Поиск единого подхода к описанию всех взаимодействий и Стандартная модель

В.Ф.Ежов

- Основное достижение классической физики – построение электромагнитного и гравитационного взаимодействий
- Создание квантовой механики и накопление информации о сильном и слабом взаимодействиях дало обширный материал на основе которого можно пытаться строить общую теорию взаимодействий.

В первой лекции мы пришли к тому, что главное это написать правильно Лагранжиан

- Принцип наименьшего действия позволяет легко согласовать теорию с принципом относительности.
- Мы описали релятивистскую механику невзаимодействующих частиц. В этом случае мы должны взять лагранжиан в виде (Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц «Теория поля»):

.

$$L = -mc^2\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

- Из этого лагранжиана были получены уравнения движения невзаимодействующих частиц в релятивистском виде.
- Взаимодействие частиц друг с другом можно описывать с помощью силового поля. Т.е. вместо того, чтобы говорить о том, что одна частица действует на другую, будем считать, что частица создает вокруг себя поле, а на всякую другую частицу в этом поле действует некоторая сила.

Лагранжиан для заряда, движущегося в электромагнитном поле:

$$L = -mc^2\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} + \frac{e}{c}\vec{A}\vec{\mathrm{v}} - e\varphi$$

- Здесь добавился член, описывающий взаимодействие заряда с полем.
- Полный же лагранжиан должен содержать член, соответствующий энергии самого поля.

$$L = -mc^2\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} + \frac{e}{c}\vec{A}\vec{\mathrm{v}} - e\varphi + \frac{1}{8\pi}\int\left(E^2 - H^2\right)dV$$

Теорема Нетер (Эмили Нетер) 1918 г.

- Сформулировала теорему для физической системы, уравнения движения которой имеют форму системы дифференциальных уравнений, получаемых из вариационного принципа механики.
- Каждому непрерывно зависящему от одного параметра преобразованию, оставляющему инвариантным действие соответствует закон сохранения.
- Перейдем к квантовой механике

Единый подход к описанию всех взаимодействий

- Наилучшей отправной точкой является произвол в выборе фазы волновой функции
- Рассмотрим поле, $\Psi(x)$, описывающее лагранжиан
- $\mathfrak{L} = \mathfrak{L}(\Psi, \partial_\mu \Psi)$, где $\partial_\mu \Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial x_\mu}$ и $x_\mu = (t, \vec{x})$
- Рассмотрим фазовое преобразование $\Psi \rightarrow \Psi' = e^{i\alpha}\Psi$
- α - действительное число
- $e^{i\alpha}$ унитарная 1x1 матрица
- α - константа – глобальное преобразование
- α (x) – локальное преобразование

Инфитиземальные преобразования

- Обычно рассматривают бесконечно малые калибровочные преобразования
- $\Psi' = \Psi + i\alpha\Psi$
- $\delta\Psi = \Psi' - \Psi \simeq i\alpha\Psi$
- Ψ – может иметь несколько компонент, например электронное
- $\delta\overline{\Psi} \simeq -i\alpha\overline{\Psi}$ - позитронное

- Как при калибровочном преобразовании будет преобразовываться лагранжиан?
- $\delta\mathfrak{L} = \frac{\partial\mathfrak{L}}{\partial\Psi}\delta\Psi + \frac{\partial\mathfrak{L}}{\partial(\partial_\mu\Psi)}\delta(\partial_\mu\Psi)$
- Используем, что $\partial_\mu(a\delta\varphi) = \partial_\mu a\delta\varphi + a\partial_\mu\delta\varphi$
- $\partial_\mu\left(\frac{\partial\mathfrak{L}}{\partial(\partial_\mu\Psi)}\delta\Psi\right) = \partial_\mu\left(\frac{\partial\mathfrak{L}}{\partial(\partial_\mu\Psi)}\right)\delta\Psi + \frac{\partial\mathfrak{L}}{\partial(\partial_\mu\Psi)}\left(\partial_\mu\delta\Psi\right)$
- Мы уже использовали, что $\delta\left(\partial_\mu\Psi\right) = \partial_\mu(\delta\Psi)$
- $\delta\mathfrak{L} = \frac{\partial\mathfrak{L}}{\partial\Psi}\delta\Psi + \partial_\mu\left(\frac{\partial\mathfrak{L}}{\partial(\partial_\mu\Psi)}\delta\Psi\right) - \partial_\mu\left(\frac{\partial\mathfrak{L}}{\partial(\partial_\mu\Psi)}\right)\delta\Psi$
- $\partial_\mu\left(\frac{\partial\mathfrak{L}}{\partial(\partial_\mu\Psi)}\right)\delta\Psi - \frac{\partial\mathfrak{L}}{\partial\Psi}\delta\Psi = 0$ – Уравнение Лагранжа
- Таким образом $\delta\mathfrak{L} = \partial_\mu\left(\frac{\partial\mathfrak{L}}{\partial(\partial_\mu\Psi)}\delta\Psi\right)$

$$\delta\mathfrak{L} = \partial_\mu \left(\frac{\partial \mathfrak{L}}{\partial(\partial_\mu \Psi)} \delta\Psi \right)$$

- Вспомним, что
- $\delta\Psi = \Psi' - \Psi \simeq i\alpha\Psi$, тогда
- $\delta\mathfrak{L} = \partial_\mu \left(\frac{\partial \mathfrak{L}}{\partial(\partial_\mu \Psi)} i\alpha\Psi \right)$
- По определению назовем током величину
- $J^\mu = -i \frac{\partial \mathfrak{L}}{\partial(\partial_\mu \Psi)} \Psi$
- Используем, что $\partial_\mu(a\delta\varphi) = \partial_\mu a\delta\varphi + a\partial_\mu\delta\varphi$
- $\delta\mathfrak{L} = -\alpha\partial_\mu J^\mu - (\partial_\mu \alpha) J^\mu$

Глобальная калибровочная инвариантность

Теперь вспомним, что α - *const* в случае глобального преобразования

$$\delta\mathfrak{L} = -\alpha\partial_\mu J^\mu - (\partial_\mu\alpha)J^\mu$$

Таким образом: глобальная калибровочная инвариантность лагранжиана

$$\delta\mathfrak{L} = 0$$

- (т.к. $\partial_\mu\alpha = 0$) эквивалентна сохранению тока
- $\partial_\mu J^\mu = 0$
- В случае дираковского электронного тока $J^\mu = \overline{\Psi}\gamma^\mu\boldsymbol{\Psi}$

Сохранение тока эквивалентно закону сохранения заряда

- $\int d^3\,x\partial_\mu J^\mu = \frac{\partial}{\partial t}\int d^3\,J^0(\vec{\boldsymbol{x}},t) = 0$, при условии
- $\int d^3\,x\vec{\nabla}\cdot\vec{J}(\vec{\boldsymbol{x}},t) = 0$

Локальная калибровочная инвариантность

- Рассмотрим теперь локальные U1 – калибровочные преобразования, т.е. $\alpha = \alpha(\vec{\boldsymbol{x}}, t)$

$$\delta\mathfrak{L} = -\alpha\partial_\mu J^\mu - (\partial_\mu\alpha)J^\mu$$

- Рассмотрим дираковский электронный ток $J^\mu = \overline{\Psi}\gamma^\mu\boldsymbol{\Psi}$,
- мы знаем, что для этого случая $\partial_\mu J^\mu = 0$
- $\delta\mathfrak{L} = -(\partial_\mu\alpha)J^\mu$, т.е лагранжиан не инвариантен относительно локальных калибровочных преобразований

Восстановление инвариантности

$$\delta\mathfrak{L} = -(\partial_\mu \alpha) J^\mu$$

- Однако эту инвариантность можно восстановить добавкой члена типа взаимодействия $\mathfrak{L}_I = -eJ_\mu A^\mu$
- e – константа взаимодействия
- A^μ - векторное поле, которое преобразуется при преобразованиях $\psi \to \psi' = e^{i\alpha}\psi$ и

$$\bar{\psi} \to \overline{\psi'} = e^{-i\alpha}\bar{\psi}$$

- $A^\mu \to A^{\mu\prime} = A^\mu - \frac{1}{e}\partial^\mu \alpha$
- $\mathfrak{L}_I{}' = -eJ_\mu A^{\mu\prime} = -eJ_\mu A^\mu + J_\mu \partial^\mu \alpha$
- В этом случае $(\mathfrak{L}_e + \mathfrak{L}_I) = 0$

- Такая сумма $(\mathfrak{L}_e + \mathfrak{L}_I) = 0$ уже инвариантна
- Фактически мы отождествили взаимодействие с электромагнитным полем с производной волновой фазы, которая набирается при движении вдоль траектории.
- Чтобы получить полный лагранжиан электродинамики нужно добавить калибровочно инвариантный член, описывающий само поле $\mathfrak{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$
- Где $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ для фотона с нулевой массой

- Если бы фотон имел массу, то надо добавить массовый член

$$\frac{1}{2}m_\gamma^2 A_\mu A_\nu$$

- Итак полный гамильтониан в квантовой электродинамике

- $$\mathfrak{L}_{QED} = \Psi\left(i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu - m\right)\Psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$
- коваринтная производная
- $$\mathcal{D}_\mu \Psi = \left(\partial_\mu + ieA_\mu\right)\Psi$$

Софус Ли

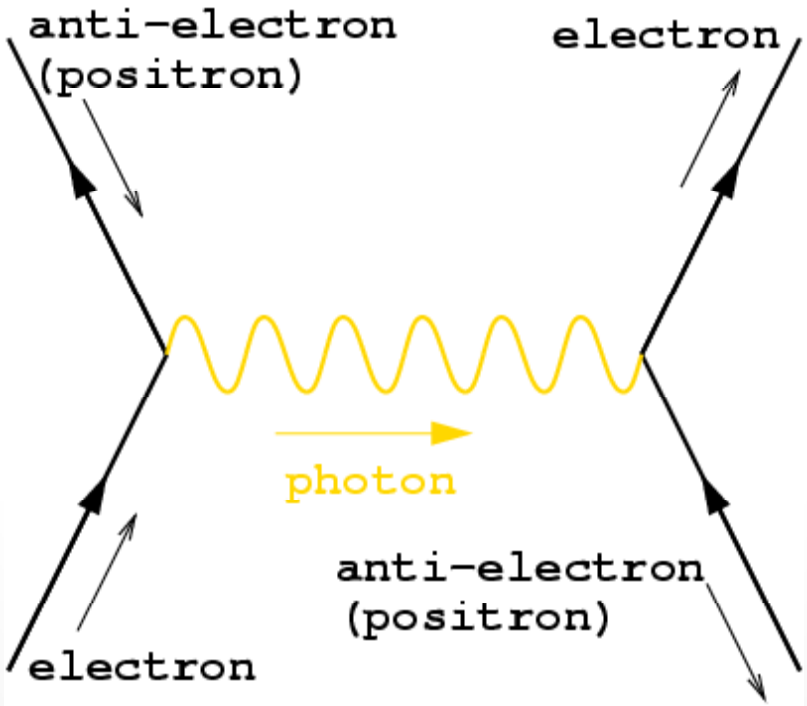
- Софус Ли занимался применением теории групп к интегрированию дифференциальных уравнений. Он связал соотношение между симметрией и сохранением с теорией канонических преобразований. С каждой однопараметрической подгруппой группы связан некий первый интеграл исследуемой механической системы. Этот интеграл совпадает с производящей заданных преобразований, т.е. их генератором (в рассмотренном случае это α)
-

Фейнмановские диаграммы

e.g. electromagnetism :

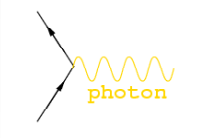
photon exchange between electrically charged particles

Feynman Diagram



Радиус действия и масса фотона

- **Основная проблема для других полей – радиус действия, который зависит от массы кванта**
- **Пусть частица излучает квант массой m, а сама остается в том же состоянии e -> e+γ,**
- **такой процесс приводит к нарушению закона сохранения энергии на величину $\Delta E \simeq mc^2$**
- **Из соотношения неопределенности $\Delta E \Delta t \simeq h$ это возможно если этот квант поглотится за время $\Delta t \simeq h/mc^2$**
- **Если квант движется со скоростью света, то он пройдет за это время $r \simeq h/mc$**
- Таким образом бесконечный радиус действия возможен только в случае нулевой массы обменного кванта

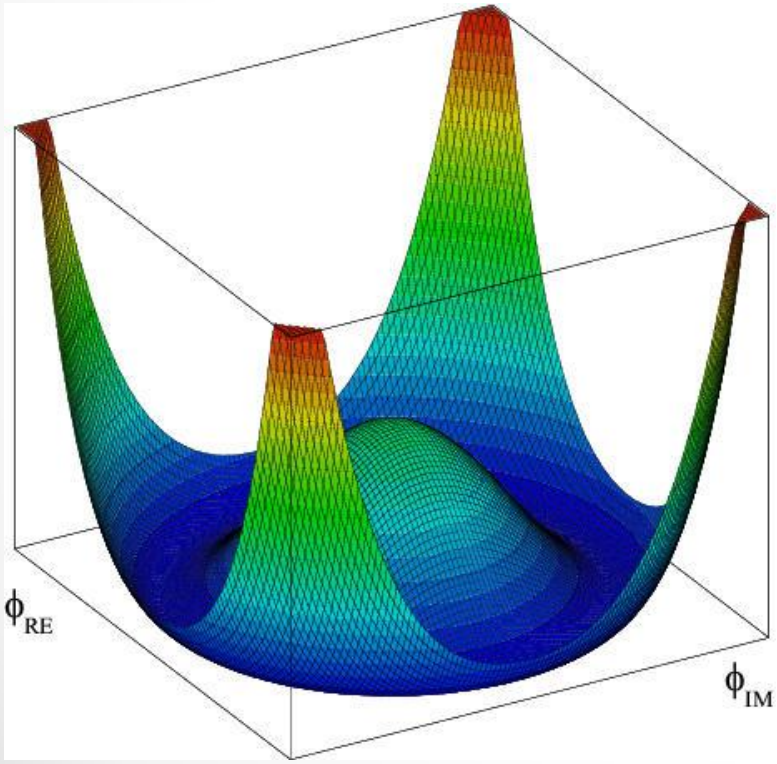


Поля Янга - Миллса

- Янг и Миллс предложили перенести всю эту идеологию на локальные SU(2) (4-параметрические) калибровочные преобразования, которые соответствуют изотопическому спину и построить теорию аналогично электродинамике
- В такой теории возникают безмассовые векторные кванты – бозоны с электрическими зарядами $\pm 1, 0$, но безмассовые, а остальные (сильные и слабые) взаимодействия короткодействующие!
- Выход: фазовый переход. При распространении в сверхпроводнике электромагнитное взаимодействие становится короткодействующим – эффект Мейснера!
- Описание: теория Гинзбурга-Ландау для описания фазовых переходов 2-го рода

Спонтанное нарушение симметрии

$$F = F_{n0} + \int \left\{ \frac{B^2}{8\pi} + \frac{\hbar^2}{4m} \left| \left(\nabla - \frac{2ie}{\hbar c} A \right) \psi \right|^2 + a |\psi|^2 + \right.$$
$$\left. + \frac{b}{2} |\psi|^4 \right\} dV, \qquad (1)$$



Теория фазовых переходов Гинзбурга - Ландау

$$\mathcal{L}_{Higgs} = (D_\mu \phi)^+ (D^\mu \phi) + m\phi^+\phi - \lambda(\phi^+\phi)^2,$$

$$D_\mu = \partial_\mu - igT_a A^a_\mu$$ **инвариантная производная**

ϕ **— поле Хиггса,**
m **и** λ **— положительные действительные числа**
T_a **— генератор калибровочной группы,**
$A^a\mu$ **— калибровочные поля, которые должны создавать через хиггсовский механизм массу.**

- Калибровочная симметрия –> Закон сохранения соответствующего квантового числа + взаимодействие

Какие есть симметрии

Conservation Laws

1. Momentum vector, **p**
2. Energy E, relativistic so due to momentum and rest mass
3. Baryon number B
   - Number of quarks remains constant
4. Electric Charge Q
   - Helpfully, most particles have charge as superscript on name
   - e.g. π^+
- Lepton number, for each generation: L_e, L_μ, L_τ

- Пытаясь систематизировать открытые до 1964 г. адроны, М. Гелл-Манн (Gell-Mann) и Цвейг (Zweig) высказали предположение, что все адроны состоят из трех различных кварков q или соответствующих антикварков q.

Кварки и антикварки группируются либо по 2, либо по 3 частицы, образуя составные частицы, названные ***адронами***.

Адроны

Барионы

3 кварка

Нуклоны

p, n

Гипероны

$m > m_{нукл}$

Обладают сильным взаимодействием
Нестабильны (кроме p)

Мезоны

кварк + антикварк

Обладают сильным (связь между нуклонами) и слабым взаимодействием

Антивещество:

3 антикварка

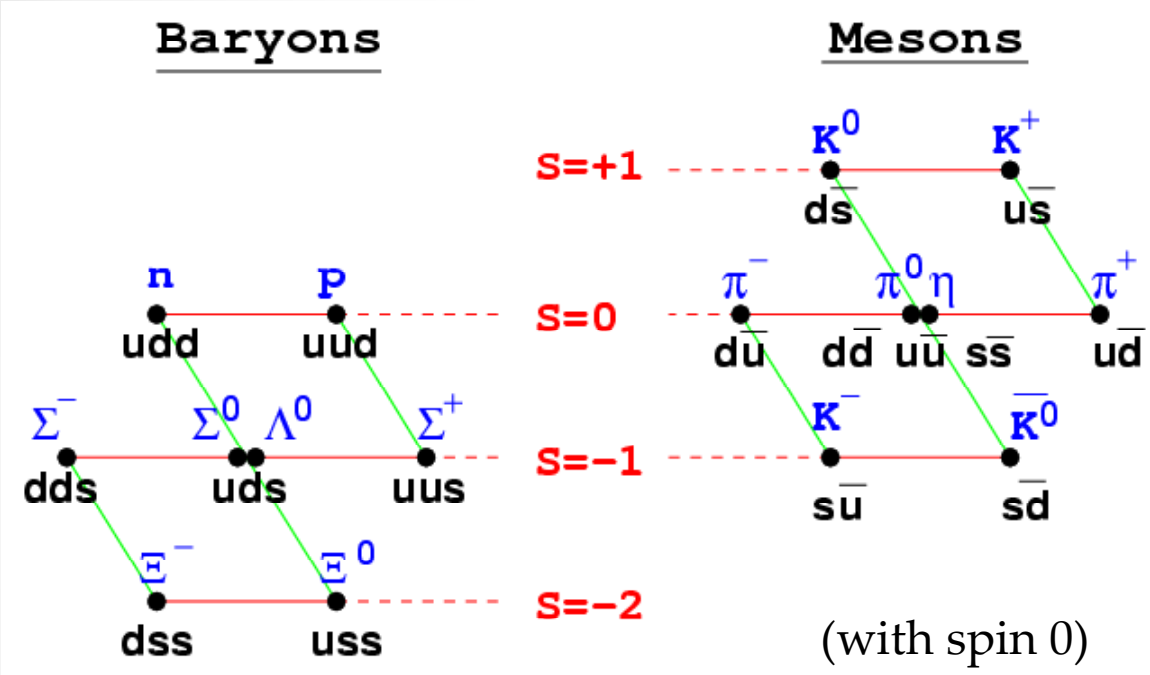
Кварки и их характеристики

Характеристики кварков

Для всех кварков: *спин* $s = ½$, *барионный заряд* $B = 1/3$

Обозначение (аромат) кварка	Электр. заряд Q	Странность S	Шарм C	Красота b	Истина t
u	$\frac{2}{3}$	0	0	0	0
d	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	0
s	$-\frac{1}{3}$	-1	0	0	0
c	$\frac{2}{3}$	0	$+1$	0	0
b	$-\frac{1}{3}$	0	0	$+1$	0
t	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	$+1$

Hadrons



(with spin ½)

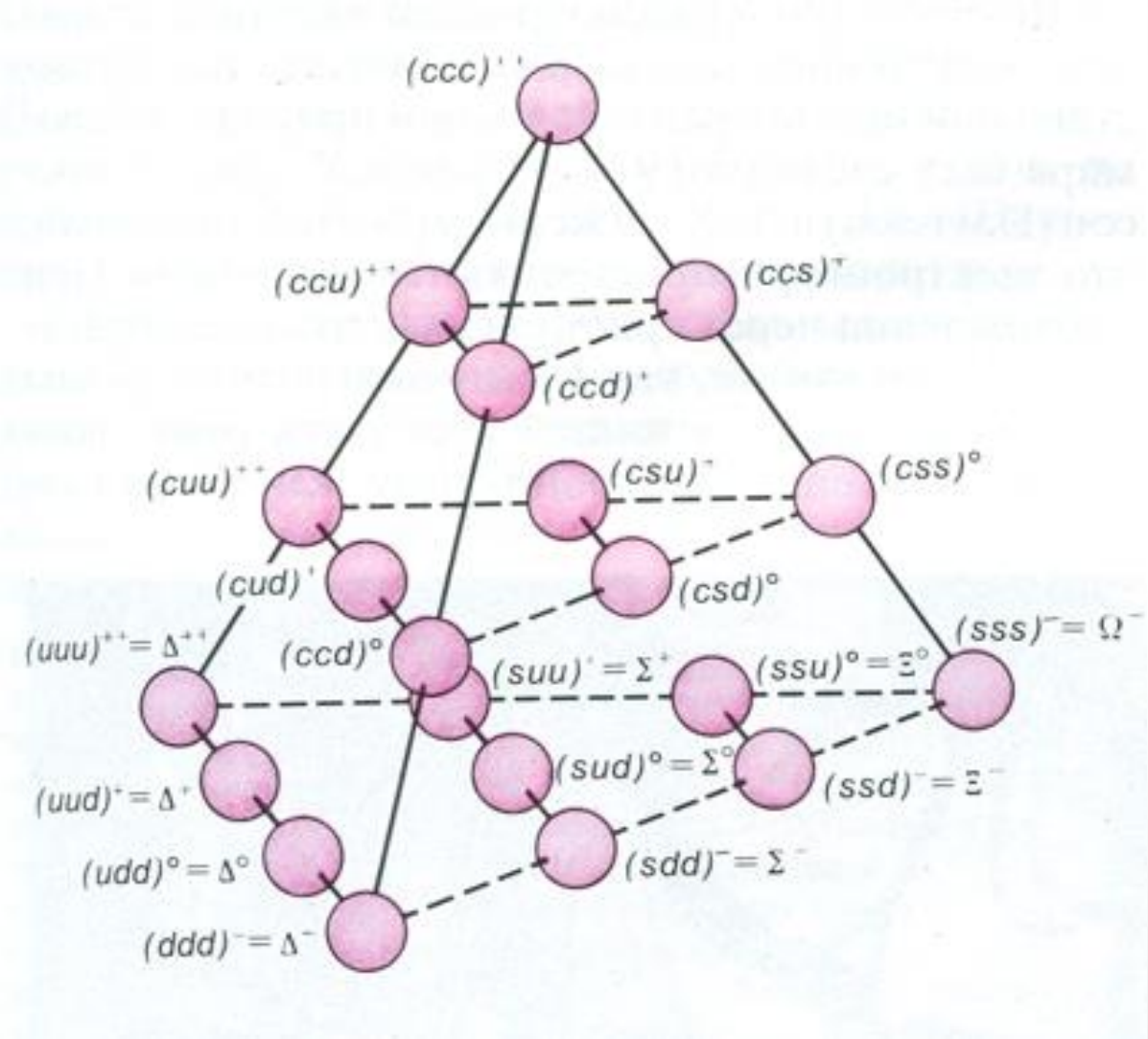
(with spin 0)

Kaon mesons are counterparts of **pions** with s rather than d quark

Strange Baryons

Σ Sigma , Λ Lamda, Ξ Xi

Очарованные барионы



Классификация кварков

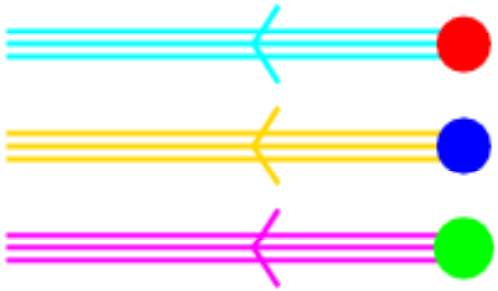
	название		заряд	масса
Первое поколение				
d	нижний	*down*	−1/3	~ 4 МэВ/c^2
u	верхний	*up*	+2/3	~ 6 МэВ/c^2
Второе поколение				
s	странный	*strange*	−1/3	150 МэВ/c^2
c	очарованный	*charm*	+2/3	1.5 ГэВ/c^2
Третье поколение				
b	прелестный	*beauty* (*bottom*)	−1/3	4.5 ГэВ/c^2
t	истинный	*truth* (*top*)	+2/3	171 ГэВ/c^2

Проблемы

- Классификацию объяснили
- Как кварки взаимодействуют внутри адронов?
- Предположили, что никак, а все их параметры (например, магнитные моменты), как заряды и спины аддитивно складываются!!!
- Почему не вылетают (конфайнмент)?

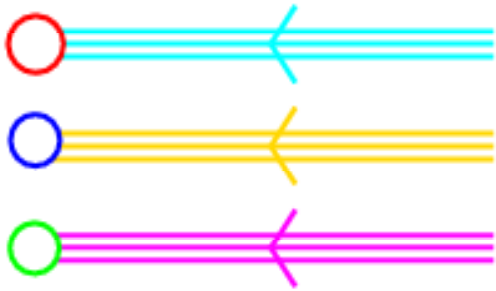
Confinement

- Strong force very strong !
- Quarks bound cannot break free
  - No free quarks
- All particles observed have no net colour



quarks

anti-quarks



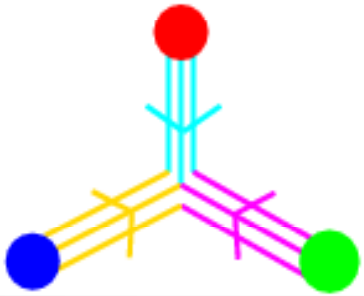
Electric charge has one type +, and its opposite -

Colour charge comes in three types: red, green, blue
and their opposites: anti-red,anti-green anti-blue

Baryon:

eg proton (uud)

neutron (udd)



Meson:

eg pions

($\bar{u}d$, $\bar{d}u$, $\bar{u}u/\bar{d}d$)

Классификация кварков

Лептоны

Три семейства фундаментальных частиц вещества

Семейство 1	
Частица	Масса, МэВ Заряд
Электрон	0,00054 – 1
Электронное нейтрино	<10 -8 0
U - кварк	0,0047 + 2/3
D - кварк	0,0074 – 1/3

Семейство 2	
Частица	Масса, МэВ Заряд
Мюон	0,11 – 1
Мюонное нейтрино	0,0003 0
C - кварк	1,6 + 2/3
S - кварк	0,16 – 1/3

Семейство 3	
Частица	Масса, МэВ аряд
Таон	1,9 – 1
Таонное нейтрино	<0,033 0
T - кварк	189,0 + 2/3
B - кварк	5,2 – 1/3

Три поколения материи (Фермионы)

	I	II	III	
масса→	2,4 МэВ	1,27 ГэВ	171,2 ГэВ	0
заряд→	⅔	⅔	⅔	0
спин→	½	½	½	1
название→	u верхний	c очаровательный	t истинный	γ фотон
Кварки	4,8 МэВ, -⅓, ½, d нижний	104 МэВ, -⅓, ½, s странный	4,2 ГэВ, -⅓, ½, b прелестный	0, 0, 1, g глюон
	<2,2 эВ, 0, ½, ν_e электронное нейтрино	<0,17 МэВ, 0, ½, ν_μ мюонное нейтрино	<15,5 МэВ, 0, ½, ν_τ тау нейтрино	91,2 ГэВ, 0, 1, Z^0 слабое взаимодействие
Лептоны	0,511 МэВ, -1, ½, e электрон	105,7 МэВ, -1, ½, μ мюон	1,777 ГэВ, -1, ½, τ тау	80,4 ГэВ, ±1, 1, $W^\pm$ слабое взаимодействие

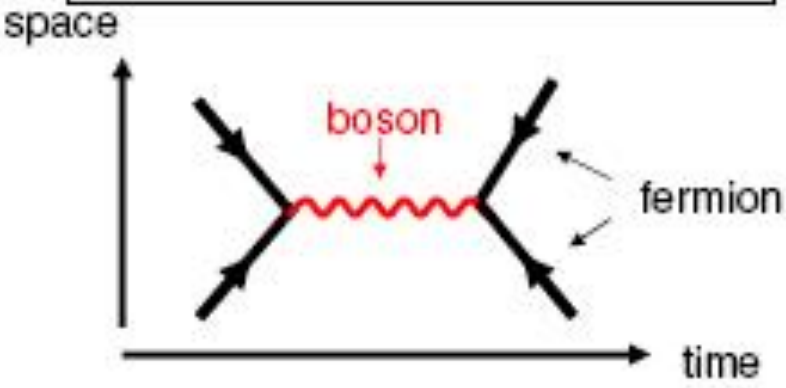
Бозоны (переносчики взаимодействия)

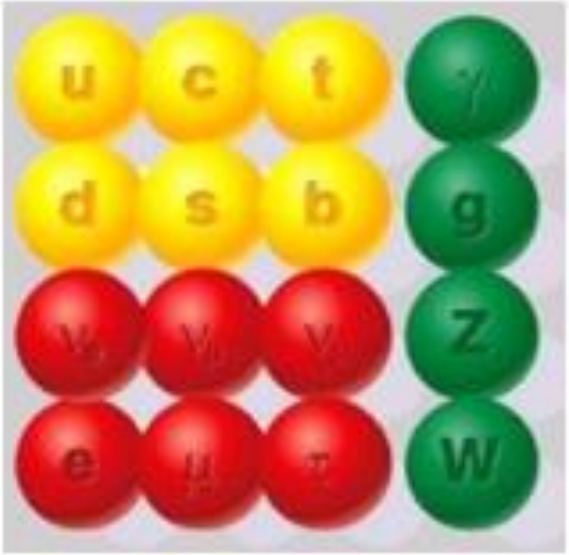
What does the Standard Model describe?

SM describes matter – force interactions;

- 12 types of matter particle (fermion)
- 3 forces, mediated by force carrying particle (boson)

We use the SM to predict experimental observations





Quarks (3 generations)

Leptons (3 generations)

Force carriers

Кабиббо Кабаяши Маскава матрица

$$\begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{bmatrix}$$

Слева мы видим CKM-матрицу вместе с вектором сильных собственных состояний кварков, а справа имеем слабые собственные состояния кварков. CKM матрица описывает вероятность перехода от одного кварка q к другому кварку q' ..

Величины значений в матрице были установлены экспериментально и равны *приблизительно*:

CKM-матрица довольно близка к единичной матрице.

$$\begin{bmatrix} 0,9753 & 0,221 & 0,003 \\ 0,221 & 0,9747 & 0,040 \\ 0,009 & 0,039 & 0,9991 \end{bmatrix}.$$

CKM Matrix

The CKM matrix can be written in many forms:

1) In terms of three angles and phase:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

The four real parameters are d, q_{12}, q_{23}, and q_{13}.

Here s=sin, c=cos, and the numbers refer to the quark generations, e.g. $s_{12}=\sin q_{12}$.

2) In terms of coupling to charge 2/3 quarks (best for illustrating physics!)

$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix}$$

3) In terms of the sine of the Cabibbo angle (q_{12}).

"Wolfenstein" representaton

This representation uses the fact that $s_{12} >> s_{23} >> s_{13}$.

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-\lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1-\lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Here $l=\sin q_{12}$, and A, r, h are all real and approximately one.

This representation is very good for relating CP violation to specific decay rates.

Weak Interaction, SM picture

- The W and Z boson **do not** couple to the same quark states as the strong and Electromagnetic Interaction
- We call the the quark states that couple to the strong and EM interactions the **Mass Eigenstates**
- The Weak Interaction couples with the weak Eigenstates:

- Note:

u=u
c=c
t=t

d', s' and b' are not d, s and b

Leptons: $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$

Quarks: $\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}$

Constructing the Standard Model

$$L_{SM} = L_{EM} + L_{WEAK} + L_{STRONG}$$

EM force	Weak force	Strong force
Electric charge (1)	Weak charge (2)	Colour charge (3)
Massless photon	Massive $W^{\pm}$,Z	8 massless gluons
Coupling g	Coupling g_W	Coupling g_s

Constructing the Standard Model

SM is a field theory. Describe force - matter interactions by Lagrangians

$$L = -1/4 F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\Psi}(i\gamma^{\mu} D_{\mu} - m)\Psi$$

Field strength of force field F

Boson-fermion interaction, fermion movement

Fermion mass

Lagrangian L obeys **local gauge invariance**

Doesn't change as a function of space and time: $\Psi \rightarrow e^{-i\alpha(x,t)}\Psi$

Consequence that bosons must be massless

Each force described by L of similar form (details of F, D, Ψ vary)

Constructing the Standard Model

$$L_{SM} = L_{EM} + L_{WEAK} + L_{STRONG} + L_{HIGGS}$$

Bosons are **massless** in SM theory

Introduce Higgs field (m_H, value of Higgs potential v):

- Couples to particles to give mass (amount ~ coupling strength)
- Keeps Lagrangian invariant

Consequences:

Unifies weak and electromagnetic forces

- **Massive** Z is mixture of massless em + weak bosons

Relates Mw, Mz and weak, electromagnetic couplings:

$\tan \theta_W = g_W / g$

$M_W = M_Z \cos \theta_W$

(SM good at predicting relations)

QED, QCD and QFD

QED: $$L = \overline{\psi}(i\gamma^u \partial_u - m)\psi + e\overline{\psi}\gamma^u A_u \psi - \frac{1}{4}F^{uv}F_{uv}$$

m=electron mass
ψ=electron spinor

electron-γ interaction

A_u=photon field (1)
$F_{uv}=\partial_u A_v - \partial_v A_u$

QCD: $$L = \overline{q}_{jk}(i\gamma^u \partial_u - m)q_{jk} + g(\overline{q}_{jk}\gamma^u \lambda_a q_{jk})G_u^a - \frac{1}{4}G_{uv}^a G_a^{uv}$$

m=quark mass
j=color (1,2,3)
k=quark type (1-6)
q=quark spinor

quark-gluon interaction

gluon-gluon interaction (3g and 4g)

QFD: $$L = \overline{\psi} i\gamma^\mu D_\mu \psi + -\frac{1}{4}F_{i\mu\nu}F_i^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} + (D_\mu\varphi)(D^\mu\varphi) - V(\varphi)$$

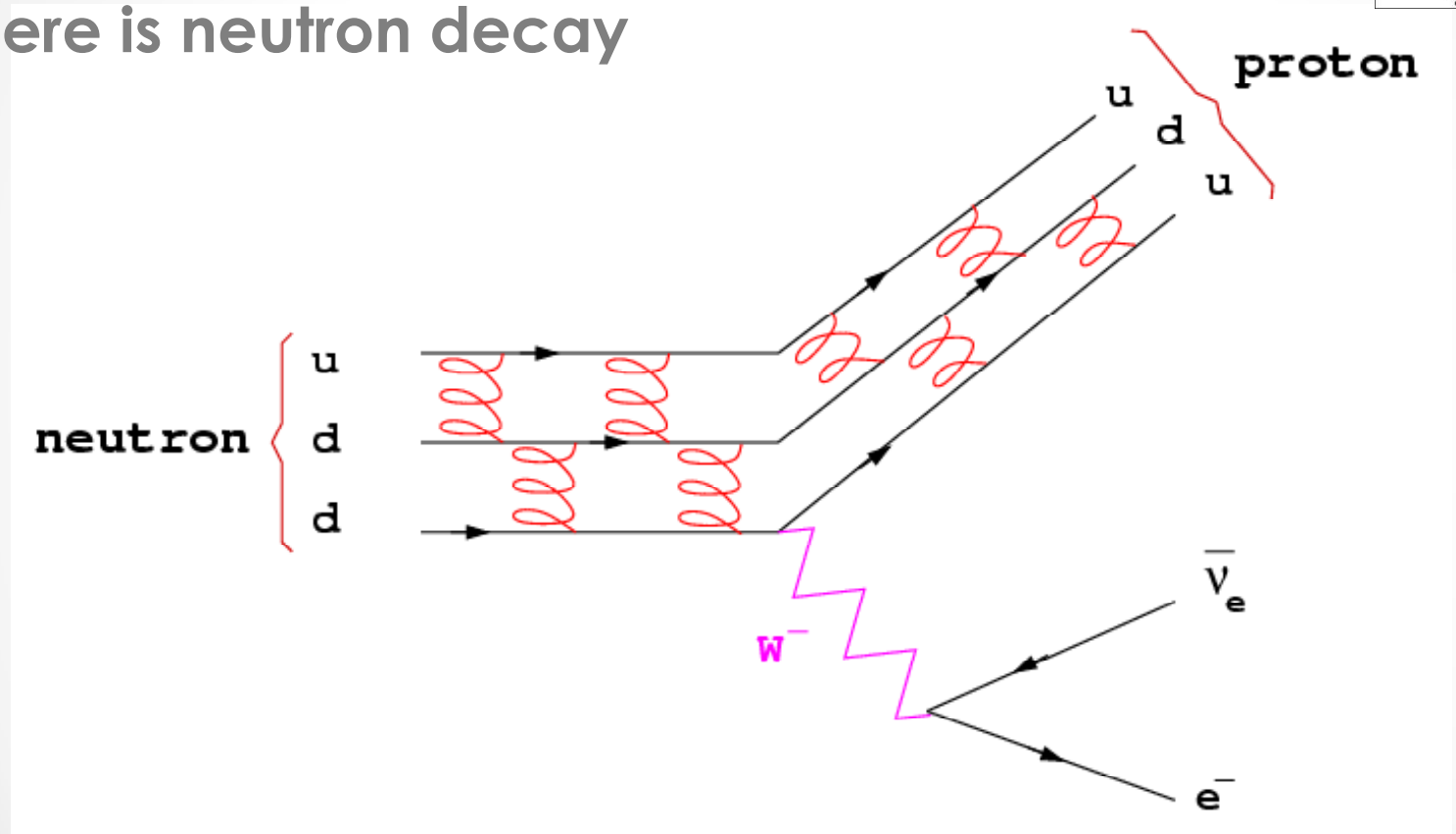
Fermions interaction

Gauge particles

Higgs field

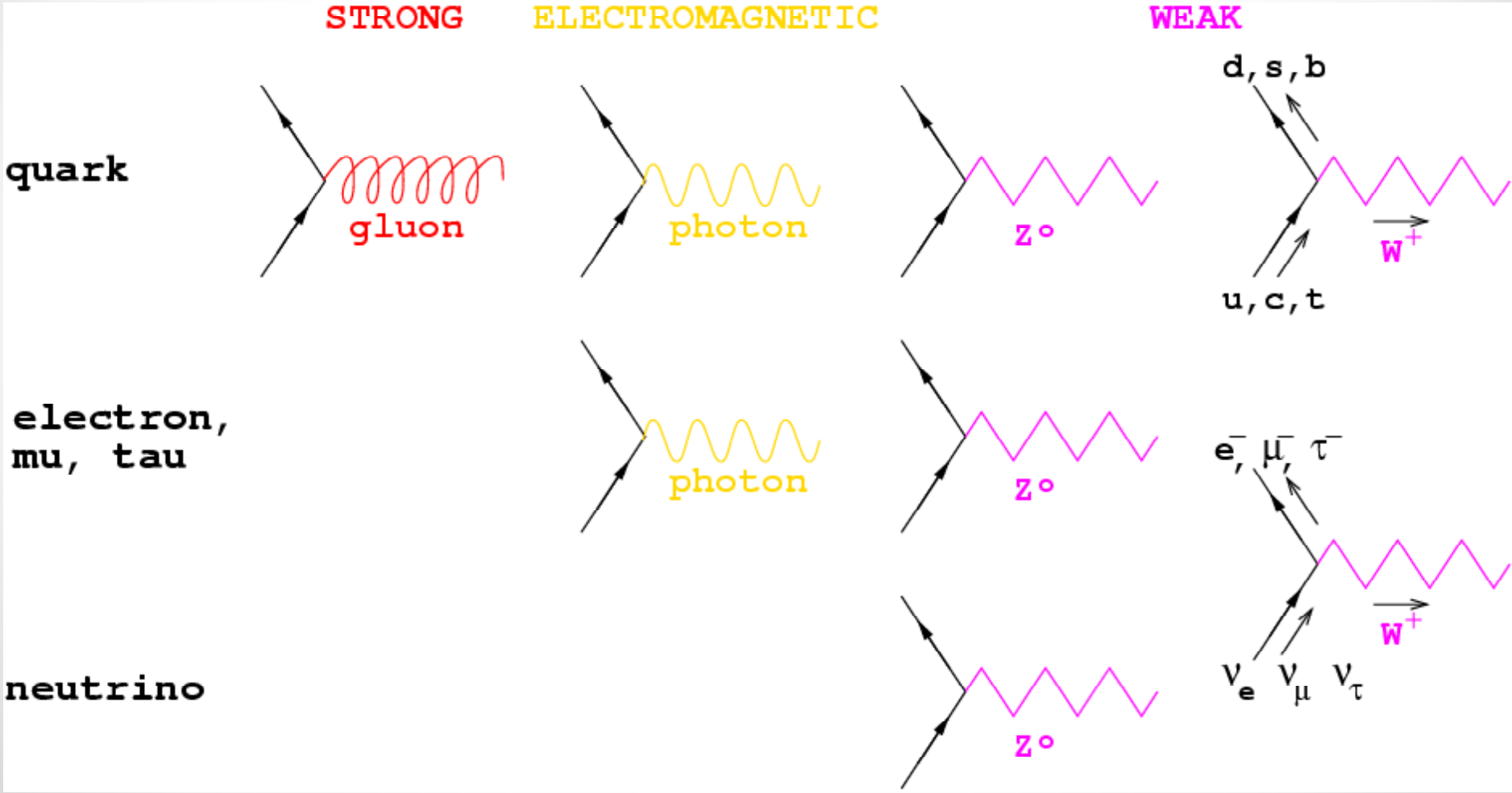
Feynman Diagrams

- Here is neutron decay



Particle interactions

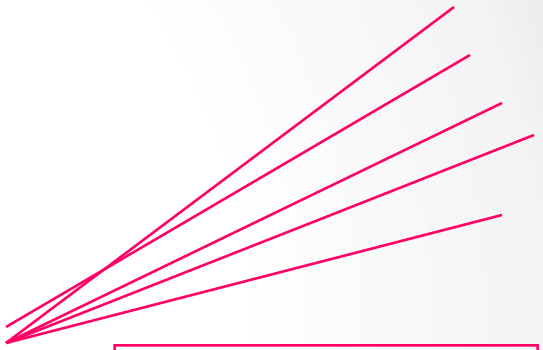
- Some basic standard model vertices:



Quark Jets

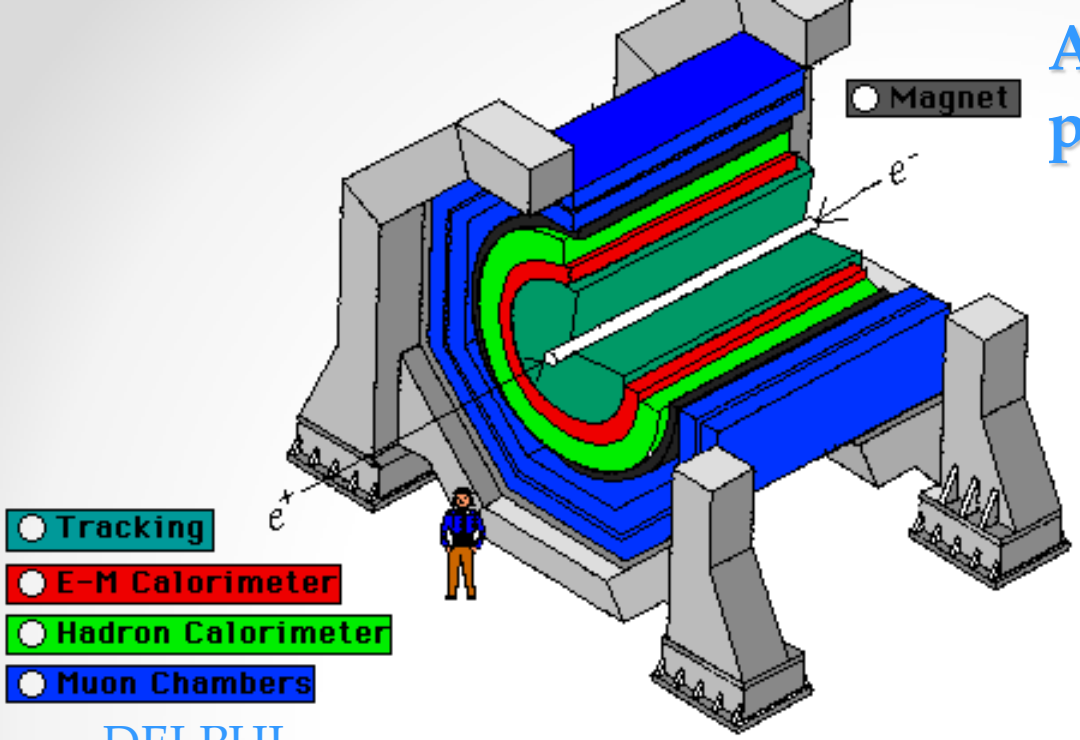
- Don't observe free quarks
- Quarks form into composite states of two quarks (mesons) or three quarks (baryons)
- in particle detectors often see showers of these particles – jets of mesons and baryons

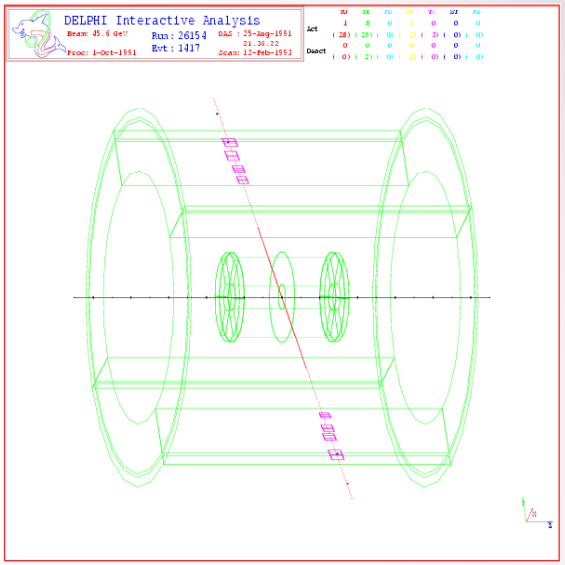
Jet of particles seen in tracking System of detector



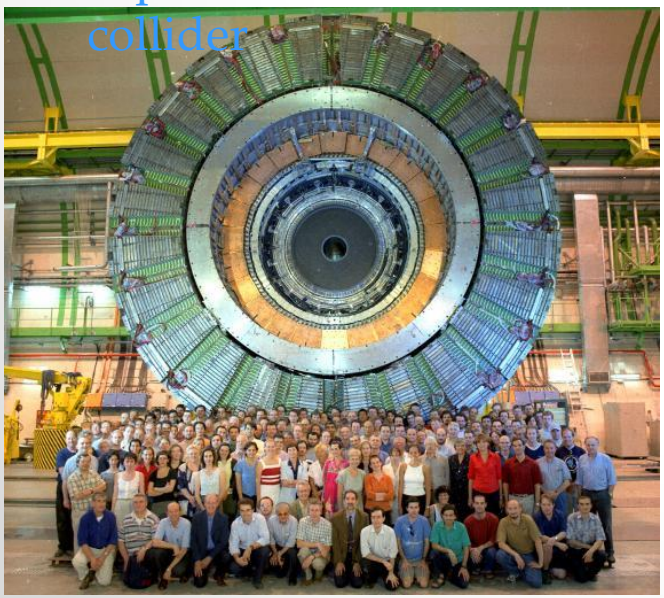
Jet of mesons & Baryons Produced from one initial high Energy quark Or anti-quark

A typical modern particle physics experiment





DELPHI experiment @ LEP collider



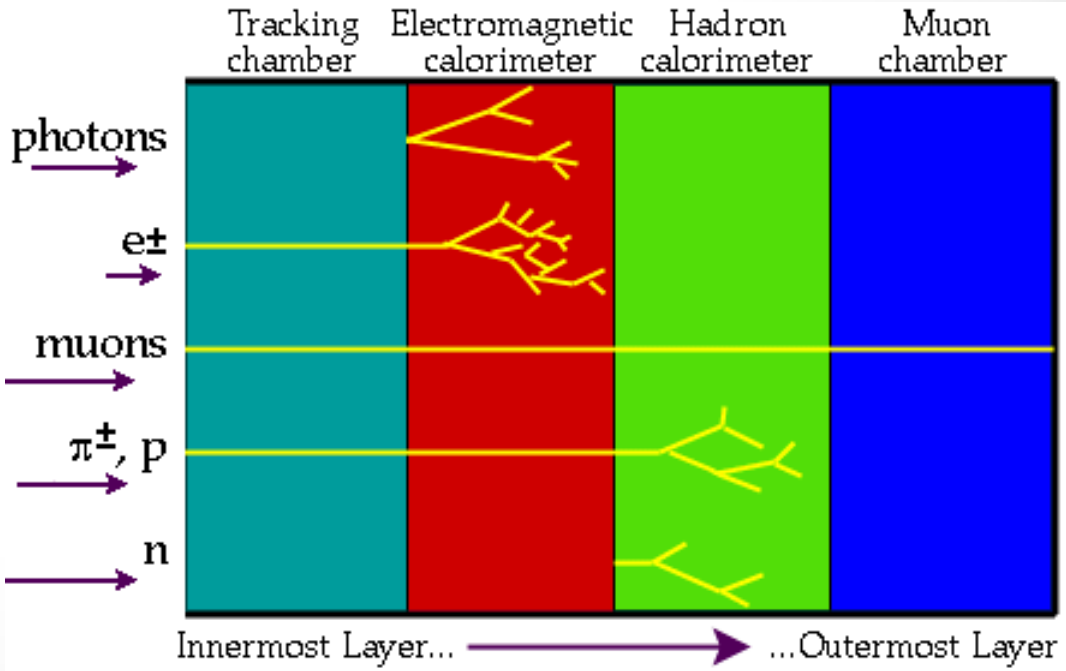
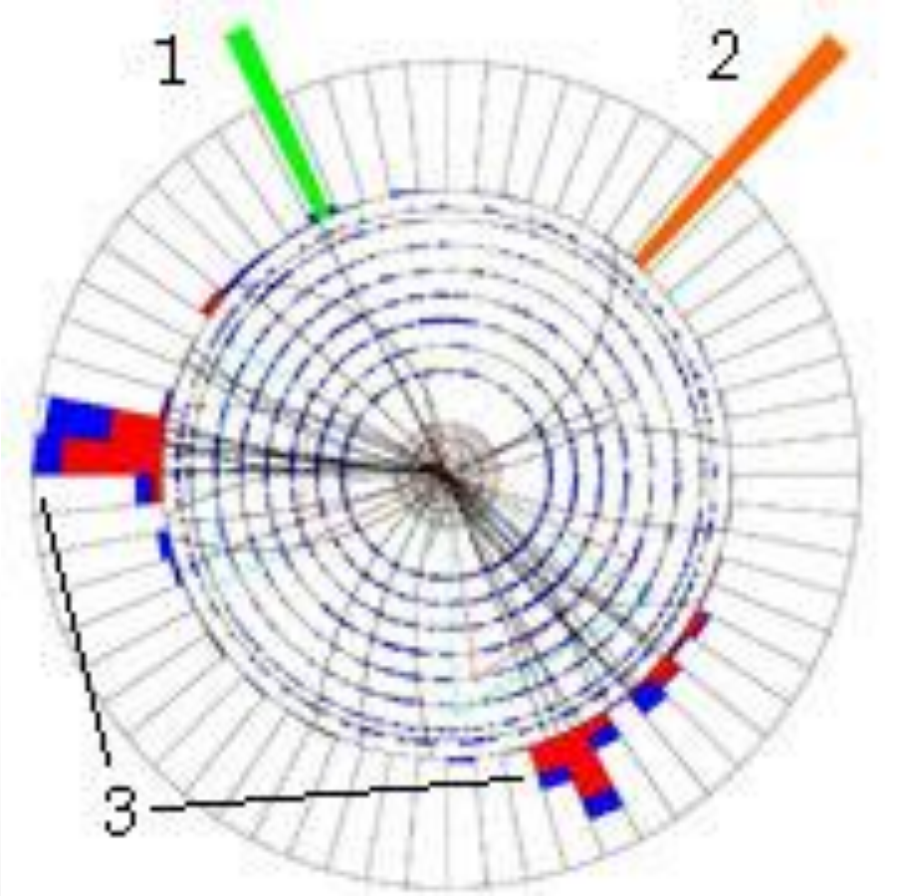


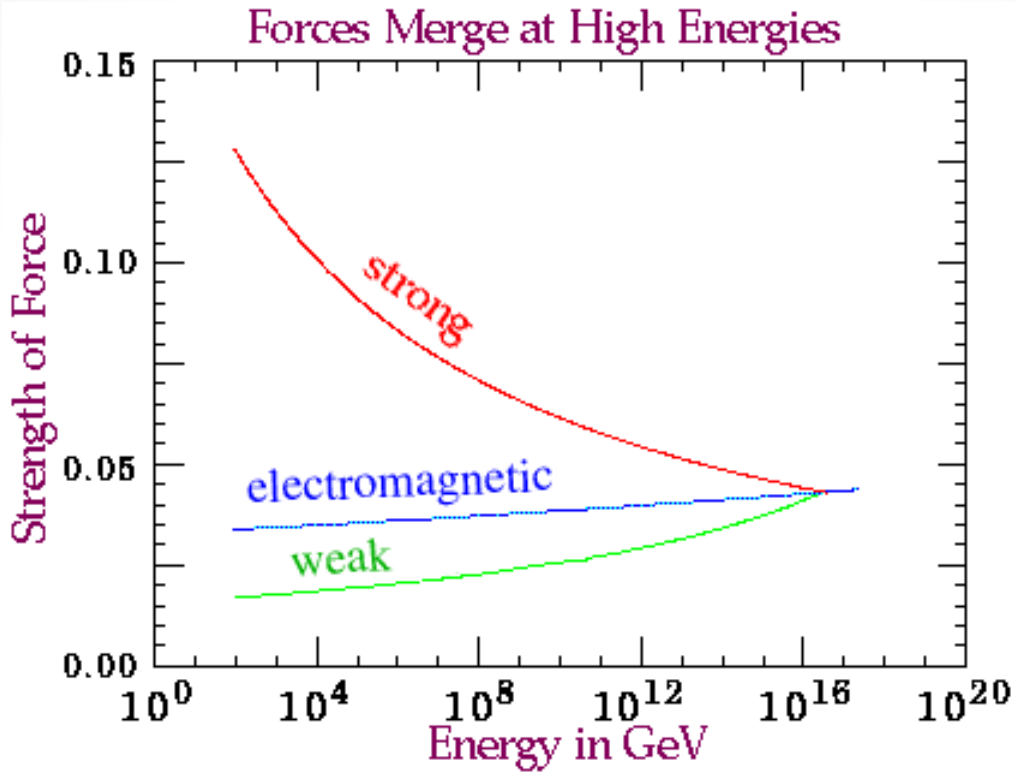
Схема детектора для обнаружения u-кварка.
В опыта происходит разложение u-кварка на W-бозон и b-кварк.
W-бозон распадается на мюон (детектируется в точке 1) и нейтрино (точка выхода — 2);
b-кварк производит один из потоков прочих частиц (3),
другой такой поток возникает в момент возникновения u-кварка
(иллюстрация DZero Collaboration).



Some Key Points

- Forces are due to exchange of the fundamental force carrying bosons
    - Photon,gluon,W^+,W^-,Z^o (and presumably graviton)
- Know the fundamental particles
    - Three generations of quarks and leptons
- Don't observe free quarks
    - Confined in colourless hadrons
- Added some more conservation laws
    - Energy, momentum, electric charge
    - Baryon number, lepton number
- Particle interactions can be written as Feynman diagrams
    - Know the basic vertices, and conservation laws to see whether or not a reaction will occur.

Searching for a Grand Unified Theory



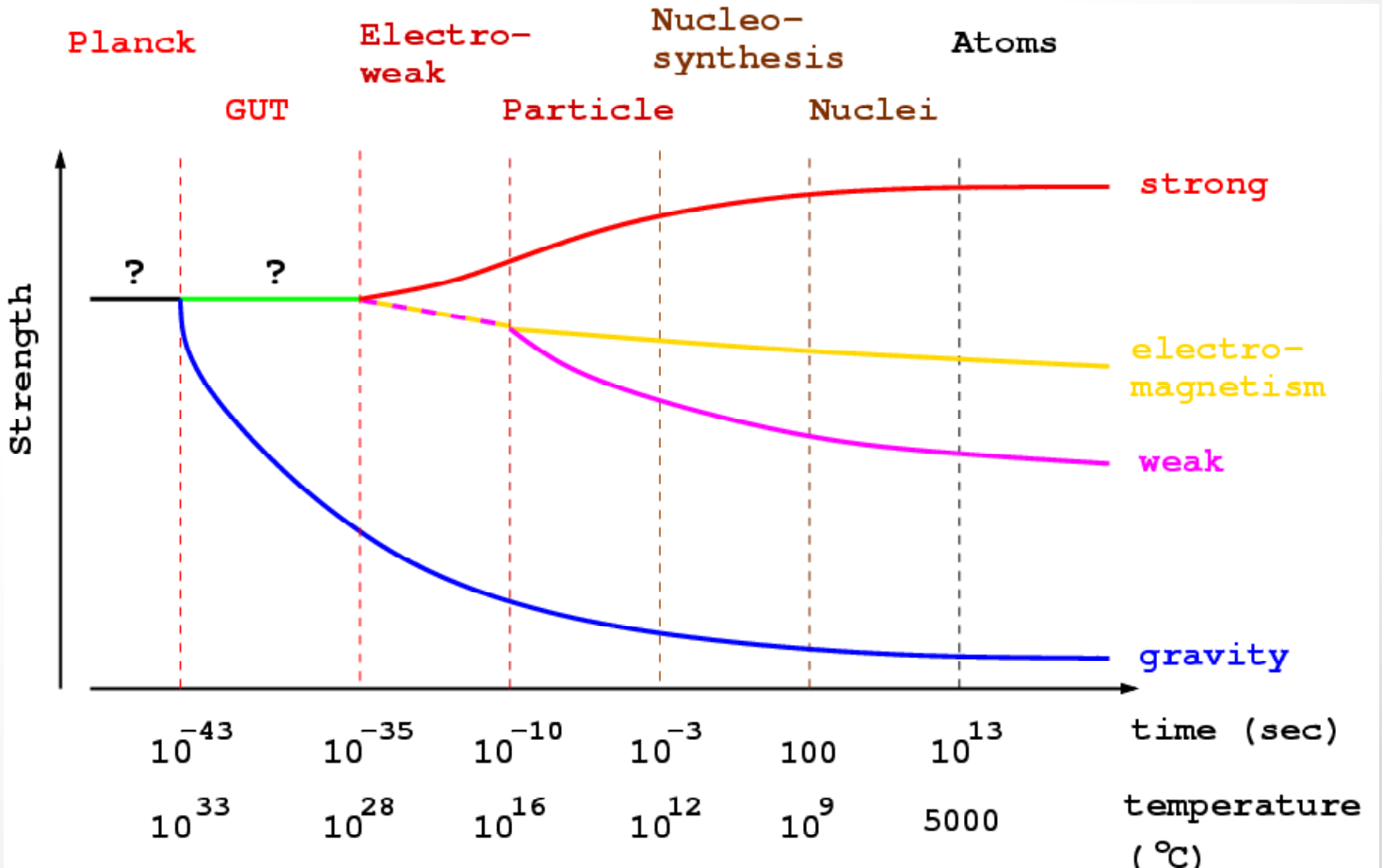
- Electroweak theory well established in SM
  - Electromagnetic and weak forces are part of same theory
  - Unify at high energy
- ?? Unifies with strong force also at high energy ??
- ……then maybe eventually combine gravity also……

the Universe

1. Planck Era
2. GUT Era
3. Electroweak Era
4. Particle Era
5. **Era of Nucleosynthesis**
6. **Era of Nuclei**
7. **Era of Atoms**
8. **Era of Galaxies – Now!**

Book:

"The first three minutes", by Steven Weinberg



Particle Physics Glossary

Fermion: ½ integer spin particle

Quarks: fundamental fermions which come in six types up, down, strange, charm, top, bottom have fractional electrical charge and colour charge

Leptons: fundamental fermions which come in six types electron, muon, tau (with electric charge) and electron neutrino, muon neutrino, tau neutrino

Generations: quarks and leptons come in three generations. Each generation looks like the previous but heavier.

Boson: integer spin particle.

Electromagnetic force: carried by photon, interacts with charged particles

Strong Force: carried by gluon, interacts with colour charged particles – the quarks. Joins quarks into hadrons

Weak Force: carried by Z0,W+,W-, responsible for nuclear Beta decay

Hadron: composite particle made of quarks

Meson: type of hadron containing 2 quarks (one quark, one anti-quark)

Pions: the most common mesons (Kaons -- meson with s quark)

Baryon: type of hadron containing 3 quarks

Anti-matter: particles with same mass and opposite charge