

# Элементарные частицы

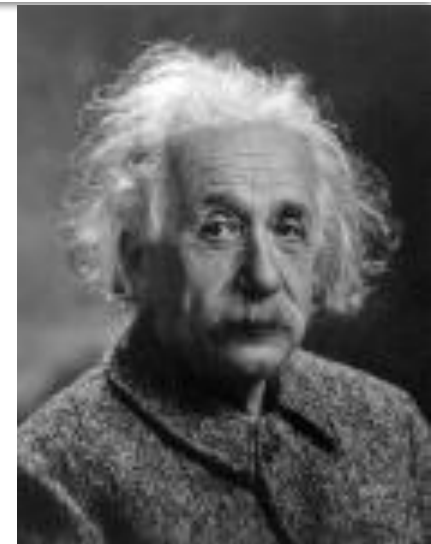
---

# ВВЕДЕНИЕ

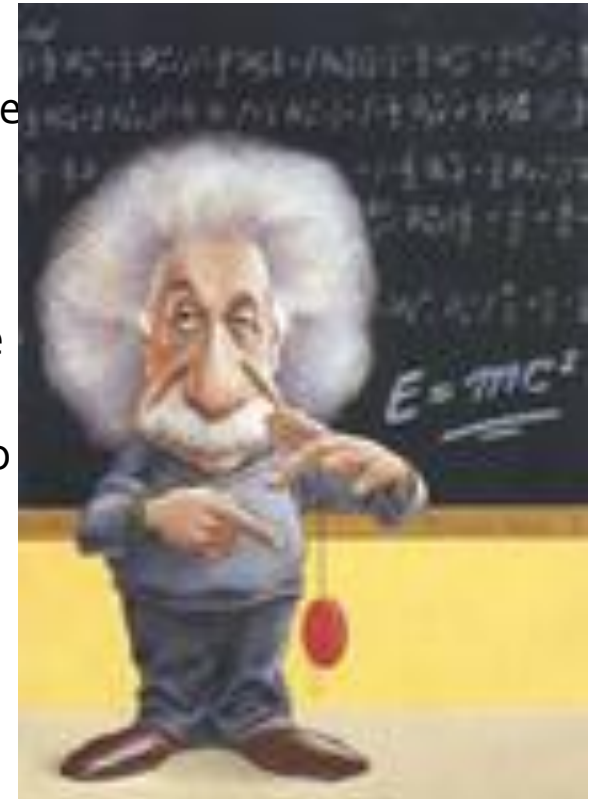
- Открытие элементарных частиц явилось
- закономерным результатом общих успехов в изучении
- строения вещества, достигнутых физикой в конце 19
- в. Оно было подготовлено всесторонними
- исследованиями оптических спектров атомов,
- изучением электрических явлений в жидкостях и
- газах, открытием фотоэлектричества, рентгеновских
- лучей, естественной радиоактивности,
- свидетельствовавших о существовании сложной
- структуры материи . Нельзя с уверенностью утверждать, что частицы,
- элементарные в смысле приведённого определения,
- существуют. Протоны и нейтроны, например,
- длительное время считавшиеся элементарными
- частицами, как выяснилось, имеют сложное строение.
- Не исключена возможность того, что
- последовательность структурных составляющих
- материи принципиально бесконечна. Существование элементарных частиц —
- это своего рода постулат, и проверка его
- справедливости — одна из важнейших задач физики

# ЭЛЕКТРОН

- Исторически первой открытой элементарной
- частицей был электрон — носитель отрицательного
- элементарного электрического заряда в атомах . В
- идейном плане он вошел в физику в 1881г., когда
- Гельмгольц в речи в честь Фарадея указал, что
- атомная структура вещества вместе с законами
- электролиза Фарадея неизбежно приводит к мысли,
- что электрический заряд всегда должен быть кратен
- некоторому элементарному заряду, - т. е. к выводу о
- квантовании электрического заряда. Носителем
- отрицательного элементарного заряда, как мы
- теперь знаем, и является электрон . Между тем «временная»
- теория о существовании
- электрона была подтверждена в 1897 г. в
- экспериментах Дж. Дж. Томсона, в которых он
- отождествил так называемые катодные лучи с
- электронами и измерил заряд и массу электрона.



- Однако идея об электро́не не сразу получила
- признание. Когда на лекции в Королевском обществе
- Дж. Дж. Томсон – первооткрыватель электро́на –
- высказал предположение, что частицы катодных
- лучей следует рассматривать как возможные
- компоненты атома, некоторые его коллеги искренне
- считали, что он мистифицирует их. Сам Планк
- признавался в 1925 г., что не верил тогда, в 1900г., до
- конца в гипотезу об электро́не
- Можно сказать, что после опытов Милликена,
- измерившего в 1911г. заряды индивидуальных
- электро́нов, эта первая элементарная частица
- получила право на существование



# ФОТОН

- Прямое экспериментальное доказательство
- существования фотона было дано Р. Милликеном в
- 1912—1915 гг. в его исследованиях фотоэффекта, а
- также А. Комптоном в 1922 г., обнаружившим
- рассеяние рентгеновских лучей с изменением их
- частоты . Фотон – это «оживленный» планковский квант света,
- т. е. квант света, несущий импульс
- Кванты света ввел Планк в 1901 г. для того, чтобы
- объяснить законы излучения абсолютно черного тела. «Живыми» фотоны
- или кванты сделала теория
- относительности Эйнштейна, который в 1905 г.
- показал, что кванты должны иметь не только
- энергию, но и импульс, и что они являются в полном
- смысле частицами, только особенными, так как масса
- покоя их равна нулю, и двигаются они со скоростью
- света

- Итак, вывод о существовании частицы
- электромагнитного поля — фотона — берёт своё
- начало с работы М. Планка (1900). Предположив, что
- энергия электромагнитного излучения абсолютно
- чёрного тела квантована, Планк получил правильную
- формулу для спектра излучения. Развивая идею
- Планка, А. Эйнштейн (1905) постулировал, что
- электромагнитное излучение (свет) в
- действительности является потоком отдельных
- квантов (фотонов), и на этой основе объяснил
- закономерности фотоэффекта .



# ПРОТОН

- Протон был открыт Э. Резерфордом в 1919 г. в
- исследованиях взаимодействия альфа-частиц с
- атомными ядрами
- Точнее открытие протона связано с открытием
- атомного ядра. Оно было сделано Резерфордом в
- результате бомбардировки атомов азота высоко
- энергетическими  $\alpha$ -частицами. Таким образом, протоны — это частицы с
- единичным
- положительным зарядом и массой, в 1840 раз
- превышающей массу электрона .

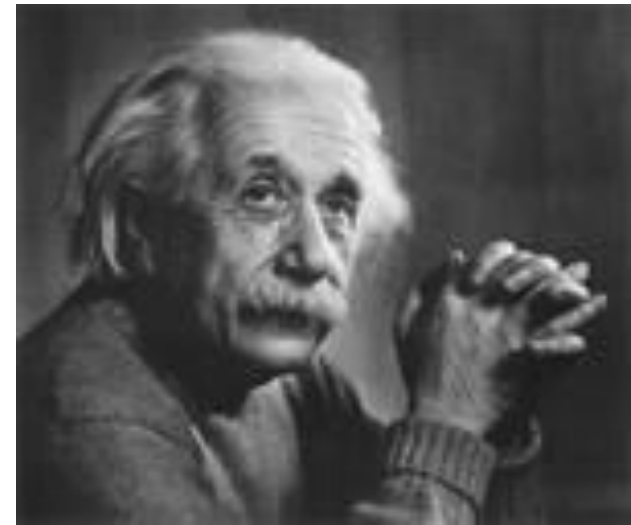


# НЕЙТРОН

- Другая частица, входящая в состав ядра, — нейтрон —
- была открыта в 1932 Дж. Чедвиком при
- исследованиях взаимодействия  $\alpha$ -частиц с
- бериллием. Нейтрон имеет массу, близкую к массе
- протона, но не обладает электрическим зарядом.
- Открытием нейтрона завершилось выявление частиц
- — структурных элементов атомов и их ядер . Лишь спустя десятилетие, после того как
- естественная радиоактивность была глубоко
- исследована, а радиоактивное излучение стали
- широко применять, чтобы вызывать искусственное
- превращение атомов, было надежно установлено
- существование новой составной части ядра. В 1930
- В.Боте и Г.Беккер из Гисенского университета
- проводили облучение лития и бериллия альфа-
- частицами и с помощью счетчика Гейгера
- регистрировали возникающее при этом проникающее
- излучение



- . В 1932 Ф.Жолио и И.Кюри повторили
- опыты с бериллием, пропуская такое проникающее
- излучение через парафиновый блок. Они обнаружили,
- что из парафина выходят протоны с необычно
- высокой энергией, и заключили, что, проходя через
- парафин, гамма-излучение в результате рассеяния
- порождает протоны. Дж. Чедвик повторил эксперимент. Он также
- использовал парафин и с помощью ионизационной
- камеры, в которой собирался заряд, возникающий при
- выбивании электронов из атомов, измерял пробег
- протонов отдачи



- Чедвик использовал также газообразный азот (в камере Вильсона, где вдоль следа заряженной
- частицы происходит конденсация водяных капелек)
- для поглощения излучения и измерения пробега атомов отдачи азота. Применив к результатам обоих
- экспериментов законы сохранения энергии и импульса, он пришел к выводу, что обнаруженное
- нейтральное излучение – это не гамма-излучение, а поток частиц с массой, близкой к массе протона.
- Чедвик показал также, что известные источники гамма-излучения не выбивают протонов. Тем самым было подтверждено
- существование новой частицы, которую теперь называют нейтроном .

# ПОЗИТРОН

- В 1932 г. в их составе А. Андерсоном была
- обнаружена первая античастица — позитрон ( $e^+$ ) —
- частица с массой электрона, но с положительным
- электрическим зарядом. Позитрон был первой
- открытой античастицей. Существование  $e^+$
- непосредственно вытекало из релятивистской теории
- электрона, развитой П. Дираком (1928—31) незадолго
- до обнаружения позитрона. В 1936г. американские
- физики К. Андерсон и С. Неддермейер обнаружили
- при исследовании космических лучей мюоны (обоих
- знаков электрического заряда) — частицы с массой
- примерно в 200 масс электрона, а в остальном
- удивительно близкие по свойствам к  $e^-$ ,  $e^+$



- Позитроны (положительные электроны) в веществе
- не могут существовать, потому что при замедлении
- они аннигилируют, соединяясь с отрицательными
- электронами. В этом процессе, который можно
- рассматривать как обратный процесс рождения пар,
- положительный и отрицательный электроны
- исчезают, при этом образуются фотоны, которым
- передается их энергия. Позитрон был открыт Андерсоном при изучении
- космических лучей методом камеры Вильсона. Вскоре после этого
- Кюри и Жолио открыли, что позитроны образуются при
- конверсии гамма-лучей радиоактивных источников, а
- также испускаются искусственными радиоактивными
- изотопами.

# Пионы и Мюоны. Открытие мезона

- В 1932 году Росси, используя метод совпадений,
- предложенный Боте и Кольхерстером, показал, что
- известную часть наблюдаемого на уровне моря
- космического излучения составляют частицы,
- способные проникать через свинцовые пластины
- толщиной до 1 м. Вскоре после этого он также
- обратил внимание на существование в космических
- лучах двух различных компонент. Частицы одной
- компоненты (проникающая компонента) способны
- проходить через большие толщи вещества, причем
- степень поглощения их различными веществами
- приблизительно пропорциональна массе этих
- веществ. Частицы другой компоненты
- (ливнеобразующая компонента) быстро поглощаются,
- в особенности тяжелыми элементами; при этом
- образуется большое число вторичных частиц (ливни).



- Эксперименты по изучению прохождения частиц
- космических лучей через свинцовые пластины,
- проведенные с камерой Вильсона Андерсоном и
- Неддемейером, также показали, что существуют две
- различные компоненты космических лучей. В 1934 году Бете и Гайтлер опубликовали теорию
- радиационных потерь электронов и рождения пар
- фотонами. Таким образом, к
- концу 1936 года стало почти очевидным, что в
- космических лучах имеются, кроме электронов, еще и
- частицы до тех пор неизвестного типа,
- предположительно частицы с массой, промежуточной
- между массой электрона и массой протона. Существование частиц с
- промежуточной массой было
- непосредственно доказано в 1937 году
- экспериментами Неддемейера и Андерсона, Стрита и
- Стивенсона

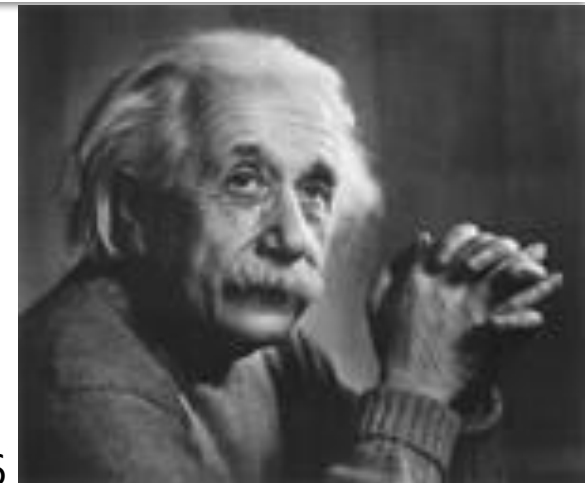
- Эксперименты Неддемейера и Андерсона явились
- продолжением (с улучшенной методикой)
- упоминавшихся выше исследований по потерям
- энергии частиц космических лучей. Они были
- проведены в камере Вильсона, помещенной в
- магнитное поле и разделенной на две половины
- платиновой пластиной толщиной 1 см. Потери
- импульса для отдельных частиц космических лучей
- определялись путем измерения кривизны следа до и
- после пластины



- . Описанные выше эксперименты, безусловно,
- доказали, что проникающие частицы действительно
- являются более тяжелыми, чем электроны, но более
- легкими, чем протоны. Кроме того, эксперимент
- Стрита и Стивенсона дал первую примерную оценку
- массы этой новой частицы, которую мы можем теперь
- назвать ее общепринятым именем - мезон
- Итак в 1936 г. А. Андерсон и С. Неддермейер открыли
- мюон (?- мезон). Эта частица отличается от
- электрона только своей массой, которая примерно в
- 200 раз больше электронной
- В 1947г. Пауэлл наблюдал в фотоэмульсиях следы
- заряженных частиц, которые были интерпретированы
- как мезоны Юкавы и названы ?-мезонами или пионами.
- Продукты распада заряженных пионов,
- представляющие собой также заряженные частицы,
- были названы ?-мезонами или мюонами. Именно
- отрицательные мюоны и наблюдались в опытах



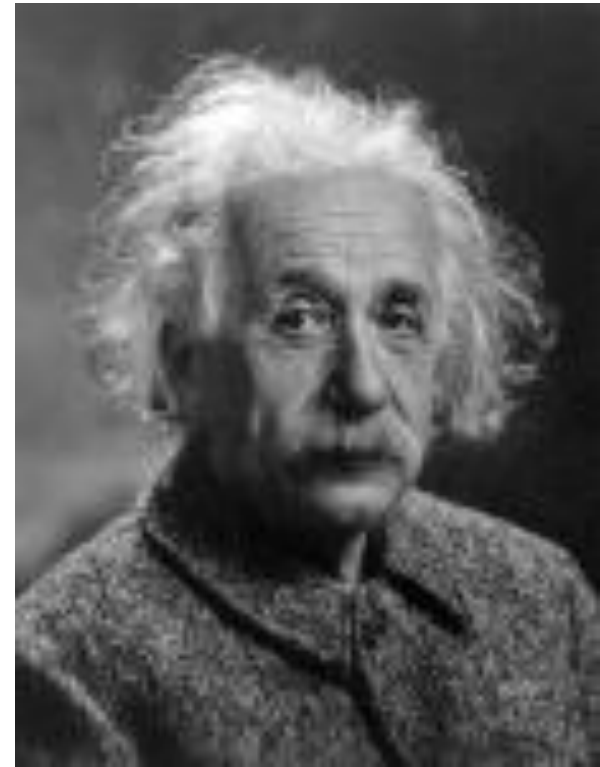
- Конверси: в отличие от пионов мюоны, как и
- электроны, не взаимодействуют сильно с атомными
- ядрами И так, был открыт заряженный мезон Юкавы,
- распадающийся на мюон и нейтрино. Время жизни ?-
- мезона относительно этого распада оказалось
- равным  $2 \cdot 10^{-8}$  с. Потом выяснилось, что и мюон
- нестабилен, что в результате его распада образуется
- электрон. Время жизни мюона оказалось порядка  $10^{-6}$
- с. Так как электрон, образующийся при распаде
- мюона, не имеет строго определенной энергии, то
- был сделан вывод, что наряду с электроном при
- распаде мюона образуются два нейтрино
- В 1947 также в космических лучах группой С. Пауэрла
- были открыты  $p^+$  и  $p^-$ -мезоны с массой в 274
- электронные массы, играющие важную роль во
- взаимодействии протонов с нейтронами в ядрах.
- Существование подобных частиц было предположено
- Х. Юкавой в 1935



# НЕЙТРИНО

- Открытие нейтрино — частицы, почти не
- взаимодействующей с веществом, ведёт своё начало
- от теоретической догадки В. Паули (1930),
- позволившей за счёт предположения о рождении
- такой частицы устранить трудности с законом
- сохранения энергии в процессах бета-распада
- радиоактивных ядер. «После открытия нейтрона, - говорил Паули, - на
- семинарах в Риме мою новую частицу, испускаемую
- при  $\beta$ -распаде, Ферми стал называть «нейтрино»,
- чтобы отличить её от тяжёлого нейтрона. Это
- итальянское название стало общепринятым»
- В 30-годы теория Ферми была обобщена на
- позитронный распад (Вик, 1934 год) и на переходы с
- изменением углового момента ядра (Гамов и Теллер,
- 1937 год)

- В 1962 было выяснено, что существуют два разных
- нейтрино: электронное и мюонное. В 1964 в распадах
- нейтральных К-мезонов было обнаружено
- несохранение т. н. комбинированной чётности
- (введённой Ли Цзун-дао и Ян Чжэнь-нином и
- независимо Л. Д. Ландау в 1956), означающее
- необходимость пересмотра привычных взглядов на
- поведение физических процессов при операции
- отражения времени



# Открытие странных частиц

- Конец 40-х — начало 50-х гг. ознаменовались
- открытием большой группы частиц с необычными
- свойствами, получивших название “странных”. Первые
- частицы этой группы  $K^{+-}$  и  $K^{--}$ -мезоны,  $L^-$ ,  $S^{+ -}$ ,  $S^{- -}$ ,  $X^{- -}$
- гипероны были открыты в космических лучах,
- последующие открытия странных частиц были
- сделаны на ускорителях — установках, создающих
- интенсивные потоки быстрых протонов и электронов.
- При столкновении с веществом ускоренные протоны и
- электроны рождают новые элементарные частицы,
- которые и становятся предметом изучения
- В 1947 г. Батлер и Рочестер в камере Вильсона
- наблюдали две частицы, названные  $V$ -частицами.
- Наблюдалось два трека, как бы образующие
- латинскую букву  $V$ . Образование двух треков
- свидетельствовало о том, что частицы нестабильны
- и распадаются на другие, более лёгкие

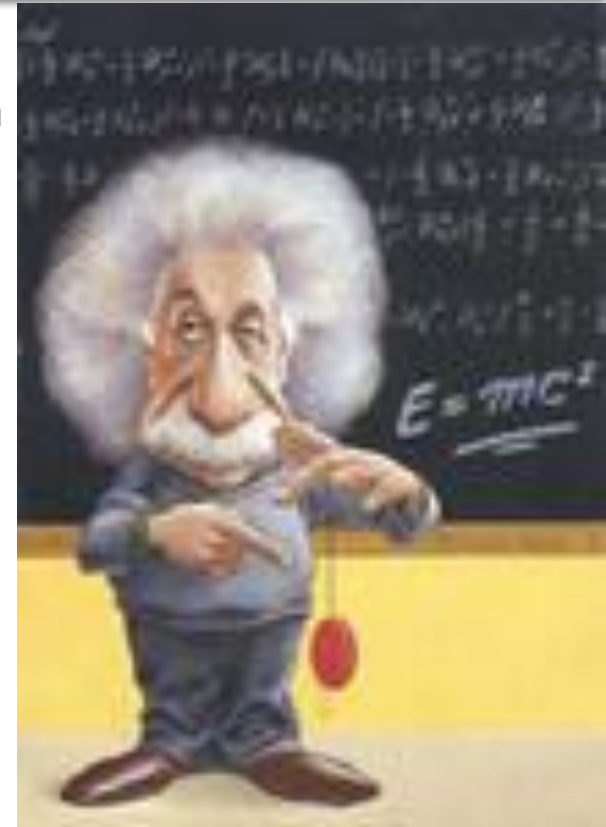
- . Одна из  $V$  -
- частиц была нейтральной и распадалась на две
- заряженные частицы с противоположными зарядами.
- (Позже она была отождествлена с нейтральным  $K$ -
- мезоном, который распадается на положительный и
- отрицательный пионы).
- Заметим, что если экспериментальное открытие ?-
- мезона было в каком-то смысле «ожидаемым» в связи
- с необходимостью объяснить природу нуклонных
- взаимодействий, то открытие  $V$  -частиц, как и
- открытие мюона, оказалось полной неожиданностью .
- «Поведение»  $V$  -частиц при рождении и последующем
- распаде привело к тому, что их стали называть
- странными
- Странные частицы в лаборатории впервые получены в
- 1954г. Фаулером, Шаттом, Торндайком и Вайтмором,
- которые, используя пучок ионов от Брукхейвенского
- космотрона с начальной энергией 1,5 ГэВ, наблюдали
- реакции ассоциативного образования странных
- частиц .

# РЕЗОНАНСЫ

- В 1960-х гг. на ускорителях было открыто большое
- число крайне неустойчивых (по сравнению с др.
- нестабильными элементарными частицами) частиц,
- получивших название “резонансов”. Возбуждённые состояния существуют не только у
- нуклона (в этом случае говорят о его изобарных
- состояниях), но и у  $\rho$ -мезона (в этом случае говорят о
- мезонных резонансах)

# «Очарованные» частицы

- В конце 1974г. две группы экспериментаторов (группа
- Тинга на протонном ускорителе в Брукхейвене и
- группа Б. Рихтера, работавшая на установке со
- встречными электронно-позитронными пучками в
- Стэнфорде) одновременно сделали важнейшее
- открытие в физике элементарных частиц: открыли
- новую частицу – резонанс с массой, равной 3,1 ГэВ
- (превышающей три массы протона)
- Наиболее удивительным свойством этого резонанса
- оказалась его малая ширина распада – она равна
- всего 70кэВ, что соответствует времени жизни
- порядка  $10^{-23}$  с
- Общепринятое объяснение природы  $\rho$ -мезонов
- основано на гипотезе существования наряду со
- «стандартными» тремя  $u$  -,  $d$  - и  $s$  -кварками ещё
- четвёртого,  $c$ -кварком.



- В 1974 были обнаружены и другие массивные (в 3—4
- протонные массы) и в то же время относительно
- устойчивые  $\chi$ -частицы, с временем жизни, необычно
- большим для резонансов. Они оказались тесно
- связанными с новым семейством элементарных
- частиц — “очарованных”, первые представители
- которого ( $D_0$ ,  $D^+$ ,  $D_s$ ) были открыты в 1976. В 1975
- были получены первые сведения о существовании
- тяжёлого аналога электрона и мюона (тяжёлого
- лептона  $t$ )
- За открытие  $\chi$ -частиц Тингу и Рихтеру в 1976 году
- была присуждена Нобелевская премия по физике .



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Таким образом, за годы, прошедшие после открытия
- электрона, было выявлено огромное число
- разнообразных микрочастиц материи.

