



# Ядерная физика и Человек

# Фундаментальные взаимодействия частиц

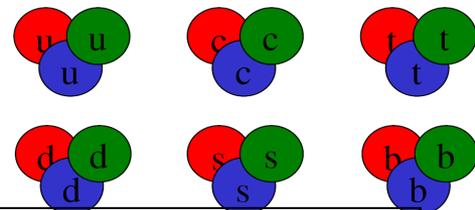
# Фундаментальные частицы Стандартной Модели

<b>Q</b>	(МэВ)	(МэВ)	(МэВ)
<b>-1</b>	$e^-$ (0.511)	$\mu^-$ (106)	$\tau^-$ (1777)
<b>0</b>	$\nu_e$ (0)	$\nu_\mu$ (0)	$\nu_\tau$ (0)
<b>+2/3</b>	$u$ (330)	$c$ (1800)	$t$ (180 000)
<b>-1/3</b>	$d$ (330)	$s$ (510)	$b$ (5000)

$8g, \gamma, W^+, W^-, Z$

$H$  - бозон Хиггса

# Кварки



Характеристика	Тип кварка (аромат)					
	d	u	s	c	b	t
Электрический заряд Q, в единицах e	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3
Барионное число B	1/3	+1/3	+1/3	+1/3	+1/3	+1/3
Спин J	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
Четность P	+1	+1	+1	+1	+1	+1
Изоспин I	1/2	1/2	0	0	0	0
Проекция изоспина I <sub>3</sub>	-1/2	+1/2	0	0	0	0
Странность s	0	0	-1	0	0	0
Очарование (charm) c	0	0	0	+1	0	0
Bottom b	0	0	0	0	-1	0
Top t	0	0	0	0	0	+1
Масса конституэнтного кварка $m c^2$ , ГэВ	0.33	0.33	0.51	1.8	5	180
Масса токового кварка	4–8 МэВ	1.5–4 МэВ	80–130 МэВ	1.1-1.4 ГэВ	4.1–4.9 ГэВ	174±5 ГэВ

# Лептонные числа

	$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$		$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$		$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$
$e^-$	+1	0	0	$\mu^-$	0	+1	0	$\tau^-$	0	0	+1
$\nu_e$	+1	0	0	$\nu_\mu$	0	+1	0	$\nu_\tau$	0	0	+1
$e^+$	-1	0	0	$\mu^+$	0	-1	0	$\tau^+$	0	0	-1
$\tilde{\nu}_e$	-1	0	0	$\tilde{\nu}_\mu$	0	-1	0	$\tilde{\nu}_\tau$	0	0	-1

Почему  $e^-$  и  $e^+$  являются стабильными частицами?  
Это следует из закона сохранения электрического заряда.

# Связь характеристик частиц и античастиц

Характеристика		Частица	Античастица
Масса		$M$	
Спин		$J$	
Чётность	<i>фермион</i>	$+(-)1$	$-(+ )1$
	<i>бозон</i>	$+(-)1$	$+(-)1$
Электрический заряд		$+(-)Q$	$-(+ )Q$
Магнитный момент		$+(-)\mu$	$-(+ )\mu$
Барионное число		$+B$	$-B$
Лептонное число		$+L_e, +L_\mu, +L_\tau$	$-L_e, -L_\mu, -L_\tau$
Изоспин		$I$	
Проекция изоспина		$+(-)I_3$	$-(+ )I_3$
Странность		$-(+ )s$	$+(-)s$
Очарование (Charm)		$+(-)c$	$-(+ )c$
Bottom		$-(+ )b$	$+(-)b$
Топ		$+(-)t$	$-(+ )t$
Время жизни		$\tau$	
Схема распада (пример)		$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$	$\bar{d} \rightarrow \bar{u} + e^+ + \nu_e$

# Законы сохранения

Характеристика		Взаимодействие		
		сильное	электромагнитное	слабое
Аддитивные законы сохранения				
Электрический заряд	$Q$	+	+	+
Энергия	$E$	+	+	+
Импульс		+	+	+
Момент количества движения		+	+	+
Барионный заряд	$B$	+	+	+
Лептонные заряды	$L_e, L_\mu, L_\tau$	+	+	+
Странность	$s$	+	+	-
Очарование (charm)	$c$	+	+	-
Bottom	$b$	+	+	-
Топ	$t$	+	+	-
Изоспин	$I$	+	-	-
Проекция изоспина	$I_3$	+	+	-
Мультипликативные законы сохранения				
Пространственная чётность	$P$	+	+	-
Зарядовая чётность	$C$	+	+	-
Комбинированная чётность	$CP$	+	+	-
Обращение времени	$T$	+	+	-
$CPT$ -инвариантность		+	+	+

# Как устроен Мир

**Лептоны**

$e^-$

$\mu^-$

$\tau^-$

$\nu_e$

$\nu_\mu$

$\nu_\tau$

**Адроны**

**Барионы**

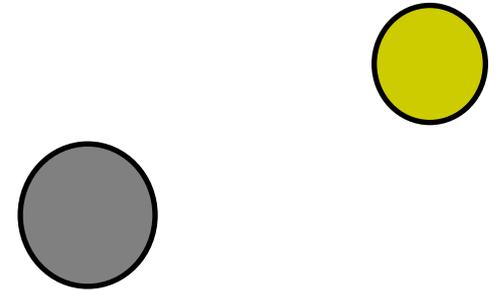
**Мезоны**

$$J = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$$

$$J = 0, 1, 2, \dots$$

# Взаимодействие. Классическая физика

## Дальнодействие

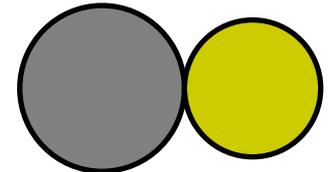


В классической физике, несмотря на разнообразие сил, действующих между телами, взаимодействия между ними описываются двумя фундаментальными взаимодействиями:

- Гравитационным,
- Электромагнитным.

Гравитационное и электромагнитное взаимодействия – дальнодействующие. Поэтому они ответственны за все макроскопические крупномасштабные явления, от окружающей нас повседневной жизни до взаимодействий звезд и галактик.

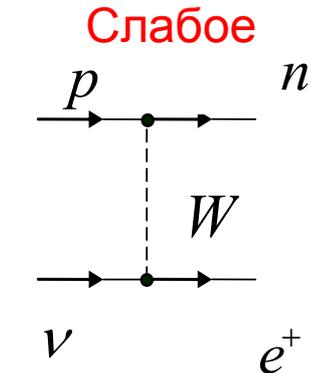
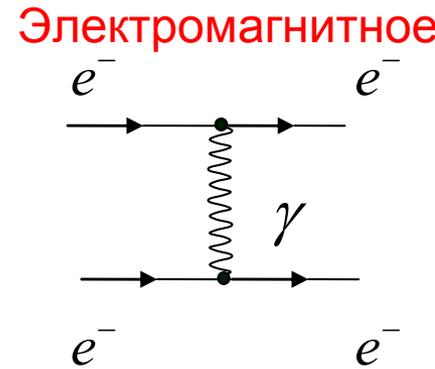
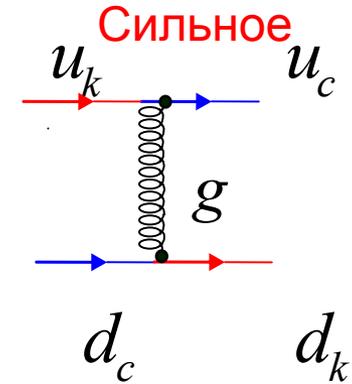
## Близкодействие



Одним из проявлений близкодействия в классической физике является соударение бильярдных шаров.

# Фундаментальные взаимодействия. Калибровочные бозоны

Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны
Сильное	Все цветные частицы	8 безмассовых глюонов, спин $J = 1$
Электромагнитное	Все электрически заряженные частицы	Безмассовый фотон, спин $J = 1$
Слабое	Кварки, лептоны, калибровочные бозоны $W^{\pm}, Z$	Массивные бозоны $W^+, W^-, Z$ , спин $J = 1$ , $m_W c^2 \approx 80 \text{ ГэВ}$ , $m_Z c^2 \approx 91 \text{ ГэВ}$
Гравитационное	Все частицы	Безмассовый гравитон, спин $J = 2$



Источником калибровочных бозонов являются заряды соответствующих фундаментальных взаимодействий.

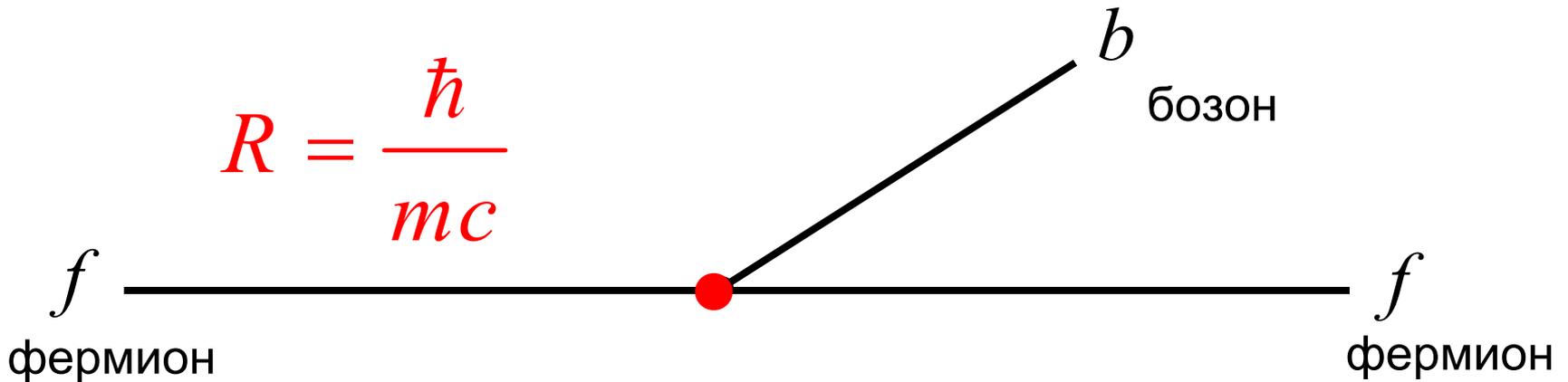
# Взаимодействие. Квантовая физика

## Локальное взаимодействие в точке Виртуальные частицы

$$\Delta E \cdot \Delta T \approx \hbar$$

$$mc^2 \cdot T \approx \hbar$$

$$R = \frac{\hbar}{mc}$$



Фундаментальная вершина описывающая локальное взаимодействие в квантовой теории.

Фундаментальный фермион (кварк, лептон) испускает или поглощает виртуальный бозон – переносчик взаимодействия (фотон, глюон, промежуточный бозон).

# Стандартная модель

Фундаментальными частицами стандартной модели являются **6 лептонов** ( $e^-$ ,  $\mu^-$ ,  $\tau^-$ ,  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ ) и **6 кварков** ( $u$ ,  $d$ ,  $c$ ,  $s$ ,  $t$ ,  $b$ ). Каждый из 6 типов кварков может находиться в трёх цветовых состояниях (например: красный, зеленый, синий). Кварки и лептоны являются фермионами и имеют спин  $-1/2$ . 12 фундаментальным фермионам соответствуют 12 антифермионов.

**Взаимодействия фундаментальных фермионов осуществляются за счет обмена переносчиками взаимодействия — фундаментальными (или калибровочными) бозонами.**

Взаимодействие частиц, имеющих электрический заряд, происходит посредством обмена квантами электромагнитного поля — **фотонами или  $\gamma$ -квантами**. Фотон электрически нейтрален. Сильное взаимодействие осуществляется за счет обмена **глюонами  $g$**  — электрически нейтральными безмассовыми переносчиками сильного взаимодействия. Глюоны переносят цветовой заряд. В слабом взаимодействии принимают участие все лептоны и все кварки. Переносчиками слабого взаимодействия являются **массивные  $W^-$ - и  $Z$ -бозоны**. Существуют положительные  $W^+$ -бозоны и отрицательные  $W^-$ -бозоны, являющиеся античастицами по отношению друг к другу.  $Z$ -бозон электрически нейтрален.

# Квантовая теория поля



Sin-Itiro Tomonaga  
(1906-1979)



Julian Schwinger  
(1918-1994)



Richard P. Feynman  
(1918-1988)

## Нобелевская премия по физике

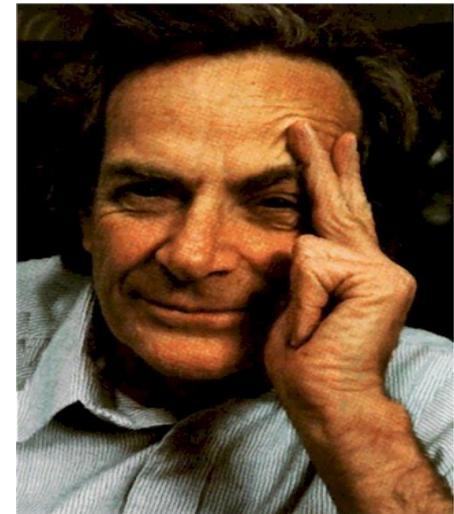
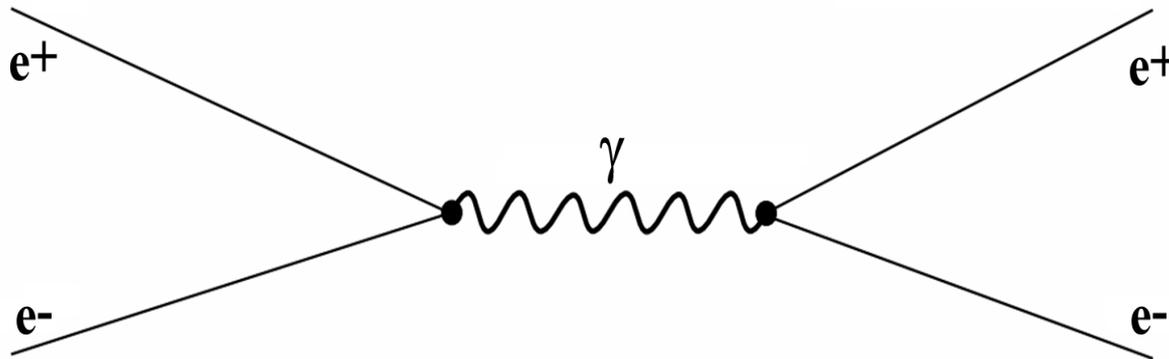
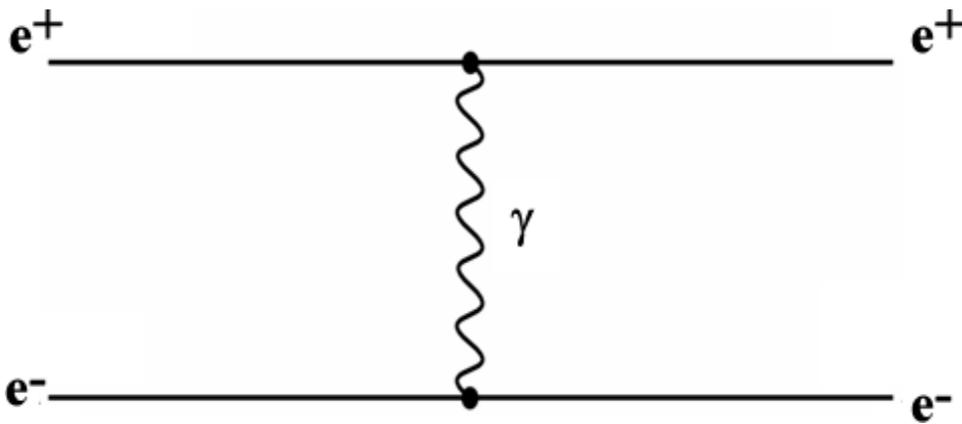
**1965 г.** — С. Томонага, Ю. Швингер и Р. Фейнман

За фундаментальные работы в области квантовой теории поля с далеко идущими последствиями для физики элементарных частиц.

# Диаграммы Фейнмана

1947

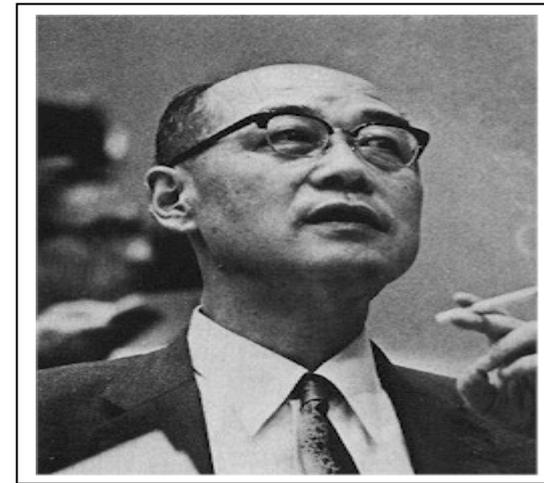
Р. Фейнман предложил  
диаграммный метод  
в квантовой электродинамике.



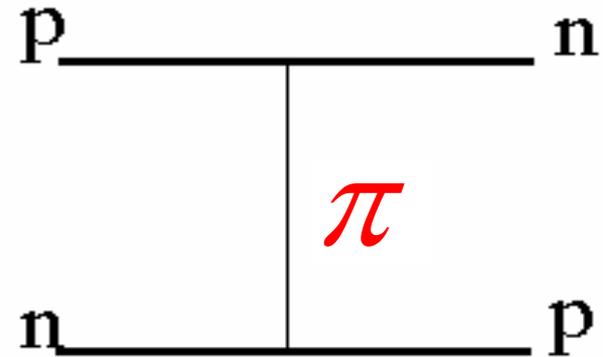
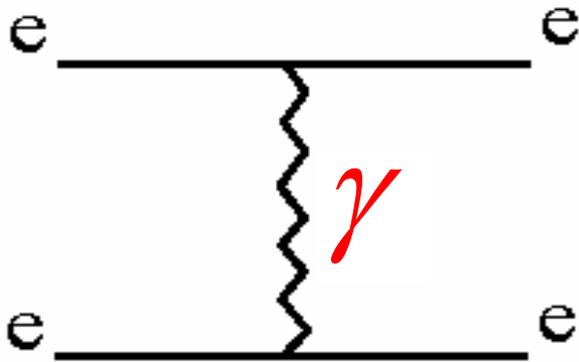
Richard Feynman  
(1918-1988)

# 1935

**Х. Юкава разработал теорию ядерного взаимодействия и предсказал частицу, связывающую протоны и нейтроны в ядре.**



**Hideki Yukawa  
(1907 –1981)**



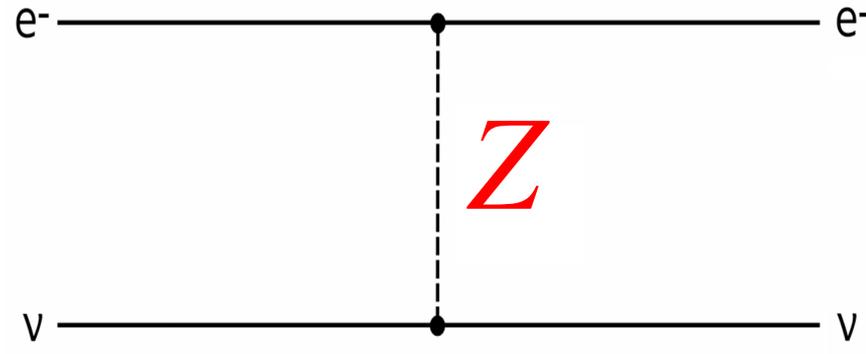
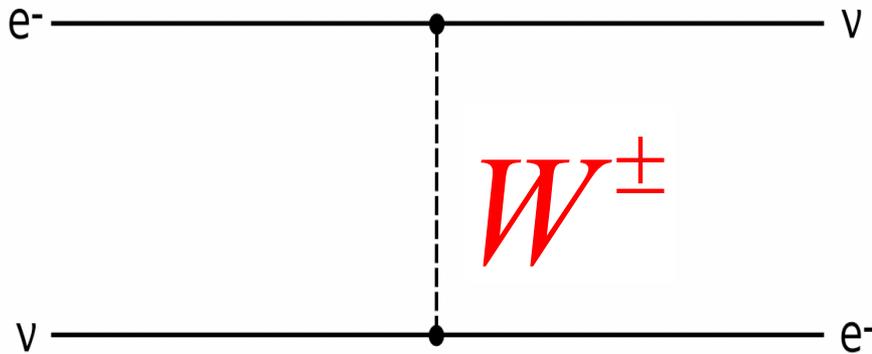
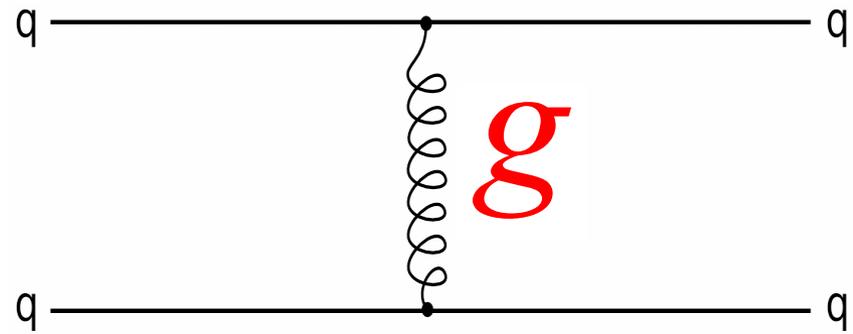
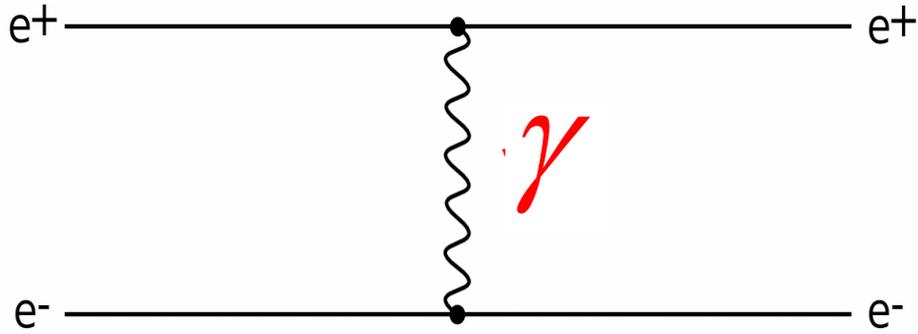
**Нобелевская премия по физике**

**1949 г. – Х. Юкава**

**За предсказание существования мезонов на основе теоретических работ по ядерным силам**

# Взаимодействия кварков и лептонов

## Диаграммы Фейнмана



**КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ**

# Взаимодействия

Взаимодействие между фундаментальными фермионами (кварками и лептонами) переносят калибровочные бозоны. В таблице приведены взаимодействия, частицы участвующие в различных взаимодействиях, калибровочные бозоны — переносчики взаимодействия, радиус действия, константа взаимодействия.

Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны	Радиус действия	Константа взаимодействия
Сильное	Все цветные частицы	8 глюонов, спин $J = 1$ , безмассовые.	$1 \text{ ФМ} = 1/m_\pi$	1
Электромагнитное	Все электрически заряженные частицы	Фотон, спин $J = 1$ , безмассовый.	$\infty$	1/137
Слабое	Кварки, лептоны, электрослабые калибровочные бозоны	$W^+$ , $W^-$ , $Z$ , спин $J = 1$ , $m(W^\pm) = 80 \text{ ГэВ}$ , $m(Z) = 91 \text{ ГэВ}$ .	$10^{-2} \text{ ФМ} = 1/m_W$	$\sim 1/30$
Гравитационное	Все массивные частицы	Гравитон, спин $J = 2$ , безмассовый	$\infty$	$10^{-38}$

# Взаимодействия

**Сильное взаимодействие.** Константа сильного взаимодействия, характеризующая интенсивность этого взаимодействия определяется взаимодействием кварков и переносчиков сильного взаимодействия — глюонов. Частицы, участвующие в сильном взаимодействии называются адронами. Характерный радиус действия сил, обусловленных сильным взаимодействием  $\sim 10^{-13}$  см. Частицы, распадающиеся в результате сильного взаимодействия, имеют характерное время жизни  $\sim 10^{-20} - 10^{-23}$  с, что соответствует характерным ширинам резонансов  $\Gamma > 10$  МэВ.

**Электромагнитное взаимодействие.** Константа электромагнитного взаимодействия  $\sqrt{\alpha} = \sqrt{e^2 / \hbar c} = \sqrt{1/137}$  ( $\alpha$  — постоянная тонкой структуры). Переносчик электромагнитного взаимодействия — фотон. То обстоятельство, что масса фотона равна нулю, определяет бесконечный радиус электромагнитного взаимодействия. Константа электромагнитного взаимодействия определяет вероятность испускания или поглощения фотона частицей с зарядом  $\pm e$ . Характерное время распада частиц в результате электромагнитного взаимодействия  $> 10^{-18}$  с. Например, время жизни  $\pi^0$ -мезона, распадающегося в результате электромагнитного взаимодействия,  $\sim 0,8 \cdot 10^{-16}$  с.

# Взаимодействия

**Слабое взаимодействие.** Константа слабого взаимодействия  $\sim 10^{-6}$ . Переносчиками слабого взаимодействия являются промежуточные бозоны  $W^\pm$  - и  $Z$ -бозоны — массивные частицы ( $m(W^\pm) = 80$  Гэв,  $m(Z) = 91$  Гэв.). Большая масса промежуточных бозонов обуславливает характерную величину радиуса слабого взаимодействия  $\sim 10^{-16}$  см. Частицы, распадающиеся в результате слабого взаимодействия имеют времена жизни  $> 10^{-12}$  с. Например заряженные  $\pi$ -мезоны, распадающегося в результате слабого взаимодействия, имеют время жизни  $2,6 \cdot 10^{-8}$  с. Нейтрон — 898 с. Некоторые ядра, распадающиеся в результате слабого взаимодействия, имеют время жизни многие годы. Единственные частицы, которые участвуют только в слабых и гравитационных взаимодействиях — нейтрино.

**Гравитационное взаимодействие.** Сила гравитационного взаимодействия определяется соотношением

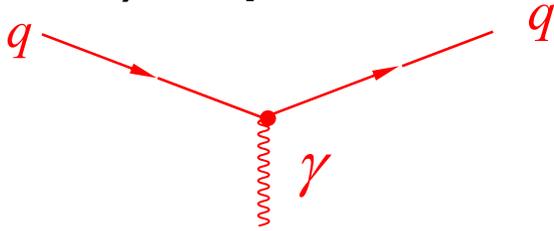
$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$  — гравитационная постоянная. Радиус действия гравитационного взаимодействия бесконечен. В гравитационном взаимодействии участвуют все частицы. Сравнение гравитационного и электромагнитного взаимодействия двух протонов, находящихся на расстоянии друг от друга  $\sim 10^{-13}$  см приводит к соотношению

$$\frac{F_{\text{грав}}}{F_{\text{эл.магн}}} \sim 10^{-36}.$$

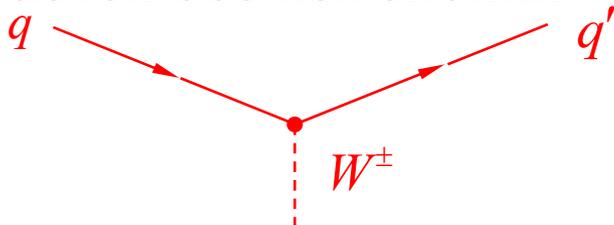
# Взаимодействие кварков

Кварки участвуют в электромагнитных взаимодействиях, излучая или поглощая  $\gamma$ -квант, при этом не изменяется ни цвет, ни тип (аромат) кварков:



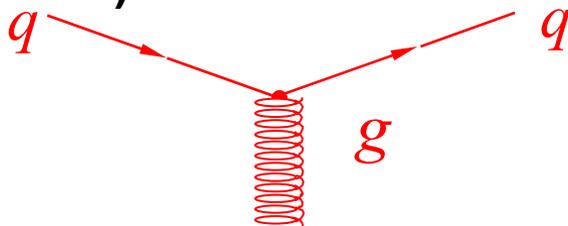
**Вершина электромагнитного взаимодействия кварков**

Кварки участвуют в слабых взаимодействиях излучая или поглощая  $W^\pm$  бозоны, при этом изменяется тип (аромат) кварка, цвет кварка остаётся без изменения



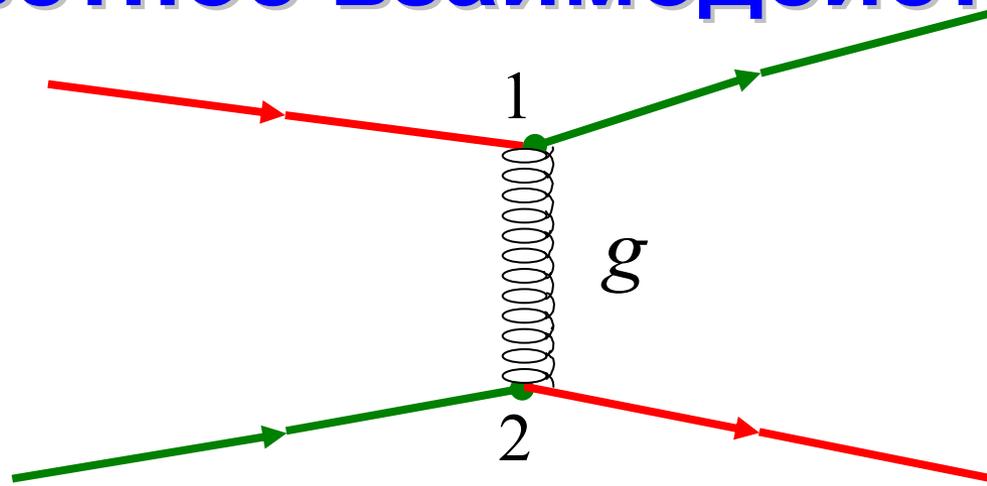
**Вершина слабого взаимодействия кварков**

Кварки участвуют в сильных взаимодействиях излучая или поглощая глюон, при этом изменяется цвет кварка, но его тип (аромат) остаётся неизменным



**Вершина сильного взаимодействия кварков**

# Цветное взаимодействие



**Глюоны – безмассовые электрически нейтральные частицы со спином  $J = 1$ , четностью  $P = -1$ , переносят сильное, т. е. цветное взаимодействие между кварками.**

Они как бы склеивают кварки в адронах (название глюона происходит от англ. *glue* – клей).

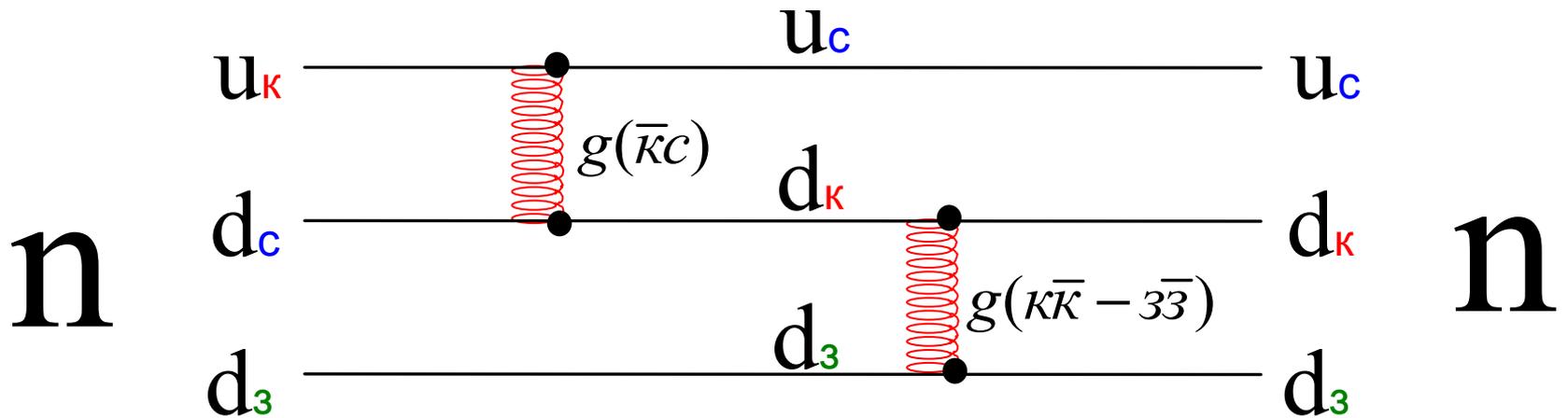
При испускании или поглощении глюона кварки изменяют цвет. При этом остальные квантовые числа кварка и его аромат не изменяются.

**Глюоны обладают цветом.** Цветовая структура глюона отличается от цветовой структуры кварка.

$$J^P (g) = 1^-$$

# Пример

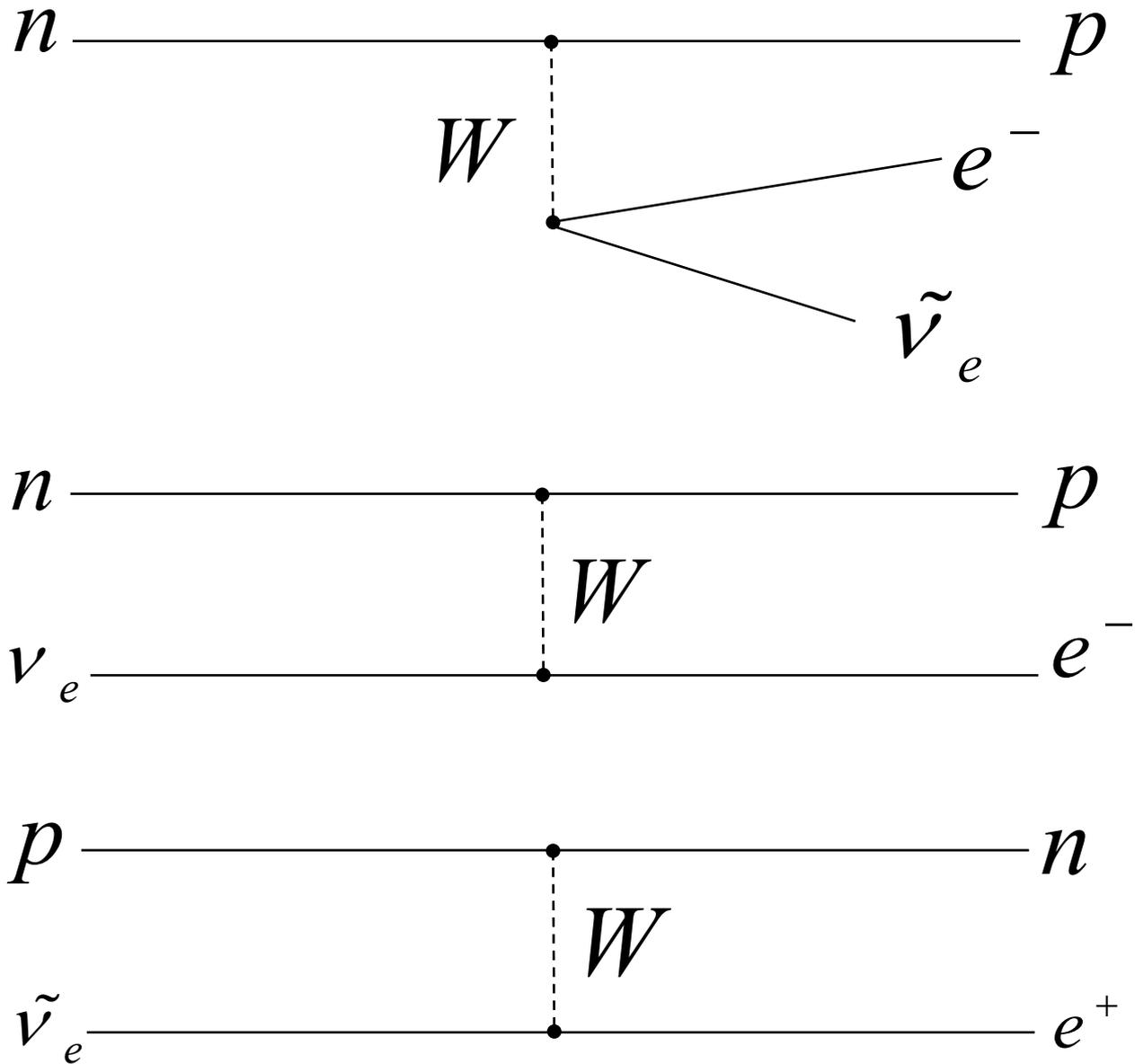
$$q(\kappa) + g(\bar{\kappa}c) \rightarrow q(c)$$



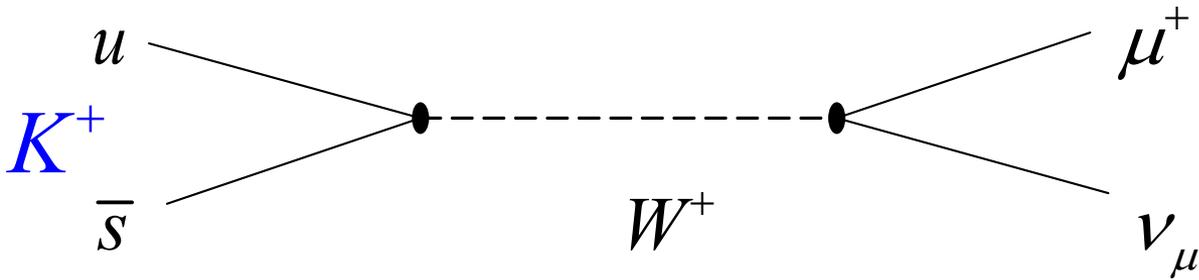
# $W^+$ , $W^-$ , $Z$ - бозоны

Переносчиками слабого взаимодействия являются  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$  бозоны которые называют промежуточными бозонами. Бозоны  $W$  и  $Z$  были предсказаны теоретически задолго до их экспериментального обнаружения как «промежуточные» частицы, переносящие слабое взаимодействие. Слабое взаимодействие, также как и электромагнитное, передается частицами со спином  $J = 1$ . Однако, в отличие от переносчика электромагнитного взаимодействия — фотона,  $W^+$ ,  $W^-$  бозоны являются заряженными частицами.  $Z$ -бозон, также как и фотон, не имеет электрического заряда.

# Распад нейтрона



# Пример

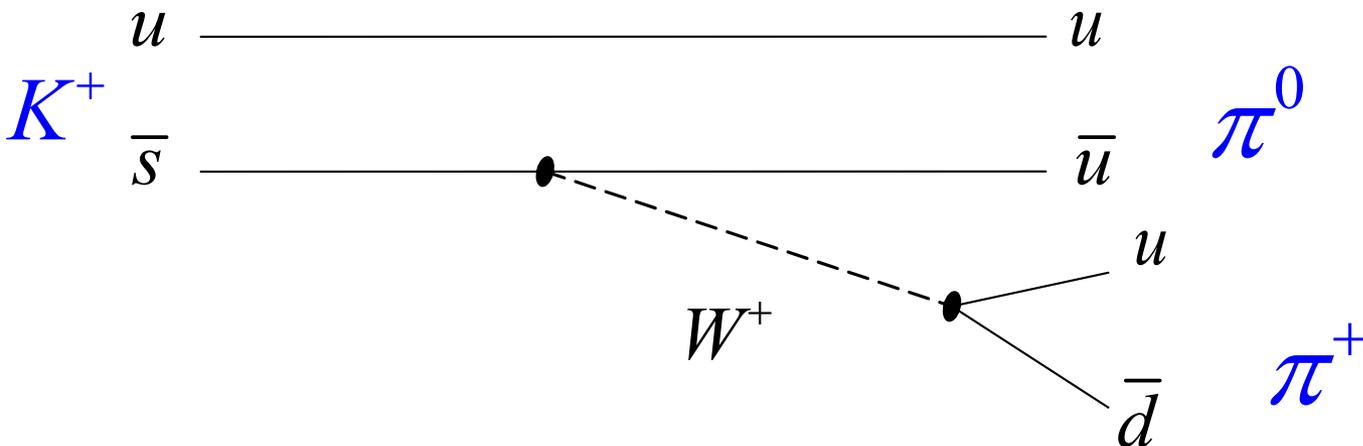
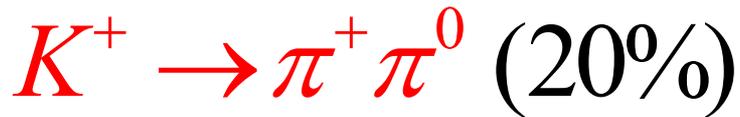


$$M(K^+) = 494 \text{ МэВ}$$

$$M(\mu^+) = 105,6 \text{ МэВ}$$

$$M(\pi^+) = 139,6 \text{ МэВ}$$

$$M(\pi^0) = 135 \text{ МэВ}$$



Каналы распада	Относительные вероятности
$\mu^+ \nu_\mu$	63.4%
$\pi^+ \pi^0$	21.1%
$\pi^+ \pi^+ \pi^-$	5.6%
$\pi^0 e^+ \nu_e$	4.9%
$\pi^0 \mu^+ \nu_\mu$	3.3%
$\pi^+ \pi^0 \pi^0$	1.7%
$\mu^+ \nu_\mu \gamma$	$5.5 \cdot 10^{-3}$
$\pi^0 \pi^0 \gamma$	$2.8 \cdot 10^{-4}$
$\pi^0 e^+ \nu_e \gamma$	$2.7 \cdot 10^{-4}$
$\pi^+ \pi^+ \pi^- \gamma$	$1.0 \cdot 10^{-4}$
$\pi^+ \pi^- e^+ \nu_e$	$4.1 \cdot 10^{-5}$
$\pi^0 \pi^0 e^+ \nu_e$	$2.1 \cdot 10^{-5}$
$e^+ \nu_e$	$1.6 \cdot 10^{-5}$
$\pi^+ \pi^- \mu^+ \nu_\mu$	$1.4 \cdot 10^{-5}$

## Распады $K^+$ - мезона

$$M(K^+) = 494 \text{ МэВ}$$

$$\tau = 1.2 \times 10^{-8} \text{ с}$$

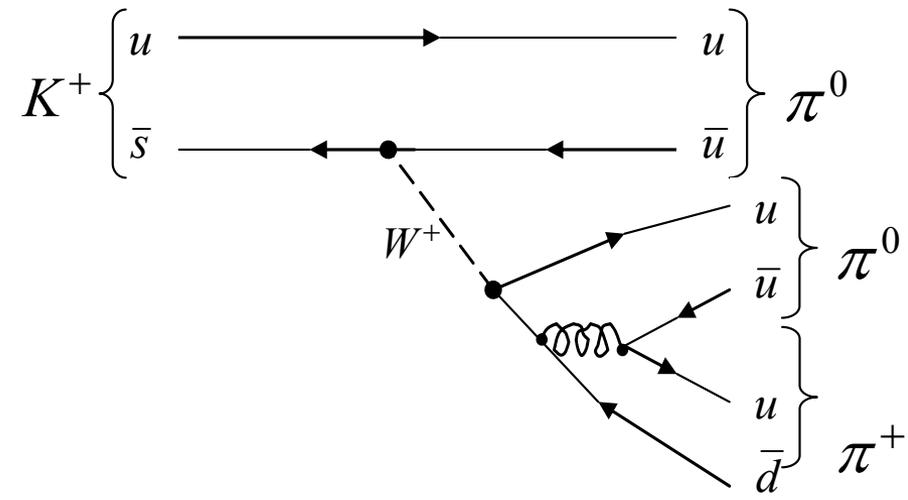
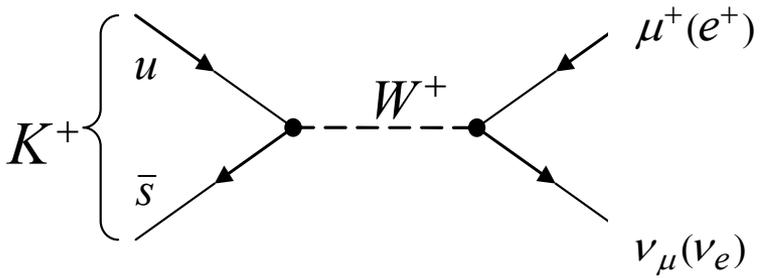
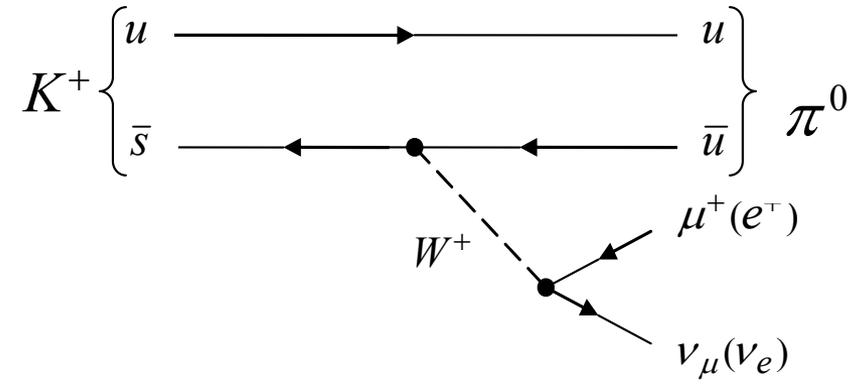
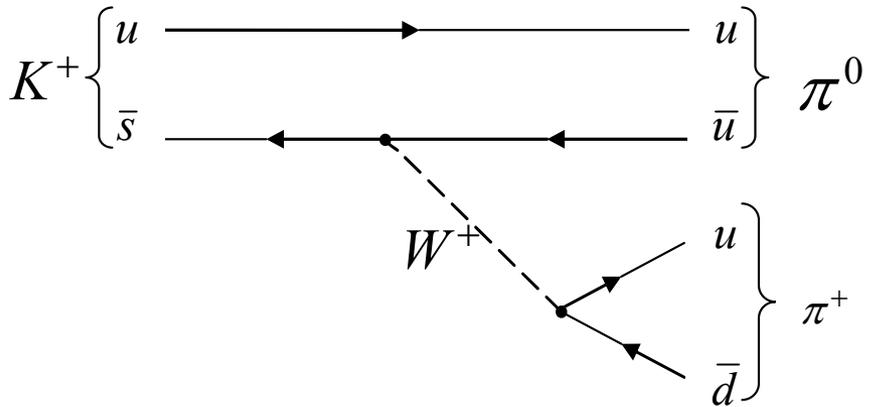
$$J^P(I) = 0^-(1/2)$$

# Распады $K^+$ - мезона

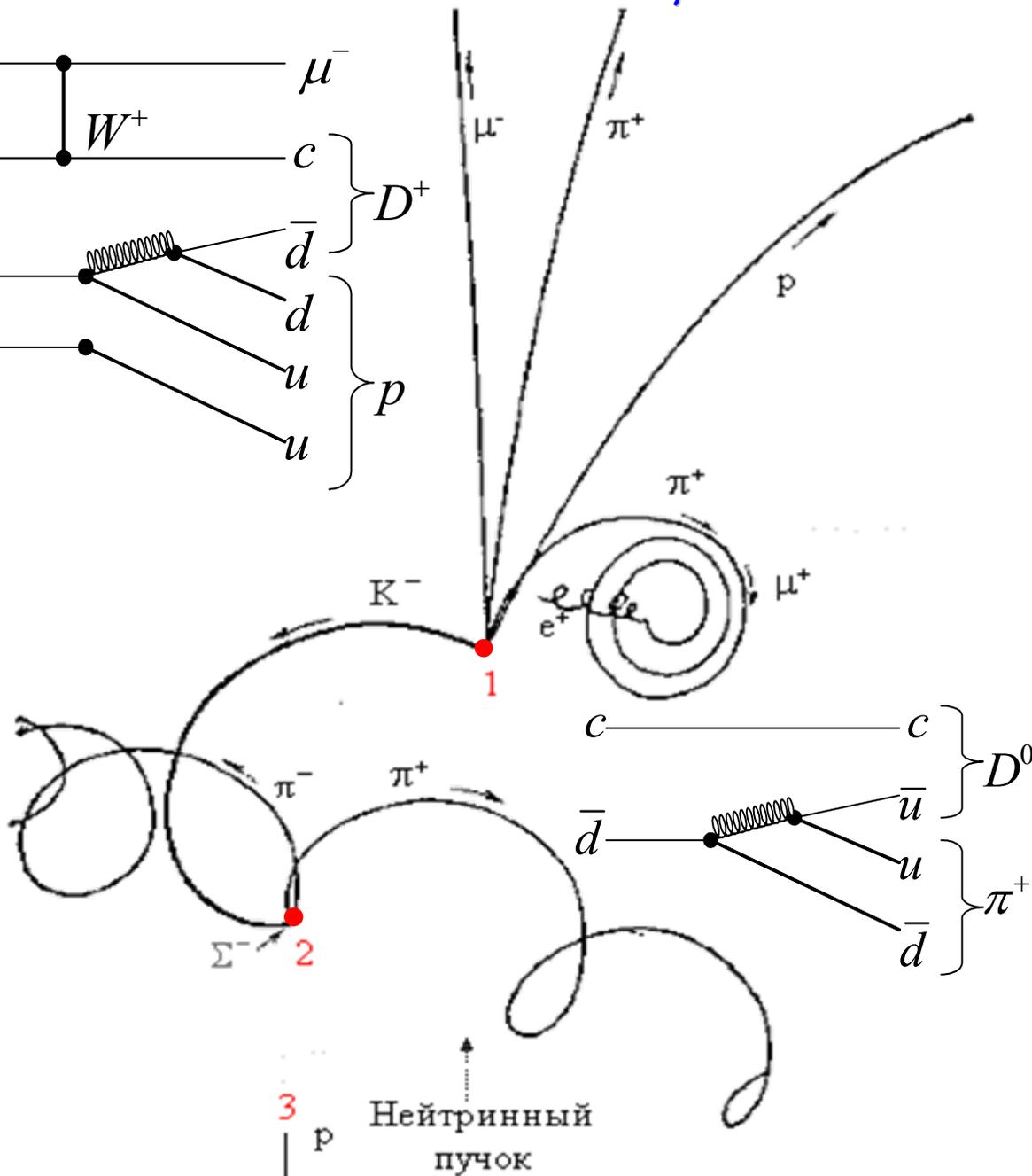
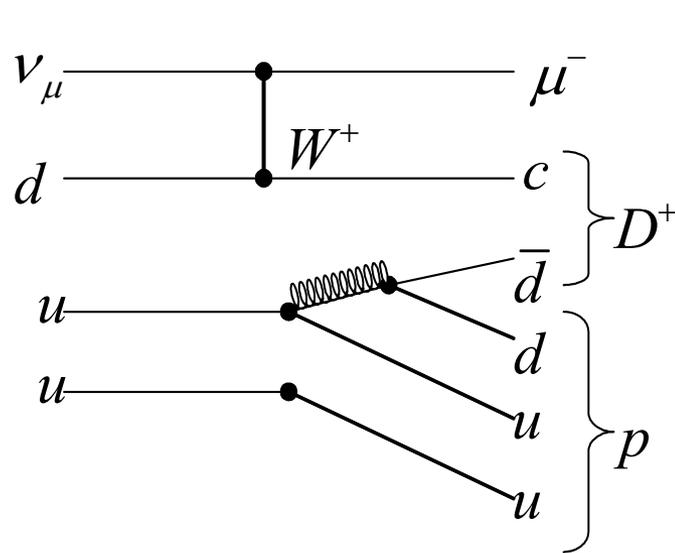
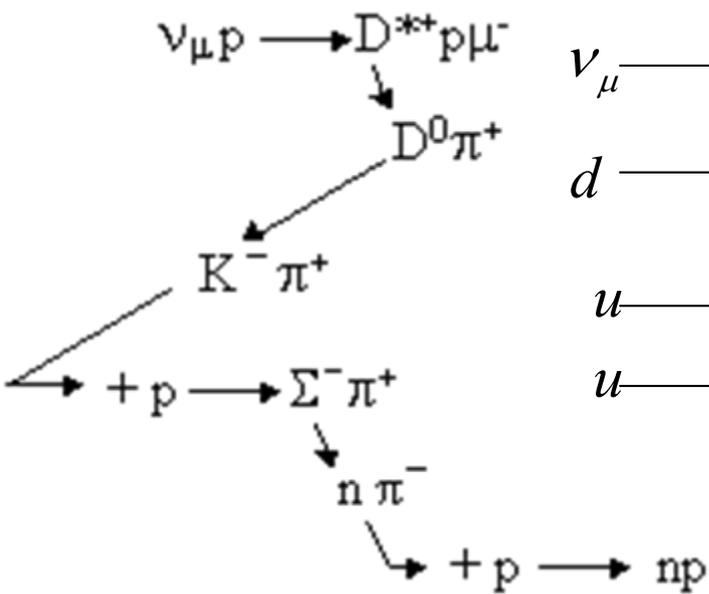
$$M(K^+) = 494 \text{ МэВ}$$

$$\tau = 1.2 \times 10^{-8} \text{ с}$$

$$J^P = 0^-$$



# Образование $D^{*+}$ резонанса в реакции $\nu_\mu + p$



$$M(D^{*+})(c\bar{d}) = 2010 \text{ МэВ}$$

$$M(D^0)(c\bar{u}) = 1864 \text{ МэВ}$$

$$M(\mu^-) = 105,7 \text{ МэВ}$$

$$M(\pi^+, \pi^-) = 139,6 \text{ МэВ}$$

$$M(K^-) = 493,7 \text{ МэВ}$$

$$M(\Sigma^-) = 1197,3 \text{ МэВ}$$

# Рождение и распад $\Omega^-$ -гиперона



$$M(\Omega) = 1672,5 \text{ МэВ}$$

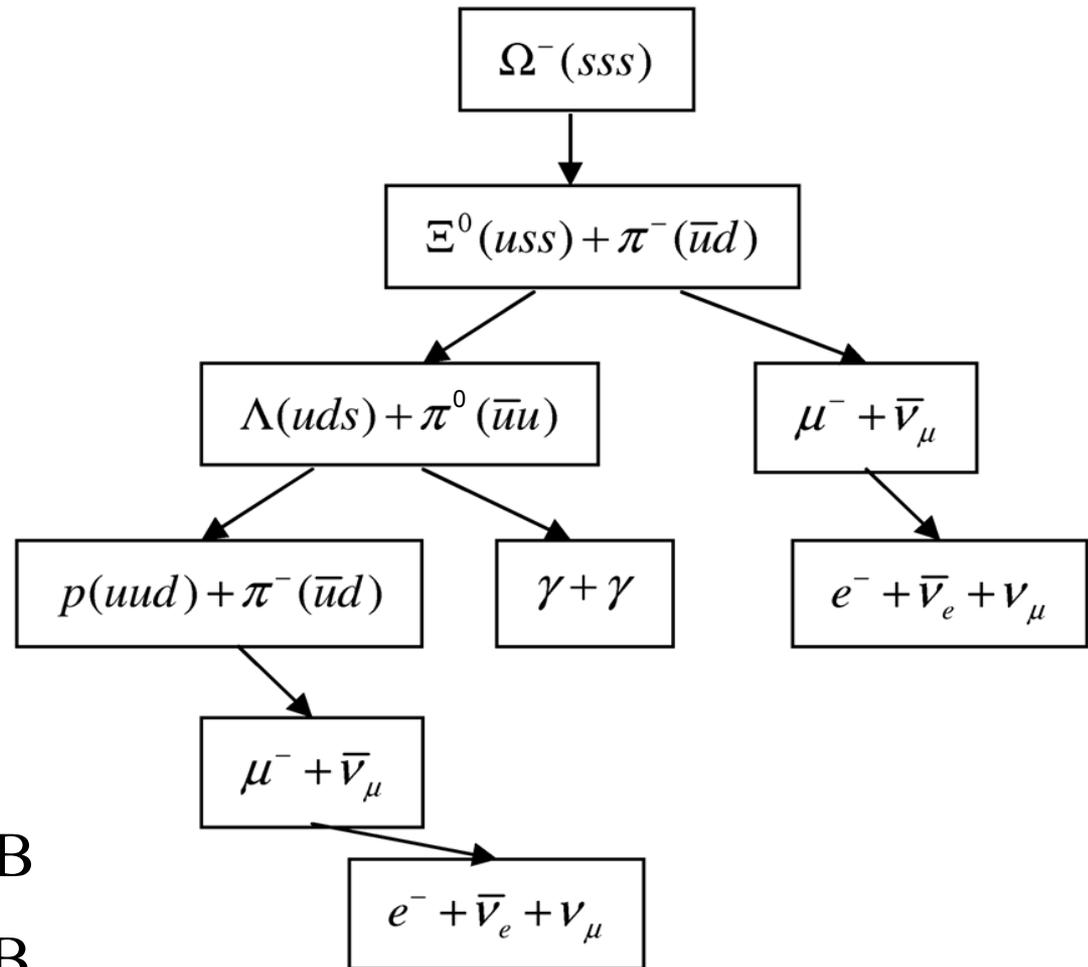
$$M(\Xi^0) = 1314,9 \text{ МэВ}$$

$$M(\Lambda) = 1115,6 \text{ МэВ}$$

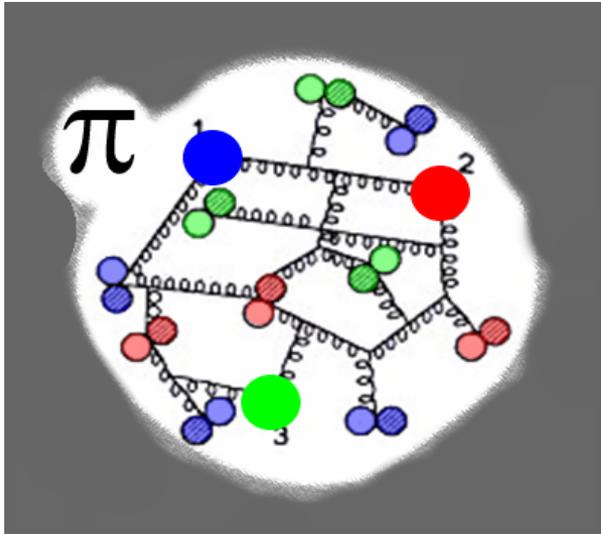
$$M(p) = 938,3 \text{ МэВ}$$

$$M(\mu^-, \mu^+) = 105,7 \text{ МэВ}$$

$$M(\pi^+, \pi^-) = 139,6 \text{ МэВ}$$

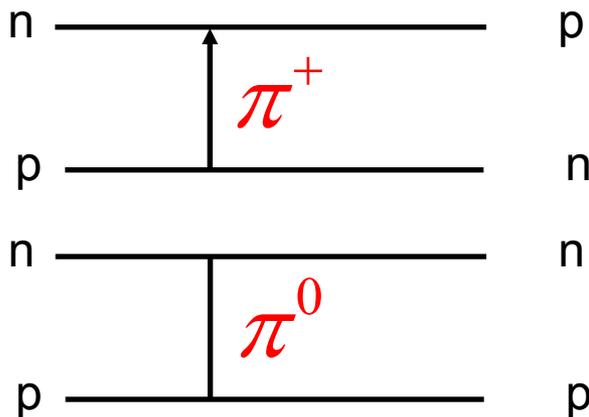
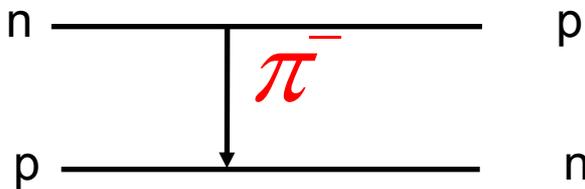


# Структура протона



В экспериментах по глубоко неупругому рассеянию электронов и нейтрино были определены заряды и спины партонов внутри нуклона.

1. Внутри нуклона обнаружены точечноподобные объекты – партоны, в которых сосредоточена вся масса нуклона. Размер партонов  $< 10^{-17}$  см.
2. Заряженные партоны имеют характеристики кварков – их спин  $1/2$ , а заряды в единицах  $e$  либо  $+2/3$ , либо  $-1/3$ .
3. Нейтральные партоны, отождествляемые с глюонами, несут около половины внутренней энергии нуклона.

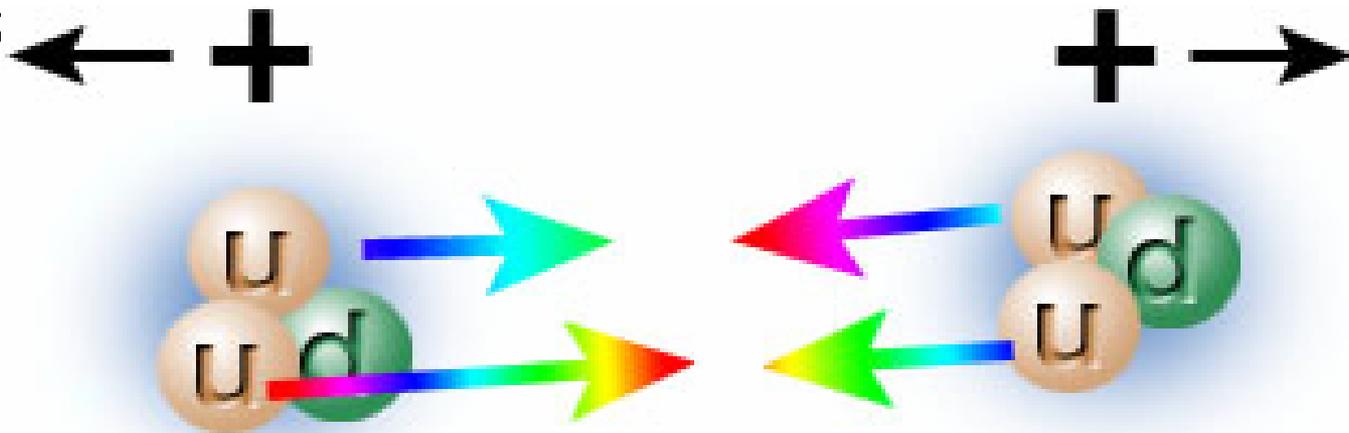


Результаты этих исследований подтверждают, что нуклон это частица, состоящая из трех валентных кварков, виртуальных морских кварков-антикварков и глюонов.

# Кварки – Адроны – Ядра

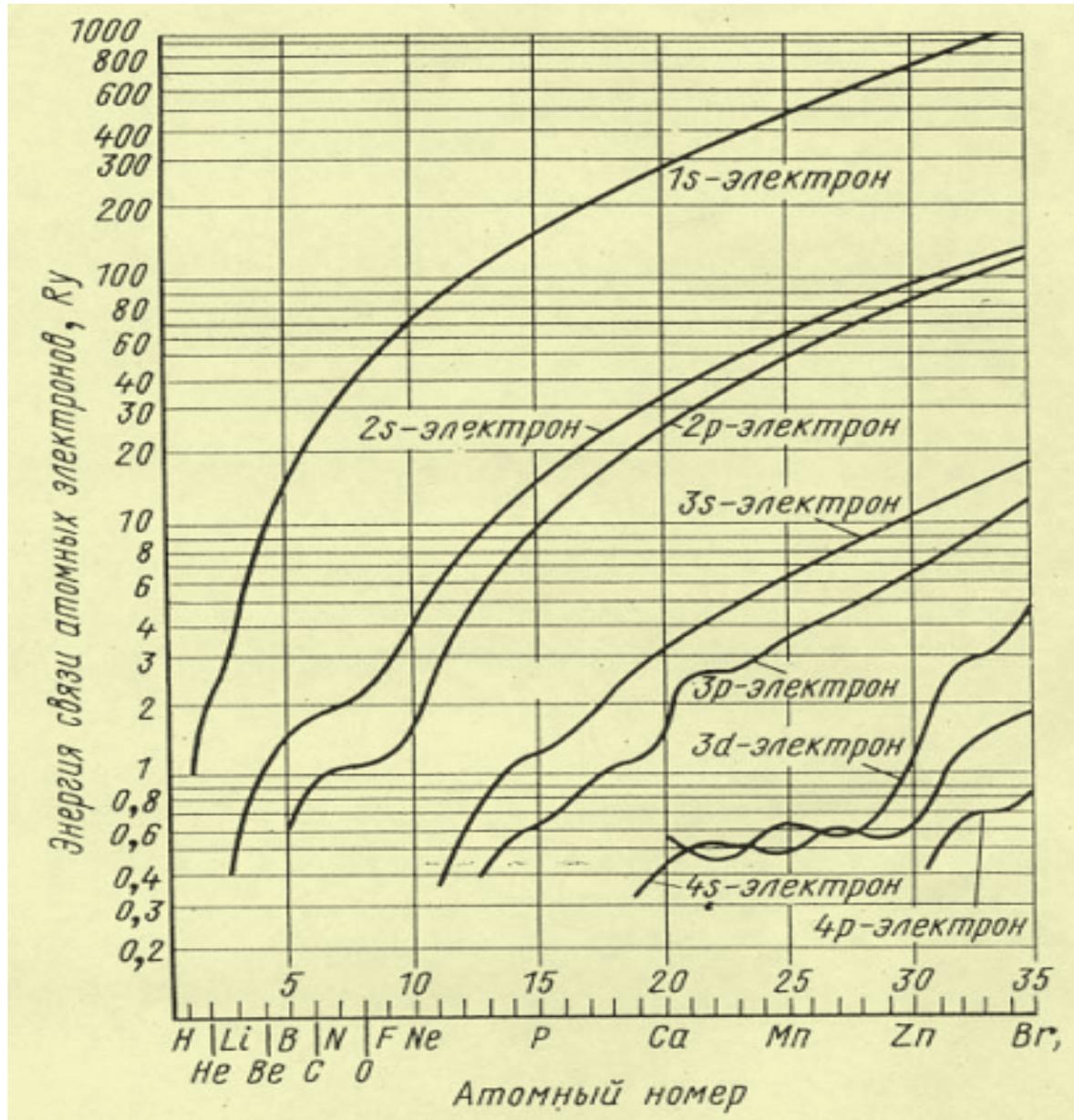
Расстояние, на котором проявляется цветное взаимодействие  $\approx 1$  Фм – характерный размер адрона. Цветные взаимодействия кварков и глюонов формируют адрон. Точно так же, как атом, состоящий из заряженных частиц, является электрически нейтральным образованием, адрон, состоящий из цветных объектов, является бесцветным объектом. Цвет проявляется только на расстоянии  $< 10^{-13}$  см.

Бесцветные адроны связаны друг с другом ядерными силами, которые являются аналогом сил связывающих нейтральные атомы в молекулы. Ядерные силы – это слабый «отголосок» сильного взаимодействия



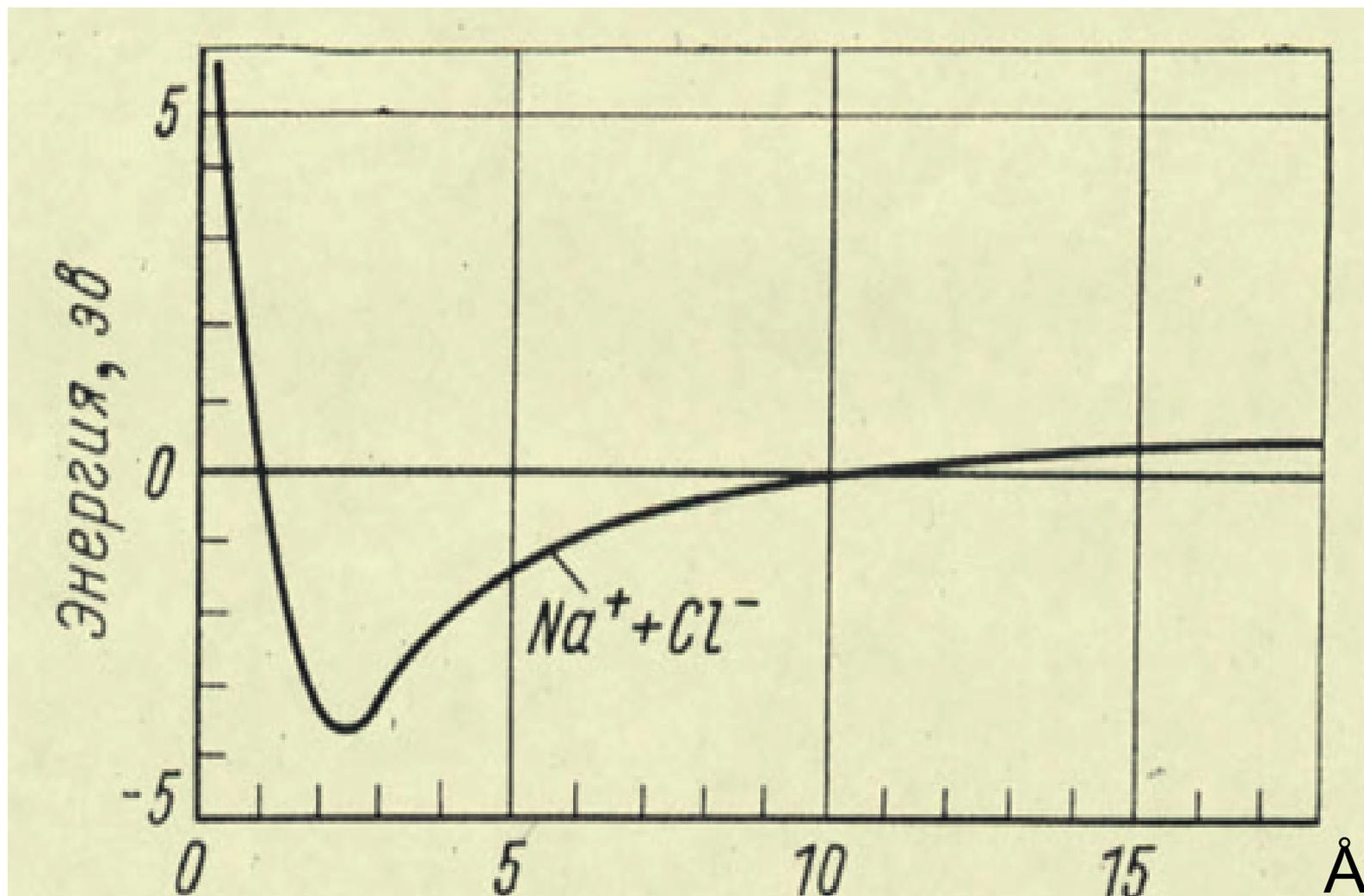
## Атомные ядра

# Атомы. Молекулы



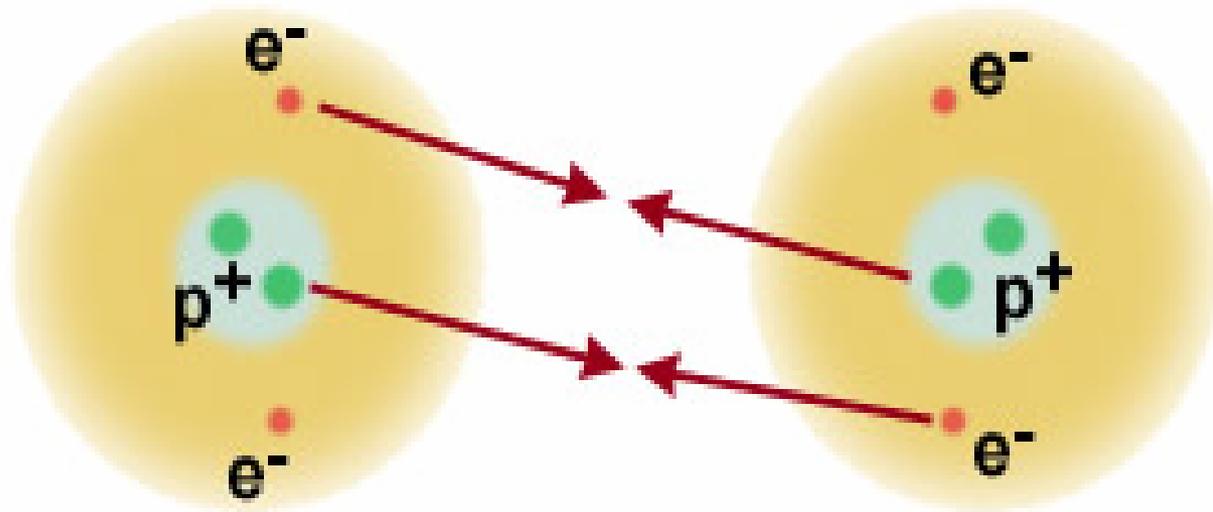
Зависимость энергии связи электронов различных оболочек атома от атомного номера

# Атомы. Молекулы



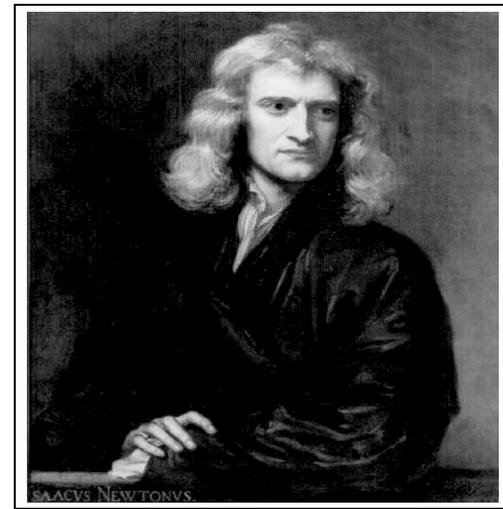
Изменение энергии системы  $\text{NaCl}$  в зависимости от расстояния (Å) между ионами  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$

# Атомы - Молекулы



Электромагнитное поле атома сосредоточено в области пространства размером  $10^{-8}$  см. Для наблюдателя, находящегося на большом расстоянии, атом представляется нейтральной системой, так как положительный заряд ядра полностью компенсируется отрицательным зарядом электронной оболочки. При образовании молекулы прочно связанные внутренние оболочки атомов практически не изменяются. Химические и физические свойства молекул определяются относительно слабо связанными электронами внешней оболочки. Силы, связывающие атомы в молекулы, имеют электромагнитную природу. Однако это лишь слабый «отголосок» сил, связывающих электроны и атомное ядро.

## Sir Isaac Newton (1642-1727)



Мельчайшие частицы материи слепляются в результате сильнейшего притяжения, образуя частицы большего размера, но уже менее склонные к притяжению; многие из этих частиц могут опять слепляться, образуя ещё большие частицы с ещё меньшим притяжением друг к другу и так далее в разных последовательностях, пока эта прогрессия не закончится на самых больших частицах, от которых зависят уже и химические реакции и цвет естественных тел, и, которые образуют, наконец, тела ощутимых размеров. Если так, то в природе должны существовать посредники, помогающие частицам вещества близко слепляться друг с другом за счет сильного притяжения. Обнаружение этих посредников и есть задача экспериментальной философии.