▶ Глюоны заряжены и взаимодействуют друг с другом



gluon exchange by 2 quarks



gluon-gluon scattering

Уравнения Максвелла в КХД

$$\operatorname{div} E^a = 4\pi\rho^a + f_1(A, E, H, \dots)$$

$$\operatorname{div} H^a = 0 + f_2(A, E, H, \dots)$$

$$\operatorname{rot} E^a = -\frac{1}{c} \frac{\partial H^a}{\partial t} + f_3(A, E, H, \dots)$$

$$\operatorname{rot} H^a = \frac{4\pi}{c} j^a + \frac{1}{c} \frac{\partial E^a}{\partial t} + f_4(A, E, H, \dots)$$

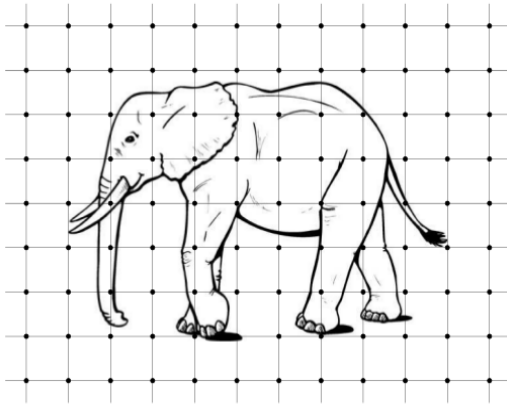
- ▶ Уравнения Максвелла для КХД - нелинейные

Квантовая Хромодинамика (КХД)

Свойства КХД

- ▶ Степени свободы
 - ▶ Кварки q
 - ▶ Глюоны A
- ▶ Нелинейные уравнения движения с $g \sim 1$
- ▶ **Самая сложная физическая теория**
- ▶ Лагранжиан КХД хорошо известен, но аналитическое вычисление наблюдаемых невозможно
 - ▶ *В частности: Вывод конфайнмента из лагранжиана КХД – задача тысячелетия*
- ▶ Надежные вычисления возможны только на современных суперкомпьютерах
- ▶ Огромное количество ресурсов в мире тратится для изучения КХД

Решеточное моделирование КХД



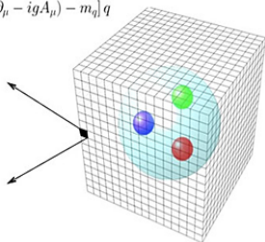
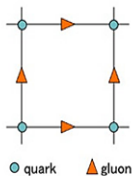
Метод решеточного моделирования

- ▶ Позволяет изучать сильно взаимодействующие нелинейные системы
- ▶ Основан на первопринципах квантовой теории поля
- ▶ В области КХД метод вне конкуренции благодаря развитию суперкомпьютеров и алгоритмов

Построение решеточной КХД

QCD Lagrangian

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



- ▶ Вводим 4-х мерную решетку
 $N_s \times N_s \times N_s \times N_t = N_s^3 \times N_t$
- ▶ Шаг решетки— a
- ▶ **Степени свободы**
 - ▶ **Глюонные поля:** 3×3 матрицы $U \in SU(3)$, линки
 - ▶ **Кварковые поля:** q, \bar{q} , узлы

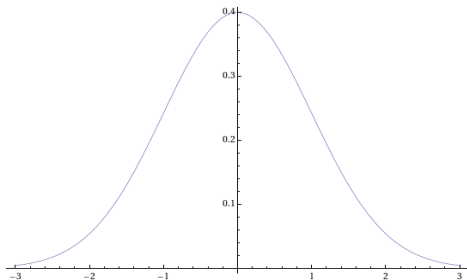
Построение решеточной КХД

- ▶ Вычисляем статистическую сумму КХД - интеграл!
(термодинамическое равновесие!)
$$Z_l = \int DU \exp\left(-\frac{E_g}{T}\right) \times \det(\hat{\mathbf{D}}(\mathbf{U}) + \mathbf{m}) = \int DU e^{-E_{\text{eff}}(U)}$$
- ▶ Вычисления методом Монте-Карло
(генерация глюонных конфигураций с весом $e^{-E_{\text{eff}}(\mathbf{U})}$)
- ▶ Проводим экстраполяцию $a \rightarrow 0$
- ▶ Метод основан на первопринципах. Не содержит каких-либо предположений!
- ▶ Параметры: g и массы кварков
- ▶ Статистические и систематические ошибки можно систематически уменьшать

$$Z_l \sim \int DU e^{-E_{eff}(U)}$$

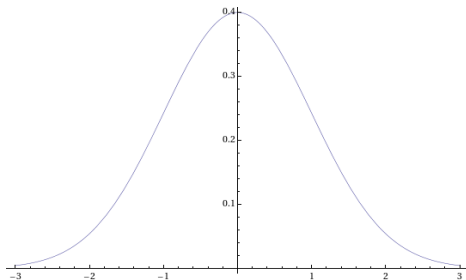
- ▶ Решетки
 - ▶ 96×48^3
 - ▶ Переменные интегрирования: $96 \cdot 48^3 \cdot 4 \cdot 8 \sim 300 \cdot 10^6$
 - ▶ Работа с матрицами: $100 \cdot 10^6 \times 100 \cdot 10^6$
- ▶ Расчеты с динамическими u, d, s, c -кварками
- ▶ Физические массы u, d, s, c кварков
- ▶ Шаг решетки вплоть до $a \sim 0.05$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

Метод Монте-Карло



- ▶ Считаем интеграл: $I = \int_{-\infty}^{+\infty} dx \frac{e^{-x^2/2}}{\sqrt{2\pi}} = \int_{-\infty}^{+\infty} dx f(x) = 1$
- ▶ Генерируем последовательность случайных чисел: $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$ на отрезке $x \in [-c, c]$
- ▶ $I_N = \frac{2c}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i)$
- ▶ $\lim_{N \rightarrow \infty} I_N = I$
- ▶ $I_{10} = 0.8836, \quad I_{100} = 1.0708, \quad I_{1000} = 0.9807,$
 $I_{10000} = 0.9983, \quad I_{100000} = 1.0018$

Метод Монте-Карло



- ▶ Считаем интеграл: $I = \int_{-\infty}^{+\infty} dx \frac{e^{-x^2/2}}{\sqrt{2\pi}} = \int_{-\infty}^{+\infty} dx f(x) = 1$
- ▶ Генерируем последовательность случайных чисел: $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$ на отрезке $x \in [-c, c]$
- ▶ $I_N = \frac{2c}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i)$
- ▶ $\lim_{N \rightarrow \infty} I_N = I$
- ▶ $I_{10} = 0.8836, \quad I_{100} = 1.0708, \quad I_{1000} = 0.9807,$
 $I_{10000} = 0.9983, \quad I_{100000} = 1.0018$
- ▶ **Неэффективный метод!**

Алгоритм Метрополиса

Вычисление интеграла $\int dx e^{-S(x)}$, $S(x) = \frac{x^2}{2}$

- ▶ Начальное приближение $x_0 = 0$
- ▶ Случайным образом выбираем $\Delta x \in [-c, c]$
- ▶ $x' = x_k + \Delta x$
- ▶ **Метод Метрополиса:** $\Delta S = S(x') - S(x_k)$. Если $\Delta S < 0$, $S(x') < S(x_k)$, то $x_{k+1} = x'$. Иначе, x' принимается с вероятностью $e^{-\Delta S}$.
- ▶ На практике: генерируем случайное число $r \in [0, 1]$. Если $r < e^{-\Delta S}$, то $x_{k+1} = x'$, иначе $x_{k+1} = x_k$.

Алгоритм Метрополиса

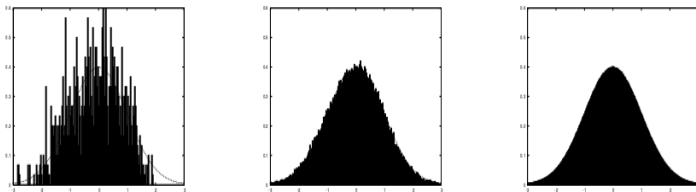
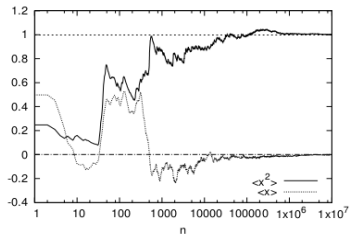


Figure 2: The distribution of $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n)}$, for $n = 10^3, 10^5$ and 10^7 , and $\frac{e^{-x^2/2}}{\sqrt{2\pi}}$.



Посчитайте интеграл методом Метрополиса: $\frac{4}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} dx e^{-8x^2}$

Метод Гибридного Монте-Карло

Вводим сопряженный импульс $\pi(x)$ и рассматриваем Гамильтониан

$$H(U, \varphi, \pi) = \int d^4x \left(S_G(U(x)) + S_F(U(x), \varphi(x)) + \frac{1}{2} \pi^2(x) \right).$$

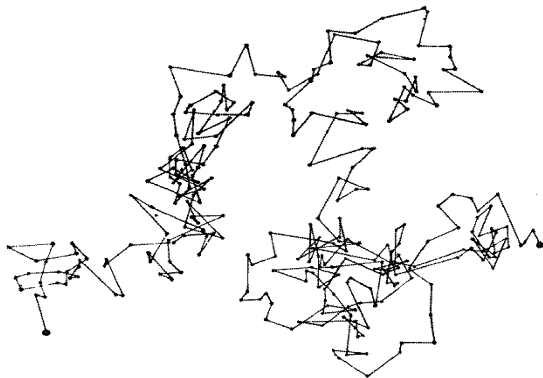
Алгоритм Гибридного Монте-Карло:

- ▶ Генерируем сопряженный импульс с нормальным распределением $\pi(x) \sim N(0, 1)$;
- ▶ Молекулярная динамика с временем τ ;
- ▶ Уравнения эволюции полей и сопряженных импульсов

$$\frac{\partial U(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial H(x, \tau)}{\partial \pi(x, \tau)} \quad \frac{\partial \pi(x, \tau)}{\partial \tau} = - \frac{\partial H(x, \tau)}{\partial U(x, \tau)}.$$

- ▶ Принимаем полевые конфигурации с вероятностью $\min(1, \exp(H' - H))$ — Метрополис accept/reject метод.

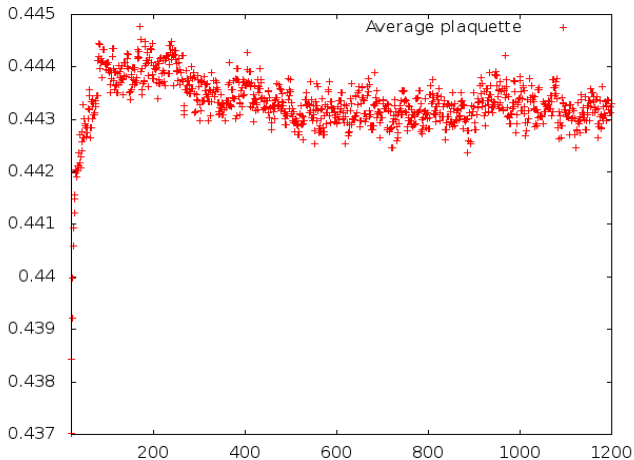
Метод Гибридного Монте-Карло



- ▶ НМС можно рассматривать как броуновское движение
- ▶ Ассерп/reject проверка в конце траектории
 - ▶ если $E_{eff}(U_{n+1}) < E_{eff}(U_n)$, то U_{n+1} принимается
 - ▶ иначе U_{n+1} принимается с $p \sim e^{-[E_{eff}(U_{n+1})-E_{eff}(U_n)]}$
- ▶ **Моделирование квантовой системы!**
- ▶ Для большого количества траекторий $p(U) \sim e^{-S_{eff}(U)}$

Метод Гибридного Монте-Карло

- ▶ Для достаточно большого количества шагов полевые конфигурации распределены как $\sim \exp(-E_{\text{eff}}(\mathbf{U}))$

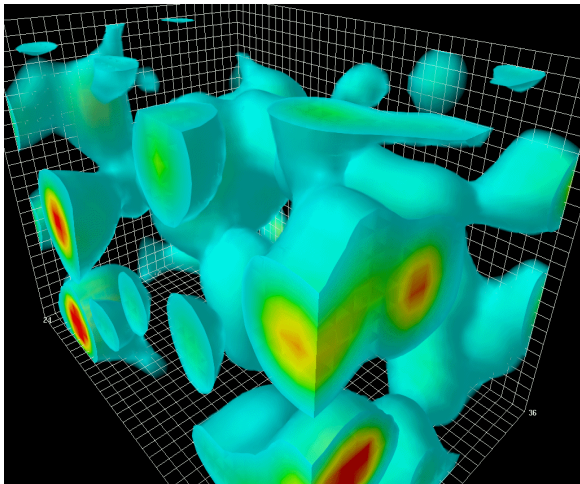


Приложения

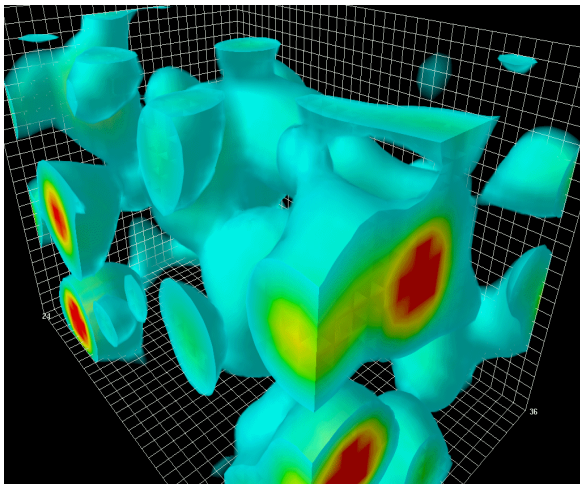
- ▶ Спектроскопия
- ▶ Матричные элементы, корреляционные функции
- ▶ Термодинамические свойства КХД
- ▶ Транспортные свойства КХД
- ▶ Фазовые переходы в КХД
- ▶ Ядерная физика
- ▶ Свойства КХД в экстремальных условиях (магнитное поле, барионная плотность, изоспиновая плотность, вращение,...)
- ▶ Топологические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

- ▶ Вакуум - пустота ($\epsilon = 0$)?

- ▶ Вакуум - пустота ($\epsilon = 0$)?
- ▶ Вакуум - состояние с минимальной энергией

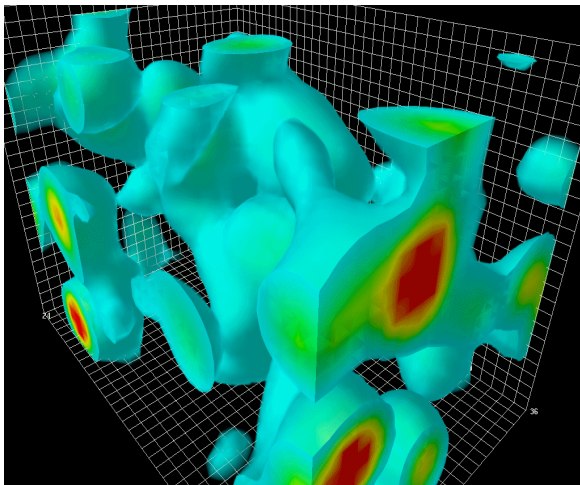


- ▶ Вакуум КХД: $\epsilon \simeq -(265 \text{ MeV})^4$, $H^2 + E^2 \neq 0$



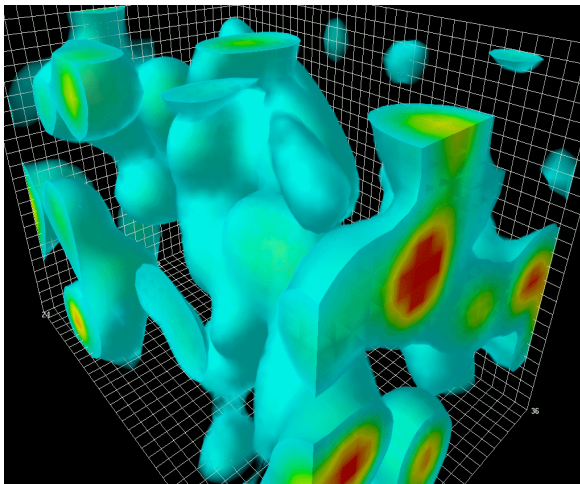
- ▶ Вакуум КХД: $\epsilon \simeq -(265 \text{ MeV})^4$, $H^2 + E^2 \neq 0$

Вакуум КХД

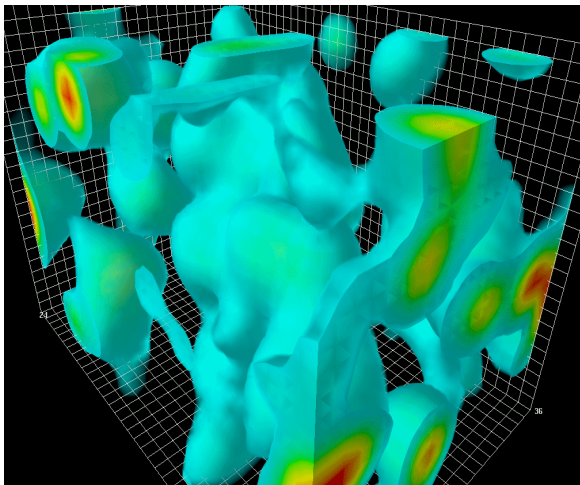


- ▶ Вакуум КХД: $\epsilon \simeq -(265 \text{ MeV})^4$, $H^2 + E^2 \neq 0$

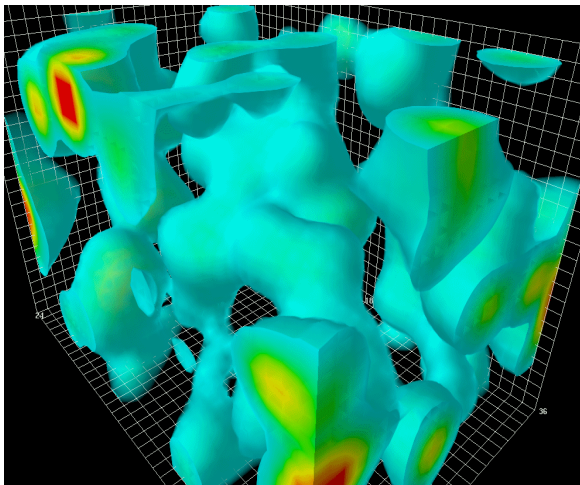
Вакуум КХД



- ▶ Вакуум КХД: $\epsilon \simeq -(265 \text{ MeV})^4$, $H^2 + E^2 \neq 0$

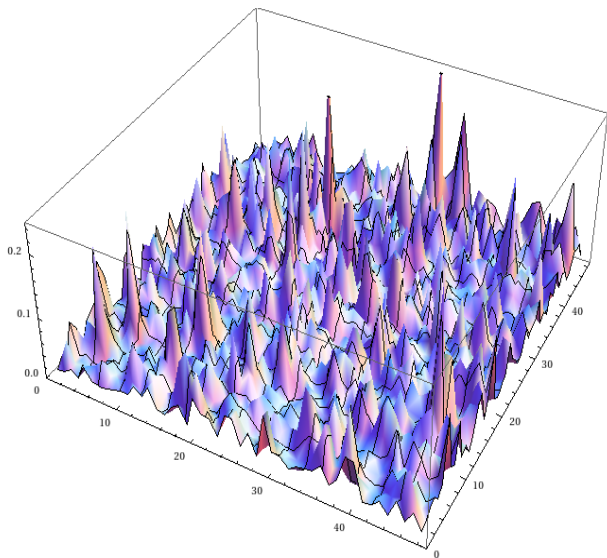


- ▶ Вакуум КХД: $\epsilon \simeq -(265 \text{ MeV})^4$, $H^2 + E^2 \neq 0$



- ▶ Вакуум КХД: $\epsilon \simeq -(265 \text{ MeV})^4$, $H^2 + E^2 \neq 0$

Квантовые (ультрафиолетовые) флуктуации в вакууме КХД

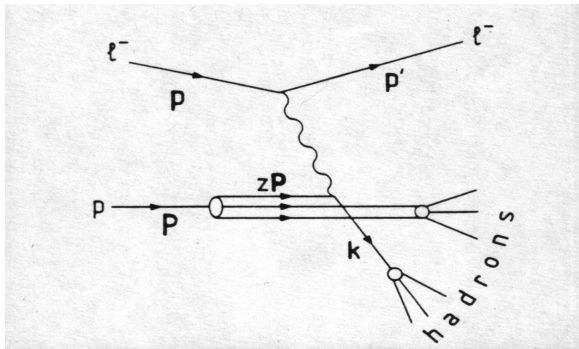


Как обнаружить кварки и глюоны?

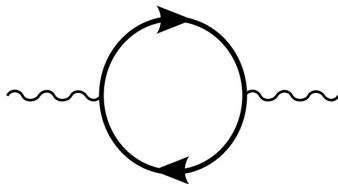
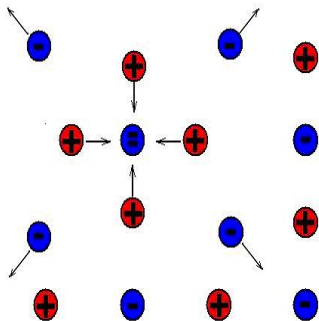
- ▶ Рассмотреть протон с помощью микроскопа
- ▶ Вырвать кварк из протона
- ▶ Расплавить протон

Микроскоп для протона

- ▶ Рассмотреть объект можно если $\lambda < R$
- ▶ Размер протона $\sim 10^{-13}$ см
- ▶ Нужна энергия фотона $E_\gamma > 1$ ГэВ



Поляризация вакуума или бегущий заряд



- ▶ Экранирование: Заряд зависит от расстояния
 $\alpha_s(r) = \frac{e^2(r)}{4\pi\hbar c}$
- ▶ Чем ближе к заряду, тем больше заряд
- ▶ Бег констант подтвержден экспериментально

Бегущий заряд в КХД

"screening" of the charge

like QED

$\alpha_s(r) \uparrow$ if $r \downarrow$

"anti-screening"

non abelian

Who wins? $\alpha_s(Q^2) = \frac{g^2}{4\pi} \approx \frac{4\pi}{(11 - \frac{2}{3}N_f) \ln(Q^2/\Lambda^2)}$ $Q \sim 1/r$

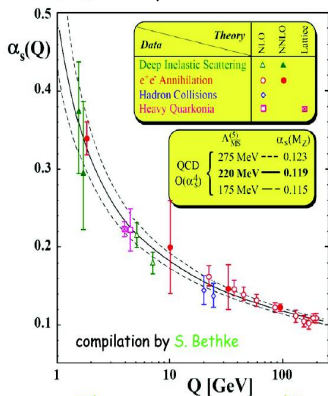
coupling at some reference scale Q_0

Асимптотическая свобода

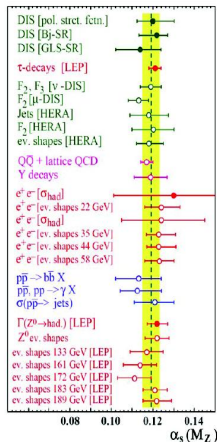
- ▶ $\alpha_s(r) \sim \frac{1}{\log r\Lambda} \rightarrow 0$ при $r \rightarrow 0$
- ▶ $\alpha_s(0.1 \text{ fm}) \sim 0.3$
- ▶ КХД проявляет свою "силу" на больших расстояниях

Экспериментальное подтверждение

test of QCD: experimental confirmation of asymptotic freedom



confinement (?) asymp. freedom



Можно ли вырвать кварк из протона?


Конфайнмент — Википедия — Mozilla Firefox

http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%BD%D0%B9%D0%BD%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82

Getting Started Latest Headlines

Предоставиться системе

статья обсуждение править история

 37 794 уже пожертвовали.

Вы можете помочь проекту Википедия изменить мир!

Пожертвовать!

*"Ein Klasse System, mein Rückgrat beim Lesen." — Ronald Wehner.

Конфайнмент

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

Конфайнмент (от англ. *confinement* — удержание, удержания цвета) — явление в физике элементарных частиц, состоящее в невозможности получения кварков в свободном состоянии, при том что имеются веские указания в пользу того, что сами кварки существуют: кварки хорошо описывают систематику элементарных частиц и наблюдаются внутри них в качестве партонов при **глубоко неупругих столкновениях**.

Для объяснения удержания предполагалось, что цветовой заряд, которым обладают кварки, имеет свойство так называемого антиэкранирования. Антиэкранирование происходит из-за того, что переносчики сильного взаимодействия, которому подвержены кварки, сами обладают цветowym зарядом и сами порождают дополнительное взаимодействие. В результате, кварки взаимодействуют тем сильнее, чем дальше они друг от друга. Эта гипотеза хорошо объясняла многие явления, в том числе рождения **струй адронов** при **глубоко неупругих столкновениях**.

Впоследствии эта гипотеза оказалась органической частью математической теории сильного взаимодействия — квантовой хромодинамики.

Категории: Явления в микромире | Физика элементарных частиц

WIKIPEDIA Последнее изменение этой страницы: 16:45, 24 августа 2007. Содержимое доступно в соответствии с GNU Free Documentation License.

38

Можно ли вырвать кварк из протона?

Асимптотическая свобода

Нобелевская премия 2004 года

Д. Гросс

Д. Политцер

Ф. Вильчек



Конфайнмент

Проблема тысячелетия

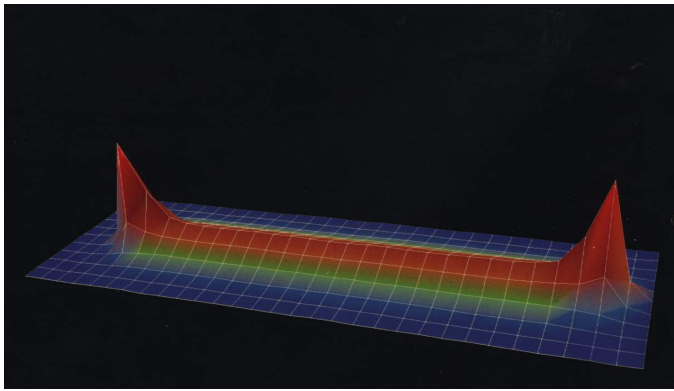
(Математический институт Клэя, 1000000 \$)

Нобелевская премия ? года



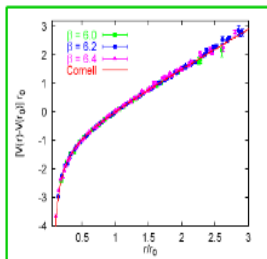
Здесь может появиться ваша
фотография!

Конфайнмент в численных расчетах



- ▶ Конфайнмент – задача тысячелетия
- ▶ Можно решить численно за 1 час на современном ноутбуке

Конфайнмент в численных расчетах

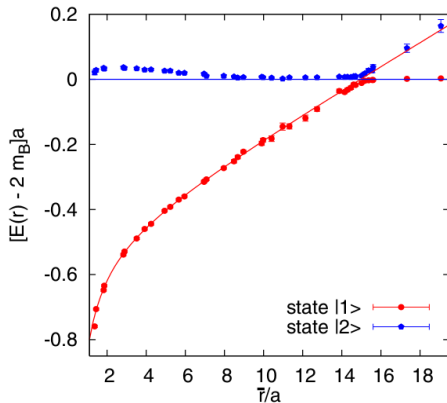


$V(r) \rightarrow kr$ при больших r

$$F = const \sim 16\,0000 \text{ Н}$$

Для разделения кварков нужна бесконечная энергия

Разрыв струны



- ▶ Струна не разорвана
- ▶ Струна разорвана

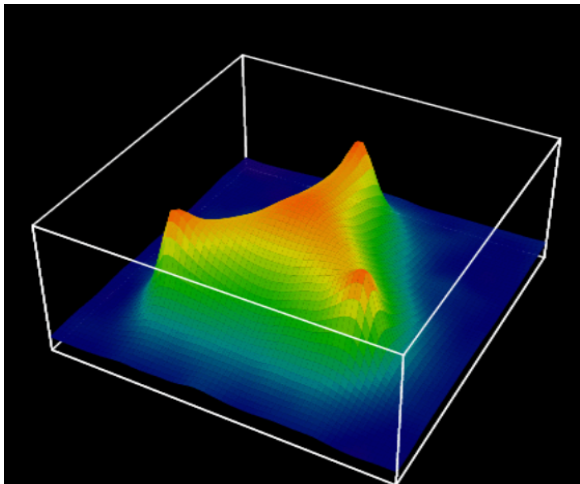
Из чего состоит материя?

- ▶ 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?

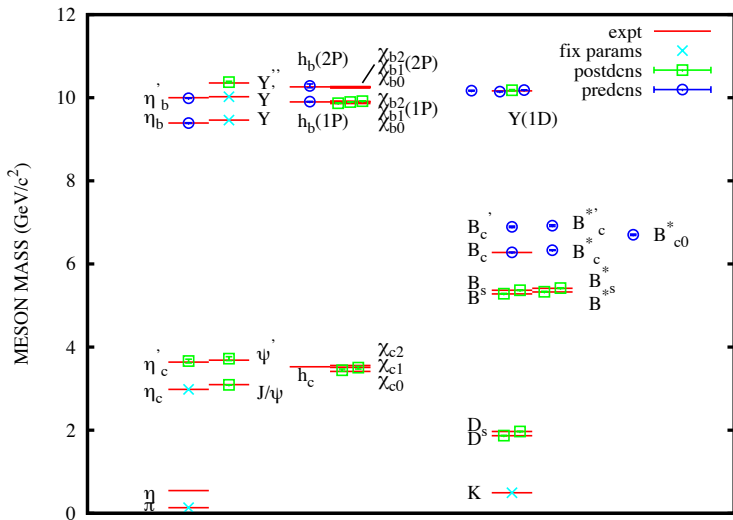
- ▶ В окружающей нас природе хорошо выполняется закон
$$M \simeq \sum_i M_i$$
- ▶ В теории сильных взаимодействий
$$p(uud) \quad M_p c^2 = 938 \text{ МэВ} \gg (m_u + m_u + m_d)c^2 = 12 \text{ МэВ}$$
$$n(udd) \quad M_n c^2 = 940 \text{ МэВ} \gg (m_u + m_d + m_d)c^2 = 15 \text{ МэВ}$$
- ▶ Где остальная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

Хромозлектрические поля в протоне

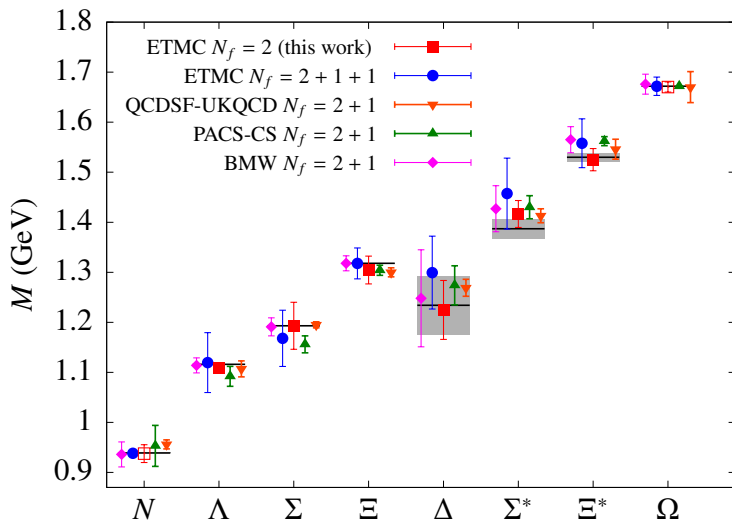


- ▶ Мы состоим из глюонов на 98%!

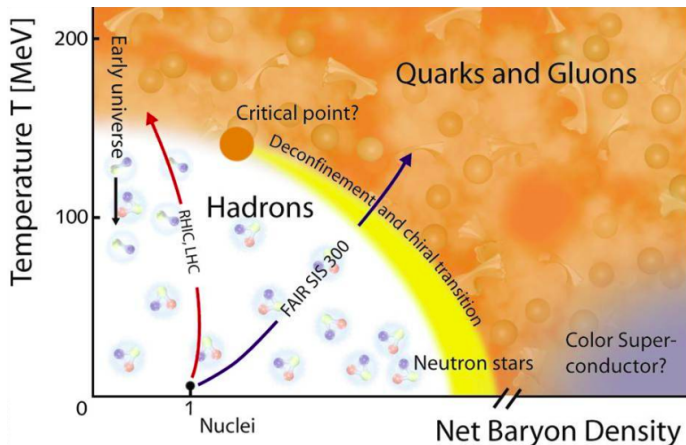
Спектроскопия: Мезоны



Спектроскопия: Барионы

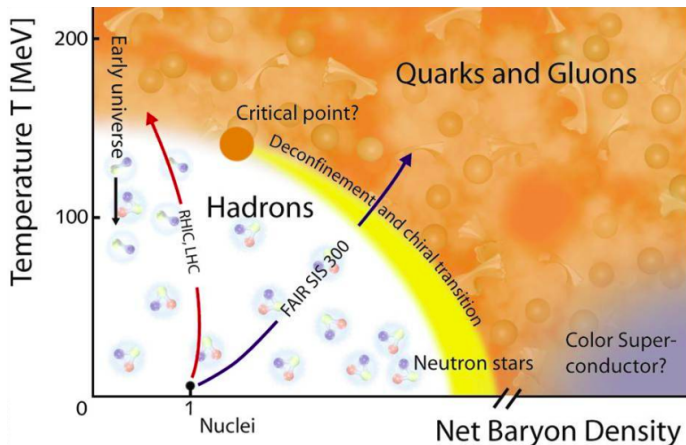


КХД в экстремальных условиях



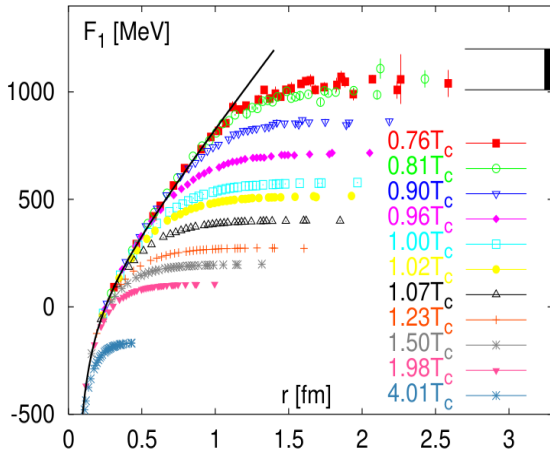
- ▶ Эксперименты: **ЛHC**(Швейцария), **RHIC**(США), **FAIR**(Германия), **NICA**(Россия, мегапроект)

КХД в экстремальных условиях



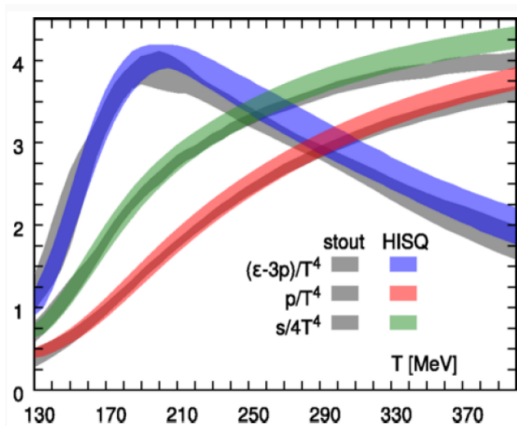
- ▶ Температуры $T \sim 150 \text{ MeV} \sim 1.5 \times 10^{12}$ градусов
- ▶ Барионная плотность $n > n_0$
- ▶ Магнитные поля $eB \sim 10^{13} \text{ T}$
- ▶ Вращение с угловой скоростью $\omega \sim 10^{22} \text{ c}^{-1}$
- ▶ ...

Как расплавить протон?



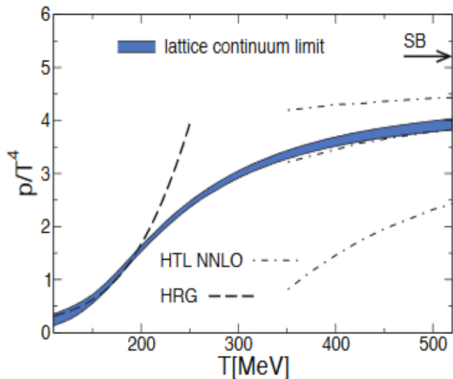
► Нужна температура $T \sim 150 \text{ MeV} \sim 1.5 \times 10^{12}$ градусов

Уравнение состояния



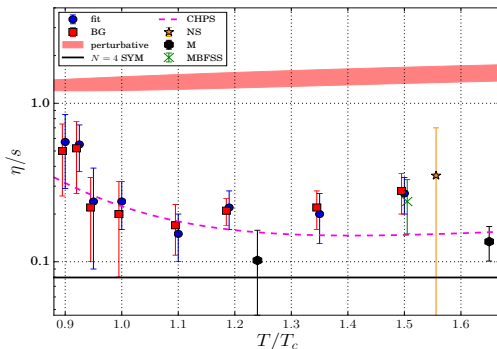
- ▶ Фазовый переход конфайнмент/деконфайнмент
- ▶ Конфайнмент - мезоны/барионы
- ▶ Деконфайнмент - кварки/глюоны (кварк-глюонная плазма)
- ▶ Изменяется число степеней свободы в системе

Уравнение состояния



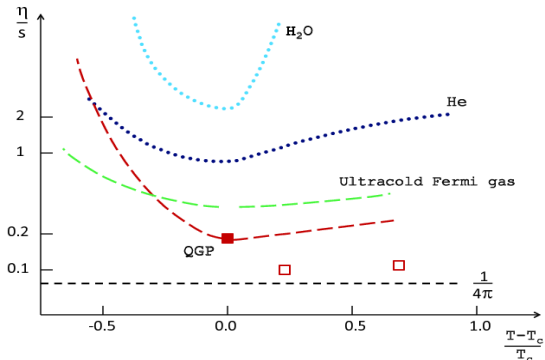
- ▶ SB - Стефан-Больцман: $p = \sigma T^4$
- ▶ При высокой температуре КГП - газ кварков и глюонов?
- ▶ Асимптотическая свобода: $\alpha_s(T)|_{T \rightarrow \infty} \rightarrow 0$
- ▶ Электрический и магнитный сектора теории
- ▶ КХД всегда теория с сильным взаимодействием!

Вязкость кварк-глюонной плазмы



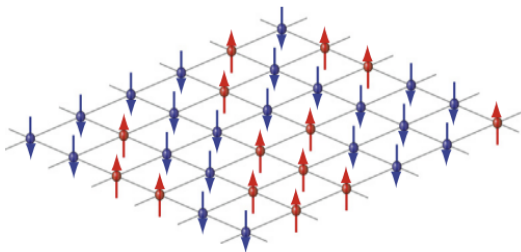
- ▶ КГП близка к идеальной жидкости ($\frac{\eta}{s} = (1 - 3)\frac{1}{4\pi}$)
- ▶ Значительное отклонение от газа кварков и глюонов
- ▶ Результат близок к N=4 SYM $\frac{\eta}{s} = \frac{1}{4\pi}$

Вязкость кварк-глюонной плазмы



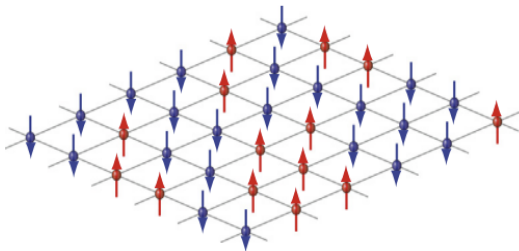
- ▶ КГП самая сверхтекучая жидкость

Модель Изинга



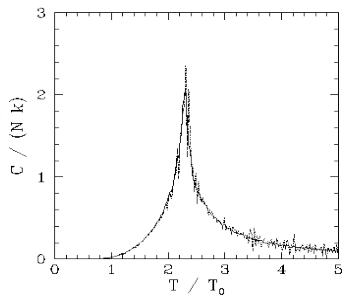
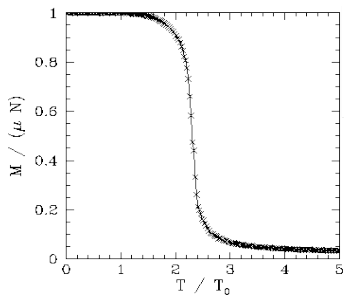
- ▶ Степени свободы: $s_i = \pm 1$, расположены в узлах решетки
- ▶ $E(\{s_i\}) = - \sum_{\langle ij \rangle} s_i s_j$
- ▶ Статистическая сумма: $Z = \sum_{\{s_i\}} e^{-E(\{s_i\})/T}$
- ▶ Вероятность состояния $\{s_i\}$: $P(\{s_i\}) = \frac{1}{Z} e^{-E(\{s_i\})/T}$
- ▶ Средняя энергия: $\langle E \rangle = \sum_{\{s_i\}} E(\{s_i\}) P(\{s_i\})$
- ▶ Для решетки 100×100 нужно посчитать $2^{100 \times 100}$ членов

Модель Изинга



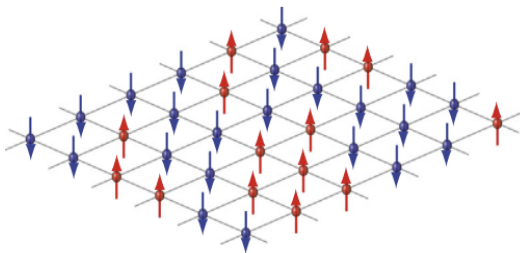
- ▶ Вероятность состояния $\{s_i\}$: $P(\{s_i\}) = \frac{1}{Z} e^{-E(\{s_i\})/T}$
- ▶ Намагниченность: $s(\{s_i\}) = \frac{1}{V} \sum_{s_i} s_i$
- ▶ Средняя намагниченность: $\langle s \rangle = \sum_{\{s_i\}} s(\{s_i\}) P(\{s_i\})$
- ▶ Флуктуации: $\chi = \langle s^2 \rangle - \langle s \rangle^2$

Модель Изинга



- ▶ Фазовый переход: $T_c = \frac{2}{\log(1+\sqrt{2})}$
- ▶ Намагниченная фаза при $T < T_c$: $\langle s \rangle \neq 0$
- ▶ Не намагниченная фаза при $T > T_c$: $\langle s \rangle = 0$

Алгоритм Метрополиса для модели Изинга



- ▶ Начальная конфигурация $\{s_i\}$: холодный или горячий старт
- ▶ Граничные условия
- ▶ В узле i переворачиваем спин $s_i^{new} = -s_i^{old}$
- ▶ Если $E(s_i^{new}) < E(s_i^{old})$ принимаем конфигурацию
- ▶ Если $E(s_i^{new}) > E(s_i^{old})$ принимаем конфигурацию с вероятностью $\exp(-\Delta E/T)$
- ▶ На практике генерируем случайное число $0 < r < 1$ если $\exp(-\Delta E/T) > r$ принимается, иначе не принимается
- ▶ Намагниченность: $\langle s \rangle = \frac{1}{N} \sum_{a=1}^N s^a(\{s_i\})$
- ▶ Флуктуации: $\chi = \langle s^2 \rangle - \langle s \rangle^2$, $\langle s^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{a=1}^N (s^a(\{s_i\}))^2$

Заключение

- ▶ КХД - теория сильных взаимодействий с очень интересными свойствами
- ▶ Перспективный метод изучения КХД - решеточное моделирование

Спасибо за внимание!



Приходите в ОИЯИ изучать
КХД и не только КХД!