



Майнор "Мир глазами физиков" 2017-2019

Осень 2017

Квантовая физика 'для чайников'

Лекция 13:

Ядерная физика II:

Изотопная датировка (продолжение)

Элементарные частицы: методы,

Стандартная модель

Геологическая датировка (продолжение)

Шкала времен – миллионы и миллиарды лет, радиоуглеродный метод – слишком “быстрый”!

Простейшее: накопление гелия (Резерфорд) и аргона-40 в минералах.

Практически используется калий-аргоновый метод, в том числе на марсоходе (<https://mars.nasa.gov/news/nasa-curiosity-first-mars-age-measurement-and-human-exploration-help/>, результат: возраст пород от 3.9 до 4.6 млрд.лет)

калий-40 (период полураспада 1.248 млрд.лет) с вероятностью 11% распадается в аргон-40

Рубидий-стронциевый метод

Рубидий-87 распадается в стронций-87 (48.81 млрд.лет). Стронций-87 и стронций-86 стабильные изотопы.

Рубидий и стронций соседи в таблице Менделеева (щелочной и редкоземельный), встречаются вместе в разных минералах

На времени формирования горной породы из расплава проявляется кристаллизационное фракционирование (рубидиевые соединения кристаллизуются несколько дольше), изотопное фракционирование для стронция не существенно.

$$^{87}\text{Sr} = ^{87}\text{Sr}^{(0)} + ^{87}\text{Rb}^{(0)} \left(1 - 2^{-t/T_{1/2}} \right)$$

$$^{87}\text{Rb} = ^{87}\text{Rb}^{(0)} 2^{-t/T_{1/2}}$$

Исходные концентрации неизвестны, но отношение рубидия и стронция в разных частях формирующейся породы было разное

Рубидий

Рубидий-87 и стронций-86 стабильны

Рубидий и стронций встречаются в природе

На времени кристаллизации кристаллизуются не существующие

$$\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} = \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right)^{(0)} + \frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}} \left(2^{t/T_{1/2}} - 1 \right)$$

измеряем сейчас

постоянно в серии образцов из-за отсутствия изотопного фракционирования

Построенная по серии (с разным *стартовым* составом рубидия и стронция) зависимость должна быть прямой!!!

$${}^{87}\text{Sr} = {}^{87}\text{Sr}^{(0)} + {}^{87}\text{Rb}^{(0)} \left(1 - 2^{-t/T_{1/2}} \right)$$

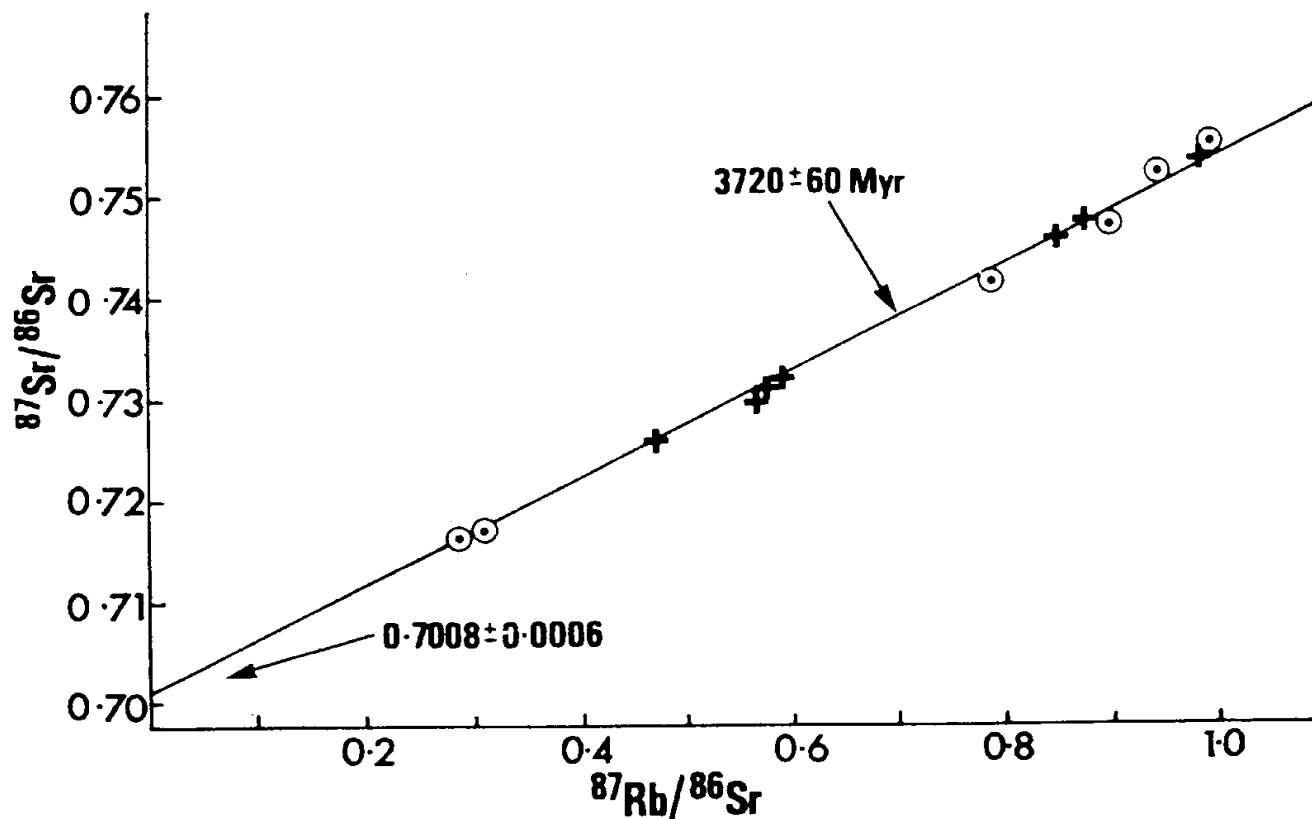
$${}^{87}\text{Rb} = {}^{87}\text{Rb}^{(0)} 2^{-t/T_{1/2}}$$

Исходные концентрации неизвестны, но отношение рубидия и стронция в разных частях формирующейся породы было разное

Примеры применения

described elsewhere⁸. Rb/Sr ratios were determined by a precise X-ray fluorescence technique⁹. The decay constant of ^{87}Rb was taken as $1.39 \times 10^{-11} \text{ yr}^{-1}$.

Fig. 2 Rb–Sr whole rock isochron plot for Amitsoq gneisses from Isua. $\odot$, Gneissic veins cutting supracrustals (Group 1, Table 1) and Gneisses far away from contact with supracrustals (Group 2, Table 1). +, Gneisses from near contact with supracrustals (for full details and analytical data, see ref. 6).



Ещё примеры (Sm-Nd)

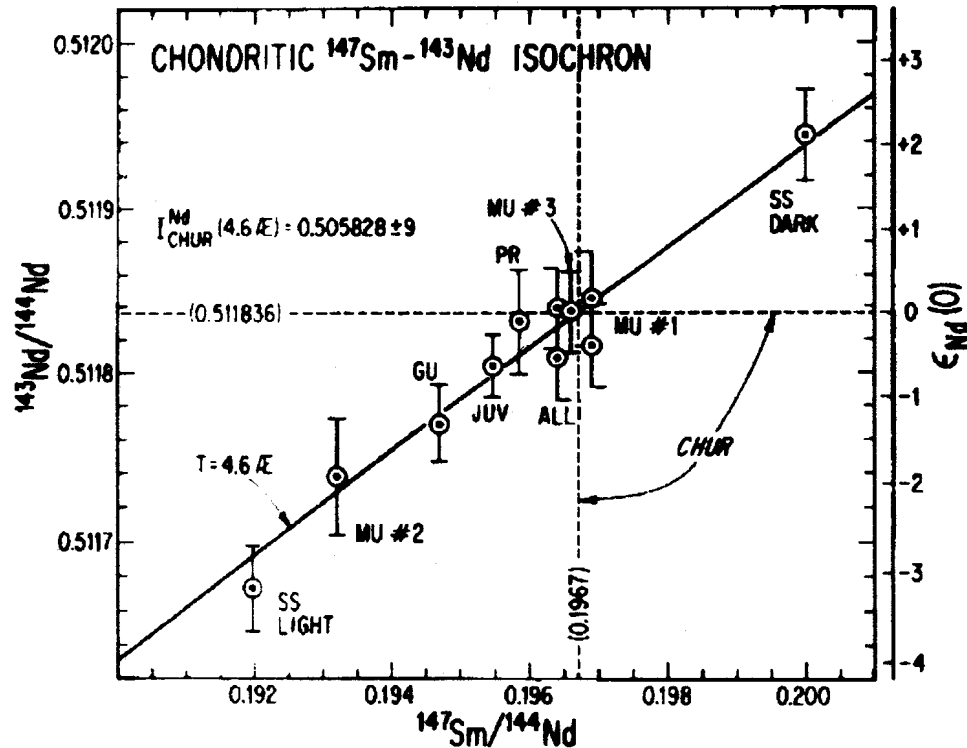
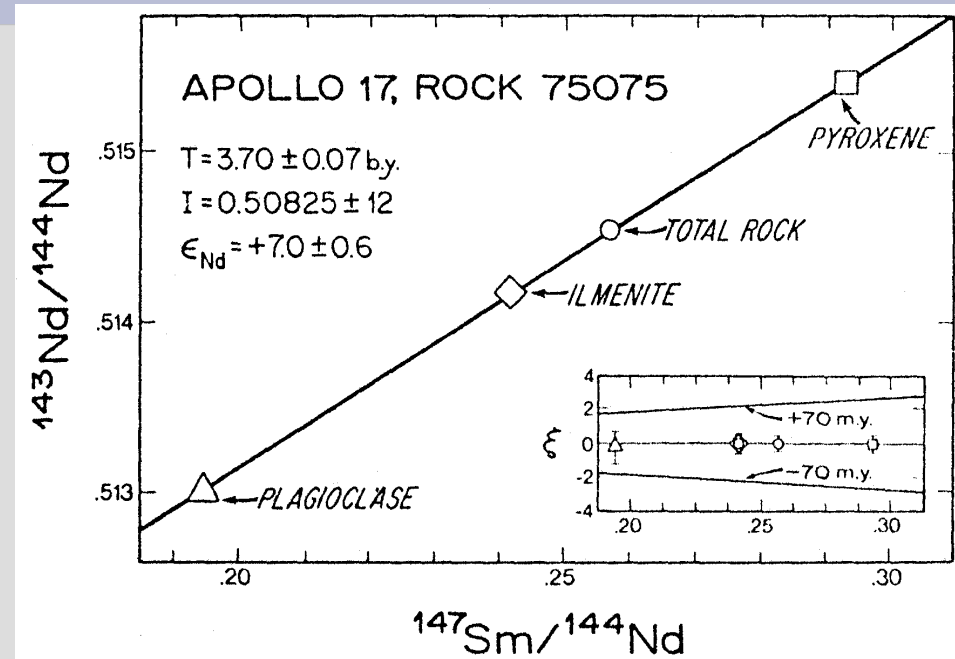


Fig. 2. Sm-Nd evolution diagram for chondrite samples and Juvinas. A reference line with a slope of 4.6 AE is shown. The dashed lines represent the new values selected for average chondrites (CHUR).

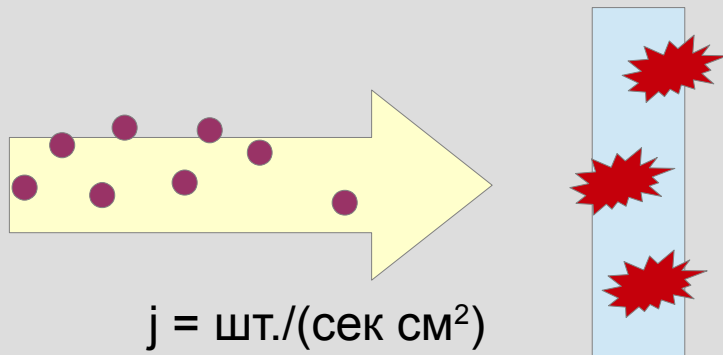


Mineral isochron for lunar basalt 75075 (Lugmair et al. 1975)

Ю.А.Костицын, Геохимия изотопов и геохронология.,
http://wiki.web.ru/wiki/Геологический_факультет_МГУ:Геохимия_изотопов_и_геохронология

Элементарные частицы: что измеряется?

бомбардировка мишени



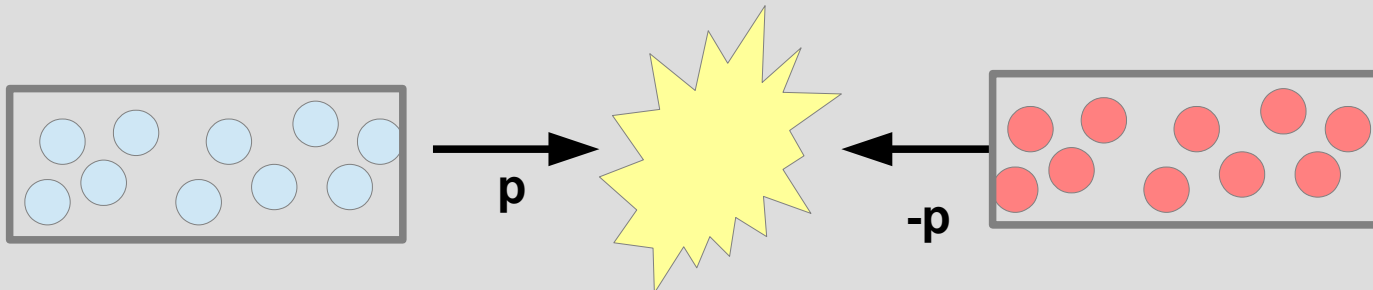
$$j = \text{шт./}(\text{сек см}^2)$$

$$\frac{dN}{dt} = j(n S dx) \sigma$$

Реально измеряется – число нужных реакций как функция параметров пучка.

Характеристика вероятности реакции – сечение реакции σ

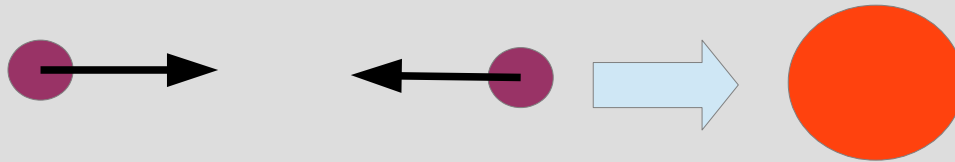
встречные пучки



$$N = \frac{N_A N_B}{S} \sigma$$

Когда наблюдается? Порог реакции

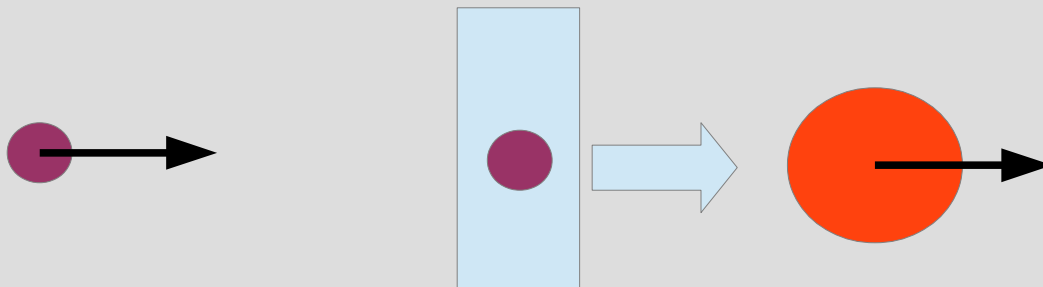
встречные пучки



$$T = \frac{M c^2}{2} - m c^2$$

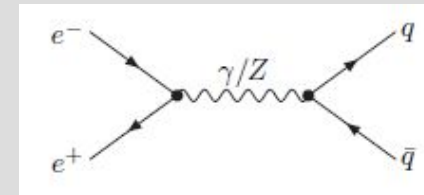
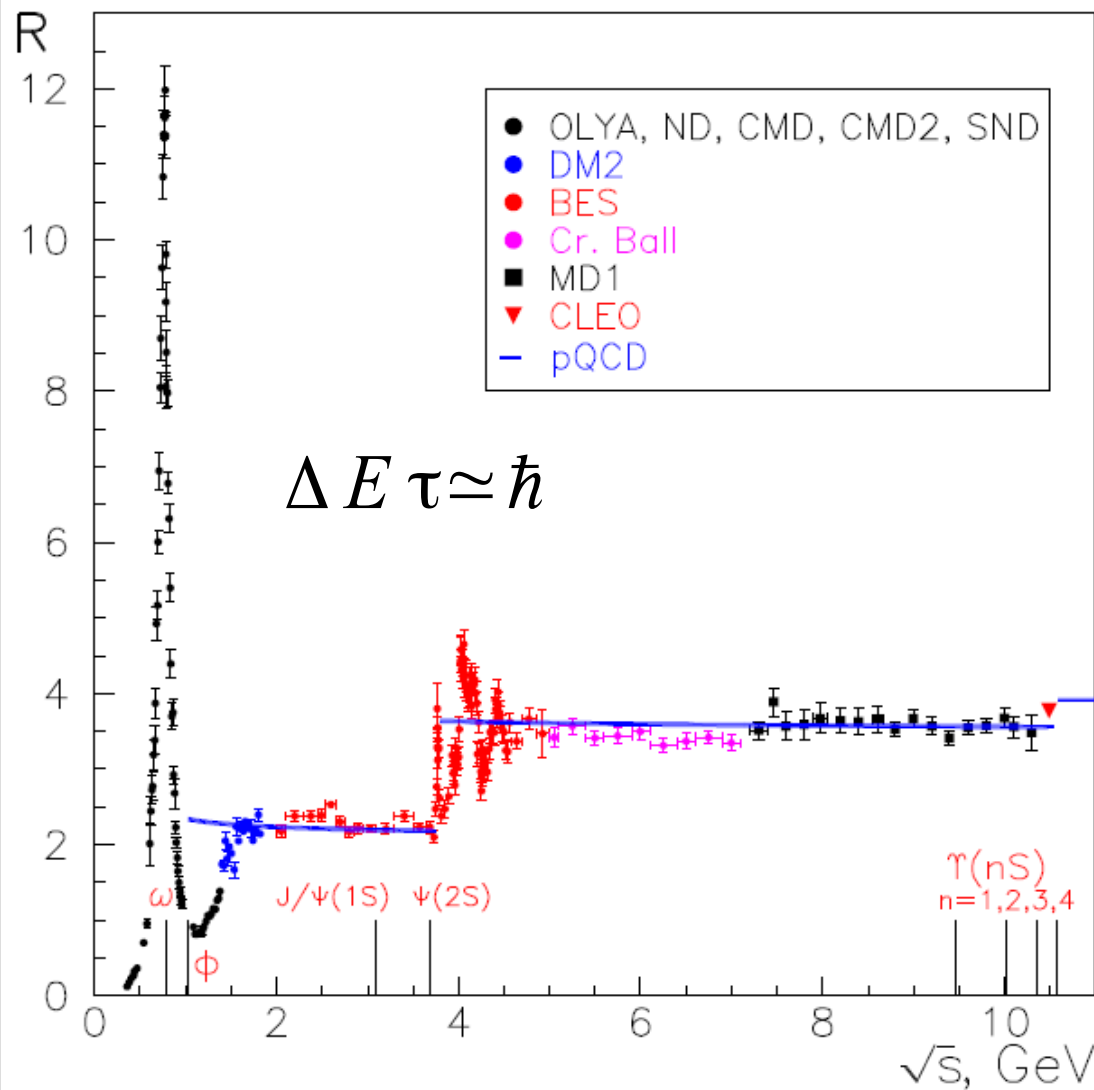
Встречные пучки (коллайдер)
выгоднее, но бомбардировка мишени
проще и гибче

бомбардировка
мишени



$$\begin{aligned} T + 2 m c^2 &= \sqrt{(M c^2)^2 + (p c)^2} = \\ &= \sqrt{(M c^2)^2 + 2 m c^2 T + T^2} \\ T &= \frac{(M c^2)^2}{2 m c^2} - 2 m c^2 \end{aligned}$$

Пример 1: получение адронов в электрон-позитронных реакциях



Резонанс на 0.78 ГэВ – омега-мезон (время жизни 10^{-18} сек)

Порог на 1.5 ГэВ – появление пары s-кварков

Порог на 3.8 ГэВ – появление пары c-кварков

Законы сохранения

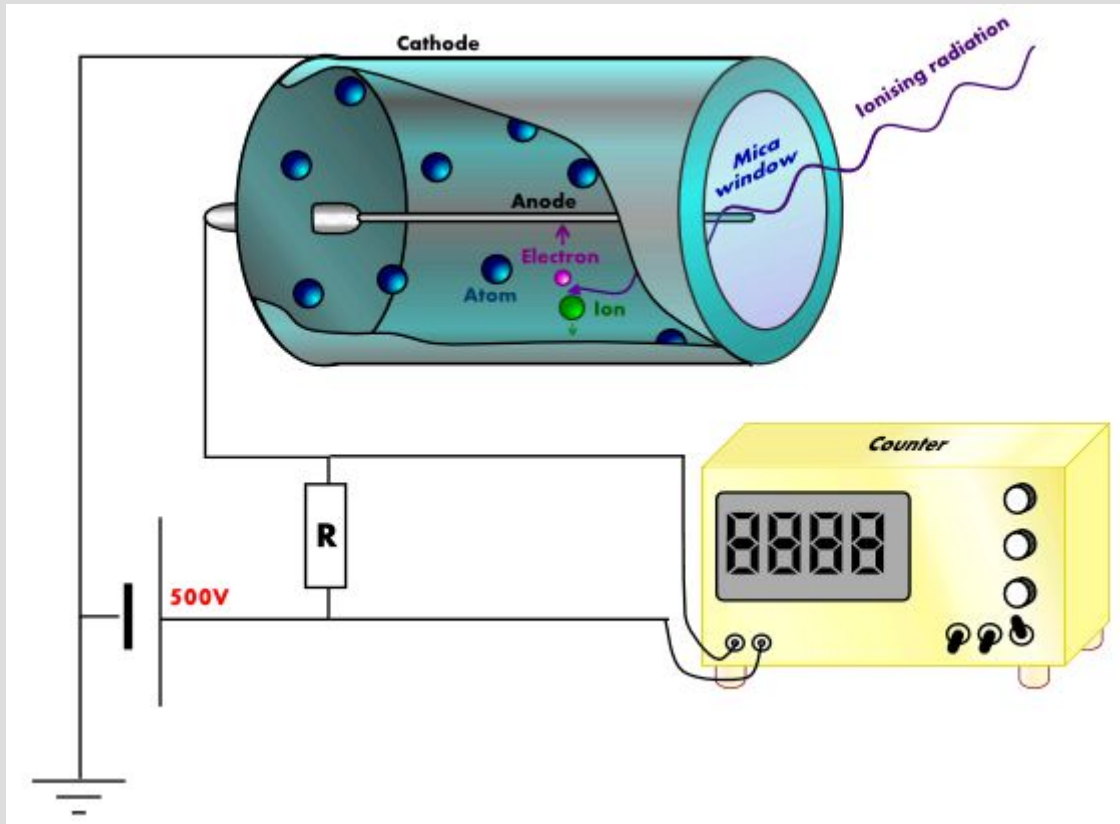
Фундаментальные законы сохранения

- Энергия
- Импульс
- Момент импульса
- Заряд

Дополнительно при анализе реакций возникают более **специфичные** (и иногда “слабые”) **законы сохранения**:

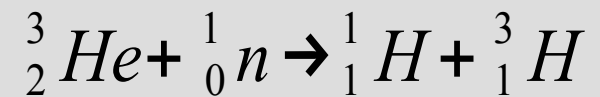
- сохранение числа кварков и лептонов (в современной Вселенной - всегда)
- сохранение типов кварков и лептонов (не сохраняется при слабом взаимодействии)

Счётчик Гейгера



Для ионизирующих излучений:
детектируется импульс тока,
усиливаемый образованием
лавины вблизи тонкого
электрода

Для нейтронов наполняется
гелием-3



Камера Вильсона



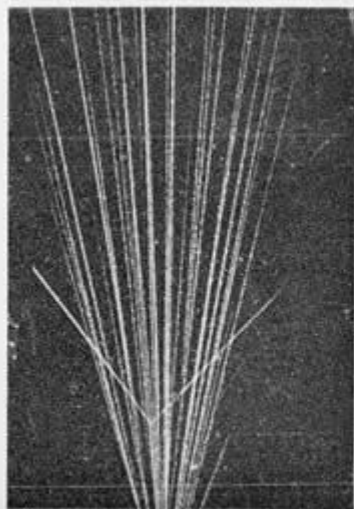
Wison Chamber Demo, <http://www.darvill.clara.net/mydown.htm>



Сделанная Ч.Вильсоном камера Вильсона. Из экспозиции музея Кавендишской лаборатории.

Memorial museum of Cavendish Laboratory, Wilson Chamber Discovery, <http://chambrebrouillard.wifeo.com/history-and-achievements.php>

Исторические фото в камере Вильсона



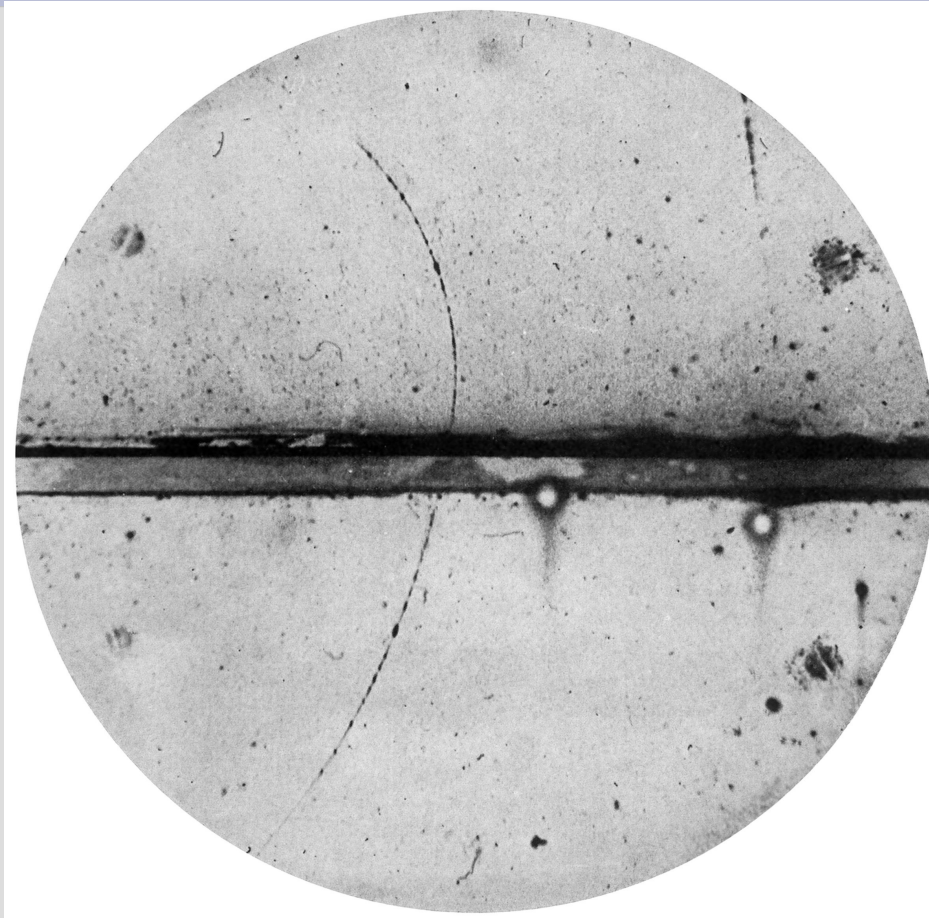
Alpha particle strikes helium nucleus and they part at right angles (Blackett)



Alpha particle enters nitrogen which ejects proton and becomes oxygen (Blackett)

Ранние фотографии в камере Вильсона (получены Блэккетом). Слева: рассеяние альфа-частицы на атоме гелия, угол 90° после столкновения свидетельствует о равенстве масс альфа частицы и атома гелия. Справа: взаимодействие альфа-частицы с ядром азота с образованием ядра кислорода и протона.

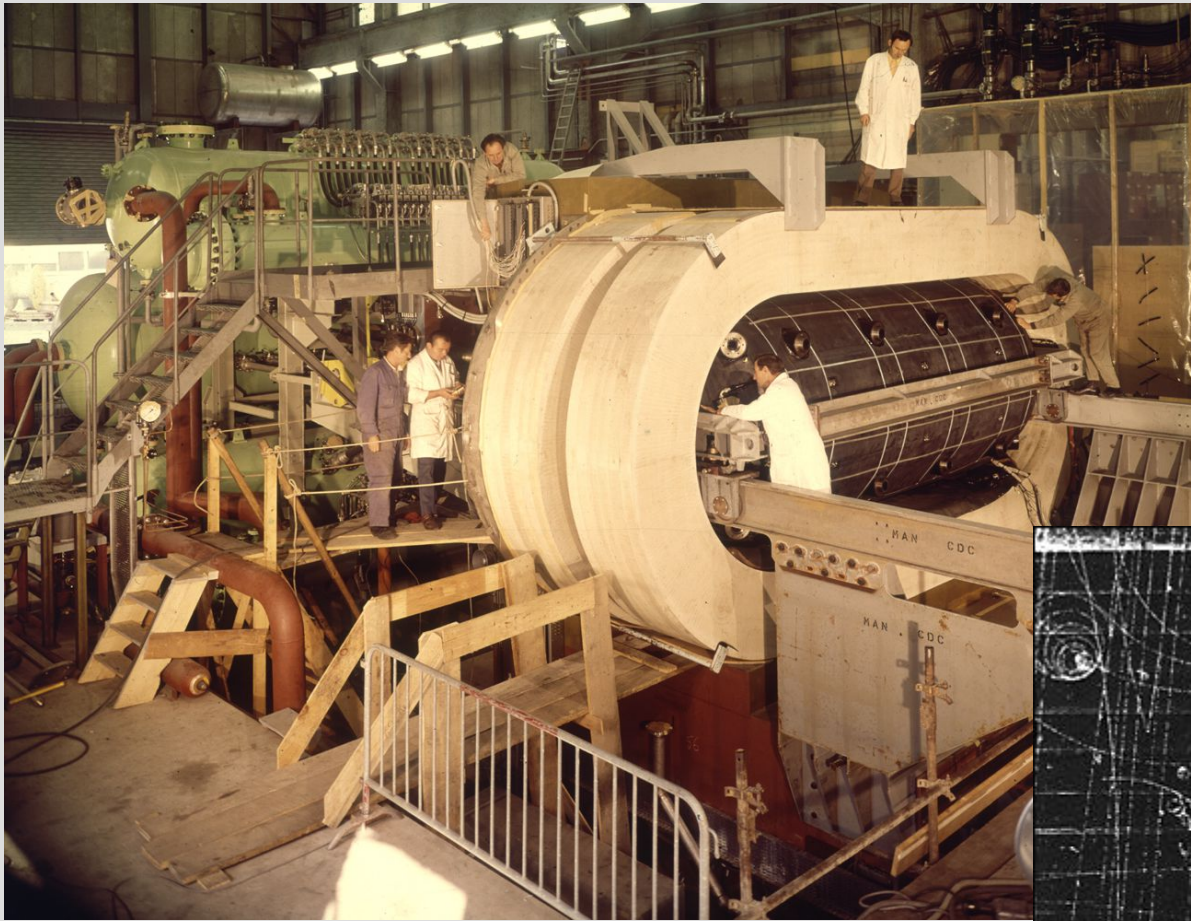
Historical tracks of alpha particles by Blackett,
<http://www.courtauld.ac.uk/researchforum/events/2011/spring/Shows of London.shtml>



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.

C.D.Anderson, The Positive Electron, Physical Review , 43, 491 (1933)

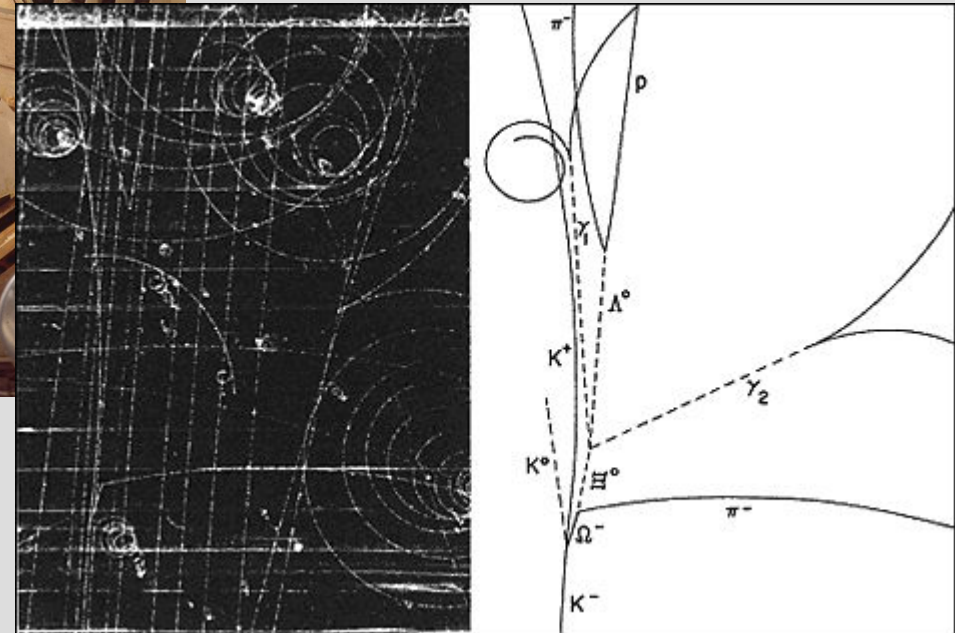
Пузырьковая камера



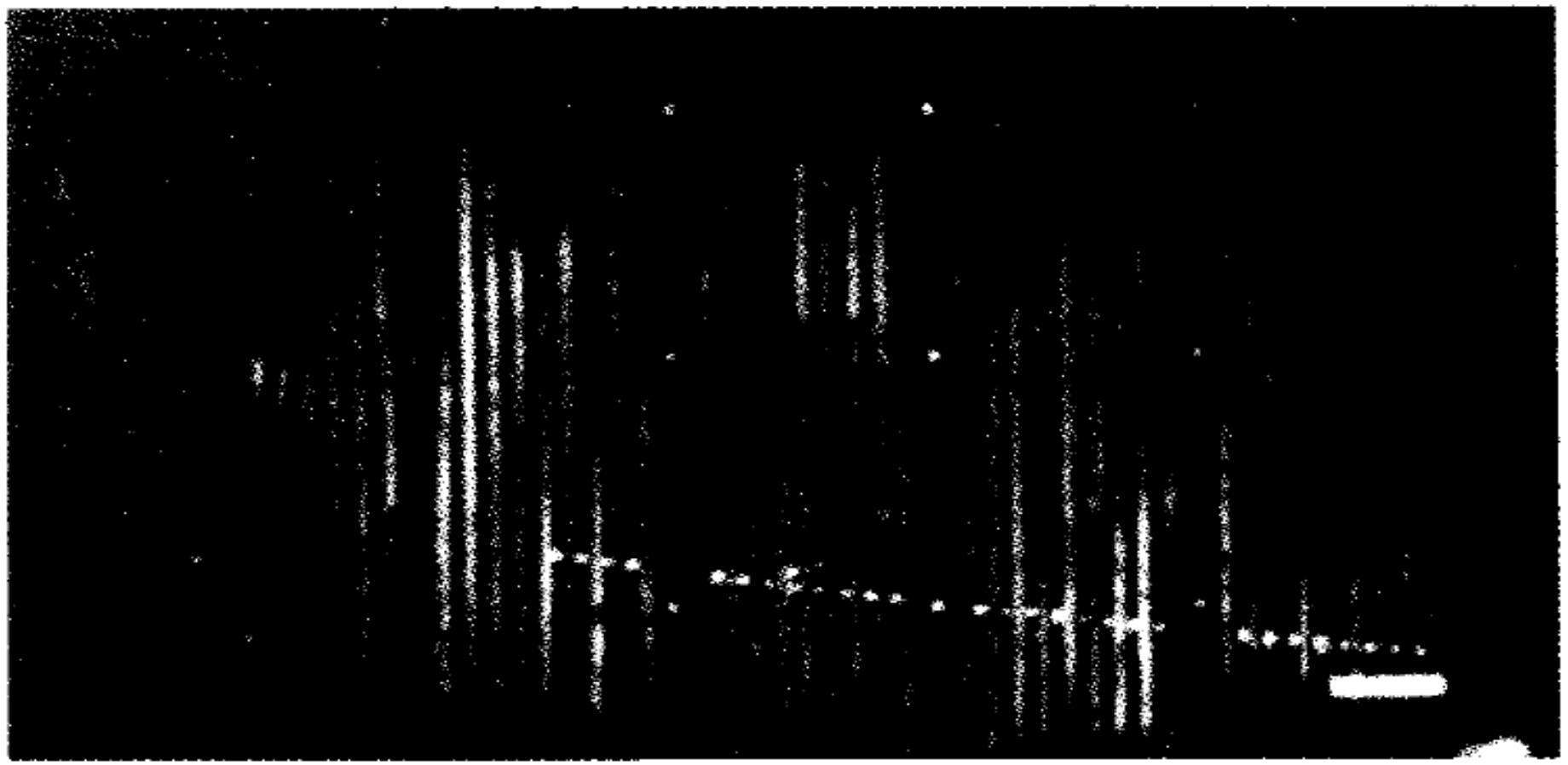
Пузырьковая камера Гаргамель (ЦЕРН)

CERN, CERN for teachers: Bubble Chambers,
http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2005/bubble_chambers/BCwebsite/index.htm

BNL, Historical tracks of Omega-minus particle,
<http://www.bnl.gov/bnlweb/history/Omega-minus.asp>



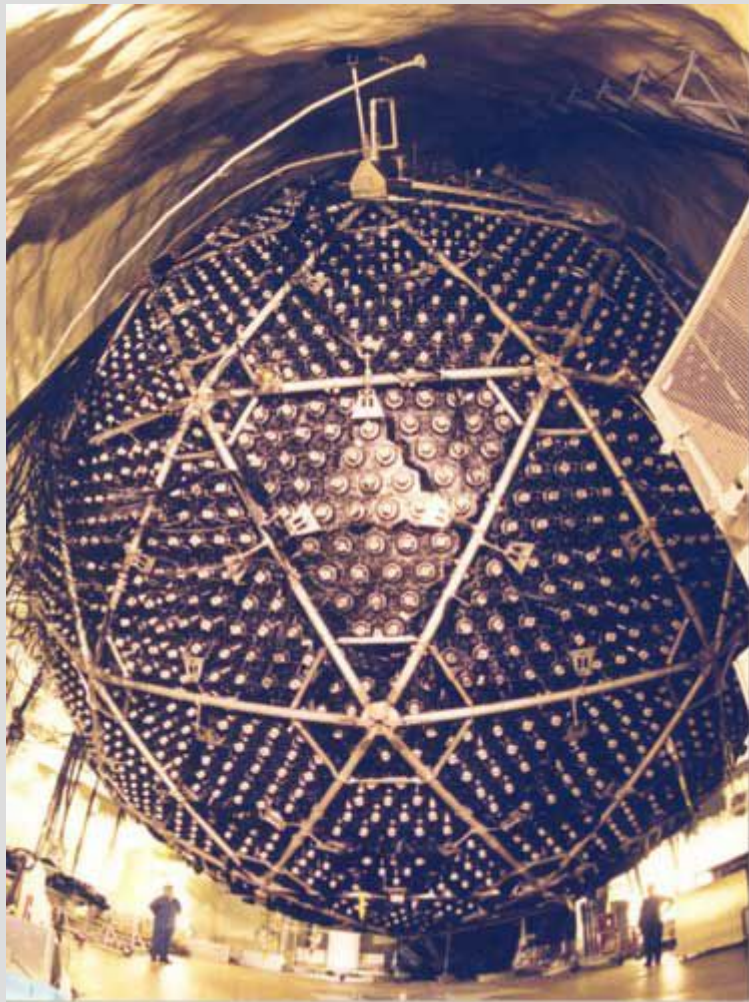
Искровая камера



Возникновение мюона в искровой камере при поглощении мюонного нейтрино (почти горизонтальный трек). Вертикальные полосы - пластины искровой камеры. Из Нобелевской лекции Шварца

$$\nu_{\mu} + e \rightarrow \mu + \nu_e$$

Детектор нейтрино



Детектор нейтрино Нейтринной обсерватории Садбэри (Канада).

низкофоновые эксперименты (как правило в пещере, глубина 100-1000 м)

условия “чистой комнаты”

большой размер детектора из-за малости сечения взаимодействия нейтрино с веществом (интенсивность нужных событий часто измеряется штуками в день)

Современные детекторы (БАК)



CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS

Pixel ($100 \times 150 \mu\text{m}$) $\sim 16\text{m}^2 \sim 66\text{M}$ channels
Microstrips ($80 \times 180 \mu\text{m}$) $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$ channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID
Niobium titanium coil carrying $\sim 18,000\text{A}$

MUON CHAMBERS

Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

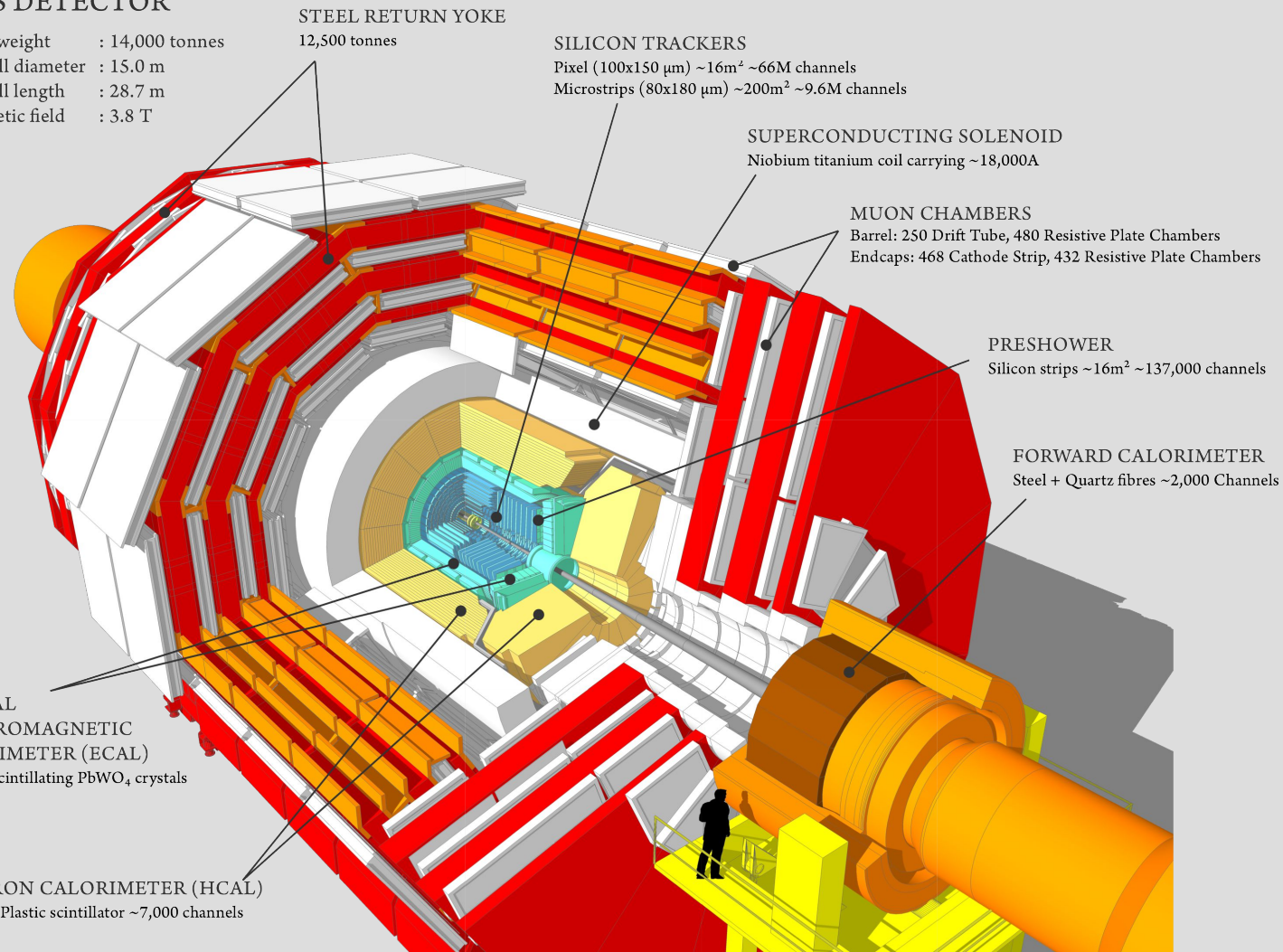
PRESHOWER

Silicon strips $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$ channels

FORWARD CALORIMETER
Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

CRYSTAL
ELECTROMAGNETIC
CALORIMETER (ECAL)
 $\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + Plastic scintillator $\sim 7,000$ channels



Современный детектор частиц

- Сложный комплекс большого числа датчиков разного типа, “фабрика” по обнаружению частиц
- Фиксируется большое число событий, частицы идентифицируются
- Набирается статистика различных реакций, определяется сечение реакции
- При формировании в процессе реакции какой-то частицы (как правило – короткоживущей) наблюдается резонансный пик в сечении реакции

Немного про ускорители

В основном – встречные пучки

Главные

характеристики:

- тип ускоряемых частиц
- энергия частиц
- светимость (число потенциально возможных столкновений в единицу времени)

Name	Type	$\sqrt{s}$ (GeV) в системе ц.м.	Years of operation
LEP	e^+e^-	91.2 (LEP-1) 130-209 (LEP-2)	1989-95 (LEP-1) 1996-2000 (LEP-2)
SLC	e^+e^-	91.2	1992-98
HERA	$e^\pm p$	320	1992-2007
Tevatron	$p\bar{p}$	1800 (Run-I) 1960 (Run-II)	1987-96 (Run-I) 2000-??? (Run-II)
LHC	pp	14000	2010? - 2013? 2013?? - 2016???
ILC	e^+e^-	500-1000	???

INTRODUCTION TO COLLIDER PHYSICS

MAXIM PERELSTEIN*

SLAC (1966-...),



Вид с воздуха на комплекс зданий Стэнфордского линейного ускорителя. Детекторный комплекс справа. Сам канал ускорителя находится на глубине 10 метров под землёй.

http://en.wikipedia.org/wiki/Stanford_Linear_Accelerator_Center

до 2017 года – самое длинное прямое здание (2 мили)

Нобелевские премии: с-кварк (1976), кварковая структура протона и нейтрона (1990), тау-лептон (1995)

50 ГэВ энергия пучка, до 90 ГэВ в с.с.м. в режиме коллайдера (1987-1998)

Циклотрон

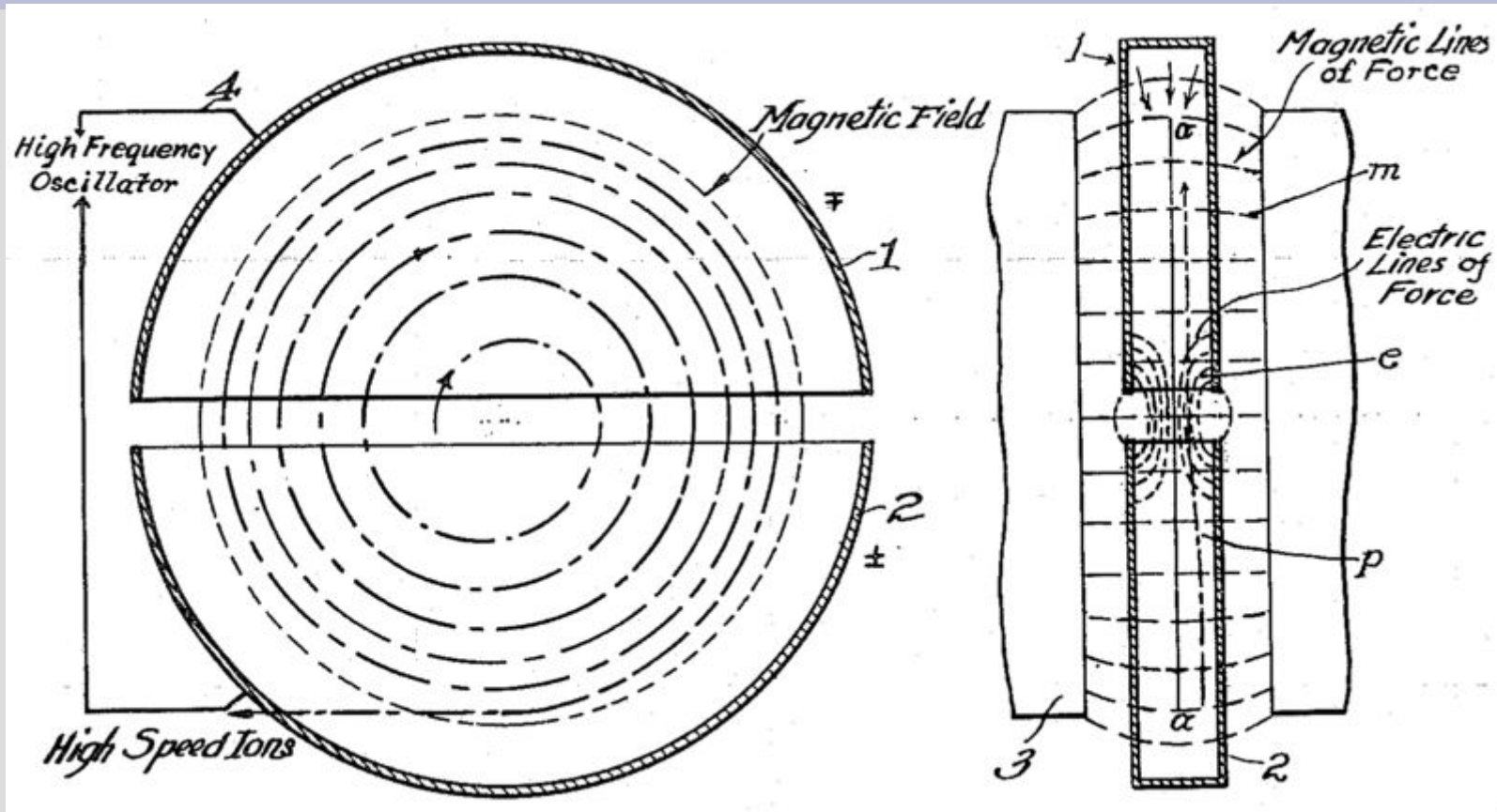
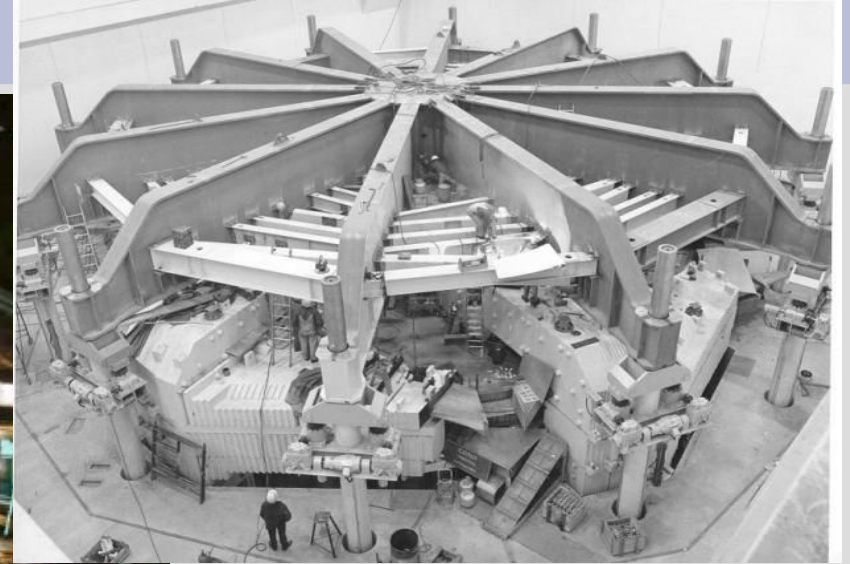
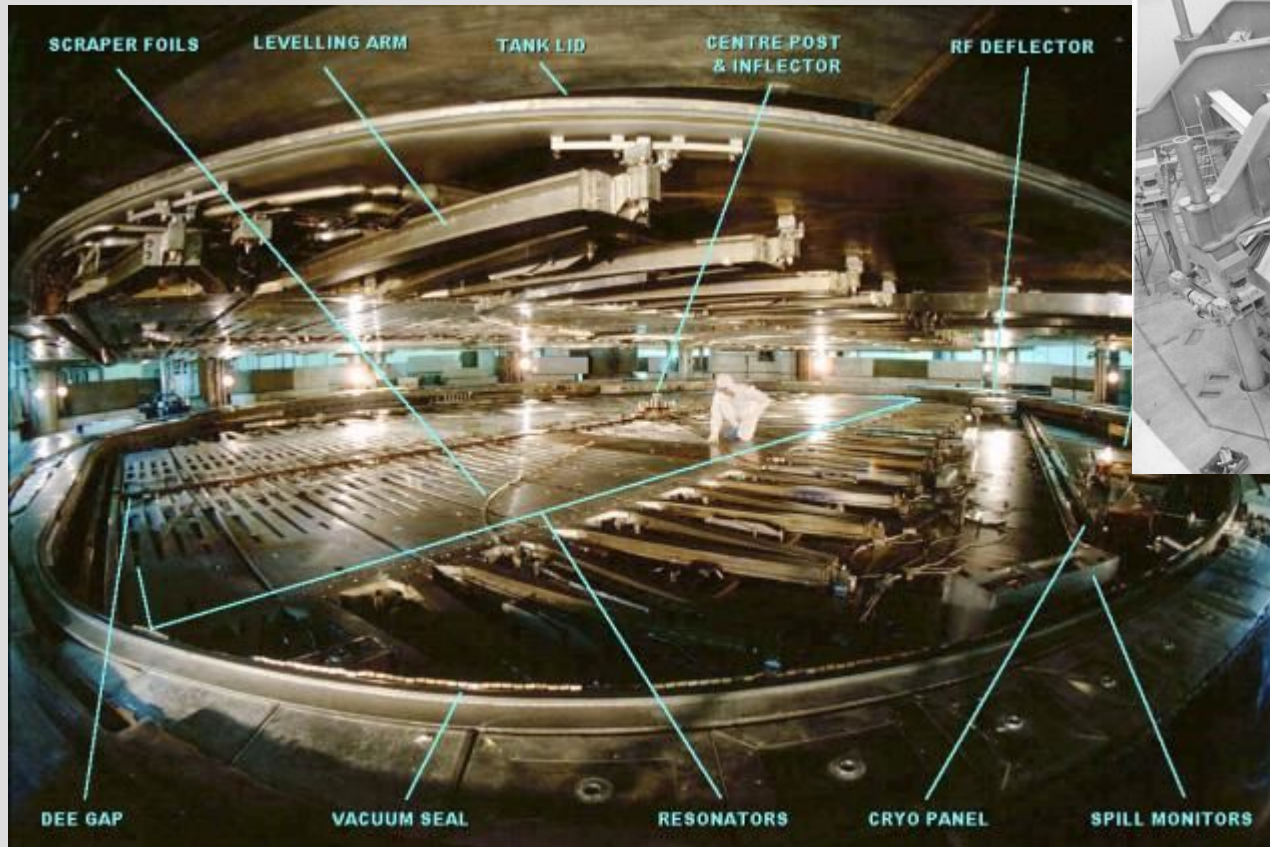


Схема циклотрона из патентной заявки Лоуренса, 1934 год.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{V}{2\pi R} = \frac{V}{2\pi \frac{mV}{qB}} = \frac{qB}{2\pi m}$$

для нерелятивистской
частицы не зависит от
скорости!!!

TRIUMF

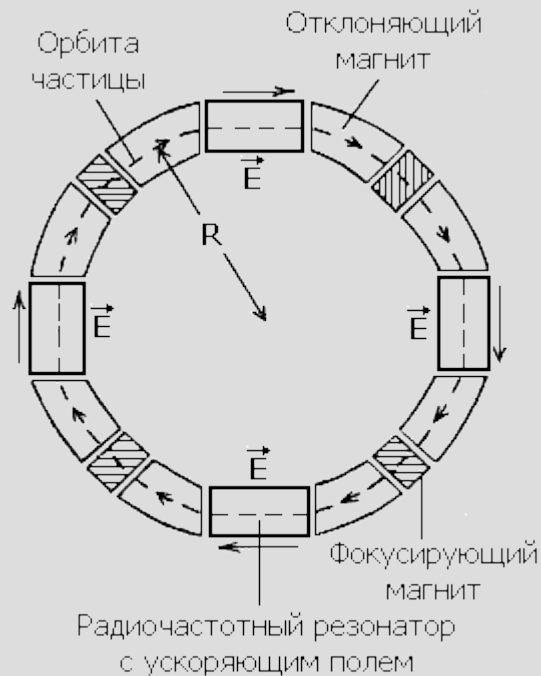


Самый большой
циклотрон

Протоны с $K=520$ МэВ

Диаметр 18 метров, поле в
зазоре 0.46 Тл

Синхротроны



Движение по фиксированной траектории

Магнитное поле и частота/фаза ускоряющего поля подстраиваются по мере роста энергии

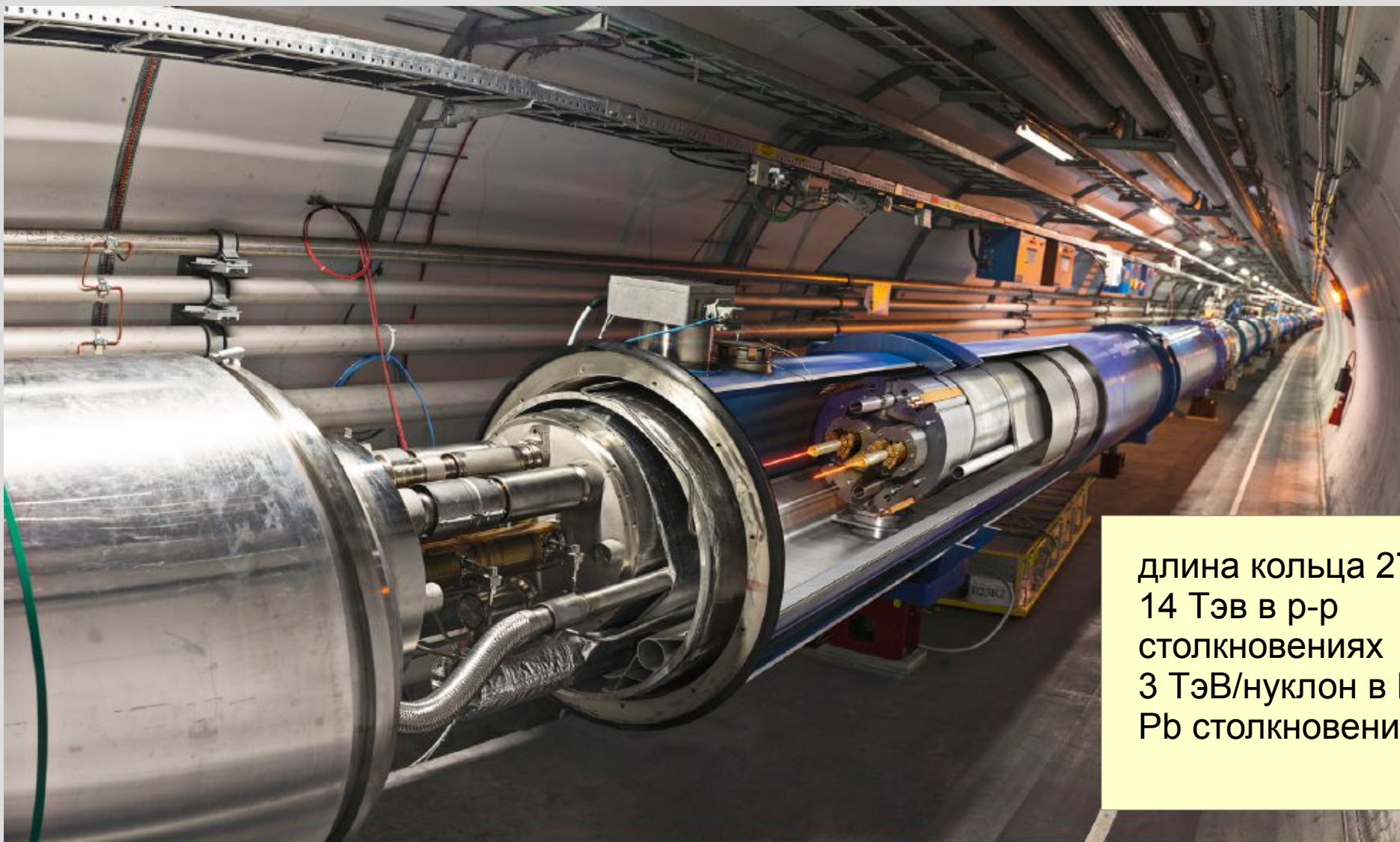
Принципиально работает импульсами (bunch)

Частицы и античастицы можно разогнать одновременно в противоположных направлениях

Одно из ограничений по энергии:
синхротронное излучение (100-200 ГэВ для электронов)

$$P \propto \frac{1}{R^2} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2$$

БАК

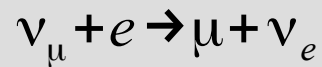
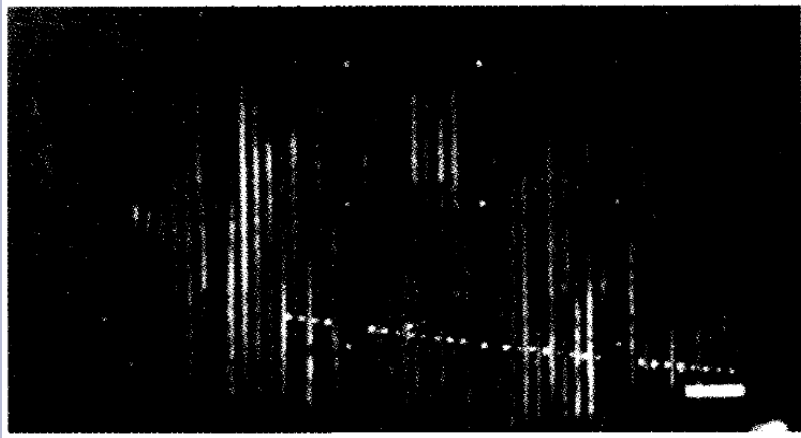


длина кольца 27 км
14 ТэВ в р-р
столкновениях
3 ТэВ/нуклон в Рb-
Рb столкновениях

Стандартная модель

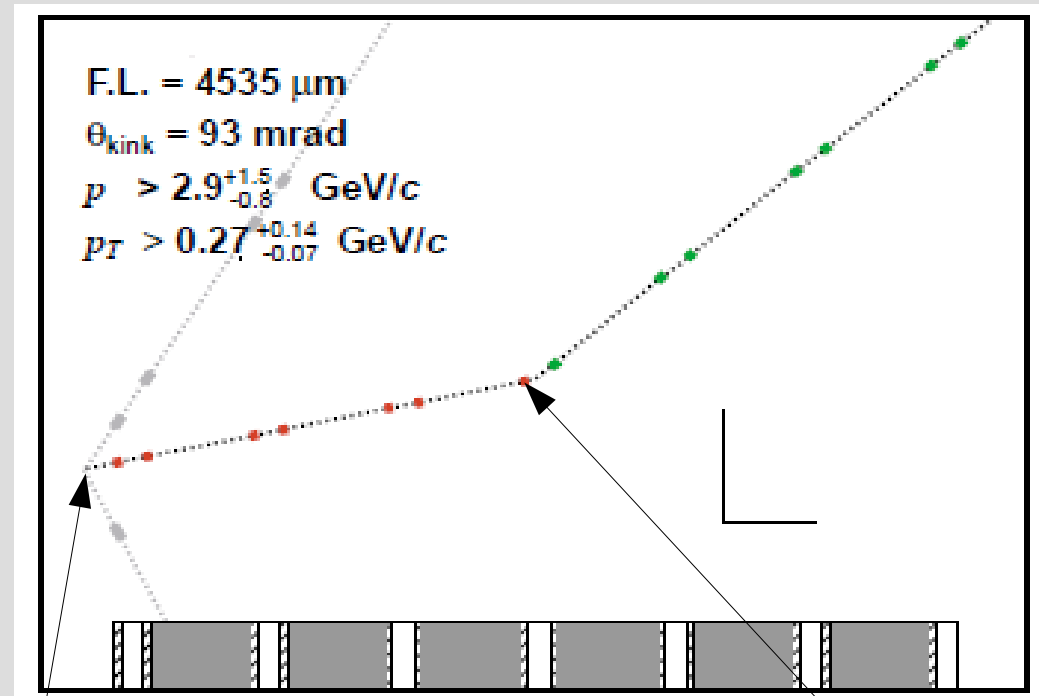
mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
LEPTONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
				GAUGE BOSONS	

Лептоны

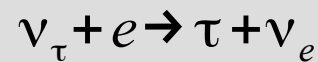


Возникновение мюона в искровой камере при поглощении мюонного нейтрино (почти горизонтальный трек). Вертикальные полосы - пластины искровой камеры. Из Нобелевской лекции Шварца

мюон: ~ 100 МэВ, 2 мксек
таон: ~ 1800 МэВ, 0.3 псек



<https://arxiv.org/ftp/hep-ex/papers/0012/0012035.pdf>

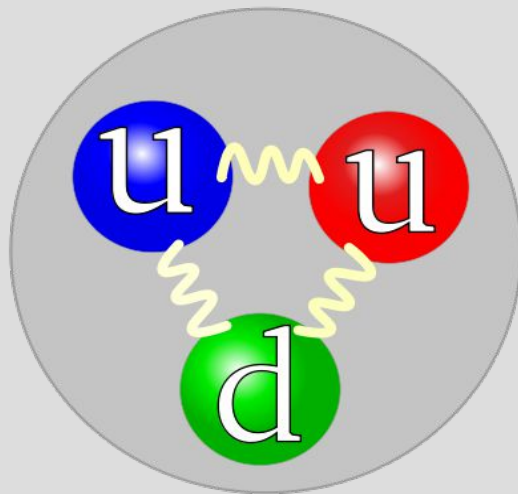
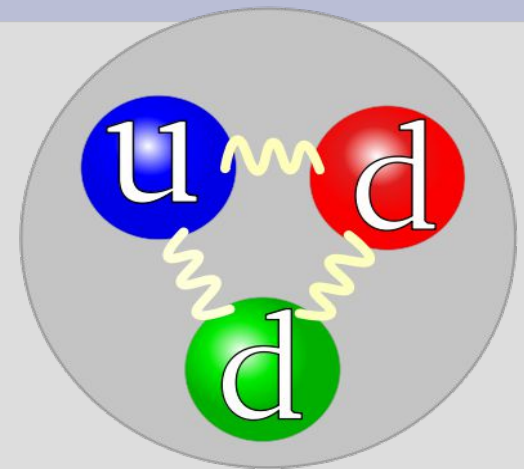


распад
тау-
лептона

Кварки, внутренняя структура нуклонов

Экспериментальные факты:

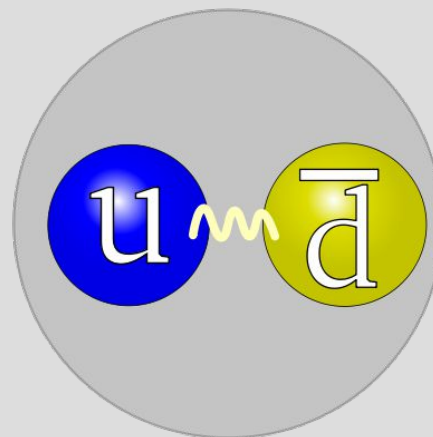
- магнитный момент нейтрона
- g-фактор протона 5.585694713(46), а не 2
- сечения рассеяния на высоких энергиях
- все тяжелые частицы описываются в кварковой модели



Два кварка (кварк+антикварк) – мезоны

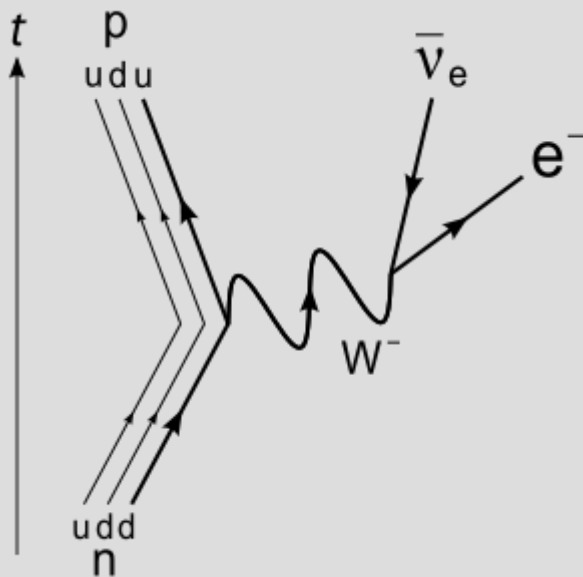
Три кварка – барионы

Экзотические, короткоживущие, но обнаруженные в экспериментах на ускорителях тетракварки и пентакварки

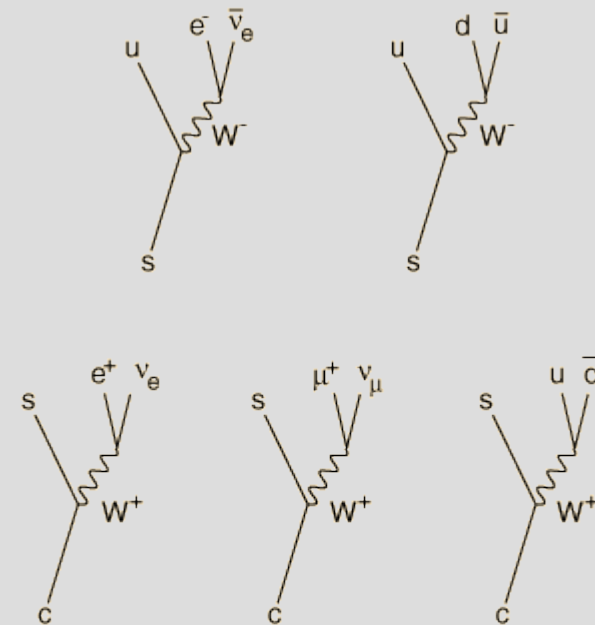


Превращения кварков (слабое взаимодействие)

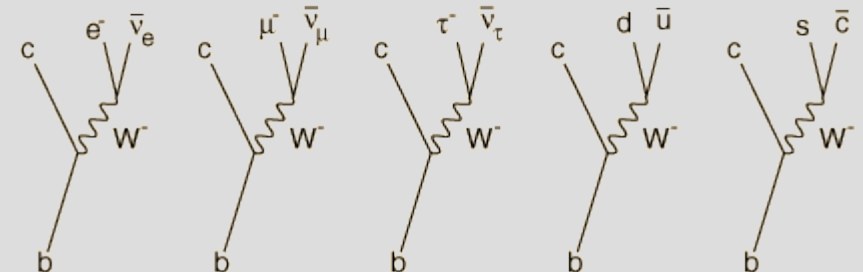
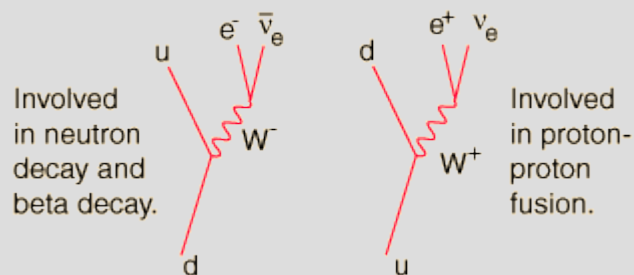
$$t \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow s \rightarrow u \leftrightarrow d$$



Feynman diagrams of quark decay by weak interaction



Weak interaction transformations of u and d quarks



Представление о цветовом заряде

Барионы со спином 3/2

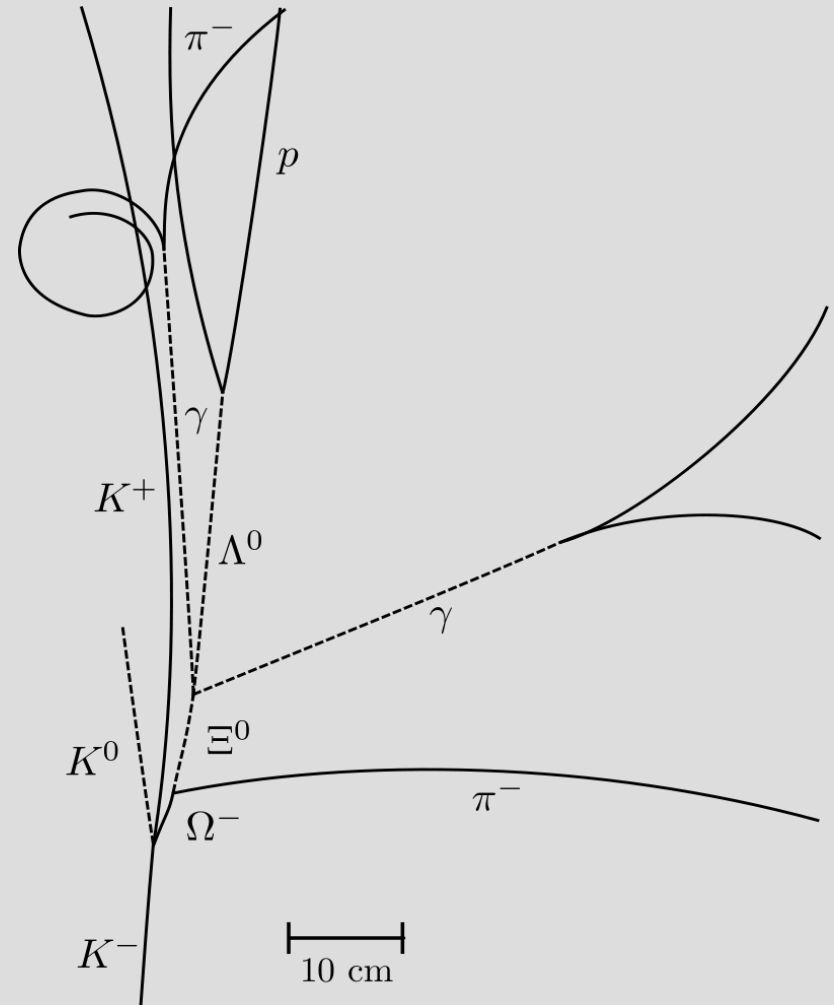
$$\Omega^{-} = (ssss)$$

$$\Delta^{++} = (uuu)$$

$$\Delta^{-} = (ddd)$$

И это основное состояние данной комбинации кварков!

Кварки- ферми-частицы!!????



Bubble chamber trace of the first observed Ω baryon event at Brookhaven National Laboratory

Представление о цветовом заряде

Барионы со спином 3/2

$$\Omega^- = (sss)$$

$$\Delta^{++} = (uuu)$$

$$\Delta^- = (ddd)$$

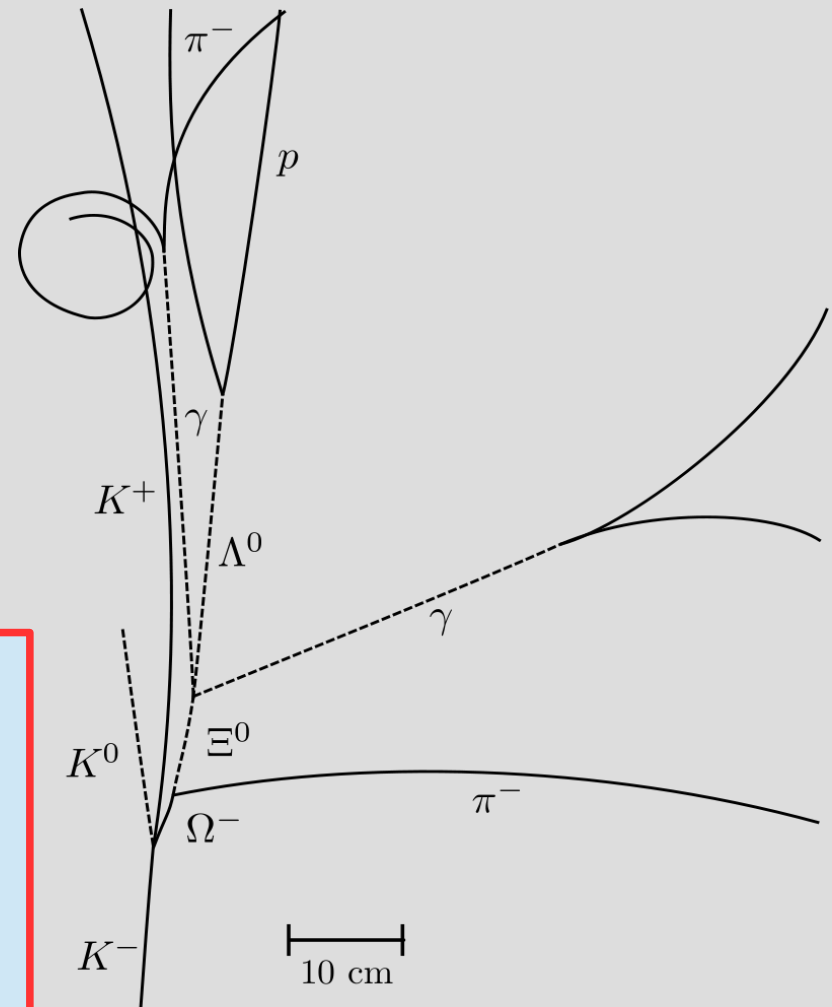
И это основное состояние данной комбинации кварков!

Кварки- ферми-частицы!!????

Есть ещё какое-то квантовое число, описывающее состояние кварка в нуклоне. Необходимо хотя бы три (а больше не нужно) значения этого квантового числа...

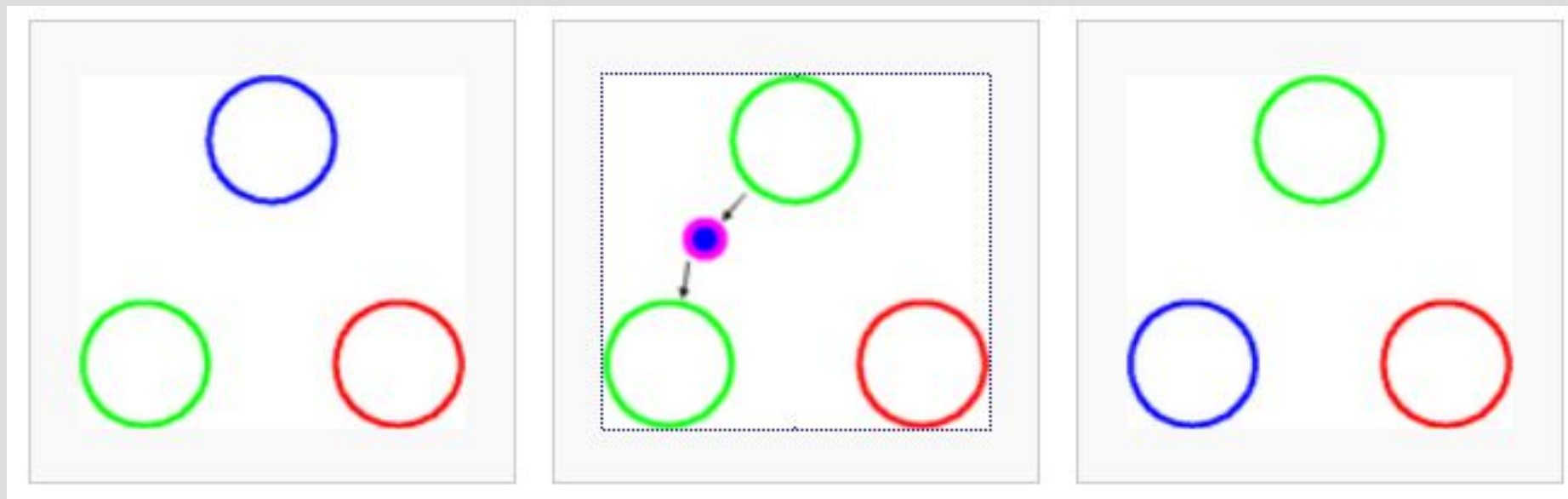
Цвет: R, G, B

... и антицвета anti-R, anti-G, anti-B



Bubble chamber trace of the first observed Ω baryon event at Brookhaven National Laboratory

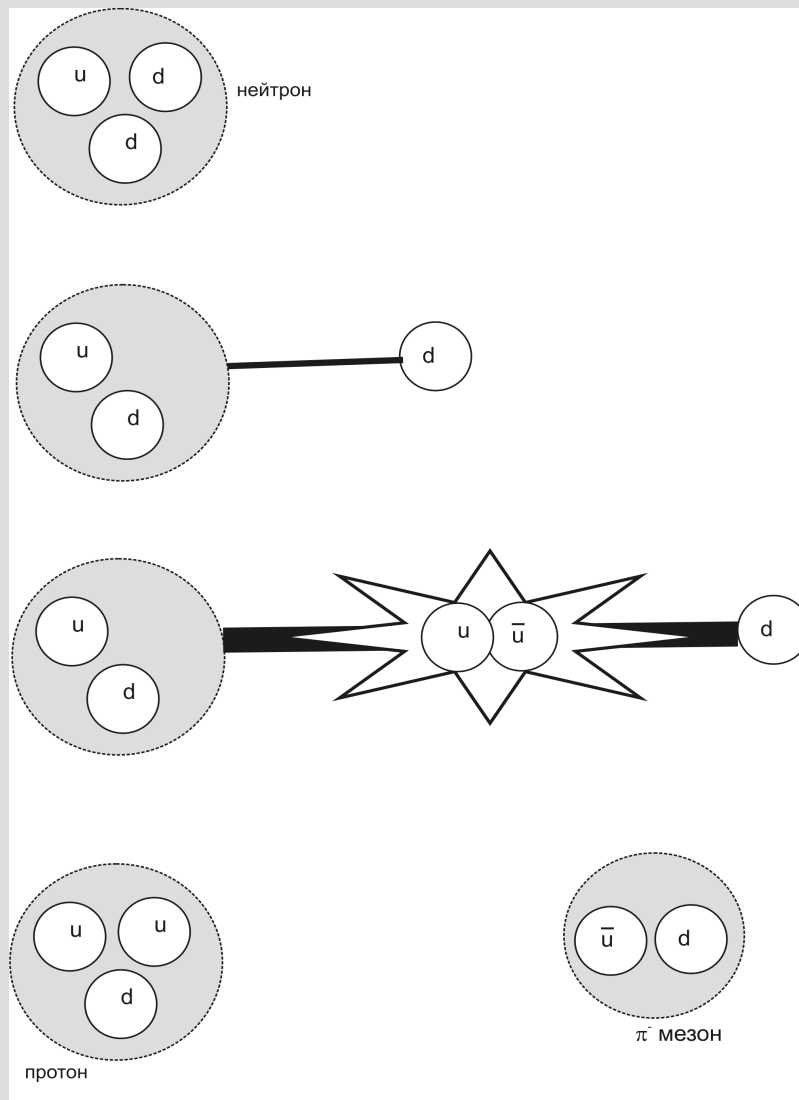
Перенос сильного взаимодействия внутри частицы: глюоны



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.

Частица в целом “бесцветная” - соответствует короткодействию ядерного взаимодействия: либо RGB, либо пары цвет-антицвет

Разрыв “глюонной трубки”



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

Бозон Хиггса

$$E = p c \quad \text{vs.} \quad E = \sqrt{(m c^2)^2 + p^2 c^2}$$

Без учёта бозона Хиггса нет причины для появления массы (и короткодействия) у переносчиков слабого взаимодействия

Упрощая: роль взаимодействия Хиггса (взаимодействия с некоторым полем) – появление конечной “цены” создания частицы.

Примеры похожего механизма:

фотон в волноводе

фотон в сверхпроводнике

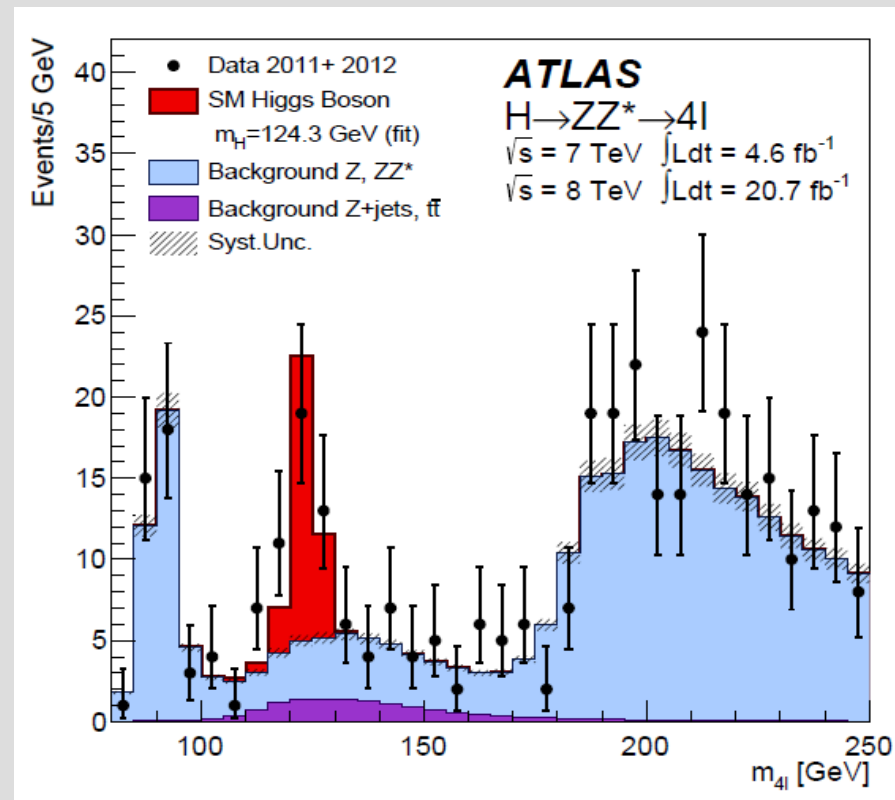
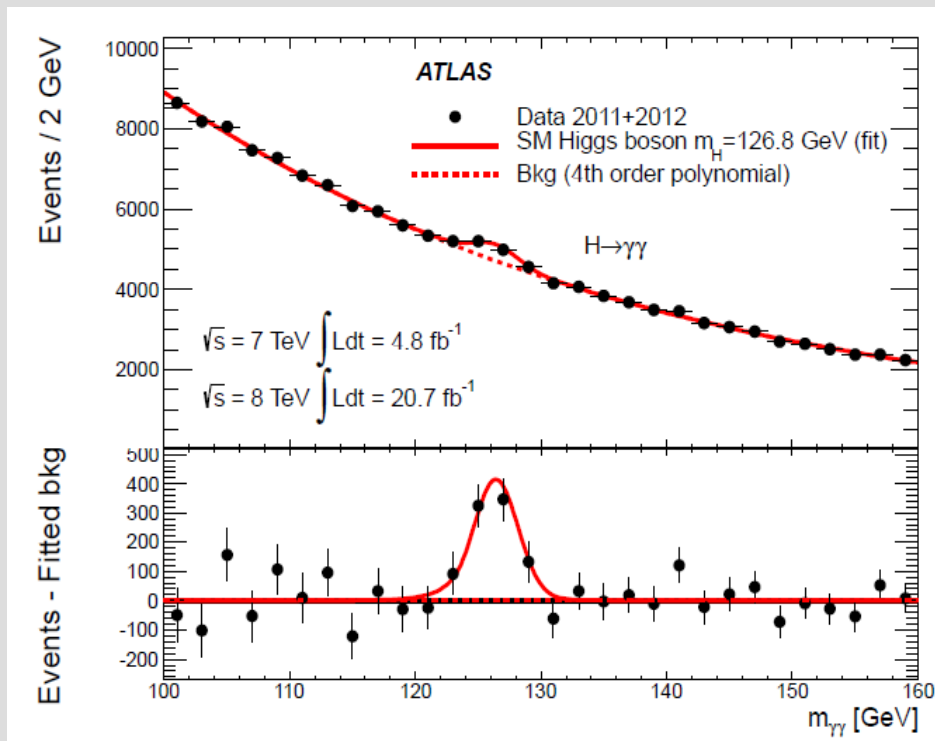
шарик на упругой пленке

Наблюдение бозона Хиггса

Decay channel	Mass resolution
$H \rightarrow \gamma\gamma$	1-2%
$H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell'^+ \ell'^-$	1-2%
$H \rightarrow W^+ W^- \rightarrow \ell^+ \nu_\ell \ell'^- \bar{\nu}_{\ell'}$	20%
$H \rightarrow b\bar{b}$	10%
$H \rightarrow \tau^+ \tau^-$	15%

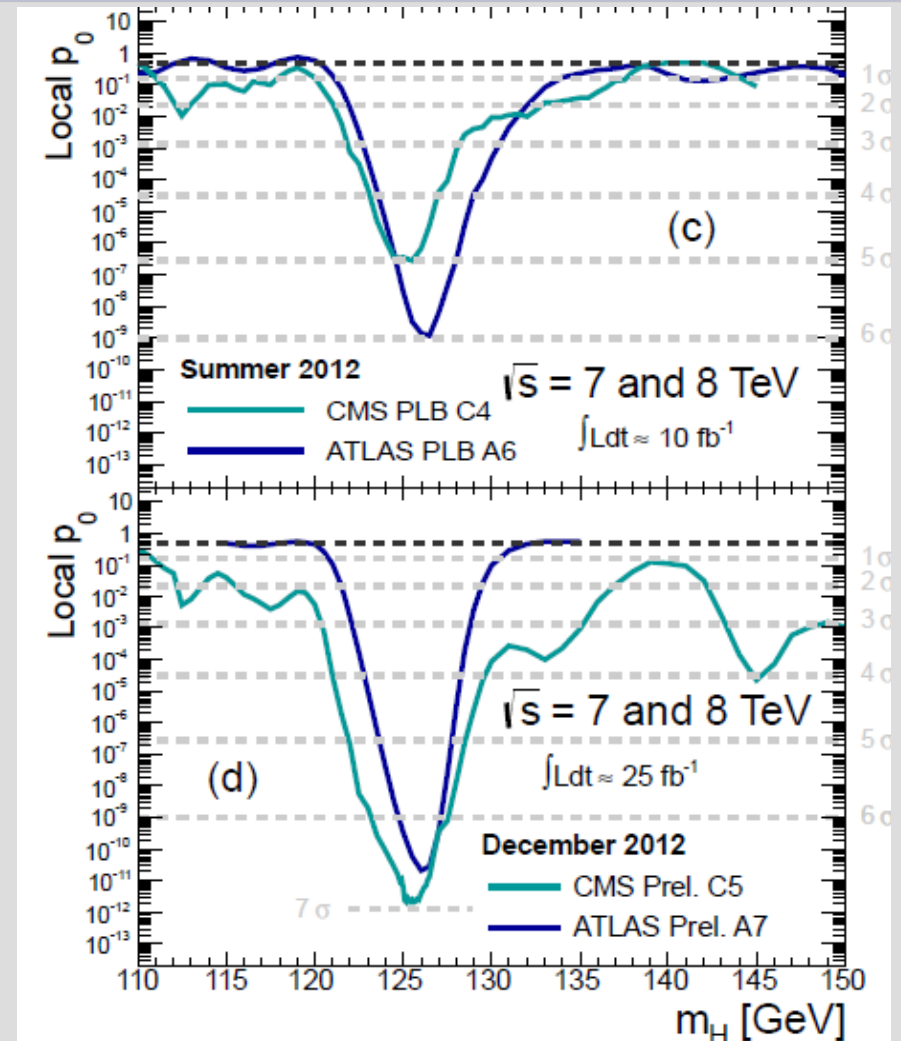
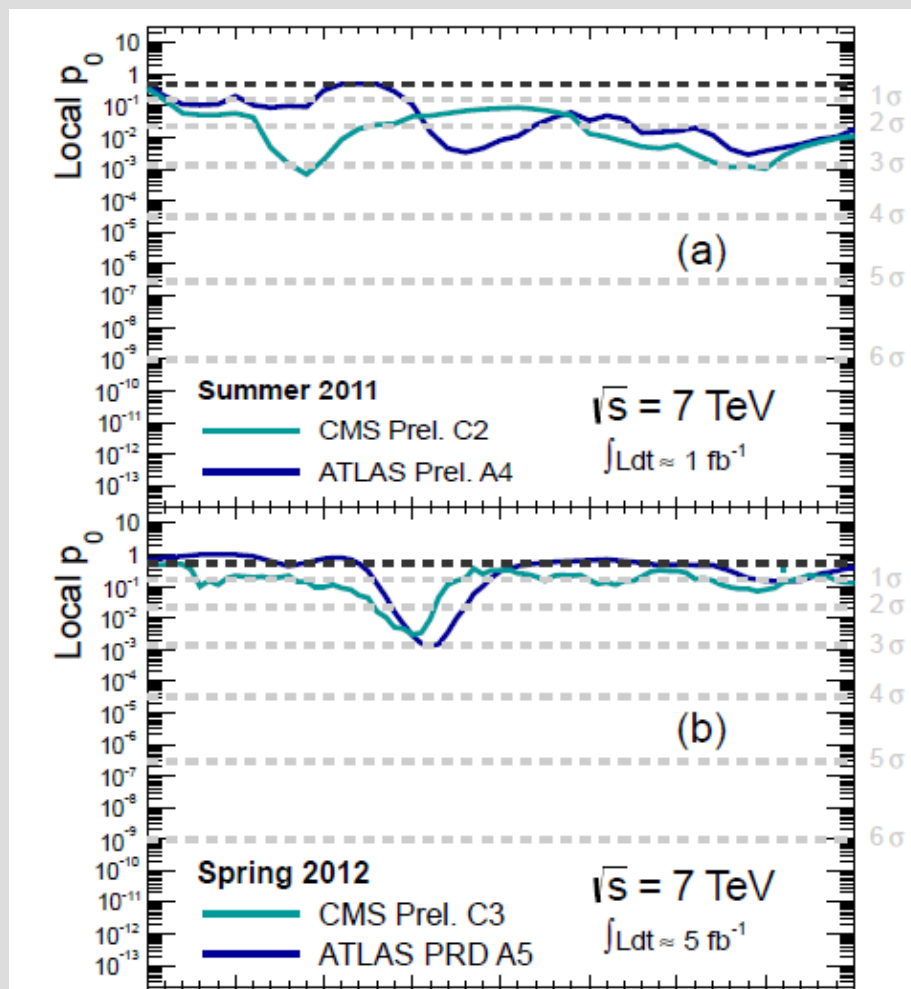
точность определения массы бозона Хиггса для разных процессов распада.

Эксперимент...



Слева: статистика двухфотонных распадов бозона Хиггса. Справа: статистика четырёхлептонных распадов бозона Хиггса.

Накопление статистики



Накопление статистики распадов бозона Хиггса по мере развития экспериментов на Большом адронном коллайдере в лета 2011 по декабрь 2012 года.

Задачи домашнего задания

Задача 1

Какие из приведенных реакций возможны, а какие невозможны (или маловероятны)? Почему?

1. $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$
2. $n \rightarrow p + \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$
3. $p \rightarrow \mu^+ + \pi^0 + \nu_\mu$
4. $\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$
5. $p + \tilde{\Sigma}^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+$

Кварковый состав частиц может быть найден, например, на странице <http://nuclphys.sinp.msu.ru/elp/elp01.htm>