



**Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»**

**Кафедра №7
экспериментальной ядерной физики и космофизики**

А.И. Болоздыня

Экспериментальная ядерная физика

Лекция №12

Элементарные частицы

2016

Лекция №12

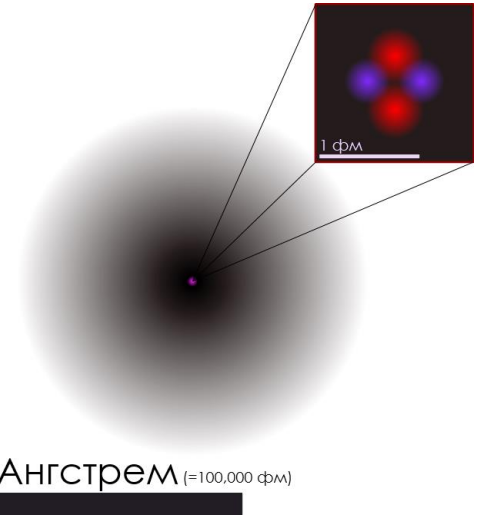
Элементарные частицы

- 1. Введение**
- 2. Истинно элементарные частицы**
- 3. Стандартная модель**
- 4. Есть ли физика за пределами С.М.?**
- 5. Тёмная материя и тёмная энергия**
- 6. Нейтринные осцилляции**

1. Введение

Элементарные частицы – материальные объекты, которые нельзя разделить на составные части.

В соответствии с этим определением к элементарным частицам **не могут** быть отнесены молекулы, атомы и атомные ядра



Классификация

По времени жизни

- **Стабильные элементарные частицы** — частицы, имеющие бесконечно большое время жизни в свободном состоянии (*протон, электрон, нейтрино, фотон, гравитон* и их античастицы).
- **Нестабильные элементарные частицы** — частицы, распадающиеся на другие частицы в свободном состоянии за конечное время (все остальные частицы).

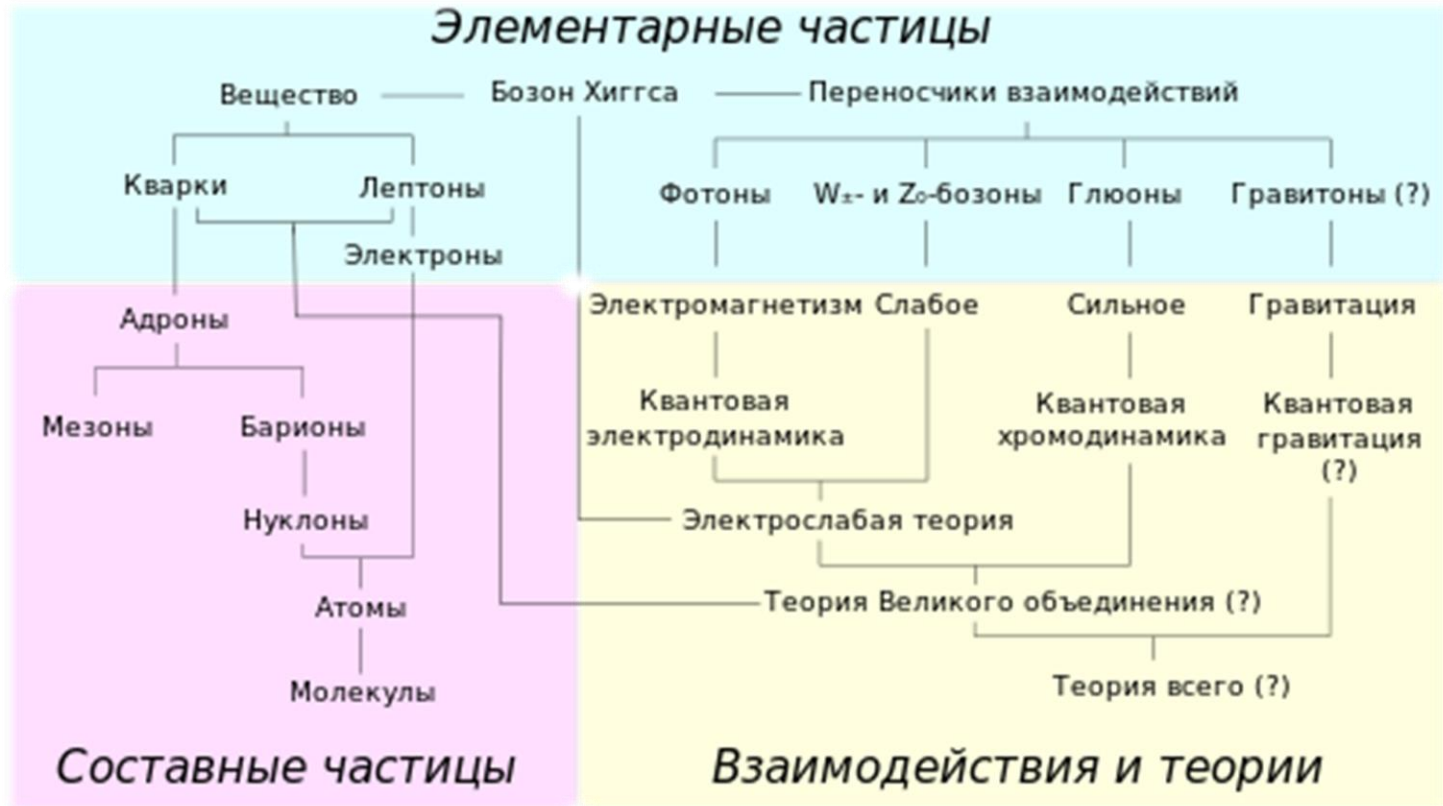
По массе

- **Безмассовые** — частицы, имеющие бесконечно большое время жизни в свободном состоянии (*протон, электрон, нейтрино, фотон, гравитон* и их античастицы).
- **Частицы ненулевой массой** — частицы, распадающиеся на другие частицы в свободном состоянии за конечное время (все остальные частицы).

По величине спина

- **Бозоны** — частицы с целым спином (*фотон, глюон, мезоны, бозон Хиггса* и их античастицы).
- **Фермионы** — частицы с полуцелым спином (*электрон, протон, нейтрон, нейтрино* и их античастицы).

По видам взаимодействий

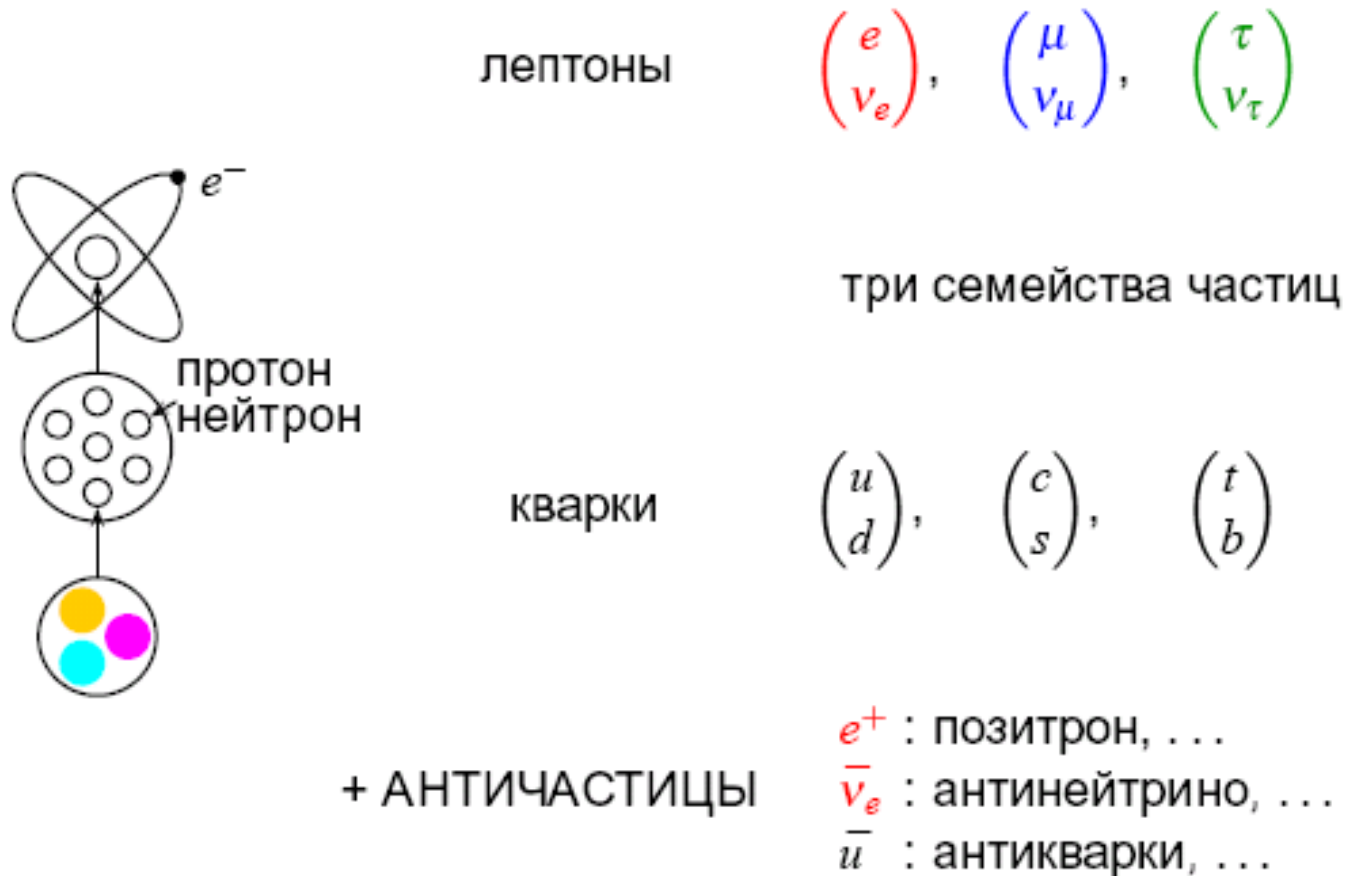


Размеры адронов (как барионов, так и мезонов) составляют около 10^{-15} м, что близко к среднему расстоянию между входящими в них кварками

Размеры фундаментальных частиц — калибровочных бозонов, кварков и лептонов — в пределах погрешности эксперимента согласуются с их точностью (верхний предел диаметра составляет около 10^{-18} м), возможно, близки к **фундаментальной длине (планковской длине, равной $1,6 \cdot 10^{-35}$ м)**.

$$\ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1,616\,229(38) \cdot 10^{-35} \text{ м}$$

2. Истинно элементарные частицы



Здесь не показаны фотоны и другие частицы, ответственные за взаимодействия, — глюоны, W^\pm - и Z -бозоны, а также Хиггс бозон H .

Фундаментальные фермионы (спин =1/2)							
Взаимодействия			Поколения			Заряд Q/e	
			1	2	3		
Сильное	Электромагнитное	Слабое	лептоны	ν_e	ν_μ	ν_τ	0
				e	μ	τ	-1
			кварки	u	c	t	+2/3
				d	s	b	-1/3

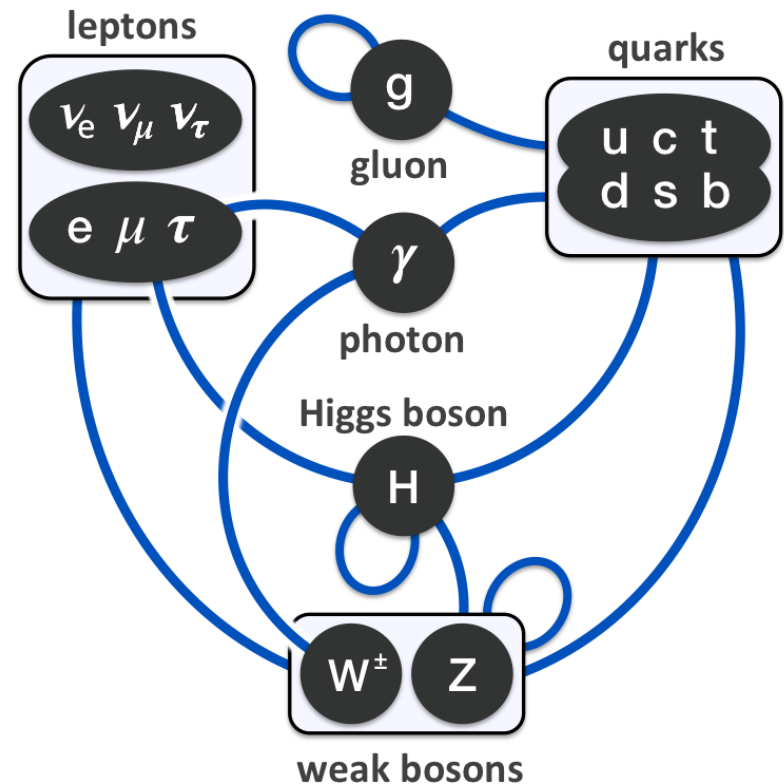
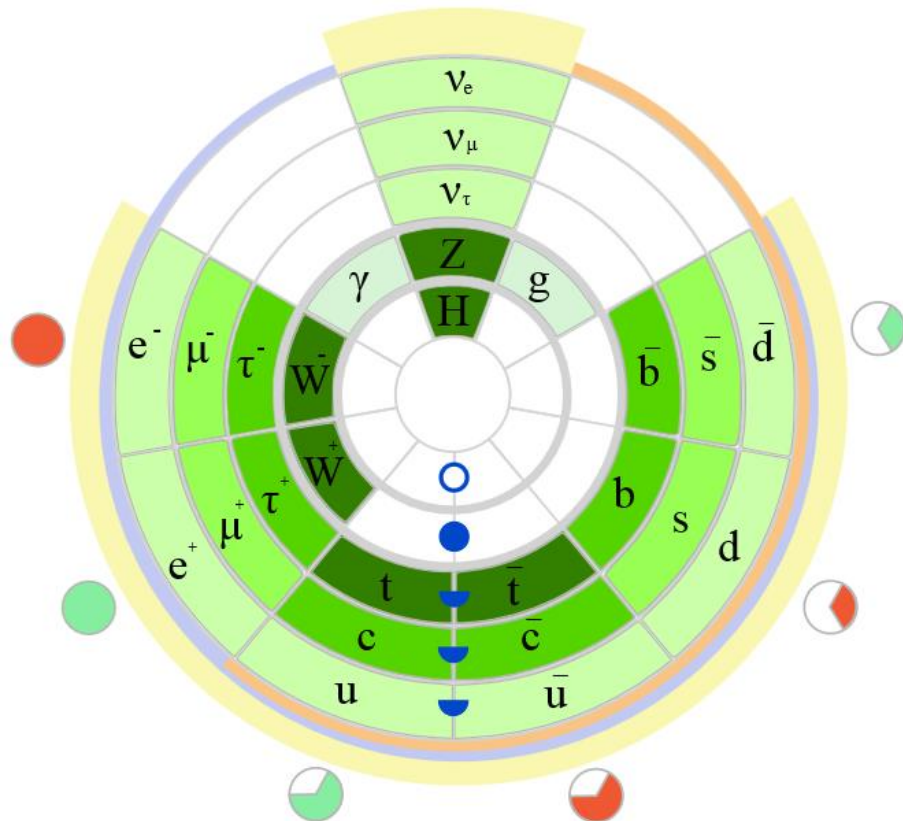
Фундаментальные взаимодействия (бозоны, спин =1)				
Взаимодействие	Квант поля	Радиус, см	Константа взаимодействия (порядок величины)	Пример проявления
сильное	глюон	10^{-13}	1	ядро, адроны
электромагнитное	γ -квант	∞	10^{-2}	атом
слабое	W^\pm, Z	10^{-16}	10^{-6}	γ -распад
гравитационное	гравитон	∞	10^{-38}	сила тяжести

3. Стандартная Модель

Основой теоретического описания частиц является *квантовая теория поля*.

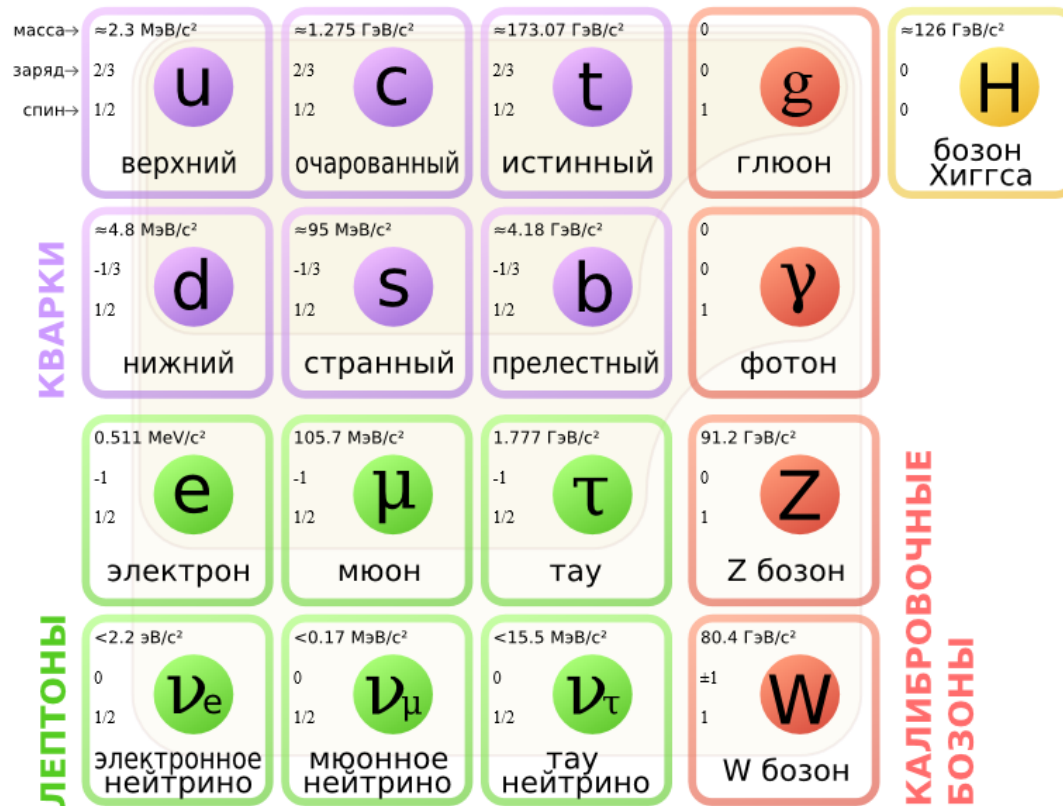
Для описания электромагнитных взаимодействий используется *квантовая электродинамика* (КЭД), слабое и электромагнитное взаимодействие совместно описываются объединённой теорией – *электрослабой моделью* (ЭСМ), сильное взаимодействие – *квантовой хромодинамикой* (КХД).

КХД и ЭСМ, совместно описывающие сильное, электромагнитное и слабое взаимодействия кварков и лептонов, образуют теоретическую схему, называемую *Стандартной Моделью*.

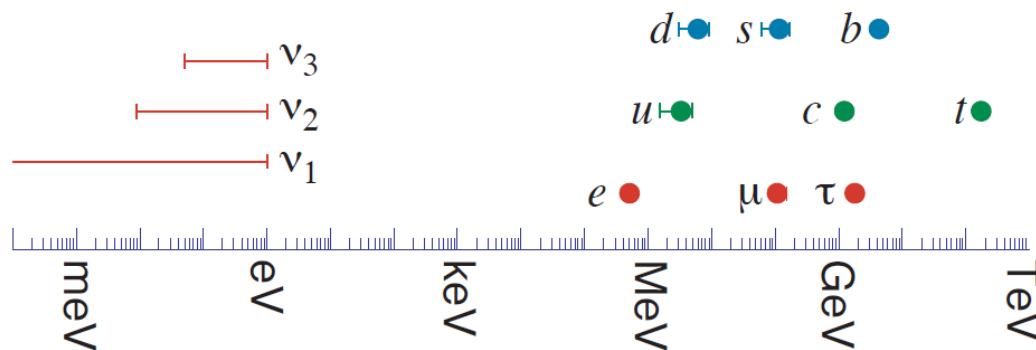


Стандартная модель состоит из следующих положений:

- Всё вещество состоит из 12 фундаментальных квантовых полей спина $\frac{1}{2}$, квантами которых являются фундаментальные частицы-**фермионы**, которые можно объединить в три поколения фермионов: **6 лептонов** (электрон, мюон, тау-лептон, электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино), **6 кварков** (u, d, s, c, b, t) и 12 соответствующих им античастиц.
- Кварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях; заряжённые лептоны (электрон, мюон, тау-лептон) — в слабых и электромагнитных; нейтрино — только в слабых взаимодействиях.
- Все три типа взаимодействий возникают как следствие постулата, что наш мир симметричен относительно трёх типов **калибровочных преобразований**. Частицами-переносчиками взаимодействий являются **бозоны**:
 - 8 **глюонов** для сильного взаимодействия (группа симметрии SU(3))
 - 3 тяжёлых **калибровочных бозона** (W^+ , W^- , Z_0) для слабого взаимодействия (SU(2));
 - один **фотон** для электромагнитного взаимодействия (группа симметрии U(1)).
- В отличие от электромагнитного и сильного, слабое взаимодействие может смешивать фермионы из разных поколений, что приводит к нестабильности всех частиц, за исключением легчайших, и к таким эффектам, как **нарушение CP-инвариантности** и **нейтринные осцилляции**.
- Внешними параметрами **Стандартной модели** являются:
 - 1) массы лептонов (3 параметра, нейтрино принимаются безмассовыми) и кварков (6 параметров), интерпретируемые как **константы взаимодействия** их полей с полем **бозона Хиггса**,
 - 2) параметры **СКМ-матрицы смешивания кварков** — три угла смешивания и одна комплексная фаза, нарушающая **CP-симметрию** — константы взаимодействия кварков с электрослабым полем,
 - 3) два параметра **поля Хиггса**, которые связаны однозначно с его вакуумным средним и массой бозона Хиггса,
 - 4) три константы взаимодействия, связанные соответственно с калибровочными группами U(1), SU(2) и SU(3), и характеризующие относительные интенсивности электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий.

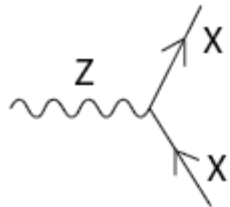


masses of matter particles

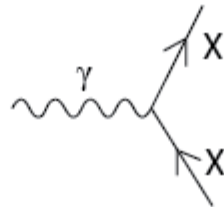


Характеристики кварков						
Характеристика	Тип кварка					
	d	u	s	c	b	t
Электрический заряд Q	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3
Барионное число B	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Спин J	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
Четность P	+1	+1	+1	+1	+1	+1
Изоспин I	1/2	1/2	0	0	0	0
Проекция изоспина I ₃	-1/2	+1/2	0	0	0	0
Странность s	0	0	-1	0	0	0
Charm c	0	0	0	+1	0	0
Bottomness b	0	0	0	0	-1	0
Topness t	0	0	0	0	0	+1
Масса в составе адрона, ГэВ	0.33	0.33	0.51	1.8	5	174
Масса "свободного" кварка, МэВ	4.8	2.3	95	$1.3 \cdot 10^3$	$(4.2-4.7) \cdot 10^3$	$174 \cdot 10^3$

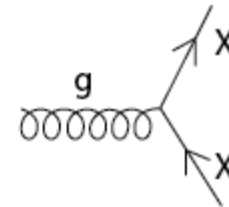
Standard Model Interactions (Forces Mediated by Gauge Bosons)



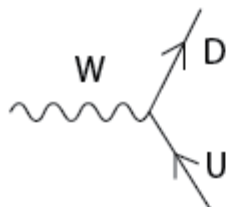
X is any fermion in the Standard Model.



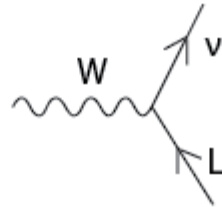
X is electrically charged.



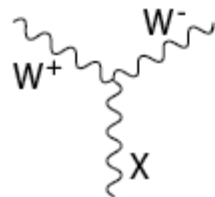
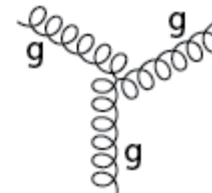
X is any quark.



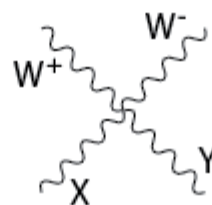
U is a up-type quark;
D is a down-type quark.



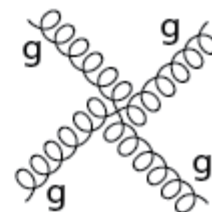
L is a lepton and ν is the corresponding neutrino.

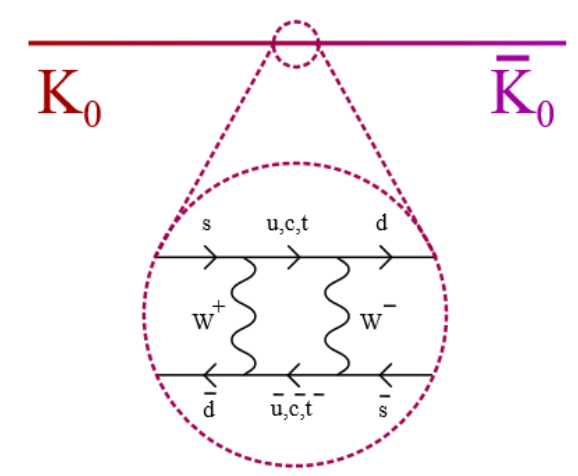
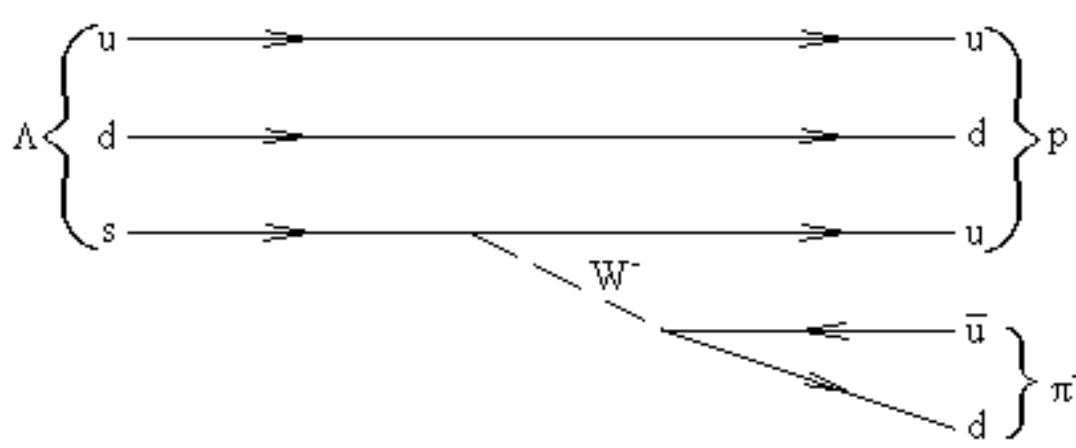
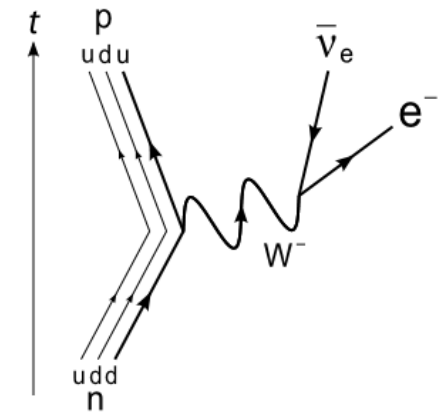
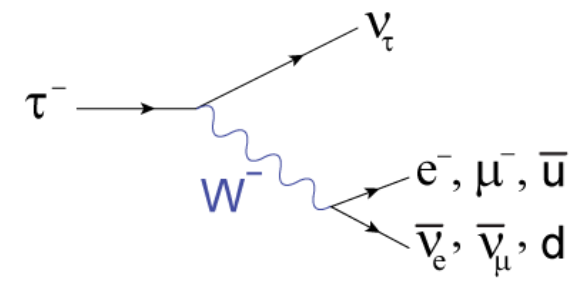
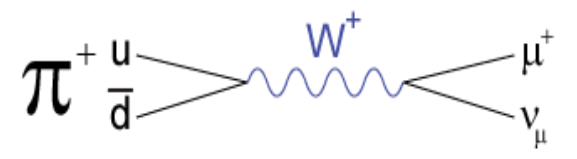
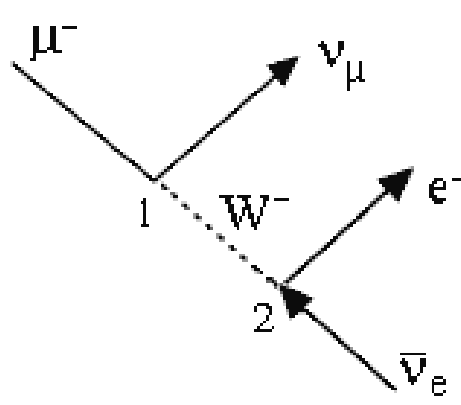
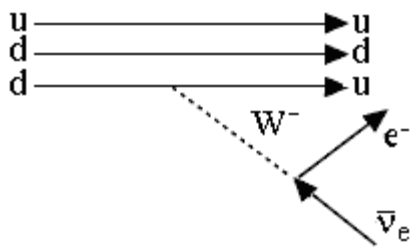


X is a photon or Z-boson.

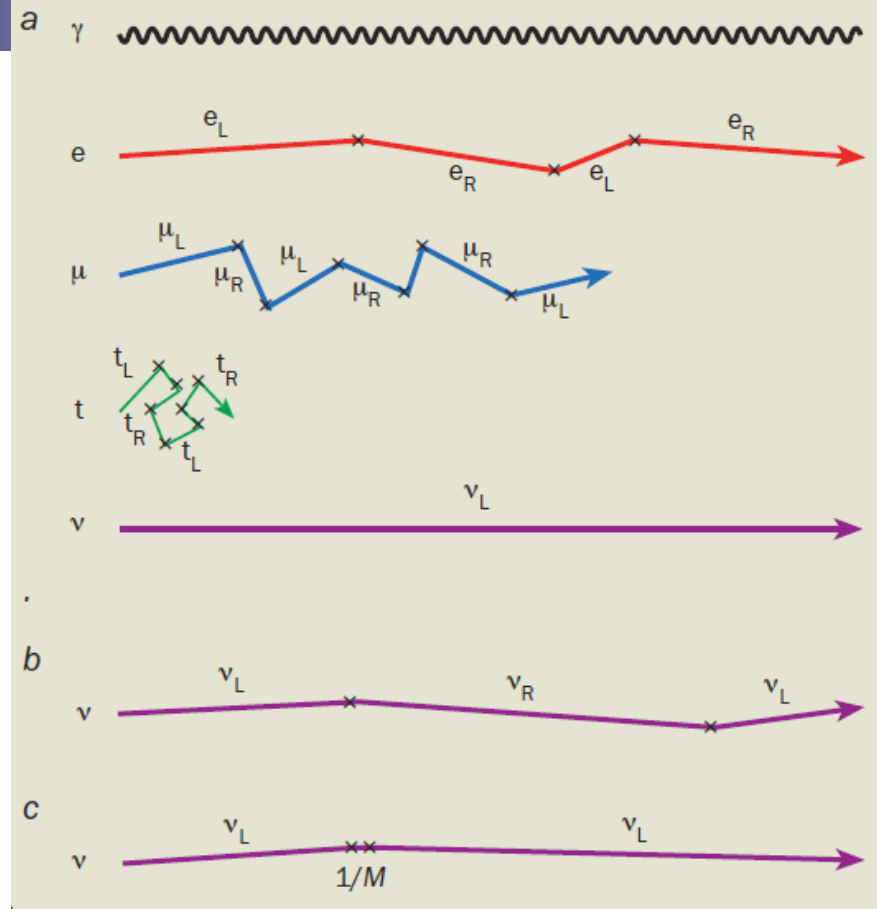


X and Y are any two electroweak bosons such that charge is conserved.





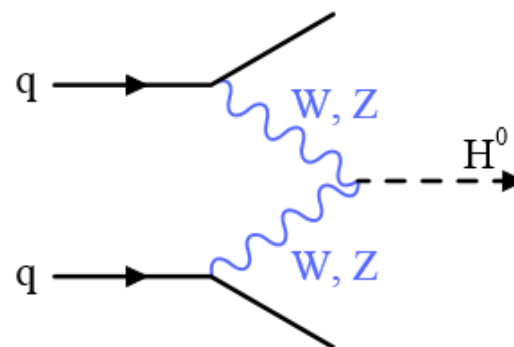
Генерация массы



- a) Частицы приобретают массы из-за рассеяния с полем Хиггса, меняя направление после каждого акта рассеяния: много чаще для тяжелой частицы, как тау-мезон, в сравнении с более лёгкой частицей, как электрон. В СМ фотон и нейтрино безмассовы
- b) Для массы Дираковского нейтрино требуется правостороннее нейтринное поле.
- c) Для левостороннего Майорановского нейтрино требуется введение массовых поправок второго порядка M за пределами СМ. Этот подход может объяснить большую разницу в массах между заряженными фермионами и нейтрино.

Бозон Хиггса, Хиггсовский бозон, хиггсон (англ. *Higgs boson*) — элементарная частица, квант поля Хиггса, с необходимостью возникающая в Стандартной модели физики элементарных частиц вследствие хиггсовского механизма спонтанного нарушения электрослабой симметрии. В рамках этой модели отвечает за инертную массу элементарных частиц. По построению хиггсовский бозон является скалярной частицей, то есть обладает нулевым спином.

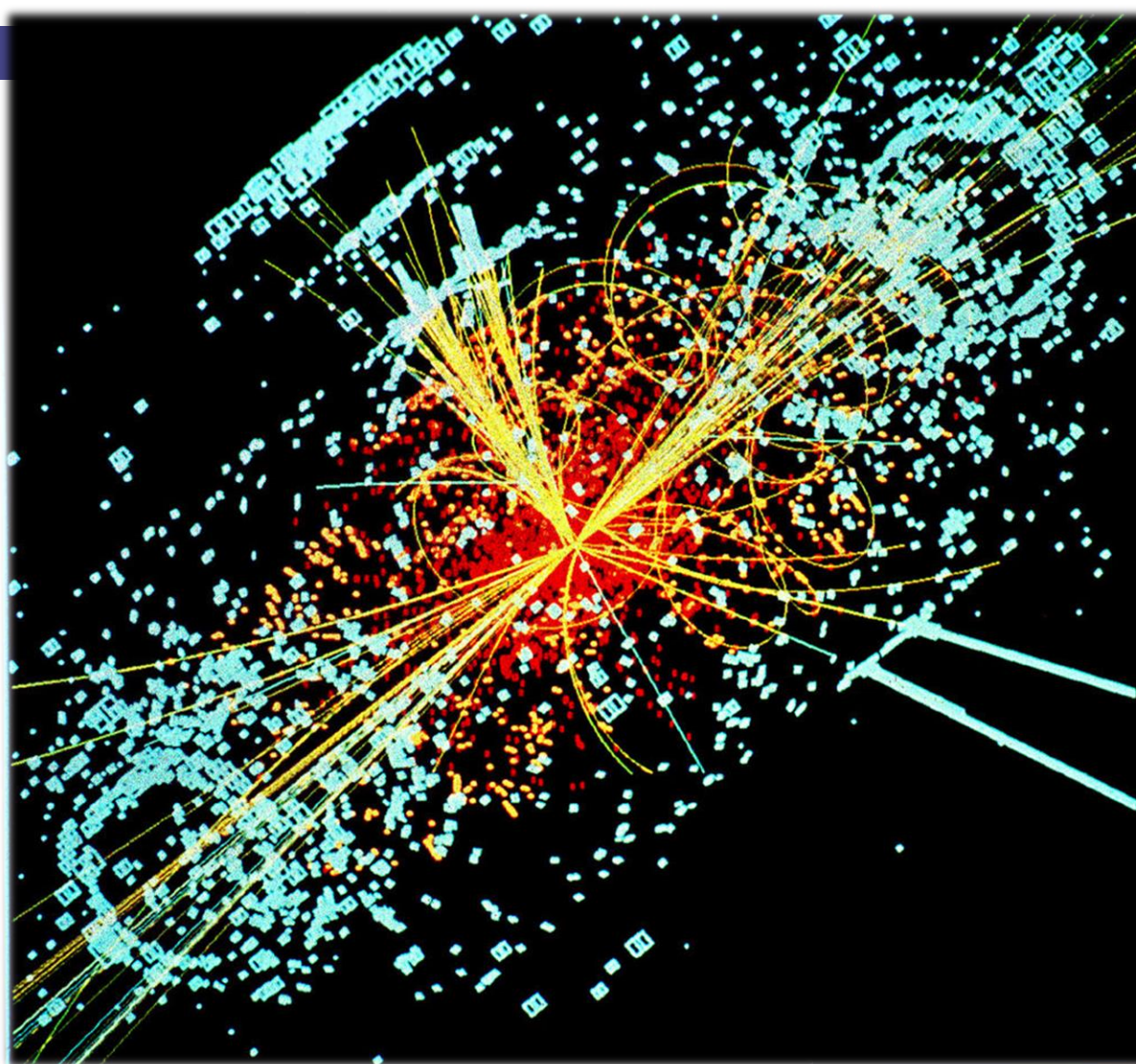
Постулирован британским физиком
Питером Хиггсом в статьях 1964 года



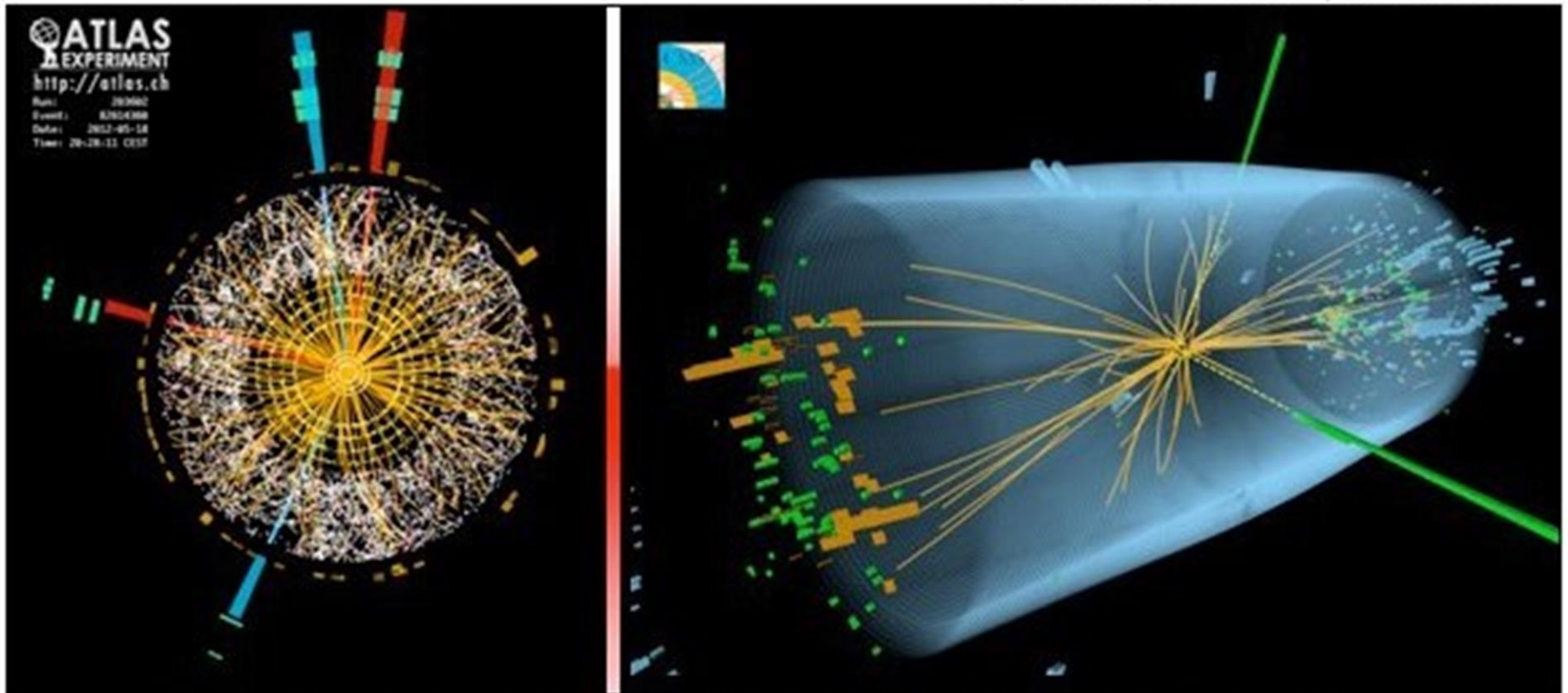
4 июля 2012 года, в результате исследований на БАК (ЦЕРН), был обнаружен кандидат на его роль — новая частица с массой около $125\text{—}126 \text{ ГэВ}/c^2$. Имелись веские основания считать, что эта частица является бозоном Хиггса.

В марте 2013 года появились сообщения от отдельных исследователей ЦЕРНа, что найденная полугодом ранее частица действительно является бозоном Хиггса.

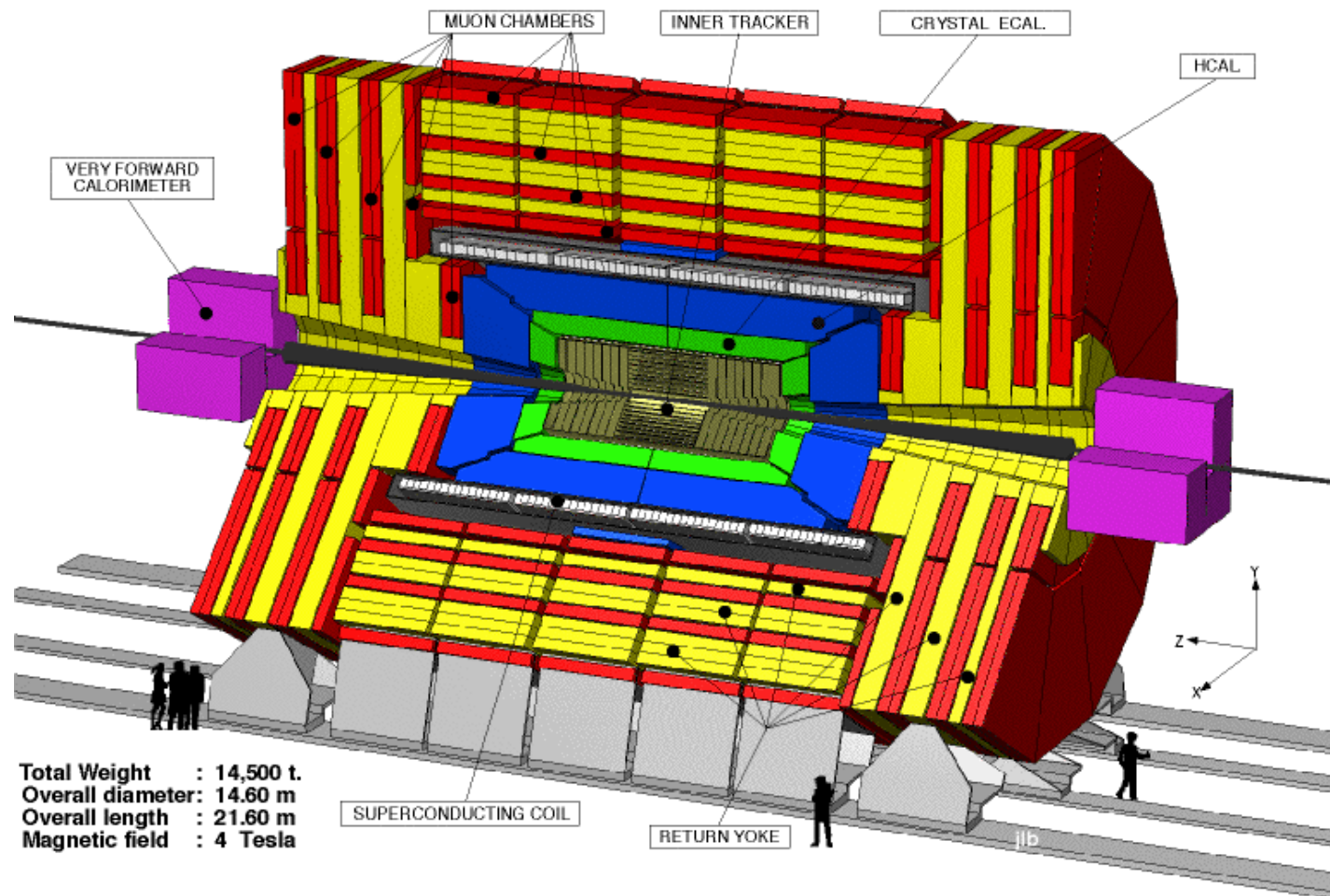
Это открытие завершило формирование Стандартной модели



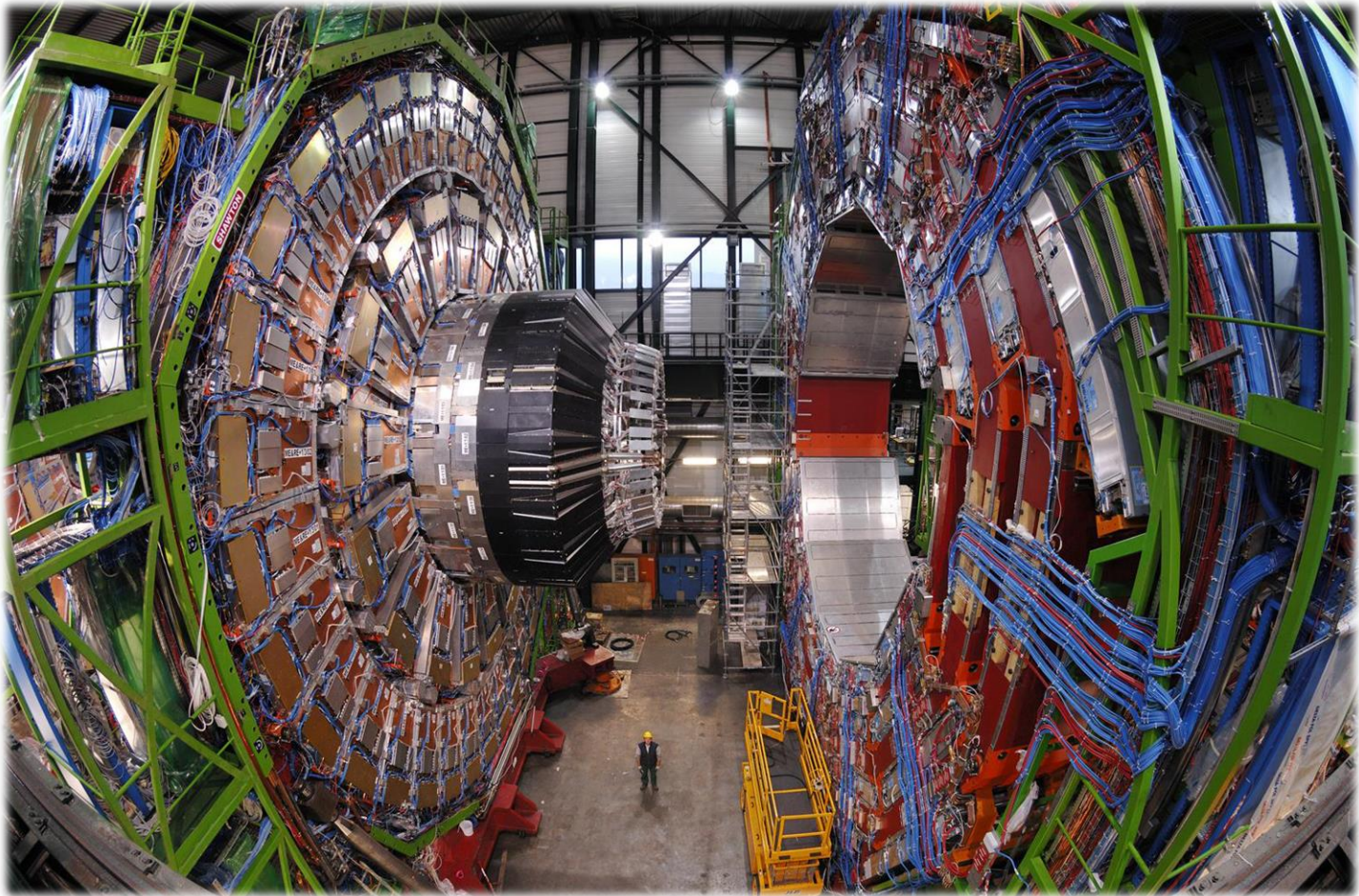
Пример моделирования события рождения Хиггса в детекторе *CMS* на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе. Сталкиваются два протона, рожденный при этом бозон Хиггса распадается на две струи адронов и две струю электронов. Линии показывают траектории частиц, а энергии этих частиц показаны голубыми квадратами.



Изображения результатов событий после столкновений двух протонов в детекторах ATLAS и CMS - © ЦЕРН



CMS particle detector on the Large Hadron Collider (LHC) at CERN



CMS particle detector on the Large Hadron Collider (LHC) at CERN

Elementary Particles

	Types	Generations	Antiparticle	Colors	Total
Quarks	2	3	Pair	3	36
Leptons			Pair	None	12
Gluons	1	1	Own	8	8
Photon			Own	None	1
Z Boson			Own		1
W Boson			Pair		2
Higgs			Own		1
Total number of (known) elementary particles:					61

4. Есть ли физика за пределами Стандартной модели?

Необъяснённые экспериментальные наблюдения

Гравитация

Стандартная модель не предоставляет объяснение гравитации. Кроме того, она несовместима с наиболее успешной теорией гравитации на сегодняшний день — *Общей теорией относительности*.

Тёмная материя и тёмная энергия

Стандартная модель способна объяснить лишь около 4,5 % материи во Вселенной. Из недостающих 95,5 % около 22,5 % должны быть тёмной материей, то есть материей, которая ведёт себя точно так же как другая материя, которую мы знаем, но которая взаимодействует только слабо с полями Стандартной модели. Остальное должно быть тёмной энергией, постоянной плотностью энергии вакуума.

Массы нейтрино

Согласно Стандартной модели нейтрино являются безмассовыми частицами. Эксперименты с нейтринными осцилляциями показали, что нейтрино имеют массу.

Асимметрия материи и антиматерии

Вселенная состоит по большей части из вещества. Стандартная модель предсказывает, что вещество и антивещество должны были быть созданы в (почти) равных количествах, которые бы уничтожили друг друга, пока Вселенная охлаждалась.



Нерешённые теоретические проблемы

Проблема иерархии фермионных масс

Стандартная модель вводит массы частиц посредством процесса, известного как *спонтанное нарушение симметрии*, вызванное полем Хиггса. В рамках Стандартной модели масса Хиггса получает некоторые очень большие квантовые поправки, связанные с присутствием виртуальных частиц (главным образом виртуальных топ-кварков). Эти поправки намного больше, чем фактическая масса Хиггса. Это означает, что параметр голой массы Хиггса в Стандартной модели должен быть тонко настроен таким способом, который почти полностью отменяет квантовые поправки. Этот уровень тонкой настройки считается неестественным многими теоретиками.

CP-проблема

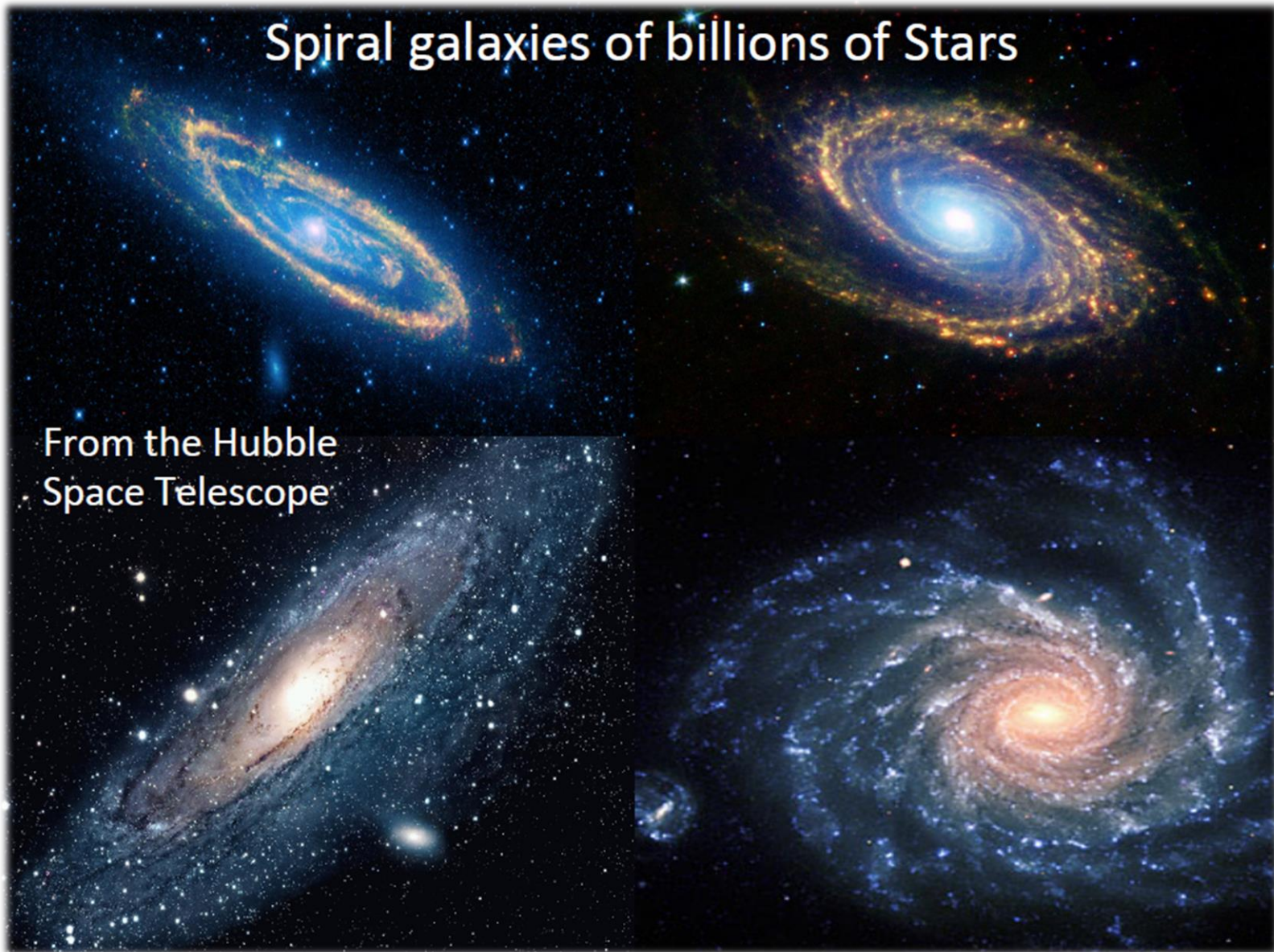
Теоретически можно утверждать, что Стандартная модель должна содержать член, который нарушает CP-симметрию между *материей и антиматерией* — в части сильного взаимодействия. Экспериментально, однако, такое нарушение не было обнаружено, что означает, что коэффициент при этом члене очень близок к нулю. Эта тонкая настройка также считается противоестественной.

Количество параметров

Стандартная модель зависит от 19 числовых параметров. Их значения известны из эксперимента, но происхождение значений неизвестно. Некоторые теоретики пытались найти *связь между различными параметрами*, например, между массами частиц в разных поколениях.

5. Тёмная материя и тёмная энергия

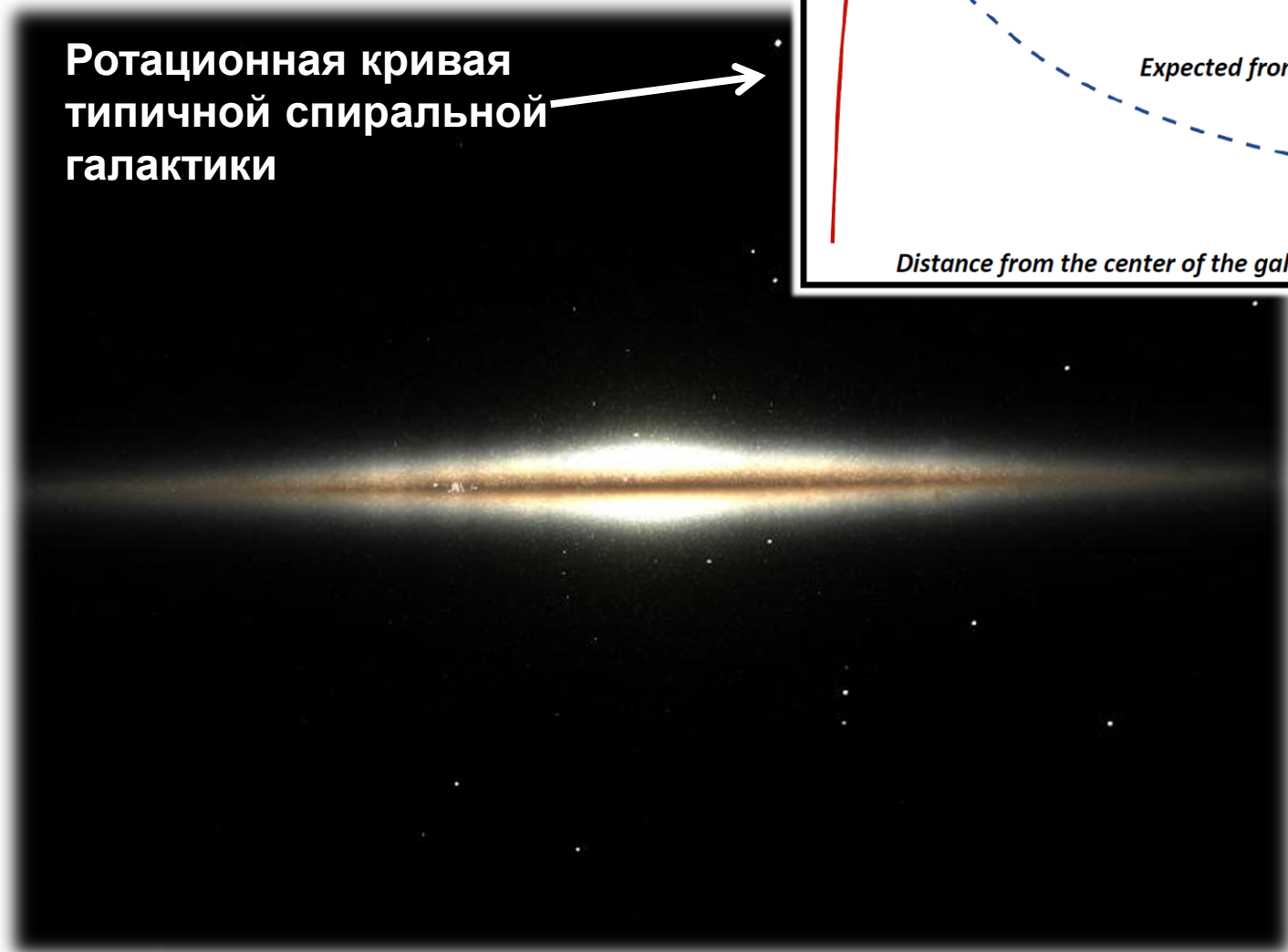
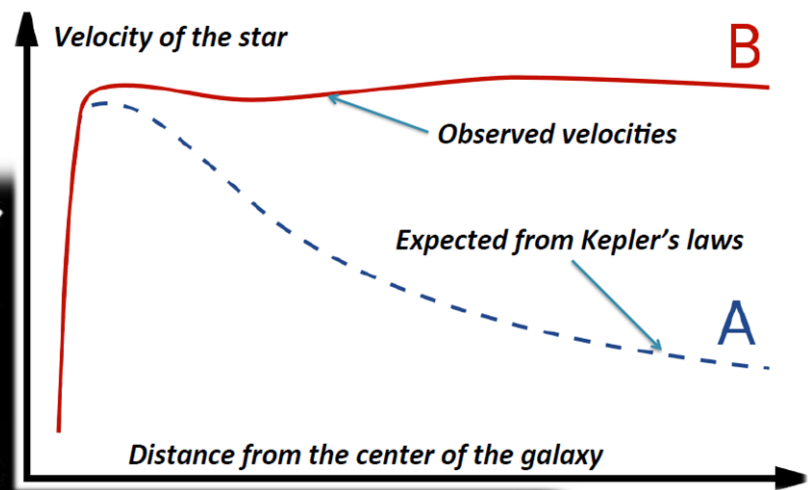
Spiral galaxies of billions of Stars



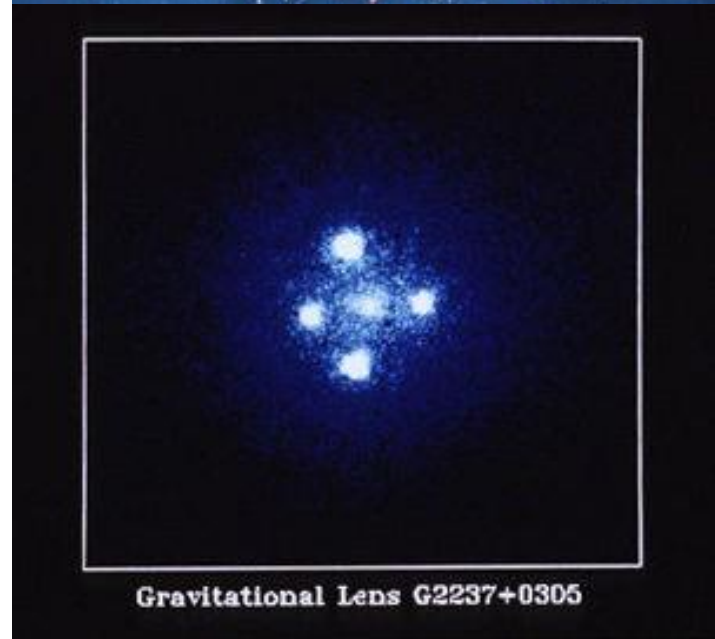
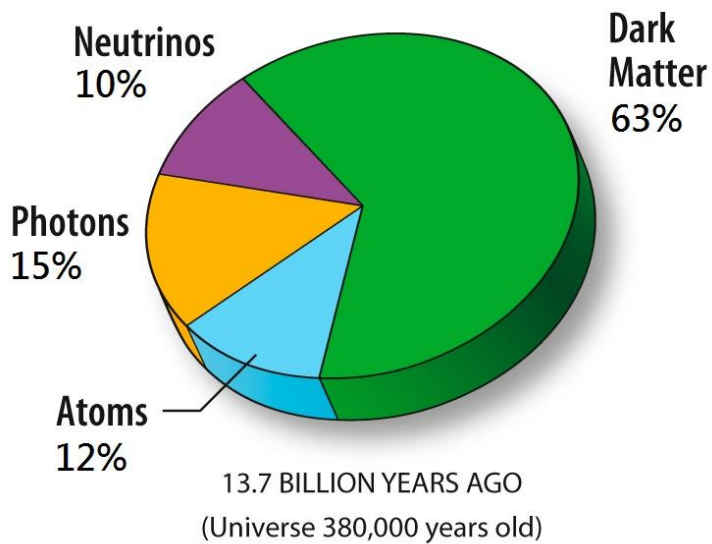
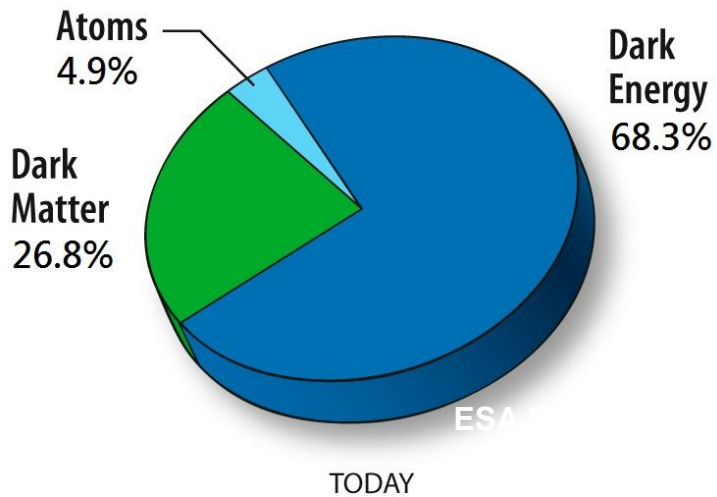
From the Hubble
Space Telescope

1933-1970 «Недостающая масса» Вселенной

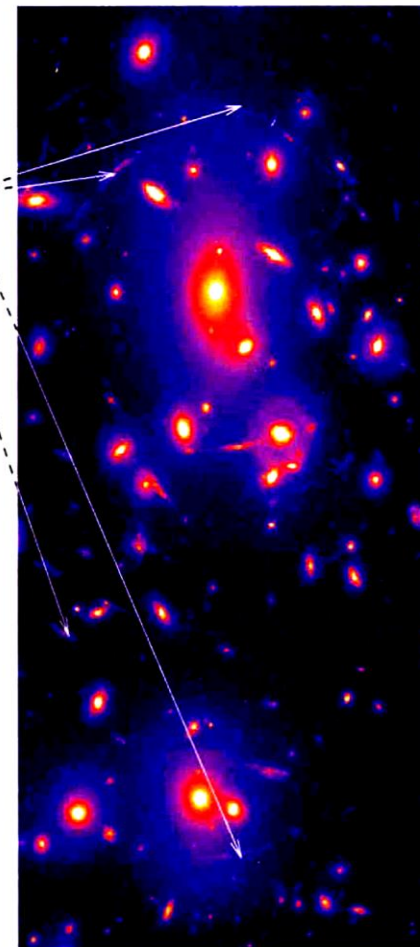
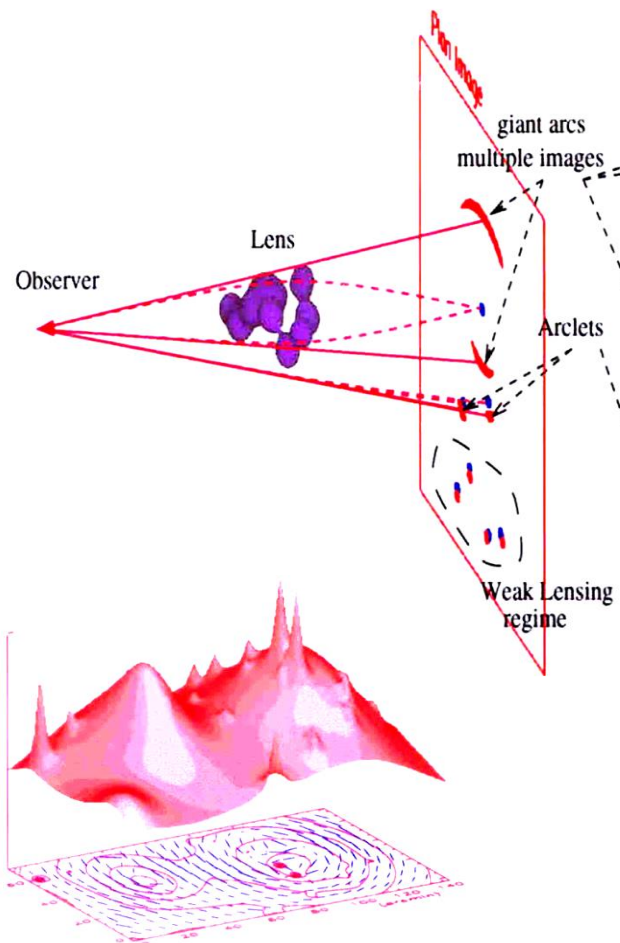
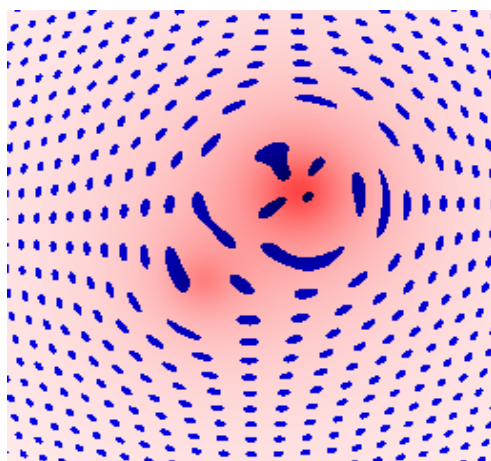
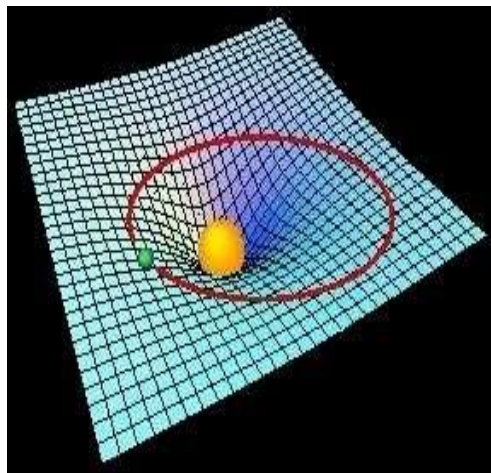
Ротационная кривая типичной спиральной галактики



Наблюдаемые эффекты

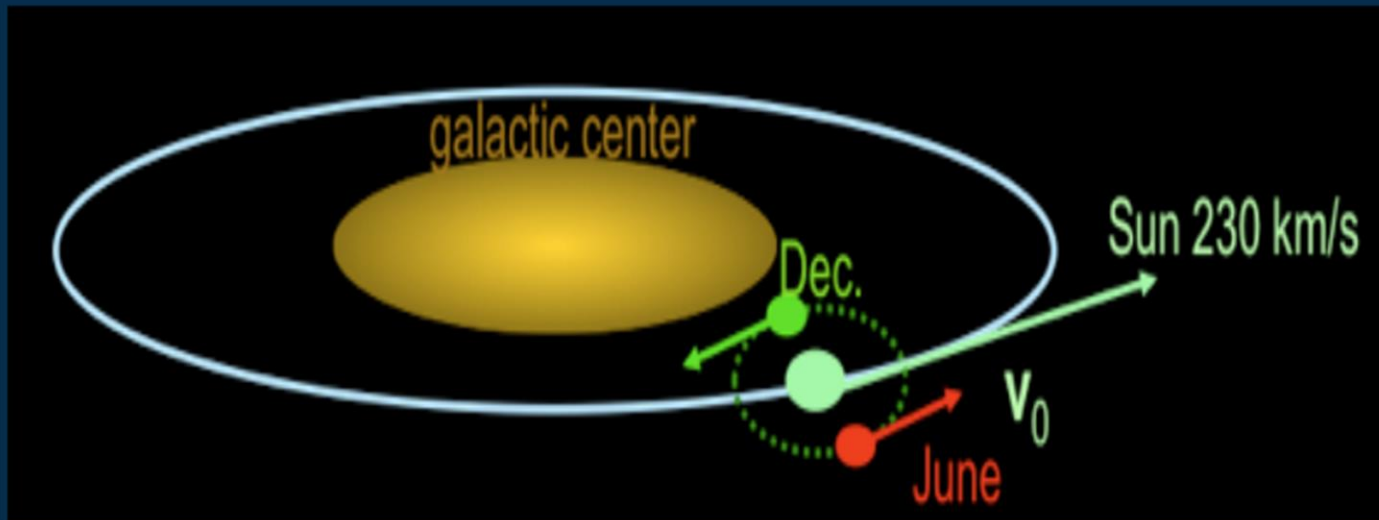


Гравитационное линзирование



Так выглядела бы простейшая решётка,
находящаяся за массивными объектом

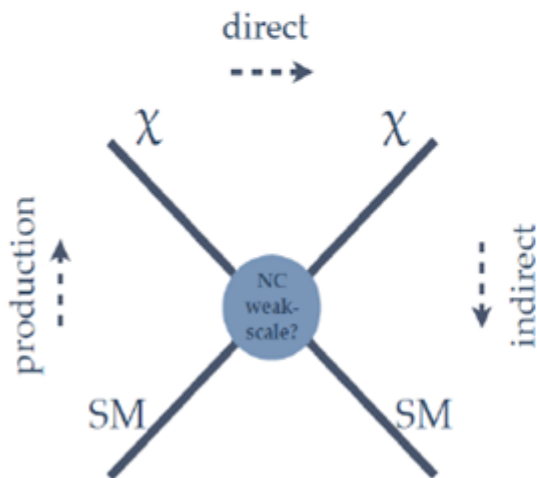
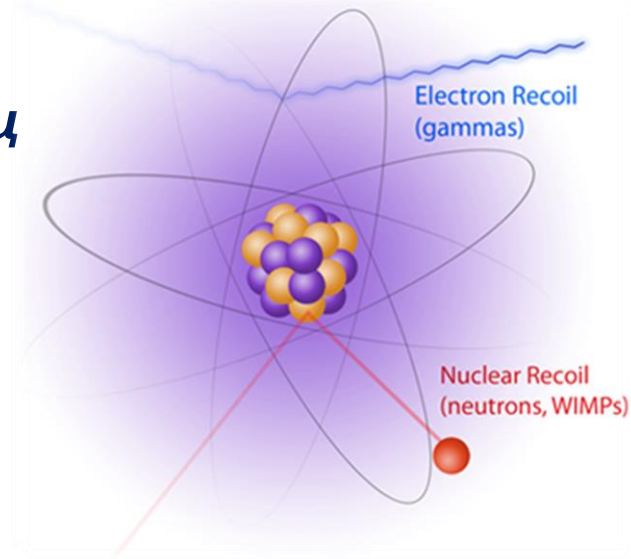
The solar system moves through the galactic halo at about 230-kilometers per second. That creates a wind of dark matter particles impinging on detectors on earth!



Поиск темной холодной материи в форме массивных слабо взаимодействующих частиц

1. Direct detection (scattering XS)

- Nuclear (atomic) recoils from elastic scattering
- (annual modulation, directionality, A- & J-dependence)
- Galactic DM at the Sun's position – our DM!
- Mass measurement (if not too heavy)



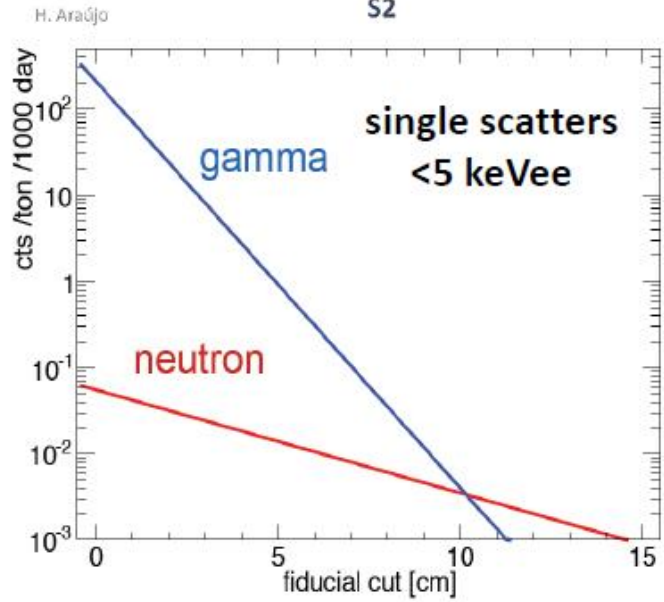
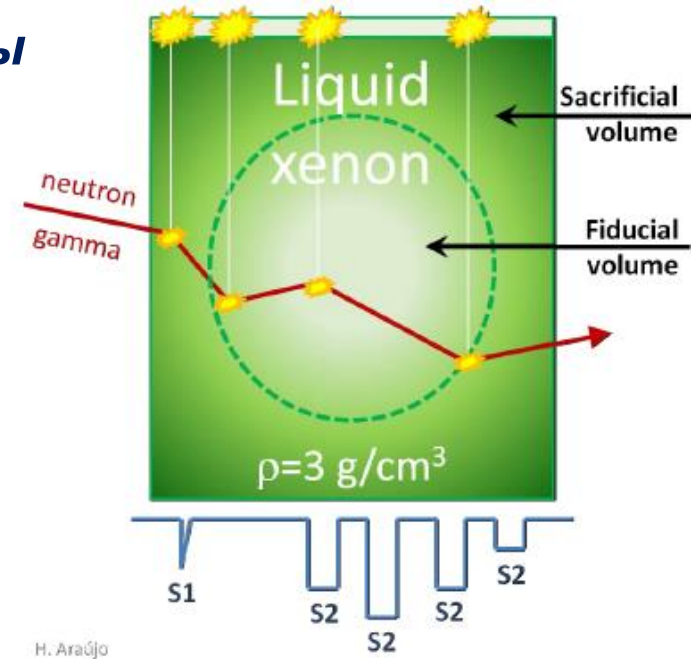
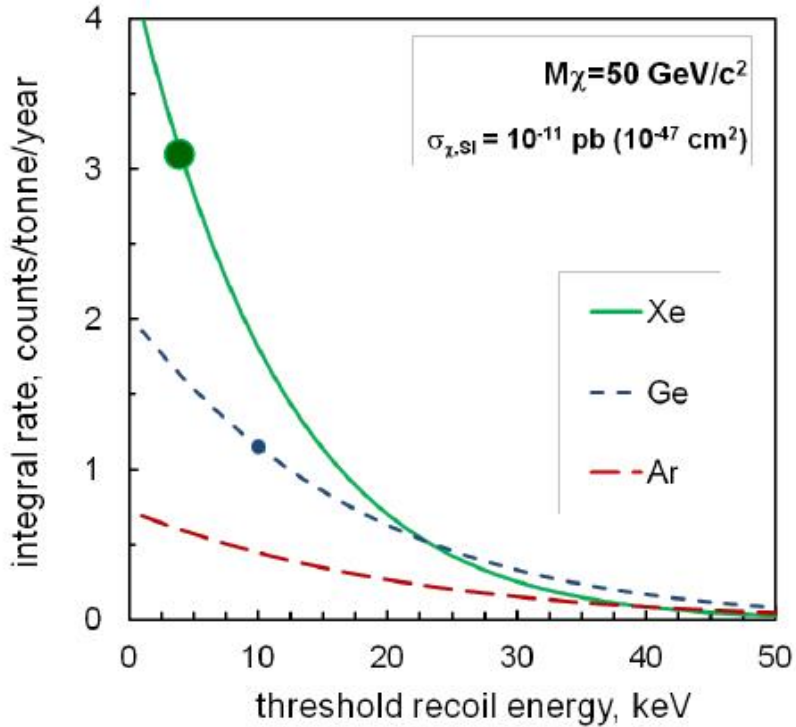
2. Indirect detection (decay, annihilation XS)

- High-energy cosmic-rays, γ -rays, neutrinos, etc.
- Over-dense regions, annihilation signal $\propto n^2$
- Challenging backgrounds

3. Accelerator searches (production XS)

- Missing transverse energy, monojets, etc.
- Good place to look for particles...
- Mass measurement poor, at least initially
- Can it establish that new particle is the DM?

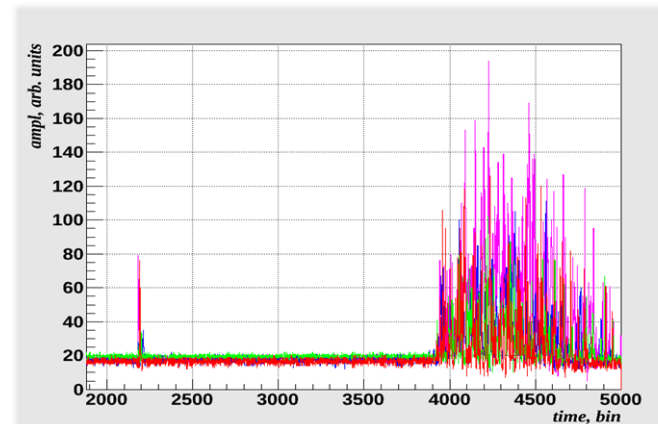
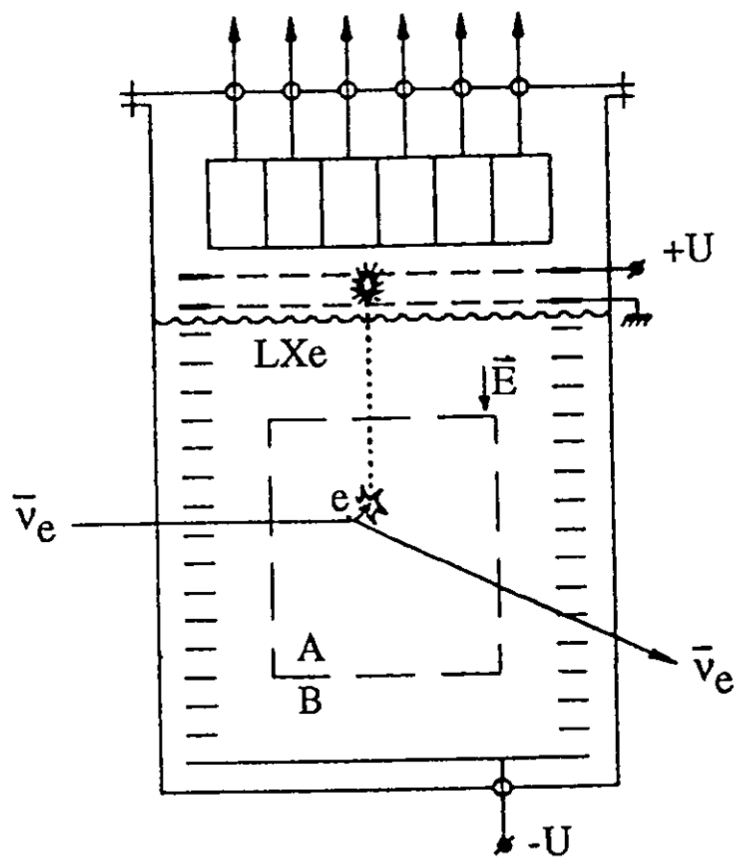
Двухфазные эмиссионные детекторы



Searches for RARE and LOW ENERGY events: a very challenging combination

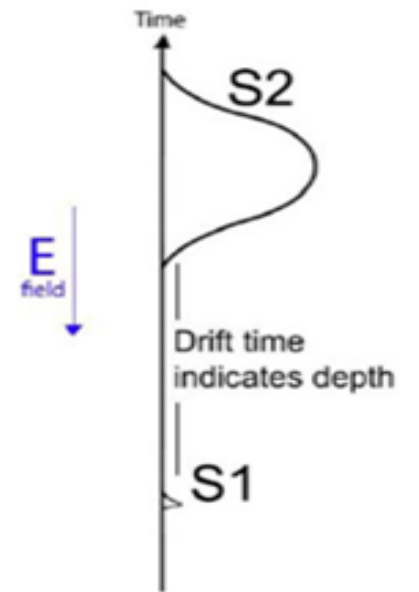
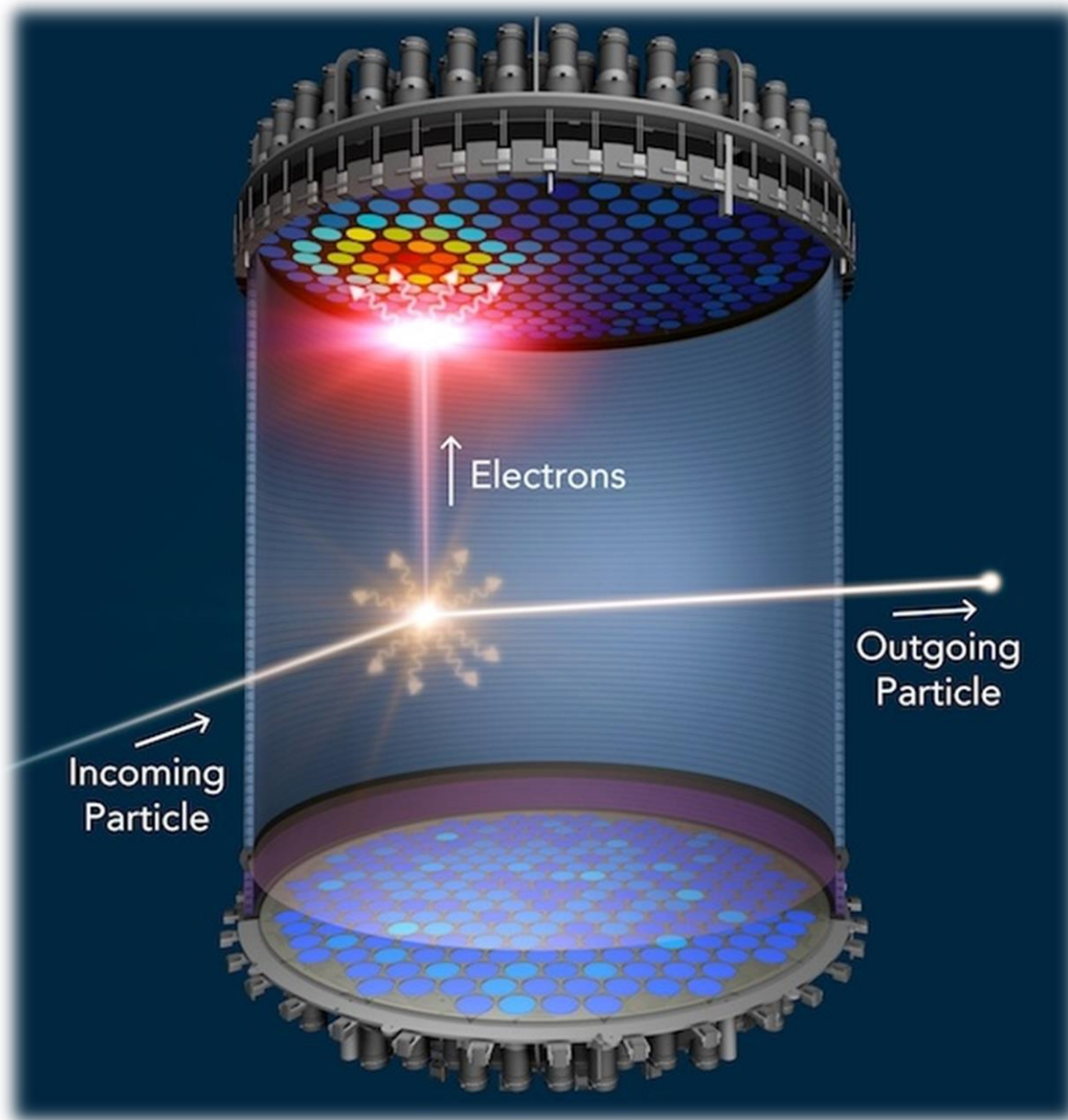


Мемориальная
доска на корпусе
«Э» открыта
18 ноября 2014 г.

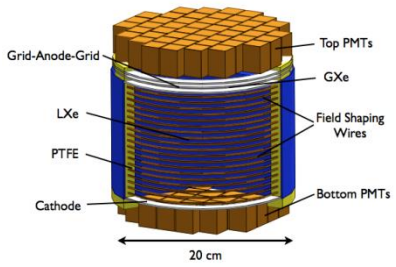


- Чувствителен к одиночным электронам
- Двойной сигнал: возбуждение и ионизация среды
- «Само-экранировка»
- Большая масса
- Можно использовать для поиска редких и слабых сигналов

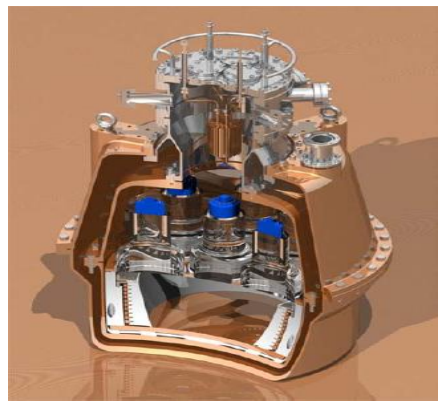
Fig.4. LXe time-projection scintillating drift chamber as wall-less detector for measurements of magnetic momentum neutrino.



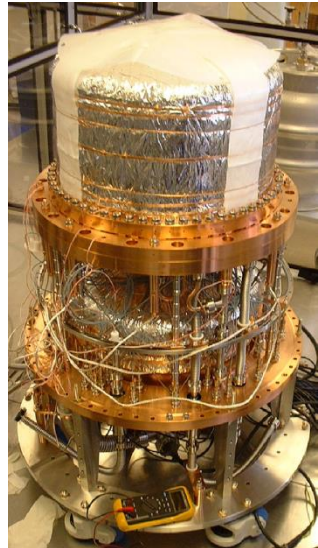
2003-2013 Эмиссионные детекторы ТМ



XENON 10



ZEPLIN II



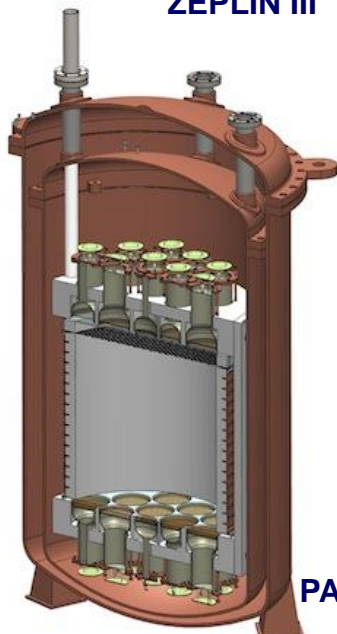
ZEPLIN III



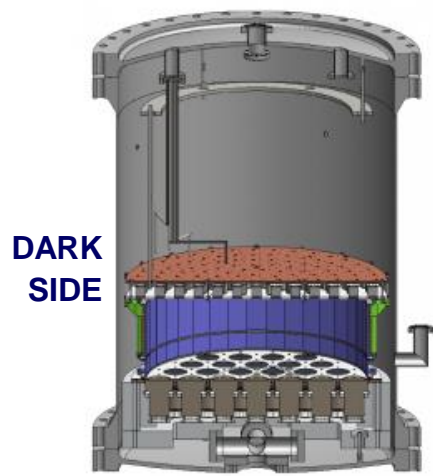
LUX



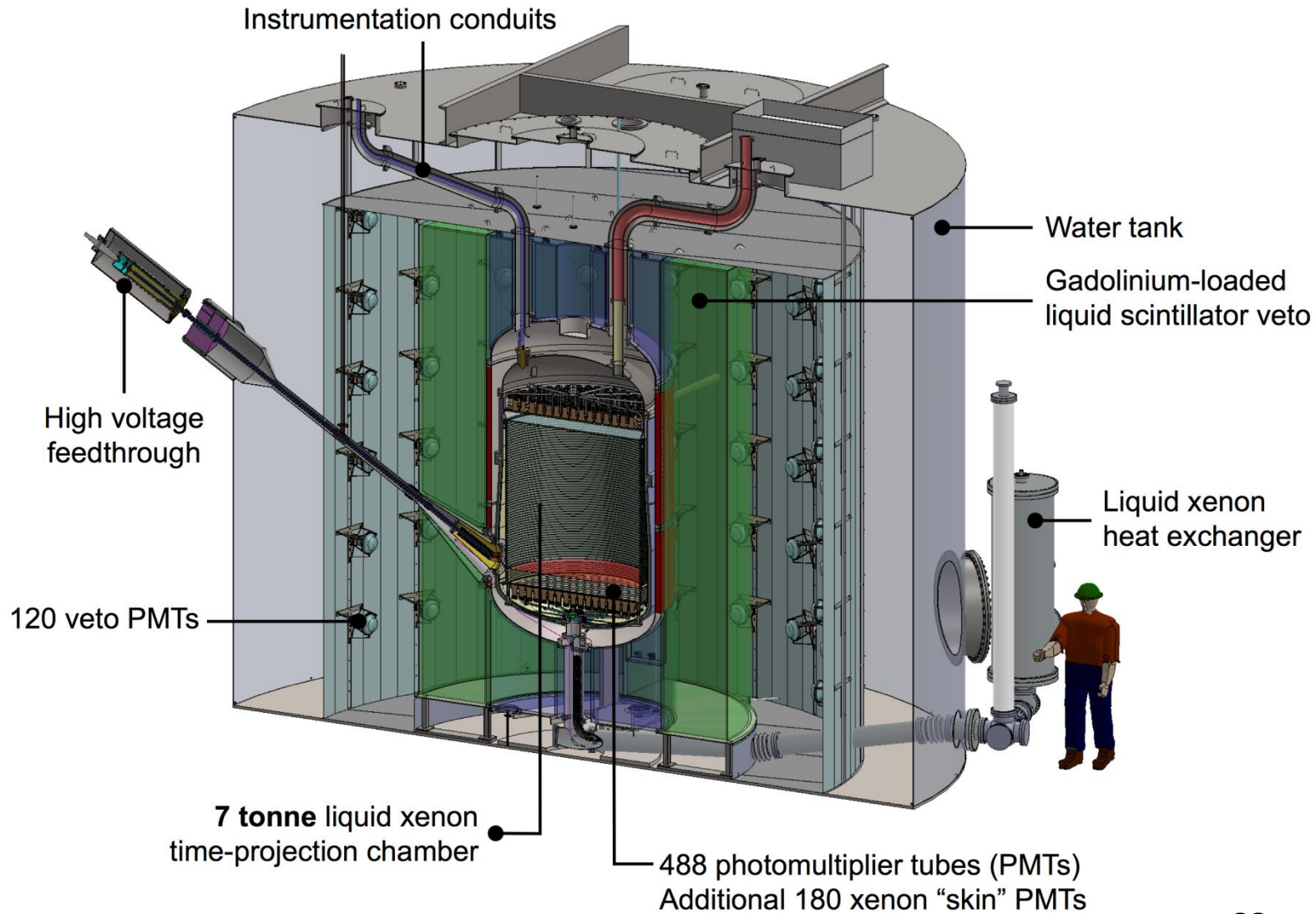
XENON 100



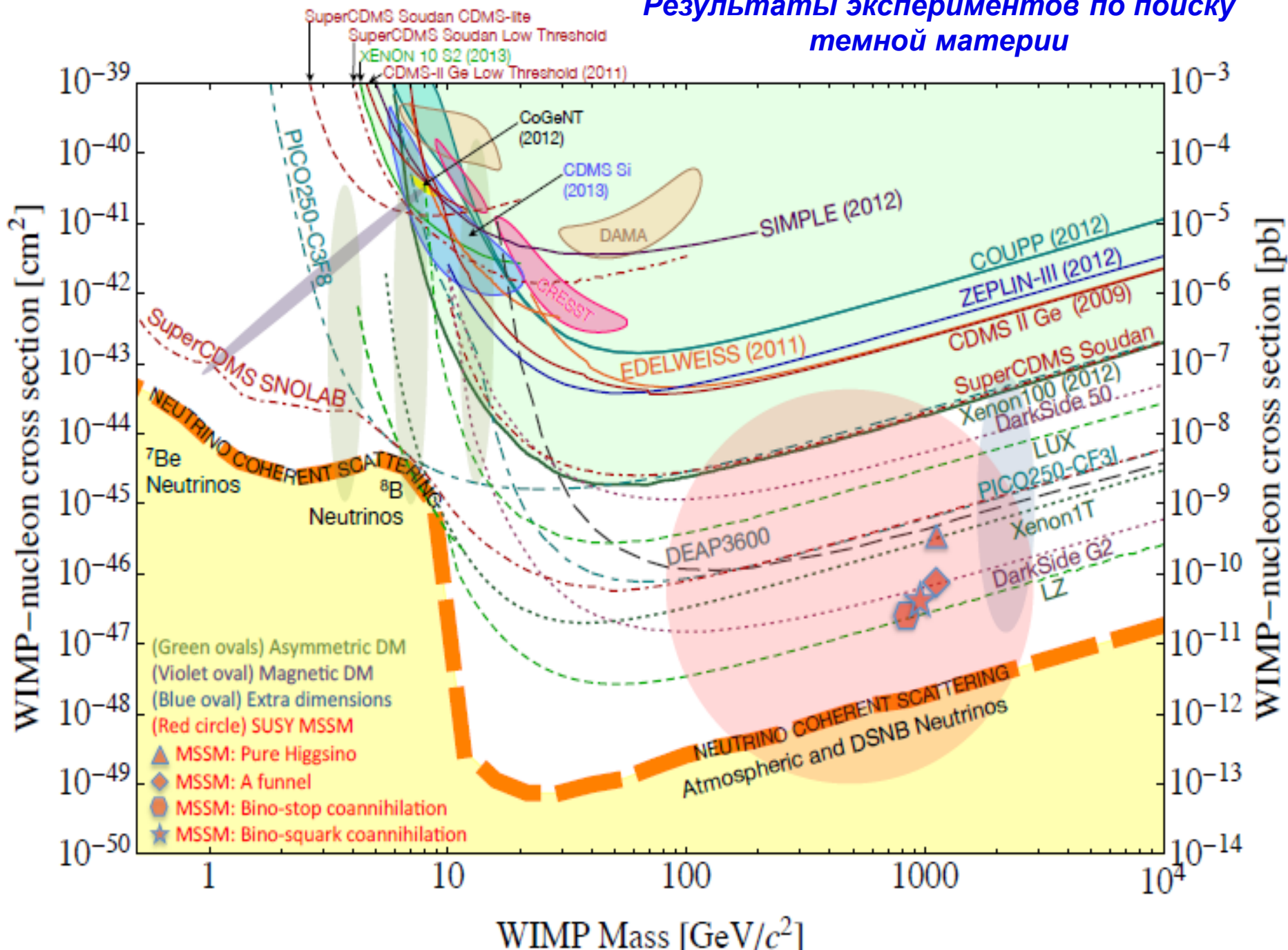
PANDA-X



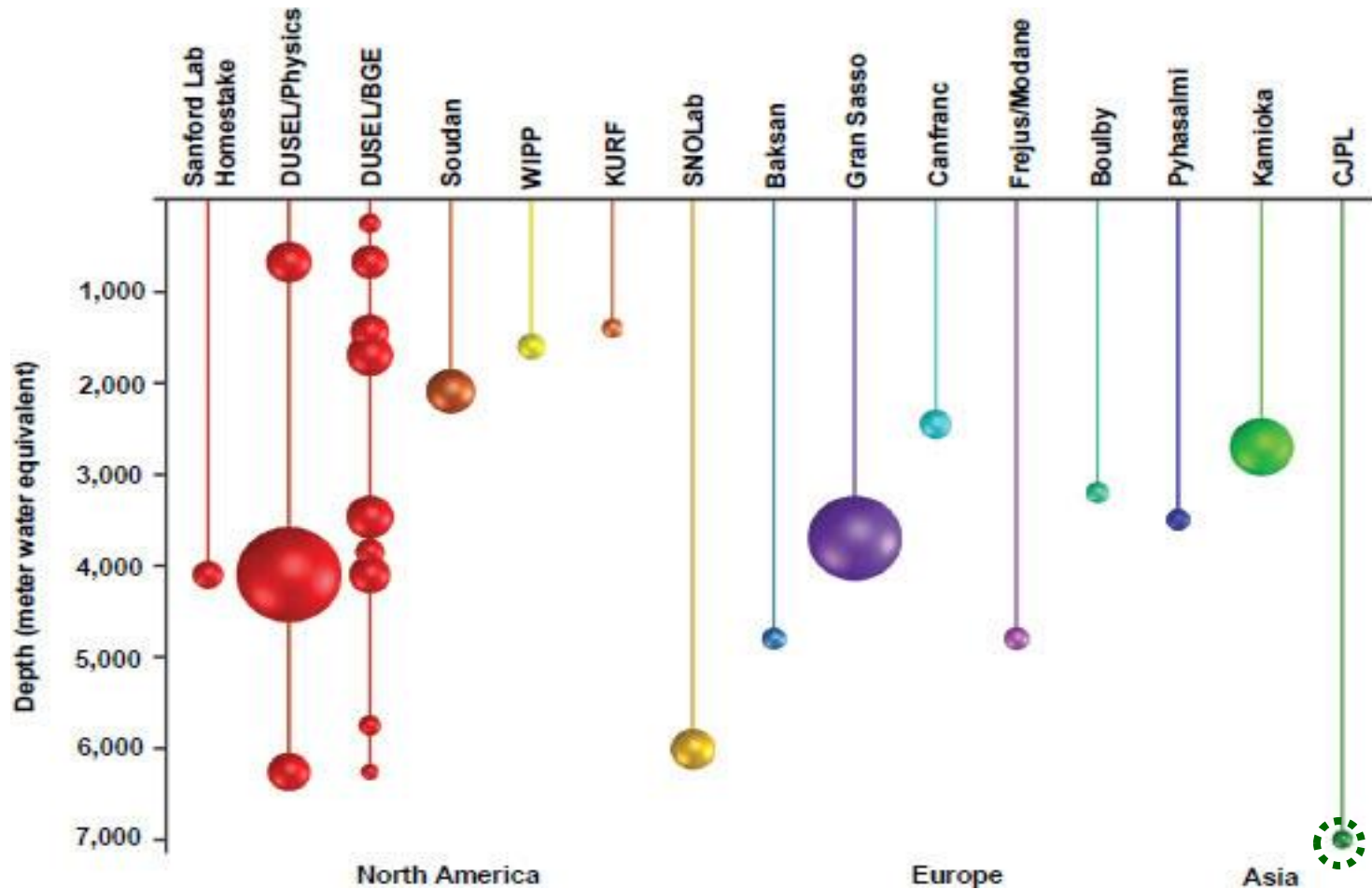
DARK SIDE



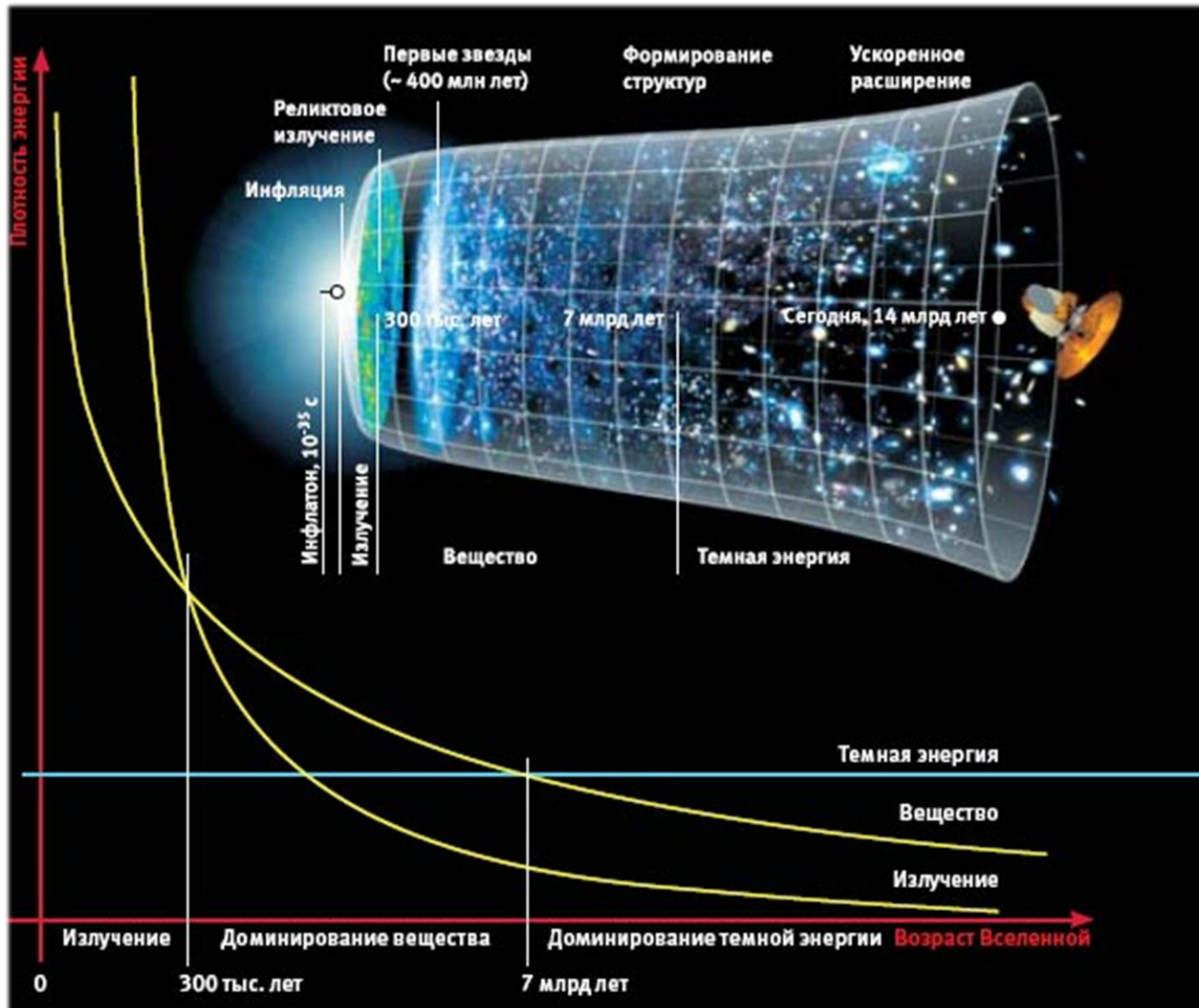
Результаты экспериментов по поиску темной материи



Подземный лаборатории мира, где ведутся поиски астрочастиц



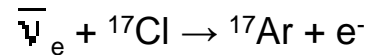
Тёмная энергия



6. Нейтринные осцилляции

Из-за чрезвычайно малого сечения взаимодействия нейтрино с веществом и малости потока нейтрино высоких энергий для создания современных нейтринных детекторов используются естественные водные бассейны (детекторы *ANTARES*, *NEMO*, *SAUND*, *HT-200* (Байкал) или толща антарктического льда (*AMANDA*, *IceCube*).

Попытки Р. Дэвиса зарегистрировать нейтрино от ядерного реактора с помощью реакции



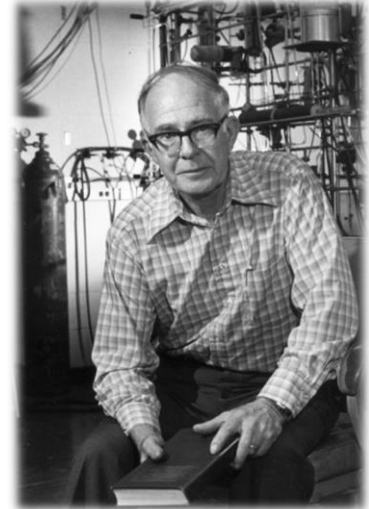
не увенчались успехом. Так было экспериментально доказано, что нейтрино и антинейтрино разные частицы.

В большой серии экспериментов, проведенных Р. Дэвисом в шахте Хомстэйк, исследовалась интенсивность протекания реакции $\bar{\nu}_e + {}^{17}\text{Cl} \rightarrow {}^{17}\text{Ar} + e^-$ инициированной потоком нейтрино, рожденных на Солнце.

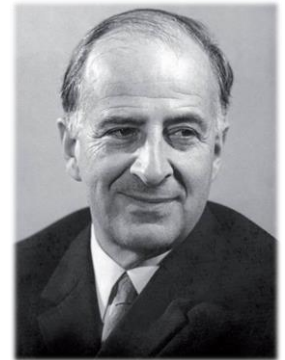
Эксперименты Дэвиса, которые проводились *в течение 30 лет*, показали, что величина измеряемого потока солнечных нейтрино значительно меньше, чем должна быть по модели Солнца

Наиболее вероятным объяснением этого явления является превращение одного сорта нейтрино в другие – т.н. *осцилляции нейтрино*.

Впервые (1957 г.) идея об осцилляциях нейтрино была высказана Б.М. Понтекорво.



Raymond Davis
(1914 – 2006)
Н.п.2002



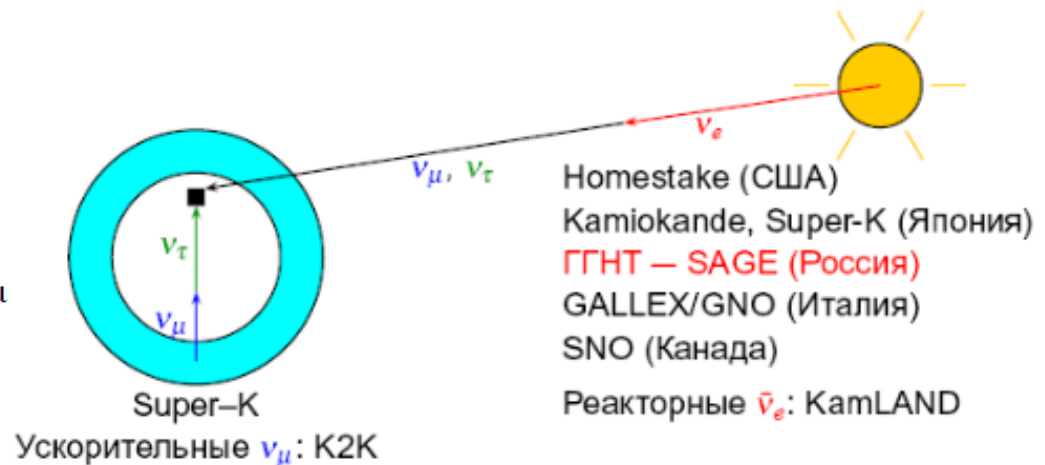
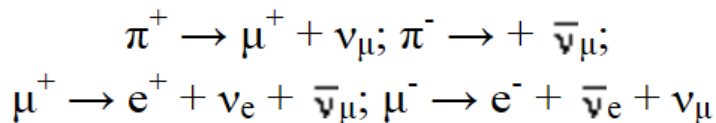
Бруно Понтекорво
(1913-1993)

Осцилляции нейтрино

Если лептонные числа L_e, L_μ, L_τ не являются абсолютно сохраняющимися квантовыми числами, и если нейтрино имеют не нулевые, а конечные массы, то возможно превращение нейтрино одного «поколения» в нейтрино другого «поколения»

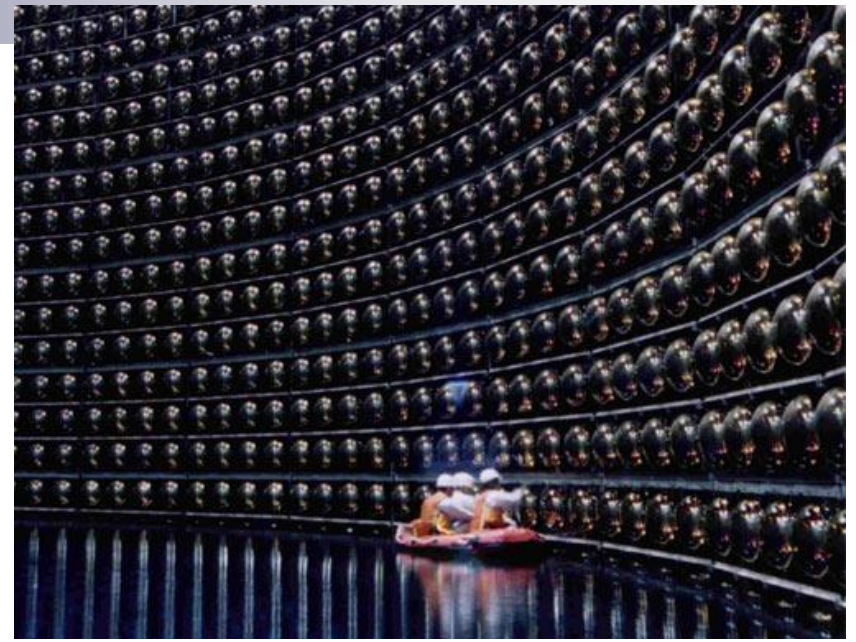
Первые указания на нейтринные осцилляции были получены в измерениях на водном черенковском детекторе *SuperKamioKande* в 1998 г. Детектор представляет собой резервуар из нержавеющей стали высотой 42 м и диаметром 40 м, заполненный 50 тыс. тоннами специально очищенной воды. Он размещен на глубине в 1.6 км (2.7 км водного эквивалента) в Японии (шахта Камиока). На стенах резервуара размещены 11146 ФЭУ (внутренний детектор + 1885 8" ФЭУ (внешний детектор) – см. след. слайд

Нейтрино рождаются в атмосфере в результате взаимодействия излучаемых Солнцем протонов высоких энергий с ядрами атмосферы. Детектор позволял надежно различать электронные и мюонные нейтрино. Потоки оказались близки. Хотя мюонных д.б. больше



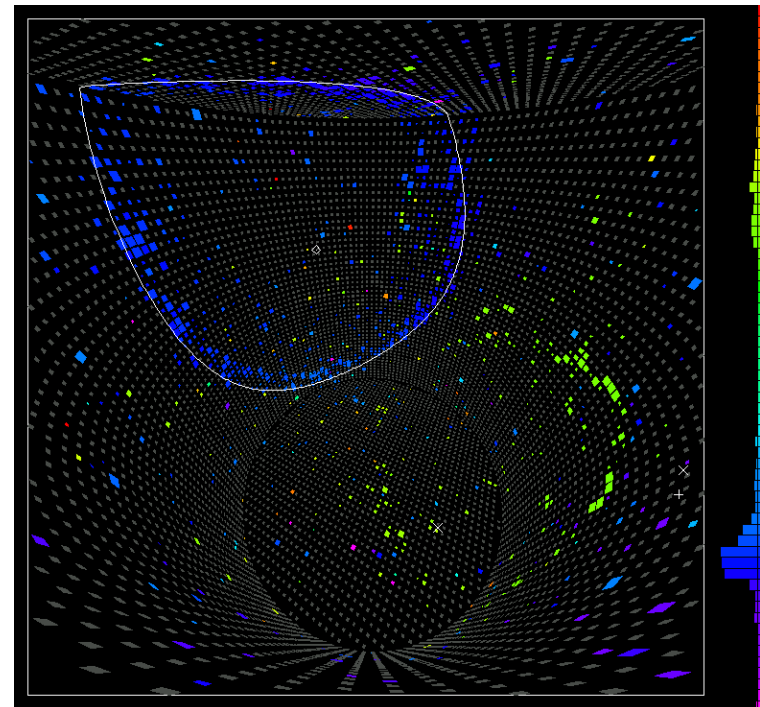
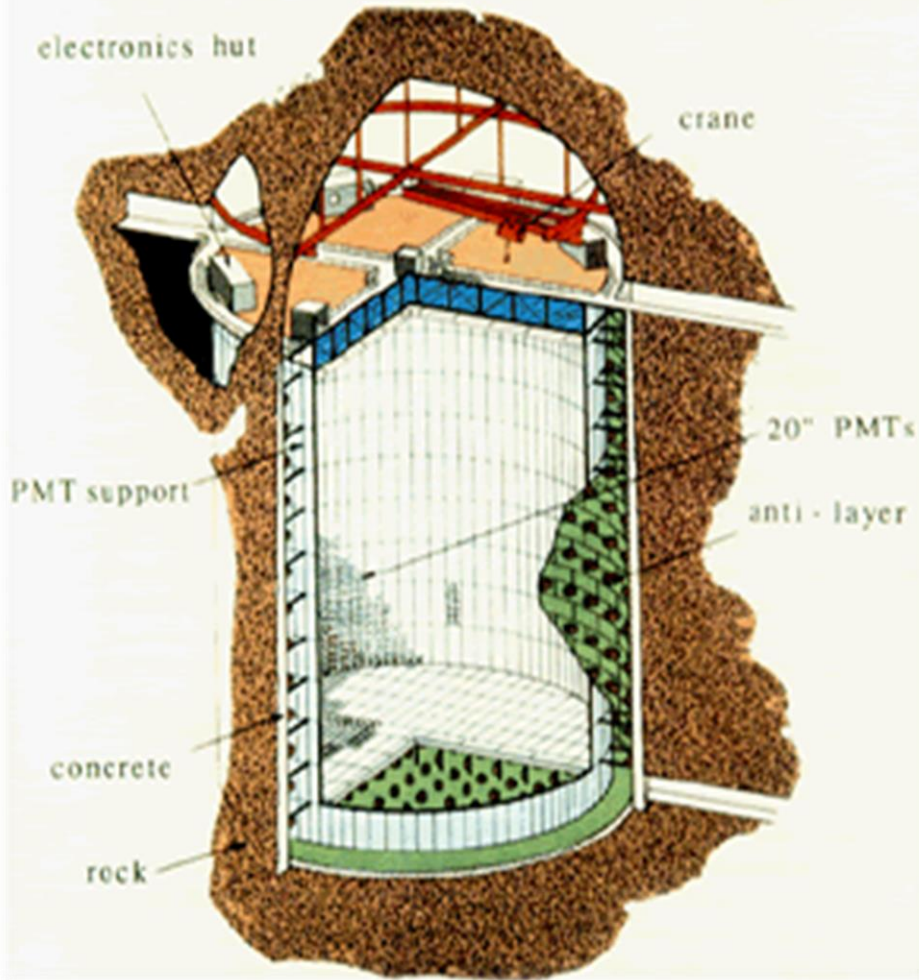
Нейтрино имеют массы
 Эти массы крайне малы: $m_\nu < 2.05$ эВ (Троицк ν -масс)
 по сравнению с массой протона $m_p \approx 1$ ГэВ = 10^9 эВ

SuperKamiokande



50,000 ton Water Cherenkov Detector

11,200 20" PMTs



"For the greatest benefit to mankind"
Alfred Nobel

2015 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

Takaaki Kajita
Arthur B. McDonald



Такааки Кадзита (Супер-Камиоканде) и Артур Макдональд (SNO) (Takaaki Kajita, Arthur B. McDonald) получили Нобелевскую премию по физике 2015 года «за открытие нейтринных осцилляций, показывающих, что нейтрино имеют массу»



*Super-
Kamiokande*



Takaaki Kajita



Arthur B. McDonald



*Sudbury
Neutrino
Observatory*

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ:

«The existence of dark matter is at present one of the strongest pieces of evidence that the current theory of fundamental particles and forces, summarized in the standard model of particle physics, is incomplete.

...Dark matter therefore plays a central role in both particle physics and cosmology, and the discovery of the identity of dark matter is among the most important goals in science today.»

The Report of the Dark Matter Scientific Assessment Group, a joint sub-panel of the High Energy Physics Advisory Panel (HEPAP) and the Astronomy and Astrophysics Advisory Committee (AAAC), states (July 2007)

Источники информации

1. Ю. М. Широков, Н.П. Юдин. Ядерная физика. М.: Наука, 1980. Глава XII
2. Ядерная физика в Интернете: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/>
3. K.S.Krane. Introductory Nuclear Physics. Wiley, 1988. Chapter 19;
<http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/446/Krane%20-%20Introductory%20Nuclear%20Physics.pdf>
4. Ю.Э.Пениожкевич. Ядерная астрофизика. Соровский образовательный журнал №10 1998; http://nuclphys.sinp.msu.ru/mirrors/1998_10.pdf
5. Д.Ю. Акимов. Обзор экспериментов по поиску темной материи.
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/nseminar/26.11.14.pdf>