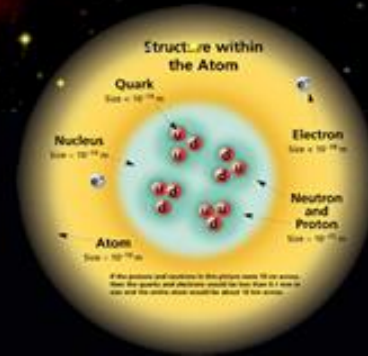




Микромир и Вселенная



Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

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

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of \hbar , which is the quantum unit of angular momentum, where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25} \text{ GeV s} = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J s}$.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c² (remember $E = mc^2$), where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10} \text{ joule}$. The mass of the proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

BOSONS

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

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W⁻	80.4	-1			
W⁺	80.4	+1			
Z⁰	91.187	0			

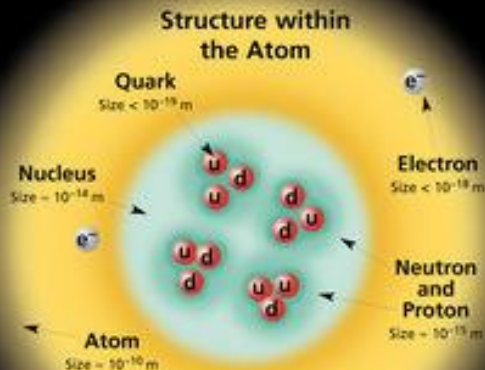
Color Charge
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and **W** and **Z** bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons** ($q\bar{q}$) and **baryons** (qqq).

Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 2.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 100 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

Property	Interaction	Gravitational	Weak	Electromagnetic	Strong	
			(Electroweak)		Fundamental	Residual
Acts on:		Mass - Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:		All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:		Graviton (not yet observed)	W⁺ W⁻ Z⁰	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag. for two u quarks at:		10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
	10^{-18} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
	$3 \times 10^{-17} \text{ m}$	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20

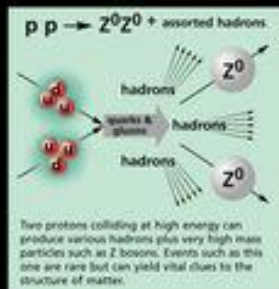
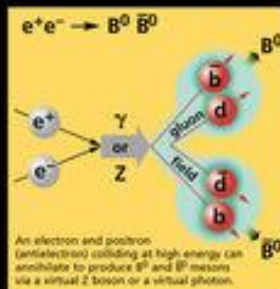
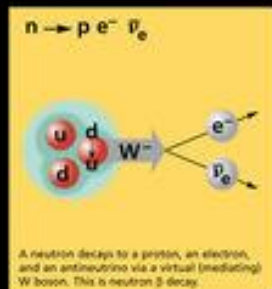
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	u\bar{d}	+1	0.140	0
K^-	kaon	s\bar{u}	-1	0.494	0
ρ^+	rho	u\bar{d}	+1	0.770	1
B^0	B-zero	d\bar{b}	0	5.279	0
η_c	eta-c	c\bar{c}	0	2.980	0

Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically bosons (e.g., Z^0 , γ , and $\eta_c = c\bar{c}$, but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:

U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particles and Fields
BURLE INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>

Периодическая система элементов Менделеева

ГРУППА

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----

ПЕРИОД

1869 г.

Категории

Alkali metals	Actinoids	Halogens
Alkaline earth metals	Post-transition metals	Noble gases
Transition metals	Metalloids	Properties unknown
Lanthanoids	Nonmetals	

Происхождение

- Изначальный
- Радиоактивный распад
- Искусственный синтез

Состояние

- Твердое
- Жидкое
- Газообразное

1 H hydrogen 1.00794(7)																				
3 Li lithium 6.941(2)	4 Be beryllium 9.012182(3)															5 B boron 10.811(7)	6 C carbon 12.0107(8)	7 N nitrogen 14.0067(2)	8 O oxygen 15.9994(3)	9 F fluorine 18.9984032(5)
11 Na sodium 22.98976928(2)	12 Mg magnesium 24.3050(6)															13 Al aluminium 26.9815386(3)	14 Si silicon 28.0855(3)	15 P phosphorus 30.973762(2)	16 S sulfur 32.065(5)	17 Cl chlorine 35.453(2)
19 K potassium 39.0983(1)	20 Ca calcium 40.078(4)	21 44.955912(6)	22 Ti titanium 47.867(1)	23 V vanadium 50.9415(1)	24 Cr chromium 51.9961(6)	25 Mn manganese 54.938045(5)	26 Fe iron 55.845(2)	27 Co cobalt 58.933195(5)	28 Ni nickel 58.6934(4)	29 Cu copper 63.546(3)	30 Zn zinc 65.38(2)	31 69.723(3)	32 72.64(1)	33 As arsenic 74.92160(2)	34 Se selenium 78.96(3)	35 Br bromine 79.904(1)				
37 Rb rubidium 85.4678(3)	38 Sr strontium 87.62(1)	39 Y yttrium 88.90585(2)	40 Zr zirconium 91.224(2)	41 Nb niobium 92.90638(2)	42 Mo molybdenum 95.96(2)	43	44 Ru ruthenium 101.07(2)	45 Rh rhodium 102.90550(2)	46 Pd palladium 106.42(1)	47 Ag silver 107.8682(2)	48 Cd cadmium 112.411(8)	49 In indium 114.818(3)	50 Sn tin 118.710(7)	51 Sb antimony 121.760(1)	52 Te tellurium 127.60(3)	53 I iodine 126.90447(3)				
55 Cs caesium 132.9054519(2)	56 Ba barium 137.327(7)	* Lanthanoids 57-71		73 Ta tantalum 180.9479(1)	74 W tungsten 183.84(1)	75	76 Os osmium 190.23(3)	77 Ir iridium 192.217(3)	78 Pt platinum 195.084(9)	79 Au gold 196.966569(4)	80 Hg mercury 200.59(2)	81 Tl thallium 204.3833(2)	82 Pb lead 207.2(1)	83 Bi bismuth 208.98040(1)	84	85				
87	88	** Actinoids 89-103																		



* Lanthanoids

57	58 Ce cerium 140.116(1)	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

** Actinoids

89	90 Th thorium 232.03806(2)	91	92 U uranium 238.02891(3)
----	--	----	---

Периодическая система элементов Менделеева

ГРУППА

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----

ПЕРИОД

1932 г.

Категории

Alkali metals	Actinoids	Halogens
Alkaline earth metals	Post-transition metals	Noble gases
Transition metals	Metalloids	Properties unknown
Lanthanoids	Nonmetals	

Происхождение

- Исходный
- Радиоактивный распад
- Искусственный синтез

Состояние

- Твердое
- Жидкое
- Газообразное

1 H hydrogen 1.00794(7)																	2 He helium 4.002602(2)
3 Li lithium 6.941(2)	4 Be beryllium 9.012182(3)											5 B boron 10.811(7)	6 C carbon 12.0107(8)	7 N nitrogen 14.0067(2)	8 O oxygen 15.9994(3)	9 F fluorine 18.9984032(5)	10 Ne neon 20.1797(6)
11 Na sodium 22.98976928(2)	12 Mg magnesium 24.3050(6)											13 Al aluminium 26.9815386(8)	14 Si silicon 28.0855(3)	15 P phosphorus 30.973762(2)	16 S sulfur 32.065(5)	17 Cl chlorine 35.453(2)	18 Ar argon 39.948(1)
19 K potassium 39.0983(1)	20 Ca calcium 40.078(4)	21 Sc scandium 44.955912(6)	22 Ti titanium 47.867(1)	23 V vanadium 50.9415(1)	24 Cr chromium 51.9961(6)	25 Mn manganese 54.938045(5)	26 Fe iron 55.845(2)	27 Co cobalt 58.933195(5)	28 Ni nickel 58.6934(4)	29 Cu copper 63.546(3)	30 Zn zinc 65.38(2)	31 Ga gallium 69.723(1)	32 Ge germanium 72.64(1)	33 As arsenic 74.92160(2)	34 Se selenium 78.96(3)	35 Br bromine 79.904(1)	36 Kr krypton 83.798(2)
37 Rb rubidium 85.4678(3)	38 Sr strontium 87.62(1)	39 Y yttrium 88.90585(2)	40 Zr zirconium 91.224(2)	41 Nb niobium 92.90638(2)	42 Mo molybdenum 95.96(2)	43 Tc technetium [98]	44 Ru ruthenium 101.07(2)	45 Rh rhodium 102.90550(2)	46 Pd palladium 106.42(1)	47 Ag silver 107.8682(2)	48 Cd cadmium 112.411(8)	49 In indium 114.818(3)	50 Sn tin 118.710(7)	51 Sb antimony 121.760(1)	52 Te tellurium 127.60(3)	53 I iodine 126.90447(3)	54 Xe xenon 131.29(6)
55 Cs caesium 132.9054519(2)	56 Ba barium 137.327(7)	* Lanthanoids 57-71	72 Hf hafnium 178.49(2)	73 Ta tantalum 180.9479(1)	74 W tungsten 183.84(1)	75 Re rhenium 186.207(1)	76 Os osmium 190.23(3)	77 Ir iridium 192.217(3)	78 Pt platinum 195.084(9)	79 Au gold 196.966569(4)	80 Hg mercury 200.59(2)	81 Tl thallium 204.3833(2)	82 Pb lead 207.2(1)	83 Bi bismuth 208.98040(1)	84 Po polonium [208]	85 At astatine [209]	86 Rn radon [222]
87 Fr francium [223]	88 Ra radium [226.0254]	** Actinoids 89-103															



* Lanthanoids

57 La lanthanum 138.90547(7)	58 Ce cerium 140.116(1)	59 Pr praseodymium 140.90765(2)	60 Nd neodymium 144.242(3)	61 Pm promethium [144.91]	62 Sm samarium 150.36(2)	63 Eu europium 151.964(1)	64 Gd gadolinium 157.25(3)	65 Tb terbium 158.92535(2)	66 Dy dysprosium 162.50(1)	67 Ho holmium 164.93032(2)	68 Er erbium 167.259(3)	69 Tm thulium 168.93421(2)	70 Yb ytterbium 173.054(5)	71 Lu lutetium 174.9668(1)
--	---	---	--	---	--	---	--	--	--	--	---	--	--	--

** Actinoids

89 Ac actinium [227.03]	90 Th thorium 232.03806(2)	91 Pa protactinium 231.03588(2)	92 U uranium 238.02891(3)
---	--	---	---

Электрон

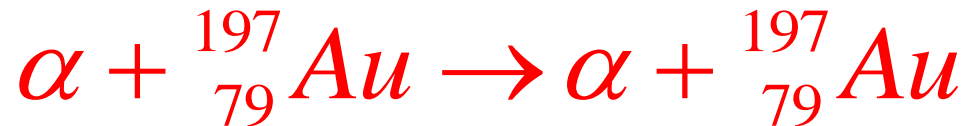
1897 - Дж. Дж. Томсон. Открытие электрона

$$Q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; m_e = 1/2000 M(^1\text{H})$$

1904 - Дж. Дж. Томсон. Модель атома

Протон

1911 – Э. Резерфорд. Открытие атомного ядра



1919 – Э. Резерфорд. Открытие протона

$$Q_p = -q_e; m_p = M(^1\text{H})$$



Нейтрон

1932 г. Дж. Чадвик. Открытие нейтрона

$$Q_n = 0; \quad m_n = m_p$$

Позитрон

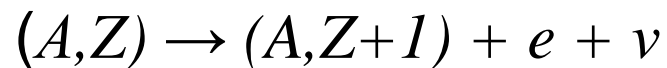
1932 г. К.Андерсон. Открытие позитрона

$$Q(e^+) = +1; \quad m(e^+) = m_e$$



Нейтрино

1930 г. В. Паули. Гипотеза нейтрино



$$Q_\nu = 0; \quad m_\nu \sim 0$$

		Заряд, q_e	Масса, МэВ/ c^2
Электрон	e^-	-1	0,511
Позитрон	e^+	+1	0,511
Протон	p	+1	938,3
Нейтрон	n	0	939,6
“Нейтрино”	ν	0	0

Элементарный заряд $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

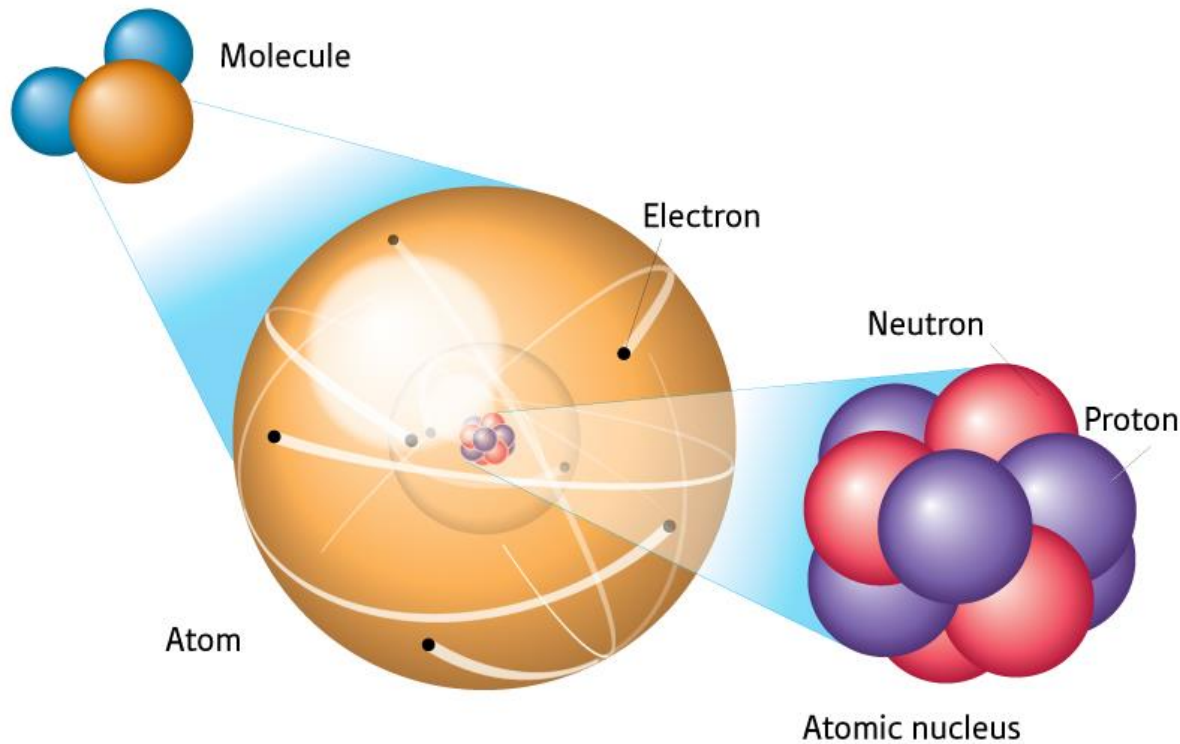
1 эВ (электрон-Вольт) – энергия, которую приобретает электрон, проходя разность потенциалов 1 Вольт

1 кэВ (кило) = 10^3 эВ

1 МэВ (мега) = 10^3 кэВ = 10^6 эВ

1 ГэВ (гига) = 10^3 МэВ = 10^9 эВ

1 ТэВ (тера) = 10^3 ГэВ = 10^{12} эВ



$^{208}_{82}\text{Pb}$

$$Z = 82$$

$$N = 126$$

$$A = 208$$

Z – заряд ядра, число протонов в ядре

N – число нейтронов в ядре

$A = N + Z$ – массовое число

Периодическая система элементов Менделеева

ГРУППА

ПЕРИОД

2006 г.

Категории

Alkali metals	Actinoids	Halogens
Alkaline earth metals	Post-transition metals	Noble gases
Transition metals	Metalloids	Properties unknown
Lanthanoids	Nonmetals	

Происхождение

-  Изначальный
-  Радиоактивный распад
-  Искусственный синтез

Состояние

-  Твердое
-  Жидкое
-  Газообразное

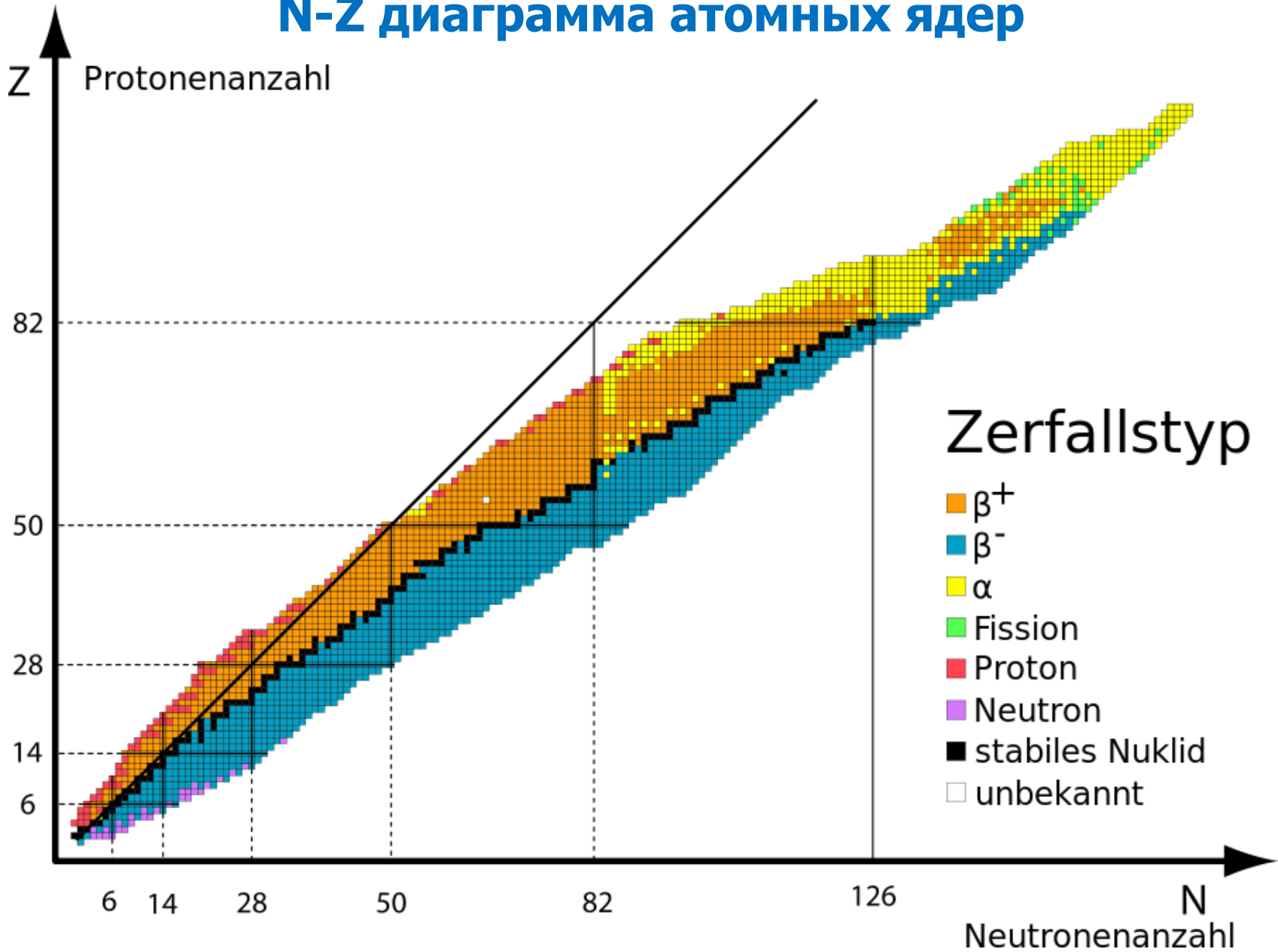
1 H hydrogen 1.00794(7)																	2 He helium 4.002602(2)
3 Li lithium 6.941(2)	4 Be beryllium 9.012182(3)											5 B boron 10.811(7)	6 C carbon 12.0107(8)	7 N nitrogen 14.0067(2)	8 O oxygen 15.9994(3)	9 F fluorine 18.9984032(5)	10 Ne neon 20.1797(6)
11 Na sodium 22.98976928(2)	12 Mg magnesium 24.3050(6)											13 Al aluminium 26.9815386(8)	14 Si silicon 28.0855(3)	15 P phosphorus 30.973762(2)	16 S sulfur 32.065(5)	17 Cl chlorine 35.453(2)	18 Ar argon 39.948(1)
19 K potassium 39.0983(1)	20 Ca calcium 40.078(4)	21 Sc scandium 44.955912(6)	22 Ti titanium 47.867(1)	23 V vanadium 50.9415(1)	24 Cr chromium 51.9961(6)	25 Mn manganese 54.938045(5)	26 Fe iron 55.845(2)	27 Co cobalt 58.933195(5)	28 Ni nickel 58.6934(4)	29 Cu copper 63.546(3)	30 Zn zinc 65.38(2)	31 Ga gallium 69.723(1)	32 Ge germanium 72.64(1)	33 As arsenic 74.92160(2)	34 Se selenium 78.96(3)	35 Br bromine 79.904(1)	36 Kr krypton 83.798(2)
37 Rb rubidium 85.4678(3)	38 Sr strontium 87.62(1)	39 Y yttrium 88.90585(2)	40 Zr zirconium 91.224(2)	41 Nb niobium 92.90638(2)	42 Mo molybdenum 95.96(2)	43 Tc technetium [98.9063]	44 Ru ruthenium 101.07(2)	45 Rh rhodium 102.90550(2)	46 Pd palladium 106.42(1)	47 Ag silver 107.8682(2)	48 Cd cadmium 112.411(8)	49 In indium 114.818(3)	50 Sn tin 118.710(7)	51 Sb antimony 121.760(1)	52 Te tellurium 127.60(3)	53 I iodine 126.90447(3)	54 Xe xenon 131.29(6)
55 Cs caesium 132.9054519(2)	56 Ba barium 137.327(7)	* Lanthanoids 57-71	72 Hf hafnium 178.49(2)	73 Ta tantalum 180.9479(1)	74 W tungsten 183.84(1)	75 Re rhenium 186.207(1)	76 Os osmium 190.23(3)	77 Ir iridium 192.217(3)	78 Pt platinum 195.084(9)	79 Au gold 196.966569(4)	80 Hg mercury 200.59(2)	81 Tl thallium 204.3833(2)	82 Pb lead 207.2(1)	83 Bi bismuth 208.98040(1)	84 Po polonium [208.9824]	85 At astatine [209.99]	86 Rn radon [222.02]
87 Fr francium [223.0197]	88 Ra radium [226.0254]	** Actinoids 89-103	104 Rf rutherfordium [261.12]	105 Db dubnium [268.13]	106 Sg seaborgium [271.13]	107 Bh bohrium [278]	108 Hs hassium [277.15]	109 Mt meitnerium [276.15]	110 Ds darmstadtium [281.16]	111 Rg roentgenium [280.16]	112 Cn copernicium [285.17]	113 Uut ununtrium [284.18]	114 Fl flerovium [289.19]	115 Uup ununpentium [288.19]	116 Lv livermorium [293]	117 Uus ununseptium [294]	118 Uuo ununoctium [294]

* Lanthanoids

57 La lanthanum 138.90547(7)	58 Ce cerium 140.116(1)	58 Pr praseodymium 140.90765(2)	60 Nd neodymium 144.242(3)	61 Pm promethium [144.91]	62 Sm samarium 150.36(2)	63 Eu europium 151.964(1)	64 Gd gadolinium 157.25(3)	65 Tb terbium 158.92535(2)	66 Dy dysprosium 162.500(1)	67 Ho holmium 164.93032(2)	68 Er erbium 167.259(3)	69 Tm thulium 168.93421(2)	70 Yb ytterbium 173.054(5)	71 Lu lutetium 174.9668(1)
89 Ac actinium [227.03]	90 Th thorium 232.03806(2)	91 Pa protactinium 231.03688(2)	92 U uranium 238.02891(3)	93 Np neptunium [237.0482]	94 Pu plutonium [244.0642]	95 Am americium [243.0614]	96 Cm curium [247.0704]	97 Bk berkelium [247.0703]	98 Cf californium [251.0796]	99 Es einsteinium [252.0829]	100 Fm fermium [257.0951]	101 Md mendelevium [258.0986]	102 No nobelium [259.1009]	103 Lr lawrencium [262.11]

** Actinoids

N-Z диаграмма атомных ядер

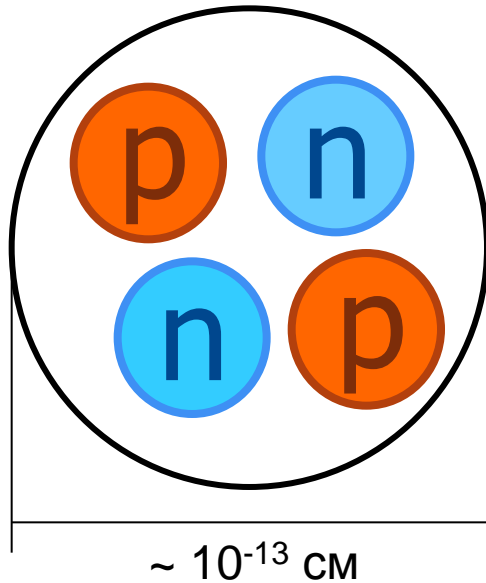


Как устроен Мир. 30-е годы XX века



В середине 30-х годов XX века физическая картина мира строилась исходя из трех элементарных частиц – **электрона**, **протона** и **нейтрона**. Вещество состоит из атомов и молекул, основную массу атомов составляет атомное ядро, состоящее из протонов и нейтронов. Электроны формируют атомную оболочку.

α -частица



α -частица – ядро атома гелия ${}^4_2\text{He}$

Какие силы связывают протоны и нейтроны в атомные ядра?

1. Сильное взаимодействие между нуклонами

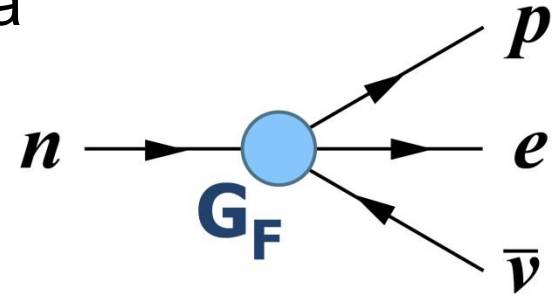
$$\frac{F_{NN}}{F_{Coul}} \sim 40$$

2. Конечность радиуса действия ядерных сил

$$r_{NN} \sim 1 \text{ ФМ} (10^{-13} \text{ см})$$

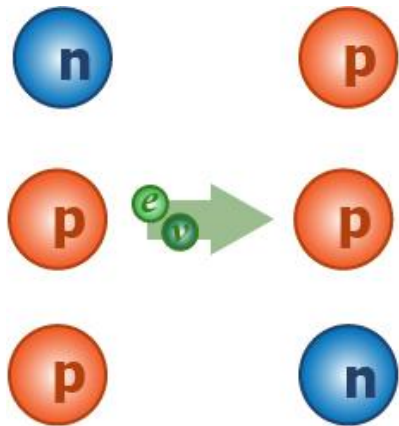
Теория Ферми

1934 – Э. Ферми. Теория β -распада



$$G_F \sim \frac{10^{-5}}{m_p^2} \text{ – константа } \mathbf{слабого} \text{ взаимодействия}$$

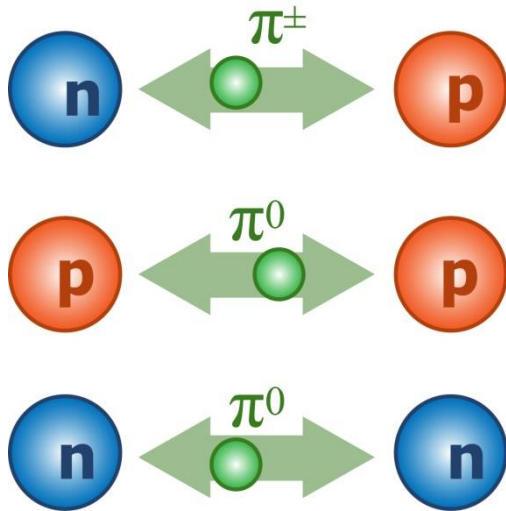
Для $E_\nu \sim 1 \text{ МэВ}$ $\sigma_\nu \sim 10^{-43} \text{ см}^2$, $L_\nu \sim 10^{20} \text{ см}$



В модели Ферми
для ядерных сил
радиус взаимодействия

$$r_{np}^F \sim 10^3 \text{ Фм} \gg r_{NN} !$$

Теория Юкавы



1935 г. Х. Юкава разработал теорию ядерного взаимодействия и предсказал мезоны – кванты ядерного поля.

$$r_{NN} \sim 1 \text{ ФМ} (10^{-13} \text{ см})$$

$$m_\pi \sim 200 m_e$$

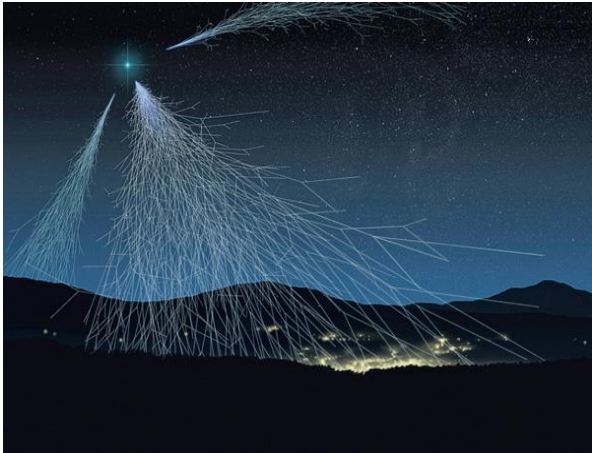
1937 г. К. Андерсон, С.Неддермейер. Открытие мюона.

$$Q_\mu = q_e; \quad m_\mu = 200 m_e \quad J=1/2$$

1947 г. С.Пауэлл. Открытие заряженных пионов.

$$Q_\pi = \pm q_e; \quad m_\pi = 140 \text{ МэВ} \quad J=0$$

Странные частицы



1947 – 1953 г. Космические лучи. Открытие К-мезонов и гиперонов: Λ , Σ , Ξ

$$Q(\Lambda) = 0; \quad m(\Lambda) = 1116 \text{ МэВ}/c^2 \quad J=1/2 \quad S=-1$$

$$Q(K^\pm) = \pm 1; \quad m(K^\pm) = 494 \text{ МэВ}/c^2 \quad J=0 \quad S=\pm 1$$

$$Q(K^0) = 0; \quad m(K^0) = 497 \text{ МэВ}/c^2 \quad J=0 \quad S=+1$$

$$Q(\bar{K}^0) = 0; \quad m(K^\pm) = 497 \text{ МэВ}/c^2 \quad J=0 \quad S=-1$$



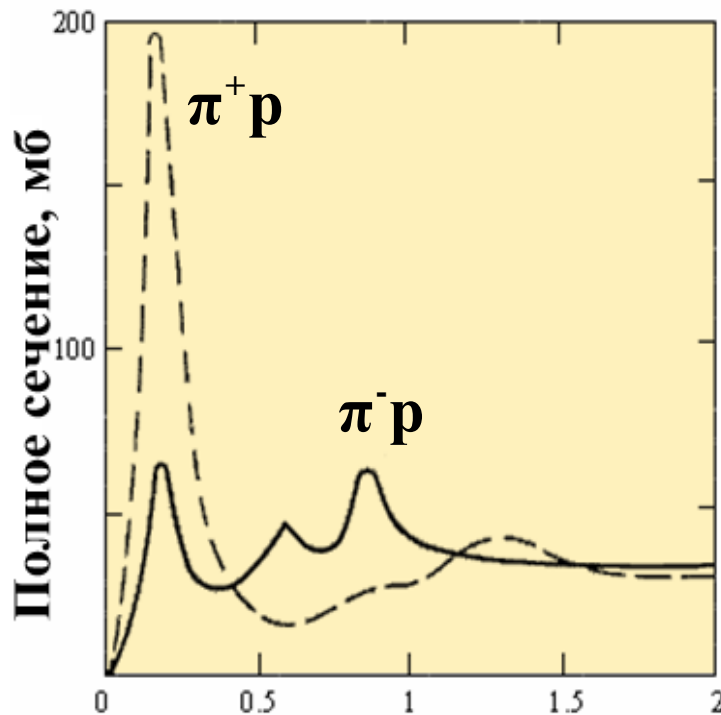
Нуклонные резонансы

1952 г. Э. Ферми. Открытие Δ -резонанса

$$\Delta E \cdot \Delta t = \hbar$$

$$\Gamma \cdot \tau = \hbar$$

$$100 \text{ МэВ} \longrightarrow 10^{-23} \text{ с}$$



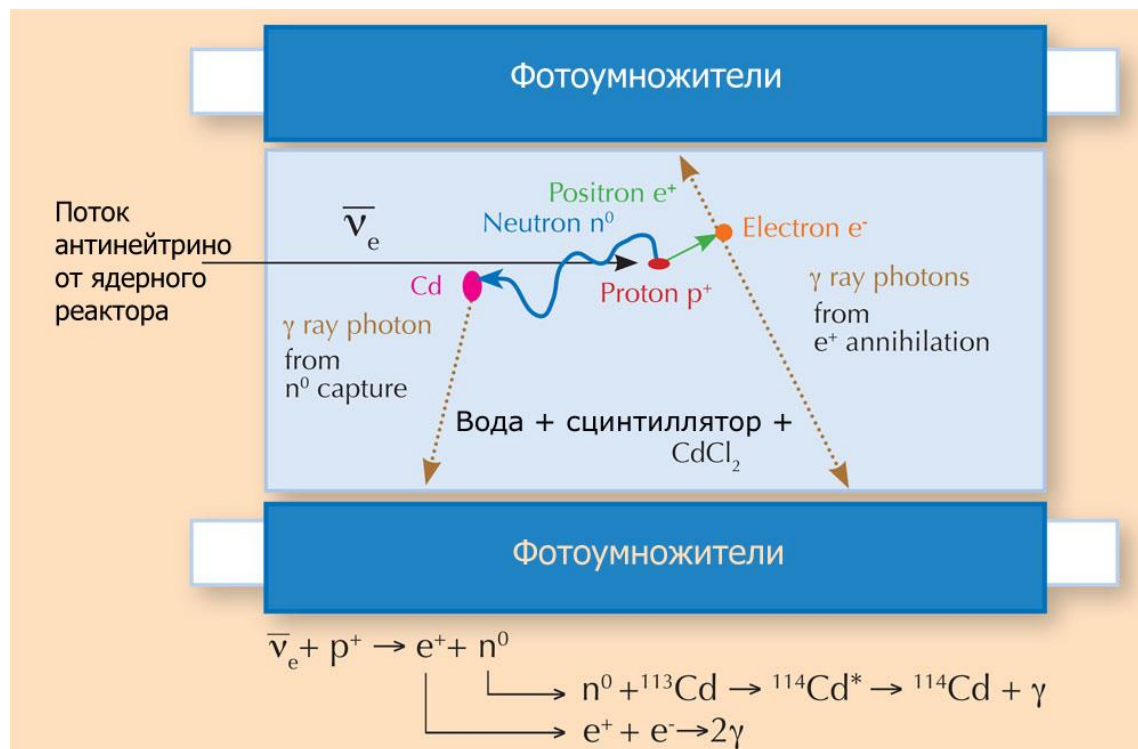
Кинетическая энергия пиона, ГэВ

Частица	Масса, Mc^2 (МэВ)	J^P
$\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$	~ 1232	$3/2^+$
N^+, N^0, N^-	~ 1440	$1/2^+$



Нейтрино

1956 г. Ф. Райнес, К. Коэн. Регистрация антинейтрино



$$\sigma = 12_{-4}^{+7} \cdot 10^{-44} \text{ см}^2$$

100 дней измерений
567 событий (фон 209 событий)

Нобелевская премия по физике

1995 г. – Ф. Райнес. За детектирование нейтрино

Нейтрино

1962 г. Л. Ледерман, М. Шварц, Дж. Стейнбергер.
Открытие мюонного нейтрино

- Идентификация двух типов нейтрино

- Распад пионов: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$

Эксперимент:

Образуются мюоны ?

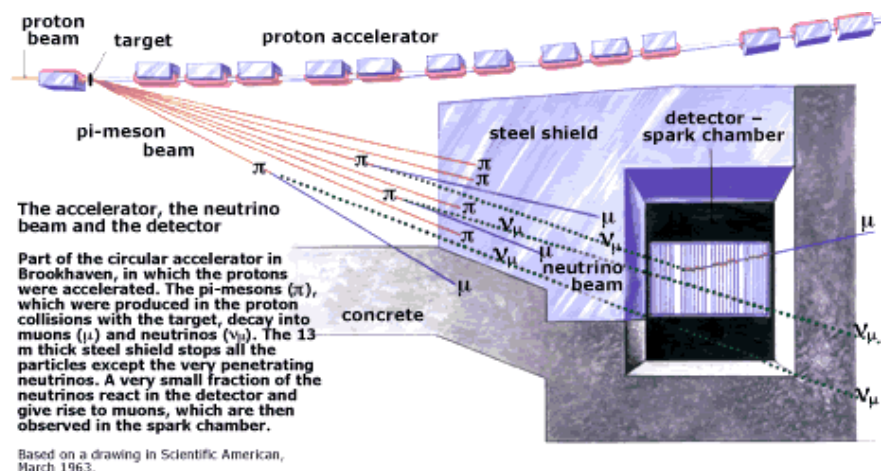
$$\nu + n \rightarrow \mu^- + p \quad \bar{\nu} + p \rightarrow \mu^+ + n$$

Или электроны?

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

Были зарегистрированы только мюоны,
следовательно

$$\nu_e \neq \nu_\mu$$

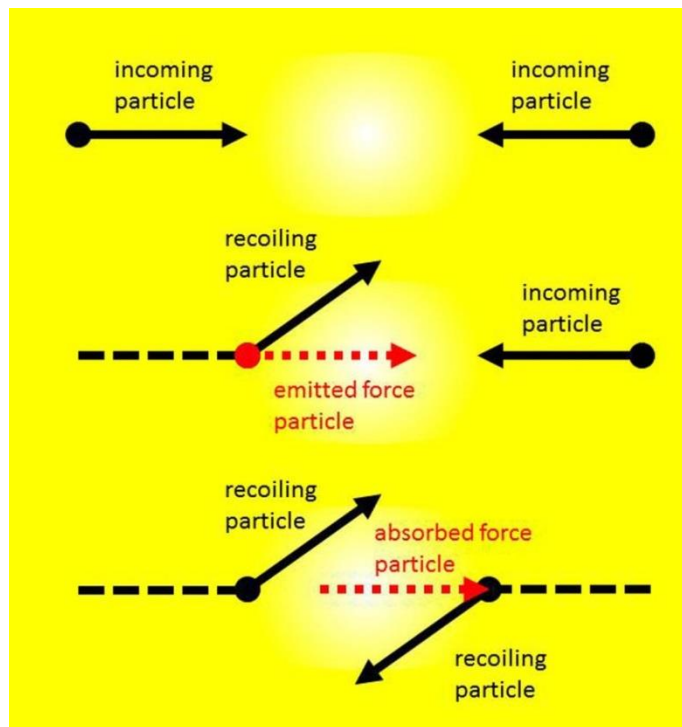
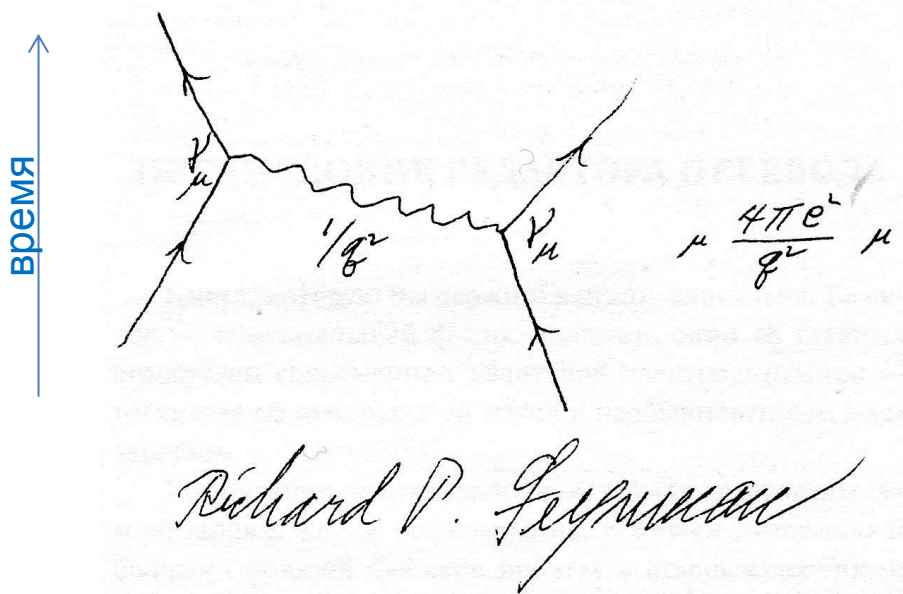


Нобелевская премия по физике

1988 г. – Л.Ледерман, М.Шварц, Дж.Стейнбергер, За метод нейтринного пучка и демонстрацию дублетной структуры лептонов через открытие мюонного нейтрино

Взаимодействия

1949 г. С. Томонага, Р. Фейнман, Дж. Швингер
Квантовая электродинамика



Нобелевская премия по физике

1965 г. – С.Томонага, Р.Фейнман, Дж.Швингер За фундаментальные работы по квантовой электродинамике, имевшие глубокие последствия для физики элементарных частиц

Как устроен Мир. 60-е годы XX века

Фермионы $J = 1/2, 3/2, \dots$		Бозоны $J=0, 1, 2 \dots$	
Барионы	Лептоны	Фотон	Мезоны
Нуклоны p, n	Электрон e^-	γ	Пионы π^-, π^+, π^0
Резонансы Δ, N	Мюон μ^-		Странные K -мезоны
Гипероны $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega^-$	Нейтрино ν_e, ν_μ		Нестранные ρ -, ω - мезон
$B = 1$	$L = 1$		$B = 0$

Барионное число

$$p + n \rightarrow p + n + p + \bar{p}$$
$$B = 1 + 1 = 1 + 1 + 1 - 1$$

$$p + p \rightarrow p + p + \pi^- + \pi^+$$
$$B = 1 + 1 = 1 + 1 + 0 + 0$$

$${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$$
$$B = 7 + 0 = 7 + 0$$
$$L_e = 0 + 1 = 0 + 1$$

Лептонные числа

$$L_e(e^-, \nu_e) = 1$$

$$L_e(e^+, \bar{\nu}_e) = -1$$

$$L_\mu(\mu^-, \nu_\mu) = 1$$

$$L_\mu(\mu^+, \bar{\nu}_\mu) = -1$$

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

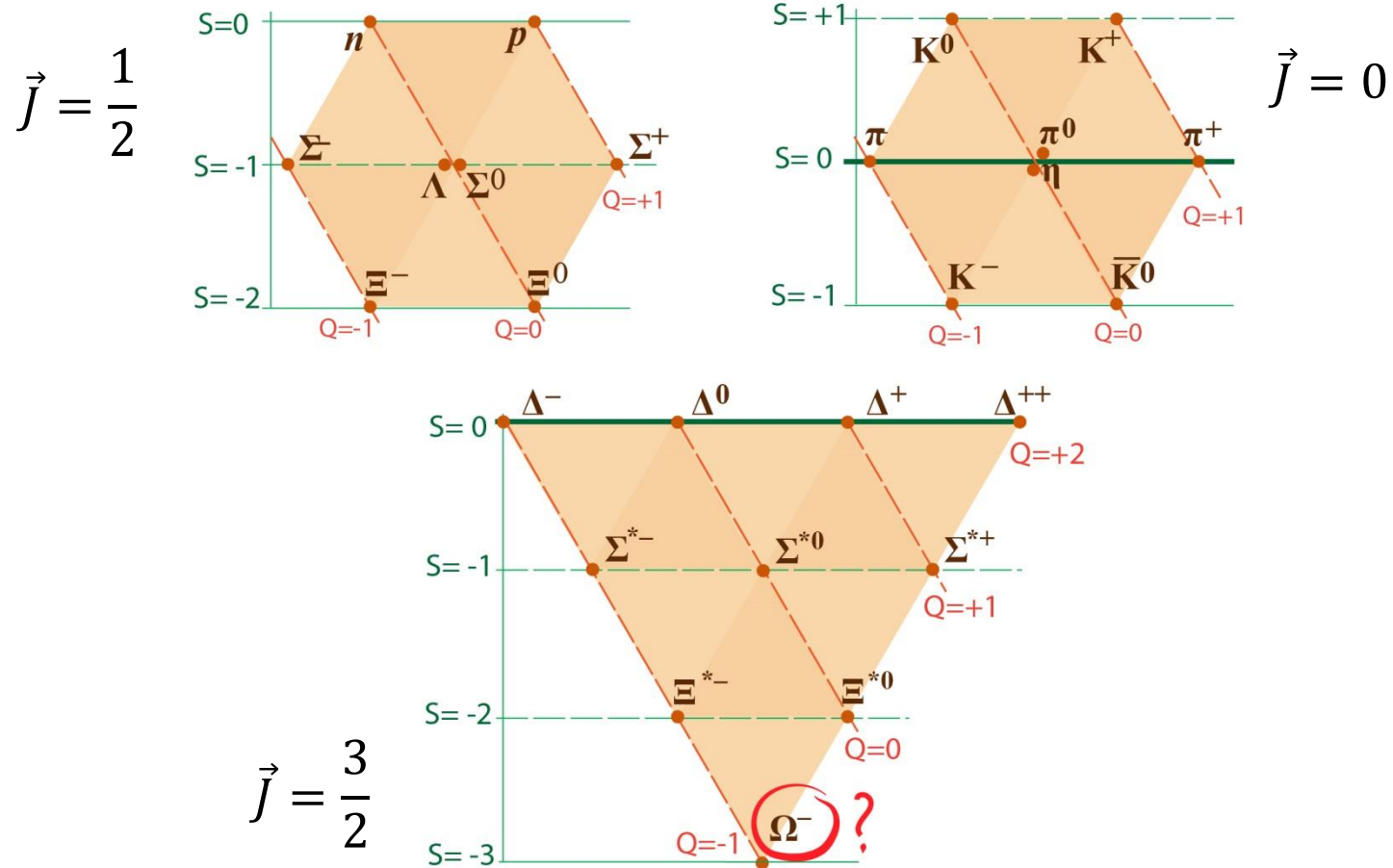
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

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

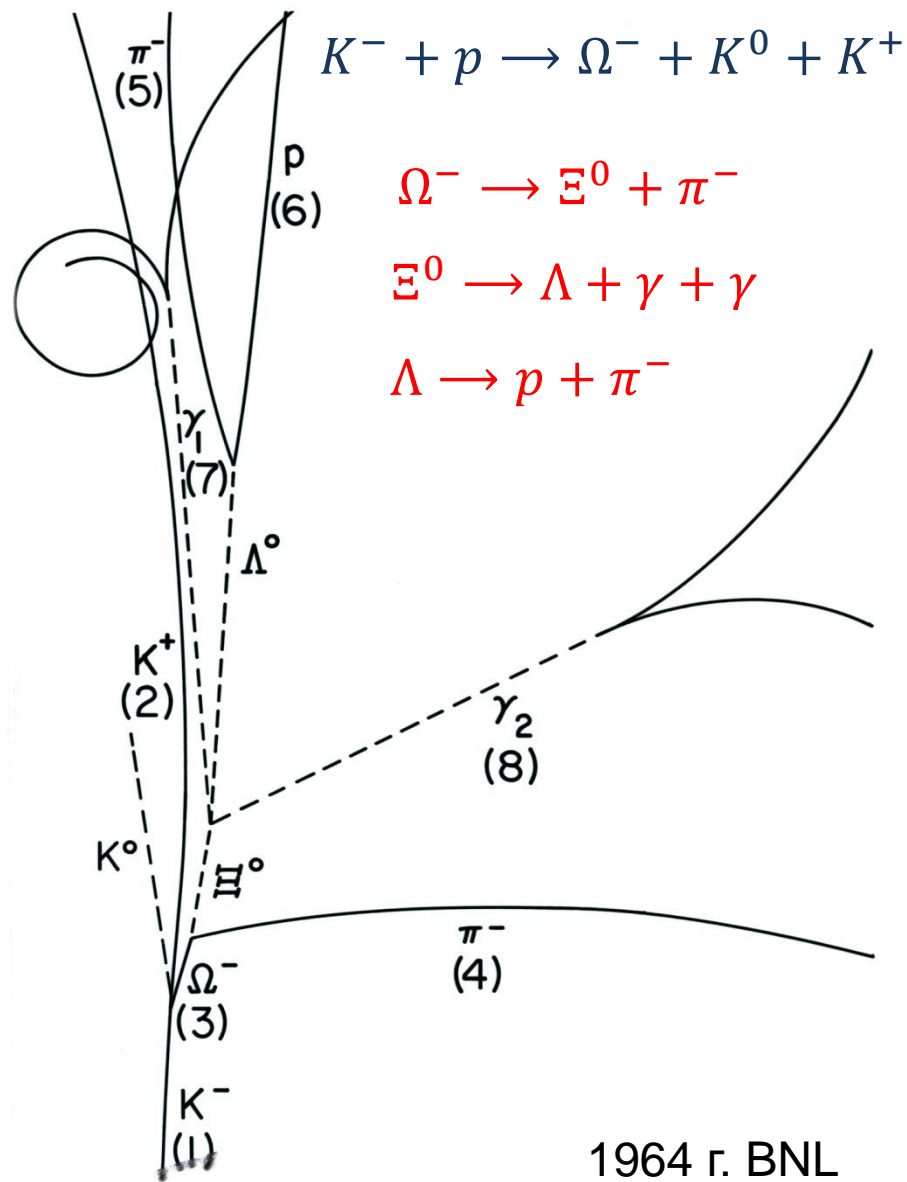
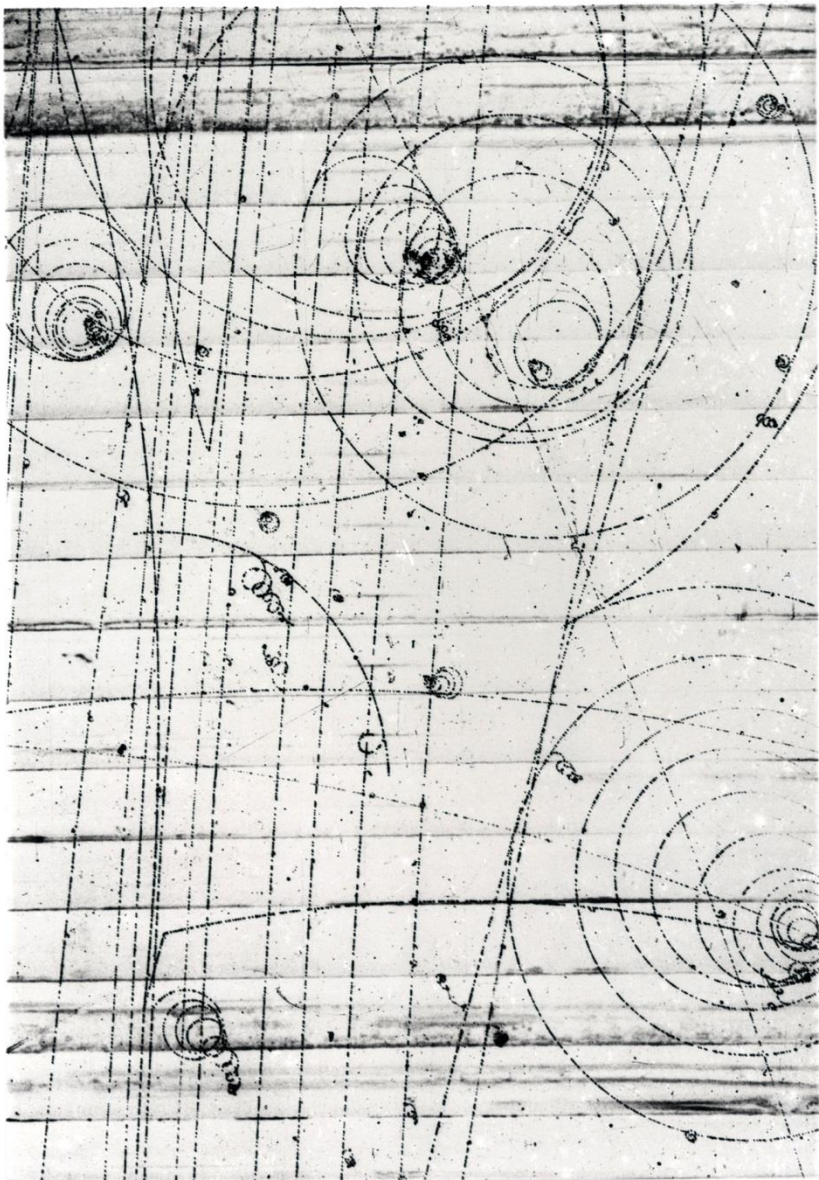
$$\mu^- \not\rightarrow e^- + \gamma \quad !$$

Кварковая модель

1961 г. М. Гелл-Манн, Восьмеричный путь



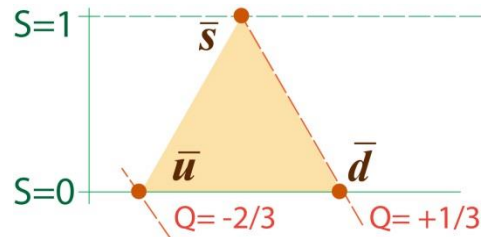
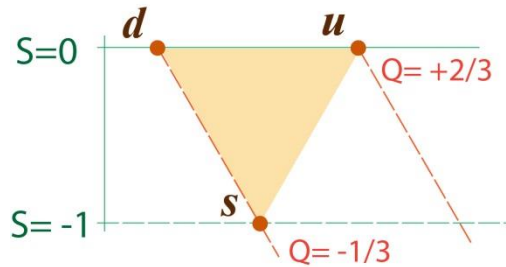
1964 г. Открытие Ω^- гиперона. BNL (Брукхевен), США



1964 г. BNL

Кварковая модель

1964 г. М. Гелл-Манн, Дж. Цвейг. Модель кварков

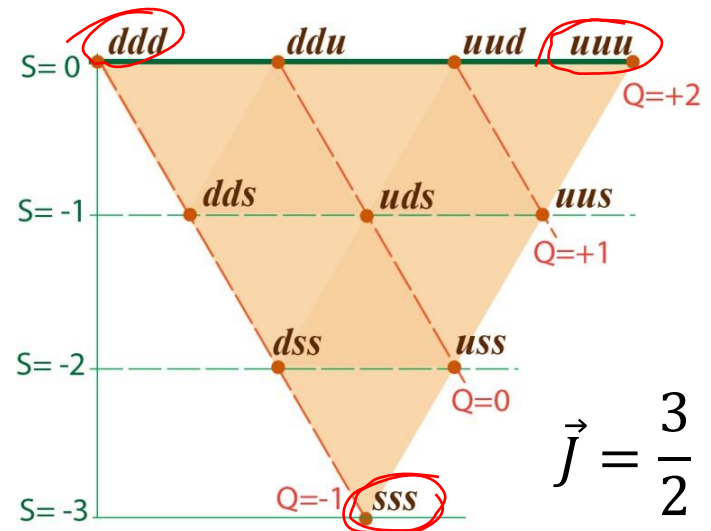


$$\vec{J} = \frac{1}{2} \quad B = \frac{1}{3}$$

Протон $p = uud$

Нейтрон $n = ddu$

Частицы	B	Состав
Барионы	1	qqq
Антибарионы	-1	\overline{qqq}
Мезоны	0	$q\bar{q}$



$$\vec{J} = \frac{3}{2}$$

Нобелевская премия по физике

1969 г. – М. Гелл-Манн За открытия, связанные с классификацией элементарных частиц и их взаимодействиях

Кварковая модель

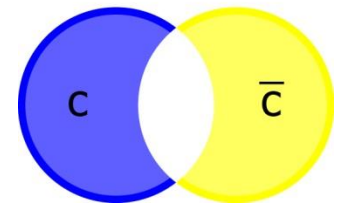
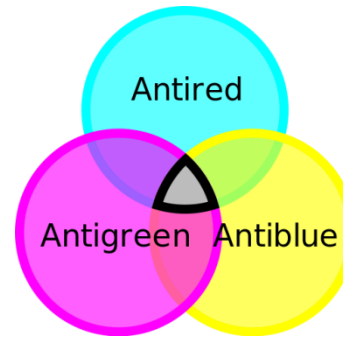
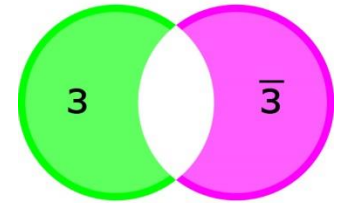
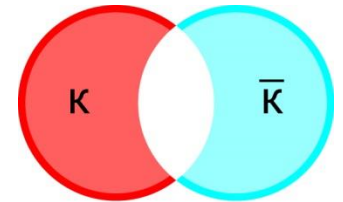
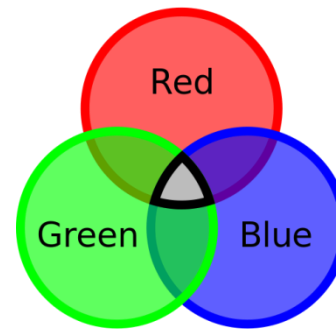
1965 г. Н.Н Боголюбов, Б.М. Струминский, А.Н. Тавхелидзе
Квантовое число - цвет

$$\vec{J} = \frac{3}{2}$$

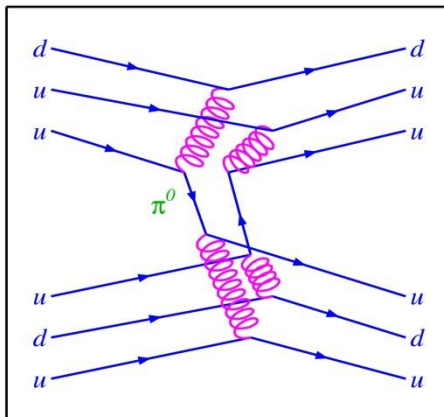
$\Omega^- : sss$

$\Delta^- : ddd$

$\Delta^{++} : uuu$



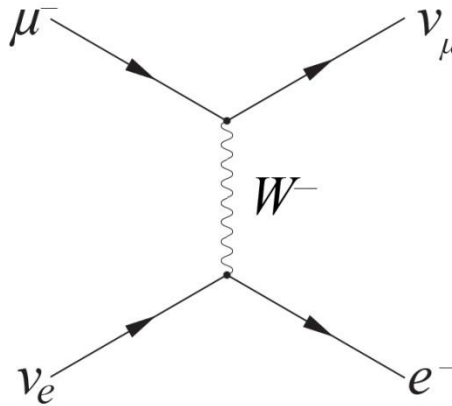
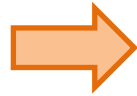
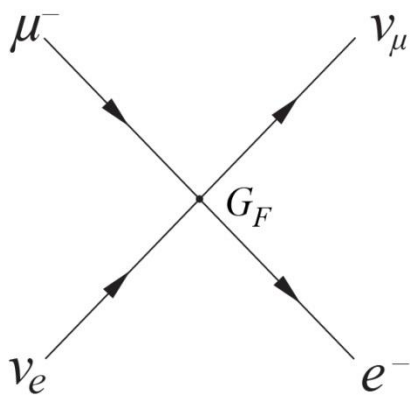
Yukawa Particle Exchange



Квантовая хромодинамика (КХД) –
теория сильного взаимодействия

Взаимодействия

1967 г. С. Вайнберг, А. Салам, Ш. Глэшоу
Теория электрослабого взаимодействия



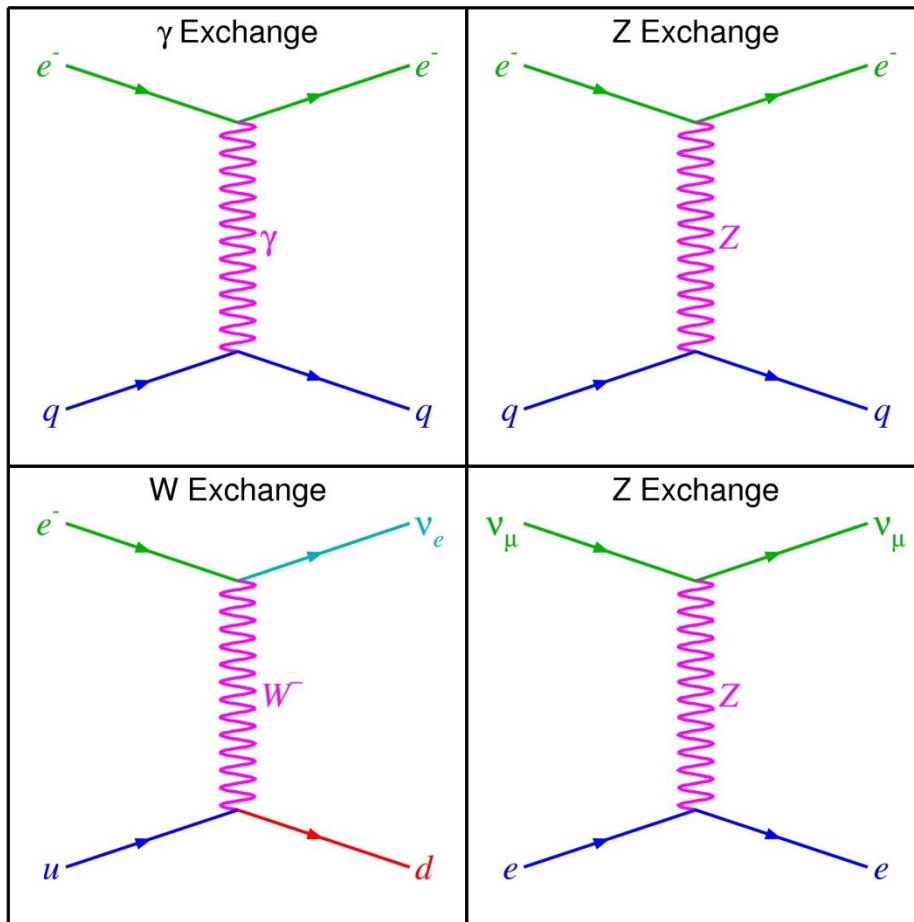
W^+, W^-, Z^0

$$G_F = \frac{\sqrt{2}g^2}{8M_W^2}$$

$$g \sin \theta_W = \sqrt{4\pi\alpha}$$

$$\alpha = \frac{1}{137}$$

g – «слабый» заряд
 θ_W – угол Вайнберга



Нейтральные токи

$$\frac{M_W}{M_Z} = \cos \theta_W$$

$$\sin^2 \theta_W = 0.232$$

(из экспериментов)

$$M_W \approx 80 \text{ ГэВ}$$

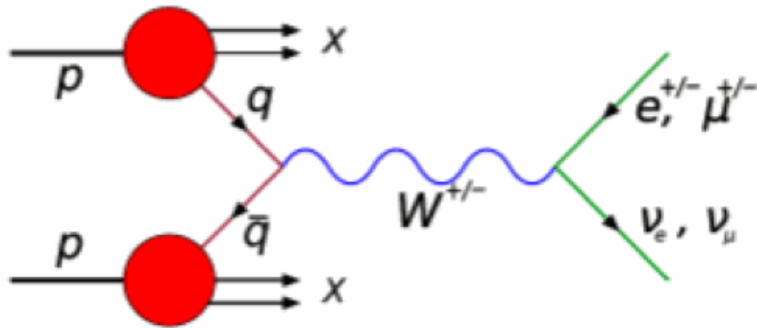
$$M_Z \approx 90 \text{ ГэВ}$$

Нобелевская премия по физике

1979 г. – С. Вайнберг, А. Салам, Ш. Глэшоу, За вклад в объединённую теорию слабых и электромагнитных взаимодействий между элементарными частицами, в том числе предсказание слабых нейтральных токов

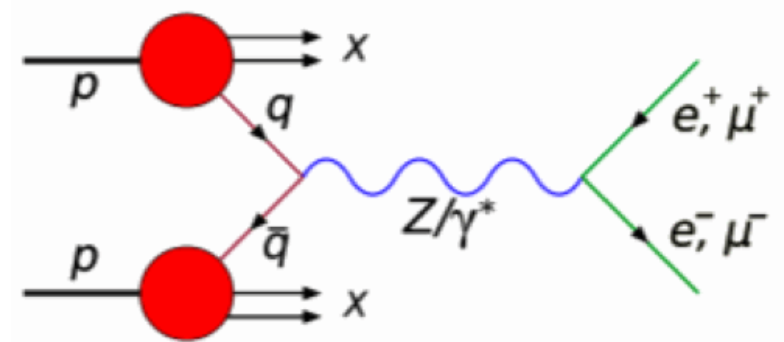
Промежуточные бозоны W^{\pm}, Z

1983 г. UA1, UA2 (SPS, CERN)



$$m_W c^2 \approx 80 \text{ ГэВ}, W^- \rightarrow e + \bar{\nu}_e.$$

$$E(e) \approx E(\bar{\nu}_e) \approx \frac{m_W c^2}{2} \approx 40 \text{ ГэВ}.$$



$$E_p = E_{\bar{p}} = 270 \text{ ГэВ}$$

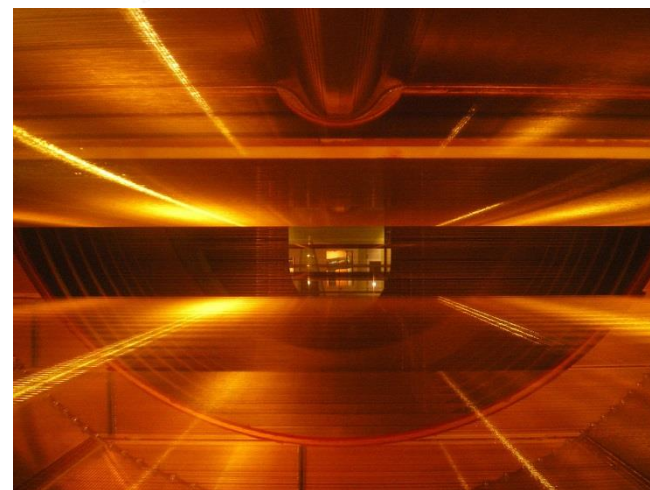
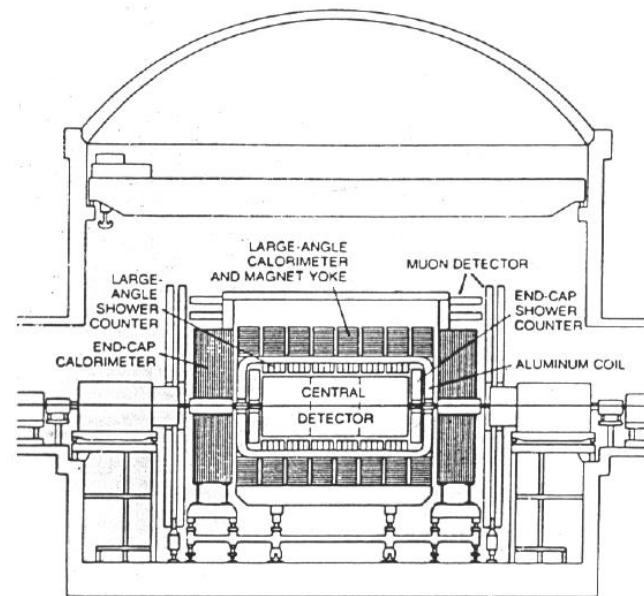
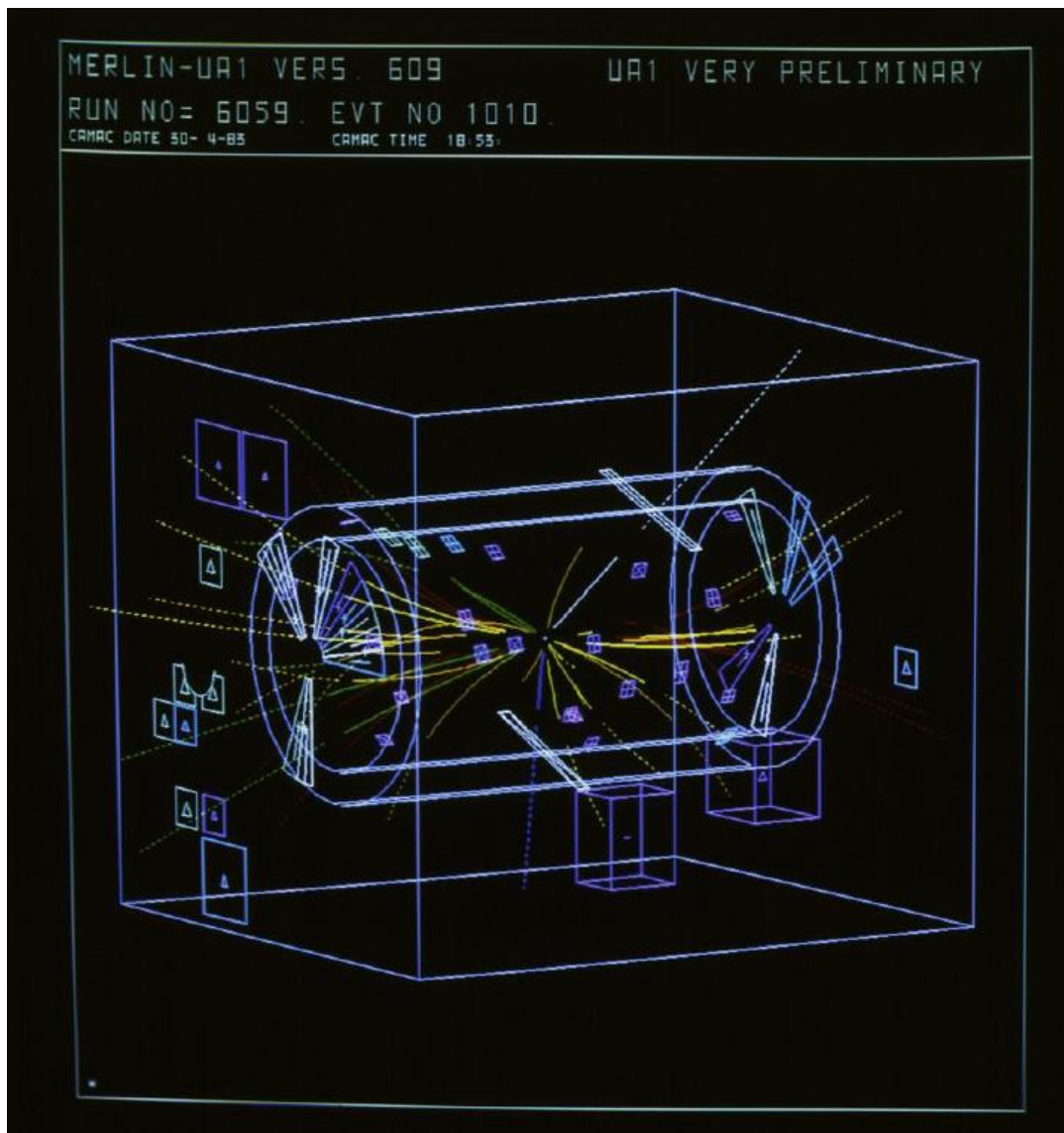
$$\sigma(W^{\pm}) = 10^{-33} \text{ см}^2$$

10^9 $p\bar{p}$ столкновений $\rightarrow 6W^{\pm}$

Нобелевская премия по физике

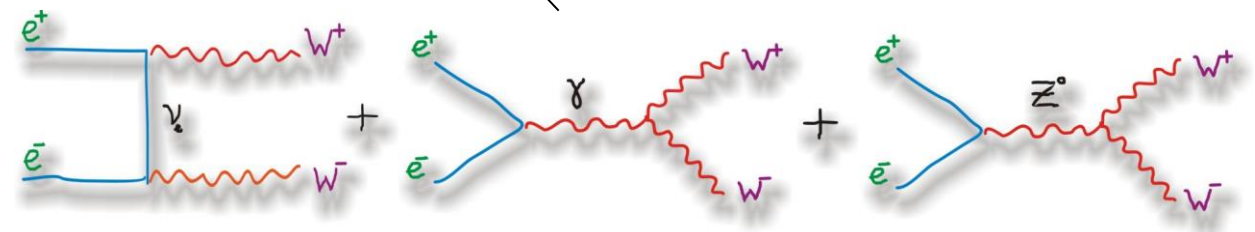
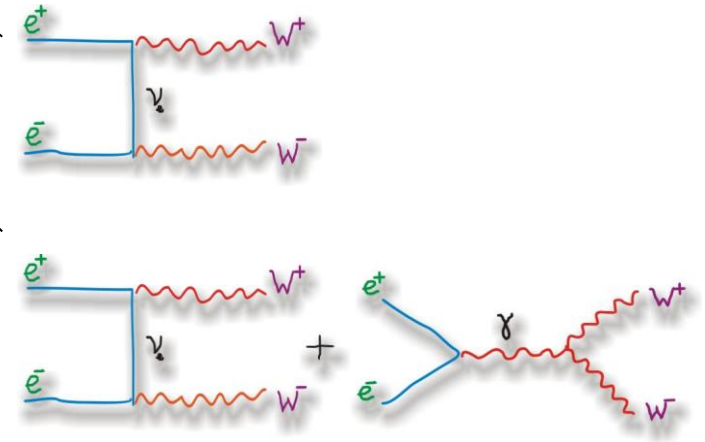
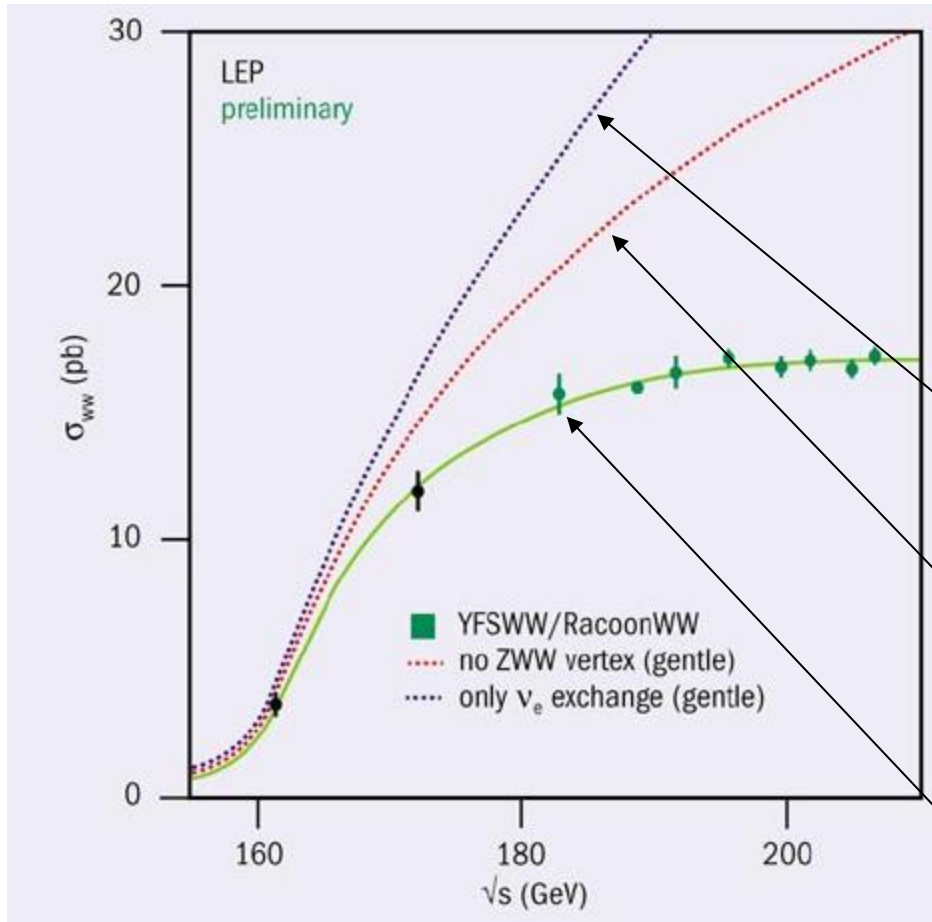
1984 г. – К. Руббиа, С. Ван дер Меер, За решающий вклад в большой проект, осуществление которого привело к открытию квантов поля W и Z — переносчиков слабого взаимодействия

Промежуточные бозоны



UA1 дрейфовая камера $L=5,8$ м, $D = 2,3$ м

Подтверждение структуры взаимодействия электрослабых бозонов



Ноябрьская революция

1974 г. Открытие четвертого кварка.

SLAC (Стэнфорд) и BNL (Брукхевен), США

Тинг (AGS, BNL):

$$p + p \rightarrow V_0 + X, X... anything$$

Рихтер (SPEAR, SLAC):

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow hadrons)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$

$$J/\psi = c\bar{c}$$

$$M(J/\psi) = 3096,9 \text{ МэВ}$$

$$J^P = 1^-$$

$$\tau = 7,2 \cdot 10^{-21} \text{ сек}$$

Шарм C=1

Нобелевская премия по физике

1976 г. – Б. Рихтер, С. Тинг, За основополагающий вклад в открытие тяжелой элементарной частицы нового типа J/ψ

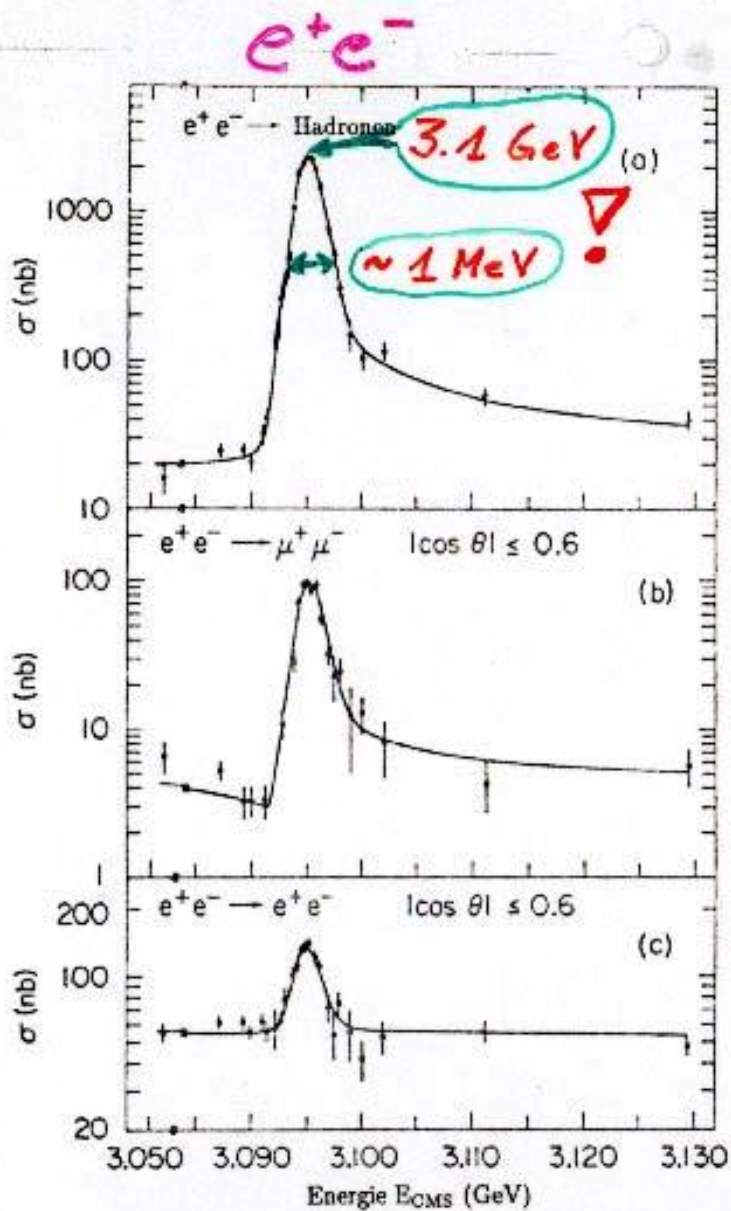


Abbildung 5.9 Ergebnisse der Messungen von Augustin et al. (1974), die die J/ψ -Resonanz bei einer Masse von 3.1 GeV zeigen. Die Resonanz wurde in e^+e^- -Kollisionen am Speicherring SPEAR des SLAC erzeugt.

J/ψ -MESON ($c\bar{c}$)

$p + \text{Be}$

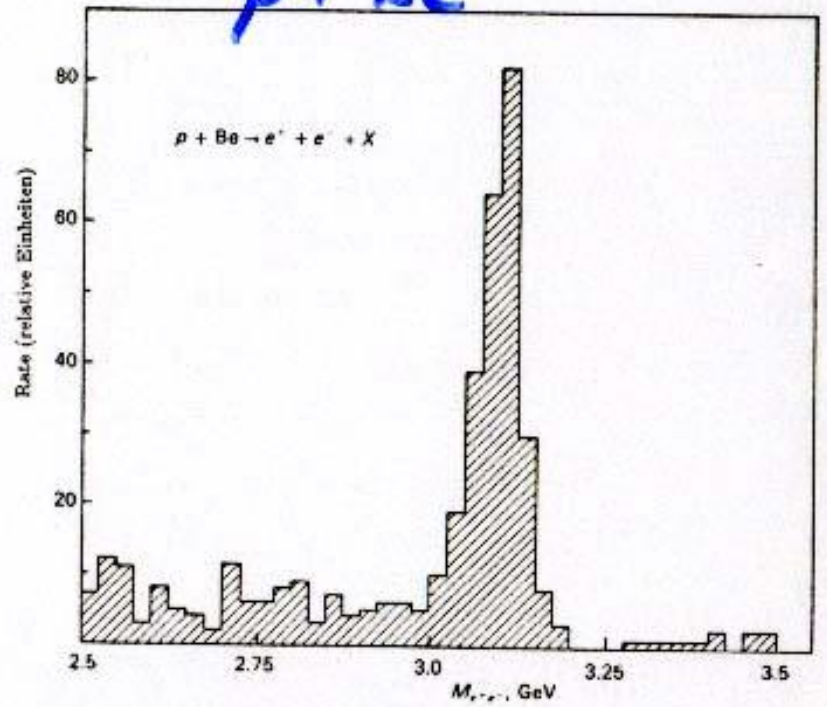


Abbildung 5.10 Die Ergebnisse von Aubert et al. (1974) zeigen die schmale J/ψ -Resonanz in der Verteilung der invarianten Masse des e^+e^- -Paares, das in inklusiven Reaktionen von Protonen an einem Berylliumtarget erzeugt wurde. Dies Experiment wurde am 28 GeV-AGS des Brookhaven National Laboratorys ausgeführt.

$M = 3097 \text{ MeV}$
 $L = 0, S = 1, P = -1$

Как устроен Мир (Стандартная Модель)

ФЕРМИОНЫ

u	c
d	s
ν_e	ν_μ
e	μ

I

II

III

t

b

ν_τ

τ

Кварки

Лептоны

БОЗОНЫ

g
γ
W^\pm
Z^0

Сильное

Электромагнитное

Слабое

АДРОНЫ

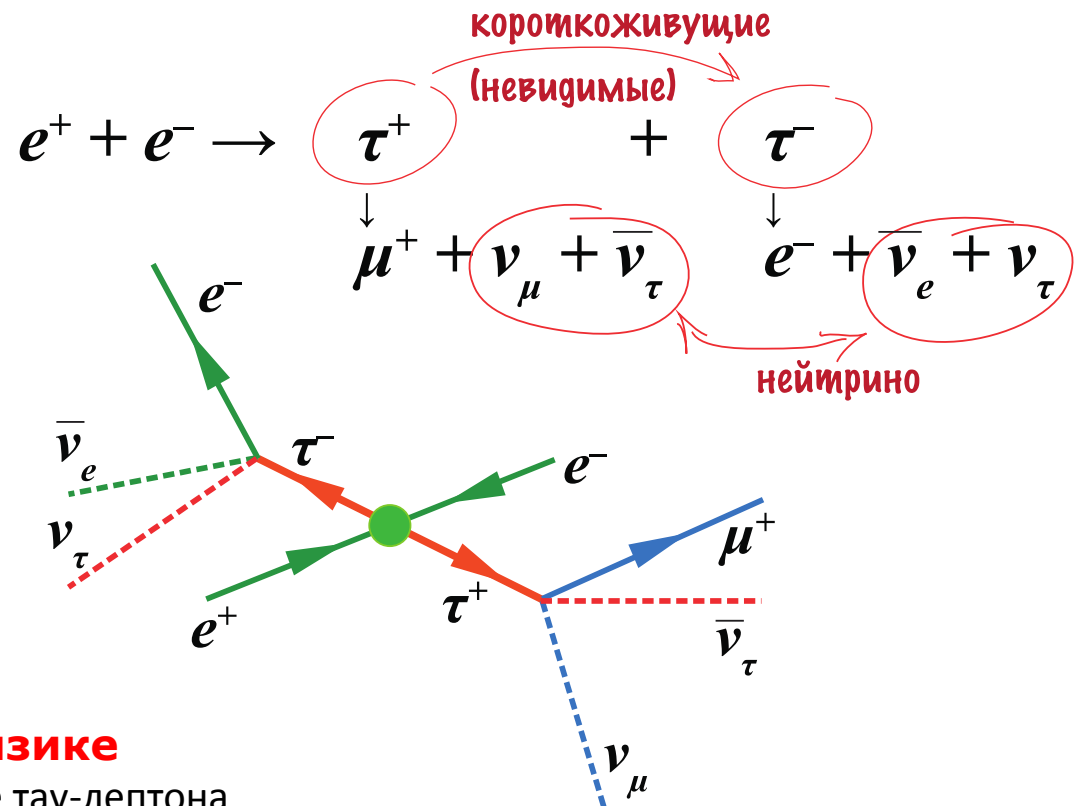
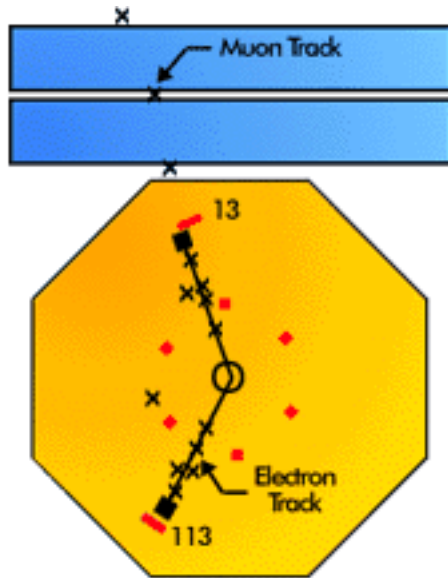
БАРИОНЫ (qqq)		МЕЗОНЫ ($q\bar{q}$)	
нуклоны	p, n	пионы	π^+, π^0, π^-
резонансы	$\Delta^-, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}$ и тд	каоны	K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0 и тд
гипероны	$\Lambda, \Sigma^0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Omega^-$ и тд	«векторные»	$\rho^+, \rho^0, \rho^-, \omega$ и тд

Третье поколение – тау-лептон

1975 г. М. Перл (SLAC, Стэнфорд, США)

Открытие таона

$$Q_\tau = q_e; \quad m_\tau = 1776,82 \text{ МэВ}; \quad \tau_\tau = 290,6 \times 10^{-15} \text{ сек}$$

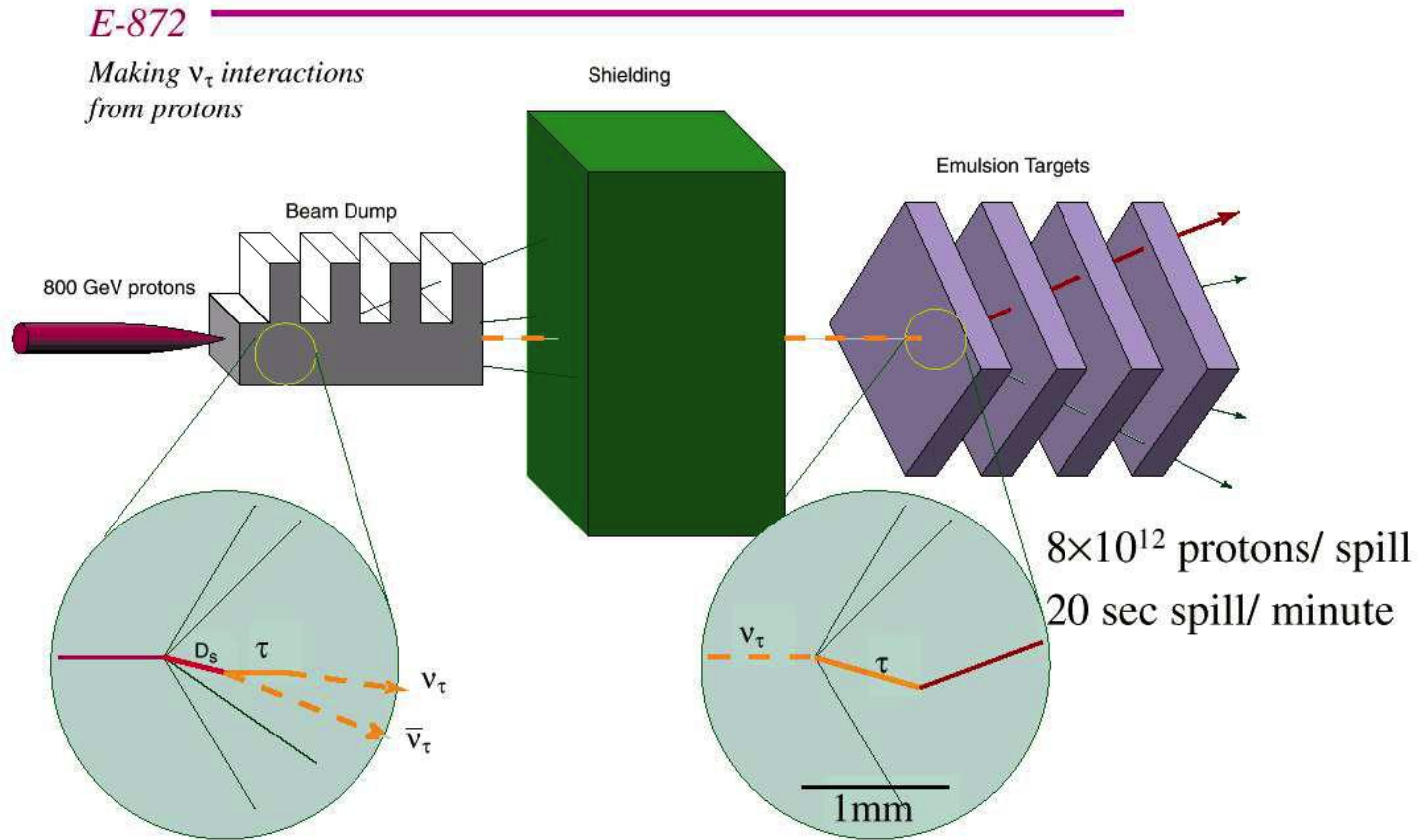


Нобелевская премия по физике

1995 г. – М. Перл, За открытие тау-лептона

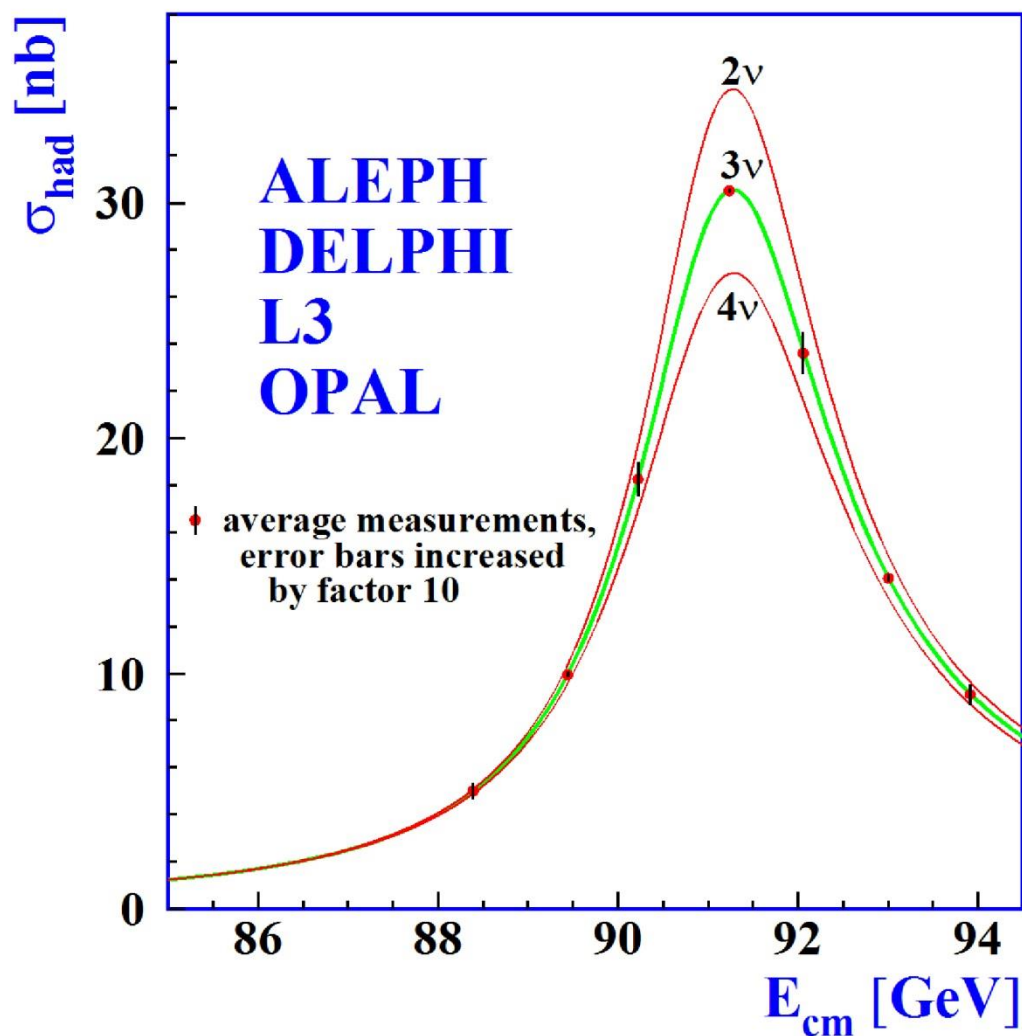
Третье поколение – тау-нейтрино

2000 г. DONUT (Direct Observation of the NU Tau)
Fermilab, USA



В результате анализа 10^7 событий было надёжно зарегистрировано 4 события

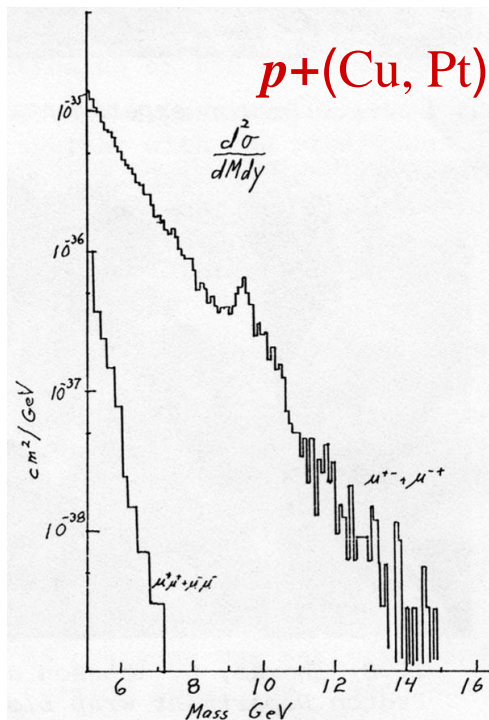
Данные LEP - в природе существует не более трех легких нейтрино



[Source: The ALEPH Collaboration et al., *Precision Electroweak Measurements on the Z Resonance*, Physics Reports **427** (2006) 257; arXiv: hep-ex/0509008v3, Fig. 1.13.]

Третье поколение – b-кварк

1977 г. Л. Ледерман (TEVATRON, FNAL, Чикаго)
Открытие ипсилон-мезона Υ



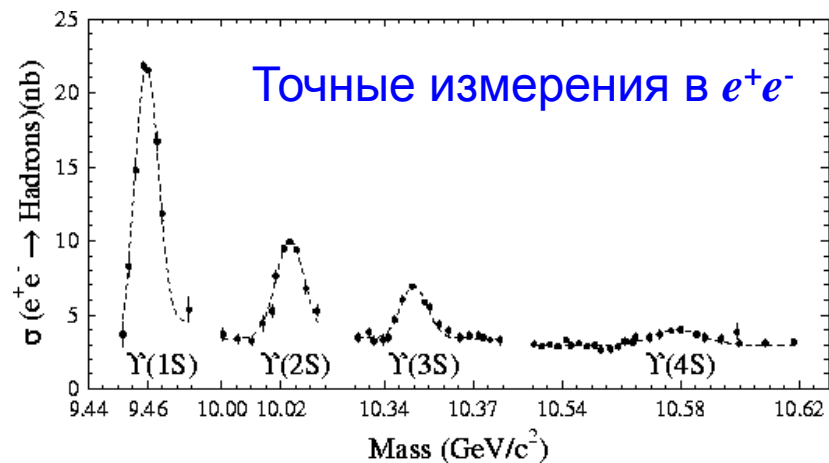
9000 событий $m_{\mu\mu} > 5$ ГэВ
три резонанса

$$\Upsilon = b\bar{b}$$

$$M(\Upsilon) = 9460 \text{ МэВ}$$

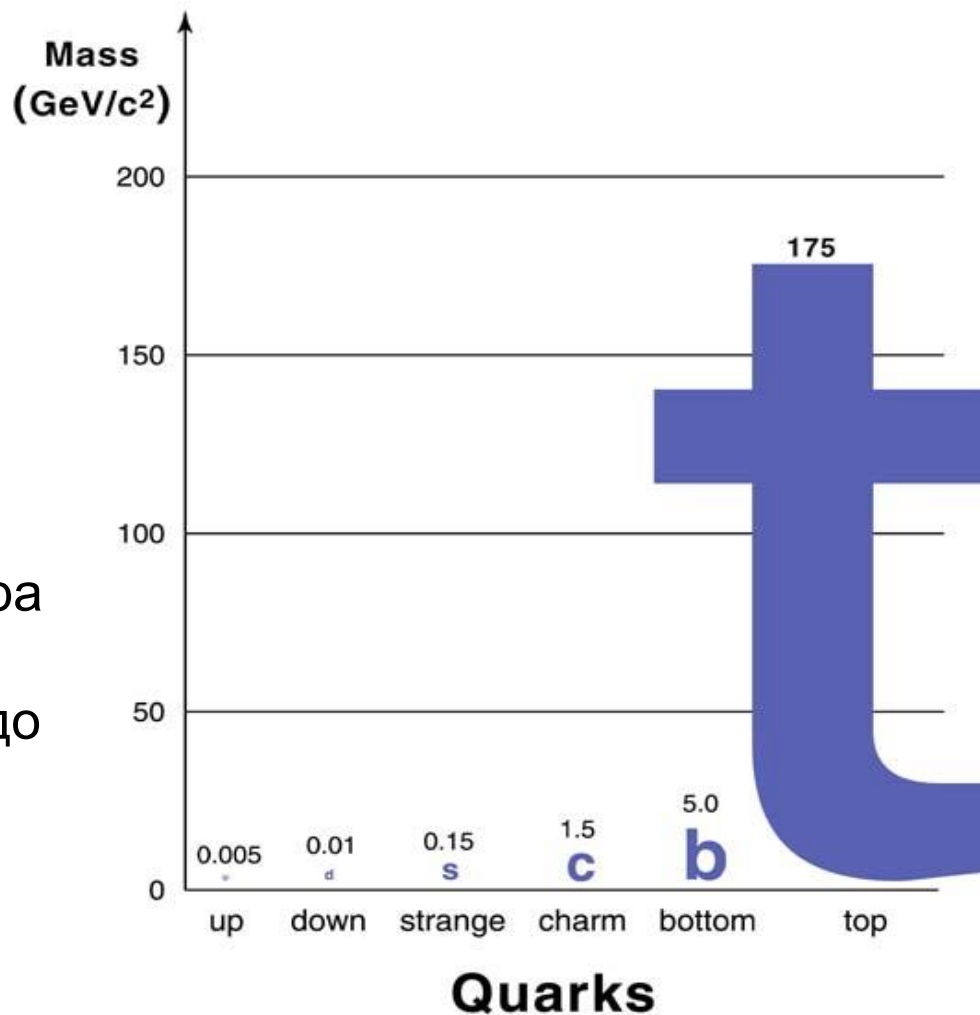
$$J^P = 1^-$$

$$\tau = 1,218 \cdot 10^{-20} \text{ сек}$$



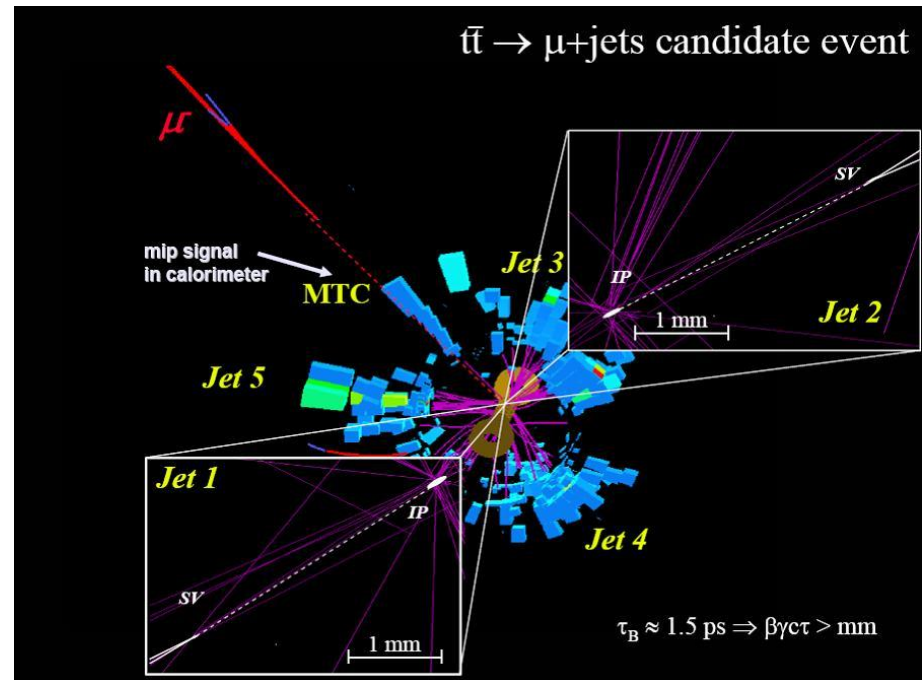
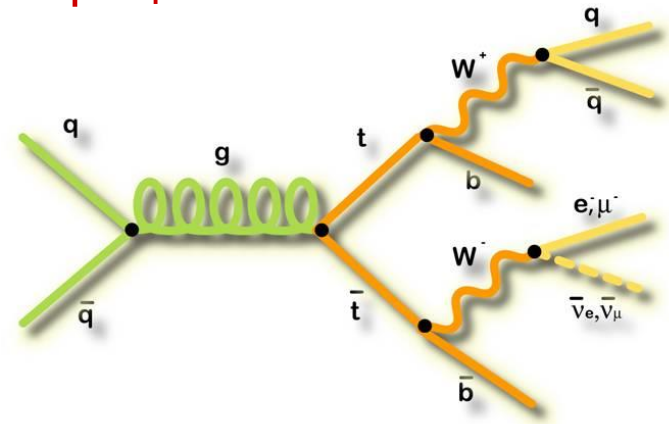
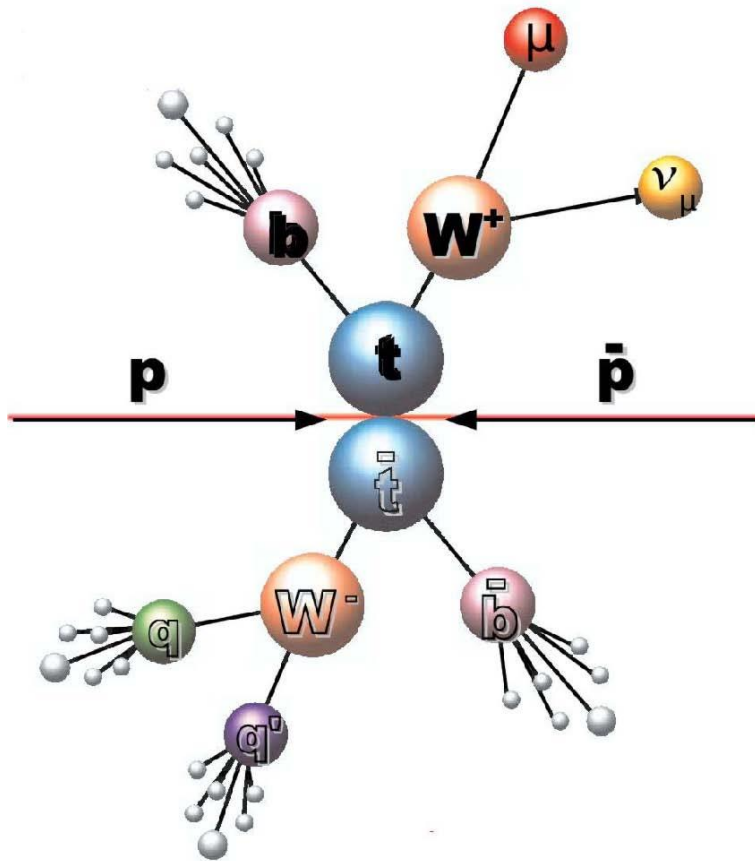
Третье поколение – t-кварк

QUARK MASSES

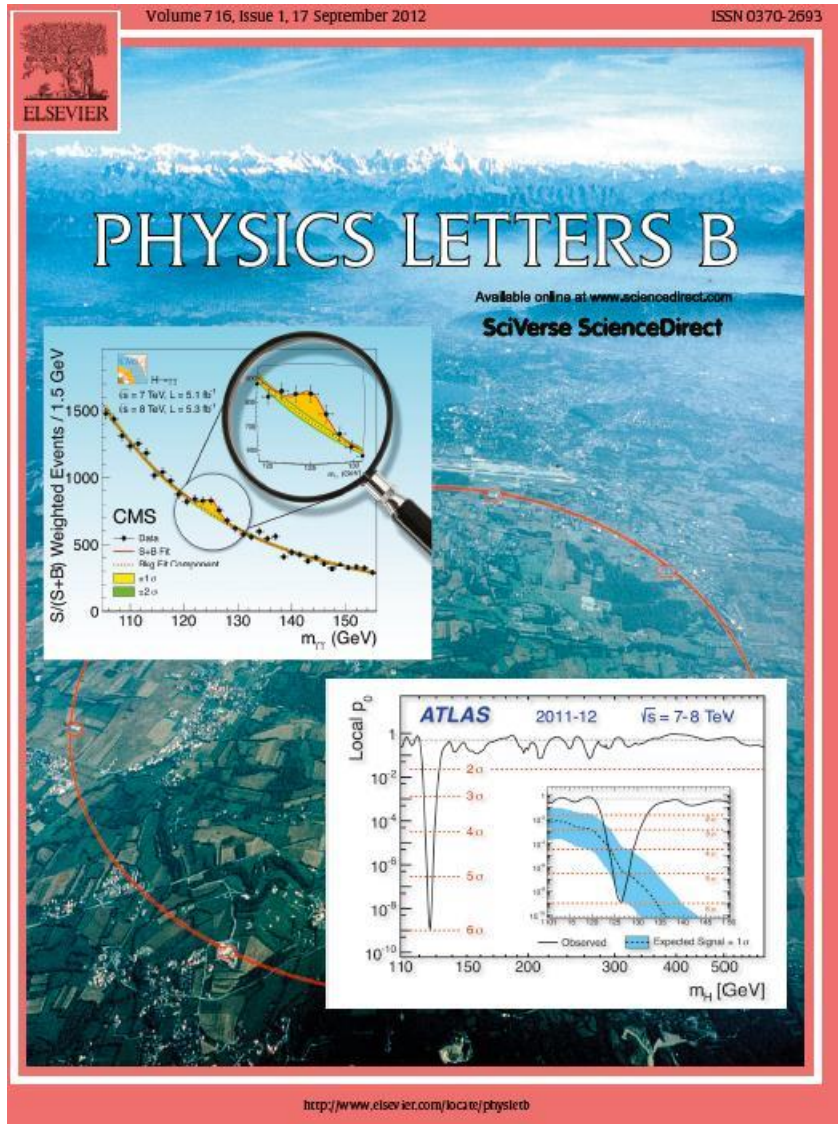


Топ-кварк чуть легче ядра золота, но точечная элементарная частица до 10^{-17} см

Самая тяжелая из существующих частиц (Тор quark) был открыт в Fermilab в 1995 году коллаборациями CDF и D0



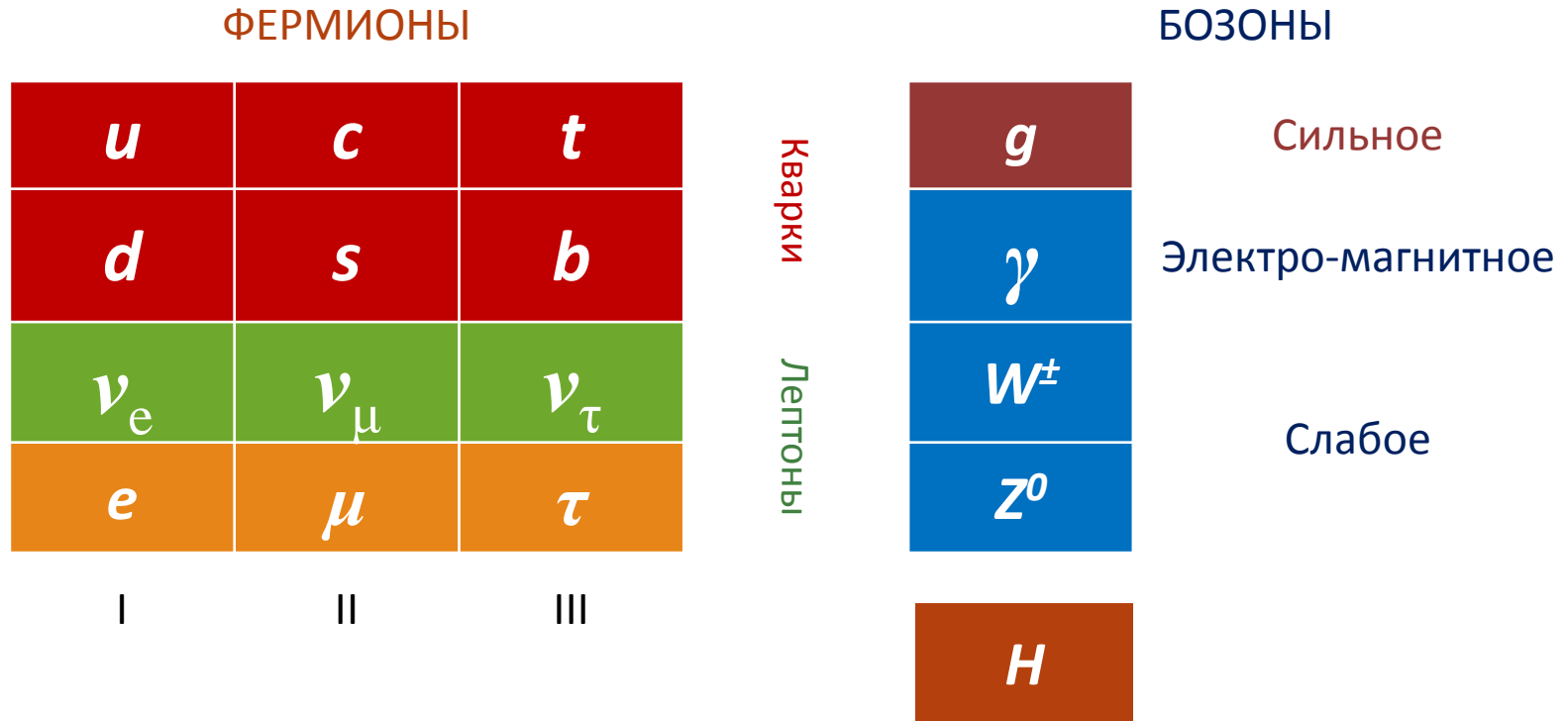
Бозон Хиггса



Нобелевская премия по физике

2013 г. – П. Хиггс, Ф. Энглер,
За теоретическое обнаружение механизма, который помогает нам понять происхождение массы субатомных частиц, подтверждённого в последнее время обнаружением предсказанной элементарной частицы в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН

Как устроен Мир (Стандартная Модель)



Фундаментальные фермионы ($J=1/2$)

ЛЕПТОНЫ ($L_l = 1$)

КВАРКИ ($B = 1/3$)

Аромат	Масса ГэВ/ c^2	Электр. заряд Q	Аромат	Масса ГэВ/ c^2	Электр. заряд Q
ν_e	$< 10^{-8}$	0	<i>u</i>	0,003	+2/3
e^-	0,000511	-1	<i>d</i>	0,006	-1/3
ν_μ	$< 0,0002$	0	<i>c</i>	1,3	+2/3
μ^-	0,106	-1	<i>s</i>	0,1	-1/3
ν_τ	$< 0,02$	0	<i>t</i>	175	+2/3
τ^-	1,777	-1	<i>b</i>	4,3	-1/3

Частица A	m	τ	J	Q	B	L_l	s	c	b	t	I	I_3
Античастица A	m	τ	J	$-Q$	$-B$	$-L_l$	$-s$	$-c$	$-b$	$-t$	I	$-I_3$

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

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

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of \hbar , which is the quantum unit of angular momentum, where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25} \text{ GeV s} = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J s}$.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c² (remember $E = mc^2$), where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10} \text{ joule}$. The mass of the proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

BOSONS

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

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W⁻	80.4	-1			
W⁺	80.4	+1			
Z⁰	91.187	0			

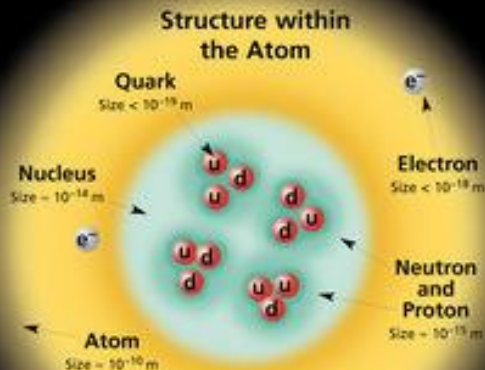
Color Charge
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and **W** and **Z** bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons** (q \bar{q}) and **baryons** (qqq).

Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 2.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 100 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

Matter and Antimatter

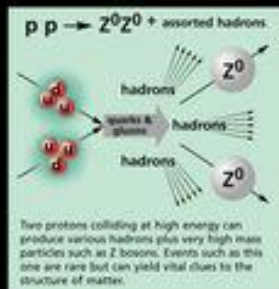
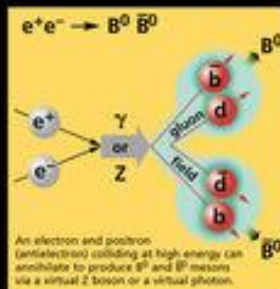
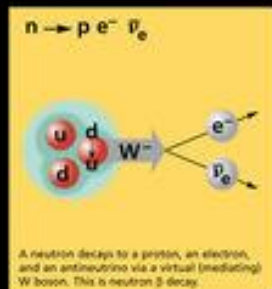
For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically bosons (e.g., Z^0 , γ , and $\eta_c = c\bar{c}$, but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.

Property	Interaction	Gravitational	Weak	Electromagnetic	Strong	
			(Electroweak)		Fundamental	Residual
Acts on:		Mass - Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:		All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:		Graviton (not yet observed)	W⁺ W⁻ Z⁰	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag. for two u quarks at:		10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
	10^{-18} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
	$3 \times 10^{-17} \text{ m}$	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20

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



The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:

U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particles and Fields
BURLE INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>