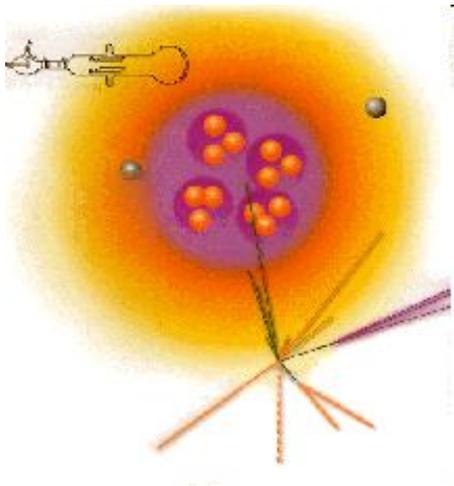
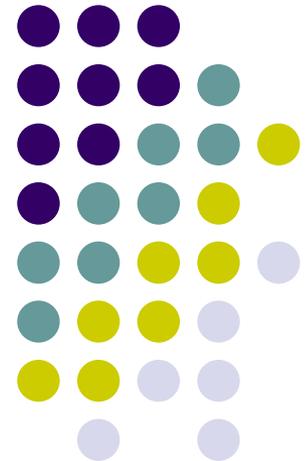


СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

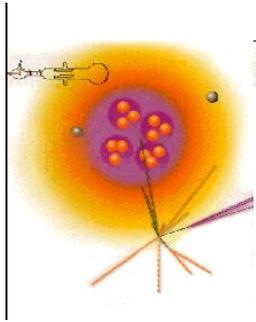


Алексей Гладышев
(ЛТФ ОИЯИ, Дубна)

ЦЕРН, 6-7 ноября 2017 г.

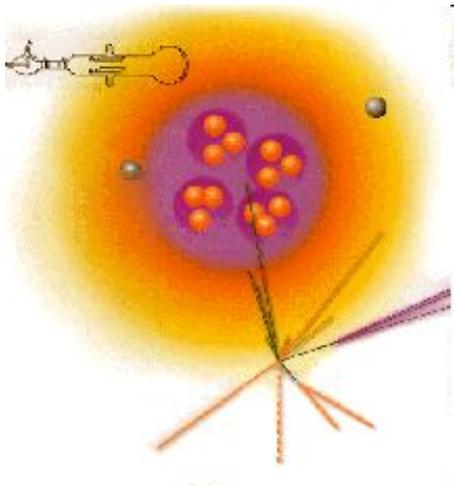


Современная физика элементарных частиц



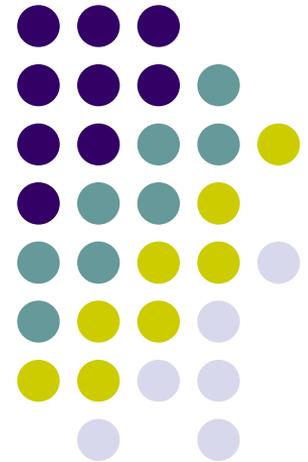
- Исторический обзор физики элементарных частиц:
«первые» «элементарные» частицы
- Стандартная модель фундаментальных взаимодействий
 - Кварки и лептоны
 - Переносчики взаимодействий
 - Экспериментальная проверка Стандартной Модели
- За пределами Стандартной Модели
- Эксперименты настоящего времени и ближайшего будущего

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ истории Нобелевских премий

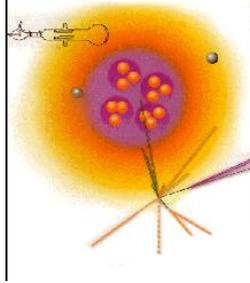


Алексей Гладышев
(ЛТФ ОИЯИ, Дубна)

ЦЕРН, 6-7 ноября 2017 г.



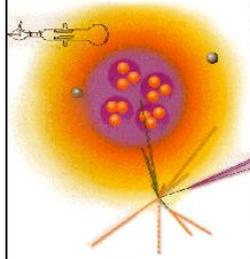
Начало физики частиц: до нашей эры



- **V век до н.э.** – древнегреческие философы **Левкипп** и **Демокрит** высказали мысль о том, что вещество состоит из неделимых частиц – **АТОМОВ** (от греческого «атомос» – неделимый) и пустого пространства



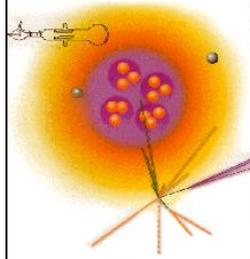
Начало физики частиц: из чего состоят атомы ?



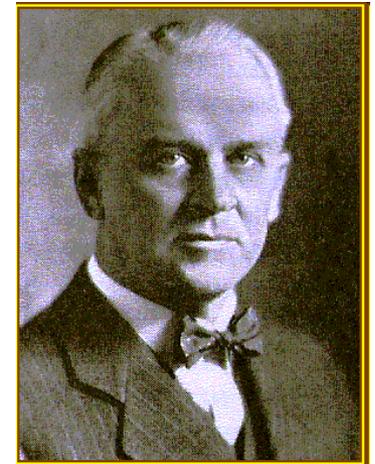
- **1897 год** - **Джозеф-Джон Томсон** открыл в катодных лучах первую элементарную частицу – **ЭЛЕКТРОН** (выступил на заседании Лондонского королевского общества 29.04.97)
- В **1906 г.** Томсон был удостоен Нобелевской премии по физике за «исследование электропроводности в газах»
- **НАЧАЛО ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**



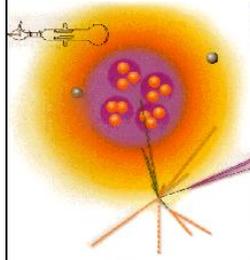
Начало физики частиц: из чего состоят атомы ?



- **1906-1914 годы** - **Роберт Эндрюс Милликен** (1868-1953) точно измерил заряд электрона
- В **1923 г.** Р. Милликену была присуждена Нобелевская премия по физике «за определение элементарного электрического заряда»
- **1815 год** – **Уильям Праут** высказал гипотезу о том, что атомы всех химических элементов состоят из целого числа фундаментальных атомов – атомов водорода.

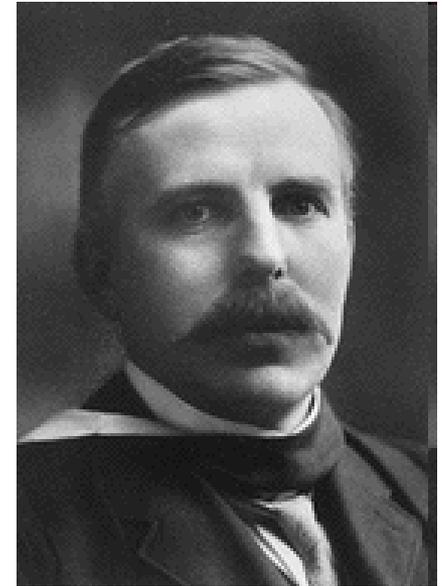


Начало физики частиц: из чего состоят атомы ?

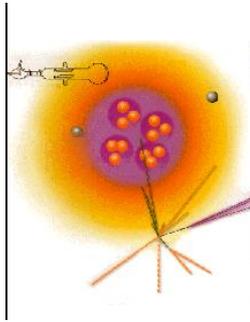


- Эрнест Резерфорд – основоположник ядерной физики
- 1899 год – открыл альфа- и бета-лучи и установил их природу
- 1903 год – создал (совместно с Ф. Содди) теорию радиоактивности

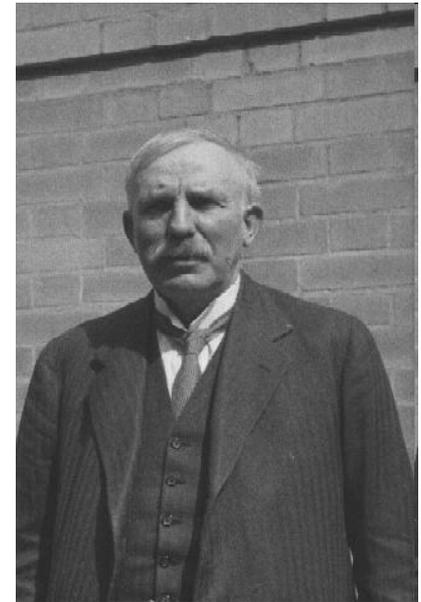
- В 1908 г. был удостоен Нобелевской премии по химии «за проведенные им исследования в области распада элементов в химии радиоактивных веществ»



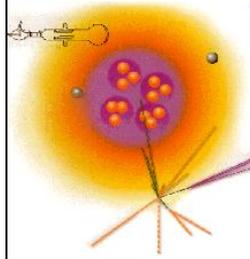
Начало физики частиц: из чего состоят атомы ?



- **1911 год** – предложил планетарную модель атома
- **1919 год** – осуществил первую искусственную ядерную реакцию – наблюдал выбивание ядер водорода из ядер азота, бомбардируемых альфа-частицами
- **1920 год** – впервые использовал термин **ПРОТОН** (от греческого «протос» – первый) для ядер водорода
- **1921 год** – предсказал существование нейтрона



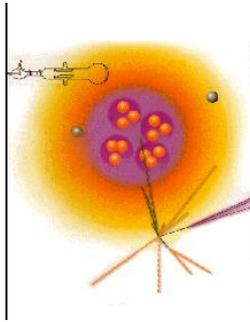
Начало физики частиц: из чего состоят атомы ?



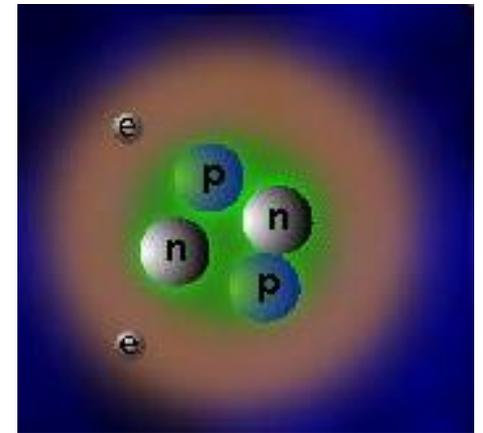
- **1932 год** – Джеймс Чедвик, исследуя излучение, возникающее при бомбардировке бериллиевой мишени альфа-частицами, показал, что оно представляет собой поток нейтральных частиц – **НЕЙТРОНОВ**. Наличие нейтронов объясняло существование изотопов.
- В 1935 г. был удостоен Нобелевской премии по физике «за открытие нейтрона»



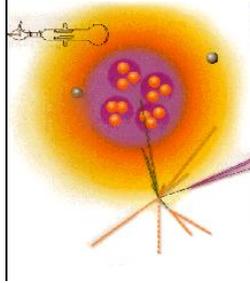
Начало физики частиц: из чего состоят атомы ?



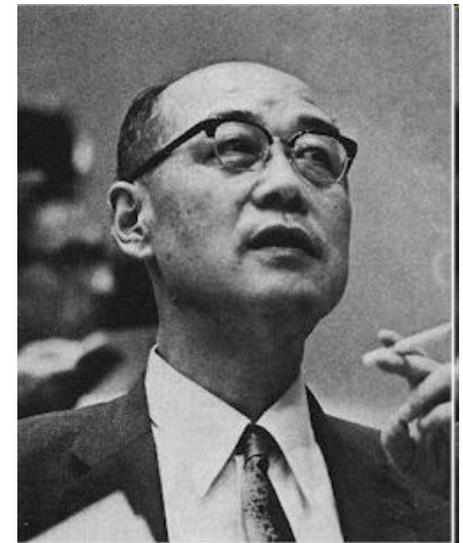
- К середине 30-х годов XX века казалось, что структура материи полностью разгадана. Кирпичики материи – **протоны**, **нейтроны** и **электроны**.
- Однако оставались вопросы:
 - Что удерживает протоны и нейтроны в атомном ядре?
 - Какие силы отвечают за радиоактивные распады атомных ядер, дающие альфа-, бета- и гамма-лучи?



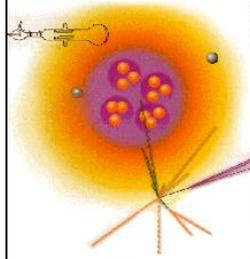
Начало физики частиц: космические пришельцы



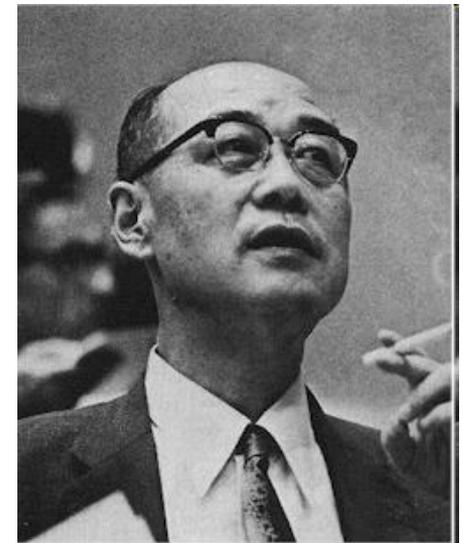
- **1934 год** – Хидеки Юкава предложил теорию внутриядерных взаимодействий. Теория требовала существования новых частиц – мезонов, в несколько раз легче протона.
- **1937 год** – предсказанные частицы, названные **ПИ-МЕЗОНАМИ**, были открыты в космических лучах – потоках частиц высокой энергии, преимущественно протонов, приходящих из мирового пространства, и рожденных ими в атмосфере Земли в результате взаимодействия с атомными ядрами.



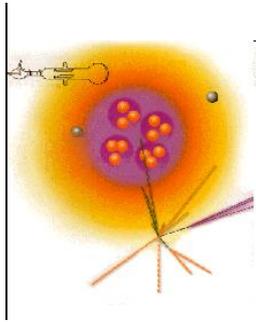
Начало физики частиц: космические пришельцы



- **1939 год** – предсказал существование нейтральных мезонов.
- **1949 год** – после открытия пи-мезонов (1947, 1948) Х. Юкава получил Нобелевскую премию по физике «за предсказание существования мезонов на основе теоретических исследований ядерных сил».
- **1953 год** – выдвинул идею частиц – переносчиков слабого взаимодействия: W-бозонов.

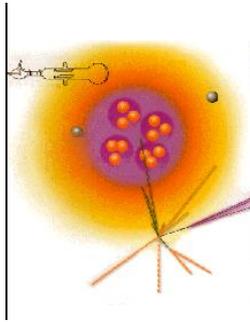


Начало физики частиц: antimatter matters

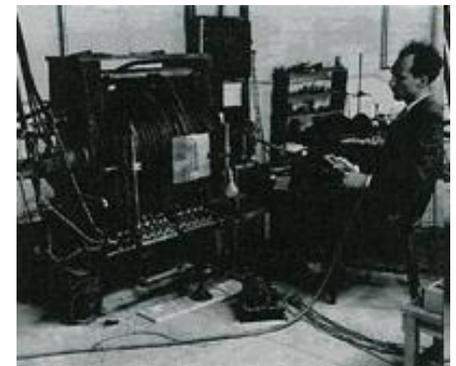
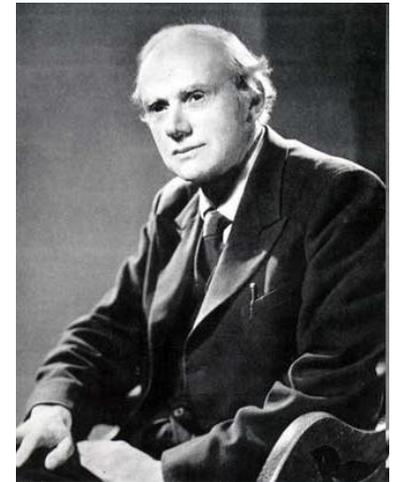


- **1928-1930 гг** – Поль Дирак сформулировал квантовую теорию описывающую движение электронов в электрическом и магнитном полях. Теория требовала существование новой частицы – с той же массой, что и электрон, но положительно заряженной!
- **1931 год** – Карл Дейвид Андерсон, изучая тысячи фотографий конденсационных треков, от высокоэнергетических частиц, заметил несколько следов, которые отличались от следов электронов только одним: они отклонялись в противоположном направлении. Это были **ПОЗИТРОНЫ**.

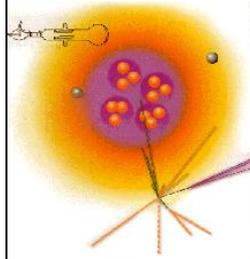
Начало физики частиц: antimatter matters



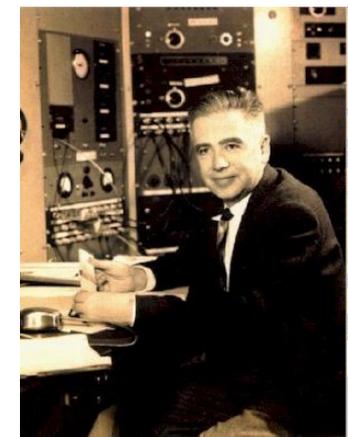
- **1933 год** – П. Дирак (вместе с Э. Шредингером) получил Нобелевскую премию по физике «за открытие новых продуктивных форм атомной теории»
- **1936 год** – К. Андерсон получил Нобелевскую премию по физике «за открытие позитрона» (совместно с Виктором Гессом, открывшим в 1912 г., космические лучи и доказавшим их внеземное происхождение)



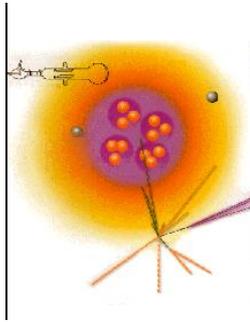
Начало физики частиц: antimatter matters



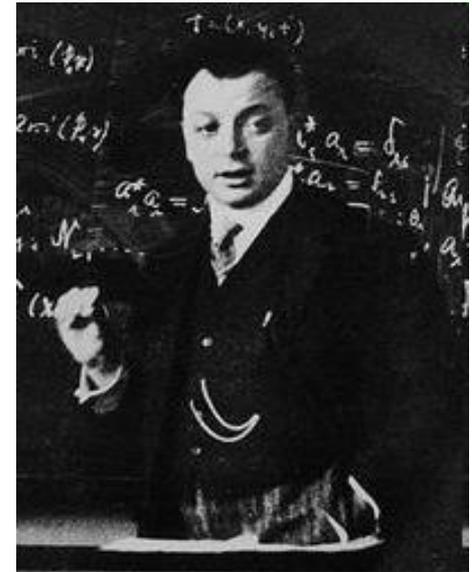
- **1955 год** – Оуэн Чемберлен и Эмилио Сегре объявили об открытии **АНТИПРОТОНА**
- «За открытие антипротона» О. Чемберлен и Э. Сегре получили в **1959 г.** Нобелевскую премию по физике.



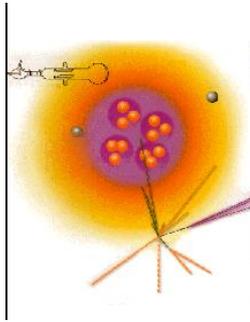
Начало физики частиц: «маленький нейтрон»



- **1914 год** – у Дж. Чедвика возникло подозрение, что при бета-распаде нарушается закон сохранения энергии.
- **1930 год** – Вольфганг Паули сообщил о своей «отчаянной попытке» «спасти» закон сохранения энергии, высказав гипотезу о существовании новой электрически нейтральной частицы, которая испускается при бета-распаде вместе с электроном



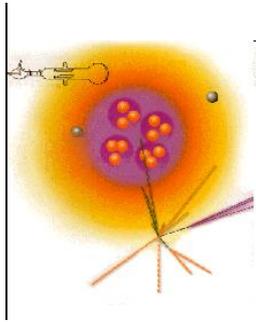
Начало физики частиц: «маленький нейтрон»



- После открытия нейтрона Энрико Ферми предложил называть частицу Паули **НЕЙТРИНО**.
- В **1933 г.** Паули сформулировал основные свойства нейтрино в их современном виде
- **1934 год** – Э. Ферми создал теорию бета-распада
- Сомнения в существовании нейтрино оставались

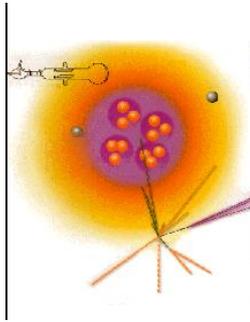


Начало физики частиц: «маленький нейтрон»



- В **1938 г.** Э. Ферми была присуждена Нобелевская премия по физике «за доказательства существования новых радиоактивных элементов, полученных при облучении нейтронами, и связанное с этим открытие ядерных реакций, вызываемых медленными нейтронами»
- В **1945 г.** В. Паули был награжден Нобелевской премией по физике «за открытие принципа запрета, который называют также принципом запрета Паули»

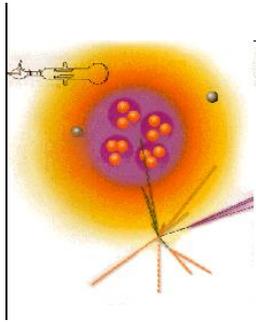
Начало физики частиц: «маленький нейтрон»



- **1953-1956 гг** — Фредерик Райнес и Клайд Коуэном на реакторе в Хэнфорде впервые осуществили эксперимент по прямому детектированию **АНТИНЕЙТРИНО** ($p \nu_e \rightarrow n e^+$)
- В **1995 г.** Ф. Райнесу была присуждена Нобелевская премия по физике «за открытие нейтрино» (К. Коуэн не дожил до 1995)

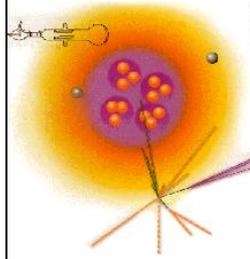


Стандартная Модель: «маленький нейтрон»



- Нейтрино осциллируют, т.е превращаются из частиц одного сорта (электронного, мюонного или таонного) в нейтрино другого сорта (поколения). Теория предсказывает периодическое изменение вероятности обнаружения частицы определённого сорта в зависимости от времени.
- Идея нейтринных осцилляций была впервые выдвинута советско-итальянским физиком Б.М.Понтекорво в **1957 году**.
- В **1998 г.** нейтринные осцилляции были подтверждены экспериментально

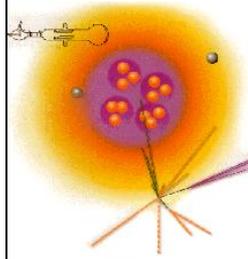
Стандартная Модель: «маленький нейтрон»



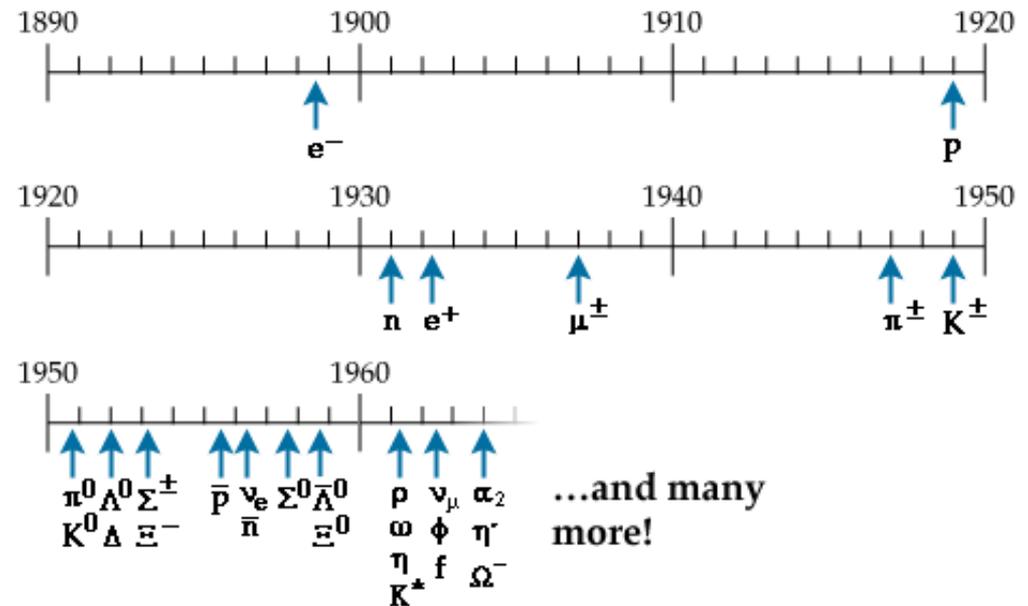
- В **2015 г.** Лауреатами Нобелевской премии по физике стали Такааки Кадзита и Артур Макдональд «за открытие нейтринных осцилляций, показывающее, что нейтрино имеют массу»



Начало физики частиц: не много ли элементарных ... ?

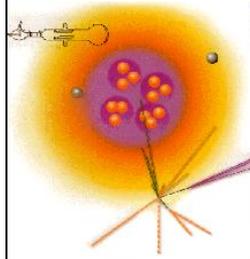


- К 60 годам XX века было известно более 100 «элементарных» частиц. Возникла проблема классификации



- Большинство частиц, открытых в 50-60 годы, были нестабильны и распадались менее чем через $1/1000000$ или даже $1/10000000000$ секунды. Их называли **РЕЗОНАНСАМИ**.

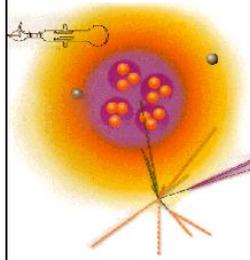
Начало физики частиц: не много ли элементарных ... ?



- **1968 год** – Нобелевская премия по физике «за исключительный вклад в физику элементарных частиц, в частности за открытие большого числа резонансов, что стало возможно благодаря разработанной им технике с использованием водородной пузырьковой камеры и оригинальному анализу данных» была присуждена Луису Альваресу.
- Л. Альваресом с коллегами было открыто около 70 новых частиц



Начало физики частиц: не много ли элементарных ... ?



- **1964 год** – Мюррей Гелл-Манн и Георг Цвейг предложили **КВАРКИ** – новые «кирпичики», из которых можно было составить уже известные частицы



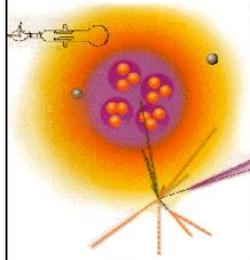
- Название взято из романа Джеймса Джойса «Поминки по Финнегану». Герою книги приснился сон, в котором чайки кричали:



«Три кварка, три кварка
для мастера Марка!»

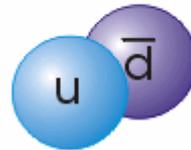
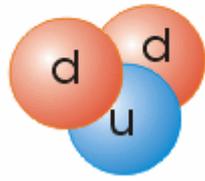
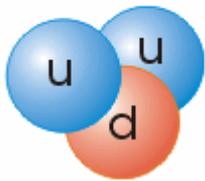


Начало физики частиц: не много ли элементарных ... ?

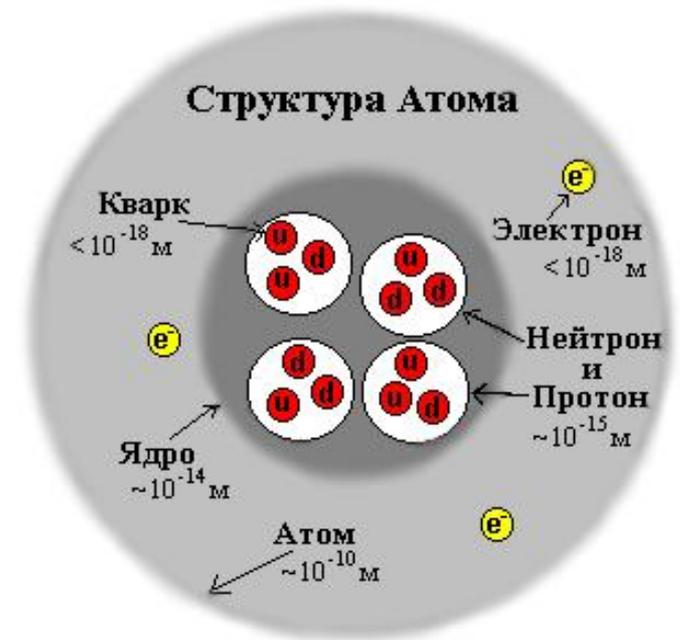


- Протон и нейтрон перестали быть фундаментальными

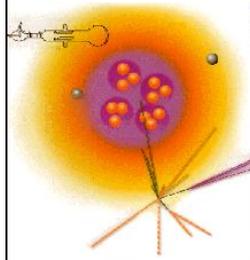
The Proton The Neutron The Pion



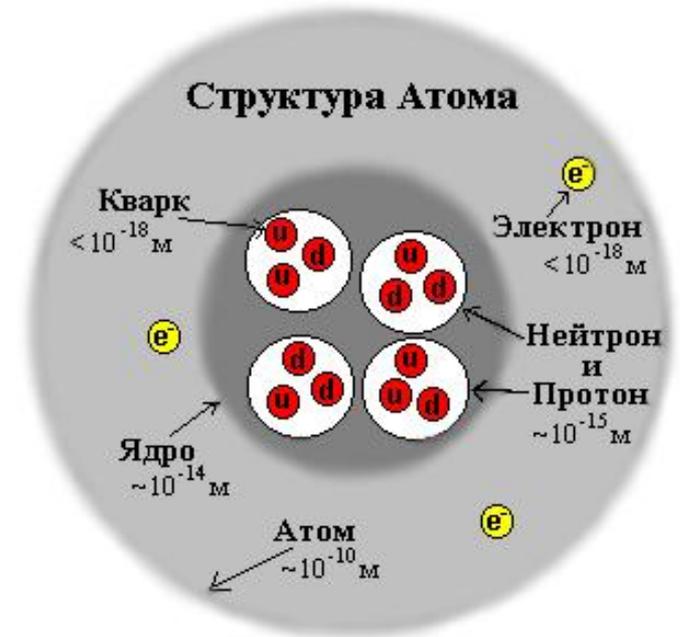
- В **1969 г.** М. Гелл-Манн был удостоен Нобелевской премии по физике «за открытия, связанные с классификацией элементарных частиц и их взаимодействий».



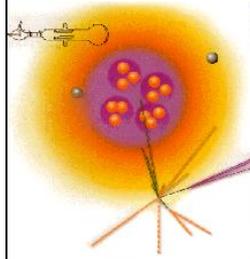
Начало физики частиц: не много ли элементарных ... ?



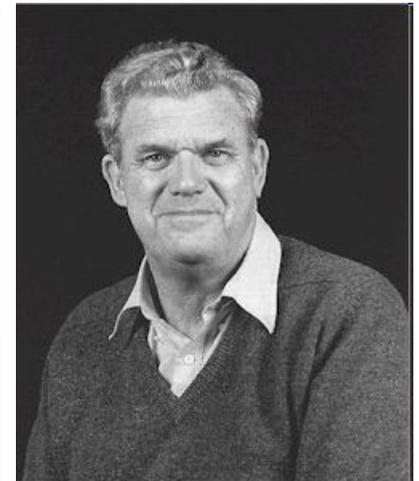
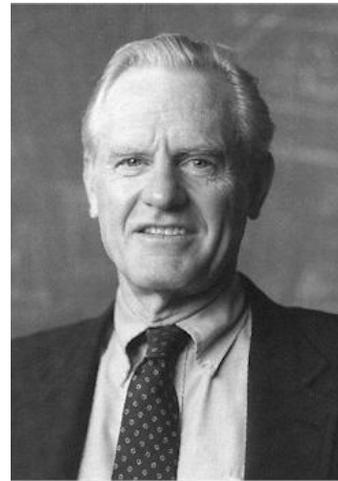
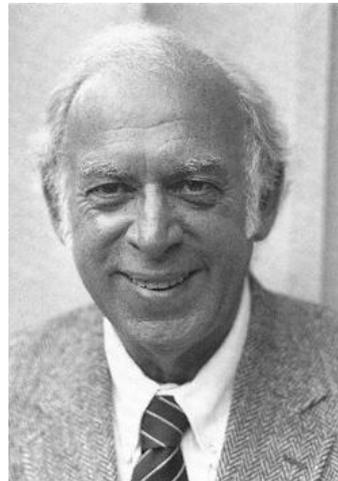
- **1968 год** – Джером Фридман, Генри Кендалл и Ричард Тейлор поставили эксперимент по рассеянию электронов на ядрах водорода и дейтерия.
- Результаты говорили о том, что протоны и нейтроны обладают внутренней структурой (аналогия с открытием структуры ядра)



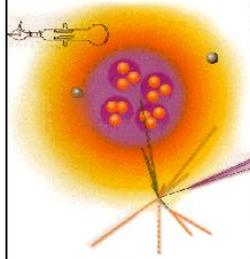
Начало физики частиц: не много ли элементарных ... ?



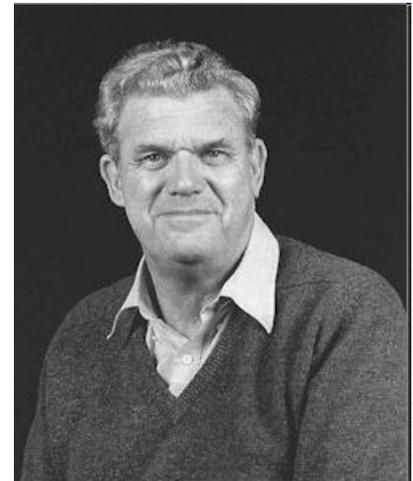
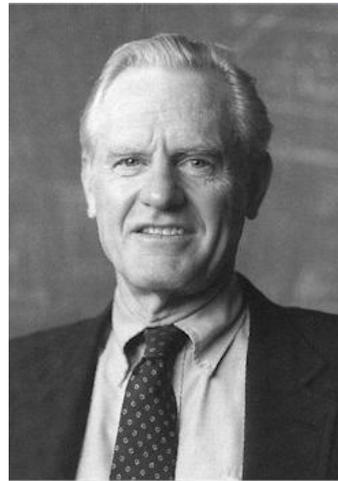
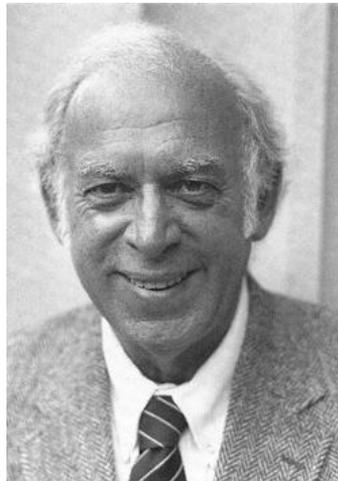
- **1968 год** – Джером Фридман, Генри Кендалл и Ричард Тейлор поставили эксперимент по рассеянию электронов на ядрах водорода и дейтерия. Результаты свидетельствовали о том, что протоны и нейтроны обладают внутренней структурой (полная аналогия с открытием структуры ядра)



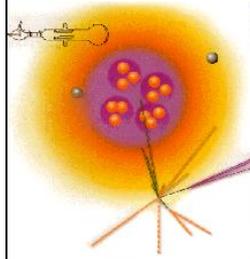
Начало физики частиц: не много ли элементарных ... ?



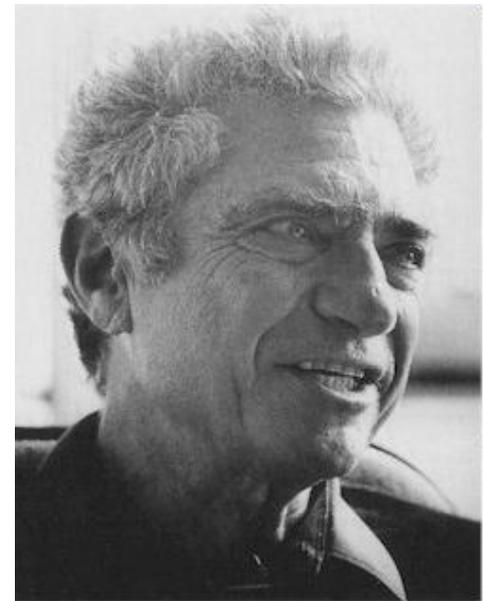
- В 1990 г. Дж. Фридману, Г. Кендаллу и Р. Тейлору была присуждена Нобелевская премия по физике «за пионерские исследования глубоконеупругого рассеяния электронов на протонах и связанных нейтронах, существенно важных для разработки кварковой модели в физике частиц»



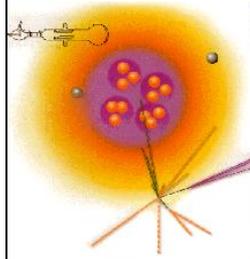
Начало физики частиц: другое нейтрино ?



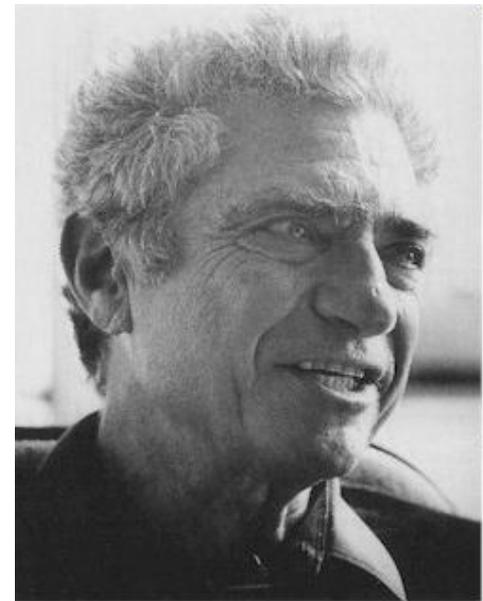
- **1962 год** – Леон Ледерман, Мелвин Шварц и Джек Стайнбергер, используя нейтринный пучок от распадов пионов и каонов, установили существование **МЮОННОГО НЕЙТРИНО**.



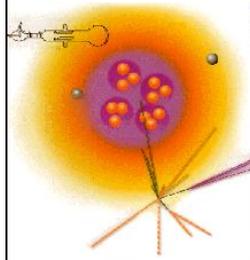
Начало физики частиц: другое нейтрино ?



- В **1988 г.** удостоены Нобелевской премии по физике «за метод нейтринного пучка и демонстрацию дублетной структуры лептонов через открытие мюонного нейтрино»



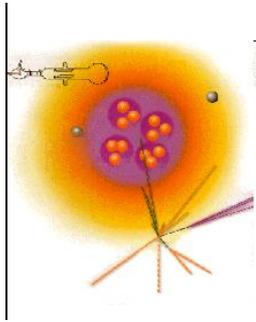
Стандартная Модель: справочные сведения



- **Спин** – внутренняя характеристика элементарных частиц.
- Спин протона, нейтрона (и составляющих их кварков) – $1/2$
 - Спин электрона, мюона, нейтрино – $1/2$
 - Спин фотона – 1
 - Спин пи-мезона – 0
- Частицы с целым спином называются **бозоны**
- Частицы с полуцелым спином называются **фермионы**

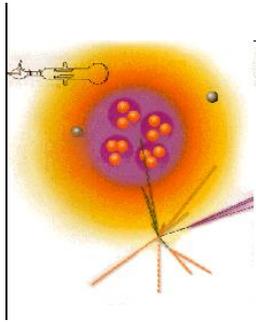
- **Массы** элементарных частиц
 - Протон и нейтрон весят примерно 1 **ГэВ** (1.8×10^{-24} г)
 - Электрон весит примерно 0.5 **МэВ**
 - Фотон – безмассовый

Стандартная Модель: Частицы и взаимодействия



- Частицы Стандартной Модели:
 - кварки и лептоны (электрон, мюон, нейтрино, ...)
 - переносчики взаимодействий (фотон, ...)
 - частица Хиггса
- Взаимодействия:
 - электромагнитное (взаимодействие электрических зарядов и токов)
 - слабое (бета-распад)
 - сильное (ядерные взаимодействия)

Стандартная Модель: лептоны



- **Лептоны** (от греческого «лептос» – маленький) – частицы, не участвующие в сильном взаимодействии, т. е. участвующие лишь в электромагнитных, слабых и гравитационных взаимодействиях.

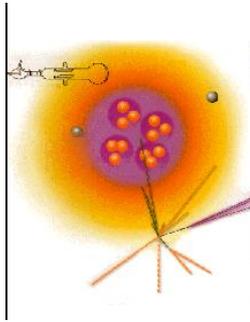
e
 ν_e

μ
 ν_μ

Заряженные лептоны

Нейтральные лептоны

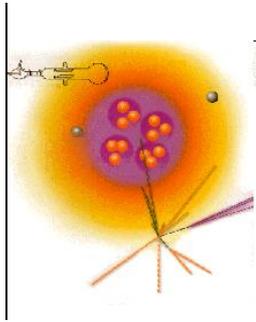
Стандартная Модель: ...верхние, нижние, странные...



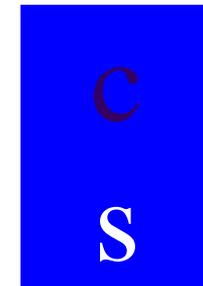
- **Кварки** – частицы, участвующие в электромагнитных, слабых, сильных и гравитационных взаимодействиях.
- Для описания известных в то время частиц достаточно 3 «ароматов» кварков (**u** – **up**, **d** – **down** и **s** - **strange**)
- Странный кварк (**s**) назван «странным» из-за странно долгого времени жизни K-мезона



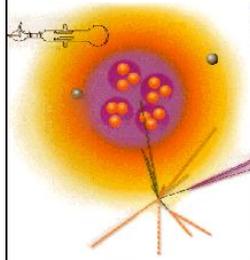
Стандартная Модель: ...верхние, нижние, странные...



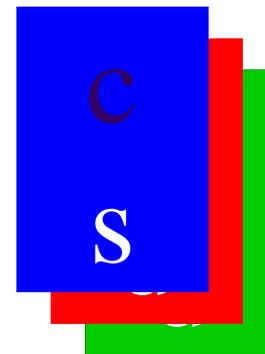
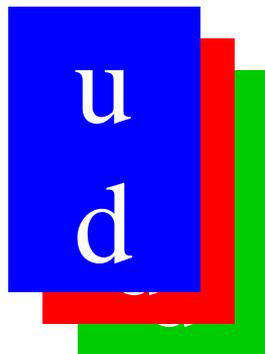
- Кварки бывают «верхние» и «нижние»
- Заряд кварков – дробный:
 - Заряд «верхних кварков» $+ 2/3 e$
 - Заряд «нижних кварков» $- 1/3 e$
- Кварки – фермионы (спин $1/2$).
Для них справедлив принцип запрета Паули



Стандартная Модель: кварки – цветные ☺ ...

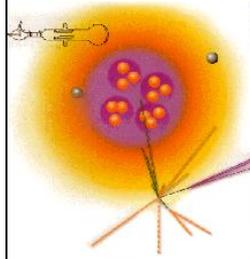


- Ω^- состоит из трех s-кварков. Противоречит принципу Паули !
- Решение проблемы – новое «квантовое число» - цвет (Н.Н. Боголюбов, Б.В. Струминский, А.Н. Тавхелидзе, 1965 год)



- Цвет – аналог электрического заряда

Стандартная Модель: мезоны и барионы

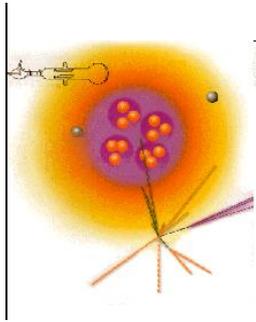


- Из кварков состоят **адроны** – **мезоны** (комбинация кварк–антикварк) и **барионы** (комбинация из 3 кварков). Мезоны и барионы – бесцветны, т.е. не имеют «цветного заряда»

Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

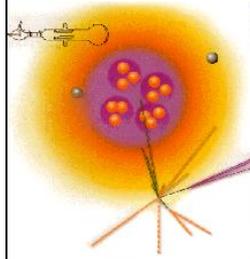
Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Стандартная Модель: ...очарованные...

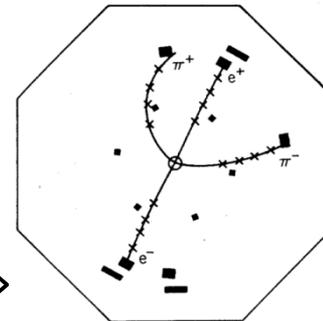
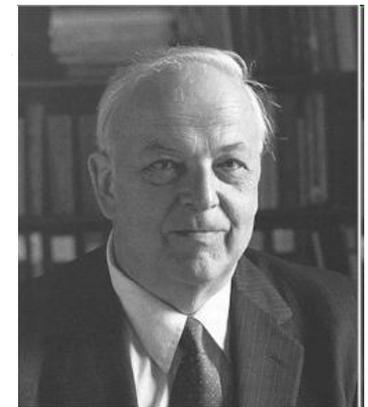


- Идея «поколений кварков и лептонов» – должен существовать новый "тяжелый" кварк с зарядом $+2/3 e$. Бьеркен и Глэшоу назвали этот четвертый кварк «очарованным» (**charm**).
- **1970 год** – Ш. Глэшоу, Дж. Иллиопулос и Л. Маиани (ГИМ) нашли неотразимые аргументы в пользу очарованного кварка: его существование позволяло построить самосогласованную теорию слабых взаимодействий

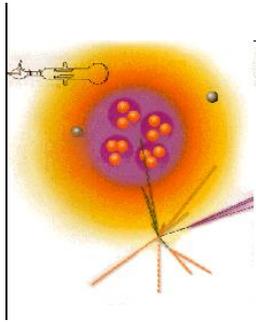
Стандартная Модель: ...очарованные...



- **1974 год** – Сэмюэль Тинг (Брукхейвен) и Бартон Рихтер (Стэнфорд) практически одновременно открыли J/ψ -мезон – связанное состояние c -кварков с массой 3.1 ГэВ
- **1976 год** – С. Тингу и Б. Рихтеру была присуждена Нобелевская премия по физике «за изыскательскую работу по открытию тяжелой элементарной частицы нового типа»

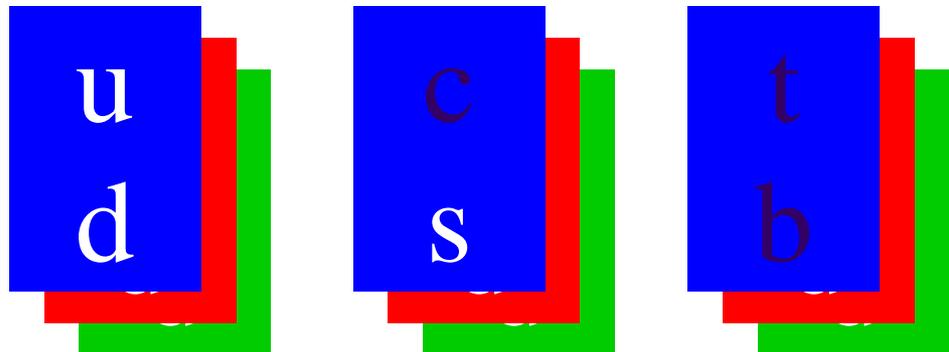


Стандартная Модель: ...очарованные...

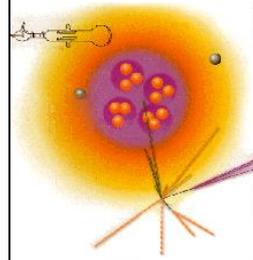


- **1976 год** – Гольдхабер и Пиере с сотрудниками открыли D^0 -мезон ($u\bar{c}$ состояние). Это было прямым доказательством существования очарования.
- Характеристики слабых распадов D -мезонов окончательно подтвердили концепцию второго поколения кварков

- Вопрос: «А есть ли третье поколение?»



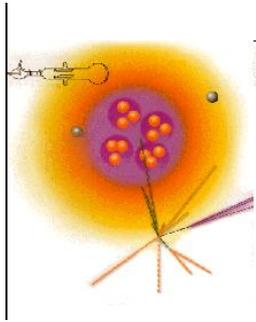
Стандартная Модель: третье поколение лептонов



- **1976 год** – Мартин Перл (Стэнфорд) обнаружил в распадах D-мезона очередного «брата» электрона – в 20 раз тяжелее мюона и в 3000 раз тяжелее электрона. Новая частица получила имя **TAU**-лептон.
- **1995 год** – М. Перлу присуждена Нобелевская премия по физике за «открытие тау-лептона» (вместе с Ф. Райнесом – за антинейтрино)

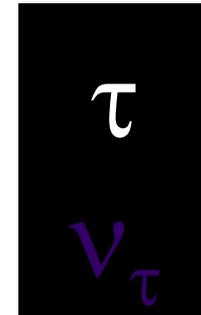
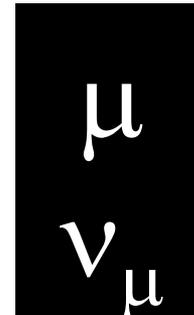
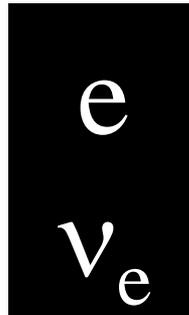


Стандартная Модель: ...прекрасные...

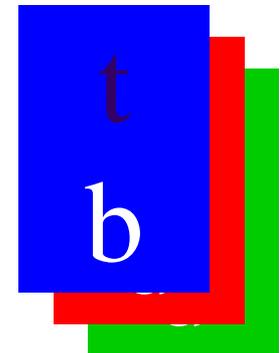
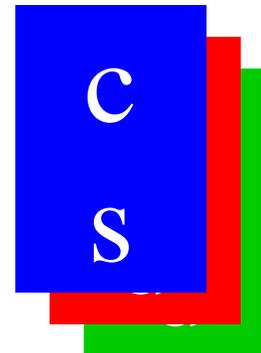
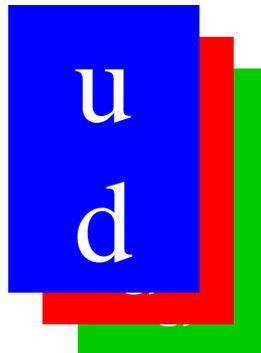


- **1977 год** – открытие прекрасных (*beauty* или *bottom*) кварков. Стив Херб обнаружил Υ -мезон – связанное состояние *b*-кварков.

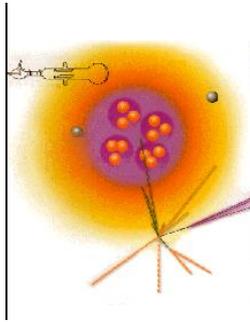
- Таким образом были открыты 5 лептонов и 5 кварков



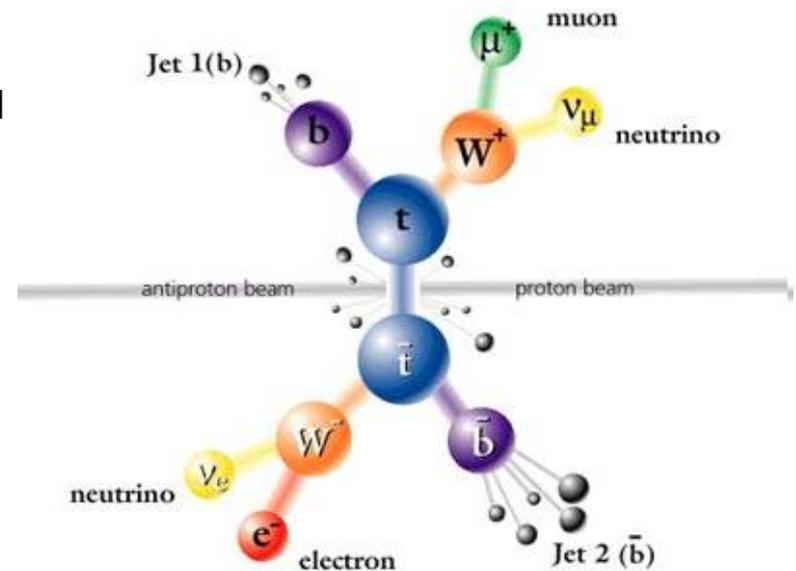
- Где же шестой лептон и кварк ?



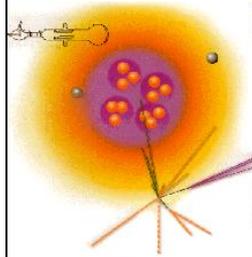
Стандартная Модель: последние кирпичики



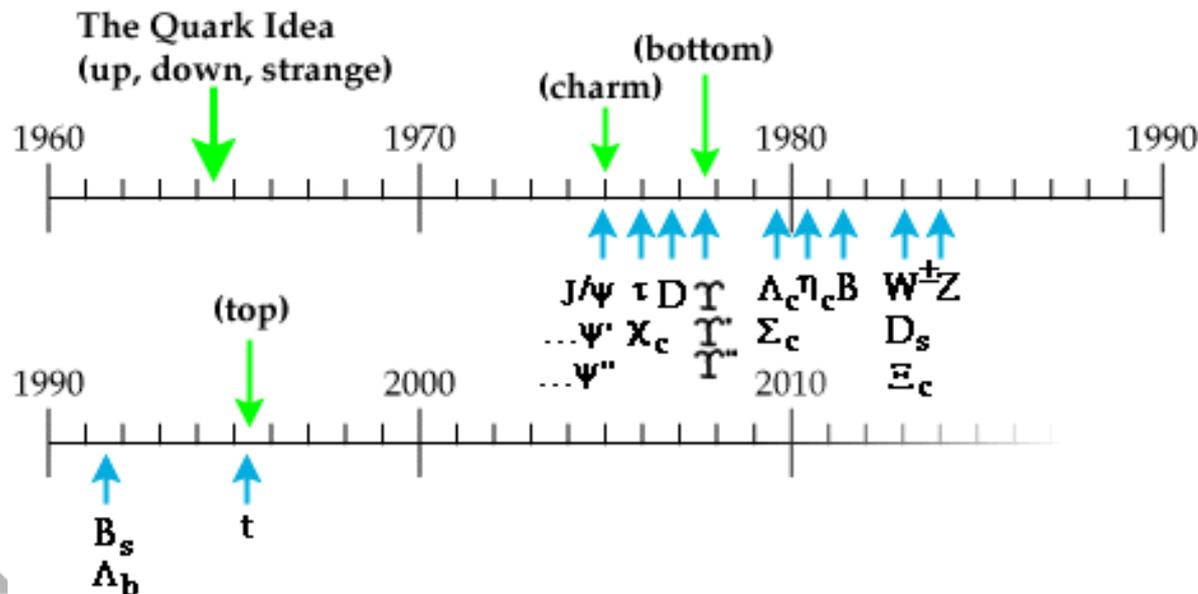
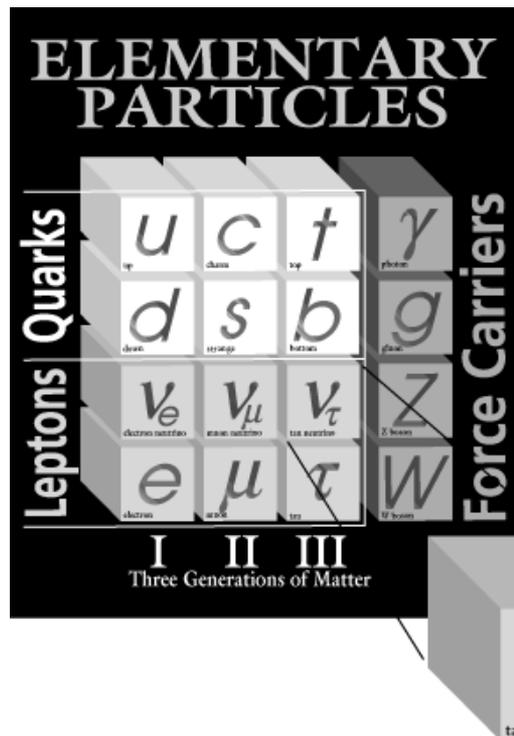
- **1989 год** – Измерения на ускорителе в ЦЕРН (Женева) показали, что существует три поколения лептонов и кварков
- **1995 год** – после 18 лет поисков в Лаборатории Ферми **t**-кварк был открыт – убедительный аргумент в пользу Стандартной Модели.
- Масса **t**-кварка оказалась равной более 170 ГэВ (почти в 200 раз тяжелее протона !)



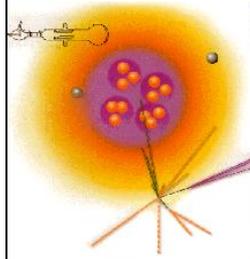
Стандартная Модель: последние кирпичики



- **2000 год** – открыта двенадцатая, последняя по счету, частица Стандартной Модели – **ТАУ-НЕЙТРИНО**

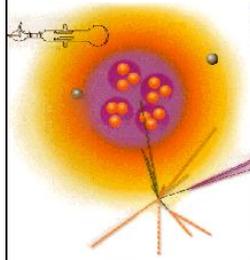


Стандартная Модель: кварки и лептоны

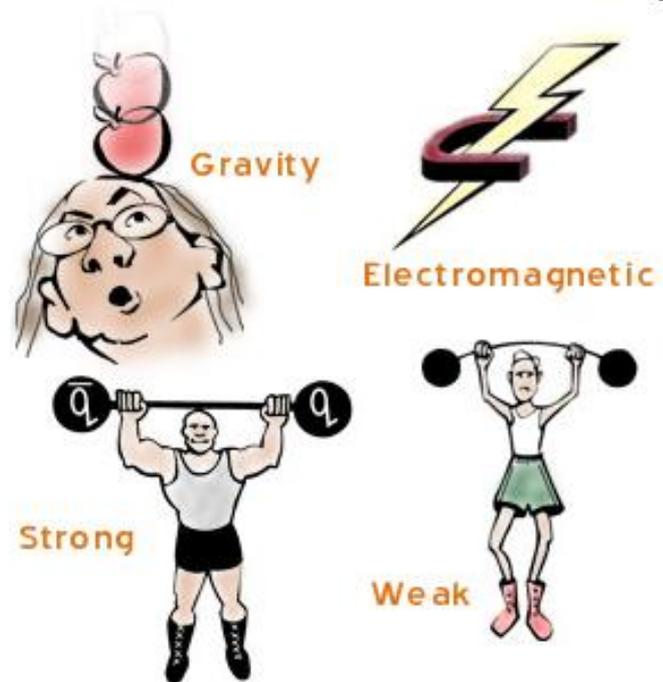


FERMIONS			matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...		
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

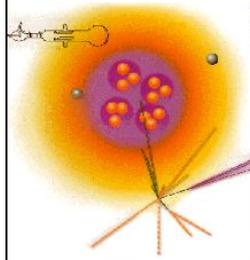
Стандартная Модель: переносчики взаимодействий



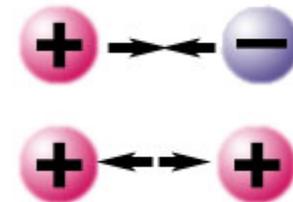
- Взаимодействия описывают притяжение и отталкивание частиц, их взаимопревращения и распады
- Типы взаимодействий:
 - Электромагнитное
 - Слабое
 - Сильное
 - Гравитационное
- Переносчики взаимодействий – бозоны, т.е. их спин равен 1 (2)



Стандартная Модель: переносчики взаимодействий



- **ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** – ответственно за притяжение разноименных зарядов, отталкивание одноименных

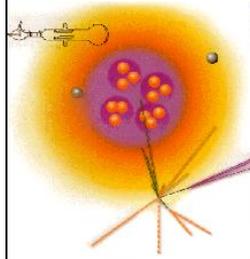


- В электромагнитном взаимодействии участвуют все электрически заряженные частицы



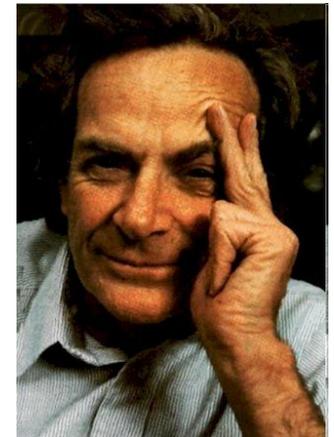
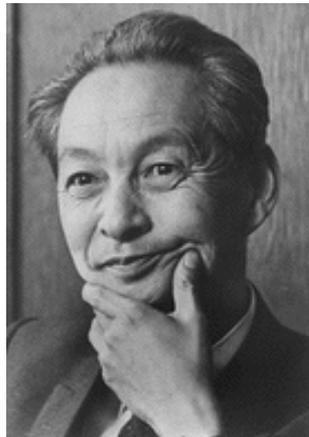
- Переносчик электромагнитного взаимодействия – **ФОТОН**
- Часть Стандартной Модели, описывающая электромагнитные явления, называется **квантовой электродинамикой**

Стандартная Модель: переносчики взаимодействий



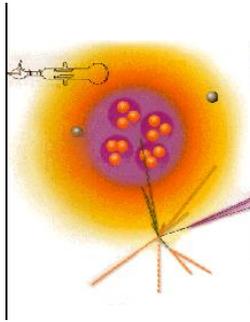
- Квантовая электродинамика была сформулирована в **1948 г.** Ричардом Фейнманом и, независимо, Син-Итиро Томонагой и Юлианом Швингером

- В **1965 г.** С. Томонага, Ю. Швингер, Р. Фейнман получили Нобелевскую премию по физике

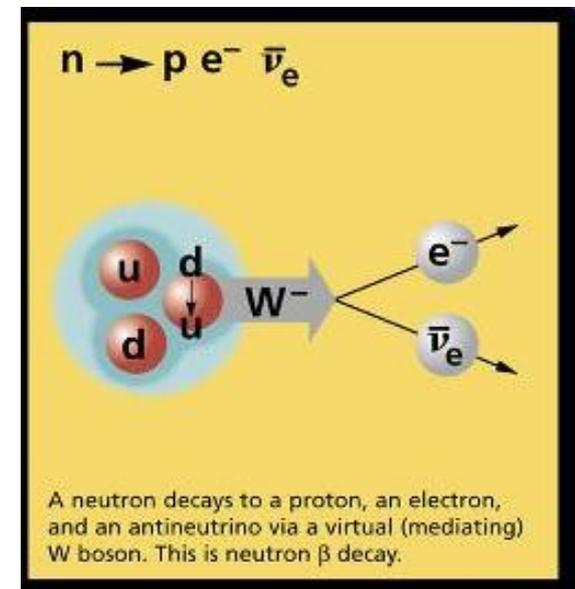


«за фундаментальные работы в области квантовой теории поля с далеко идущими последствиями для физики элементарных частиц»

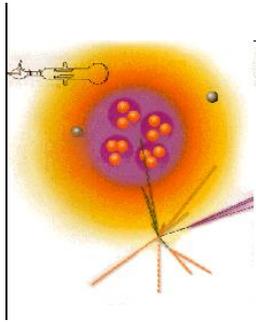
Стандартная Модель: переносчики взаимодействий



- **СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** обуславливает большинство распадов элементарных частиц.
- В слабом взаимодействии участвуют все частицы, кроме фотона
- Переносчики слабого взаимодействия – массивные W^\pm и Z^0 **БОЗОНЫ**
- Слабое взаимодействие – причина бета-распада

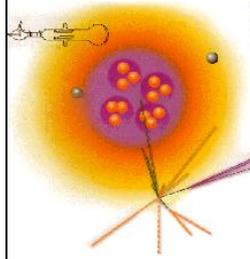


Стандартная Модель: переносчики взаимодействий

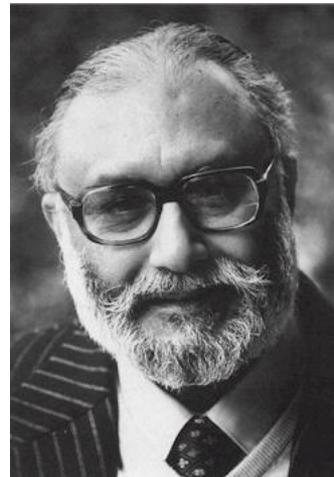
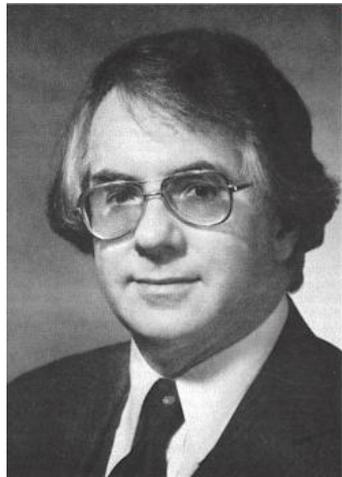


- Теория слабых взаимодействий и квантовая электродинамика с современной точки зрения могут быть рассмотрены как единая теория – **ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОСЛАБЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ** (по сути это и есть Стандартная Модель)
- Единая электрослабая теория создавалась в **60-х годах XX века**

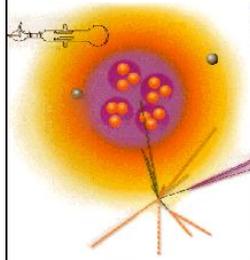
Стандартная Модель: переносчики взаимодействий



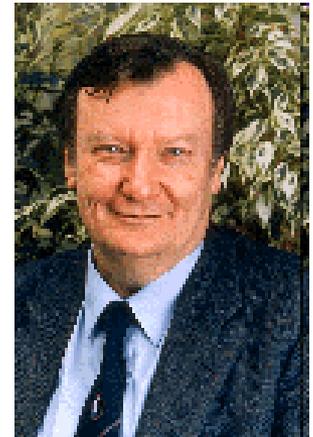
- **1979 год** – Шелдону Глэшоу, Абдусу Саламу и Стивену Вайнбергу была присуждена Нобелевская премия по физике «за вклад в теорию объединенного слабого и электромагнитного взаимодействия между элементарными частицами, включающий в том числе предсказание слабого нейтрального тока»



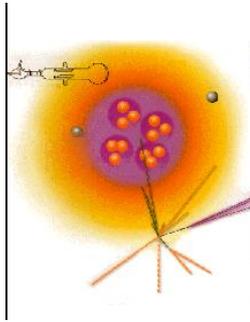
Стандартная Модель: переносчики взаимодействий



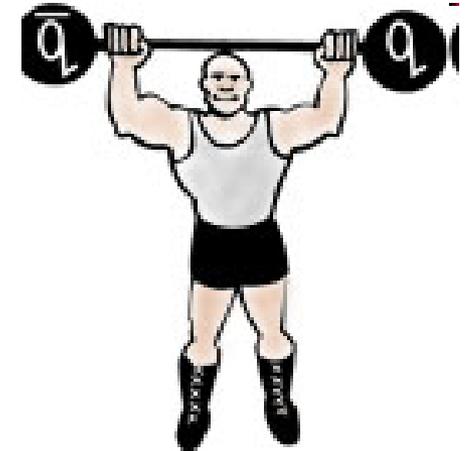
- **1983 год** – открытие W и Z^0 бозонов в лаборатории ЦЕРН в Женеве. Массы частиц 80 и 91 ГэВ
- **1984 год** – Карло Руббиа и Симон Ван дер Меер получили Нобелевскую премию по физике «за решающий вклад в большой проект, который привел к открытию полевых частиц W и Z , переносчиков слабого взаимодействия»
- Триумф Стандартной Модели !



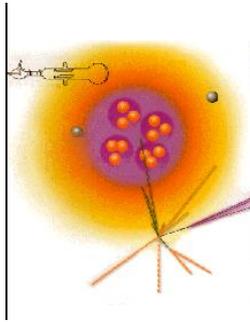
Стандартная Модель: переносчики взаимодействий



- **СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** – взаимодействие между кварками в адронах (протонах, нейтронах, ...), осуществляемое обменом **ГЛЮОНАМИ** (от английского «glue» – клей)
- Кварки кроме электрического заряда имеют **цветной заряд**. Глюон, в отличие от фотона, тоже имеет цветной заряд
- Часть Стандартной Модели, описывающая взаимодействие кварков и глюонов называется **квантовой хромодинамикой**

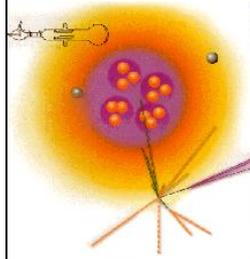


Стандартная Модель: переносчики взаимодействий

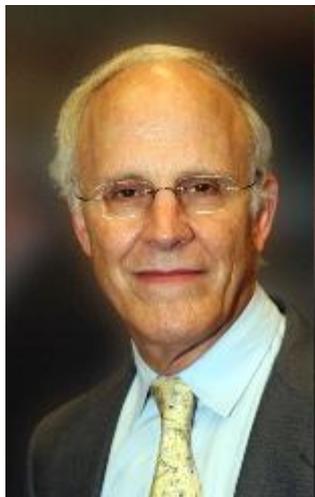


- Основное свойство квантовой хромодинамики – это явление **конфайнмента** – удержание кварков и глюонов внутри адронов. Сам механизм конфайнмента не ясен.
- Кварки и глюоны экспериментально в свободном состоянии не наблюдаются.
- При увеличении расстояния между кварками сила их взаимного притяжения возрастает ! На малых межкварковых расстояниях кварки и глюоны слабо взаимодействуют (явление называемое **асимптотической свободой**)

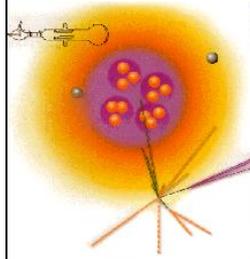
Стандартная Модель: переносчики взаимодействий



- **2004 год** – Дэвид Гросс, Дэвид Политцер и Фрэнк Вильчек удостоены Нобелевской премии по физике «за открытие асимптотической свободы в сильных взаимодействиях»

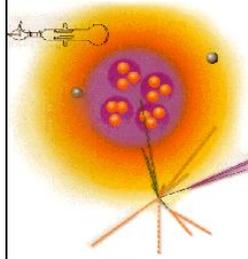


Стандартная Модель: переносчики взаимодействий



BOSONS			force carriers spin = 0, 1, 2, ...		
Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W⁻	80.4	-1			
W⁺	80.4	+1			
Z⁰	91.187	0			

Стандартная Модель: почему сильные – «сильные» ?



- Почему сильные взаимодействия называют сильными, а слабые – слабыми ?

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong	
				Fundamental	Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
	for two protons in nucleus	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons

- В таблице сила электромагнитного взаимодействия равна 1

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

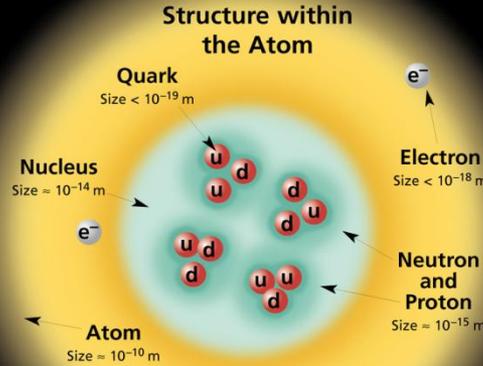
The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	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



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

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

Color Charge
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and W and Z bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons** $q\bar{q}$ and **baryons** qqq .

Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Property	Interaction	Gravitational	Weak		Electromagnetic		Strong	
			(Electroweak)			Fundamental	Residual	
Acts on:		Mass - Energy	Flavor		Electric Charge		Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:		All	Quarks, Leptons		Electrically charged		Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:		Graviton (not yet observed)	$W^+ W^- Z^0$		γ		Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:	10^{-18} m 3×10^{-17} m for two protons in nucleus	10^{-41}	0.8		1		25	Not applicable to quarks
		10^{-41}	10^{-4}		1		60	
		10^{-36}	10^{-7}		1		Not applicable to hadrons	

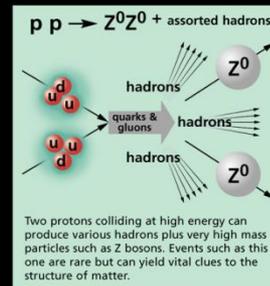
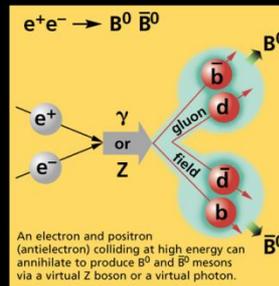
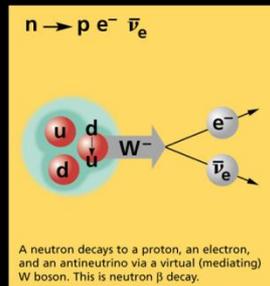
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0 , γ , and $\eta_c = c\bar{c}$, but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

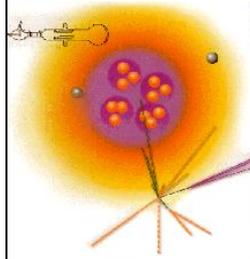
This chart has been made possible by the generous support of:

U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particles and Fields
BURLE INDUSTRIES, INC.

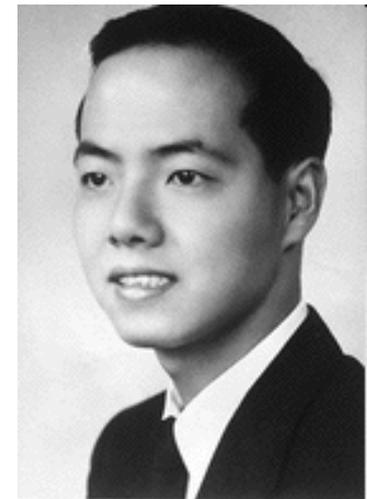
©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>

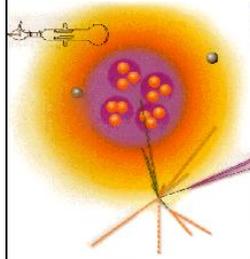
Стандартная Модель: симметрии в физике частиц



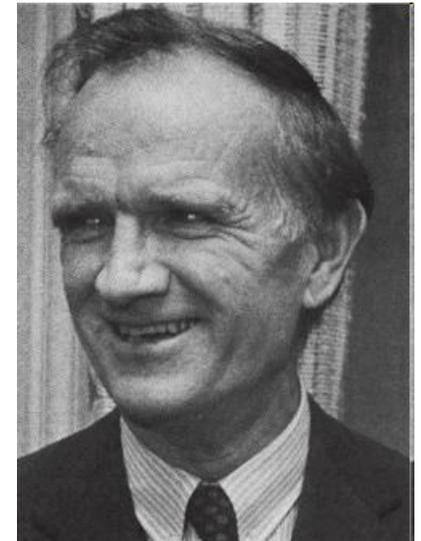
- **1957 год** – Нобелевская премия по физике была присуждена Чень-ин Янгу Цзун-дао Ли «за глубокие исследования так называемых законов четности, которые привели к важным открытиям в области элементарных частиц»
- Открытие несохранения четности (зеркальной симметрии) в слабых взаимодействиях



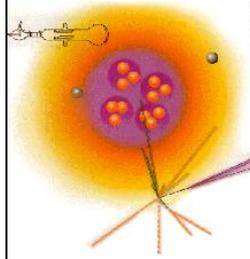
Стандартная Модель: симметрии в физике частиц



- **1980 год** – Нобелевская премия по физике была присуждена Джеймсу Кронину и Валу Фитчу «за открытие нарушения фундаментальных принципов симметрии в распаде нейтральных К-мезонов»



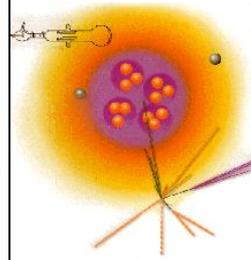
Стандартная Модель: симметрии в физике частиц



- В **2008 г.** премия присуждена Ёитиро Намбу «за открытие механизма спонтанного нарушения симметрии в субатомной физике» и Макото Кобаяси и Тосихидэ Маскава «за открытие источника нарушения симметрии, которое позволило предсказать существование в природе по меньшей мере трёх поколений кварков»

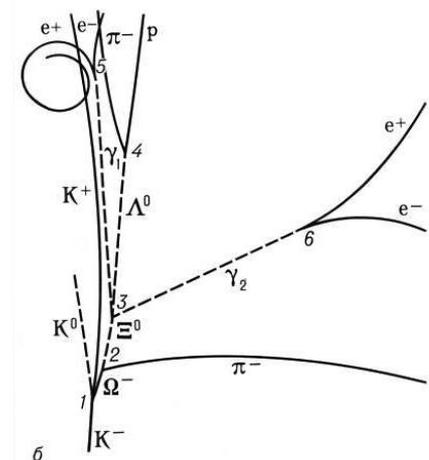


Стандартная Модель: эксперимент

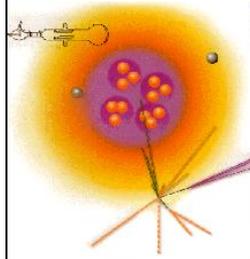


- **1960 год** – Нобелевская премия по физике была присуждена Дональду Глейзеру «за изобретение пузырьковой камеры» (**1952 г.**)

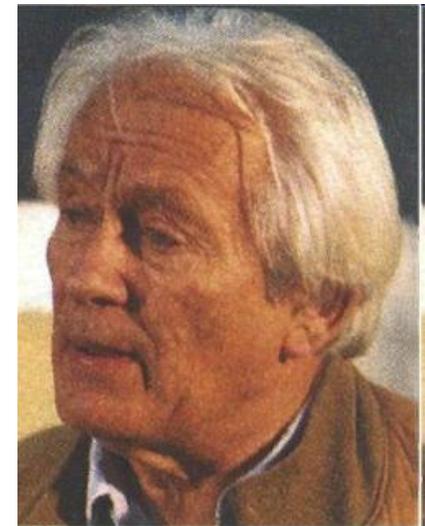
- Принцип действия – вскипание перегретой жидкости на траектории частицы. Цепь пузырьков пара может быть сфотографирована



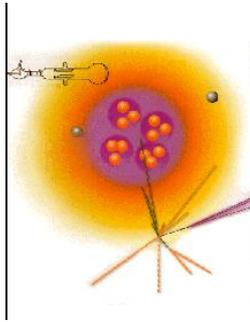
Стандартная Модель: эксперимент



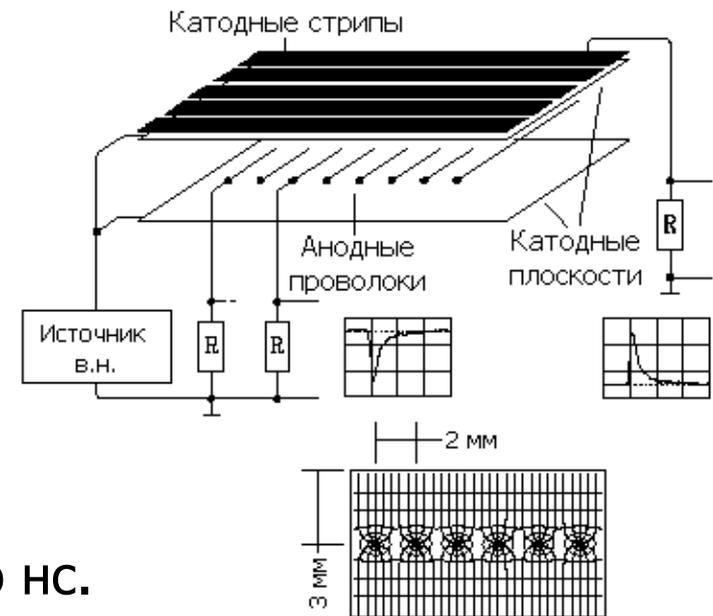
- **1992 год** – Нобелевская премия по физике присуждена Георгу Чарпаку «за открытие и создание детекторов частиц, в частности многопроволочной пропорциональной камеры» (**1968 г.**, ЦЕРН)
- Многопроволочные пропорциональные камеры применяют в исследованиях элементарных частиц на ускорителях высоких энергий



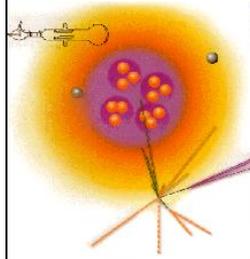
Стандартная Модель: эксперимент



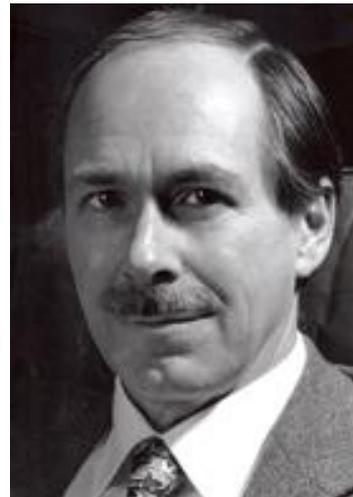
- МПК – плоская система тонких параллельных проволок (аноды) между двумя плоскими катодами. Образовавшиеся вдоль следа заряженной частицы свободные электроны дают начало лавинам, приходящим на аноды, ближайшие к этим электронам.
- Сигналы с проволок указывают положение частицы с точностью до 0.05-0.3 мм.
- Временное разрешение – несколько нс.



Стандартная Модель: математический фундамент

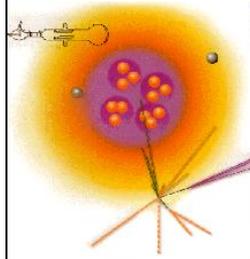


- Развитие экспериментальной техники требовало развития новых методов расчетов. Огромный вклад внесли Джерардус 'т Хоофт и Мартинус Вельтман, доказав перенормируемость Стандартной Модели (1971–1972 гг.).



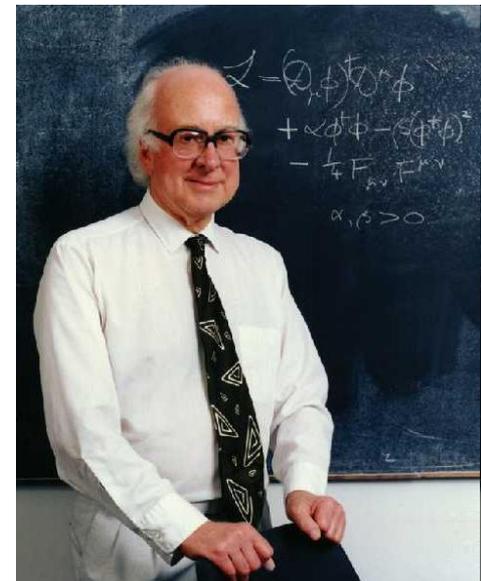
- 1999 год – Дж. 'т Хоофту и М. Вельтману присуждена Нобелевская премия по физике «за объяснение квантовой структуры электрослабого взаимодействия в физике»

Стандартная Модель: еще не конец – частица Хиггса

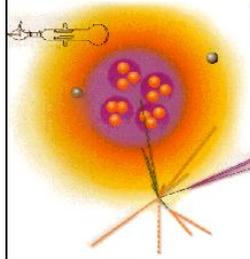


- **Необходима еще одна частица !**
- Для того, чтобы объяснить массы кварков, лептонов и переносчиков взаимодействий необходимо ввести скалярную частицу (спин 0), называемую частицей Хиггса. Механизм возникновения масс был предложен Петером Хиггсом в **1964 г.**
- Частица Хиггса обнаружена в ЦЕРНе в 2012 году

Missing
H
Higgs
 $q=0$

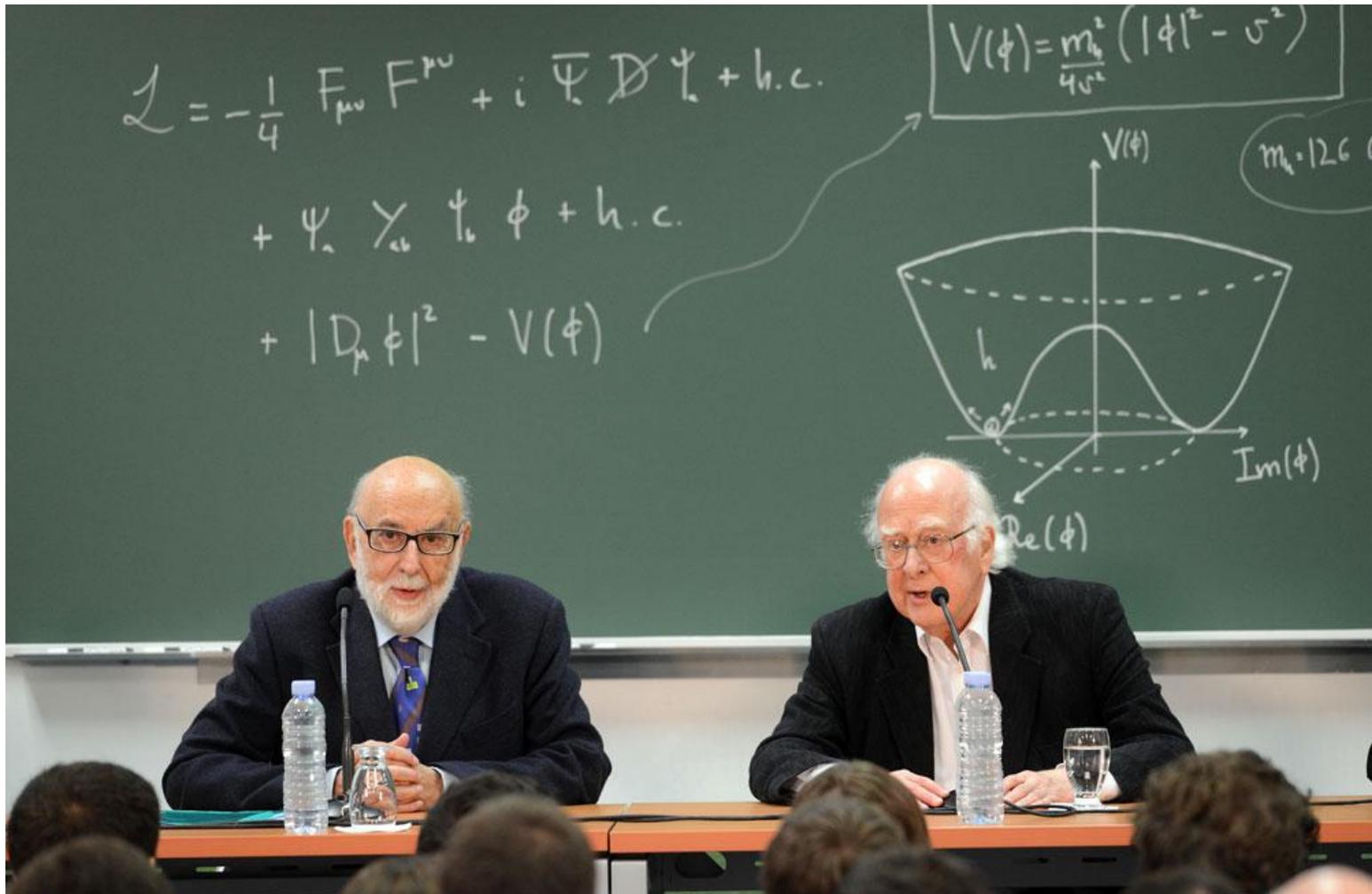
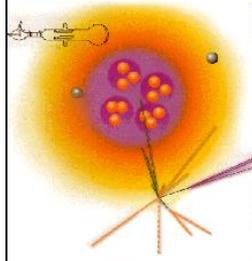


Стандартная Модель: еще не конец – частица Хиггса

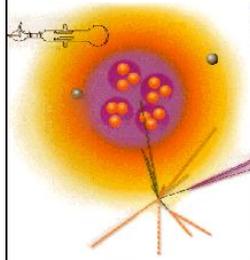


- **4 июля 2012 г.** В ЦЕРНе состоялся научный семинар, на котором руководители коллабораций ATLAS и CMS доложили об открытии новой элементарной частицы, свойства которой напоминали свойства бозона Хиггса
- В **2013 г.** Питеру Хиггсу и Франсуа Энглеру присуждена нобелевская премия по физике за теоретическое обнаружение механизма, который помогает нам понять происхождение массы субатомных частиц, подтверждённого в последнее время обнаружением предсказанной элементарной частицы в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН

Стандартная Модель: еще не конец – частица Хиггса

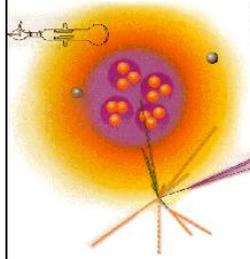


Стандартная Модель: еще не конец – частица Хиггса



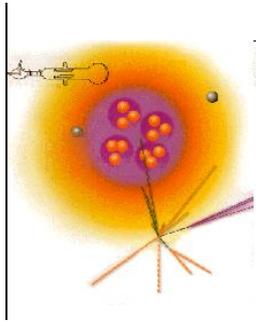
- **4 июля 2012 г.** В ЦЕРНе состоялся научный семинар, на котором руководители коллабораций ATLAS и CMS доложили об открытии новой элементарной частицы, свойства которой напоминали свойства бозона Хиггса
- В **2013 г.** Питеру Хиггсу и Франсуа Энглеру присуждена нобелевская премия по физике за теоретическое обнаружение механизма, который помогает нам понять происхождение массы субатомных частиц, подтверждённого в последнее время обнаружением предсказанной элементарной частицы в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН

Стандартная Модель: нерешенные проблемы



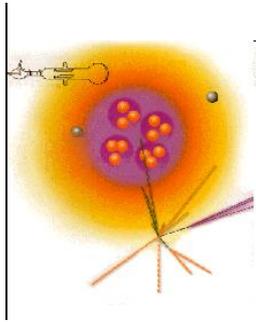
- Почему t -кварк оказался массивнее всех остальных кварков?
- Нет ли дополнительных поколений фундаментальных частиц?
- Устоит ли Стандартная Модель при последовательных повышении точности измерений?
- Появятся ли экспериментальные указания на реализуемость ныне привлекательных теоретических расширений СМ?
- Являются ли кварки и лептоны фундаментальными, или они сами являются составными?

За Стандартной Моделью: Великое объединение



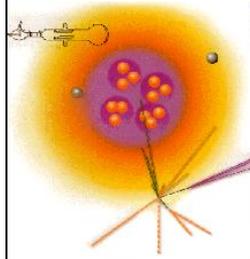
- **ВЕЛИКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ** — теоретические модели, в которых делаются попытки описания на единой основе слабого, электромагнитного и сильного взаимодействий.
- Объединение взаимодействий происходит при очень больших энергиях $10^{15} - 10^{16}$ ГэВ
- Ряд моделей предсказывает нестабильность протона со временем жизни 10^{32} лет.

За Стандартной Моделью: суперсимметрия

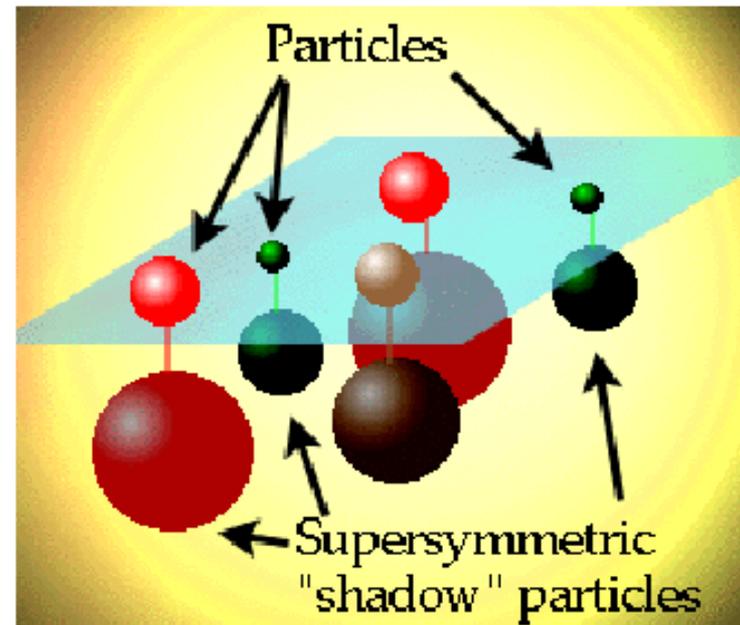


- **СУПЕРСИММЕТРИЯ** — гипотетическая симметрия, объединяющая в одну группу частицы с разными спинами — бозоны и фермионы.
- Должна проявляться при сверхвысоких энергиях.
- По современным представлениям является основой для построения единой теории всех взаимодействий, включая гравитационное.

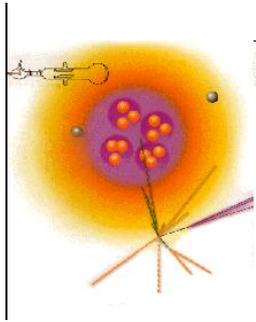
За Стандартной Моделью: суперсимметрия



- Суперсимметричные теории элементарных частиц предполагают наличие у каждой частицы ее **суперпартнера**.
- Массы суперпартнеров ожидаются в области 100 – 1000 ГэВ, т.е. должны быть доступны для ускорителя LHC

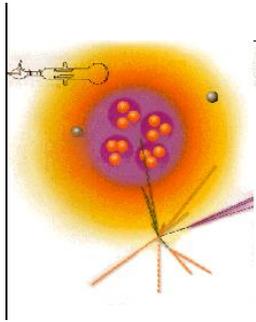


Стандартная Модель и космология



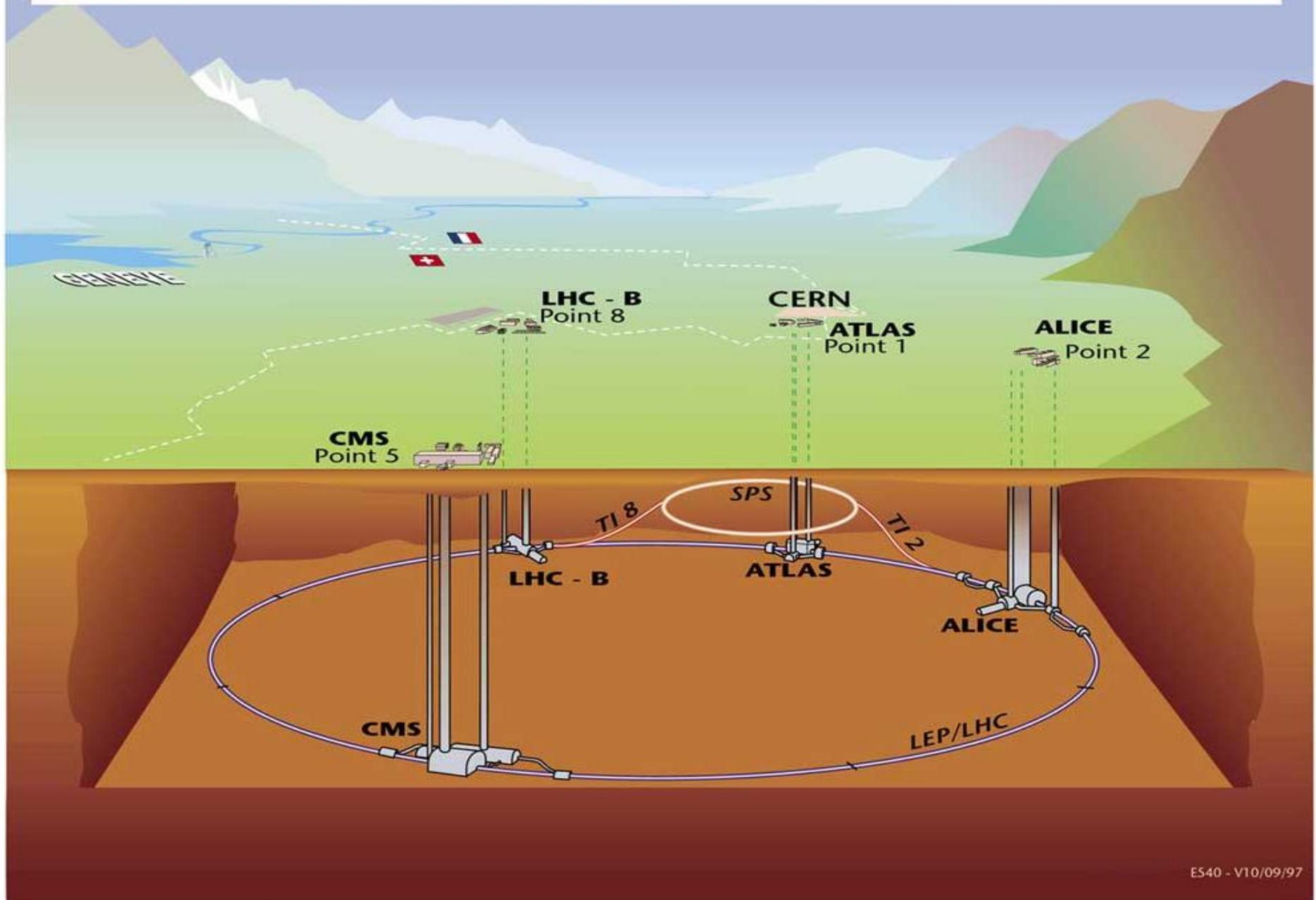
- Физика элементарных частиц в последние годы тесно переплетается с космологией и астрофизикой.
- В процессе своего развития Вселенная прошла те пороги энергий, которые мы сегодня пытаемся достичь на ускорителях

Стандартная Модель: новые горизонты – LHC

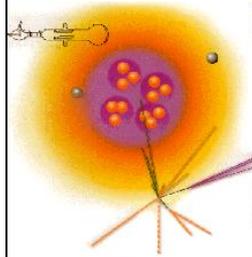


- LHC (Large Hadronic Collider) – действующий в настоящее время в ЦЕРН ускоритель протонов.
- Энергия столкновений составит 14000 ГэВ
- В 1 с происходит 10^8 – 10^9 столкновений протонов
- Главные задачи
 - Поиск частиц Хиггса
 - Поиск суперсимметрии
 - Поиск того, о чем мы еще не догадываемся

Overall view of the LHC experiments.



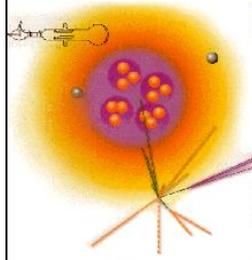
Стандартная Модель: новые горизонты – LHC



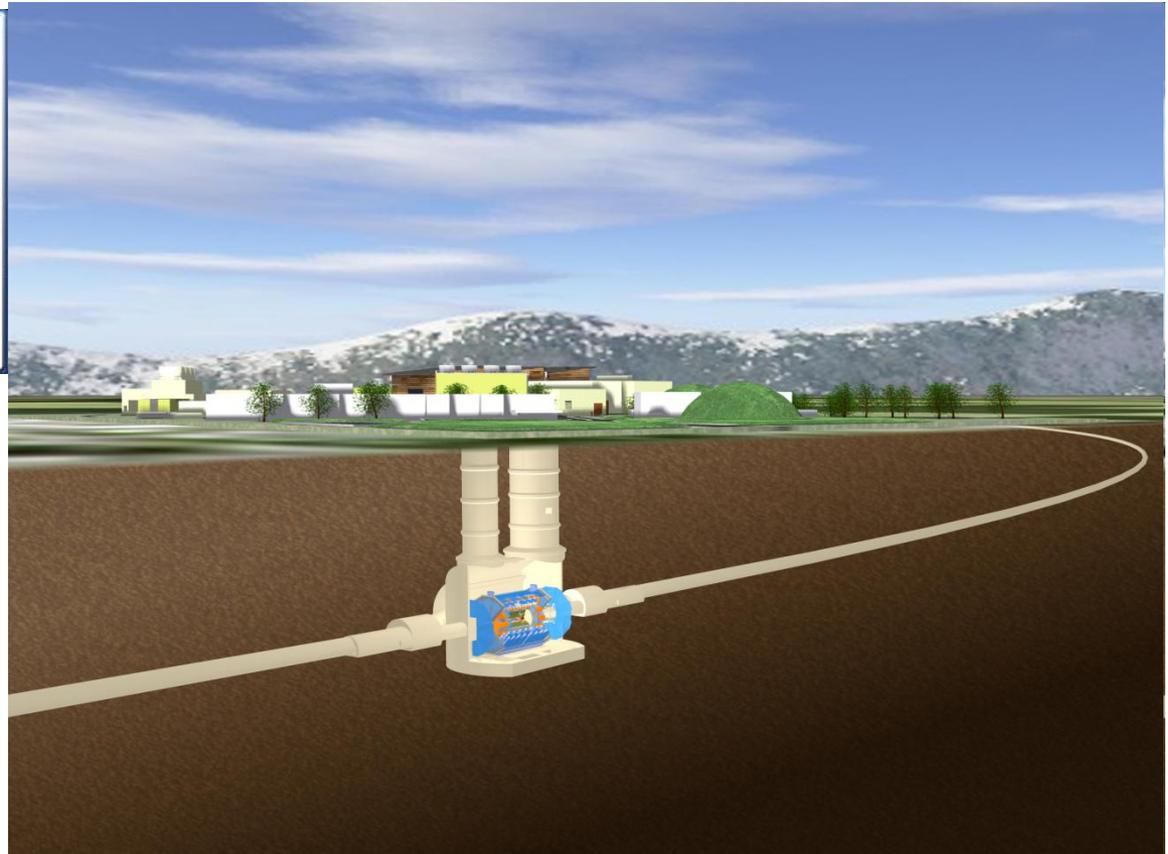
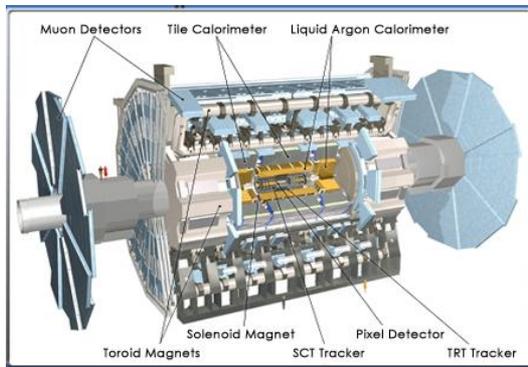
- Эксперимент ATLAS

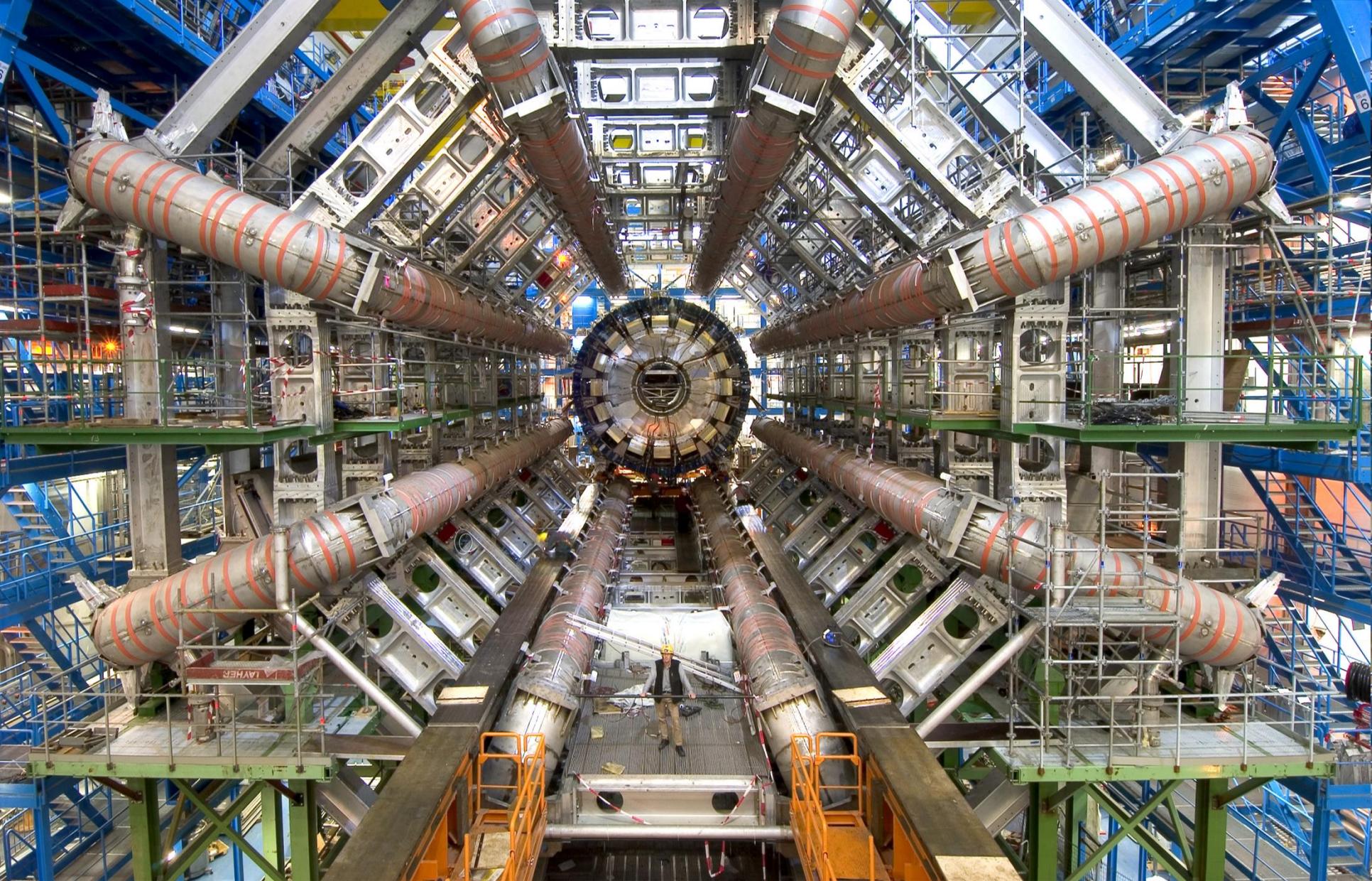


Стандартная Модель: новые горизонты – LHC



- Эксперимент ATLAS

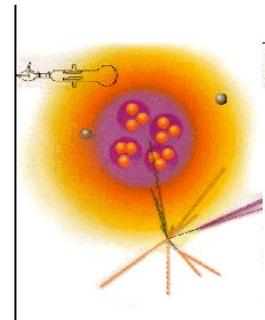




ATLAS October 2005

А. ГЛАДЫШЕВ (ЛТФ ОИЯИ) СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

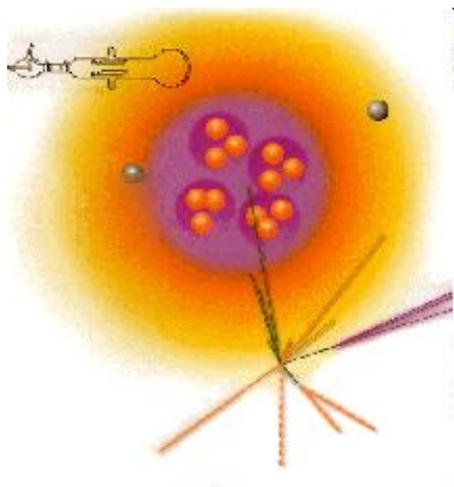




История физики частиц продолжается.

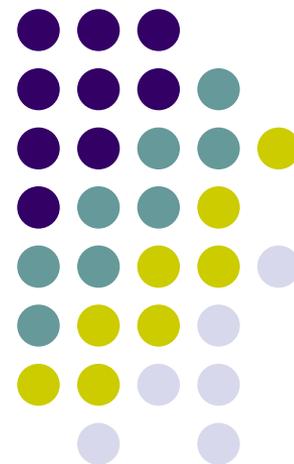
НОВЫЕ ОТКРЫТИЯ ВПЕРЕДИ !

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ что написано на кружке?



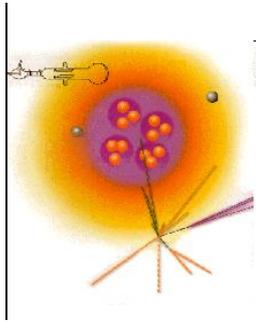
А. Гладышев (ЛТФ ОИЯИ)

ЦЕРН, 6-7 ноября 2017 г.



$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \chi_i Y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

Стандартная Модель: калибровочная инвариантность



- Лагранжиан свободного поля электрона:

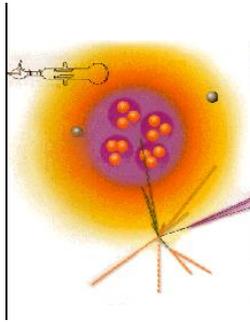
$$L_0 = \bar{E}(x)(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)E(x)$$

- Инвариантен относительно группы U(1), т.е. относительно изменения фазы

$$E(x) \rightarrow E'(x) = e^{-i\alpha} E(x)$$

$$\bar{E}(x) \rightarrow \bar{E}'(x) = e^{i\alpha} \bar{E}(x)$$

Стандартная Модель: калибровочная инвариантность



- Сделаем симметрию локальной – «калибруем» ее

$$E(x) \rightarrow E'(x) = e^{-i\alpha(x)} E(x)$$

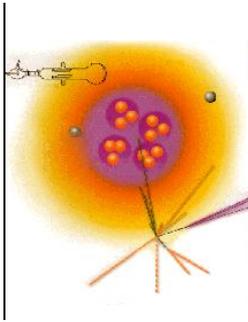
$$\bar{E}(x) \rightarrow \bar{E}'(x) = e^{i\alpha(x)} \bar{E}(x)$$

- Тогда член с производной преобразуется как

$$\begin{aligned} \bar{E}(x) \partial_{\mu} E(x) &\rightarrow \bar{E}'(x) \partial_{\mu} E'(x) = \bar{E}(x) e^{i\alpha(x)} \partial_{\mu} (e^{-i\alpha(x)} E(x)) = \\ &= \bar{E}(x) \partial_{\mu} E(x) - i \bar{E}(x) \partial_{\mu} \alpha(x) E(x) \end{aligned}$$

т.е. он калибровочно неинвариантный

Стандартная Модель: калибровочная инвариантность



- Выход: заменить обычную производную на ковариантную, чтобы

$$D_\mu E(x) \rightarrow [D_\mu E(x)]' = e^{-i\alpha(x)} D_\mu E(x)$$

- Этого можно достичь введя новое векторное («калибровочное») поле, тогда

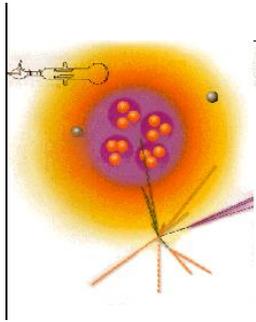
$$D_\mu E(x) = (\partial_\mu + ieB_\mu)E(x)$$

$$B_\mu(x) \rightarrow B'_\mu(x) + \frac{1}{e} \partial_\mu \alpha(x)$$

- Необходимо добавить кинетический член для нового поля

$$L_{gauge} = -\frac{1}{4} B_{\mu\nu} B_{\mu\nu}; \quad B_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu$$

Стандартная Модель: лагранжиан



- Собирая все вместе получим инвариантный относительно калибровочной группы U(1) лагранжиан квантовой электродинамики:

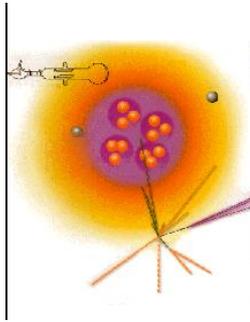
$$L_{gauge} = -\frac{1}{4} B_{\mu\nu} B_{\mu\nu} + i\bar{E}\gamma^\mu D_\mu E$$

$$B_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu$$

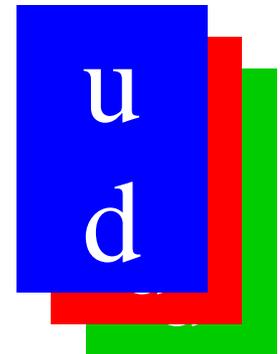
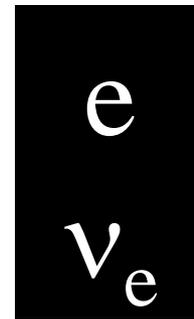
$$D_\mu E = (\partial_\mu - ieB_\mu)E$$

- Содержит кинетические члены для фотона и электрона и взаимодействие фотона и электрона. Массовый член для фотона запрещен калибровочной инвариантностью.

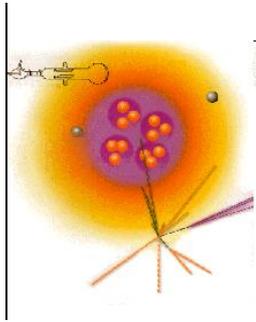
Стандартная Модель: структура полей СМ



- Кварки и лептоны в Стандартной модели образуют «дублеты» (частицы – компоненты дублетов участвуют в слабом взаимодействии):
- Синглеты участвуют в электромагнитном взаимодействии
- На языке теории групп дублет – «фундаментальное представление группы» $SU(2)$
- Кроме того кварки – цветные «триплеты» - фундаментальные представления группы $SU(3)$



Стандартная Модель: структура полей СМ



- Переносчики взаимодействий образуют «присоединенные» представления
- Размерность присоединенного представления для $SU(N)=N^2-1$
 - Переносчики слабого взаимодействия образуют триплет
 - Переносчики сильного взаимодействия образуют октет

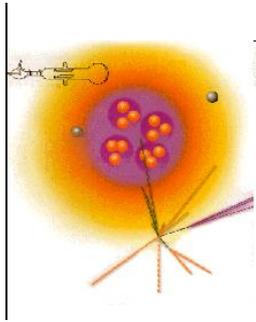
$$W_{\mu} = (W_{\mu}^1, W_{\mu}^2, W_{\mu}^3)$$

$$r\bar{b}, r\bar{g}, b\bar{g}, b\bar{r}, g\bar{b}, g\bar{r},$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(r\bar{r} - g\bar{g}),$$

$$\frac{1}{\sqrt{6}}(r\bar{r} + g\bar{g} - 2b\bar{b})$$

Стандартная Модель: лагранжиан

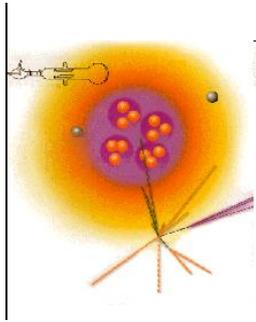


- Лагранжиан Стандартной модели состоит из 3 частей
 - калибровочные взаимодействия
 - юкавские взаимодействия
 - скалярный потенциал

$$L = L_{gauge} + L_{Yukawa} + L_{Higgs}$$

- Инвариантен относительно калибровочной группы $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

Стандартная Модель: лагранжиан



- Калибровочные взаимодействия
(кусочек электрослабой теории):

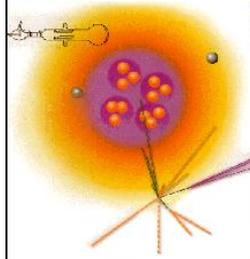
$$L_{gauge} = \dots - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^i F_{\mu\nu}^i + i \bar{E}_L \gamma^\mu D_\mu E_L + i \bar{E}_R \gamma^\mu D_\mu E_R + \dots$$

$$F_{\mu\nu}^i = \partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i - g \varepsilon_{ijk} W_\mu^j W_\nu^k$$

$$D_\mu E_L = \left(\partial_\mu - i \frac{g}{2} \tau^i W_\mu^i - i \frac{g}{2} B_\mu \right) E_L$$

$$D_\mu E_R = \left(\partial_\mu - i g' B_\mu \right) E_R$$

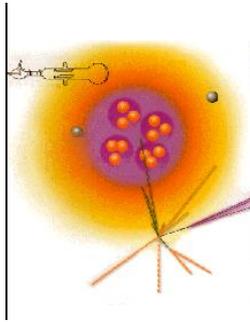
Стандартная Модель: лагранжиан



- Калибровочные взаимодействия
(электрослабая теория + хромодинамика):

$$\begin{aligned} L_{gauge} = & -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a - \frac{1}{4} W_{\mu\nu}^i W_{\mu\nu}^i - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B_{\mu\nu} \\ & + i\bar{L}_\alpha \gamma^\mu D_\mu L_\alpha + i\bar{Q}_\alpha \gamma^\mu D_\mu Q_\alpha + i\bar{E}_\alpha \gamma^\mu D_\mu E_\alpha \\ & + i\bar{U}_\alpha \gamma^\mu D_\mu U_\alpha + i\bar{D}_\alpha \gamma^\mu D_\mu D_\alpha \end{aligned}$$

Стандартная Модель: КЭД и КХД



ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

1 заряд (электрический)

- Значения: + и –
- 1 переносчик взаимодействий – фотон γ
 - не обладает электрическим зарядом

ХРОМОДИНАМИКА

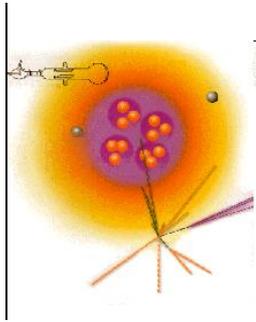
- 3 заряда
 - Значения: «красный», «синий», «зеленый»
 - Плюс «антицвет»
- 8 переносчиков взаимодействий – глюонов
 - Обладают цветным зарядом

$$r\bar{b}, r\bar{g}, b\bar{g}, b\bar{r}, g\bar{b}, g\bar{r},$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(r\bar{r} - g\bar{g}),$$

$$\frac{1}{\sqrt{6}}(r\bar{r} + g\bar{g} - 2b\bar{b})$$

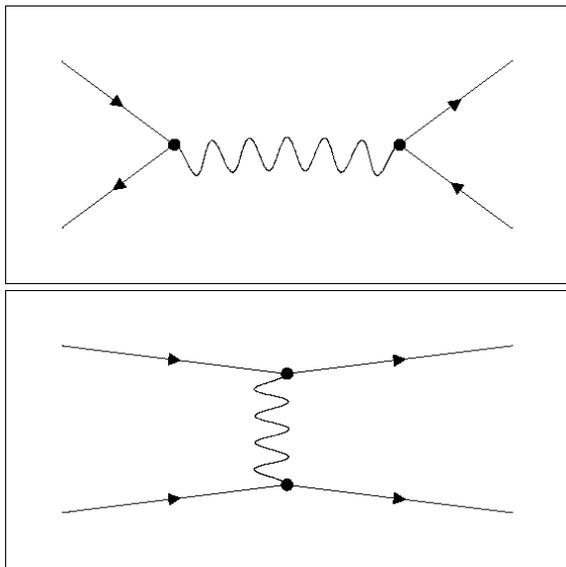
Стандартная Модель: КЭД и КХД



ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Описывается абелевой группой симметрии $U(1)$

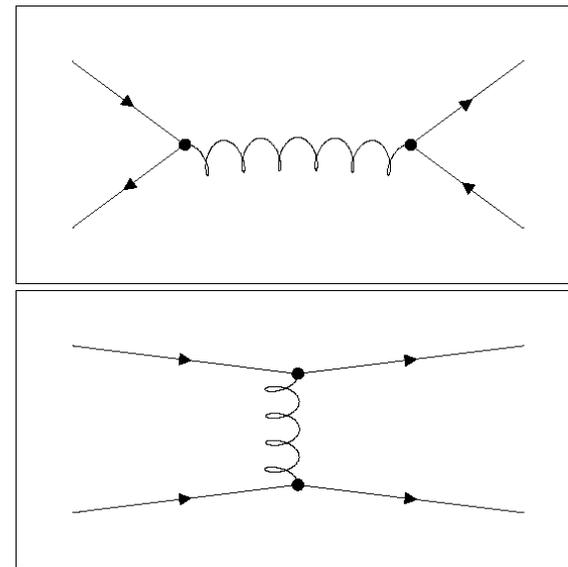
Описывает взаимодействие заряженных частиц



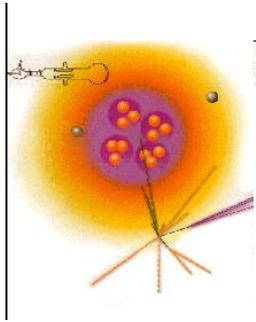
ХРОМОДИНАМИКА

Описывается неабелевой группой симметрии $SU(3)$

Описывает взаимодействие кварков и глюонов

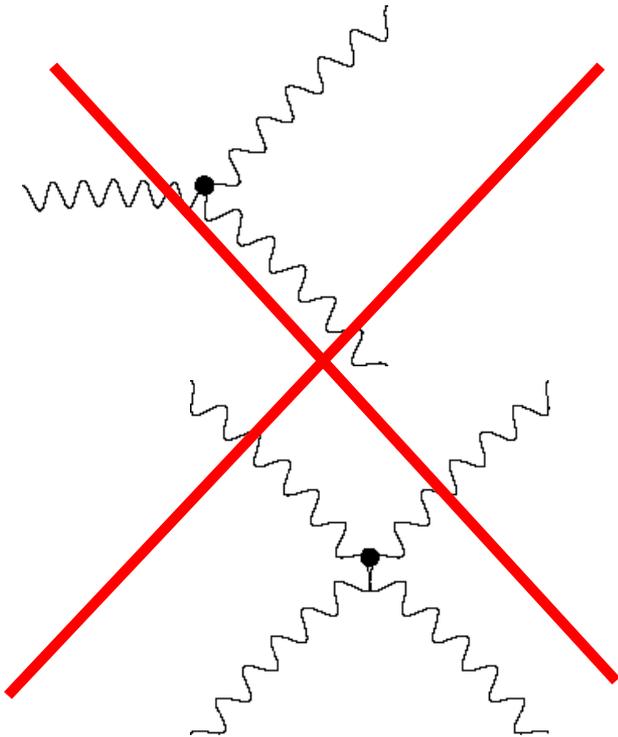


Стандартная Модель: КЭД и КХД



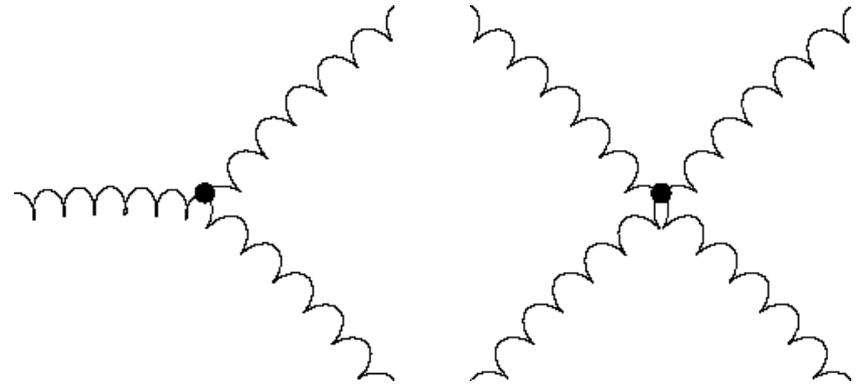
ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Самодействие фотонов
запрещено



ХРОМОДИНАМИКА

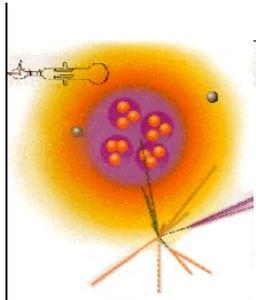
Самодействие глюонов разрешено



$$L_{gauge} = \dots - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^i G_{\mu\nu}^i + \dots$$

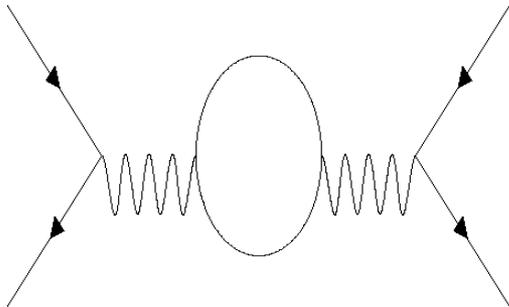
$$G_{\mu\nu}^i = \partial_\mu G_\nu^i - \partial_\nu G_\mu^i - g f_{ijk} G_\mu^j G_\nu^k$$

Стандартная Модель: КЭД и КХД



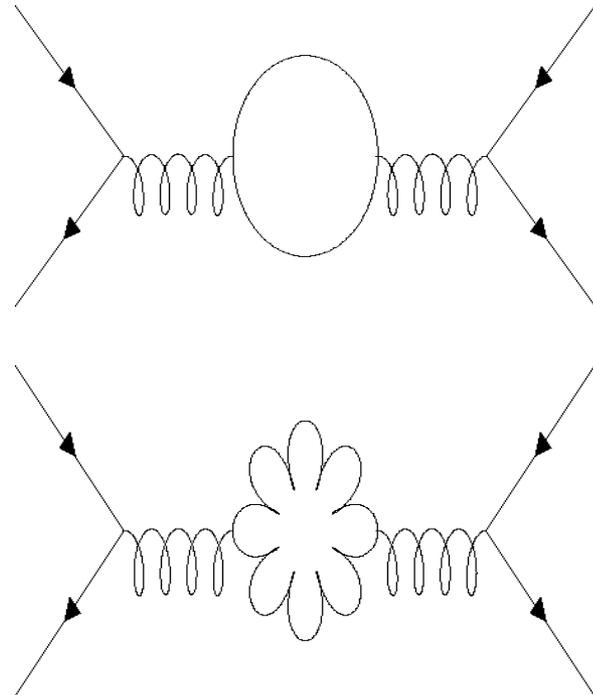
ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Самодействие фотонов
запрещено

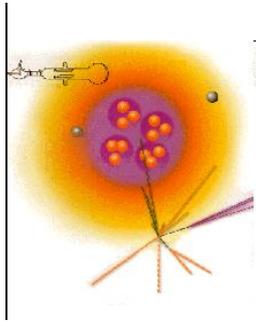


ХРОМОДИНАМИКА

Самодействие глюонов разрешено



Стандартная Модель: лагранжиан



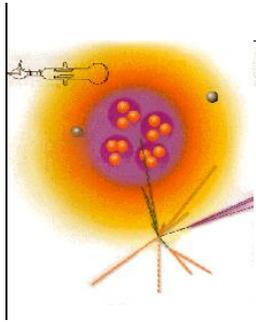
- Калибровочная инвариантность запрещает в лагранжиане массовые члены для калибровочных полей и фермионов
- Юкавские взаимодействия (взаимодействия кварков и лептонов с хиггсом)

$$L_{Yukawa} = y_{\alpha\beta}^L \bar{L}_\alpha E_\beta H + y_{\alpha\beta}^D \bar{Q}_\alpha D_\beta H + y_{\alpha\beta}^U \bar{Q}_\alpha U_\beta H$$

- Впервые встретился хиггс, тоже дублет по SU(2)

$$H = \begin{pmatrix} H^+ \\ H^0 \end{pmatrix} \quad H = i\tau_2 H^\dagger$$

Стандартная Модель: лагранжиан



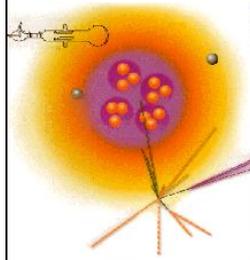
- Скалярная часть лагранжиана (кинетический член и скалярный потенциал)

$$L_{Higgs} = (D_\mu H)^\dagger (D_\mu H) - m^2 H^\dagger H + \frac{\lambda}{2} (H^\dagger H)^2$$

$$D_\mu H = \left(\partial_\mu + i \frac{g}{2} \tau^i W_\mu^i - i \frac{g'}{2} B_\mu \right) H$$

- Содержит взаимодействие калибровочных и хиггсовских бозонов и массовый член для хиггса

Стандартная Модель: нарушение ЭС симметрии



- Скалярный потенциал

$$L_{\text{Higgs}} = -V = m^2 H^\dagger H - \frac{\lambda}{2} (H^\dagger H)^2$$

содержит массовый член для полей Хиггса и их самодействие.

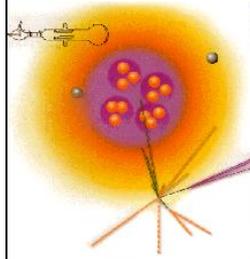
- Забудем на время, что хиггс – дублет и рассмотрим скалярный случай

$$V(\phi) = m^2 \phi^\dagger \phi - \frac{\lambda}{2} (\phi^\dagger \phi)^2$$

- Минимум потенциала достигается при

$$|\phi| = v/2, \quad v = \sqrt{\mu^2 / \lambda}$$

Стандартная Модель: нарушение ЭС симметрии



- Ненулевой минимум означает, что имеется вакуумное среднее

$$|\langle 0 | \phi | 0 \rangle| = v/2$$

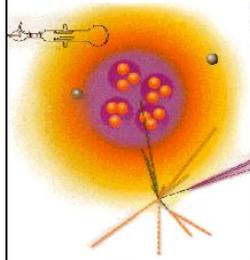
- Если скалярное поле выразить через действительные поля, их можно выбрать так, что

$$\phi = \frac{1}{2}(\phi_1 + i\phi_2) \quad \langle 0 | \phi_1 | 0 \rangle = v, \quad \langle 0 | \phi_2 | 0 \rangle = 0$$

- Теперь сделаем сдвиг

$$\phi_1' = \phi_1 - v, \quad \phi_2' = \phi_2$$

Стандартная Модель: нарушение ЭС симметрии

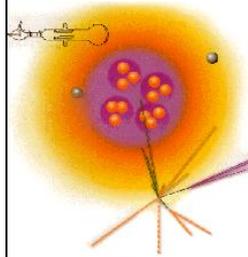


- Слагаемое с производной тогда примет вид

$$\begin{aligned} |D_\mu \phi|^2 &= |(\partial_\mu - igB_\mu)\phi|^2 = \\ &= \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi'_1 + gB_\mu \phi'_2)^2 + \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi'_2 - gB_\mu \phi'_1)^2 - \\ &= -gvB_\mu(\partial_\mu \phi'_2 + gB_\mu \phi'_1) + \frac{g^2 v^2}{2} B_\mu B_\mu \end{aligned}$$

- Возник массовый член для калибровочного поля!
- Механизм можно обобщить на случай неабелевых групп

Стандартная Модель: нарушение ЭС симметрии



- Скалярный потенциал

$$V = -m^2 H^\dagger H + \frac{\lambda}{2} (H^\dagger H)^2$$

имеет нетривиальный
минимум

$$\langle H \rangle = \begin{pmatrix} v \\ 0 \end{pmatrix}, \quad v = \frac{m}{\sqrt{\lambda}}$$

Spontaneous Symmetry Breaking

Pick a preferred value for the minimum and define the **massive** Higgs field H (radial) so that:

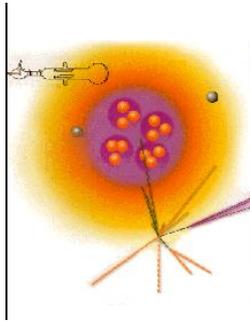
$$\langle H \rangle = \langle \Phi_1 - v \rangle = 0$$

The tangential component is massless (Goldstone)

$$\langle \rho \rangle \equiv \langle \Phi_2 \rangle = 0$$

E. Gross, *Hunting Higgs*, Nov 1997

Стандартная Модель: нарушение ЭС симметрии



- Частицы – переносчики электрослабых взаимодействий – есть линейные комбинации изначальных полей (они стали теперь массивными!)

$$W_{\mu}^{\pm} = \frac{W_{\mu}^1 \mp W_{\mu}^2}{\sqrt{2}}$$

$$Z_{\mu} = -\sin \theta_W B_{\mu} + \cos \theta_W W_{\mu}^3$$

$$\gamma_{\mu} = \cos \theta_W B_{\mu} + \sin \theta_W W_{\mu}^3$$

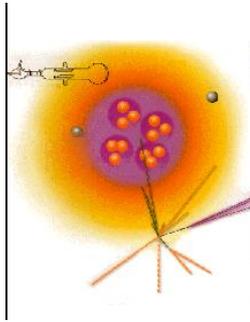
$$M_W = \frac{1}{\sqrt{2}} g v$$

$$M_Z = M_W / \cos \theta_W$$

$$\tan \theta_W = g' / g$$

$$M_{\gamma} = 0$$

Стандартная Модель: нарушение ЭС симметрии



- Для того, чтобы калибровочные бозоны становятся массивными мы использовали три степени свободы из четырех. Оставшаяся степень свободы и есть хиггсовский бозон

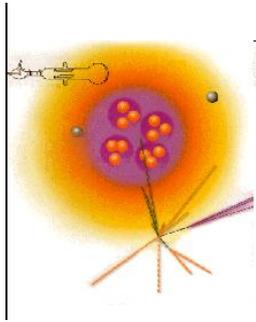
$$m_H = \sqrt{2}m = \sqrt{2\lambda}v$$

- Юкавские взаимодействия породили массовые члены для фермионов

$$y_{\alpha\beta}^L \bar{L}_\alpha E_\beta v + y_{\alpha\beta}^D \bar{Q}_\alpha D_\beta v + y_{\alpha\beta}^U \bar{Q}_\alpha U_\beta v$$

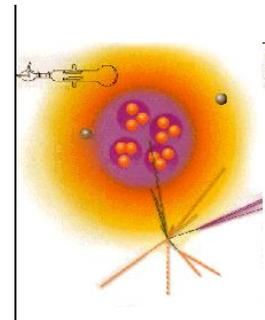
$$M_{\alpha\beta}^u = y_{\alpha\beta}^u v, \quad M_{\alpha\beta}^d = y_{\alpha\beta}^d v, \quad M_{\alpha\beta}^l = y_{\alpha\beta}^l v$$

Стандартная Модель: переносчики взаимодействий



- Таким образом мы построили калибровочно инвариантный лагранжиан, описывающий частицы и взаимодействия Стандартной Модели
- Зная лагранжиан, мы знаем все о нашей теории

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \chi_i Y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !

