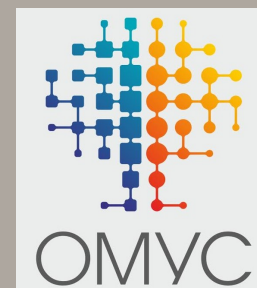


Удивительный Квантовый мир

Алексей Дзюба / ПИЯФ НИЦ КИ

02 октября 2015 г. в ИЦЯЭ СПб



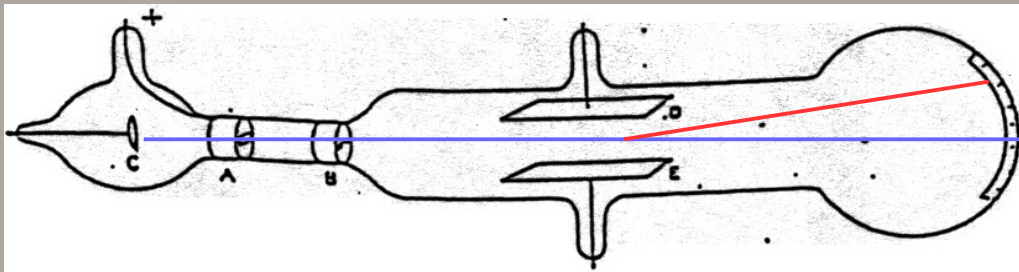
Открытие электрона

– Исследование катодных лучей (1895-97 г.)

Перрен : поток отрицательно-заряженных частиц

Томпсон : электростатическое и магнитное поля

КЛ – поток частиц легче водорода



– Первая модель атома

– Кинескоп : КЛ + фотоэффект

– Радиоактивность (1896 г.)

Резерфорд 1899 г. : α -, β - и γ -лучи

Беккерель 1900 г. : $q_{\beta} / m_{\beta} = q_{\text{КЛ}} / m_{\text{КЛ}}$



Джозеф Джон Томпсон

Излучение абсолютно черного тела

– Все задачи об излучении можно свести к задачам об излучении АЧТ

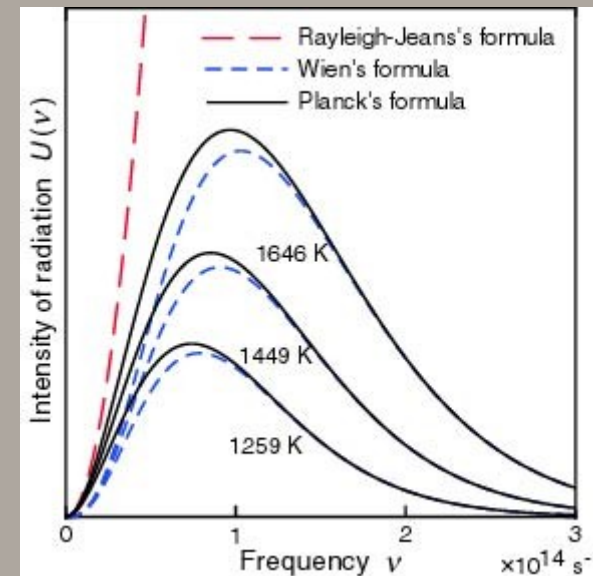
– Классическая физика (формула Релея-Джинса) приводит к УФ-катастрофе

– Формула Планка

$$u(\omega, T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar \omega}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1}$$

– Излучение происходит порциями – квантами

– Постоянная Планка



Объяснение фотоэффекта

- Свет уже существует в виде квантов.
- **Фотоэффект** – испускание электронов веществом под действием эл.-м. излучения (пороговый)
- Энергия кванта тратится на вырывание электрона и его кин. энергию

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$$

- И был это не единственный аргумент Эйнштейна
- 1905 г. «Год чудес»
(лат. *Annus Mirabilis*)



Альберт Эйнштейн

Специальная теория относительности (СТО)

- Неинвариантность уравнений Максвелла относительно преобразований Галилея.
- СТО: законы природы одни и те же для всех ИСО
 - + постоянство скорости света
- *Лоренц, Лармор, Пуанкаре.*
- Преобразования Лоренца:

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- $v \ll c$: СТО → Классич. Мех.
- *Принцип соответствия*
- «Год чудес» Объяснение броуновского движения



Альберт Эйнштейн

СТО (продолжение)

– Принцип наименьшего действия и ур-я Лагранжа

$$S = -\alpha \int ds = -\alpha c \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{1 - \mathbf{u}^2/c^2} dt$$

$$L = -mc^2 \sqrt{1 - \mathbf{u}^2/c^2}$$

– Энергия и импульс в СТО :

$$\mathbf{p} = \frac{\partial L}{\partial \mathbf{u}} = \frac{m\mathbf{u}}{\sqrt{1 - \frac{\mathbf{u}^2}{c^2}}},$$

$$E = \mathbf{p}\mathbf{u} - L = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{\mathbf{u}^2}{c^2}}}$$

– В пределе малых скоростей :

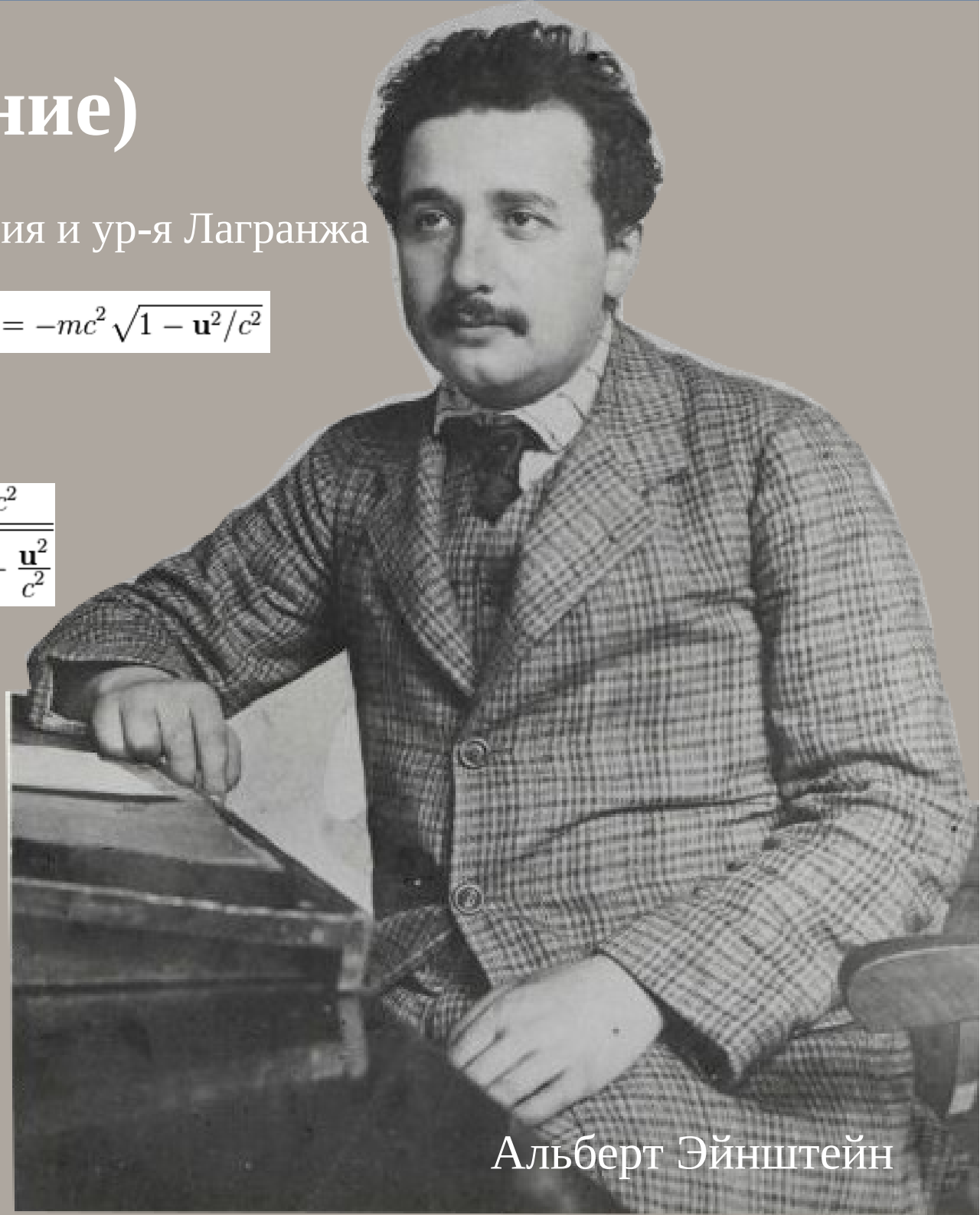
$$\mathbf{p} \approx m\mathbf{u} + \dots$$

$$E \approx mc^2 + \frac{m\mathbf{u}^2}{2} + \dots,$$

– Связь энергии и импульса :

$$E^2 - \mathbf{p}^2 c^2 = m^2 c^4,$$

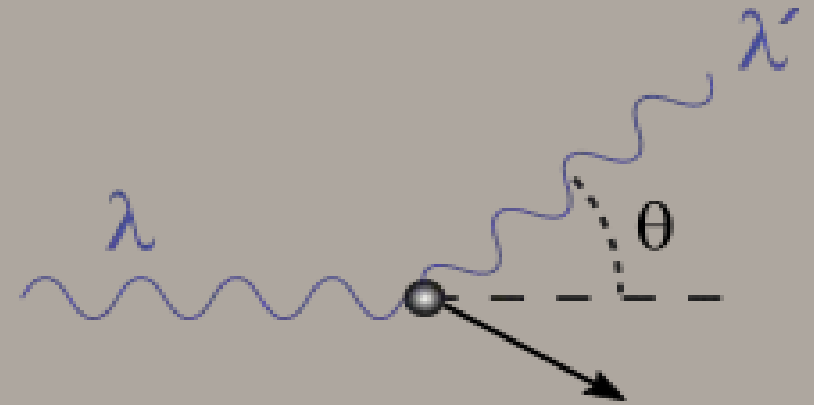
– Удобна система: $c = \hbar = 1$



Альберт Эйнштейн

Эффект Комптона

- 1923 г. Рассеяние фотонов на свободном электроне.
- Фотон в результате рассеяния меняет энергию (длину волны)



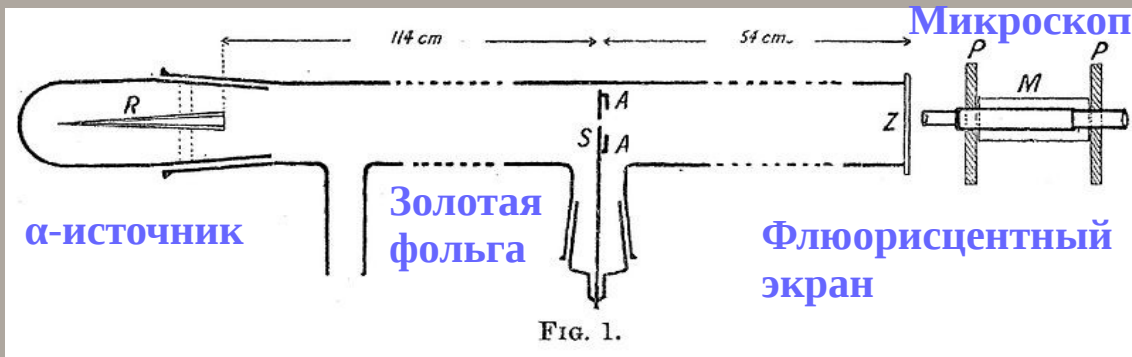
- Подтверждение теории световых квантов Эйнштейна. Корпускулярно-волновой дуализм.

- Существует и обратный эффект Комптона

Артур Комптон

Обнаружение атомных ядер

– 1908 г. : опыты Гейгера-Марсдена



– 1909 г. Резерфорд предлагает измерить
Рассеяние на большие углы → *Успех!*

– “Это было почти столь же невероятно,
как если бы вы стреляли 15-дюймовым
снарядом в кусок тонкой бумаги,
а снаряд возвратился бы к вам
и нанёс удар.” (Э.Р.)

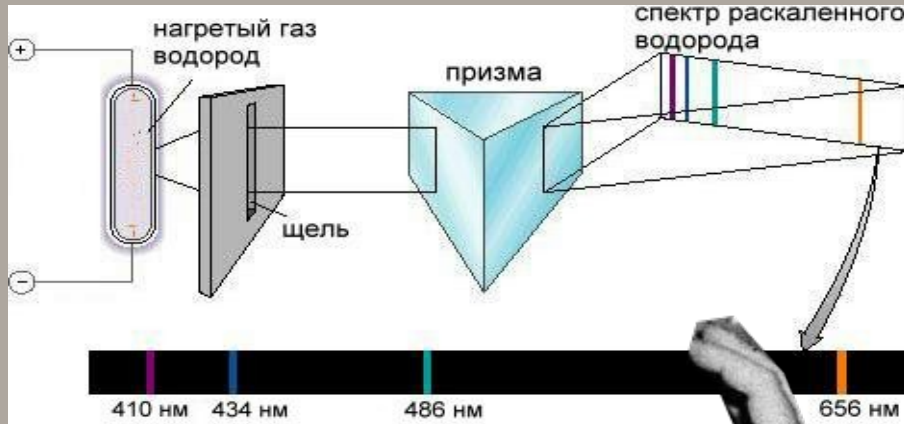
– Планетарная модель атома (несовместима с законами классической физики)

– 1919 г. Резерфорд выбивание протона из ядра азота [гипотеза Праута (1816)]



Эрнест Резерфорд

Модель атома Нильса Бора



– Дискретные спектры атомов

- Атом может находиться только в особенных состояниях с определенной энергией
- Излучение и поглощение энергии атомом происходит при скачком, при этом:

$$mvr = n\hbar, n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\varepsilon = E_{n2} - E_{n1},$$

- 1916 г. Зоммерфельд : некруговые орбиты.
- Квазиклассический подход (ур. движ. – классич.; ур. квантования -- квантовое)

Нильс Бор

Волны материи

– Принцип корпускулярно-волнового дуализма для света: в одних экспериментах свет ведёт себя как волна, в других как частица

– 1924 г. : де Бройль : распространим этот принцип на частицы имеющие массу покоя

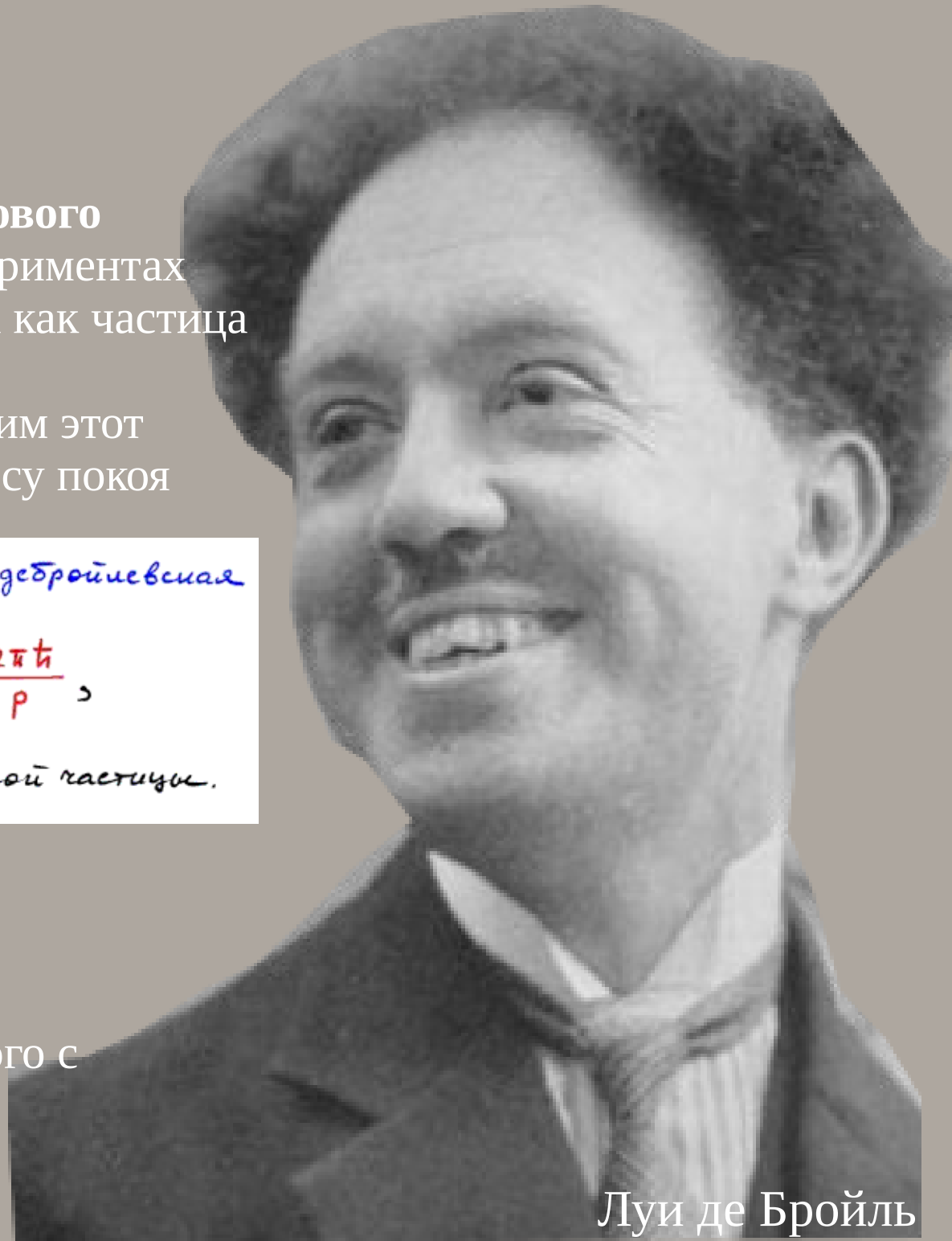
Длина волны колебательного процесса (дебройлевская длина волны частицы) равна:

$$\lambda = 2\pi \frac{c}{\omega^{(c)}} = 2\pi \hbar \frac{c^2}{\hbar \omega \phi} \frac{\sqrt{1-v^2/c^2}}{v} = \frac{2\pi \hbar}{p} \quad \rightarrow m_0$$

где $p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ – импульс релятивистской частицы.

– <http://nuclphys.sinp.msu.ru/pm/>

– Но каков же физический смысл колебательного процесса, связанного с движением?



Луи де Бройль



Волновая функция

– Если есть колебательный процесс соответствующей микрочастицы, то для него можно и нужно записать волновое уравнение

– Волны де Бройля для частиц в потенциале \leftrightarrow световые волны в среде с переменным показателем преломления

– Стационарное ур-е Шрёдингера

$$\left(\Delta + \frac{2m\phi}{\hbar^2} (E - U(\vec{x})) \right) \psi(\vec{x}) = 0,$$

– Нестационарное ур-е Шрёдингера:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{x}, t)}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m\phi} \Delta + U(\vec{x}, t) \right) \Psi(\vec{x}, t)$$

Соотношение неопределённости

– Первая формулировка квантовой механики (1925 г.)
матричная механика Гейзенберга-Борна-Йордана

– Физические величины, характеризующие частицу,
описываются матрицами, изменяющимися во времени
(представление Гейзенберга)

$$\langle f(t) \rangle_{\Psi} = \underbrace{\langle \Psi^{(S)}(t) | \hat{f}^{(S)}(\emptyset) | \Psi^{(S)}(t) \rangle}_{\text{представление Шредингера}} = \underbrace{\langle \Psi^{(H)}(\emptyset) | \hat{f}^{(H)}(t) | \Psi^{(H)}(\emptyset) \rangle}_{\text{представление Гейзенберга}}$$

– Уравнение:

$$\left(\frac{df}{dt} \right)^{(H)}(t) = \frac{i}{\hbar} [\hat{H}^{(H)}(t), \hat{f}^{(H)}(t)]$$

$$\Delta x_i \Delta p_i \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta \theta_i \Delta J_i \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

– Первоначально – эвристическое количественное соотношение.

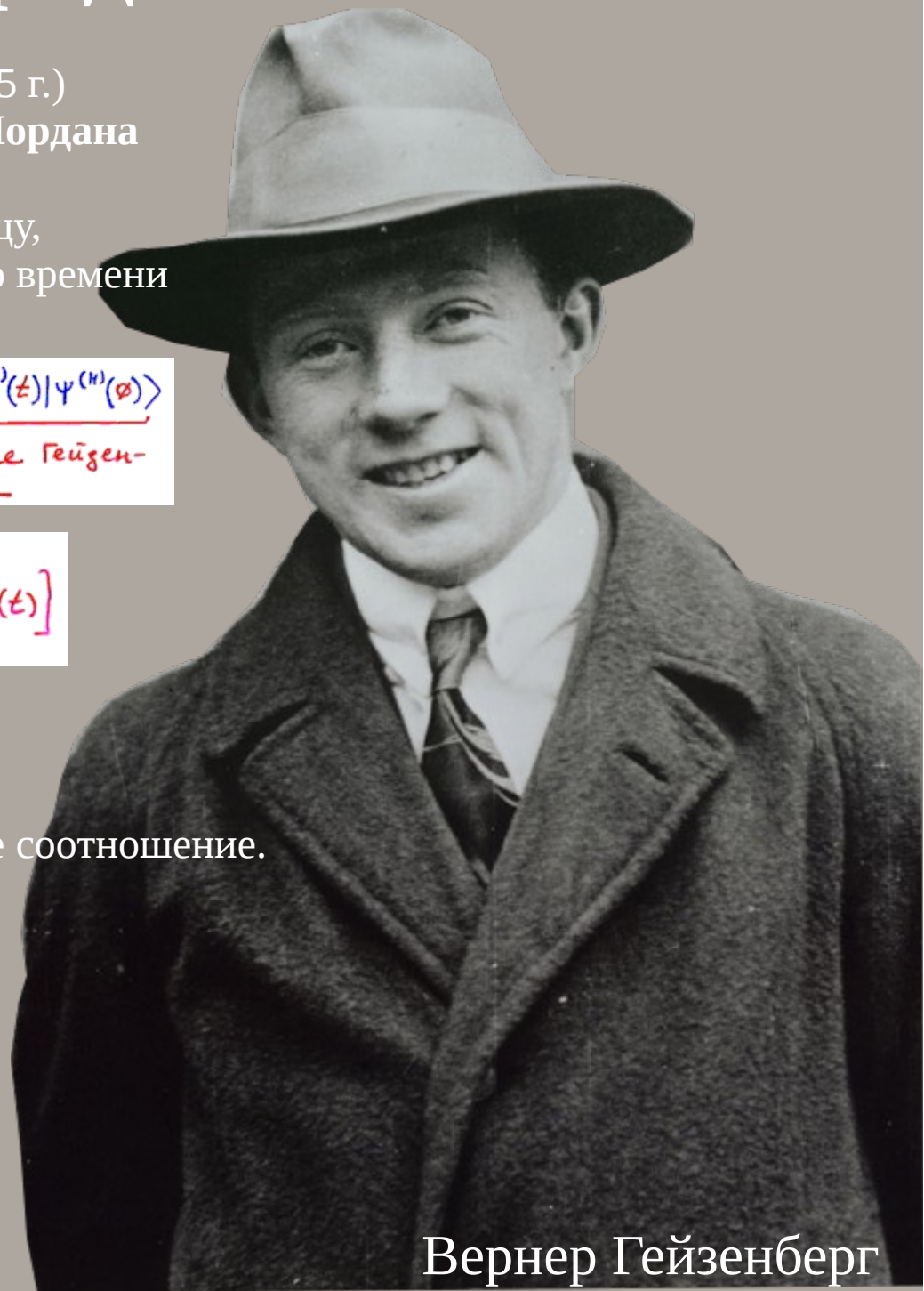
1930 г. : Робертсон, Шрёдингер

1936 г. : Дирак

1945 г. : Мандельштам, Тамм

– Представление взаимодействия

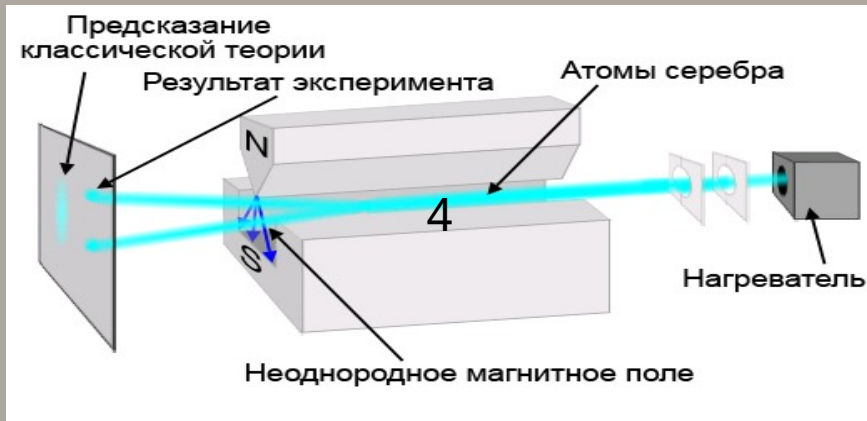
– Формулировка Фейнмана



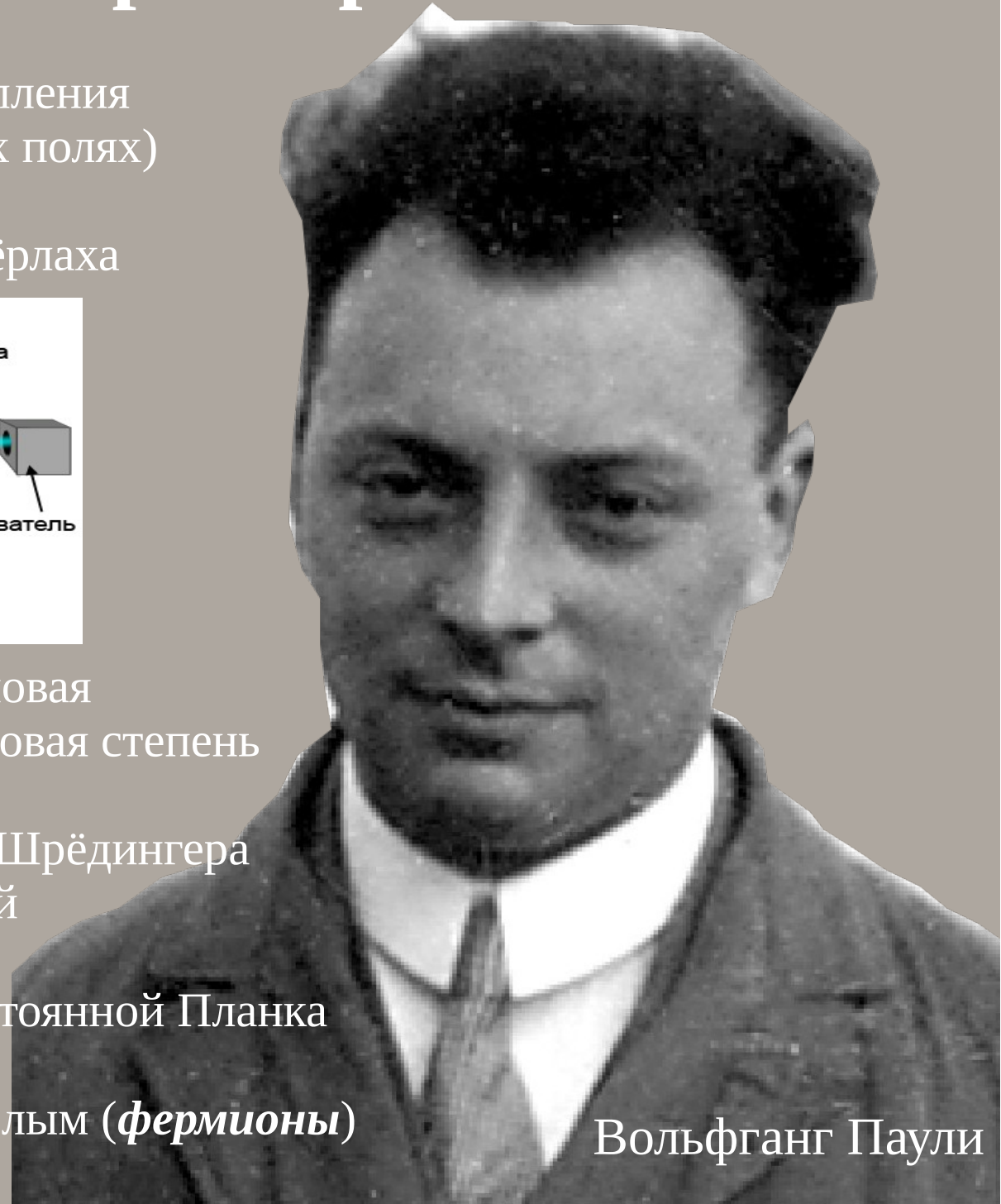
Вернер Гейзенберг

Спин – квантовая характеристика

- 1896 г. : Эффект Зеемана (расщепления атомных спектров в магнитных полях)
- 1921 г. : Эксперимент Штерна-Гёрлаха



- 1924 г. для электрона вводится новая двухкомпонентная чисто квантовая степень свободы – спин.
- 1927 г. Паули модифицирует ур. Шрёдингера с учетом спиновой переменной
- Спин измеряется в единицах постоянной Планка
- Бывает целым (*бозоны*) и полуцелым (*фермионы*)



Вольфганг Паули

Непостижимая эффективность

Математики (http://ufn.ru/ufn68/ufn68_3/Russian/r683f.pdf)



Джероламо Кардано



Давид Гильберт

Антиматерия

- 1930 г. Дирак : теория релятивистского электрона, естественным образом описывала спин и магнитный момент.

$$(i\gamma^{\mu}\partial_{\mu} - m)\psi = 0$$

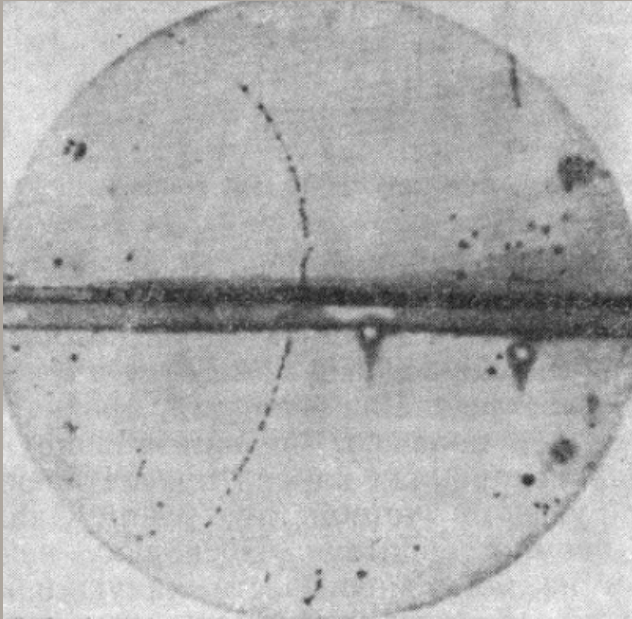
- Волновая функция, являвшаяся решением ур-я Дирака содержала две дополнительные компоненты характеризующиеся отрицательной энергией
- Дирак постулировал, что это решение соответствует положительно-заряженной частице (первоначально Протон)
- Протон не может быть античастицей для электрона
- Дирак указал, что тогда и для протона должна быть своя античастица – антипротон.



Поль Дирак

Экспериментальное открытие античастиц

– Исследование космических лучей при помощи камеры Вильсона + магнитное поле.



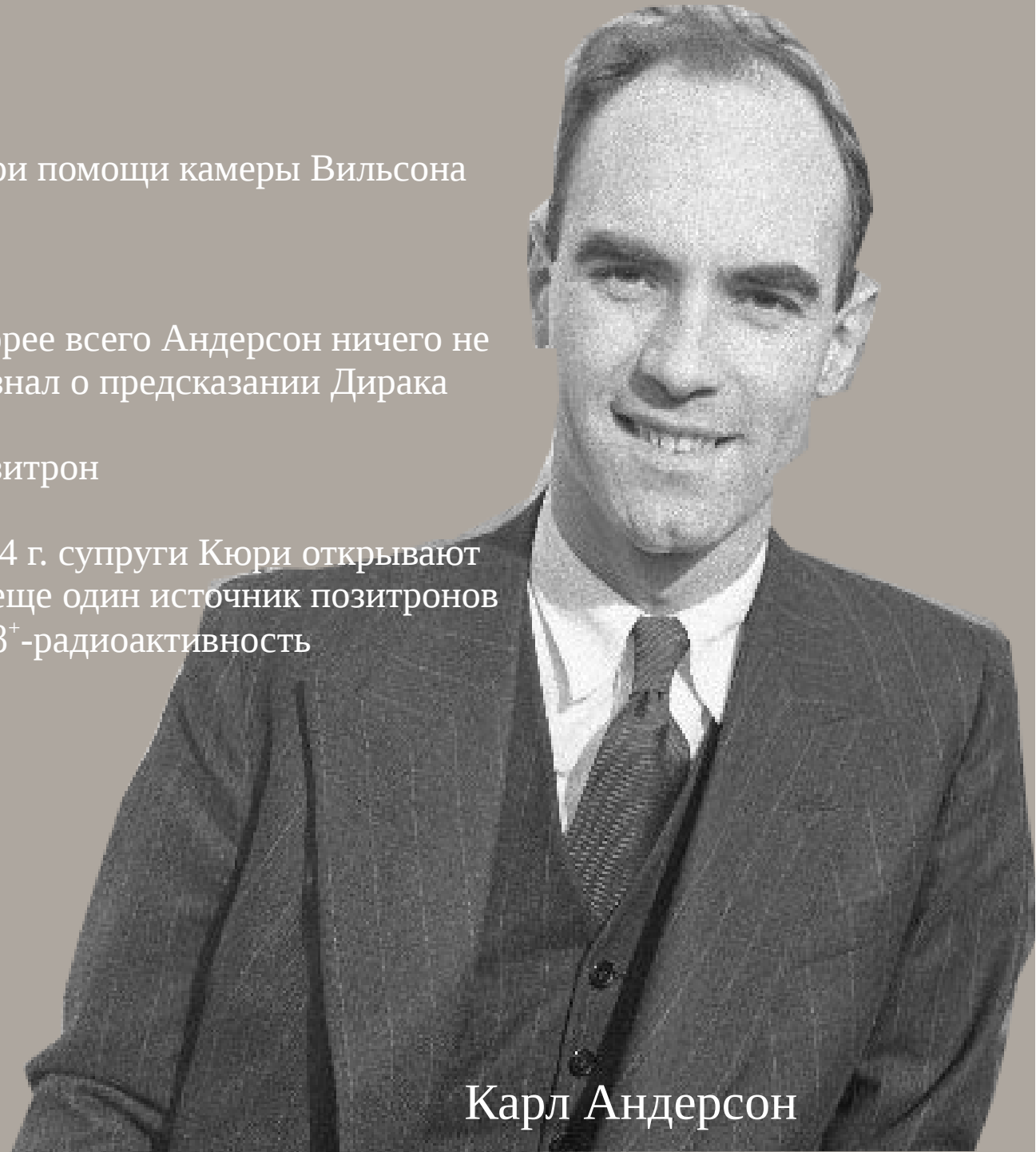
– Скорее всего Андерсон ничего не знал о предсказании Дирака

– Позитрон

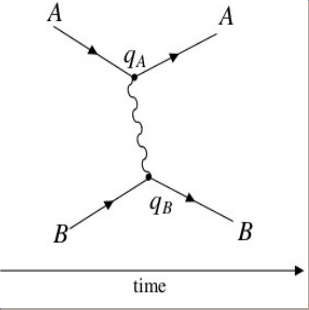
– 1934 г. супруги Кюри открывают еще один источник позитронов β^+ -радиоактивность

– 1955 г. Сегрэ. Чэмберлен
открытие антипротона

– 90-е годы создание антивещества



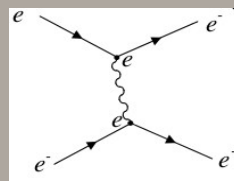
Карл Андерсон



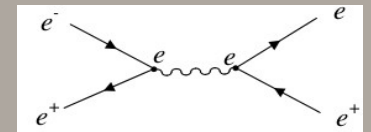
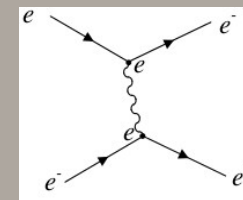
Квантовая электродинамика

- 1940 г. Лэмб, лэмбовский сдвиг
- 1947 г. Бете, идеи перенормировки массы и заряда
- Конец 40-х: Швингер, Томонага, Фейнман, Дайсон – формулировка КЭД
- Расчет аномального магнитного моментов электрона (и мюона) и объяснение лэмбовского сдвига
- Диаграммы Фейнмана

Рассеяние электронов



Рассеяние электронов на позитронах

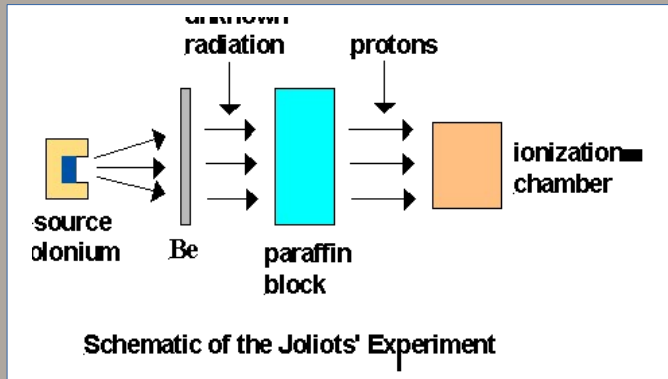


- Каждой диаграмме соответствует формула!
- КЭД пертурбативная теория
- Фейнман “КЭД - странная теория света и вещества.”

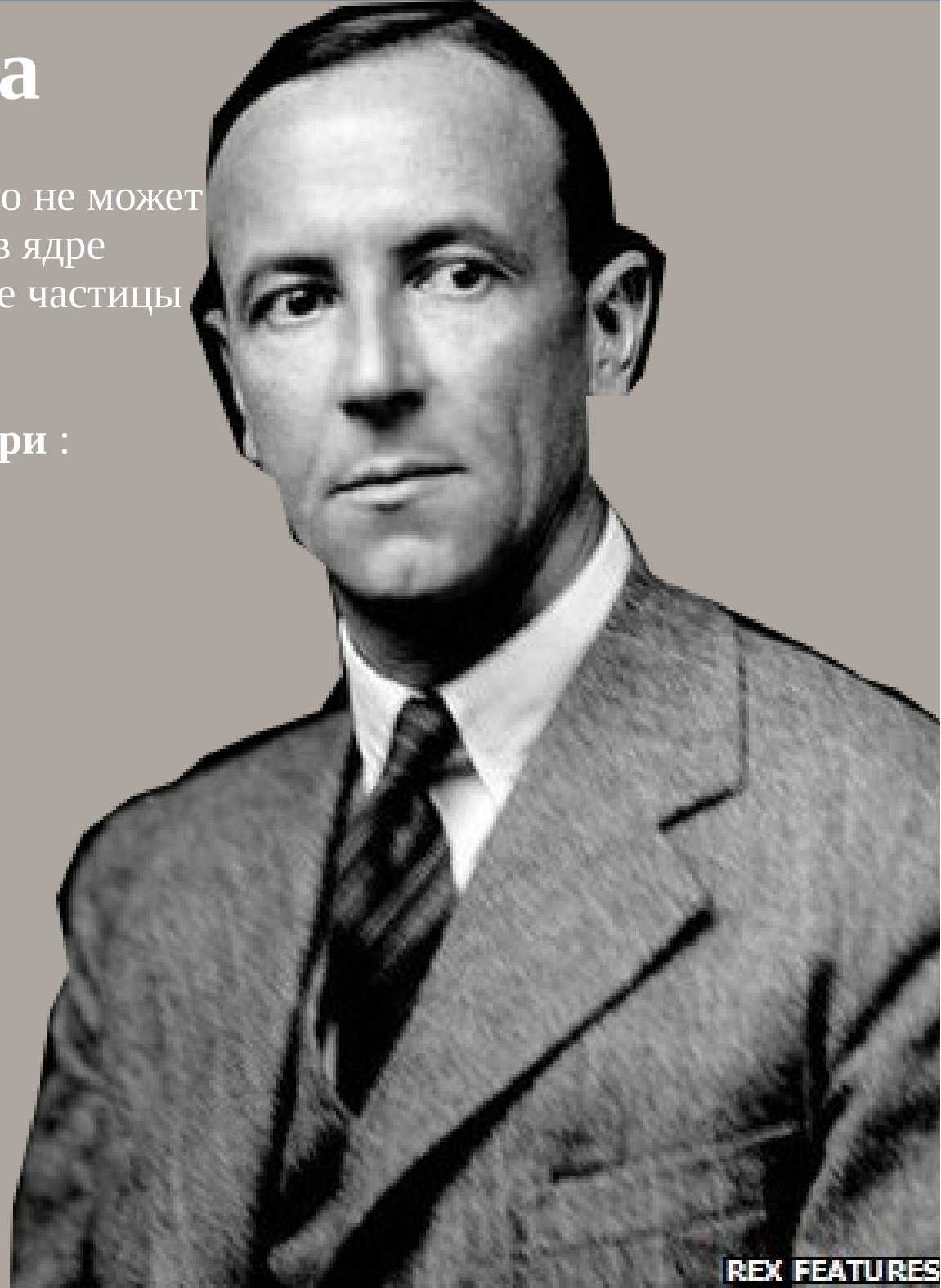
Ричард Фейнман

Открытие нейтрона

- 1930 г. Амбарцумян, Иваненко : ядро не может состоять из протонов и электронов, в ядре должны присутствовать нейтральные частицы
- 1930 г. Боте, Бекер :
1932 г. Ирен Фредерик Жолио-Кюри :

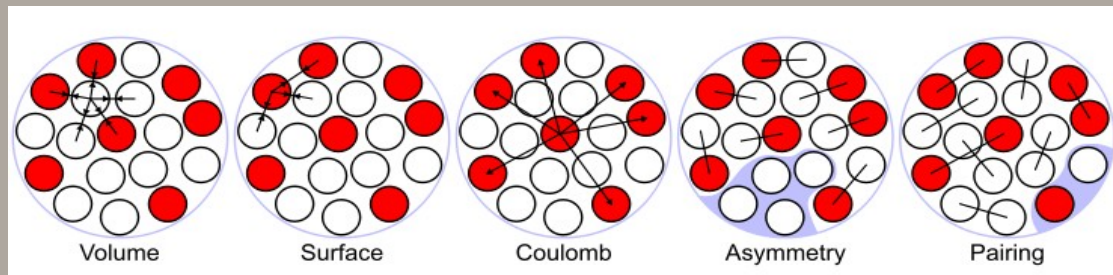


- 1932 г. Чедвик : серия экспериментов, γ -лучевая гипотеза несостоятельна, излучение состоит из незаряженных частиц с массой, близкой к массе протона



Модели атомных ядер

– 1936 г. Капельная модель (Гамов, Бор, Вилер)



– Формула Вайцзеккера

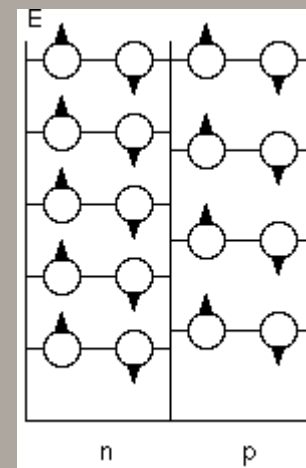
$$E_B = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_A \frac{(A - 2Z)^2}{A} - \delta(A, Z)$$

– Оболочечная модель

1932 г. Гейзенберг, Иваненко, Гапон

1946 г. Вигнер, Гёпперт-Майер, Йенсен

– Физика ядра =
= “Дом моделей”



Дмитрий Иваненко

Мезонная теория ядерных сил

– Какие силы удерживают протоны и нейтроны в ядре? *сильное взаимодействие*

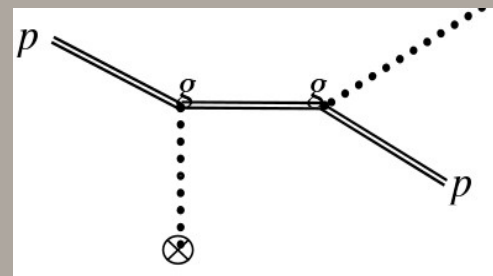
– Юкава : скалярное поле массивных частиц (мезонов), потенциал Юкавы

$$V_{\text{Yukawa}}(r) = -g^2 \frac{e^{-mr}}{r}$$

– Оценка массы мезона:

$$r_0 > 1 \text{ fm} \quad \rightarrow \quad m < 1/r_0 \sim 200 \text{ MeV}$$

– Протоны должны рождать мезоны в поле ядра



Поиск мезонов (открытие мюона)

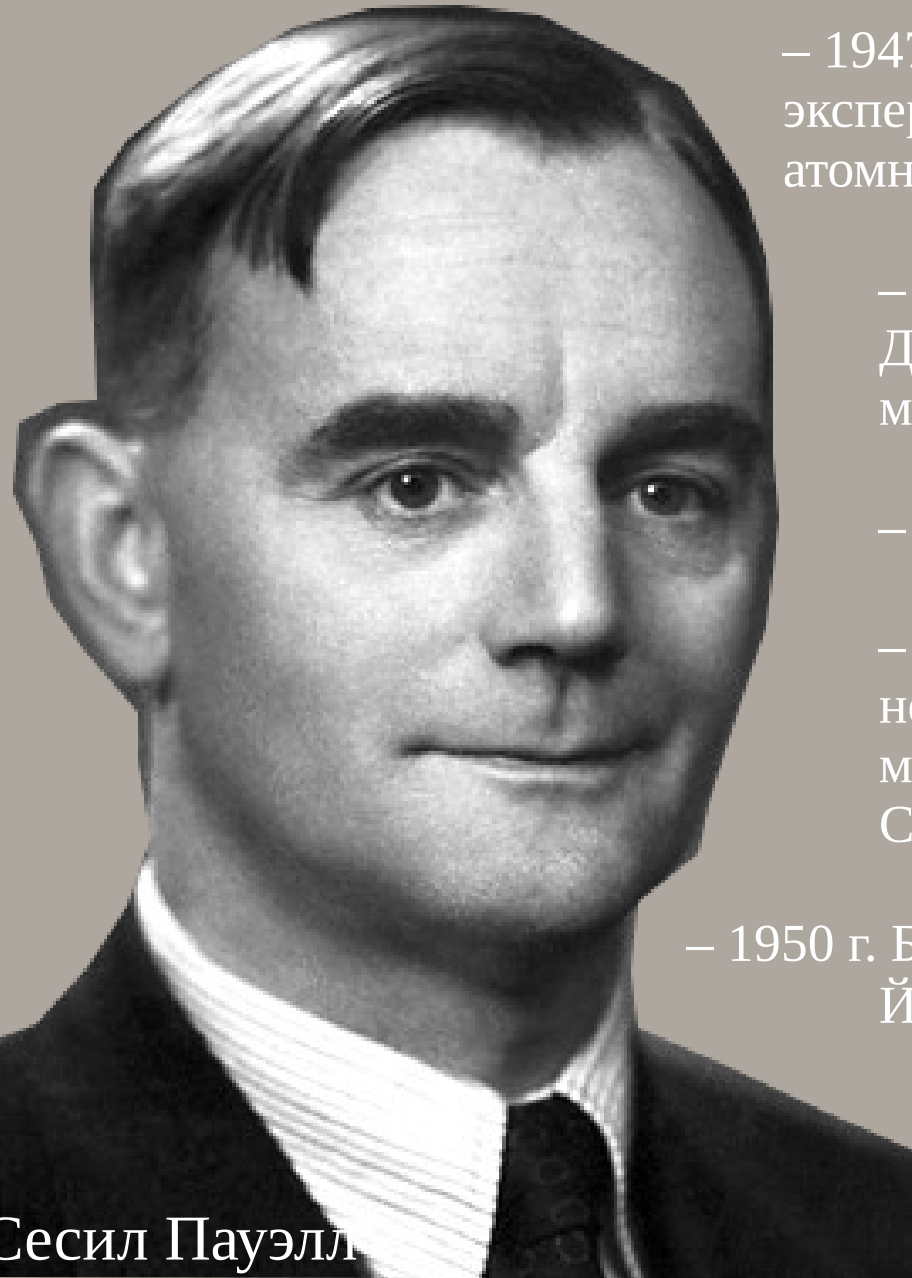
- 1937 г. Андерсон, Нидермайер : (потери энергии в пластинке, камера Вильсона) проникающие частицы в космических лучах с массой больше массы электрона и меньше массы протона
- 1937 г. : Стрид, Стивенсон : (камера Вильсона, магнитное поле)
 $M = (130 \pm 30)$ масс электрона.
- 1939 г. : Розетти, Росси + Нерсон, и др.
Время жизни частиц около 2 микросекунд
- 1940 г. Томонага, Араки : положительно и отрицательно заряженные юкавовские мезоны должны по разному вести себя после остановки: “+” – распадаться, “–” – захватываться ядрами
- 1946 г. Конверси, Панчини, Пиччиони : **ОДИНАКОВО!**
- Не юкавовский мезона. Раби: “Кто это заказал?”
- Мюон – частица 2-го поколения элементарных частиц



Синъитиро
Томонага

Поиск мезонов (открытие π -мезонов)

– Фотоэмульсии – новый экспериментальный метод.



Сесил Пауэлл

– 1947 г. Перкинс высокогорный эксперимент. Мезоны разрушают атомные ядра

– 1947 г. Пауэлл
Два типа мезонов: пионы и мюоны.

– Масса 140 МэВ

– 1938 Кеммер: предсказание нейтрального юкавовского мезона из соображений Симметрии.

– 1950 г. Бьоркланд, Крэнделл, Моьер, Йорк: $pp \rightarrow pp\pi^0$

– 1950 Карсон, Хупер, Кинг
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

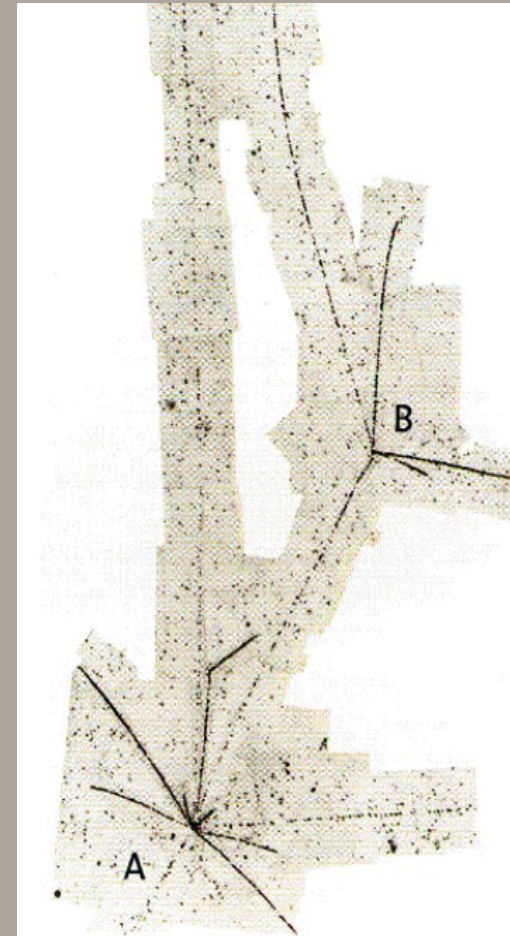


Fig. 5.9 The birth (A) and death (B) of a pion are recorded in this photograph taken by César Lattes, Occhialini, and Powell in 1947. It was one of the first observations of the creation of a pion. The distance between points A and B is about 0.11 mm.

Слабые взаимодействия

– 1914 г. : **Чедвик** : электроны испускаемые при β -распаде имеют непрерывный спектр

...имея в виду ... непрерывный β -спектр, я предпринял отчаянную попытку спасти «обменную статистику» и закон сохранения энергии. Именно, имеется возможность того, что в ядрах существуют электрически нейтральные частицы, которые я буду называть «нейтронами» и которые обладают спином $\frac{1}{2}$... Масса «нейтрона» по порядку величины должна быть сравнимой с массой электрона и во всяком случае не более 0,01 массы протона. Непрерывный β -спектр тогда стал бы понятным, если предположить, что при β -распаде вместе с электроном испускается ещё и «нейтрон», таким образом, что сумма энергий «нейтрона» и электрона остаётся постоянной. Я признаю, что такой выход может показаться на первый взгляд маловероятным... Однако, не рискуя, не выиграешь; серьёзность положения с непрерывным β -спектром хорошо проиллюстрировал мой уважаемый предшественник г-н Дебай, который недавно заявил мне в Брюсселе: «О... об этом лучше не думать вовсе, как о новых налогах».

– 1930 г. : **Паули** : высказывает гипотезу о существовании лёгкой частицы, которую еще не наблюдали (Ферми предлагает называть её *нейтрино*)

– **Ферми** предлагает теорию β -распада. (базировалась на формальной аналогии с излучением фотонов)
4-х фермионное контактное вз-е

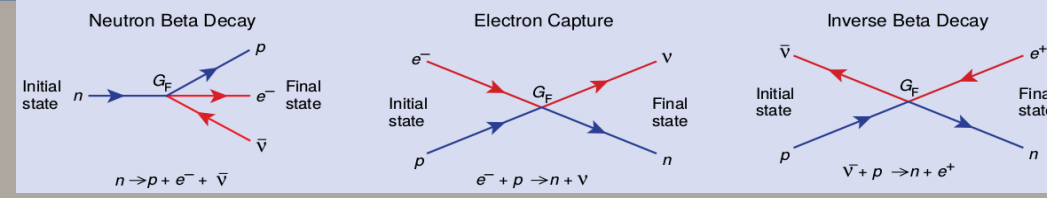
$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} \hat{p} \hat{n} \cdot \hat{e} \hat{\nu},$$

– 1957 г. **Гелл-Манн, Фейнман, Маршак, Сударшин** универсальная V-A теория, для объяснения нарушения пространственной чётности в слабых распадах

Энрико Ферми

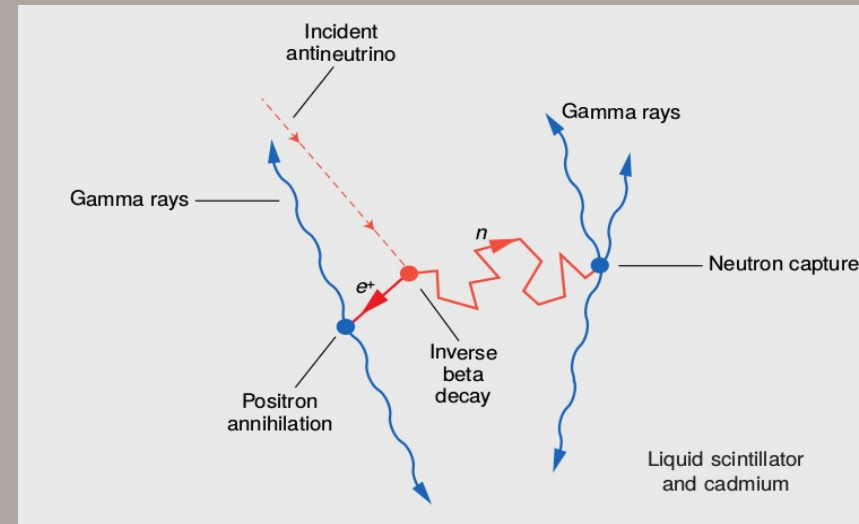


Открытие нейтрино



– 1942 г. Чанг, предлагает использовать обратный β -распад для обнаружения нейтрино

– 1956 г. Кован, Рейнс, Харрисон, Крузе и МакГуайр (совпадение аннигиляция позитрона и детектирования нейтрона)



– Реактор в Лос-Аламосе, поток $\sim 5 \cdot 10^{13}$ нейтрино / (сек*см²)

– Детектировали ~ 3 нейтрино в час

Федерик Рейнс и Клайд Кован

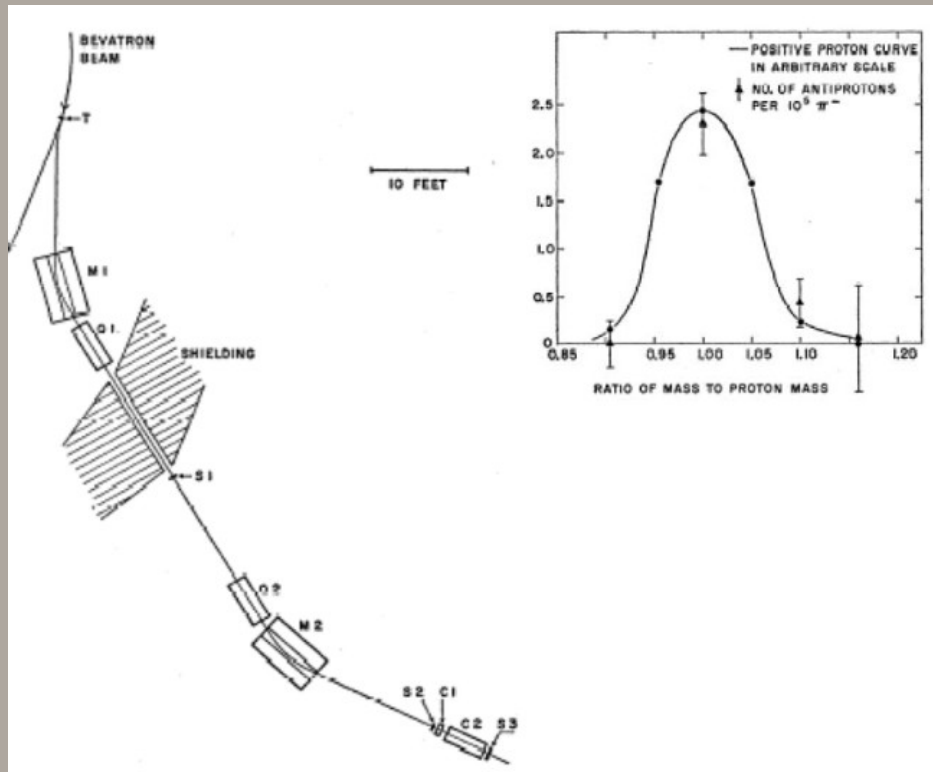
Открытие антипротона

– 1955 г. Сегрэ, Чемберлен : Bevatron (5 ГэВ)

Фиксированный импульс (1.19 ГэВ/с)

Измерение времени пролёта

Подавление пионного фона при помощи
счетчиков черенковского излучения

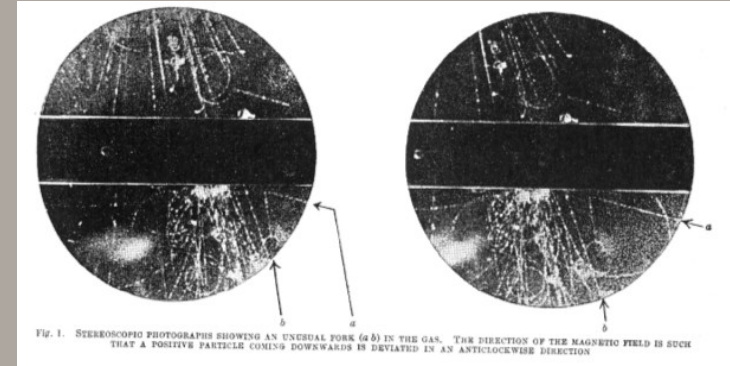


Эмилио Сегрэ

Странные частицы

First seen in	Reported events	Current interpretation
1943 (1946)	Mesons Charged particle with M~500 MeV	K^+
1947	$\theta^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-, V^0_2 \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$
1947	$\theta^+ \rightarrow \pi^+$ (neutral), $\chi^+ \rightarrow \pi^+$ (neutral)	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$
1949	$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$
1951	$\kappa^+ \rightarrow \mu^+$ (neutrals)	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$
1950	Baryons $V^0_1 \rightarrow p \pi^-$	$\Lambda \rightarrow p \pi^-$
1953	$V^+_1 \rightarrow p$ (neutrals)	$\Sigma^+ \rightarrow p \pi^0$
?	$\Lambda^+ \rightarrow n \pi^+$	$\Sigma^+ \rightarrow n \pi^+$
(1953)	$X^- \rightarrow V^0_1 \pi^-$	$\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$

Парное рождение новых частиц



- Загадка №1: Большое сечение (вероятность) рождения распад в адроны [сильное взаимодействие], но большое время жизни [слабое взаимодействие]
- Загадка №2: Одна и та же масса и спин, но разные чётности (Разные частицы или нарушение P-чётности?)
- 1953 г. Гелл-Манн и (независимо Нишиджима) предлагают **новое квантовое число странность**, которая сохраняется в сильных взаимодействиях (парное рождение странных частиц), но не сохраняется в слабых (большое время жизни).



Казухико
Нишиджима

Резонансы

– Соотношение неопределённости ↔ нестабильные состояния
пикующийся энергетический спектр [распределение Брейта-Вигнера]

– Проявляются (например) в полном сечении и в инвариантных массах (два примера ниже)

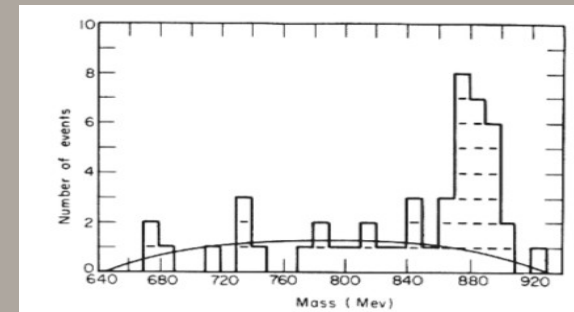
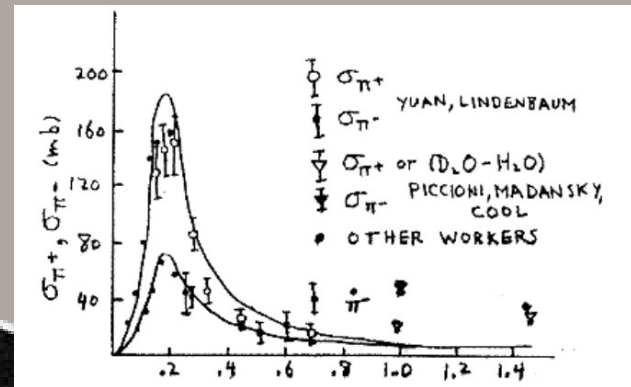


FIG. 2. Mass spectrum of the $K^0-\pi^-$ system. The solid line represents the phase-space curve normalized to background events.

– Первое наблюдение (1952 г.) группа Ферми “поглощение” пионов протонами растёт начиная с определённой энергии

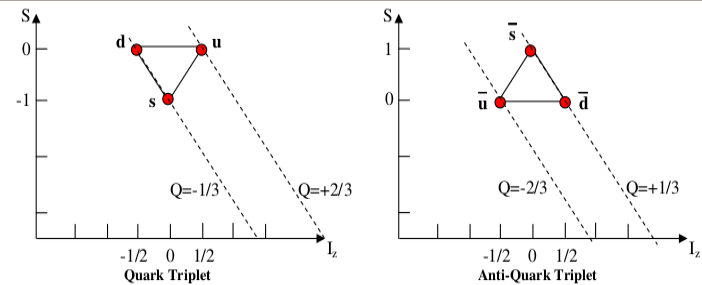
– Начало 60-х: группа Альвареса (K^* , ω , ...)

– Резонансы = короткоживущие частицы

– “Зоопарк” элементарных частиц, который нужно было как-то систематизировать.

Кварки

- 1964 г. : Гелл-Манн, Цвейг
- точечные частицы ($S=1/2$)
- дробный заряд



Mesons: $\bar{q}q$ $\bar{3} \otimes 3 = 8 \oplus 1$ (octet and singlet) and can have spin 0, 1, etc.
 Baryons: qqq $3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$ and can have spin $1/2, 3/2$, etc.

– объяснение :

- странности
- аномального магнитного момента барионов
- разница масс
- спин-четность

– сложности :

- не наблюдаются в свободном состоянии
- некоторые барионы нарушают принцип Запрета Паули

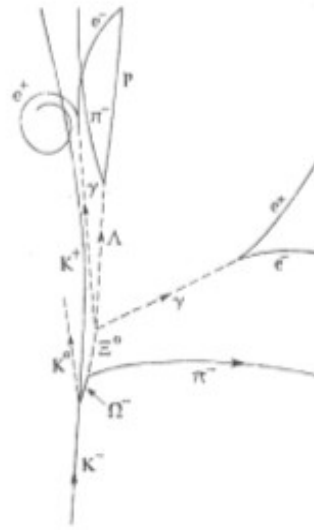
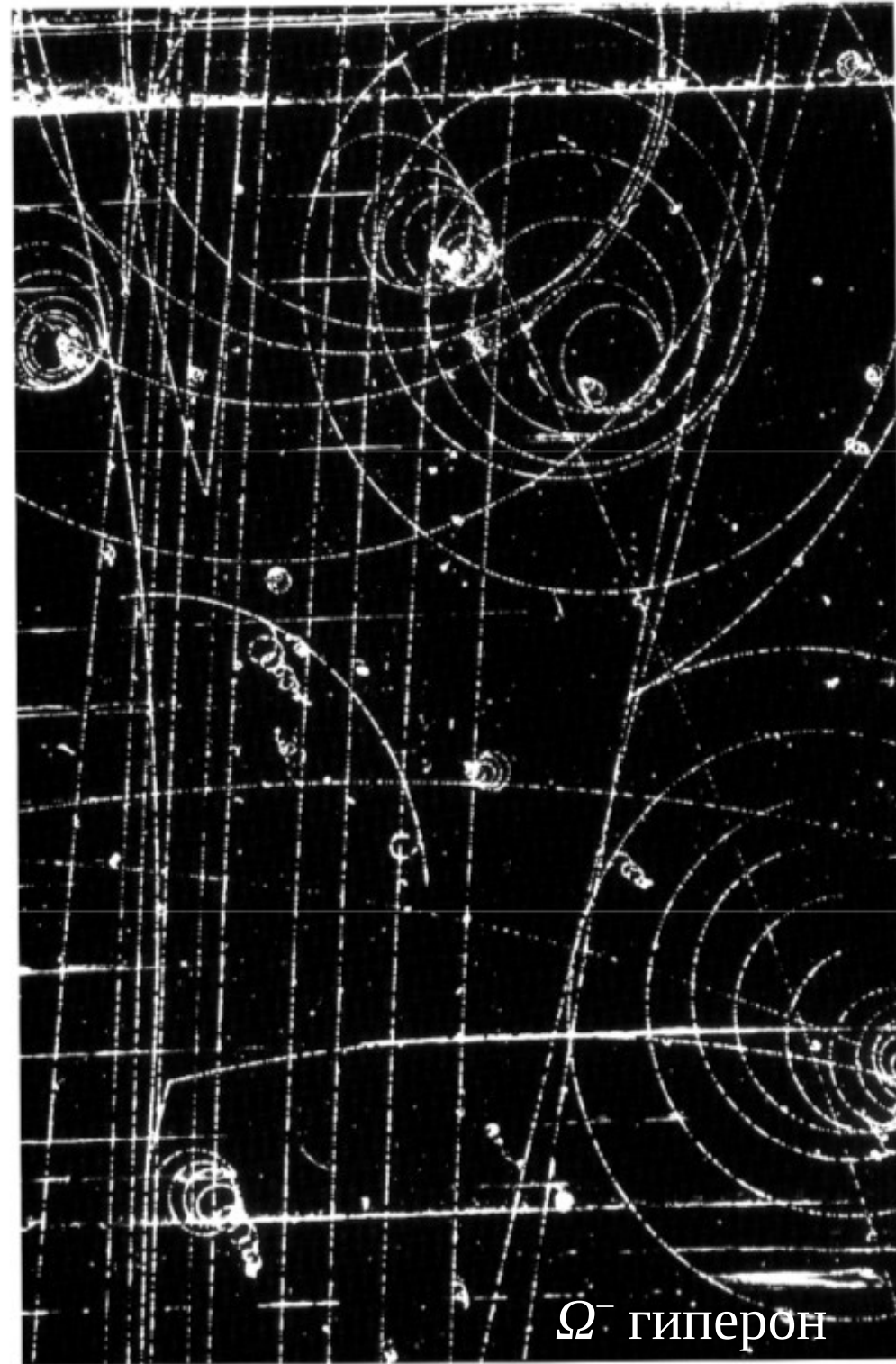


Fig. 7.12 This historic picture from the 200 cm (80 inch) hydrogen bubble chamber at Brookhaven shows the first observation of the omega-minus. A negative kaon (K^-) collides with a proton to produce three particles: an omega-minus (Ω^-), a positive kaon (K^+), and an unseen neutral kaon (K^0), represented by a dotted line in the diagram. The omega-minus travels a short distance (2.5 cm) and then decays, emitting a pi-minus (π^-) that veers sharply to the right, and a neutral xi (Ξ^0) which decays into three more neutral particles – a lambda (Λ) and two gamma ray photons (γ). These neutrals, also marked by dotted lines in the diagram, finally reveal themselves by decaying into visible γ 's: the gamma rays into electron-positron pairs (e^-, e^+), the lambda into a proton (p) and a pi-minus.



Ω^- гиперон

Квантовая хромодинамика (КХД)

- Хан, Намбу: цветовой заряд, *глюоны*, переносчиков взаимодействия новое квантовое число *цвет* (может принимать три значения + антицвета), адроны – бесцветные, принцип Паули работает!
- Струминский также (независимо) пришел к заключению о сущ. цвета
- Бьеркен : использовать глубоко неупругое *ep*-рассеяние
- Фейнман : партонная модель адронов
- Фридман, Кендалл, Тейлор : экспериментальные подтверждения кварковой модели



Намбу

Как устроен протон :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4E_1^2 \sin^4 \theta / 2} \frac{E_3}{E_1} \left(\cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{q^2}{2M^2} \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

Rutherford

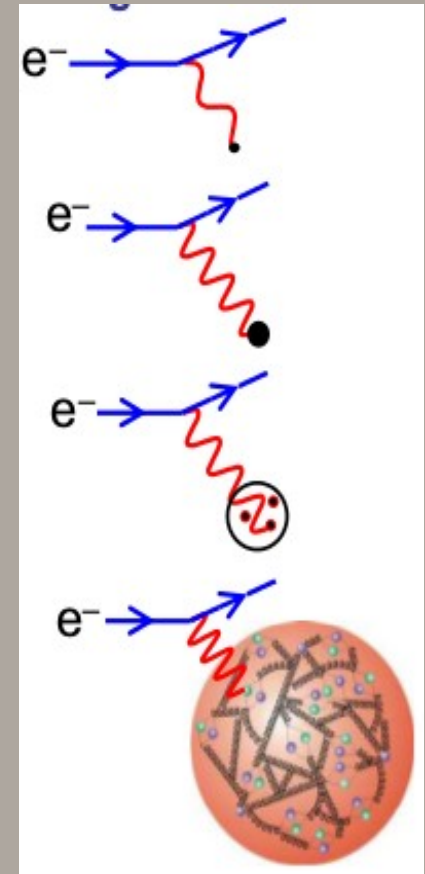
Proton recoil

Electric/
Magnetic scattering

Magnetic term due to spin

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4} \left[\frac{G_E^2 + \tau G_M^2}{(1+\tau)} \left(1 - y - \frac{M^2 y^2}{Q^2} \right) + \frac{1}{2} y^2 G_M^2 \right]$$

$$\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4} \left[\left(1 - y - \frac{M^2 y^2}{Q^2} \right) \frac{F_2(x, Q^2)}{x} + y^2 F_1(x, Q^2) \right]$$



Джеймс Бьеркен

Приемственность теории →

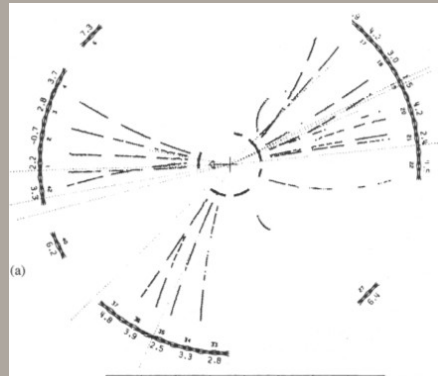
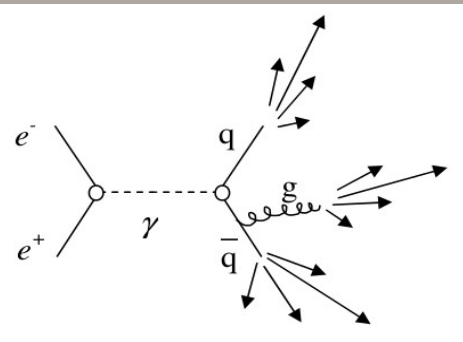
Конфайнмент, Асимптотическая свобода

– 1954 г. : Янг, Миллс – теория безмассовых, спин-1, “самодействующих” частиц

– 1973 г. : Гросс, Полицер, Вилчек : асимптотическая свобода (при высоких

энергиях = на малых расстояниях кварки ведут себя как свободные частицы)
Свойство ЯМ-теории.

– Сила взаимодействия между кварками растет при увеличении расстояния между ними



– Невылетание цвета (*конфайнмент*)

– Кварки и глюоны можно видеть как адронные струи.

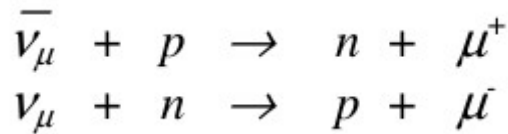
– 1979 г. : PETRA (DESY) 3-х-струйные события, экспериментальное открытие ГЛЮОНОВ.

– Численное решение задач КХД

Открытия: мюонного нейтрино, τ -лептона

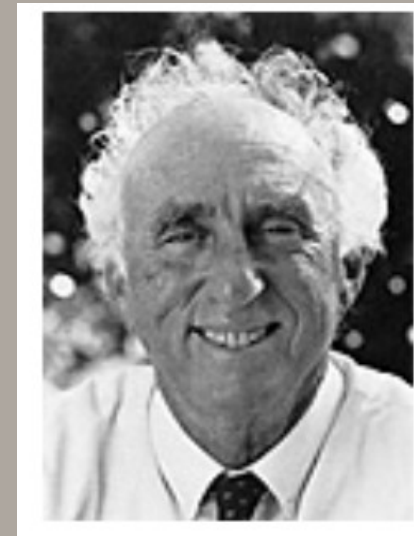
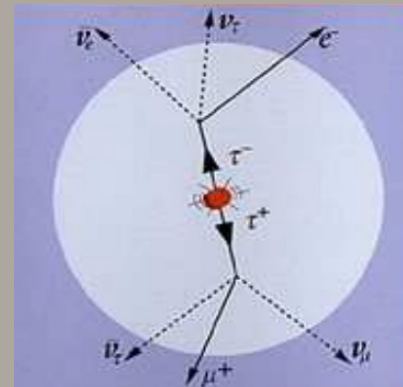
- 1953 г. : **Конопински, Махмуд** – сохранение лептонного числа (пока одно)
- 1959 г. : **Понтекорво** – лептонное число должно быть разным для e и μ .
(также предложил идею нейтринных пучков)

- 1962 г. : **Ледерман, Шварц, Штейнберг** : пучки мюонных нейтрино (и антинейтрино) и поиск реакций типа:



Мюонные нейтрино рождали в искровой камере мюоны (но не электроны)

- 1975 г. : Эксперимент **Mark-I** (Стэнфорд) [**Мартин Перл**]
Новый лептона с массой 1.777 ГэВ и временем жизни $\sim 3 \cdot 10^{-13}$ сек.



- Третье поколение лептонов.
- τ -нейтрино открыто в 2000 г.
Эксперимент **DONUT** (Фермилаб)

Электрослабая теория

$$\frac{G_F}{(\hbar c)^3} = \frac{\sqrt{2}}{8} \frac{g^2}{m_W^2} = 1.16637(1) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

– Идея, что слабые взаимодействия результат обмена массивными частицами привлекательна, но такие теории перенормируемы.

– 1961 г. : Глэшоу : должен существовать и нейтральный переносчик слабых сил

– 1964 г. : Браут, Энглер, Хиггс : существование скалярного поля с ненулевым вакуумным средним будет нарушать электрослабую симметрию, “замедлять” W^\pm и Z^0 , давая им массу. Но $m(\gamma)=0$

– 1967 г. : Вайнберг, Салам: самосогласованная теория электрослабого взаимодействия

– 1970 г. : Глэшоу, Илиопулус, Маиани : решение проблемы *нейтральных токов неменяющих аромат* (отсутствие распада $K^0 \rightarrow 2\mu$), должен существовать еще один кварк – массивный аналог u -кварка. Осцилляции нейтральных каонов также требуют s -кварк (масса $< 3-4$ ГэВ)

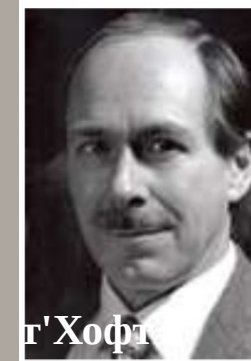
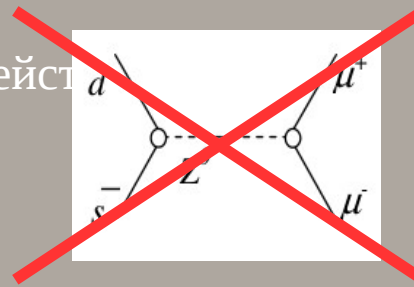
– 1972 г. : Глэшоу, Джорджи : s -кварк также устранил расходимости в некоторых диаграммах электрослабой теории

– 1972 г. : т'Хофт, Вельдман – такая теория перенормируема

– Нейтральные токи возможны как процесс: $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$

– 1973 г. : Пузырьковая камера Гаргамелль (ЦЕРН) :

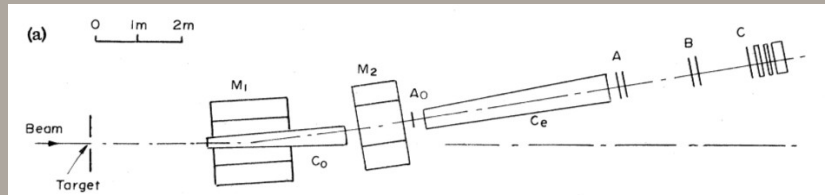
Открытие нейтральных токов в этих процессах (166 событий)



Открытие с-кварка

– Начало 70-х : Ледерман наблюдает небольшое превышение в димьюонном спектре, но из-за плохого разрешения установки и малой статю значимости “отвергает” открытие

– 1974 г. Тинг (AGS @ BNL) находит резонанс в электрон-позитронном спектре, но тщательно всё перепроверяет

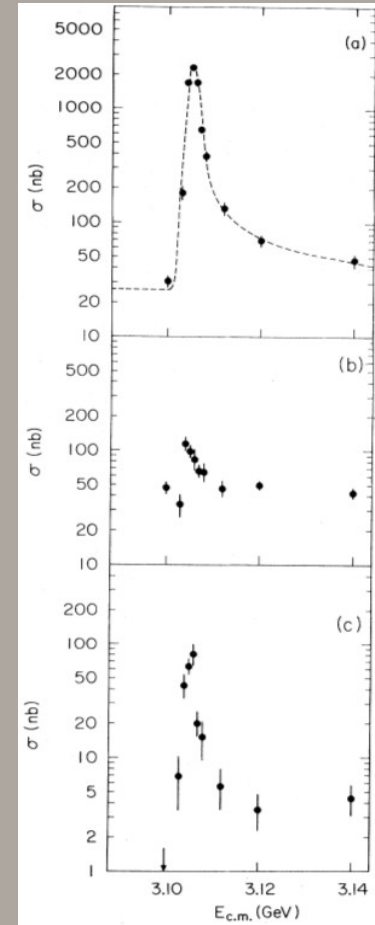
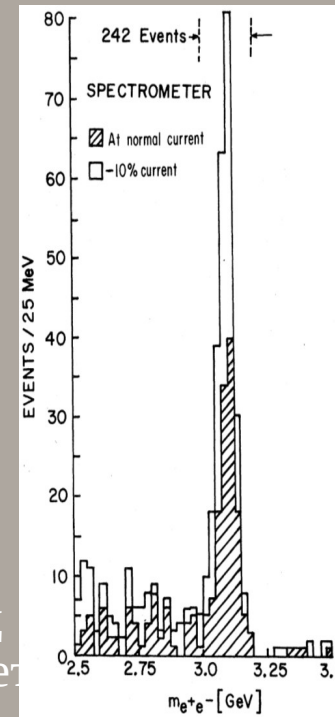


– 1974 г. Рихтер (SPEAR @ Стэнфорд) изучает рождение частиц на электрон-позитронном коллайдере находит, что оно растет в районе 3.1 ГэВ.

– J/ψ – связанное состояние c -кварка и c -антикварка

– Гонка по поиску частиц с открытым очарованием

– 1976 г. Гольдхабер, Пиер – открытие D -мезона



Тинг



Рихтер

Открытие b -кварка

– 1964 г. Фитч, Кронин – CP-нарушение в распаде нейтральных каонов (частицы ведут себя не так как античастицы, их можно принципиально отличить друг от друга)

– 1973 г. Кобаяши, Маскава – эффект можно описать, если предположить существование третьего поколения кварков

– 1975 г. – Mark-I (SPEAR, Стэнфорд) тау-лептон

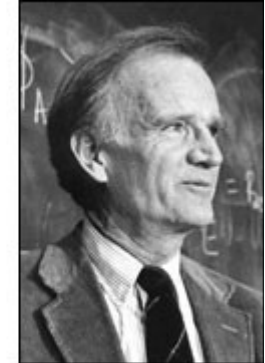
– 1976-77 г. – группа Ледермана (E-288, Fermilab) открытие частицы Y похожей на J/ψ , но с массой 9.5 ГэВ

– 1978-1980 г. : открытие резонансов, но с большей массой $Y(4S)$ оказался очень широким – распада в мезоны с открытой прелестью (найлены очень быстро).

– Описывать связанные состояния тяжелых кварков легче с точки зрения КХД чем легких!



James Cronin



Val Fitch



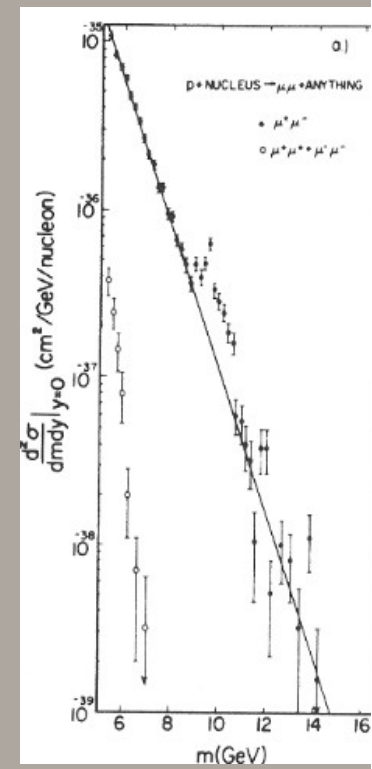
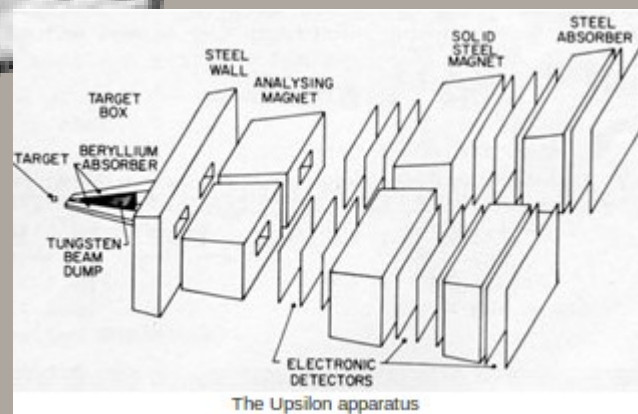
Кобаяши



Маскава



Леон Ледерман



Открытие W^\pm и Z^0 бозонов

– Огромные массы 80-90 GeV → новые ускорители:

Адронные коллайдеры:

Протон-протонный SpS (ЦЕРН) 540 ГэВ 1981-82 гг

Протон-антипротонный (Fermilab) 2000 ГэВ 1990-е

– Большие эксперименты. Установки похожие на те, что сейчас эксплуатируются на большом адронном коллайдере

– 1983 г. UA1 и UA2 сообщают об открытии W (~81 ГэВ)

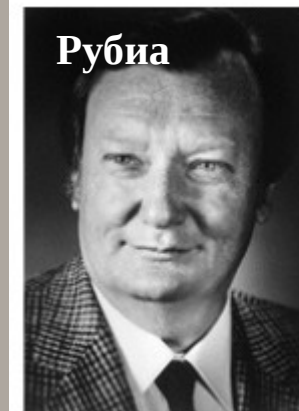
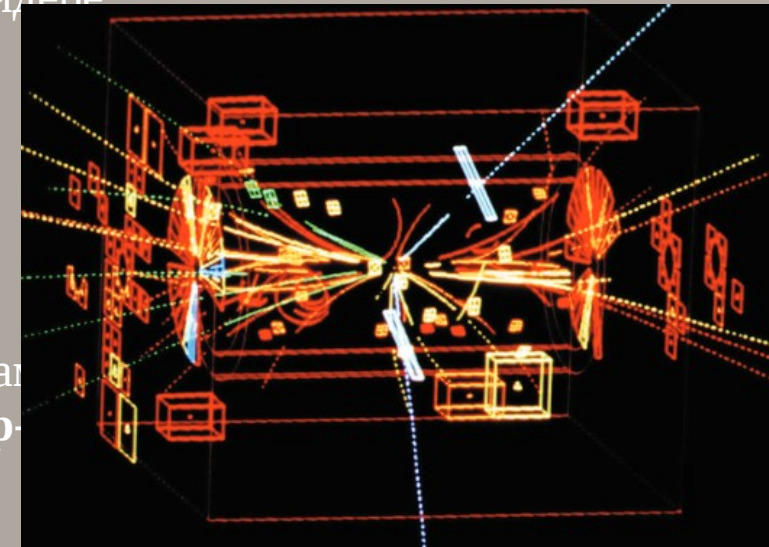
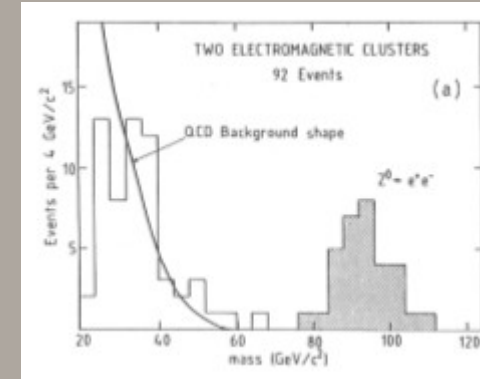
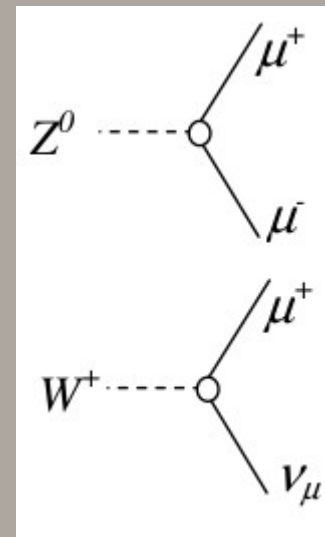
– 1983 г. Эти же эксперименты рапортуют об открытии Z-бозона (~91 ГэВ)

– Последние эксперименты нобелевские премии, по результатам которых присуждены конкретным людям (Рубиа, Ван-дер-Мейр)

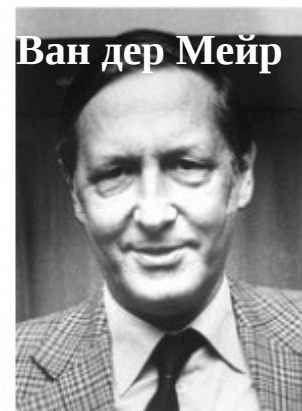
– Уточнение параметров Стандартной Модели на электрон-позитронном коллайдере LEP (1980-2000 гг)

– Форма спектра Z-бозона → только три поколения нейтрино

– Осталось найти t -кварк и бозон Хиггса



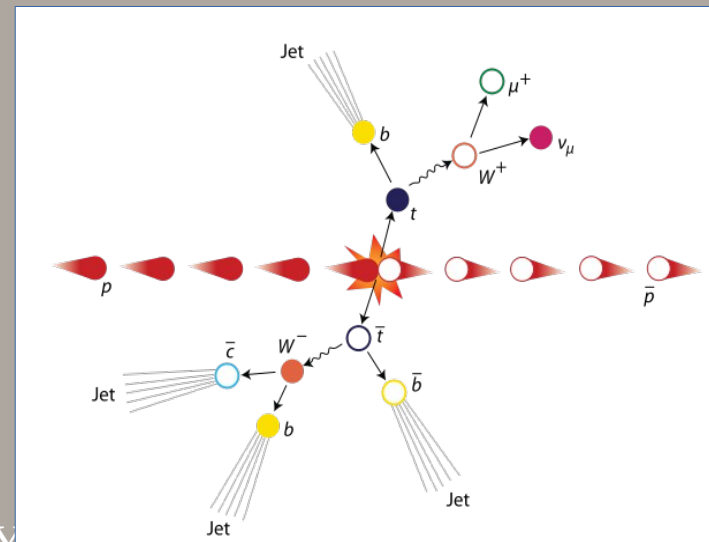
Рубиа



Ван дер Мейр

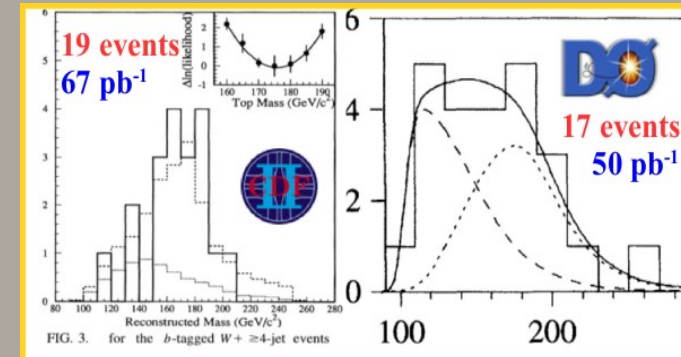
Открытие t -кварка

- Массы истинно элементарных частиц являются параметрами Стандартной Модели и могут быть измерены только экспериментально (прямою или косвенно)
- Ошибочное открытие UA1, японский электрон-позитронный коллайдер TRISTAN, которому не хватило энергии
- Параметры осцилляции нейтральных B -мезонов (ARGUS, DESY), не прямые измерения \rightarrow огромная масса t -кварка.



- Малое время жизни t -кварка \rightarrow он не успевает сформировать адрон и распадается: $t \rightarrow Wb$

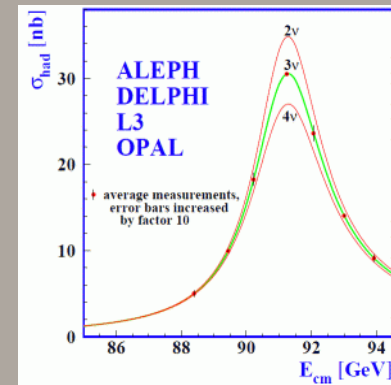
- 1995 г. эксперименты CDF и D0 на протон-антипротонном коллайдере сообщили об открытии t -кварка (Директор Fermilab – Леон Ледерман)



- 2015 г. : в первые дни второго сеанса БАК, эксперименты ATLAS и CMS объявили об измерении вероятности рождения t -кварка на на энергии 13 ТэВ, то есть сейчас наблюдение t -кварка – “обычное дело”

- Каково же число поколений элементарных частиц? \rightarrow

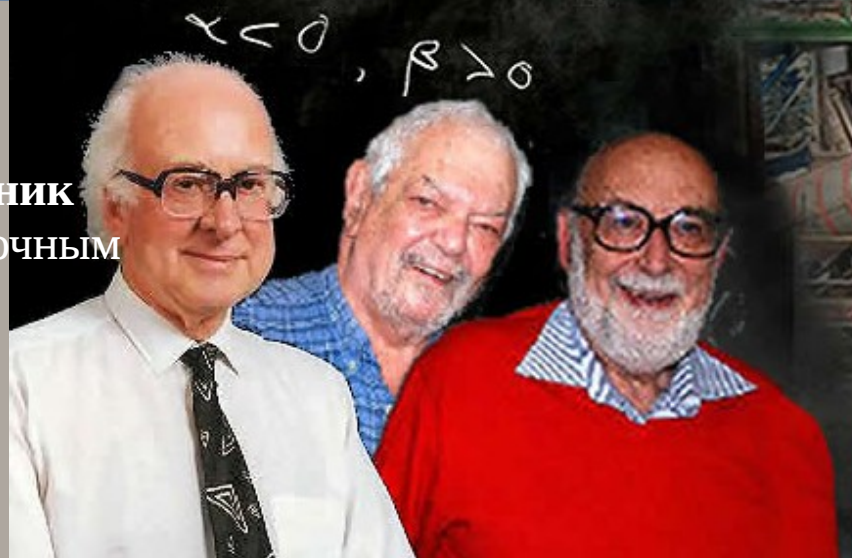
Ответ: По всей видимости три! Например форма пика Z -бозона измеренная в экспериментах на SLAC и LEP, говорит о таком числе нейтрино ($m < 45 \text{ ГэВ}$)



Открытие бозона Хиггса

– 1964 г. Энглер + Браут, Хиггс, Киббл + Хаген + Гуральник придумывают механизм дающий массы калибровочным бозонам (а также фермионам).

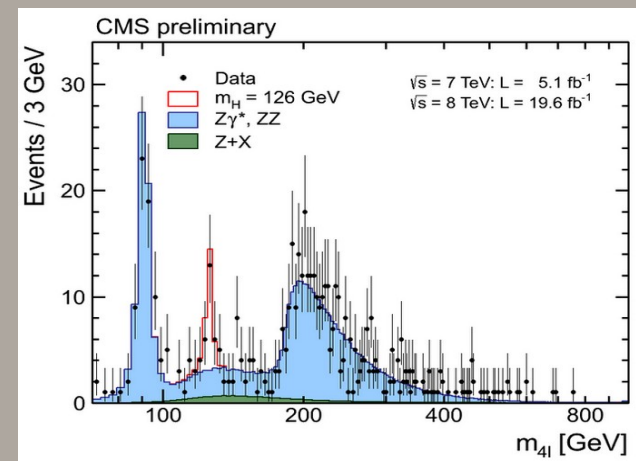
Скалярное поле с ненулевым вакуумным средним!
Чтобы его статью приняли в журнал, Хиггс предсказывает существование скалярного бозона – кванта этого поля.



– Надежна на открытие H на LEP не оправдалась.
Главная задача для первого сеанса БАК

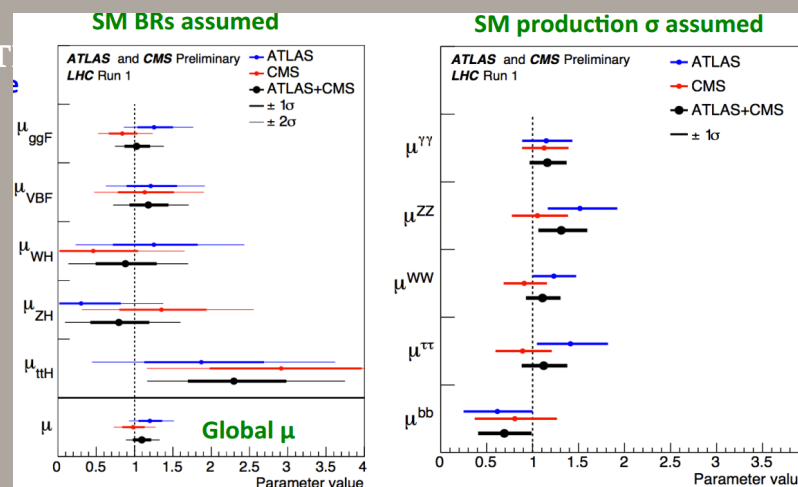
– 4 июля 2012 г. Эксперименты ATLAS и CMS объявляют об открытии новой частицы в каналах, где предсказывалось открытие бозона Хиггса.

– За последние три года ATLAS и CMS хорошо изучили эту частицу ее характеристики полностью совпадают с предсказаниями Стандартной Модели для бозона Хиггса

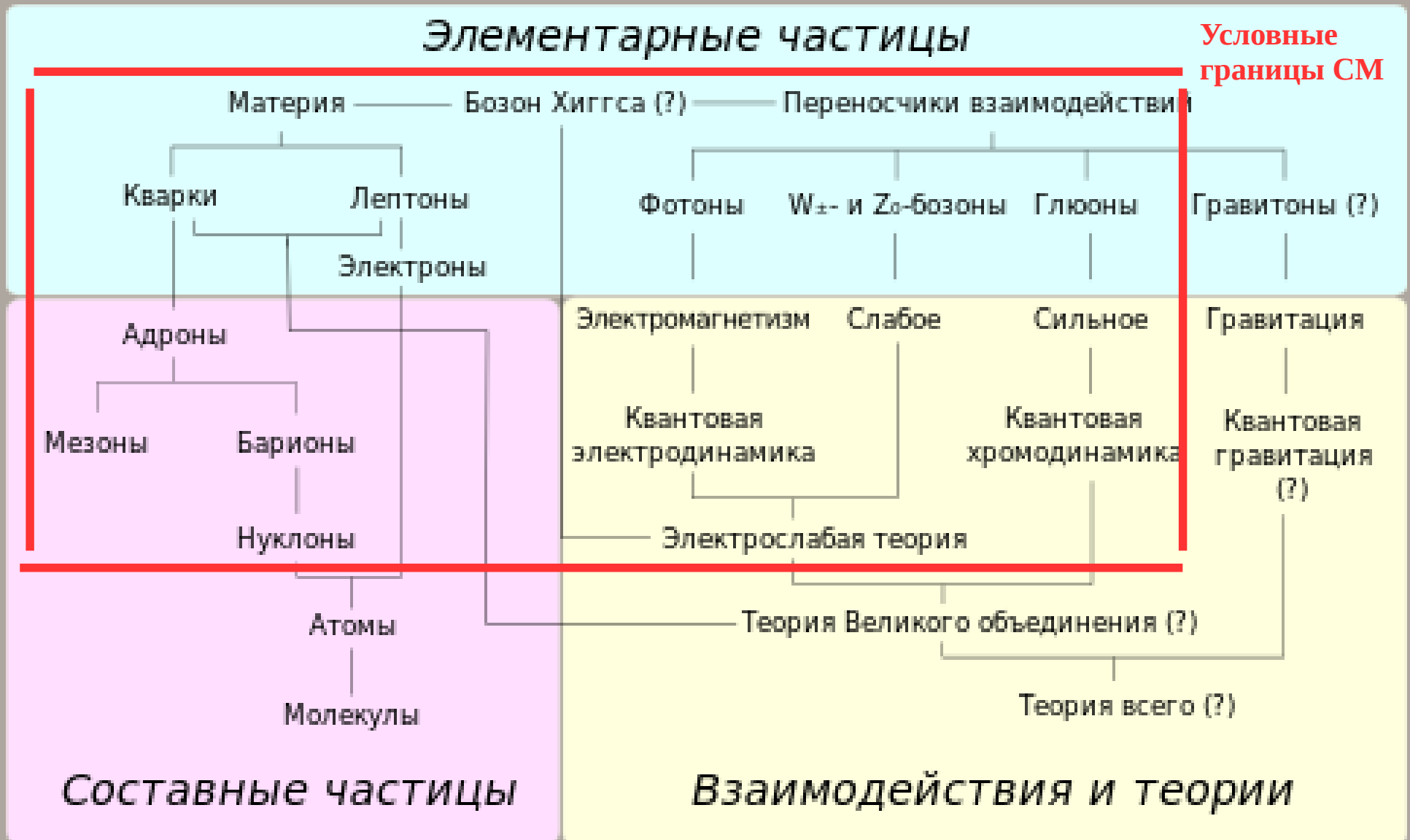


– Масса частицы 125.09 ± 0.24 ГэВ известна с лучшей точностью чем масса любого из кварков.

– Стандартная Модель построена и экспериментально проверена с высокой точностью! Что дальше?



Что описывает Стандартная Модель



Послесловие

- На сегодняшний день, Стандартная Модель (теперь это неудачное название) построена и многократно проверена.
- В ускорительных экспериментах не найдено ни одного эффекта, который было бы невозможно описать при помощи СМ. (Есть некоторые указания, но не более того)
- В принципе СМ можно при помощи тонкой подстройки параметров заставить работать вплоть до гигантских масштабов энергий.
- Интенсивный поиск эффектов выходящих за рамки СМ.
- Астрофизические наблюдения не могут быть объяснены СМ
- Есть много задач, которые нужно решить, не привлекая новых фундаментальных взаимодействий. Например проблема конфайнмента.

Устройство мира для физиков, находящихся на переднем крае науки

~1895 Молекулы [атомы] – молекулярно-кинетическая теория
Электромагнитные волны ['эфир'?] – ур. Максвелла

Устройство мира для физиков, находящихся на переднем крае науки

~1895 Молекулы [атомы] – молекулярно-кинетическая теория
Электромагнитные волны ['эфир'?] – ур. Максвелла

~1930 Атомы [ядра [?] + электроны] – квантовая механика + фотоны

Устройство мира для физиков, находящихся на переднем крае науки

- ~1895 Молекулы [атомы] – молекулярно-кинетическая теория
Электромагнитные волны ['эфир'?] – ур. Максвелла
- ~1930 Атомы [ядра [?] + электроны] – квантовая механика + фотоны
- ~1960 Атомы [ядра [протоны + нейтроны] + электроны] –
 - КЭД (фотон), теория Юкавы (пи-мезоны),
теория Ферми → V-A теория (нейтрино) + античастицы
 - + Мезоны + гипероны + резонансы

Устройство мира для физиков, находящихся на переднем крае науки

- ~1895 Молекулы [атомы] – молекулярно-кинетическая теория
Электромагнитные волны ['эфир'?] – ур. Максвелла
- ~1930 Атомы [ядра [?] + электроны] – квантовая механика + фотоны
- ~1960 Атомы [ядра [протоны + нейтроны] + электроны] –
 - КЭД (фотон), теория Юкавы (пи-мезоны),
теория Ферми → V-A теория (нейтрино) + античастицы
 - + Мезоны + гипероны + резонансы
- ~1973 Атомы [ядра [протоны + нейтроны [u,d-кварки]] + электроны]
 - Электрослабая теория (фотон, W^\pm ?, Z^0 ?, H?), КХД(глюоны?)
 - + второе поколение лептонов + s-кварк + еще кварки(?)

Устройство мира для физиков:

Элементарные частицы

Масса	Заряд	Спин	Кварки	Лептоны	Бозоны – переносчики взаимодействия
$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	u up		g gluon
$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	c charm		H Higgs boson
$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	t top		γ photon
$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	d down		Z Z boson
$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	s strange		W W boson
$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	b bottom		
$0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	e electron		
$105.7 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	μ muon		
$1.777 \text{ GeV}/c^2$	-1	$1/2$	τ tau		
$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$1/2$	ν_e electron neutrino		
$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	ν_μ muon neutrino		
$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	ν_τ tau neutrino		

Адроны – частицы, участвующие в сильном взаимодействии

Типы адронов



Барионы



Мезоны



Пентакварк



Тетракварк

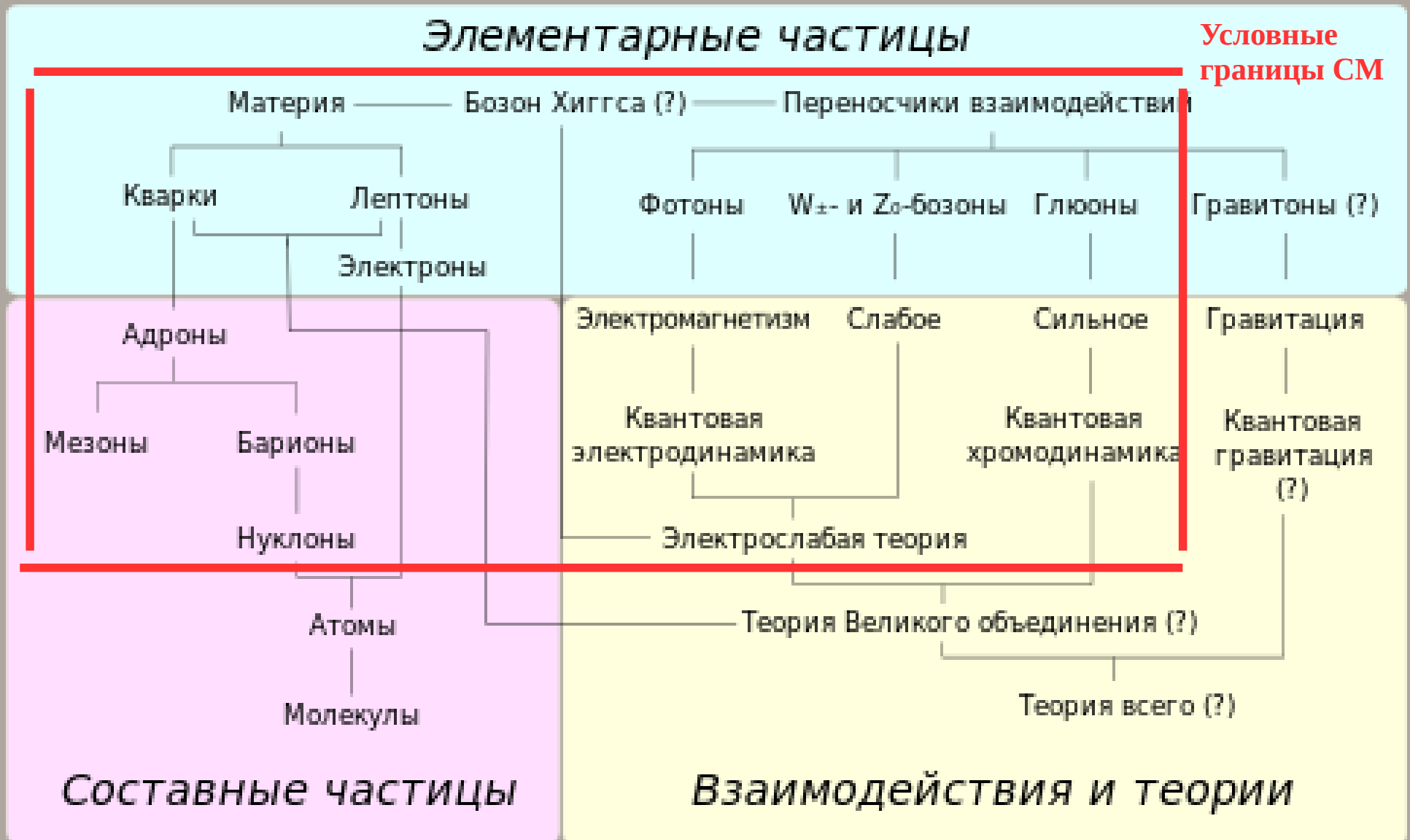


Глюбол



Гибридный мезон

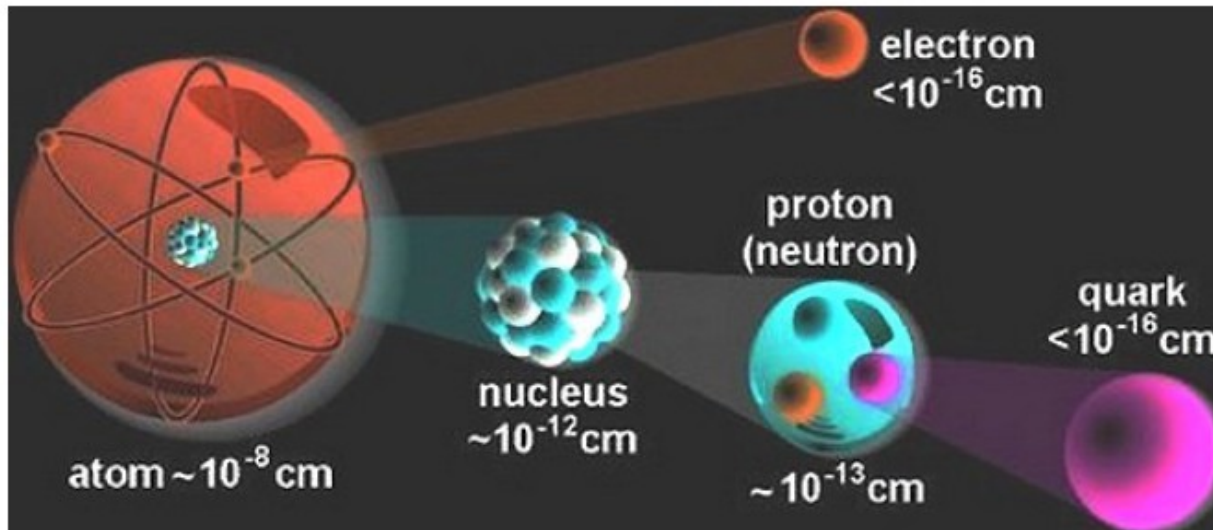
Что описывает Стандартная Модель



Как развивается физика:

- Теория и эксперимент идут вместе, и если кто-то из них “пробуксовывает” второй приходит на помощь.
- Накопленные знания переходят в понимание. Эволюция физических теорий. Порой медленная, порой взрывная.
- Ещё до прямых измерений физики начинают предчувствовать неладное потому, что хорошая теория вдруг перестает работать.
- Физику создают физики!
- Невероятная эффективность математики в естественных науках.

Вглубь микромира



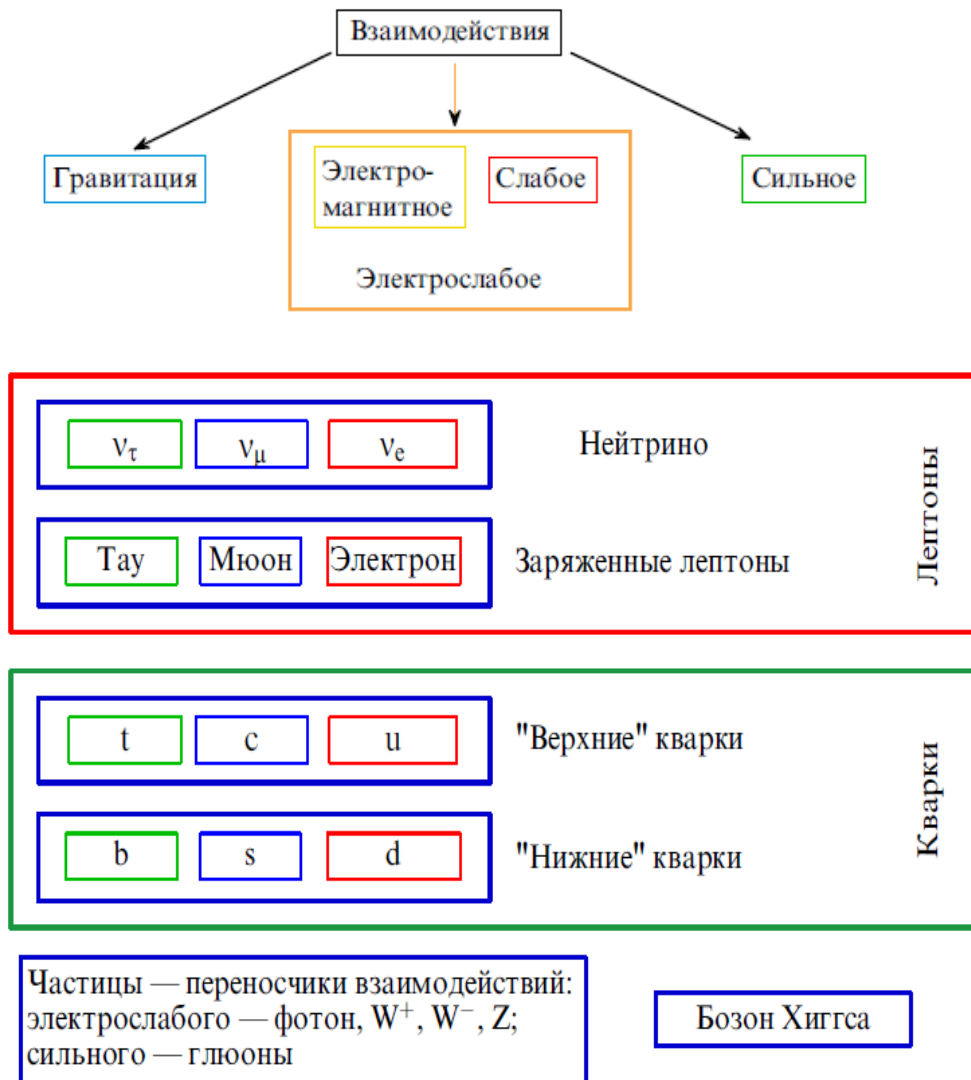
Два типа “трудностей”:

- много степеней свободы
- новые фундаментальные взаимодействия.

Указания на существование Новой Физики:

- Проблемы массы и смешивания нейтрино
- Темная материя
- Барионная асимметрия Вселенной
- Проблема “точной подгонки” Стандартной Модели

Основные ингредиенты СМ



Параметр	Значение
$\alpha_s(M_Z)$	$0,114 \pm 0,0007$
$1/\alpha(M_Z)$	$127,916 \pm 0,015$
$\sin^2 \theta_W(M_Z)$	$0,23108 \pm 0,00005$
θ	$\lesssim 10^{-10}$
m_u (2 ГэВ)	$2,5_{-1,0}^{+0,8}$ МэВ
m_d (2 ГэВ)	$5,0_{-1,5}^{+1,0}$ МэВ
m_s (2 ГэВ)	105_{-35}^{+25} МэВ
$m_c(m_c)$	$1,266_{-0,036}^{+0,031}$ ГэВ
$m_b(m_b)$	$4,198 \pm 0,023$ ГэВ
$m_t(m_t)$	$173,10 \pm 1,35$ ГэВ
m_e	$510,998910 \pm 0,000013$ кэВ
m_μ	$105,658367 \pm 0,000004$ МэВ
m_τ	$1,77682 \pm 0,00016$ ГэВ
θ_{12}	$13,02^\circ \pm 0,05^\circ$
θ_{23}	$2,35^\circ \pm 0,06^\circ$
θ_{13}	$0,199^\circ \pm 0,011^\circ$
δ	$1,20 \pm 0,08$
$v(m_\mu)$	$246,221 \pm 0,002$ ГэВ
M_H	115,5 – 127,0 ГэВ (уровень достоверности 95 %)

Что обозначают названия

Элементарные частицы

Масса	Заряд	Спин	Кварки	Бозоны – переносчики взаимодействия
$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	u up	g gluon
$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	c charm	H Higgs boson
$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	t top	γ photon
$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	d down	Z Z boson
$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	s strange	W W boson
$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	b bottom	
$0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	e electron	
$105.7 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	μ muon	
$1.777 \text{ GeV}/c^2$	-1	$1/2$	τ tau	
$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$1/2$	ν_e electron neutrino	
$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	ν_μ muon neutrino	
$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	ν_τ tau neutrino	

Адроны – частицы, участвующие в сильном взаимодействии

Типы адронов



Барионы



Мезоны



Пентакварк



Тетракварк

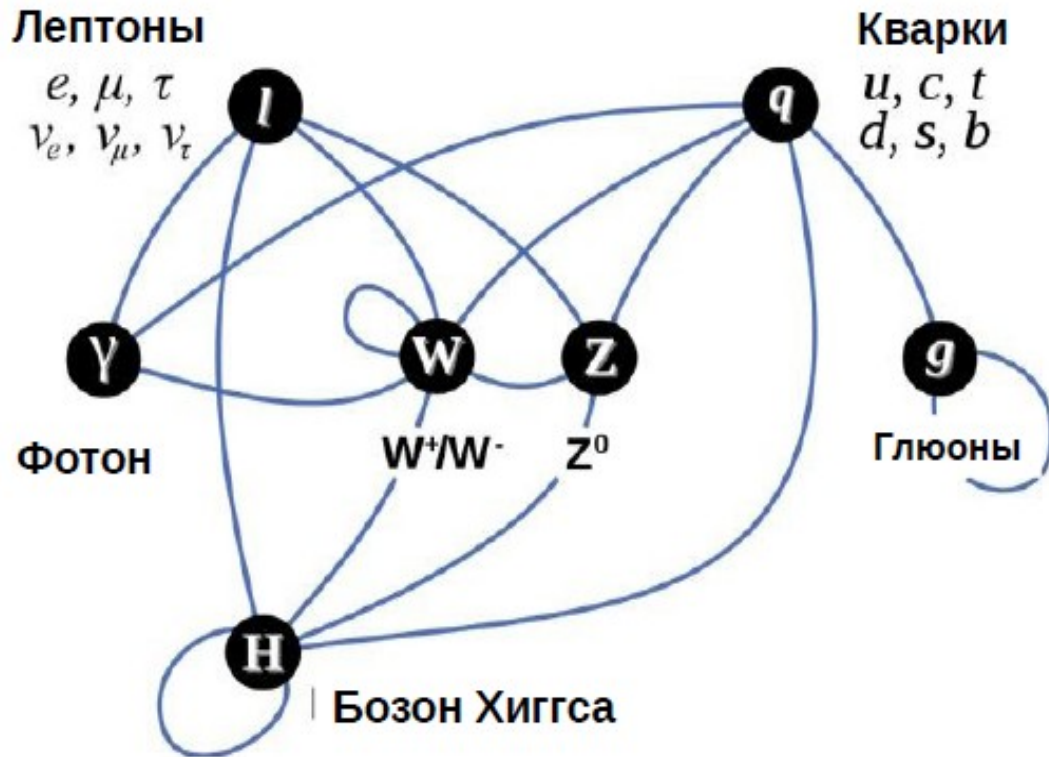


Глюбол

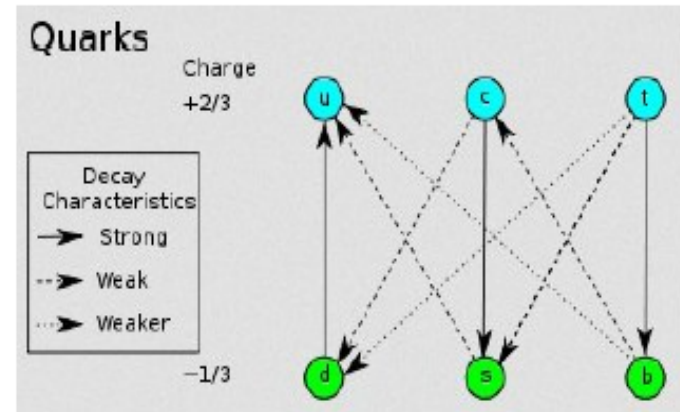


Гибридный мезон

Как эти частицы взаимодействуют



- В СМ кварки могут менять свой аромат только в результате слабого взаимодействия
- Интенсивность переходов не одинакова



“Эстетические” трудности СМ

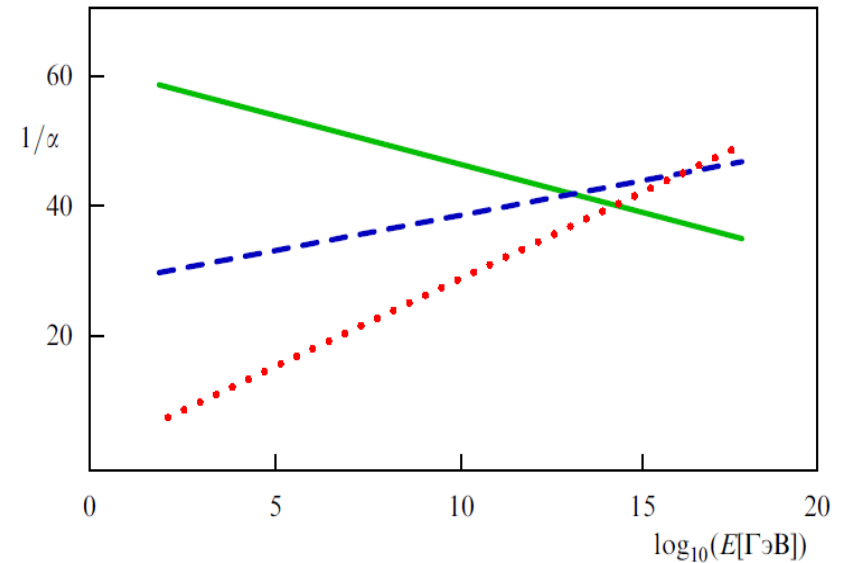
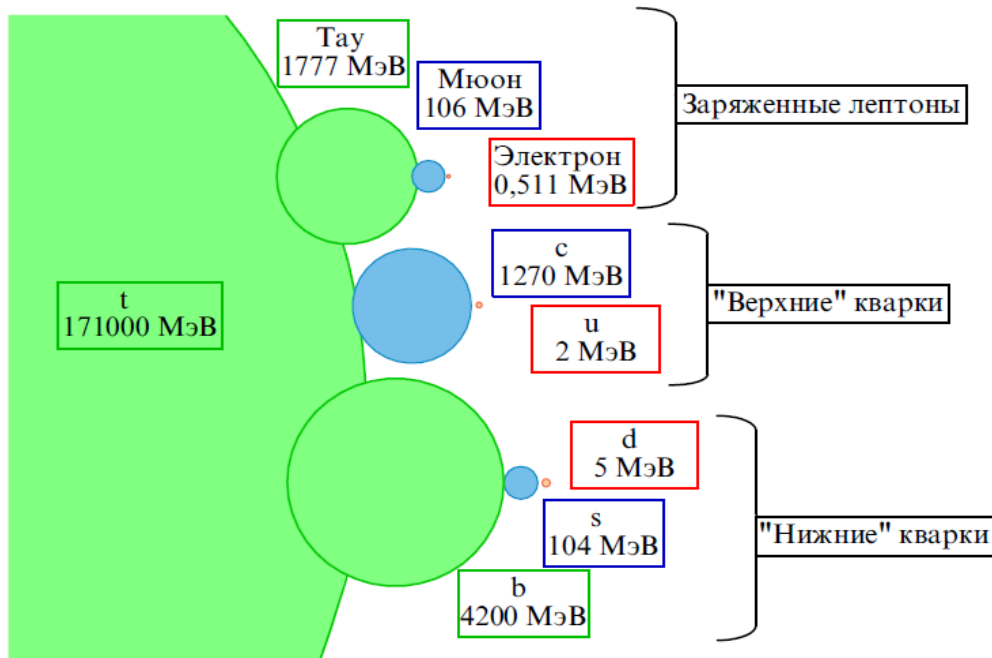
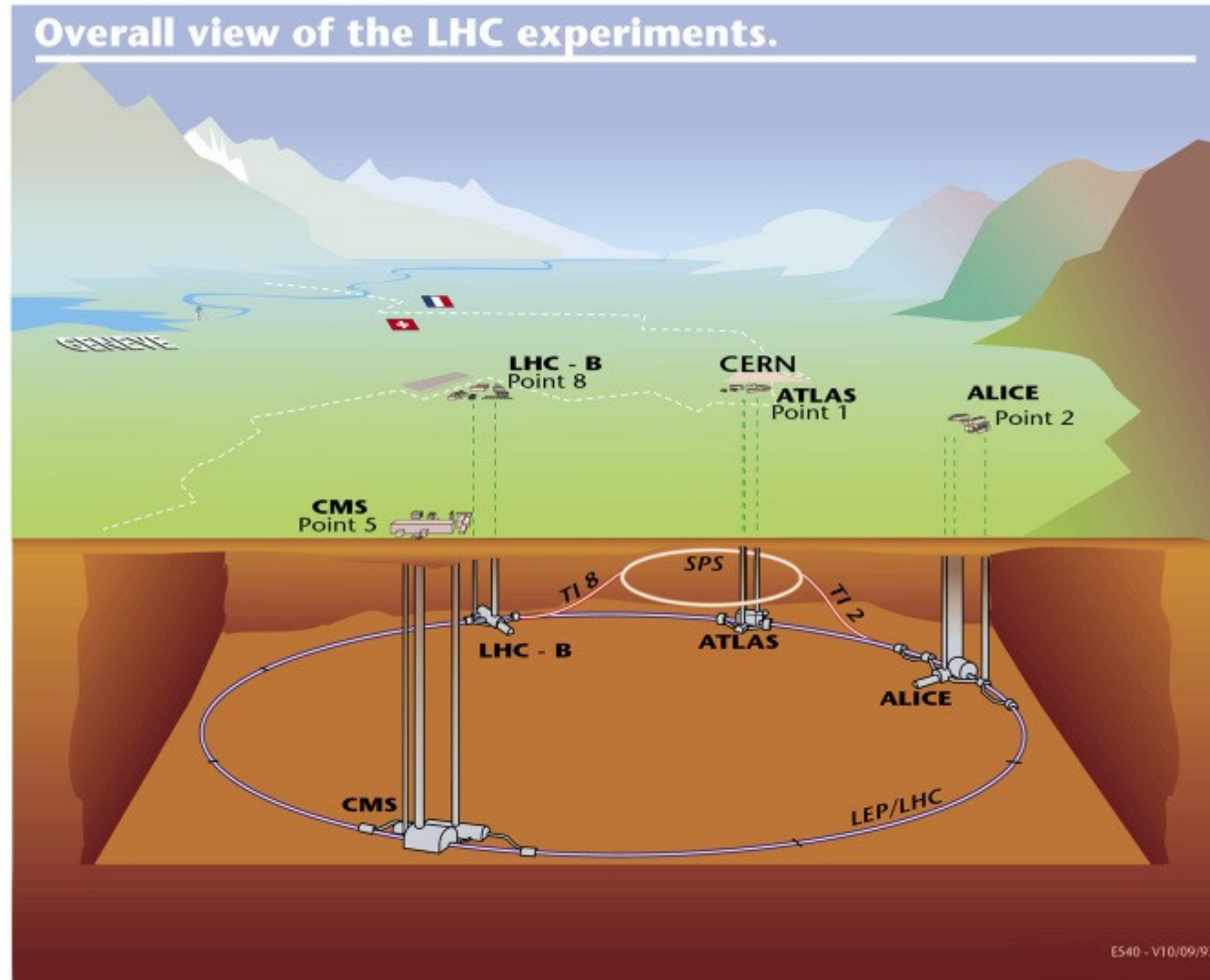


Рис. 14. Зависимость констант калибровочных взаимодействий $U(1)_Y$ (сплошная линия), $SU(2)_L$ (штриховая линия) и $SU(3)_c$ (пунктирная линия) СМ от энергетического масштаба в ведущем приближении.



Большой Адронный Коллайдер



Открытие бозона Хиггса

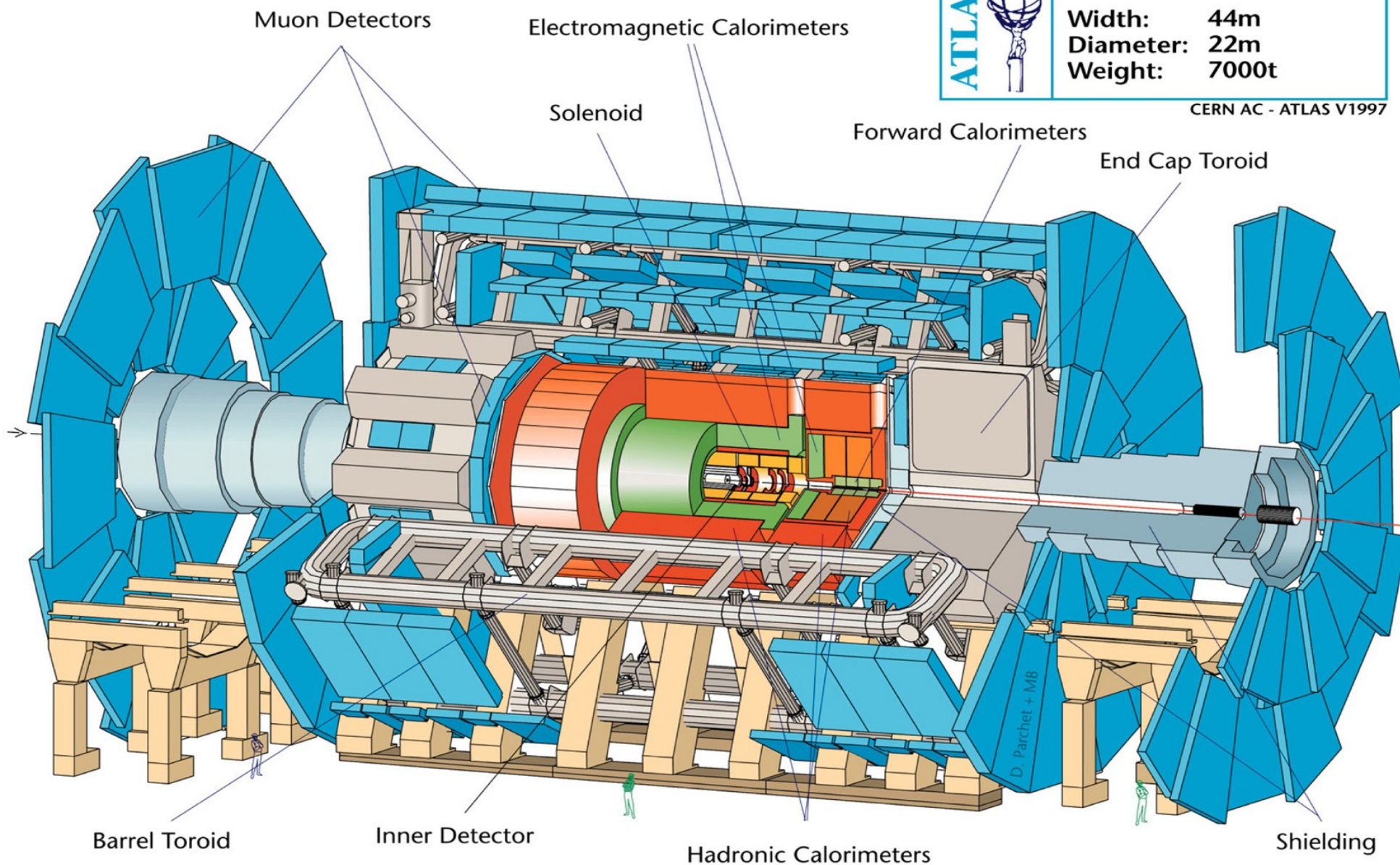
Эксперимент CMS



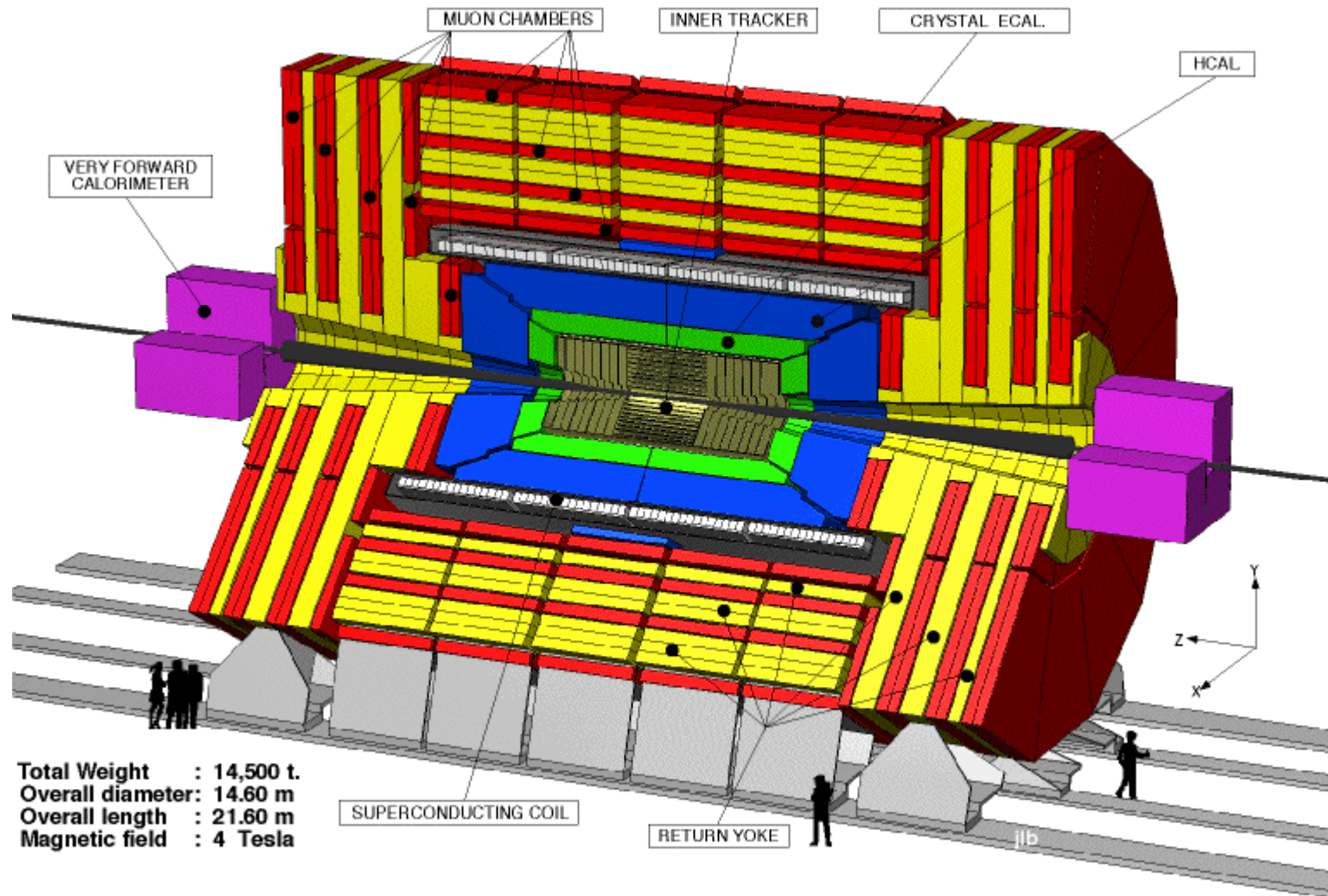
Detector characteristics

Width: 44m
Diameter: 22m
Weight: 7000t

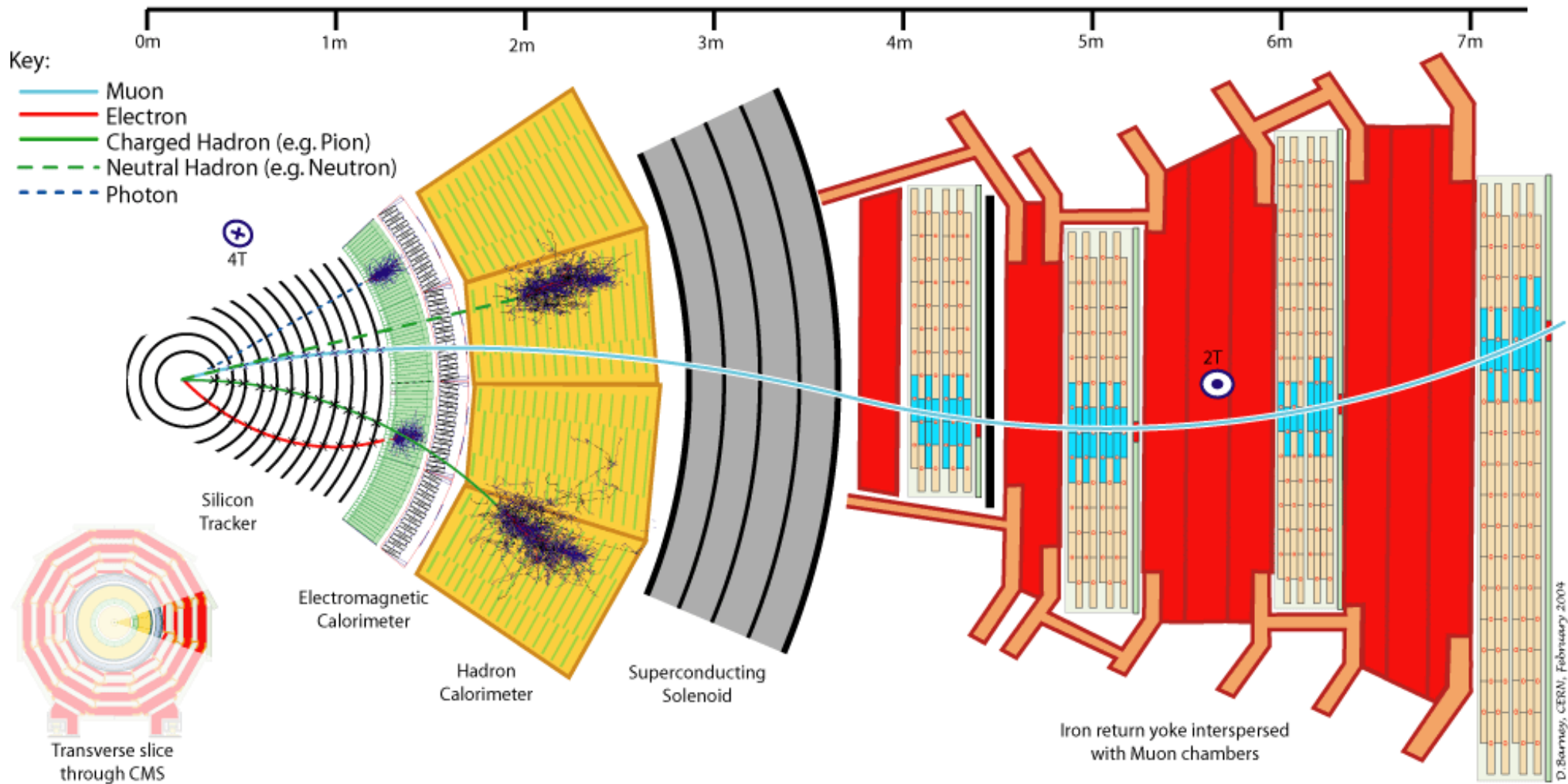
CERN AC - ATLAS V1997



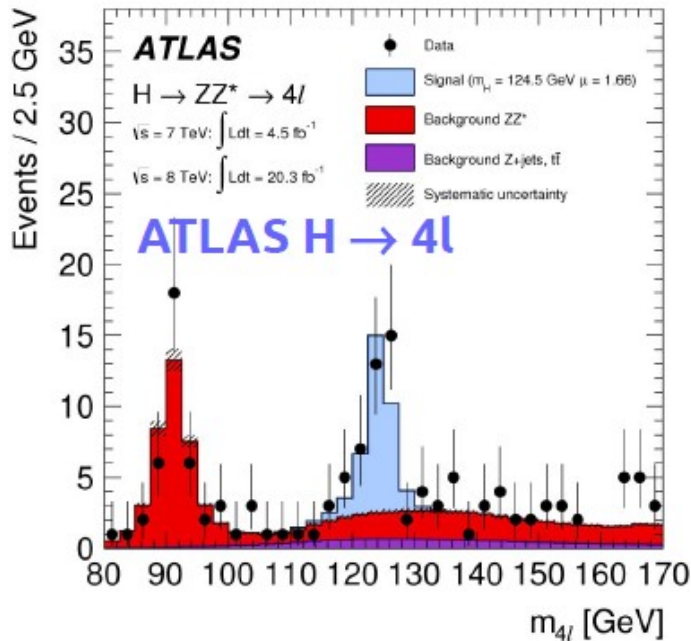
Эксперимент CMS



Эксперимент CMS

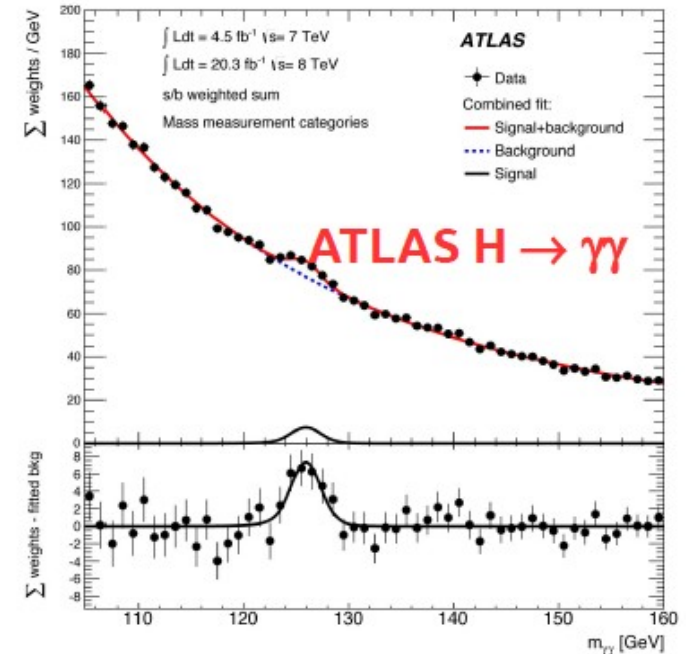


Бозон Хиггса



Combination of ATLAS and CMS mass measurements in

- $H \rightarrow \gamma\gamma$
- $H \rightarrow 4l$

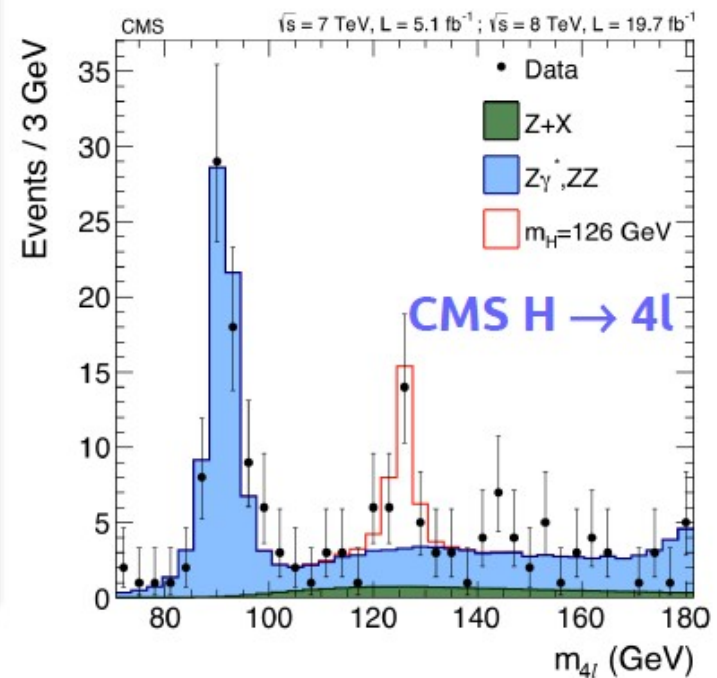
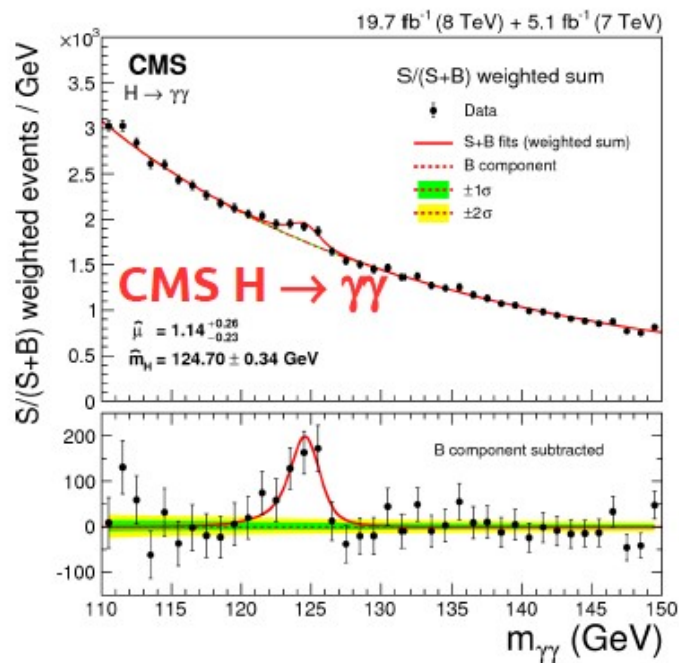


Agnostic to the signal yields

3 signal strength parameter μ for

- $gg \rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma$
- VBF $H \rightarrow \gamma\gamma$
- $H \rightarrow 4l$

simultaneously determined from data (profiled)

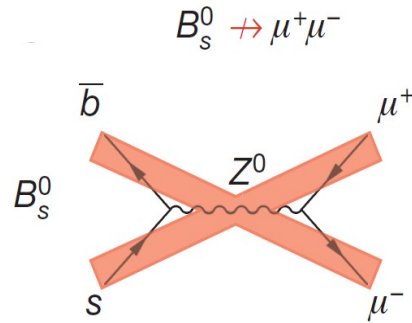
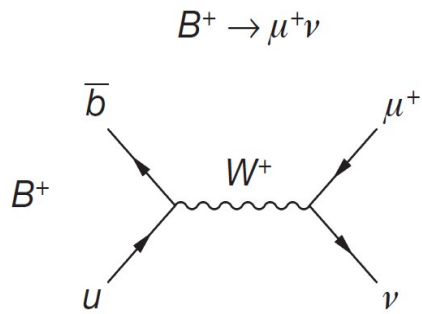


Изучение редких распадов

Rare decays $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

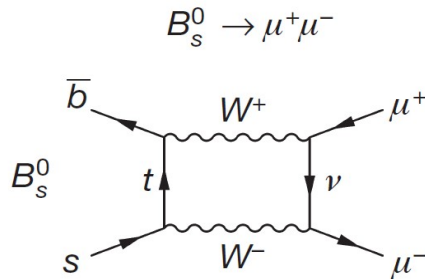
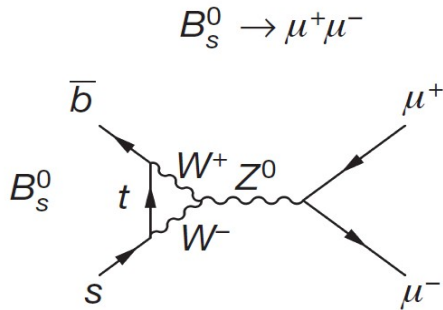
– Helicity suppressed in SM

– $\Delta\Gamma_s$ correction [PRD 86, 014027]



$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{SM}} = (3.66 \pm 0.23) \times 10^{-9}$$

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{SM}} = (1.06 \pm 0.09) \times 10^{-10}$$



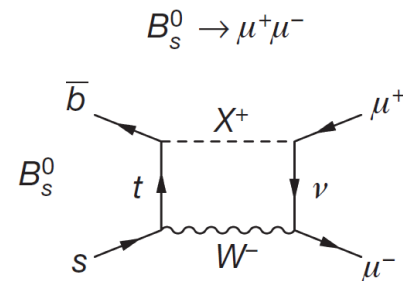
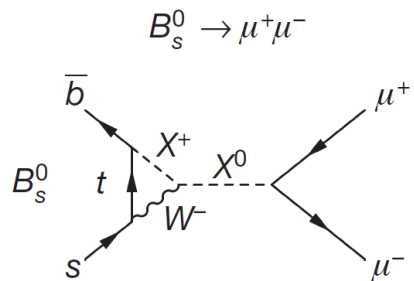
Bobeth et al. Phys. Rev. Lett 112 (2014)

101801

5% precision SM calculations!

Ratio is power discriminator as well

$$\mathcal{R} \equiv \mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{SM}} / \mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{SM}} = 0.0295_{-0.0025}^{+0.0028}$$

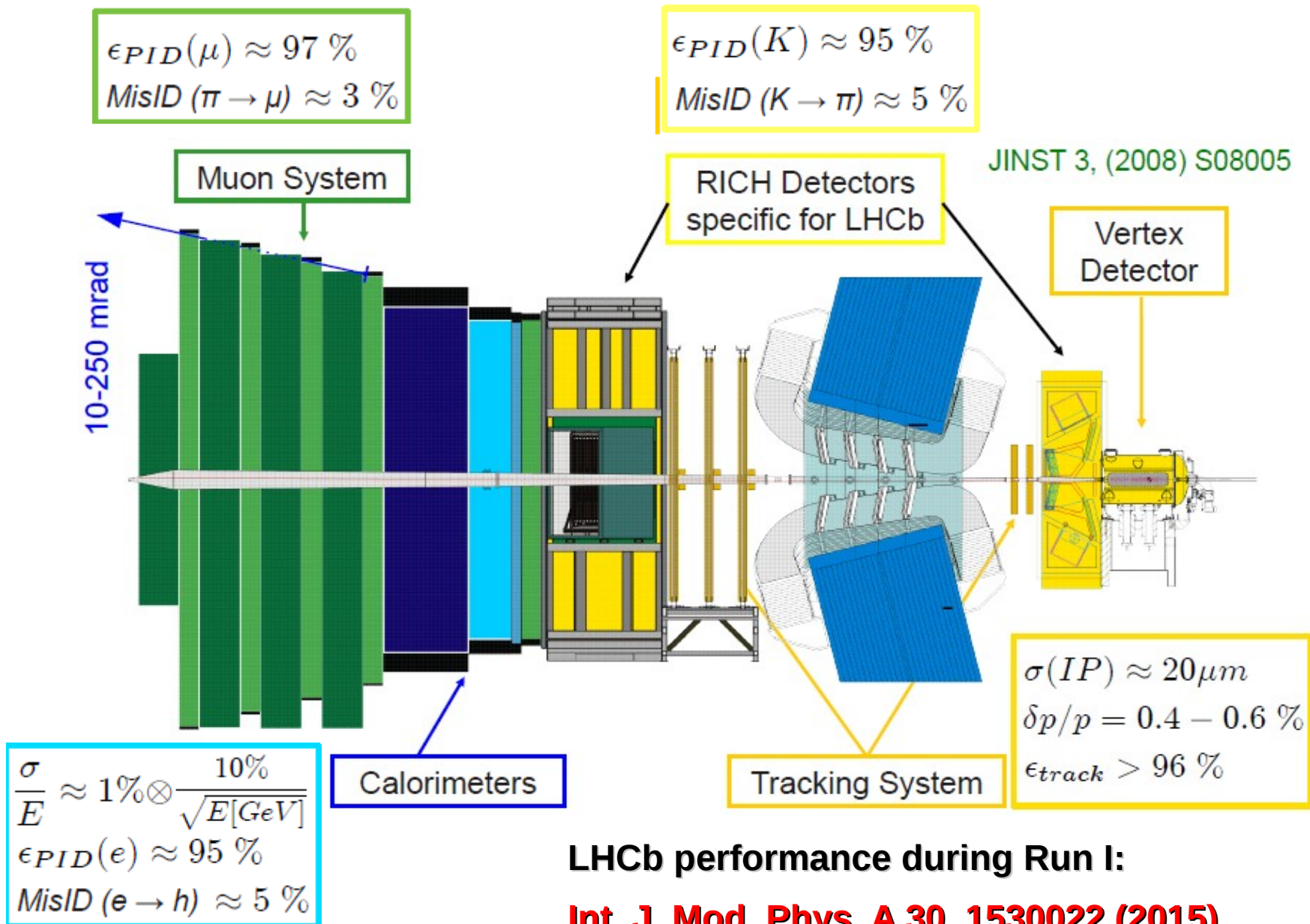


Sensitive to new scalar, pseudoscalar, axial-vector particles in loops

In MSSM:

$$C_{S,P}^{\text{MSSM}} \propto \frac{m_b^2 m_\mu^2 \tan^6 \beta}{M_A^4}$$

Experimental setup



LHCb performance during Run I:

Int. J. Mod. Phys. A 30, 1530022 (2015)

LHCb data analysis

Efficient trigger (L0/HLT1/HLT2):

40MHz \rightarrow 5kHz

Tagging if needed

Event selection

Kinematical and topological info

(p_T , p , IP, vertex and track quality)

PID information

Cut based or multivariate selection

BDT, Neurobayes, etc.

Optimization of selection

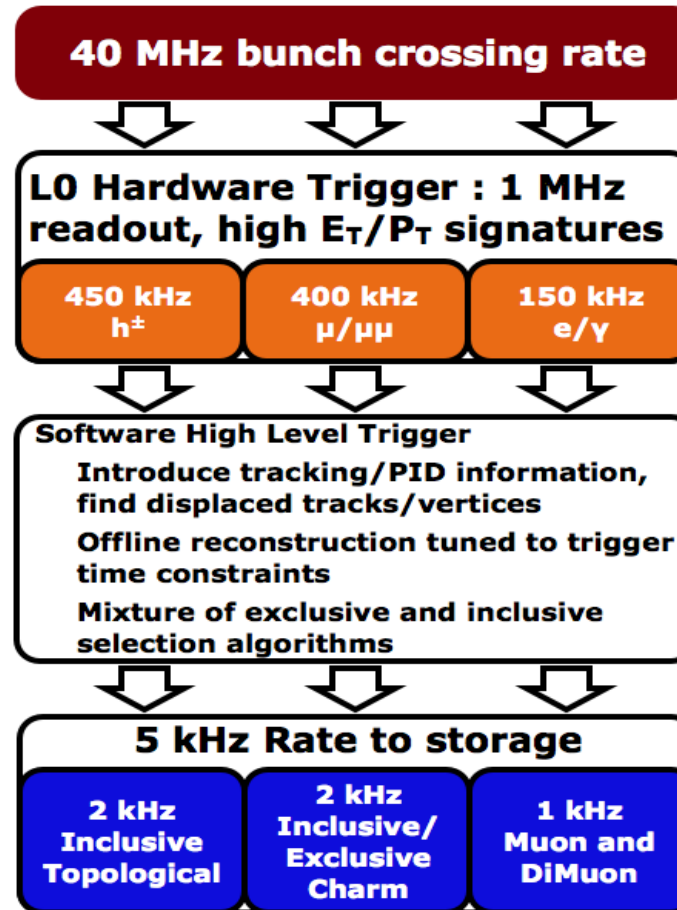
Using MC

Using small sample of real data

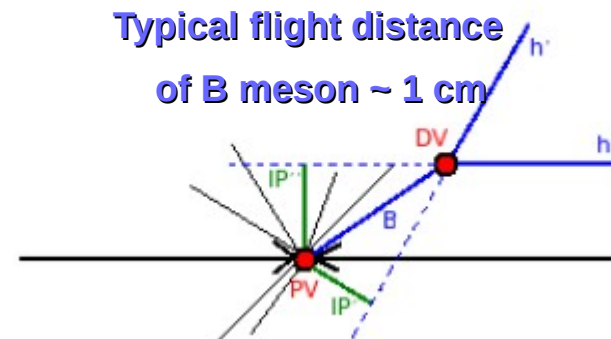
Angular analysis++

Check for systematics

And a lot of other checks!



Trigger



Selection using SV/PV separation:

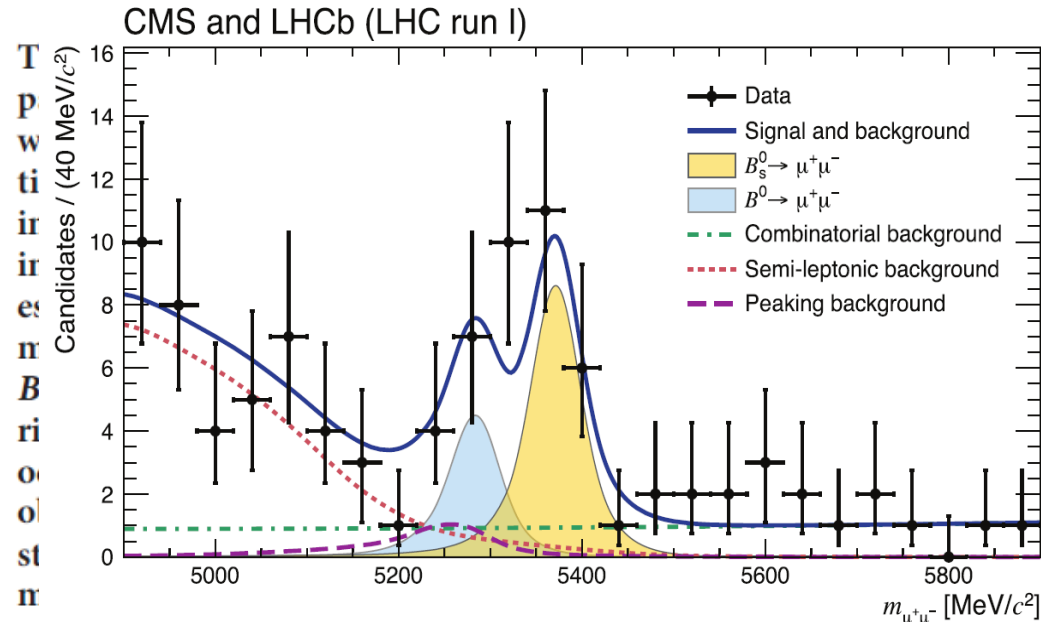
PV = Primary Vertex

DV = Daughter Vertex

(secondary vertex SV)

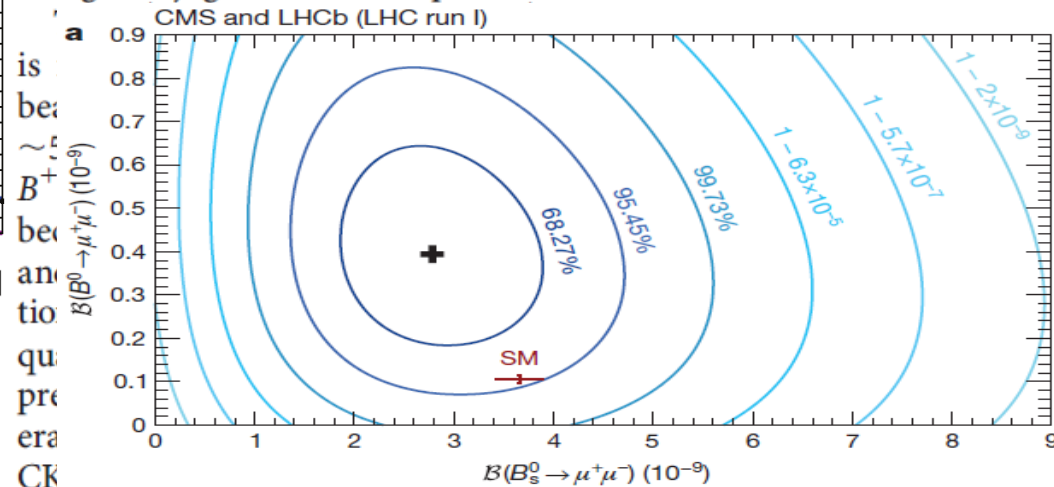
Observation of the rare $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decay from the combined analysis of CMS and LHCb data

The CMS and LHCb collaborations*



at CERN started operating, no evidence for either decay mode had been found. Upper limits on the branching fractions were an order of magnitude above the standard model predictions. The CMS (Compact Muon Solenoid) and LHCb (Large Hadron Collider beauty) collaborations have performed a joint analysis of the data from

respectively. An example of the charged current is the decay of the π^+ meson, which consists of an up (u) quark of electrical charge $+2/3$ of the charge of the proton and a down (d) antiquark of charge $+1/3$. A pictorial representation of this process, known as a Feynman diagram, is shown in Fig. 1a. The u and d quarks are ‘first generation’ or lowest mass quarks. Whenever a decay mode is specified in this Letter, the charge conjugate mode is implied.



CKM

Прямой поиск НФ

(на примере Суперсимметрии)

Суперсимметрия (SUSY)

Суперсимметрия — гипотетическая симметрия, между бозонами и фермионами.
[в (3+1)-мерных простейших суперсимметричных моделях у каждой частицы есть частица **суперпартнер с теми же взаимодействиями**, но со спином отличающимся на $1/2$]

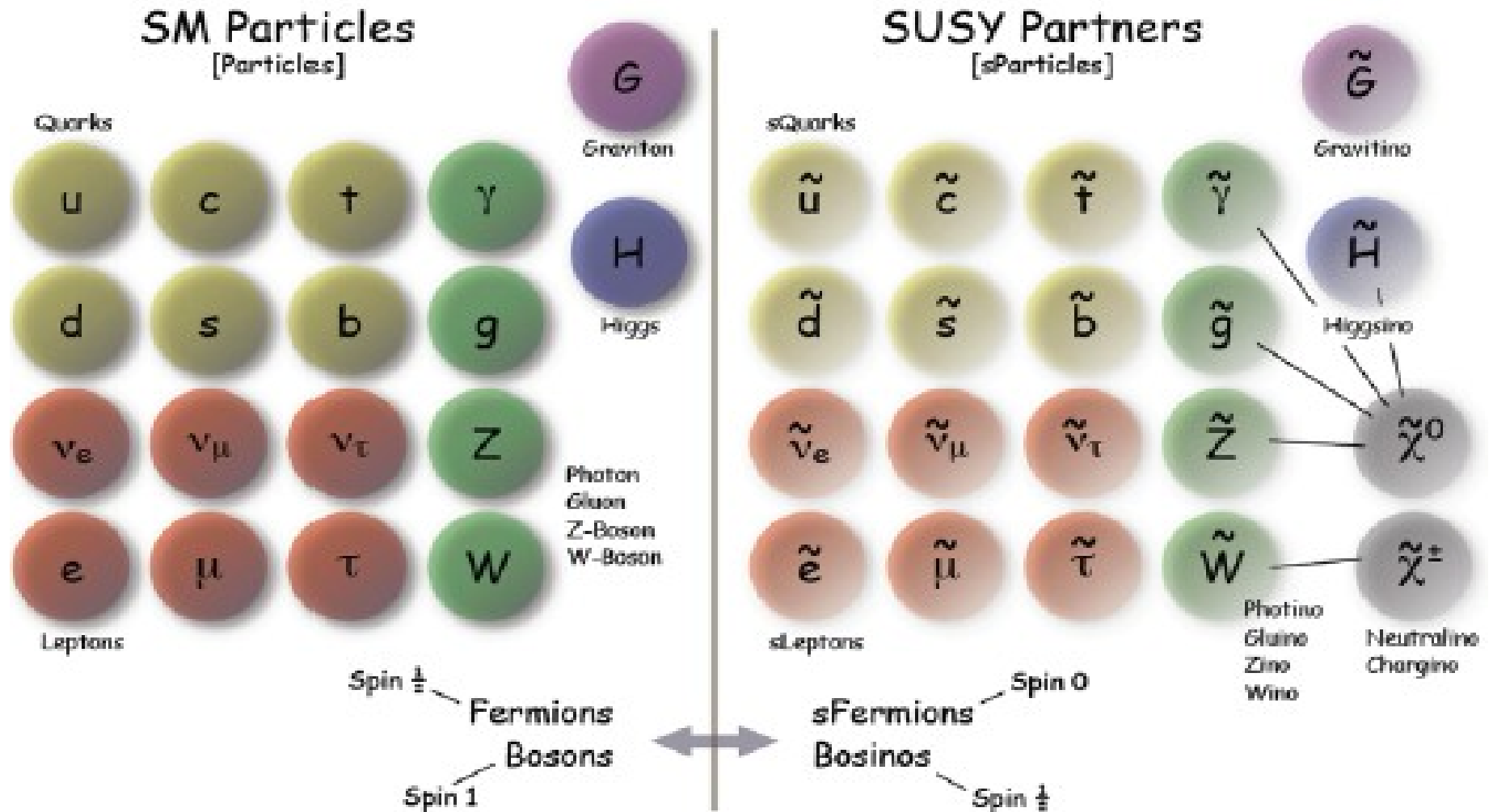
Достоинства идеи:

- 1) Решение проблемы иерархии (рад. поправки к массе бозона Хиггса)
- 2) Унификация калибровочных бегущих констант (возможно объединение электрослабого и сильного взаимодействий)
- 3) Хороший кандидат на объяснение феномена темной материи
(сохранение R-четности => стабильное нейтралينو)

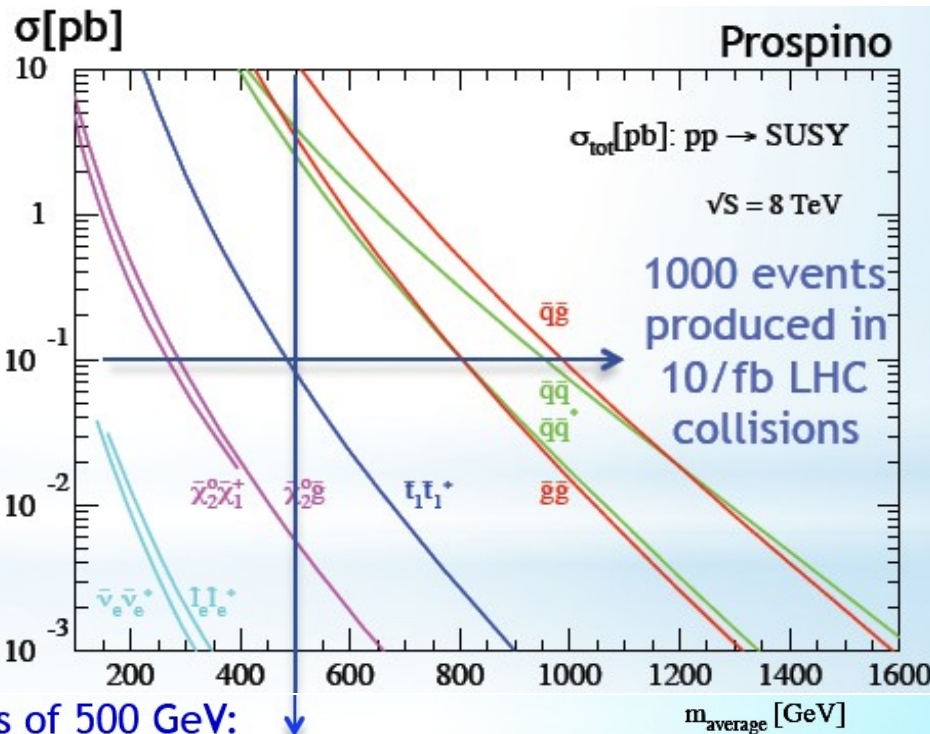
...

N) Хорошая предсказательная сила (Новая Физика на масштабе 1 ТэВ, сохр. R => парное рождение SUSY-частиц, предсказание сечений)

Спектр SUSY-частиц



Исключение масс (модельные расчеты сечений)

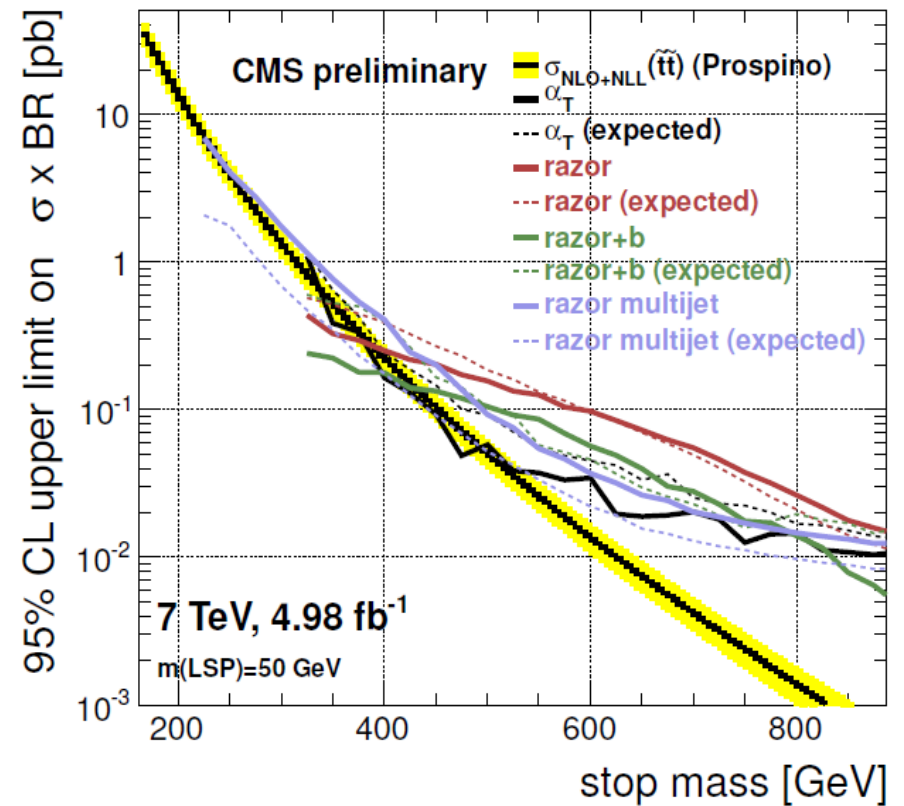


40k gluino pairs, 1000 stops, 50 chargino/neutralino pairs in 10/fb

4

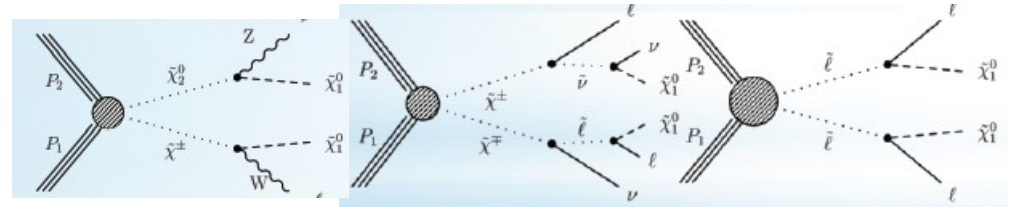
11 December 2012

95% exclusion limits for $\tilde{t} \rightarrow t\tilde{\chi}^u$; $m(\tilde{g}, \tilde{q}) \gg m(\tilde{t})$

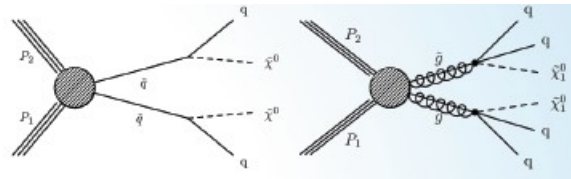


Типичные сигнатуры поиска SUSY (Упрощенные модели, CMS)

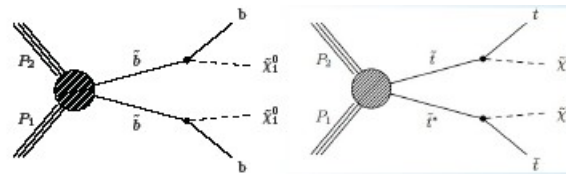
1) Прямое рождение нейтралино, чарджино, слептонов



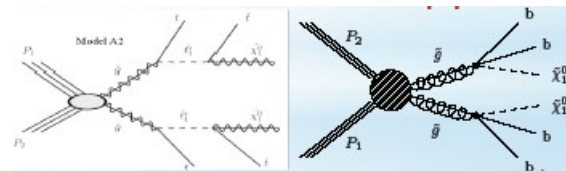
2) Рождение скварков и глюино



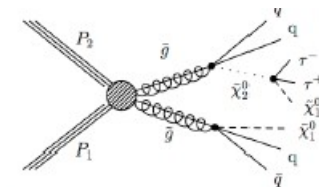
3) Прямое рождение сботтом и стоп кварков



4) Рождение сботтом и стоп посредством глюино

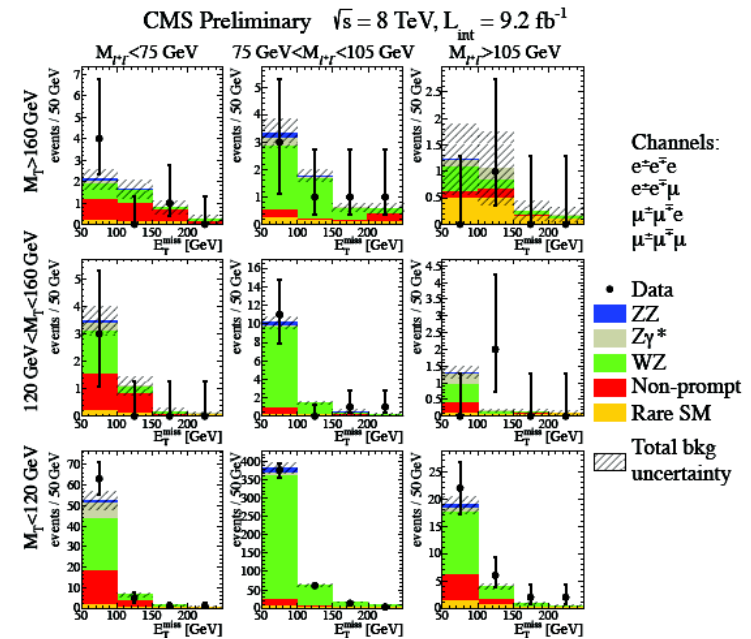
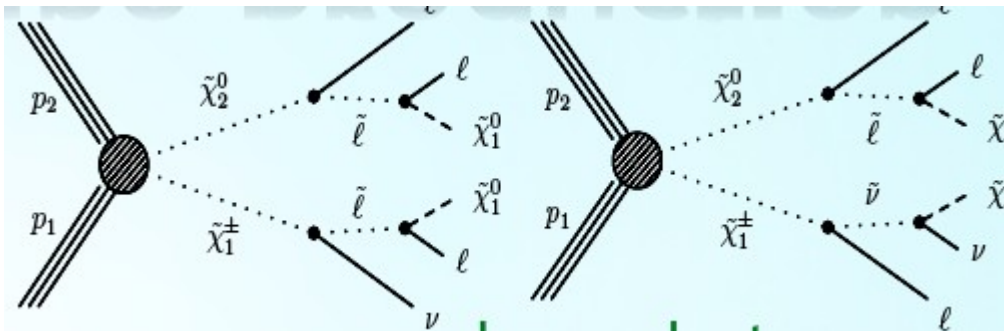


5) Тау-лептноны в распадах чарджино и нейтралино

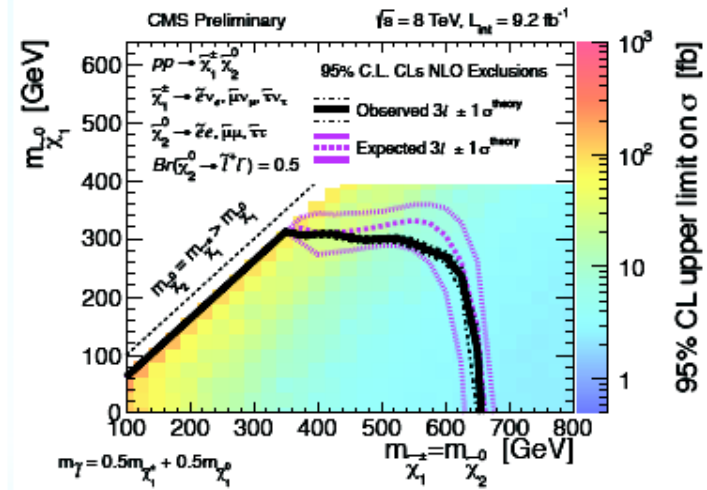
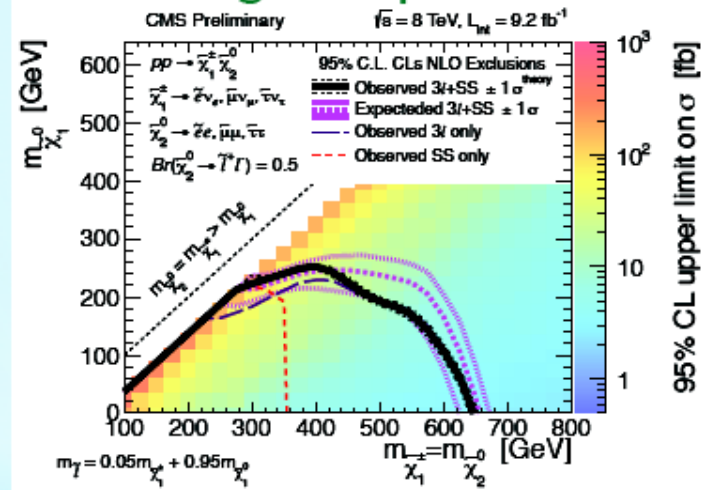


Пример экспериментальных спектров

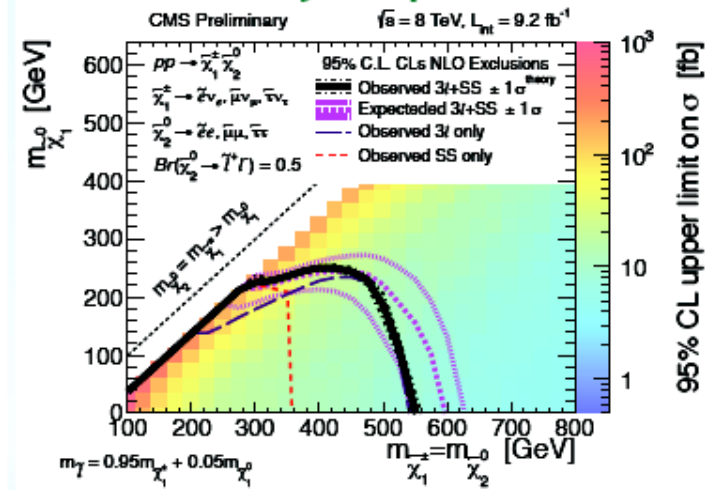
Трехлептонный канал (малый фон от СМ)
 становится доступным на больших светимостях.



light slepton

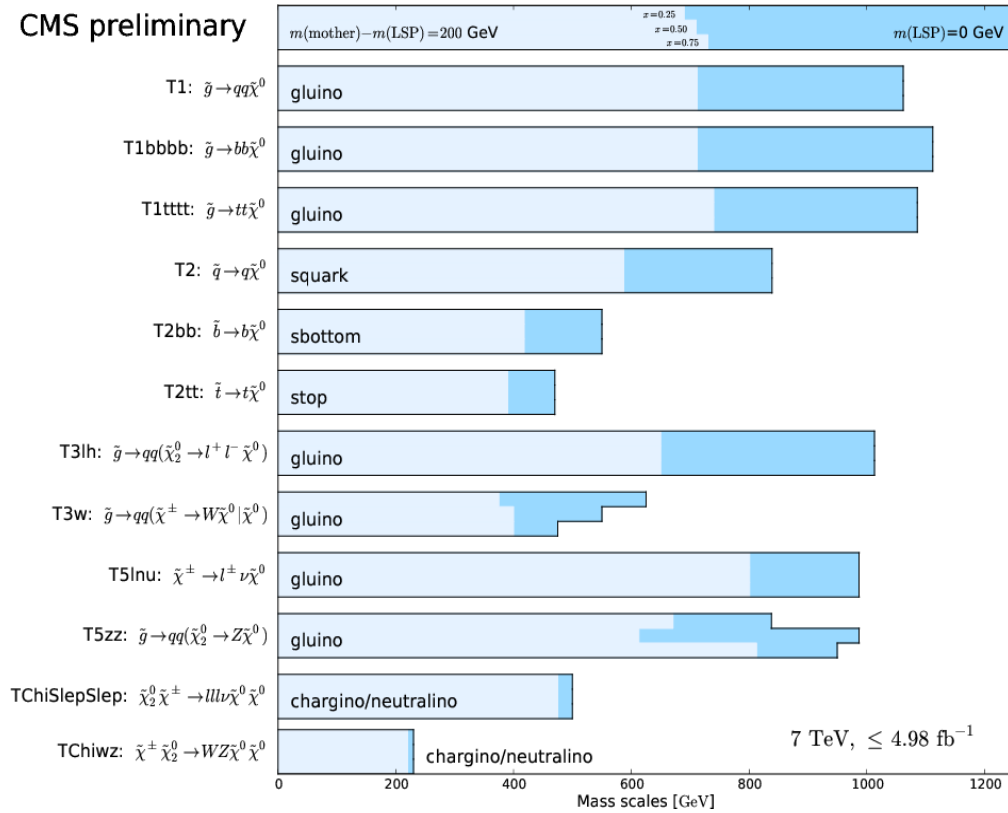


heavy slepton

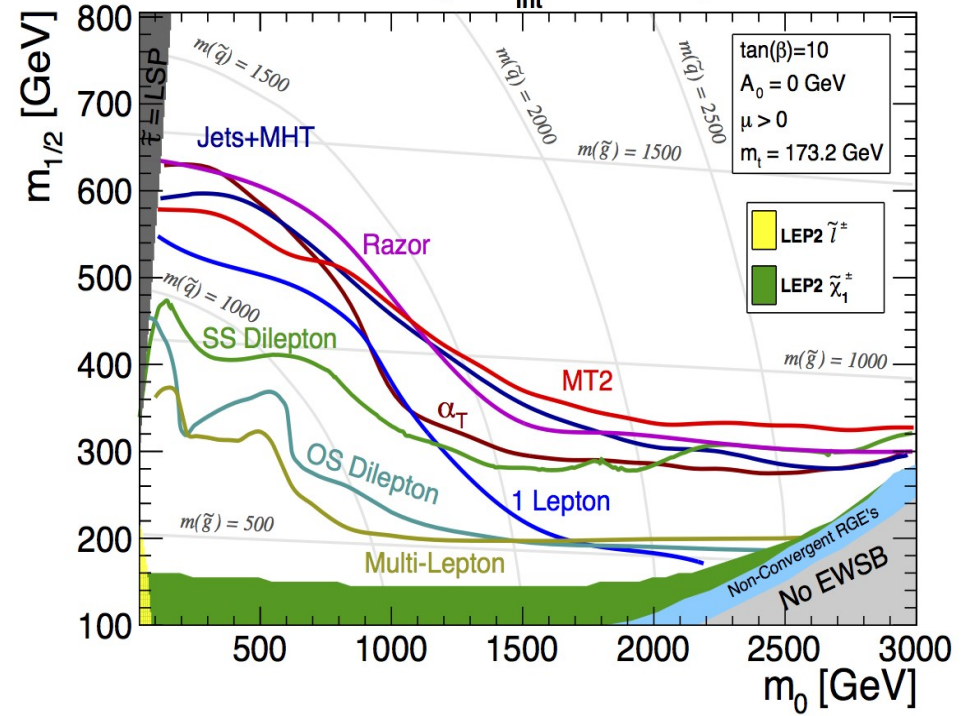


CMS

CMS preliminary



CMS Preliminary $L_{\text{int}} = 4.98 \text{ fb}^{-1}, \sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$



ATLAS

ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits (Status: Dec 2012)

Search Category	Search Description	Integrating Luminosity (L)	Lower Limit	Notes
Inclusive searches	MSUGRA/CMSSM : 0 lep + j's + $E_{T,miss}$	$L=5.8 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-109]	1.50 TeV	$\tilde{q} = \tilde{g}$ mass
	MSUGRA/CMSSM : 1 lep + j's + $E_{T,miss}$	$L=5.8 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-104]	1.24 TeV	$\tilde{q} = \tilde{g}$ mass
	Pheno model : 0 lep + j's + $E_{T,miss}$	$L=5.8 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-109]	1.18 TeV	\tilde{g} mass ($m(\tilde{q}) < 2 \text{ TeV}$, light $\tilde{\chi}_1^0$)
	Pheno model : 0 lep + j's + $E_{T,miss}$	$L=5.8 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-109]	1.38 TeV	\tilde{q} mass ($m(\tilde{g}) < 2 \text{ TeV}$, light $\tilde{\chi}_1^0$)
	Glauino med. $\tilde{\chi}^\pm (\tilde{g} \rightarrow q\tilde{\chi}^\pm)$: 1 lep + j's + $E_{T,miss}$	$L=4.7 \text{ fb}^{-1}$, 7 TeV [1208.4688]	900 GeV	\tilde{g} mass ($m(\tilde{\chi}_1^0) < 200 \text{ GeV}$, $m(\tilde{\chi}_1^\pm) = \frac{1}{2}(m(\tilde{\chi}_1^0) + m(\tilde{g}))$)
	GMSB (\tilde{l} NLSP) : 2 lep (OS) + j's + $E_{T,miss}$	$L=4.7 \text{ fb}^{-1}$, 7 TeV [1208.4688]	1.24 TeV	\tilde{g} mass ($\tan\beta < 15$)
	GMSB ($\tilde{\tau}$ NLSP) : 1-2 τ + 0-1 lep + j's + $E_{T,miss}$	$L=4.7 \text{ fb}^{-1}$, 7 TeV [1210.1314]	1.20 TeV	\tilde{g} mass ($\tan\beta > 20$)
	GGM (bino NLSP) : $\gamma\gamma$ + $E_{T,miss}$	$L=4.8 \text{ fb}^{-1}$, 7 TeV [1209.0753]	1.07 TeV	\tilde{g} mass ($m(\tilde{\chi}_1^0) > 50 \text{ GeV}$)
	GGM (wino NLSP) : γ + lep + $E_{T,miss}$	$L=4.8 \text{ fb}^{-1}$, 7 TeV [ATLAS-CONF-2012-144]	619 GeV	\tilde{g} mass
	GGM (higgsino-bino NLSP) : γ + b + $E_{T,miss}$	$L=4.8 \text{ fb}^{-1}$, 7 TeV [1211.1167]	900 GeV	\tilde{g} mass ($m(\tilde{\chi}_1^0) > 220 \text{ GeV}$)
GGM (higgsino NLSP) : Z + jets + $E_{T,miss}$	$L=5.8 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-152]	690 GeV	\tilde{g} mass ($m(H) > 200 \text{ GeV}$)	
Gravitino LSP : 'monojet' + $E_{T,miss}$	$L=10.5 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-147]	645 GeV	$F^{1/2}$ scale ($m(\tilde{G}) > 10^{-4} \text{ eV}$)	
3rd gen. sq. gluino med.	$\tilde{g} \rightarrow b\tilde{b}\tilde{\chi}_1^0$ (virtual \tilde{b}) : 0 lep + 3 b-j's + $E_{T,miss}$	$L=12.8 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-145]	1.24 TeV	\tilde{g} mass ($m(\tilde{\chi}_1^0) < 200 \text{ GeV}$)
	$\tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0$ (virtual \tilde{t}) : 2 lep (SS) + j's + $E_{T,miss}$	$L=5.8 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-105]	850 GeV	\tilde{g} mass ($m(\tilde{\chi}_1^0) < 300 \text{ GeV}$)
	$\tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0$ (virtual \tilde{t}) : 3 lep + j's + $E_{T,miss}$	$L=13.0 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-151]	860 GeV	\tilde{g} mass ($m(\tilde{\chi}_1^0) < 300 \text{ GeV}$)
	$\tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0$ (virtual \tilde{t}) : 0 lep + multi-j's + $E_{T,miss}$	$L=5.8 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-103]	1.00 TeV	\tilde{g} mass ($m(\tilde{\chi}_1^0) < 300 \text{ GeV}$)
	$\tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0$ (virtual \tilde{t}) : 0 lep + 3 b-j's + $E_{T,miss}$	$L=12.8 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-145]	1.15 TeV	\tilde{g} mass ($m(\tilde{\chi}_1^0) < 200 \text{ GeV}$)
	$bb, b_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$: 0 lep + 2-b-jets + $E_{T,miss}$	$L=12.8 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-165]	620 GeV	b mass ($m(\tilde{\chi}_1^0) < 120 \text{ GeV}$)
	$bb, b_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$: 3 lep + j's + $E_{T,miss}$	$L=13.0 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-151]	405 GeV	b mass ($m(\tilde{\chi}_1^\pm) = 2m(\tilde{\chi}_1^0)$)
	$\tilde{t}\tilde{t}$ (light), $\tilde{t} \rightarrow b\tilde{\chi}_1^\pm$: 1/2 lep (+ b-jet) + $E_{T,miss}$	$L=4.7 \text{ fb}^{-1}$, 7 TeV [1208.4305, 1209.2102, 167 GeV]	\tilde{t} mass ($m(\tilde{\chi}_1^0) = 55 \text{ GeV}$)	
	$\tilde{t}\tilde{t}$ (medium), $\tilde{t} \rightarrow b\tilde{\chi}_1^\pm$: 1 lep + b-jet + $E_{T,miss}$	$L=13.0 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-166]	160-350 GeV	\tilde{t} mass ($m(\tilde{\chi}_1^0) = 0 \text{ GeV}$, $m(\tilde{\chi}_1^\pm) = 150 \text{ GeV}$)
	$\tilde{t}\tilde{t}$ (medium), $\tilde{t} \rightarrow b\tilde{\chi}_1^\pm$: 2 lep + $E_{T,miss}$	$L=13.0 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-167]	160-440 GeV	\tilde{t} mass ($m(\tilde{\chi}_1^0) = 0 \text{ GeV}$, $m(\tilde{t}) - m(\tilde{\chi}_1^\pm) = 10 \text{ GeV}$)
3rd gen. squarks direct production	$\tilde{t}\tilde{t}$ (medium), $\tilde{t} \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$: 1 lep + b-jet + $E_{T,miss}$	$L=13.0 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-166]	230-560 GeV	\tilde{t} mass ($m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$)
	$\tilde{t}\tilde{t}$ (medium), $\tilde{t} \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$: 0/1/2 lep (+ b-jets) + $E_{T,miss}$	$L=4.7 \text{ fb}^{-1}$, 7 TeV [1208.1447, 1208.2590, 1209.4186]	230-465 GeV	\tilde{t} mass ($m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$)
	$\tilde{t}\tilde{t}$ (natural GMSB) : Z ($\rightarrow ll$) + b-jet + $E_{T,miss}$	$L=2.1 \text{ fb}^{-1}$, 7 TeV [1204.6736]	310 GeV	\tilde{t} mass ($115 < m(\tilde{\chi}_1^0) < 230 \text{ GeV}$)
	$\tilde{l}_1\tilde{l}_1 \rightarrow l\tilde{\chi}_1^0$: 2 lep + $E_{T,miss}$	$L=4.7 \text{ fb}^{-1}$, 7 TeV [1208.2884]	85-195 GeV	l mass ($m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$)
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^- \rightarrow l\tilde{\nu}(l\tilde{\nu}) \rightarrow l\nu\tilde{\chi}_1^0$: 2 lep + $E_{T,miss}$	$L=4.7 \text{ fb}^{-1}$, 7 TeV [1208.2884]	110-340 GeV	$\tilde{\chi}_1^\pm$ mass ($m(\tilde{\chi}_1^0) < 10 \text{ GeV}$, $m(\tilde{l\nu}) = \frac{1}{2}(m(\tilde{\chi}_1^\pm) + m(\tilde{\chi}_1^0))$)
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_2^- \rightarrow l\nu\tilde{l}(l\nu\tilde{l}) \rightarrow l\nu\tilde{l}\tilde{\nu}$: 3 lep + $E_{T,miss}$	$L=13.0 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-154]	580 GeV	$\tilde{\chi}_1^\pm$ mass ($m(\tilde{\chi}_1^\pm) = m(\tilde{\chi}_2^0)$, $m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$, $m(\tilde{l\nu})$ as above)
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_2^- \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0 Z\tilde{\chi}_1^0$: 3 lep + $E_{T,miss}$	$L=13.0 \text{ fb}^{-1}$, 8 TeV [ATLAS-CONF-2012-154]	140-295 GeV	$\tilde{\chi}_1^\pm$ mass ($m(\tilde{\chi}_1^\pm) = m(\tilde{\chi}_2^0)$, $m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$, sleptons decoupled)
	Direct $\tilde{\chi}_1^0$ pair prod. (AMSB) : long-lived $\tilde{\chi}_1^0$	$L=4.7 \text{ fb}^{-1}$, 7 TeV [1210.2852]	220 GeV	$\tilde{\chi}_1^0$ mass ($1 < \tau(\tilde{\chi}_1^0) < 10 \text{ ns}$)
	Stable \tilde{g} R-hadrons : low β , $\beta\gamma$ (full detector)	$L=4.7 \text{ fb}^{-1}$, 7 TeV [1211.1597]	985 GeV	\tilde{g} mass
	Stable \tilde{t} R-hadrons : low β , $\beta\gamma$ (full detector)	$L=4.7 \text{ fb}^{-1}$, 7 TeV [1211.1597]	683 GeV	t mass
Long-lived particles	GMSB : stable $\tilde{\tau}$	$L=4.7 \text{ fb}^{-1}$, 7 TeV [1211.1597]	300 GeV	$\tilde{\tau}$ mass ($5 < \tan\beta < 20$)
	$\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow qq\mu$ (RPV) : μ + heavy displaced vertex	$L=4.4 \text{ fb}^{-1}$, 7 TeV [1210.7451]	700 GeV	\tilde{q} mass ($0.3 \times 10^{-5} < \lambda_{211} < 1.5 \times 10^{-5}$, $1 \text{ mm} < c\tau < 1 \text{ m}$, \tilde{g} decoupled)

ATLAS Preliminary

$\int L dt = (2.1 - 13.0) \text{ fb}^{-1}$
 $\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$

8 TeV results
 7 TeV results