

*Современные проблемы  
технической физики*

*Стандартная модель*

## Три поколения материи (Фермионы)

	I	II	III	
масса	2.4 МэВ	1.27 ГэВ	171.2 ГэВ	0
заряд	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название	верхний	очарованный	истинный	фотон
	<b>u</b>	<b>c</b>	<b>t</b>	<b><math>\gamma</math></b>
	4.8 МэВ	104 МэВ	4.2 ГэВ	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	нижний	странный	прелестный	глюон
	<b>d</b>	<b>s</b>	<b>b</b>	<b>g</b>
	< 2.2 эВ	< 0.17 МэВ	< 15.5 МэВ	91.2 ГэВ
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	электронное нейтрино	мюонное нейтрино	тау нейтрино	Z бозон
	<b><math>\nu_e</math></b>	<b><math>\nu_\mu</math></b>	<b><math>\nu_\tau</math></b>	<b><math>Z^0</math></b>
	0.511 МэВ	105.7 МэВ	1.777 ГэВ	80.4 ГэВ
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	электрон	мюон	тау	W бозон
	<b>e</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\tau</math></b>	<b><math>W^\pm</math></b>

Кварки

Лептоны

Калибровочные Бозоны  
(переносчики взаимодействия)

**Стандартная модель** —  
теоретическая конструкция в физике  
элементарных частиц, описывающая  
электромагнитное, слабое и сильное  
взаимодействие всех элементарных  
частиц

Стандартная модель не является теорией всего, так как не описывает тёмную материю, тёмную энергию и не включает в себя гравитацию.

Экспериментальное подтверждение существования промежуточных векторных бозонов в середине 80-ых годов завершило построение Стандартной модели и её принятие как основной.

Необходимость незначительного расширения модели возникла в 2002 году после обнаружения нейтринных осцилляций, а подтверждение существования бозона Хиггса в 2012 году завершило экспериментальное обнаружение предсказываемых Стандартной моделью элементарных частиц.

Всё вещество состоит из 24 фундаментальных квантовых полей спина  $\frac{1}{2}$ , квантами которых являются фундаментальные частицы-фермионы, которые можно объединить в три поколения фермионов: 6 лептонов (электрон, мюон, тау-лептон, электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино), 6 кварков (u, d, s, c, b, t) и 12 соответствующих им античастиц.

Кварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях; заряжённые лептоны (электрон, мюон, тау-лептон) — в слабых и электромагнитных; нейтрино — только в слабых взаимодействиях.

Все три типа взаимодействий  
возникают как следствие постулата,  
что наш мир симметричен  
относительно трёх типов  
калибровочных преобразований.

Частицами-переносчиками взаимодействий являются бозоны:

8 глюонов для сильного взаимодействия;

3 тяжёлых калибровочных бозона ( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ) для слабого взаимодействия

один фотон для электромагнитного взаимодействия.

В отличие от электромагнитного и сильного, слабое взаимодействие может смешивать фермионы из разных поколений, что приводит к нестабильности всех частиц, за исключением легчайших, и к таким эффектам, как нарушение CP-инвариантности и нейтринные осцилляции.

# FERMIONS

matter constituents  
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

## Leptons spin = 1/2

Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_L$ lightest neutrino*	$(0-0.13)\times 10^{-9}$	0
$e$ electron	0.000511	-1
$\nu_M$ middle neutrino*	$(0.009-0.13)\times 10^{-9}$	0
$\mu$ muon	0.106	-1
$\nu_H$ heaviest neutrino*	$(0.04-0.14)\times 10^{-9}$	0
$\tau$ tau	1.777	-1

## Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$u$ up	0.002	2/3
$d$ down	0.005	-1/3
$c$ charm	1.3	2/3
$s$ strange	0.1	-1/3
$t$ top	173	2/3
$b$ bottom	4.2	-1/3

# BOSONS

force carriers  
spin = 0, 1, 2, ...

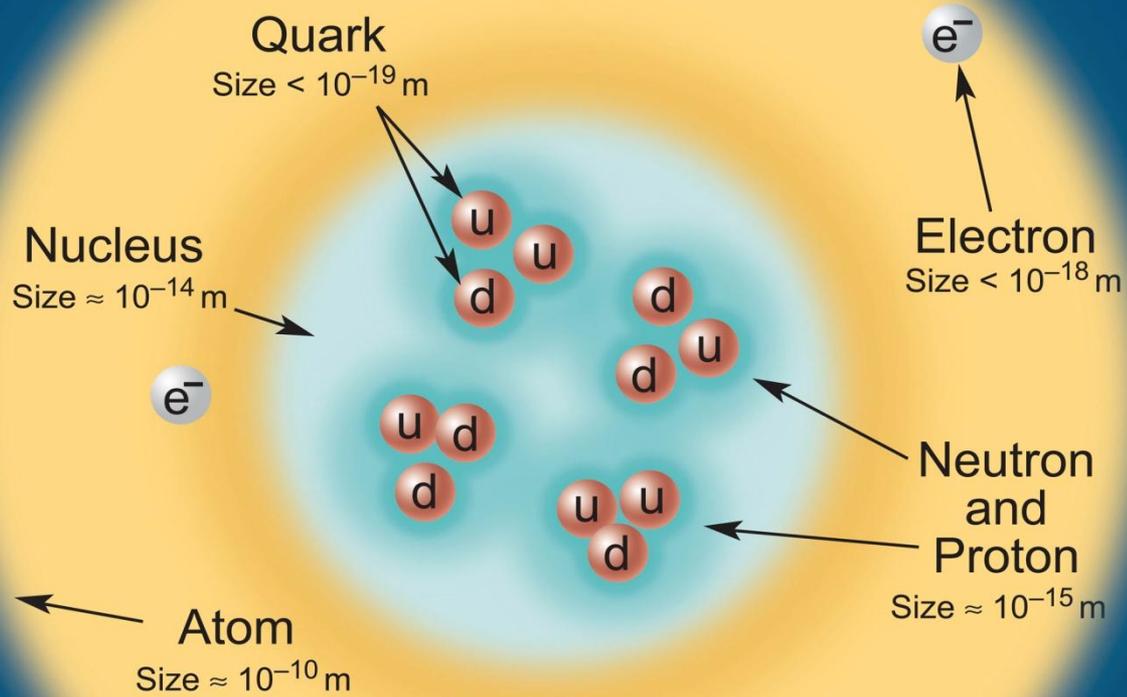
## Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
 photon	0	0
  W bosons	80.39	-1 +1
 Z boson	91.188	0

## Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
 gluon	0	0

# Structure within the Atom



If the proton and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

# Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	$W^+$ $W^-$ $Z^0$	$\gamma$	Gluons
Strength at	$10^{-18}$ m	0.8	1	25
	$3 \times 10^{-17}$ m	$10^{-41}$	1	60

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

Baryons are fermionic hadrons.

These are a few of the many types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass $\text{GeV}/c^2$	Spin
<b>p</b>	proton	<b>uud</b>	1	0.938	1/2
<b><math>\bar{p}</math></b>	antiproton	<b><math>\bar{u}\bar{u}\bar{d}</math></b>	-1	0.938	1/2
<b>n</b>	neutron	<b>udd</b>	0	0.940	1/2
<b><math>\Lambda</math></b>	lambda	<b>uds</b>	0	1.116	1/2
<b><math>\Omega^-</math></b>	omega	<b>sss</b>	-1	1.672	3/2

# Mesons $q\bar{q}$

Mesons are bosonic hadrons

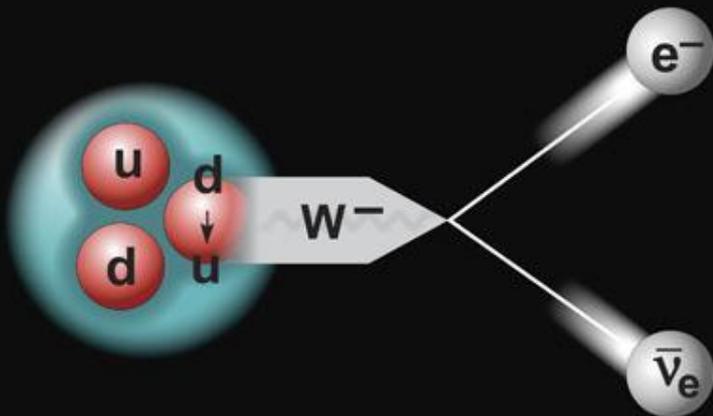
These are a few of the many types of mesons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass $\text{GeV}/c^2$	Spin
$\pi^+$	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
$K^-$	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	+1	0.776	1
$B^0$	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

# Particle Processes

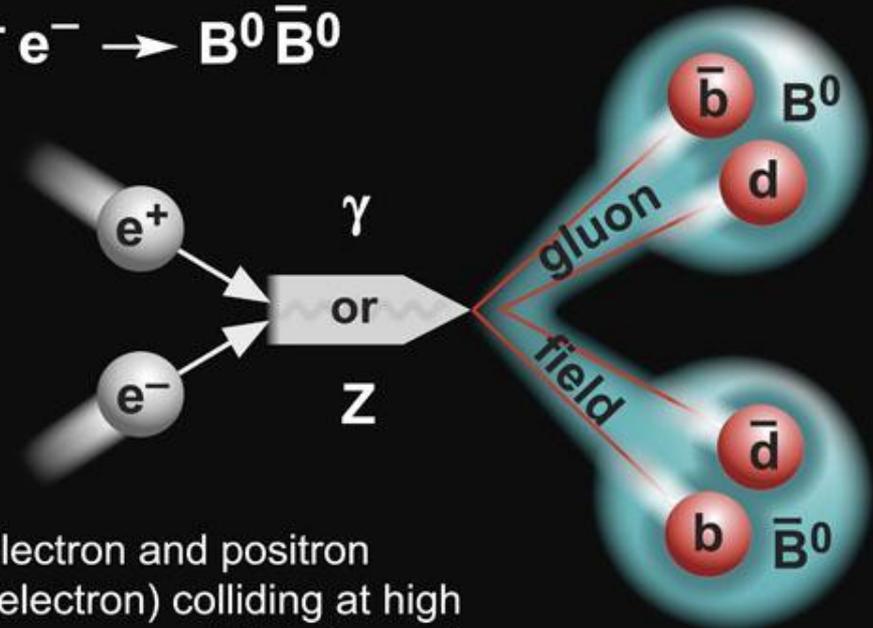
These diagrams are an artist's conception. Blue-green shaded areas represent the cloud of gluons.

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$$



A free neutron (udd) decays to a proton (uud), an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron  $\beta$  (beta) decay.

$$e^+ e^- \rightarrow B^0 \bar{B}^0$$



An electron and positron (antielectron) colliding at high energy can annihilate to produce  $\bar{B}^0$  and  $B^0$  mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.

## Unsolved Mysteries

Driven by new puzzles in our understanding of the physical world, particle physicists are following paths to new wonders and startling discoveries. Experiments may even find extra dimensions of space, mini-black holes, and/or evidence of string theory.

### Universe Accelerating?



The expansion of the universe appears to be accelerating. Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If not, will experiments reveal a new force of nature or even extra (hidden) dimensions of space?

### Why No Antimatter?



Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we now see only matter except for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?

### Dark Matter?



Invisible forms of matter make up much of the mass observed in galaxies and clusters of galaxies. Does this dark matter consist of new types of particles that interact very weakly with ordinary matter?

### Origin of Mass?



In the Standard Model, for fundamental particles to have masses, there must exist a particle called the Higgs boson. Will it be discovered soon? Is supersymmetry theory correct in predicting more than one type of Higgs?

По состоянию на конец XX века все предсказания Стандартной модели подтверждались экспериментально, иногда с очень высокой точностью в миллионные доли процента. Только в 2000-е годы стали появляться результаты, в которых предсказания Стандартной модели слегка расходятся с экспериментом, и даже явления, крайне трудно поддающиеся интерпретации в её рамках.

Стандартная модель не может являться последним словом в физике элементарных частиц, ибо она содержит слишком много внешних параметров, а также не включает гравитацию. Поэтому поиск отклонений от Стандартной модели (так называемой «новой физики») — одно из самых активных направлений исследования в 2010-х годах. Ожидалось, что эксперименты на коллайдере смогут зарегистрировать множество отклонений от Стандартной модели (с добавлением массивных нейтрино), однако по состоянию на конец 2011 года после двух лет экспериментов таких отклонений обнаружено не было.