

Введение в физику частиц

Дмитрий Горбунов

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Russian Teachers Programme 2013

“Естественная” система единиц в физике частиц

$$\hbar = c = k_B = 1$$

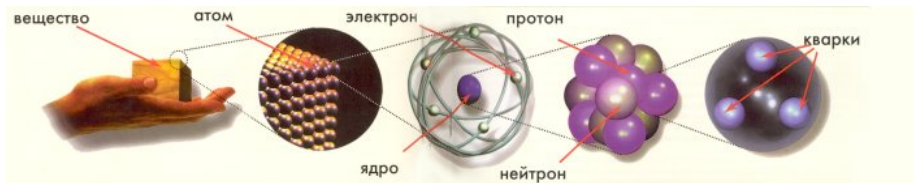
измеряют в ГэВ: энергия E , масса M , температура T

$$m_p = 0.938 \text{ ГэВ}, \quad 1 \text{ К} = 8.6 \cdot 10^{-14} \text{ ГэВ}$$

измеряют в ГэВ⁻¹: время t , длина L

$$1 \text{ с} = 1.5 \times 10^{24} \text{ ГэВ}^{-1}, \quad 1 \text{ см} = 5.1 \times 10^{13} \text{ ГэВ}^{-1}$$

Элементарные частицы и взаимодействия между ними



Фундаментальные взаимодействия

- гравитационное

для "жизни" нужны все !!

самое универсальное (всё подвержено)
первое (всё падает вниз)
загадочное (космология, чёрные дыры, грав волны)

- электромагнитное

самое полезное (химия, быт, приборы, наблюдения)
изученное (теория совпадает с практикой 10^{-11})

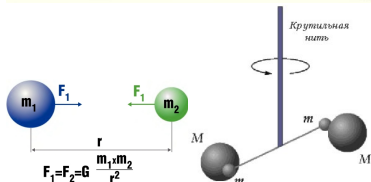
- сильное

самое необычное (сила растёт с расстоянием)
правильное (пропадает с ростом энергии)
определяющее (масса объекта, химические элементы)

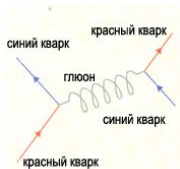
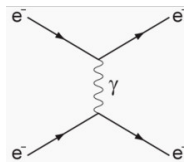
- слабое

самое незаметное (только β -радиоактивность)
разрушительное (уничтожает тяжёлые частицы, нарушает симметрии)

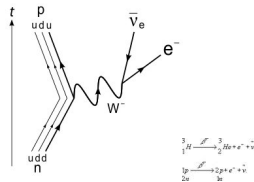
Элементарные частицы и взаимодействия между ними



дальнодействие $V \propto \frac{q_1 q_2}{r}$



$r_0 = 10^{-13}$ см короткодействие $V \propto e^{-r/r_0}$ $r_0 = 10^{-16}$ см



Характеристики (свободной) частицы

- **Масса** энергия в системе покоя, $E = mc^2$
а можно ли частицу остановить? (нет системы — нет массы)
- **Спин** “собственный”, квантованный=дискретный, угловой момент
0 скаляр хиггсовский бозон
 $\hbar/2$ спинор (проекция спина $\pm\hbar/2$) электрон, нейтрино, кварк
 \hbar вектор (поляризация) фотон, слабые W^{\pm} , Z-бозоны
 $2\hbar$ тензор (поляризация) гравитон
- **Статистика** что будет, если собрать вместе?
определяется величиной спина квантовый эффект
целый (0, \hbar , $2\hbar$) бозон (много частиц — классическое поле)
полуцелый ($\hbar/2$, $3\hbar/2$?) фермион (запрет Паули: орбитали электронов в химии)
- **Заряд** определяет силу взаимодействия
оказался “квантован” по-построению: g_s , g_W , загадка: e , $e/3$, $2e/3$
- **Время жизни** определяют в системе покоя
взаимодействия дают распады в другие частицы
(в любой другой системе живут дольше)

Three Generations of Matter (Fermions) spin 1/2

и античастицы материи (фермионов)

	I	II	III
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
name →	Left u Right up	Left c Right charm	Left t Right top
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	Left d Right down	Left s Right strange	Left b Right bottom
Leptons	0 eV	0 eV	0 eV
	0	0	0
	Left ν_e Right electron neutrino	Left ν_μ Right muon neutrino	Left ν_τ Right tau neutrino
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV
	-1	-1	-1
	Left e Right electron	Left μ Right muon	Left τ Right tau

Bosons (Forces) spin 1	0	g	gluon
	0	γ	photon
	91.2 GeV	Z⁰	weak force
	80.4 GeV	W[±]	weak force
	>114 GeV	H	Higgs boson
	spin 0		

Движение (свободной) частицы

Лоренц-инвариантность

Энергия в системе покоя ($\vec{p} = 0$)

$$E = mc^2$$
$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m^2 c^4$$

В системе, где импульс частицы равен \vec{p}

квадрат 4-вектора $A_t^2 - A_x^2 - A_y^2 - A_z^2 \equiv A^2 = \text{const}$

интервал $c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = \text{const}$

= 0 для обмена фотоном
причинность...

Специальная Теория Относительности

Энергия E , импульс $\vec{p} \rightarrow$ 4-импульс $P = (E/c, p_x, p_y, p_z)$

$$P^2 = m^2 c^2$$

Применение:

преимущество коллайдера перед ускорителем в рождении тяжёлых частиц

сталкиваются частицы P_1 и P_2 (центр масс) рождаем частицу $M = E_1 + E_2$

$$s \equiv (P_1 + P_2)^2 = (E_1 + E_2)^2$$

налетает P_1 , покоится M_2 (мишень)

рождаем частицу $M = \sqrt{2E_1 M_2}$

$$s \equiv (P_1 + P_2)^2 = (E_1 + M_2)^2 - \vec{p}_1^2 = M_1^2 + M_2^2 + 2E_1 M_2 \approx 2E_1 M_2$$

Положение частицы в пространстве

Квантовость запрещает полную локализацию (“точечность”) волновой пакет

$$\Delta E \Delta t \gtrsim 2\pi\hbar, \quad \Delta \vec{p} \Delta \vec{x} \gtrsim 2\pi\hbar$$

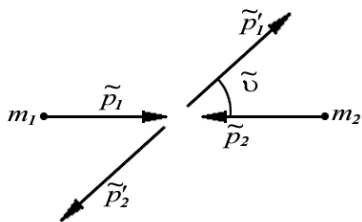
волна де Бройля $\lambda \sim 2\pi\hbar/|\vec{p}|$ корпускулярно-волновой дуализм

Следствие:

Чтобы исследовать взаимодействие частиц на малых расстояниях Δx они должны “обменяться” большим импульсом Δp

Нужны высокоэнергетичные коллайдеры!

= супермикроскопы



Лоренц-инвариантный аналог переданного импульса \vec{q} для процесса рассеяния $X_1 + X_2 \rightarrow X_{1'} + \dots$

$$t \equiv (P_1 - P_{1'})^2 \approx -\vec{q}^2$$

Описание взаимодействий: локальность

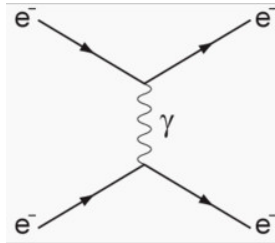
свободная частица \longrightarrow акт взаимодействия \longrightarrow свободная частица

взаимодействие между элементарными частицами происходит путём обмена “виртуальными” элементарными частицами

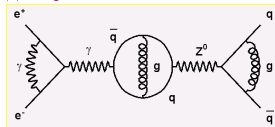
$$P_A^2 \neq m_A^2$$

В каждой вершине

- сохраняется 4-импульс
обмен массивной частицей — короткодействие
- сохраняется полный спин (угловой момент)
- стоит константа взаимодействия, e , g_S ,
...
больше константа — сильнее взаимодействие



диаграммы Фейнмана



- электромагнитное:
фотон, γ
- сильное: глюон (8), g
- слабое:
 W^\pm -бозоны, Z -бозон
- гравитационное:
гравитон
- юкавское:
бозон Хиггса, h

Three Generations of Matter (Fermions) spin 1/2

	I	II	III
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
name →	u Left up Right	c Left charm Right	t Left top Right
Quarks	4.8 MeV $-1/3$ d Left down Right	104 MeV $-1/3$ s Left strange Right	4.2 GeV $-1/3$ b Left bottom Right
	0 eV 0 ν_e Left electron neutrino Right	0 eV 0 ν_μ Left muon neutrino Right	0 eV 0 ν_τ Left tau neutrino Right
	0.511 MeV -1 e Left electron Right	105.7 MeV -1 μ Left muon Right	1.777 GeV -1 τ Left tau Right
Leptons			

Bosons (Forces) spin 1	0 0 g gluon	>114 GeV 0 0 H Higgs boson
	0 0 γ photon	spin 0
	91.2 GeV 0 Z⁰ weak force	
	80.4 GeV ± 1 W[±] weak force	

непосредственно: все взаимодействуют гравитационно!

- **кварки**: сильное, слабое, электромагнитное, юкавское
- **заряженные лептоны**: слабое, электромагнитное, юкавское
- **нейтрино**: слабое

- **глюоны**: сильное (самодействие)
- **Z-бозон**: слабое (самодействие), юкавское
- **W^\pm -бозоны**: слабое (самодействие), юкавское, электромагнитное

через виртуальных посредников:

все со всеми !!

Three Generations of Matter (Fermions) spin 1/2

три поколения частиц материи (фермионов)

неразличимы
электрическими,
слабыми или
сильными
"силами"

различаются
гравитационными
и юкавскими
"силами"

зачем нужны?
иерархичность

	I	II	III
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
name →	u up	c charm	t top
Quarks	d down	s strange	b bottom
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
Leptons	e electron	μ muon	τ tau

0
0
g
gluon

0
0
 γ
photon

Bosons (Forces) spin 1

91.2 GeV
0
Z⁰
weak
force

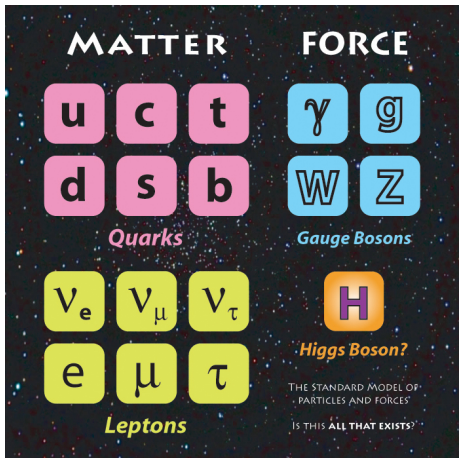
80.4 GeV
 ± 1
W[±]
weak
force

>114 GeV
0
0
H
Higgs
boson

spin 0

$m_p \approx 1 \text{ GeV}$

Элементарные частицы и взаимодействия между ними

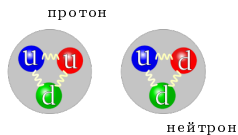
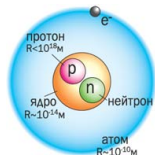


1 2 3 ← поколения

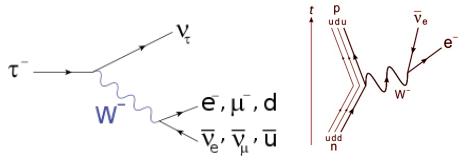
$$m_d - m_u \approx 5 m_e, \quad m_n - m_p \approx 3 m_e$$

долгожитель: мюон $\tau_\mu \sim 10^{-6}$ с

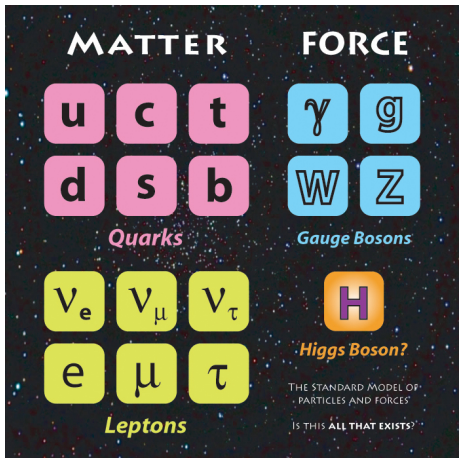
- Почему столь различные массы???
- Почему 2- и 3-го поколений нет в повседневной жизни?



Спасибо слабым взаимодействиям!



Элементарные частицы и взаимодействия между ними

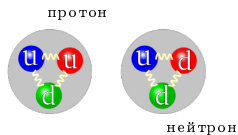
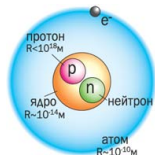


1 2 3 ← поколения

$$m_d - m_u \approx 5 m_e, \quad m_n - m_p \approx 3 m_e$$

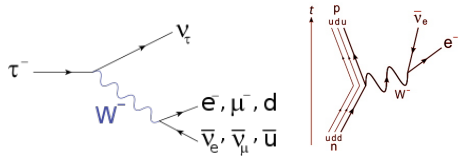
долгожитель: мюон $\tau_\mu \sim 10^{-6}$ с

- Почему столь различные массы???
- Почему 2- и 3-го поколений нет в повседневной жизни?



Спасибо

слабым взаимодействиям!



Симметрии и особенности слабых взаимодействий

Другие симметрии:

- зарядовая C (частица \leftrightarrow античастица)
- обращение времени T
($t \rightarrow -t$ в элементарном процессе)
- отражение пространственных осей P
($\vec{p} \rightarrow -\vec{p}$, $\vec{L} \rightarrow \vec{L}$)

теория должна быть

CPT -инвариантна

- барионный заряд
(стабильность протона)

$$B(q) = 1/3, \tau_p > 10^{31-33} \text{ лет}$$

- лептонные заряды L_e, L_μ, L_τ
сохраняются в СМ, но не в природе!
нейтринные осцилляции \rightarrow

$$L_{e,\mu,\tau} \neq \text{const}$$

пока не видели нарушения
полного числа $L \equiv L_e + L_\mu + L_\tau$

Слабые взаимодействия нарушают:

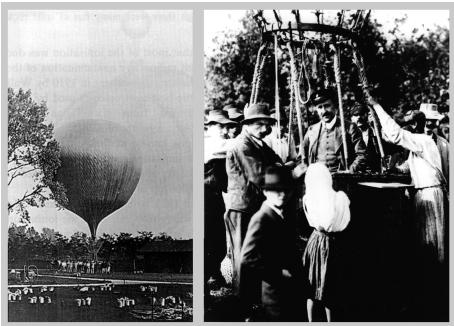
- кварковые ароматы: заряженные W^\pm -бозоны смешивают верхние и нижние кварки разных поколений
- P -симметрию: только “левые”
(по-анalogии с поляризацией света)
частицы участвуют
асимметрия в β -распаде ^{60}Co
- C -симметрию: антинейтрино правые!
- CP -симметрию: осцилляции и распады K -, D -, B -мезонов

нарушение C - CP - необходимо (по Сахарову) для генерации барионной асимметрии Вселенной

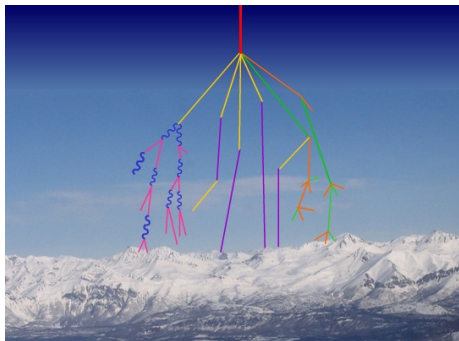
- T -инвариантность: в распадах B -мезонов (2012, BaBar)

Космические лучи или 101 год физике частиц

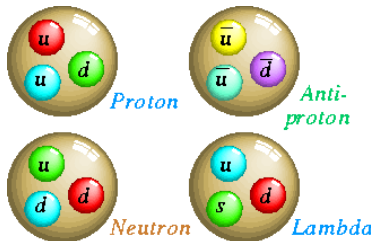
Открытие: Виктор Гесс, 1912г.



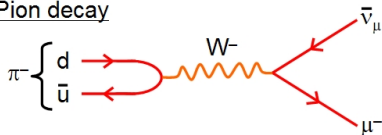
- Спонтанный электрический ток в газах
- Наблюдался даже в свинцовой камере
- Ток растёт с высотой! ↗5300м
- Эффект не от Солнца!



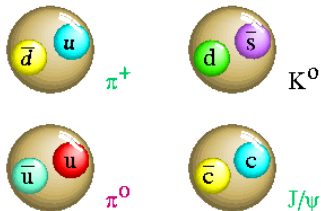
- 1932г. открыт позитрон e^+ “анти”
- 1937г. открыты мюоны $\mu^+\mu^-$ и их распад 2-е поколение
- 1947г. открыты π -мезоны адроны, множественное рождение
- 1955г. открыты K -мезоны и нейтральные гипероны “странность”



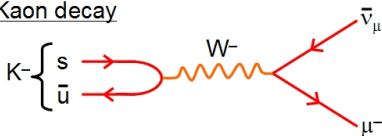
Pion decay



$$\pi^-(d\bar{u}) \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$



Kaon decay



$$K^-(s\bar{u}) \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

кварк (глюон) в составе протона несёт лишь часть полного импульса на адронном коллайдере энергия элементарного столкновения

qq, gg, gq в среднем меньше:

грубо на LHC (8 ТэВ): $P_{u,d} \sim P_p/6$

остальной импульс $\sim P_p/2$ уносят многочисленные глюоны

Проверки Стандартной модели

- распады частиц:

темп ("ширина") Γ_X

парциальная ширина $\text{Br} = \Gamma_{X \rightarrow A+B} / \Gamma_X$

- рассеяния частиц $A+B \rightarrow \dots$:

для данной частицы A и плотности потока налетающих частиц j_B

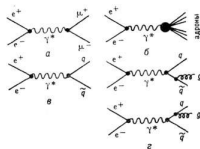
число событий в единицу времени $dN_{A+B \rightarrow \dots} = j_B \times d\sigma_{A+B \rightarrow \dots}$

$$\mu \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_\mu, Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

вероятность выживания за время t есть $P = e^{-\Gamma t}$

вероятность распада в частицы A и B

сечение рассеяния $d\sigma_{A+B \rightarrow \dots}$



Фундаментальные частицы

масса	2.4 МэВ	1.27 ГэВ	173.2 ГэВ	0
заряд	2/3	2/3	2/3	0
спин	1/2	1/2	1/2	1
К	u верхняя	c очарованый	t top (truth)	γ фотон
В	d нижняя	s странная	b bottom (бозон)	g глюон
Л	ν_e электронное	ν_μ мюонное	ν_τ тау-нейтрин	Z^0 z-бозон
П	e электрон	μ мюон	τ тау-лептон	W^\pm w-бозон
Н	0	0	0	0
О	0	0	0	0
М	0	0	0	0

Три поколения фермионов

Проверки предсказаний СМ

$$\dots \Gamma = \Gamma_{X \rightarrow A+B}(g, m_X, \dots)$$

Проверки предсказаний её мотивированных обобщений

Регулярно обновляемая достоверная информация

<http://pdg.lbl.gov>

Backup slides

Сильные взаимодействия бесцветных объектов

