# Решеточное моделирование теории сильного взаимодействия(КХД)

В.В.Брагута

24 ноября 2024 г.

### Таблица элементарных частиц



#### **Standard Model of Elementary Particles**

### Материя и переносчики взаимодействия



### Кварковая модель: барионы

Baryons qqq and Antibaryons qqq									
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.									
Symbol	Symbol Name Quark Electric Mass GeV/c <sup>2</sup>								
р	proton	uud	1	0.938	1/2				
p	anti- proton	ūūd	-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

<b>Mesons q</b> φ Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.								
Symbol	bol Name Quark Electric Mass content charge GeV/c <sup>2</sup> S							
$\pi^+$	pion	ud	+1	0.140	0			
K-	kaon	sū	-1	0.494	0			
$ ho^+$	rho	ud	+1	0.770	1			
B <sup>0</sup>	B-zero	db	0	5.279	0			
$\eta_c$	eta-c	cτ	0	2 .980	0			

#### Открытые частицы

Meson Summary Table

Baryon Summary Table

See also the table of suggested ou quark-model assignments in the Quark Model section.

Indicates particles that appear in the preceding Meson Summary Table. We do not regard the other entries as being established.
 Indicates that the value of J given is preferred, but needs confirmation.

	LIGHT UN	FLANORED		STR/	NGE	BOTTOM	
	(S = C)	+ 8 = 0		(S = ±1, 0	= 8 = 0	(8 =	±1)
	$P(P^{C})$		$f^{c}(\mathcal{F}^{c})$		(L)		$f^{\mu}(J^{\mu}C)$
• 7 <sup>±</sup>	1-(0-)	<ul> <li>π<sub>2</sub>(1670)</li> </ul>	1-(2-+)	• K <sup>±</sup>	1/2(0-)	• 8 <sup>±</sup>	1/2(0-)
• ±0	1-(0-+)	<ul> <li>\$\phi(1680)\$</li> </ul>	0-(1)	• K <sup>0</sup>	1/2(0 )	• B <sup>3</sup>	1/2(0 )
• 1	0+(0-+)	<ul> <li>/g(1690)</li> </ul>	1+(3)	• K <sup>0</sup> <sub>S</sub>	1/2(0-)	<ul> <li>B<sup>±</sup>/B<sup>0</sup> ADM</li> </ul>	DATURE
<ul> <li>fy(603)</li> </ul>	0+(0++)	<ul> <li>,c(1700)</li> </ul>	1+(1)	• K <sup>0</sup> <sub>L</sub>	1/2(0-)	<ul> <li>B<sup>±</sup>/B<sup>0</sup>/B<sup>0</sup><sub>2</sub>/b</li> </ul>	i-baryon AD-
<ul> <li>s(770)</li> </ul>	1+(1)	3 <sub>2</sub> (1700)	1-(2++)	K;(800)	1/2(0+)	MIXTURE	
• a (782)	0-(1)	<ul> <li>6(1710)</li> </ul>	0 <sup>+</sup> (0 <sup>+</sup> <sup>+</sup> )	<ul> <li>K*(892)</li> </ul>	1/2[1]	Elements	NVN WATLK
<ul> <li>- √(958)</li> </ul>	0+(0-+)	3(1760)	0+(0-+)	<ul> <li>K<sub>1</sub>(1270)</li> </ul>	$1/2(1^+)$	+ B"	1/2(1-)
<ul> <li>6(980)</li> </ul>	0+(0++)	<ul> <li>\u03c0 (1800)</li> </ul>	1-(0-+)	<ul> <li>K<sub>1</sub>(1400)</li> </ul>	1/2[1+]	81(5732)	7(7)
<ul> <li>A<sub>3</sub>(930)</li> </ul>	1-(0++)	6(1810)	0+(2++)	<ul> <li>K'(1410)</li> </ul>	1/2(1-)	20 0	
<ul> <li></li></ul>	0-(1)	X(1835)	? <sup>1</sup> (? - +)	<ul> <li>K<sub>0</sub>(1430)</li> </ul>	1/2(0+)	BOTTOM	STRANGE
<ul> <li>b<sub>1</sub>(1170)</li> </ul>	0 (1 + -)	<ul> <li>\$\phi_3\$(1850)</li> </ul>	0 (3)	<ul> <li>K5(1430)</li> </ul>	1/2(2+)	$\{8' = \pm 1\}$	, S = 71)
<ul> <li>b<sub>1</sub>(1235)</li> </ul>	1+(1+-)	1/2(1870)	0+(2 - +)	K(1490)	1/2(0-)	• B <sup>2</sup> <sub>5</sub>	c(o_)
<ul> <li>»<sub>1</sub>(1260)</li> </ul>	1-(1++)	,c(1900)	1+(1)	K <sub>2</sub> (1580)	1/2[2])	B <sup>*</sup> 2	0(1_)
<ul> <li>f<sub>2</sub>(1270)</li> </ul>	$0^{+}(2^{++})$	f <sub>2</sub> (1910)	0+(2++)	K(1630)	1/2(73)	B <sup>*</sup> <sub>4,1</sub> (5850)	?(?')
<ul> <li>f<sub>1</sub>(1285)</li> </ul>	0+(1++)	<ul> <li>f<sub>2</sub>(1950)</li> </ul>	0+(2++)	K <sub>1</sub> (1650)	$1/2(1^+)$	BOTTOM	CHARACTO
<ul> <li>τ(1295)</li> </ul>	0+(0-+)	,eg(1990)	1+(3)	<ul> <li>K"(1680)</li> </ul>	1/2[1])	10-10	CHURMED
<ul> <li>= (1300)</li> </ul>	1-(0-+)	<ul> <li>f<sub>2</sub>(2010)</li> </ul>	0+(2++)	<ul> <li>K<sub>2</sub>(1770)</li> </ul>	1/2(2)	10-0	=
<ul> <li>\$2(1320)</li> </ul>	$1^{-}(2^{++})$	(6(2020)	0+(0++)	<ul> <li>K<sup>*</sup><sub>3</sub>(1780)</li> </ul>	1/2(3 )	• B <sub>c</sub>	0(0 )
<ul> <li>6(1370)</li> </ul>	0+(0++)	<ul> <li>34(2040)</li> </ul>	1-(4++)	<ul> <li>K<sub>2</sub>(1820)</li> </ul>	1/2[2])	6	č
h <sub>1</sub> (1380)	? (1 * -)	<ul> <li>f<sub>0</sub>(2050)</li> </ul>	0+(4++)	K(1830)	1/2(0-)	<ul> <li>n.(15)</li> </ul>	0+(0-+)
• =1(1400)	1-(1-+)	T2(2100)	1-(2-+)	K <sub>0</sub> (1950)	1/2(0+)	<ul> <li>Unit15)</li> </ul>	0-(1)
<ul> <li>((1405))</li> </ul>	0+(0-+)	6(2100)	0+(0++)	K5(1990)	$1/2(2^+)$	• Yes(1P)	a+(a++)
<ul> <li>I<sub>1</sub>(1420)</li> </ul>	0.(1)	f <sub>2</sub> (2150)	0+(5++)	<ul> <li>K2(2045)</li> </ul>	1/2(4+)	• X=(1P)	a+(1++)
• a (1420)	0 (1 )	/(2150)	1+(1)	K <sub>3</sub> (2250)	1/2(2-)	h.(1P)	22(277)
P2(1430)	0 (2 + +)	(6(2200)	0+(0++)	K <sub>3</sub> (2320)	1/2(3+)	• Xep(1P)	0+(2++)
• a <sub>0</sub> (1450)	$1^{-}(0^{++})$	fy(2220)	0 <sup>+</sup> (2 or 4 + +)	K((2390)	1/2(5-)	• n-(25)	0+(0-+)
• (1450)	1 (1 )	7(2225)	0 (0 )	K <sub>4</sub> (2500)	1/2(4-)	<ul> <li>⊕(25)</li> </ul>	0-(1)
• ((14/5)	0 0 0 1	P1(2290)	1 (3 )	K(3100)	77(777)	<ul> <li>         ψ[3770]     </li> </ul>	0-(1)
• (9(1500)	0.0.1	• 12(2300)	0.(2.1.)			<ul> <li>X(3872)</li> </ul>	o?(??+)
h(1510)	0 (1 + 1)	6(2300)	0 (4 )	CHAR	MED	<ul> <li>Xc2(2P)</li> </ul>	0+(2++)
• (1020)	a+(a++)	· (2280)	1+10	[C =	= 1)	Y (3940)	15(555)
12(1099)	0-(2+-)	19(2300)	1-10++1	• D=	1/2(0 )	<ul> <li>         ψ(4040)     </li> </ul>	0-(1)
B(1595)	1-(1-+)	45(2450)	0+16 + +3	• D'	1/2(0-)	<ul> <li>         ψ(4160)     </li> </ul>	0 (1 )
• -1(1000)	1-0++1	(0(2010)	0.(0)	• D*(2007)*	1/2(1 )	Y (4260)	? (1)
4(1640)	0+(0++)	OTH	ER LIGHT	• D'(2010)"	1/2(1-)	<ul> <li></li></ul>	0-(1)
· m(1645)	0+(2-+)	Further Sta	stes	D <sub>0</sub> (2400)*	1/2(0 ' )		*
• (1650)	0-0			D <sub>0</sub> (2400)-	1/2(01)	0	0
a (1670)	0-(3)			• D1(2420)*	1/2(1-)	73(15)	0+(0-+)
				D1(2420)*	1/2[71]	• T(15)	0 (1 )
				D1(2430)*	1/2(1.)	<ul> <li>χ<sub>80</sub>(1P)</li> </ul>	0+(0++)
				• D <sub>2</sub> (200).	1/2(2.)	<ul> <li>Xai (1P)</li> </ul>	0.(1 )
				<ul> <li>D<sub>2</sub>(200)</li> </ul>	1/2(2*)	<ul> <li> <i>x</i><sub>82</sub>(1P)     </li> </ul>	0+(2++)
				D.(5940)-	1/3[1]	• 7(25)	0 (1 )
				CHARMED.	STRANGE	7(1D)	0-(2)
				(C = 5	$=\pm 1$	• X80(2P)	++(+++)
				• D <sup>±</sup>	0(0)	· A00(2P)	a+(a++)
				• D <sup>*±</sup>	0(??)	- 7(25)	0-(2)
				• 0°-(2317)±	000*1	. 7(48)	0-(1)
				· D. (2460)=	0(1+)	. 7(10960)	0-0
				• D. (2536)*	0(1+)	• 7(11020)	0-(1)
				• De(2573)=	0(77)	(- 1020)	* (i )
						NON-qq CA	NDIDATES

	0	****	A(1222)	0	****	4	0	****	<b>r</b> +	0	****		0	****	
	P.1	****	A(1600)	-33	***	A(1405)	C.1		10	P.11		1	P.11		
N(1440)	P.,	****	A(1600)	e 33		A(1E35)	0		F-	P.11	****	=(1530)	P.,		
AV(1520)	0	****	A(1020)	311		A(1600)	D.,		F(1385)	P.,		=(1620)	1.13		
AV(1535)	C.,	****	A(1750)	033		A(1670)	C.		5(1481)	. 19		=(1600)		***	
AV(1650)	C.,		A(1000)	r 31		A(1601)	0		5(1560)		**	=(1820)	n.,	***	
AV(1675)	0.	****	A(1990)	521		A(1905)	C.,		F(1581)	D <sub>1</sub>		=(1050)	013		
AV(1680)	6.	****	A(1999)	25	****	A(1910)	-QL		F(1620)	S.,	**	=(2030)		***	
AV(1200)	0.	***	A(1910)	-31		A(1935)	6.		5(1660)	P.,	***	=(2120)			
AV(1710)	P.,	***	A(1920)	-33		A(1935)	0.		F(1670)	Da	****	=(2250)			
AV(1720)	P.,	****	A(1930)	0.5		A(1991)	0.0		F(1690)	-11	**	=(2370)		**	
AV(1900)	P.	**	A(1050)	C 33		A(2000)	1.03		5(1750)	S.,		=(2500)			
AV(1000)	E.,	**	A(2020)	6		A(2020)	£.,.		F(1770)	P.,		=()			
AV(2000)	6.	**	A(2150)	r 35		A(2105)	Gu		5(1775)	D.	****	0-		****	
AV(2080)	n.,	**	A(2030)	511 C		A(2110)	E.		5(1840)	P.,		£0(2250)-		***	
AV(2000)	C.,		A(2200)	u .	**	A(2225)	0.		5(1891)	P.,		£0(2380)-			
AV(2100)	P.,		A(2250)	0		A(2250)	4		F(1915)	Fur.	****	(0'2470)			
AV(2190)	Gu	****	A(2330)	6		A(2005)	1.69		F(1940)	Do	***				
AV(2200)	0	**	A(26350)	C.		1(2003)			F(2001)	S.,		A <sup>+</sup>		****	
AV(2220)	H.	****	A(2400)	0 <u>99</u>					E(2030)	En	****	A-(2593)+		***	
AV(2250)	Gu	****	A(29264)	1011					£(2070)	Fur.		A-(2625)+		***	
AV(2600)	6	***	A(2054)	9,13					F(2001)	P.,	**	A-(2765)+			
M(2200)	K		4(2990)	A3,15					F(2100)	Gu		A-(2880)+		**	
ra(arco)	74,11		0/15400+						F(2250)		***	E-(2455)		****	
			8(1940)						T(M65)			5.(2520)		***	
									£(2620)		**	Σ-(2000)		***	
									F(3000)			E!		***	
									F(3170)			=0		***	
									-()			2r+		***	
												-6		***	
												=c = (3645)			
												E (2790)			
												= (1915)			
												-c(2013)			
												**c			
												$\Xi_{cc}^{+}$		•	
												R		***	
												10.00			

\*\*\*\* Existence is certain, and properties are at least fairly well explored.

\*\*\* Existence ranges from very likely to certain, but further confirmation is desirable and/or quantum numbers, branching fractions, etc. are not well determined.

\*\* Evidence of existence is only fair.

\* Evidence of existence is poor.

- 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<sup>2</sup>
- Константа связи  $\alpha_{em} = \frac{e^2}{\hbar c} \simeq \frac{1}{137}$

### Элекродинамика

- 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:  $f(\alpha_{em}) = f(0) + f'(0)\alpha_{em} + \frac{1}{2}f''(0)\alpha_{em}^2 + \dots$



$$divE = 4\pi\rho$$
$$divH = 0$$
$$rotE = -\frac{1}{c}\frac{\partial H}{\partial t}$$
$$rotH = \frac{4\pi}{c}j + \frac{1}{c}\frac{\partial E}{\partial t}$$

Уравнения Максвелла - линейные

- 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 × цвет = 3 × 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

### Уравнения Максвелла в КХД

$$\begin{split} div E^a &= 4\pi \rho^a + f_1(A, E, H, \ldots) \\ div H^a &= 0 + f_2(A, E, H, \ldots) \\ rot E^a &= -\frac{1}{c} \frac{\partial H^a}{\partial t} + f_3(A, E, H, \ldots) \\ rot H^a &= \frac{4\pi}{c} j^a + \frac{1}{c} \frac{\partial E^a}{\partial t} + f_4(A, E, H, \ldots) \end{split}$$

Уравнения Максвелла для КХД - нелинейные

### Квантовая Хромодинамика(КХД)

#### Свойства КХД

- Степени свободы
  - Кварки q
  - Глюоны А
- $\blacktriangleright$  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



- ▶ Вводим 4-х мерную решетку  $N_s \times N_s \times N_s \times N_t = N_s^3 \times N_t$
- Шаг решетки–а
- Степени свободы
  - **Глюонные поля:** 3x3 матрицы  $U \in SU(3)$ , линки
  - Кварковые поля:  $q, \bar{q}$ , узлы

### Построение решеточной КХД

 ▶ Вычисляем статистическую сумму КХД - интеграл! (термодинамическое равновесие!) Z<sub>l</sub> = ∫ DU exp (-<sup>E<sub>g</sub></sup>/<sub>T</sub>) × det (**D**(**U**) + **m**) = ∫ DUe<sup>-E<sub>eff</sub>(U)</sup>
 ▶ Вычисления методом Монте-Карло

(генерация глюонных конфигураций с весом  $e^{-\mathbf{E}_{eff}(\mathbf{U})}$ )

- Проводим экстраполяцию  $a \rightarrow 0$
- Метод основан на первопринципах. Не содержит каких-либо предположений!
- Параметры: *д* и массы кварков
- Статистические и систематические ошибки можно систематически уменьшать

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

- Решетки
  - $\blacktriangleright$  96 × 48<sup>3</sup>
  - Переменные интегрирования: 96 · 48<sup>3</sup> · 4 · 8 ~ 300 · 10<sup>6</sup>
  - 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  $a \sim 0.05 \, {\rm fm}$

### 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<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, x<sub>3</sub>, ...x<sub>N</sub>) на отрезке x ∈ [-c, c]
   ▶ I<sub>N</sub> = <sup>2c</sup>/<sub>N</sub> ∑<sup>N</sup><sub>i=1</sub> f(x<sub>i</sub>)
- $\blacktriangleright \lim_{N \to \infty} I_N = I$

► 
$$I_{10} = 0.8836$$
,  $I_{100} = 1.0708$ ,  $I_{1000} = 0.9807$ ,  
 $I_{10000} = 0.9983$ ,  $I_{100000} = 1.0018$ 

### 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:  $(x_1, x_2, x_3, ..., x_N)$  на отрезке  $x \in [-c, c]$
- $I_N = \frac{2c}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i)$  $\lim_{N \to \infty} I_N = I$
- ►  $I_{10} = 0.8836$ ,  $I_{100} = 1.0708$ ,  $I_{1000} = 0.9807$ ,  $I_{10000} = 0.9983$ ,  $I_{100000} = 1.0018$
- 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  $\Delta x \in [-c,c]$
- $\blacktriangleright x' = x_k + \Delta x$
- 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  $\frac{e^{-x^2/2}}{\sqrt{2\pi}}$ .



из работы arXiv:1808.08490

### 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  $\tau$ ;
- 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

- Accept/reject проверка в конце траектории
  - ▶ если E<sub>eff</sub>(U<sub>n+1</sub>) < E<sub>eff</sub>(U<sub>n</sub>), то U<sub>n+1</sub> принимается
     ▶ иначе U<sub>n+1</sub> принимается с p ~ e<sup>-[E<sub>eff</sub>(U<sub>n+1</sub>)-E<sub>eff</sub>(U<sub>n</sub>)]
    </sup>
- 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 ~  $\exp\left(-\mathbf{E}_{eff}(\mathbf{U})\right)$ 



### 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 - состояние с минимальной энергией













#### 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



Асимптотическая свобода

- ▶  $\alpha_s(r) \sim \frac{1}{\log r\Lambda} \to 0$ при  $r \to 0$
- $\alpha_s(0.1 \text{ fm}) \sim 0.3$
- КХД проявляет свою "силу"на больших расстояниях
   36

### Экспериментальное подтверждение





### Можно ли вырвать кварк из протона?

Конфайниент — Википи	egys - Mozilla Firefox	_16
le Edit Yew History	Bookmarks Icols Help	
🦗 • 🕪 • 🞯 🖗	🖇 🚯 W http://ru.wilipedia.org/wiki/ND0N9AND0N8END0N8DND1N84ND0N80ND0N89ND0N8DND0N8CND0N85ND0N85ND0N8DND1N82 🛛 🔕 🔹 🕨 💽 🗤 Goog	le .
🗭 Getting Started 🔝 Late	est Headines	
Lin S	статья обсуждение править история	<ol> <li>Представиться системе</li> </ol>
THE T	инининия +++++++++ 37 794 уже пожертвовали.	
Википедия	Вы можете помочь проекту Википедия изменить мир! » Пожертвовать! "Еіл Niasse Уутси», зеіл Ляскудат bein Lennen" - Jonald Sauman,	
навигация	Конфайнмент	
<ul> <li>Заглавная страница</li> <li>Рубрикация</li> </ul>	Материал из Википедии — свободной энциклопедии	
<ul> <li>Индекс А — Я</li> <li>Случайная статья</li> <li>Текущие события</li> </ul>	Конфайниент (от англ. confinement — удержание, удержание цеята) — явление в физике злементарных частиц, состоящее в невозможности полу cocronewa, притом что миеются веские указание в пользу того, что сами кварки существуют, кварки хорошо описывают систематику элементарных или в зачастем партовон при глубоко инургутих самовлениях.	чения кварков в свободном частиц и наблюдаются внутри
частие Портал сообщества Форуля « Свежие правки « Свежие правки « Новые статьи « Пожето орания	Для объяснения удерскими предполаганось, что целовой заради, которым обладают карои, имеет свойство так называетоя антикранирования и коза тото, что вереностия исклюто взамиходёйство, которыу поредеживнаяран, сами обядают целевала зарадов и сами пореджат долови результач, наяри козмицаёнствуют тем сильнее, чем дальше они друг от друга. Эта пелотеза хорошо объясняля многие явления, в том числе роз глубоко наукругия стальновениях. Вояследствии эта гипотеза озавлась органической частью математической творни сильного взамиходействия — квантовой хромоденамихи.	чтизкранирование происходит пельное взаимодействие. В кдения струй адронов при
юиск	Категории: Явления в микромире   Физика элементарных частиц	
Перейти Найти		
нструменты Ссылки сюда		
в Связанные правки		
<ul> <li>Запузить фаил</li> <li>Сполоточника</li> </ul>		
в Версия аля ремати		
Постоянная ссылка		
= Цитировать статью		
IN DOVING RODINGS		
Deutsch		
English		
Français		
עברית =		
<ul> <li>taliano</li> </ul>		
• B * 15		
<ul> <li>Hattouutsch</li> </ul>		
<ul> <li>Portugues</li> </ul>		
<ul> <li>中文</li> </ul>		
( wikiAedia	Последнее изменение этой страницы: 16:45, 24 ав густа 2007. Содержиее доступно в соответствии с DNU Pree Documentation License.	

### Можно ли вырвать кварк из протона?





### 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 ~ 16 0000 H

Для разделения кварков нужна бесконечная энергия

### Разрыв струны



- Струна не разорвана
- Струна разорвана

42

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

- 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?

### Хромоэлектрические поля в протоне



Мы состоим из глюонов на 98%!

### Спектроскопия: Мезоны



### Спектроскопия: Барионы



### КХД в экстремальных условиях



Эксперименты: LHC(Швецария), RHIC(США),
 FAIR(Германия), NICA(Россия, мегапроект)

### КХД в экстремальных условиях



- Температуры  $T \sim 150~{\rm MeV} \sim 1.5 \times 10^{12}$ градусов
- Барионная плотность  $n > n_0$
- Магнитные поля  $eB \sim 10^{13}$  Т

. . .

Вращение с угловой скоростью  $\omega \sim 10^{22} \ \mathrm{c}^{-1}$ 

48

### 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



- <br/> SB Стефан-Больцман:  $p=\sigma T^4$
- При высокой температуре КГП газ кварков и глюонов?
- Асимптотическая свобода:  $\alpha_s(T)|_{T\to\infty} \to 0$
- 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

$$\blacktriangleright E(\{s_i\}) = -\sum_{\langle ij \rangle} s_i s_j$$

- Статистическая сумма: Z =  $\sum_{\{s_i\}} e^{-E(\{s_i\})/T}$
- Вероятность состояния  $\{s_i\}: P(\{s_i\}) = \frac{1}{Z}e^{-E(\{s_i\})/T}$
- $\blacktriangleright$  Средняя энергия:  $\langle E \rangle = \sum_{\{s_i\}} E(\{s_i\}) P(\{s_i\})$
- ▶ Для решетки 100 × 100 нужно посчитать 2<sup>100×100</sup> членов

### Модель Изинга



- Вероятность состояния  $\{s_i\}: P(\{s_i\}) = \frac{1}{Z}e^{-E(\{s_i\})/T}$
- ▶ Намагниченность:  $s({s_i}) = \frac{1}{V} \sum_{s_i} s_i$
- $\blacktriangleright$  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:  $T_c = \frac{2}{\log(1+\sqrt{2})}$
- <br/> 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<sub>i</sub>}: холодный или горячий старт
- Граничные условия
- В узле і 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 ехр (-∆E/T) > r принимается, иначе не принимается
- ▶ Намагниченность:  $\langle s \rangle = \frac{1}{N} \sum_{a=1}^{N} s^{a}(\{s_i\})$
- ▶ Флуктуации:  $\chi = \langle s^2 \rangle \langle s \rangle^2$ ,  $\langle s^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{a=1}^N (s^a(\{s_i\}))^2$

- 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!

 $\mathbf{59}$ 

### Записался в физики-теоретики?

