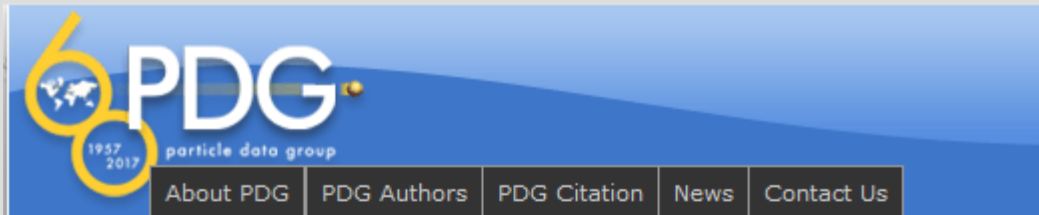


Лекция 13

Ядерные реакции, сечения реакций. Элементарные частицы. Кварки.

«Зоопарк» элементарных частиц



The Review of Particle Physics (2018)

M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018).



pdgLive - Interactive Listings

Summary Tables

Reviews, Tables, Plots

Particle Listings

Search

Order: Book

Download or Print: Book, B

Previous Editions (& Errata) 1957-2017

Errata in current edition

Figures in reviews

Mirror Sites

Particle name	Symbol	Quark content	Rest mass (MeV/c ²)
proton ^[2]	$p / p^+ / N^+$	uud	938.272 046(21) ^[K]
neutron ^[2]	$n / n^0 / N^0$	udd	939.565 379(21) ^[K]
Lambda ^[10]	Λ^0	uds	1 115.683 ± 0.006
charmed Lambda ^[11]	Λ_c^+	udc	2 286.46 ± 0.14
bottom Lambda ^[12]	Λ_b^0	udb	5 619.4 ± 0.6
Sigma ^[12]	Σ^+	uus	1 189.37 ± 0.07
Sigma ^[14]	Σ^0	uds	1 192.642 ± 0.024
Sigma ^[15]	Σ^-	dds	1 197.449 ± 0.030
charmed Sigma ^[16]	Σ_c^+	uuc	2 453.98 ± 0.16
charmed Sigma ^[16]	Σ_c^0	udc	2 452.9 ± 0.4
charmed Sigma ^[16]	Σ_c^-	ddc	2 453.74 ± 0.16
bottom Sigma ^[17]	Σ_b^+	uub	5 811.3 ^{+0.9} _{-0.8} ± 1.7
bottom Sigma [†]	Σ_b^0	udb	Unknown
bottom Sigma ^[17]	Σ_b^-	ddb	5 815.5 ^{+0.6} _{-0.5} ± 1.7
χ^0 ^[18]	Ξ^0	uss	1 314.86 ± 0.20
χ^0 ^[18]	Ξ^-	ds s	1 321.71 ± 0.07
charmed χ ^[20]	Ξ_c^+	usc	2 467.8 ^{+0.4} _{-0.6}
charmed χ ^[21]	Ξ_c^0	dsc	2 470.88 ^{+0.34} _{-0.80}
charmed χ prime ^[22]	Ξ_c^+	usc	2 575.6 ± 3.1

Надежный « официальный путеводитель»:

Particle Data Group

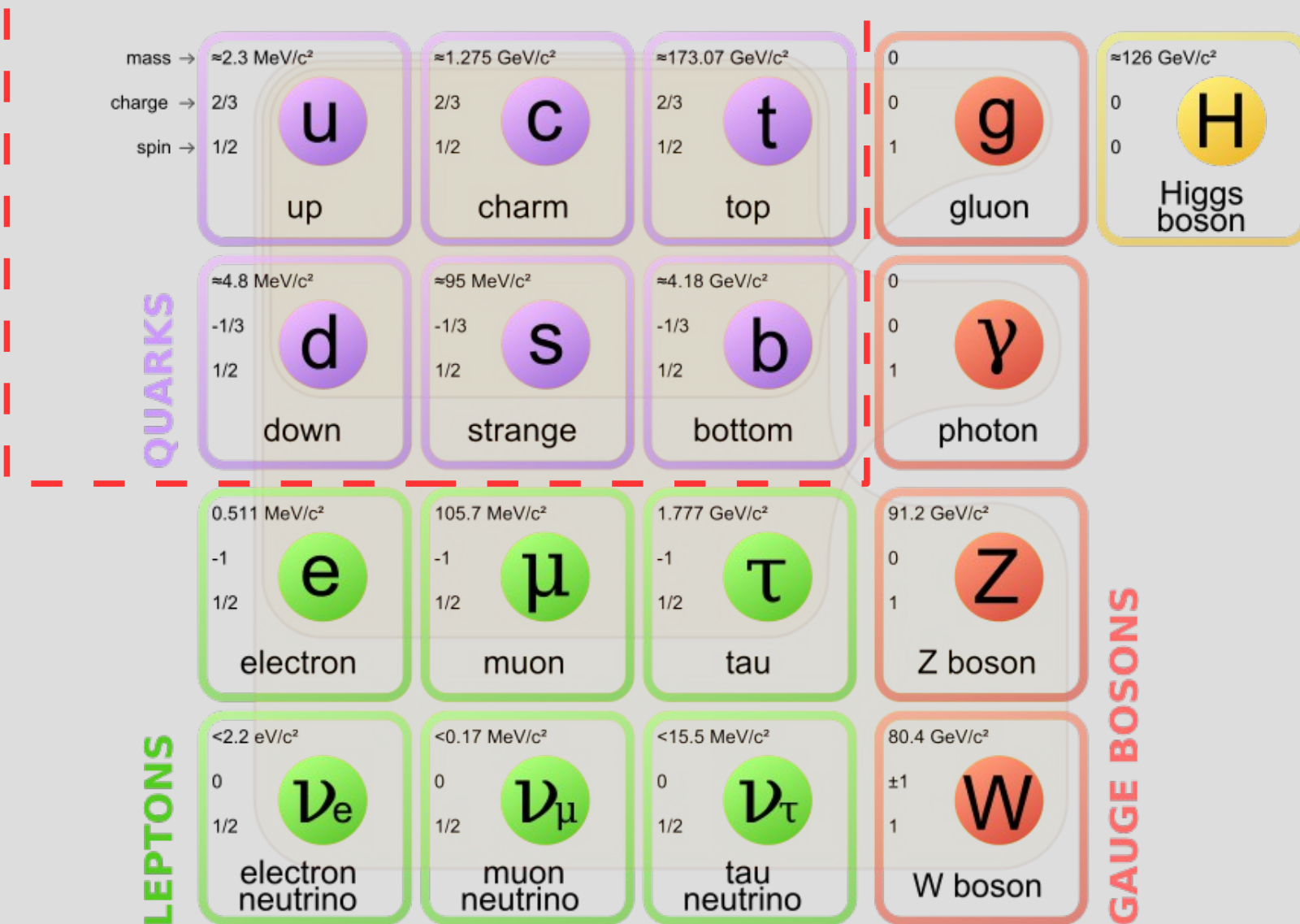
<http://pdg.lbl.gov/>

Удобный сайт:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/parcon.html>

Часть 1. Частицы Стандартной модели

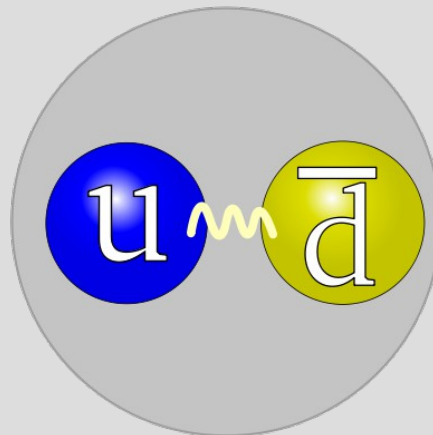
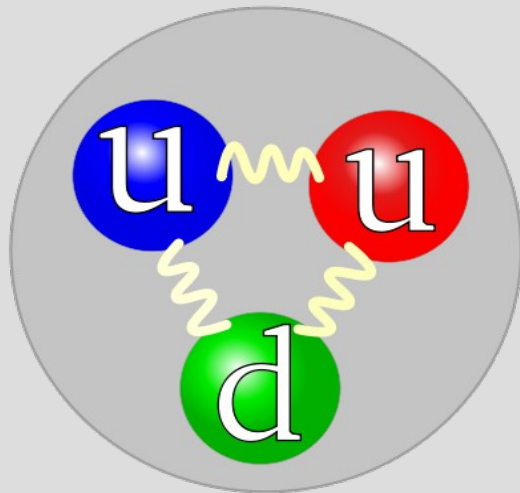
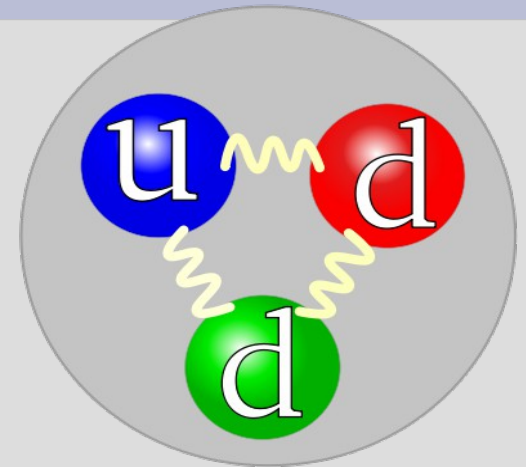
Сегодня — только о них



Кварки, внутренняя структура нуклонов

Экспериментальные факты:

- Магнитный момент нейтрона
- g-фактор протона 5.585694713(46), а не 2
- Сечения рассеяния на высоких энергиях
- Эквивалентность протона и нейтрона для ядерных сил
- 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

Представление о цветовом заряде

Барионы со спином 3/2

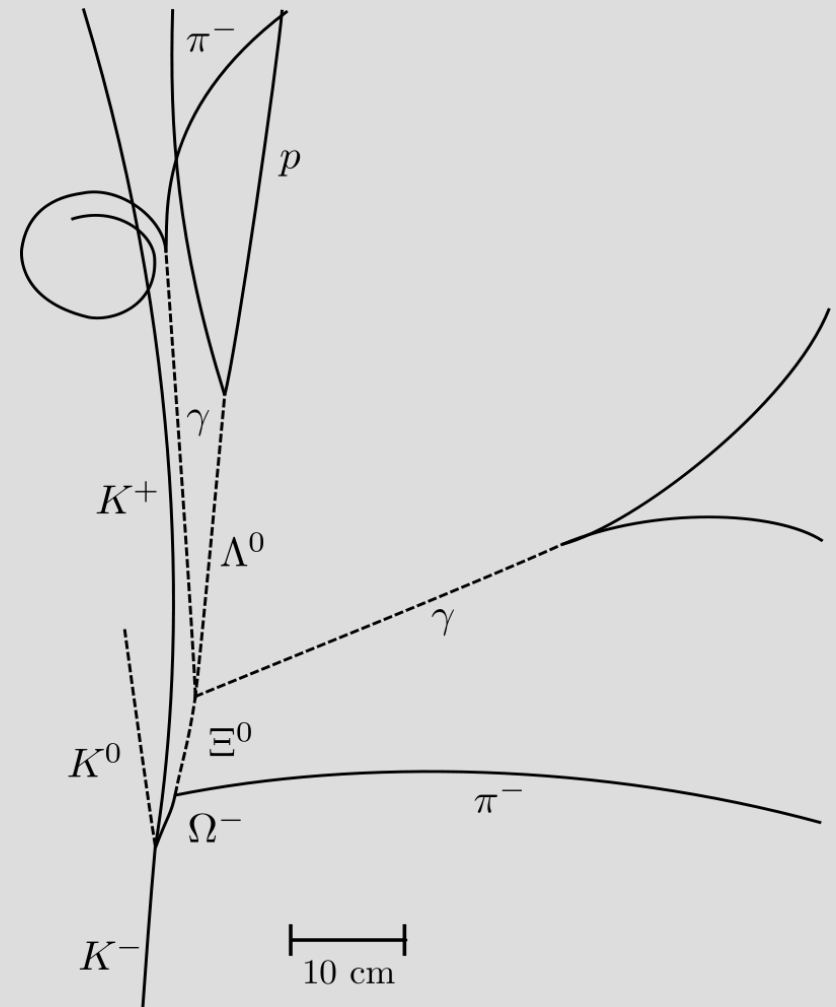
$$\Omega^- = (sss)$$

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

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

И это основное состояние данной комбинации кварков!

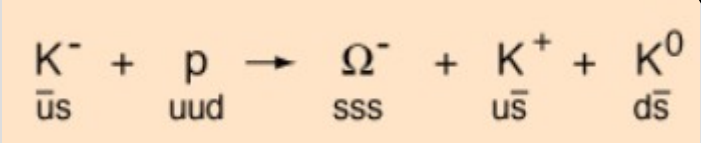
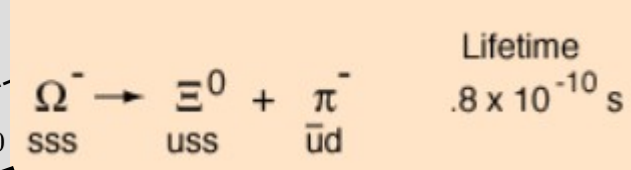
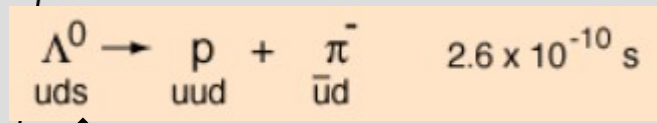
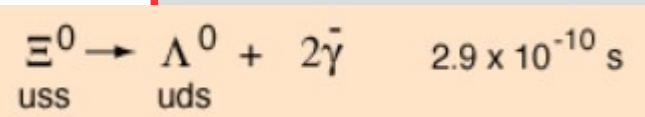
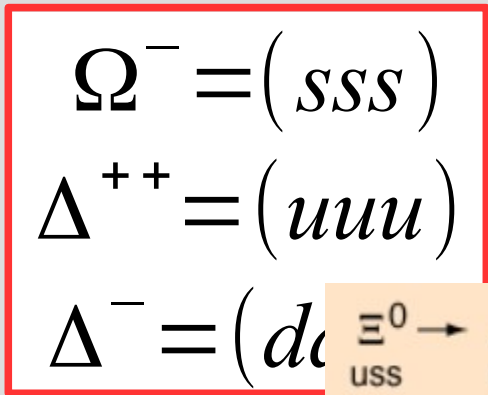
Кварки ($S=1/2$) - ферми-частицы!!????



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

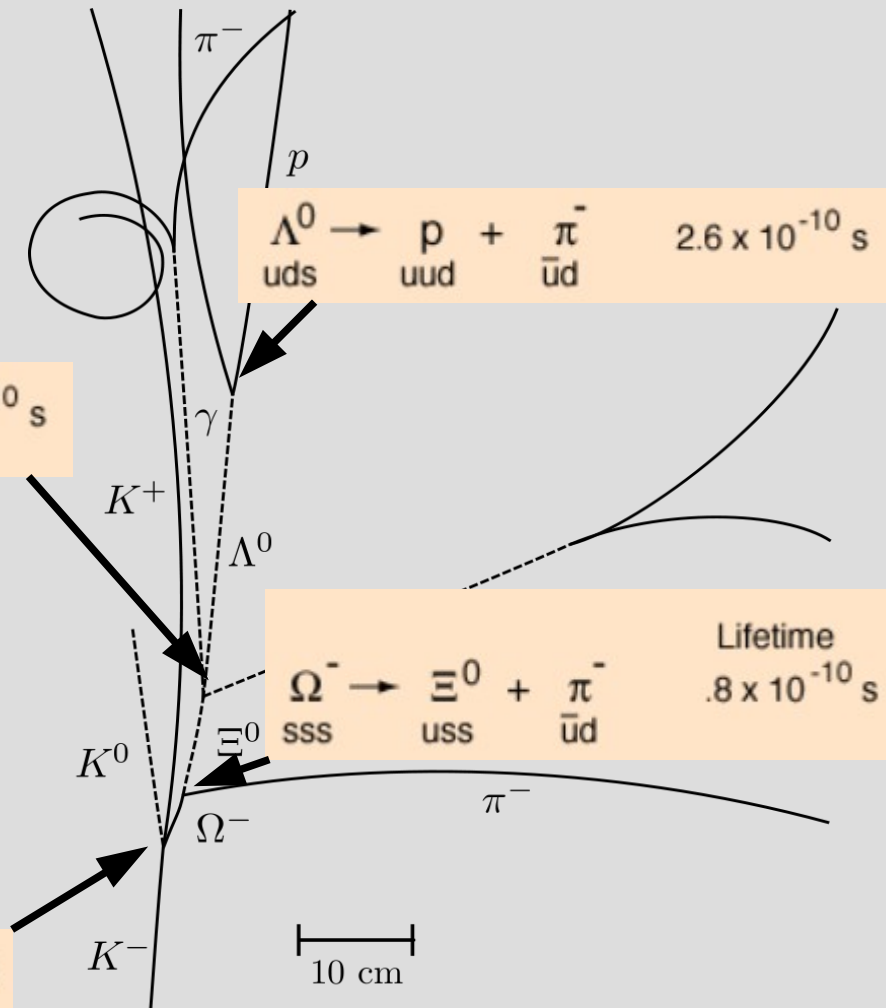
Представление о цветовом заряде

Барионы со спином 3/2



И это основное состояние данной комбинации кварков!

Кварки (S=1/2) - ферми-частицы!!????



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

Представление о цветовом заряде

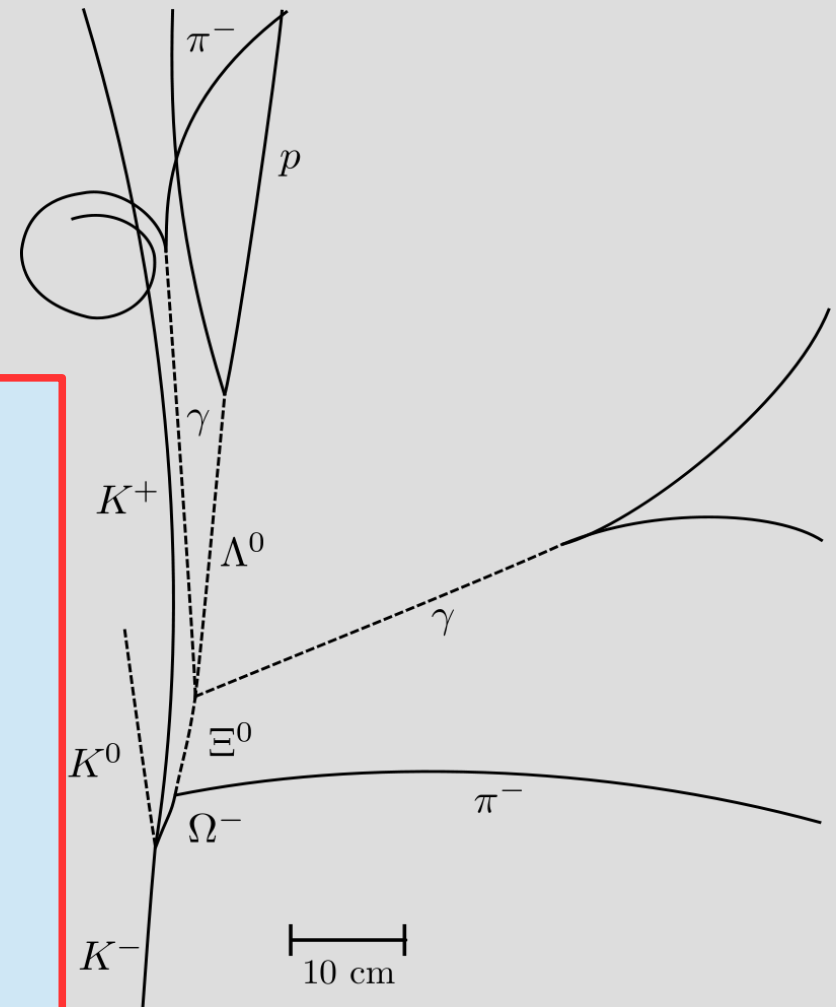
Барионы со спином 3/2

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

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

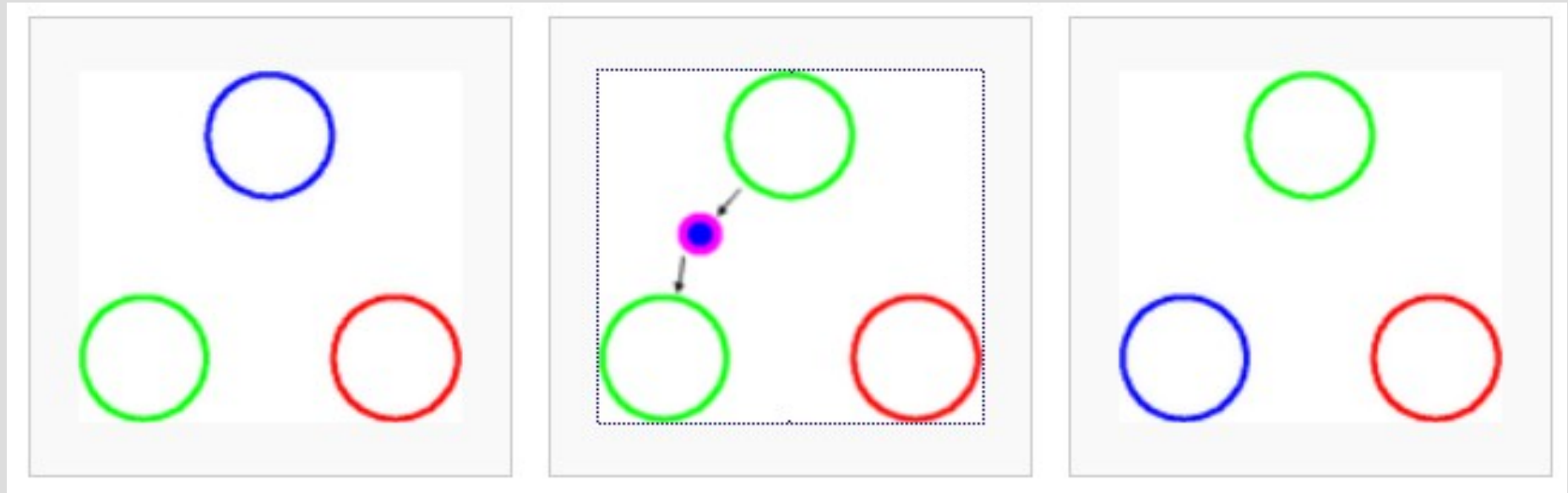
Есть ещё какое-то квантовое число, описывающее состояние кварка в нуклоне. Необходимо хотя бы три (а больше не нужно) значения этого квантового числа...

«Цвет»: R, G, B
... и «антицвет» anti-R, anti-G, anti-B



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

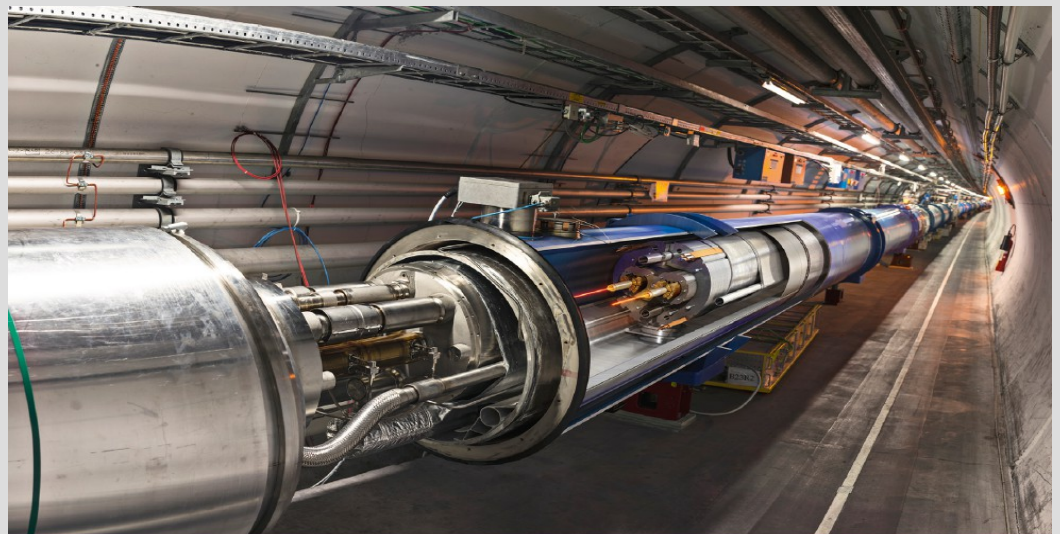
Перенос сильного взаимодействия внутри частицы: ГЛЮОНЫ



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 все три цвета RGB, либо пары цвет-антицвет

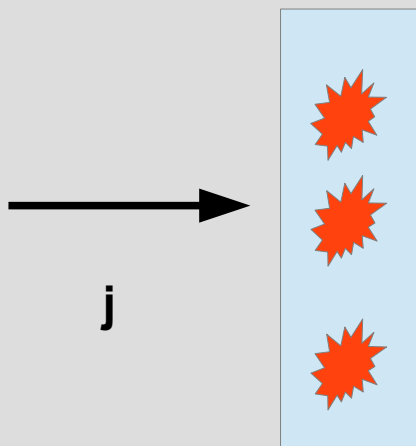
Часть 2. «Инструменты» физики частиц



CERN Brochure, 2017

Сечение реакции

Покоящаяся мишень

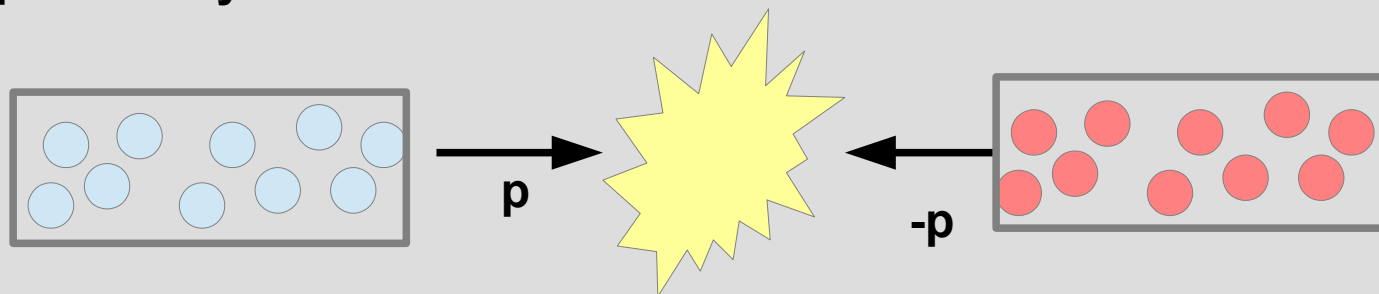


число реакций (нужного типа) в единицу времени

$$\propto j (n S dx) \sigma$$

“эффективная площадь”,
в ядерной физике удобная
единица барн, $1\text{бн}=10^{-24}\text{ см}^2$

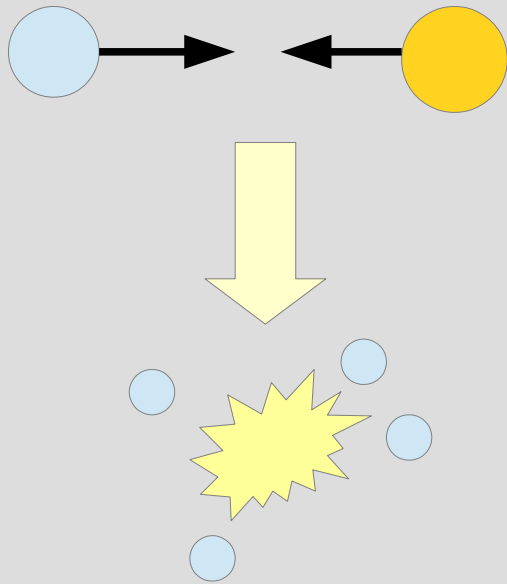
Встречные пучки



Число
реакций: $\propto \frac{N_A \times N_B}{A} \sigma$

$N_{A,B}$ – число частиц в импульсе, A – сечение пучка

Порог реакции (система Ц.М.=встречные пучки)

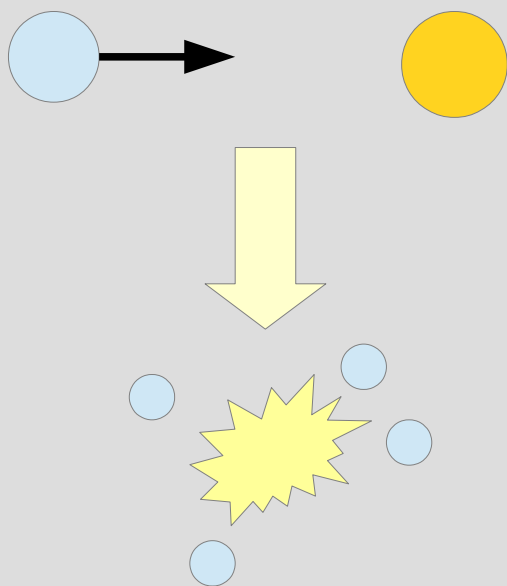


Минимальная энергия – если в системе центра масс продукты реакции покоятся

$$\begin{pmatrix} mc^2 + T \\ pc \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} mc^2 + T \\ -pc \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Mc^2 \\ 0 \end{pmatrix}$$
$$2(mc^2)^2 + 2(mc^2 + T)^2 + 2(pc)^2 = (Mc^2)^2$$
$$E = mc^2 + T = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2} \Rightarrow$$
$$(pc)^2 = (mc^2 + T)^2 - (mc^2)^2$$

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

Порог реакции (лабораторная с.к.=неподвижная мишень)



Минимальная энергия – если в лабораторной с.к. продукты реакции движутся как целое

$$\begin{pmatrix} m_1 c^2 + T \\ pc \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_2 c^2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M c^2 \\ pc \end{pmatrix}$$

$$(m_1 c^2)^2 + (m_2 c^2)^2 + 2(m_1 c^2 + T)m_2 c^2 = (M c^2)^2$$

$$T = \frac{(M c^2)^2 - (m_1 c^2)^2 - (m_2 c^2)^2}{2 m_2 c^2} - m_1 c^2$$

для $m_1 = m_2$

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

В опыте с неподвижной мишенью пороговая энергия выше, но больше гибкость в выборе мишени.

$$\frac{T_{\text{пок}}}{T_{\text{встр}}} = \frac{M^2 - 4m^2}{2m(M - 2m)} = \frac{M}{2m} + 1 > 2$$

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	???

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

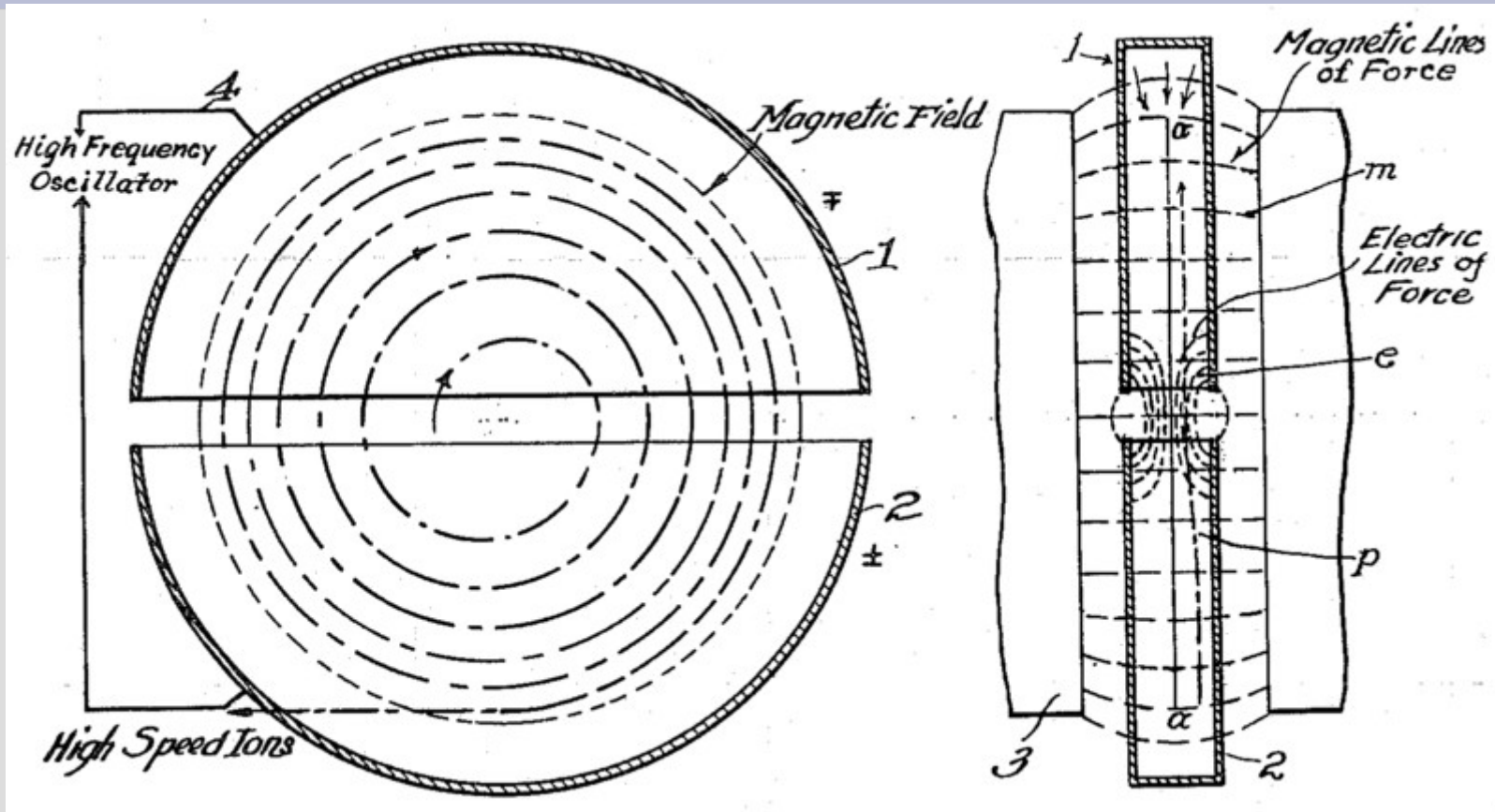
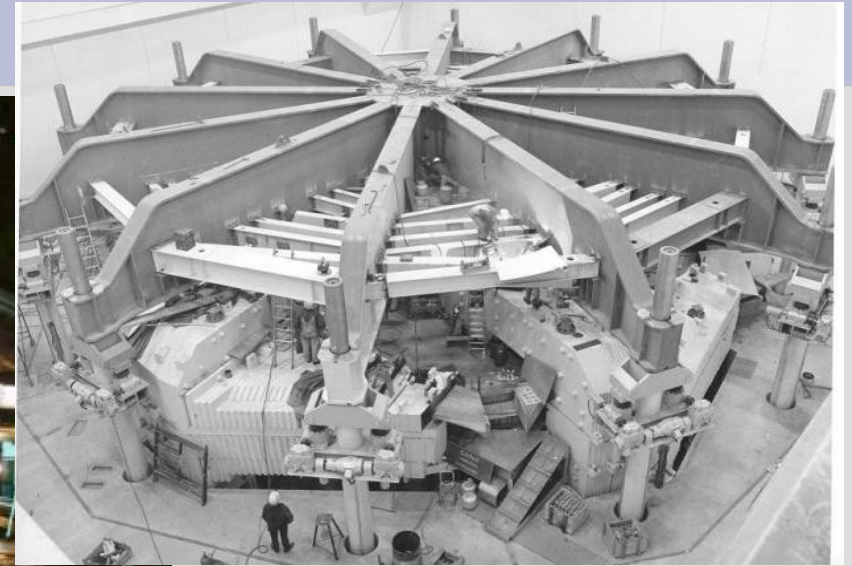
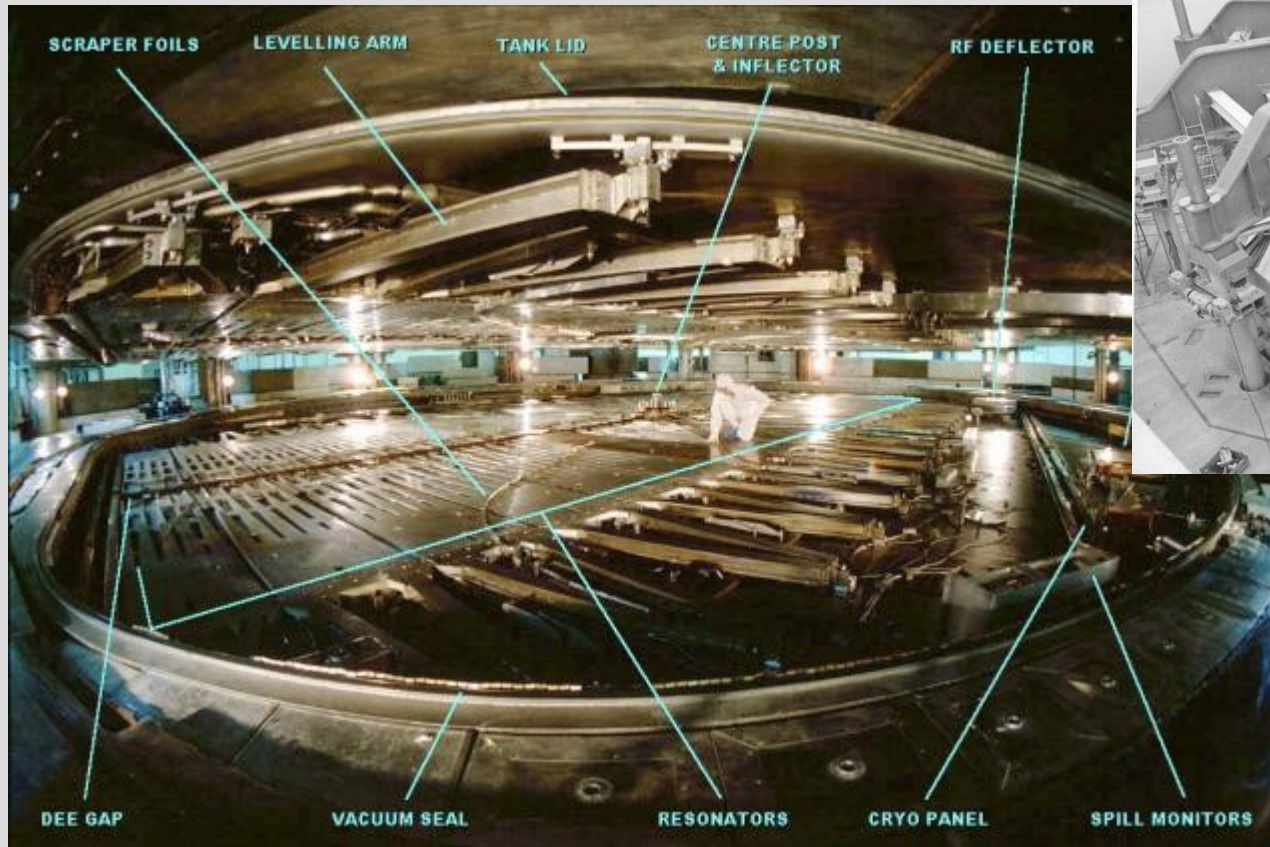


Схема циклотрона из патентной заявки Лоуренса, 1934 год.

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

для нерелятивистской
частицы не зависит от
скорости!!!

TRIUMF

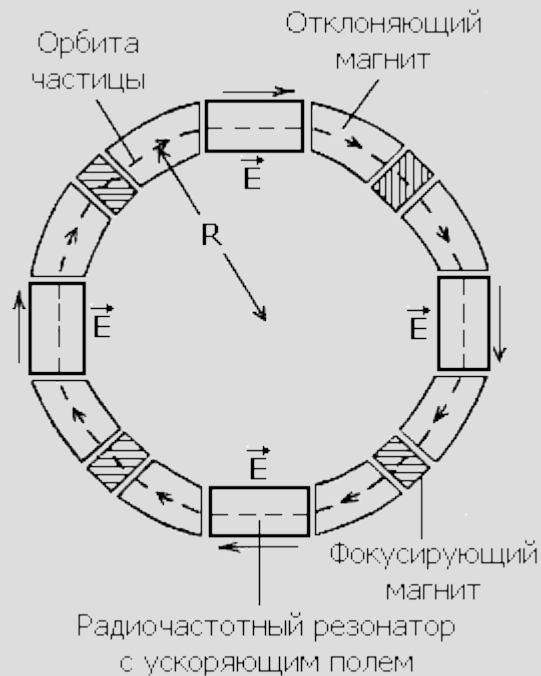


Самый большой
циклотрон

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

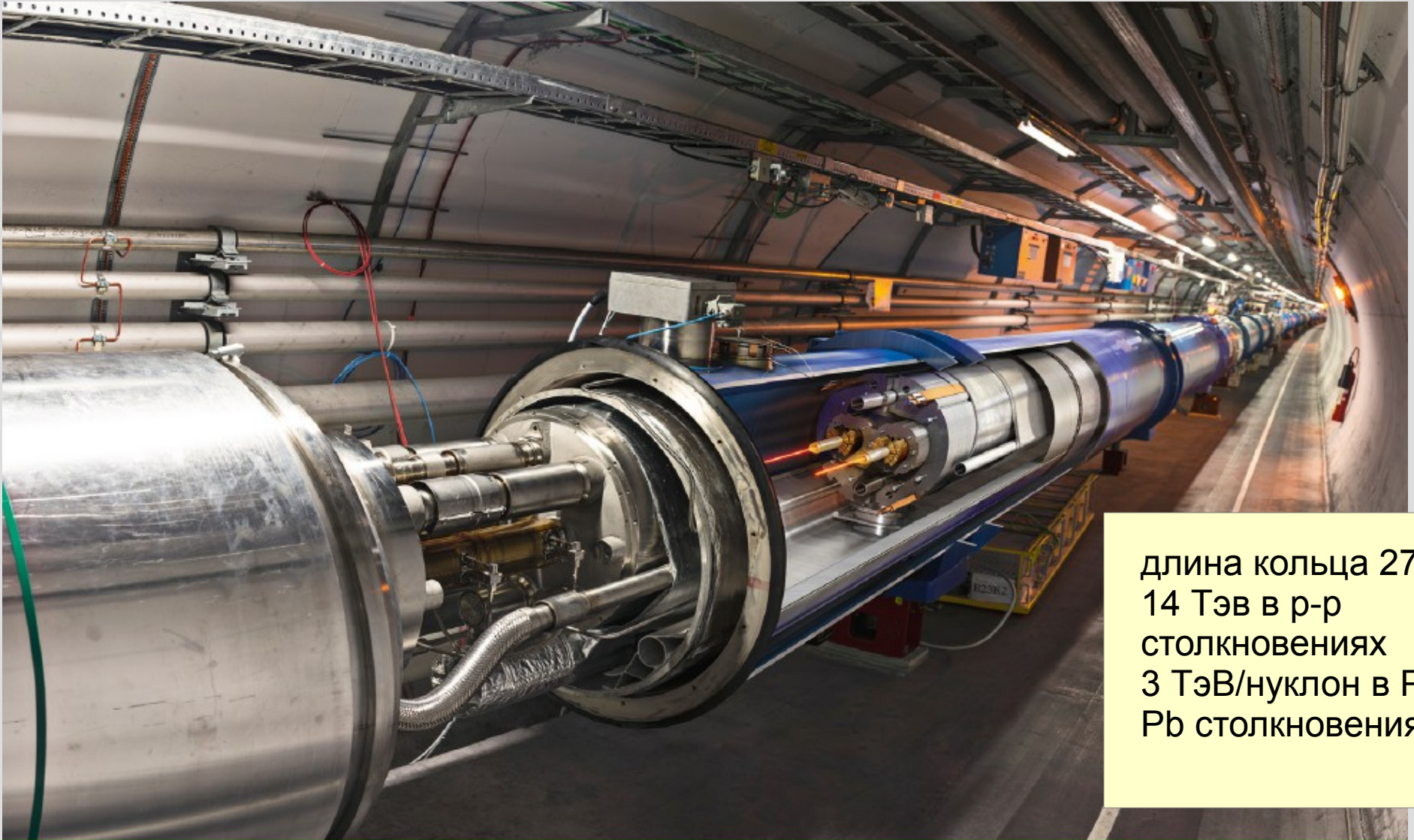
Принципиально работает импульсами (bunch)

Частицы и античастицы можно разогнать одновременно в противоположных направлениях

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

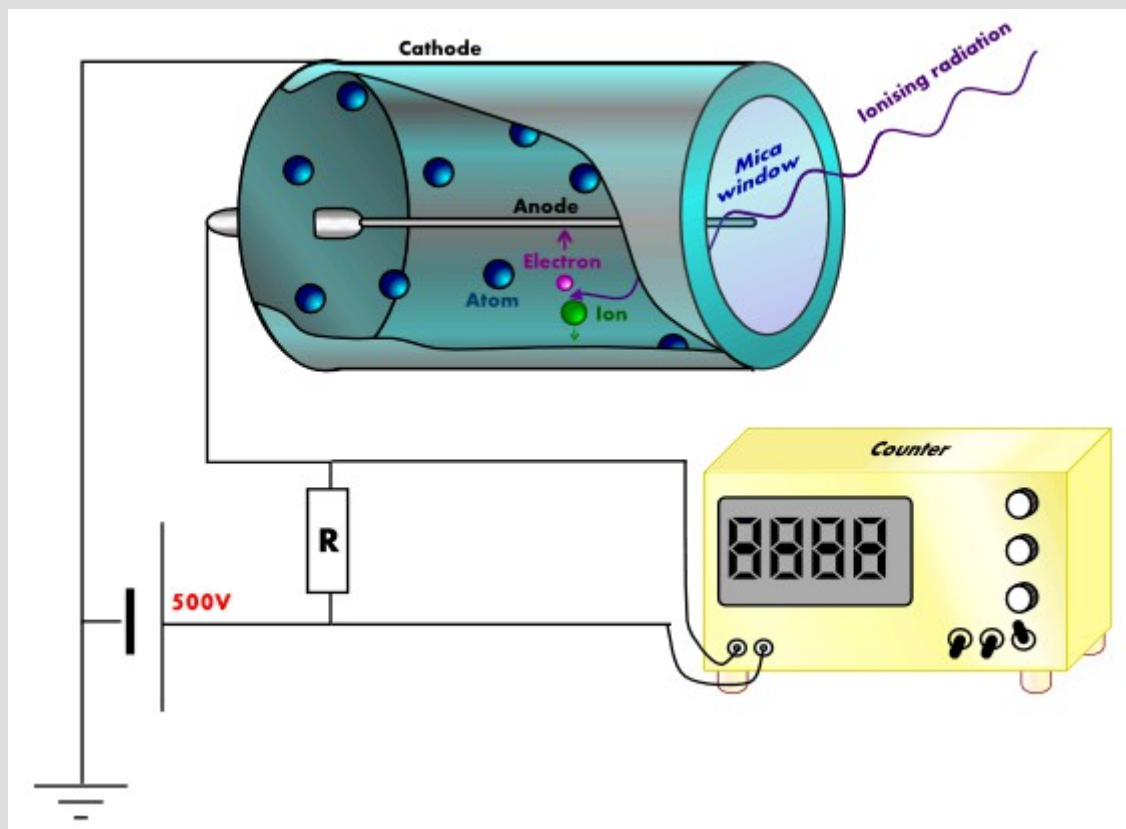
$$P \propto \frac{1}{R^2} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2$$

БАК



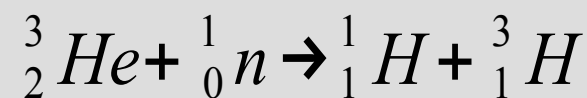
длина кольца 27 км
14 ТэВ в р-р
столкновениях
3 ТэВ/нуклон в Рb-
Рb столкновениях

Счётчик Гейгера



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

Для нейтронов наполняется
гелием-3



Камера Вильсона



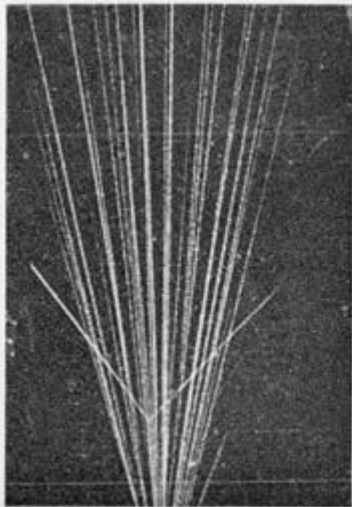
Wilson Chamber Demo, <http://www.darvill.clara.net/mydown.htm>



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



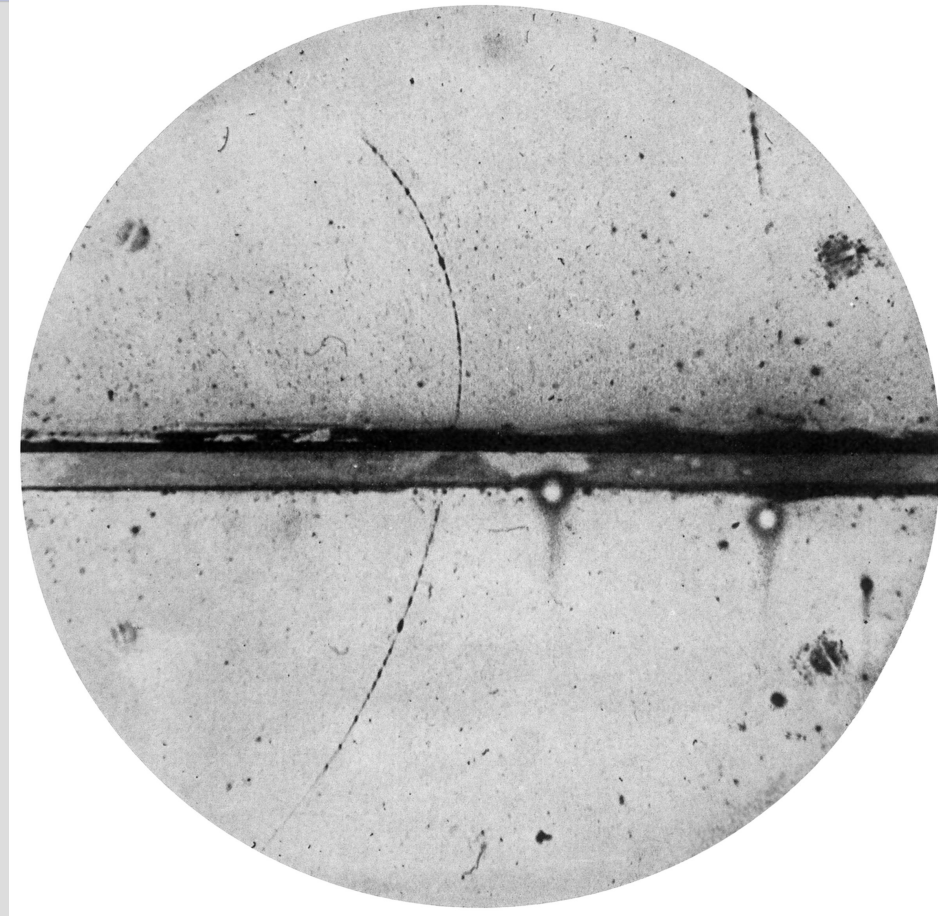
Alpha particle strikes helium nucleus and they part at right angles (Blackett)



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

Ранние фотографии в камере Вильсона (получены Блэккеттом). 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.

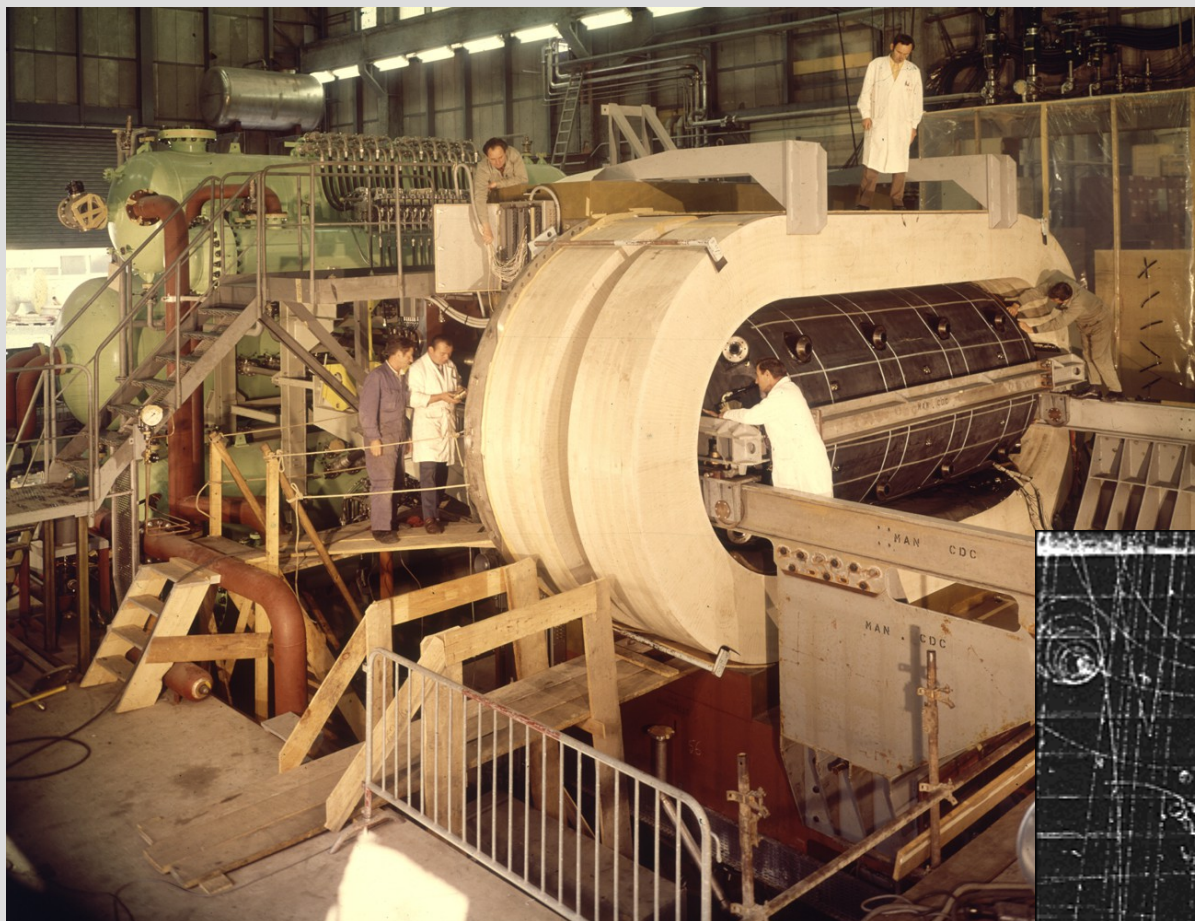
Historical tracks of alpha particles by Blackett,
<http://www.courtauld.ac.uk/researchforum/events/2011/spring/ShowsOfLondon.shtml>



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)

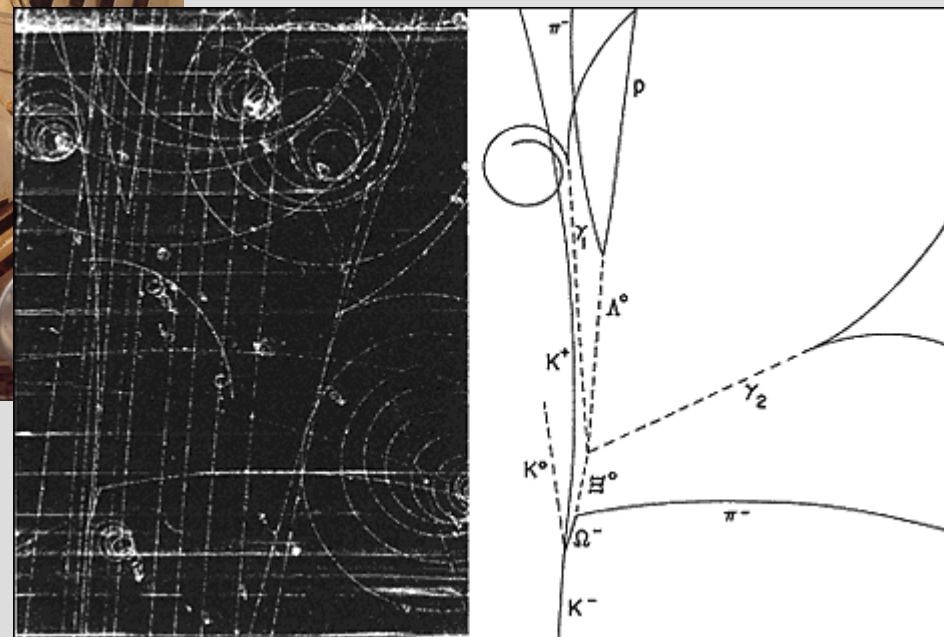
Пузырьковая камера



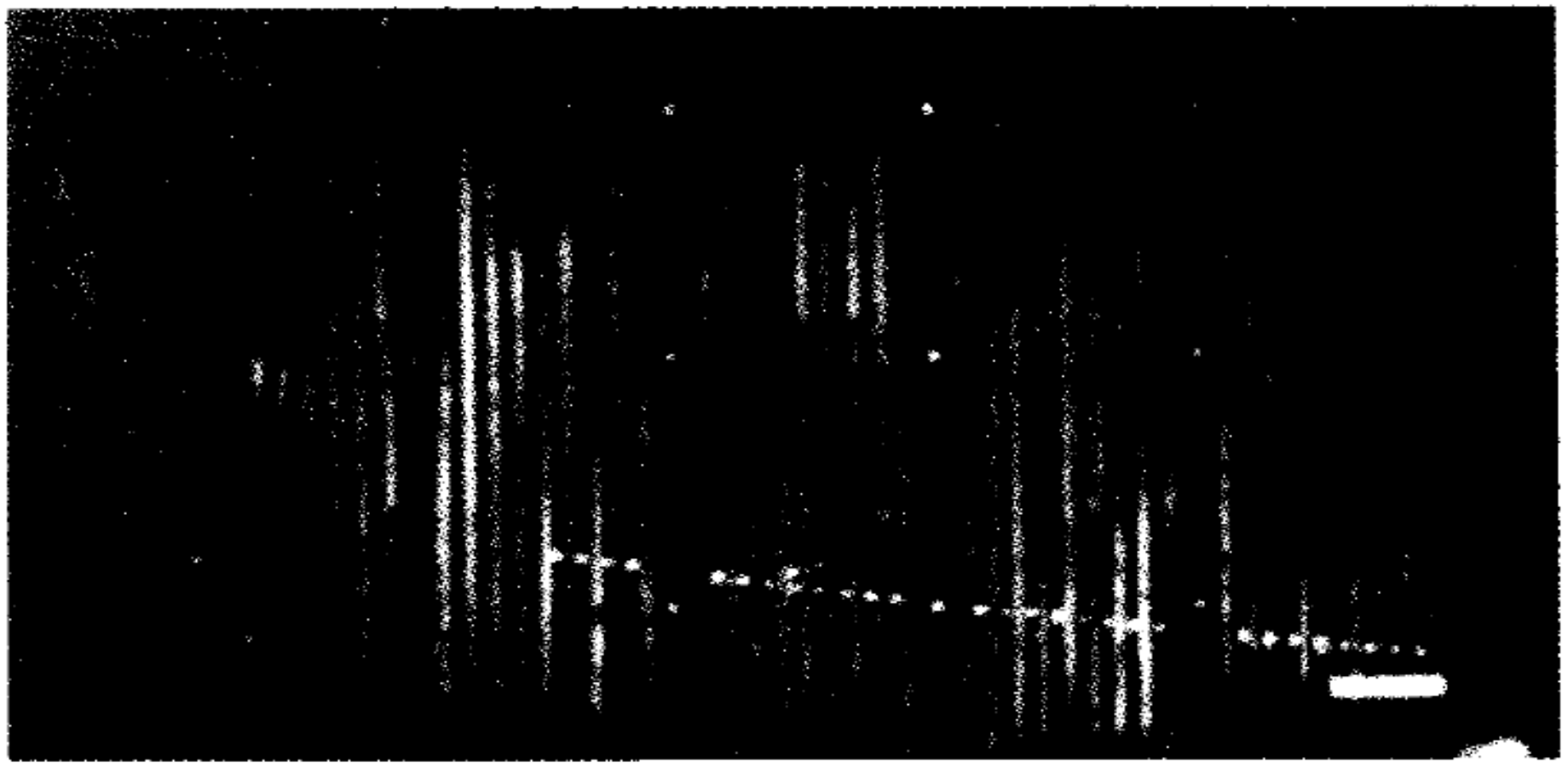
BNL, Historical tracks of Omega-minus particle,
<http://www.bnl.gov/bnlweb/history/Omega-minus.asp>

Пузырьковая камера Гаргамель (ЦЕРН)

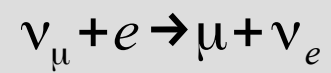
CERN, CERN for teachers: Bubble Chambers,
http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2005/bubble_chambers/BCwebsite/index.htm



Искровая камера



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

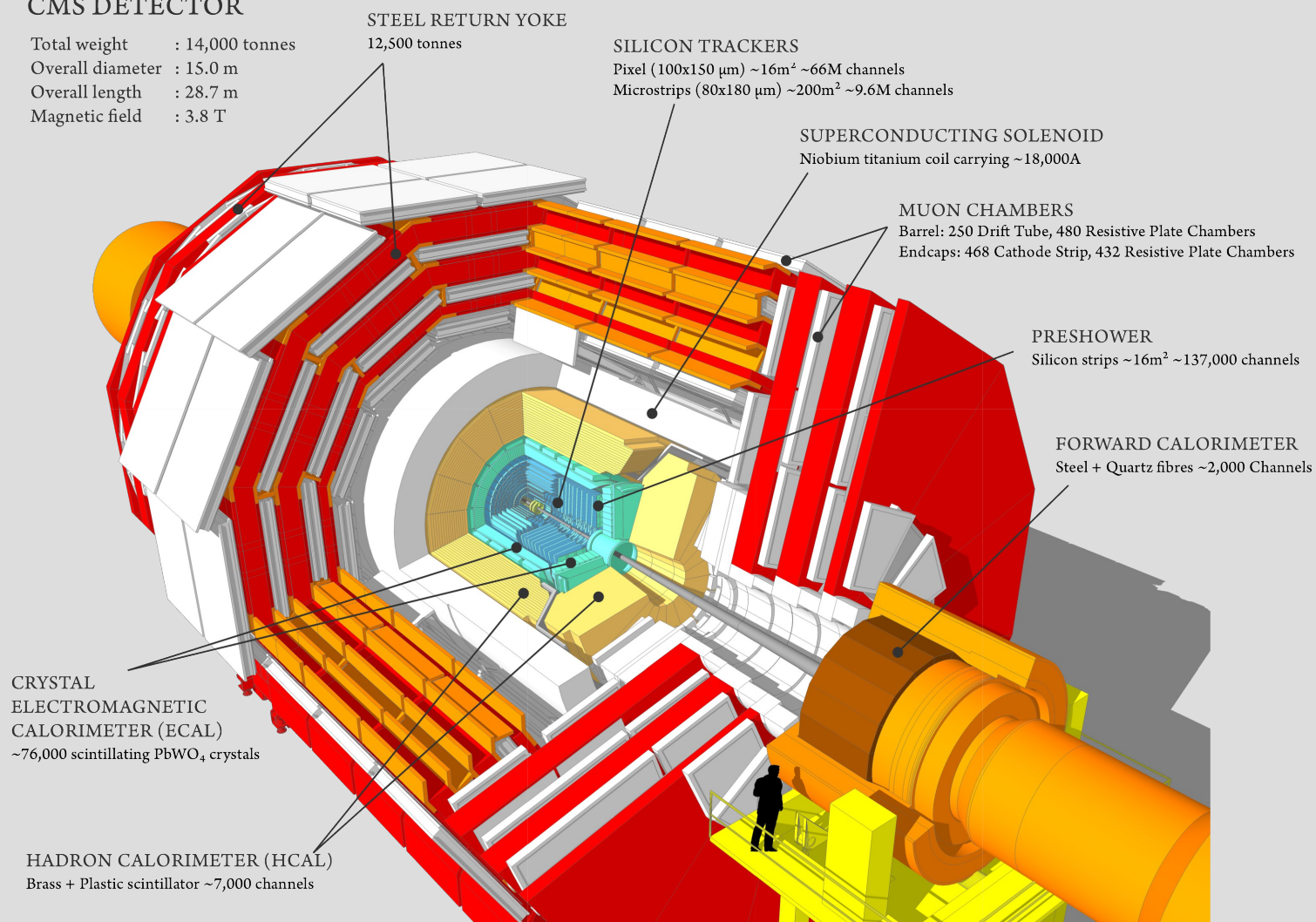


Современные детекторы (БАК)



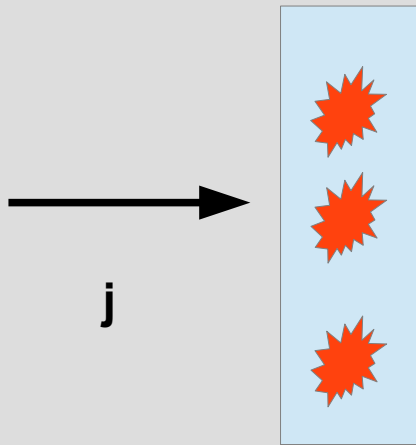
CMS DETECTOR

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



Часть 3. Сечения реакций

Покоящаяся мишень

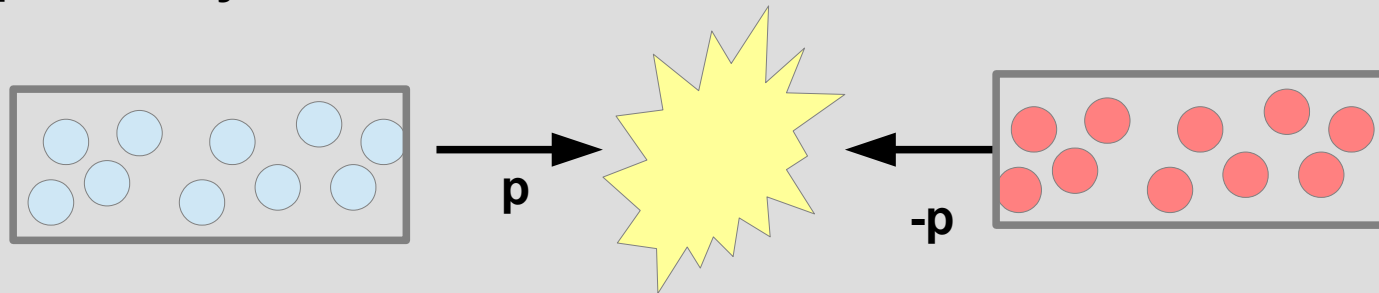


число реакций (нужного типа) в единицу времени

$$\propto j (n S dx) \sigma$$

“эффективная площадь”,
в ядерной физике удобная
единица барн $1\text{бн}=10^{-24}\text{ см}^2$

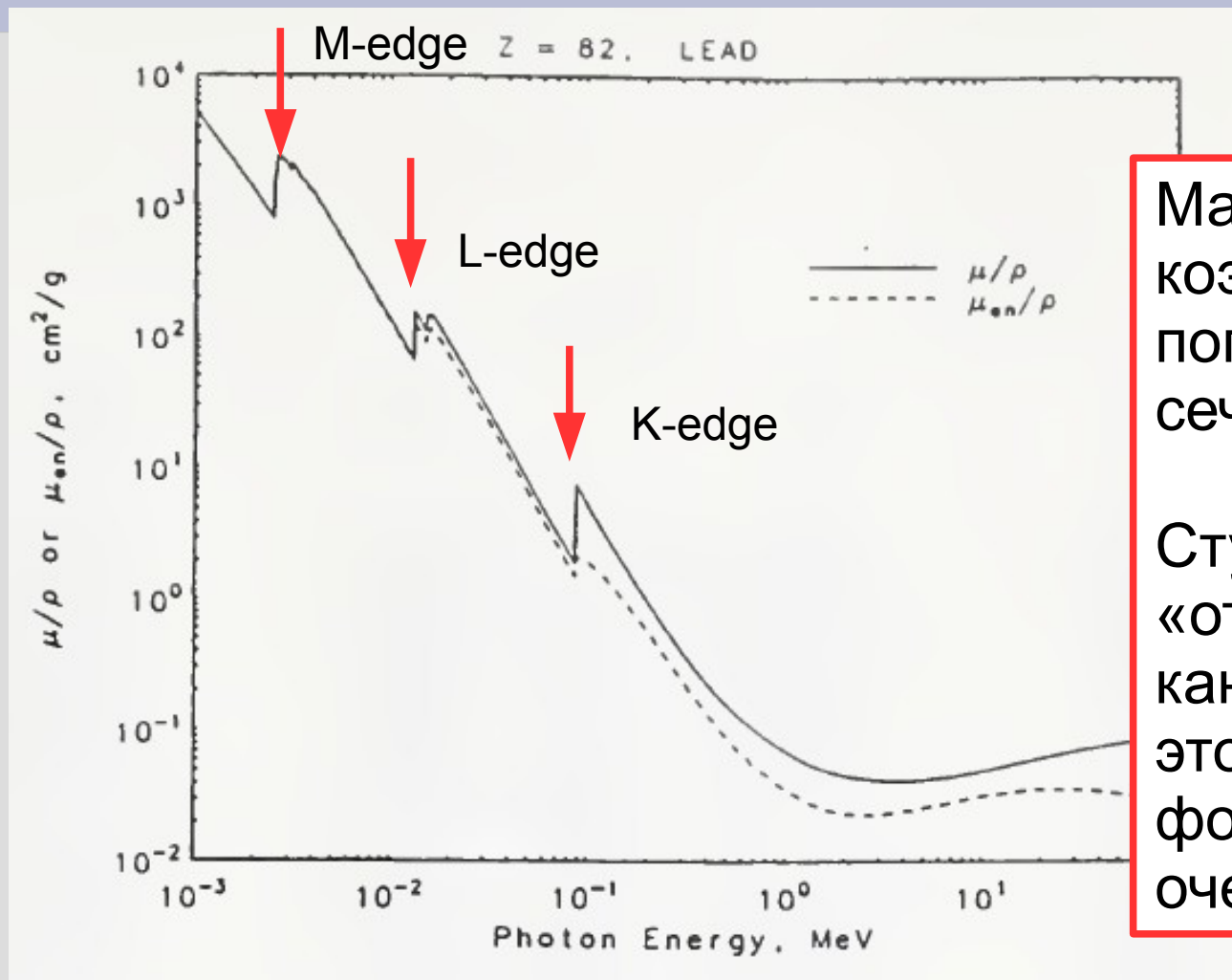
Встречные пучки



Число
реакций: $\propto \frac{N_A \times N_B}{A} \sigma$

$N_{A,B}$ – число частиц в импульсе, A – сечение пучка

Напоминание: поглощение гамма-квантов в свинце

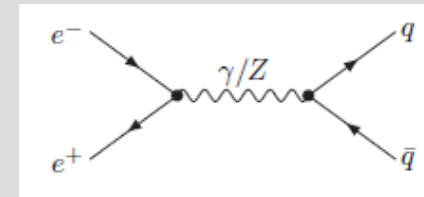
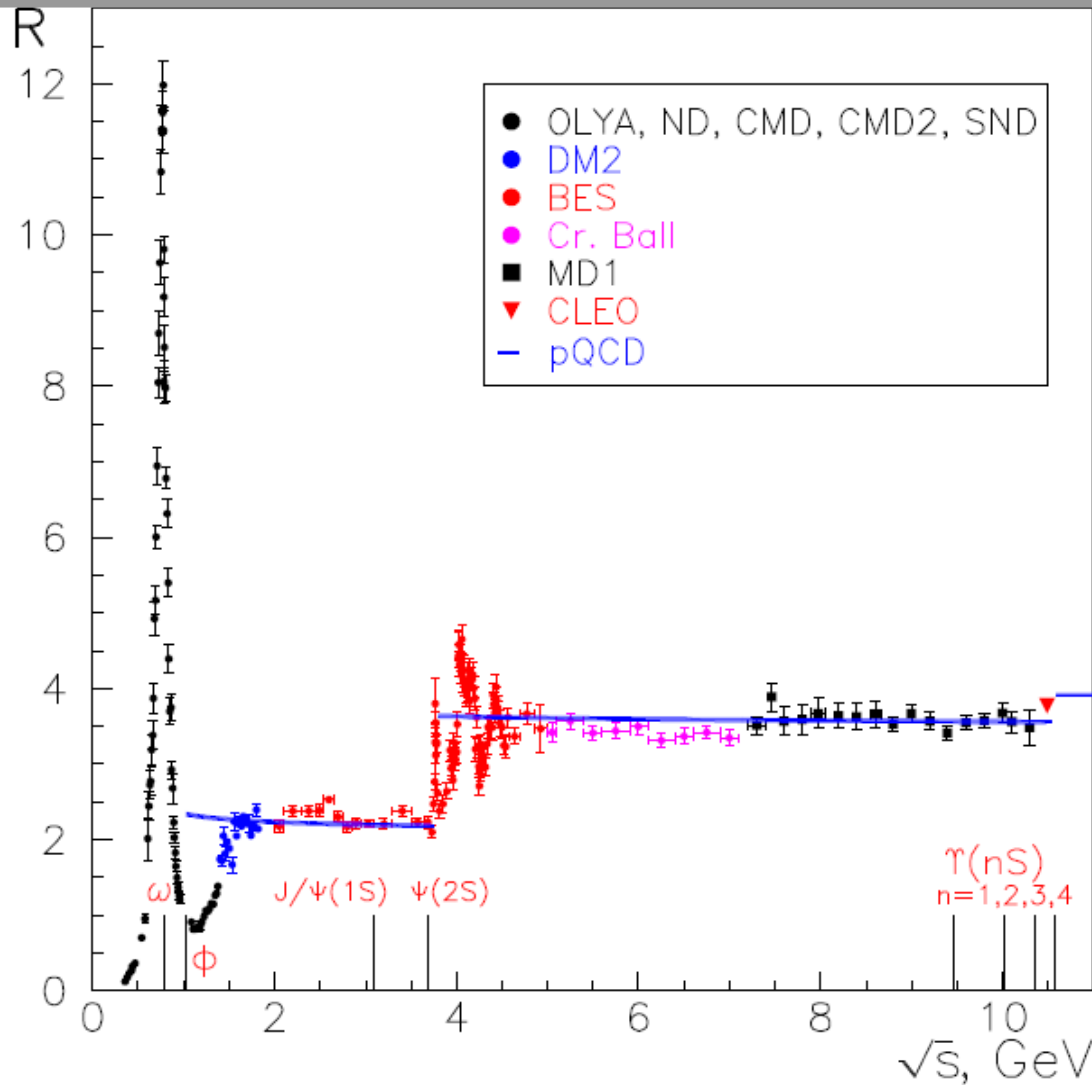


Массовый коэффициент поглощения связан с сечением поглощения

Ступеньки связаны с «открытием» нового канала поглощения, в этом случае — фотоэффект на очередной оболочке

Пример из физики частиц: получение адронов в электрон-позитронных реакциях

R: нормированное сечение адронных выходов в электрон-позитронной аннигиляции



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

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d})$$

Порог на 1.5 ГэВ – появление пары s-кварков и их дальнейшие распады

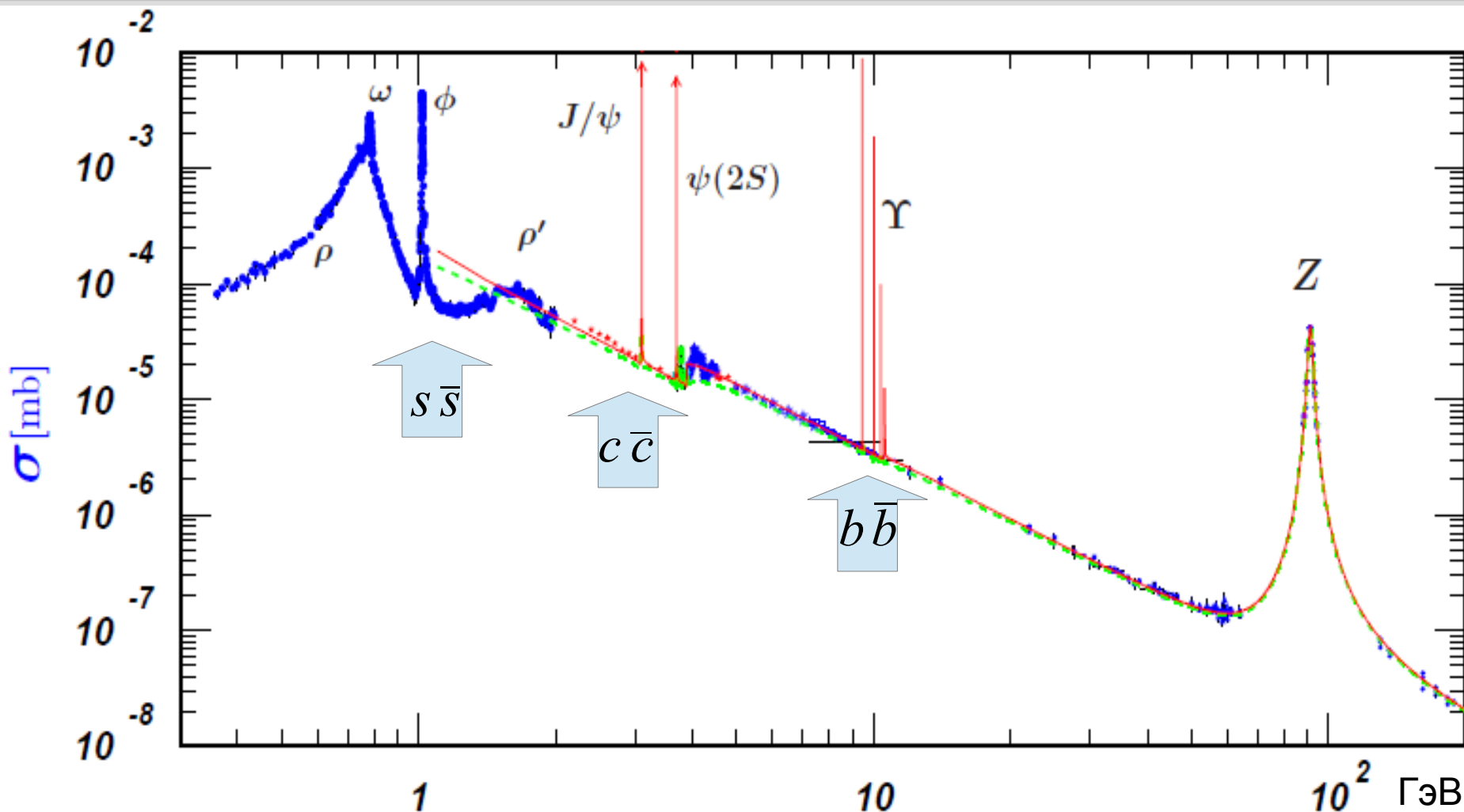
Порог на 3.8 ГэВ – появление пары c-кварков и их дальнейшие распады

Recent results from $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$

S. I. Eidelman^a

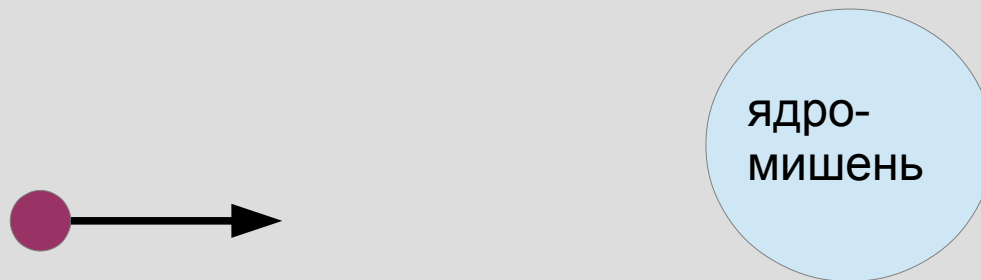
arXiv:hep-ex/0211043

Полное сечение электрон-позитронных реакций



Оценки для сечений реакции. Нерезонансные реакции.

1) Нерезонансные реакции с нейтральными частицами



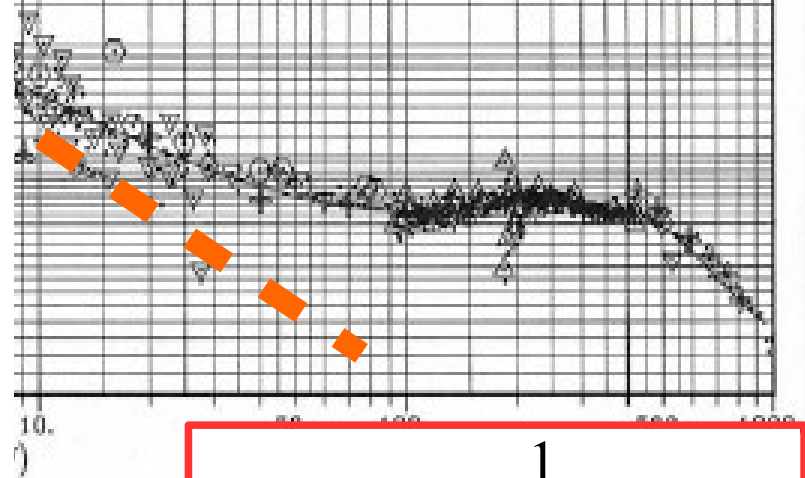
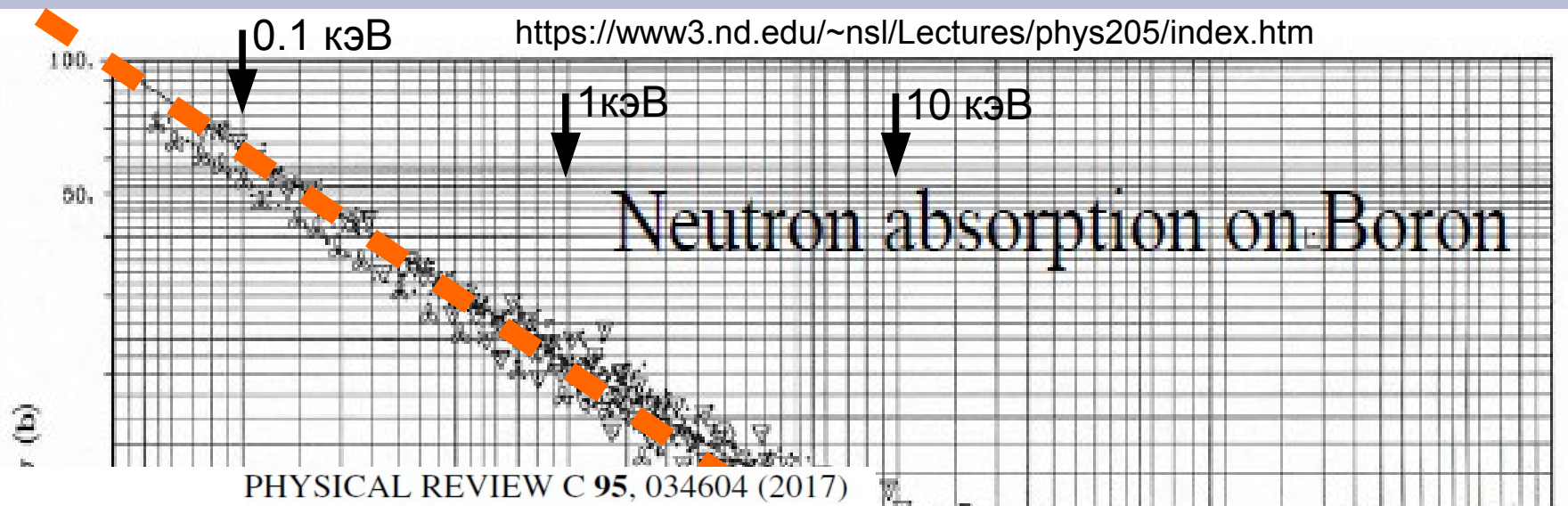
$$\sigma \simeq \pi (\lambda + R)^2 D(E)$$

с учётом большой глубины ямы – пользуемся формулой для прозрачности барьера

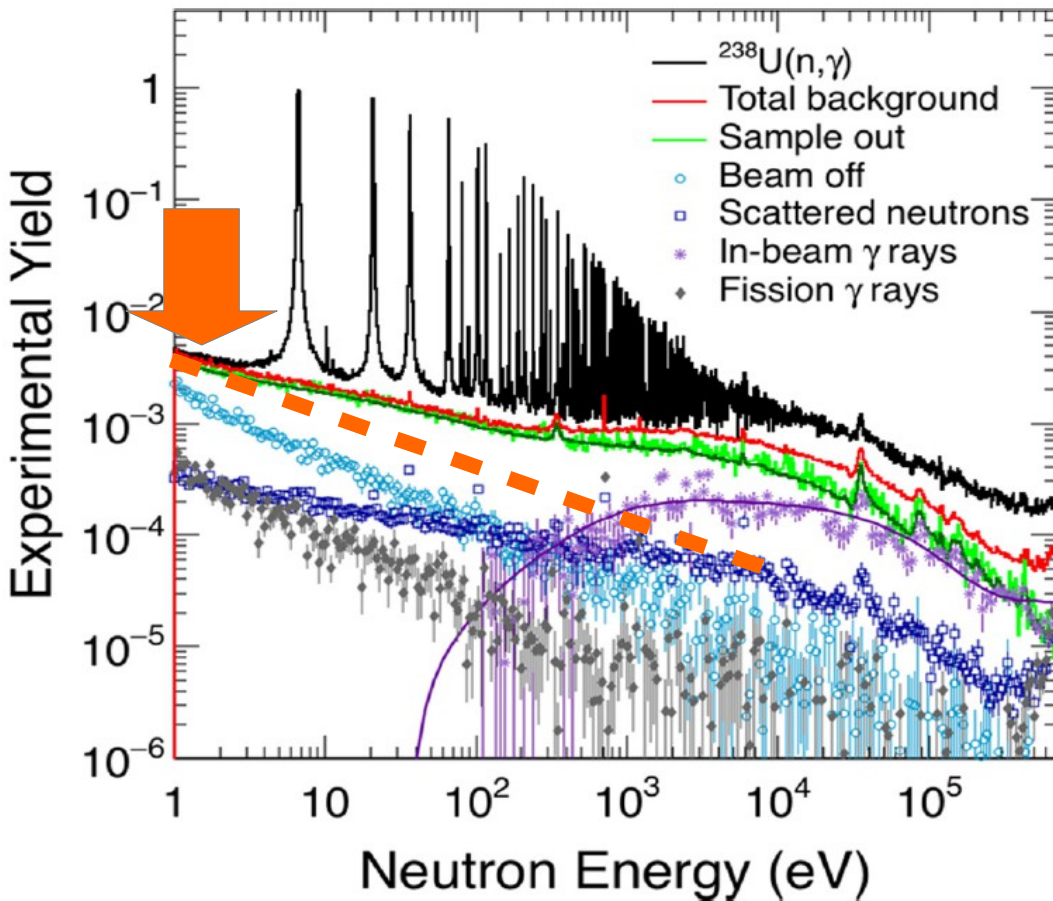
$$D = \frac{4kK}{(k+K)^2} \simeq 4 \frac{k}{K} \simeq 4 \sqrt{\frac{E}{U_0}}$$

$$\sigma \simeq 4\pi \lambda^2 \sqrt{\frac{E}{U_0}} = 4\pi \frac{\hbar^2}{p^2} \sqrt{\frac{E}{U_0}} = \frac{2\pi \hbar^2}{m} \frac{1}{\sqrt{EU_0}} \propto \frac{1}{V}$$

закон Бете



1)



$$\sigma \propto \frac{1}{V}$$

$$\ln(\sigma) = \text{const} - \frac{1}{2} \ln(E)$$

формула

закон Бете

$$\frac{1}{\sqrt{E U_0}} \propto \frac{1}{V}$$

Оценки сечения реакций. Резонансные реакции.

При формировании промежуточной частицы — дополнительный канал реакции. По законам сохранения, промежуточная частица формируется при «резонансной» энергии.

2) Резонансные реакции

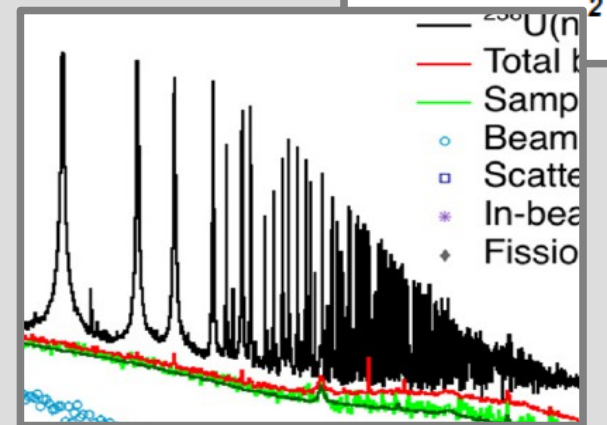
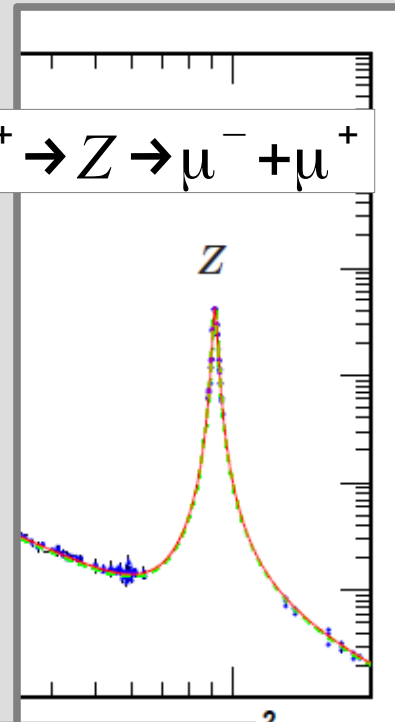
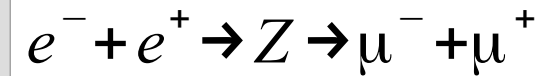
$$a + A = \dots = \begin{cases} a + A & \leftarrow \text{“упругий” процесс} \\ b + B \\ c + C \\ \dots \end{cases}$$

$$\sigma_{ab} = \pi \lambda^2 \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2 / 4}$$

формула Брейта-Вигнера

$$\Gamma = \Gamma_a + \Gamma_b + \dots$$

$$\frac{\sigma_{aa}}{\sigma_{ab}} = \frac{\Gamma_a}{\Gamma_b} = \frac{\tau_b}{\tau_a}$$



Времена реакции и взаимодействия

$\Gamma \tau \simeq \hbar$ времена жизни (времена полураспада) -
измеряемы

“внутриядерный” масштаб времени $\tau = \frac{r_{\text{яд}}}{c} = 10^{-23} \text{ сек}$

Дополнительный фактор: эффективность взаимодействия,
приводящего к распаду

Времена жизни (грубое правило):

$\sim 10^{-23}$ сек – сильное взаимодействие

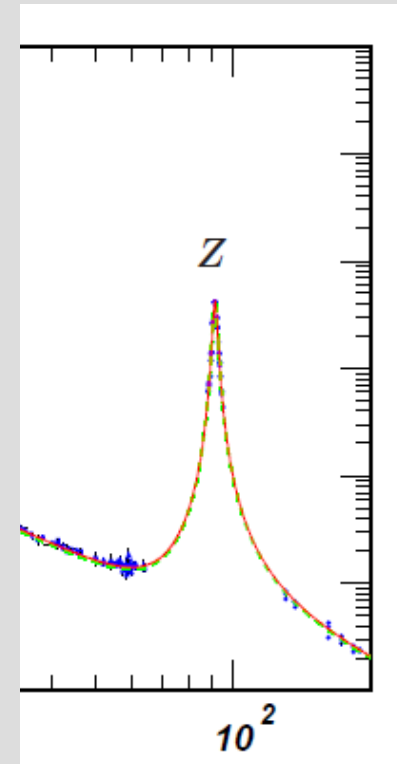
(взаимодействие кварков)

$\sim 10^{-17}$ сек – электромагнитное взаимодействие

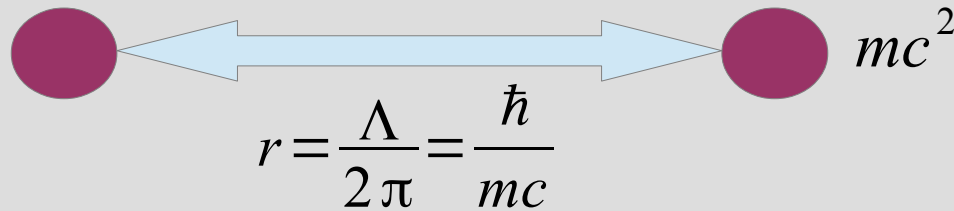
(взаимодействие с электромагнитным полем)

$\sim 10^{-13}$ сек – слабое взаимодействие

(превращения кварков, лептонов; возникновение
нейтрино)



Сравнение взаимодействий (константа связи).



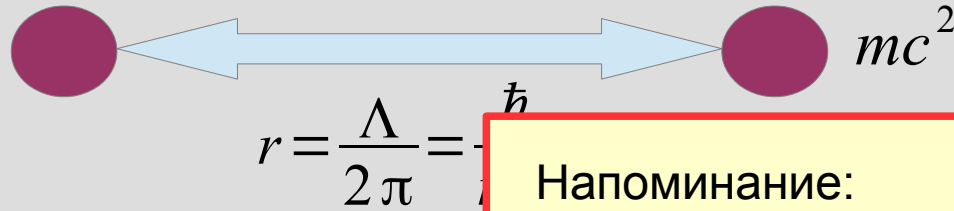
$$U = \frac{q^2}{r}$$

$$U = \frac{q^2}{r} \exp\left(-\frac{r}{\hbar/(Mc)}\right)$$

- Электромагнитное $g_{\text{эм}}^2 = \frac{e^2}{\hbar/(mc)} = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137} \sim 10^{-2}$
- Гравитационное $g_{\text{гр}}^2 = \frac{Gm^2}{\hbar} c \approx 6 \times 10^{-39}$ (для протонов) $\sim 10^{-38}$
- Сильное $g_{\text{яд}}^2 \sim \frac{U_{\text{яд}} \times R_{\text{яд}}}{\hbar c} \approx \frac{10 \text{ МэВ} \times 1 \text{ фм}}{\hbar c} \approx 0.05 \sim 1$
- Слабое $\frac{r_{\text{сл}}}{r_{\text{яд}}} \sim \frac{M_{\pi}}{M_Z} = \frac{140 \text{ МэВ}}{91 \text{ ГэВ}} \approx 1.6 \times 10^{-3}$ $g_{\text{сл}}^2 \sim 10^{-4} \sim 10^{-6}$

принятая оценка

Сравнение взаимодействий (константа связи).



$$U = \frac{q^2}{r}$$

$$U = g^2 \exp\left(-\frac{r}{\hbar/(Mc)}\right)$$

Напоминание:

По «золотому правилу Ферми» вероятность перехода между состояниями квадратична по энергии взаимодействия

Это соответствует временам распадов

10^{-23} сек: 10^{-17} сек: 10^{-13} сек

1: $1/(10^{-2})^2$: $1/(10^{-6})^2$

• Электромагнит

$\sim 10^{-2}$

• Гравитационно

(протонов) $\sim 10^{-38}$

• Сильное

$\frac{1 \text{ фМ}}{1 \text{ фМ}} \approx 0.05 \sim 1$

• Слабое

$$\frac{r_{\text{сл}}}{r_{\text{яд}}} \sim \frac{M_{\pi}}{M_Z} = \frac{140 \text{ МэВ}}{91 \text{ ГэВ}} \simeq 1.6 \times 10^{-3}$$

$g_{\text{сл}}^2 \sim 10^{-4} \sim 10^{-6}$

принятая оценка

Законы сохранения

Строгие, “привычные”: энергия, импульс, момент импульса, заряд

Примеры:

свободный нейтрон (939.6 МэВ) распадается в протон (938.3) МэВ + электрон (0.51 МэВ) + нейтрино, но не наоборот;

электрон-позитронная пара аннигилирует в не менее чем 2 гамма кванта

Строгие “в современной Вселенной”: сохранение числа кварков (барионного заряда), числа и типа лептонов

предположительно нарушалось в момент рождения Вселенной, что объясняет барионную асимметрию (преобладание вещества над антивеществом)

“Не для всех”: странность, шарм, чётность

нарушаются только для слабого взаимодействия (при взаимопревращении кварков или лептонов)

О странном (и о странности)

П-МЕЗОНЫ (заряженные 140 МэВ,
нейтральный 135 МэВ)

$$\pi^0 = \frac{u\bar{u} - d\bar{d}}{\sqrt{2}}; \pi^+ = u\bar{d}; \pi^- = d\bar{u}$$

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad 10^{-17} \text{ сек}$$



Истинно нейтральная частица

К-МЕЗОНЫ (заряженные 494
МэВ, нейтральный 498 МэВ)

$$K^+ = u\bar{s}; K^- = \bar{u}s; K^0 = d\bar{s}$$



*Электрически
нейтральная, но не
совпадает со своей
античастицей*

Нейтральный К-мезон живёт $10^{-8} \dots 10^{-10}$
сек, на гамма кванты не распадается

Было предположено существование
дополнительного “заряда” - странности,
который тоже должен сохраняться.

В кварковой модели странность равна
минус числу странных кварков

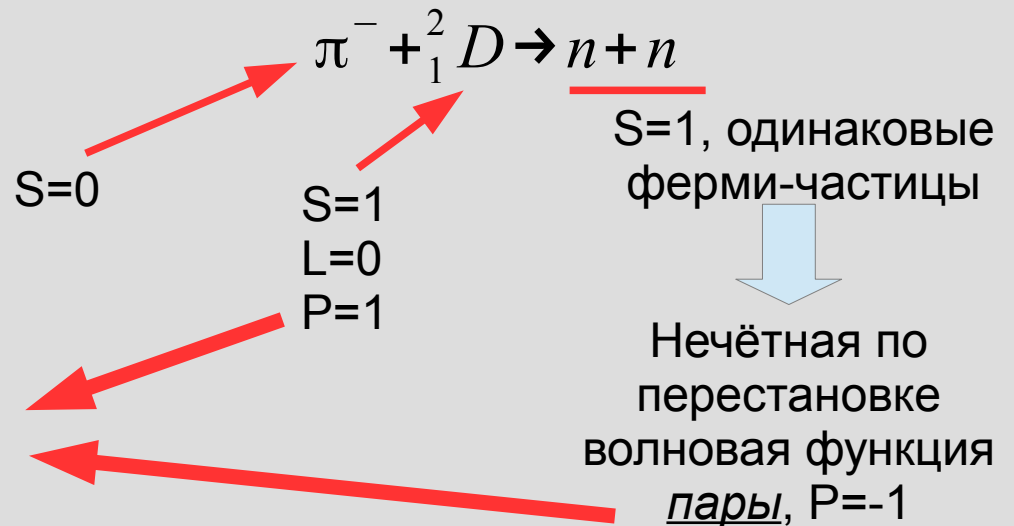
Чётность и распад каонов.

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$$

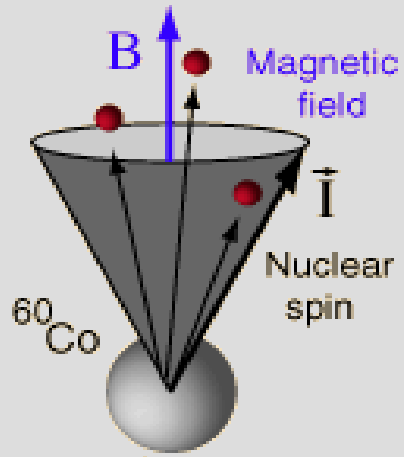
Чётность каонов и пионов отрицательна (известно из независимых экспериментов)

Анализ вероятностей $\rightarrow \pi^0 \rightarrow (2 \gamma) \rightarrow 2 e^- + 2 e^+$

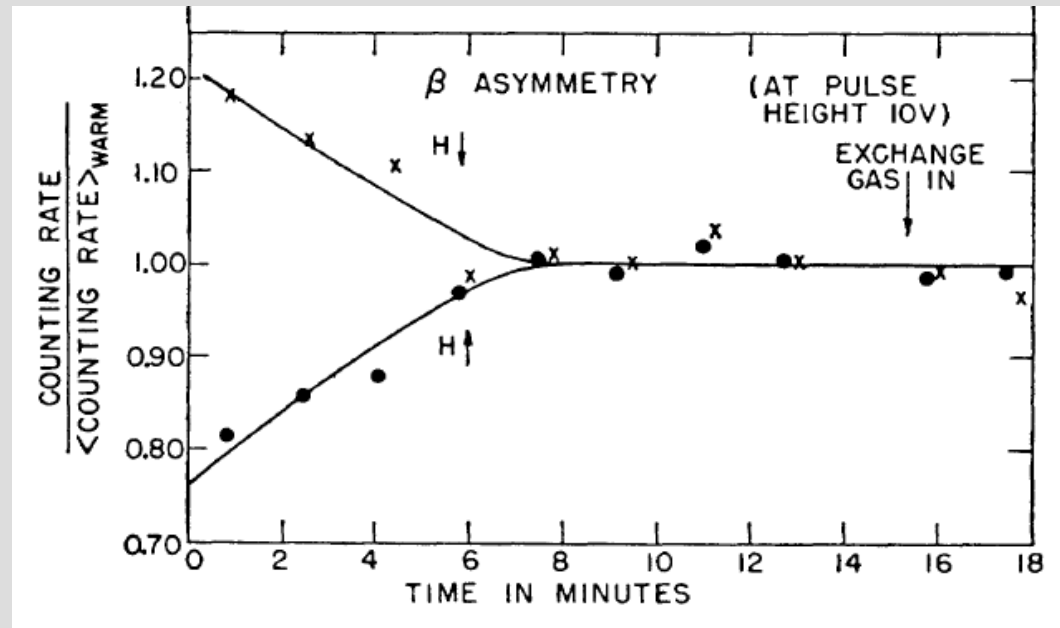
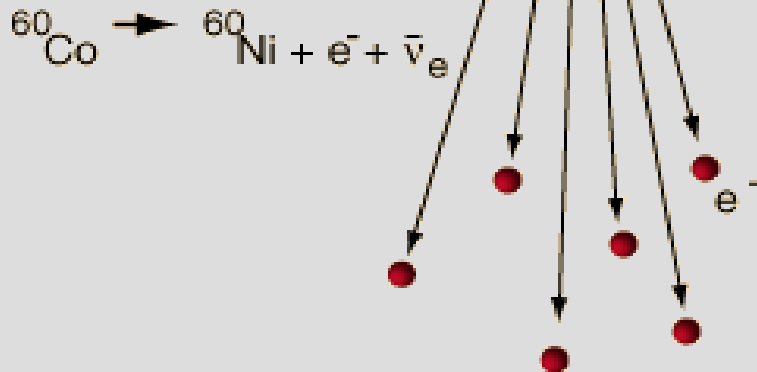


Эксперимент Ву

Beta emission is preferentially in the direction opposite the nuclear spin, in violation of conservation of parity.



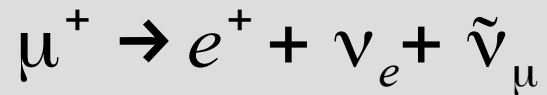
Wu, 1957



Различие числа отсчётов счётчика бета-частиц при разном направлении поляризирующего магнитного поля. В момент $t=0$ достигалась минимальная температура образца кобальта, затем образец нагревался из-за теплоподвода и выделения тепла при распаде, и поляризация пропадала. Анизотропия бета распада поляризованных ядер характеризуется различием числа отсчётов в момент $t=0$. Из работы Ц.Ву

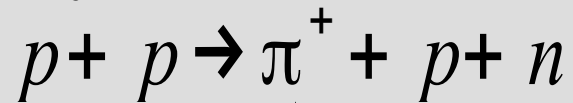
Чётность не сохраняется при слабом взаимодействии

Мюонная спектроскопия

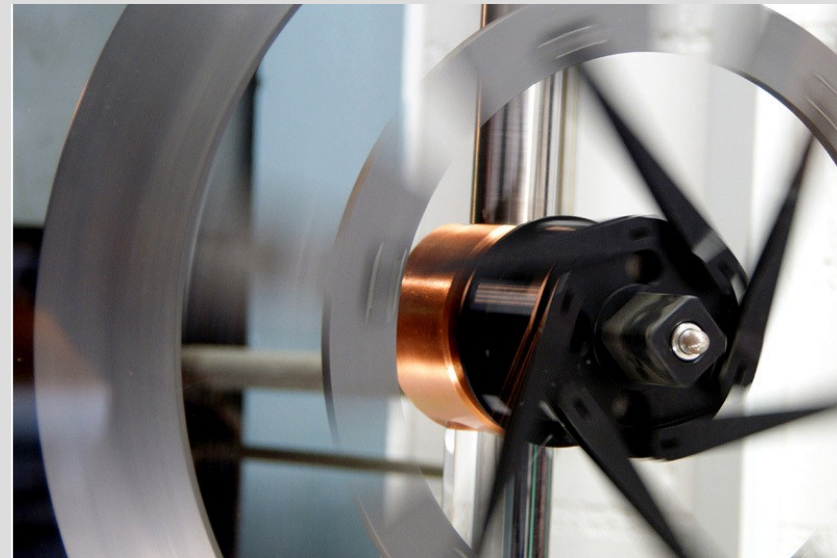
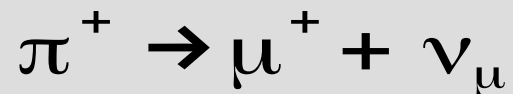


Аналогично опыту Ву, позитроны вылетают преимущественно в направлении спина мюона

Получение мюонов



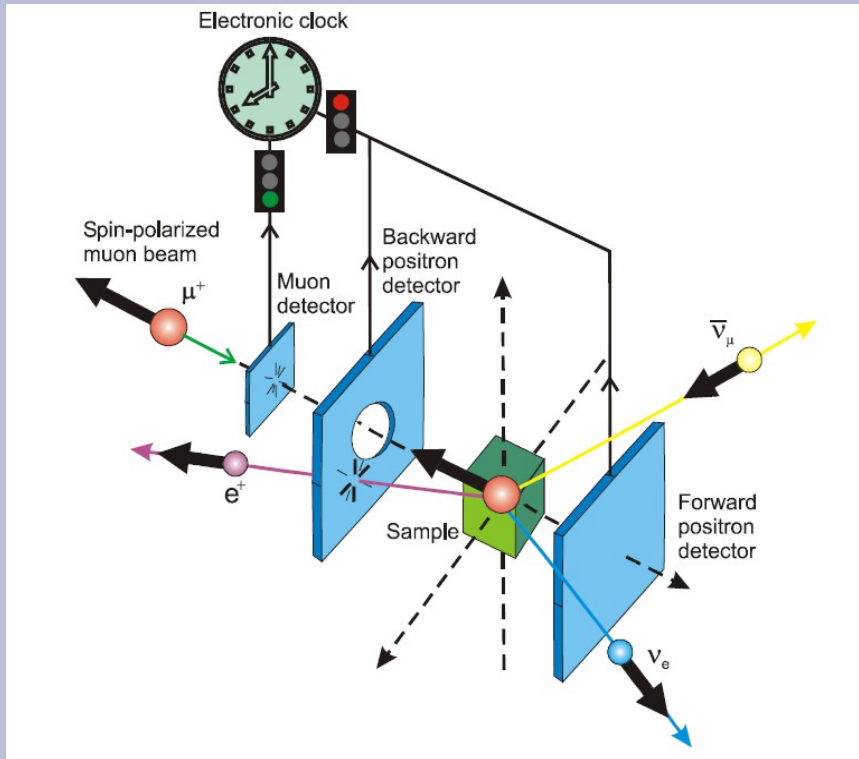
тормозится в мишени и в состоянии покоя за 10^{-8} сек распадается далее



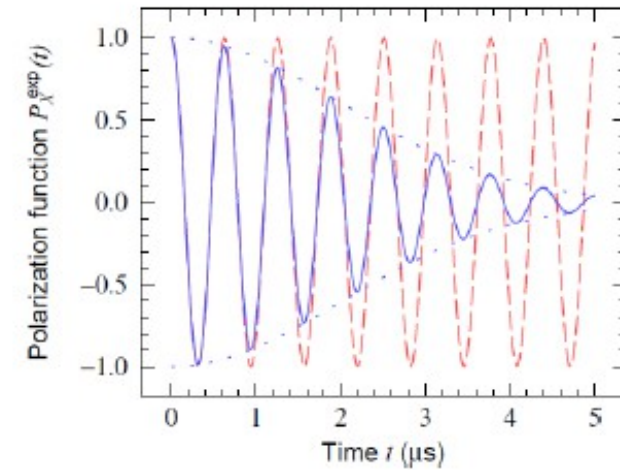
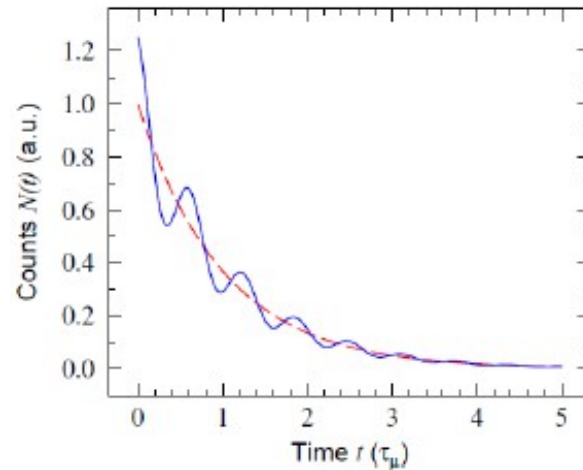
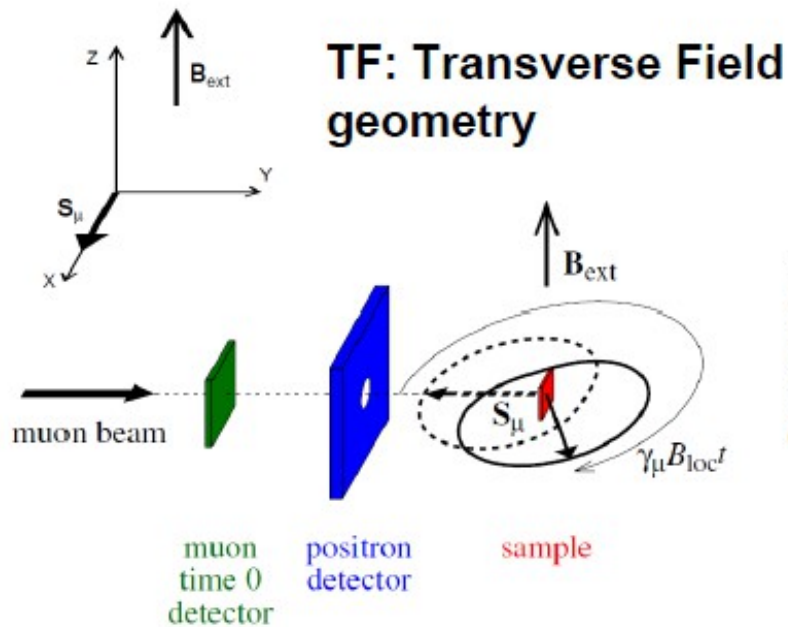
Мишень для производства мюонов в Институте Поля Шерера.

<http://www.psi.ch/>

Схема опыта

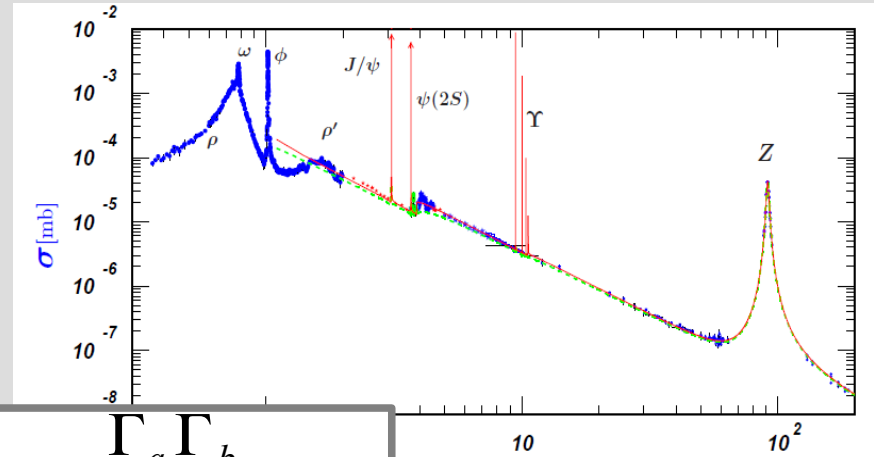


Осцилляции асимметрии распада мюона, имплантированного в образец, позволяют измерить локальное магнитное поле



Основное на лекции

mass →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²	0	≈126 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					
	≈4.8 MeV/c ²	≈95 MeV/c ²	≈4.18 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	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS					
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	80.4 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	



$$\sigma_{ab} = \pi \lambda^2 \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2/4}$$

