Введение в физику элементарных частиц

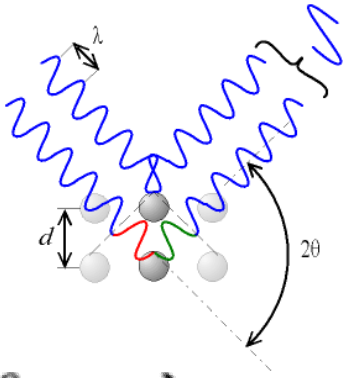
Игорь Романович Бойко
ФОПФ 1987-1993

Что можно рассмотреть в микроскоп?





- В микроскоп можно различить детали, превышающие длину волны света (~0.5 микрон)
  - Всё что меньше – волна «воспринимает» как одну точку
- Можно ли рассмотреть более мелкие объекты?
- Рентген! Изображение не получишь (нет линз), но по углу рассеяния можно измерить межатомное расстояние d (формула Брэгга-Вульфа)



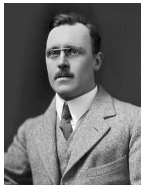
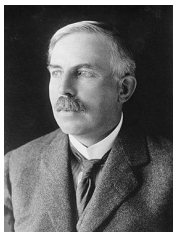
$$2d\sin\theta = n\lambda$$

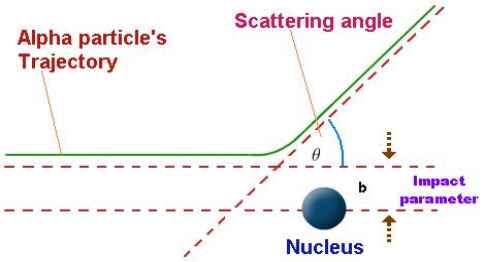
Длина волны и энергия: $\lambda \times E = 12.4$

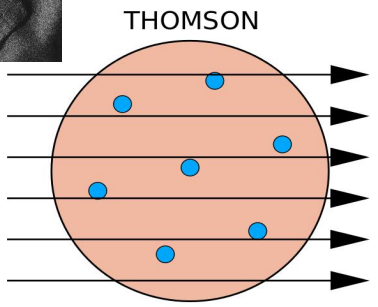
- Длина волны выражена в ангстремах (10^{-10}м), энергия – в кэВ
  - Энергию 1 кэВ приобретает электрон, пройдя разность потенциалов 1 кВ
- Для сравнения: видимый свет – несколько эВ
- Современные коллайдеры: от нескольких ГэВ до нескольких ТэВ ($10^{9\text{-}12}$ эВ)
- Итак, чтобы рассмотреть мелкие объекты, их нужно «освещать» лучами всё более высоких энергий. Разрешающая способность $\Delta R \sim 1/E$
- Коллайдеры являются микроскопами с разрешающей способностью в миллиард раз меньше размера атома

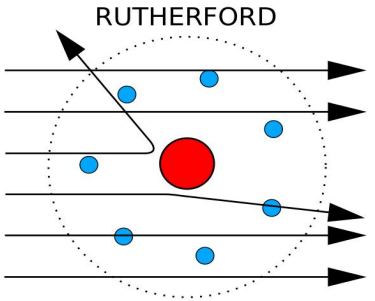
Открытие атомного ядра

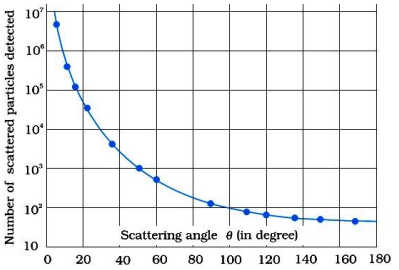
- 1909: эксперимент Гейгера-Марсдена
- 1911: объяснение Резерфордом результатов эксперимента
- Золотая фольга облучалась пучком α–частиц
  - Энергия порядка 6 МэВ, разрешающая способность в 500 раз меньше размера атома
- 1 частица из 8000(?) отклонялась более чем на 90 градусов
- Это невозможно, если положительные и отрицательные заряды равномерно размазаны по объёму атома
- Резерфорд предложил «планетарную модель атома»

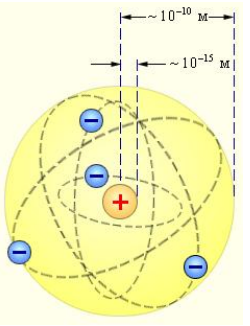














Из статьи Резерфорда

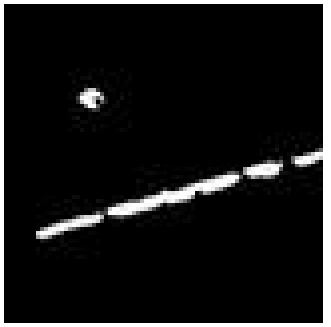
supposed that the scattering of a pencil of α or β rays in passing through a thin plate of matter is the result of a multitude of small scatterings by the atoms of matter traversed. The observations, however, of Geiger and Marsden† on the scattering of α rays indicate that some of the α particles must suffer a deflexion of more than a right angle at a single encounter. They found, for example, that a small fraction of the incident α particles, about 1 in 20,000, were turned through an average angle of 90° in passing through a layer of gold-foil about ·00004 cm. thick, which was equivalent in stopping-power of the α particle to 1·6 millimetres of air. Geiger ‡ showed later that the most probable angle of deflexion for a pencil of α particles traversing a gold-foil of this thickness was about 0°·87. A simple calculation based on the theory of probability shows that the chance of an α particle being deflected through 90° is vanishingly small. In addition, it will be seen later that the distribution

Как оценить размер ядра?

- Закон Кулона: $F=kq_1q_2/r^2$
- Кулоновская энергия: $E=kq_1q_2/r$
- Частица, рассеиваемая на 180 градусов, должна полностью остановиться в поле ядра и повернуть обратно.
- В момент остановки кинетическая энергия E_K полностью переходит в кулоновскую: $E_K=kq_1q_2/R_0$
- Ядро может быть и меньше, чем R_0; но оно во всяком случае не больше (коль скоро наблюдается рассеяние на 180 градусов).
- Мы снова приходим к зависимости разрешающей способности от энергии: $\Delta R \sim 1/E$

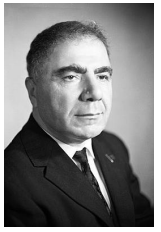
Открытие структуры ядра

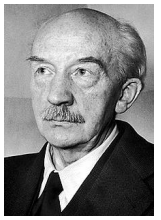
- Эксперимент: Резерфорд, 1917
  - При облучении альфа-частицами азота (или воздуха) рождались частицы, совпадающие по свойствам с ядром атома водорода.



- 1919: Резерфорд публикует первое (неправильное) объяснение эффекта:
  - альфа-частица вышибает протон из ядра, $^{14}N+\alpha \rightarrow {}^{13}C + \alpha + p$
- 1925: Резерфорд публикует правильное объяснение:
  - альфа-частица внедряется в ядро, из которого выбрасывается лишний протон, $^{14}N+\alpha \rightarrow {}^{17}O + p$

Открытие нейтрона

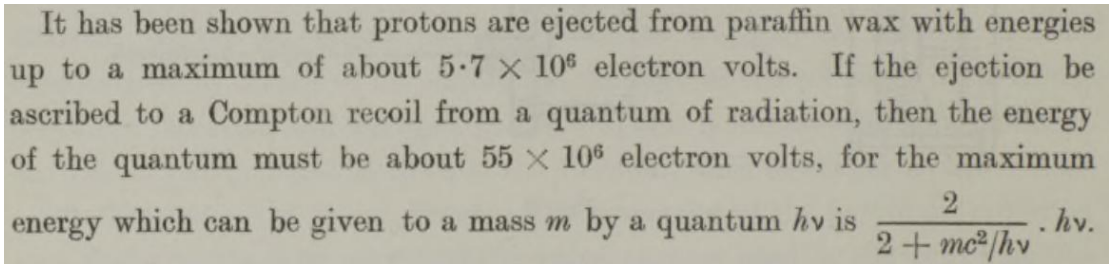



Беккер



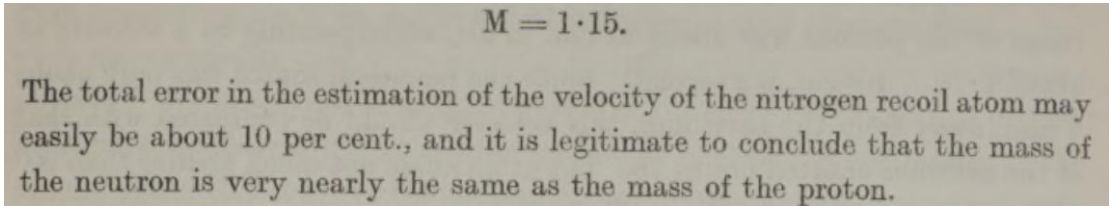
- 1930: Амбарцумян и Иваненко предположили, что электроны, вылетающие при β–распаде, рождаются в распаде тяжёлых нейтральных частиц.
- 1930: Боте и Беккер обнаружили, что при облучении α–частицами лития и бериллия возникает излучение, похожее на γ–лучи, но с необычно высокой проникающей способностью.
- 1932 (январь): Ирен и Фредерик Жолио-Кюри обнаружили, что излучение Боте-Беккера (которое они считали γ–излучением) выбивает протоны из парафина
- 1932 (февраль): Чедвик с высокой точностью повторил опыт Жолио-Кюри и доказал, что излучение состоит не из γ-квантов, а из нейтральных частиц с массой, близкой к массе протона (Нобелевская премия 1935)
- Протон и нейтрон вместе называют «нуклонами», то есть частицы, входящие в состав ядер (nuclei)

Из статьи Чедвика



It has been shown that protons are ejected from paraffin wax with energies up to a maximum of about $5{\cdot}7 \times 10^6$ electron volts. If the ejection be ascribed to a Compton recoil from a quantum of radiation, then the energy of the quantum must be about 55×10^6 electron volts, for the maximum energy which can be given to a mass m by a quantum $h\nu$ is $\frac{2}{2 + mc^2/h\nu} \cdot h\nu$.

- Энергия выбитых из парафина протонов 5-7 МэВ. Фотон передаёт протону лишь малую долю своей энергии, значит энергия фотона должна быть 55 МэВ. Но тогда уже было известно, что в радиоактивных распадах такие энергии недостижимы.



$$M = 1{\cdot}15.$$

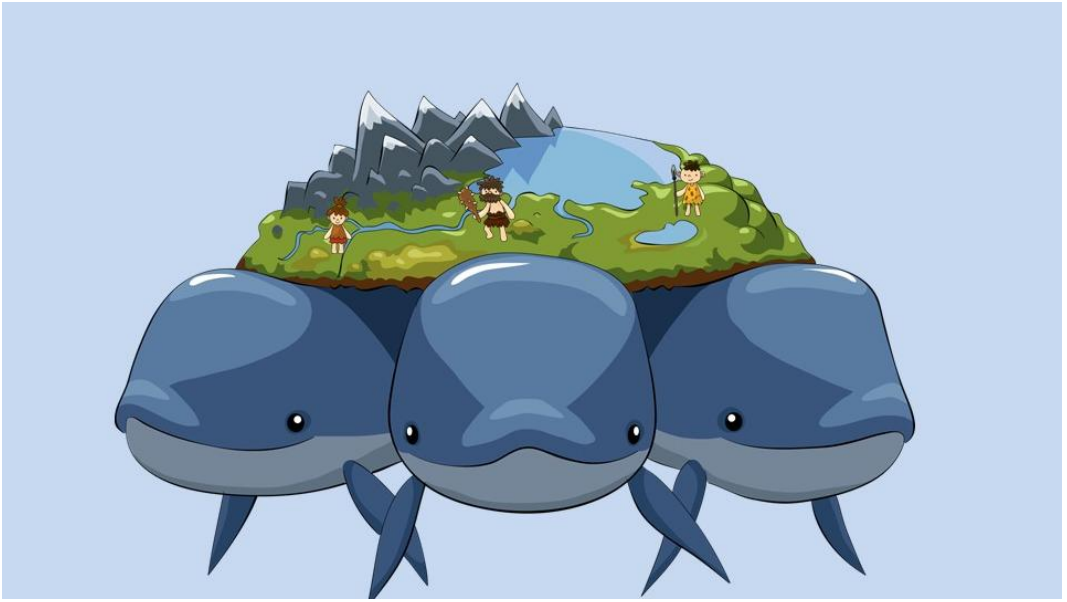
The total error in the estimation of the velocity of the nitrogen recoil atom may easily be about 10 per cent., and it is legitimate to conclude that the mass of the neutron is very nearly the same as the mass of the proton.

- Из результатов измерений следует, что протоны выбиваются частицей с массой (1.15 ± 0.12) от массы протона, то есть массы равны в пределах экспериментальной точности.

Сейчас будут формулы…

- Но совсем немного!
- И очень простые!
- Важно: между правильностью и простотой – я всегда выбирал простоту
- Поэтому: формулы в этой лекции неправильные. Не вздумайте повторять их на экзамене!!!
- Формулы даются исключительно для иллюстрации общей идеи.

Физика частиц стоит на трёх китах



1. Специальная теория относительности
2. Квантовая механика
3. Принцип близкодействия

Принцип близкодействия

- Дальнодействие – концепция, в которой тела воздействуют друг на друга на расстоянии, без материального посредника, с бесконечной скоростью
  - Пример – классическая ньютоновская гравитация
- Близкодействие постулирует, что взаимодействие передаётся материальными носителями, с конечной скоростью
  - Пример – электромагнитное поле в теории Масквелла
- По современным представлениям, нет принципиального различия между частицами и полями. Поле состоит из особого рода частиц, переносящих взаимодействия между другими частицами
- Например, электромагнитное поле состоит из виртуальных фотонов, а реальные фотоны – это куски поля, «оторвавшиеся» от своего родительского заряда

Теория относительности
$E = mc^2$

- Полная энергия тела равна его массе (множитель c^2 часто опускают)
  - Сжатая пружина весит больше свободной, заряженый телефон – больше разряженного
- Массу покоящегося тела называют «массой покоя» m_0.
- Энергия тела, движущегося с импульсом p (и в принципе его полная масса): $E^2 = (m_0c^2)^2+(pc)^2$
- По негласному соглашению, в физике частиц словом «масса» называют только массу покоя m_0. Полную энергию движущегося тела называют словом «энергия» и никогда – «масса».
- Это делается только для удобства. Всегда следует помнить, что масса – это энергия, а энергия – это масса.
- Массы частиц выражают в единицах энергии, сохраняя или опуская множитель c^2. Например, масса электрона 511 кэВ (или кэВ/c^2). Масса протона 938 МэВ, масса Хиггс-бозона 125 ГэВ

Квантовая механика

- В классической механике система переходит из начального состояния в конечное по определённой траектории, то есть через промежуточные состояния, которые непрерывно сменяют друг друга.
- В квантовой механике у системы имеется начальное и конечное состояние. Переход между ними происходит согласно определённым формулам, без промежуточных состояний.
- В результате с точки зрения привычного нам «макромира» квантовая механика полна парадоксов.
- В частности, формулы выглядят так, как будто в промежуточных состояниях нарушается закон сохранения энергии. Несильно и ненадолго – и с условием что в конечном состоянии баланс энергии восстанавливается

Туннельный эффект

- В классической механике частица с энергией $mv^2/2$ никогда не преодолеет барьер, который выше, чем её энергия, $mgH>mv^2/2$
- Формулы квантовой механики дают ненулевую вероятность оказаться за барьером.
- Это выглядит, словно в барьере образуется тоннель, через который проходит частица.
- Однако возможна и другая интерпретация: частица как бы приобретает дополнительную энергию ΔE на короткое время Δt, а затем «возвращает» эту «заёмную» энергию

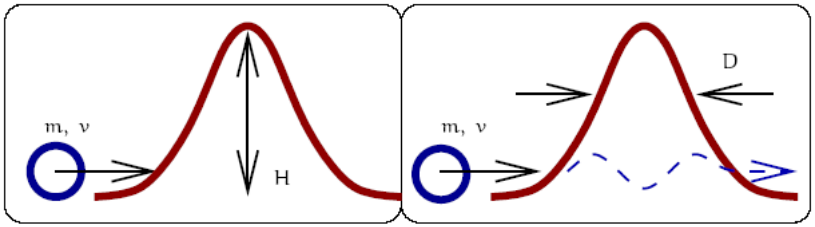


Рис. 57: Квантовый туннельный эффект

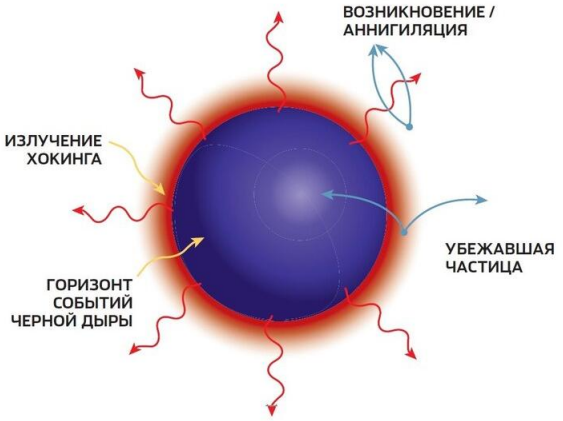
- Итак, З.С.Э. как бы нарушается «немного и ненадолго». А именно: $\Delta E \cdot \Delta t \sim h$
- Постоянную Планка ($h=6.6\cdot10^{-34}$ Дж·с) часто опускают, и тогда $\Delta t \sim 1/\Delta E$
- Это соотношение вероятностное: за время Δt «карета превратится обратно в тыкву» с вероятностью порядка ½.
- Дополнительная энергия может просуществовать в несколько раз дольше, чем Δt, но с ничтожной вероятностью
- Поскольку «время на попытку» Δt малó, вероятность преодоления барьера падает не только с высотой барьера H, но и с его шириной D: $p \sim e^{-D\sqrt{(mH)}}$

Квантовая механика + теория относительности = ???

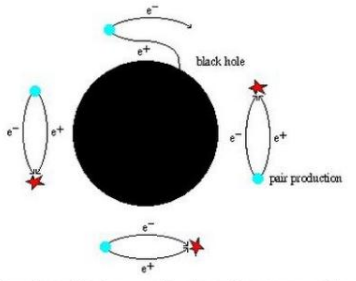
- Мы ещё помним, что масса – это энергия.
- А энергия может на короткое время появляться «из ниоткуда».
- Если эта дополнительная энергия $\Delta E > 2mc^2$, то новые частицы могут родиться из ничего!
- Двойка в формуле потому, что нарушается только З.С.Э. – другие законы сохранения обязаны соблюдаться.
- Поэтому виртуальные частицы должны рождаться в паре с античастицей, чтобы сохранялся суммарный заряд.
- Итак, всё пространство вокруг нас буквально набито парами виртуальных частиц. Мы не замечаем их, потому что закон сохранения энергии всё же выполняется – в квантовом понимании. Немного посуществовав, пара обязана аннигилировать обратно «в ничто». Энергия начального состояния равна энергии конечного состояния (нулю).
- Всё меняется, если за время существования виртуальной пары «придёт подмога», кто-то выделит ей недостающую энергию ΔE. Тогда виртуальные частицы смогут укорениться в нашем реальном мире.

Именно так испаряются чёрные дыры…

- Ничто не может покинуть чёрную дыру. Горизонт событий – это непреодолимый барьер.
  - Но ведь квантовая механика позволяет преодолеть непреодолимые барьеры!
- Допустим, виртуальная пара родилась вблизи чёрной дыры. Если за время существования Δt одна из частиц успеет провалится в гравитационном поле на глубину $mg\Delta H > 2mc^2$, то это и будет «подмога», превращающая виртуальные частицы в реальные!
- Одна из частиц после этого обязательно упадёт в чёрную дыру, другая – улетит прочь.
- В итоге суммарная энергия (и масса) чёрной дыры уменьшится – несмотря на то, что в неё кое-что упало! Гравитационная энергия отрицательна, и этот «убыток» превышает «прибыль» от поглощённой массы.
- Внешне это выглядит как «свечение» чёрной дыры, лучи – это «убежавшие» частицы из пары.
- Процесс небыстрый: чёрная дыра солнечной массы полностью испарится через 10^{67} лет.



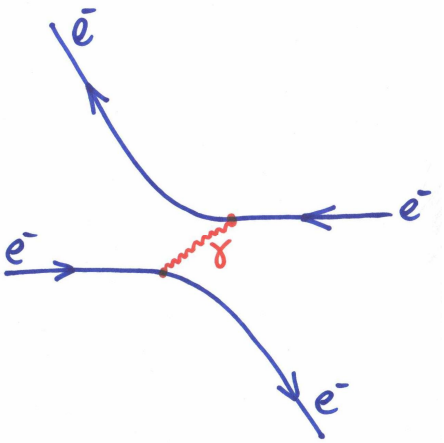
the strong gravitational field around a black hole causes pair production

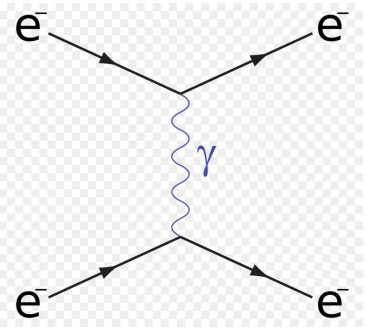


if a pair is produced outside the event horizon, then one member will fall back into the black hole, but the other member will escape and the black hole loses mass

Вспомним о принципе близкодействия…

- Частицы взаимодействуют посредством «материальных носителей».
- В квантовой теории поля эти носители – виртуальные частицы, кванты поля.
- Например, виртуальный фотон испускается электроном и поглощается другим электроном.
- У системы двух электронов суммарные энергия, импульс и всё прочее – равны в начальном и конечном состояниях.
  - Пока виртуальный фотон летел от одного электрона к другому – закон сохранения энергии был нарушен. Но для квантовой механики это не проблема
- Кстати. Мы помним, что $\Delta E \sim 1/\Delta t$. Если фотону далеко лететь (Δt велико), значит его энергия невелика (ΔE мало́). Значит, он сможет передать только слабый «толчок». Это закон Кулона: сила падает с расстоянием, $F \sim 1/r^2$



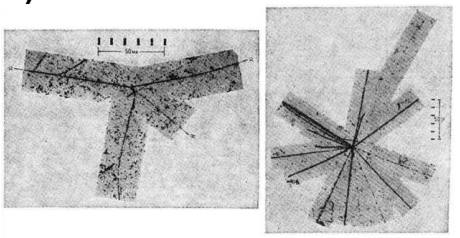


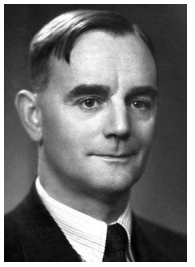
А как взаимодействуют протоны и нейтроны в ядре?

- С самого начала было понятно, что нуклоны (протоны и нейтроны) связаны в ядре не электричеством, а какой-то другой силой.
  - Во-первых, эта сила значительно сильнее электричества (доказательство тому – ядерная бомба). У ядерного взаимодействия есть и другое название – «сильное взаимодействие»
  - Во-вторых, положительные протоны и нейтральные нейтроны никак не могут быть связаны кулоновской силой
  - В-третьих, сильное взаимодействие – короткодействующее: оно почти не выходит за пределы ядра
- 1934: Юкава вводит потенциал нового поля $V = -e^{-r/r_0}/r$ Предсказывается переносчик взаимодействия (квант поля) – «мезон». (Нобелевская премия 1949).



- Экспонента сводит взаимодействие к нулю на расстояниях значительно больших r_0. Если r_0 порядка размера ядра, значит масса мезона – сотни МэВ ($\Delta R \sim 1/E = 1/M$).
- 1947: Пауэлл открывает в космических лучах π-мезон (пион) с массой 139 МэВ. (Нобелевская премия 1950).





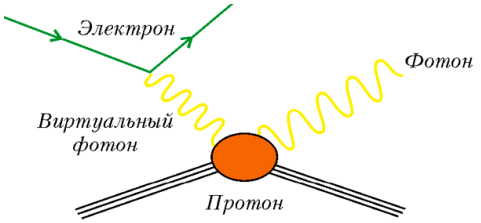
Казалось бы, теперь всё хорошо…

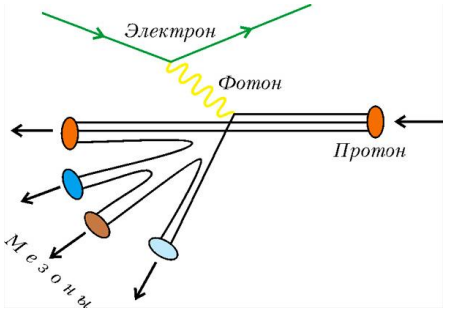
- Ядро состоит из протонов и нейтронов, пионы склеивают их вместе. Гармония! Но были и проблемы.
- Во-первых, потенциал Юкавы только в первом приближении описывал ядерные силы, но более точные измерения начинали расходиться с теорией
- Во-вторых, вскоре было открыто огромное количество (сотни!) новых мезонов, некоторые со странными свойствами (их так и назвали, «странные частицы»)
- В-третьих, появились ускорители, энергия которых непрерывно росла. Разрешающая способность ($\Delta R \sim 1/E$) позволила заглянуть внутрь протона – и оказалось, что там внутри что-то есть…

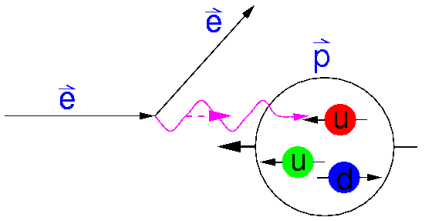
Партоны

- В 1968 в Стэнфорде (Калифорния) заработал линейный ускоритель, создающий пучки электронов с энергией до 50 ГэВ.
- Были проведены эксперименты по глубоконеупругому рассеянию (Deep Inelastic Scattering, DIS).
- В принципе, это повторение опыта Резерфорда, но при 10000-кратной энергии (а значит – и разрешающей способности).
- Электрон испускает фотон высокой энергии, который и сталкивается с протоном – или частицами внутри протона
- Данные DIS были проанализированы Бьёркеном. Подобно тому, как внутри атома было обнаружено ядро, внутри протона были обнаружены новые частицы.
- Фейнман назвал их партонами (Part – часть).
- Оказалось, что свойства партонов прекрасно согласуются с ранее придуманными кварками!





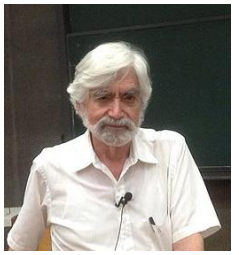




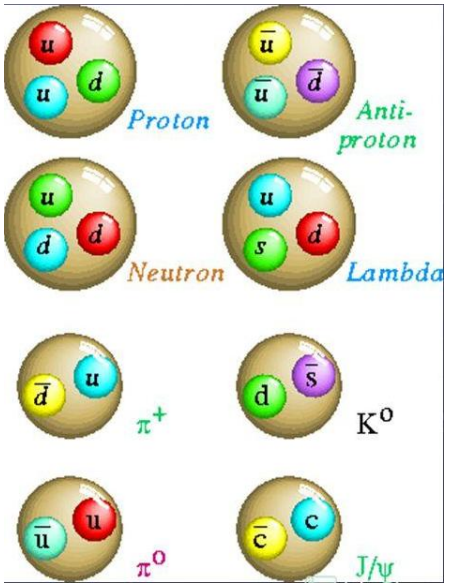
Зоопарк частиц

- В 1950-60е годы количество открытых частиц нарастало лавинообразно
- Кроме пиона Юкавы π^+ был открыт нейтральный π^0. А ещё $\rho^+ \to \pi^+ \pi^0$, $\rho^0 \to \pi^+\pi^-$ $(\pi^0\pi^0)$, «странные частицы» каоны (K^+ и K^0) с необычно большим временем жизни, $K \to \pi\pi$, $K^* \to K\pi$
- А кроме того: $\eta,\eta',\omega,\varphi$,a,b,f,h,… Потом алфавит кончился, частицы стали обозначать значениями массы.
- Кроме мезонов, были обнаружены барионы – они распадаются на другие барионы и в конце цепочки стоят протон и нейтрон.
- С этими сотнями частиц нужно было что-то делать.

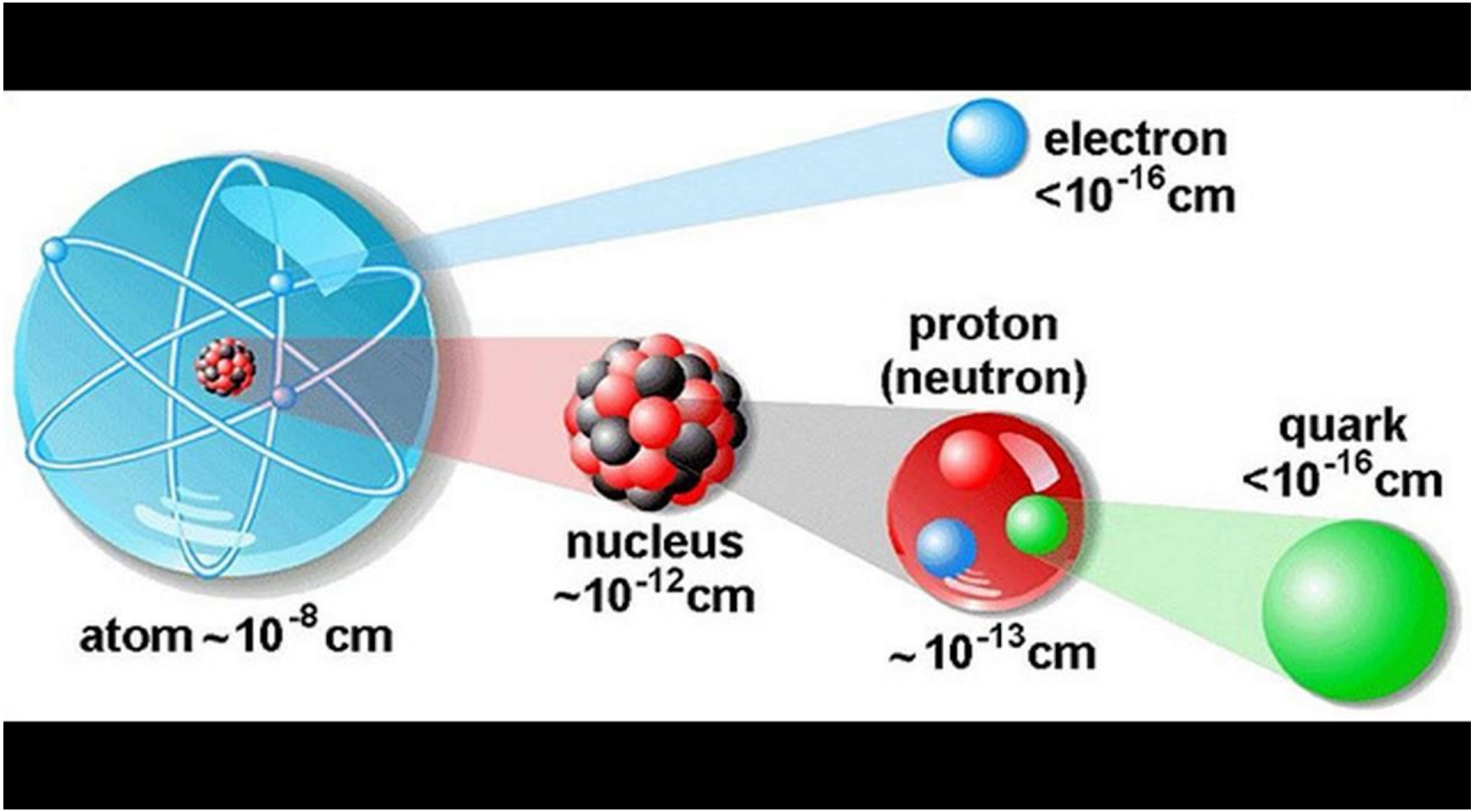
Кварковая модель

- В 1964 Гелл-Манн и (независимо) Цвейг предлагают классификацию частиц на основе кварковой модели.
  - Гелл-Манн получил Нобелевскую премию в 1969.
- Ядерная материя состоит из кварков – частиц с дробным электрическим зарядом. Сейчас известно 6 кварков, тогда – только 3:
  - d (down, нижний), заряд -1/3
  - u (up, верхний), заряд +2/3
  - s (strange, странный), заряд -1/3
- Частицы ядерной материи делятся на мезоны и барионы. Мезон состоит из кварка и антикварка. Барион состоит из трёх кварков (антибарион – из антикварков).
- Кварковая модель объяснила всё многообразие частиц. Из трёх «кирпичиков» можно сложить не так уже много комбинаций. Однако та же самая комбинация кварков может формировать частицы разной массы. Это «возбуждённые состояния», когда кварки вращаются друг вокруг друга по более высокой орбите.
- Например, π^+-мезон с массой 139 МэВ состоит из u-кварка и d-антикварка. ρ^+-мезон имеет тот же состав, но имеет массу 775 МэВ. Это первый уровень возбуждения. Дальше идут $a_0(980)$, $b_1(1235)$, $a_1(1260)$, $\pi(1300)$, $a_2(1320)$, и т.д., вообще говоря до бесконечности



Как устроена материя (сегодняшнее понимание)



А как взаимодействуют кварки?

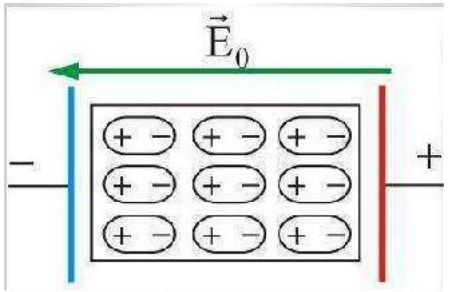
- Взаимодействие между кварками переносят кванты сильного взаимодействия – глюоны.
- Масса глюона равна нулю, как и у фотона.
- Электрические заряды бывают двух знаков: «плюс» и «минус». Вместе они создают нейтральный объект (нулевой заряд).
- Кварки несут цветной заряд, который бывает трёх разновидностей: Красный, Зелёный, Синий. Антикварк несёт антицвет. Три цвета RGB вместе создают белый (нейтральный относительно сильного взаимодействия) объект.
- Как легко понять, два разных цвета вместе взятые – это антицвет третьей разновидности.
- Фотон электрически нейтрален. Глюон имеет цветной заряд, причём несёт одновременно один цвет и один антицвет. Когда кварк испускает или поглощает глюон – цвет кварка меняется согласно цвету и антицвету глюона.
- Аналогично электродинамике, взаимодействие цветных зарядов изучается квантовой хромодинамикой (КХД, QCD)
- Цвета существуют только в мире кварков и глюонов. Все другие частицы (мезоны, нуклоны, ядра) цветонейтральны!!!

Почему же сильное взаимодействие так отличается от электрического?

- Сильное взаимодействие короткодействующее: оно не простирается дальше размеров ядра.
- Это объясняли тем, что сила переносится пионом, а тяжёлая виртуальная частица может существовать только короткое время.
- Но выяснилось, что взаимодействие между нуклонами в ядре – это всего лишь остаточные (ван-дер-ваальсовские, приливные) проявления «настоящего» сильного взаимодействия. Протоны и нейтроны цветонейтральны, но цветные объекты у них внутри распределены несимметрично, поэтому нуклоны всё же слегка «чувствуют» друг друга.
  - Аналогично, электрически нейтральные атомы отталкиваются при соударениях, поскольку положительные и отрицательные заряды у них внутри разнесены.
- Итак, если сильное взаимодействие переносится глюонами – такими же безмассовыми, как и фотоны – то откуда же такое отличие от электричества?

Чему равен заряд электрона?

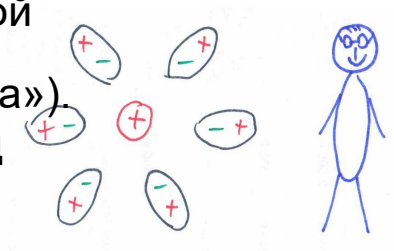
- Все знают ответ: $e=1.6\cdot10^{-19}$ Кл.
- В физике частиц очень любят комбинацию $\alpha=e^2/(hc)=1/137$ (постоянная тонкой структуры).
- Но правильно ли мы измеряем заряд?
- Если между зарядом и прибором внести диэлектрик, молекулы диэлектрика поляризуются и экранируют заряд (ослабляют кулоновскую силу).
- Заряд кажется меньше, чем на самом деле! Закон Кулона в диэлектрике:
- К счастью, вакуум пустой, там нечему поляризоваться.
- Точно в вакууме ничего нету?

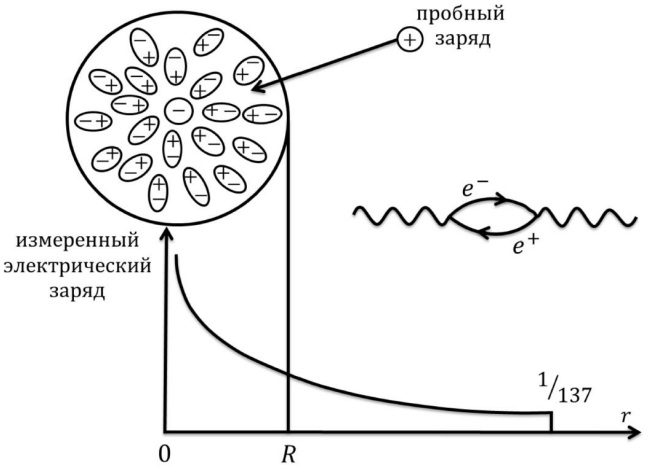


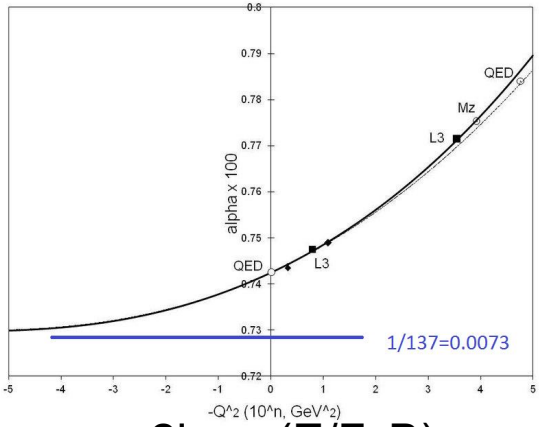
$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\varepsilon \cdot r^2}$$

Виртуальные частицы!!!!!

- Вакуум заполнен их парами.
- В электрическом поле реальной частицы пары поляризуются (эффект «поляризации вакуума»).
- На большом расстоянии заряд максимально экранируется (участвуют все пары).
  - Измеренный заряд будет «меньше чем на самом деле»
- Если подойти поближе, на расстояние R_0, экранировка слабее (только пары с $R<R_0$).
  - Измеренный заряд окажется больше
- Вспомним что R~1/E, малые расстояния можно рассмотреть лучами большой энергии
- При малых энергиях (на больших расстояниях) постоянная тонкой структуры $\alpha=e^2/(hc)=1/137$
- При 1 ГэВ: $\alpha=1/135$
- При 100 ГэВ: $\alpha=1/129$
- При 10^{16} ГэВ: $\alpha=1/60$







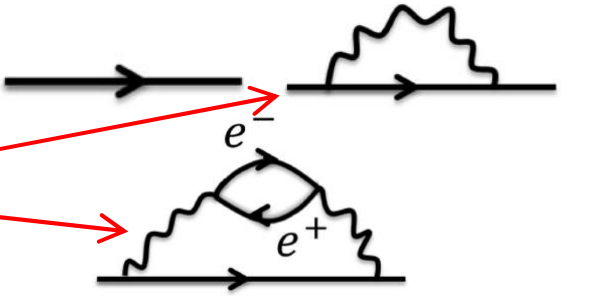
$2\log_{10}(E/\text{ГэВ})$

Где же истина?

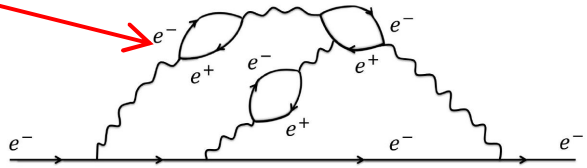
- Поляризацию вакуума можно понимать двояко.
  - Либо смириться с тем фактом, что заряд электрона зависит от энергии ускорителя (свойства бактерии зависят от марки микроскопа).
  - Либо признать, что наши привычные $e=1.6\cdot10^{-19}$ Кл – это не истинный заряд электрона, а «истинный заряд минус эффект экранировки».
- Каков же истинный заряд?
- Чтобы измерить истинный заряд, нужно устранить виртуальные пары между нами и электроном, т.е. подойти поближе.
- Но подойдя на некоторое конечное расстояние, мы устраним влияние только «внешних» пар. Зато здесь (по закону Кулона) увеличилась напряжённость поля, поэтому в нём рождается много виртуальных пар, и экранировка всё ещё велика. Если подойти ещё ближе – поле ещё сильнее возрастёт… и так до бесконечности
- Остаётся признать, что единственная «выделенная» или «особая» точка – это всё же $1.6\cdot10^{-19}$ Кл на бесконечном расстоянии.
- При этом теория считается «хорошей», или перенормируемой, если она умеет предсказывать экранировку («квантовые поправки») для любых расстояний (энергий ускорителя)

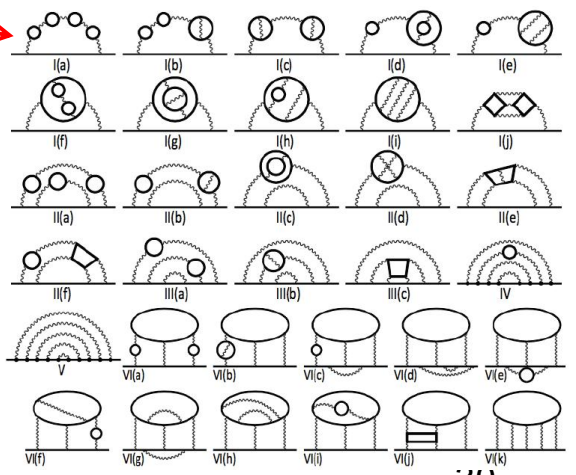
Квантовые поправки

- На языке диаграмм Фейнмана это изображается так:
  - Свободный электрон
  - Электрон, окружённый своим электромагнитным полем
  - Поле электрона экранируется виртуальной парой
- Пары могут между делом взаимодействовать друг с другом
- Электродинамика полностью вычислила экранирование от 1 1-петлевой диаграммы, 7 2-петлевых, 72 3-петлевых, 891 4-петлевых, 12672 5-петлевых.
- Начата работа с 6 петлями
- Этот процесс бесконечный, сойдётся ли сумма к какому-то пределу?
- Вклад диаграммы с n+1 петлёй приблизительно в 137 раз меньше, чем с n петель (закон Кулона, $F=e^2/r^2$, $\alpha=e^2/(hc)=1/137$)
- Поэтому подсчёт всех петель – это суммирование ряда Тэйлора, с разложением по степеням 1/137
  - а если коллайдер работает при 100 ГэВ, тогда по степеням 1/129







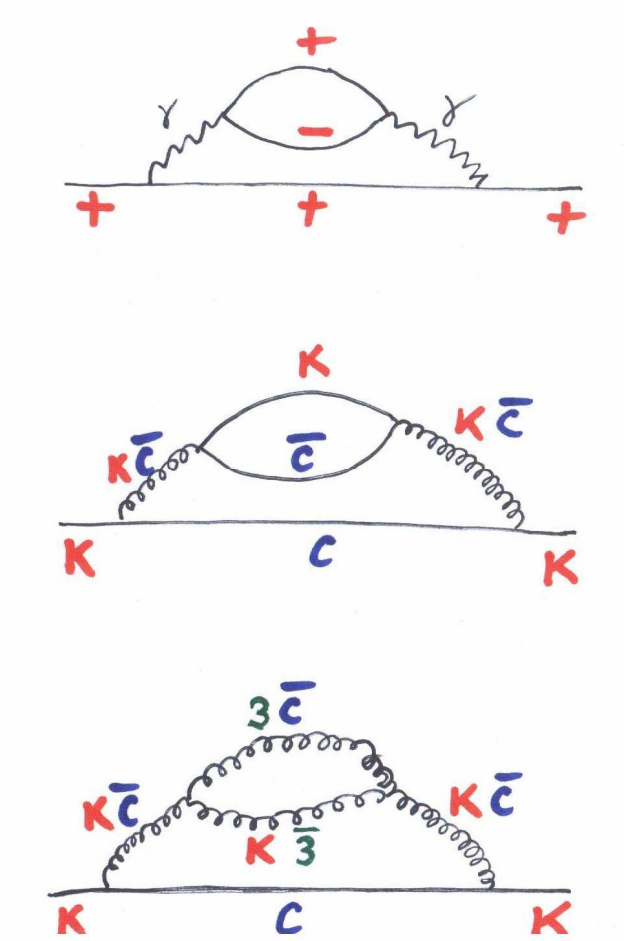


Почему сильное взаимодействие так непохоже на электрическое?

- Принципиальное отличие сильного взаимодействия от электромагнитного: глюон несёт цветной заряд (а фотон электрически нейтрален).
- Глюоны переносят взаимодействие не только между кварками, но и между другими глюонами (а также между кварком и глюоном).
- Как и в электродинамике, кварки одинакового цвета отталкиваются (цветной заряд экранируется). А вот глюоны виртуальной пары, несущие цветовую компоненту, притягиваются к кварку того же цвета.
- Пары виртуальных глюонов не экранируют, а усиливают (антиэкранируют) поле цветного заряда.
- Сильное взаимодействие не уменьшается, а растёт на больших расстояниях (то есть при малых энергиях).
- Поскольку виртуальные кварки экранируют цветной заряд, а глюоны антиэкранируют, изначально неочевидно, кто из них победит. Знак эффекта определяется из: $(12-1)N_c - 2n_f$. (N_c - число цветов). Если бы существовало 17 и более ароматов (типов) кварков (n_f), то они побеждали бы (КХД превращалась бы в КЭД). В 1960-е годы были известно 3 аромата (uds). Сейчас известно 6 (udscbt), и есть веские основания полагать, что новых уже не будет. Глюоны побеждают!

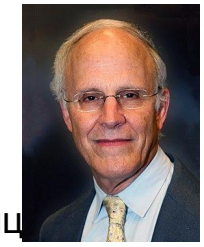
Экранирование и антиэкранирование

- Электродинамика: виртуальный положительный заряд отталкивается от реального положительного, в целом положительный заряд оттесняется на периферию и «кажется меньше чем на самом деле».
- Хромодинамика: виртуальный синий антикварк притягивается к реальному кварку, который временно стал синим. Красный цвет вытесняется на периферию.
- Хромодинамика: антисиняя компонента виртуального глюона отталкивается (!!!) от синего реального кварка. Красный цвет стягивается к реальному кварку, усиливая его изначально красный цвет



Итак: ядерное взаимодействие усиливается с расстоянием

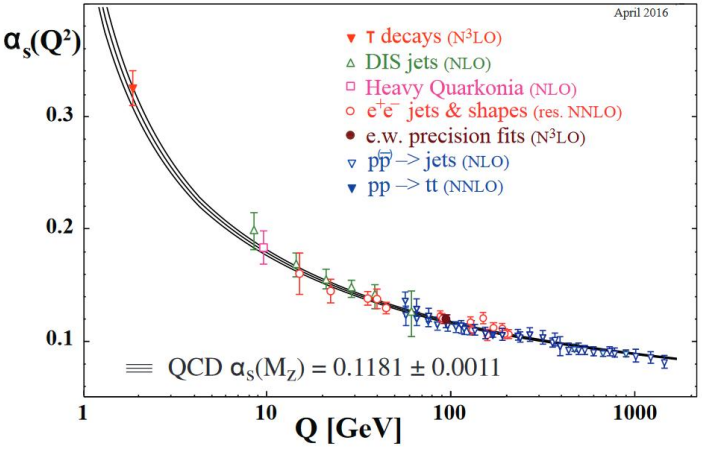
- Парадокс: ядерные силы не действуют на больших расстояниях, потому что они… становятся там слишком большими
- Допустим, глюон вылетел из ядра, чтобы перенести ядерное взаимодействие куда-то далеко
- Но ведь глюон несёт цветной заряд, т.е. сам взаимодействует с родным ядром. Едва он удалится от ядра, сила возрастёт настолько, что вернёт глюон обратно.
- С другой стороны, при больших энергиях (т.е. на малых расстояниях, внутри нуклона) взаимодействие между кварками и глюонами стремится к нулю. Кварки как бы связаны резиновыми лентами – которые вообще не ощущаются, пока кварки не разойдутся достаточно далеко
- Это явление называется асимптотическая свобода. В 1973 Гросс, Политцер и Вильчек открыли антиэкранирование и асимптотическую свободу и доказали, что это явление приводит именно к тем свойствам, которые Бьоркен обнаружил у партонов (Нобелевская премия 2004)

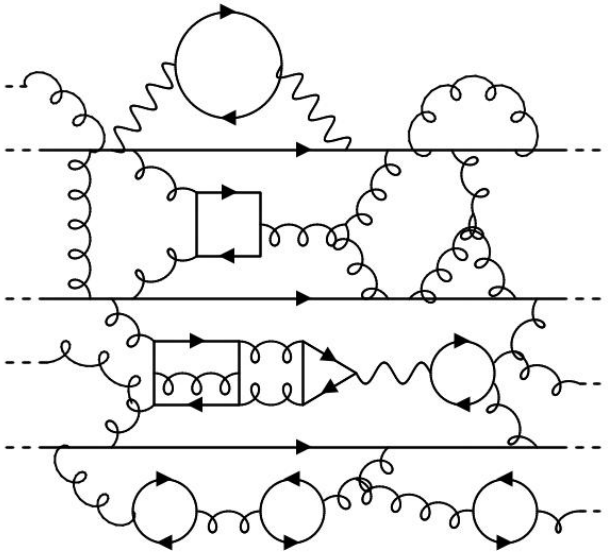




Пределы применимости КХД

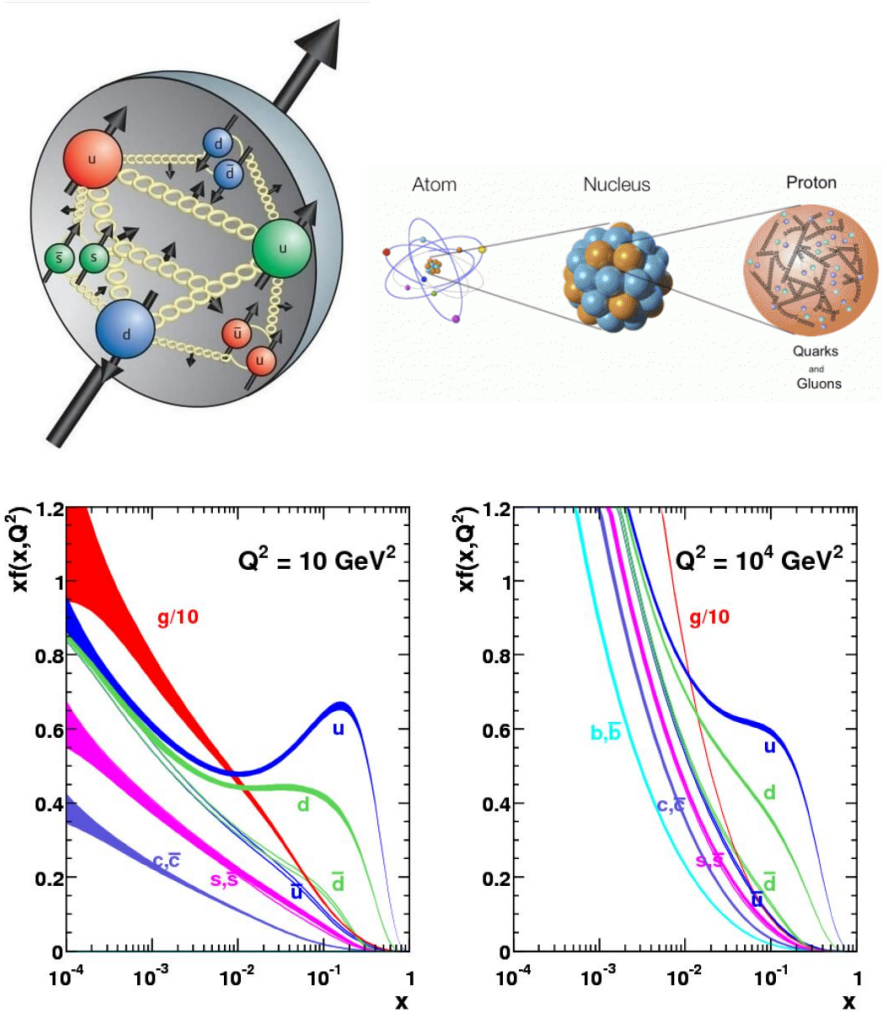
- Мы помним, что процессы электродинамики вычисляются из бесконечного ряда с разложением по степеням константы связи α=1/137
- В КХД есть своя константа связи α_S. Как и в КЭД, она зависит от энергии, причём зависимость более резкая из-за интенсивной экранировки.
- При $E=\Lambda_{QCD}\approx 0.3$ГэВ происходит катастрофа: α_S становится больше 1.
- Отныне мы больше не можем вычислить сходящийся ряд по степеням α_S. Вклад квантовых поправок «взрывается». При низких энергиях ядерная материя почти целиком состоит из виртуальных частиц, а вклад реальных – является маленькой поправкой.
- Ничего не поделаешь, приходится возвращаться к старому доброму потенциалу Юкавы и обмену пионами. Точность этой модели невелика, да сама модель «фундаментально неправильная», но «правильная» теория здесь не работает.
- С появлением мощных компьютеров стала развиваться «КХД на решётке» (Lattice QCD). Она обходит необходимость суммирования расходящихся рядов – ценой огромного времени вычислений. Кое-какие результаты получены, но пока что доверие к этой модели невелико.





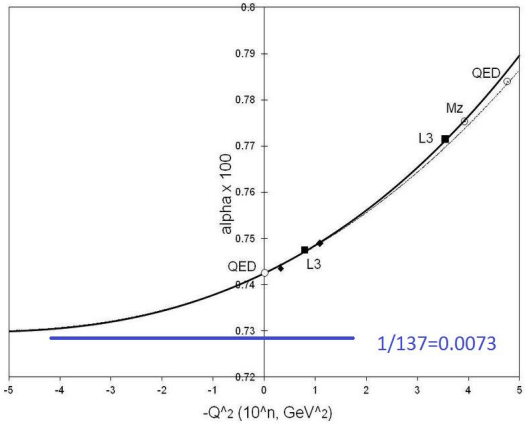
Как выглядит протон изнутри

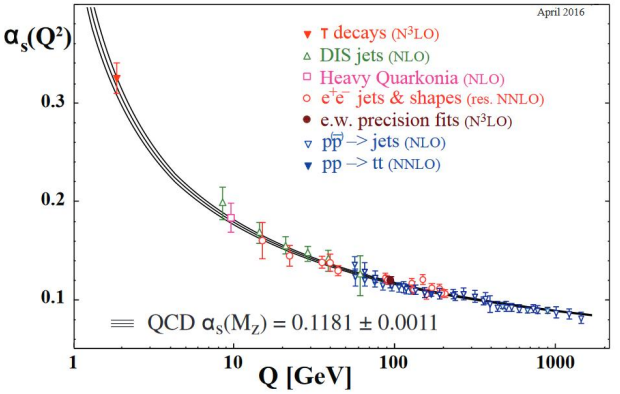
- Масса протона 938 МэВ.
- Масса составляющих его валентных кварков (uud) – около 10 МэВ.
- Остальное – виртуальные глюоны и морские (виртуальные) кварки
- В экспериментах по глубоконеупругому рассеянию состав протона измерен с хорошей точностью.
- Не только константа связи, но и многие другие величины зависят от энергии.
- Состав протона измеряется на «двумерной карте»: Q^2 (квадрат энергии налетающего фотона) и x (доля импульса протона, которую несёт данный партон)



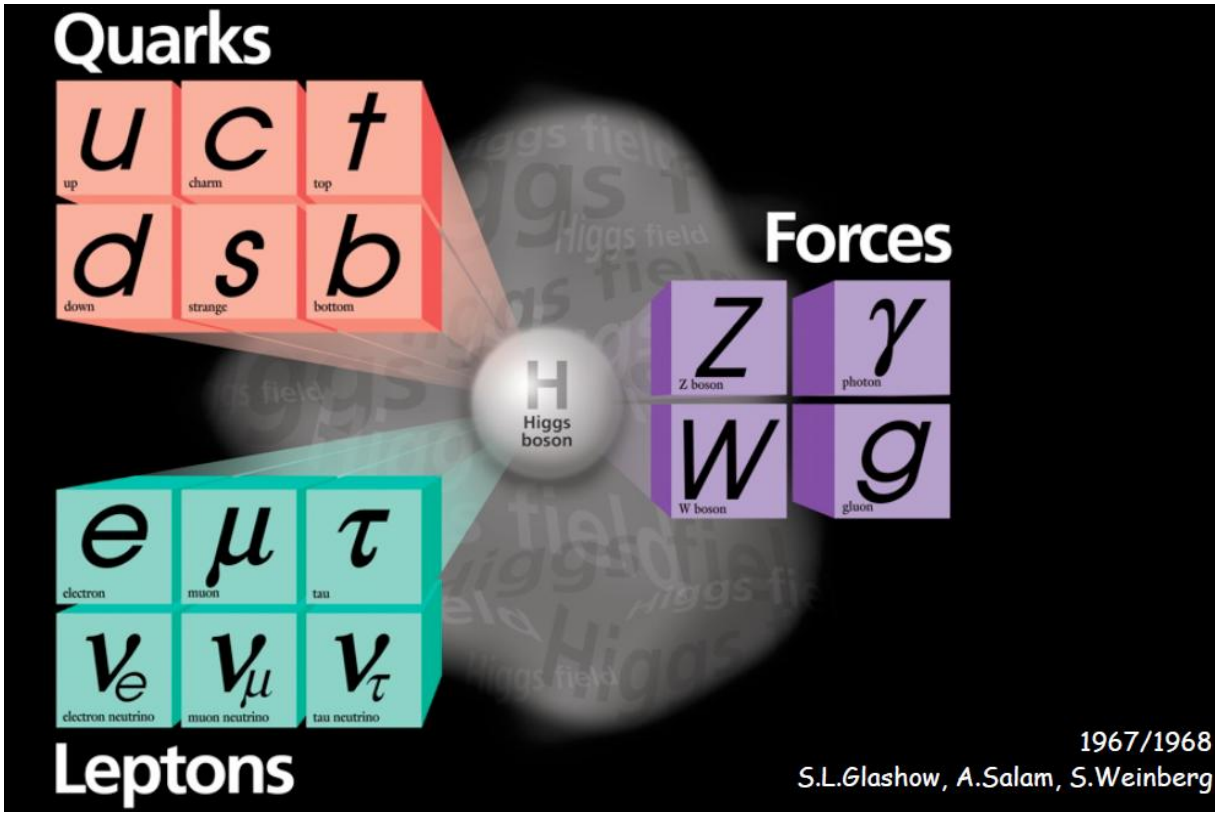
А чему равна константа сильного взаимодействия?

- «Настоящий» заряд электрона измерить невозможно - для этого нужно подойти к нему на нулевое расстояние (построить коллайдер бесконечной энергии).
- Поэтому за «эталонный образец» берут константу электромагнитного взаимодействия при нулевой энергии, $\alpha=1/137$
- С константой сильного взаимодействия α_S всё ещё сложнее. При энергиях ниже $\Lambda_{QCD}\approx 300$ МэВ она превышает единицу и становится бессмысленной величиной. При высоких энергиях (малые расстояния) наступает асимптотическая свобода и α_S уменьшается вообще говоря до нуля. Не за что зацепиться!
- Поэтому за «точку отсчёта» принята энергия, равная массе Z-бозона, $M_Z=91.2$ ГэВ. В 1990-95 коллайдер LEP в Женеве провёл сверхточные измерения на этой энергии.
- **$\alpha_S(M_Z)=0.118\pm0.001$**
- Итак, сильное взаимодействие примерно в 15 раз сильнее электромагнитного
- Если учитывать (анти)экранирование только 1 петлёй, то $1/\alpha_S(E) = \beta_0 \ln(E^2/\Lambda^2)$, где $\beta_0=(12N_C-N_C-2n_f)/12\pi$
- Здесь $2n_f$ – экранирование кварковыми парами, N_C – экранирование одиночными глюонами, $12N_C$ - антиэкранирование парами виртуальных глюонов





Частицы и поля Стандартной модели



- 1967: Глэшоу, Вайнберг, Салам
- Нобелевская премия (1979)





«Периодическая таблица» современной физики

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1\times10^{-8}$	0
e electron	0.000511	−1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	−1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	−1

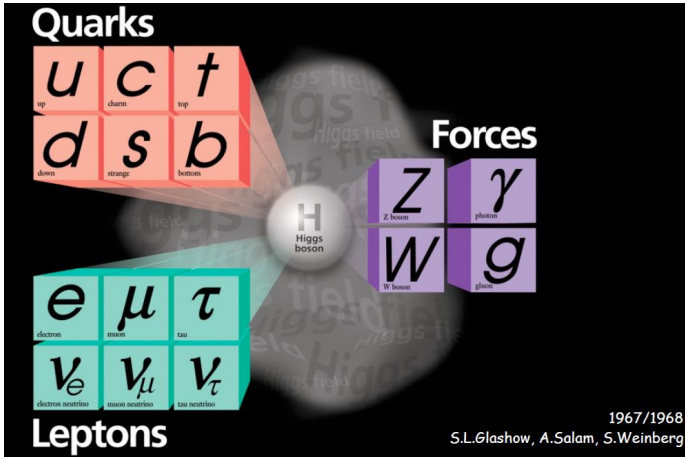
Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c^2	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	−1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	−1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	−1/3

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	−1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
g gluon	0	0

Классификация частиц

- Не считая античастиц, известно 12 частиц материи: 6 кварков и 6 лептонов.
- Те и другие делятся на 3 поколения, по 2 частицы в каждом.
- Лептонное число (количество лептонов данного поколения) сохраняется, при этом античастица считается «минус одной частицей».
- Кварки могут превращаться в кварки других поколений, хотя вероятность такого перехода в 10-100 раз меньше, чем для переходов внутри поколения.
- Взаимодействия переносятся глюонами (сильное), фотонами (электромагнитное), Z и W бозонами (слабое).
- Гравитацию (предположительно переносится гравитонами) пока не удаётся вписать в эту схему.
- Особняком стоит Хиггс-бозон, который нельзя причислить ни к материи, ни к переносчикам взаимодействия.



Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1\times10^{-8}$	0
e electron	0.000511	−1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	−1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	−1

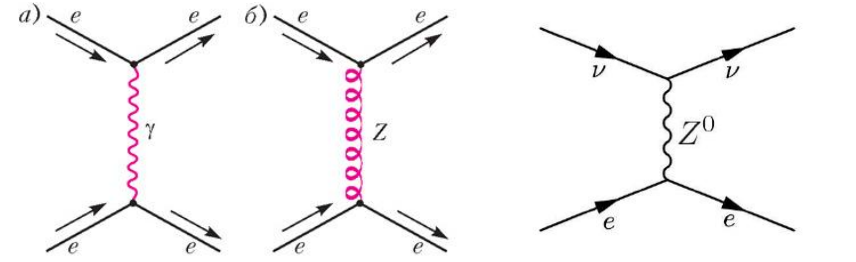
Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c^2	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	−1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	−1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	−1/3

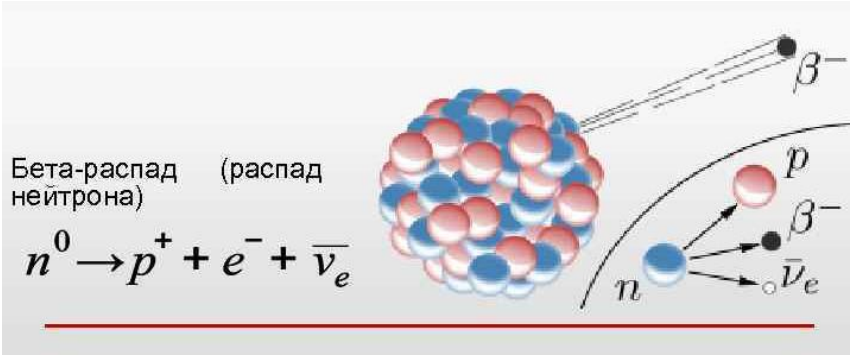
Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	−1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

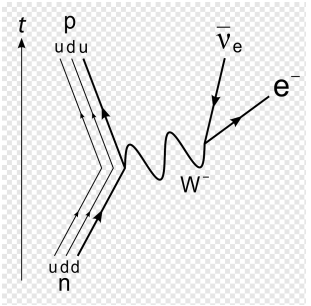
Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
g gluon	0	0

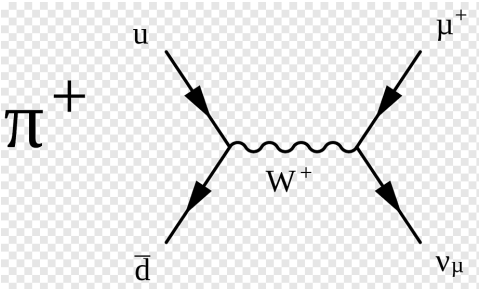
Слабое взаимодействие

- Z^0-бозон по свойствам похож на фотон, но имеет огромную массу: M_Z=91.188 ГэВ.
  - Виртуальная частица такой массы рождается на очень короткое время, поэтому слабое взаимодействие действует на расстояниях в сотни раз меньше размера протона.
  - Если коллайдер работает при энергии 91 ГэВ и выше, то слабое взаимодействие ничуть не слабее электромагнитного
- Исторически со слабым взаимодействием познакомились в реакциях бета-распада, идущих через заряженный W-бозон (M_W=80.38 ГэВ).
- При испускании/поглощении $W^{\pm}$ бозона частица меняет заряд на 1, превращаясь в своего соседа по поколению. Кварки с небольшой вероятностью могут превратиться и в кварк другого поколения.



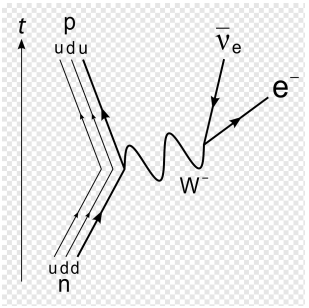


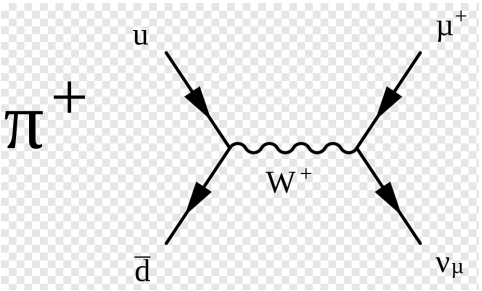


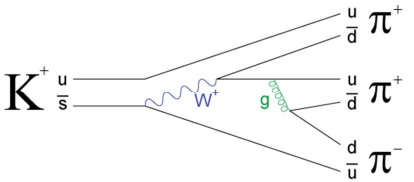


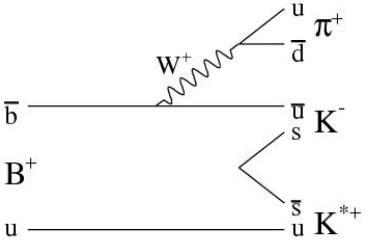
Слабые распады

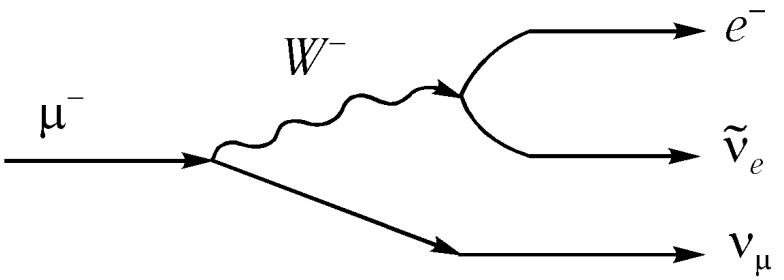
- Слабое взаимодействие вызывает распады нейтрона, пиона, мюона, и т.д.
- В распаде нейтрона разность энергий $\Delta E = M_n - (M_p + M_e + M_\nu) = 0.8$ МэВ. Вероятность рождения виртуальной частицы с массой $M_W = 80.4$ ГэВ подавлена фактором $(\Delta E / M_W)^2$.
- В результате огромное время жизни свободного нейтрона: 15 минут(!!!)
- Время жизни других частиц удобнее выражать через характерную длину пробега: мюон 700м, пион 8м, каон $K^\pm$ 4м, B-мезон (кварковый состав $b\hat{u}$) 0.5мм, тау-лептон 0.1мм



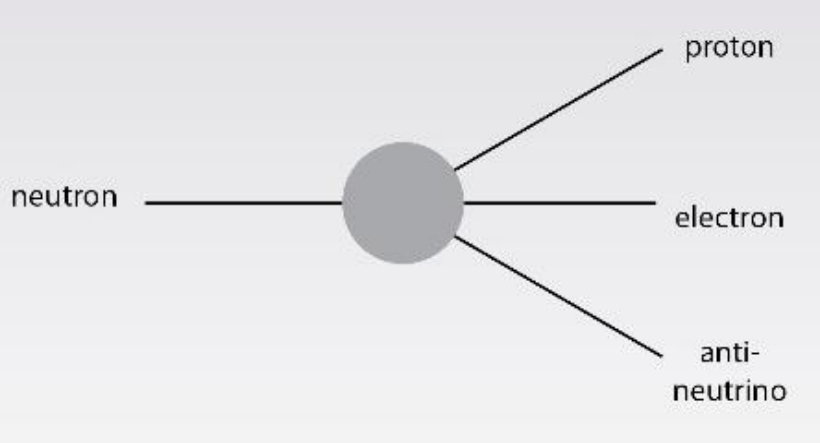


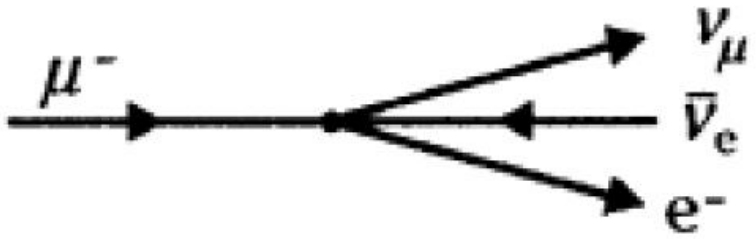






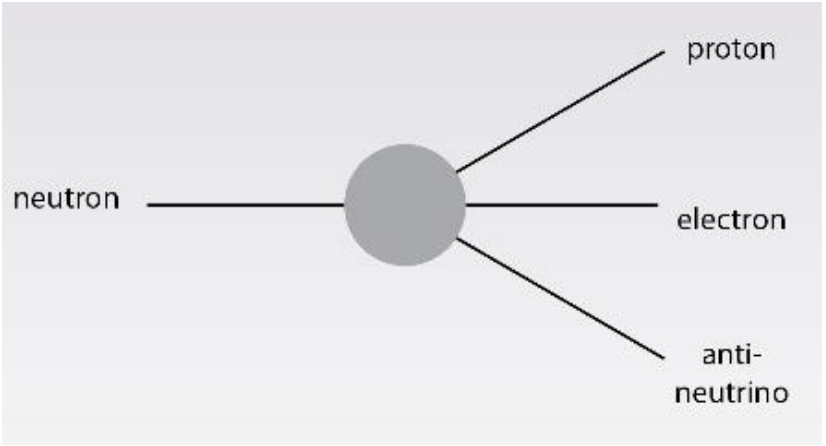
Теория слабого взаимодействия

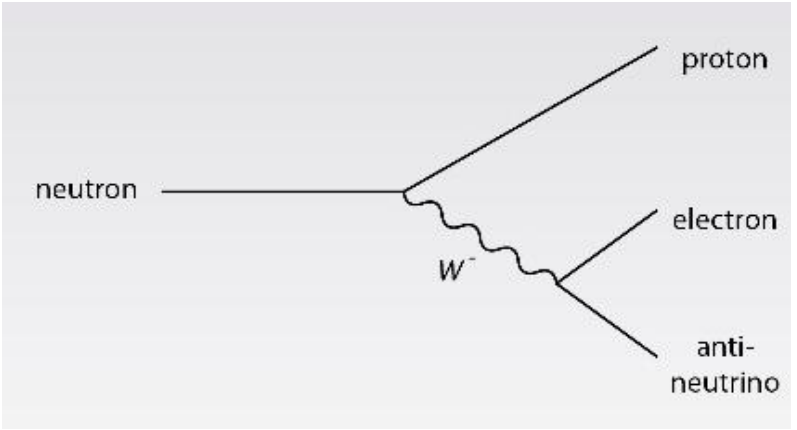


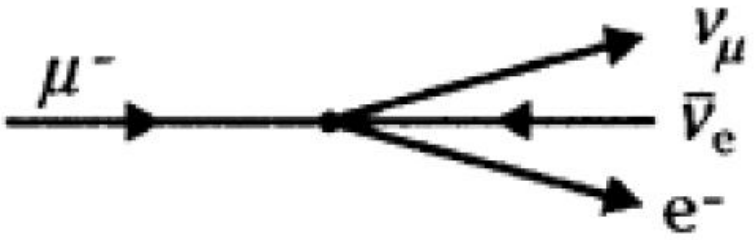


Теория Ферми:
4-фермионное взаимо-
действие в общей вершине

Теория слабого взаимодействия







Теория Ферми: 4-фермионное взаимо-действие в общей вершине



Стандартная Модель: дальнодействующее взаимодействие, пере-носимое векторными бозонами (γ/W/Z/g)

Масса переносчиков взаимодействия

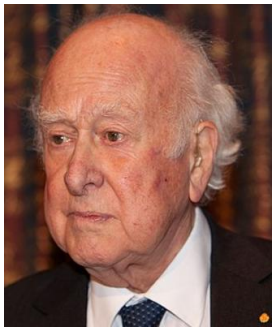
- Из времени жизни мюона была прекрасно известна «сила» слабого взаимодействия - постоянная Ферми: $G_F = 1.17 \times 10^{-5}$ ГэВ$^{-2}$

$$\tau_\mu = \frac{192\pi^3}{G_F^2 m_\mu^5}$$

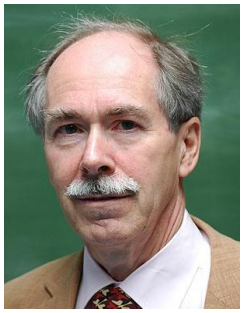
- Это определяет по порядку величины массу переносчика взаимодействия: $M \sim 1/\sqrt{G_F} \sim 300$ ГэВ
- Фактически это означает, что слабое взаимодействие не является «слабым», оно кажется таким из-за того, что в экспериментах при E ~ 1 ГэВ трудно родить 100-ГэВный переносчик. При достаточно высоких энергиях слабое взаимодействие становится порядка электромагнитного
- Проблема: калибровочная симметрия запрещает переносчику взаимодействия иметь ненулевую массу!

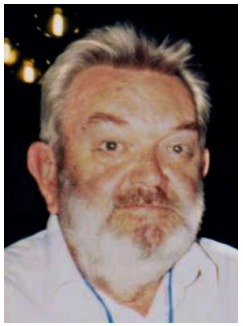
Создание новой теории

- 1964: Хиггс (при участии других групп) предложил механизм, позволяющий ввести в калибровочную теорию массивные переносчики взаимодействия
  - Нобелевская премия 2013



- 1967: Глэшоу, Вайнберг и Салам создают Стандартную Модель на основе хиггсовского механизма
  - Нобелевская премия 1979
- 1971: т'Хуфт и Вельтман доказали перенормируемость теорий, использующих хиггсовский механизм
  - Нобелевская премия 1999



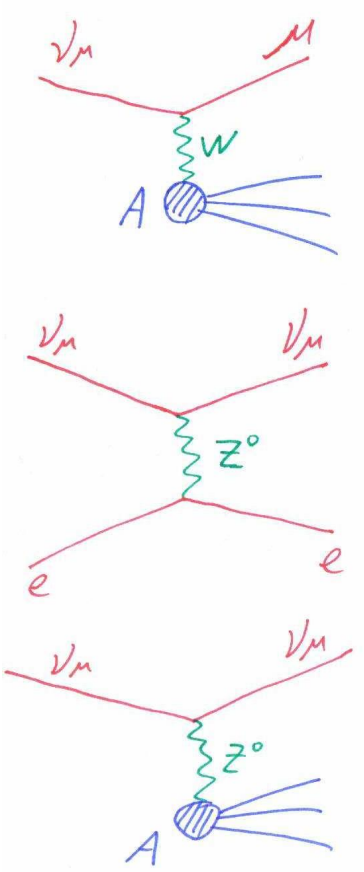


Масса переносчиков взаимодействия (II)

- Ранее приведённая формула $M_W \sim 1/\sqrt{G_F} \sim 300$ ГэВ была сильно приближённой
- На самом деле: $M_W = \sqrt{\frac{\pi\alpha}{G\sqrt{2}}}\frac{1}{\sin\theta_W}$ $\qquad \cos\theta_W = \frac{M_W}{M_Z}$
- Угол Вайнберга пришёл к нам из ранней Вселенной, он описывает смешивание безмассовых переносчиков взаимодействия, до того как они обрели массу по механизму Хиггса
- Какой же угол подставлять в формулу??
- Например, при θ_W=45º, получим M_W=53ГэВ
- Однако неопределённость – вплоть до бесконечности

1973: Открытие нейтральных токов и измерение угла Вайнберга

- Стандартная Модель предсказала существование нейтральных токов.
- При низких энергиях их можно изучать только на нейтринных пучках, т.к. при $E<M_Z$ электромагнитное взаимодействие на много порядков больше
- Заряженный ток: нейтрино превращается в мюон (мюон «внезапно появляется»)
- Нейтральный ток: нейтрино рассеивается «квазиупруго» - либо ниоткуда «внезапно появляется» электрон, либо осколки ядра (и ничего более)



1973: Открытие нейтральных токов и измерение угла Вайнберга

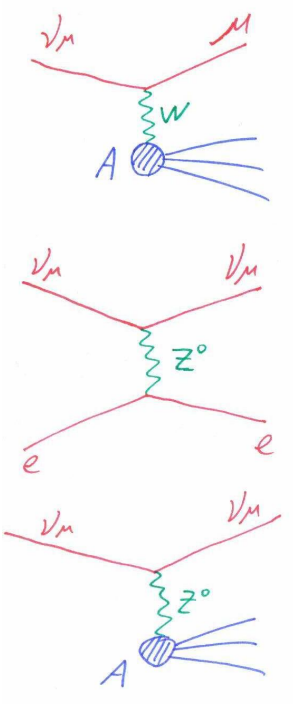
- Пузырьковая камера Gargamelle (CERN) обнаружила несколько сотен событий нейтрального тока
- Стандартная Модель предсказывает отношение:

$$1/2 - \sin^2\theta = \frac{NC - \overline{NC}}{CC - \overline{CC}}$$

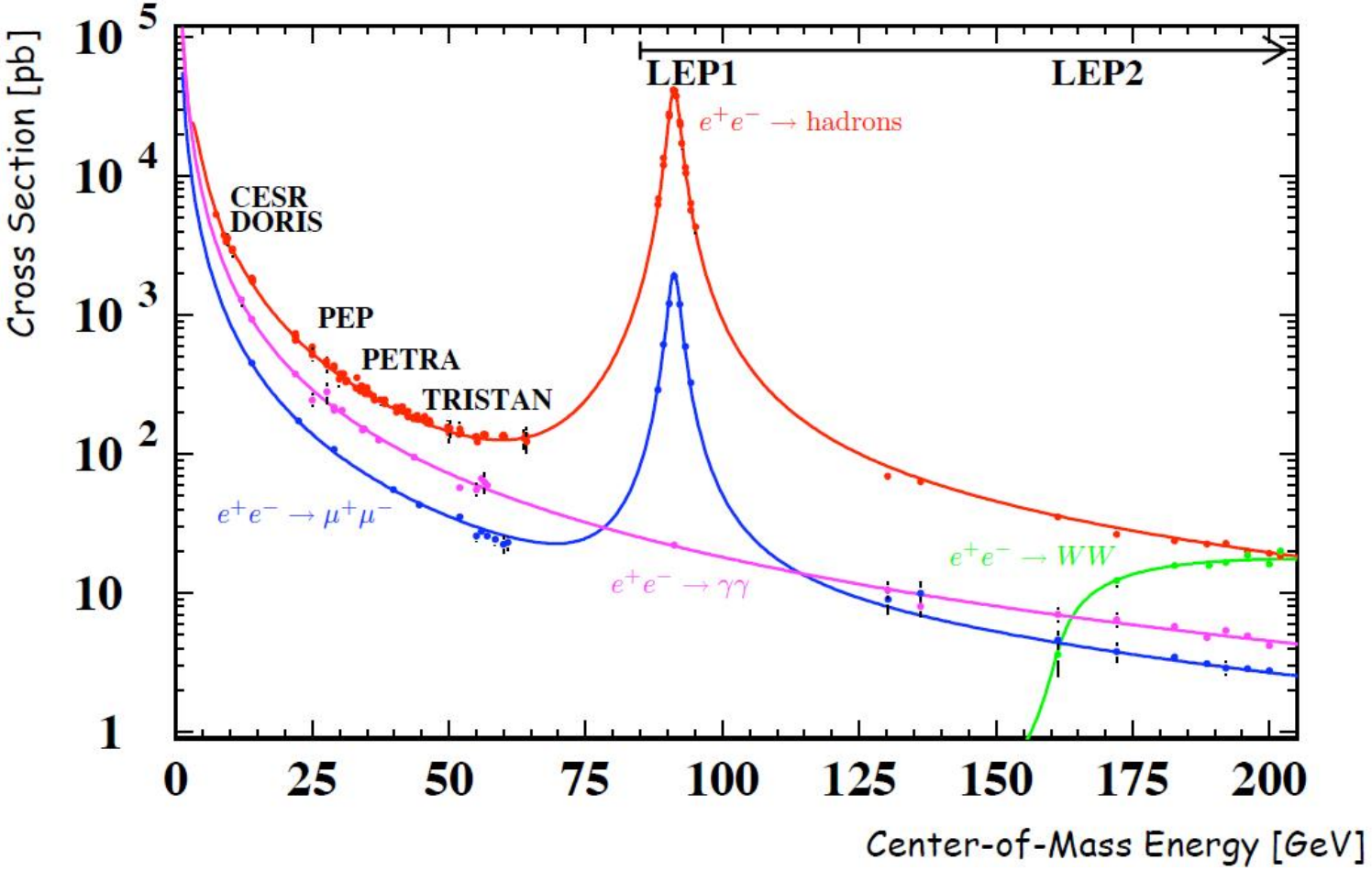
- Результат Gargamelle: NC/CC=0.21±0.03, $(NC/CC)_{bar}$=0.45±0.09
- Отсюда: $\sin^2\theta_W$ =0.35±0.05
- Современное значение: 0.2232
- Подставляя в формулы величину Gargamelle, получим: M_W=63ГэВ







Сечение e^+e^- аннигиляции



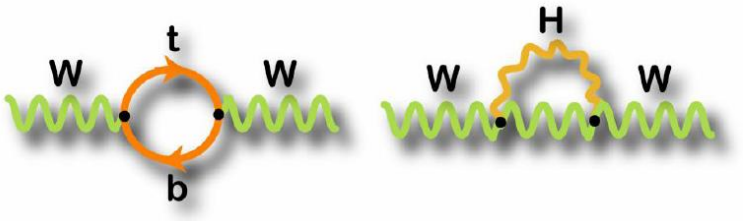
Точные измерения электрослабого взаимодействия

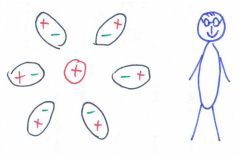
- LEP:
  - M_Z=91.187 ГэВ, M_W=80.37 ГэВ, $\sin^2\theta_W$=0.2232
- Подставим синус в формулу
- Получаем: M_W=78.9 ГэВ

$$M_W = \sqrt{\frac{\pi\alpha}{G\sqrt{2}}}\frac{1}{\sin\theta_W}$$

- Вспоминаем, что при высоких энергиях заряд электрона меньше экранируется виртуальными частицами. Заменяем α=1/137 на 1/129.
- Получаем: M_W=81.3 ГэВ (современное значение: 80.35)
- Эта нестыковка –слабые квантовые поправки
- После их учёта согласие достигает $\sim 10^{-4}$

Квантовые поправки





$$\rho = \frac{M_W^2/M_Z^2}{1-\sin^2\Theta_W} =$$

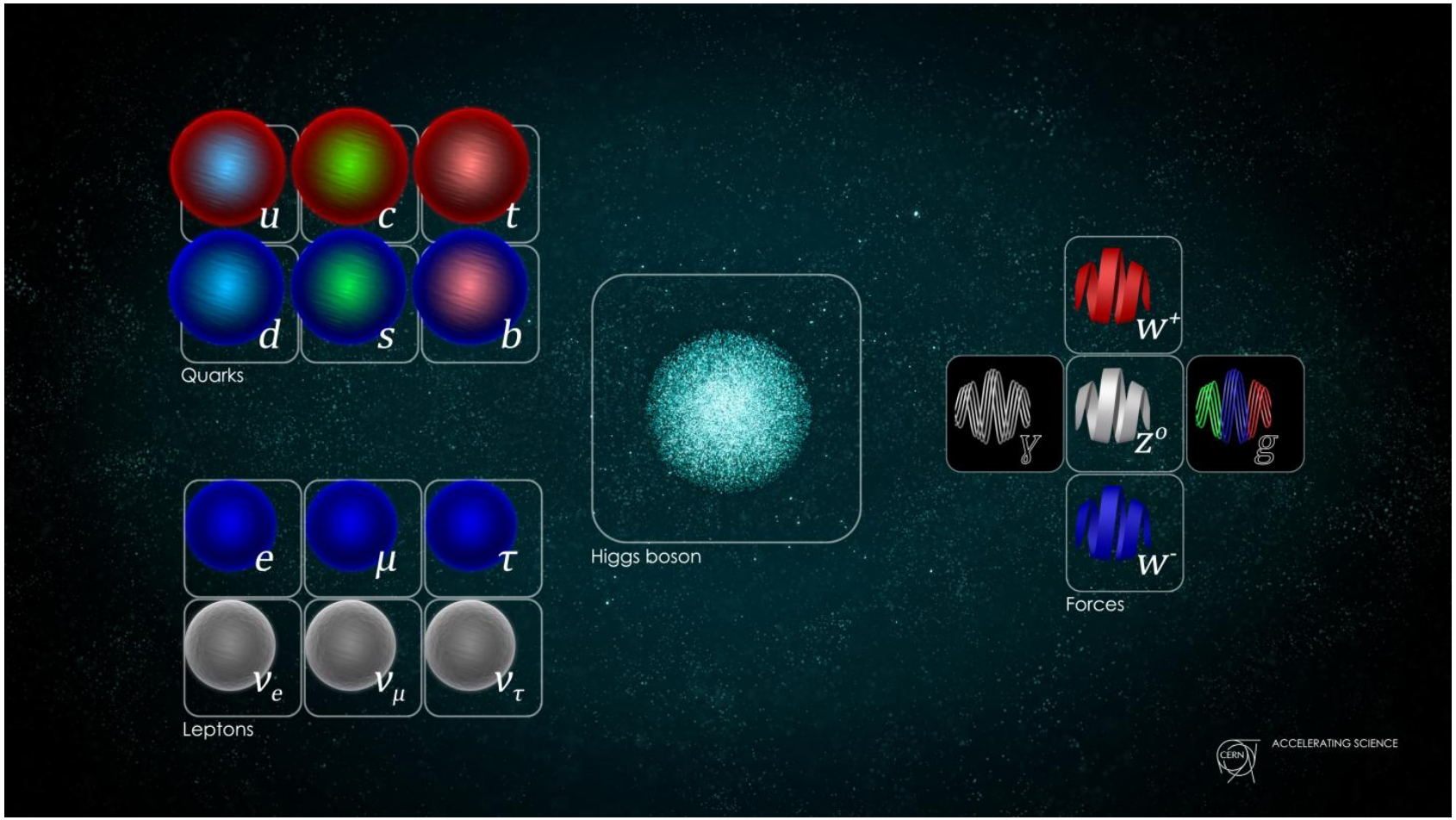
$$= 1 + \frac{3G_F}{8\pi^2\sqrt{2}}m_t^2 + \frac{\sqrt{2}G_F}{16\pi^2}m_t^2\left[\frac{11}{3}\ln\left(\frac{M_H^2}{M_W^2}\right) + \ldots\right] + \ldots$$

- Изучая W и Z бозоны – мы с некоторой вероятностью «натыкаемся» на виртуальные топ-кварк и Хиггс-бозон
- Это позволяет косвенно оценить свойства t и H, хоть они и не рождаются в виде реальных частиц

Кстати, о теме лекции: а что такое вообще «элементарная частица»

- Когда-то слово «атом» означало «неделимый»
- Сейчас мы знаем, что атом очень даже делим
- Однако название «атом» сохраняется по традиции
- Нечто подобное случилось с термином «элементарные частицы»…

Фундаментальные частицы



Фундаментальные или элементарные?

- Фундаментальные частицы – точечные (не имеющие структуры) объекты, входящие в состав лангранжиана теории
- Элементарные частицы могут быть синонимом фундаментальных…
- …или могут означать «реальные» частицы – взаимодействия и/или распады которых наблюдаются в эксперименте
  - Элементарные частицы: все фундаментальные, кроме несущих цветовой заряд (кварки и глюоны), плюс все адроны
- Топ-кварк занимает двойственное положение: он распадается быстрее, чем успевает войти в состав адрона, поэтому его причислить одновременно к фундаментальным и элементарным частицам

Классификация элементарных частиц по времени жизни

- Стабильные: электрон, протон, фотон, нейтрино(?)
- Квазистабильные ($c\tau$ более метра): нейтрон, мюон, пион, заряженный каон, K^0_L
- Короткоживущие ($c\tau$ от микрона до метра): тау-лептон, K^0_S, гипероны ($\Lambda/\Sigma/\Xi/\Omega$), нижние состояния адронов, содержащих c- и b-кварки
- Нестабильные ($c\tau$ менее микрона): Хиггс-бозон, поля слабого взаимодействия $W^{\pm}$ и Z^0, топ-кварк, сотни (!) адронных резонансов: $\pi^0,\rho,K^*,\omega,\eta,J/\psi,\Upsilon$, тетракварки, пентакварки,…

Фундаментальные взаимодействия

Взаимо-действие	Участвуют	Переносчик	Интенсив-ность	Радиус
Сильное	Кварки (и глюоны)	Глюон	0.1-1.0	10^{-15}м
Электро-магнитное	Заряженные частицы (и поля)	Фотон	1/137	∞
Слабое	Все частицы (также W,Z)	$W^{\pm}$,Z^0	10^{-10} (эффективно)	10^{-18}м
Гравитаци-онное	Все частицы и поля	Гравитон (?)	10^{-38} (эффективно)	∞

Совсем дальние горизонты: Великое объединение

