

# Элементарно, Хиггс!

Дмитрий Казаков

Лаборатория теоретической физики  
Объединённый институт ядерных исследований (Дубна)

Московский физико-технический институт



# Программа курса лекций

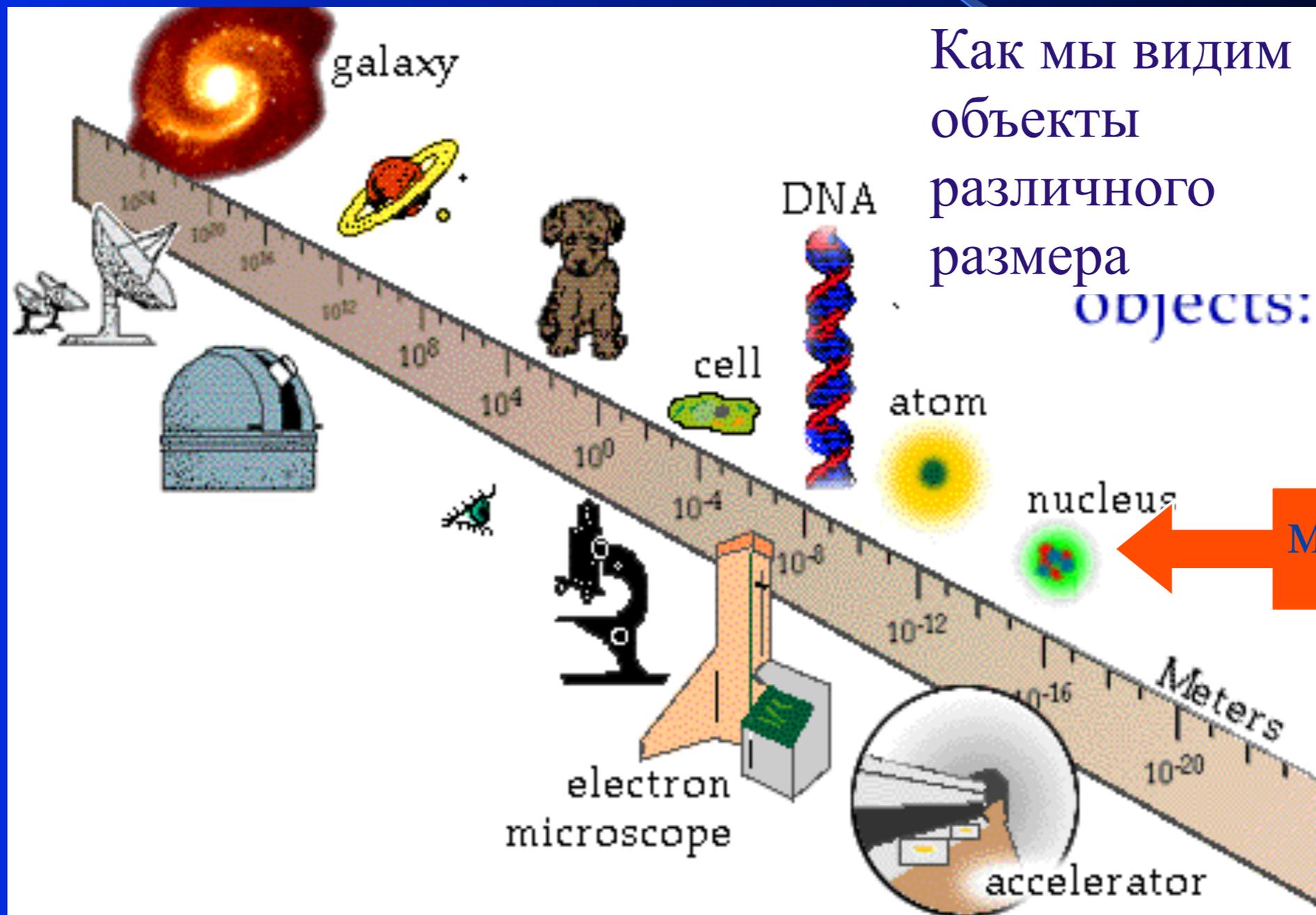
- Лекция I Физика элементарных частиц в предверии смены парадигм
- Лекция II Симметрии в физике элементарных частиц
- Лекция III Стандартная модель: сильные взаимодействия
- Лекция IV Стандартная модель: электрослабые взаимодействия
- Лекция V Физика за пределами Стандартной модели

# Лекция I

## Физика элементарных частиц в преддверии смены парадигм

- Атомное ядро
- Элементарные частицы
- Пион-нуклонная теория
- Странные частицы
- Адроны и проблема классификации
- Кварковая модель
- Сколько нужно лептонов?
- Слабые взаимодействия: модель Ферми

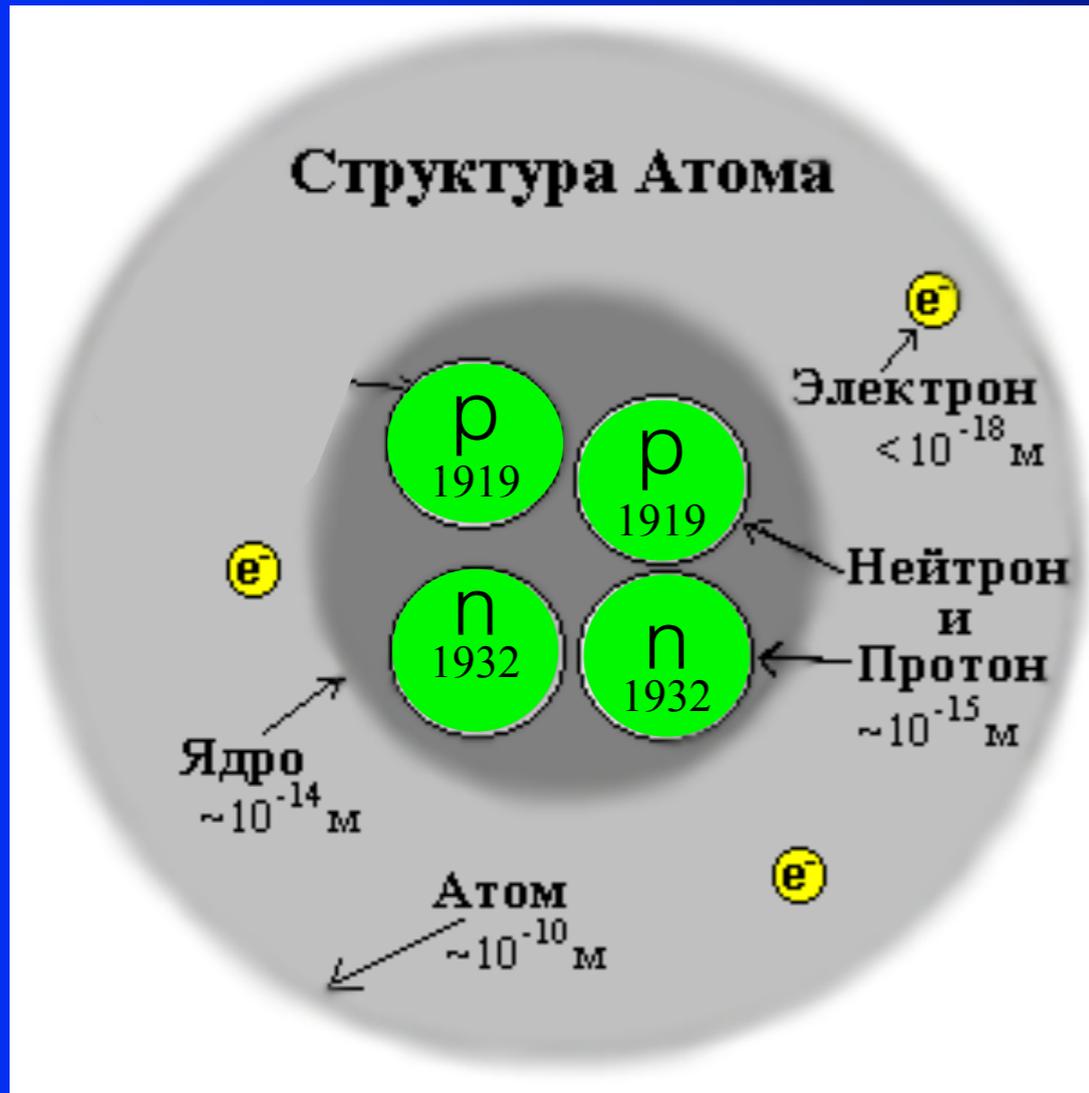
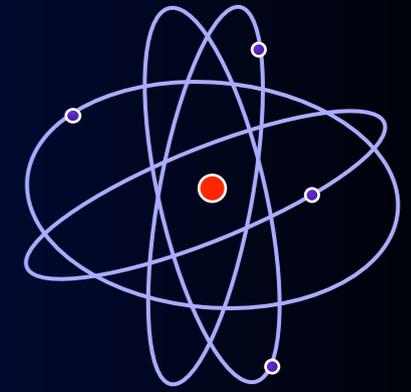
# Макро и микро космос на шкале расстояний



Как мы видим  
объекты  
различного  
размера  
objects:

← микромир

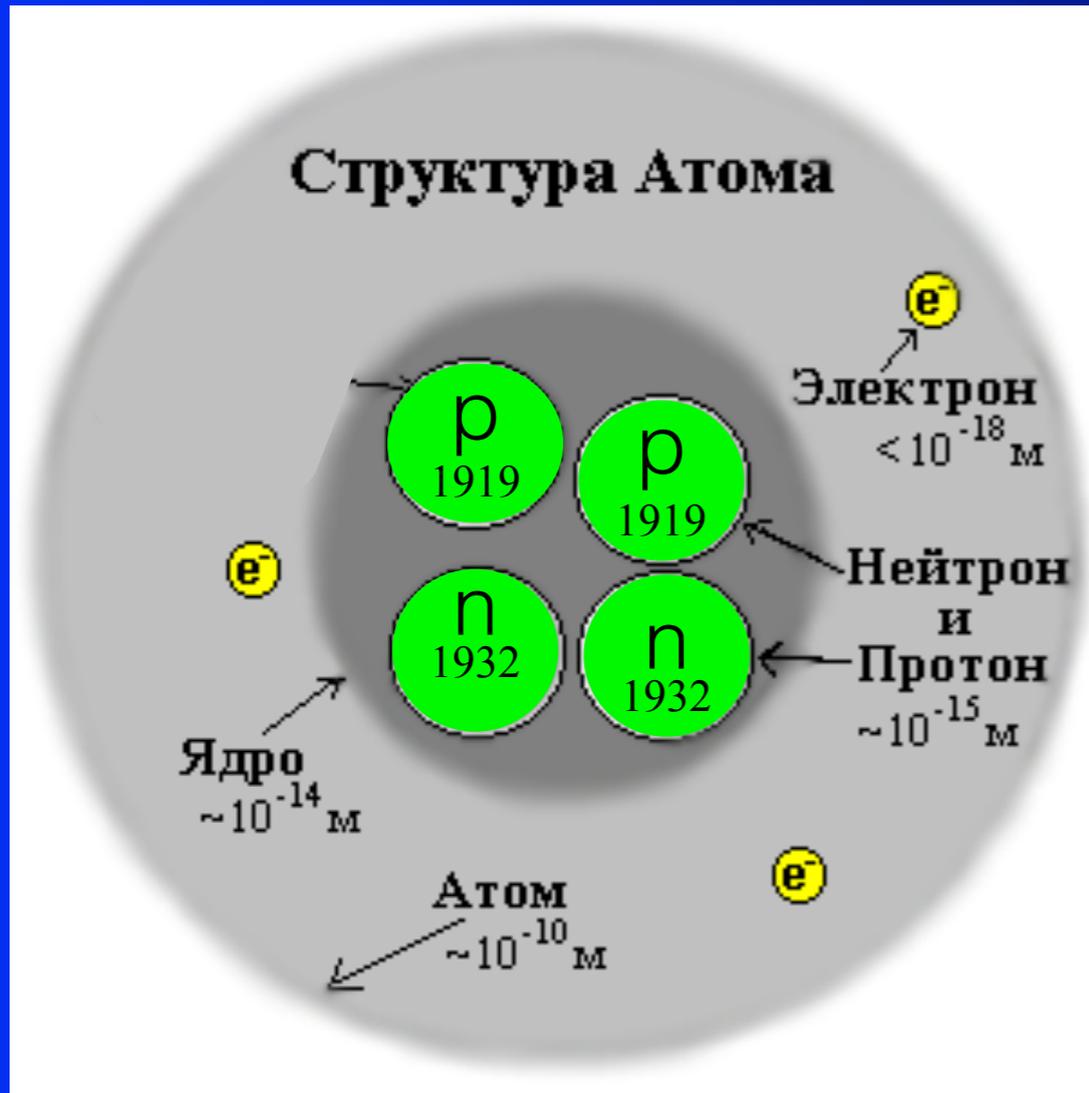
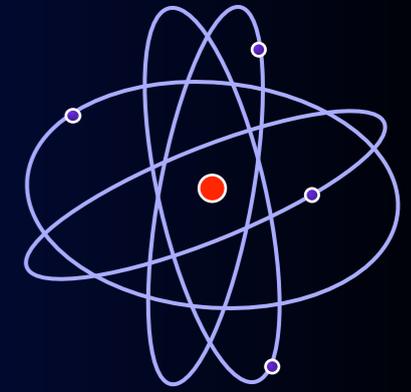
# Структура Атома



В центре атома находится плотное ядро имеющее положительный электрический заряд

Оно в 10000 раз меньше размера самого атома

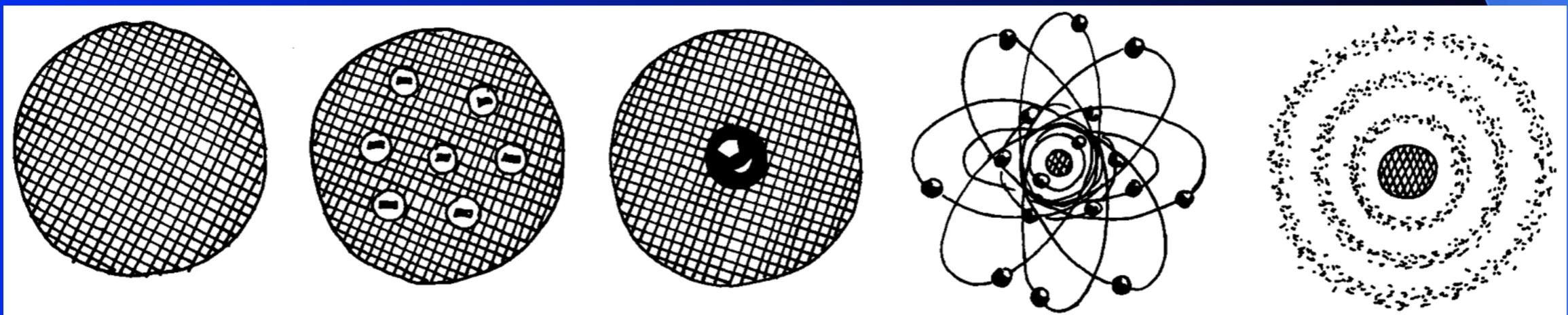
# Структура Атома



В центре атома находится плотное ядро имеющее положительный электрический заряд

Оно в 10000 раз меньше размера самого атома

Эволюция в понимании строения атома



Демокрит

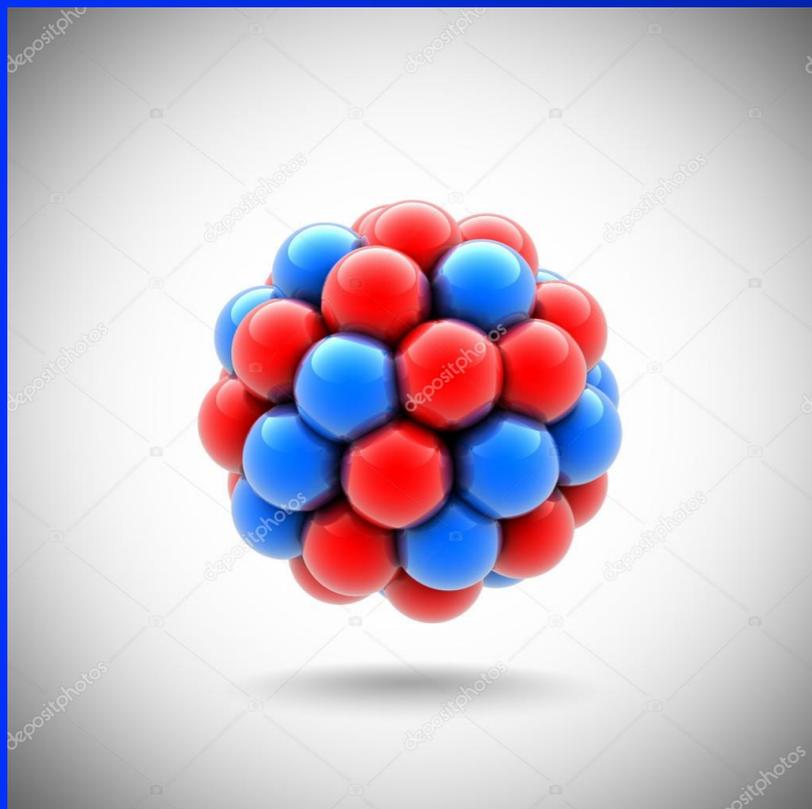
Томпсон

Резерфорд

Бор

Шредингер

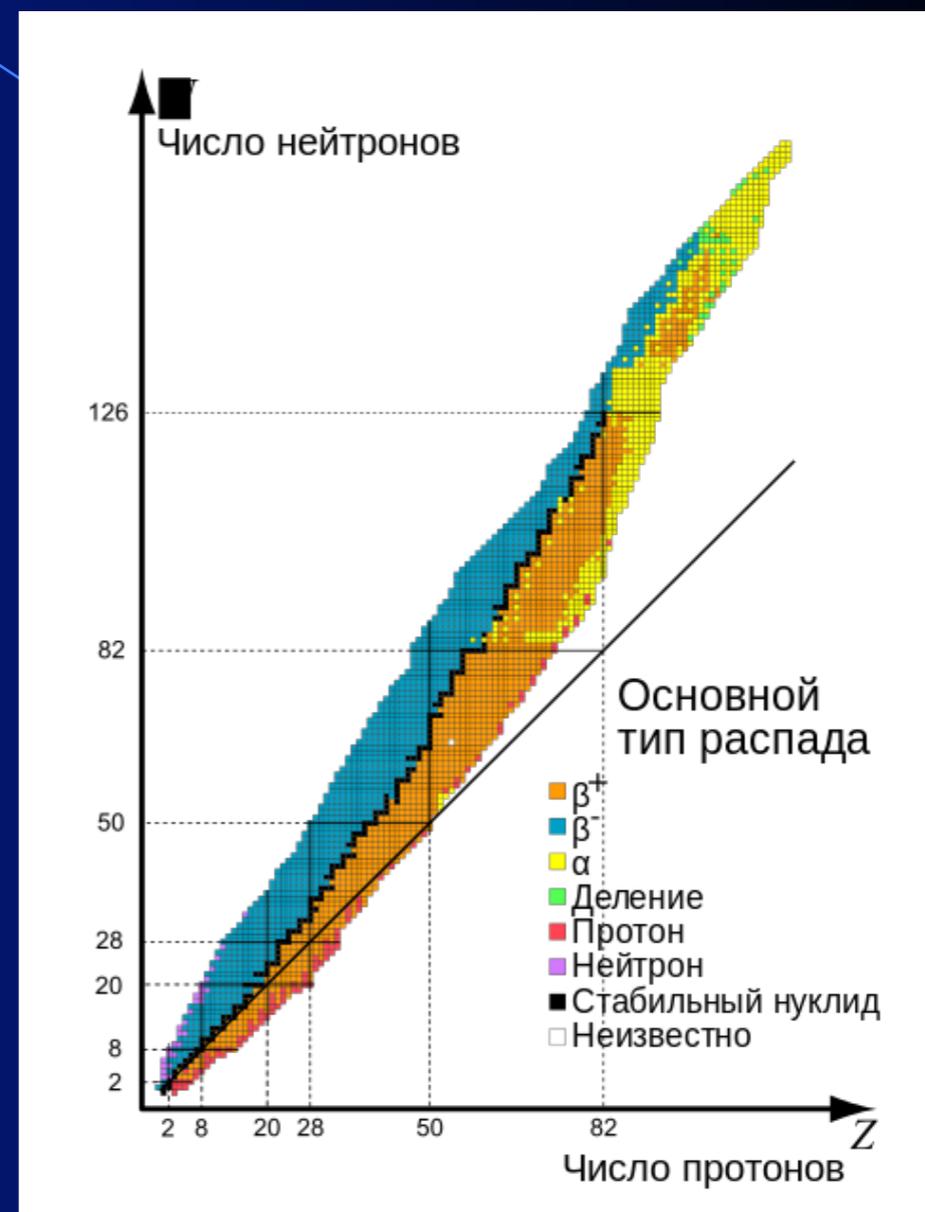
# Атомное ядро



Ядро состоит  
из протонов и  
нейтронов

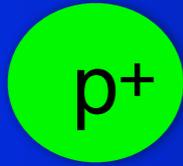
Атомы различаются только  
количеством протонов и  
нейтронов в ядре

Между ними действуют ядерные силы, которые  
удерживают протоны и нейтроны вместе



# Элементарные частицы

протон



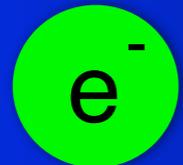
стабильная частица

нейтрон



распадается за 9 минут

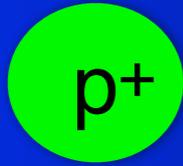
электрон



стабильная частица

# Элементарные частицы

протон



стабильная частица

нейтрон



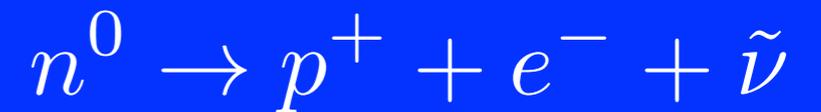
распадается за 9 минут

электрон



стабильная частица

нейтрино (маленький нейтрончик)



# Элементарные частицы

протон  стабильная частица

нейтрон  распадается за 9 минут

электрон  стабильная частица

нейтрино (маленький нейтрончик)



- Из этих частиц состоят все атомы и всё что мы видим во Вселенной



# Элементарные частицы

протон  $p^+$  стабильная частица

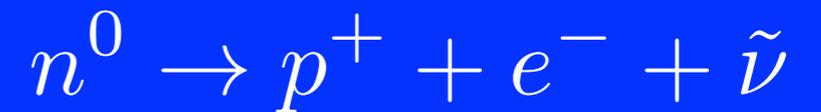
нейтрон  $n^0$  распадается за 9 минут

электрон  $e^-$  стабильная частица

нейтрино (маленький нейтрончик)

- Из этих частиц состоят все атомы и всё что мы видим во Вселенной

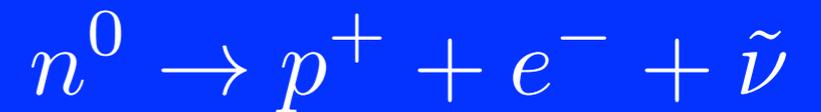
фотон  $\gamma$  квант электромагнитного поля (квант света)



# Элементарные частицы

протон  стабильная частица

нейтрон  распадается за 9 минут



электрон  стабильная частица

нейтрино (маленький нейтрончик)

- Из этих частиц состоят все атомы и всё что мы видим во Вселенной

фотон  квант электромагнитного поля (квант света)

Масса протона 938 МэВ, масса нейтрона 939 МэВ,  
масса электрона - 0.510 МэВ =  $9 \times 10^{-31}$  кг



# Что удерживает протоны и нейтроны в ядре?

## Пион-нуклонная теория

Между нуклонами (протонами и нейтронами) действуют ядерные силы, которые осуществляются путём обмена новыми частицами -  $\pi$ -мезонами

ПИОНЫ

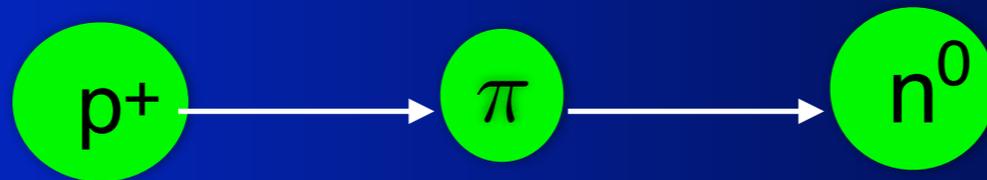


или  $\pi$ -мезоны ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ )

Ими обмениваются протоны и нейтроны в ядре  
открыты в 1947 году

8

Ядерные силы являются коротко-действующими - их радиус действия обратно пропорционален массе  $\pi$ -мезонов

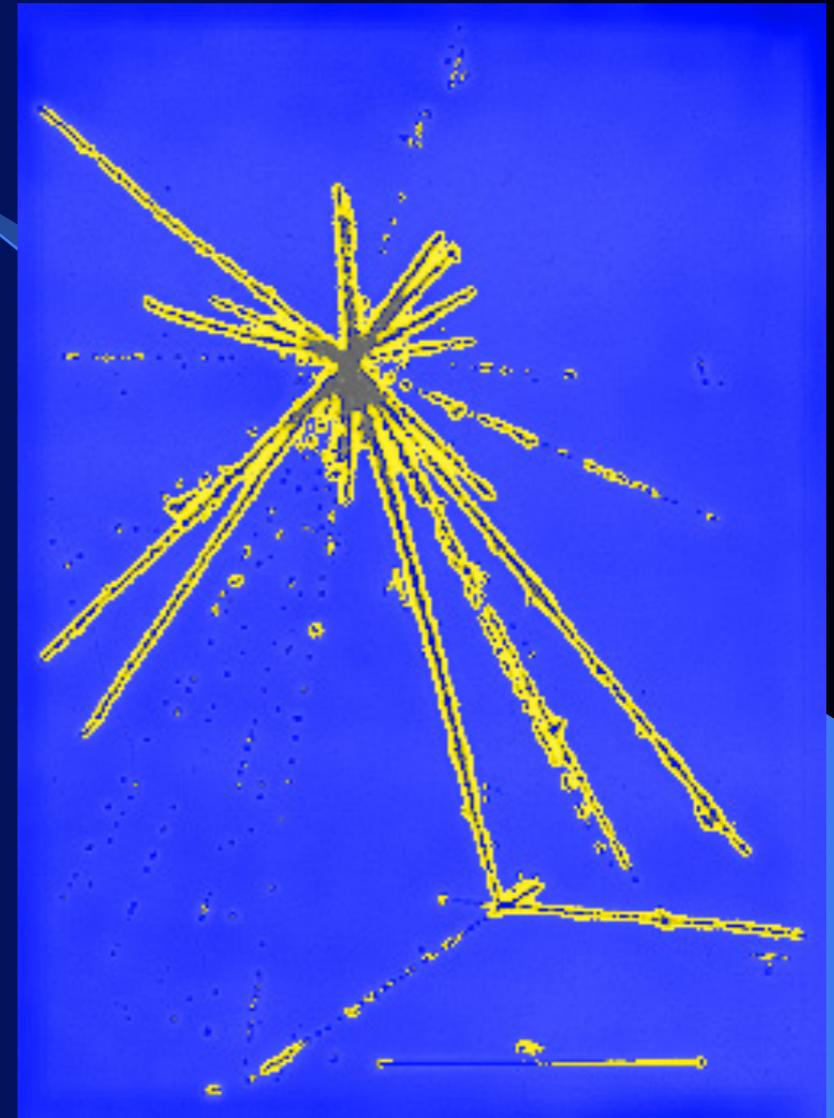
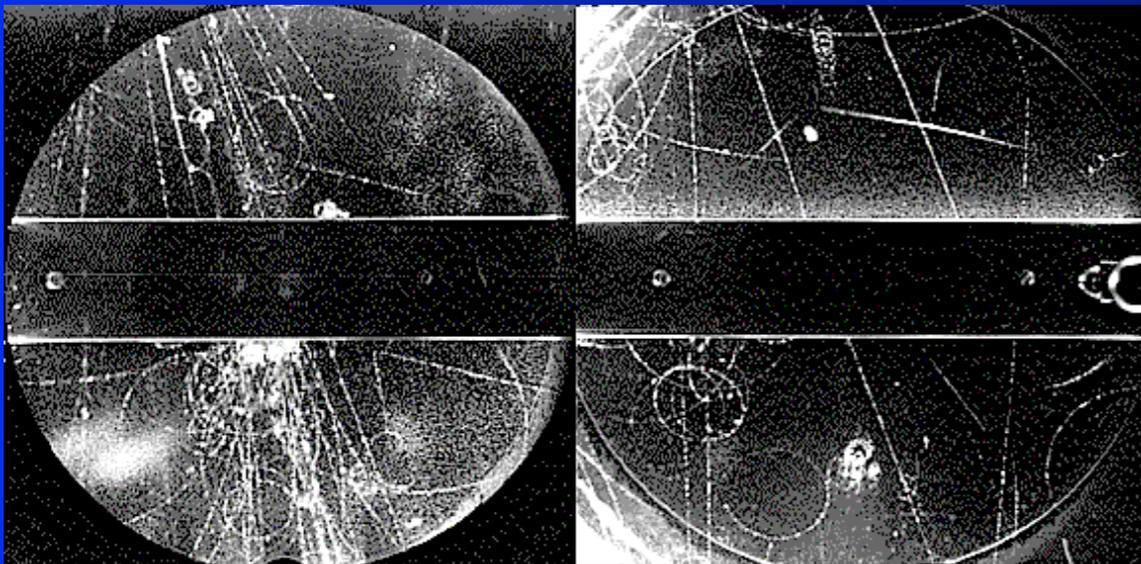


Масса  $\pi^{\pm}$  мезона 139 МэВ,  $\pi^0$  мезона 135 МэВ

# Открытие Странности

Открытие К-мезона в 1947 г. и  $\Lambda$  - гиперона в 1952 г. явилось первым указанием на то, что частицы из которых состоит ядро атома - это ещё не всё.

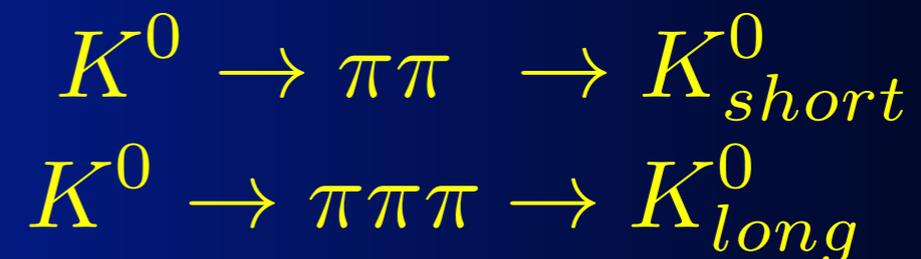
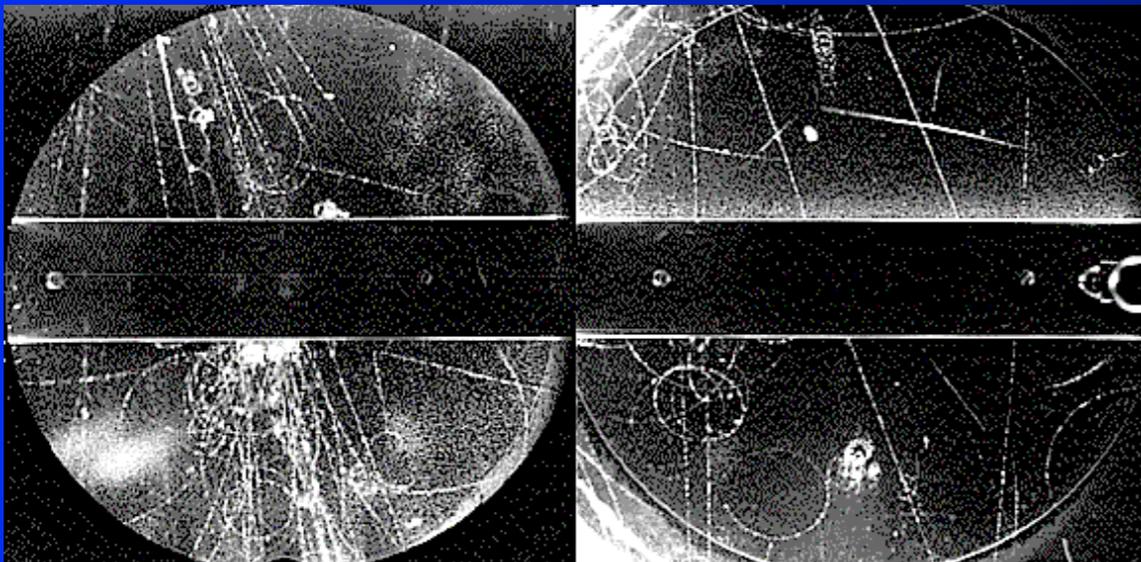
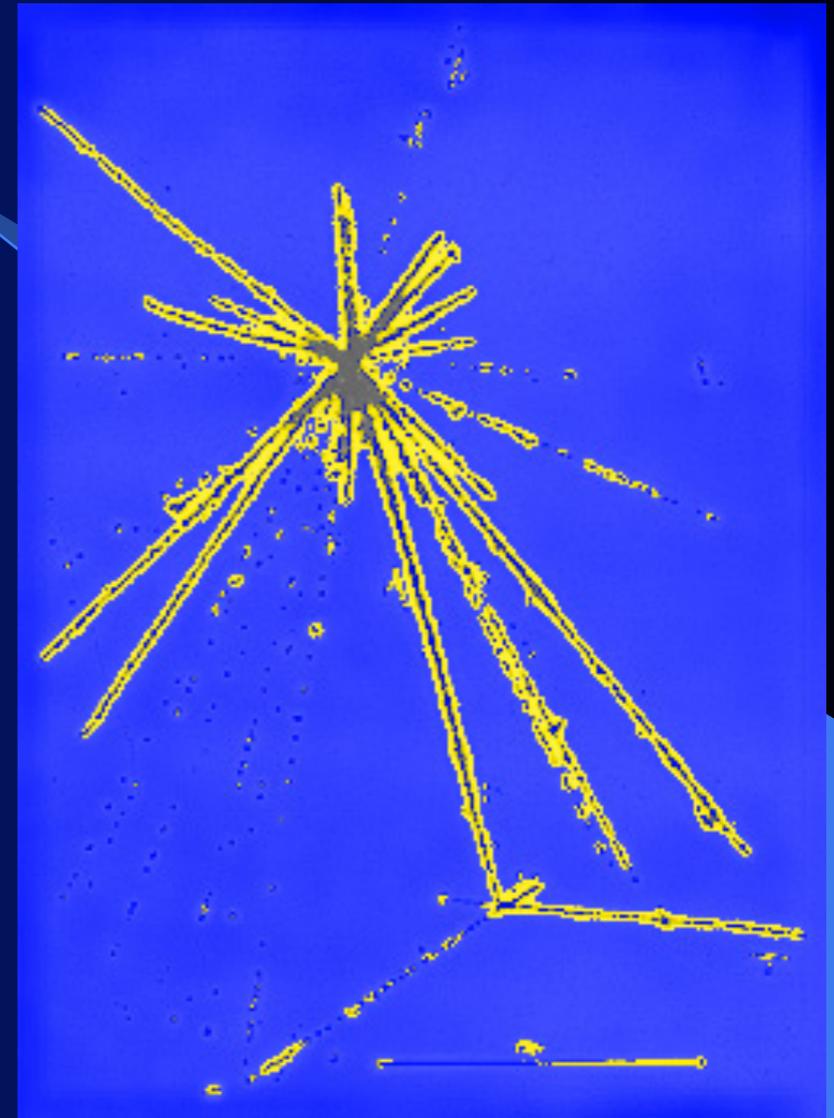
По какой-то неизвестной причине природа хочет чего-то-ещё!



# Открытие Странности

Открытие К-мезона в 1947 г. и  $\Lambda$  - гиперона в 1952 г. явилось первым указанием на то, что частицы из которых состоит ядро атома - это ещё не всё.

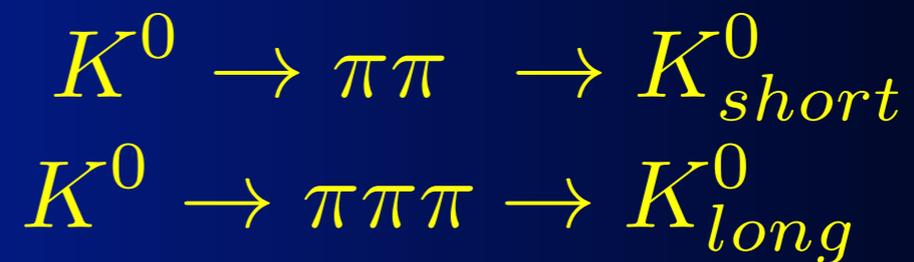
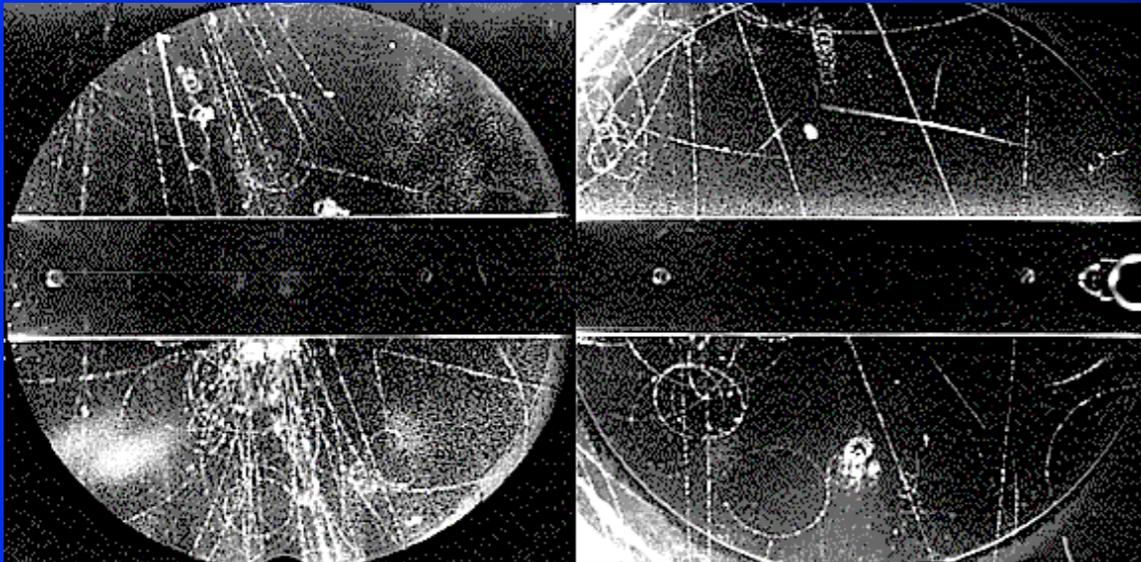
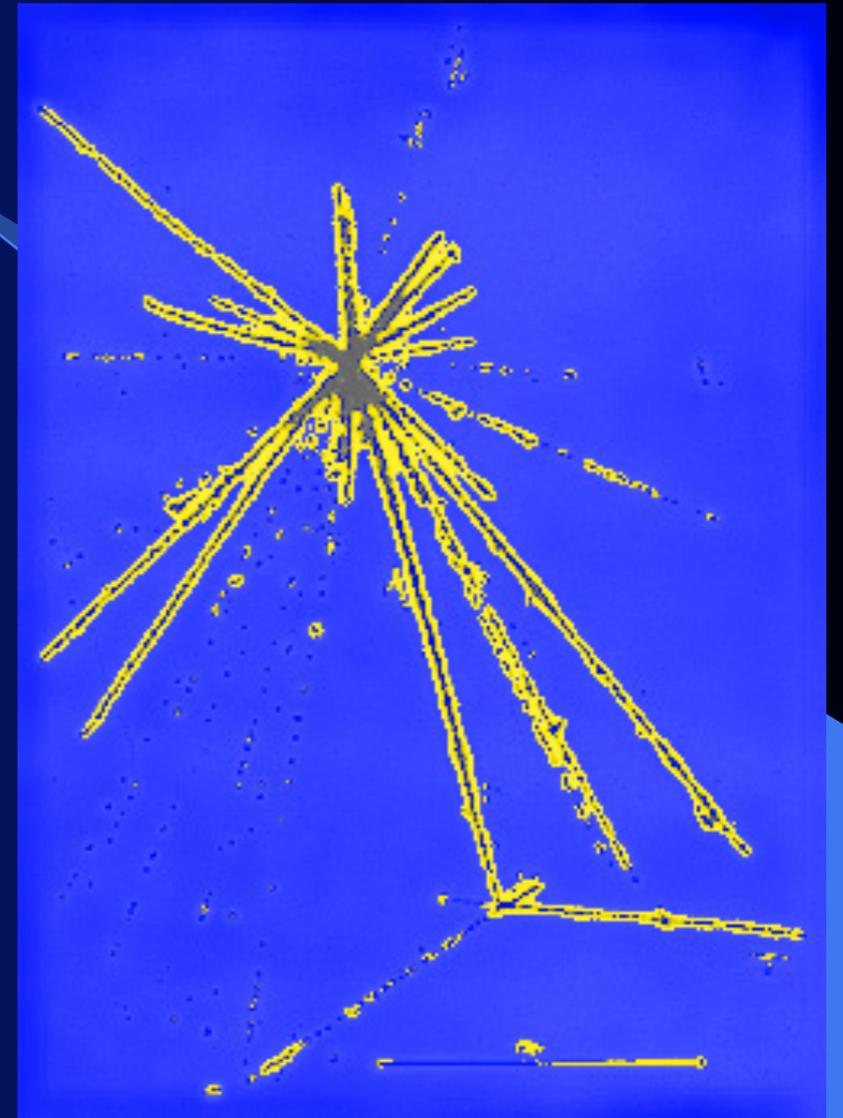
По какой-то неизвестной причине природа хочет чего-то-ещё!



# Открытие Странности

Открытие К-мезона в 1947 г. и  $\Lambda$  - гиперона в 1952 г. явилось первым указанием на то, что частицы из которых состоит ядро атома - это ещё не всё.

По какой-то неизвестной причине природа хочет чего-то-ещё!



Смешивание  $K^0$  и  $\bar{K}^0$

# Открытие элементарных частиц

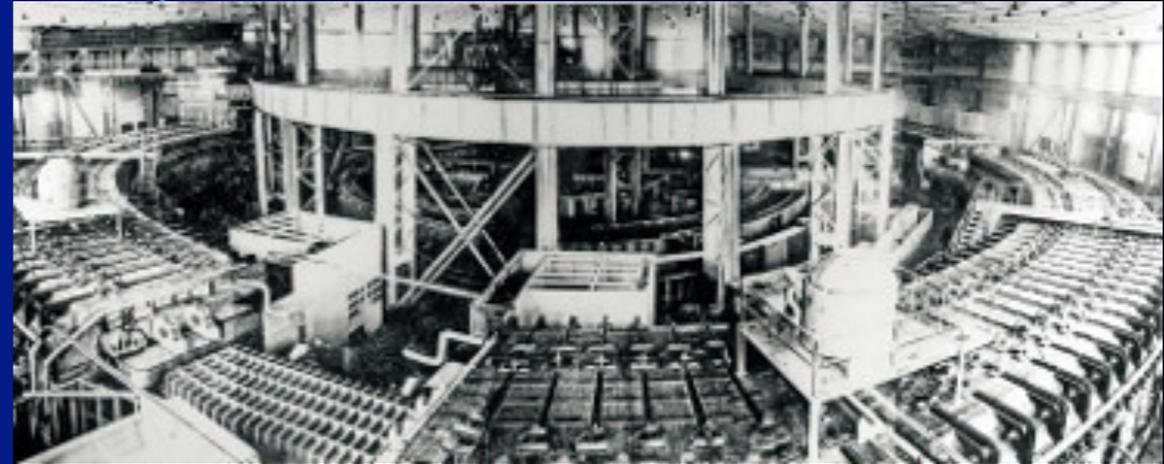


- Целый зоопарк элементарных частиц был открыт на ускорителях
- Их стали разделять на два класса: барионы и мезоны
- Это было окном в новый мир - микромир

# Ускорители протонов



BNL Cosmotron (1952-1966) 3.3 GeV



Синхрофазотрон Дубна ОИЯИ 1957 10 ГэВ

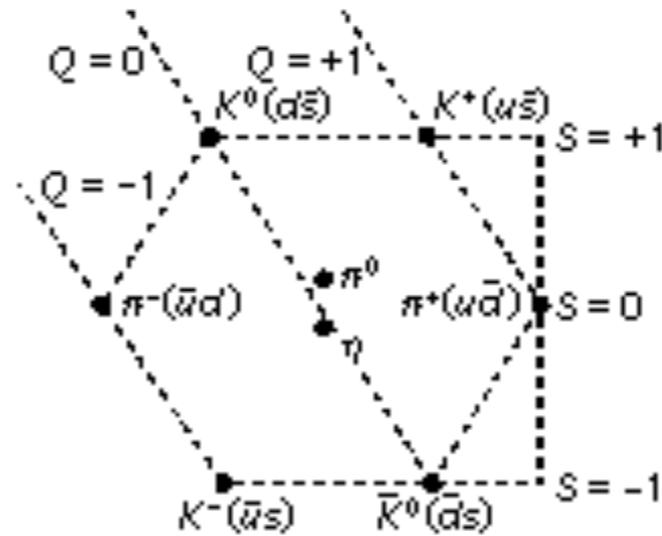
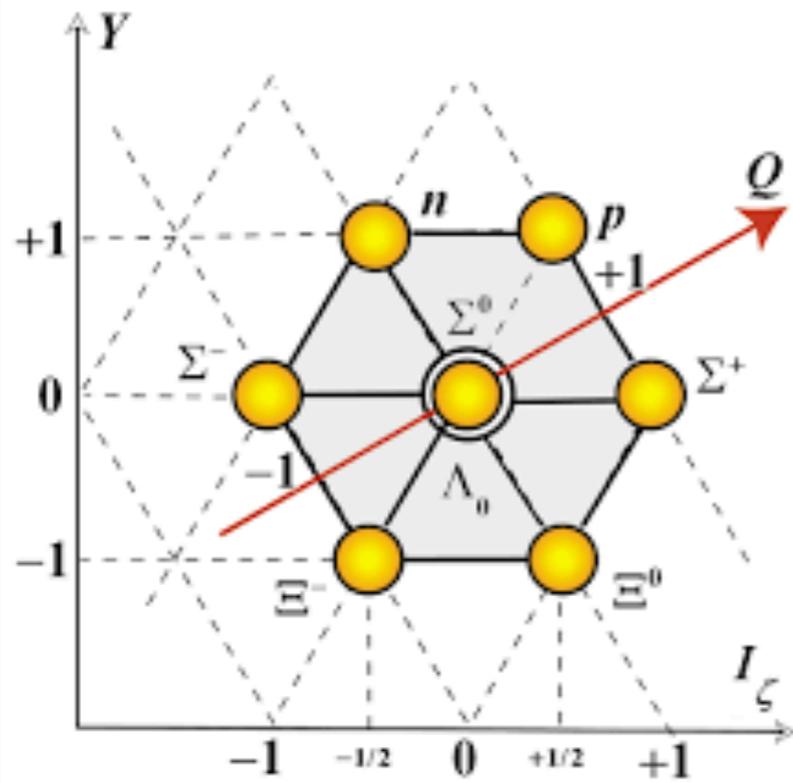


Синхрофазотрон Протвино ИФВЭ 1967 70 ГэВ

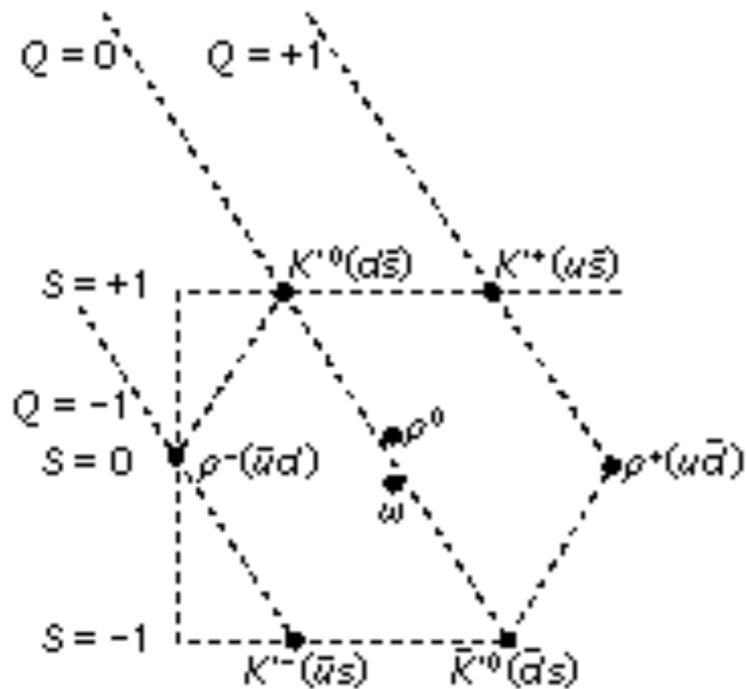


Super-proton-synchrotron CERN 1976 450 ГэВ

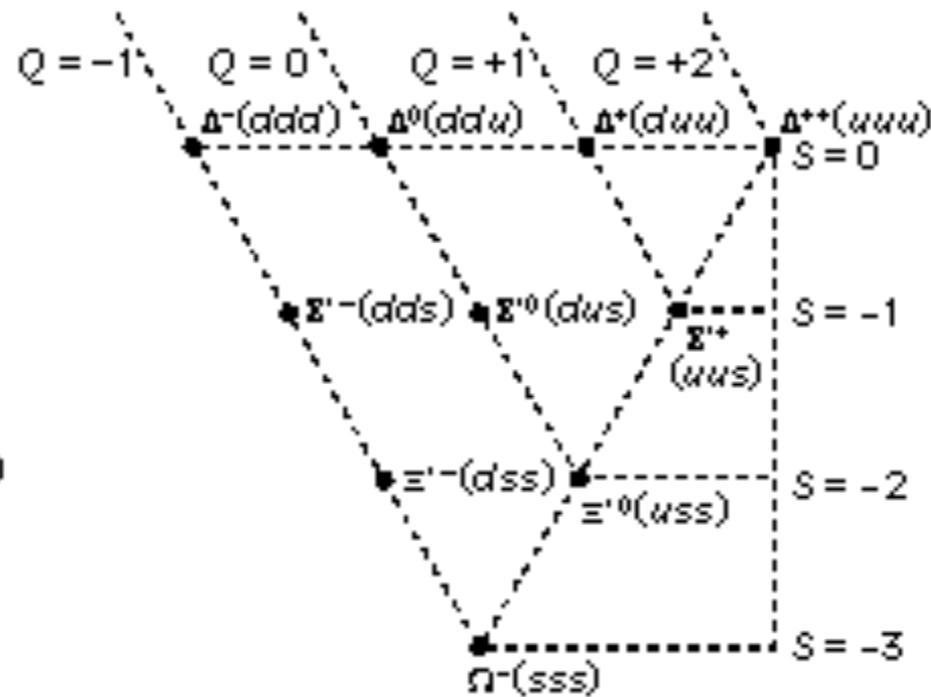
# Таблицы элементарных частиц



**ОКТЕТ МЕЗОНОВ ( $s = 0$ )**



**ОКТЕТ МЕЗОНОВ ( $s = 1$ )**



**ДЕКУПЛЕТ БАРИОНОВ ( $s = 3/2$ )**

Было обнаружено, что по какой-то причине частицы группируются в 8 (октеты) и 10 (декуплеты)

Внутри этих семейств частицы ведут себя одинаково по отношению к сильным взаимодействиям

# Элементы теории групп

# Элементы теории групп

- Все преобразования можно классифицировать
- Бывают дискретные и непрерывные преобразования
- Все непрерывные преобразования образуют группы

# Элементы теории групп

- Все преобразования можно классифицировать
- Бывают дискретные и непрерывные преобразования
- Все непрерывные преобразования образуют группы
- Преобразования образуют группу, если
  - 📄 - повторение двух преобразований есть третье преобразование того же типа
  - 📄 - существует обратное преобразование
  - 📄 - существует тождественное преобразование

# Элементы теории групп

- Все преобразования можно классифицировать
- Бывают дискретные и непрерывные преобразования
- Все непрерывные преобразования образуют группы
- Преобразования образуют группу, если
  - 📁 - повторение двух преобразований есть третье преобразование того же типа
  - 📁 - существует обратное преобразование
  - 📁 - существует тождественное преобразование
- Все конечные непрерывные группы относятся к 4 классам
  - Унитарные группы
  - 📁 - Ортогональные группы (чётные)
  - 📁 - Ортогональные группы (нечётные)
  - 📁 - Симплектические группы
  - 📁 + некоторое число исключительных групп

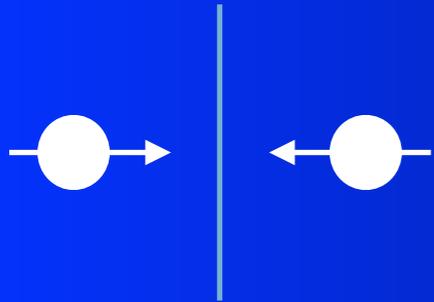
# Элементы теории групп

- Все преобразования можно классифицировать
- Бывают дискретные и непрерывные преобразования
- Все непрерывные преобразования образуют группы
- Преобразования образуют группу, если
  - 📁 - повторение двух преобразований есть третье преобразование того же типа
  - 📁 - существует обратное преобразование
  - 📁 - существует тождественное преобразование
- Все конечные непрерывные группы относятся к 4 классам
  - Унитарные группы
  - 📁 - Ортогональные группы (чётные)
  - 📁 - Ортогональные группы (нечётные)
  - 📁 - Симплектические группы
  - 📁 + некоторое число исключительных групп
- Конечная группа содержит конечное число типов преобразований

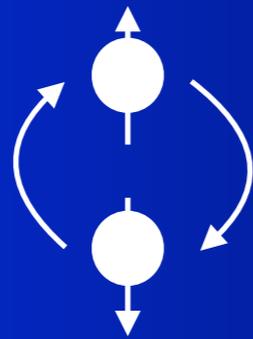
# Элементы теории групп

- Все преобразования можно классифицировать
- Бывают дискретные и непрерывные преобразования
- Все непрерывные преобразования образуют группы
- Преобразования образуют группу, если
  - 📁 - повторение двух преобразований есть третье преобразование того же типа
  - 📁 - существует обратное преобразование
  - 📁 - существует тождественное преобразование
- Все конечные непрерывные группы относятся к 4 классам
  - Унитарные группы
  - 📁 - Ортогональные группы (чётные)
  - 📁 - Ортогональные группы (нечётные)
  - 📁 - Симплектические группы
  - 📁 + некоторое число исключительных групп
- Конечная группа содержит конечное число типов преобразований
- Для каждой группы существуют наборы состояний (представления), элементы которых при преобразованиях группы переходят друг в друга
- Каждое такое представление содержит конечное число элементов (размерность представления)

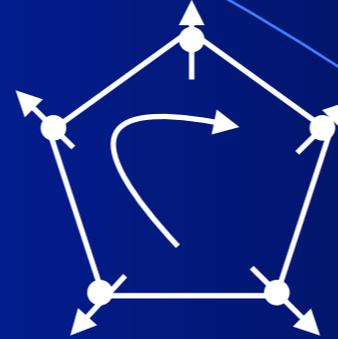
# Элементы теории групп



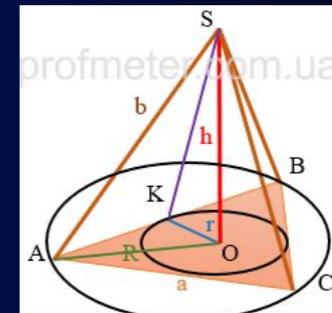
Отражение



Перестановка



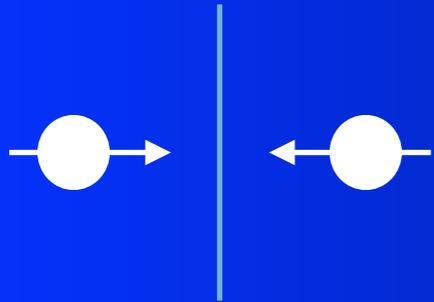
Вращение в плоскости



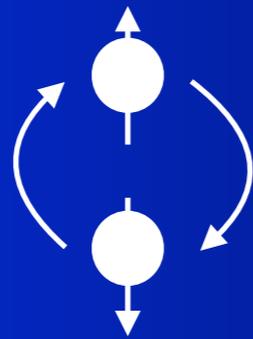
Вращение в пространстве

- Каждая группа характеризуется своим набором представлений и своим набором генераторов преобразований, образующих алгебру группы
- Представления можно перемножать, образуя новые представления

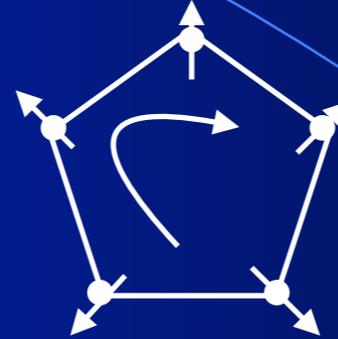
# Элементы теории групп



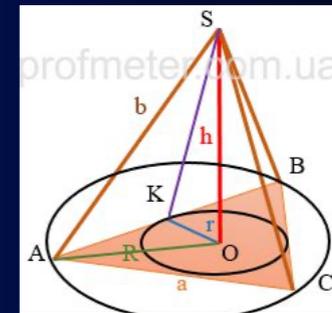
Отражение



Перестановка



Вращение в плоскости

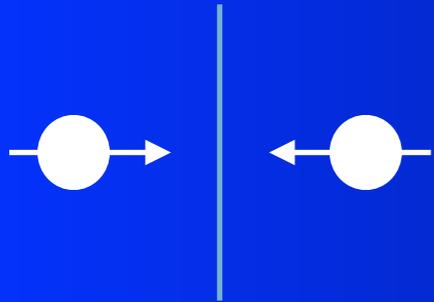


Вращение в пространстве

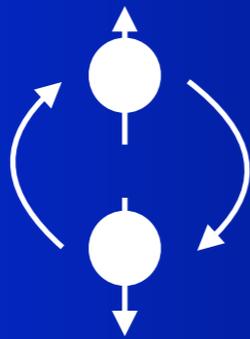
- Каждая группа характеризуется своим набором представлений и своим набором генераторов преобразований, образующих алгебру группы
- Представления можно перемножать, образуя новые представления

Восьмеричный путь (Мюррей Гелл-Манн)

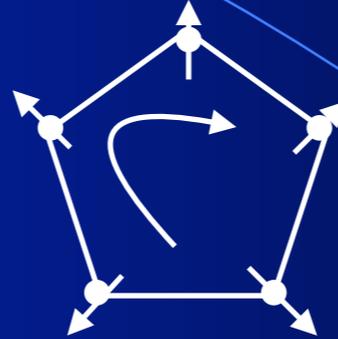
# Элементы теории групп



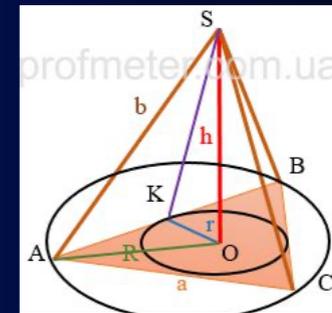
Отражение



Перестановка



Вращение в плоскости



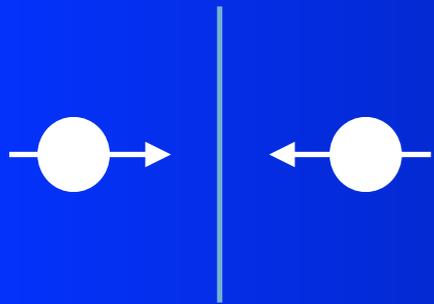
Вращение в пространстве

- Каждая группа характеризуется своим набором представлений и своим набором генераторов преобразований, образующих алгебру группы
- Представления можно перемножать, образуя новые представления

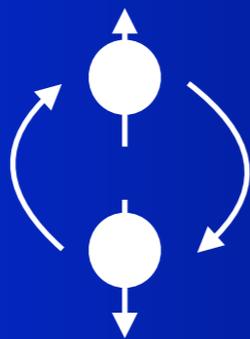
## Восьмеричный путь (Мюррей Гелл-Манн)

- Восьмёрки и десятки адронов -> представления группы  $SU(3)$  - специальной унитарной группы матриц  $3 \times 3$

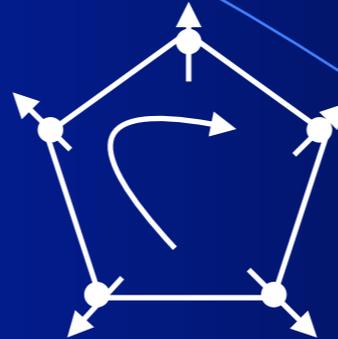
# Элементы теории групп



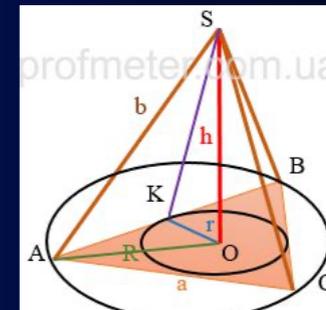
Отражение



Перестановка



Вращение в плоскости



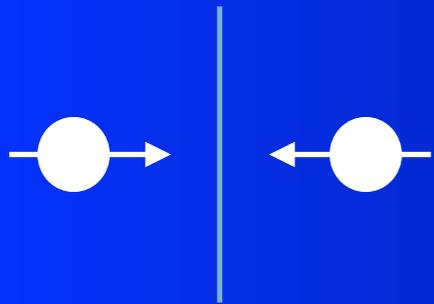
Вращение в пространстве

- Каждая группа характеризуется своим набором представлений и своим набором генераторов преобразований, образующих алгебру группы
- Представления можно перемножать, образуя новые представления

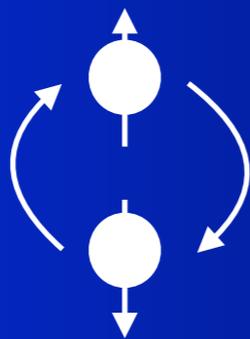
## Восьмеричный путь (Мюррей Гелл-Манн)

- Восьмёрки и десятки адронов -> представления группы  $SU(3)$  - специальной унитарной группы матриц  $3 \times 3$
- Минимальное (фундаментальное) представление группы  $SU(3)$  - 3 (тройка)

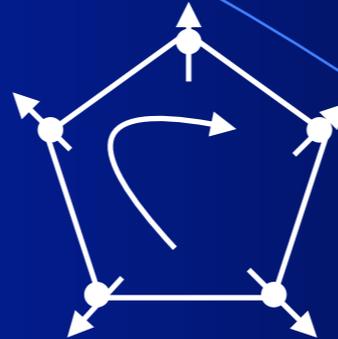
# Элементы теории групп



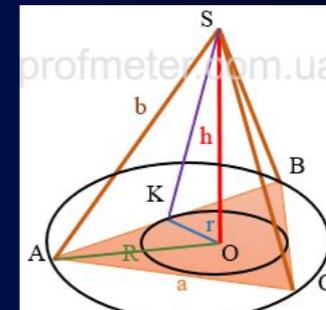
Отражение



Перестановка



Вращение в плоскости



Вращение в пространстве

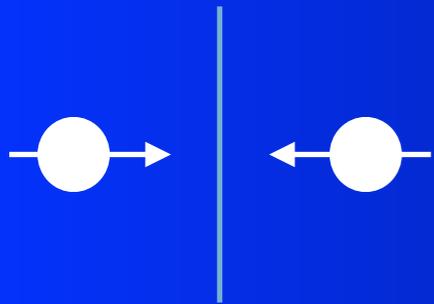
- Каждая группа характеризуется своим набором представлений и своим набором генераторов преобразований, образующих алгебру группы
- Представления можно перемножать, образуя новые представления

## Восьмеричный путь (Мюррей Гелл-Манн)

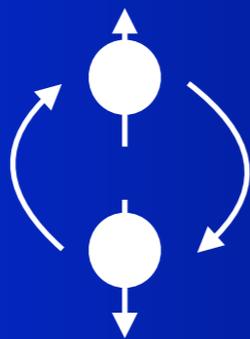
- Восьмёрки и десятки адронов -> представления группы  $SU(3)$  - специальной унитарной группы матриц  $3 \times 3$
- Минимальное (фундаментальное) представление группы  $SU(3)$  - 3 (тройка)
- Перемножая тройки можно получить все остальные представления

$$3^* \times 3 = 1 + 8, \quad 3 \times 3 = 3^* + 6, \quad 3 \times 3 \times 3 = 1 + 8 + 8 + 10$$

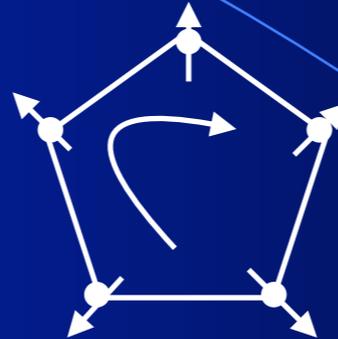
# Элементы теории групп



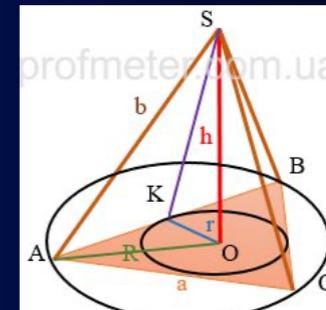
Отражение



Перестановка



Вращение в плоскости



Вращение в пространстве

- Каждая группа характеризуется своим набором представлений и своим набором генераторов преобразований, образующих алгебру группы
- Представления можно перемножать, образуя новые представления

## Восьмеричный путь (Мюррей Гелл-Манн)

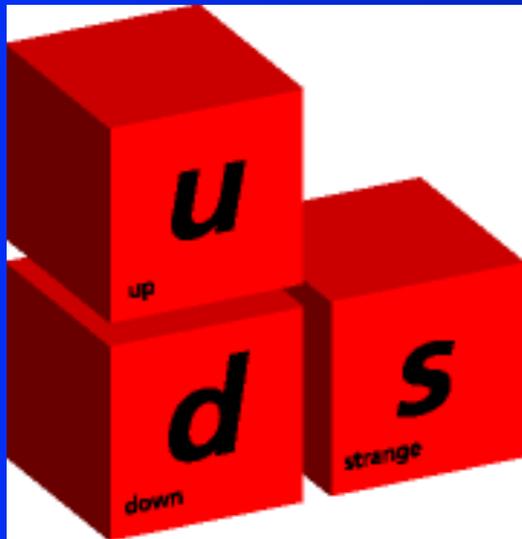
- Восьмёрки и десятки адронов -> представления группы  $SU(3)$  - специальной унитарной группы матриц  $3 \times 3$
- Минимальное (фундаментальное) представление группы  $SU(3)$  - 3 (тройка)
- Перемножая тройки можно получить все остальные представления

$$3^* \times 3 = 1 + 8, \quad 3 \times 3 = 3^* + 6, \quad 3 \times 3 \times 3 = 1 + 8 + 8 + 10$$

Все адроны сделаны из троек! Тройка - три кварка!

# Кварки — “кирпичики мироздания”

Появление октетов и декуплетов легко объяснить, если предположить, что все частицы «сделаны» из трёх оставляющих, которые стали называть кварками  $q$



Они получили название верхнего (up), нижнего (down) и странного (strange) кварка

Кварки имеют дробный электрический заряд:

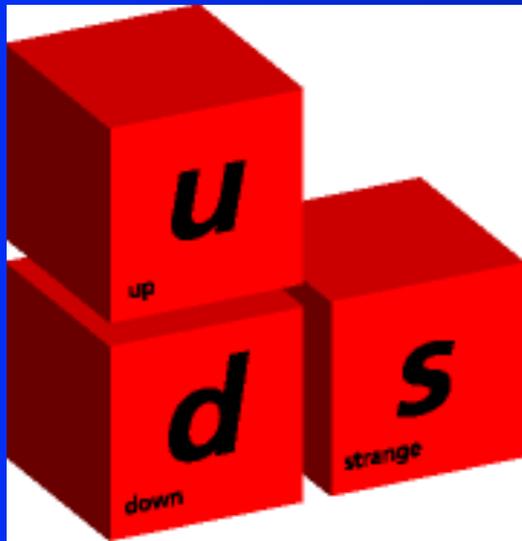
$$Q_u = +2/3, \quad Q_d = -1/3, \quad Q_s = -1/3,$$

Все частицы сделаны из кварков как из кубиков.

Есть два вида частиц: барионы  $B = qqq$  и мезоны  $M = q\bar{q}$

# Кварки — “кирпичики мироздания”

Появление октетов и декуплетов легко объяснить, если предположить, что все частицы «сделаны» из трёх оставляющих, которые стали называть кварками  $q$



Они получили название верхнего (up), нижнего (down) и странного (strange) кварка

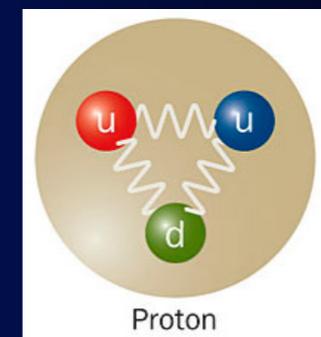
Кварки имеют дробный электрический заряд:

$$Q_u = +2/3, \quad Q_d = -1/3, \quad Q_s = -1/3,$$

Все частицы сделаны из кварков как из кубиков.

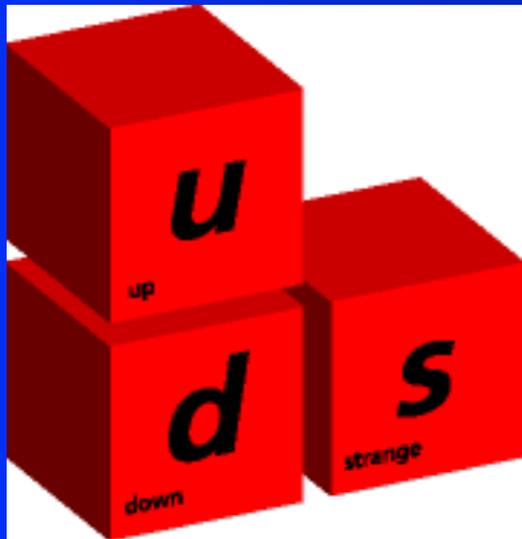
Есть два вида частиц: барионы  $B = qqq$  и мезоны  $M = q\bar{q}$

протон  $p = uud, \quad Q_p = 2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$



# Кварки – “кирпичики мироздания”

Появление октетов и декуплетов легко объяснить, если предположить, что все частицы «сделаны» из трёх оставляющих, которые стали называть кварками  $q$



Они получили название верхнего (up), нижнего (down) и странного (strange) кварка

Кварки имеют дробный электрический заряд:

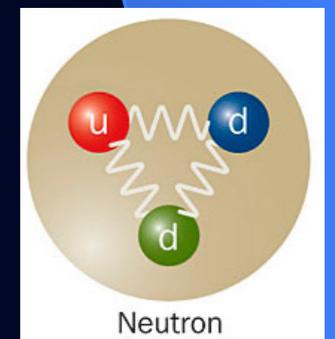
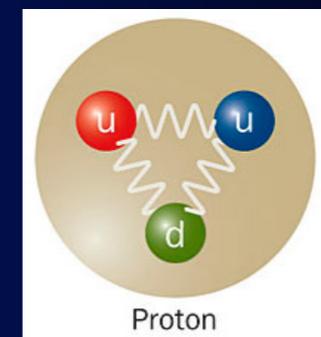
$$Q_u = +2/3, \quad Q_d = -1/3, \quad Q_s = -1/3,$$

Все частицы сделаны из кварков как из кубиков.

Есть два вида частиц: барионы  $B = qqq$  и мезоны  $M = q\bar{q}$

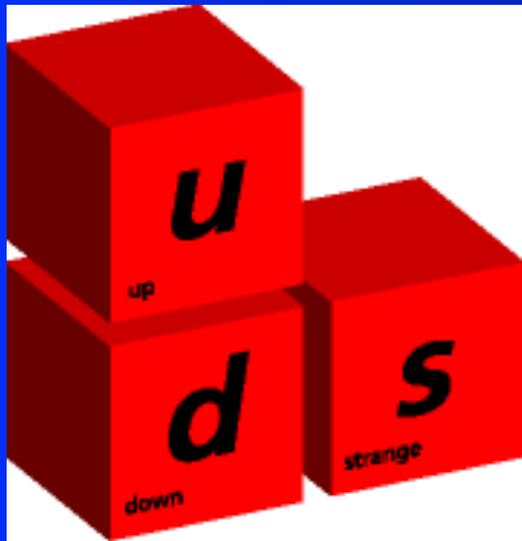
протон  $p = uud, \quad Q_p = 2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$

нейтрон  $n = udd, \quad Q_n = 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$



# Кварки – “кирпичики мироздания”

Появление октетов и декуплетов легко объяснить, если предположить, что все частицы «сделаны» из трёх оставляющих, которые стали называть кварками  $q$



Они получили название верхнего (up), нижнего (down) и странного (strange) кварка

Кварки имеют дробный электрический заряд:

$$Q_u = +2/3, \quad Q_d = -1/3, \quad Q_s = -1/3,$$

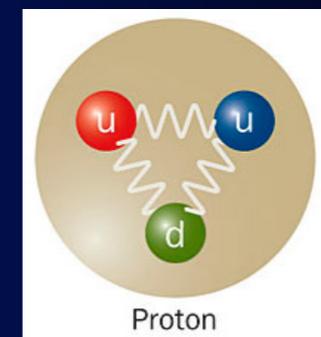
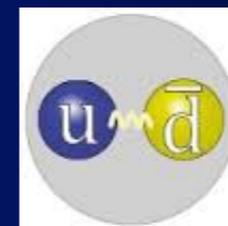
Все частицы сделаны из кварков как из кубиков.

Есть два вида частиц: барионы  $B = qqq$  и мезоны  $M = q\bar{q}$

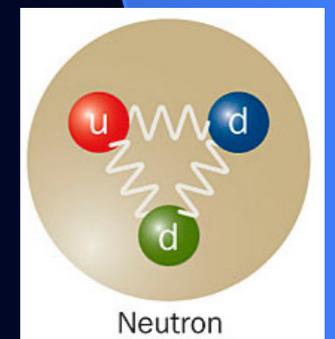
протон  $p = uud, \quad Q_p = 2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$

нейтрон  $n = udd, \quad Q_n = 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$

$\pi^+$ -мезон  $\pi^+ = u\bar{d}, \quad Q_{\pi} = 2/3 + 1/3 = 1$



Proton



Neutron

# Кварки

- Кварки - фермионы, спин кварка=1/2
- При перестановке двух кварков меняется знак

$$qq' = -q'q$$

- Это значит, что  $q \uparrow q \downarrow = -q \downarrow q \uparrow$      $q \uparrow q \uparrow = -q \uparrow q \uparrow = 0$
- Как же существуют частицы со спином 3/2

$$\Delta^{++} = u \uparrow u \uparrow u \uparrow$$

$$\Omega^{-} = s \uparrow s \uparrow s \uparrow$$

# Кварки

- Кварки - фермионы, спин кварка=1/2
- При перестановке двух кварков меняется знак

$$qq' = -q'q$$

- Это значит, что  $q \uparrow q \downarrow = -q \downarrow q \uparrow$      $q \uparrow q \uparrow = -q \uparrow q \uparrow = 0$
- Как же существуют частицы со спином 3/2

$$\Delta^{++} = u \uparrow u \uparrow u \uparrow \qquad \Omega^- = s \uparrow s \uparrow s \uparrow$$

- Решение проблемы: антисимметризовать волновую функцию по новому квантовому числу «цвет»

$$\Delta^{++} = \epsilon^{ijk} u_i \uparrow u_j \uparrow u_k \uparrow \qquad \epsilon^{ijk} \quad i, j, k = 1, 2, 3$$

# Кварки

- Кварки - фермионы, спин кварка=1/2
- При перестановке двух кварков меняется знак

$$qq' = -q'q$$

- Это значит, что  $q \uparrow q \downarrow = -q \downarrow q \uparrow$      $q \uparrow q \uparrow = -q \uparrow q \uparrow = 0$
- Как же существуют частицы со спином 3/2

$$\Delta^{++} = u \uparrow u \uparrow u \uparrow \qquad \Omega^- = s \uparrow s \uparrow s \uparrow$$

- Решение проблемы: антисимметризовать волновую функцию по новому квантовому числу «цвет»

$$\Delta^{++} = \epsilon^{ijk} u_i \uparrow u_j \uparrow u_k \uparrow \qquad \epsilon^{ijk} \quad i, j, k = 1, 2, 3$$

- Почему нет аналогичных частиц со спином 1/2 ?

# Кварки

- Кварки - фермионы, спин кварка=1/2
- При перестановке двух кварков меняется знак

$$qq' = -q'q$$

- Это значит, что  $q \uparrow q \downarrow = -q \downarrow q \uparrow$      $q \uparrow q \uparrow = -q \uparrow q \uparrow = 0$
- Как же существуют частицы со спином 3/2

$$\Delta^{++} = u \uparrow u \uparrow u \uparrow \qquad \Omega^- = s \uparrow s \uparrow s \uparrow$$

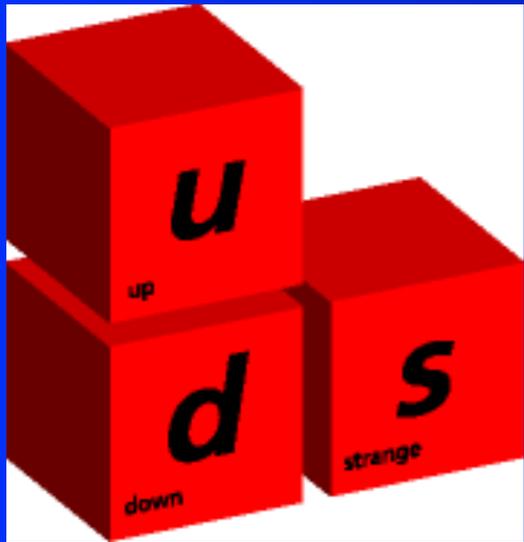
- Решение проблемы: антисимметризовать волновую функцию по новому квантовому числу «цвет»

$$\Delta^{++} = \epsilon^{ijk} u_i \uparrow u_j \uparrow u_k \uparrow \qquad \epsilon^{ijk} \quad i, j, k = 1, 2, 3$$

- Почему нет аналогичных частиц со спином 1/2 ?

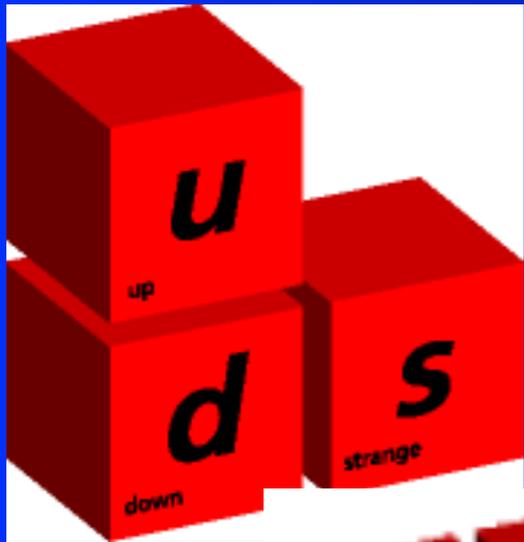
$$\epsilon^{ijk} u_i \uparrow u_j \downarrow = (-)^3 \epsilon^{ijk} u_j \downarrow u_i \uparrow$$

# Кварки — “кирпичики мироздания”



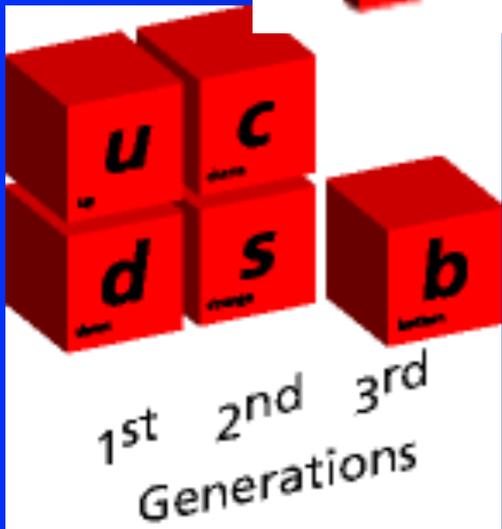
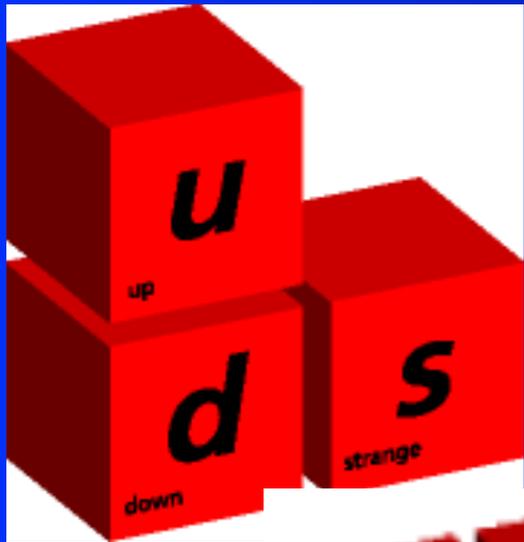
- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен  $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения

# Кварки — “кирпичики мироздания”



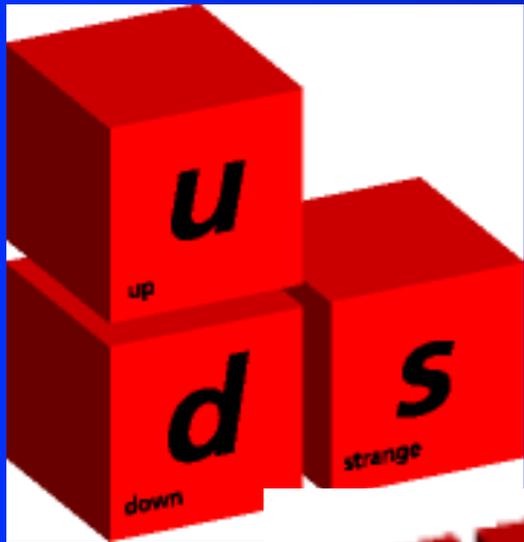
- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен  $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения

# Кварки — “кирпичики мироздания”

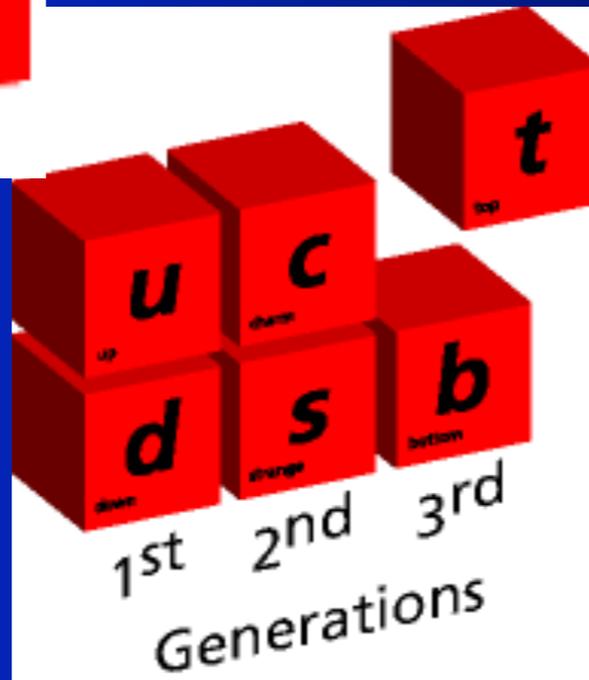
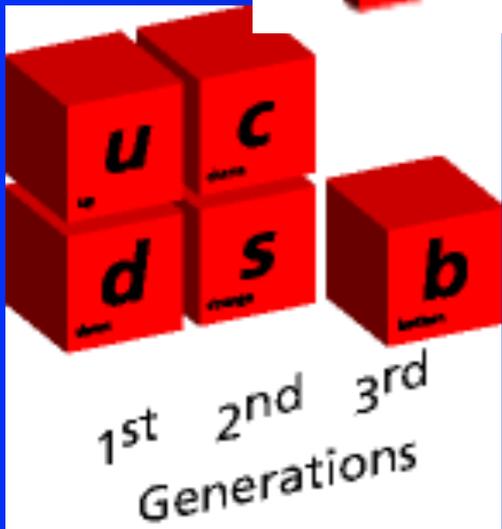
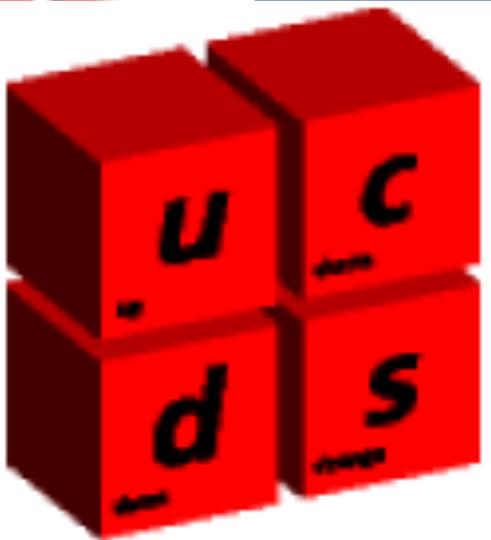


- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен  $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения

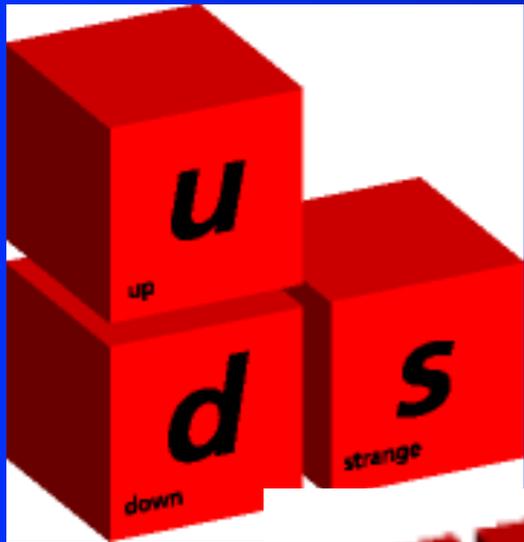
# Кварки — “кирпичики мироздания”



- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен  $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения



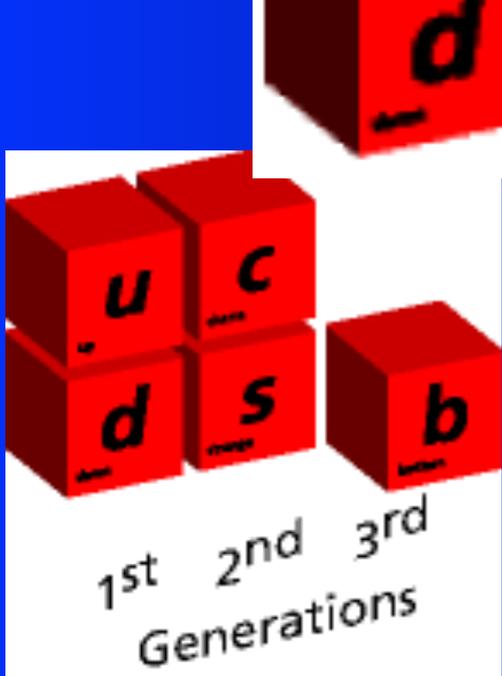
# Кварки — “кирпичики мироздания”



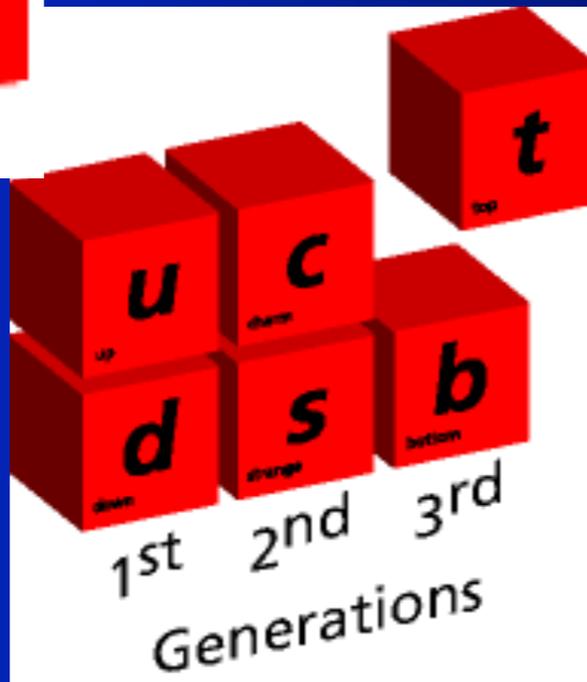
- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен  $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения



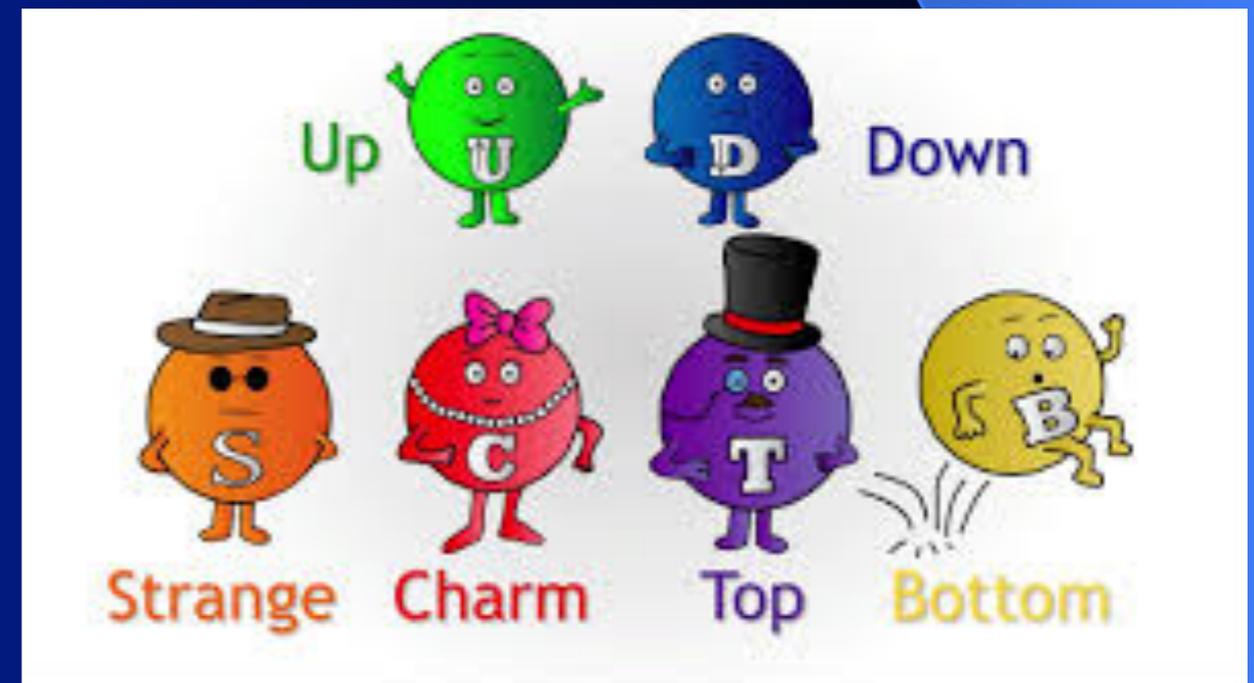
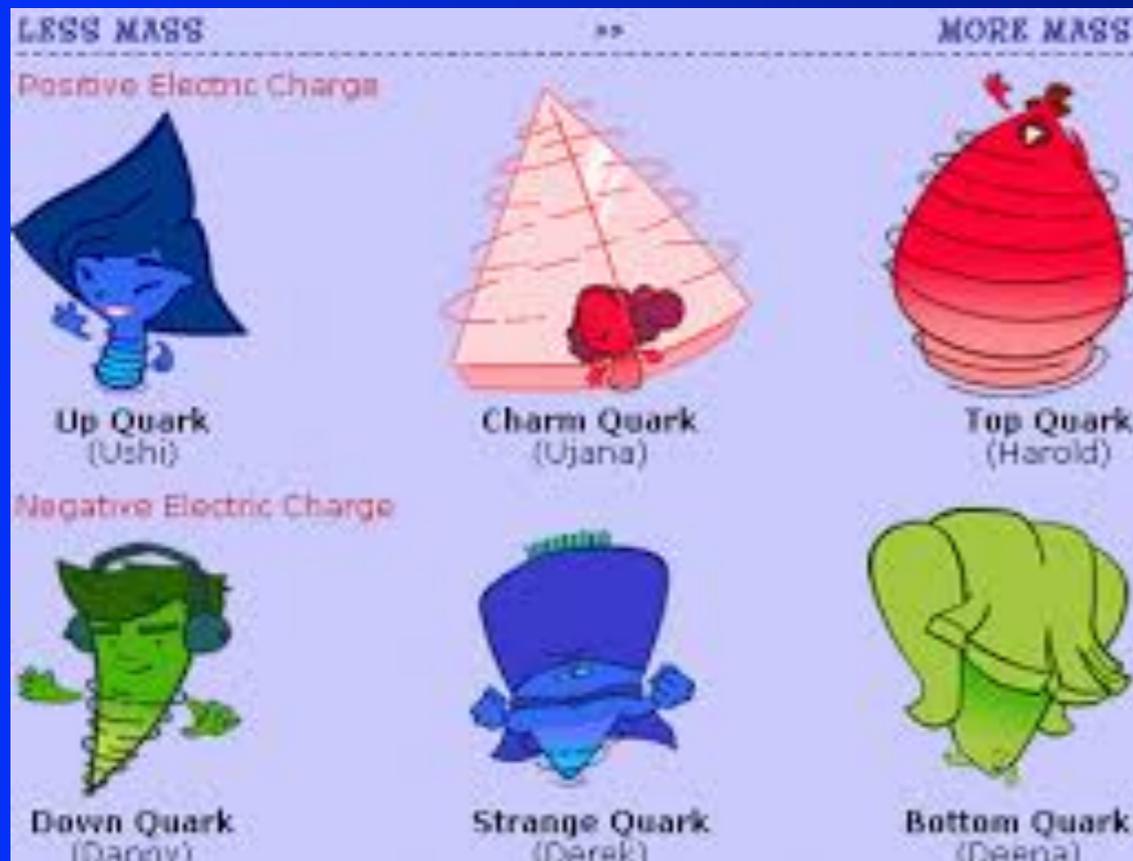
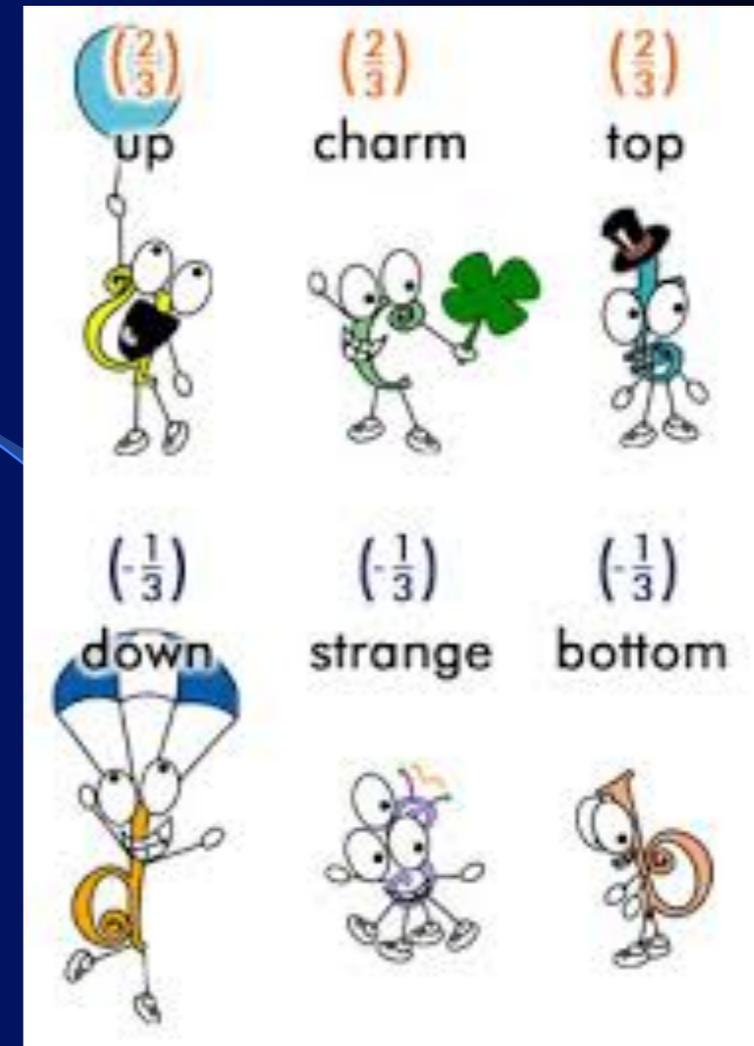
- Число сортов кварков росло с открытием новых частиц и достигло **шести**



По непонятной причине природа создала 3 копии (поколения) кварков и лептонов



$(\frac{2}{3})$ up	$(\frac{2}{3})$ charm	$(\frac{2}{3})$ top
$(-\frac{1}{3})$ down	$(-\frac{1}{3})$ strange	$(-\frac{1}{3})$ bottom



# Тяжёлый электрон

В 1936 году в космических лучах открыт тяжёлый электрон - мюон. Он отличается от электрона только массой, будучи тяжелее электрона в 200 раз!

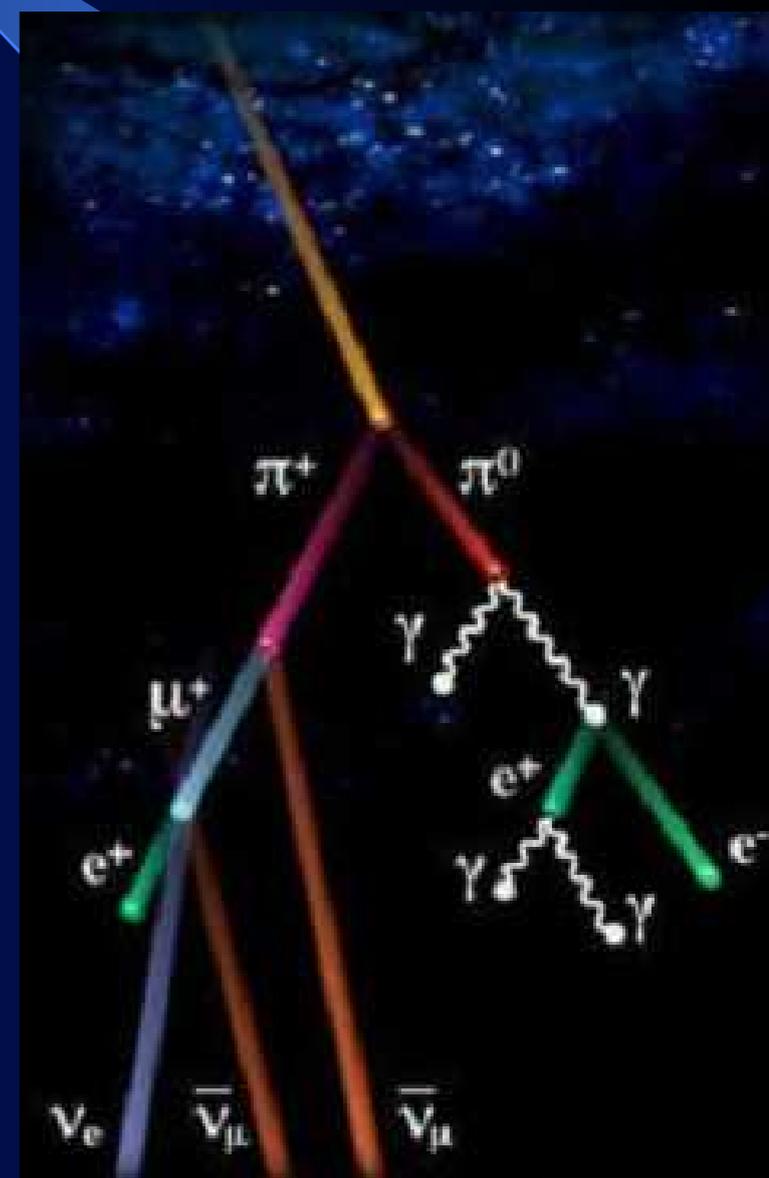
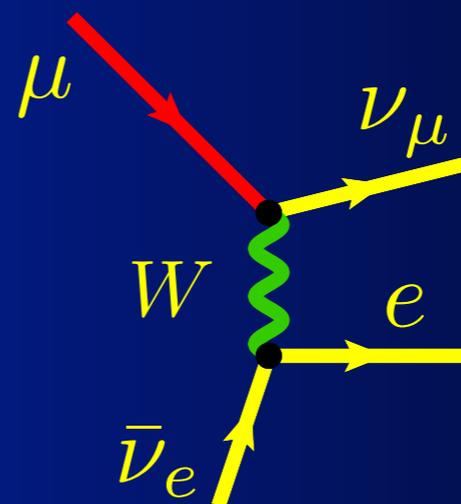
Мюоны рождаются от распада  $\Pi$ -мезонов в космических лучах и распадаются на электроны и два нейтрино

В свободном состоянии мюон живёт  $10^{-6}$  секунды и распадается на электрон и два нейтрино

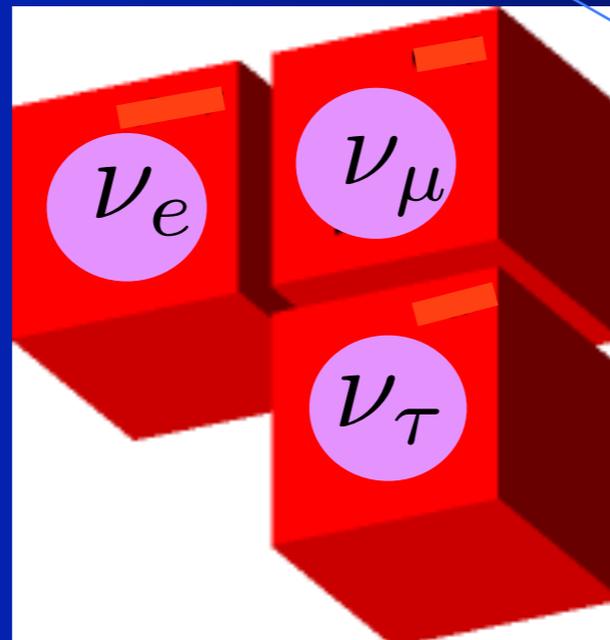
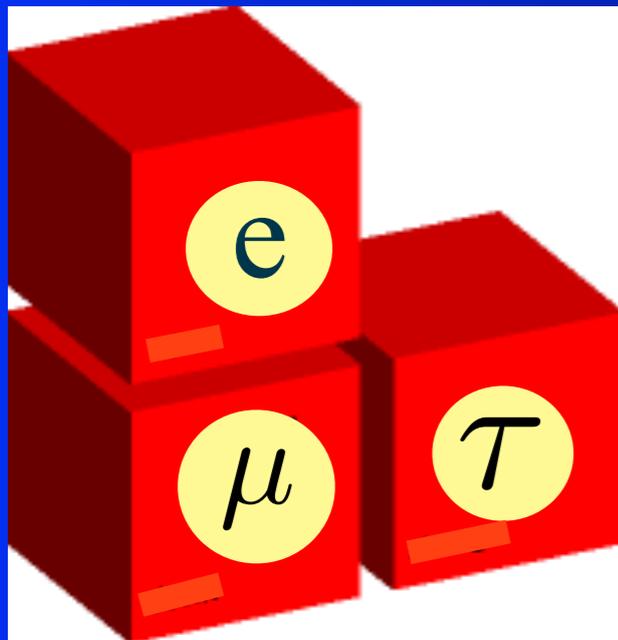
$$\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

Так появились две новые частицы:

Зачем они нужны?



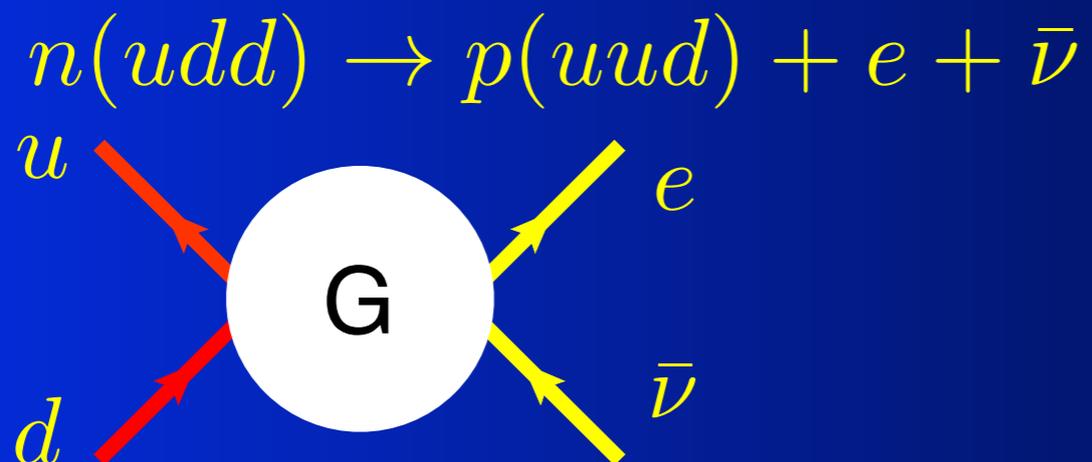
# Лептоны от слова λεπτός



Природа создала две копии электронов и нейтрино, каждая копия тяжелее предыдущей

Электроны образуют оболочки атомов и определяют всю химию неживой и живой природы

Нейтрино рождаются в процессах распада адронов



Эти частицы живут микроскопические доли секунды и не образуют обычного вещества, но прилетают к нам в виде космических лучей и рождаются на ускорителях

# Слабые взаимодействия

## Теория Ферми

- Слабые взаимодействия описывают распады частиц
- Все тяжёлые частицы распадаются на лёгкие
- При этом сохраняются квантовые числа:
  - Q - электрический заряд
  - B - барионный заряд
  - L - лептонный заряд

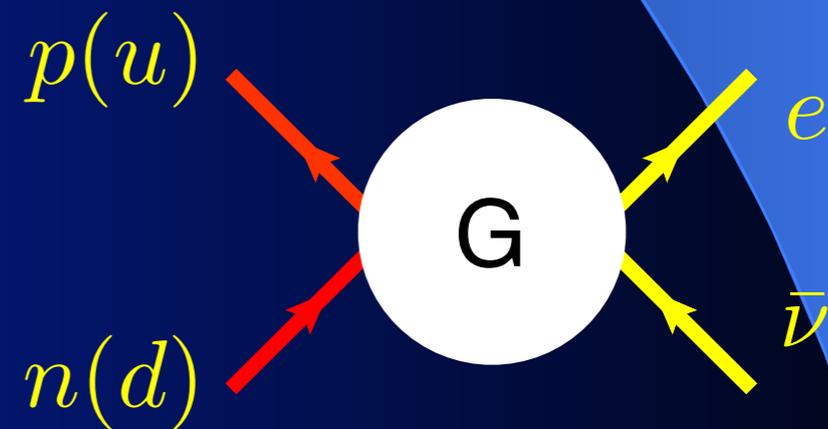
G

# Слабые взаимодействия

## Теория Ферми

- Слабые взаимодействия описывают распады частиц
- Все тяжёлые частицы распадаются на лёгкие
- При этом сохраняются квантовые числа:
  - Q - электрический заряд
  - B - барионный заряд
  - L - лептонный заряд

Теория Ферми: четырёхфермионное контактное взаимодействие:

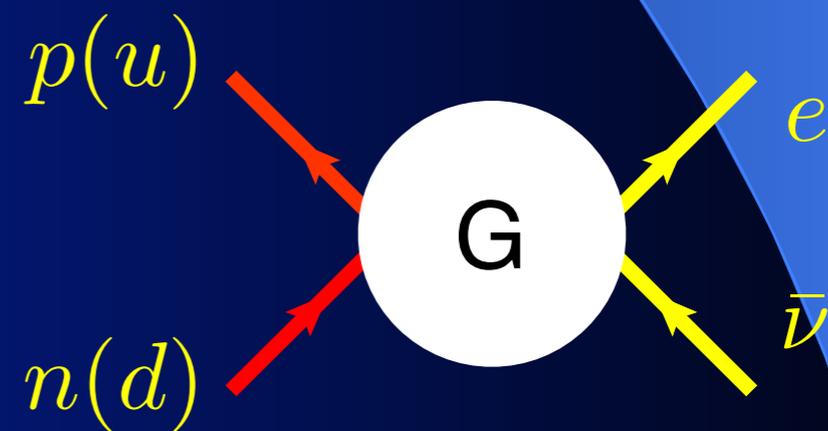


# Слабые взаимодействия

## Теория Ферми

- Слабые взаимодействия описывают распады частиц
- Все тяжёлые частицы распадаются на лёгкие
- При этом сохраняются квантовые числа:
  - Q - электрический заряд
  - B - барионный заряд
  - L - лептонный заряд

Теория Ферми: четырёхфермионное контактное взаимодействие:



$$G \bar{u} O d \times e O \bar{\nu}$$

Оператор



Константа Ферми



Адронный ток



Лептонный ток

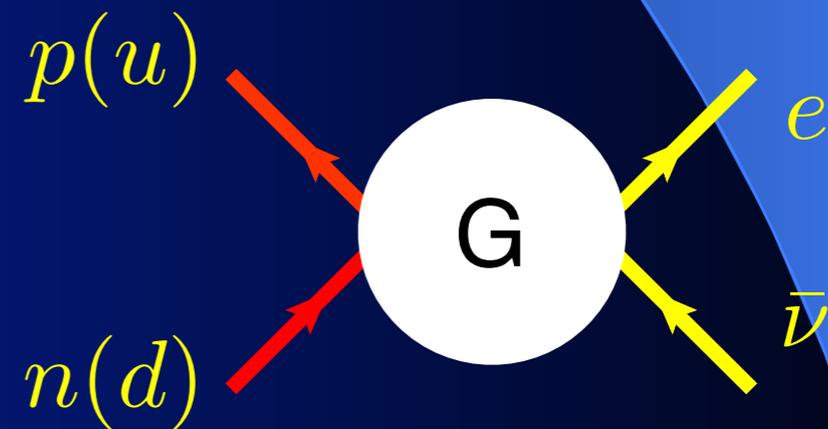
$$O = S, P, V, A, T$$

# Слабые взаимодействия

## Теория Ферми

- Слабые взаимодействия описывают распады частиц
- Все тяжёлые частицы распадаются на лёгкие
- При этом сохраняются квантовые числа:
  - Q - электрический заряд
  - B - барионный заряд
  - L - лептонный заряд

Теория Ферми: четырёхфермионное контактное взаимодействие:



$$G \bar{u} O d \times e O \bar{\nu}$$

Оператор

Лептонный ток

Константа Ферми    Адронный ток

$$O = S, P, V, A, T$$

$$V - A$$

# Рубеж 60-х годов

- Элементарные частицы делятся на адроны (мезоны и барионы) и лептоны
- Адроны состоят из кварков, лептоны - элементарны
- Всего известно 3 кварки и 4 лептона
- Различают три вида взаимодействия элементарных частиц
  - электромагнитное (участвуют все заряженные частицы)
  - сильное ядерное (участвуют адроны) - пион-нуклонная теория
  - слабое (распады, участвуют все частицы) - теория Ферми
- Гравитация не участвует в физике элементарных частиц и описывается классической теорией ОТО