

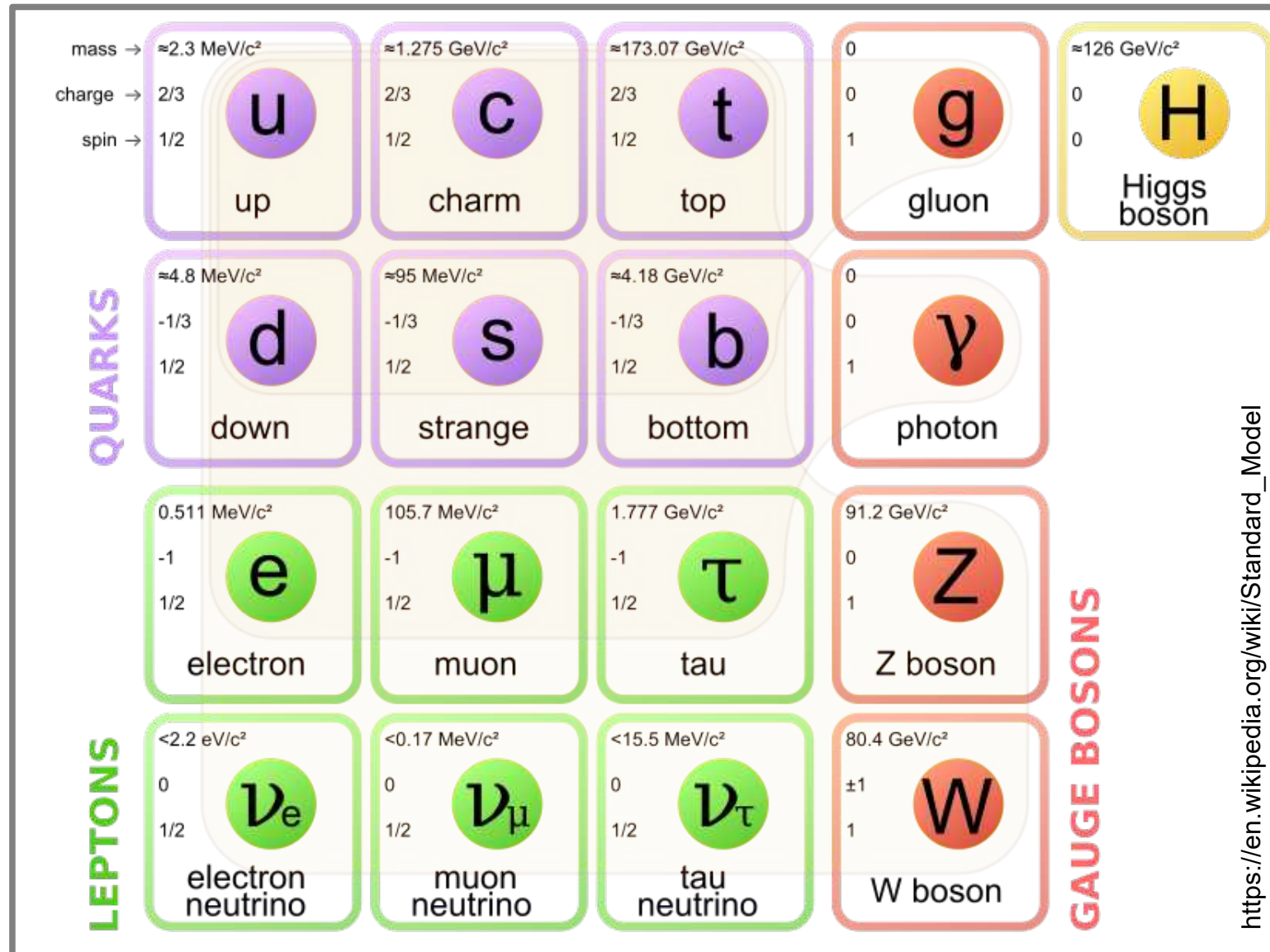
Лекция 14

Элементарные частицы 2: слабое взаимодействие.

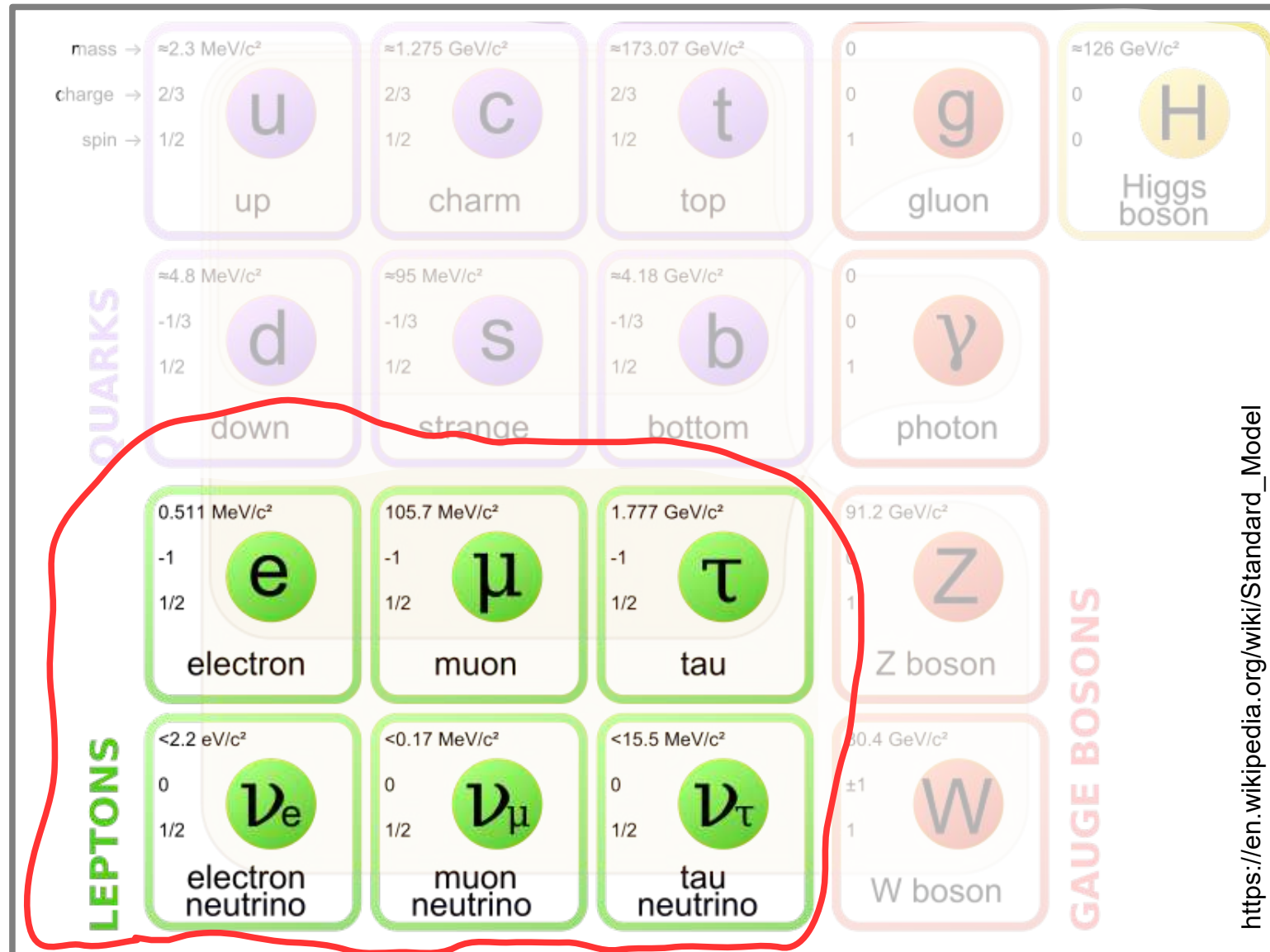
Важные (и красивые) эксперименты по
наблюдению частиц и взаимодействий

Часть 1. Лептоны стандартной модели.

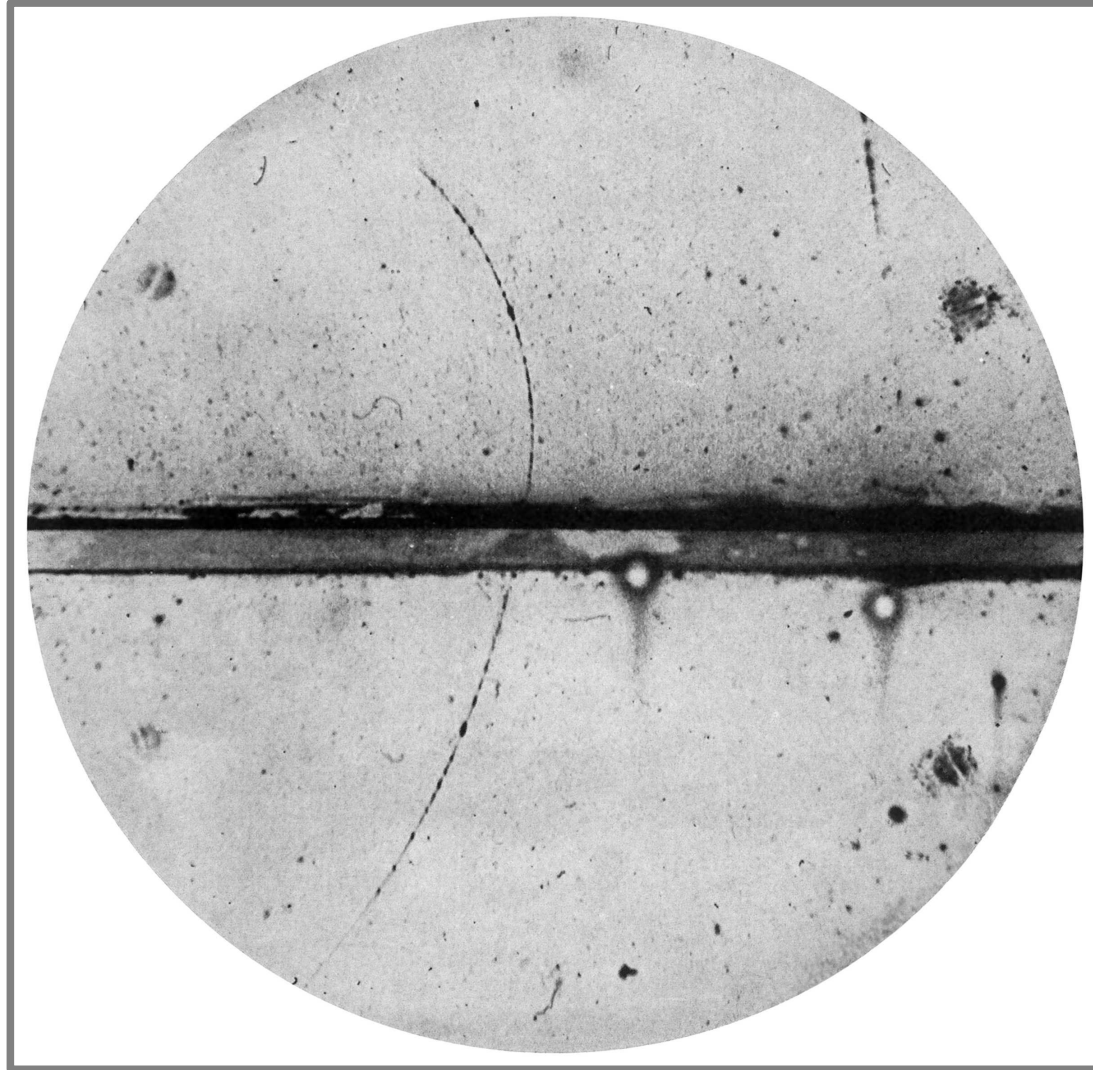
Стандартная модель



Стандартная модель



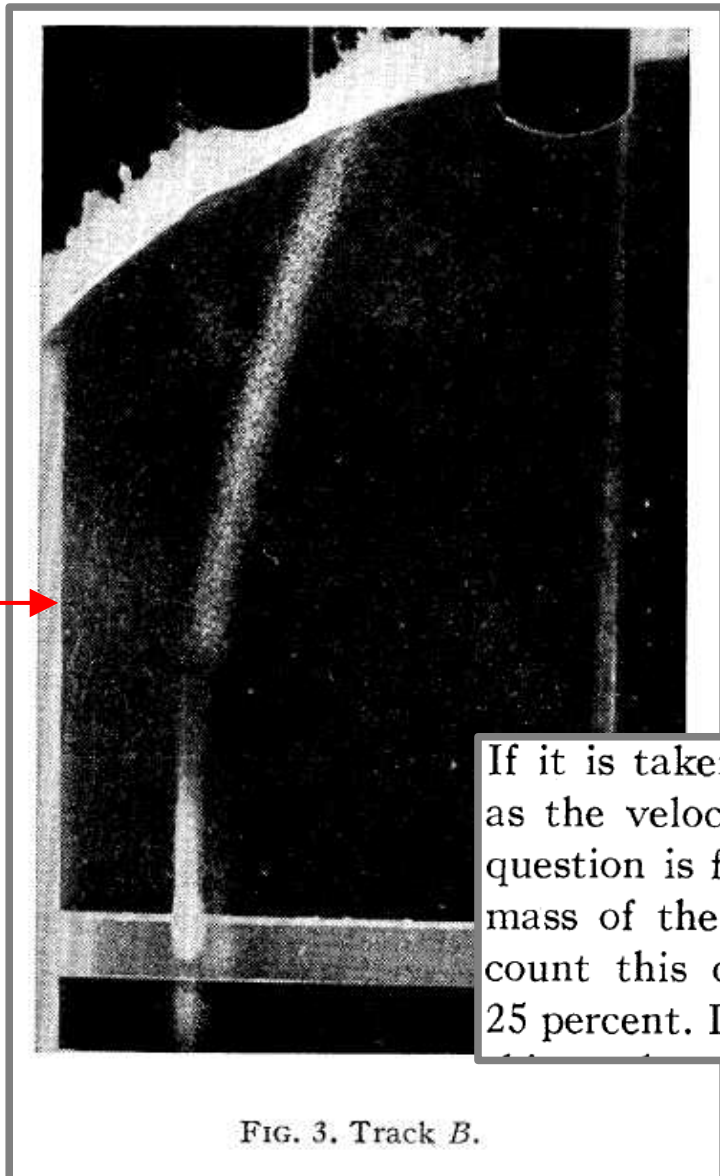
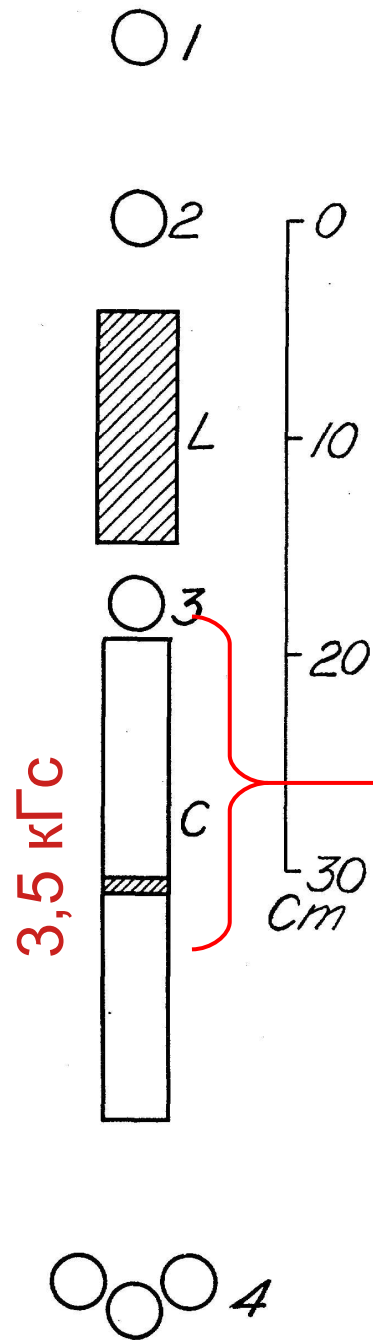
Открытие позитрона



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)

Открытие мюонов



$$m \frac{V^2}{R} = \frac{e}{c} B V$$

$$m V = \frac{e B R}{c}$$

If it is taken that the ionization density varies inversely as the velocity squared, the rest mass of the particle in question is found to be approximately 130 times the rest mass of the electron. Because of uncertainty in the ion count this determination has a probable error of some 25 percent. In any case it does not seem possible to explain

FIG. 3. Track B.

Открытие мюонов

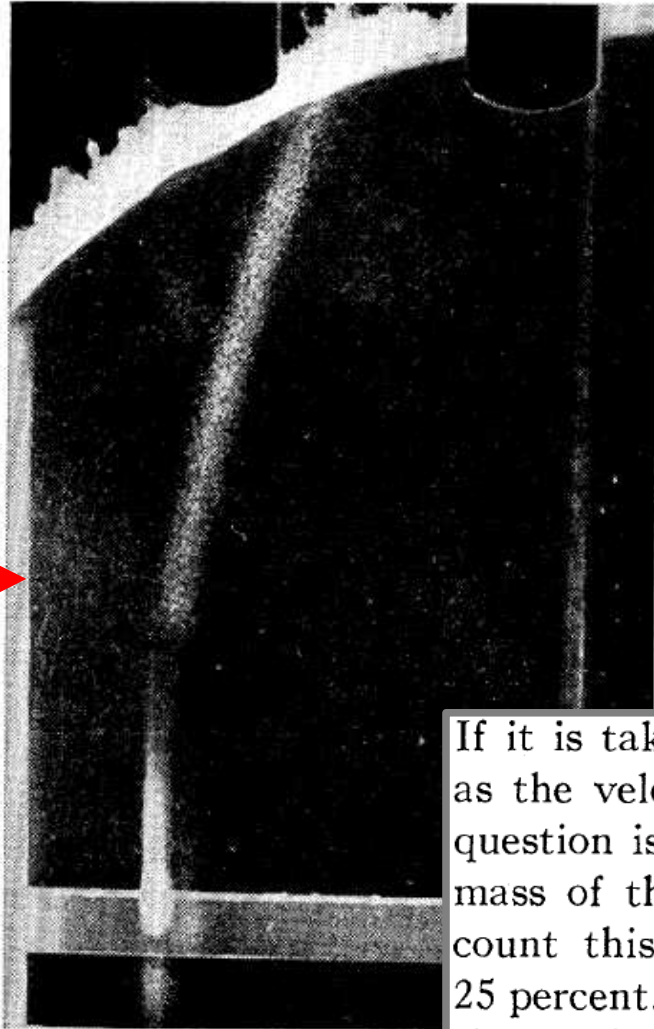
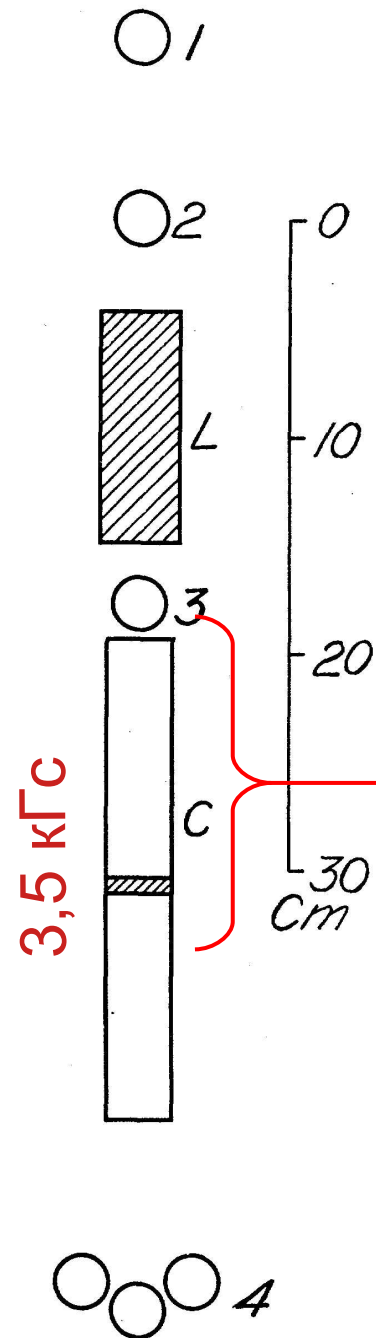


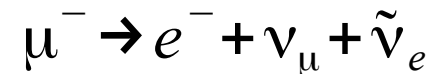
FIG. 3. Track B.

$$m \frac{V^2}{R} = \frac{e}{c} B V$$

$$m V = \frac{e B R}{c}$$

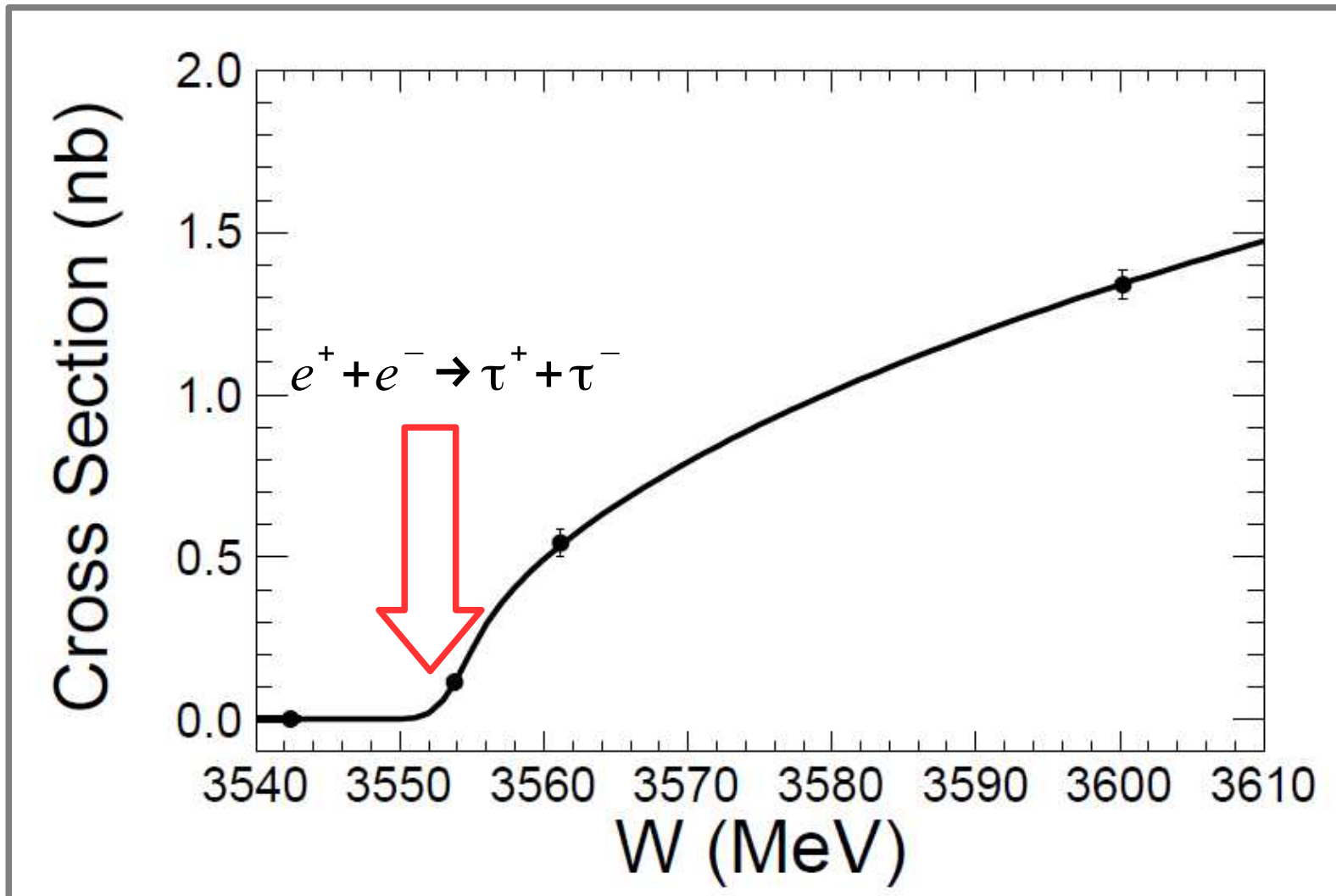
$$m_{\mu} c^2 = 207 m_e c^2 \approx 106 \text{ МэВ}$$

$$T_{\text{life}} = 2.2 \text{ мкс}$$

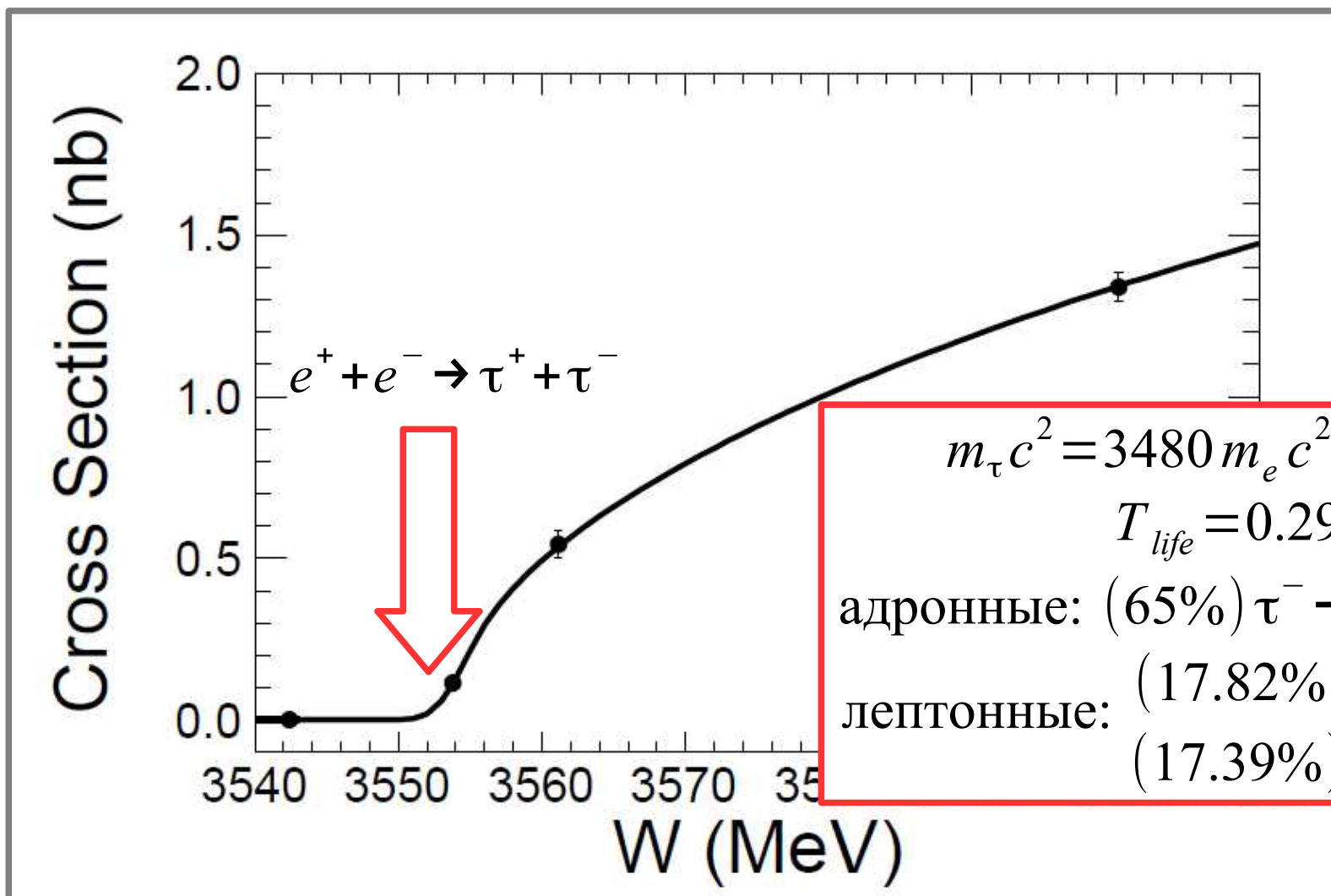


If it is taken that the rest mass of the particle in question is found to be approximately 130 times the rest mass of the electron. Because of uncertainty in the ion count this determination has a probable error of some 25 percent. In any case it does not seem possible to explain

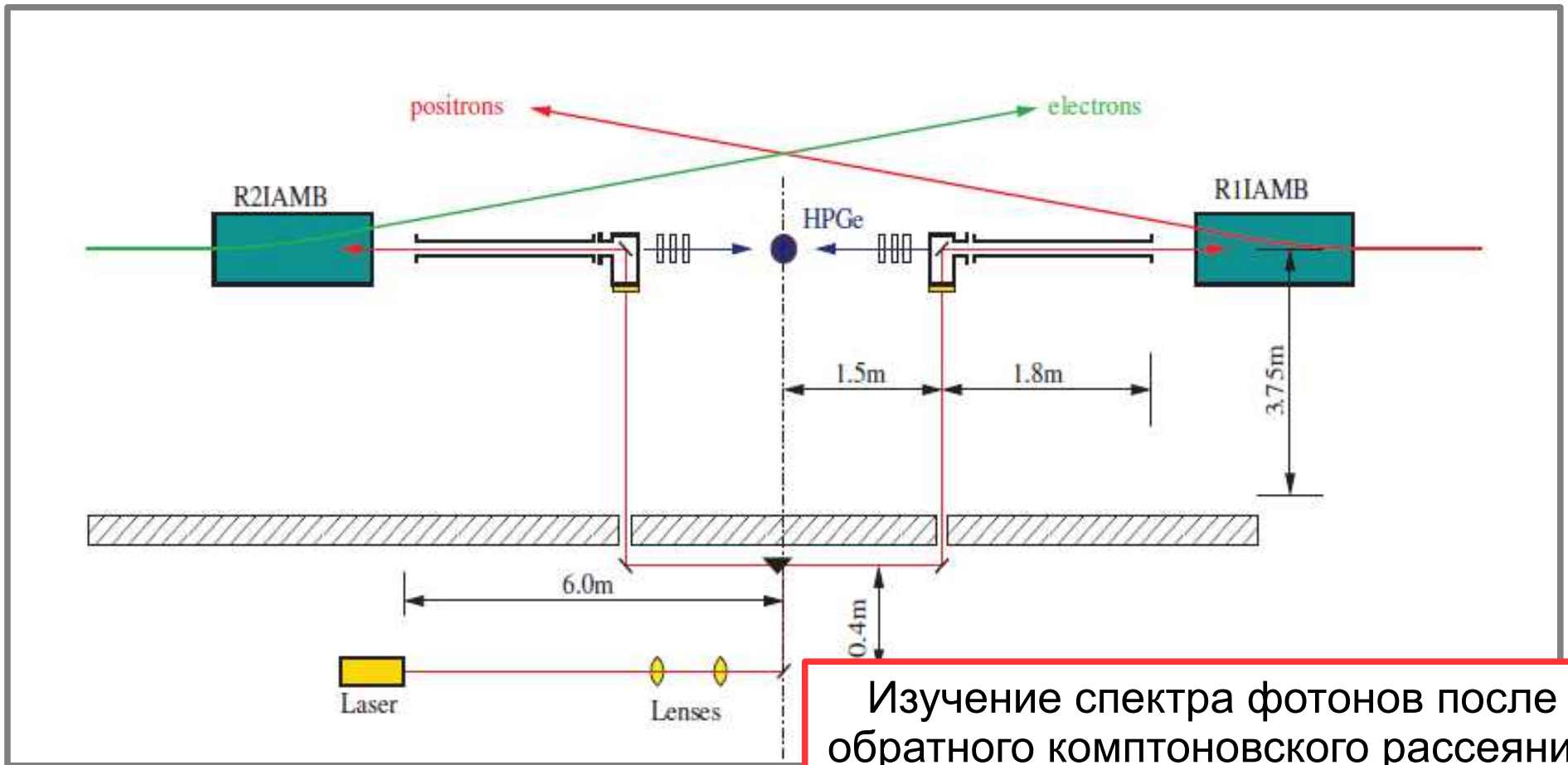
Наблюдение таона (тау-частицы)



Наблюдение таона (тау-частицы)

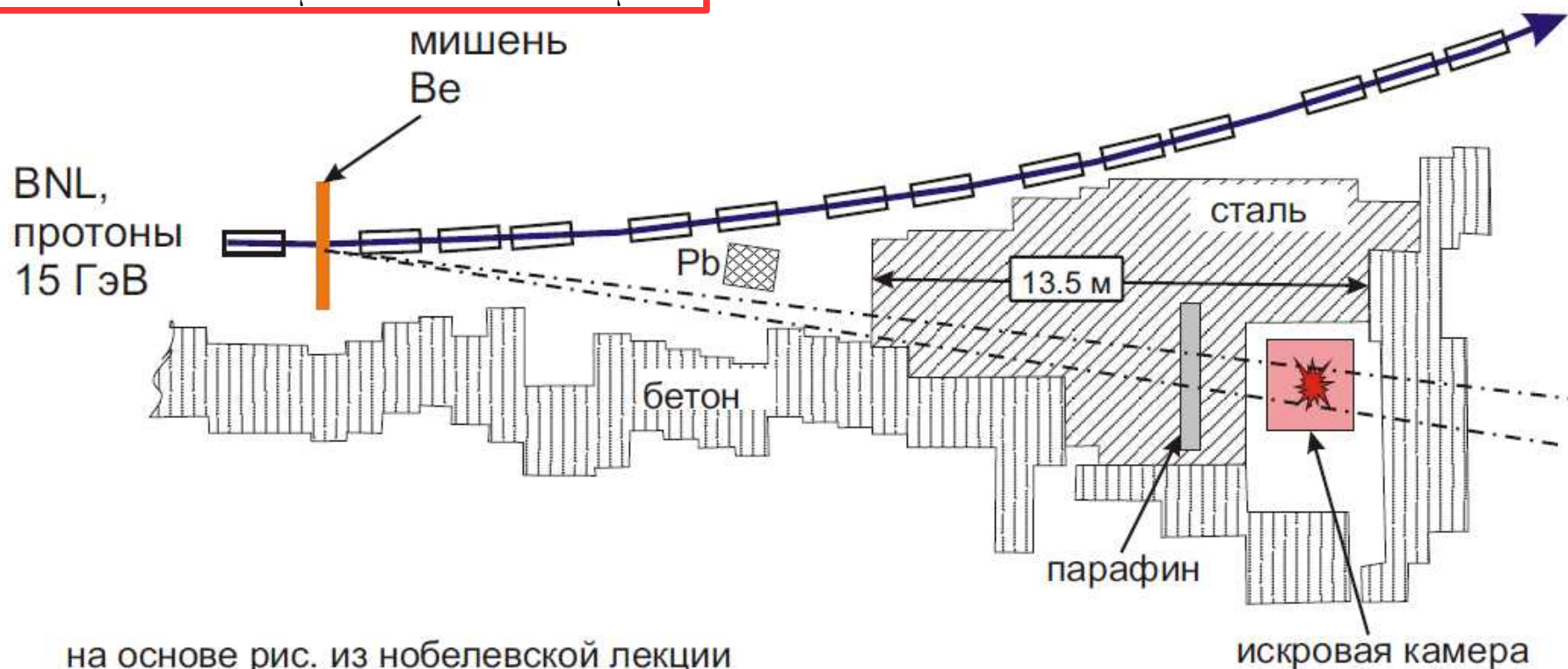
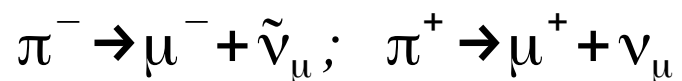
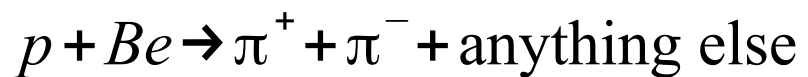


Вспоминая эффект Комптона...



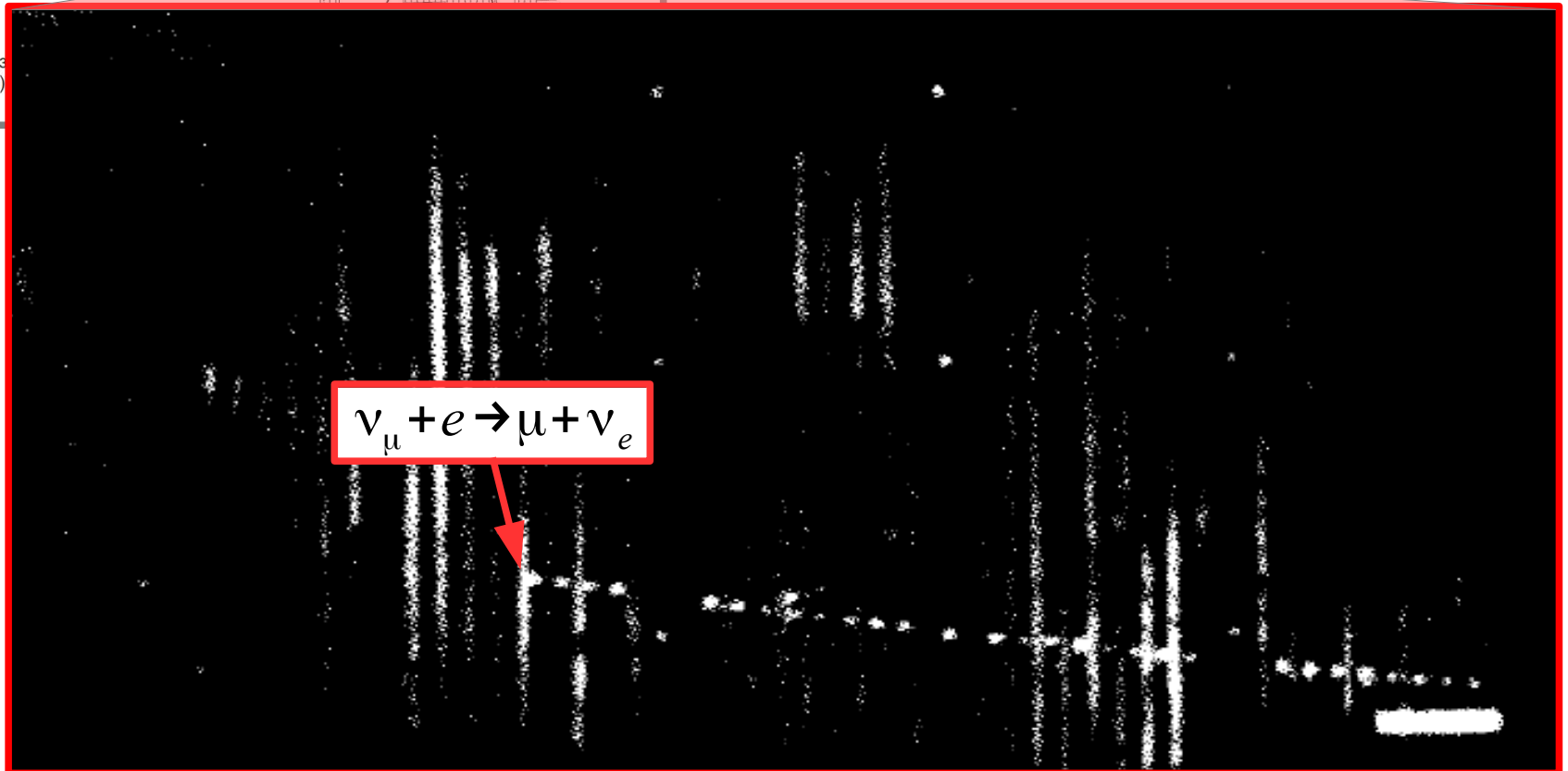
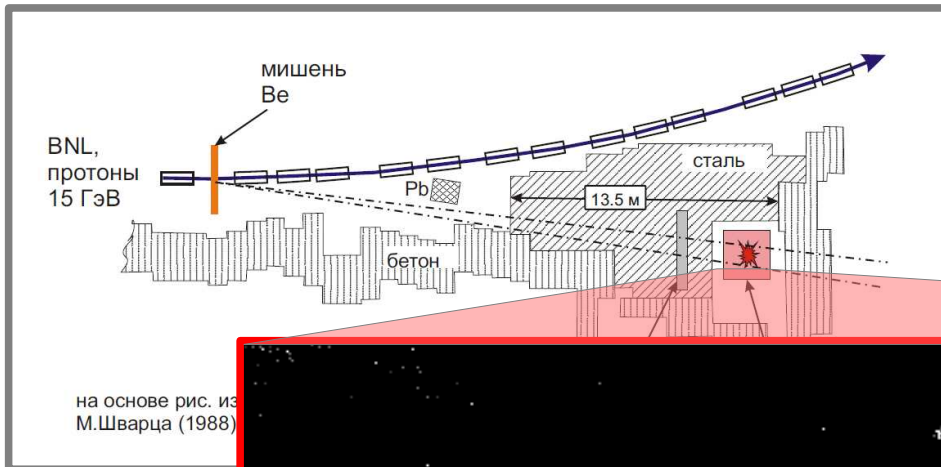
Изучение спектра фотонов после обратного комптоновского рассеяния позволяет измерить энергию частиц в пучке и распределение частиц по энергии.

Мюонное нейтрино



на основе рис. из нобелевской лекции
М.Шварца (1988)

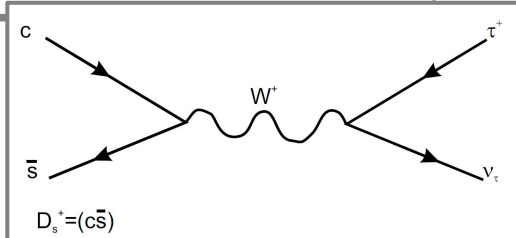
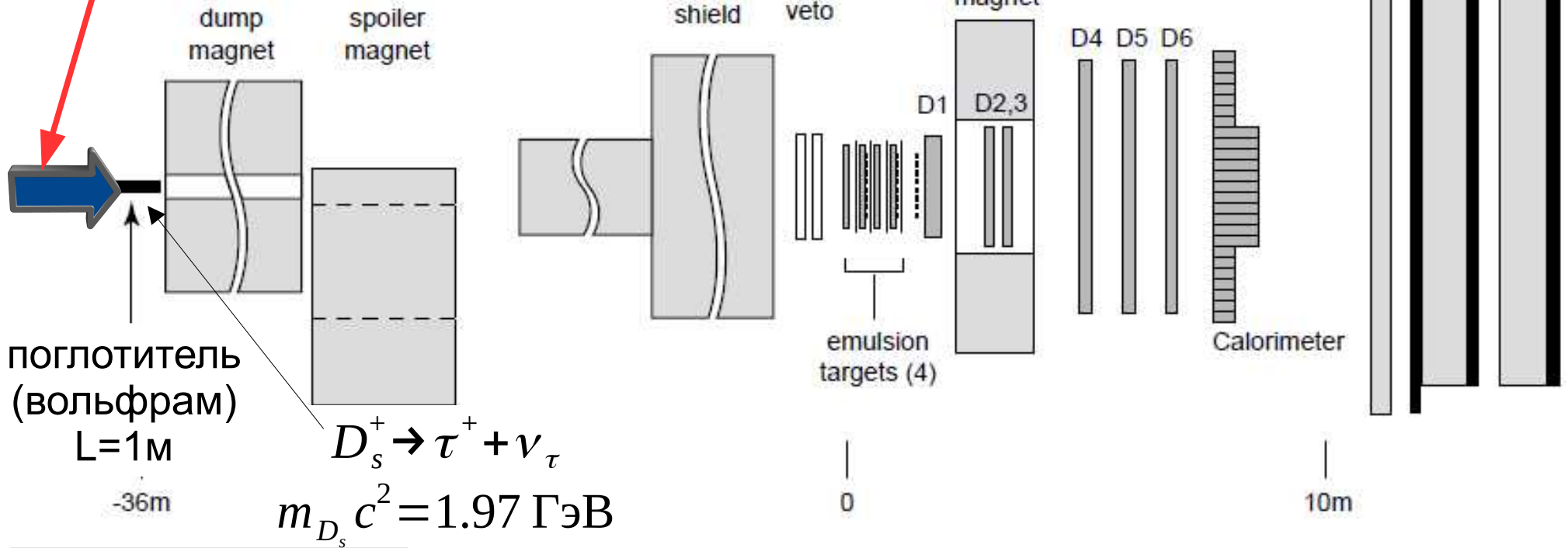
Мюонное нейтрино



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

Тау-нейтрино

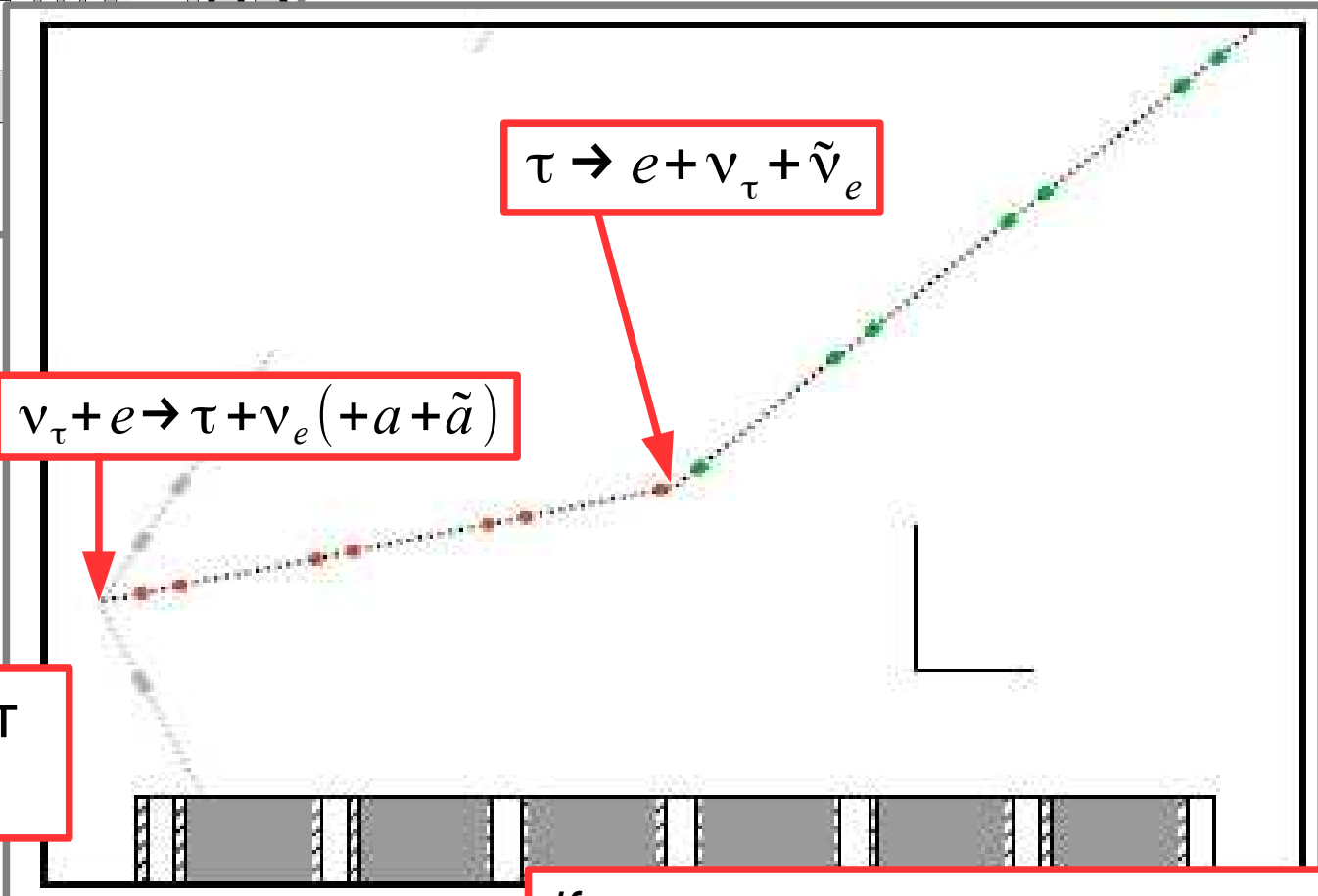
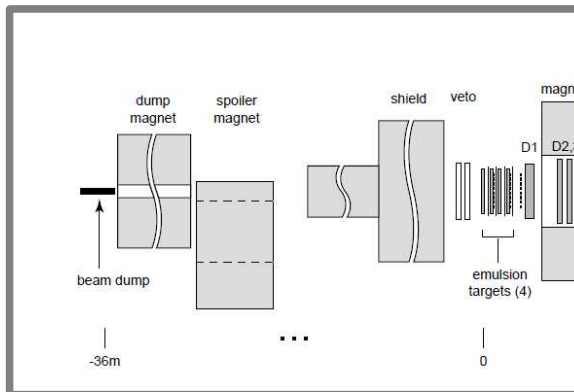
Тэватрон
(Фермилаб)
протоны 800 ГэВ



Observation of Tau Neutrino Interactions (DONUT Collaboration)
<https://arxiv.org/ftp/hep-ex/papers/0012/0012035.pdf>

То

The DONUT experiment (Fermilab E872) was designed to observe the charged current interactions of the ν_τ by identifying the τ lepton as the only lepton created at the interaction vertex. At the neutrino energies in this experiment, the τ typically decays within 2 mm of its creation to a single charged daughter (86% branching fraction). Thus the signature of the τ is a track with a kink, signifying a decay characterized by a large transverse momentum. Nuclear emulsion was used to locate and resolve these decays. A charged particle spectrometer with electron and muon identification capabilities provided additional information.



9 событий за 8 лет эксперимента...

Кстати, длина трека соответствует релятивистскому удлинению времени

Observation of Tau Neutrino Interactions (DONUT Collaboration)
<https://arxiv.org/ftp/hep-ex/papers/0012/0012035.pdf>
 Вертикальный отрезок 0.1мм, горизонтальный 1мм
 Внизу: схема детектора. Заштрихованные пластины — фотоэмульсия, серые — сталь, белые — пластик.

Часть 2. Слабое взаимодействие, W^+ , W^- , Z^0 бозоны

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	
		$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	0	
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
		e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
		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

Стандартная модель

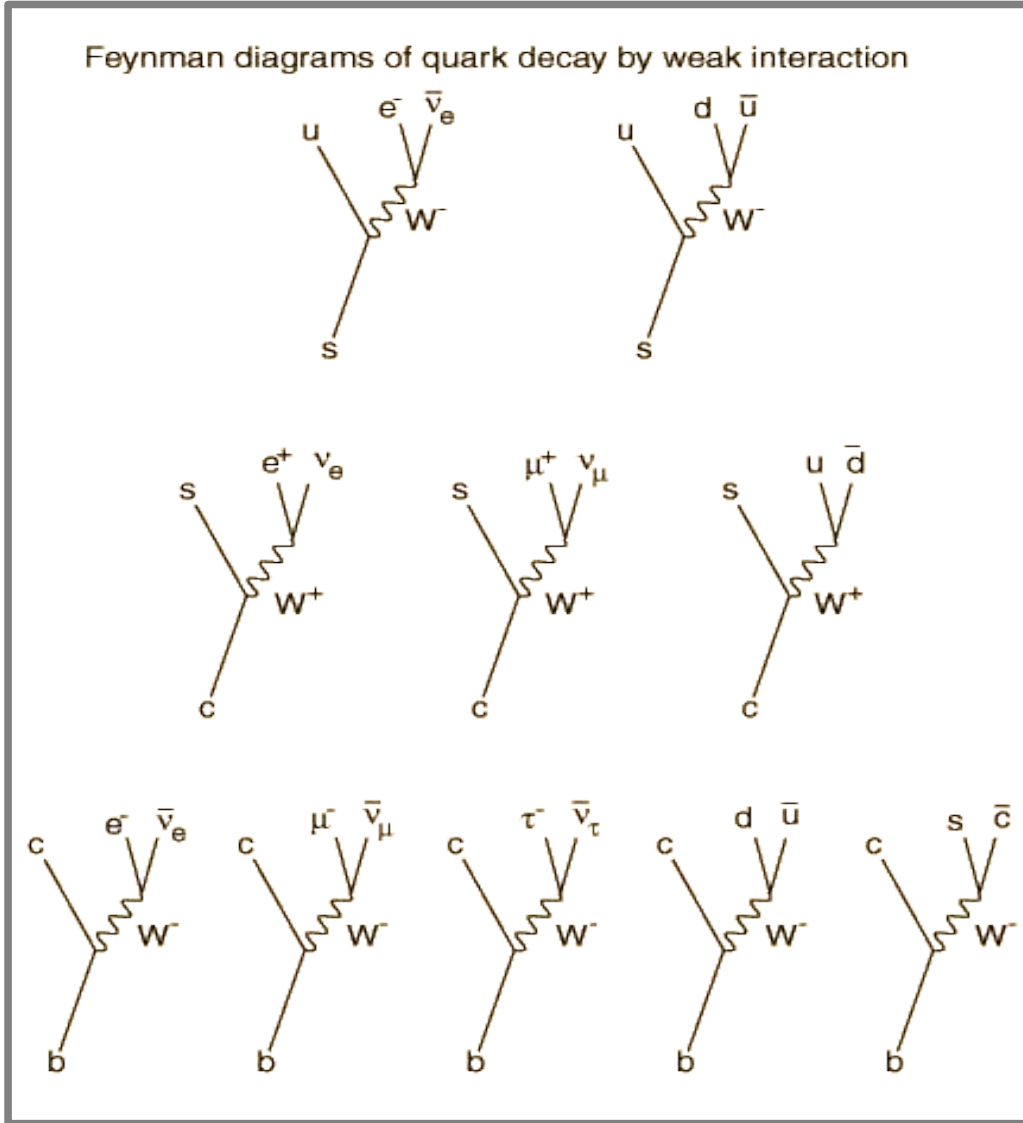
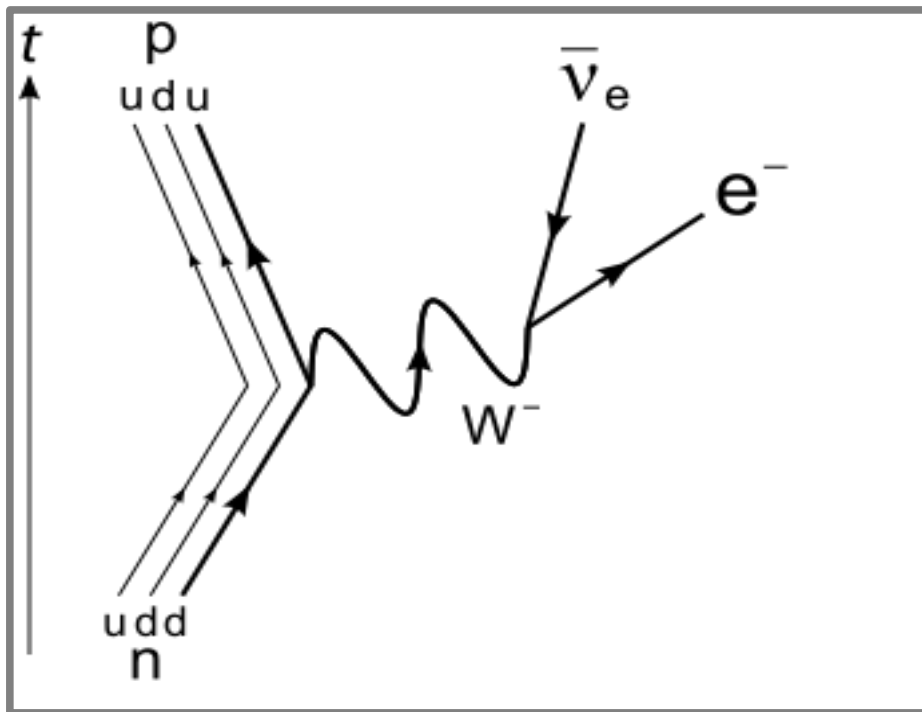
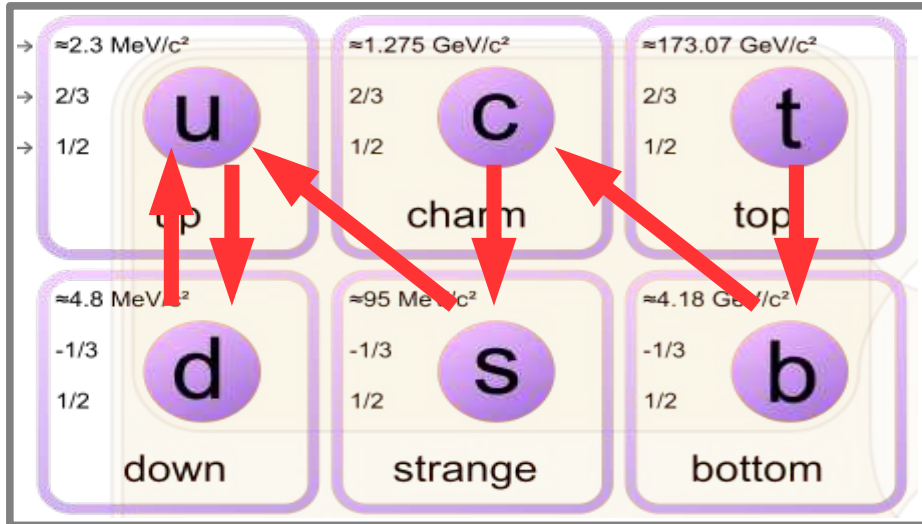


Масса W и Z бозонов — около 90 ГэВ

Масса π-мезона (модель Юкавы ядерных сил!) 140 МэВ

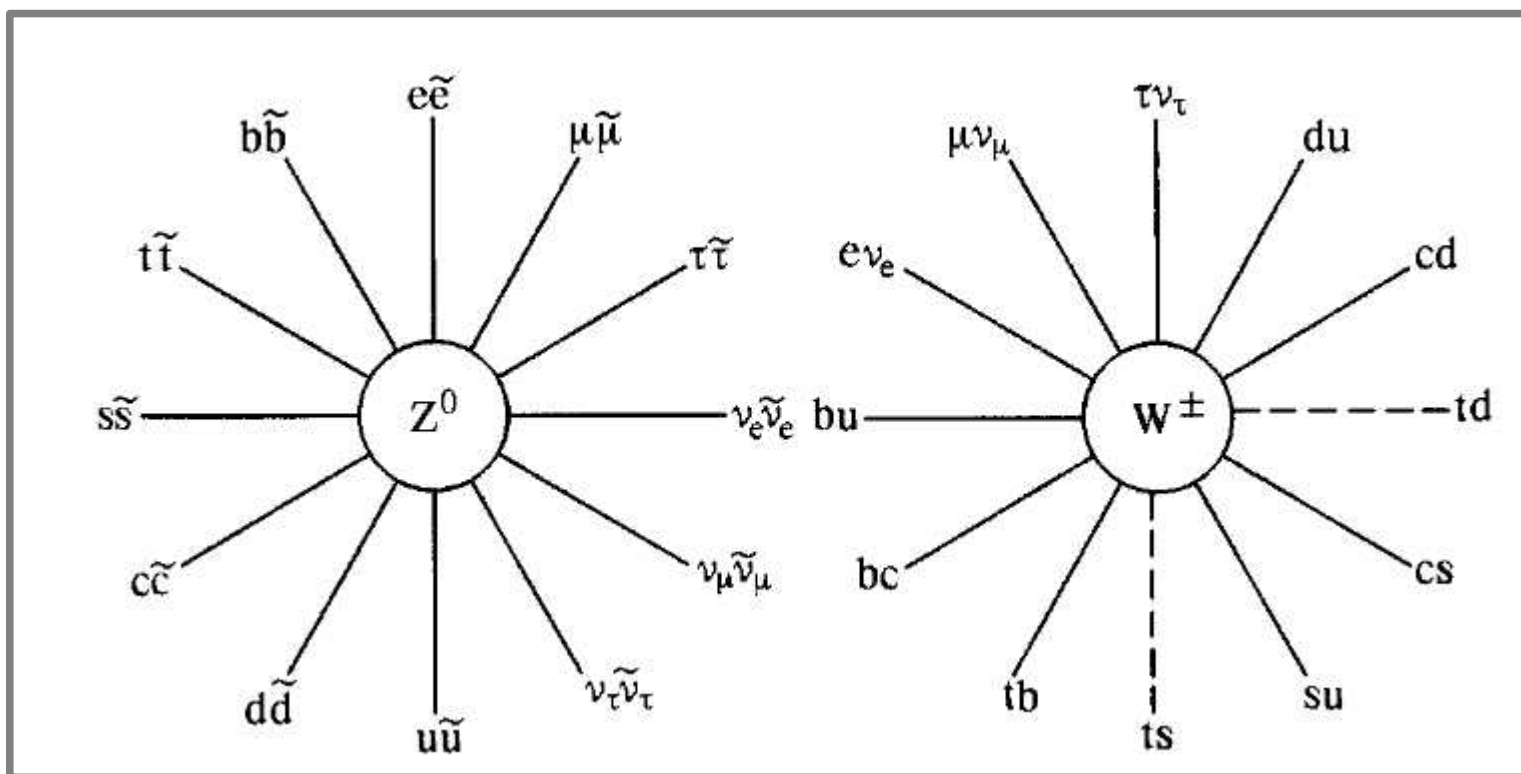
Соответствует тому, что слабое взаимодействие еще более короткодействующее чем сильное.

Превращения кварков (слабое взаимодействие)



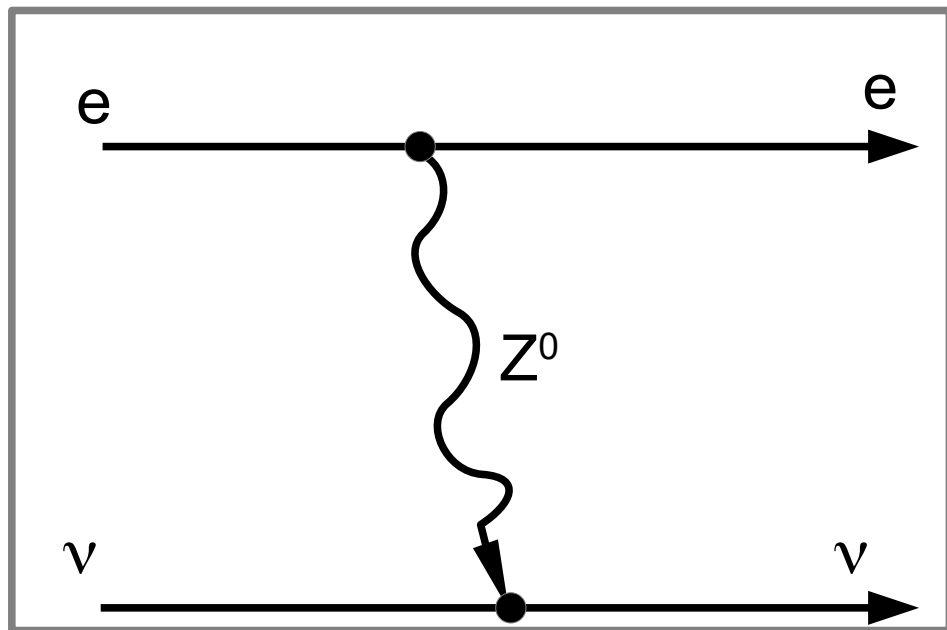
см. также стр. 333 задачника

Распады W и Z бозонов

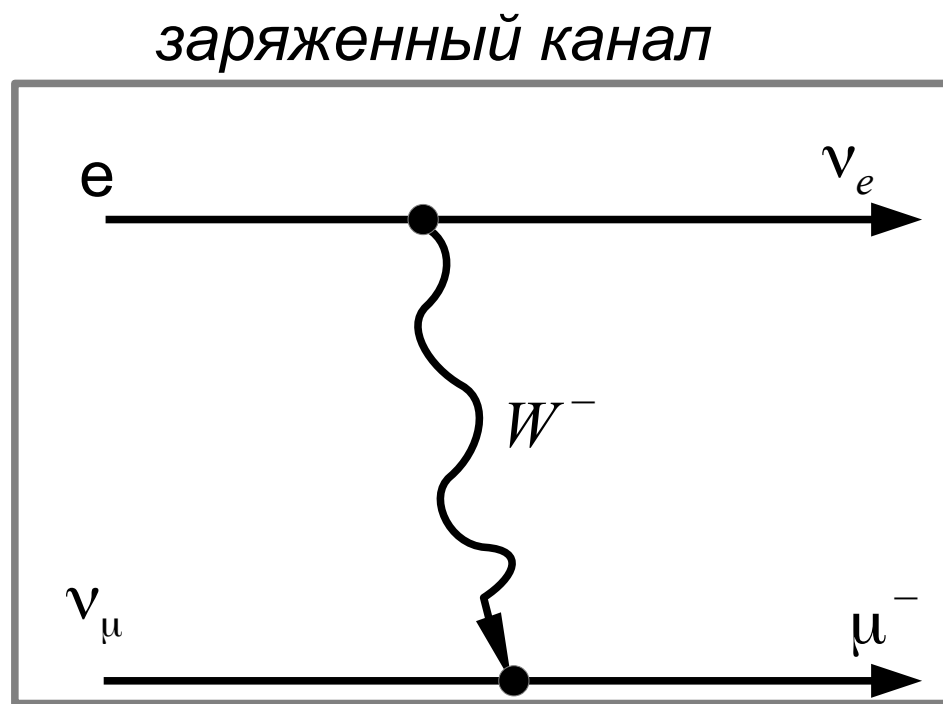


стр. 333 «Сборника задач...»

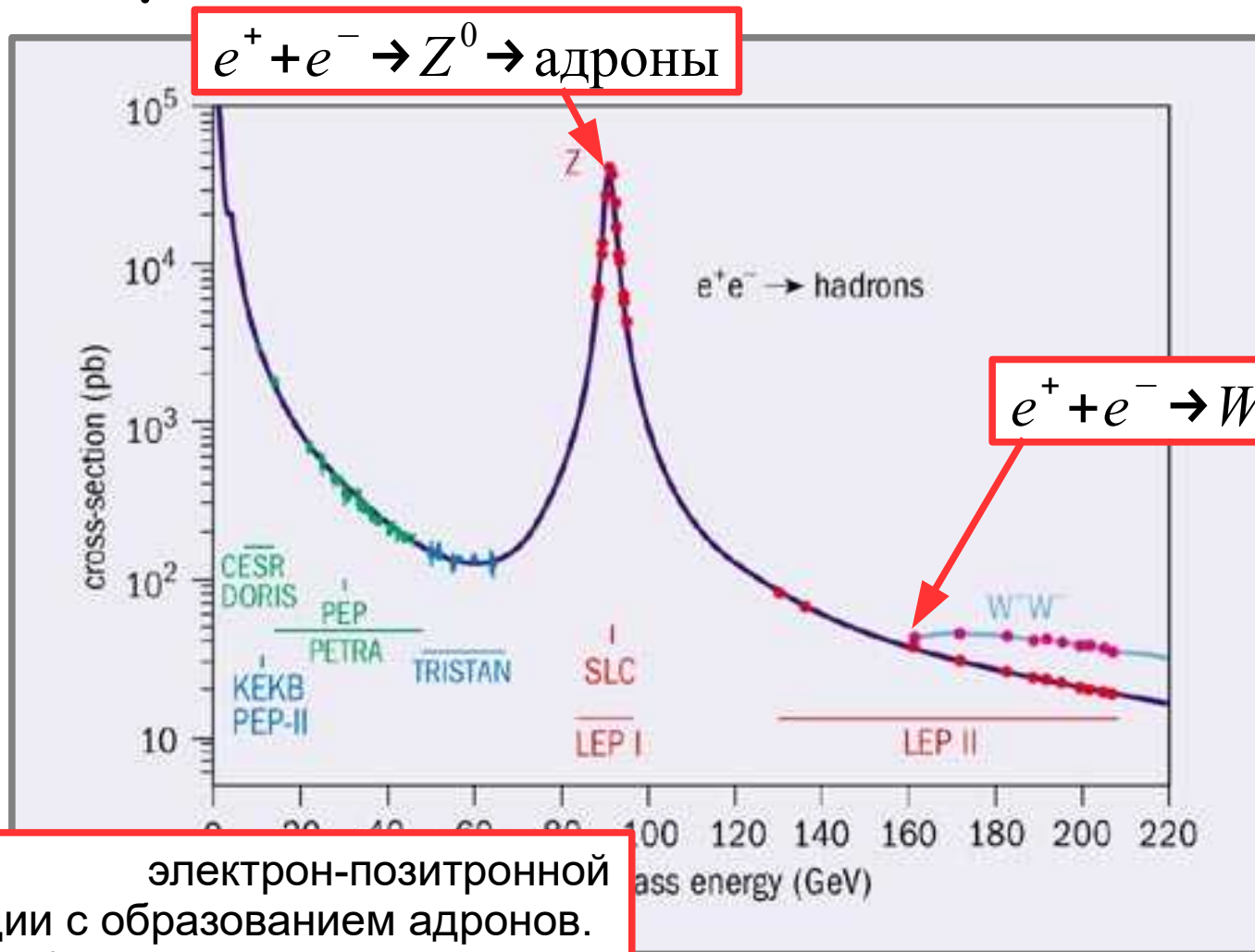
Взаимодействие электрона с нейтрино



нейтральный канал



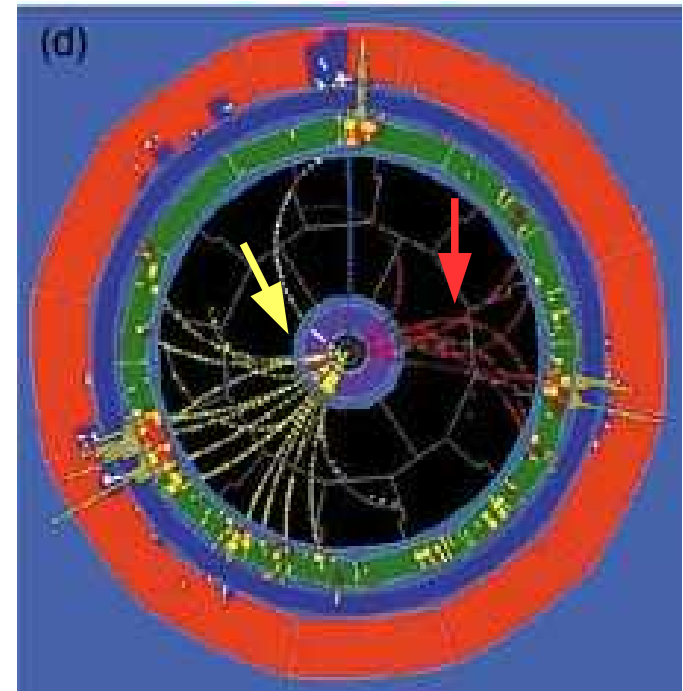
Наблюдение W и Z бозонов в эксперименте (лептонный коллайдер).



Сечение электрон-позитронной аннигиляции с образованием адронов. LEP (CERN)

Адронные струи (Jet)

$$e^+ e^- \rightarrow W^+ W^-$$
$$W^+ \rightarrow u \bar{d}$$

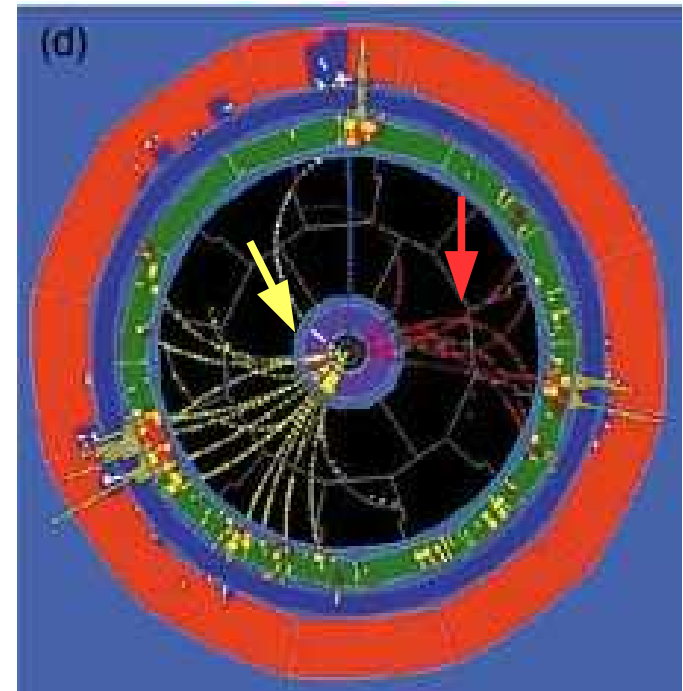


W+W- event at ALEPH

Адронные струи (Jet)

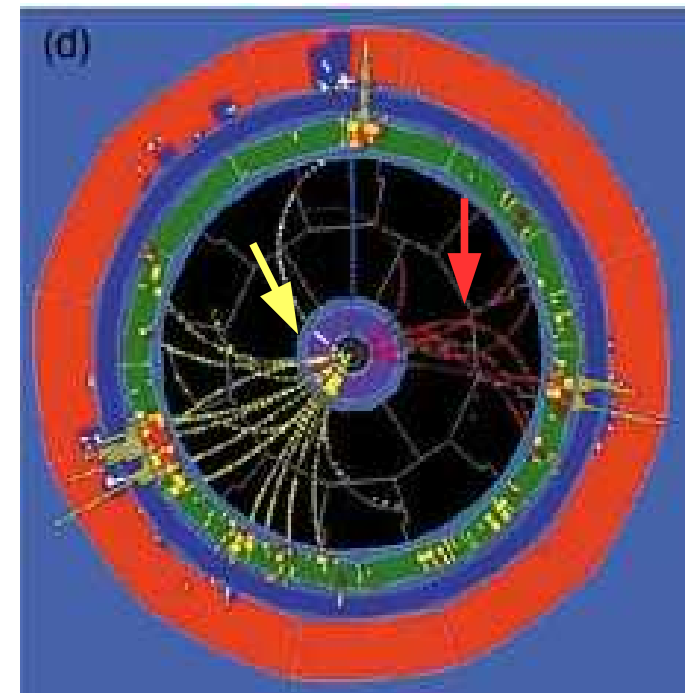
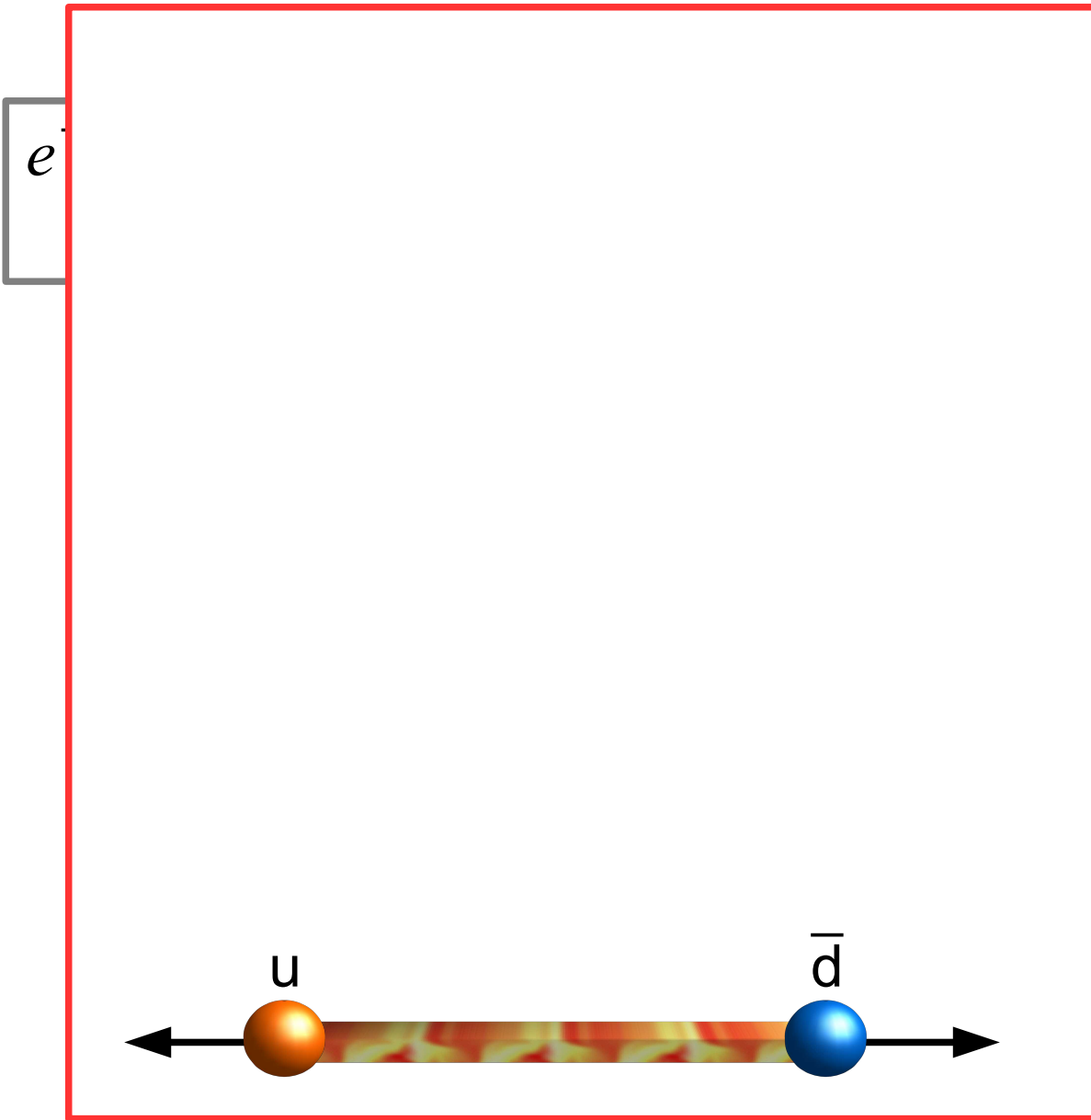
$$e^+ e^- \rightarrow W^+ W^-$$
$$W^+ \rightarrow u \bar{d}$$

Кварковый состав π^+
мезона, но
ОГРОМНЫЙ
избыток энергии



W+W- event at ALEPH

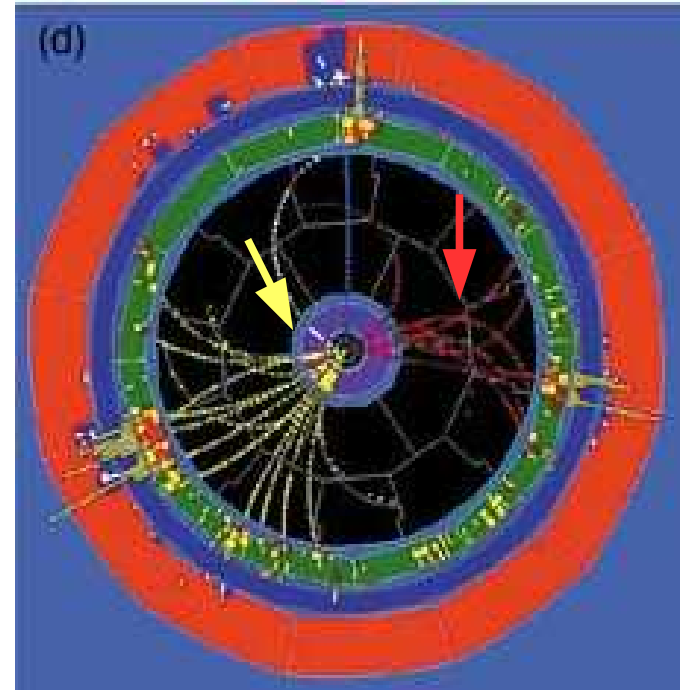
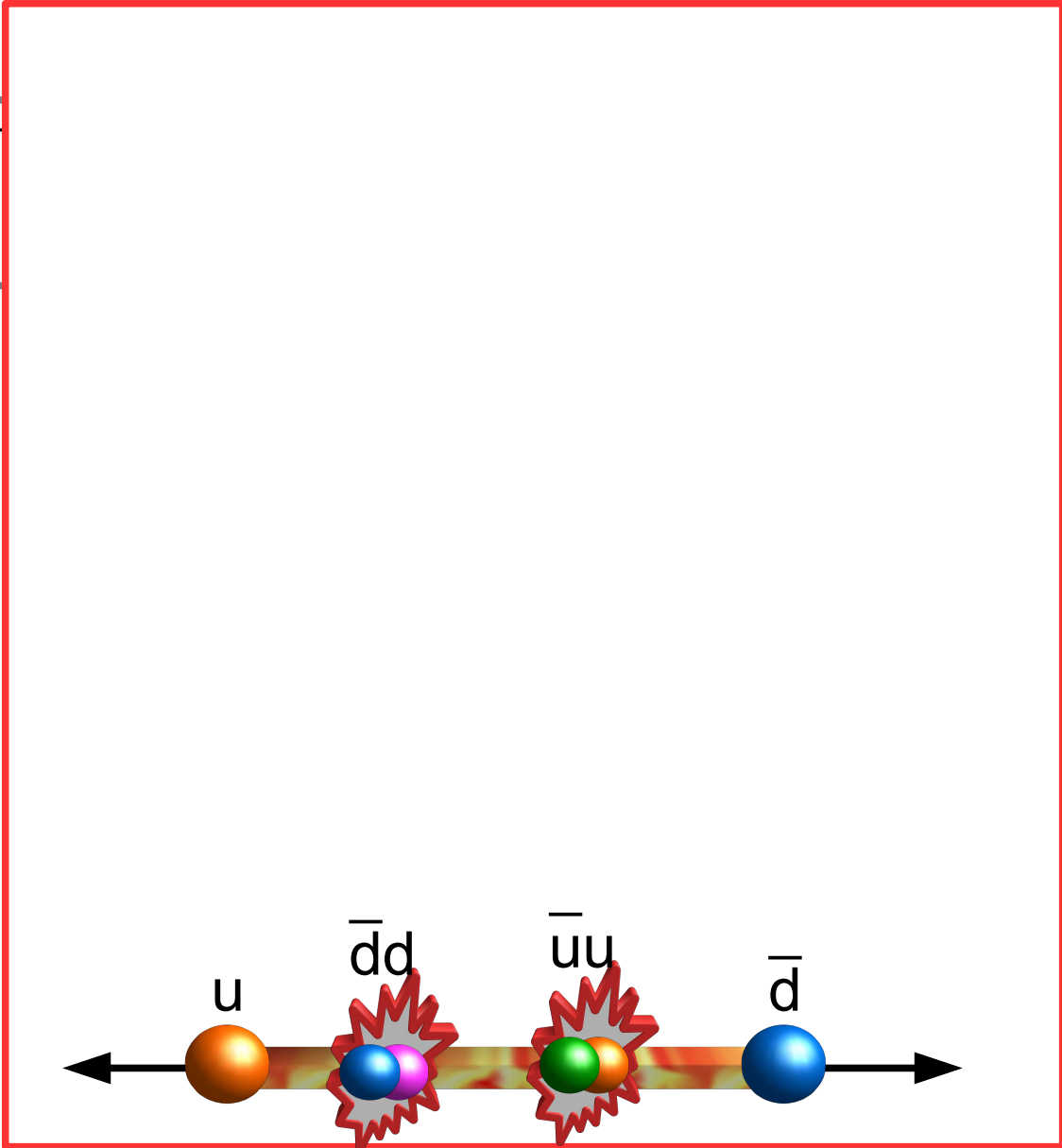
Адронные струи (Jet)



W+W- event at ALEPH

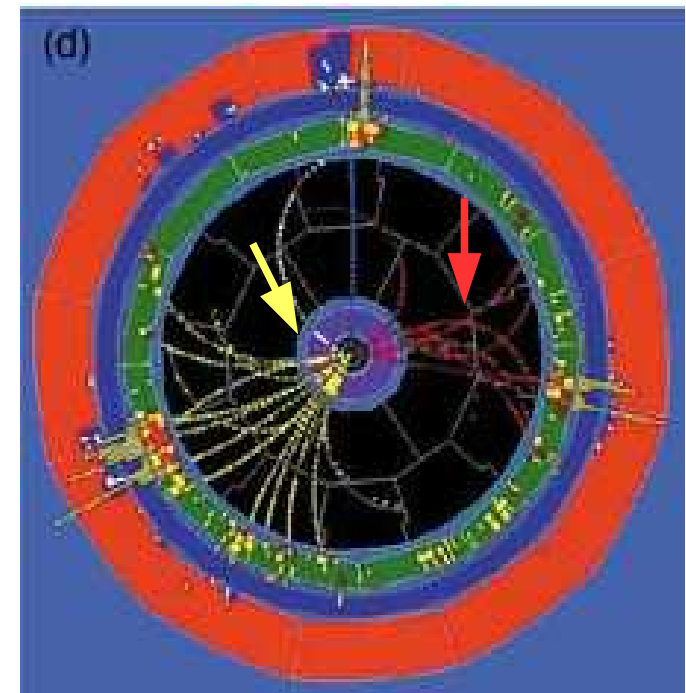
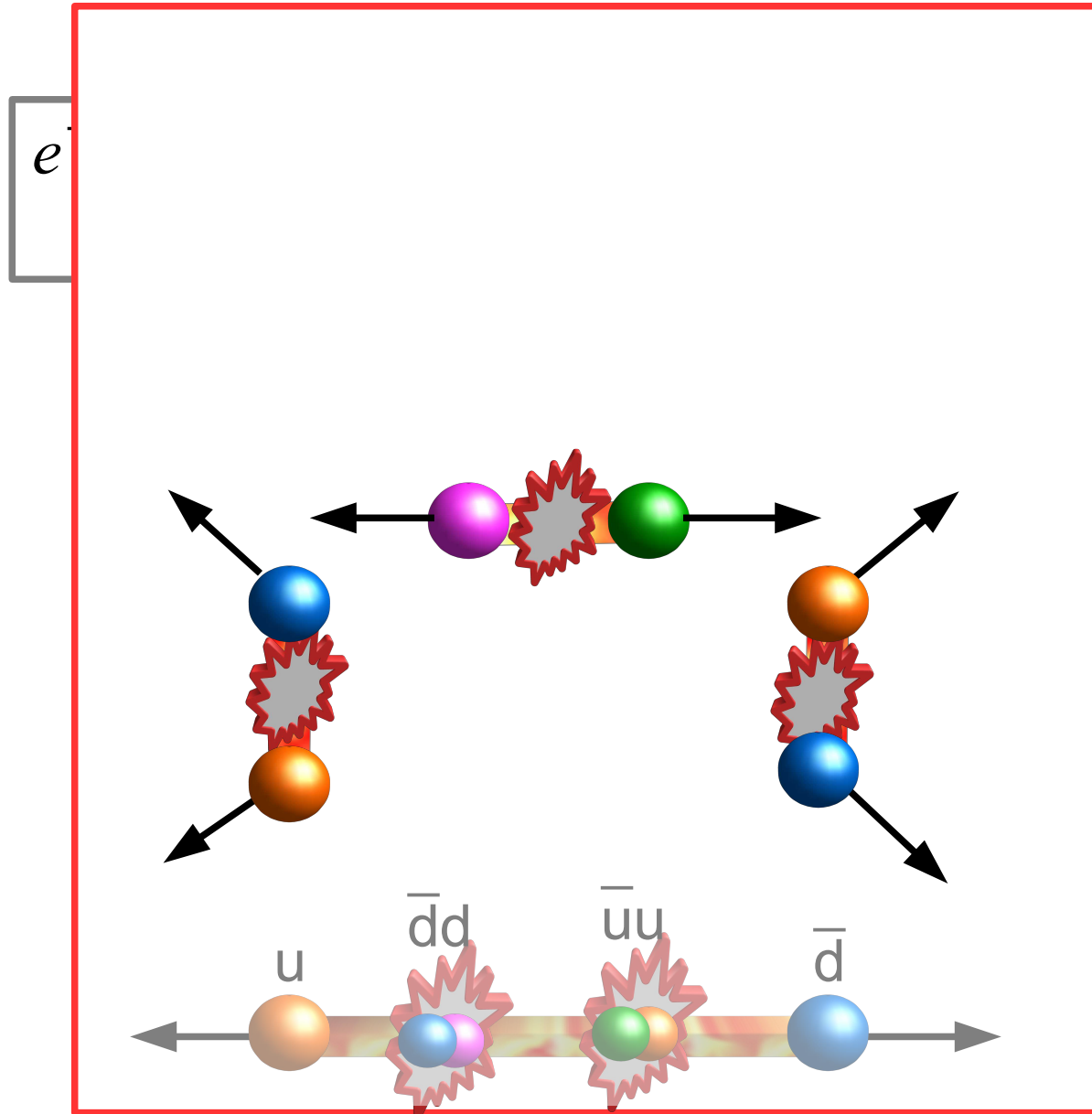
Адронные струи (Jet)

e^-



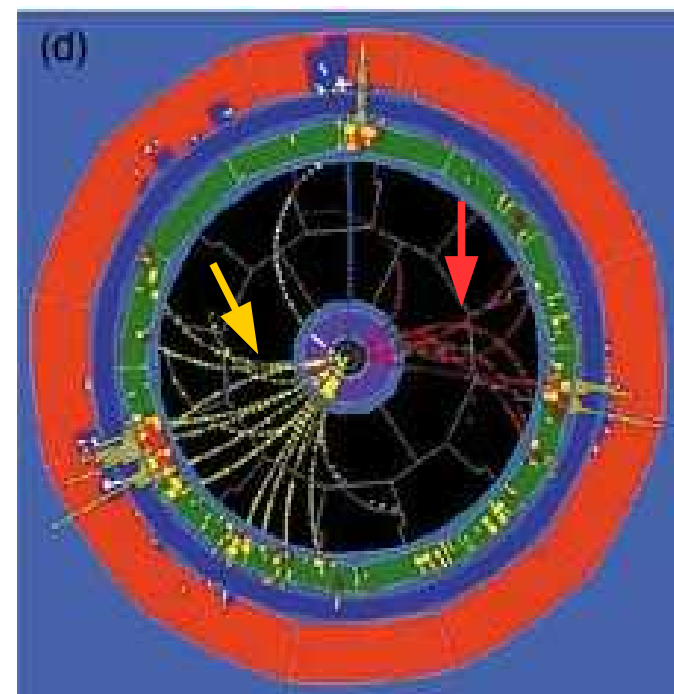
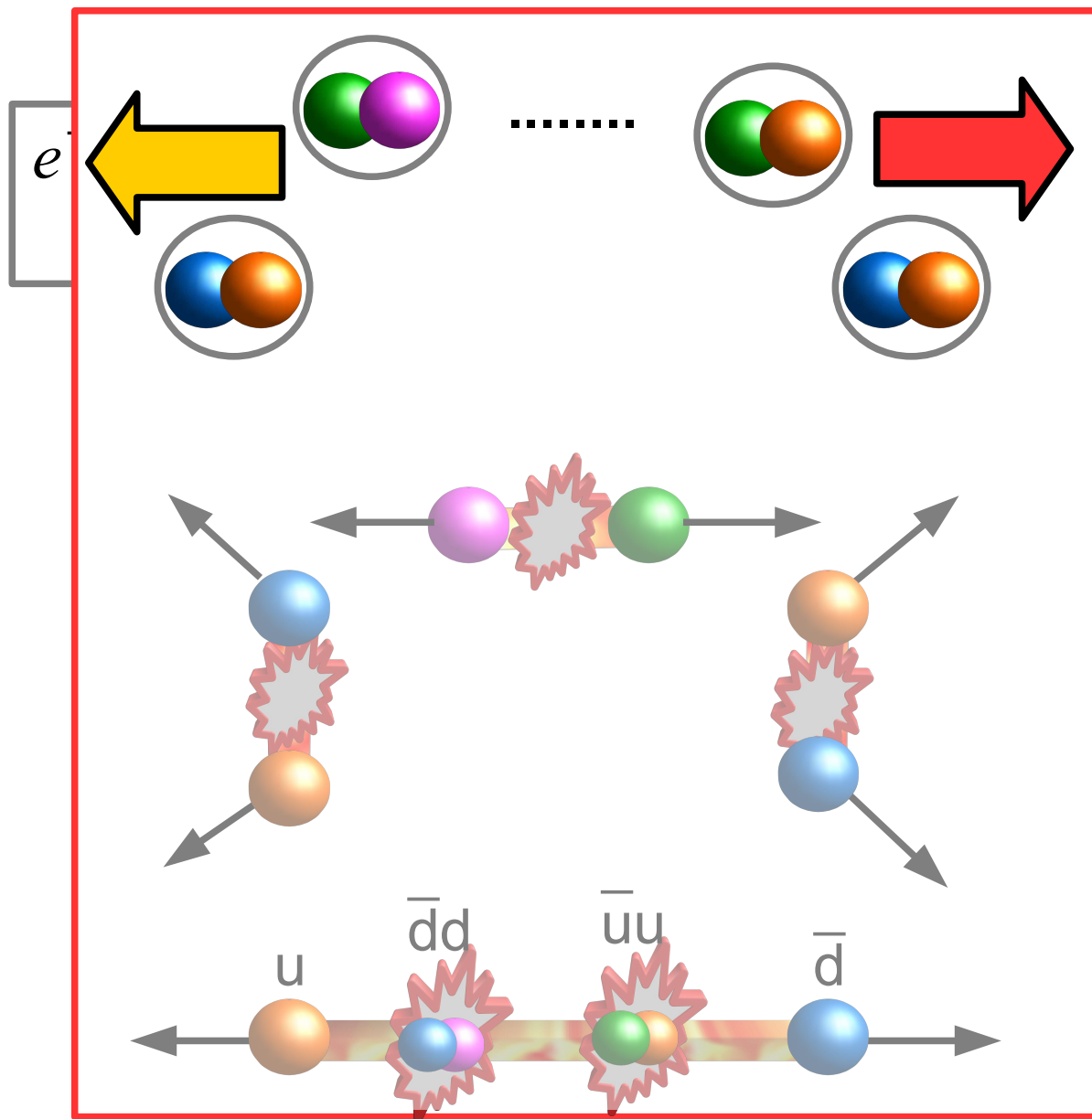
W+W- event at ALEPH

Адронные струи (Jet)



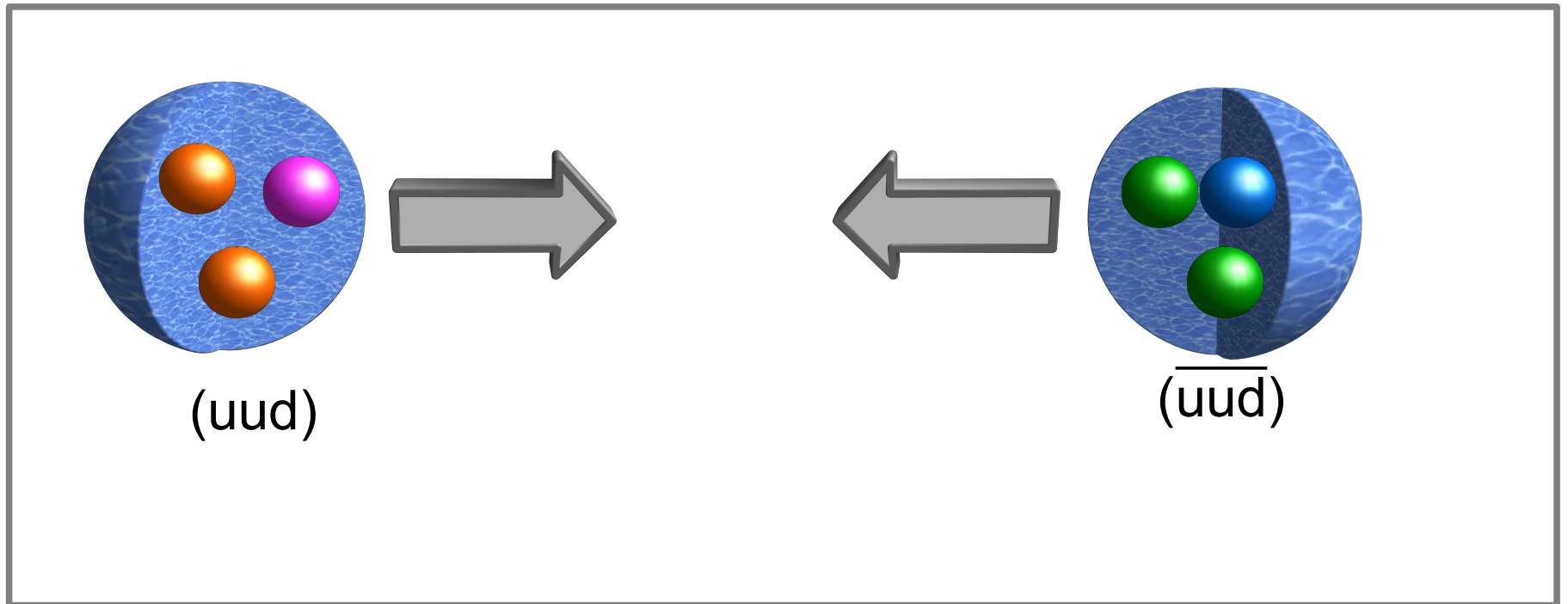
W^+W^- event at ALEPH

Адронные струи (Jet)



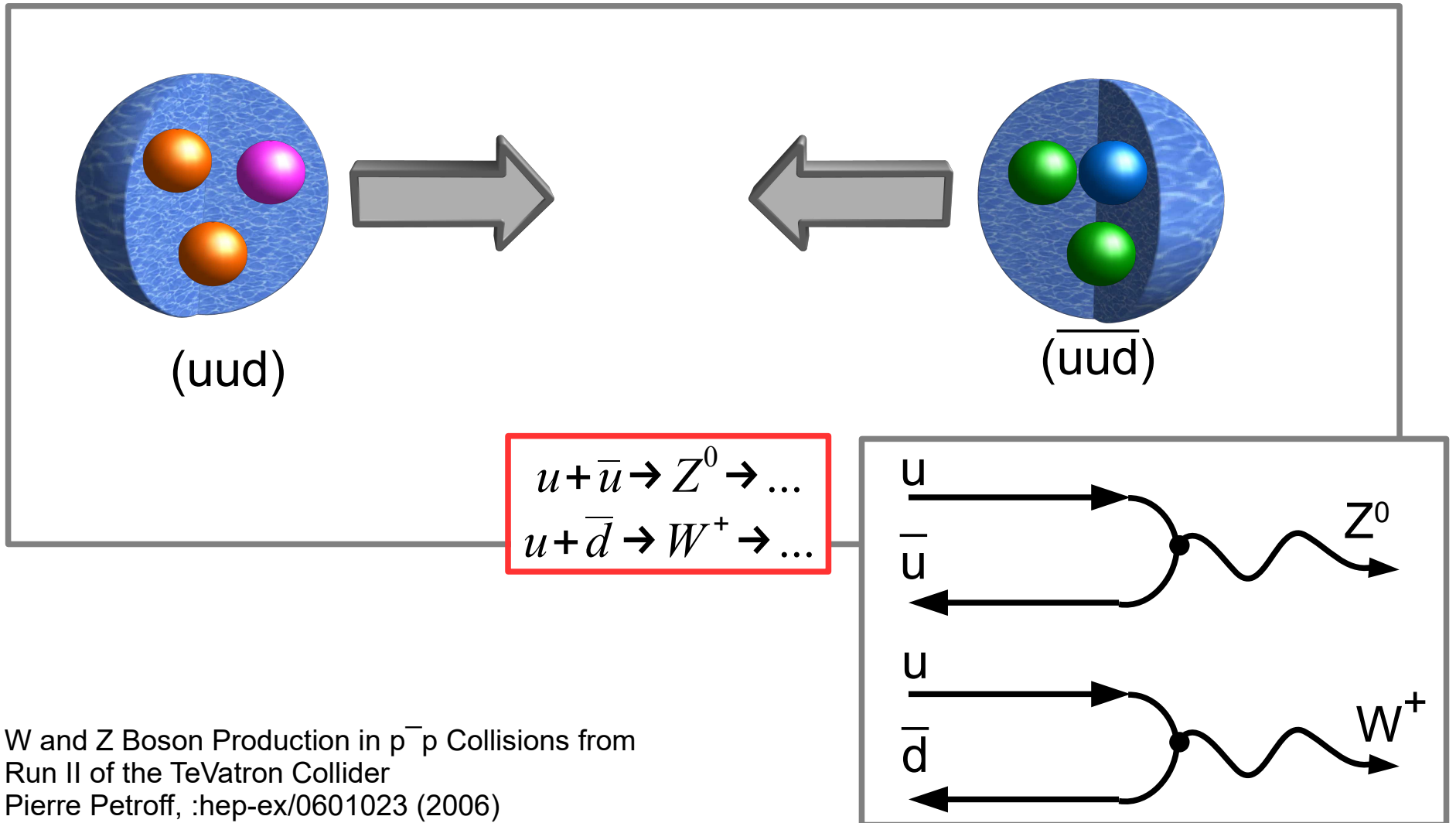
W^+W^- event at ALEPH

Наблюдение W и Z бозонов в $p\bar{p}$ - СТОЛКНОВЕНИЯХ



W and Z Boson Production in $p\bar{p}$ Collisions from
Run II of the TeVatron Collider
Pierre Petroff, :hep-ex/0601023 (2006)

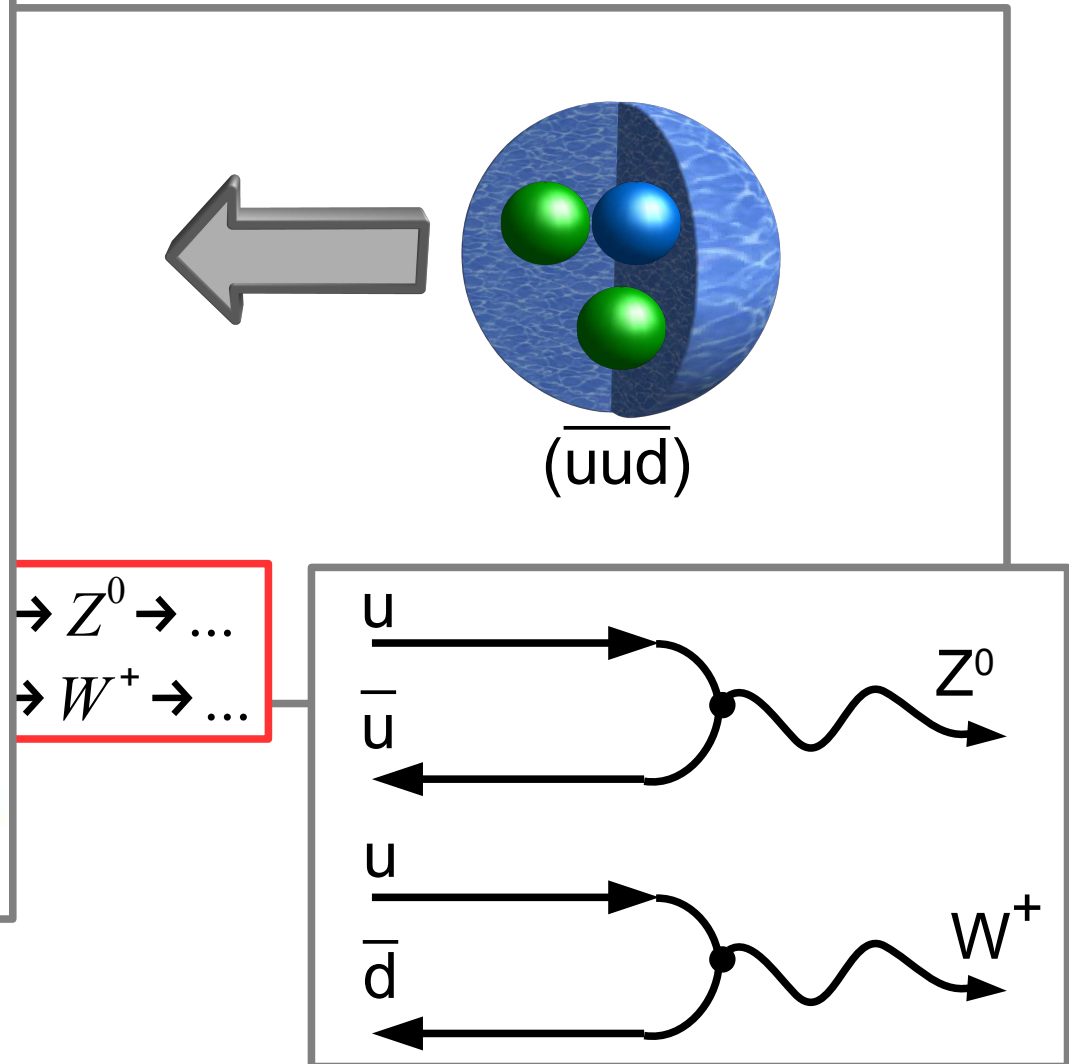
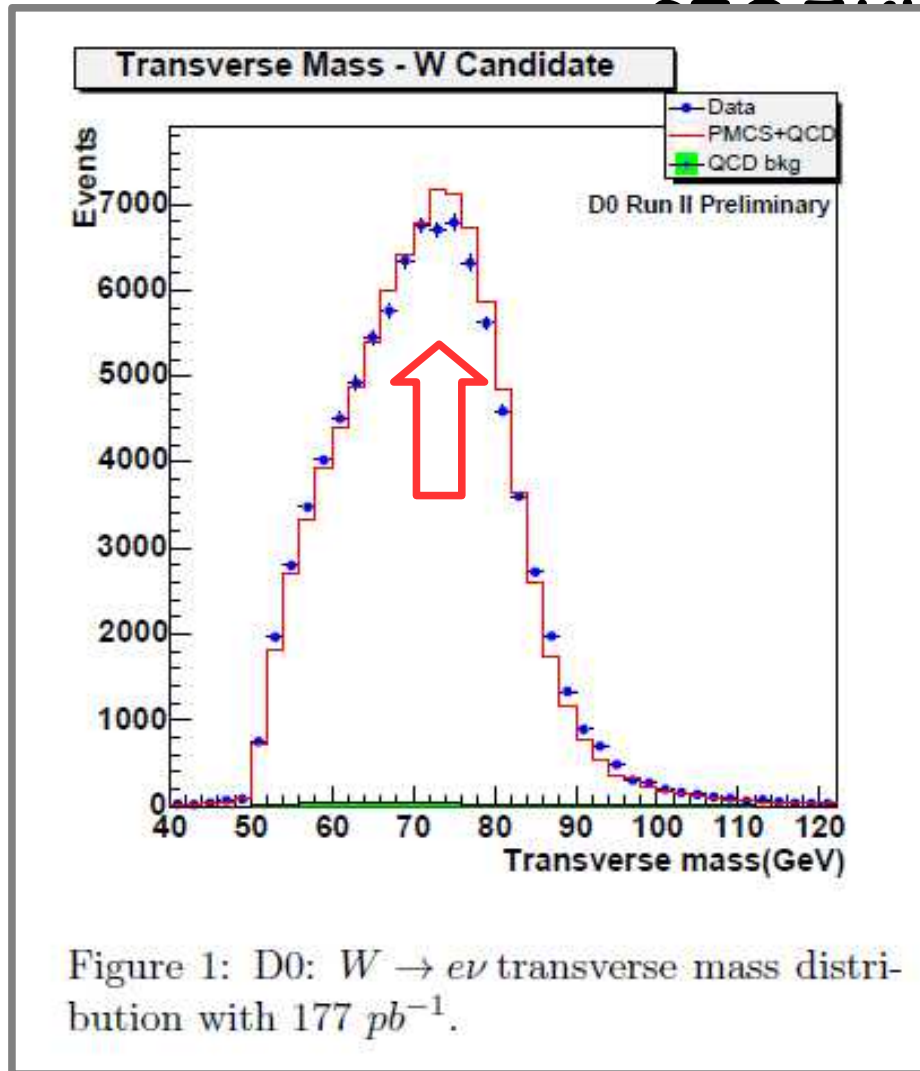
Наблюдение W и Z бозонов в $p\bar{p}$ - СТОЛКНОВЕНИЯХ



W and Z Boson Production in $p\bar{p}$ Collisions from
Run II of the Tevatron Collider
Pierre Petroff, :hep-ex/0601023 (2006)

Наблюдение W и Z бозонов в $p\bar{p}$ -

СЕРВИСОВЕНИЯХ



W and Z Boson Production in $\bar{p}p$ Collisions from Run II of the Tevatron Collider
 Pierre Petroff, :hep-ex/0601023 (2006)

Часть 3. Немного о бозоне Хиггса

Бозон Хиггса

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

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

Примеры похожего механизма:

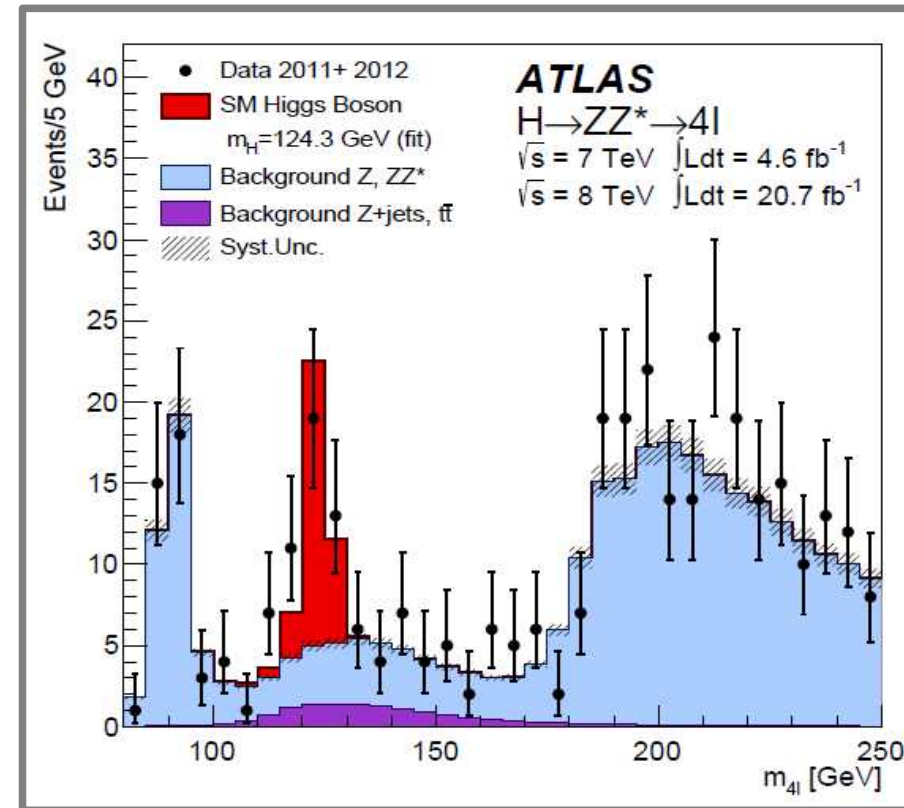
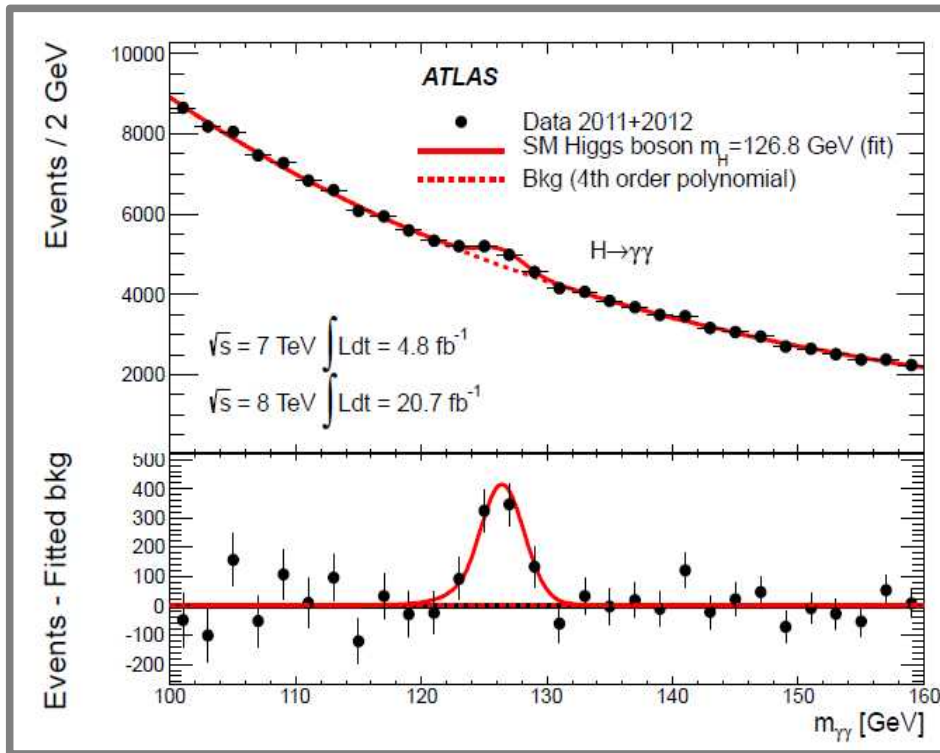
- фотон в волноводе
- фотон в сверхпроводнике
- магнитно-упругие взаимодействия
- шарик на упругой пленке (условно)

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.

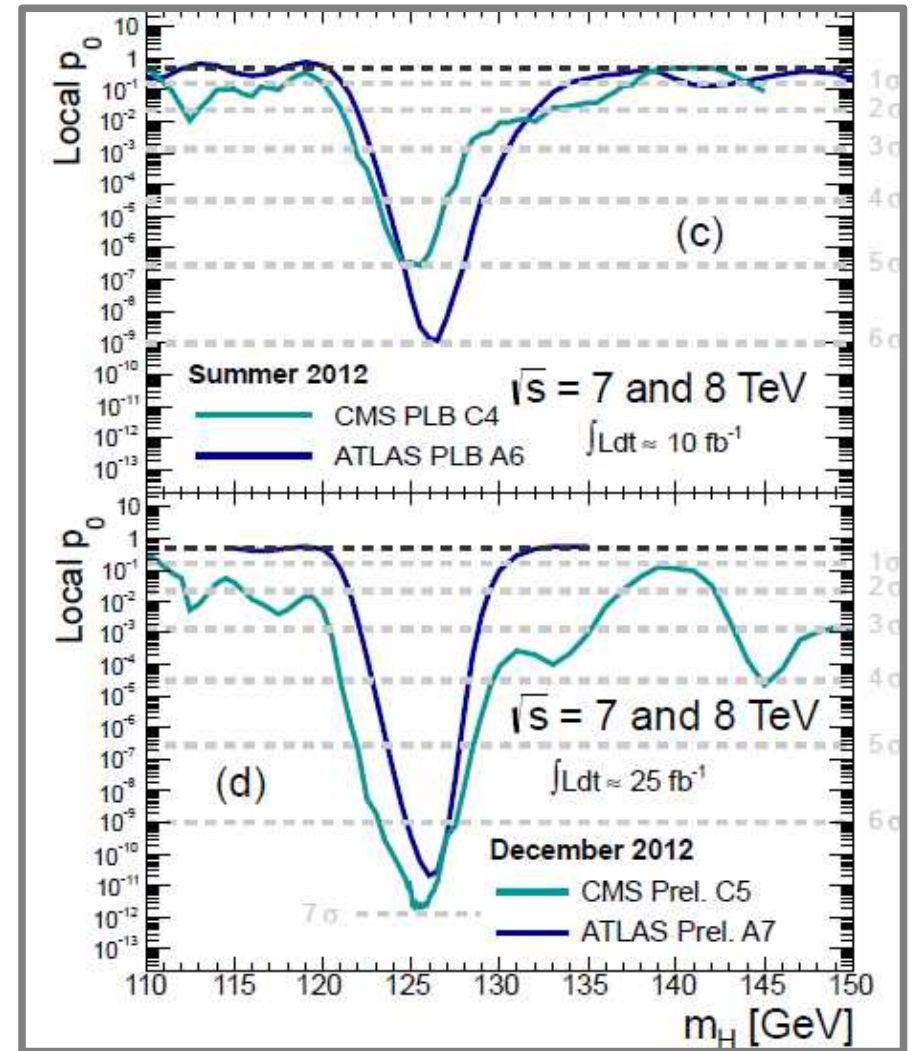
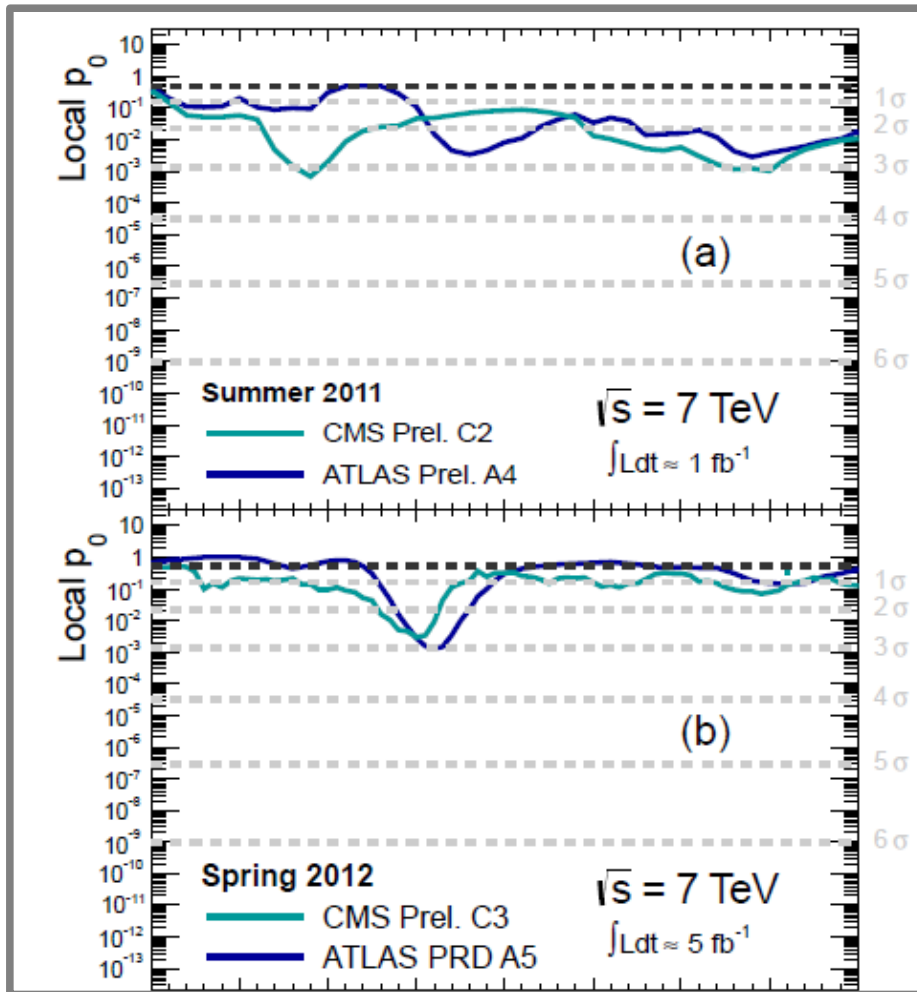
Эксперимент...



Слева: статистика двухфотонных распадов бозона Хиггса.

Справа: статистика четырёхлептонных распадов бозона Хиггса.

Накопление статистики



Накопление статистики распадов бозона Хиггса по мере развития экспериментов на БАК в лета 2011 по декабрь 2012

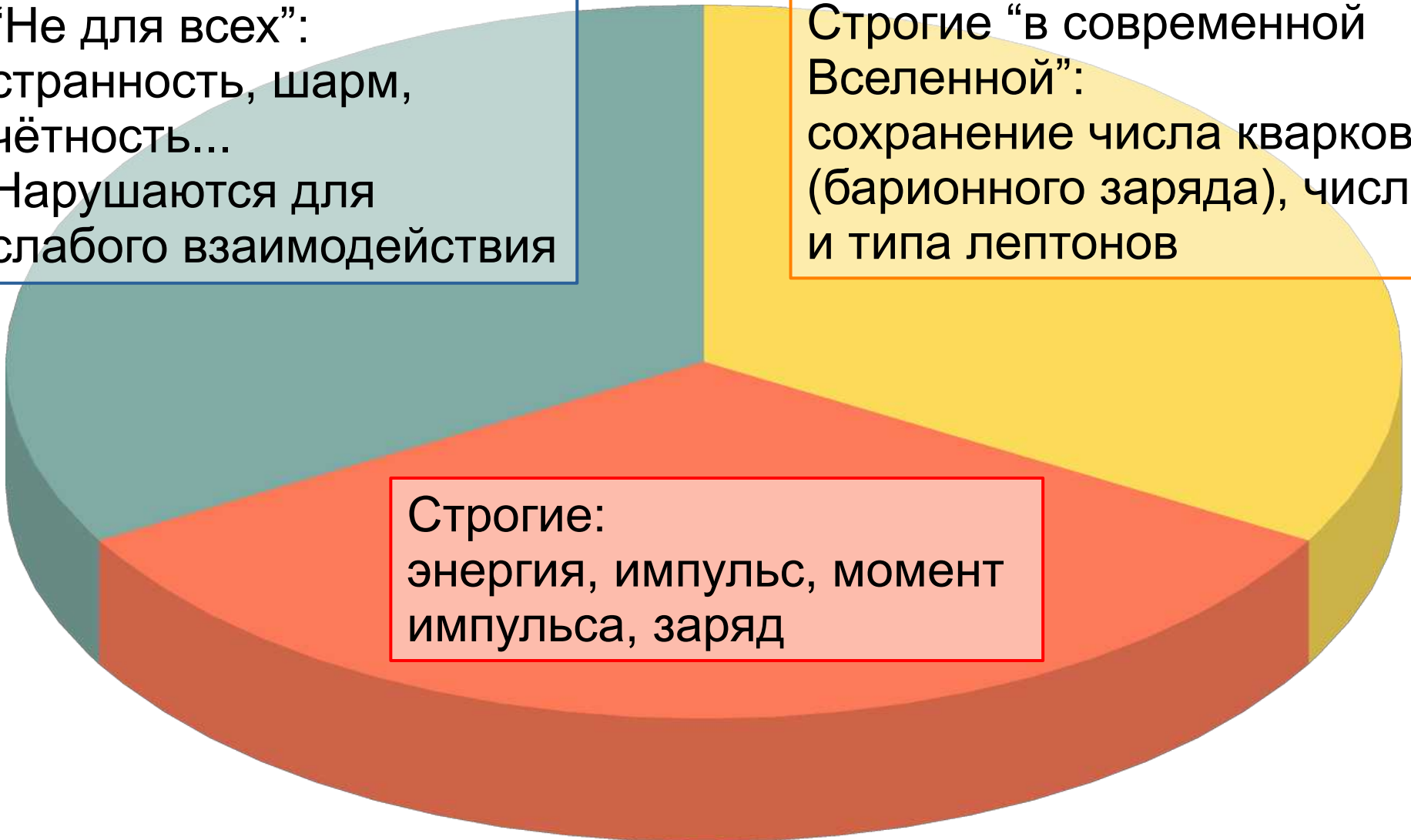
Часть 4. «Строгие» и «нестрогие»
законы сохранения в мире
элементарных частиц.

Законы сохранения

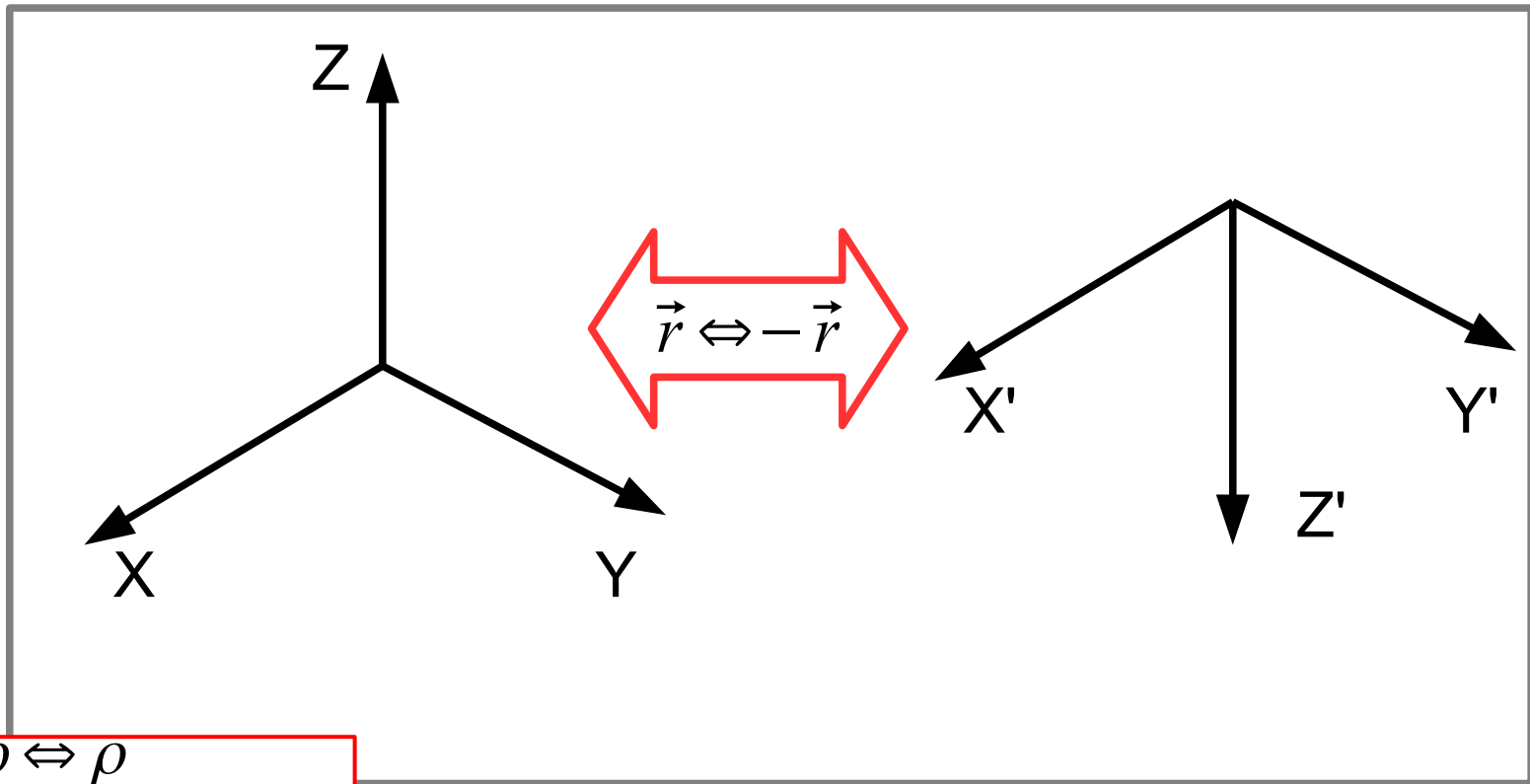
“Не для всех”:
странность, шарм,
чётность...
Нарушаются для
слабого взаимодействия

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

Строгие:
энергия, импульс, момент
импульса, заряд

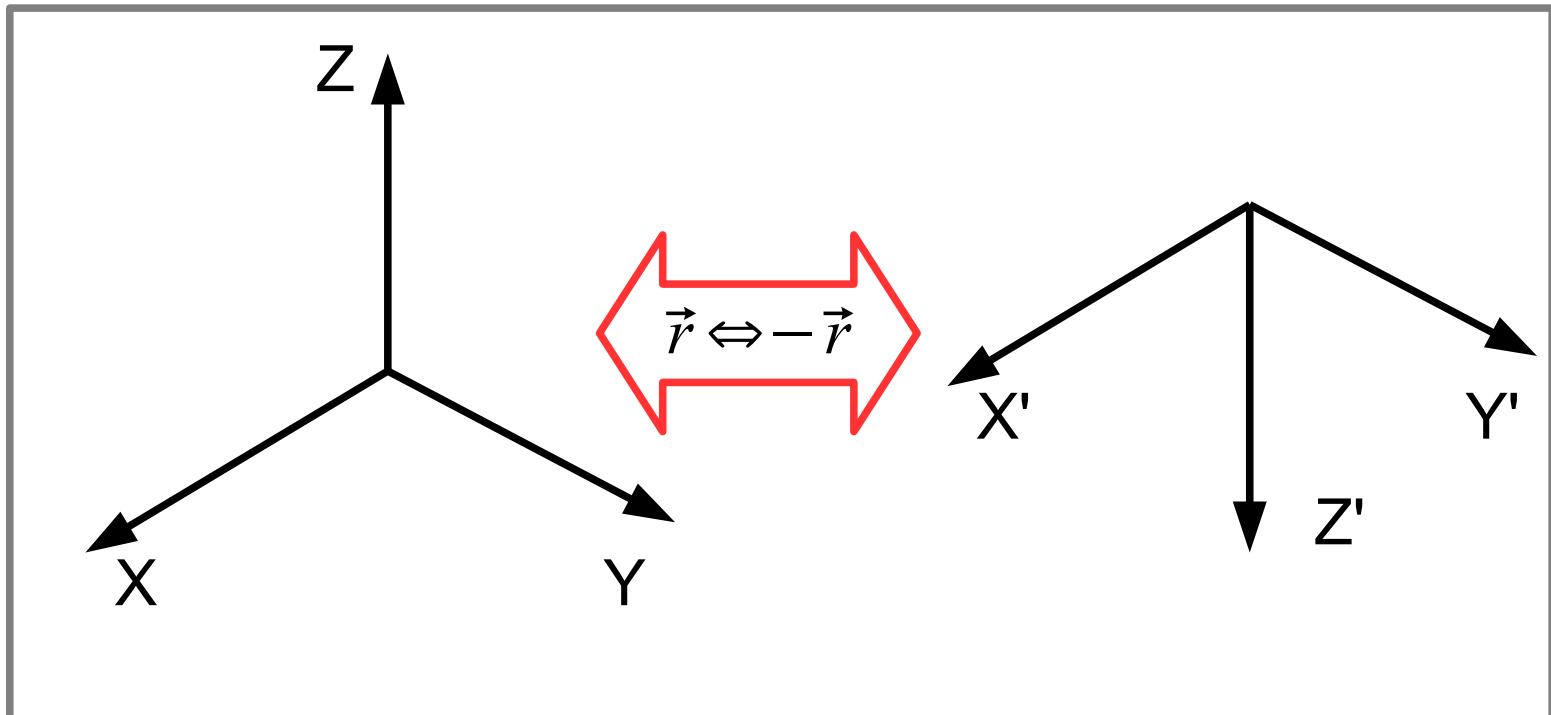


Пространственная четность законов природы



$$\begin{aligned} \rho &\Leftrightarrow \rho \\ \vec{r} ; \vec{V} ; \vec{E} &\Leftrightarrow -\vec{r} ; -\vec{V} ; -\vec{E} \\ \vec{J} ; \vec{S} ; \vec{H} &\Leftrightarrow \vec{J} ; \vec{S} ; \vec{H} \end{aligned}$$

Пространственная четность законов природы



$$\rho \Leftrightarrow \rho$$

$$\vec{r}; \vec{V}; \vec{E} \Leftrightarrow -\vec{r}; -\vec{V}; -\vec{E}$$

$$\vec{J}; \vec{S}, \vec{H} \Leftrightarrow \vec{J}, \vec{S}, \vec{H}$$

$$\hat{H} = \frac{1}{2m} \left(\hat{p} - \frac{e}{c} \vec{A} \right)^2 - \hat{\mu} \vec{H} + e\phi \Leftrightarrow \hat{H}$$

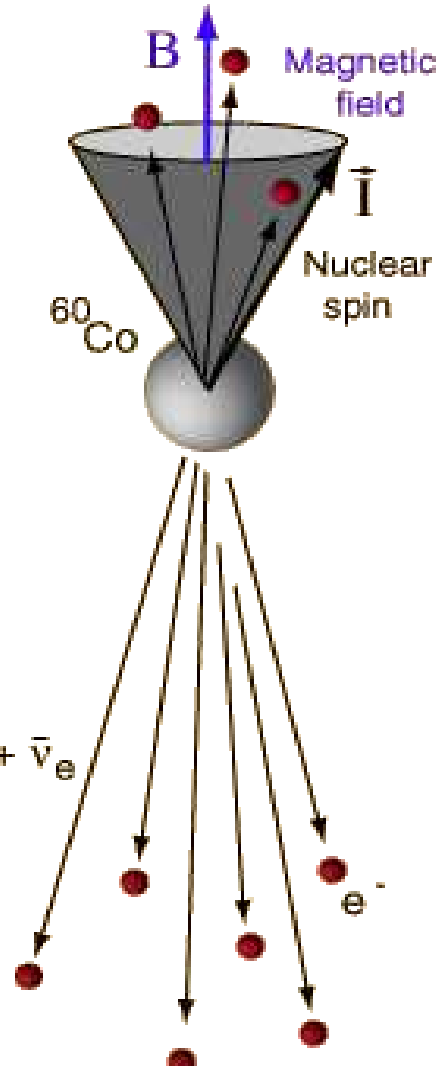
$$\text{rot } \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \Leftrightarrow \text{в себя}$$

Эксперимент Ву

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

Wu, 1957

$^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e$



Hyperphysics project

Если бы была симметрия к инверсии, то направление вылета бета-частиц не зависело бы от направления магнитного момента ядра

Эксп

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

Wu, 1957

$${}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e$$

Hyperphysics project

Wu, 1957

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

Beta emission is

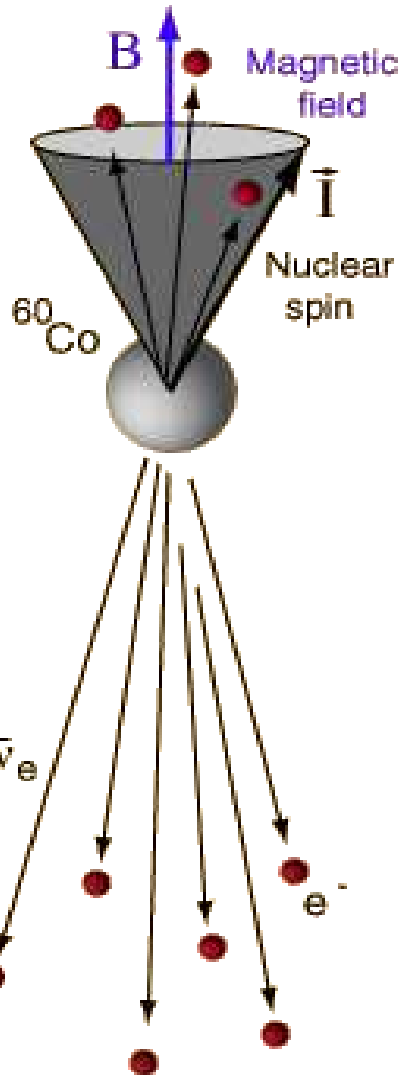
${}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e$

$\vec{r} \leftrightarrow -\vec{r}$

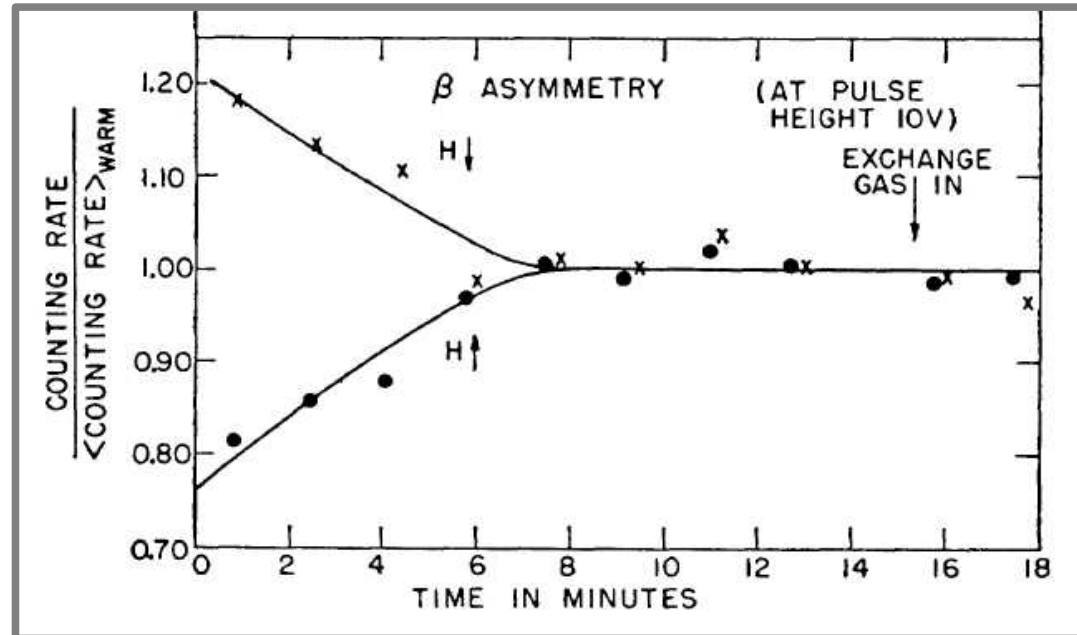
Эксперимент Ву

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

Wu, 1957



Hyperphysics project

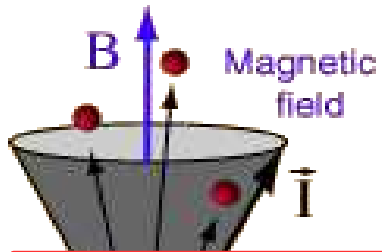


Различие числа отсчётов счётчика бета-частиц при разном направлении поляризирующего магнитного поля. В момент $t=0$ достигалась минимальная температура образца кобальта, затем образец нагревался из-за теплоподвода и выделения тепла при распаде, и поляризация пропадала. Анизотропия бета распада поляризованных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

Эксперимент Wu

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

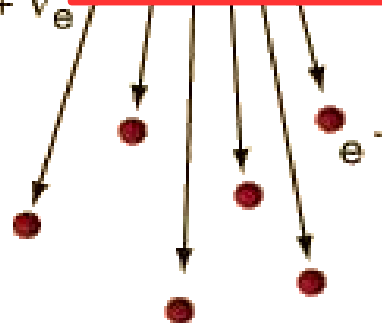
Wu, 1957



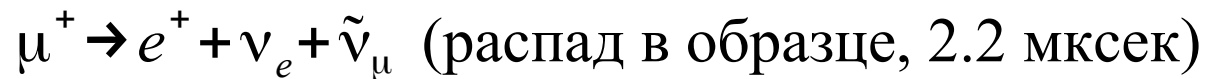
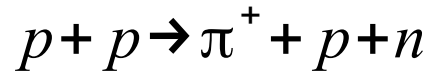
Следствия:

- 1) СРТ-инвариантность законов микромира
- 2) Все нейтрино «левые»: спин направлен против импульса, антинейтрино - «правые».

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 отсчетов в момент $t=0$. Из работы Ц.Ву

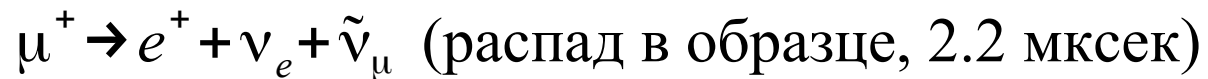
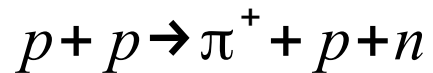


Мюонная спектроскопия в физике твёрдого тела



Мишень для производства мюонов в
Институте Поля Шерера.

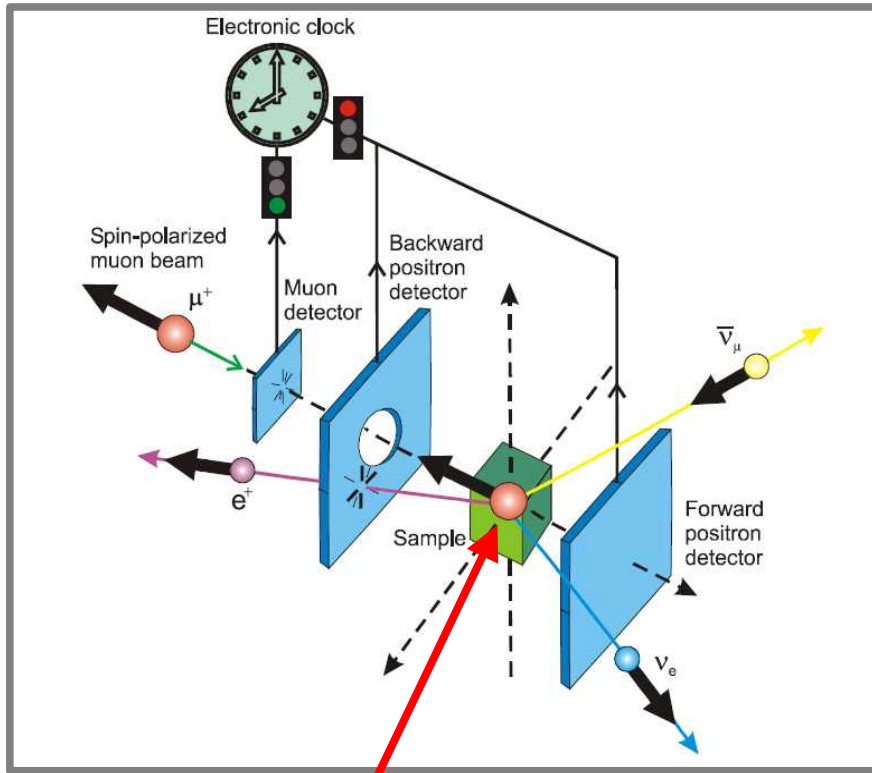
Мюонная спектроскопия в физике твёрдого тела



Мишень для производства мюонов в
Институте Поля Шерера.

- распад пиона — двухчастичный + «левизна» нейтрино: спин мюона поляризован против импульса, $E \approx 4$ МэВ
- при распаде мюона (опыт Ву!) позитрон преимущественно вылетает вдоль спина мюона в момент распада

Схема опыта



$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \gamma \vec{S} \times \vec{B}_{loc}$$

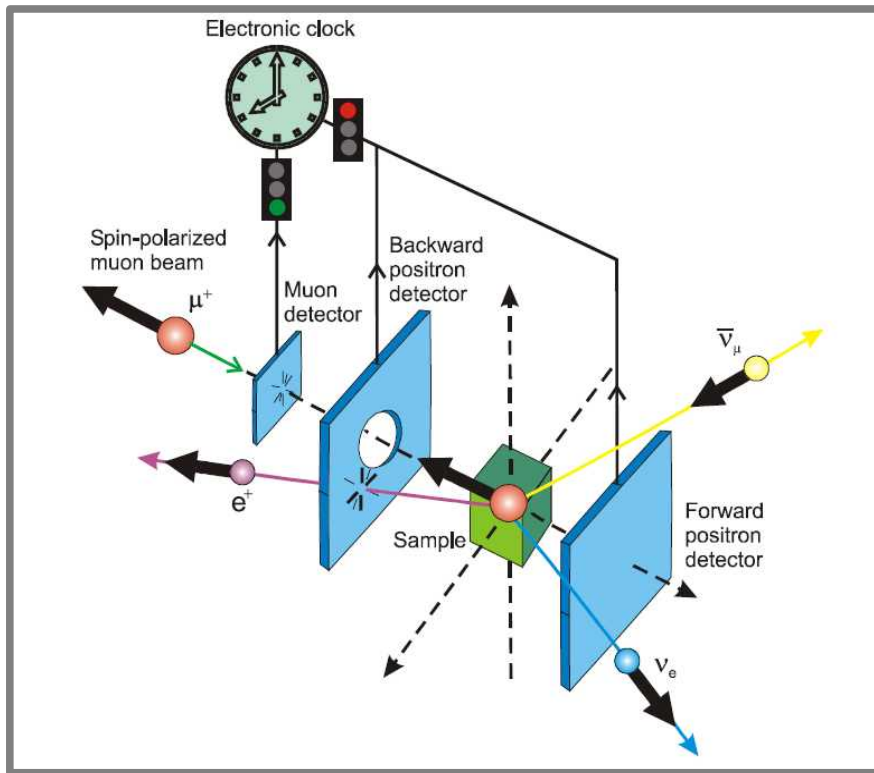
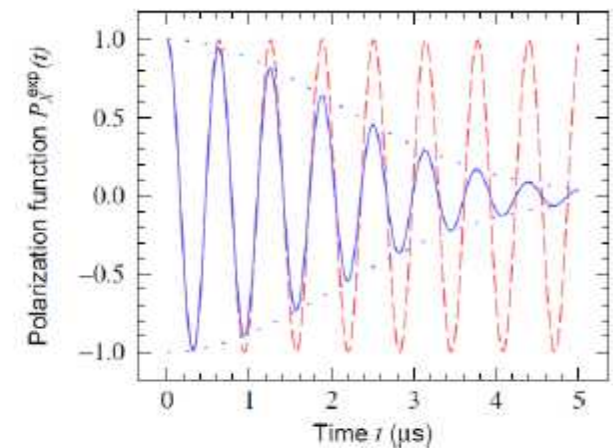
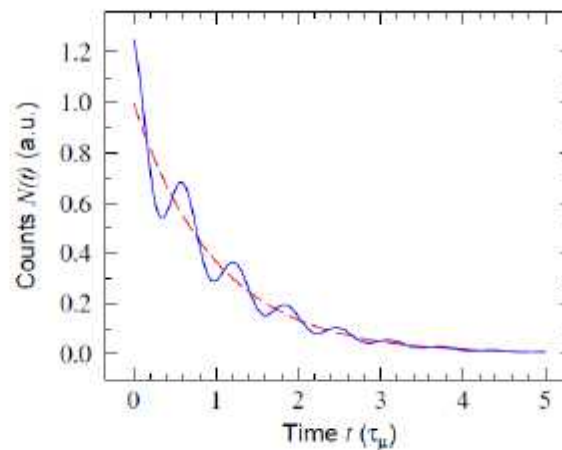
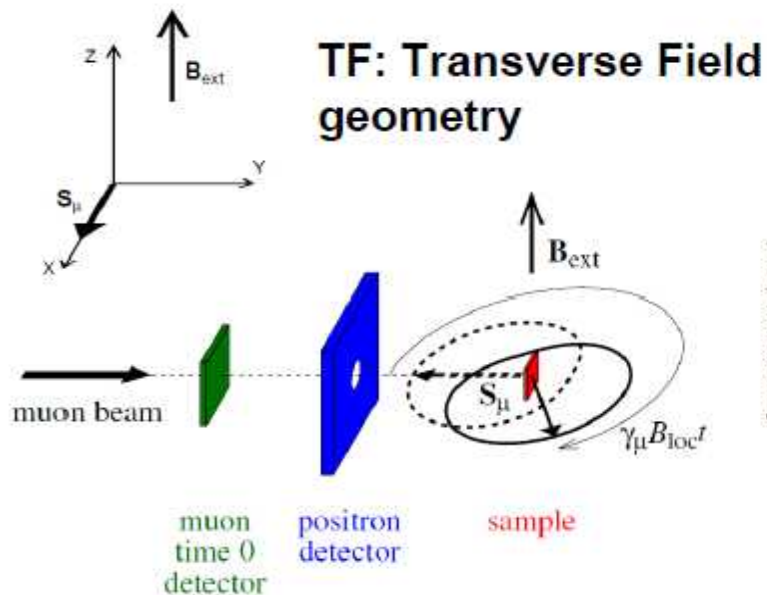


Схема опыта

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

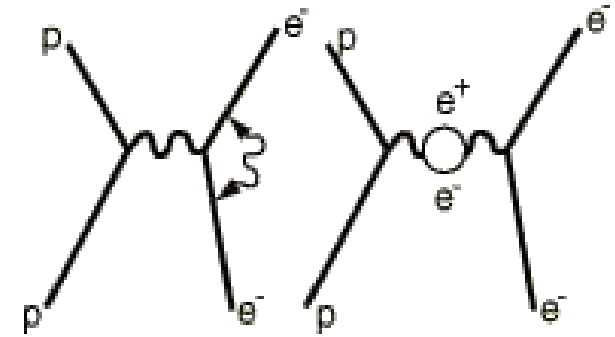


Часть 5. Реальность виртуальных частиц

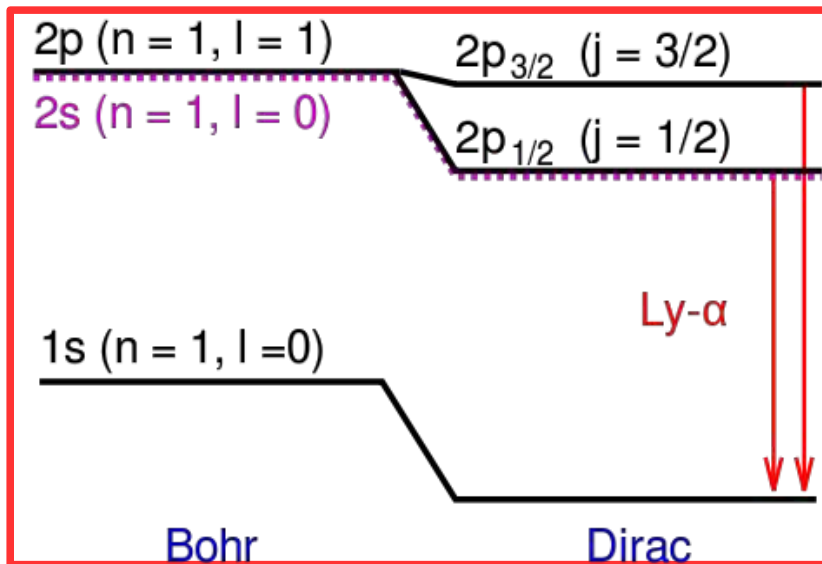


<http://www.treda.ru/i/photos/b/5586/898495a52b9c344d3a05a1848c879b86.jpg>

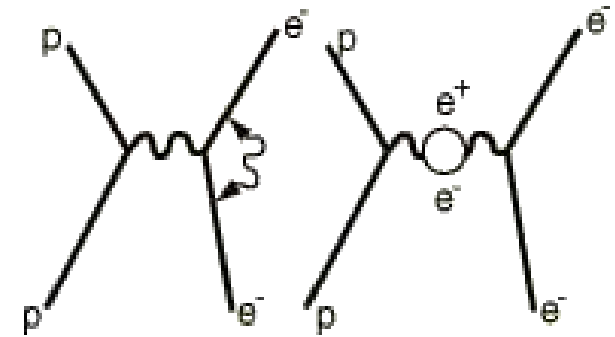
Сдвиг Лэмба



Атом водорода $E_n = -Ry \frac{1}{n^2}$

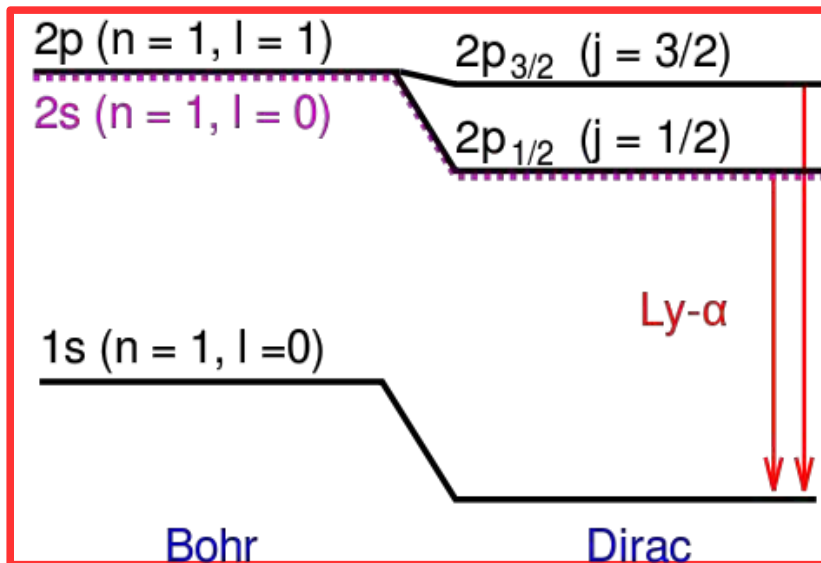


Сдвиг Лэмба

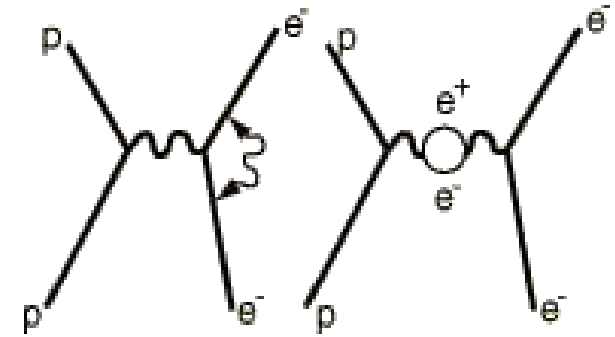


Атом водорода $E_n = -Ry \frac{1}{n^2}$

С учётом спин-орбиты (в рамках теории возмущений) $E(2^2 P_{1/2}) \neq E(2^2 P_{3/2})$



Сдвиг Лэмба

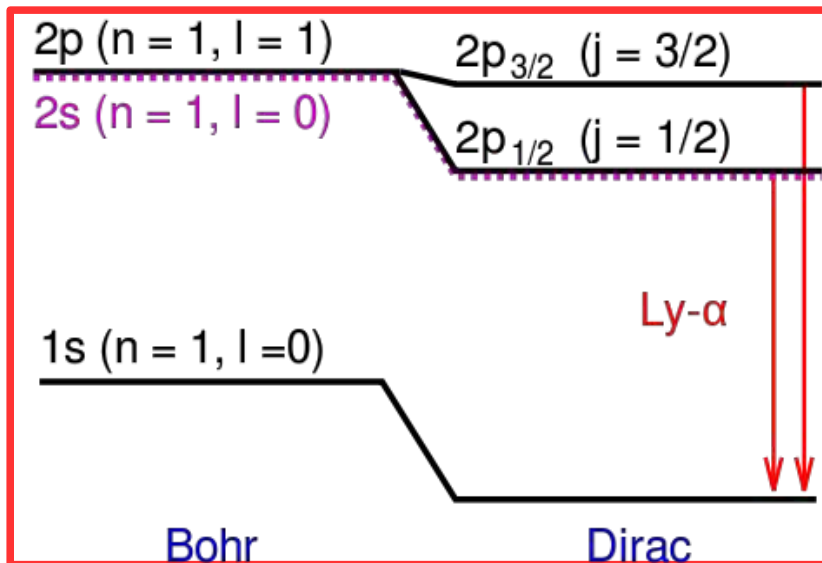


Атом водорода $E_n = -Ry \frac{1}{n^2}$

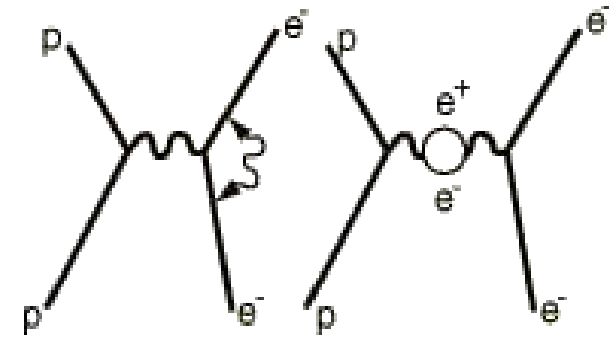
С учётом спин-орбиты (в рамках теории возмущений) $E(2^2 P_{1/2}) \neq E(2^2 P_{3/2})$

Строгое релятивистское решение задачи (Дирак)

$$E = E(n, j) \Rightarrow E(2^2 S_{1/2}) = E(2^2 P_{1/2})$$



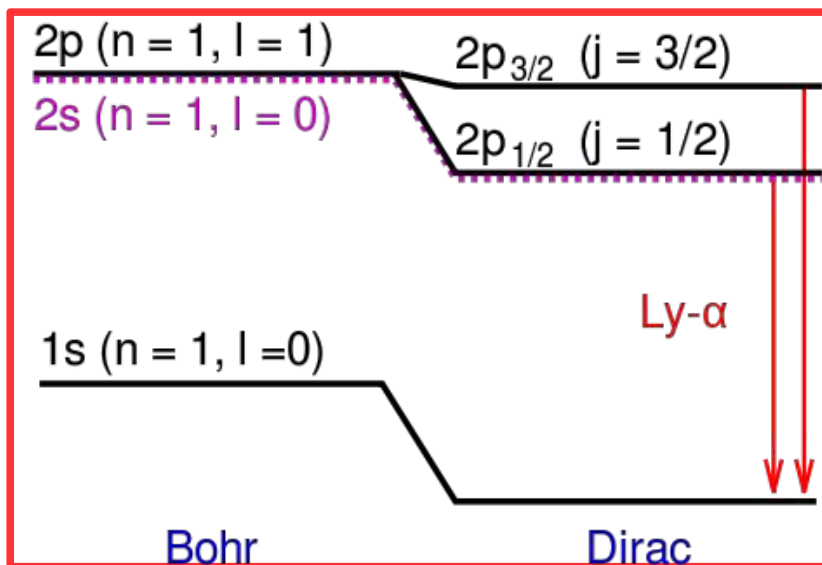
Сдвиг Лэмба



Атом водорода $E_n = -Ry \frac{1}{n^2}$

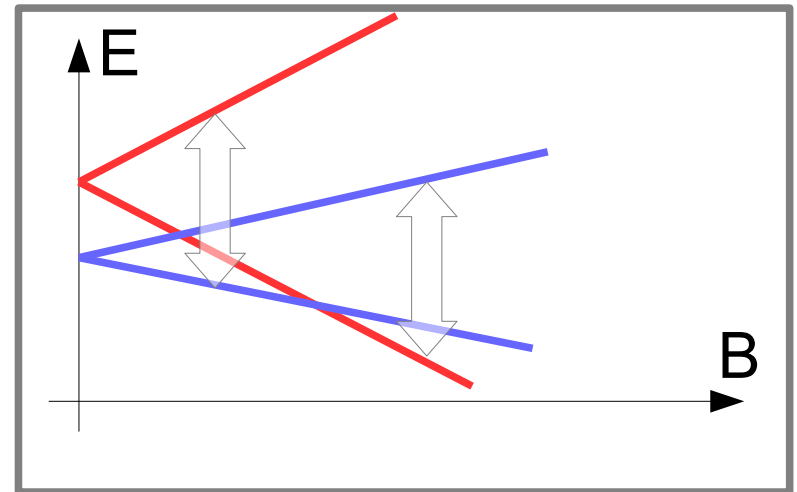
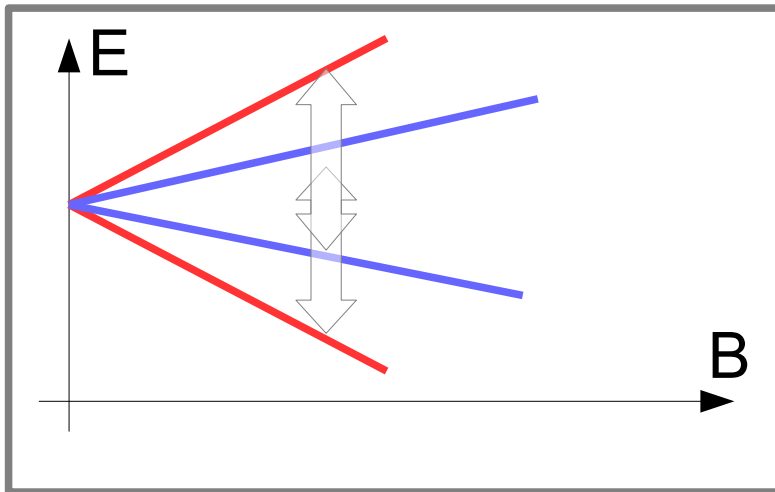
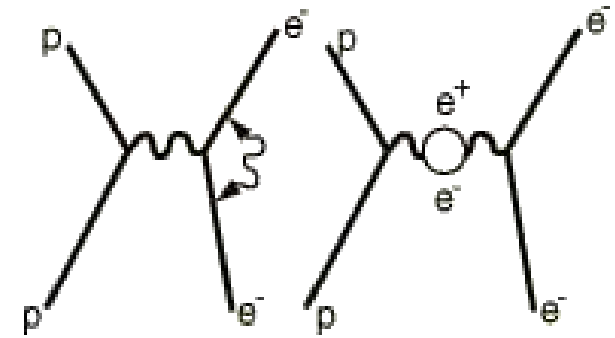
С учётом спин-орбиты (в рамках теории возмущений) $E(2^2 P_{1/2}) \neq E(2^2 P_{3/2})$

Строгое релятивистское решение задачи (Дирак) $E = E(n, j) \Rightarrow E(2^2 S_{1/2}) = E(2^2 P_{1/2})$



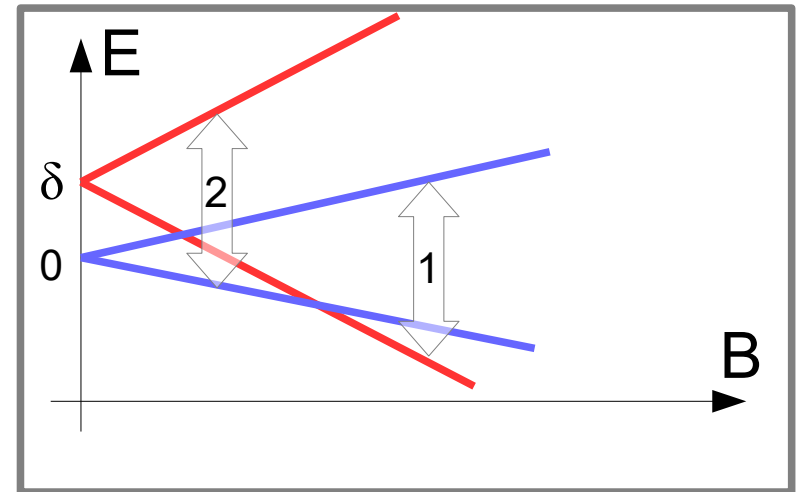
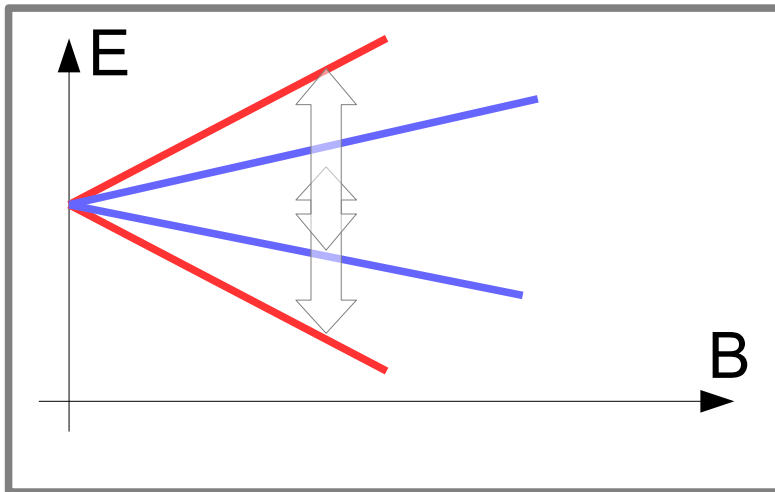
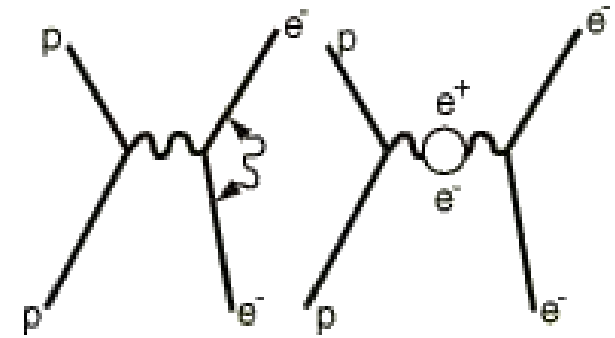
Эксперимент (Лэмб, 1947):
 $2^2 S_{1/2}$ на 1 ГГц выше,
 чем $2^2 P_{1/2}$

Сдвиг Лэмба



${}^2S_{1/2} : g=2$
 ${}^2P_{1/2} : g=2/3$
E1 фотон: $S \leftrightarrow P$

Сдвиг Лэмба



$$\hbar \omega_1 = \left(\frac{2}{3} - (-2) \right) \mu_B B S$$

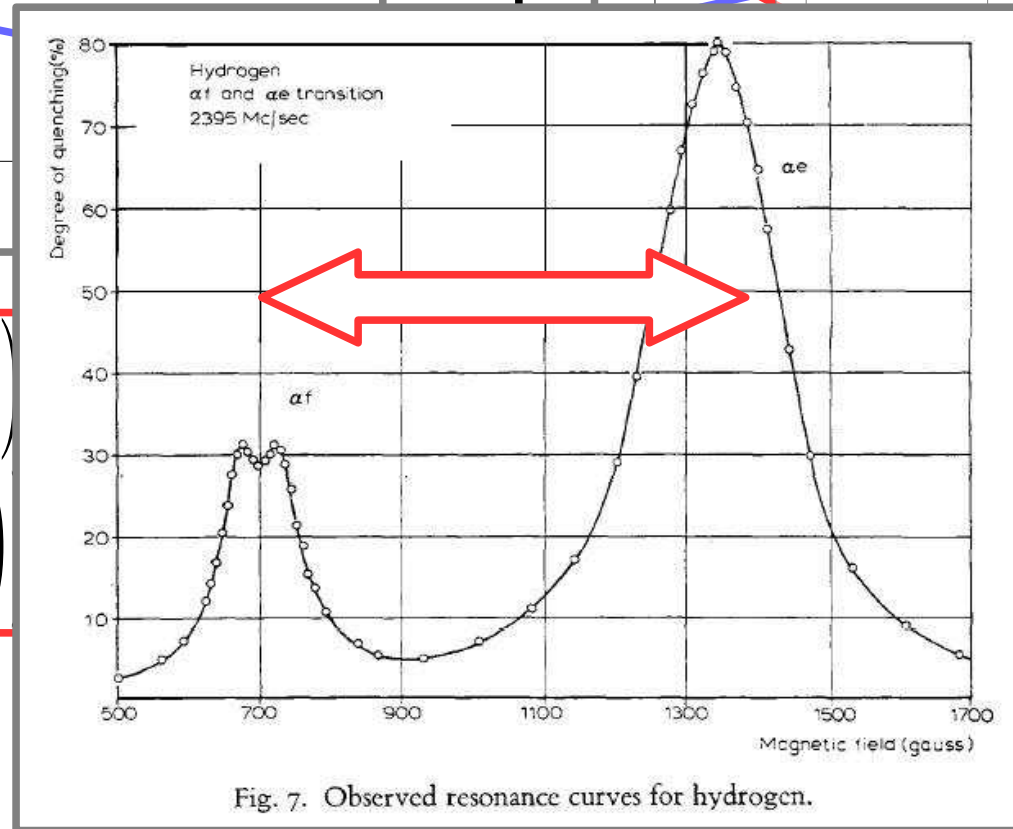
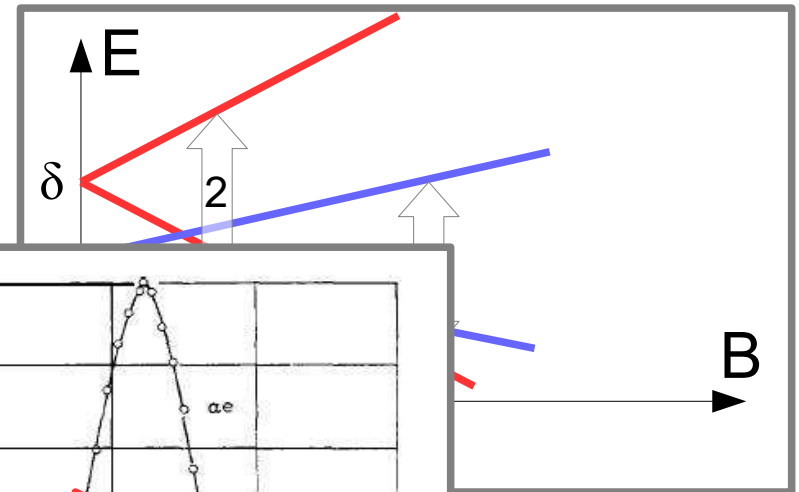
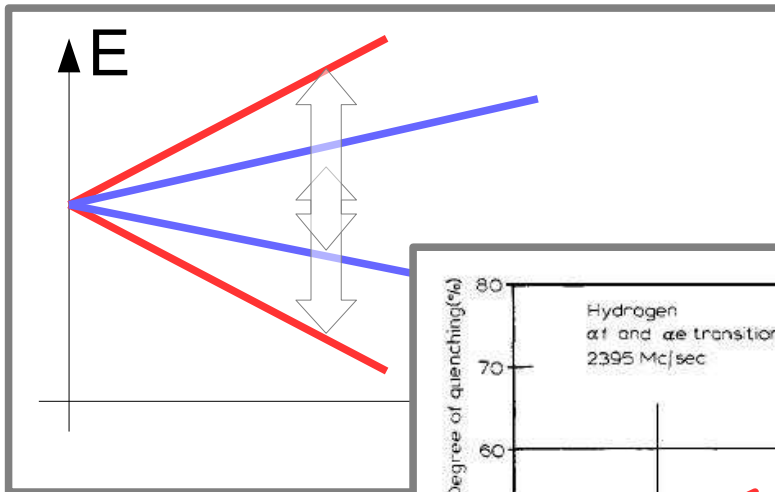
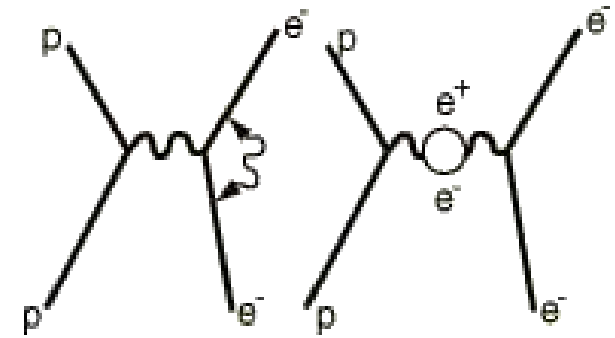
$$\hbar \omega_2 = \left(2 - \left(-\frac{2}{3} \right) \right) \mu_B B S$$

$$\hbar \omega_1 = \left(\frac{2}{3} - (-2) \right) \mu_B B S - \delta$$

$$\hbar \omega_2 = \left(2 - \left(-\frac{2}{3} \right) \right) \mu_B B S + \delta$$

$^2S_{1/2} : g=2$
 $^2P_{1/2} : g=2/3$
 E1 фотон: $S \leftrightarrow P$

Сдвиг Лэмба



$$\hbar \omega_1 = \left(\frac{2}{3} - (-2) \right)$$

$$\hbar \omega_2 = \left(2 - \left(-\frac{2}{3} \right) \right)$$

$$\left(\frac{2}{3} - (-2) \right) \mu_B B S - \delta$$

$$2 - \left(-\frac{2}{3} \right) \mu_B B S + \delta$$

Аномальный магнитный момент электрона и мюона

Релятивистская теория предсказывает $g=2$ для чисто спинового g -фактора электрона или мюона

Взаимодействие с виртуальными фотонами, электрон-позитронными парами приводит к небольшому отличию, называемому *аномальным магнитным моментом*

$$a = \frac{g-2}{2}$$

$$a_e^{\text{э}} = 0,00115965218073(28)$$

$$a_e^m = 0,001159652181643(764)$$

$$a_{\mu}^{\text{э}} = 0,0011659209(6)$$

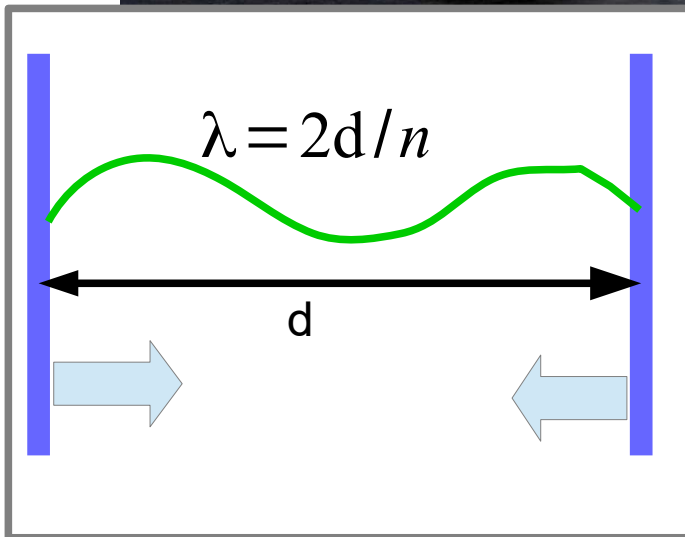
$$a_{\mu}^m = 0,00116591804(51)$$

Эффект Казимира



И. К. Айвазовский «Смотр Черноморского флота в 1849 году»

Эффект Казимира

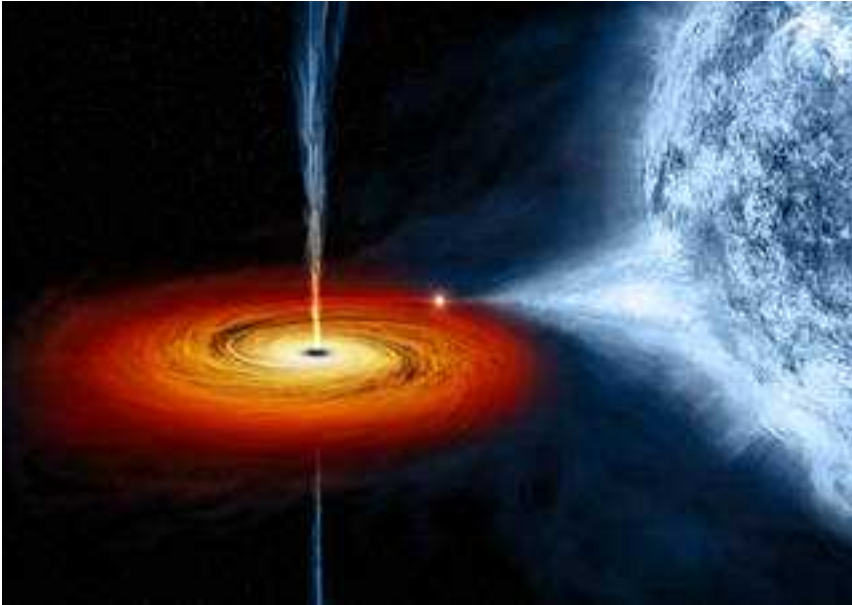


ского

$$F = -\left(\frac{\pi^2}{240}\right) \frac{\hbar c}{d^4}$$

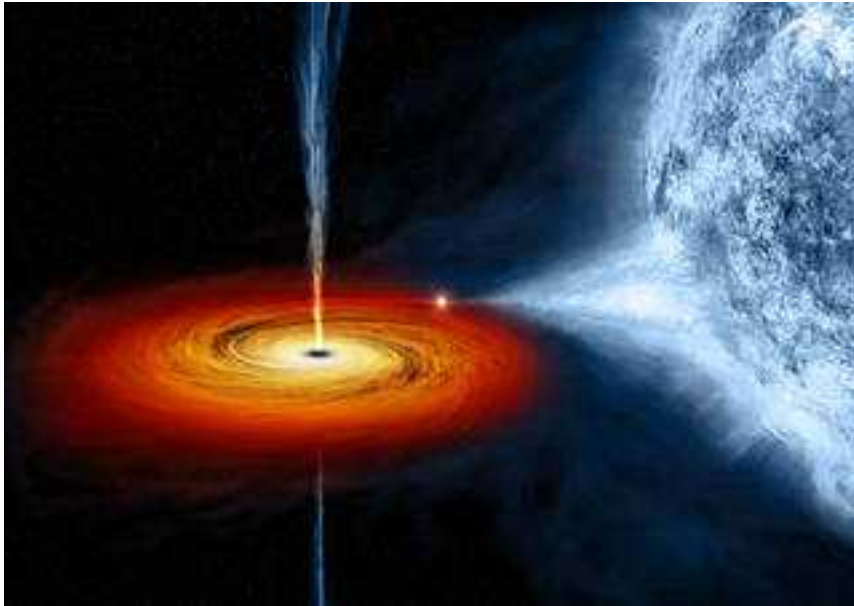
$$1 \text{ кв. см} \& 1 \text{ мкм} \rightarrow 10^{-8} \text{ Н}$$

Излучение Хокинга

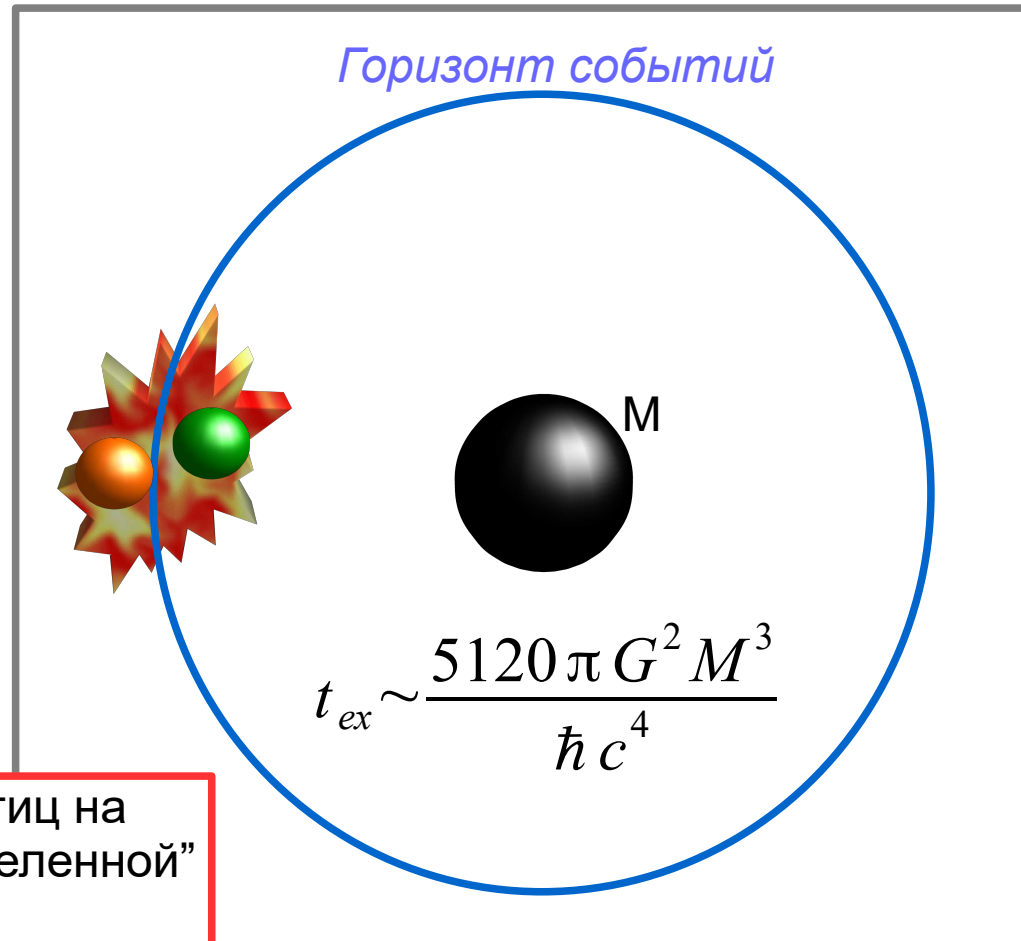


An artist's drawing a black hole named Cygnus X-1. It formed when a large star caved in. This black hole pulls matter from blue star beside it.
Credits: NASA/CXC/M.Weiss

Излучение Хокинга



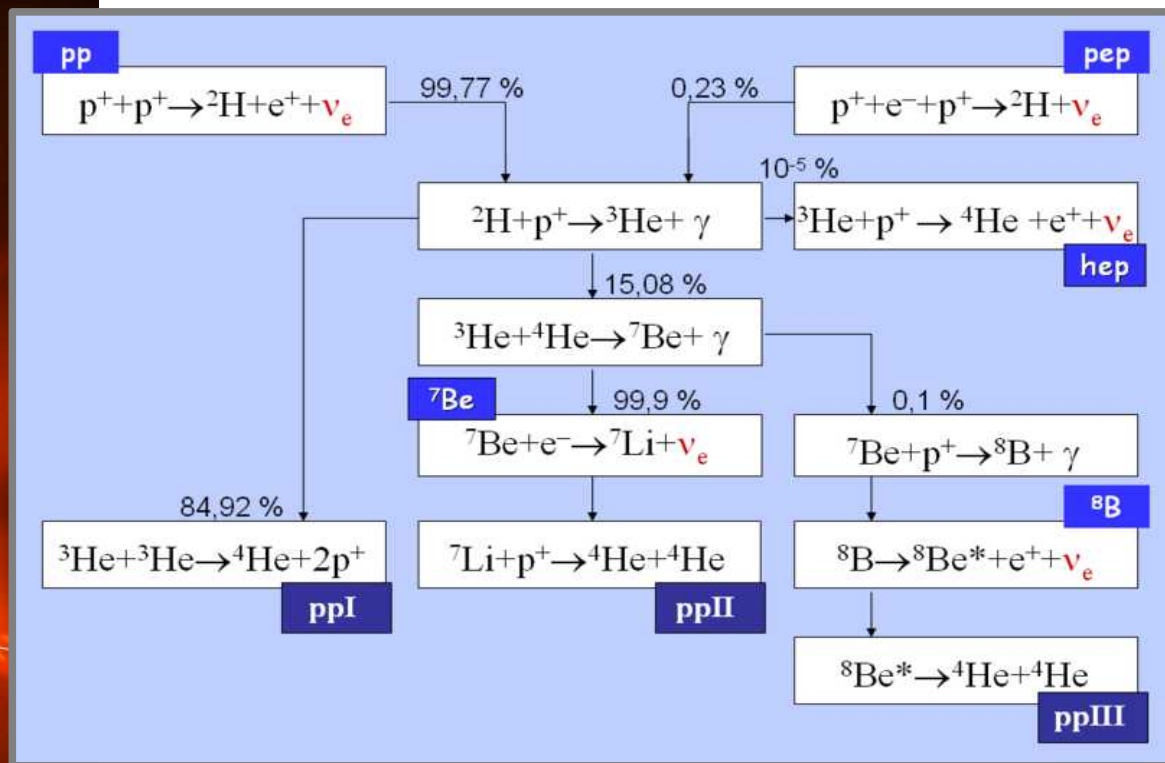
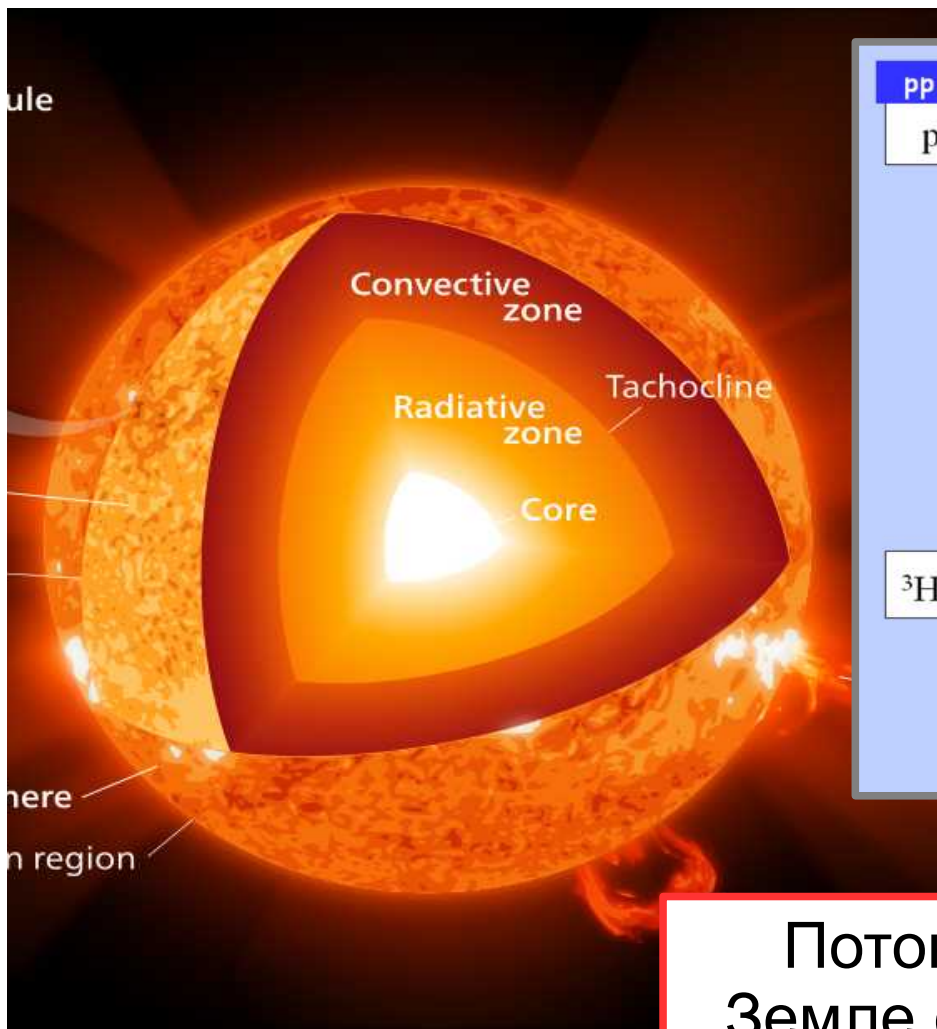
An artist's drawing a black hole named Cygnus X-1. It formed when a large star caved in. This black hole pulls matter from blue star beside it.
Credits: NASA/CXC/M.Weiss



(теория!) При образовании пары частиц на границе горизонта событий “в нашей Вселенной” остаётся одна из частиц пары.
Чёрная дыра как бы излучает эту частицу, теряет энергию, “испаряется” (для 200 тонн за 1 сек)

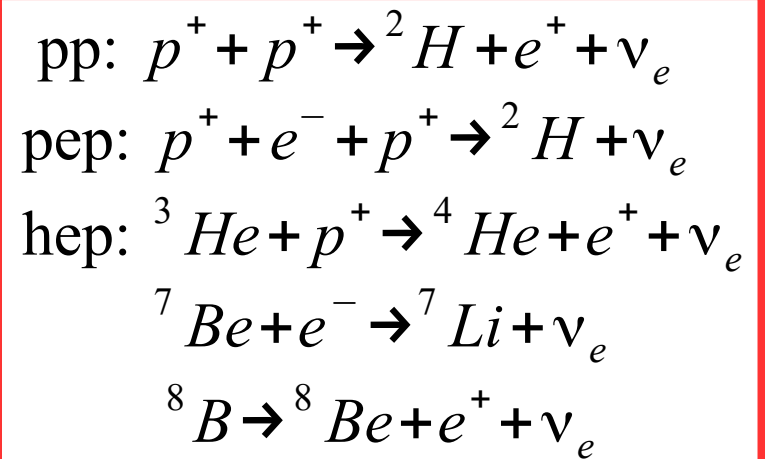
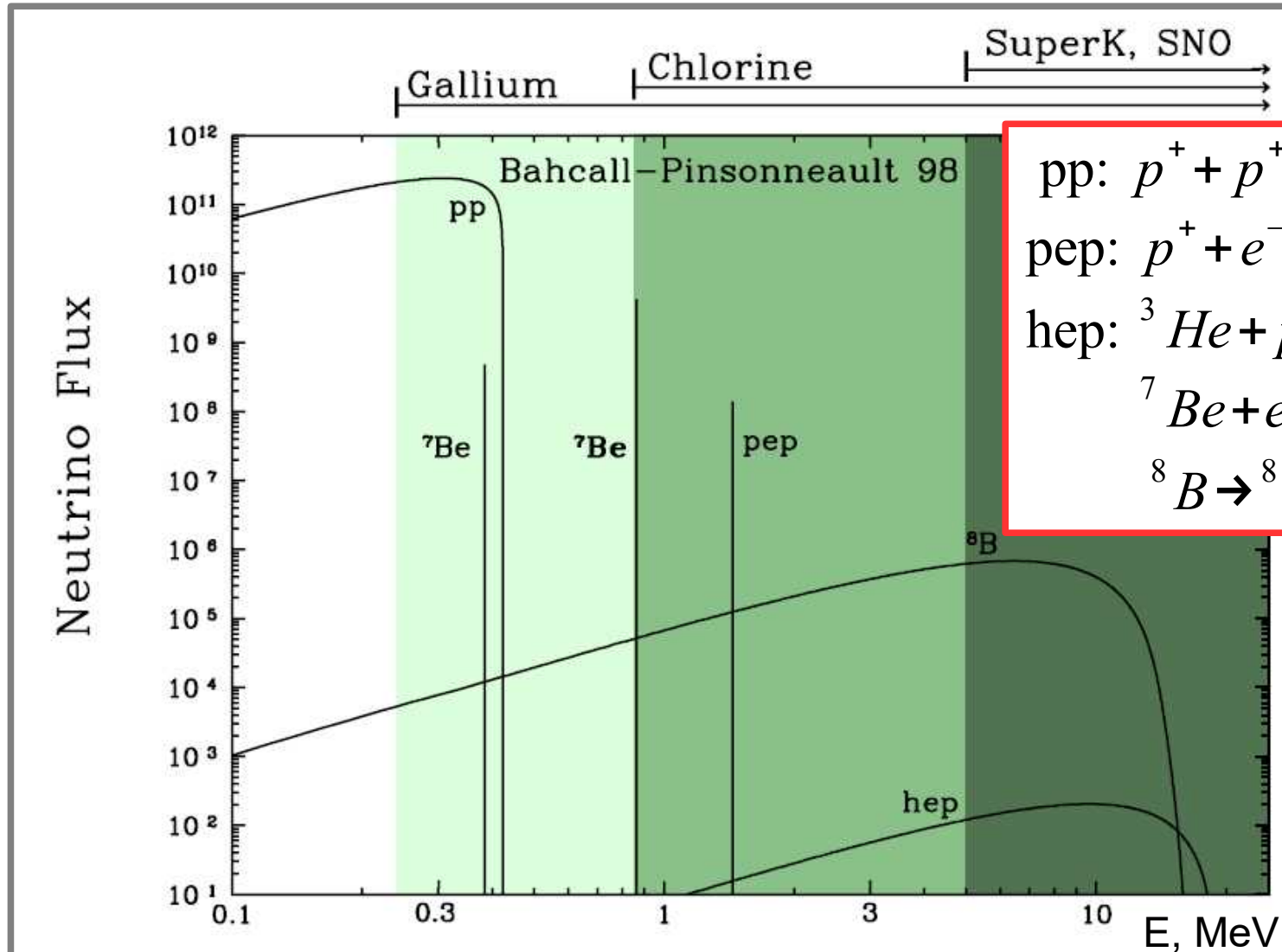
Часть 6. Детектирование нейтрино,
проблема солнечных нейтрино,
нейтринные осцилляции.

Проблема солнечных нейтрино



Поток нейтрино, обнаруживаемый на Земле оказался в первых экспериментах на 30% ниже, чем ожидается!

Спектр солнечных нейтрино



<http://www.sns.ias.edu/~jnb/SNviewgraphs/SNspectrum/energyspectra.html>

From the paper "Solar Neutrinos: Where We Are, Where We Are Going," ApJ 467, 475 (1996), hep-ph/9512285, updated using the data given in astro-ph/9805135.

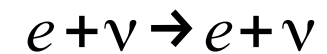
Каналы детектирования нейтрино

- «Эффект Комптона» Все типы нейтрино, но для электронных больше эффективность.

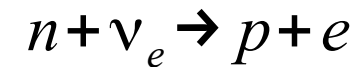
$$e + \nu \rightarrow e + \nu$$

Каналы детектирования нейтрино

- «Эффект Комптона» Все типы нейтрино, но для электронных больше эффективность.

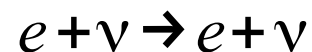


- Обратный бета-распад (галлий-германий, хлор-аргон). Только электронные нейтрино.

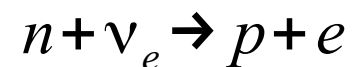


Каналы детектирования нейтрино

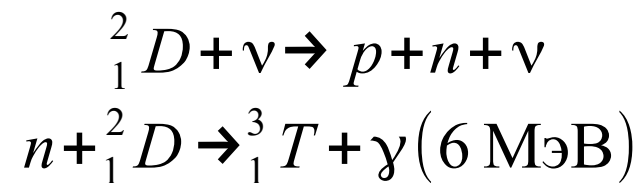
- «Эффект Комптона» Все типы нейтрино, но для электронных больше эффективность.



- Обратный бета-распад (галлий-германий, хлор-аргон). Только электронные нейтрино.

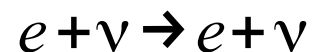


- Нейтральный канал в тяжеловодном детекторе. Все типы нейтрино.

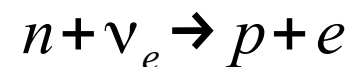


Каналы детектирования нейтрино

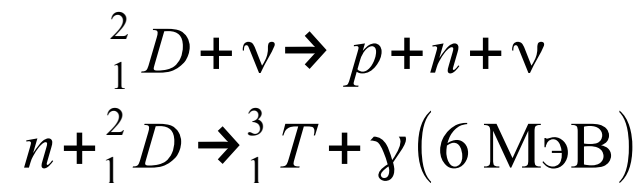
- «Эффект Комптона» Все типы нейтрино, но для электронных больше эффективность.



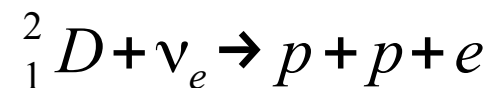
- Обратный бета-распад (галлий-германий, хлор-аргон). Только электронные нейтрино.



- Нейтральный канал в тяжеловодном детекторе. Все типы нейтрино.

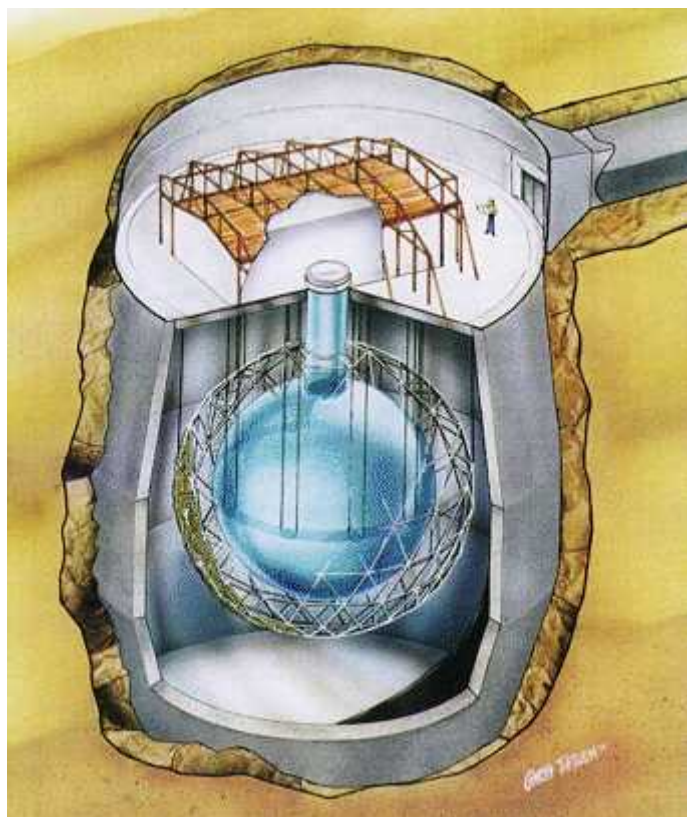


- Заряженный канал в тяжеловодном детекторе. Только электронное нейтрино.



Обнаружение всех нейтрино (Sudbury)

[https://
www.sno.phy.queensu.ca/](https://www.sno.phy.queensu.ca/)



Детектор с тяжелой водой, три канала детектирования нейтрино:

1) нейтральный (комптоновский)

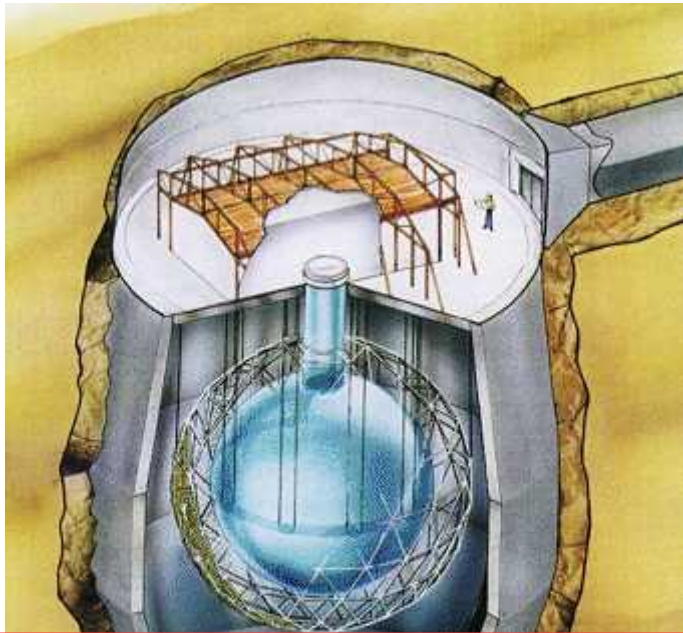
2) нейтральный $\nu + {}^2H \rightarrow p + n$

3) заряженный $\nu_e + {}^2H \rightarrow p + p + e$



Обнаружение всех нейтрино (Sudbury)

[https://
www.sno.phy.queensu.ca/](https://www.sno.phy.queensu.ca/)



Детектор с тяжелой водой, три канала детектирования нейтрино:

1) нейтральный (комптоновский)

2) нейтральный $\nu + {}^2H \rightarrow p + n$

3) заряженный $\nu_e + {}^2H \rightarrow p + p + e$

Полное число нейтрино всех типов соответствует энергии, излучаемой Солнцем: нейтрино меняют аромат по дороге от Солнца к Земле!

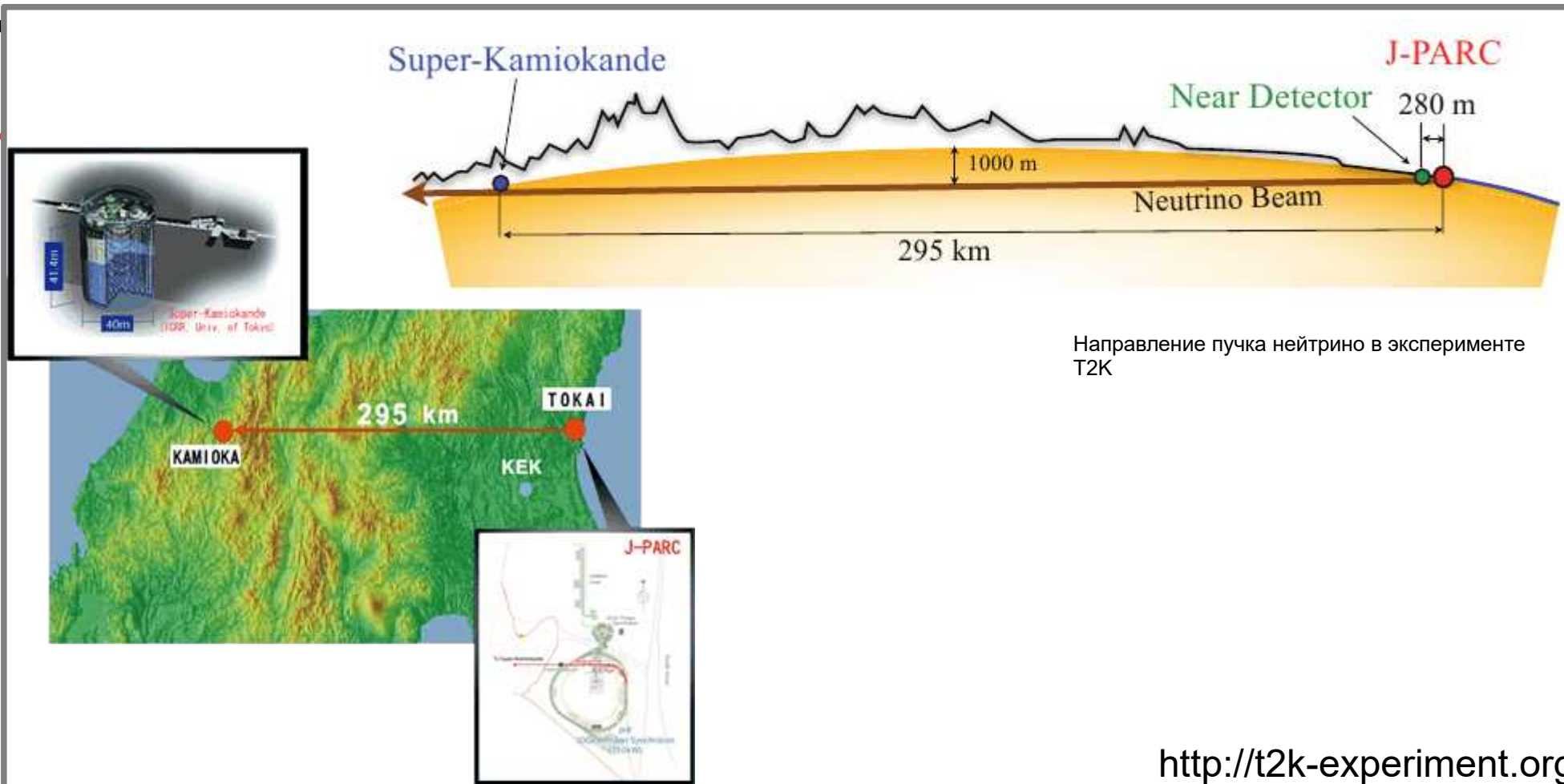


Ускорительные эксперименты по нейтринным осцилляциям

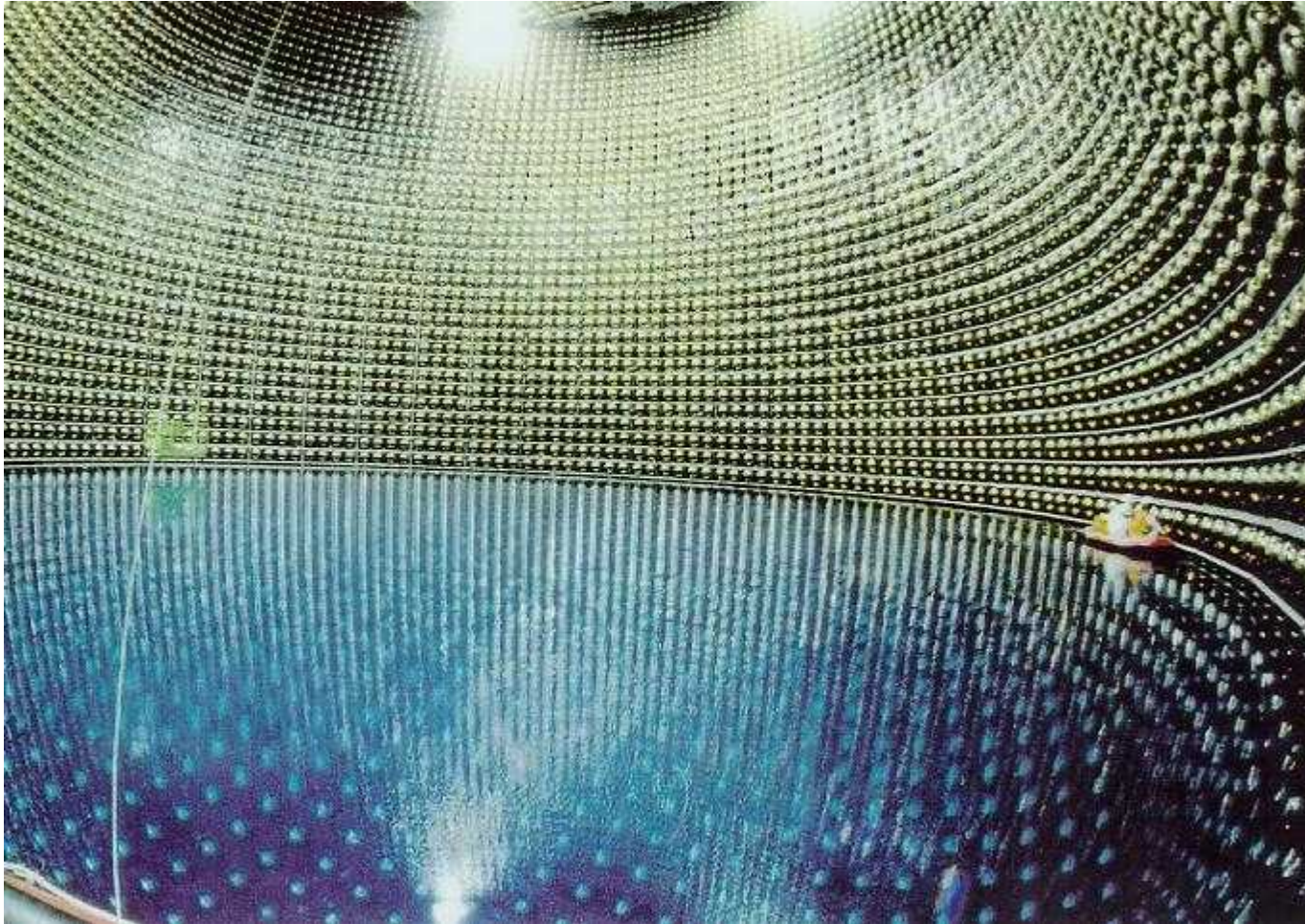
- MINOS: источник Фермилаб, детектор в Миннесоте (735 км)
- T2K: источник Токай, детектор в Камиоканде (295 км)
- OPERA: источник CERN, детектор Gran Sasso (IT) (730 км,
 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$)

Ускорительные эксперименты по нейтринным осцилляциям

- MINOS: источник Фермилаб, детектор в Миннесоте (735 км)
- T2K: источник Токай, детектор в Камиоканде (295 км)

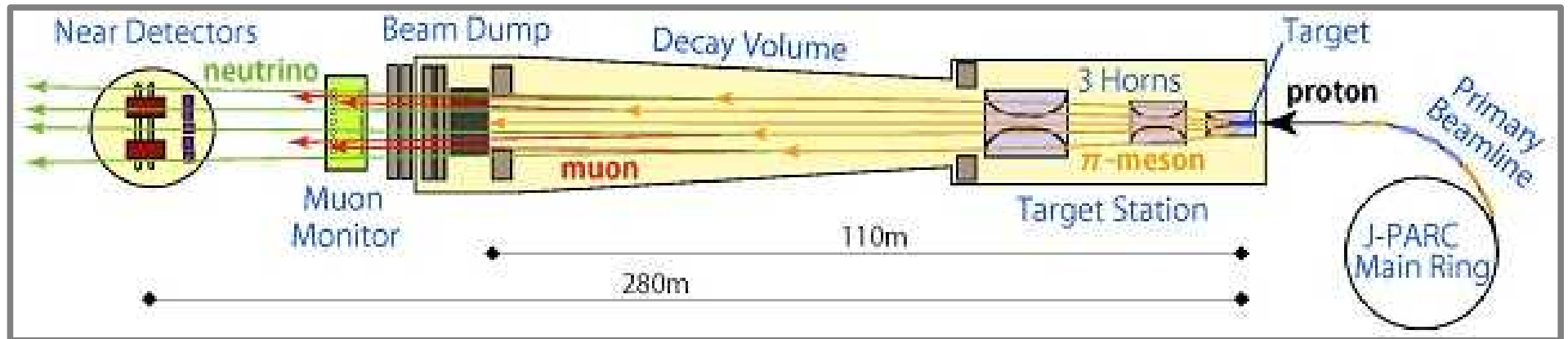


Детектор Супер-Камиоканде



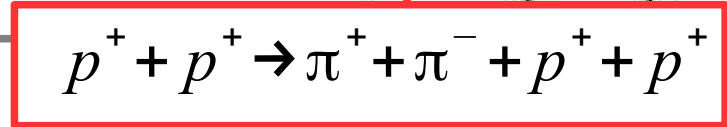
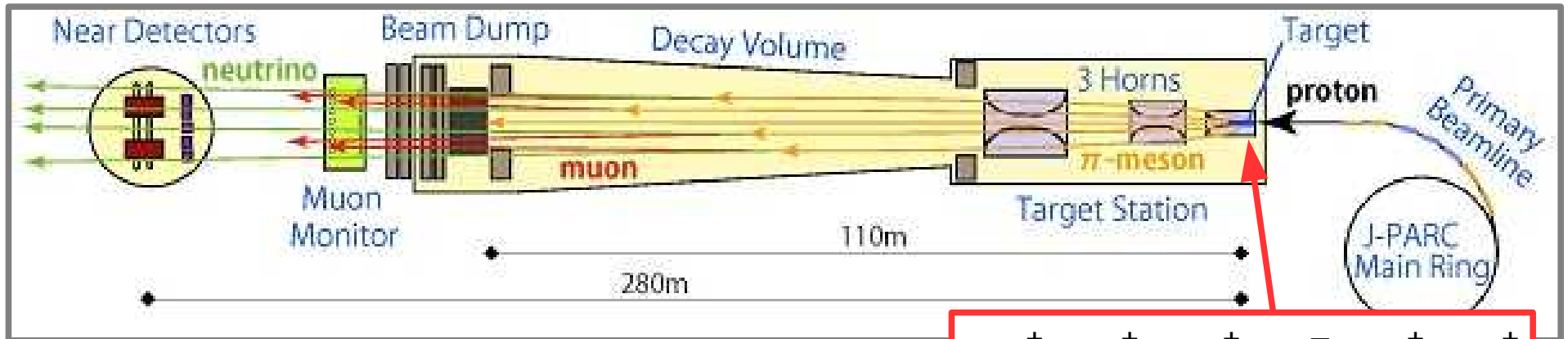
40 метров
50,000 тонн
ЧИСТОЙ ВОДЫ
~10,000 ФЭУ

Получение нейтринного пучка



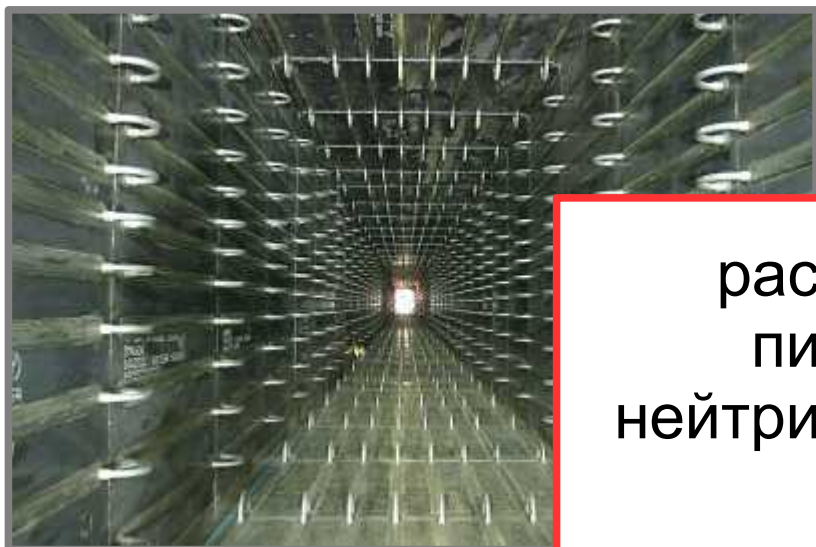
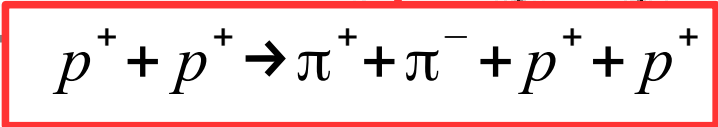
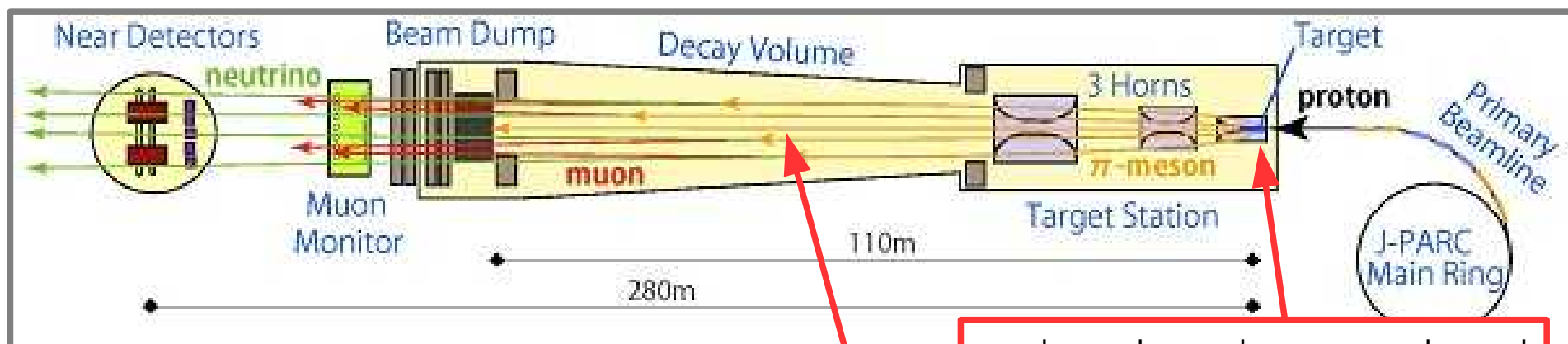
Upstream view of decay volume

Получение нейтринного пучка



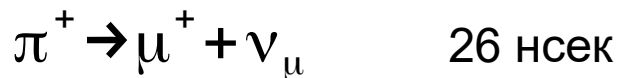
Upstream view of decay volume

Получение нейтринного пучка

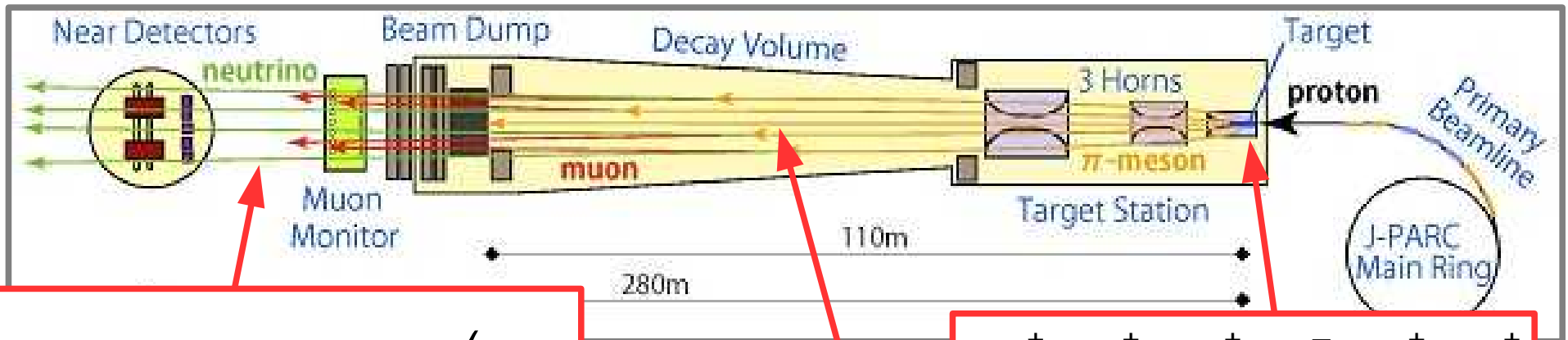


Upstream view of decay volume

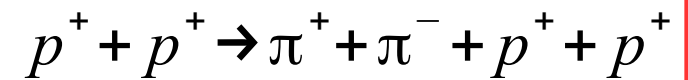
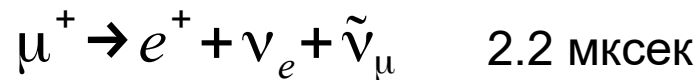
распад ультрарелятивистских пионов «на лету», мюоны и нейтрино вылетают по направлению пучка



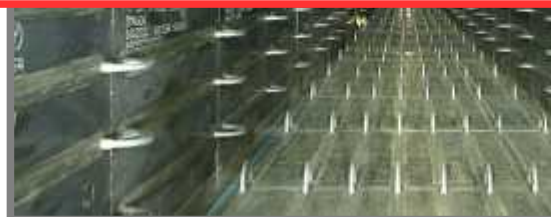
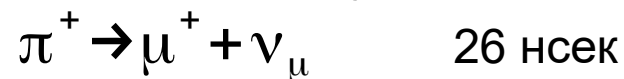
Получение нейтринного пучка



остановка мюонов (и пионов), изотропный распад мюонов в покое

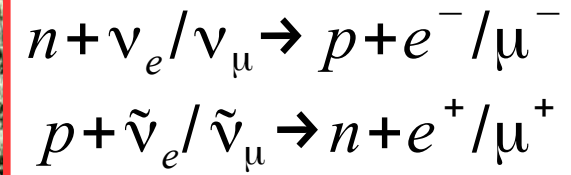
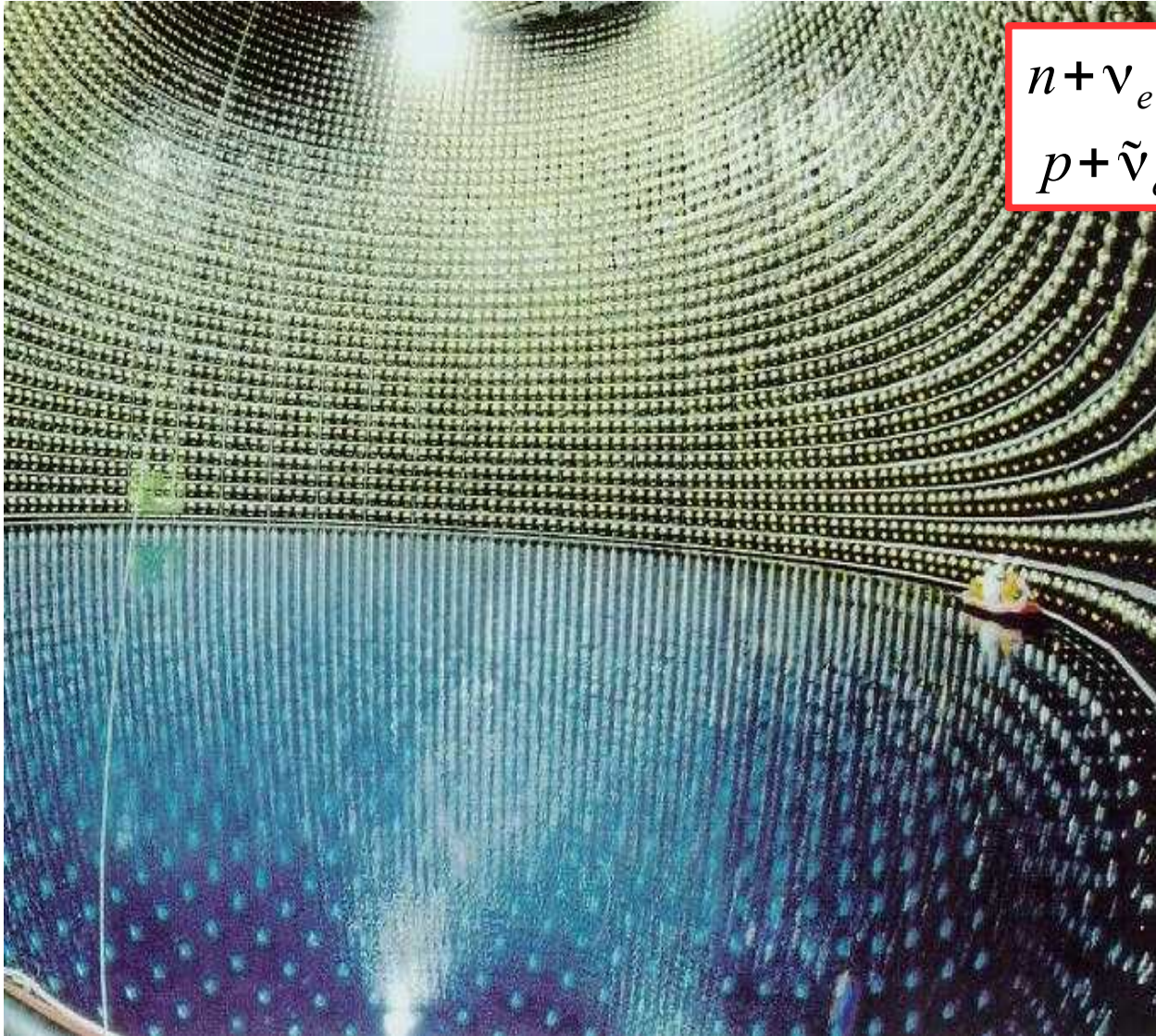


распад ультрарелятивистских пионов «на лету», мюоны и нейтрино вылетают по направлению пучка

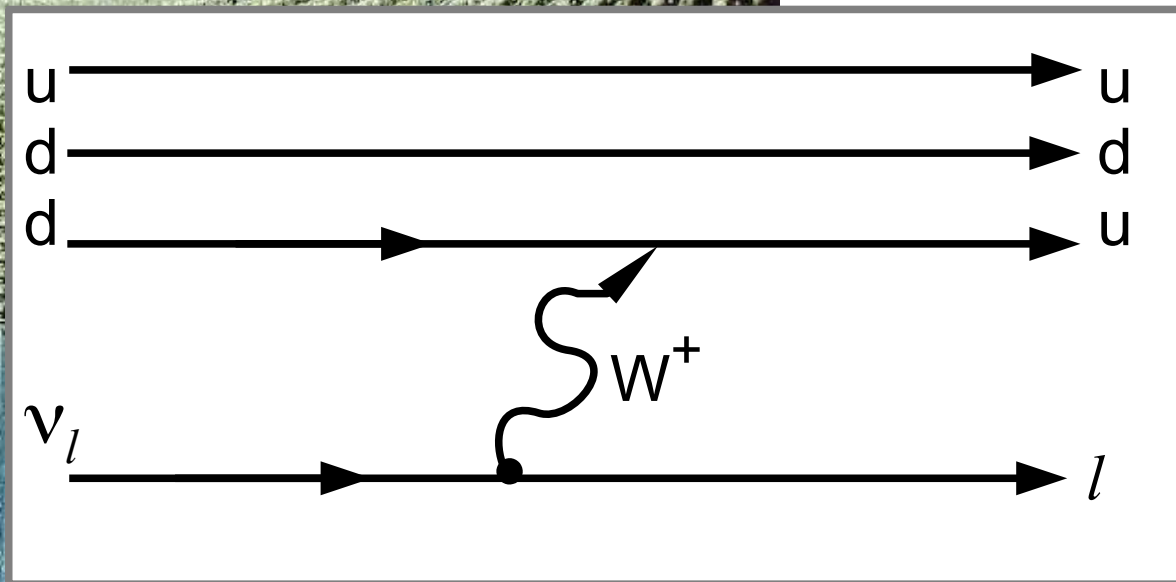
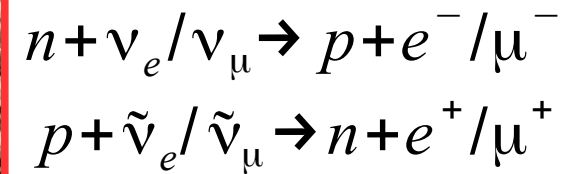


Upstream view of decay volume

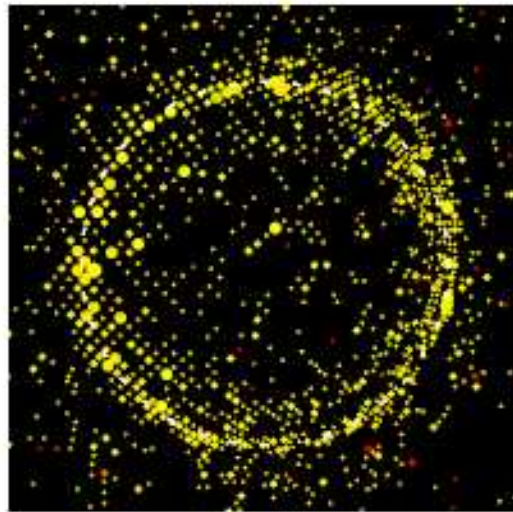
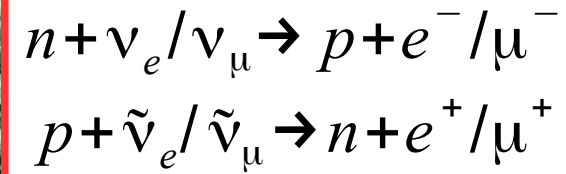
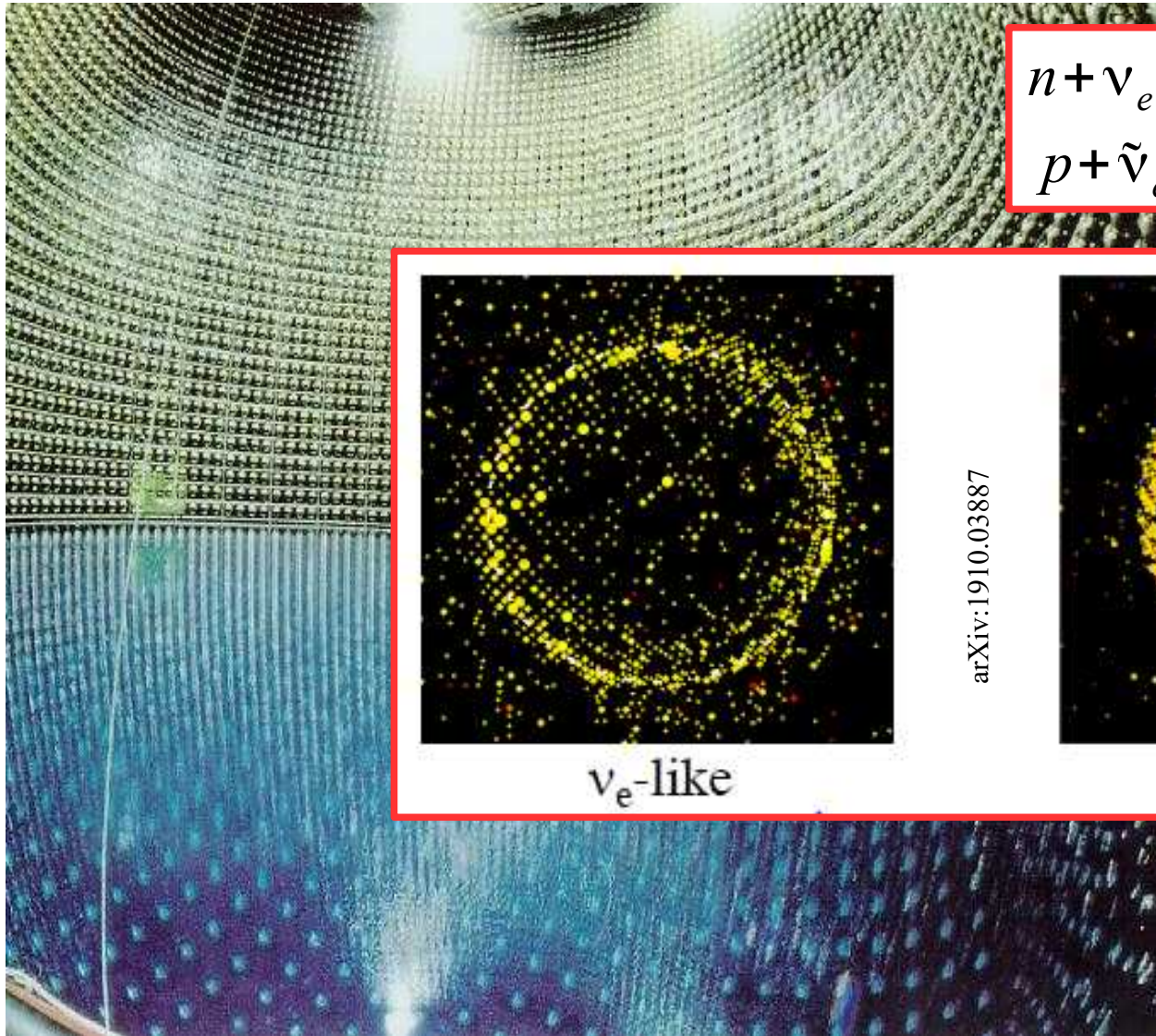
T2K: ЧТО ВИДИМ НА ДЕТЕКТОРЕ



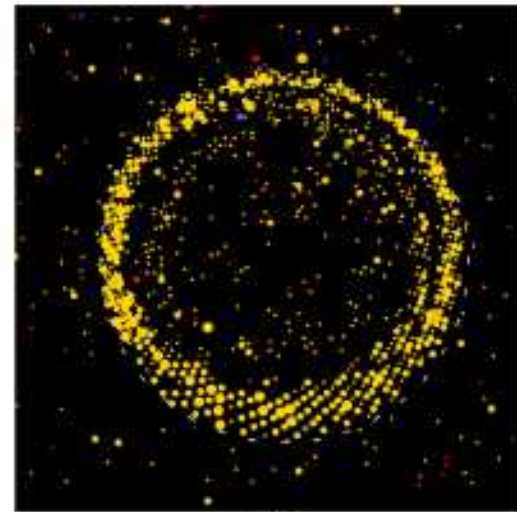
T2K: ЧТО ВИДИМ НА ДЕТЕКТОРЕ



T2K: ЧТО ВИДИМ НА ДЕТЕКТОРЕ



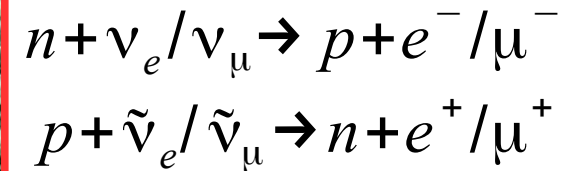
ν_e -like



ν_μ -like

arXiv:1910.03887

T2K: ЧТО ВИДИМ НА ДЕТЕКТОРЕ



... 7.48×10^{20} protons on target in neutrino mode, giving 37 electron-like and 135 muon-like events at the far detector, and 7.47×10^{20} protons on target in antineutrino mode, giving 4 electron-like and 66 muon-like events.

Нейтринные осцилляции и масса нейтрино: упрощенная модель.

Если электронные и мюонные нейтрино превращаются друг в друга, то это не стационарные состояния.

Но именно эти «лептонные ароматы» проявляются при взаимодействии с веществом.

Пусть есть «истинные» нейтрино ν_1 и ν_2

Нейтринные осцилляции и массовая модель.

$$i\hbar \frac{d\Psi_{1,2}}{dt} = E_{1,2} \Psi_{1,2}; \quad \Psi_{1,2} = \Psi_{1,2}^{(0)} e^{-iE_{1,2}t/\hbar}$$

$$\Psi_e = \cos \Theta \Psi_1 - \sin \Theta \Psi_2$$

$$\Psi_\mu = \sin \Theta \Psi_1 + \cos \Theta \Psi_2$$

Электронные нейтрино превращаются друг в друга, то это не стационарные состояния.

Но именно эти «лептонные ароматы» проявляются при взаимодействии с веществом.

Пусть есть «истинные» нейтрино ν_1 и ν_2

Нейтринные осцилляции и масса

двухкомпонентная модель.

$$i\hbar \frac{d\Psi_{1,2}}{dt} = E_{1,2} \Psi_{1,2}; \quad \Psi_{1,2} = \Psi_{1,2}^{(0)} e^{-iE_{1,2}t/\hbar}$$

$$\Psi_e = \cos \Theta \Psi_1 - \sin \Theta \Psi_2$$

$$\Psi_\mu = \sin \Theta \Psi_1 + \cos \Theta \Psi_2$$

$$\Psi_\mu @ [t=0]: \Psi_1^{(0)} = \sin \Theta, \quad \Psi_2^{(0)} = \cos \Theta$$
$$\bar{E} = (E_1 + E_2)/2, \quad \Delta E = E_2 - E_1$$

$$\Psi_\mu(t) = e^{-i\bar{E}t/\hbar} \left(\sin \Theta \Psi_1^{(0)} e^{i\Delta Et/(2\hbar)} + \cos \Theta \Psi_2^{(0)} e^{-i\Delta Et/(2\hbar)} \right)$$
$$\Psi_e(t) = e^{-i\bar{E}t/\hbar} \left(\cos \Theta \Psi_1^{(0)} e^{i\Delta Et/(2\hbar)} - \sin \Theta \Psi_2^{(0)} e^{-i\Delta Et/(2\hbar)} \right)$$

Пусть есть «истинные» нейтрино ν_1 и ν_2

Нейтринные осцилляции и массовая модель.

$$i\hbar \frac{d\Psi_{1,2}}{dt} = E_{1,2} \Psi_{1,2}; \quad \Psi_{1,2} = \Psi_{1,2}^{(0)} e^{-iE_{1,2}t/\hbar}$$

$$\Psi_e = \cos \Theta \Psi_1 - \sin \Theta \Psi_2$$

$$\Psi_\mu = \sin \Theta \Psi_1 + \cos \Theta \Psi_2$$

$$\Psi_\mu @ [t=0]: \Psi_1^{(0)} = \sin \Theta, \quad \Psi_2^{(0)} = \cos \Theta$$

$$\bar{E} = (E_1 + E_2)/2, \quad \Delta E = E_2 - E_1$$

$$\Psi_\mu(t) = e^{-i\bar{E}t/\hbar} \left(\sin \Theta \Psi_1^{(0)} e^{i\Delta Et/(2\hbar)} + \cos \Theta \Psi_2^{(0)} e^{-i\Delta Et/(2\hbar)} \right)$$

$$\Psi_e(t) = e^{-i\bar{E}t/\hbar} \left(\cos \Theta \Psi_1^{(0)} e^{i\Delta Et/(2\hbar)} - \sin \Theta \Psi_2^{(0)} e^{-i\Delta Et/(2\hbar)} \right)$$

$$\Psi_\mu(t) = e^{-i\bar{E}t/\hbar} \left(\cos \left[\Delta Et/(2\hbar) \right] + i \cos(2\Theta) \sin \left[\Delta Et/(2\hbar) \right] \right)$$

$$\Psi_e(t) = i e^{-i\bar{E}t/\hbar} \sin(2\Theta) \sin \left[\Delta Et/(2\hbar) \right]$$

Нейтринные осцилляции и масса нейтрино: упрощенная модель.

$$\Psi_{\mu}(t) = e^{-i\bar{E}t/\hbar} \left(\cos[\Delta E t/(2\hbar)] + i \cos(2\Theta) \sin[\Delta E t/(2\hbar)] \right)$$
$$\Psi_e(t) = i e^{-i\bar{E}t/\hbar} \sin(2\Theta) \sin[\Delta E t/(2\hbar)]$$

Если испущено нейтрино с определенным импульсом:

$$\Delta E = \sqrt{(m_2 c^2)^2 + (pc)^2} - \sqrt{(m_1 c^2)^2 + (pc)^2} \approx pc \left(\frac{(m_2 c^2)^2 - (m_1 c^2)^2}{2(pc)^2} \right) = \frac{\Delta(m c^2)^2}{2E}$$

период $L = cT = c \times \frac{h}{\Delta E} = \frac{2 E c h}{\Delta(m c^2)^2}$

Нейтринные осцилляции и масса

Oscillation probabilities for an initial electron neutrino

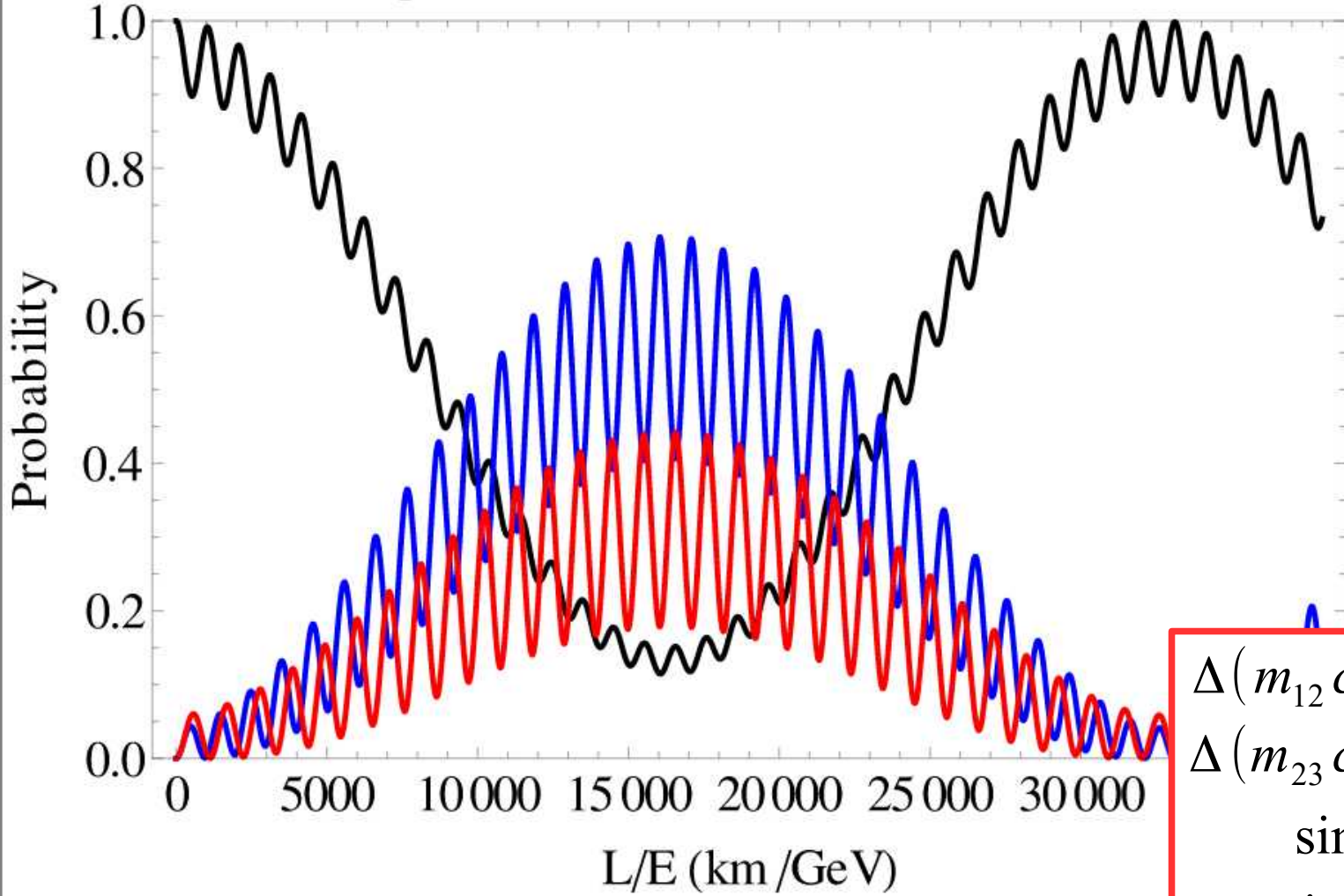


рис. с https://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino_oscillation

ль.

ом:

$$\frac{\Delta(m c^2)^2}{2 E} = \frac{\Delta(m c^2)^2}{2 E}$$

$$\Delta(m_{12} c^2)^2 \approx 7.5 \times 10^{-5} \text{ эВ}^2$$

$$\Delta(m_{23} c^2)^2 \approx 2.4 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$$

$$\sin^2(2 \Theta_{13}) \approx 0.1$$

$$\sin^2(2 \Theta_{12}) \approx 0.85$$

$$\sin^2(2 \Theta_{23}) > 0.9$$

Масса нейтрино

$$\Delta(m_{12} c^2)^2 \approx 7.5 \times 10^{-5} \text{ эВ}^2$$

$$\Delta(m_{23} c^2)^2 \approx 2.4 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$$

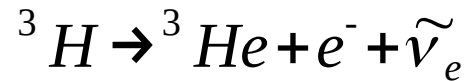
$$\sin^2(2\Theta_{13}) \approx 0.1$$

$$\sin^2(2\Theta_{12}) \approx 0.85$$

$$\sin^2(2\Theta_{23}) > 0.9$$

KARlsruhe TRItium Neutrino (KATRIN)
experiment

<https://www.katrin.kit.edu/>



$$m_{\nu_e} c^2 < 1.1 \text{ эВ}$$

Двойной безнейтринный бета-распад накладывает ограничения на массу электронного нейтрино (сама возможность этого процесса подразумевает массу нейтрино!)

Neutrino-less double beta decay $(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^-$ is forbidden in the SM as it violates lepton number conservation (by 2 units). However, if neutrino is a Majorana particle measurements of the half-lives $T_{1/2}^{0\nu}$ of different isotopes give information

on $m_{ee} = \left| \sum_{i=1}^3 m_i U_{ei}^2 \right|$. The sensitivity reached by experiments on

${}^{136}\text{Xe}$ and ${}^{76}\text{Ge}$, $T_{1/2}^{0\nu} > 1.07 \times 10^{26}$ yr, and $T_{1/2}^{0\nu} > 1.8 \times 10^{26}$ yr, give bounds of $m_{ee} < 61 - 165$ meV and $m_{ee} < 79 - 180$ meV respectively.

PDG2022
report

Подводя итоги...

- Фотоэффект, эффект Комптона
- Уравнение Шредингера, модельные задачи про барьеры и ямы
- Спин электрона, запрет Паули (ферми- и бозе-частицы)
- Строение атома, уровни энергии, спин-орбитальное взаимодействие, эффект Зеемана
- Строение ядра, капельная и оболочечная модель, энергия связи, распады и синтез ядер
- Стандартная модель: кварки, нейтрино, взаимодействия