

Национальный исследовательский университет  
Высшая Школа Экономики

курс-майнор 2017-2018 уч.года  
«Квантовая физика 'для чайников'»

В.Н.Глазков

Лекция 13

Ядерная физика 2:  
Элементарные частицы. Стандартная модель.

## Оглавление

Сечение реакции и порог реакции, элементарная механика реакций.....	5
Сечение реакции.....	5
Порог реакции.....	6
Сечение реакции, образование частицы, время жизни частицы.....	6
Элементарная механика реакций.....	7
Экспериментальные методы ядерной физики. ....	7
Детектирование частиц.....	7
Счётчик Гейгера.....	7
Детекторы нейтронов.....	8
Камера Вильсона.....	9
Пузырьковая камера.....	11
Искровые и многопроволочные (многопроволочные пропорциональные) камеры.....	13
Метод фотографических эмульсий.....	14
Детекторы нейтрино.....	15
Ускорители элементарных частиц: Виды ускорителей и история их развития.....	16
Ускорители ЦЕРН.....	24
Элементарные частицы.....	28
История открытия элементарных частиц.....	28
Характеристики элементарных частиц.....	34
Частицы и античастицы.....	35
Аннигиляция.....	36
Антиматерия.....	36
Семейства элементарных частиц.....	38
Стандартная модель.....	38
Калибровочные бозоны.....	40
Бозон Хиггса.....	43
Лептоны.....	46
Кварки.....	47
Составные частицы.....	48

## Список литературы

- 1: wikipedia.org, Geiger-Muller tube, 2016, [http://en.wikipedia.org/wiki/Geiger\\_Müller\\_tube](http://en.wikipedia.org/wiki/Geiger_Müller_tube)
- 2: ILL, Neutron detectors, 2016, <http://www.ill.eu/science-technology/neutron-technology-at-ill/detectors/miland/>
- 3: Memorial museum of Cavendish Laboratory, Wilson Chamber Discovery, 2016, <http://chambrebrouillard.wifeo.com/history-and-achievements.php>
- 4: , Wison Chamber Demo, 2016, <http://www.darvill.clara.net/mydown.htm>
- 5: , Hystorical tracks of alpha particles by Blackett, 2016, <http://www.courtauld.ac.uk/researchforum/events/2011/spring/ShowsofLondon.shtml>
- 6: C.D.Anderson, The Positive Electron, Physical Review , 43, 491 ( 1933)
- 7: CERN, CERN for teachers: Bubble Chambers, 2016, [http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2005/bubble\\_chambers/BCwebsite/index.htm](http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2005/bubble_chambers/BCwebsite/index.htm)
- 8: BNL, Hystorical tracks of Omega-minus particle, 2016, <http://www.bnl.gov/bnlweb/history/Omega-minus.asp>
- 9: BNL, On the dyscovery of muon neutrino, 2016, [http://www.bnl.gov/bnlweb/history/nobel/nobel\\_88.asp](http://www.bnl.gov/bnlweb/history/nobel/nobel_88.asp)
- 10: Нобелевский комитет, Официальный сайт Нобелевского комитета (информация о лауреатах, Нобелевские лекции), , [www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org)
- 11: wikipedia.org, Sudbury Neutrino Observatory, 2016, [http://en.wikipedia.org/wiki/Sudbury\\_Neutrino\\_Observatory](http://en.wikipedia.org/wiki/Sudbury_Neutrino_Observatory)
- 12: wikipedia.org, Cockroft-Walton Generator, , [http://en.wikipedia.org/wiki/Cockcroft-Walton\\_generator](http://en.wikipedia.org/wiki/Cockcroft-Walton_generator)
- 13: wikipedia.org, Van de Graaf Generator, 2016, [http://en.wikipedia.org/wiki/Van\\_de\\_Graaff\\_generator](http://en.wikipedia.org/wiki/Van_de_Graaff_generator)
- 14: Fermilab, Cockroft-Walton Generator at Fermilab, 2016, <http://www.fnal.gov/pub/inquiring/physics/accelerators/chainaccel.html>
- 15: wikipedia.org, Linear particle accelerator, 2016, [http://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_particle\\_accelerator](http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_particle_accelerator)
- 16: Stanford University, Accelerators for medical applications, 2016, <http://news.stanford.edu/news/2007/april18/med-accelerator-041807.html>
- 17: wikipedia.org, Stanford Linear Accelerator Center, 2016, [http://en.wikipedia.org/wiki/Stanford\\_Linear\\_Accelerator\\_Center](http://en.wikipedia.org/wiki/Stanford_Linear_Accelerator_Center)
- 18: wikipedia.org, Cyclotron, 2016, <http://en.wikipedia.org/wiki/Cyclotron>
- 19: TRIUMF, TRIUMF Cyclotron Center, 2016, <http://www.triumf.ca>
- 20: ИЯФ МГУ, Синхротрон, 2016, <http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/accelerators/synchro.htm>
- 21: wikipedia.org, Synchrotron, 2016, <http://en.wikipedia.org/wiki/Synchrotron>
- 22: wikipedia.org, Fermilab, 2016, <http://en.wikipedia.org/wiki/Fermilab>
- 23: wikipedia.org, CERN, 2016, <http://en.wikipedia.org/wiki/Cern>
- 24: CERN, Official Web-page, 2016, [www.cern.ch](http://www.cern.ch)
- 25: CERN, CERN Accelerator Complex, 2016, <http://public.web.cern.ch/public/en/Research/AccelComplex-en.html>
- 26: CERN, Large Hadron Collider, 2016, <http://home.cern/topics/large-hadron-collider>
- 27: wikipedia.org, Large Hadron Collider, 2016, [http://en.wikipedia.org/wiki/Large\\_Hadron\\_Collider](http://en.wikipedia.org/wiki/Large_Hadron_Collider)
- 28: CERN, The Antiproton Decelerator, 2016, <http://home.cern/about/accelerators/antiproton-decelerator>

- 29: CERN, ALICE, 2016, <http://home.cern/about/experiments/alice>
- 30: wikipedia.org, ALICE: A Large Ion Collider Experiment, 2016, [https://en.wikipedia.org/wiki/ALICE:\\_A\\_Large\\_Ion\\_Collider\\_Experiment](https://en.wikipedia.org/wiki/ALICE:_A_Large_Ion_Collider_Experiment)
- 31: American Institute of Physics, Center for Hystory of Physics, The discovery of Electron, 2016, <https://www.aip.org/history/exhibits/electron/>
- 32: cambridgephysics.org, the Museum at the Cavendish Laboratory, 2016, <http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/museum/tour.htm>
- 33: wikipedia.org, Cathode ray, 2016, [https://en.wikipedia.org/wiki/Cathode\\_ray](https://en.wikipedia.org/wiki/Cathode_ray)
- 34: P. M. S. Blackett, The Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method, Proc. R. Soc. Lond. A , 107, 349 ( 1925)
- 35: G.J.Neary, The beta-ray spectrum of radium E [Bi-210], Proc. R. Soc. Lond. A, 175, 71 ( 1940)
- 36: wikipedia.org, Antimatter, 2016, <https://en.wikipedia.org/wiki/Antimatter>
- 37: Д. И. Казаков, Хиггсовский бозон открыт: что дальше?, УФН, 184, 1004 ( 2014)
- 38: wikipedia.org, Standard Model, 2016, [https://en.wikipedia.org/wiki/Standard\\_Model](https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model)
- 39: wikipedia.org, W and Z bosons, 2016, [https://en.wikipedia.org/wiki/W\\_and\\_Z\\_bosons](https://en.wikipedia.org/wiki/W_and_Z_bosons)
- 40: Hyperphysics project, Georgia State University, HyperPhysics:Quantum Physics: Particles, 2016, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/particles/parcon.html>
- 41: wikipedia.org, Color charge, , [http://en.wikipedia.org/wiki/Color\\_charge](http://en.wikipedia.org/wiki/Color_charge)
- 42: В.А.Рубаков, К открытию на большом адронном коллайдере новой частицы со свойствами бозона Хиггса, УФН, 182, 1017 ( 2012)
- 43: Particle Data Group, K.A.Olive et al., Status of Higgs boson physics, Chin. Phys. C, 38, 090001 ( 2014)
- 44: Adrian Cho, Mass of the Common Quark Finally Nailed Down, Science Online, <http://www.sciencemag.org/news/2010/04/mass-common-quark-finally-nailed-down> ( 2010)
- 45: Hyperphysics Project, Georgia State University, Quarks, 2016, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/particles/quark.html#c1>
- 46: LHCb Collaboration, Observation of the resonant character of the  $Z(4430)^-$  state, arXiv.org > hep-ex > arXiv:1404.1903 ( 2014)
- 47: Eric Swanson, Viewpoint: New Particle Hints at Four-Quark Matter, Physics , 6, 69 ( 2013)
- 48: R. Aaij et al. (LHCb Collaboration), Observation of  $J/\psi$  Resonances Consistent with Pentaquark States in  $\Lambda^0 b \rightarrow J/\psi K^- p$  Decays, Phys. Rev. Lett., 15, 072001 ( 2015)
- 49: Kenneth Hicks, Viewpoint: Elusive Pentaquark Comes into View, Physics, 8, 77 ( 2015)

## Сечение реакции и порог реакции, элементарная механика реакций

В этой лекции речь пойдёт об обзоре свойств элементарных частиц. Как уже отмечалось в начале нашего курса, микромир часто кажется контринтуитивным, так как наша интуиция и «житейский» здравый смысл складываются в совершенно иных условиях. Это в полной мере относится и к миру элементарных частиц. Поэтому необходимо вначале сделать несколько вводных замечаний, касающихся измеряемых величин.

### Сечение реакции

Физика элементарных частиц — это в первую очередь физика реакций между этими частицами. Поэтому необходимо как-то охарактеризовать эти реакции. В частности, интерес представляет вероятность реакции: насколько вероятно, что при столкновении двух частиц типов «А» и «Б» получится частица типа «В»?

Точнее, в реальном эксперименте обычно происходит одно из двух: либо поток частиц (от источника радиации или из ускорителя) направляется в какую-то мишень, либо сталкиваются встречные пучки частиц. В любом случае речь идёт не о столкновении пары частиц, а о возможном взаимодействии многих частиц со многими. При этом экспериментатор (в идеальном случае) наблюдает рождение многих частиц в ходе этой реакции, так что реально анализируется некоторая статистика событий.

Удобной характеристикой вероятности события оказывается сечение реакции  $\sigma$ .

Для ситуации с бомбардировкой мишени потоком частиц  $j$  (штук на единицу площади в единицу времени) число реакций в единицу времени в тонком слое толщиной  $dx$  и площадью  $S$  равно  $\frac{dN}{dt} = j(nSdx)\sigma$ , где  $n$  — концентрация частиц, с которыми происходит взаимодействие, в мишени. Видно, что  $\sigma$  имеет здесь просто смысл эффективной площади, которой одна частица мишени «перекрывает» путь налетающим частицам.<sup>1</sup>

Для ситуации встречных пучков необходимо учесть, что в ускорителях частицы ускоряются «пакетами», а не непрерывным потоком. Поэтому интерес для анализа статистики представляет столкновение двух «пакетов» частиц, содержащих  $N_A$  и  $N_B$  штук частиц каждый. Количество произошедших реакций тогда равно  $N = \frac{N_A N_B}{S} \sigma$ , где  $S$  — сечение пучка.

И в той, и в другой схеме опыта экспериментатор определяет количество интересующих его реакций как функцию от параметров пучка и, зная свойства пучка, фактически измеряет собственную (не зависящую от параметров установки) характеристику данной реакции — её сечение.

<sup>1</sup> Отсюда автоматически следует закон убывания потока частиц вглубь мишени:  $\frac{dj}{dx} = -jn\sigma$  и

$$j(x) = j_0 e^{-n\sigma x}$$

## Порог реакции

Открытие многих элементарных частиц стало возможно только с появлением ускорителей. Тогда, сталкивая две частицы друг с другом, можно (с некоторой вероятностью и если это не противоречит законам сохранения) получить более тяжёлые частицы «конвертируя» энергию налетающих частиц в массу. Минимальная энергия, начиная с которой это становится возможным, называется *порогом реакции*.

Рассмотрим модельную задачу, когда сталкиваются частицы с одинаковой массой  $m$ , а получается частица с массой  $M$ . Здесь опять различаются постановки эксперимента с бомбардировкой мишени и со встречными пучками.

Для случая встречных пучков суммарный импульс сталкивающихся частиц равен нулю, следовательно и рожденная частица будет покоиться. Поэтому закон сохранения энергии будет сразу давать ответ на наш вопрос:  $2E = Mc^2$ , а кинетическая энергия каждого пучка

$$T = \frac{Mc^2}{2} - mc^2.$$

Для случая бомбардировки мишени полный импульс сталкивающихся частиц не равен нулю, поэтому и дочерняя частица должна двигаться. Из релятивистского соотношения для энергии

и импульса  $E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$  получаем для импульса  $p = \sqrt{\left(\frac{E}{c}\right)^2 - (mc)^2} = \sqrt{2mT + \left(\frac{T}{c}\right)^2}$ .

Из закона сохранения энергии  $T + 2mc^2 = \sqrt{(Mc^2)^2 + (pc)^2} = \sqrt{(Mc^2)^2 + 2m c^2 T + T^2}$ , возводя в квадрат получаем  $2m c^2 T = (M c^2)^2 - 4(m c^2)^2$  и  $T = \frac{(M c^2)^2}{2m c^2} - 2m c^2$ .

Легко заметить, что для больших масс дочерней частицы второй способ (бомбардировка мишени) становится катастрофически проигрышным. С этим и связано то, что ускорители высоких энергий работают по принципу коллайдера, то есть сталкивают встречные пучки.

## Сечение реакции, образование частицы, время жизни частицы

Как уже говорилось, сечение реакции является фактически измеряемой величиной в опыте. В модельном случае реакции  $A + B \rightarrow C$  одновременное выполнение всех законов сохранения возможно только при строгом равенстве энергии налетающей (налетающих) частицы пороговой энергии. То есть, на зависимости сечения реакции от энергии пучка возникнет очень узкий максимум<sup>2</sup>.

Если же время жизни частицы «С» конечно, то по соотношению неопределённости для энергии  $\Delta E \tau \simeq \hbar$  её измеряемая энергия «размазана» вблизи среднего значения. Это означает, что в наблюдаемой зависимости  $\sigma(E)$  возникнет пик («резонанс») конечной ширины  $\Delta E$ .

Во многих случаях, когда в физике частиц говорят о наблюдении частицы массой  $M c^2$  с временем жизни  $\tau$ , то имеется в виду именно наблюдение такого резонансного увеличения сечения реакции.

<sup>2</sup> На языке математики это описывается дельта-функцией  $\sigma(E) \propto \delta(E - E_0)$

## Элементарная механика реакций

Отметим без подробного обсуждения несколько фактов, которые используются для определения характеристик элементарных частиц:

1. Во всех процессах превращения частиц сохраняются энергия, импульс, электрический заряд, момент импульса
2. При распаде частицы на две дочерние частицы энергии и импульсы всех частиц однозначно связаны законами сохранения энергии и импульса.
3. Знаки заряда частиц можно определить по их отклонению в магнитном поле

## Экспериментальные методы ядерной физики.

### Детектирование частиц.

#### Счётчик Гейгера.

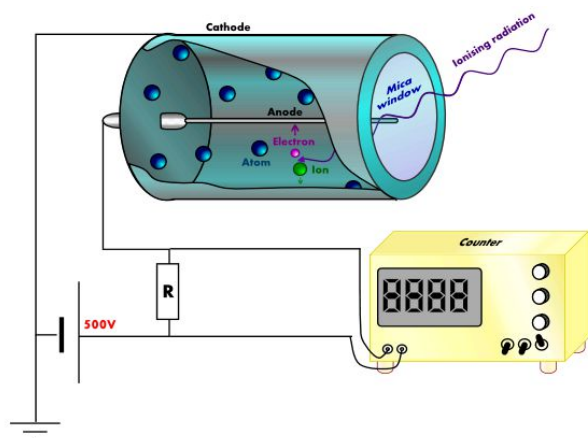


Рисунок 1: Схема устройства счётчика Гейгера. С сайта [1]



Рисунок 2: Современный счётчик Гейгера. С сайта [1].

Всем известный счётчик Гейгера был изобретён сотрудником Резерфорда Хансом Гейгером в 1908 году (доработан Вальтером Мюллером в 1928 году) [1].

Счётчик представляет собой трубку, наполненную газом при давлении  $\sim 0.1$  атм с центральным электродом в форме тонкой проволоочки (вторым электродом является стенка трубки). На электроды трубки прикладывается разность потенциалов от нескольких сотен вольт до примерно одного киловольта. На трубке обычно делается окно из прозрачного для детектируемого излучения материала.

При попадании внутрь трубки ионизирующего излучения (в основном гамма и бета) происходит ионизация газа. Под действием приложенного напряжения образовавшиеся при ионизации электроны и ионы притягиваются к соответствующим электродам, положительным электродом (анодом) является в стандартном счётчике тонкая проволоочка.

Вблизи тонкой проволоочки электрическое поле сильно возрастает (поле равномерно заряженной длинной нити  $E \propto \frac{1}{r}$ ), под действием этого поля электроны ускоряются и успевают набирать энергию, достаточную для ионизации других атомов при столкновении — рождается электронная лавина. Эта лавина, вызванная изначально единственной частицей ионизирующего излучения, создаёт заметный импульс электрического тока между электродами, который и детектируется. Количество таких импульсов пропорционально интенсивности излучения. Для выделения определённых видов излучения (например, блокирования бета-излучения) окно счётчика может закрываться соответствующими поглощающими экранами.

Счётчик Гейгера прост в изготовлении и использовании, поэтому он широко распространён в технике (включая военную и технику гражданской обороны). В физических применениях использование счётчика Гейгера ограничено, так как он не позволяет более точно определить свойства излучения.

### Детекторы нейтронов.



Нейтроны активно используются в физических исследованиях: нейтронная дифракция является одним из наиболее сильных экспериментальных методов физики конденсированного состояния, поэтому детектирование нейтронов представляет отдельную важную проблему. Так как нейтрон — нейтральная частица, его ионизирующее действие мало, и он не вызывает отклика ни у счётчика Гейгера, ни в камере Вильсона.

Для детектирования нейтронов обычно используется их взаимодействие с другими ядрами, приводящее к образованию ионизованных ядер, которые в свою очередь можно обнаружить обычными методами. Наиболее практичными являются две реакции:



Технически для детектирования изготавливается ионизационная камера, похожая на счётчик Гейгера, которая либо заполняется гелием-3 или трифторидом бора-10 ( $\text{BF}_3$ ), либо стенки камеры покрываются слоем бора-10.

*Рисунок 3: Детектор нейтронов MILAND Института Лауэ-Ланжевена (Гренобль, Франция). Точность определения положения нейтрона 1мм. С сайта [2].* Для задач нейтронной дифракции важным является обнаружение пространственного положения рассеянного нейтрона, поэтому детектор либо делается подвижным, либо делается многоэлектродный детектор большого размера, контролирующий одновременно большой угол рассеяния (см., например, [2]).



### **Камера Вильсона.**

Первым из приборов, позволившим «увидеть» траекторию движения элементарной частицы (трек частицы) была камера Вильсона, изобретённая шотландским физиком Чарльзом Вильсоном в 1911 году [3]. Демонстрационные камеры Вильсона можно встретить в университетах и даже в школах [4]. В первоначальной версии камеры Вильсона создавалась атмосфера насыщенного водяного пара, после чего за счёт адиабатического расширения воздух в камере охлаждался и начиналась конденсация. При пролёте заряженной частицы её взаимодействие с паром приводило к образованию центров конденсации и капельки показывали путь частицы. За своё изобретение Вильсон стал лауреатом Нобелевской премии по физике в 1927 году.



*Рисунок 5: Демонстрационная диффузионная камера Вильсона. Источник частиц находится на конце изогнутого держателя слева, виден «веер» расходящихся от источника треков. С сайта [4].*



*Рисунок 4: Сделанная Ч.Вильсоном камера Вильсона. Из экспозиции музея Кавендишской лаборатории. С сайта [3].*

Недостатком камеры Вильсона в её первоначальной версии был импульсный характер работы — спустя некоторое время необходимо заново создавать атмосферу насыщенного пара и производить цикл адиабатического расширения для начала конденсации. Диффузионная разновидность камеры Вильсона (изобретена А.Лангсдорфом в 1939) лишена этого недостатка. В этой камере нижняя стенка охлаждается (часто с использованием сухого льда), так что вблизи неё условие конденсации поддерживается непрерывно, но новые молекулы конденсирующейся жидкости (обычно различные спирты) попадают в холодную область только за счёт диффузии.

В 1923 году работающий в лаборатории Резерфорда П.Л.Капица впервые поместил камеру Вильсона во внешнее магнитное поле и наблюдал искривление траекторий движения альфа-частиц. Этот метод в дальнейшем стал одним из главных методов идентификации частиц, так как радиус траектории в заданном поле определяется скоростью частиц и их удельным зарядом:

$$m \frac{V^2}{R} = qVB$$

$$R = \frac{mV}{qB}$$

С введением в практику фотографирования треков (следов частиц) камера Вильсона стала на долгое время самым главным инструментом ядерной физики (см. [5] для примеров первых фотографий треков частиц). В ней были обнаружены космические лучи, открыты позитрон [6], мюон, пи-мезон.

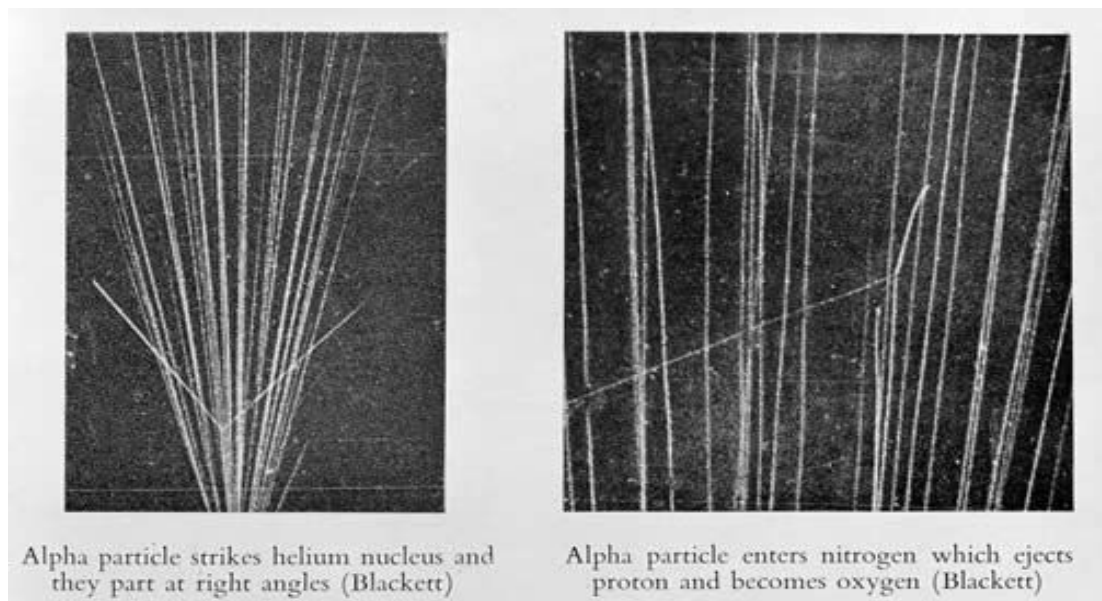


Рисунок 6: Ранние фотографии в камере Вильсона (получены Блэкеттом). Слева: рассеяние альфа-частицы на атоме гелия, угол  $90^\circ$  после столкновения свидетельствует о равенстве масс альфа частицы и атома гелия. Справа: взаимодействие альфа-частицы с ядром азота с образованием ядра кислорода и протона. С сайта [5]

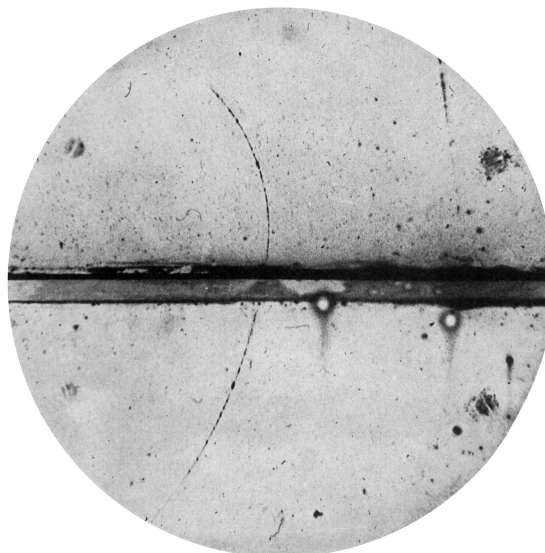


Рисунок 7: Трек первого достоверно обнаруженного позитрона в камере Вильсона (К.Андерсон). В центре кадра свинцовая пластина, большая кривизна трека в верхней части показывает, что позитрон прилетел снизу. Из [6].

**Пузырьковая камера.**

Пузырьковая камера была изобретена Дональдом Глэйзером в 1952 году, за это изобретение он был удостоен Нобелевской премии 1960 года. Принцип работы пузырьковой камеры похож на принцип работы камеры Вильсона, только вместо переохлаждённого пара используется перегретая жидкость. Заряженные частицы вызывают парообразование и по следу пузырьков можно восстановить траекторию частицы.

Пузырьковые камеры стали необходимы с ростом энергии исследуемых частиц: энергичные частицы слишком медленно теряли энергию во взаимодействии с паром в камере Вильсона, что требовало увеличения размеров камеры. Недостатком пузырьковой камеры является импульсный характер её работы. Перегрев жидкости достигается сбросом давления, после чего через некоторое время начинается обычное кипение. В качестве перегретой жидкости используются криогенные жидкости, обычно водород или неон-водородная смесь, в камере Гаргамель в ЦЕРН (рисунок 8) использовался тяжёлый фреон  $\text{CF}_3\text{Br}$  для увеличения взаимодействия с нейтрино и усиления разрешающей способности (обнаружение отличий мюона от пиона) [7].

В пузырьковых камерах было получено также много новых данных. В частности, в пузырьковой камере Гаргамель (Gargamel) (ЦЕРН, 1970-1978) были открыты слабые нейтральные токи, доказавшие существование  $Z$ -бозона. В пузырьковой камере впервые были обнаружены многие элементарные частицы, например  $\Omega^-$  (рисунок 9) [8].

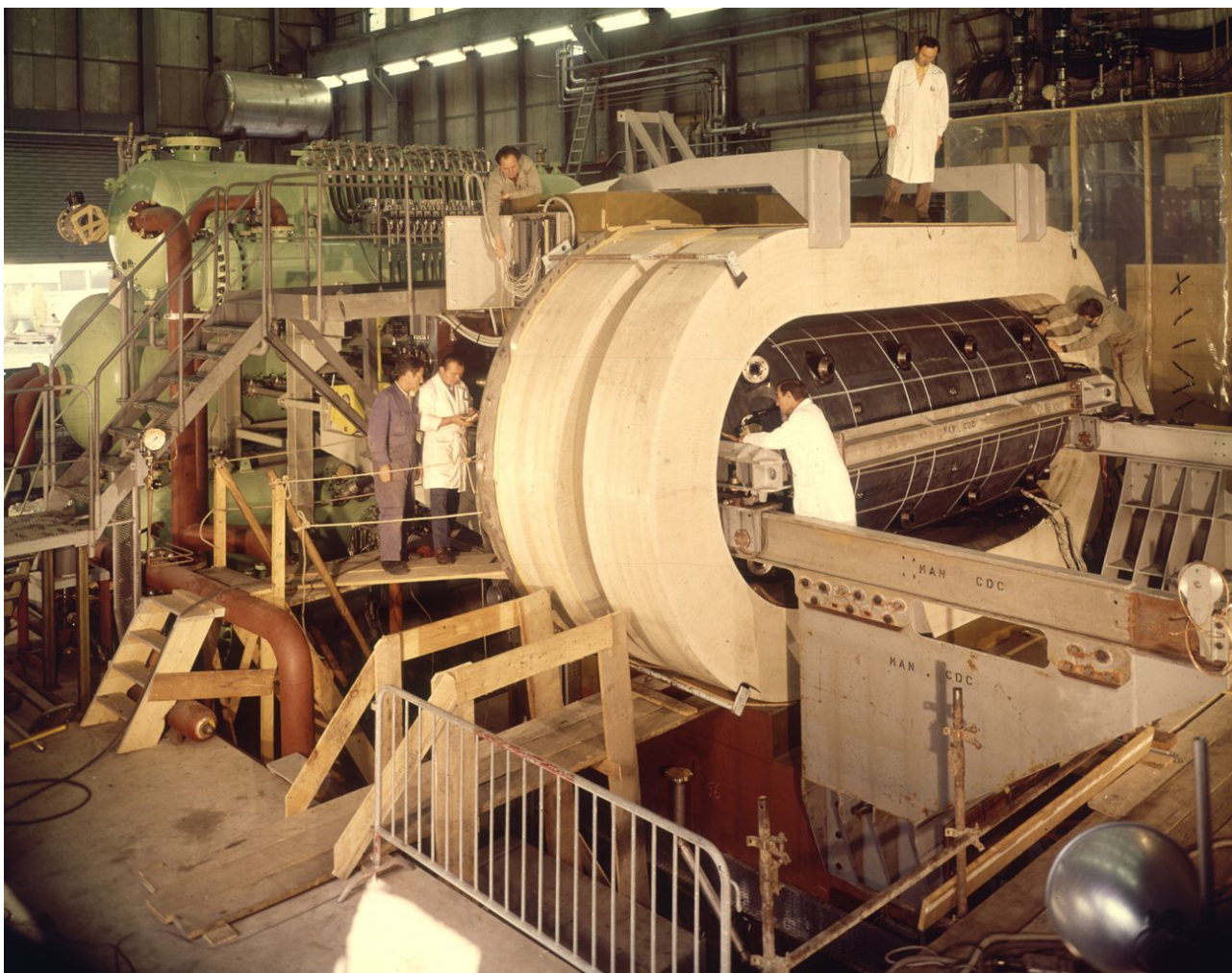


Рисунок 8: Пузырьковая камера Гаргамель (ЦЕРН). С сайта [7].

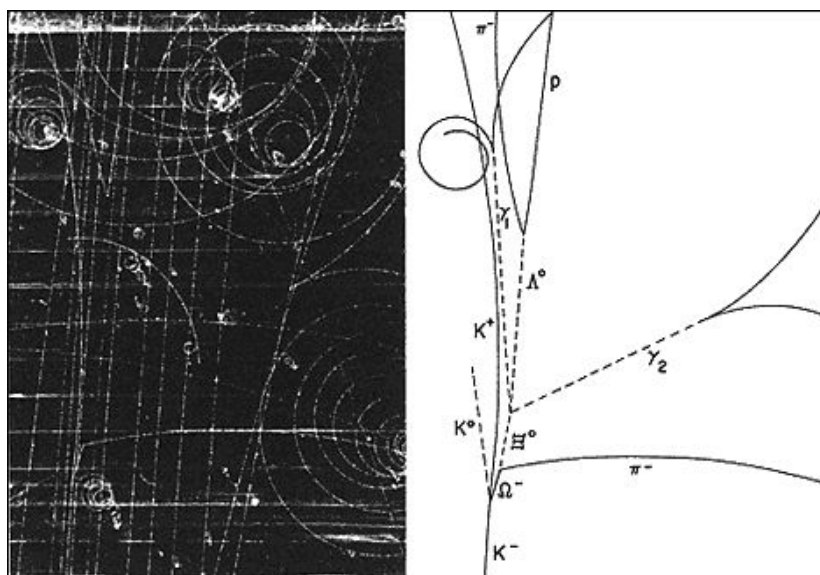


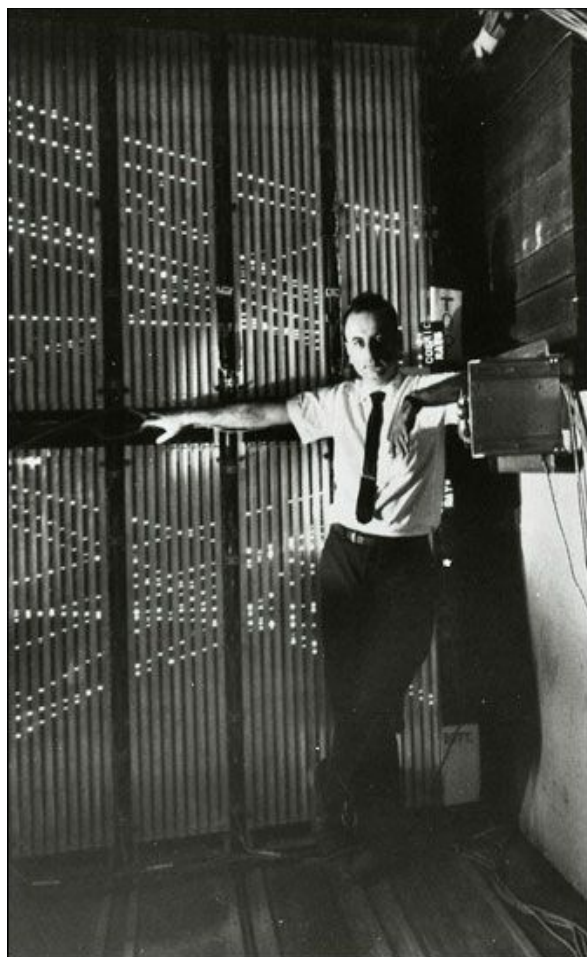
Рисунок 9: Первое изображение омега-минус мезона в пузырьковой камере. Слева: фотография, справа: расшифровка. пунктирные линии на расшифровке соответствуют невидимым трекам нейтральных частиц. С сайта [8].



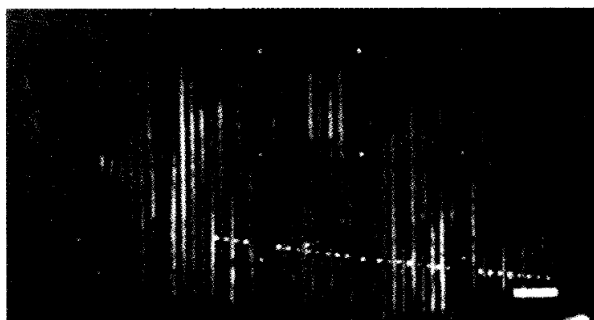
### **Искровые и многопроволочные (многопроволочные пропорциональные) камеры.**

Оба этих типа детекторов являются идеологически родственными счётчику Гейгера. В искровой камере частица пролетает через набор параллельных электродов, пространство между которыми заполнено газом (рисунок 10) [9]. К электродам прикладывается напряжение, близкое к пробойному, при ионизации газа возникает искра, которую можно зафиксировать на фотопластинке. Искровые камеры использовались с 30-х до 60-х годов. При помощи искровой камеры были зафиксированы мюонные нейтрино (Нобелевская премия 1988 года, рисунок 11).

Многопроволочная камера — это по сути дела счётчик Гейгера со множеством анодов. Определяя на какой из анодов произошёл разряд можно проследить путь частицы. Эта камера позволяет лёгкую интеграцию с электроникой и компьютерной техникой. За разработку и развитие многопроволочной камеры Георг Шарпак был удостоен Нобелевской премии 1992 года.



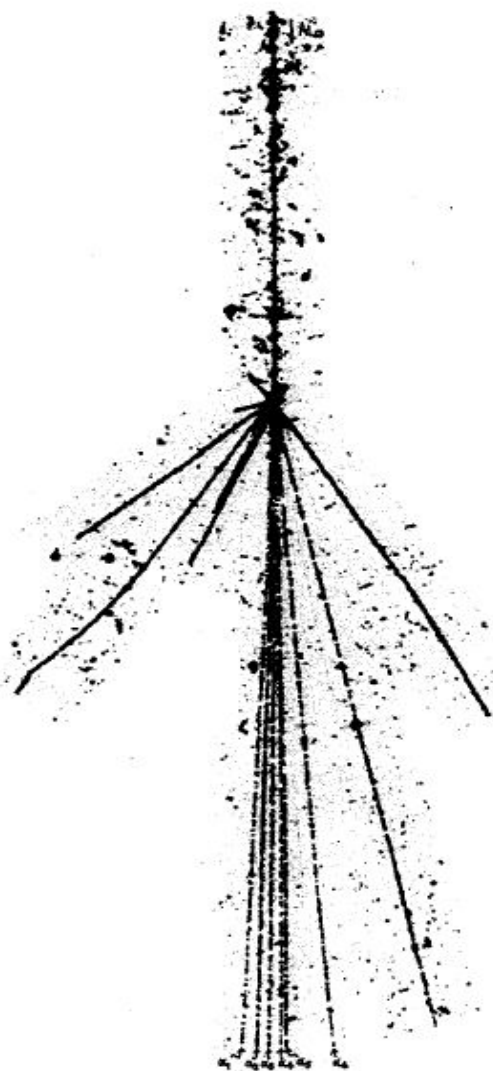
*Рисунок 10: М.Шварц на фоне модулей искровой камеры. С сайта [9].*



*Рисунок 11: Возникновение мюона в искровой камере (почти горизонтальный трек). Вертикальные полосы - пластины искровой камеры. Из Нобелевской лекции Шварца [10].*

**Метод фотографических эмульсий.**

Этот метод является развитием самого первого метода детектирования радиации — ещё в опытах Беккереля было обнаружено взаимодействие радиации с чувствительной эмульсией фотопластинки. Для детектирования трека частицы оказалось необходимо создать фотопластинки с толстыми слоями эмульсии, так чтобы при дальнейшем анализе можно было проследить пути и распады частиц. В развитие метода внесли вклад советские физики Л.В.Мысовский и А.Д.Жданов. В работах Нобелевского лауреата С.Пауэла также применялись фотоэмульсии для обнаружения и анализа частиц космического излучения (рисунки 12, 13).



*Рисунок 13: Следы последовательного распада пи-мезона в мюон и электрон. Изображение получено на фотоэмульсии. Из нобелевской лекции С.Пауэла [10].*

*Рисунок 12: Результат столкновения ядра магния или алюминия из космического излучения с ядром фотоэмульсии с образованием лёгких ядер (включая 6 альфа-частиц). Изображение получено на фотоэмульсии. Из нобелевской лекции С.Пауэла [10].*

## Детекторы нейтрино.

Детектирование нейтрино представляет сложность ввиду слабости их взаимодействия с веществом. Возможно несколько каналов взаимодействия: нейтральный и заряженный.

В нейтральном канале происходит просто «механическое» рассеяние нейтрино с частицей: нейтрино обменивается с частицей  $Z$ -бозоном и передаёт ей некоторую энергию, при этом никаких превращений частиц не происходит. Если частица-мишень лёгкая (электрон), то она может получить энергию достаточную для движения со скоростью больше скорости света в среде, что может быть обнаружено по характерному черенковскому излучению. При рассеянии нейтрино на дейтерии по нейтральному каналу может произойти распад ядра дейтерия на протон и нейтрон, образовавшиеся нейтроны могут быть зафиксированы. По нейтральному каналу могут взаимодействовать все нейтрино.

В заряженном канале происходит обмен  $W$ -бозонами, нейтрино уничтожается в процессе взаимодействия, образуется лептон и протон превращается в нейтрон или наоборот. Этот процесс может быть обнаружен либо по появлению заряженного лептона, либо по превращению одних элементов в другие. Для такого взаимодействия нейтрино должно иметь достаточную энергию (необходимо рождение соответствующего лептона), поэтому оно с разной эффективностью проявляется для электронных, мюонных и тау-нейтрино.

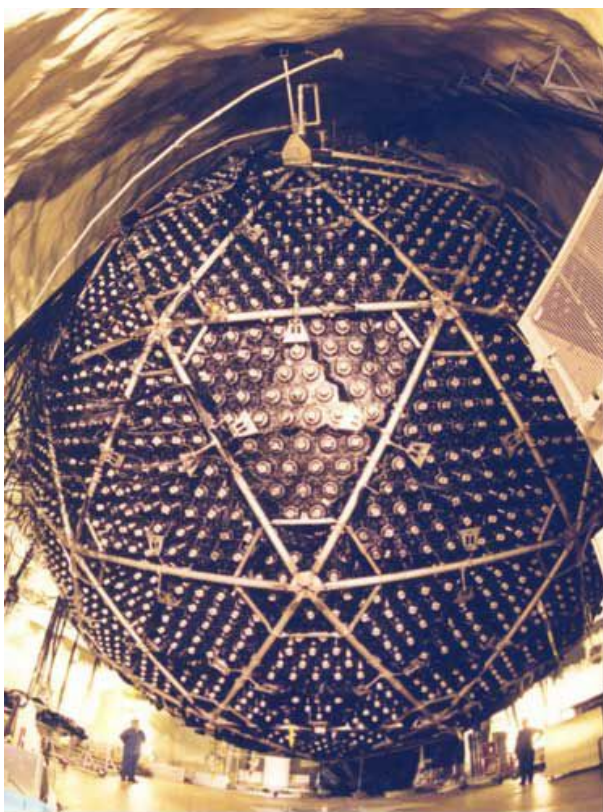


Рисунок 14: Детектор нейтрино Нейтринной обсерватории Садбэри (Канада). С сайта [11].

Для экранировки от космического излучения и других фоновых сигналов детекторы нейтрино обычно размещают в подземных шахтах.

С детекторами нейтрино исторически связана «проблема солнечных нейтрино». При первых опытах (Р.Дэвис и Дж.Бэхкалл, конец 60-х) использовалось детектирование по заряженному каналу. В качестве детектора выступала 380 м<sup>3</sup> дистиллированная вода, расположенная в шахте на глубине почти 1500 метров. Искомыми событиями было превращение нейтрона в атоме хлора в протон с образованием радиоактивного изотопа аргона, который собирался, выделялся и количество которого подсчитывалось.<sup>3</sup> Эти опыты обнаружили наличие солнечных нейтрино, однако их количество составило примерно 1/3 от ожидаемого по излучаемой Солнцем энергии. Как показали дальнейшие опыты, эта нехватка нейтрино была связана с эффектом нейтринных осцилляций — за время следования от Солнца до Земли часть электронных нейтрино превращается в мюонные и тау-нейтрино, для которых заряженный канал взаимодействия в детекторе запрещён требованием иметь достаточно энергии

3 Подробное описание этого красивого эксперимента есть в литературе. Отметим здесь, что для успешного проведения опыта необходимо было детектировать буквально образование считанных атомов аргона в нескольких тоннах хлорсодержащего детектора. Как ни удивительно, это удалось сделать!



для рождения массивного лептона (у солнечных нейтрино недостаточно энергии для этого). Проблема солнечных нейтрино была решена с введением в строй Нейтринной обсерватории в Садбэри (Канада) [11], где в качестве детектора использовался объём с 1000 тонн тяжёлой воды (рисунок 14), в котором фиксировались взаимодействия нейтрино всех типов по нейтральному каналу и дополнительно взаимодействие электронных нейтрино по заряженному каналу.

## Ускорители элементарных частиц: Виды ускорителей и история их развития.



Рисунок 15: Генератор Ван де Граафа первого венгерского линейного ускорителя, в 1952 году достигнуто напряжение 1МВ. С сайта [13].

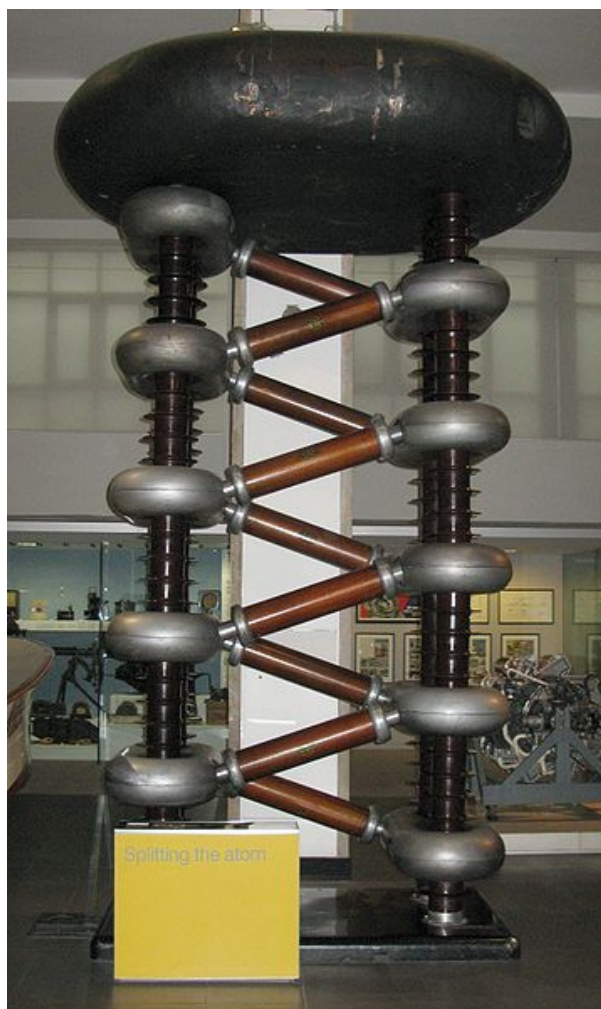


Рисунок 16: Умножитель Кокрофта-Валтона, 1937 год. С сайта [12].

Простейшим видом ускорителей являются линейные ускорители. В них частицы разгоняется по прямой под действием высоковольтного потенциала либо «сопровождающего» частицу переменного электрического поля. Высокое напряжение в компактных линейных ускорителях получалось обычно либо генератором Ван де Граафа [13], в котором поляризация диэлектрической ленты служила для накопления электрического заряда (рисунок 15), либо генератор (умножитель) Кокрофта-Валтона [12], состоящий из каскадов конденсаторов и диодов (рисунки 16, 18). Эти генераторы позволяли получить высокое напряжение в



несколько мегавольт. В современных ускорителях эти простые ускорители используются как «первый каскад» для начального ускорения частиц (например, [14], рисунок 18)

Дальнейшее увеличение напряжения (и, соответственно, энергии ускоряемых частиц) ограничено техническими сложностями, связанными с пробоем высокого напряжения. В линейных ускорителях на большие энергии разгоняющее напряжение создаётся набором электродов, на которые подаётся переменное напряжение с подобранными амплитудами, частотами и фазами, обеспечивающими «сопровождение» частицы электрическим полем во время её движения ([15], см. схему на рисунке 17). Общим преимуществом линейных ускорителей является возможность ускорения тяжёлых частиц (в циклотронах и других ускорителях с движением по кругу радиус кривизны зависит от магнитного поля и массы частицы:  $R = \frac{mV}{qB}$  (для нерелятивистской частицы), таким образом для более тяжёлой частицы для достижения той же скорости потребуются большее магнитное поле), непрерывный режим работы, отсутствие синхротронного излучения.

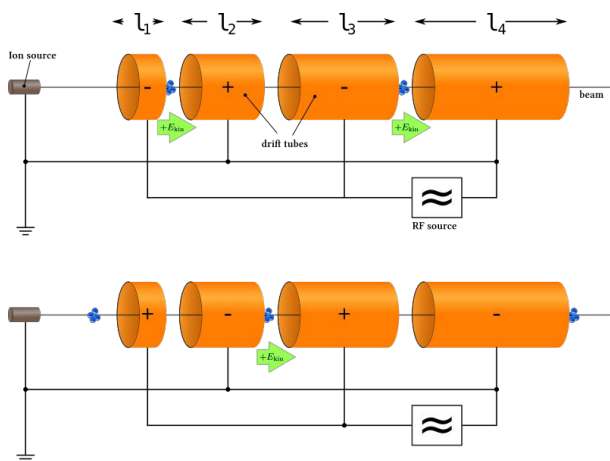


Рисунок 17: Схема линейного ускорителя с многосекционными электродами. С сайта [15].



Рисунок 18: Протонный ускоритель Кокрофта-Валтона на 750 кэВ, являющийся первой ступенью ускорительного комплекса лаборатории Фермилаб (США). С сайта [14].

Первые линейные ускорители были созданы Кокрофтом и Валтоном в лаборатории Резерфорда в начале 1930-х (Нобелевская премия по физике 1951 года). В простейшей версии с постоянной разностью потенциалов (фактически, модификации рентгеновской трубки) были достигнуты энергии протонов в 300 кВ, в последующих версиях с многосекционными электродами — 700 кВ.

Линейные ускорители электронов с энергией 5-20 МэВ используются в медицинских приложениях для радиационной терапии опухолей (используется либо сам пучок электронов, либо производимое при его попадании в мишень жёсткое рентгеновское излучение) [16]. Аналогичные ускорители используются как мощные рентгеновские источники в дефектоскопии. Линейные ускорители являются первой стадией различных циклических ускорителей, сообщая заряженным частицам начальную скорость. Рекордсменом среди линейных ускорителей является Стэнфордский линейный ускоритель длиной 3.2 км (самое прямое здание в мире), способный ускорять протоны и электроны до энергии 50 ГэВ [17].



*Рисунок 19: Вид с воздуха на комплекс зданий Стэнфордского линейного ускорителя. Детекторный комплекс справа. Сам канал ускорителя находится на глубине 10 метров под землёй. С сайта [17].*

Для получения больших энергий частиц в относительно компактных ускорителях траекторию частицы искривляют магнитным полем. Частица начинает двигаться по окружности, а её энергия (и скорость) увеличиваются за счёт колеблющегося в фазе с движением частицы переменного электромагнитного поля. Отметим, что с проявлением взаимодействия движущейся частицы и электромагнитного поля мы сталкиваемся почти ежедневно на своей кухне — в микроволновой печи СВЧ излучение создаётся в специальном приборе — магнетроне, в котором энергия движущихся электронов превращается в энергию колебаний электромагнитного поля, что, очевидно, является «ускорителем наоборот».

Первым из циклических ускорителей был циклотрон [18], изобретённый в 1929 году Э.Лоуренсом (Нобелевская премия по физике 1939 года). Схема циклотрона и один из первых «настольных» циклотронов показаны на рисунках 20, 21.

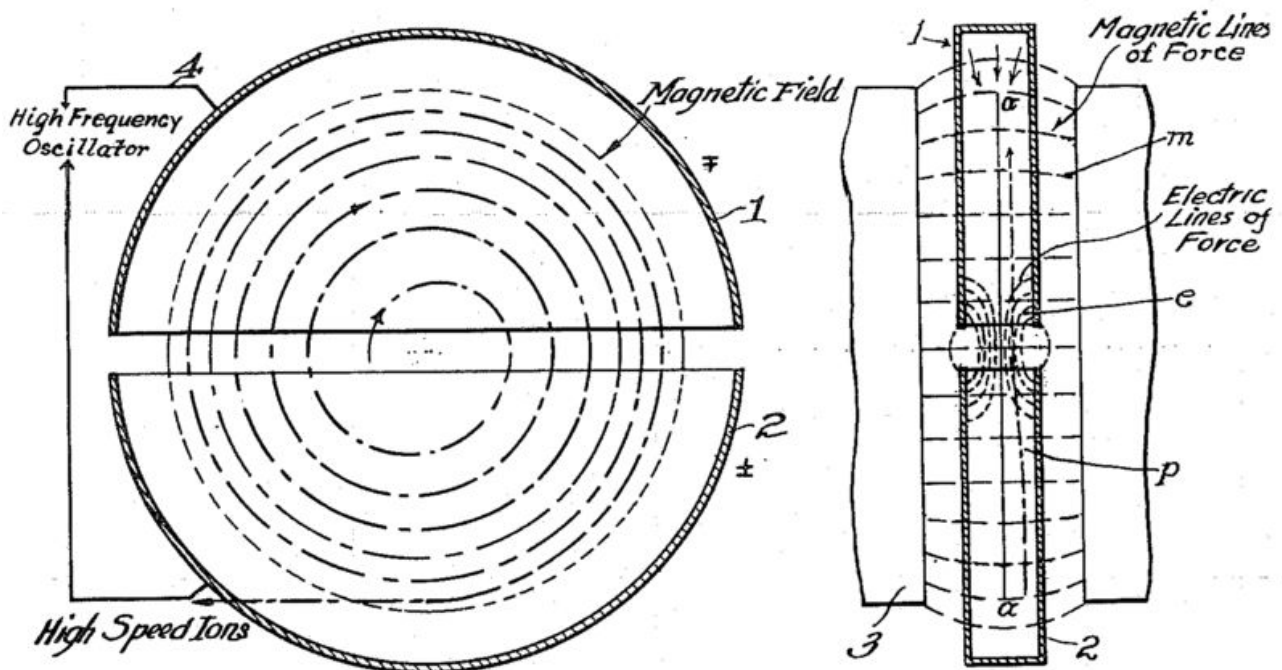


Рисунок 20: Схема циклотрона из патентной заявки Лоуренса, 1934 год. С сайта [18].

В циклотроне частицы движутся в постоянном поле между полюсами магнита внутри двух электродов в форме латинской буквы “D”.<sup>1</sup> На электроды подаётся переменное напряжение, частота которого подобрана так, что при пролёте частиц в зазоре между электродами электрическое поле ускоряет частицы. В нерелятивистском случае частота обращения

частицы в магнитном поле  $f = \frac{1}{T} = \frac{V}{2\pi R} = \frac{V}{2\pi \frac{mV}{qB}} = \frac{qB}{2\pi m}$  определяется только внешним

полем и удельным зарядом частицы (составляет для электронов 28 ГГц в поле 1Т). При совпадении частоты переменного напряжения с этой (циклотронной) частотой будет происходить разгон пакета частиц, проходящего зазор электродов в то время, когда электрическое поле направлено в «ускоряющем» направлении. Достоинством циклотрона является отсутствие необходимости создавать большое напряжение — в циклотроне энергия добавляется маленькими порциями на каждом обороте. Недостатком является увеличение радиуса траектории с ростом скорости, ограничивающее размерами циклотрона максимальную энергию, а также релятивистские эффекты, из-за которых на релятивистских скоростях циклотронная частота начинает зависеть от скорости частицы. Для учёта этих факторов схему циклотрона модернизируют, подстраивая частоту для компенсации релятивистских эффектов (синхроциклотрон) либо создавая неоднородное (увеличивающееся с радиусом) магнитное поле (изохронный циклотрон).

<sup>1</sup> Другим способом представить себе форму электродов является разрезанная пополам тонкая консервная банка. Получается два электрода, электроны движутся внутри этой «банки», а при пролёте в зазоре между электродами подвергаются действию электрического поля электродов.

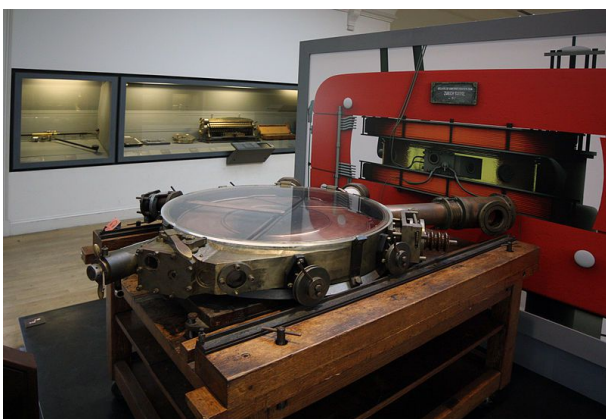


Рисунок 21: Циклотрон, построенный в 1937 году. С сайта [18].



Рисунок 22: Экспериментальный зал циклотрона Триумф (Ванкувер, Канада). Циклотрон на заднем плане скрыт под бетонными блоками толщиной около 5 метров. С сайта [19].

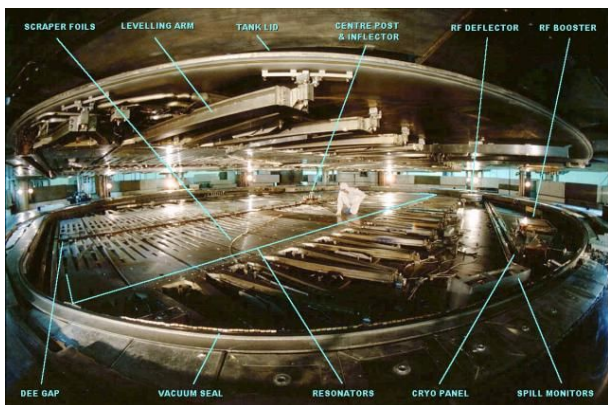


Рисунок 23: Вакуумная полость циклотрона Триумф во время регламентных работ. С сайта [19].

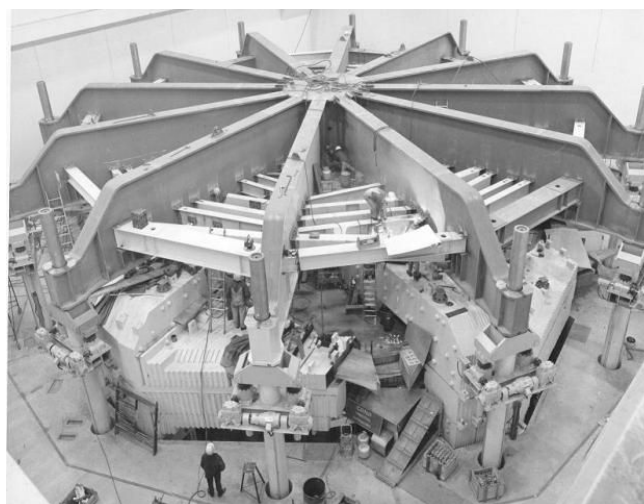


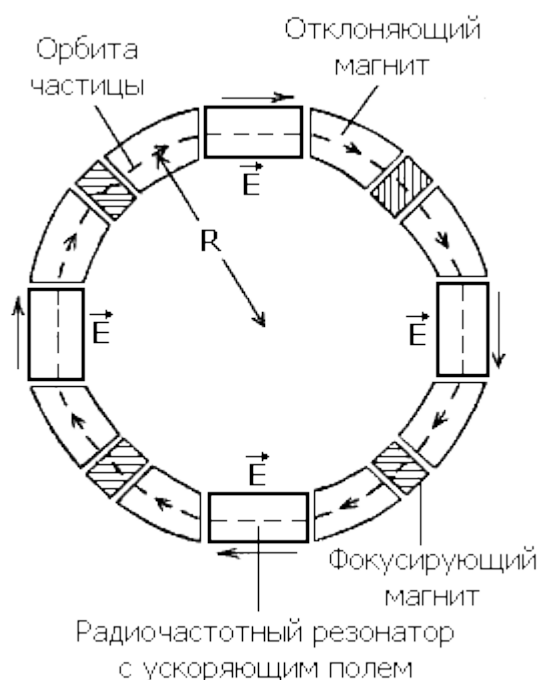
Рисунок 24: Циклотрон Триумф после окончания монтажных работ. С сайта [19].



Первая пробная модель циклотрона, созданная Лоуренсом ускоряла протоны до энергии 80 кэВ, её можно было поднять руками, она имела диаметр около 10 см. С ростом энергии циклотроны также росли в размерах. В современных циклотронах протоны ускоряются до энергии около 500 МэВ. Крупнейший в мире циклотрон находится в канадской лаборатории Триумф (TRIUMF, Ванкувер, Канада) [19] (рисунки 22, 23, 24). Название лаборатории является сокращением от TRI-University Meson Facility (мезонный комплекс трёх университетов), лаборатория была основана совместно тремя канадскими университетами (Университетом Симона Фразера, Университетом Британской Колумбии и Университетом Виктории) в 1968 году. В дальнейшем лаборатория выделилась в независимую Национальную лабораторию. Диаметр главного магнита этого циклотрона составляет 18 метров, вес магнита 4000 тонн, поле в азоре 0.46 Т. Протоны (точнее, отрицательные ионы водорода  $H^-$  ускоряются до энергии 500 МэВ при помощи осциллирующего на частоте 23 МГц электрического поля с напряжением «всего» 94 кВ.

Следующим этапом развития ускорительной техники стали синхротроны и синхрофазотроны [20], [21]. Большинство современных ускорителей работают по этому принципу (в том числе и Большой адронный коллайдер). Принцип работы синхротрона был впервые сформулирован советским физиком В.Векслером в 1944 году и независимо от него американцем Э.Макмиланом в 1945 году. Макмилан является Нобелевским лауреатом по химии 1951 года за открытие и исследование трансурановых элементов). Первый электронный синхротрон построен Макмиланом.

В синхротроне частицы движутся по орбите фиксированного радиуса, поочерёдно проходя через микроволновые резонаторы, в которых они ускоряются за счёт взаимодействия с электромагнитным полем, отклоняющие магниты, обеспечивающие движение по заданной траектории, и фокусирующие магниты («магнитные линзы»), компенсирующие расхождение пучка. Начальная энергия частицам сообщается в ускорителе-инжекторе (обычно линейный ускоритель или циклотрон). Для поддержания постоянной траектории по мере роста энергии



частиц синхронно увеличивается магнитное поле отклоняющих магнитов, корректируется частота и фаза ускоряющих напряжений. Из-за этого синхронного изменения ускоритель и получил название синхротрон.

В отличие от циклотрона или бетатрона, синхротрон не привязан к размерам одного магнита: отклоняющие магниты (часто сверхпроводящие) могут быть достаточно компактны и располагаться вдоль кольца синхротрона, которое может достигать внушительных размеров (длина кольца Большого адронного коллайдера около 27 километров).

Рисунок 25: Схема синхротрона. С сайта [20].



Рисунок 26: Зал Австралийского синхротрона. С сайта [21].

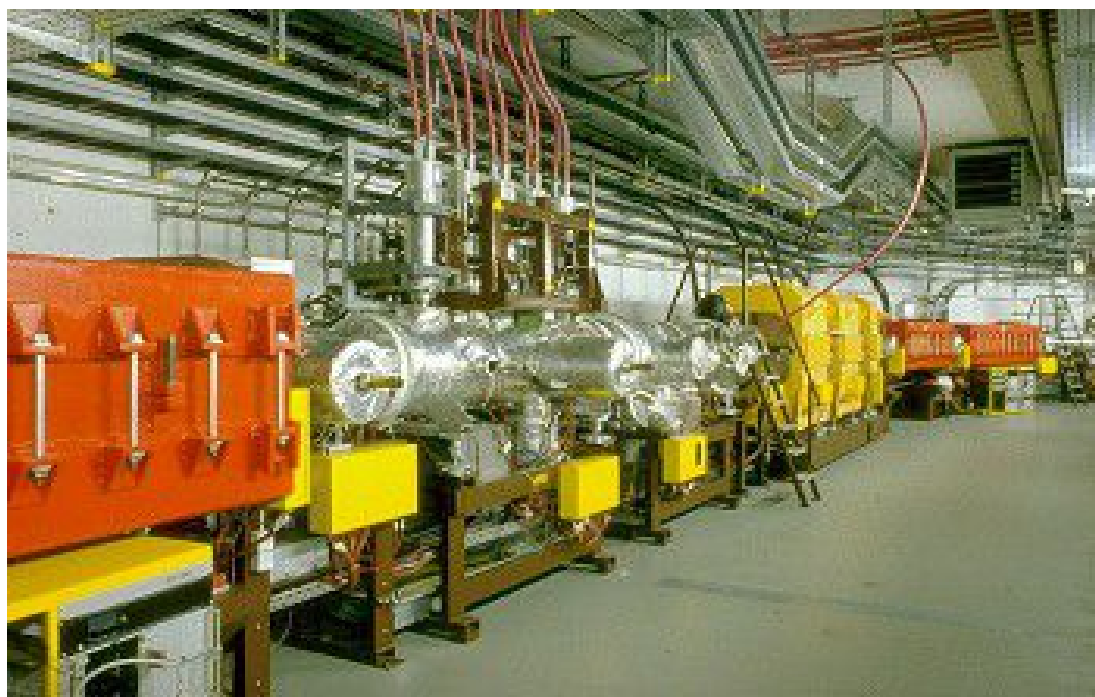


Рисунок 27: Фрагмент ускорительного кольца протонного синхротрона БАК на 7 ТэВ (ЦЕРН). С сайта [20].



Рисунок 28: Ускорительные кольца лаборатории Фермилаб (США). С сайта [22].

Синхротроны внесли большой вклад в открытие новых частиц и трансурановых элементов. Максимальная энергия достигнутая в электронных синхротронах составляет около 100 ГэВ

(ограничивается синхротронным излучением, интенсивность которого  $P \propto \frac{1}{R^2} \left( \frac{E}{mc^2} \right)^2$  растёт с ростом энергии частиц), в протонном синхротроне Большого адронного коллайдера достигнута энергия 7 ТэВ.

Для исследования столкновения частиц ускоренные синхротроном частицы либо направляют на неподвижную мишень, либо используют два синхротрона, обеспечивая пересечение их пучков (например, в лаборатории Фермилаб в США [22], см. рисунок 28). Отметим, что так как направление силы Лоренца для частиц и античастиц отличается, то для столкновения частиц и античастиц можно обойтись одним синхротроном, запустив пучки частиц и античастиц в противоположных направлениях.



## Ускорители ЦЕРН.

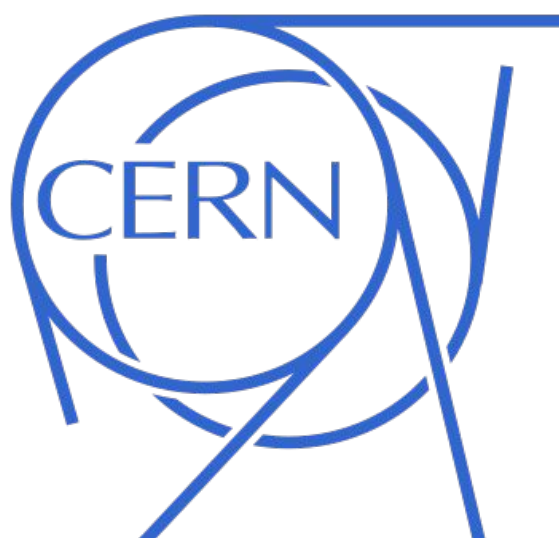


Рисунок 29: Логотип ЦЕРН. С сайта [23]

миллиарда долларов США.

ЦЕРН (CERN, от французского названия организации-предшественника *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) является крупнейшим международным центром в области ядерных исследований [23], [24]. ЦЕРН находится на границе Франции и Швейцарии неподалёку от Женевы. Интересно отметить, что ускорительные кольца ЦЕРН пересекают границу Франции и Швейцарии (рисунок 31).

ЦЕРН был основан в 1954 году, в настоящее время в программу ЦЕРН вовлечено 20 стран-участниц из Европы. Россия имеет статус страны-наблюдательницы. В ЦЕРН постоянно работает около 2400 сотрудников и около 10000 учёных из разных стран посещают его ежегодно. Годовой бюджет ЦЕРН составляет около 1

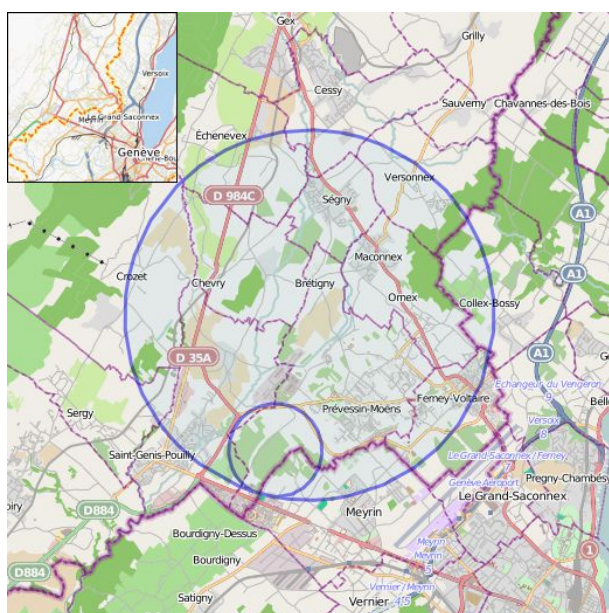


Рисунок 31: Расположение колец Большого адронного коллайдера (большой круг) и Суперпротонного синхротрона (маленький) ЦЕРН. С сайта [23].

Помимо огромного вклада в физику элементарных частиц, ЦЕРН внёс вклад и в развитие компьютерных технологий. Большие объёмы данных, получаемых в ЦЕРН и необходимость сделать их доступными для коллег, работающих во всех странах мира привели к рождению и развитию всемирной сети Интернет (рисунок 30).



Рисунок 30: Мемориальная табличка "Здесь родился Интернет" в ЦЕРН. С сайта [23].



## CERN Accelerator Complex

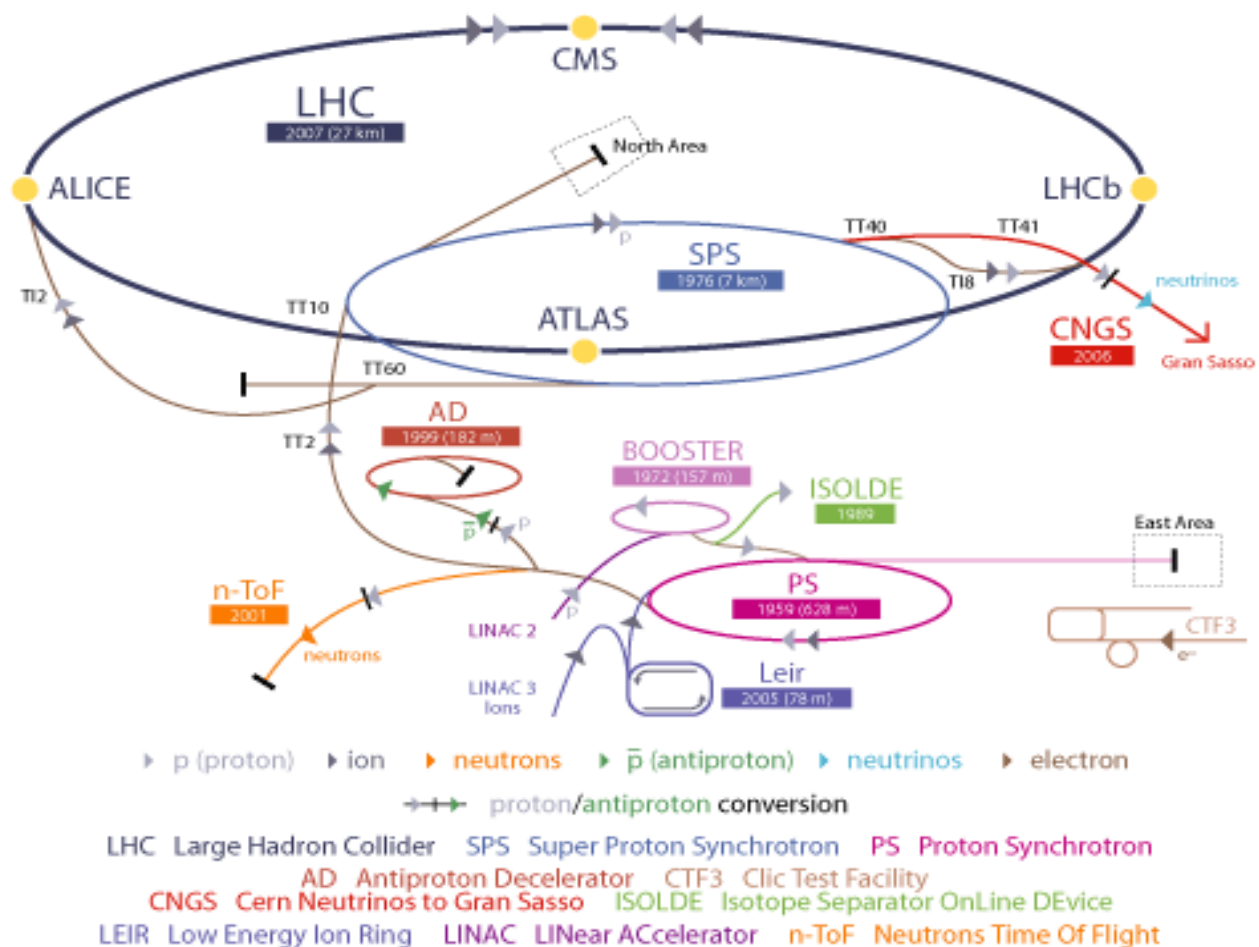


Рисунок 32: Схема современного ускорительного комплекса ЦЕРН. С сайта [25].

В данный момент в ЦЕРН работает несколько ускорителей [25] (рисунок 32):

- Протонный синхротрон (PS). Запущен в 1959 году, длина кольца 628 метров, 277 резистивных электромагнитов, энергия протонов 20 ГэВ. Этот синхротрон также использовался для ускорения альфа-частиц, ядер кислорода и серы, электронов, позитронов и антипротонов. Синхротрон PS в течение короткого времени после запуска был самым мощным в мире. В настоящее время он в основном используется как предварительная стадия разгона частиц для более крупного ускорителя SPS.
- Суперпротонный синхротрон (SPS). Это представитель следующего поколения синхротронов, длина его кольца почти 6 километров, вдоль кольца установлено 1317 резистивных магнитов для контроля пучка. Протоны ускоряются до энергии 450 ГэВ. Ускоритель также использовался и для ускорения других частиц: ядер серы и кислорода, электронов и позитронов, антипротонов. На ускорителе SPS в режиме встречных пучков протонов и антипротонов были в 1983 году получены подтверждения существования W и Z бозонов (Нобелевская премия Руббиа и Ван дер Меера 1984 года). В настоящее время SPS используется как предварительный ускоритель для Большого адронного коллайдера, а также в нейтринных экспериментах

для получения пучка нейтрино, направленного в итальянскую обсерваторию Гран-Сассо в 730 километрах от ЦЕРН.

- Большой адронный коллайдер (БАК, LHC) [26][27] это самый мощный из ускорителей в мире . Туннель БАК находится на глубине 50-150 метров, имеет длину около 27 километров, так что для обслуживания комплекса техникам приходится перемещаться по туннелю на велосипедах (рисунки 33, 34). Пучок контролируется 1232 сверхпроводящими магнитами. Ускоритель выдал первый пучок в 2008 году и на данный момент продолжают работы по достижению проектной мощности: ускорение протонов до энергии 7 ТэВ и ускорение ядер свинца до энергии 574 ТэВ. В 2010-11 году достигнут уровень энергии 3.5 ТэВ, в 2015 была достигнута энергия пучка 6.5 ТэВ.
- Кроме этого в комплекс ускорителей ЦЕРН входит замедлитель антипротонов (AD – The Antiproton Decelerator) [28], который связан с опытами по получению и удержанию антивещества (в 2011 году преодолена отметка в 1000 секунд удержания нейтральных атомов антиводорода, см. также стр. 36).

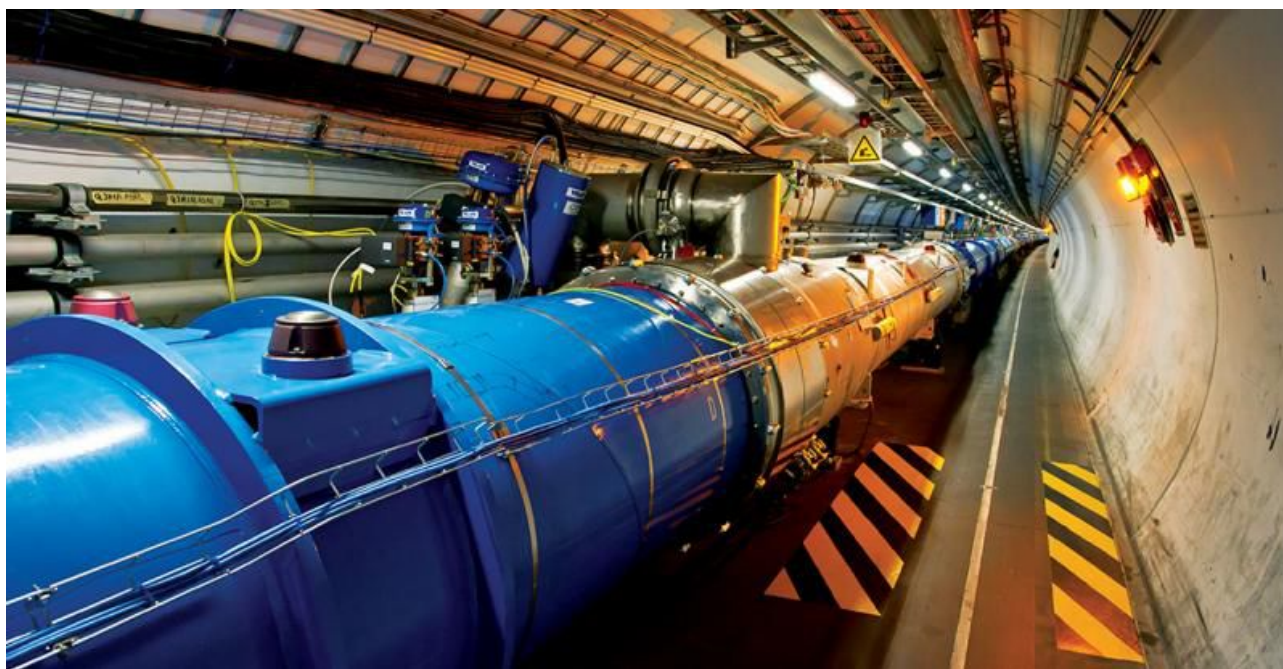


Рисунок 33: Туннель Большого адронного коллайдера. С сайта [26].

В качестве примера сложности современных детекторных установок в ядерной физике рассмотрим один из детекторов БАК: ALICE (A Large Ion Collider Experiment) [29][30]. В этом эксперименте в столкновении ядер свинца планируется достичь условий, сравнимых с условиями сразу после Большого Взрыва, и возможно наблюдать формирование кварк-глюонной плазмы (состояния, когда нуклоны «плавятся») (рисунок 35).



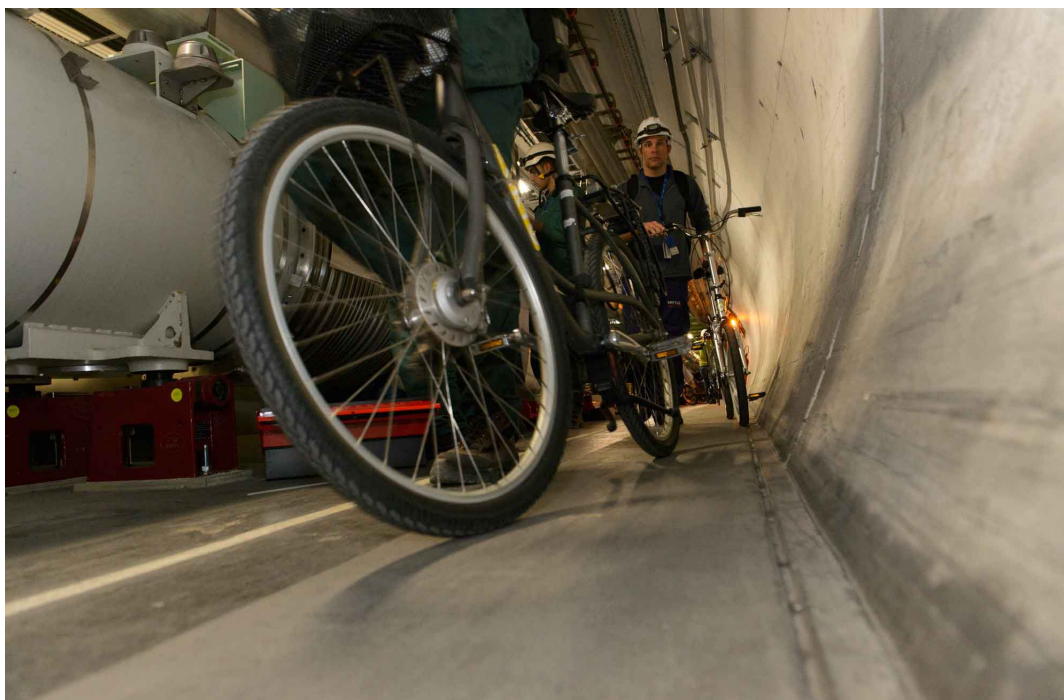


Рисунок 34: Передвижение техников по каналу Большого адронного коллайдера. С сайта [26].

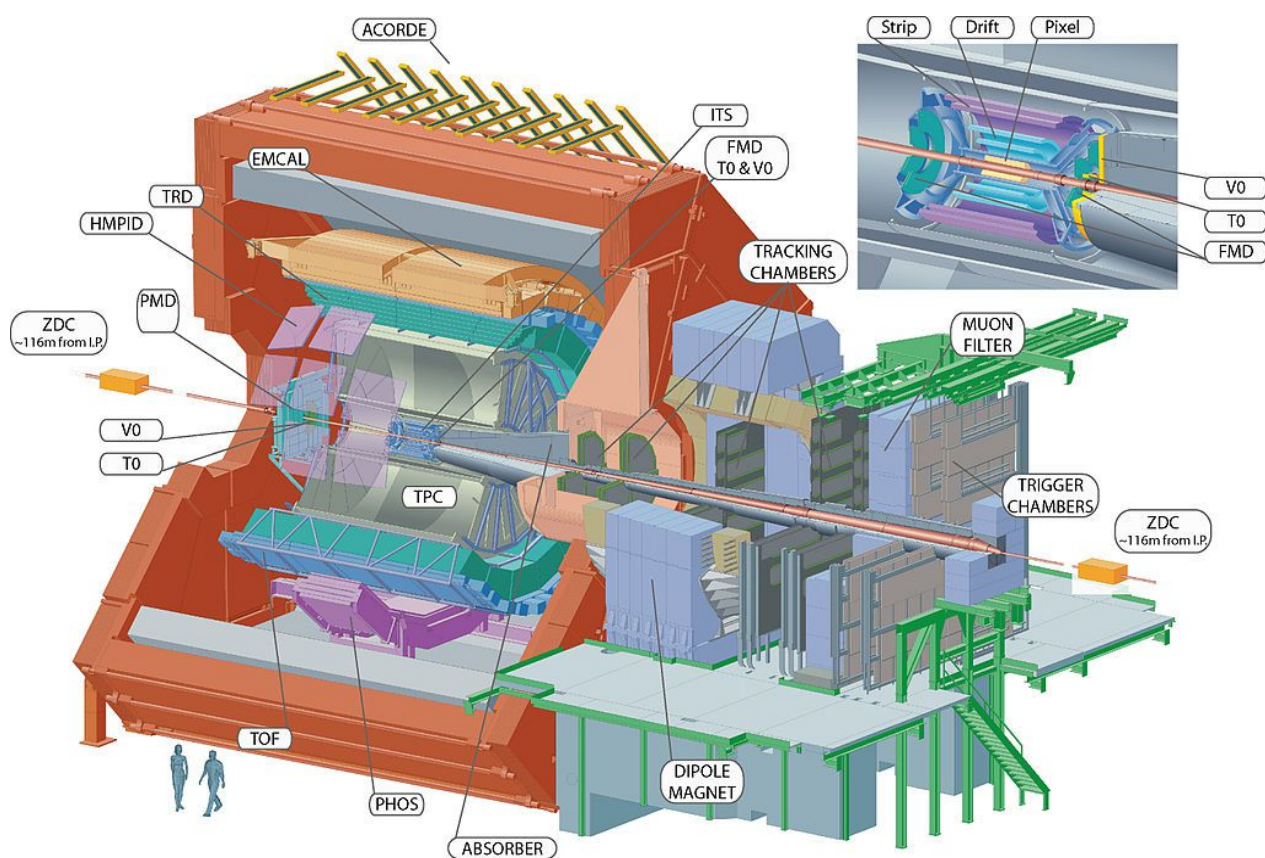


Рисунок 35: Схема детектора эксперимента ALICE. Вес детектора 10000 тонн, длина 26 метров, диаметр 16 метров. С сайта [30]

## Элементарные частицы.

### История открытия элементарных частиц.

Рассмотрим историю открытия различных элементарных частиц (список неполон):

- 1897 год. Дж.Дж.Томсон открыл электрон, первую субатомную частицу. Дж.Дж.Томсон изучал катодные лучи (рисунки 36, 37) [31], [32], [33]. Томсон установил, что эти «лучи» состоят из частиц и измерил заряд и массу этих частиц, установив, что их масса менее одной тысячной массы самого лёгкого элемента — водорода. Дж.Дж.Томсон является Нобелевским лауреатом 1906 года, открытие электрона является частью нобелевских результатов (премия вручена «в признание большого значения его теоретических и экспериментальных исследований электропроводности газов»)

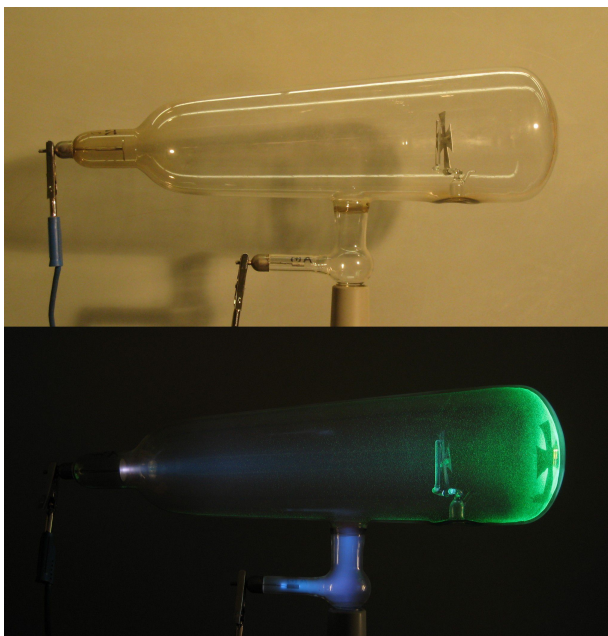


Рисунок 36: Демонстрация "катодных лучей". Сверху: неподключенная трубка Крукса. Снизу: разряд в трубке Крукса. В трубке Крукса создается разряд в разреженном газе между катодом (слева) и анодом (в центре внизу). При этом катод испускает "лучи" (электроны), которые создают засветку на фосфоресцирующем торце трубки (справа). Дополнительный электрод в форме мальтийского креста (обычно в этой демонстрации с потенциалом катода) отбрасывает "тень" на экран. С сайта [33].



Рисунок 37 Трубка, в которой Дж.Дж.Томсон провёл опыты, приведшие к открытию электрона. Катод располагается в левом (дальнем по рисунку) конце трубки, в средней части видна пара отклоняющих электродов, по действию которых было определено наличие заряда у электрона. С сайта музей Кавендишской лаборатории [32].

- 1919 год. Э.Резерфорд показал, что протоны (ядра водорода) содержатся в ядрах других элементов. В этих опытах Резерфорд пропускал альфа-частицы через азот и

обнаруживал возникновение энергичных частиц, эквивалентных ядру водорода. Как показали поздние исследования Блэкетта [34] (1924) (рисунок 38), при этом происходила реакция синтеза  ${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^{17}_8\text{O}$



Рисунок 38: Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Из работы Блэкетта [34]. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке.

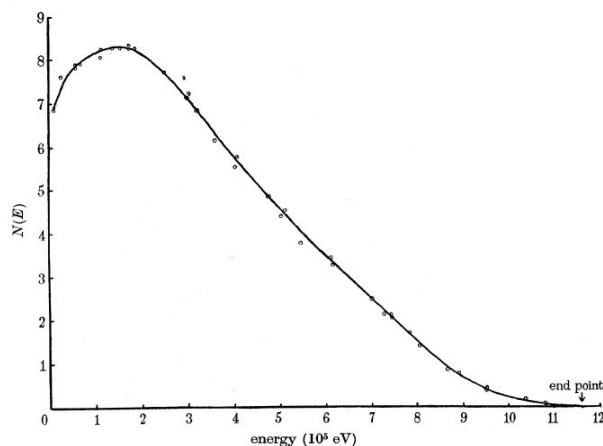


Рисунок 39: Энергетический спектр электронов при бета-распаде висмута-210. Из статьи [35].

- 1927 год. П.Дирак предсказал существование позитрона. В уравнении Дирака, объединяющем квантовую механику с теорией относительности, обнаружилось существование двух решений: одного, соответствующего обычному электрону, и второго, соответствующего частице с той же массой, но с отрицательной энергией. Эти частицы с отрицательной энергией в электромагнитном поле должны были двигаться как если бы у них был положительный заряд. П.Дирак является нобелевским лауреатом 1933 года «за открытие новых продуктивных форм представления квантовой теории», одним из следствий этого открытия было предсказание позитрона.
- 1931 год. В.Паули предсказал существование нейтрино. Данное предсказание связано с явлением бета-распада и с непрерывным спектром образующихся при бета-распаде электронов (рисунок 39). Если бы процесс был двухчастичным, то законы сохранения энергии и импульса однозначно определяли бы энергию вылетающего электрона. Паули предположил, что непрерывность спектра бета-частиц связана с присутствием третьей очень лёгкой нейтральной частицы. В.Паули является нобелевским лауреатом 1945 года, но эта премия связана с другим его открытием — принципом Паули.
- 1932 год. Д.Чедвик открыл нейтрон. Первые нейтроны были получены бомбардировкой энергичными альфа-частицами мишеней из лёгких элементов (бериллия) (рисунок 41). Д.Чедвик за своё открытие получил Нобелевскую премию 1934 года.
- 1932 год. К.Андерсон обнаружил в космических лучах позитроны — предсказанные



Дираком частицы с массой, равной массе электрона, и положительным зарядом (Рисунок 40) [6]. Интересно заметить, что первым наблюдал космические лучи в камере Вильсона советский физик Д.В.Скобельцын в 1927. Следы «неправильных» электронных треков обнаруживались в опытах Скобельцына (СССР), Чао (Калтех, США), Жолио-Кюри (Франция), но эти исследования не придали значения своим наблюдениям, считая их либо ошибкой эксперимента (например, перевёрнутой фотопластинкой), либо следом протона. К.Андерсон за открытие позитрона был удостоен Нобелевской премии 1936 года.

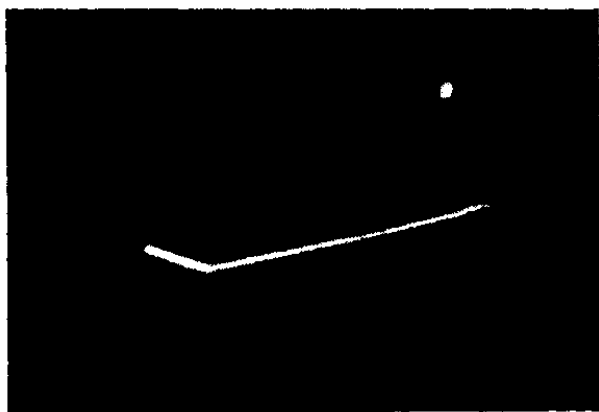


Рисунок 41: Трэки частиц, образовавшихся при расщеплении азота нейтроном ( ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + {}^4_2\text{He}$ ). Трэк нейтрального нейтрона не виден. Из нобелевской лекции Чедвика [10].

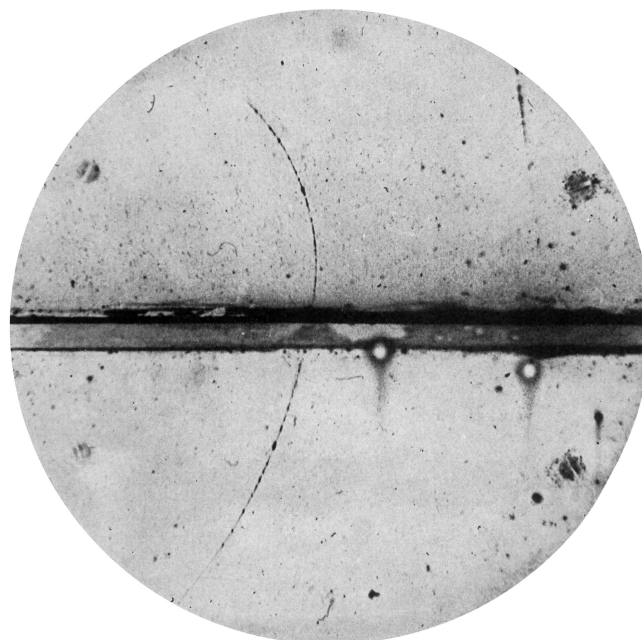


Рисунок 40: Трэк первого достоверно обнаруженного позитрона в камере Вильсона (К.Андерсон). В центре кадра свинцовая пластина толщиной 6мм, большая кривизна трека в верхней части показывает, что позитрон прилетел снизу. Энергия позитрона до прохождения пластины (по кривизне трека в магнитном поле) 63 МэВ, после прохождения пластины 23МэВ. Из работы [6].

- 1935 год. Х.Юкава предсказал существование частиц-переносчиков сильного взаимодействия: пионов (или пи-мезонов). За это предсказание, подтверждённое позднее экспериментально, и за осознание роли таких частиц во внутриядерных взаимодействиях, Х.Юкава стал лауреатом Нобелевской премии 1949 года.
- 1936-37 год. В опытах К.Андерсона и С.Нидермайера, и, независимо, Д.Стрита и Е.Стивенсона, в космических лучах были обнаружены мюоны: частицы с отрицательным зарядом и массой примерно в 200 раз больше массой электрона (106 МэВ). Первое время эта частица считалась предсказанным Юкавой мезоном, однако дальнейшие исследования показали, что в сильном взаимодействии она не участвует.
- 1947 год. Группа под руководством С.Поуелла обнаруживает в потоках космических частиц другую частицу промежуточной массы: заряженный пи-мезон (масса покоя около 140 МэВ). Эта частица оказалась предсказанным Юкавой переносчиком

сильного взаимодействия. С.Поуэл стал лауреатом Нобелевской премии в 1950 году «за развитие фотографического метода исследования ядерных процессов и за открытие мезонов при помощи этого метода».

- 1947 год. К.Батлер и Д.Рочестер обнаруживают в космическом излучении каоны (K-мезоны, масса покоя около 500 МэВ) и гипероны ( $\Lambda$ -гипероны, масса покоя более 1000 МэВ).
- 1955 год. На ускорителе протонов в Беркли открыт антипротон (Э.Сегре и О.Чемберлен, Нобелевская премия 1959). Антипротоны были получены при бомбардировке медной мишени протонами с энергией 6.3 ГэВ. Антипротоны также обнаруживают и в космических лучах.
- 1956 год. К.Кован и Ф.Рейнз обнаруживают электронное нейтрино (Ф.Рейнз стал лауреатом Нобелевской премии 1995 года). Кован и Райнз использовали в качестве источников нейтрино ядерный реактор (нейтрино образуются при бета распадах продуктов деления), поток нейтрино оценивался как  $5 \cdot 10^{13} 1/(см^2 \cdot сек)$ . (Первоначально планировалось проведение опыта по поиску нейтрино во время ядерного взрыва.) В качестве детектора нейтрино использовалось около 200 литров воды. Ожидаемым событием было взаимодействие электронного антинейтрино с протоном:  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ , образующийся позитрон аннигилирует с электроном с образованием двух гамма-квантов, детектируемых по вспышкам на сцинтиляторе. Для дополнительной надёжности в воде растворялась соль кадмия-108, который при захвате нейтрона образует изомерное состояние кадмий-109m, который с периодом полураспада около 10 мксек испускает гамма-квант. Таким образом, при взаимодействии антинейтрино с протоном должно было наблюдаться две вспышки с интервалом в несколько микросекунд. Для защиты от космического фона, установка была расположена в 12 метрах под землёй (11 метров от реактора). Эксперимент фиксировал около 3 нейтрино в час. Для того, чтобы подтвердить их связь с реактором, реактор был остановлен для измерения контрольного уровня сигнала.

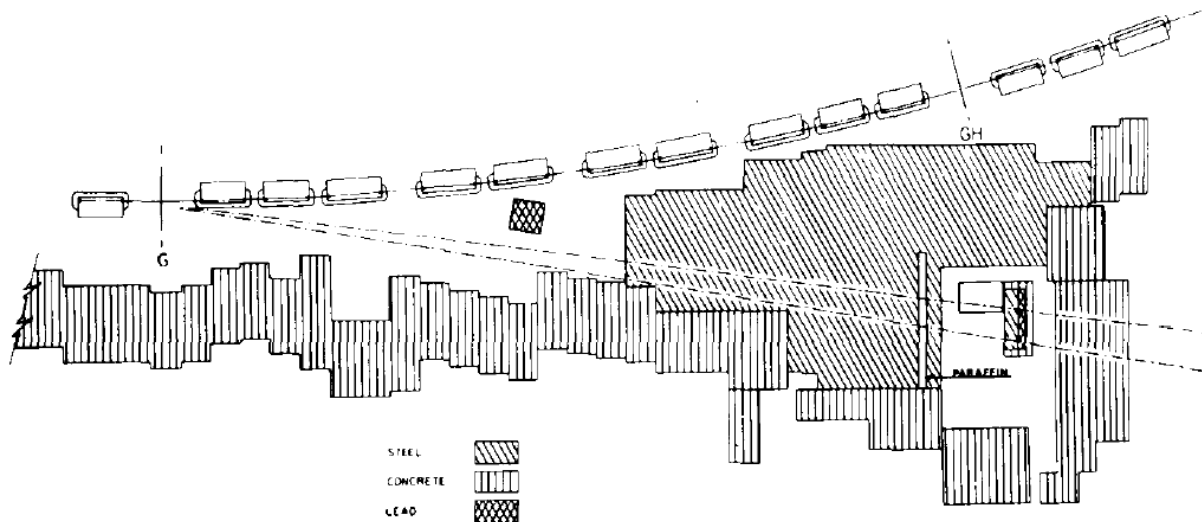
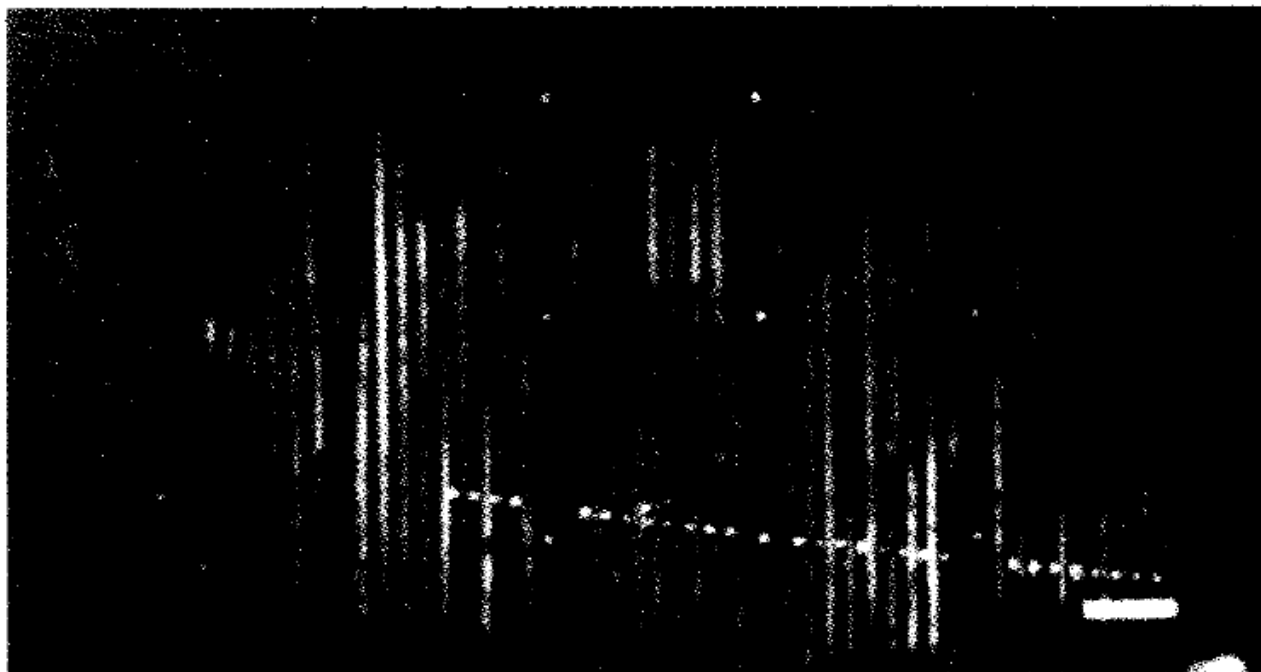


Рисунок 42: Схема опыта Ледермана, Шварца и Стейнберга по обнаружению мюонного нейтрино. Наклонная штриховка — стальные экраны, вертикальная штриховка — бетон, двойная штриховка — свинец. Пунктирные линии показывают примерное направление распространения попадающего на детектор пучка нейтрино. Толщина стального экрана на пути пучка около 13 метров. Из Нобелевской лекции Шварца [10].

- 1962 год. Л.Ледерман, М.Шварц и Д.Стейнбергер (Нобелевские лауреаты 1988 года) обнаружили другой вид нейтрино — мюонные нейтрино. Мюонное нейтрино в их экспериментах получалось при распаде К-мезонов:  $K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} / \bar{\nu}_{\mu}$  и пионов  $\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} / \bar{\nu}_{\mu}$ . Пионы и каоны образовывались при бомбардировке протонами с энергией несколько ГэВ бериллиевой мишени, после их распада за мишенью возникал «пучок нейтрино». Для экранировки детектора от прочих частиц была установлена 13 метровая стальная стена (собранная из броневых плит разбираемых линкоров) (рисунок 42). В детекторе (искровой камере с алюминиевыми пластинами толщиной 2.5 см) наблюдалось примерно 1.5 «события» на  $10^{16}$  протонов, попавших в мишень. Искомыми событиями были образования мюонов при поглощении электроном мюонного нейтрино (рисунок 43). Всего было зарегистрировано несколько десятков таких событий (в первых опытах) и удалось показать, что мюонное нейтрино отлично от обнаруженного ранее электронного.





*Рисунок 43: Возникновение мюона в искровой камере (почти горизонтальный трек). Вертикальные полосы - пластины искровой камеры. Трек мюона виден по пробое между пластинами искровой камеры в месте пролёта частицы. Начало трека внутри камеры указывает на рождение мюона из материала, находящегося в камере, под действием нейтральной внешней частицы. Из нобелевской лекции Шварца [10].*

- 1974 год. Рихтер и Тинг обнаружили тяжёлый  $J/\Psi$ -мезон (масса около 3.1 ГэВ). В этом мезоне проявилось существование четвёртого вида кварков - «очарованных». За открытие этой частицы Рихтер и Танг были удостоены Нобелевской премии 1976 года.
- 1977 год. В лаборатории Фермилаб в группе под руководством Л.Ледермана открыт ипсилон-мезон ( $Y$ -мезон), являющийся связанным состоянием кварка и антикварка. Масса покоя этой частицы 9.46 ГэВ.
- 1977 год. Мартин Перл обнаруживает тау-лептон (Нобелевская премия 1995 года). Масса покоя этого лептона 1.78 ГэВ. Перл обнаружил, что при столкновении электронов и позитронов с энергиями до 5-8 ГэВ (Стэнфордский линейный ускоритель) в части событий наблюдается нарушение законов сохранения, которое может быть объяснено образованием неизвестных тяжёлых частиц.
- 1979 год. На электрон-протонном коллайдере DESY (Гамбург, ФРГ) экспериментально подтверждено существование глюонов — частиц, переносящих взаимодействие между кварками, аналогов фотонов для сильного взаимодействия.
- 1983 год. К.Рубиа и С. ван дер Мер в экспериментах на встречных пучках протонов и антипротонов с энергиями 500 ГэВ (ЦЕРН) обнаружили экспериментально  $W$  и  $Z$ -бозоны, частицы-переносчики слабого взаимодействия. За это открытие они были удостоены Нобелевской премии 1984 года.
- 1995 год. Экспериментальное открытие правдивого кварка в лаборатории Фермилаб.
- 2000 год. В лаборатории Фермилаб показано отличие тау-нейтрино от электронного и мюонного нейтрино.

- 2012 год. Обнаружение в ЦЕРН бозона Хиггса.

## Характеристики элементарных частиц.

Таким образом, в физике элементарных частиц известно множество частиц с разнообразными свойствами. Для описания этих частиц используются различные характеристики, которые иногда являются уже известными нам (масса, электрический заряд итд.), а иногда это оказываются специфичные для ядерной физики «заряды» (барионный, странность итд.). Эти дополнительные характеристики возникают из обобщения наблюдаемых процессов взаимодействия и формулировок законов сохранения в этих процессах. Ситуация отдельно усложняет тем, что для некоторых из введённых таким образом характеристик законы сохранения выполняются в одних процессах (например, с участием сильного взаимодействия), но не выполняются в других (например, с участием слабого взаимодействия).

Названия для некоторых из этих характеристик придумывались исходя из «духа момента», а потом иногда менялись под действием мнемонических правил — поэтому возникают такие «нефизические» названия как «странность частицы» или «цвет кварка». Такие наименования надо принимать как исторически сложившиеся, их происхождение связано либо с шуткой первооткрывателя, либо с необходимостью найти какое-то слово, описывающее похожие градации в языке, сложившемся задолго до быстрого развития ядерной физики. При описании частиц на языке составляющих их кварков<sup>4</sup> дополнительные «заряды» оказываются автоматически учтёнными.

Дополнительные характеристики частиц называют также их «ароматами». Для единообразия, знак «аромата» частицы берётся совпадающим со знаком её электрического заряда.

Рассмотрим подробнее происхождение и смысл некоторых характеристик частиц.

### Барионное число $B$ (барионный заряд).

Опыт показал, что в ядерных процессах сохраняется число протонов и нейтронов. Поэтому частицам был приписан барионный заряд. Он равен  $+1$  для барионов (протонов, нейтронов и других частиц из трёх кварков),  $0$  для мезонов (пар кварк-антикварк) и  $-1$  для антибарионов (три антикварка). Барионный заряд можно связать с кварковым составом частицы:  $B = \frac{1}{3}(n_q - n_{\bar{q}})$ , где  $n_q$  - число кварков, а

$n_{\bar{q}}$  - число антикварков. Закон сохранения барионного заряда теоретически может нарушаться в условиях большой плотности барионов и их высоких энергий. Такие процессы предположительно ответственны за избыток материи над антиматерией в нашей Вселенной, но в эксперименте таких нарушений пока не наблюдалось. Понятие барионного заряда появилось до возникновения кварковой модели, для сохранения привычного понятия кваркам также приписан барионный заряд  $1/3$  ( $-1/3$  для антикварков).

### Лептонное число $L$ (лептонный заряд).

Аналогично барионному числу, лептонное число выражает полное число лептонов (электронов, мюонов и тау-лептонов) в системе. Лептонам приписывается лептонный

<sup>4</sup> Считаем, что понятие кварка читателю уже немного знакомо и не требует систематического обоснования. Некоторые сведения из истории кварковой модели и экспериментальных предпосылок к ее развитию будут изложены далее.

заряд  $+1$ , а их античастицам  $-1$ . Из-за эффекта осцилляции нейтрино лептоны одного вида могут превращаться в лептоны другого вида, поэтому отдельно число электронов, мюонов и тау-лептонов не сохраняется. Аналогично барионному заряду, полное число лептонов могло не сохраняться на ранних этапах развития Вселенной.

### Странность, очарование, прелесть и правдивость.

Концепция «странности» как некоторого неизвестного закона сохранения была введена Гелл-Маном и Нишиджимой для объяснения относительно большого времени жизни каонов и некоторых других частиц.

Так как эти частицы при столкновениях пучков в ускорителе всегда образуются парами, было предположено, что возникает некоторый новый закон сохранения: одна частица в паре получает условно положительный «заряд», другая — отрицательный «заряд». Эта новая характеристика получила название странности. Соответственно, в образующейся паре частица имела странность одного знака, а античастица — другого.

На языке кварковой модели странность частицы выражается через числа странных кварков и антикварков в её составе:  $S = -(n_s - n_{\bar{s}})$ , где  $n_s$  и  $n_{\bar{s}}$  - числа странных кварков и антикварков. Знак «минус» связан с историческим наследием, проистекающим из соглашения о выборе знака ароматов частиц.

Странность не сохраняется при слабом взаимодействии. Например, возможен распад  $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ , в котором  $K^+$ -мезон (странность  $+1$ ) распадается на положительный мюон и нейтрино (оба с нулевой странностью). На языке кварковой модели это несохранение странности соответствует возможности изменения кваркового состава частицы из-за взаимных превращений кварков при посредстве слабого взаимодействия.

Аналогично с числом очарованных  $c$ -кварков (charm quark) и антикварков в системе связана такая характеристика как очарование  $C = n_c - n_{\bar{c}}$ . Очарование также не сохраняется при слабом взаимодействии. С числом прелестных кварков — прелесть<sup>5</sup>  $B' = -(n_b - n_{\bar{b}})$  (знак «минус» связан с соглашением о выборе знака аромата по знаку заряда, поэтому у  $b$ -кварка прелесть равна  $-1$ , а у его антикварка  $+1$ ). С числом  $t$ -кварков<sup>6</sup> и их антикварков связывают правдивость:  $T = n_t - n_{\bar{t}}$ .

При всех ядерных реакциях сохраняется полное число кварков и антикварков, но в результате слабого взаимодействия могут меняться ароматы кварков.

### Частицы и античастицы.

Пусть есть частица с некоторым зарядом и набором ароматов. Античастицей для неё будет

- 
- 5 Отметим, что это свойство иногда называют по разному из-за мнемонических причин и разных переводов. Изначально для соответствующего вида кварка было предложено слово «нижний» (английское bottom, bottom quark), от него возникло сокращение  $b$ -кварк, по первой букве которого возникло название «прелестный» или «красивый»: beautiful quark. о избежание путаницы следует иметь в виду, что «нижний кварк» в русской традиции относят к  $d$ -кварку (down quark).
- 6 Здесь также возможны несколько вариантов названий и их переводов. Символ « $t$ » происходит от английского «top», то есть «верхний». Такой перевод может ввести в заблуждение, так как «up quark» в русской традиции также называется «верхним». Иногда в английском используется обозначение «truth quark», то есть «правдивый» или «истинный». В русской традиции во избежание путаницы используется вариант «правдивый» или «истинный».

называться частица, у которой та же масса, а электрический заряд и все ароматы имеют другой знак. Возможен случай, когда частица и античастица совпадают (если все ароматы и заряды нулевые): например в семействе пионов  $\pi^+$ ,  $\pi^0$  и  $\pi^-$  заряженные  $\pi^+$  и  $\pi^-$  являются частицей и античастицей, а нейтральный пион  $\pi^0$  сам является для себя античастицей. Такие частицы иногда называют истинно нейтральными — чтобы подчеркнуть, что у них нулевой не только электрический заряд. В частности, фотон является истинно нейтральной частицей.

В кварковой модели для получения античастицы составной частицы необходимо заменить все кварки на антикварки и наоборот.

### **Аннигиляция.**

Так как заряды и ароматы частиц связаны с законами сохранения (точными или приближёнными), то при взаимодействии частицы и античастицы суммарные заряды и ароматы до и после взаимодействия точно нулевые — то есть из пары частица-античастица может получиться либо несколько истинно нейтральных частиц, либо другая пара частица-античастица, либо их комбинация, лишь бы при этом выполнялись одновременно законы сохранения энергии и импульса. Такой процесс уничтожения частицы и античастицы называют аннигиляцией.

В силу закона сохранения энергии для лёгких частиц (электрона и позитрона, мюонов, протона и антипротона) наиболее вероятным является образование двух высокоэнергичных гамма квантов (так как фотон — безмассовая частица). Образование двух гамма квантов необходимо для выполнения закона сохранения импульса.<sup>7</sup> В экспериментах на высоких энергиях наблюдалось и образование тяжёлых частиц при аннигиляции.

Истинно нейтральная частица может «аннигилировать сама с собой». Так, истинно нейтральный  $\pi^0$  мезон распадается на два гамма-кванта. Из-за этого его время жизни (  $8.4 \cdot 10^{-17} \text{ сек}$  ) гораздо меньше времени жизни заряженных  $\pi$ -мезонов (  $2.6 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$  ).

### **Антиматерия.**

Так как античастицы проявляют такое же электрическое взаимодействие друг с другом, как и обычные частицы, возникает естественный вопрос о возможности существования связанных состояний античастиц: антиатомов, антимолекул и так далее. Вопрос этот давно решён в фантастической литературе, однако на практике он связан с различными сложностями.

---

7 У этого правила есть простое объяснение: для двух массивных аннигилирующих частиц мы всегда можем выбрать систему отсчёта, связанную с центром масс пары. В этой системе отсчёта полный импульс пары равен нулю. Импульс фотона в любой системе отсчёта не ноль, так как фотон всегда движется со скоростью света. Поэтому аннигиляция с образованием единственного фотона невозможна (но, в принципе, возможна аннигиляция пары частица-античастица с образованием единственной массивной истинно нейтральной частицы).



Рисунок 44: Зал антипротонного замедлителя (Antiproton Decelerator) в ЦЕРНе. С сайта [28].

В принципе, законы физики допускают существование антиматерии. Гипотетическая Вселенная из антивещества функционировала бы ничем не хуже нашей Вселенной из нормального вещества. Одной из важных проблем космологии является объяснение барионной асимметрии — избытка вещества над антивеществом в нашей Вселенной. Все современные данные говорят нам о том, что, хотя в природе и постоянно образуются античастицы (например, в позитронном бета-распаде), не существует областей, в которых преобладало бы антивещество. Наличие таких областей привело бы к появлению источников характерного гамма-излучения от аннигиляции на границе их контакта с областями нормальной материи, чего не наблюдается.

В лабораторных условиях получение антиматерии (лёгких «анти-элементов») является решённой задачей [28]. В ЦЕРН для получения антивещества используется специальный комплекс замедлителя антипротонов (Antiproton Decelerator). Антипротоны (точнее, пары протон-антипротон) образуются при бомбардировке металлической мишени протонами с энергией до 20ГэВ. Один антипротон образуется примерно на миллион падающих на мишень протонов. Образовавшийся антипротон имеет скорость близкую к световой и его торможение до скорости около 10% световой является задачей комплекса замедлителя.

Отметим, что удержание антивещества является задачей, подобной по сложности задаче удержания плазмы при термоядерной реакции: нельзя допускать контакта со стенками из обычного вещества. Для ионизированного антивещества можно пользоваться магнитными или электрическими ловушками, нейтральные атомы удерживаются лазерными ловушками либо с использованием взаимодействия дипольных моментов атомов с внешним полем.

В результате, антивещество оказывается на данный момент самым дорогим веществом в мире. По некоторым оценкам [36] стоимость получения одного грамма антиводорода может составить более 60 миллиардов долларов США, а стоимость производства одного грамма позитронов составляет более 20 миллиардов долларов и примерно равна стоимости (в современных ценах) Манхэттенского проекта. По оценкам специалистов ЦЕРН, их антипротонный комплекс сможет производить 10 миллионов антипротонов в минуту. Даже если все антипротоны превратить в атомы антиводорода, наработка одного моля займёт примерно 100 миллиардов лет.

Перечислим некоторые достижения в области получения антивещества в лабораторных

условиях:

- 1965 год. В ЦЕРНе получены ядра антидейтерия (связанное состояние антипротона и антинейтрона). Почти одновременно ядра антидейтерия получены в Брукхэвенской национальной лаборатории (США).
- 1970 год. На Серпуховском ускорителе протонов (СССР, ИФВЭ) получено ядро антигелия-3.
- 1995 год. В ЦЕРНе получены первые атомы антиводорода. Позднее (1997) аналогичные результаты получены в лаборатории Фермилаб (США), где было получено около 100 атомов антиводорода.
- 1999 год. В ЦЕРН введён в строй замедлитель антипротонов (Antiproton Decelerator), который позволяет «остудить» образующиеся в высокоэнергетичных процессах антипротоны с энергий 3.5 ГэВ до 5.3 МэВ, а потом за счёт взаимодействия с электронной плазмой (электрон и антипротон не аннигилируют, так как они не являются друг для друга античастицами) и до энергий  $\sim 100$  мэВ (соответствует температуре 1000 К). При смешивании холодных антипротонов с накопленными позитронами (образующимися в позитронном бета-распаде) образуются атомы антиводорода.
- 2002 год. ЦЕРН, в ловушке достигнуто удержание нескольких тысяч атомов антиводорода.
- 2011 год. ЦЕРН объявил об удержании 300 атомов антиводорода в течение 17 минут.
- 2011 год. В Брукхэвенской национальной лаборатории (США) зафиксировано образование ядра антигелия-4.

## Семейства элементарных частиц.

### **Стандартная модель.**

Совокупность современных знаний о структуре и свойствах элементарных частиц называют «Стандартной моделью». Эта модель сформировалась в 60-х — 70-х годах XX века в частности в работах Нобелевских лауреатов 1979 года Глашоу, Салама и Вайнберга. Модель описывает сильное, электромагнитное и слабое взаимодействия между частицами. С открытием нейтральных слабых токов связанных с Z-бозоном (1973), прелестного кварка (1979), правдивого кварка (1995) и тау-нейтрино (2000) «Стандартная модель» получила достаточное экспериментальное подтверждение (все наблюдаемые в ускорительных экспериментах реакции и вероятности этих реакций с точностью не более 2-2.5 стандартных отклонений описываются «Стандартной моделью» [37]) и является принятой на данный момент. Строгое изложение «Стандартной модели» является предметом специализированных курсов ядерной физики, простейшие сведения могут быть найдены в [38]

«Стандартная модель» выделяет четыре вида фундаментальных частиц:

- калибровочные бозоны, ответственные за перенос электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий
- бозон Хиггса, ответственный за возникновение масс элементарных частиц

- лептоны
- кварки

Лептоны и кварки дополнительно группируются в три «поколения» по мере увеличения их массы. Современная теория считает, что обнаружение следующего поколения ещё более тяжёлых частиц невозможно.

«Стандартная модель» несомненно не является окончательной — например, она требует коррекции для учёта эффекта нейтринных осцилляций, а также не включает в себя гравитацию. Тем не менее, на данный момент она является наиболее точным описанием в физике частиц и описывает на языке 24 частиц<sup>8</sup> (6 кварков, 6 лептонов и их античастицы) и 12 переносчиков (фотон, 3 бозона для слабого взаимодействия и 8 глюонов для сильного взаимодействия).

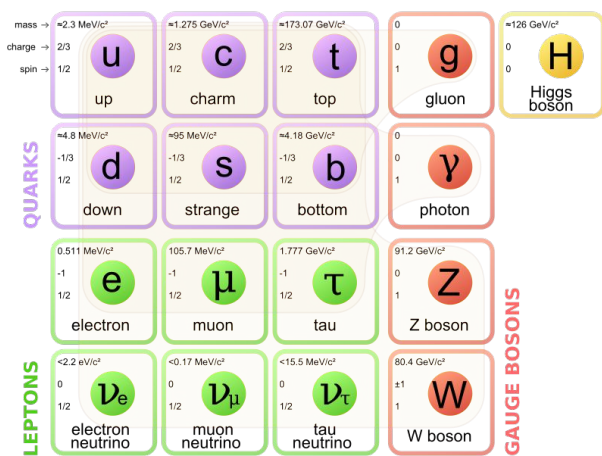


Рисунок 45: Частицы «Стандартной модели»: кварки (фиолетовые клетки), лептоны (зелёные), калибровочные бозоны (красные) и бозон Хиггса (жёлтая). С сайта [38]

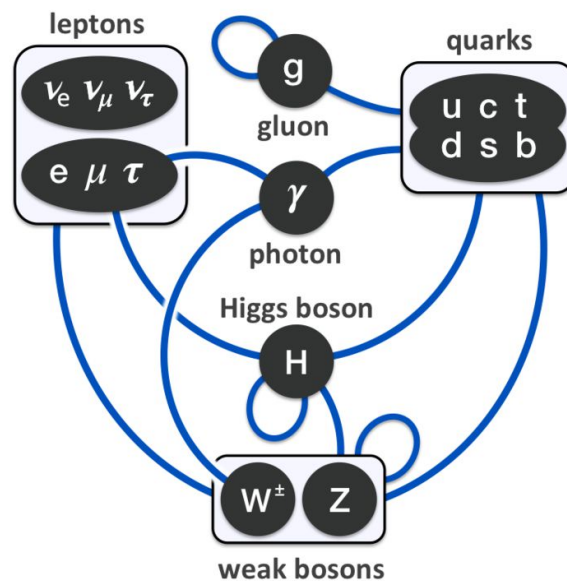


Рисунок 46: Схема взаимодействий между частицами "Стандартной модели". С сайта [38].

Отдельное место в «Стандартной модели» занимает бозон Хиггса. Это массивная частица с предсказанной массой покоя около 120 ГэВ. Теория предполагает, что взаимодействие частиц «Стандартной модели» с полем Хиггса<sup>9</sup> (с бозонами Хиггса) ответственно за наблюдаемые массы этих бозонов. Теоретическое предсказание этого механизма было сделано в середине 60-х годов 20 века, экспериментальное подтверждение существования частицы со свойствами бозона Хиггса было получено в ЦЕРН на Большом адронном коллайдере в 2012 году. За предсказание свойств этой частицы Ф.Энглерт и П.Хиггс в 2013 году получили Нобелевскую премию по физике.

Рассмотрим подробнее эти основные виды частиц.

<sup>8</sup> Без учёта «цветов» кварков и глюонов и считая, что нейтрино и антинейтрино являются разными частицами.  
<sup>9</sup> Также это взаимодействие называют полем Энглерта-Брауна-Хиггса, так как модель взаимодействия элементарных частиц, приводящая к появлению у них массы была одновременно предложена теоретиками из Брюсселя Ф.Энглертом и Р.Браутом и теоретиком из Эдинбурга П.Хиггсом.

**Калибровочные бозоны.**

Калибровочные бозоны — это частицы-переносчики взаимодействий: фотоны (переносят электромагнитное взаимодействие),  $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z^0$ -бозоны (слабое взаимодействие) и 8 глюонов (сильное взаимодействие). Эти частицы проявляются как виртуальные при передаче взаимодействия.

Фотоны — это наиболее привычные частицы, кванты электромагнитного поля. Фотонами могут обмениваться все частицы (и лептоны, и кварки), а также заряженные  $W^\pm$  бозоны. Фотоны — безмассовые частицы, поэтому электромагнитное взаимодействие является дальнедействующим<sup>10</sup>. Фотоны не имеют электрического заряда, спин фотона не определён из-за отсутствия системы отсчёта покоя для безмассовой частицы.

$W^\pm$  и  $Z^0$ -бозоны отвечают за осуществление слабого взаимодействия [39], [40]. Это массивные частицы с массой 80.4 ГэВ и 91.2 ГэВ для  $W^\pm$  и  $Z^0$ -бозонов, соответственно. Эти массы почти в 100 раз превосходят массу протона и даже превосходят массу атома железа. Поэтому слабое взаимодействие является очень короткодействующим: как мы помним из оценки для пи-мезонов масса в 100-200 МэВ соответствует переносу взаимодействия на ядерный масштаб  $10^{-14} \dots 10^{-15}$  метра (см. сноску на стр. 40). Соответственно, для слабого взаимодействия его радиус действия окажется ещё в 1000 раз меньше. То есть, как мы уже упоминали при рассмотрении бета-распада, слабое взаимодействие оказывается действующим на масштабах меньших внутриядерного — на внутринуклонных масштабах.

---

<sup>10</sup> Напомним, что для массивной виртуальной частицы время её «существования» определяется соотношением неопределённости  $mc^2 \tau \sim \hbar$ , а максимальное расстояние, на которое эта частица может переместиться за время  $\tau$  равно  $L = c \tau \sim \frac{\hbar}{mc}$



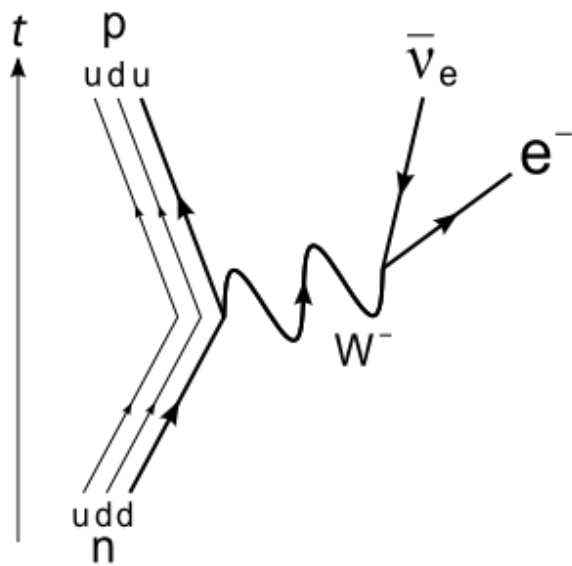


Рисунок 47: Схема (фейнмановская диаграмма) бета-распада. С сайта [39].

Weak interaction transformations of u and d quarks

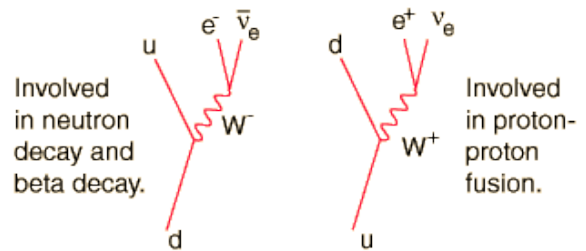


Рисунок 48: W-бозон в бета-распадах. С сайта [40].

Feynman diagrams of quark decay by weak interaction

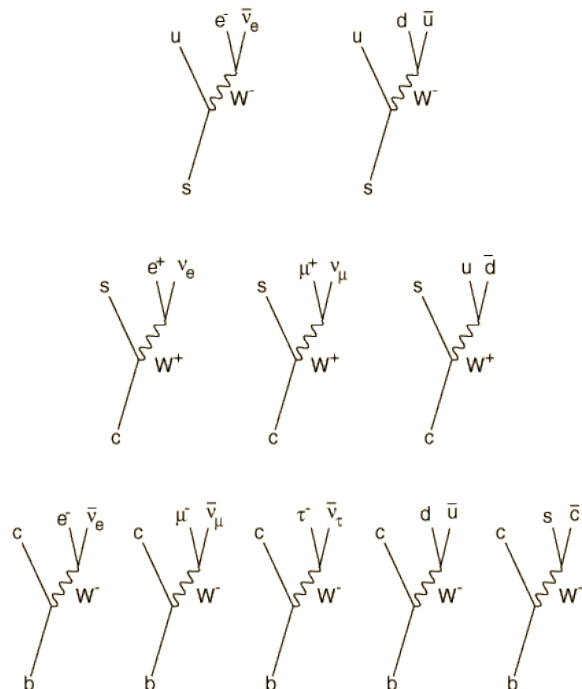


Рисунок 49: Диаграммы распада различных кварков с участием W-бозона. С сайта [40].

Существование  $W^\pm$  и  $Z^0$ -бозонов было предсказаны в конце 60-х, косвенные экспериментальные подтверждения были получены в ЦЕРНе в 1973 году (наблюдение взаимодействия нейтрино с электроном, описываемое как обмен  $Z^0$ -бозоном), и наконец с вводом в строй Суперпротонного синхротрона (ЦЕРН) в 1983 году W и Z-бозоны были обнаружены в столкновениях протонов и антипротонов (Рубиа и ван дер Мер, Нобелевская премия 1984 года). Детали эксперимента изложены в Нобелевской лекции К.Рубиа [10]. При столкновении протона и антипротона, точнее при столкновении входящих в их состав кварков и антикварков, может образоваться  $W^\pm$  бозон, который затем распадается в пару электрон-антинейтрино или позитрон-нейтрино. С меньшей вероятностью может образоваться нейтральный  $Z^0$  бозон, который распадается в пару электрон-позитрон или мюон-антимюон. Детектировалось появление электронов с характерным для бета-распада распределением по энергии для заряженных бозонов, либо одновременный вылет пары лептон-антилептон для нейтрального бозона.

$W^\pm$  и  $Z^0$ -бозоны имеют спин 1.  $W^\pm$ -бозоны участвуют в процессах слабого взаимодействия с

изменением электрического заряда,  $Z^0$ -бозоны в процессах без изменения заряда. Они не имеют дополнительных ароматов. В свободном виде  $W^\pm$  и  $Z^0$ -бозоны нестабильны.  $W$  бозоны распадаются в лептон и нейтрино ( $W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$  и аналогично в мюонном и тау-каналах), либо в пары кварк-антикварк (распад в пару кварк-антикварк противоположен методу получения этих бозонов в вышеупомянутых опытах). В частности, превращение нейтрона в протон (и наоборот) при бета распаде сопровождается испусканием соответствующего  $W$ -бозона (напомним, что слабое взаимодействие не сохраняет ароматы кварков) (рисунки 47, 48, 49). Нейтральный  $Z$ -бозон распадается в пары электрон-позитрон (мюон-антимюон, тау-анти-тау), нейтрино-антинейтрино, пары кварк-антикварк.

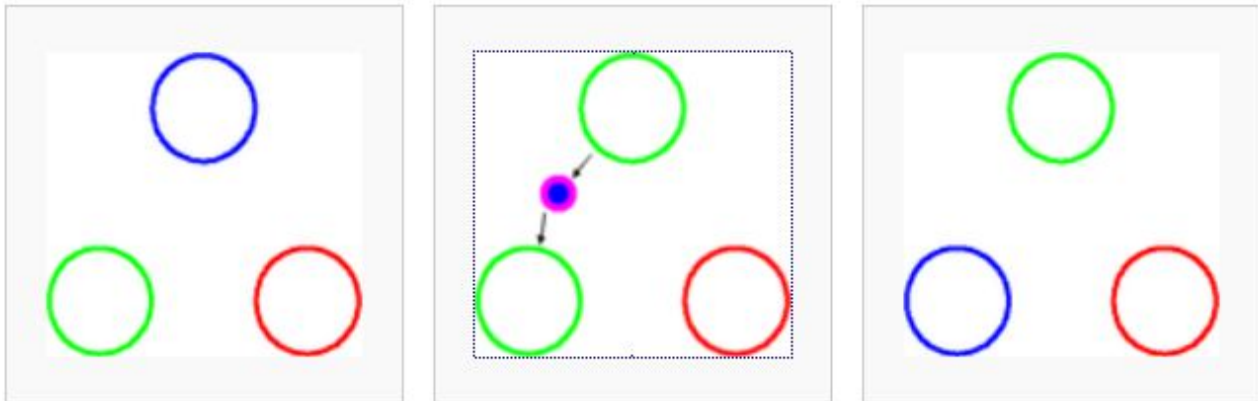


Рисунок 50: Изменение цвета кварка при испускании/поглощении глюона. Левое изображение: исходное состояние адрона с тремя разноцветными кварками. Среднее изображение: синий кварк испускает синий-антизелёный глюон и становится зелёным. Правое изображение: зелёный кварк поглощает синий-антизелёный глюон и становится синим. С сайта [41].

Последние, самые многочисленные и самые трудные для понимания калибровочные бозоны — это глюоны, частицы-переносчики сильного взаимодействия между кварками. По теоретическим представлениям глюоны безмассовые частицы.<sup>11</sup> Насчитывается 8 видов глюонов, которые обозначают комбинацией «цветовых зарядов», свойственных кваркам. Концепция «цветового заряда» [41] кварков была введена для того чтобы объяснить, как в некоторых тяжёлых частицах три одинаковых кварка могут занимать одно и то же состояние (что запрещено для фермионов по принципу Паули). «Цветовой заряд» маркируется цветом (красный, зелёный, синий для кварков и анти-красный, анти-зелёный, анти-синий для антикварков). Глюон маркируется парой цвет/антицвет (красный-антизелёный, например), испускание-поглощение глюона сопровождается соответствующим изменением цвета. «Цветовой заряд» сохраняется при обмене глюонами. Все свободные частицы не имеют цветового заряда — они либо содержат полную тройку цветов, либо пару цвет-антицвет. Сильное взаимодействие проявляется только между цветными частицами. Всего возможно 9 комбинаций цвет-антицвет, однако отсутствие дальнего действия взаимодействия между бесцветными частицами указывает на то, что одна из комбинаций (так называемый «цветовой синглет») не реализуется (это несколько похоже на отсутствие фотонов с нулевой проекцией

<sup>11</sup> Необходимо предостеречь читателя от кажущейся лёгкости и наглядности картины взаимодействия кварков: эта картина является обобщением огромного количества сложно интерпретируемых экспериментальных фактов и её строгое описание уходит за рамки большинства университетских курсов физики. Наглядные слова о «цветах» кварков и глюонов, являются лишь выражением некоторых своеобразных законов сохранения. Выбор этих слов, как уже отмечалось, возникает исторически, иногда в чём-то случайно или в силу каких-то ассоциаций, а иногда и просто как шутка среди физиков-ядерщиков.

спина) — что в конечном итоге приводит к 8 возможным типам глюонов.

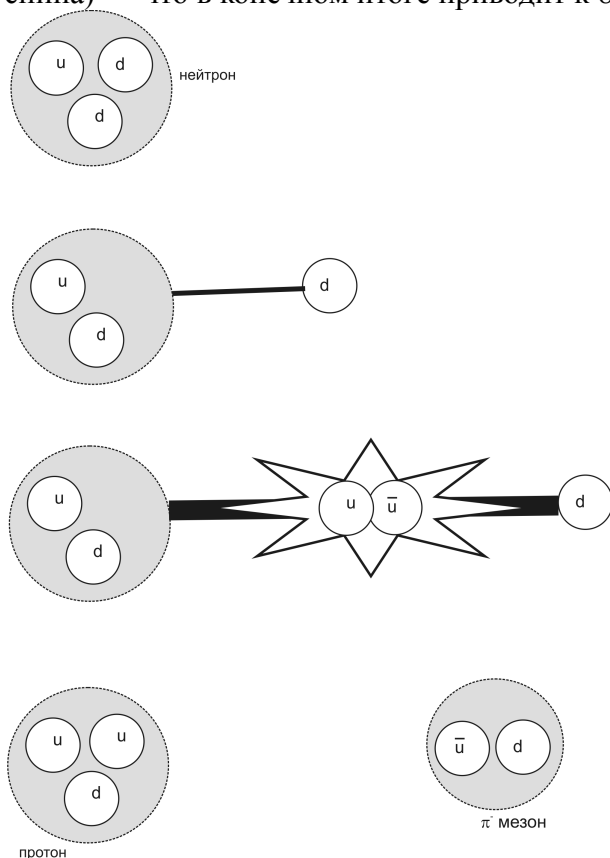


Рисунок 51: Образование пи-мезона при разрыве глюонной трубки. Цветовой заряд для простоты не показан.

Выбор цветов для «цветового заряда» условен, он связан тем, что красный, синий и зелёный это дополнительные цвета, при смешивании они образуют бесцветное состояние. Так как сам глюон несёт цветовой заряд, глюоны взаимодействуют друг с другом. В результате между двумя удаляемыми кварками возникает «глюонная трубка», энергия которой возрастает по мере удаления кварков. Возникает, говоря классическим языком, сила, увеличивающаяся с расстоянием между частицами. Однако, в квантовом мире, когда энергия этой трубки сравнится с энергией покоя пары кварк-антикварк с таким же цветовым зарядом (и антизарядом) возникает возможность разорвать трубку с образованием новой частицы. Например, при удалении от нейтрона (кварковый состав  $udd$ ) одного  $d$ -кварка при разрыве трубки образуется пара самых лёгких верхних кварка и антикварка и мы получим протон ( $uud$ ) и  $\pi^-$ -мезон ( $u\bar{d}$ ). Обе частицы бесцветные, то есть не связаны сильным взаимодействием. Пи-мезон в свою очередь может быть поглощён другим протоном, превращая его в нейтрон. Таким образом, глюоны оказываются отвечающим за взаимодействие внутри частиц, а между бесцветными частицами взаимодействие осуществляется за счёт обмена другими частицами (например, пионами).

### Бозон Хиггса.

Экспериментальное подтверждение существования бозона Хиггса в 2012 году широко обсуждалось в средствах массовой информации (с громкими названиями об «открытии частицы бога») и в научных кругах. Это открытие является одним из важнейших фундаментальных открытий последних лет. Само это наблюдение показывает, что большие открытия в фундаментальной физике продолжают случаться и пока прочитана ещё далеко не последняя страница книги изучения Вселенной. Обзоры по этой теме могут быть найдены в литературе [37], [42], [43]. Мы ограничимся самыми простыми вопросами.

Во-первых, отметим, что предсказание о существовании поля Энглера-Брауна-Хиггса и бозона-переносчика этого поля (бозона Хиггса) было сделано в 60-х годах 20 века. Хотя это предсказание теоретически является вполне естественным для Стандартной модели (так что в существовании этого механизма взаимодействия большинство физиков-ядерщиков было уверено), для его экспериментального подтверждения понадобилось 50 лет прогресса в инструментальных методах ядерной физики. Наблюдение бозона Хиггса стало возможным только с запуском Большого адронного коллайдера<sup>12</sup> — одного из самых дорогих научных

<sup>12</sup> Эксперименты по поиску бозона Хиггса велись и на других больших ускорителях. Постепенно накапливающиеся данные по косвенным наблюдениям сужали диапазон возможных масс новой частицы. Эксперименты на протон-антипротонных столкновениях в ускорителе Теватрон (США) позволили

инструментов в истории со стоимостью строительства около 10 миллиардов долларов. Важно отметить, и это характерно подчёркивает логику развития науки, что Нобелевская премия теоретикам Хиггсу и Энглеру была присуждена только после экспериментального подтверждения существования предсказанного ими механизма.

Про бозон Хиггса часто говорят, что это та частица, из-за которой возникает масса. Это несколько условные слова, которые могут запутать неспециалиста. Напомним известный из теории относительности факт, что для безмассовых частиц (фотонов, например) энергия связана с импульсом как  $E = pc$ , а для частиц с ненулевой массой покоя

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + p^2c^2}. \text{ В Стандартной модели без бозона Хиггса нет внутренних причин}$$

считать различными переносчики электромагнитного и слабого взаимодействия, более того теория объединения электрослабого взаимодействия показывает, что на первых этапах жизни Вселенной эти два взаимодействия были одним целым. Это означает, что и переносчики слабого взаимодействия могли бы быть безмассовыми с точки зрения теории — это не так в реальном мире, но с точки зрения чистой теории у элементарных частиц стандартной модели не должно бы быть массы. Физики говорят об этом, как о некоторой симметрии в Стандартной модели [42]. Предсказание Хиггса и Энглера заключалось в предложении механизма нарушения такой симметрии: предложено некоторая формально допустимая возможность взаимодействия изначально безмассовых частиц с дополнительным полем, в результате которого связь энергии с импульсом у частицы меняется от безмассового закона

$$E = pc \text{ к закону } E = \sqrt{(mc^2)^2 + p^2c^2}. \text{ Энергия массивной частицы не может быть меньше}$$

$mc^2$ , то есть масса в некотором смысле определяет «цену создания» частицы. Безмассовая частица может быть создана «даром», и роль взаимодействия Хиггса сводится к тому, что за счёт взаимодействия с полем Энглера-Брауна-Хиггса изначально безмассовая частица как-то искажает его и энергия этого взаимодействия создаёт конечную «цену» создания частицы. Грубой аналогией является отличие между движением стального шарика по жёсткой и эластичной поверхности: в первом случае при приложении минимального усилия шарик сразу начнёт движение, во втором случае он деформирует под собой основу и для его движения необходимо всё время «вылезать» из созданной ямки - «цена» перевода шарика в движущееся состояние становится конечной.

В результате бозон Хиггса определяет массы элементарных частиц и вводит пятое фундаментальное взаимодействие помимо гравитационного, электромагнитного, слабого и сильного.

Как же «увидели» бозон Хиггса? Как всегда в ядерной физике речь идёт о некотором процессе взаимопревращения частиц в результате которого на детекторе обнаружили некоторое количество обычных частиц (электронов, фотонов). Бозон Хиггса является истинно нейтральной частицей, он может распадаться на разные комбинации частиц и античастиц. Для экспериментального обнаружения основными оказались [43] каналы распада на два фотона  $H \rightarrow \gamma\gamma$  и на 4 лептона (2 лептона и два антилептона) через промежуточную пару истинно нейтральных Z-бозонов  $H \rightarrow ZZ \rightarrow llll$ . Другие возможные каналы менее удобны для экспериментального обнаружения таких распадов по разным причинам (более высокий фон, появление трудноуловимых нейтрино, малая вероятность, см. рисунок 52).

---

исключить существование частицы с массой меньше 110 МэВ и более 145 МэВ [43]. Эксперименты на Большом адронном коллайдере завершили эту гонку, позволив непосредственно статистически достоверно зафиксировать процессы, связанные с распадами именно бозона Хиггса.

Decay channel	Branching ratio	Rel. uncertainty	Decay channel	Mass resolution
$H \rightarrow \gamma\gamma$	$2.28 \times 10^{-3}$	+5.0% -4.9%	$H \rightarrow \gamma\gamma$	1-2%
$H \rightarrow ZZ$	$2.64 \times 10^{-2}$	+4.3% -4.1%	$H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell'^+ \ell'^-$	1-2%
$H \rightarrow W^+W^-$	$2.15 \times 10^{-1}$	+4.3% -4.2%	$H \rightarrow W^+W^- \rightarrow \ell^+ \nu_\ell \ell'^- \bar{\nu}_{\ell'}$	20%
$H \rightarrow \tau^+\tau^-$	$6.32 \times 10^{-2}$	+5.7% -5.7%	$H \rightarrow b\bar{b}$	10%
$H \rightarrow b\bar{b}$	$5.77 \times 10^{-1}$	+3.2% -3.3%	$H \rightarrow \tau^+\tau^-$	15%
$H \rightarrow Z\gamma$	$1.54 \times 10^{-3}$	+9.0% -8.9%		
$H \rightarrow \mu^+\mu^-$	$2.19 \times 10^{-4}$	+6.0% -5.9%		

Рисунок 52 Слева: вычисленные в рамках Стандартной модели вероятности различных процессов распада бозона Хиггса для массы бозона 125 МэВ. Справа: точность определения массы бозона Хиггса для разных процессов распада. Из [43].

Возникновение бозона Хиггса является процессом обратным распаду. С некоторой вероятностью бозон Хиггса может образовываться при столкновении достаточно энергичных частиц, на Большом адронном коллайдере сталкивались два пучка протонов.

В эксперименте детектировалось возникновение после столкновения пары гамма-квантов или четвёрки лептонов, по их суммарной энергии и импульсу можно было определить массу покоя распадающейся частицы. При этом необходимо было исключить все возможные процессы образования других частиц при столкновениях. В результате анализа статистики, накапливаемой более года в двухфотонных и четырёхлептонных процессах распада (рисунки 53, 54) был зафиксирован статистически достоверный избыток событий, соответствующий образованию при протон-протонных столкновениях нейтральной частицы массой  $M c^2 = 125.8 \text{ МэВ}$ , по всем характеристикам совпадающей с предсказываемым теорией хиггсовским бозоном.

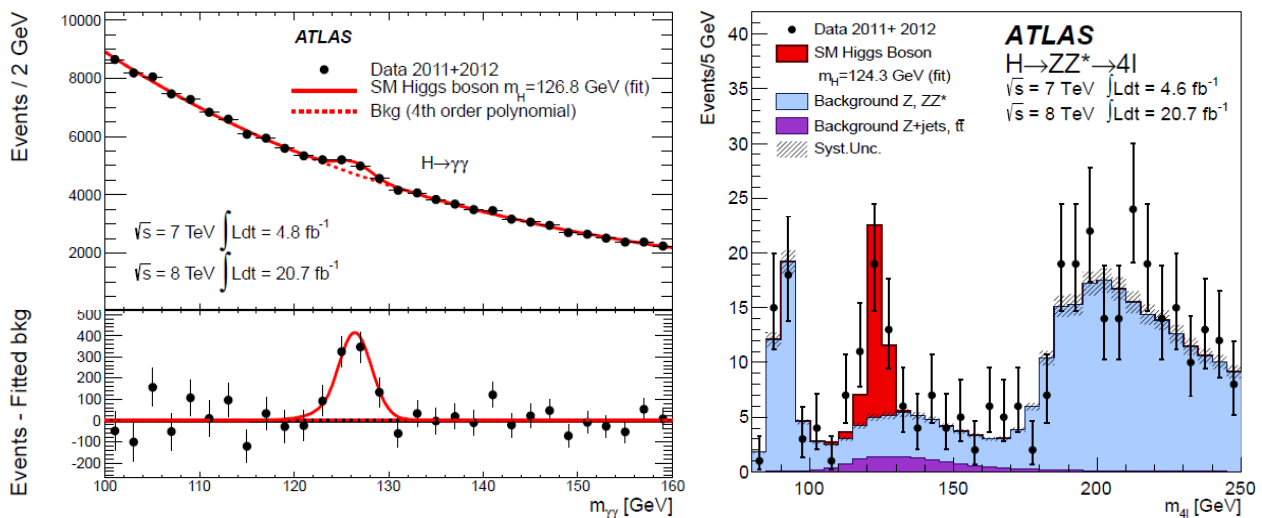


Рисунок 53 Слева: статистика двухфотонных распадов бозона Хиггса. Справа: статистика четырёхлептонных распадов бозона Хиггса. Из [43].



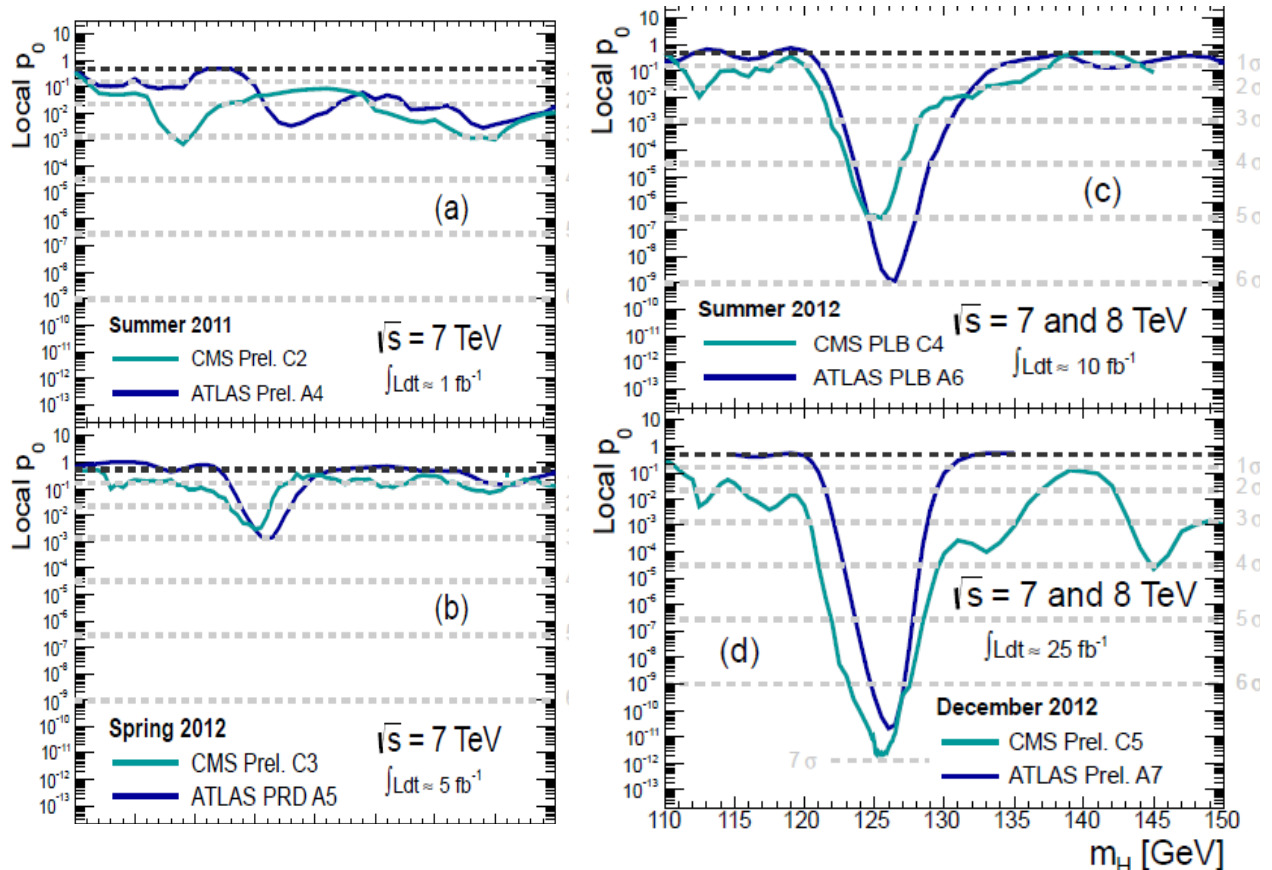


Рисунок 54 Накопление статистики распадов бозона Хиггса по мере развития экспериментов на Большом адронном коллайдере в лета 2011 по декабрь 2012 года. Из [43].

### Лептоны.

В семейство лептонов входят электрон, мюон, тау-лептон, электронное, мюонное и тау-нейтрино, а также их античастицы. Частицы лептонного семейства взаимодействуют только через электромагнитное, слабое и гравитационное взаимодействия, а также могут взаимодействовать с хиггсовским бозоном.

Все лептоны являются фермионами со спином 1/2, спин нейтрино связан с направлением движения нейтрино: он направлен против движения для нейтрино и по движению для антинейтрино. С лептонами связывают квантовое число  $L$  — лептонный заряд, а иногда вводят индивидуальные лептонные числа по поколениям (для электрона, мюона и тау). Однако закон сохранения как для индивидуальных, так и для общего лептонного числа верен лишь приближённо.

Согласно «Стандартной модели» нейтрино являются безмассовыми частицами, но наблюдение эффекта осцилляций нейтрино (превращения одних нейтрино в другие) указывает на наличие некоторой малой массы. Современные эксперименты пока установили оценки сверху для масс нейтрино.

Электрон является стабильной частицей, мюон и тау-лептон распадаются. Мюон с периодом полураспада 2.2 мксек в электрон и пару нейтрино:  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ , тау-лептон со средним периодом полураспада  $2.9 \cdot 10^{-13}$  сек по многим каналам, включающим, например, образование мюона и пары нейтрино, либо мезона и тау-нейтрино.

Характеристики лептонов представлены в таблице ниже:

Частица/ античастица	Символ	Q	Спин S	$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$	Масса, МэВ	Время жизни, сек.
Электрон / позитрон	$e^-/e^+$	-1/+1	1/2	+1/-1	0	0	0.511	стабилен
мюон/ антимюон	$\mu^-/\mu^+$	-1/+1	1/2	0	+1/-1	0	106	$2.20 \cdot 10^{-6}$
тау/антитау	$\tau^-/\tau^+$	-1/+1	1/2	0	0	+1/-1	1777	$2.91 \cdot 10^{-13}$
электронное нейтрино/ электронное антинейтрино	$\nu_e/\bar{\nu}_e$	0	1/2	+1/-1	0	0	$<2.2 \cdot 10^{-6}$	
мюонное нейтрино/ мюонное антинейтрино	$\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$	0	1/2	0	+1/-1	0	$<0.17$	
тау нейтрино/ тау антинейтрино	$\nu_\tau/\bar{\nu}_\tau$	0	1/2	0	0	+1/-1	$<15.5$	

### Кварки.

Экспериментально было установлено, что даже такая «простая» частица как нейтрон «непроста»: у электрически нейтрального нейтрона есть свой магнитный момент, нейтрон не совпадает со своей античастицей. Кроме того, были обнаружены многочисленные взаимные превращения тяжёлых частиц друг в друга, формирование групп частиц с похожими свойствами.

На основе анализа этих данных в 1964 году Дж.Цвейг и М.Гелл-Ман (Гелл-Ман является лауреатом Нобелевской премии 1969 года) предположили существование составной структуры адронов. В этой модели свойства различных тяжёлых частиц объяснялись комбинацией свойств составляющих их элементов — кварков.

Термин «кварк» не имеет специального смысла (хотя и совпадает по первым буквам и в русском и в английском языках со словом «квант»). Название было заимствовано Гелл-Маном из романа Джойса «Поминки по Финнегану», герою которого снилась бессмысленная фраза: «Три кварка для доктора Марка».

По современным представлениям кварки не существуют как свободные частицы: сила взаимодействия кварков друг с другом возрастает неограниченно при попытке разнести их. Из анализа свойств различных частиц установлено существование 6 типов кварков. Их свойства перечислены в таблице ниже. Отметим сразу, что понятие массы для кварков определено несколько условно, так как масса имеет смысл только как масса покоя изолированной частицы, массы тяжёлых кварков определены пока с достаточно большим разбросом, в литературе могут встречаться и другие значения по сравнению с указанными в таблице.

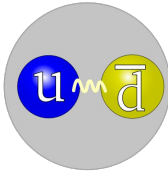
Название	Символ	Масса, МэВ <sup>13</sup>	Заряды и ароматы					
			Q	B	S	C	b	t
верхний	u	2.01±0.14	+2/3	1/3	0	0	0	0
нижний	d	4.79±0.16	-1/3	1/3	0	0	0	0
странный	s	101	-1/3	1/3	-1	0	0	0
очарованный	c	1270	+2/3	1/3	0	+1	0	0
красивый (прелестный)	b	4190-4670	-1/3	1/3	0	0	-1	0
правдивый (истинный)	t	172000	+2/3	1/3	0	0	0	+1

Помимо этих характеристик у кварков есть дополнительный «цветовой заряд», обеспечивающий обмен глюонами. Цвет конкретного кварка в составной частице не важен, важно лишь чтобы частица в целом была бесцветной.

## Составные частицы

Из кварков могут быть составлены все тяжёлые частицы — адроны. По составу их подразделяют на барионы (состоящие из трёх кварков) и мезоны (из двух кварков). С учётом требования отсутствия полного «цветового заряда» у составной частицы, в барионе должны присутствовать все три цвета либо все три антицвета, а в мезоне — пары цвет-антицвет.

Ниже в таблице приведены кварковые структуры некоторых барионов и мезонов:

Частица	Масса, МэВ	Спин	Q	I <sub>3</sub>	Состав (рисунки с соответствующих страниц wikipedia.org)
$\pi^+$	139.6	0	+1	+1	 $u \bar{d}$
$\pi^0$	135.0	0	0	0	$\frac{(u \bar{u} - d \bar{d})}{\sqrt{2}}$
$\pi^-$	139.6	0	-1	-1	$\bar{u} d$
$K^+$	494	0	+1	1/2	$u \bar{s}$
$K^0$	498	0	0	-1/2	$d \bar{s}$ <sup>14</sup>

<sup>13</sup> для верхнего и нижнего кварков по [44], для остальных кварков по [45]

<sup>14</sup>  $K^0$  не является истинно нейтральным, у него есть античастица  $\bar{K}^0$  с кварковым составом  $\bar{d} s$ , в эксперименте проявляются симметричная долгоживущая и антисимметричная короткоживущая комбинации частицы и античастицы:  $K_L^0 = \frac{d \bar{s} + \bar{d} s}{\sqrt{2}}$  и  $K_S^0 = \frac{d \bar{s} - \bar{d} s}{\sqrt{2}}$ .

$K^-$	494	0	-1	-1/2	$\bar{u} s$
$\rho^+$	775	1	+1	1	$u \bar{d}$
$\rho^0$	775	1	0	0	$\frac{(u \bar{u} - d \bar{d})}{\sqrt{2}}$
$\rho^-$	775	1	-1	-1	$\bar{u} d$

Кроме этого теоретически возможно существование и частиц из большего числа кварков: тетракварков и пентакварков. Требование «цветовой нейтральности» означает, что в тетракварке должно быть две пары кварк-антикварк, а в пентакварке должны быть представлены все три цвета и одна пара цвет-антицвет, то есть должно содержаться 4 кварка и один антикварк. Тетракварк имеет нулевой барионный заряд и формально является мезоном, пентакварк имеет барионный заряд равный 1 и является барионом. Несколько кандидатов в такие экзотические тяжёлые частицы было недавно открыто в ускорительных экспериментах на Большом адронном коллайдере и электрон-позитронных коллайдерах в Пекине (Китай) и Цукубе (Япония). Обнаруженный тетракварк с кварковым составом  $c \bar{c} d \bar{u}$  имеет массу около 4500 МэВ [46], другой кандидат в тетракварки (частица  $Z_c(3900)$ ) с ещё не установленным точно составом имеет массу около 3900 МэВ [47], обнаруженный пентакварк с кварковым составом  $u u d c \bar{c}$  имеет массу около 4400 МэВ [48], [49].

Частица	Масса, МэВ	Спин	Q	$I_3$	Состав (рисунки с соответствующих страниц wikipedia.org)
p	938.2	1/2	+1	+1/2	 <i>uud</i>
n	939.6	1/2	0	-1/2	 <i>udd</i>
$\Lambda^0$	1116	1/2	0	0	<i>uds</i>
$\Sigma^+$	1189	1/2	+1	1	<i>uus</i>
$\Sigma^0$	1193	1/2	-1	0	<i>uds</i>
$\Sigma^-$	1197	1/2	0	-1	<i>dds</i>
$\Sigma_c^{++}$	2454	1/2	+2	1	<i>uuc</i>
$\Delta^{++}$	1232	3/2	+2	3/2	<i>uuu</i>
$\Delta^-$	1232	3/2	-1	-3/2	<i>ddd</i>
$\Xi^-$	1322	1/2	-1	-1/2	<i>dss</i>
$\Xi^0$	1315	1/2	0	1/2	<i>uss</i>
$\Omega^-$	1672	3/2	-1	0	<i>sss</i>
J/Ψ	3097	1	0	0	<i>c <math>\bar{c}</math></i>