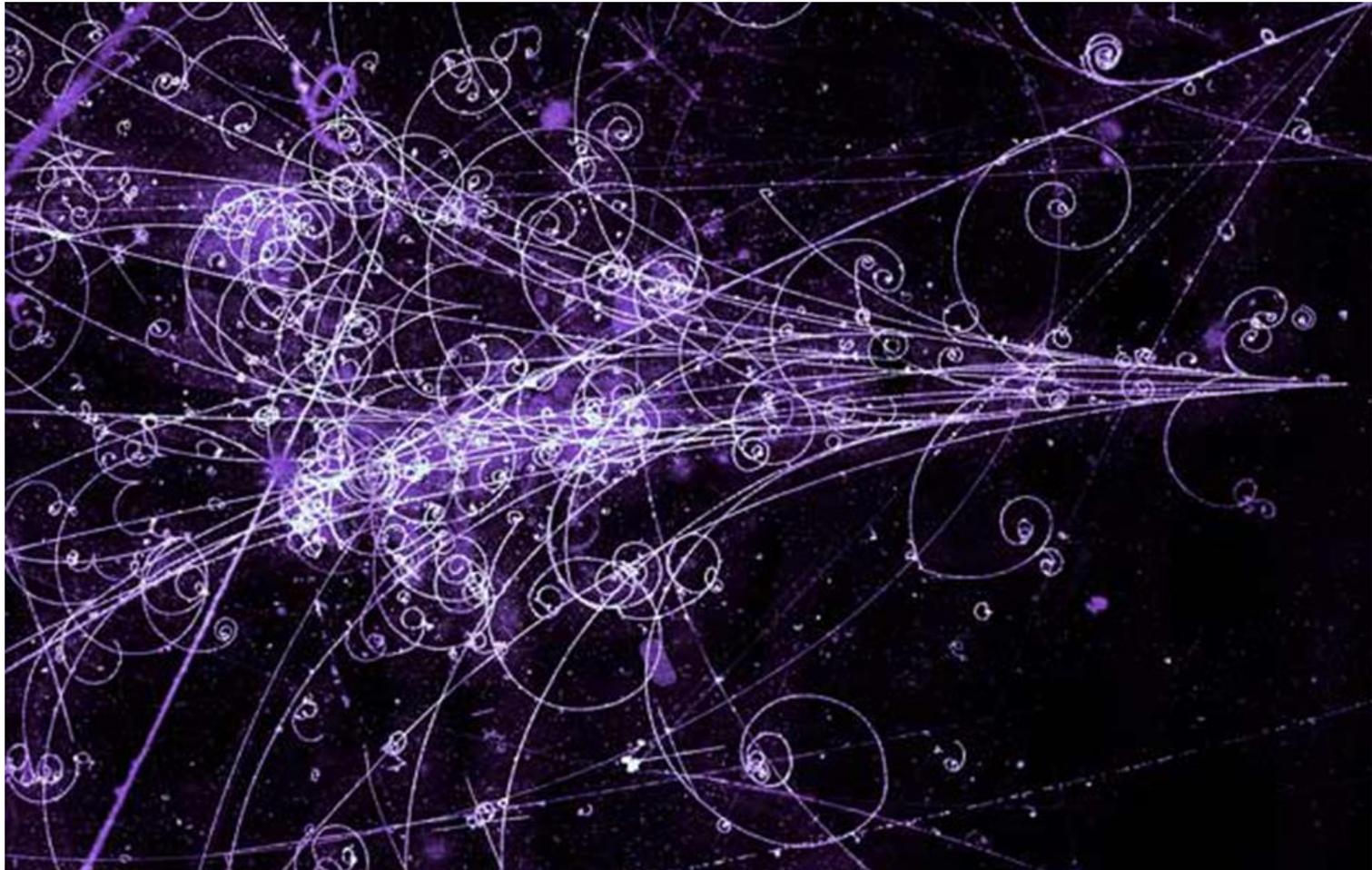




Элементарные частицы



Вопросы

1. Визуализация явлений в микромире.
2. Детектор ALICE.
3. Нейтринный детектор «Супер-Камиоканде».
4. Стандартная модель.

1. Визуализация явлений в микромире

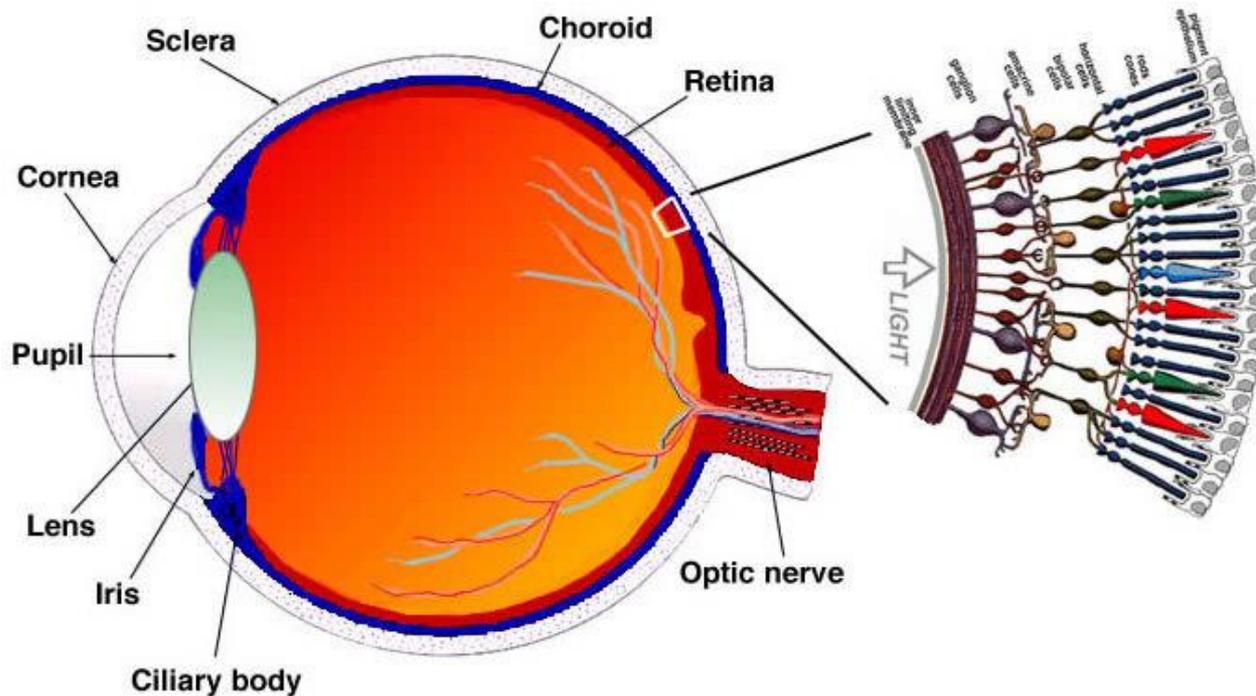
Характерные размеры объектов микромира



1. Визуализация явлений в микромире

Для регистрации частиц и определения их характеристик (энергия, импульс, траектория и др.) служат детекторы.

Глаз – детектор фотонов.



1. Визуализация явлений в микромире

Могут использоваться детекторы, которые максимально чувствительны к *регистрации определенной частицы* и не чувствуют большой фон создаваемый другими частицами.

В экспериментах приходится выделять «нужные» события на гигантском фоне «посторонних» событий. Используются различные *комбинации счётчиков и методов регистрации*, применяют *схемы совпадений или антисовпадений* между событиями, зарегистрированными *различными детекторами*, отбор событий по *амплитуде и форме сигналов* и т. д. Часто используется *селекция частиц по времени пролёта* ими определённого расстояния, *магнитный анализ* и другие методы.

1. Визуализация явлений в микромире

Наиболее общие принципы регистрации частиц

Заряженная частица, двигаясь в нейтральной среде детектора (газ, жидкость, твердое тело), вызывает *ионизацию и возбуждение атомов среды*. Вдоль траектории движения частицы появляются свободные заряды (электроны и ионы) и возбужденные атомы. Если среда находится в электрическом поле, то в ней возникает электрический ток, который фиксируется в виде короткого электрического импульса. Детекторы, использующие этот принцип, можно называть *ионизационными детекторами*.

При возвращении возбужденных атомов в основное (невозбужденное) состояние *излучаются фотоны*, которые могут быть зарегистрированы в виде оптической вспышки в видимой или ультрафиолетовой области. Этот принцип используется в *сцинтилляционных детекторах*.

При определенных условиях траекторию заряженной частицы, можно сделать видимой. Это осуществляется в *трековых детекторах*.

Нейтральные частицы непосредственно не вызывают ионизацию и возбуждение атомов среды. Они могут быть зарегистрированы в результате появления *вторичных заряженных частиц*, возникших либо в реакциях этих нейтральных частиц с ядрами среды, либо в результате их распада. **Гамма-кванты** также регистрируются по *вторичным заряженным частицам* – электронам и позитронам, возникающим в среде вследствие фотоэффекта, Комpton-эффекта и рождения электрон-позитронных пар.

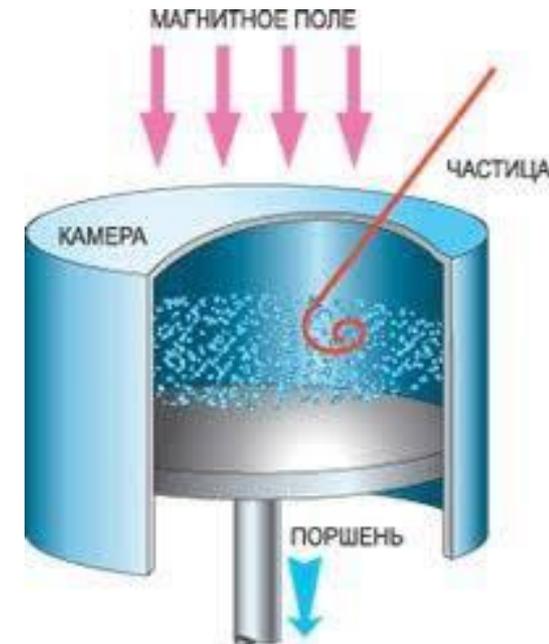
1. Визуализация явлений в микромире

Камера Вильсона

Трековый детектор, в котором трек частицы образует цепочка мелких капелек жидкости вдоль траектории её движения. Изобретена Ч. Вильсоном в 1912 г. (Нобелевская премия 1927 г.).

Используется *явление конденсации перенасыщенного пара*: при появлении в среде перенасыщенного пара каких-либо центров конденсации (в частности ионов, сопровождающих след быстрой заряженной частицы) на них образуются мелкие капли жидкости..

Камера представляет собой ёмкость со стеклянной крышкой и поршнем в нижней части. Заполняется *насыщенными парами* воды, спирта или эфира. Пары тщательно очищены от пыли. Когда поршень опускается, то пары охлаждаются и становятся *перенасыщенными*. Заряженная частица, проходя сквозь камеру, оставляет на своём пути цепочку ионов. Пар конденсируется на них, делая видимым след частицы.



1. Визуализация явлений в микромире

Пузырьковая камера

Изобретена Дональдом Глазером (США) в 1952 году.

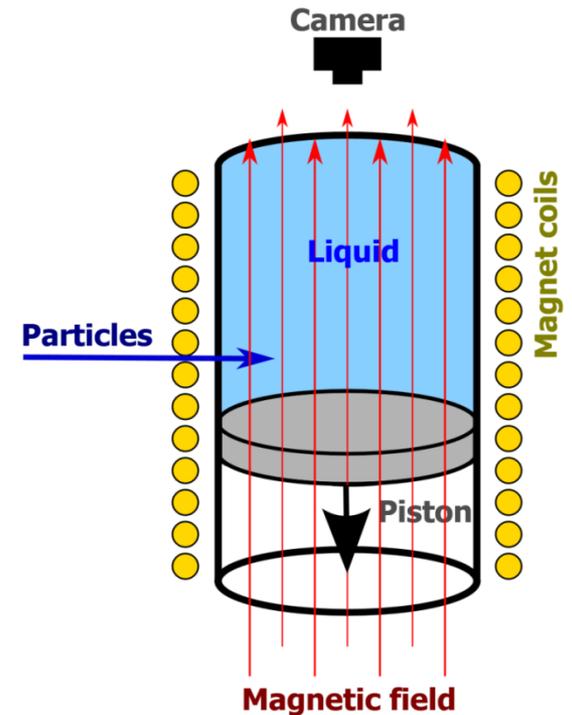
Нобелевская премия по физике в 1960 году.

Камера заполнена жидкостью в состоянии, близком к вскипанию. При резком понижении давления жидкость становится перегретой и существует в таком состоянии 10–40 мс. При движении заряженной частицы вдоль её траектории образуется ряд пузырьков пара.

После фотографирования давление поднимается, камера готова к регистрации следующей частицы.

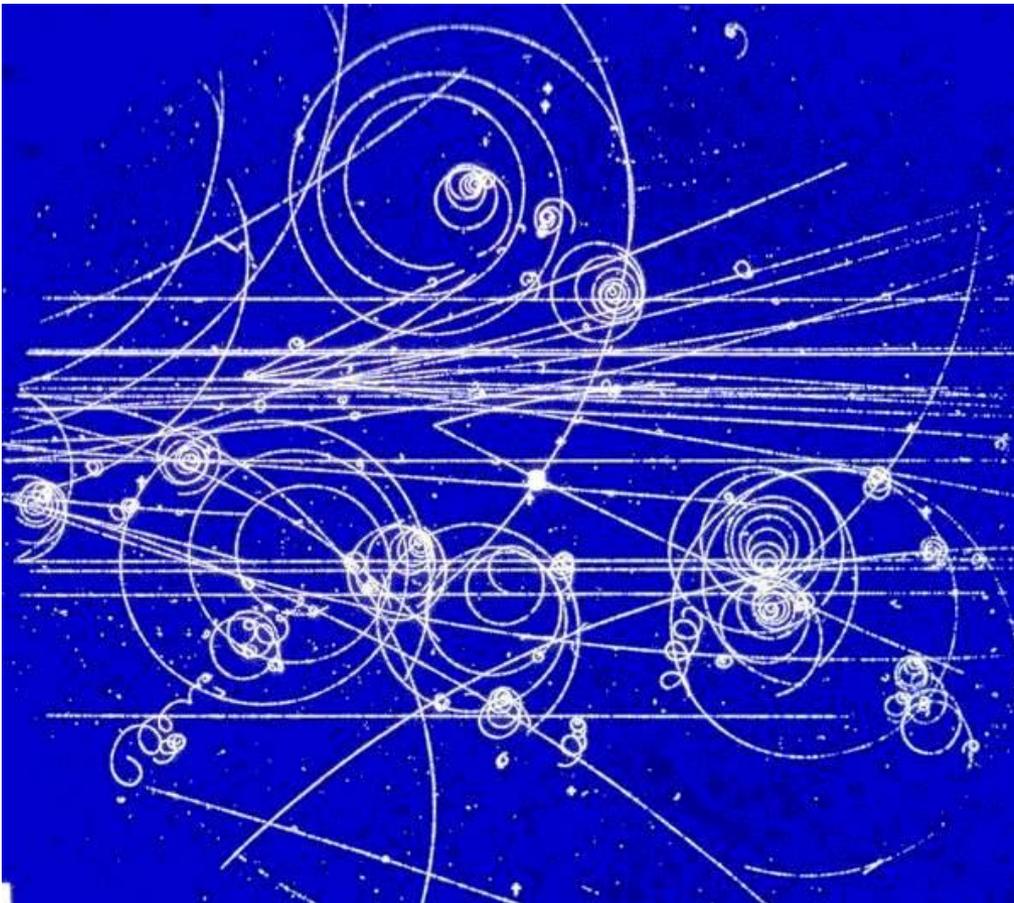
Цикл работы менее 1 секунды.

Если пузырьковую камеру поместить в сильное магнитное поле, то по радиусу кривизны траектории можно определить импульс заряженной частицы.



1. Визуализация явлений в микромире

Пузырьковая камера

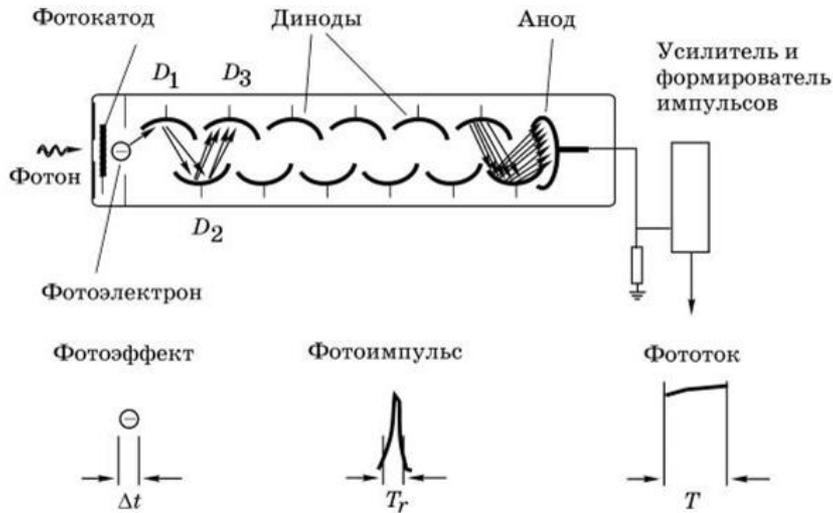


Fermi National Accelerator Laboratory

1. Визуализация явлений в микромире

Фотоэлектронный умножитель

В ФЭУ фотоны попадают на фотокатод из которого за счет *фотоэффекта* выбивают электроны. Электроны затем направляются электрическим полем на систему динодов, где их поток *умножается за счет вторичной электронной эмиссии*. Ток в цепи анода значительно превышает ток от фотокатода. *Коэффициент усиления* в некоторых ФЭУ достигает 10^{11}



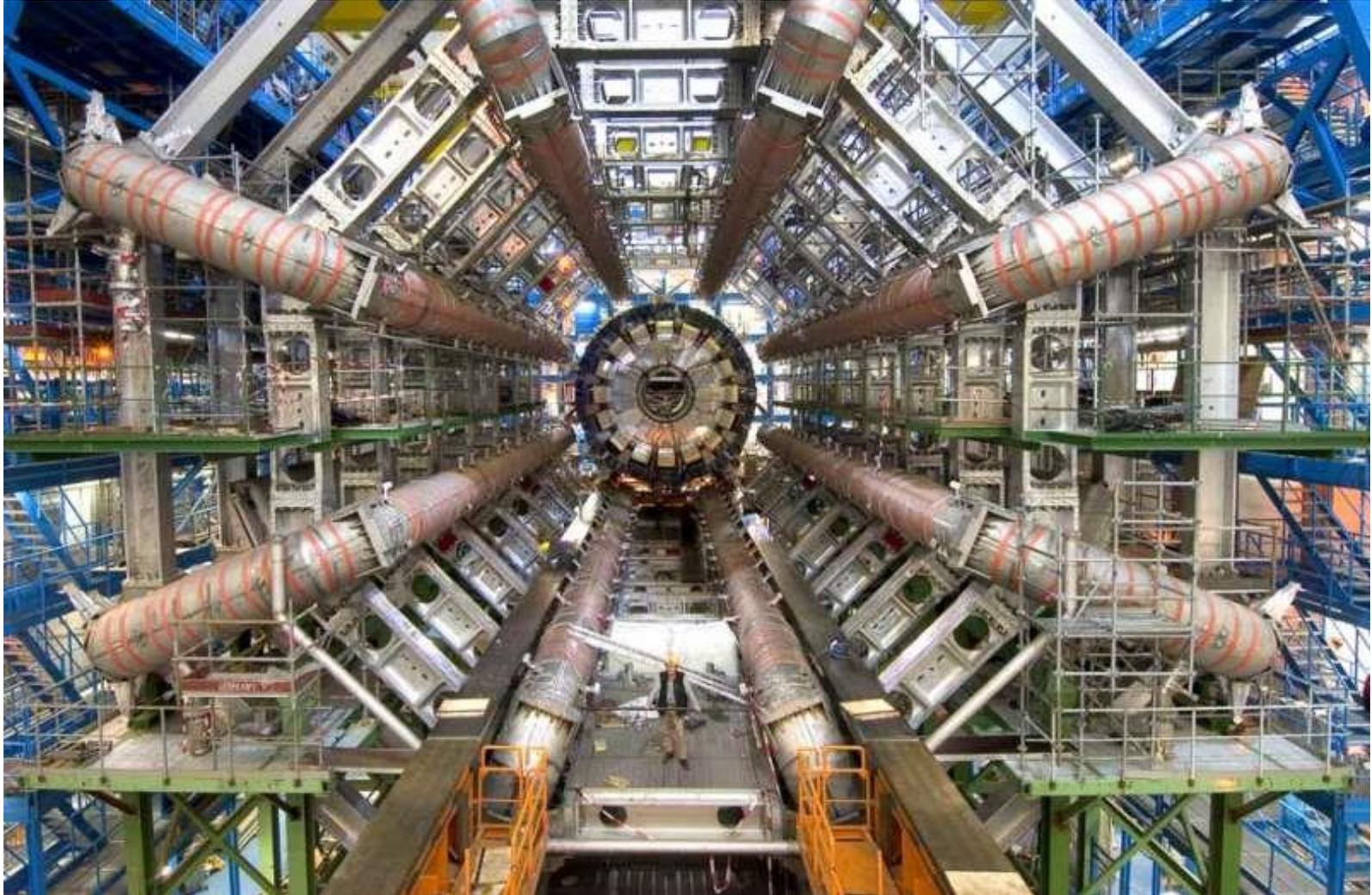
2. Детектор ALICE

ALICE (A Large Ion Collider Experiment) — один из семи *детекторов*, сооруженных на **Большом адронном коллайдере (БАК)** (англ. *Large Hadron Collider (LHC)*).

БАК - ускоритель заряженных частиц на встречных пучках, предназначенный для ускорения тяжёлых ионов и изучения продуктов их соударений. Построен в **ЦЕРНе** (Европейский совет ядерных исследований), находящемся около Женевы, на границе Швейцарии и Франции. Является самой крупной экспериментальной установкой в мире (длина основного кольца около 27 км).

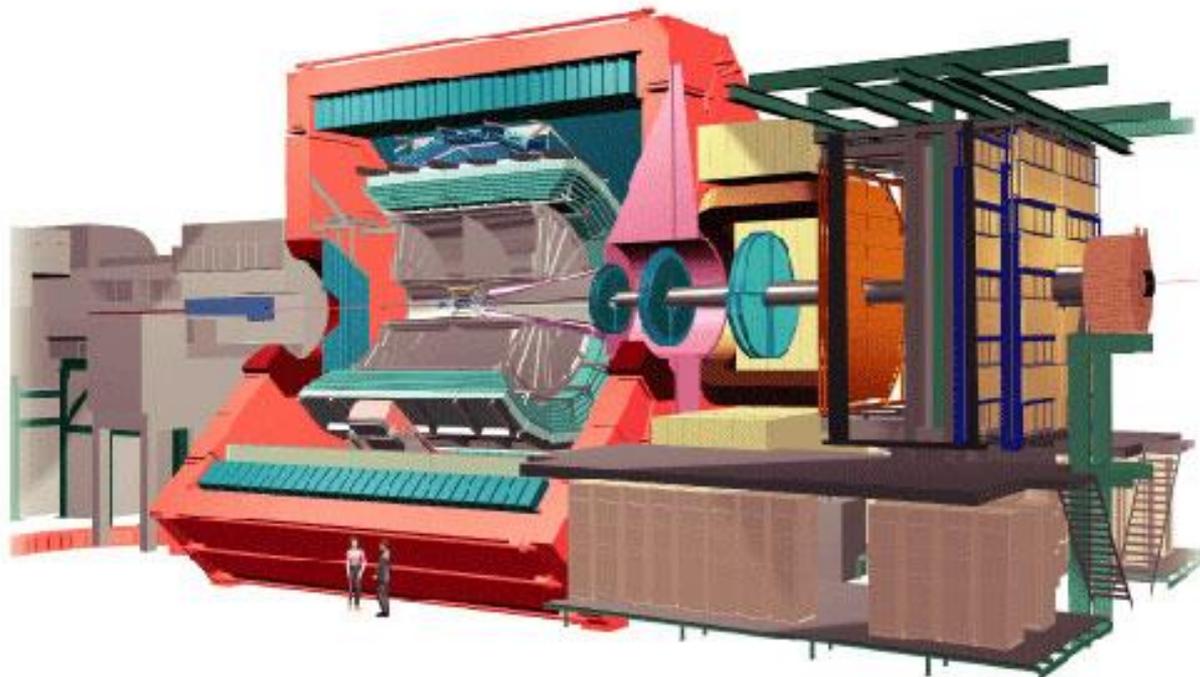
Основной целью экспериментов является **проверка Стандартной модели** – теоретической конструкции физики элементарных частиц.

2. Детектор ALICE



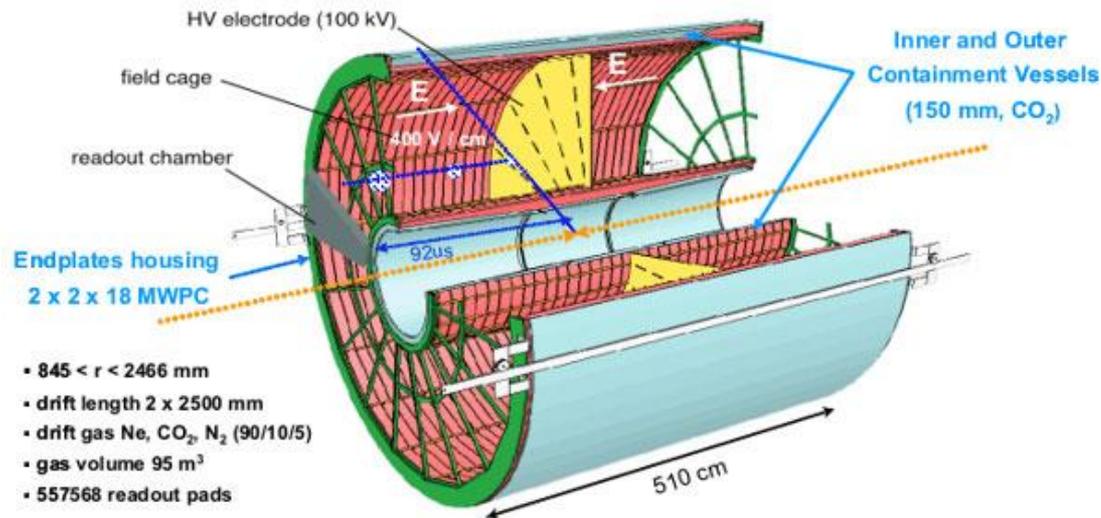
2. Детектор ALICE

**Общий вид детектора ALICE (рис. с сайта public.web.cern.ch).
26 метров в длину и 16 на 16 метров в поперечной плоскости; полная
масса детектора — 10 тысяч тонн.**



2. Детектор ALICE

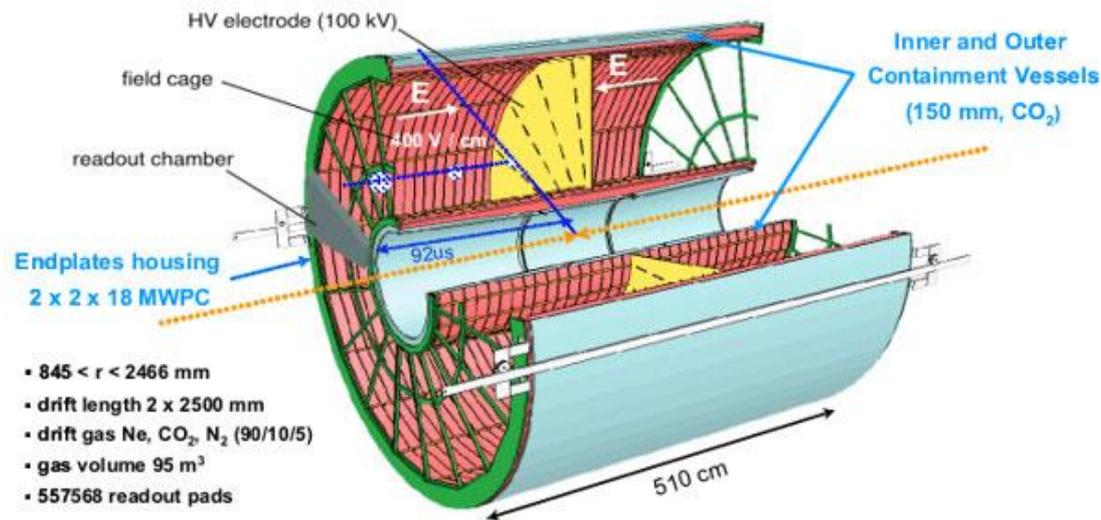
В центре несколькими цилиндрическими слоями расположены трековые детекторы. Непосредственно снаружи вакуумной трубы расположен двухслойный вершинный пиксельный детектор, который позволяет восстановить траекторию с точностью лучше 50 микрон. За ними идут дрейфовая камера и полосковые детекторы, которые вместе с пиксельным детектором образуют «внутреннюю трековую систему» детектора ALICE.



Устройство время-проекционной камеры детектора ALICE (рис. с сайта aliceinfo.cern.ch).

2. Детектор ALICE

Внутреннюю трековую систему охватывает особый трековый детектор — *время-проекционная камера* (88 м³), заполненная газовой смесью (неон и углекислый газ). В камере создано однородное электрическое поле параллельно оси ($E=400$ В/см, $U=100$ кВ !). Ровно посередине камеры находится катод. Когда заряженные частицы пролетают через объем, они ионизируют газ на своем пути. Свободные электроны дрейфуют к торцам цилиндра и при достижении регистрируются считывающими камерами, которые определяют поперечные координаты сигнала и время его прихода (а значит, и продольную координату).



3. Нейтринный детектор «Супер-Камиоканде»

Детектор находится **на глубине более 1 км** под горой Икено, в цинковой шахте Камиока, в 290 км к северу от Токио.

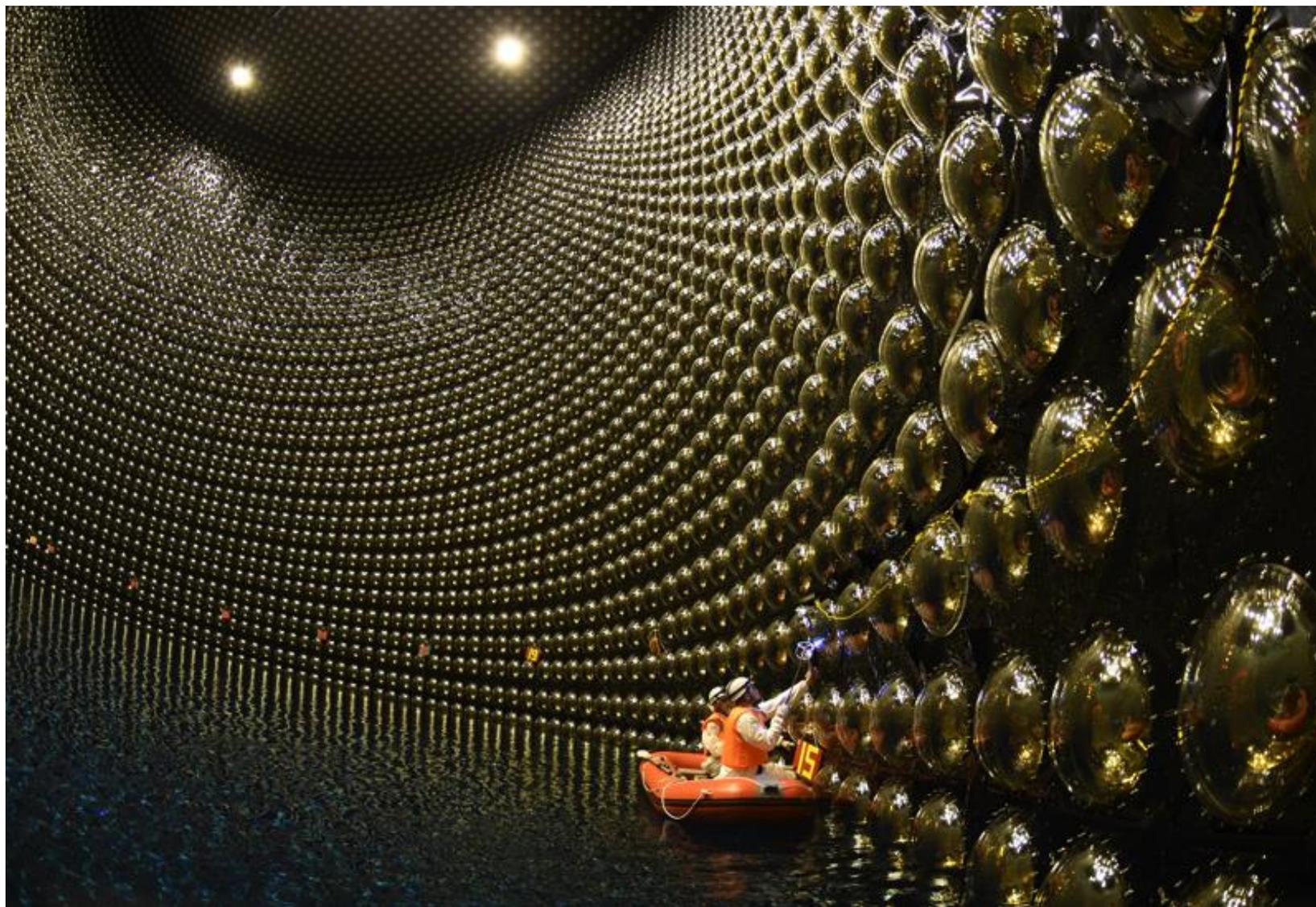
Огромный резервуар из нержавеющей стали в форме цилиндра (высотой 41,4 м и диаметром основания 39,3 м) заполнен 50 тысячами тонн *специально очищенной воды*. Вода проходит постоянный процесс специальной многоуровневой очистки.

На стенах, потолке и дне резервуара установлено более **11 000 фотоумножителей**.

В 2026 году планируется детектор «*Гипер-Камиоканде*» в 20 раз больший «Супер-Камиоканде». Будет использоваться около **99 000 фотоумножителей**.

Основным процессом является *рассеяние нейтрино на электронах воды*. В результате столкновения нейтрино с каким-либо атомом, входящим в состав воды, ядро атома отскакивало, а из атомной оболочки вылетал электрон, создавая в воде черенковское излучение. Можно достаточно точно определить, откуда прибыло нейтрино, так как вылетевший электрон сохраняет направление движения нейтрино.

3. Нейтринный детектор «Супер-Камиоканде»



4. Стандартная модель

Стандартная модель — это современная теория строения и взаимодействий элементарных частиц. Базируется на очень небольшом количестве постулатов и позволяет теоретически предсказывать свойства тысяч процессов в мире элементарных частиц. В подавляющем большинстве случаев эти предсказания подтверждаются экспериментом, иногда с исключительно высокой точностью.

Физики уверены, что она должна быть частью некоторой более глубокой теории строения микромира. Что это за теория — достоверно пока неизвестно. Теоретики разработали большое число кандидатов на такую теорию, но только эксперимент должен показать, что из них отвечает реальной ситуации, сложившейся в нашей Вселенной. Поэтому физики ищут любые отклонения от Стандартной модели, любые частицы, силы или эффекты, которые Стандартной моделью не предсказываются. Все эти явления ученые обобщенно называют «Новая физика»; именно **поиск Новой физики и составляет главную задачу Большого адронного коллайдера.**

4. Стандартная модель

Рабочим инструментом Стандартной модели является **квантовая теория поля** — теория, приходящая на смену квантовой механике **при скоростях, близких к скорости света**.

Ключевые объекты в ней не частицы, как в классической механике, и не «частицы-волны», как в квантовой механике, а **квантовые поля**: электронное, мюонное, электромагнитное, кварковое и т. д. — по одному для каждого сорта «сущностей микромира».

И вакуум, и то, что мы воспринимаем как отдельные частицы, и более сложные образования, которые нельзя свести к отдельным частицам, — всё это описывается как **разные состояния полей**. **Когда физики употребляют слово «частица», они на самом деле имеют в виду именно эти состояния полей, а не отдельные точечные объекты.**

4. Стандартная модель

Положения Стандартной модели

- 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 кварков** (u, d, s, c, b, t), **6 лептонов** (электрон, мюон, тау-лептон, электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино), 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.
- *Частицами-переносчиками взаимодействий* являются *бозоны*: 8 *глюонов* для сильного взаимодействия, 3 тяжёлых *калибровочных бозона* для слабого взаимодействия; один *фотон* для электромагнитного взаимодействия.
- В отличие от электромагнитного и сильного, слабое взаимодействие может смешивать фермионы из разных поколений, что приводит к нестабильности всех частиц, за исключением легчайших.
- 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) три константы взаимодействия характеризующие относительные интенсивности электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий.

4. Стандартная модель

масса→	$\approx 2.3 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ ГэВ}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ ГэВ}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ ГэВ}/c^2$
заряд→	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
спин→	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u верхний	c очарованный	t истинный	g глюон	H бозон Хиггса
КВАРКИ	$\approx 4.8 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 95 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ ГэВ}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d нижний	s странный	b прелестный	γ фотон	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ МэВ}/c^2$	$1.777 \text{ ГэВ}/c^2$	$91.2 \text{ ГэВ}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e электрон	μ мюон	τ тау	Z Z бозон	
ЛЕПТОНЫ	$< 2.2 \text{ эВ}/c^2$	$< 0.17 \text{ МэВ}/c^2$	$< 15.5 \text{ МэВ}/c^2$	$80.4 \text{ ГэВ}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	W W бозон	
				КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ	

4. Стандартная модель

Фермионы

Создают видимую материю вокруг нас. Делятся на **кварки**, сильно взаимодействующие между собой и запертые внутри более сложных частиц вроде адронов, и **лептоны**, которые свободно существуют в пространстве независимо друг от друга.

Кварки делятся на две группы.

- Верхнего типа с зарядом $+2/3$. Относят: верхний, очарованный и истинный кварки.
- Нижнего типа с зарядом $-1/3$. Относят: нижний, странный и прелестный кварки

Лептоны также делятся на две группы.

- Первая группа, с зарядом «-1», к ней относят: электрон, мюон и тау-частицу .
- Вторая группа, с нейтральным зарядом, содержит: электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино

4. Стандартная модель

Бозоны

Обмениваясь бозонами, фермионы взаимодействуют.

Взаимодействия:

- **Электромагнитное**, частицы — **фотоны**.
- **Сильное**, частицы — **глюоны**. С их помощью кварки из ядра атома не распадаются на отдельные частицы.
- **Слабое**, частицы — **$\pm W$ и Z бозоны**. С их помощью фермионы обмениваются массой, энергией, и могут превращаться друг в друга.
- **Гравитационное**, частицы — **гравитоны**. Чрезвычайно слабая в масштабах микромира сила. Становится ощутимой только на сверхмассивных телах.

Существование гравитонов экспериментально ещё не подтверждено. Они существуют лишь в виде теоретической версии. В стандартной модели в большинстве случаев их не рассматривают.

4. Стандартная модель

Нейтроны и протоны относятся к группе так называемых **адронов** (частиц, подверженных сильному взаимодействию), а если быть ещё точнее, **барионов**.

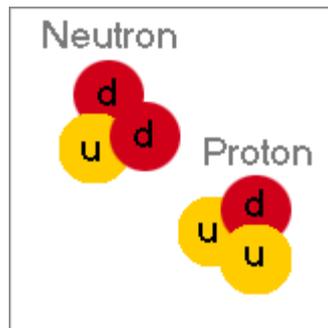
Адроны можно разделить на группы:

Барионы, которые состоят из трёх кварков.

Мезоны, которые состоят из пары: кварк-антикварк.

Нейтрон, как ясно из его названия, является нейтрально заряженным, и может быть поделён на два нижних кварка и один верхний кварк.

Протон, положительно заряженная частица, делится на один нижний кварк и два верхних кварка.



Спасибо за внимание!