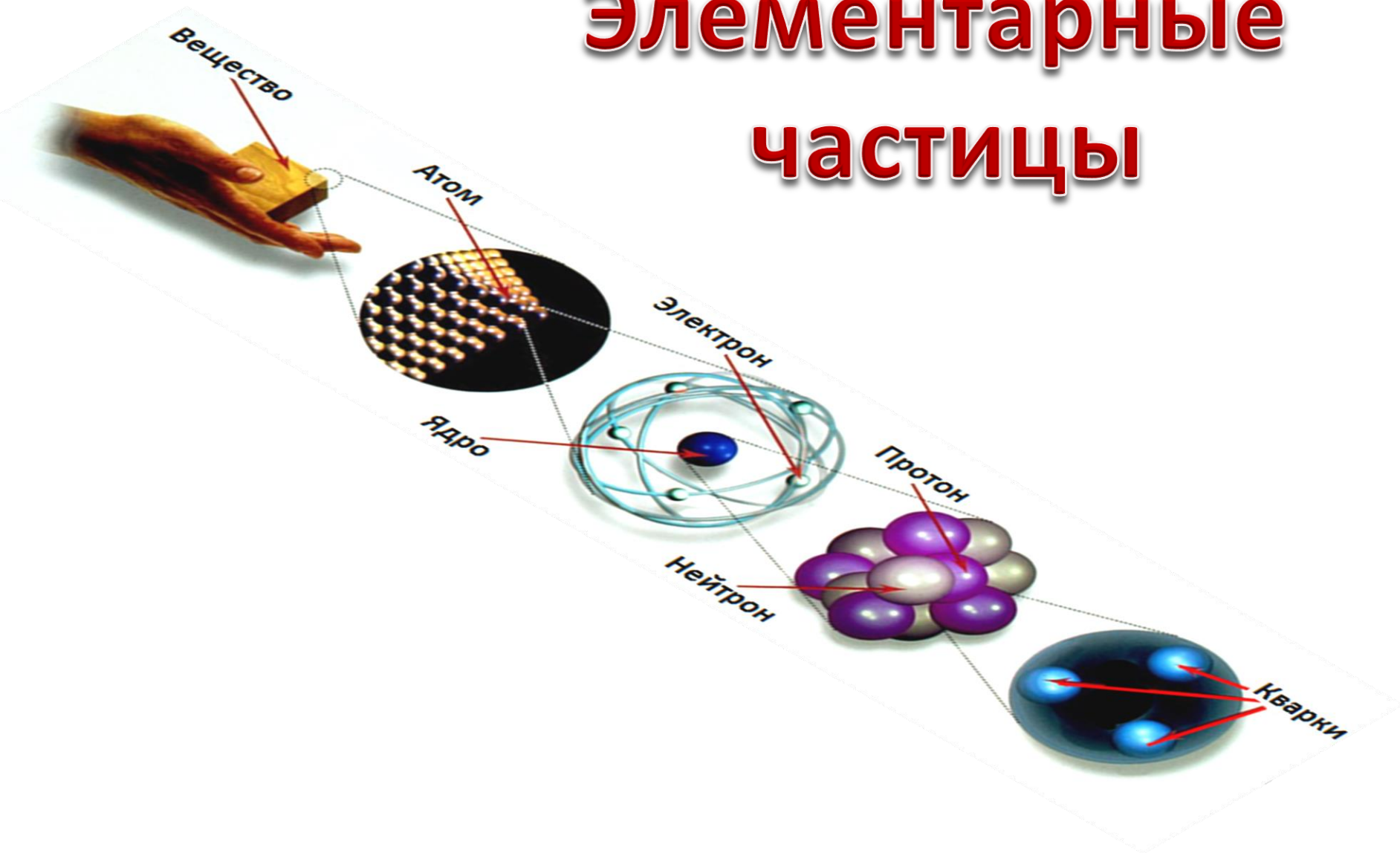


Элементарные частицы



Темы лекции

1. Ускорители последнего поколения.
Большой Адронный Коллайдер (LHC).
2. Современные детекторы частиц.
3. Открытие бозона Хиггса.
4. Нейтринные детекторы.
5. Предварительные сведения о частицах.
6. Классификация частиц.
7. Фундаментальные частицы. Кванты полей.
8. Законы сохранения в мире частиц.

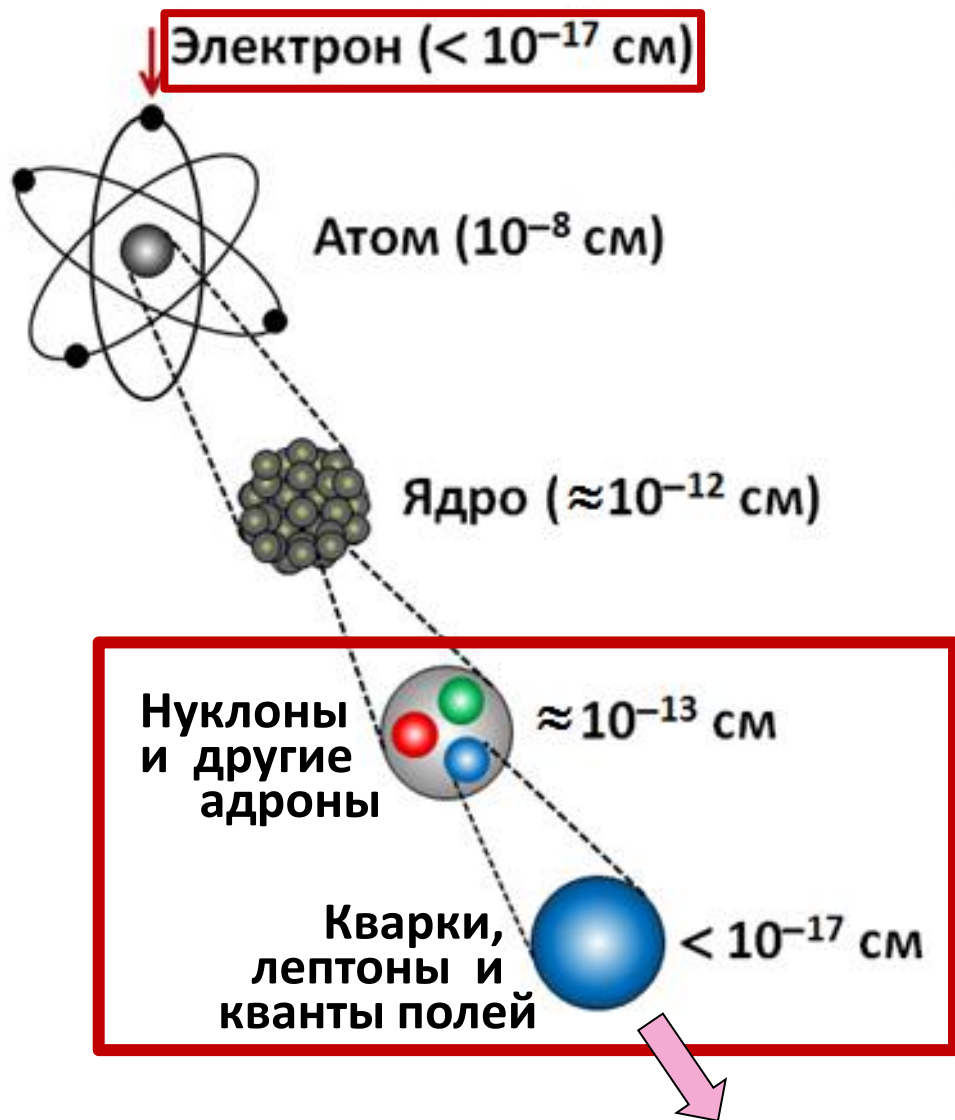
Приложение 1

Зарядовая симметрия сильного взаимодействия
и квантовое число «изоспин»

Приложение 2

Сохранение электрического заряда

Физика элементарных частиц



Суперструны (10^{-33} см) ??

Разрешающая способность ускорителя:

$$\lambda = \frac{h}{p} \approx \frac{2\pi\hbar c}{E} \approx \frac{1,24 \text{ ГэВ} \cdot \text{Фм}}{E(\text{ГэВ})}$$

Крупнейшие ускорители – коллайдеры:

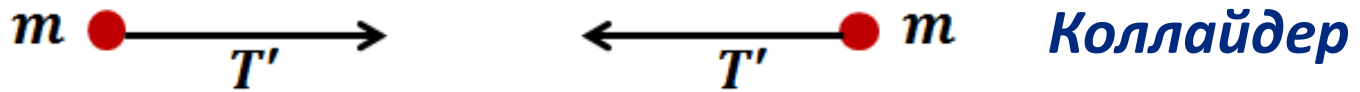
Название	LEP	LHC	HERA	TEVATRON	SLC
Институт	CERN	CERN	DESY	Fermilab	SLAC
Страна	Швейцария		Германия	США	США
Годы работы	1989 – 2000	2008 –	1992 – 2007	1987– 2011	1989– 1998
Ускоряемые частицы	e^-e^+	pp	e^-p	$p\bar{p}$	e^-e^+
Энергии, ГэВ	101+101	6800+6800	30+920	980+980	50+50
Длина кольца, км	26,7	26,7	6,3	6,3	3,2

Кольцевые ускорители

↑
Линейный ускоритель

Почему коллайдеры?

СЦИ



ЛСК



Ускоритель с неподвижной мишенью эквивалентен коллайдеру при условии:

$$T \approx \frac{2T'^2}{mc^2}$$

Протонный ускоритель с неподвижной мишенью эквивалентный **ЛНС** ($T' \approx 7$ ТэВ) должен ускорять протоны до энергии

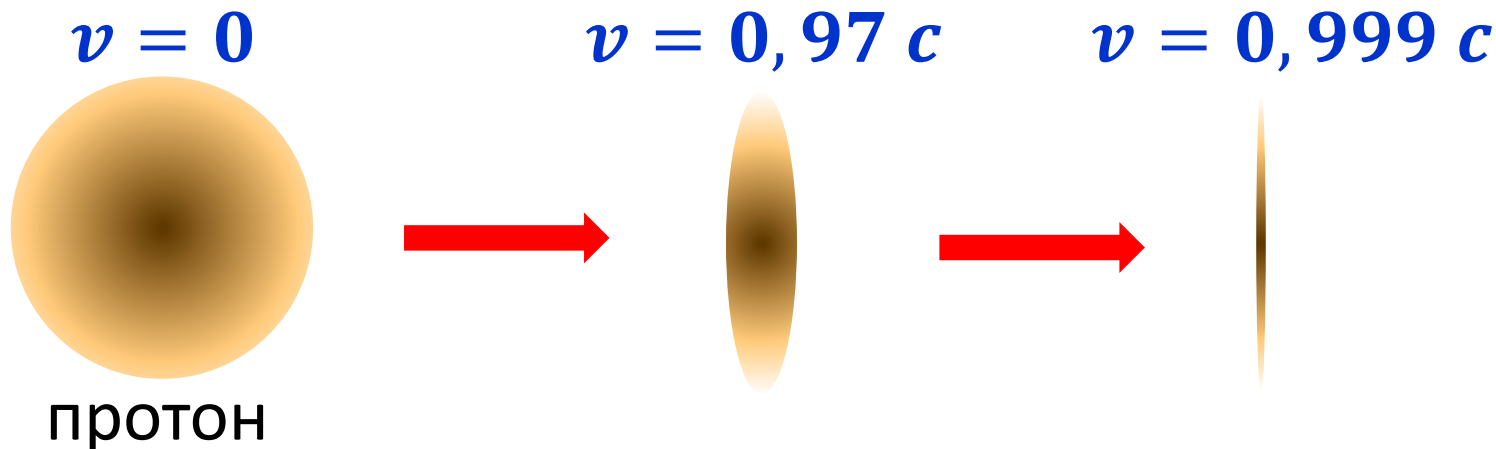
$$T \approx \frac{2T'^2}{mc^2} = \frac{2 \cdot (7 \text{ ТэВ})^2}{10^{-3} \text{ ТэВ}} \approx \mathbf{10^5 \text{ ТэВ!}}$$

Покоящийся протон сферически симметричен
и его радиус $\approx 0,8 \text{ Фм} = 0,8 \cdot 10^{-13} \text{ см}$.

Учитывая величину Лоренц-фактора протона
с $T_p \approx 7000 \text{ ГэВ}$:

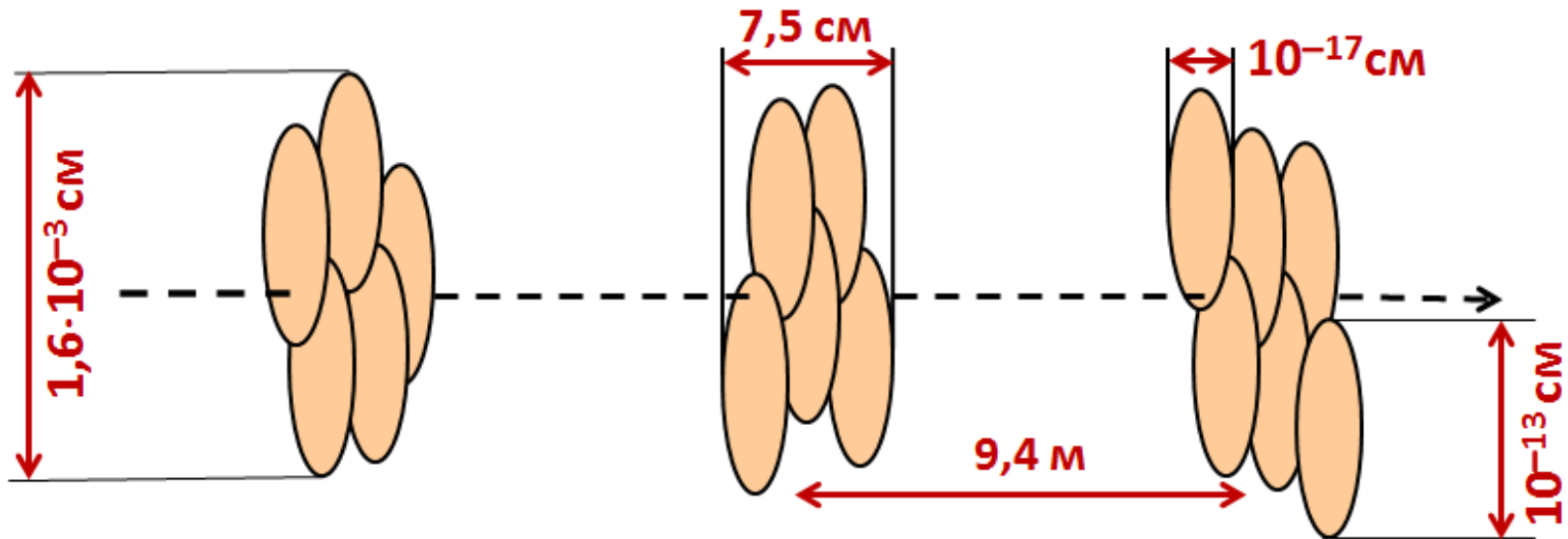
$$\gamma_p = 1 + \frac{T_p}{m_p c^2} = 1 + \frac{7000 \text{ ГэВ}}{0,93827 \text{ ГэВ}} = 7463 \approx 7500,$$

получаем, что радиус протона в LHC в продольном
направлении сократится до $\approx 10^{-4} \text{ Фм} = 10^{-17} \text{ см}$.



Протон в LHC достигает скорости отличной от скорости света всего на 10^{-8} её части, (на ≈ 3 м/сек)

Структура протонного пучка в LHC:



Сгустки (bunches) ускоренных протонов.

Число протонов в банче 10^{11} частиц.

Длина банча 7,5 см.

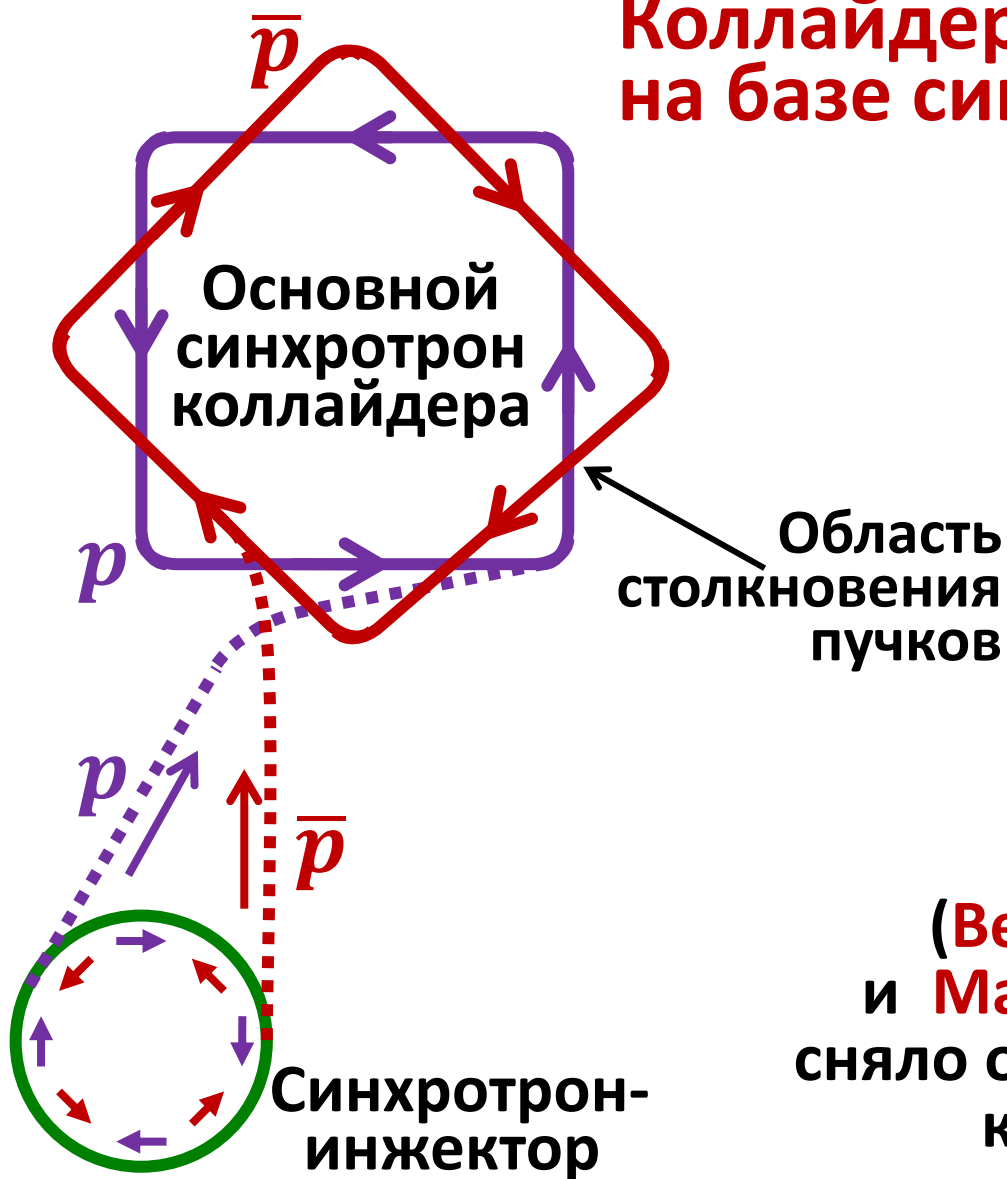
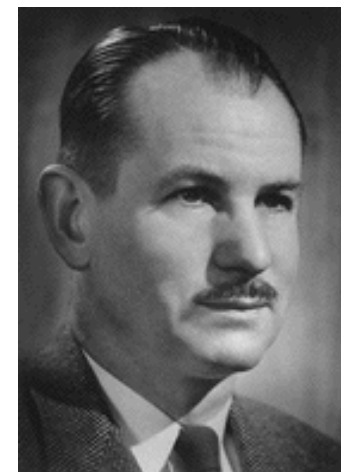
Поперечный диаметр банча $1,6 \cdot 10^{-3}$ см.

Расстояние между банчами 9,4 м.

Коллайдер на базе синхротрона

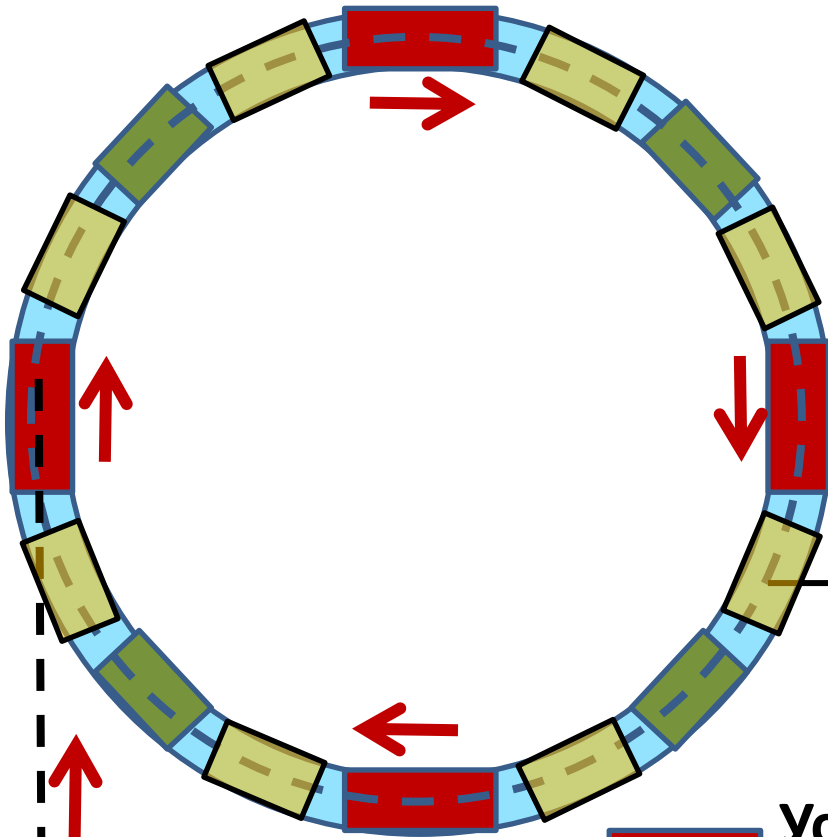
Векслер

Макмиллан






Открытие принципа фазовой стабильности (Векслер В.И., СССР, 1944 г. и Макмиллан, США, 1945 г.) сняло ограничение на энергии кольцевых ускорителей

Устройство синхротрона



Траектория частицы

ИНЖЕКТОР

-  Ускоряющее электрическое поле (радиочастотные резонаторы)
-  Отклоняющие сверхпроводящие электромагниты (диполи) с нарастающим во времени полем
-  Фокусирующие магниты (квадруполь)

Large Hadron Collider

**Он ускоряет и сталкивает протоны
и расположен под землей на границе
Франции и Швейцарии**

**Видео на Лекции
о том как работает LHC**

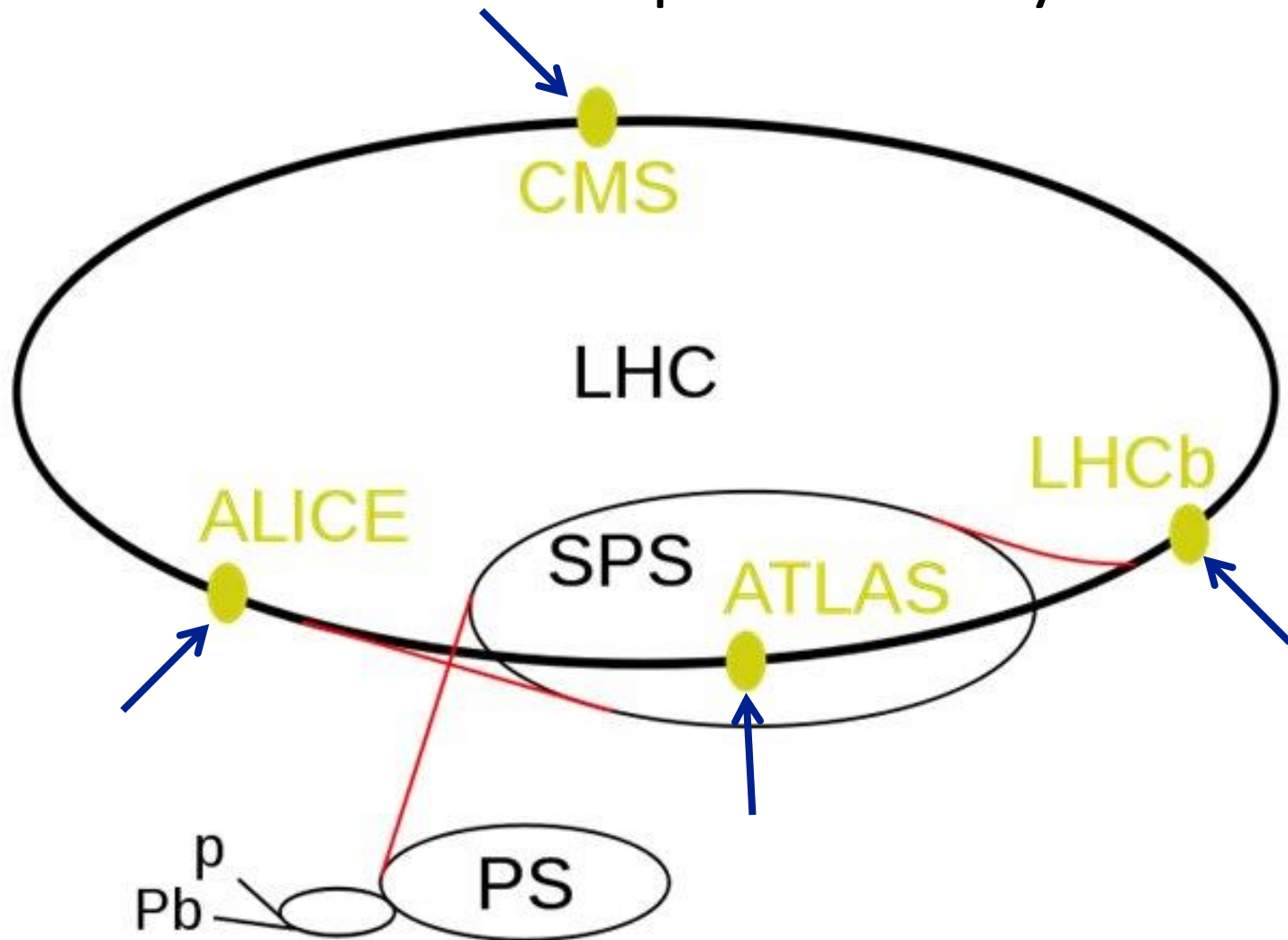


Карта ЛНС

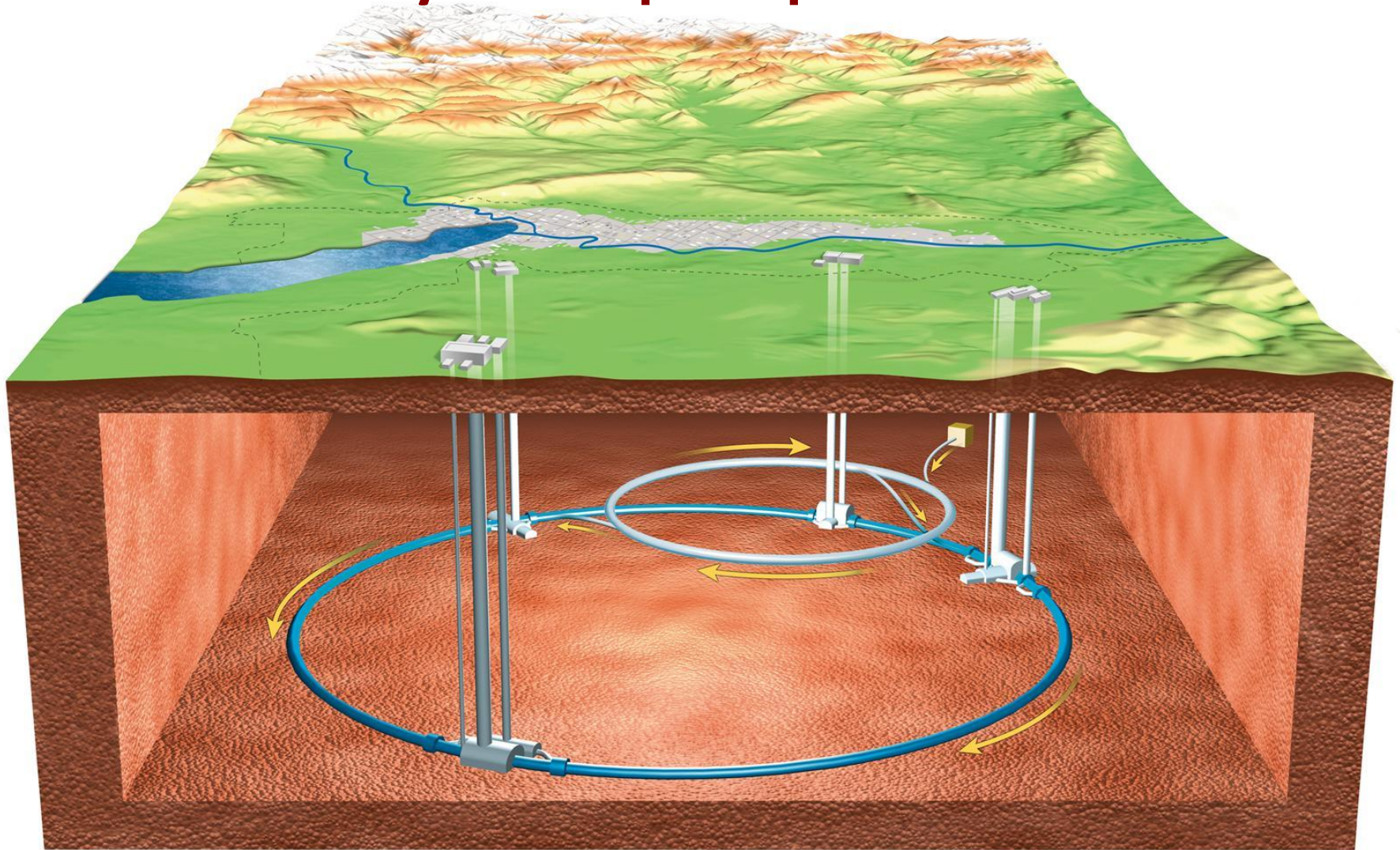
Длина основного кольца 26,7 км

Синхротрон
инжектор

Четыре установки, расположенные в местах
столкновения протонных пучков



**ЛНС располагается под землёй
на глубине примерно 175 м**

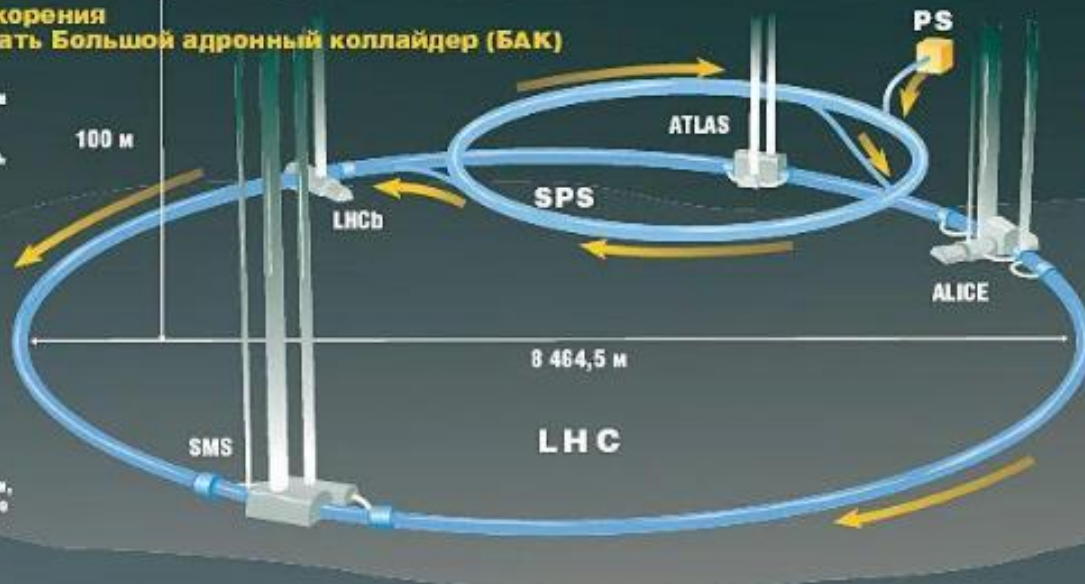


CERN В РАЗРЕЗЕ



Перестройка ускорения Как будет работать Большой адронный коллайдер (БАК)

Детектор LHCb предназначен для исследования частиц, называемых «кварки В». Цель эксперимента — выяснить различия между материей и антиматерией.



Детектор ATLAS — один из двух многопрофильных детекторов (второй — LHCb). Здесь будут осуществляться исследования в ряде областей физики, в частности поиск бозона Хиггса и исследование частиц, из которых состоит темная материя.

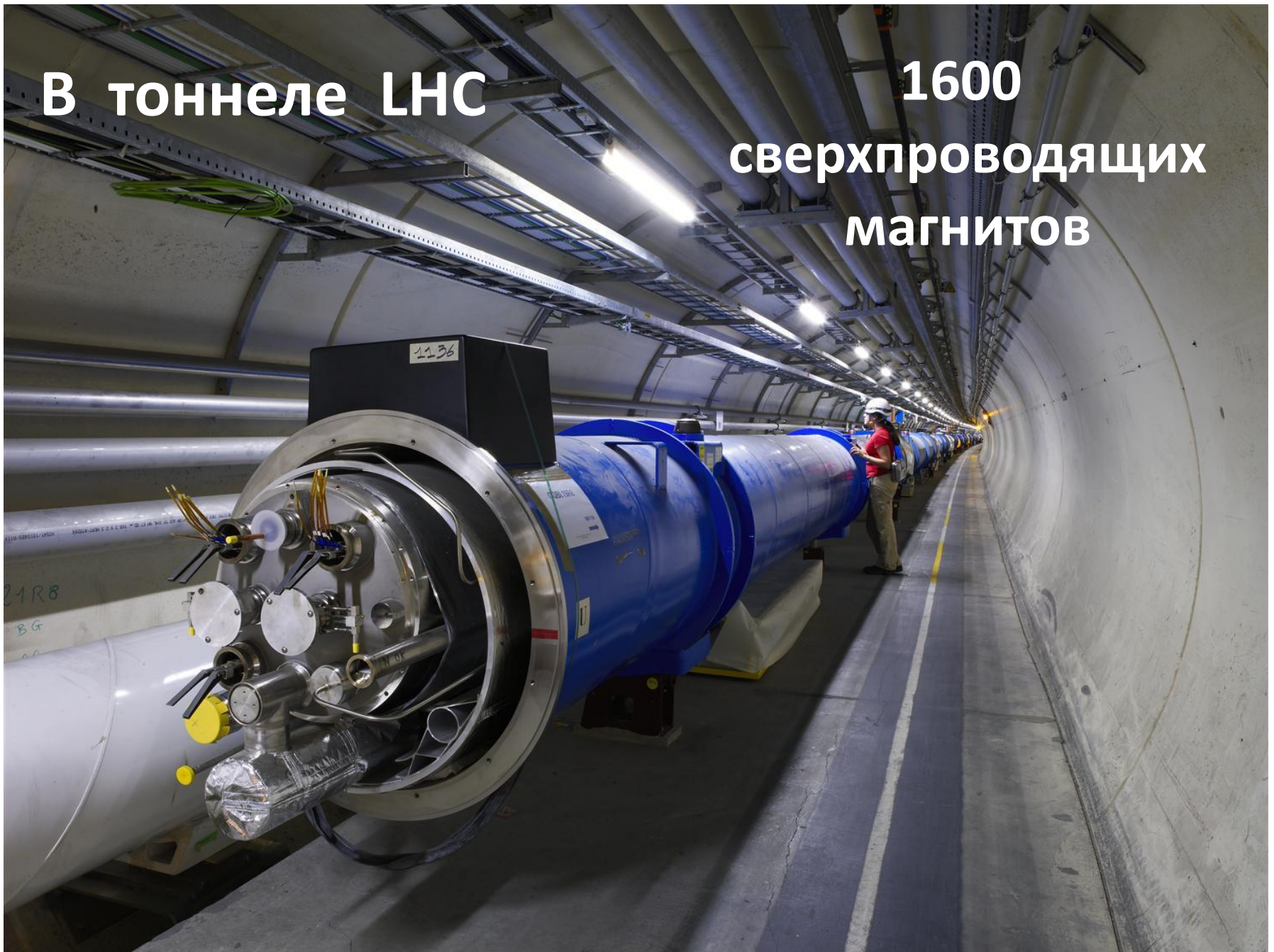
Детектор ALICE. Для этих экспериментов БАК воссоздаст условия, которые существовали сразу после Большого взрыва; полученные данные позволят изучить эволюцию материи от зарождения Вселенной.

Детектор CMS — те же задачи, что и у ATLAS. Различия в ряде технических характеристик.

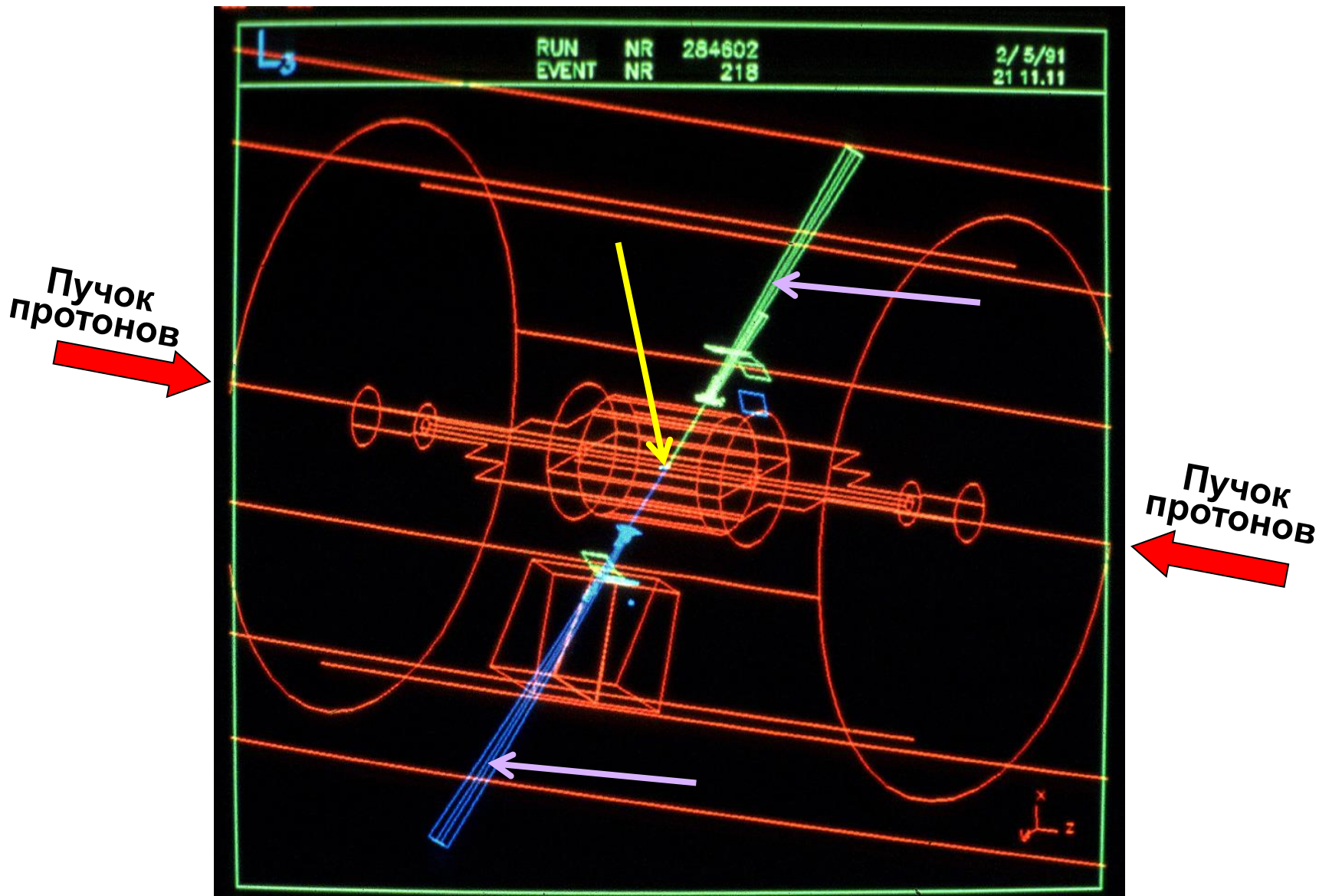
Перед тем как попасть в БАК, протоны будут разогнаны сначала инжекционным синхротроном (PS), затем суперсинхротроном (SPS). Попадая в БАК, протоны будут циркулировать в нем порядка 20 минут, чтобы выйти на максимальный скоростной и энергетический уровень. То, что произойдет с ними дальше, будет замеряться на четырех супердетекторах (по сути, суперлабораториях)

В тоннеле LHC

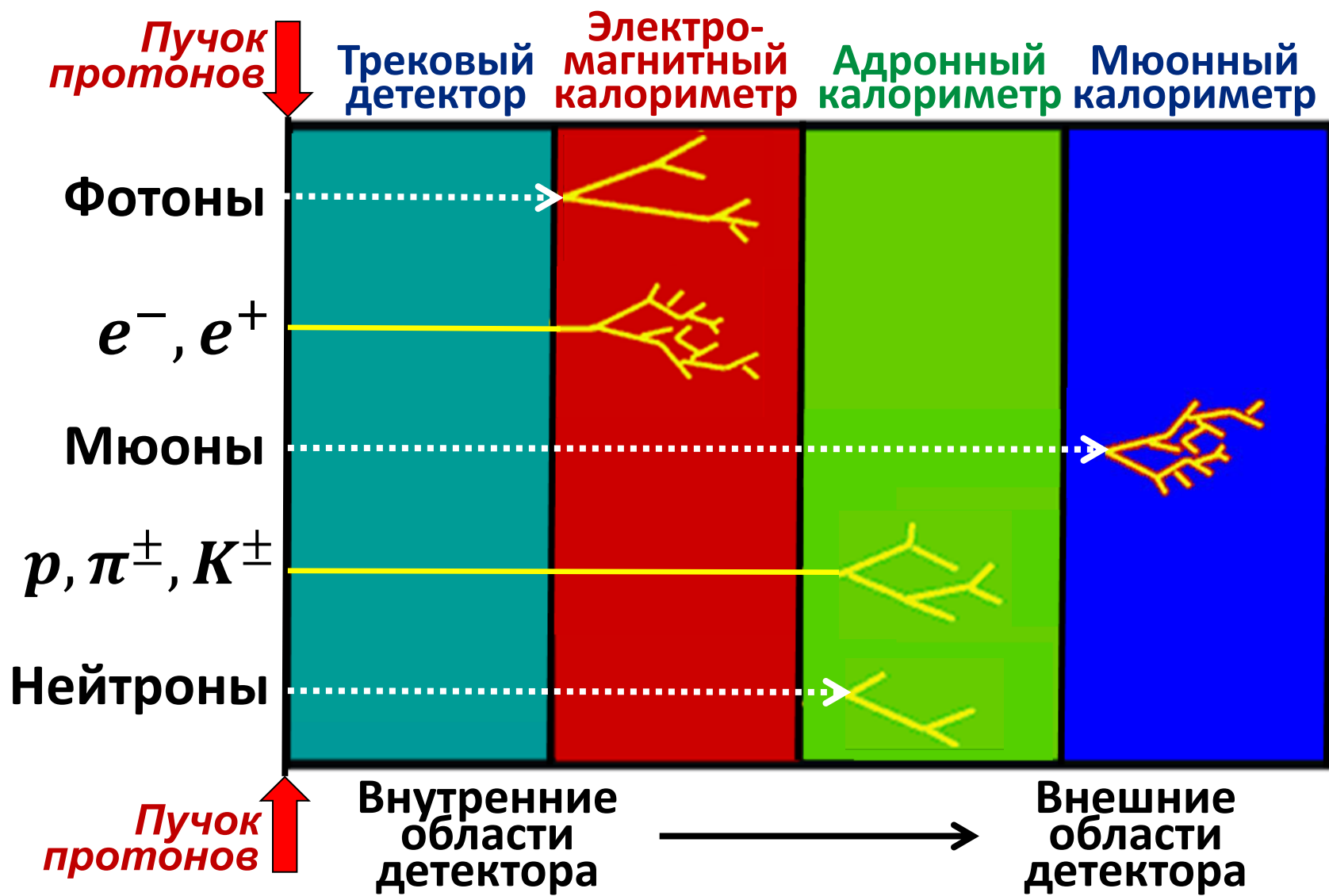
**1600
сверхпроводящих
магнитов**



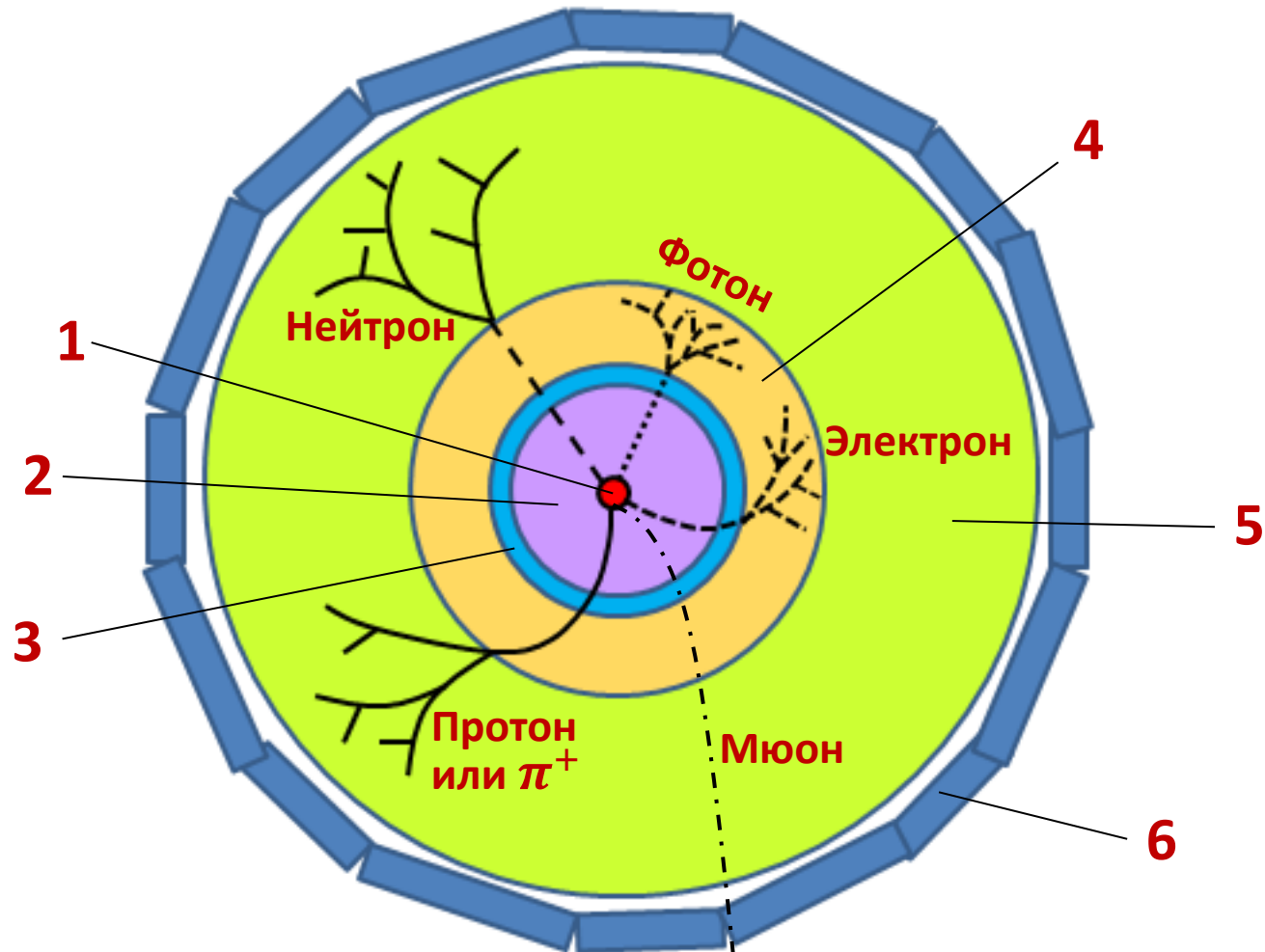
Точка столкновения протонов (↓).
Продукты реакции
в цилиндрическом многослойном детекторе (←)



Принцип многослойной регистрации частиц в современных детекторах



Поперечное сечение детектора ATLAS (вид вдоль оси сталкивающихся пучков протонов)



1. Вакуумная труба для протонов и точка столкновения.
2. Трековый детектор заряженных частиц.
3. Соленоидальный магнит.
4. Электромагнитный калориметр.
5. Адронный калориметр.
6. Мюонный детектор.

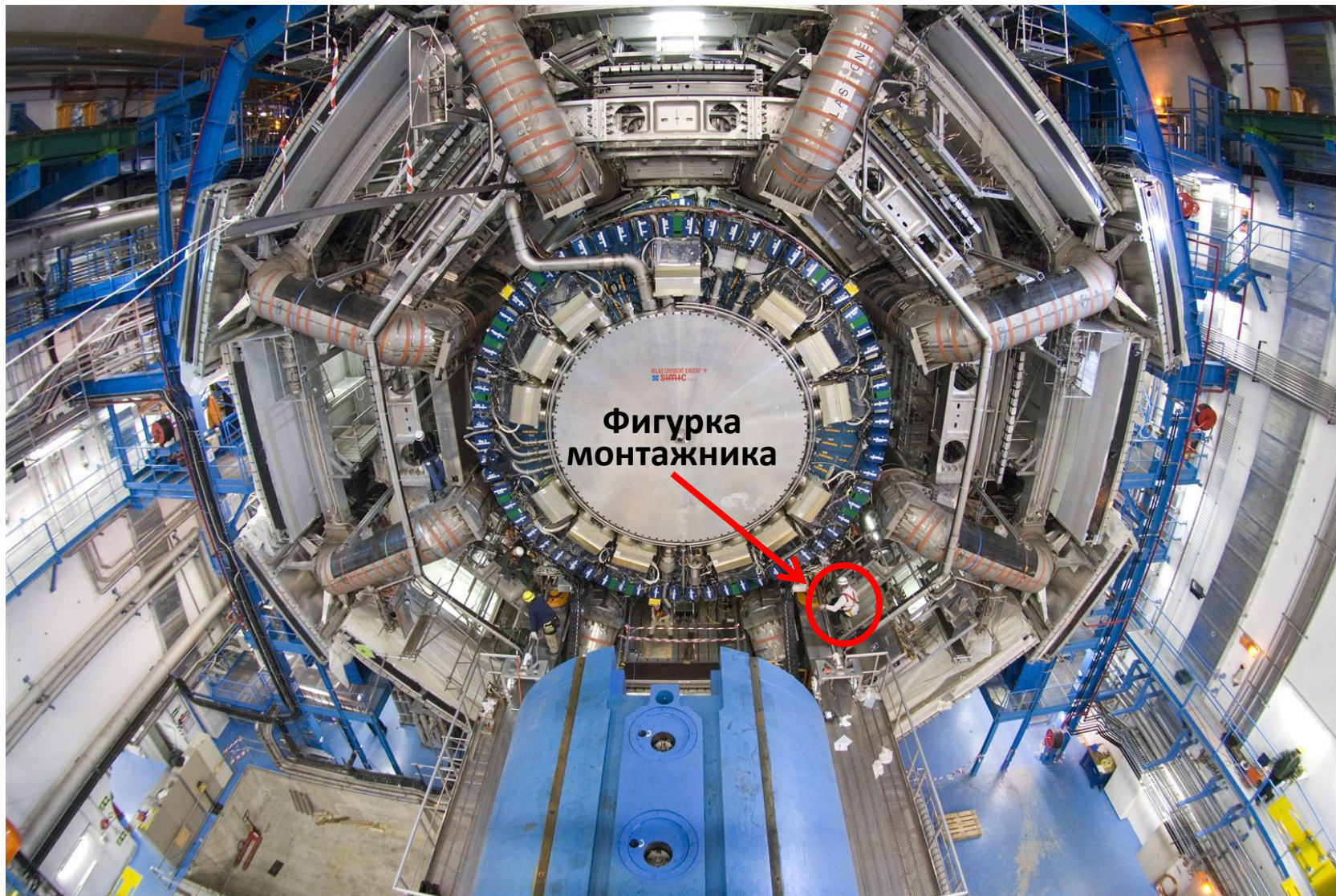
Детектор ATLAS

3500 Физиков из 38 стран,
174 организаций,
около 200 физиков из России

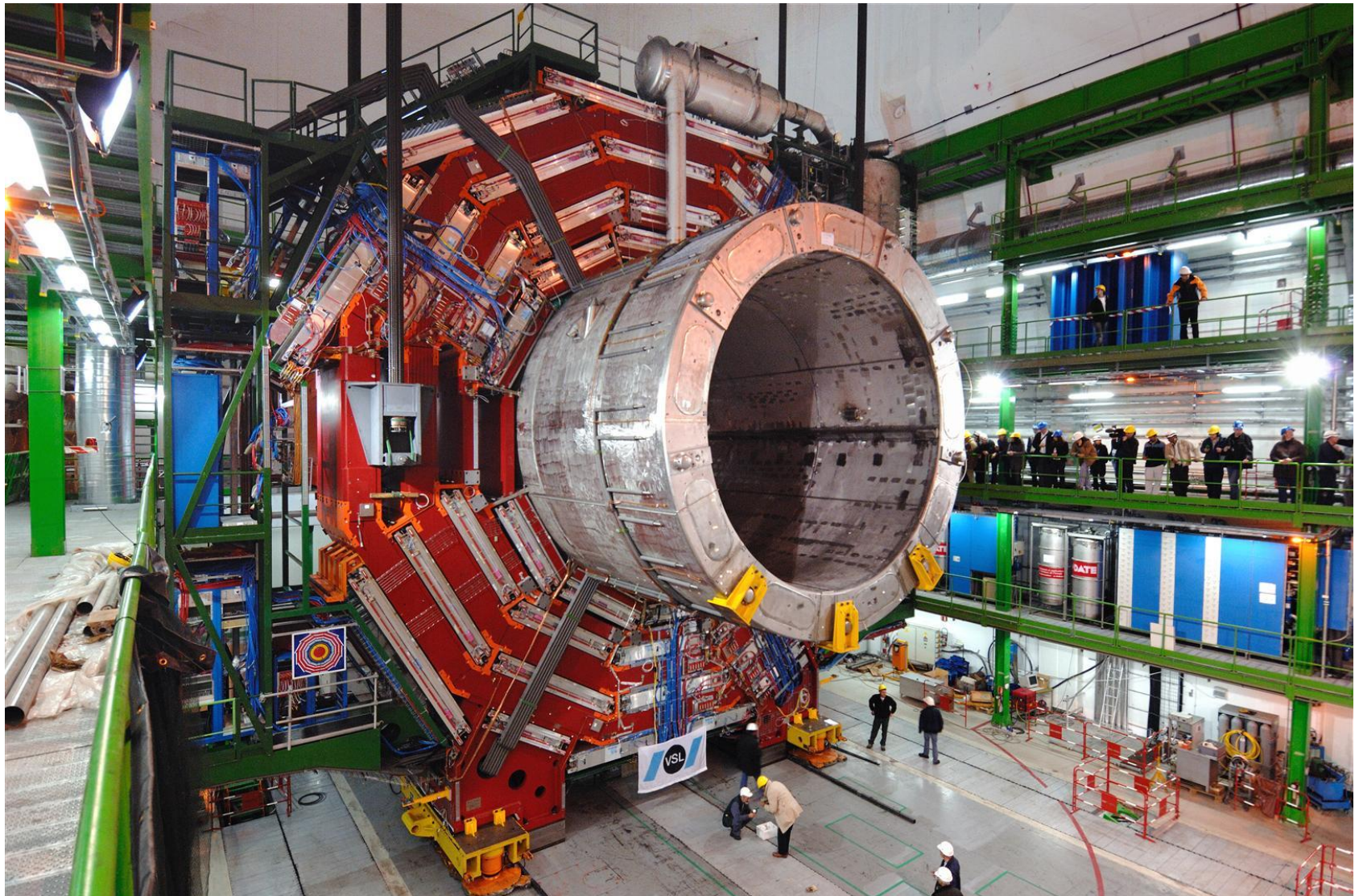


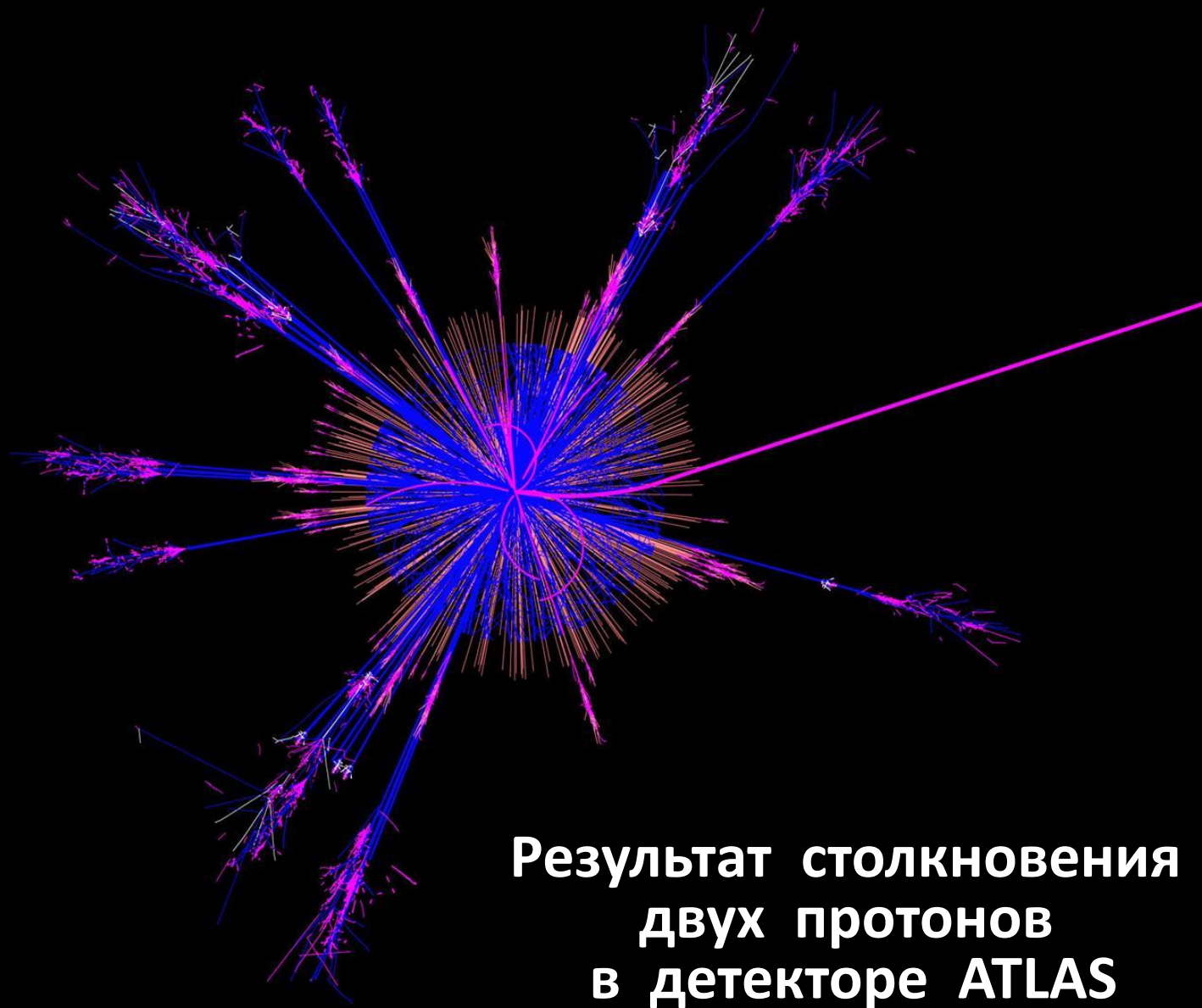
Фигурка человека

Поперечный разрез детектора ATLAS



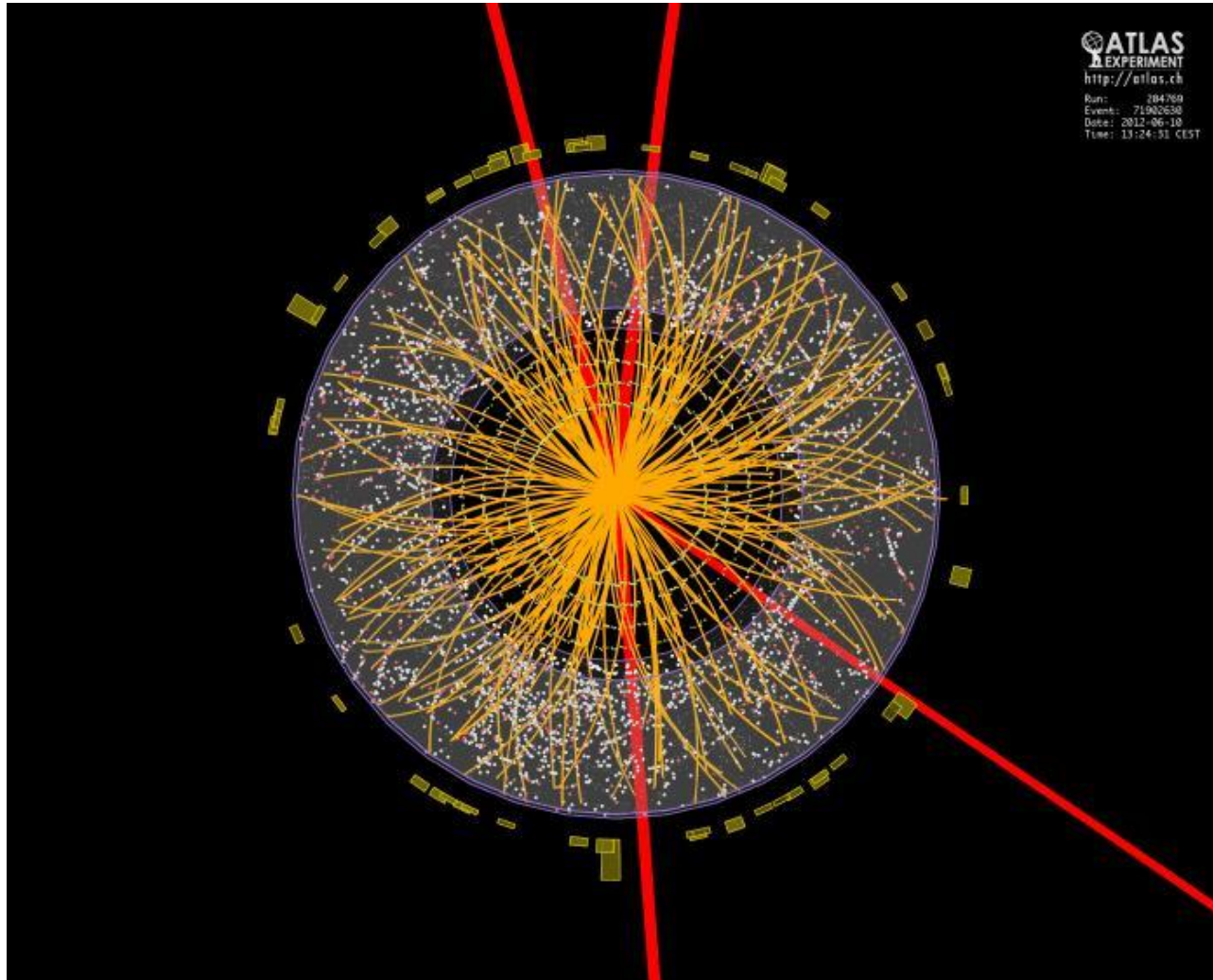
Центральная часть детектора CMS





**Результат столкновения
двух протонов
в детекторе ATLAS**

Результат одного из столкновений протонов в детекторе ATLAS



4 июля 2012 года состоялось событие, имеющее выдающееся значение для современной физики: на семинаре в ЦЕРНе было объявлено об открытии новой частицы, свойства которой соответствуют ожидаемым свойствам **бозона Хиггса**

Директор ЦЕРНа Рольф Хойер сказал:
I think we have it

Бозон Хиггса H открыт в распадах: $H \rightarrow \gamma\gamma$,
 $H \rightarrow e^+e^-e^+e^-$.
 $H \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$.

Его характеристики:
электрически нейтрален,
 $M_H c^2 = 125,25 \pm 0,17$ ГэВ; J^P (спин-чётность) = 0^+

Питер Хиггс как бозон его имени в скалярном поле



Бозон Хиггса нестабилен.

Его время жизни:

$$\tau_H(\text{теория}) = 1,6 \cdot 10^{-22} \text{ секунд,}$$

$$\tau_H(\text{эксперимент}) = 2,2^{+4,4}_{-1,1} \cdot 10^{-22} \text{ секунды.}$$

Типы распада бозона Хиггса:

$H \rightarrow b\bar{b}$ -кварки, вероятность 57,7%,

$H \rightarrow W^+W^-$, вероятность 21,5%,

$H \rightarrow \tau^+\tau^-$ -лептоны, вероятность 6,32%,

$H \rightarrow ZZ$, вероятность 2,64%,

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ($e\mu$ -лептоны), вероятность 10^{-4} :

$\rightarrow e^+e^-e^+e^-$,

$\rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$,

$\rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$,

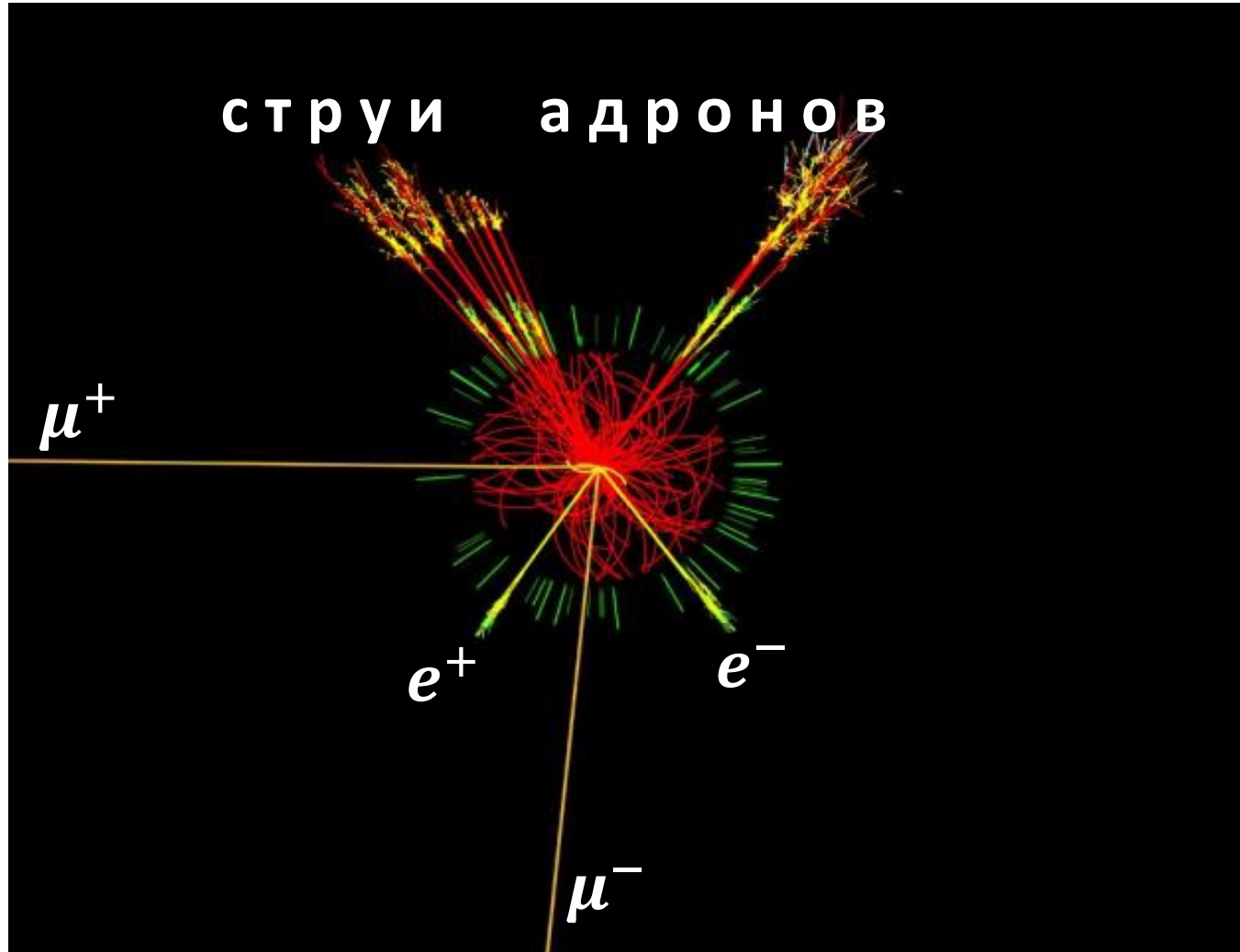
$H \rightarrow \gamma\gamma$, вероятность 0,228% ,

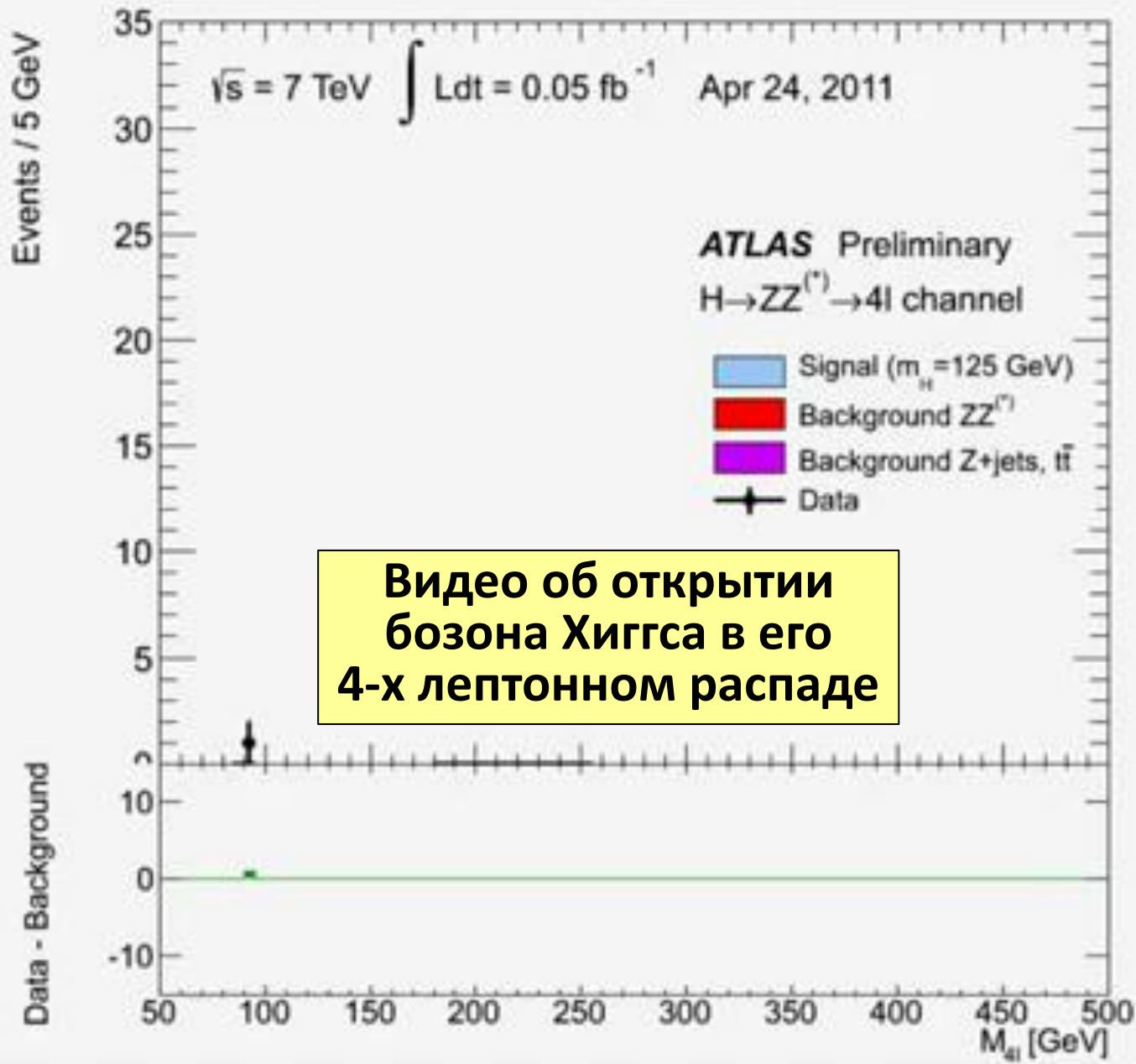
$H \rightarrow Z\gamma$, вероятность 0,154%,

$H \rightarrow \mu^+\mu^-$ -лептоны, вероятность 0,0219%,

и так далее

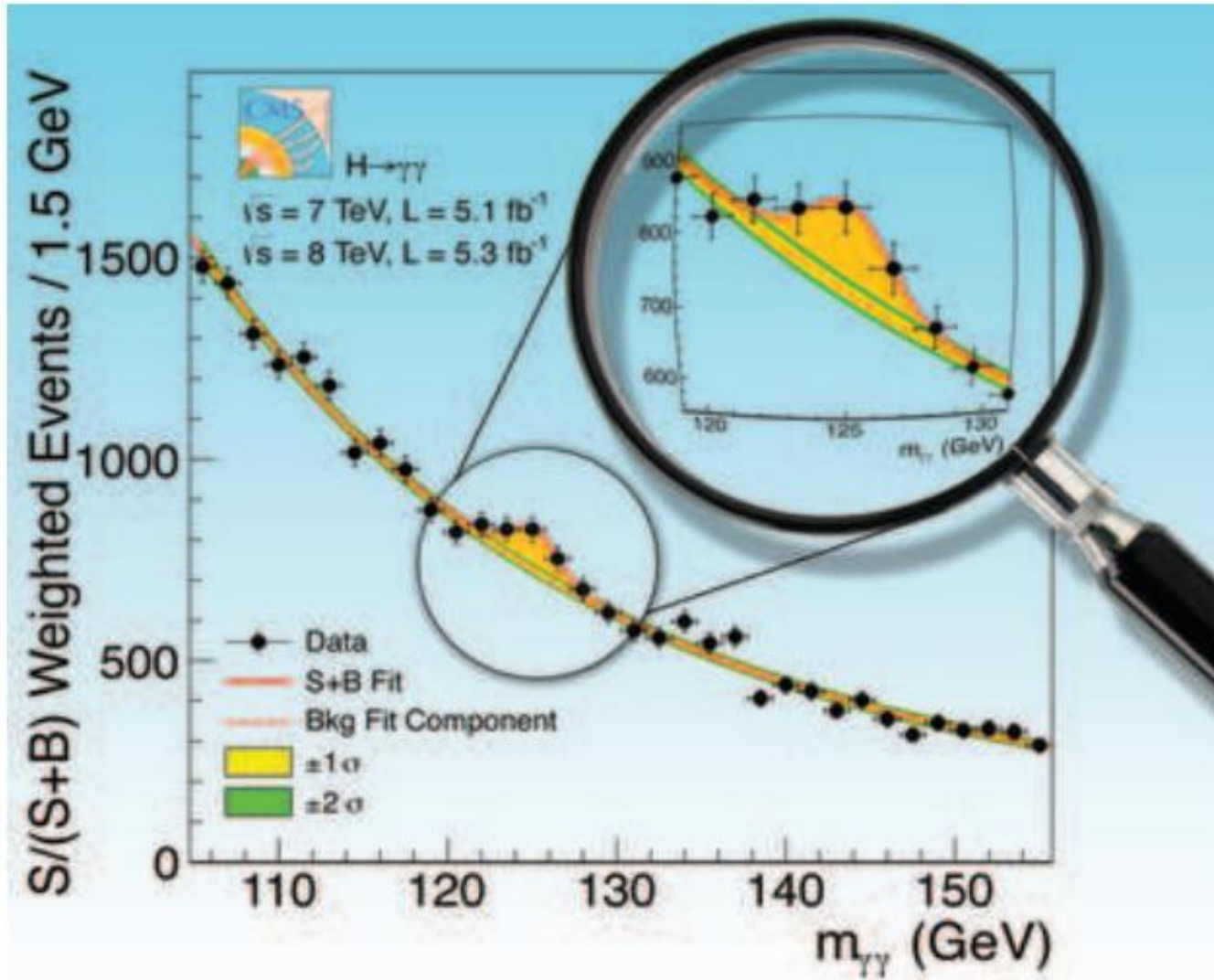
Событие с рождением бозона Хиггса (H)
и его 4-х лептонным распадом:
 $H \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-$





Видео об открытии бозона Хиггса в его 4-х лептонном распаде

Видео об открытии бозона Хиггса в распаде $H \rightarrow \gamma\gamma$



CMS

Бозон Хиггса – квант поля Энглера-Браута-Хиггса

Зачем нужно новое поле?

Симметрии теории микромира запрещают элементарным частицам иметь массы, а новое поле нарушает эти симметрии и обеспечивает существование масс частиц

Главная роль поля Энглера-Браута-Хиггса

– обеспечить массы всем фундаментальным частицам

Бозон Хиггса –

**последняя из фундаментальных частиц,
предсказываемых**

**Стандартной Моделью элементарных частиц,
которую до сих пор не наблюдали**

Потерю масс фундаментальными частицам при исчезновении хиггсовского поля можно сравнить с потерей веса телами при исчезновении гравитационного поля. Также как в гравитационном поле (например, Земли) различные тела имеют, как правило, различные веса и теряют эти веса при отключении гравитационного поля, становясь одинаково невесомыми, так и в хиггсовском поле различные фундаментальные частицы имеют различные массы и теряют эти массы при выключении поля, становясь одинаково безмассовыми.

Различные веса тел и различные массы фундаментальных частиц обусловлены различными энергиями взаимодействия тел (частиц) с соответствующими полями.

Нобелевская премия по физике 2013 г.



F. Englert

P. Higgs

Первая очная встреча Хиггса и Энглера состоялась лишь в 2012 году

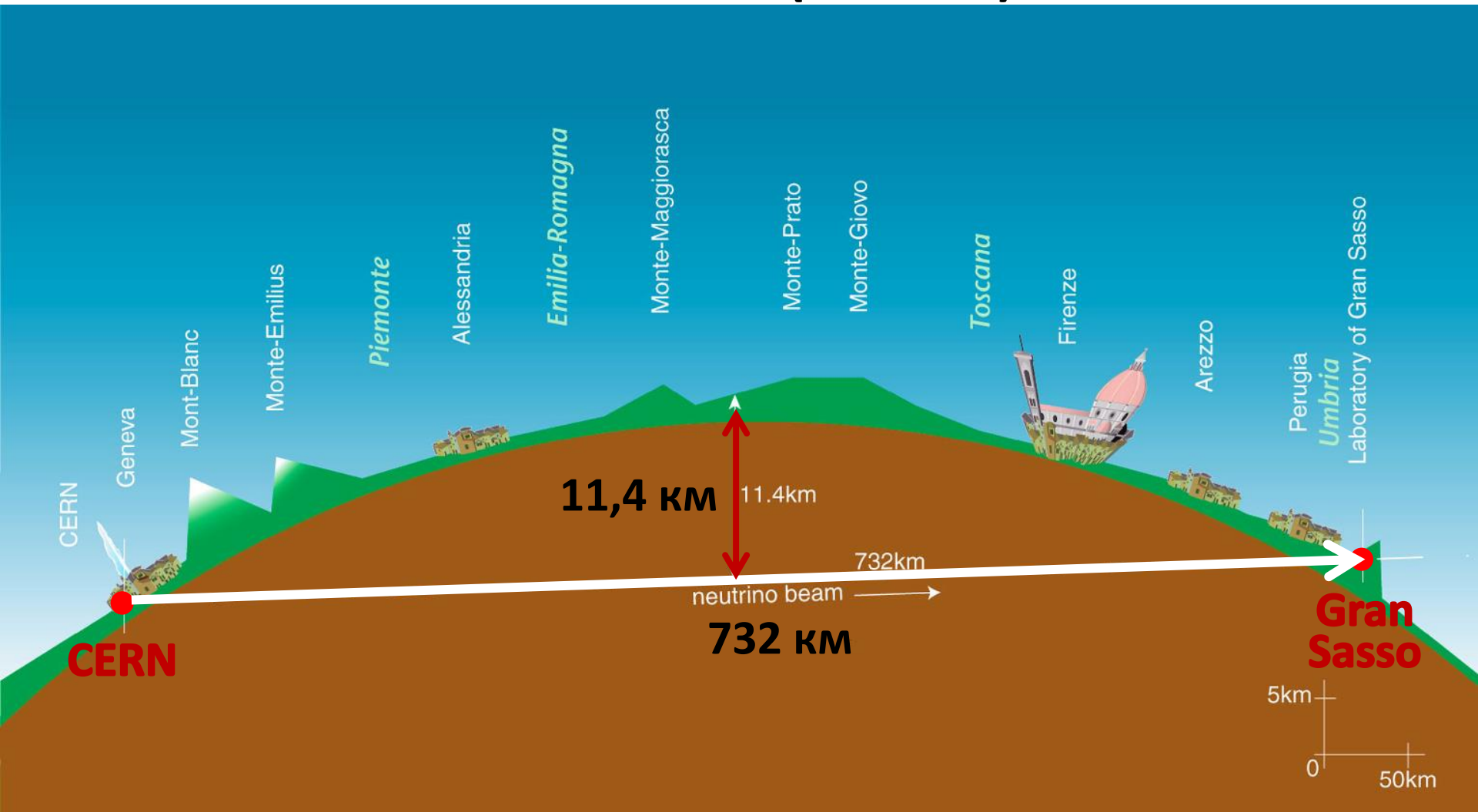


R. Brout
(1928-2011)

Публикации:

1. F. Englert, R. Brout – **август** 1964,
2. P. Higgs – **октябрь** 1964,
3. T. Kibble, G. Guralnik, C. Hagen
– **ноябрь** 1964

Путь нейтринного пучка из **CERN** в подземную нейтринную лабораторию **Gran Sasso** (Италия)



Гора Gran Sasso (Центральная Италия)



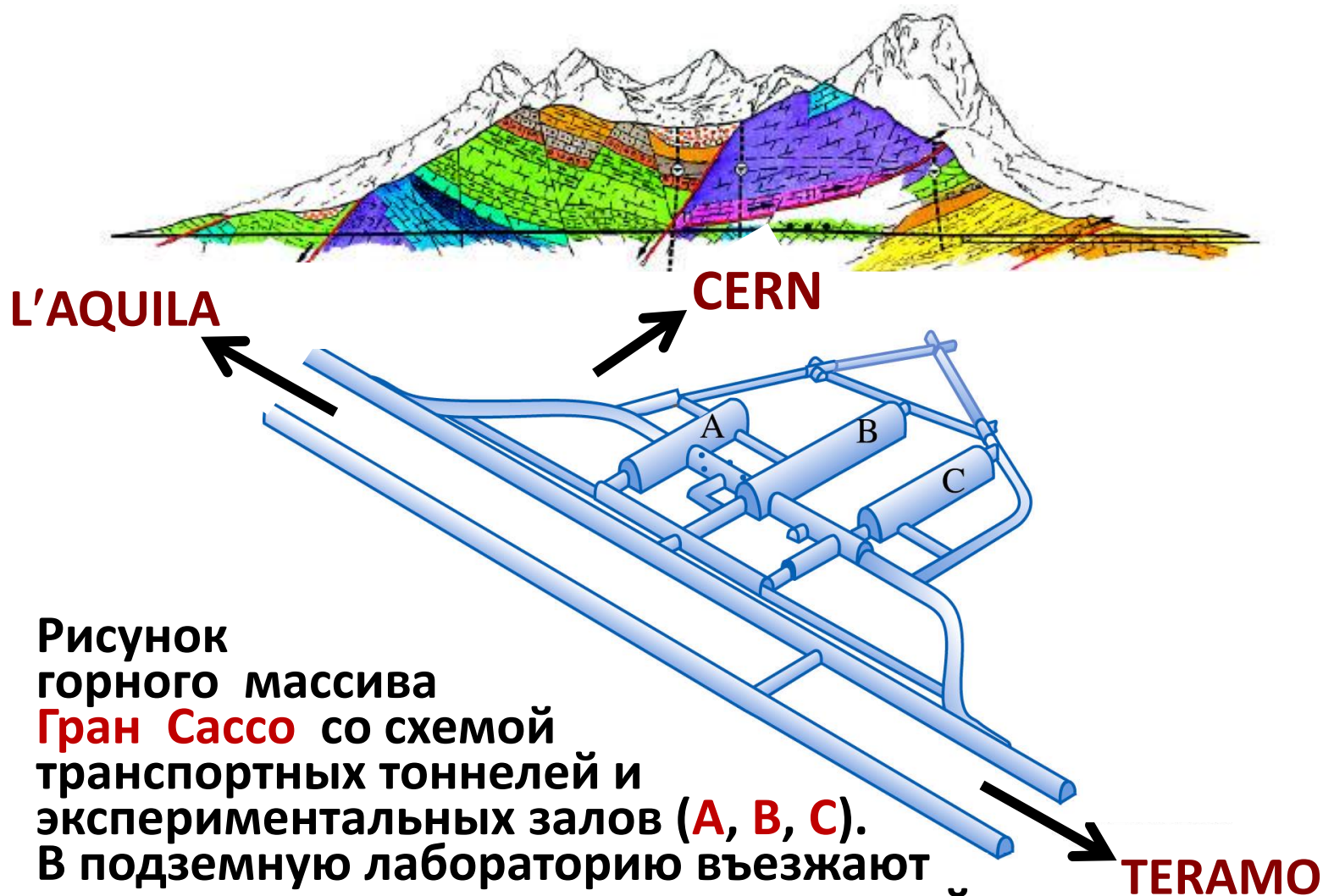


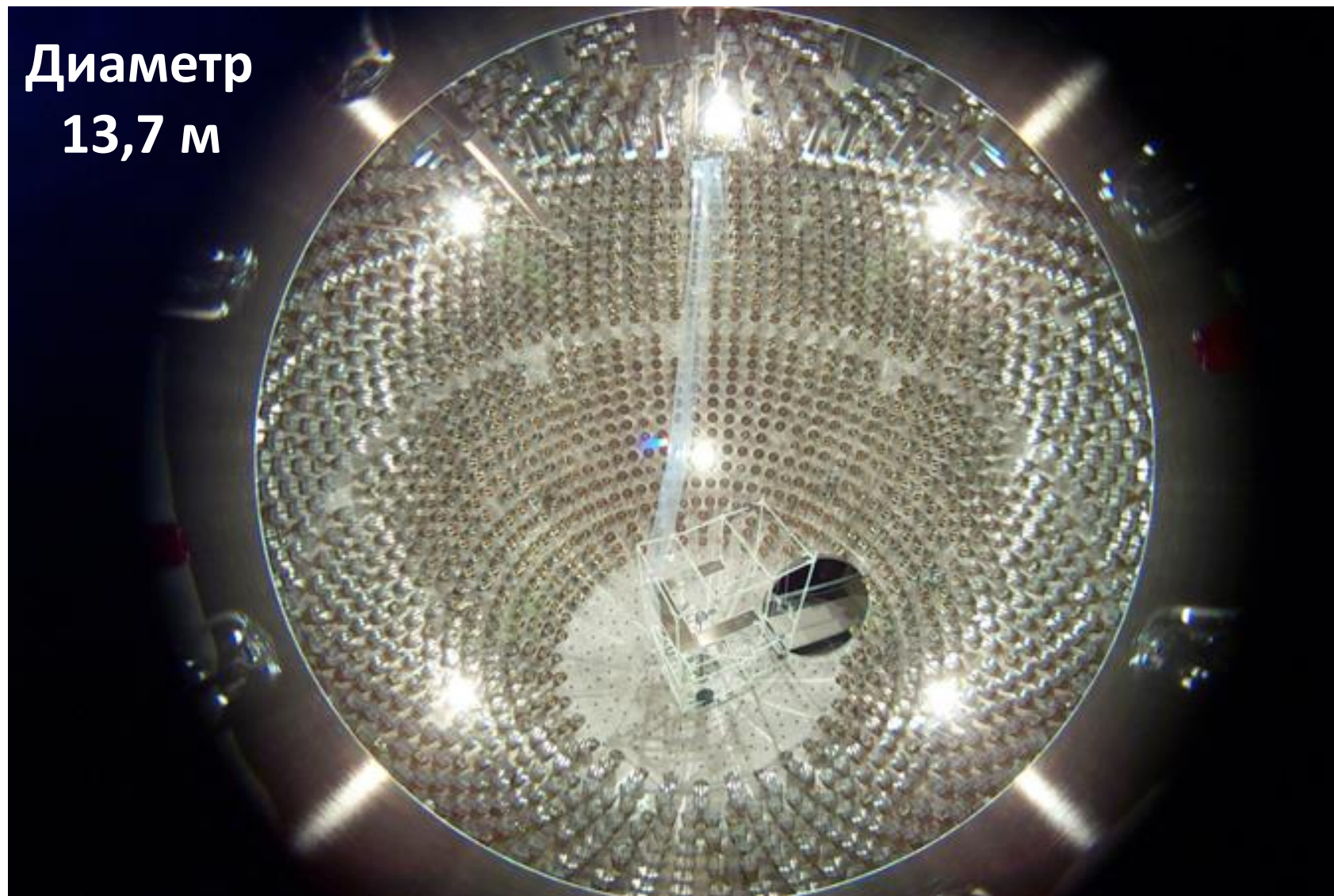
Рисунок
горного массива
Гран Сассо со схемой
транспортных тоннелей и
экспериментальных залов (A, B, C).
В подземную лабораторию въезжают
по тоннелю автострады, соединяющей
города Аквила и Терамо, расположенные
по разные стороны горного массива.

Нейлоновая оболочка нейтринного детектора Борексино под горой Гран Сассо (Италия)

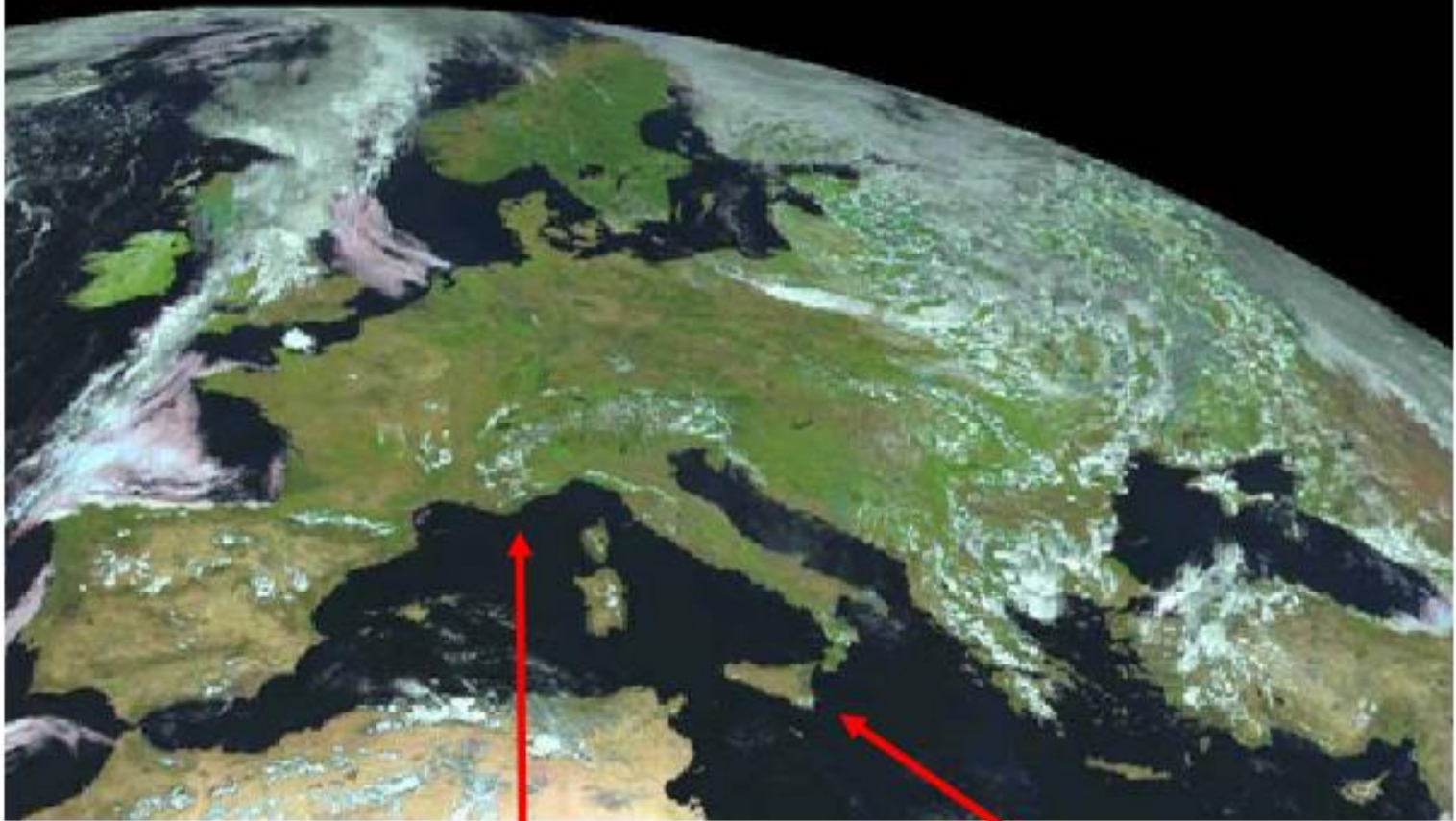


Детектор Борексино

Диаметр
13,7 м



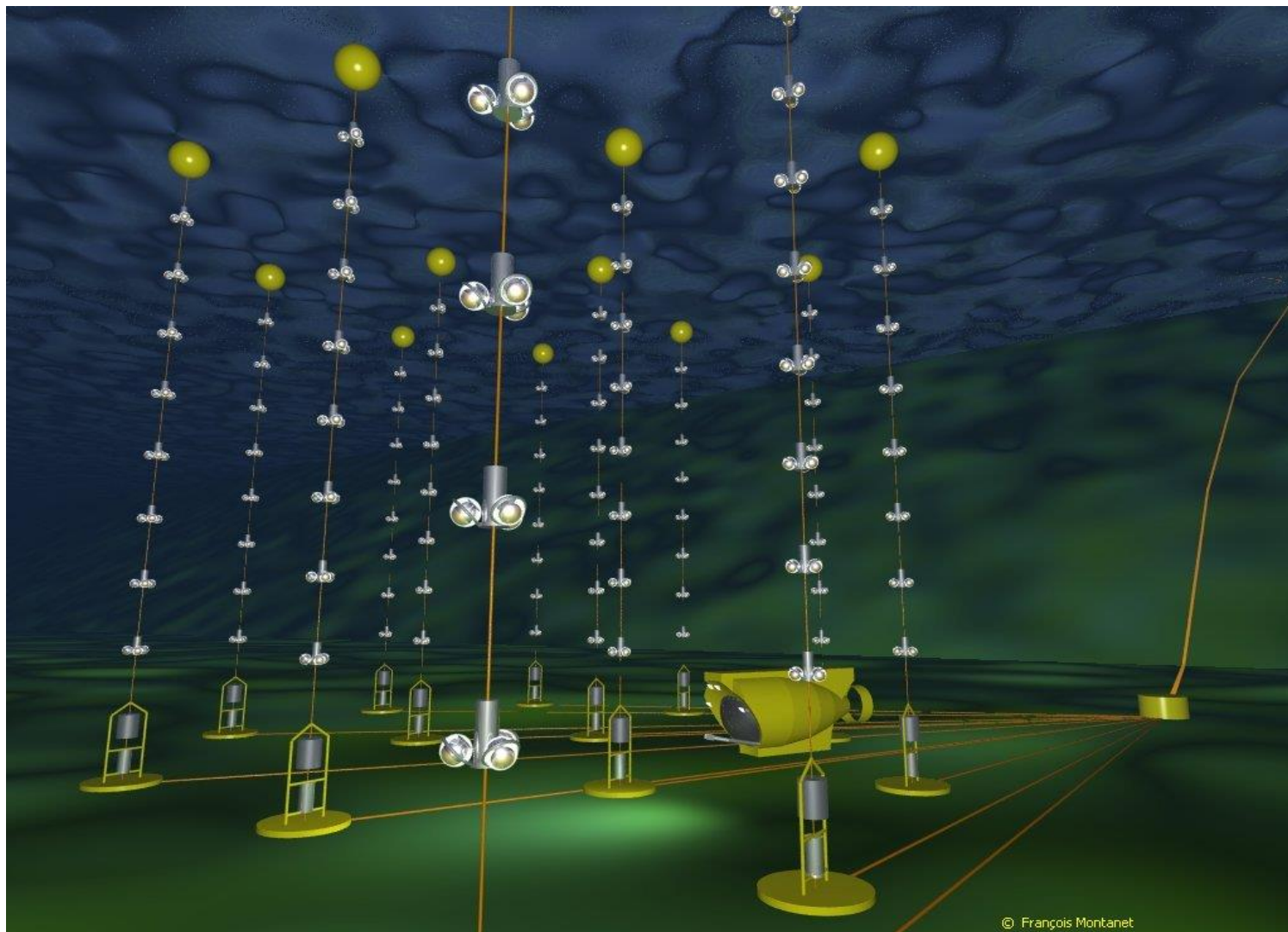
Местоположение глубоководных нейтринных детекторов ANTARES и KM3NeT



ANTARES

KM3NeT

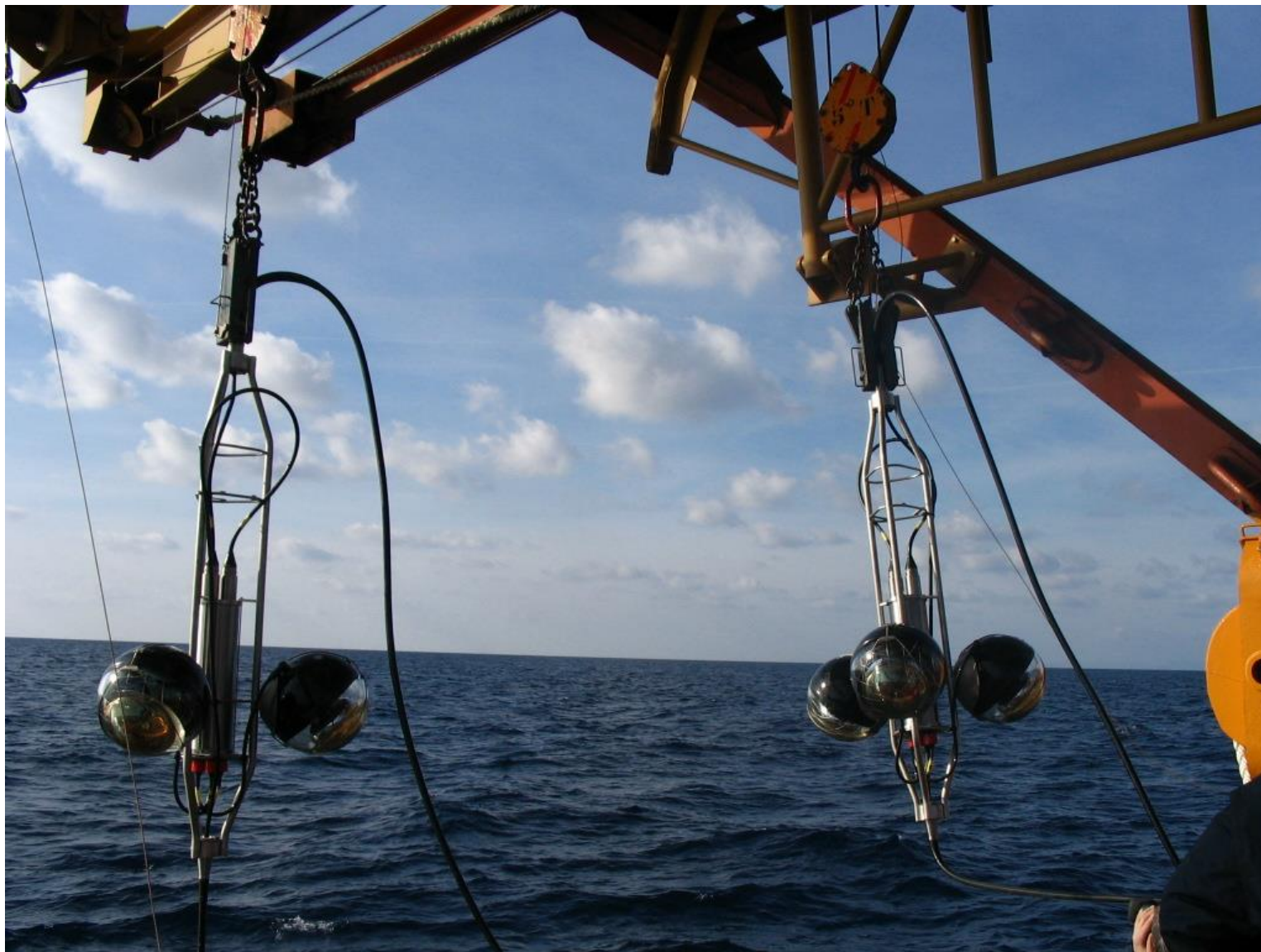
Подводный нейтринный телескоп ANTARES





**Триплет-модуль
фотоумножителей
подводного
нейтринного
телескопа ANTARES**

Установка ФЭУ-триплетов нейтринного телескопа ANTARES (40 км южнее Средиземноморского побережья Франции)



Некоторые сведения об элементарных частицах

Всего известно около **620** частиц (включая античастицы).

Мы уже встречали протон (p), нейтрон (n), электрон и позитрон (e^\pm), фотон (γ), нейтрино (ν), антинейтрино ($\bar{\nu}$), промежуточные бозоны (W^\pm, Z), пионы (π^\pm, π^0).

Стабильные частицы:

p, e, γ, ν (и их античастицы). $\tau_e > 6,6 \cdot 10^{28}$ лет, $\tau_p > 10^{33}$ лет

Самая долгоживущая нестабильная частица:

это нейтрон $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$. $\tau_n \approx 900$ сек

Остальные частицы короткоживущие

их времена жизни $10^{-24} - 10^{-6}$ сек

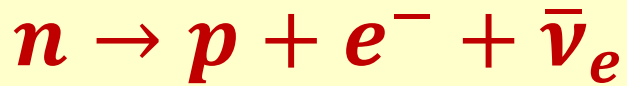
Большинство частиц-античастиц (**580**) имеют размеры ≈ 1 Фм и состоят из двух или трёх кварков.

Они называются **адронами**

Остальные частицы бесструктурны ($< 10^{-17}$ см):

это **6 кварков + 6 лептонов + кванты полей (глюоны, фотон, W^\pm, Z , гравитон).**

Их называют **фундаментальными**



Продукты распада нейтрона

не являются его составными частями,
а рождаются в момент распада.

Это справедливо и для всех других нестабильных частиц.

**Частицы распада не входят в состав
распадающейся частицы,
а рождаются в момент её распада.**

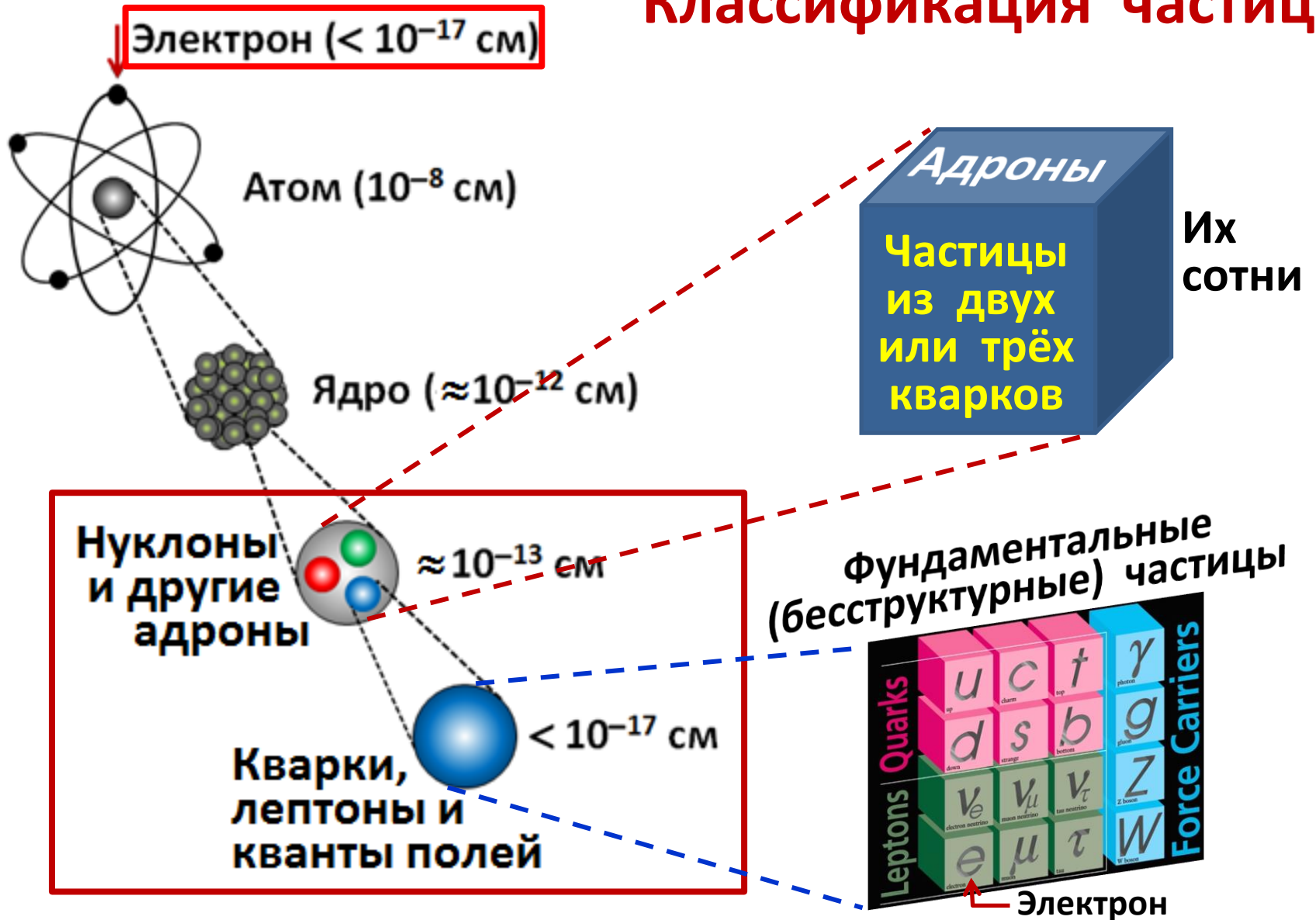
Это кардинально отличает элементарную частицу
от всех других известных объектов.

При столкновении двух энергичных частиц
наблюдаются события, где рождаются сотни частиц,
и все они не осколки столкнувшихся,
а полноценные новые частицы.

Возможны два определения элементарной частицы:

- (элементарной) частицей будем называть объект размером ≤ 1 Фм,
- (элементарной) частицей будем называть объект, который нельзя расщепить на составляющие его элементы.

Классификация частиц



Фундаментальные частицы

Кварки, лептоны и кванты физических полей на современном уровне знаний бесструктурны (точечны), их размер $< 10^{-17}$ см.

Они образуют самый глубинный слой материи и мы будем называть их **фундаментальными частицами**.

Существует **6** кварков и **6** лептонов. Они имеют спин **1/2**, т. е. являются фермионами. Эти **12** фундаментальных фермионов делятся на **три поколения** (или семейства) по **2** кварка и лептона в каждом из них.

Поколения (семейства):

		1	2	3	Заряд
Кварки	Верхние	u	c	t	$+\frac{2}{3}e$
	Нижние	d	s	b	$-\frac{1}{3}e$
Лептоны	Нейтрино	ν_e	ν_μ	ν_τ	0
	Заряженные	e	μ	τ	$-1e$

Кванты физических полей:
фундаментальные
или
калибровочные бозоны

Поле (взаимодействие)	Квант (бозон)	Масса (mc^2)	Спин	Радиус взаимо- действия
Сильное	ГЛЮОН (8 типов)	0	1	10^{-13} см
Электромагнитное	ФОТОН	0	1	∞
Слабое	W^{\pm}, Z	80, 91 ГэВ	1	10^{-16} см
Гравитационное	ГРАВИТОН	0	2	∞

Участие фундаментальных фермионов в различных взаимодействиях

Взаимодействия

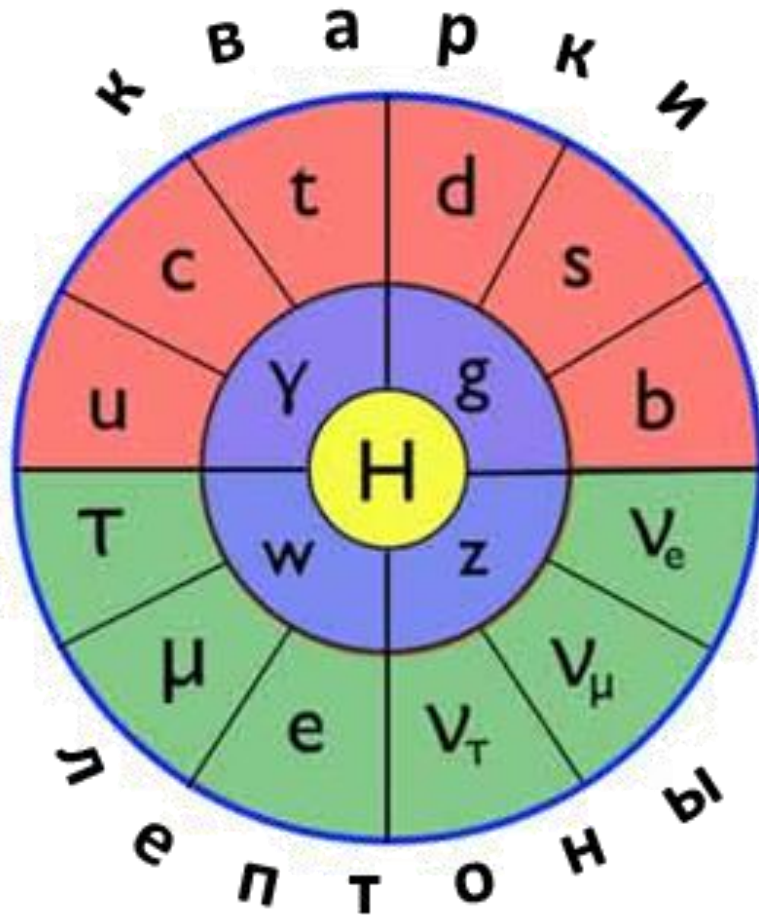
Фундаментальные фермионы	Сильное	Электромагнитное	Слабое	Гравитация
<p>Кварки: <i>d, u, s, c, b, t</i></p> <p>Лептоны: <i>e μ τ</i> <i>ν_e ν_μ ν_τ</i></p>	Глюоны	Фотоны	W^{\pm}, Z	Гравитоны

Силы в природе реализуются обменом переносчиками взаимодействия, роль которых обычно выполняют кванты полей



Наш мир можно свести к фундаментальным фермионам, взаимодействующим посредством обмена фундаментальными бозонами

Частицы Стандартной Модели элементарных частиц



Кварки

Лептоны

Кванты полей

H Бозон Хиггса

Характеристики кварков.

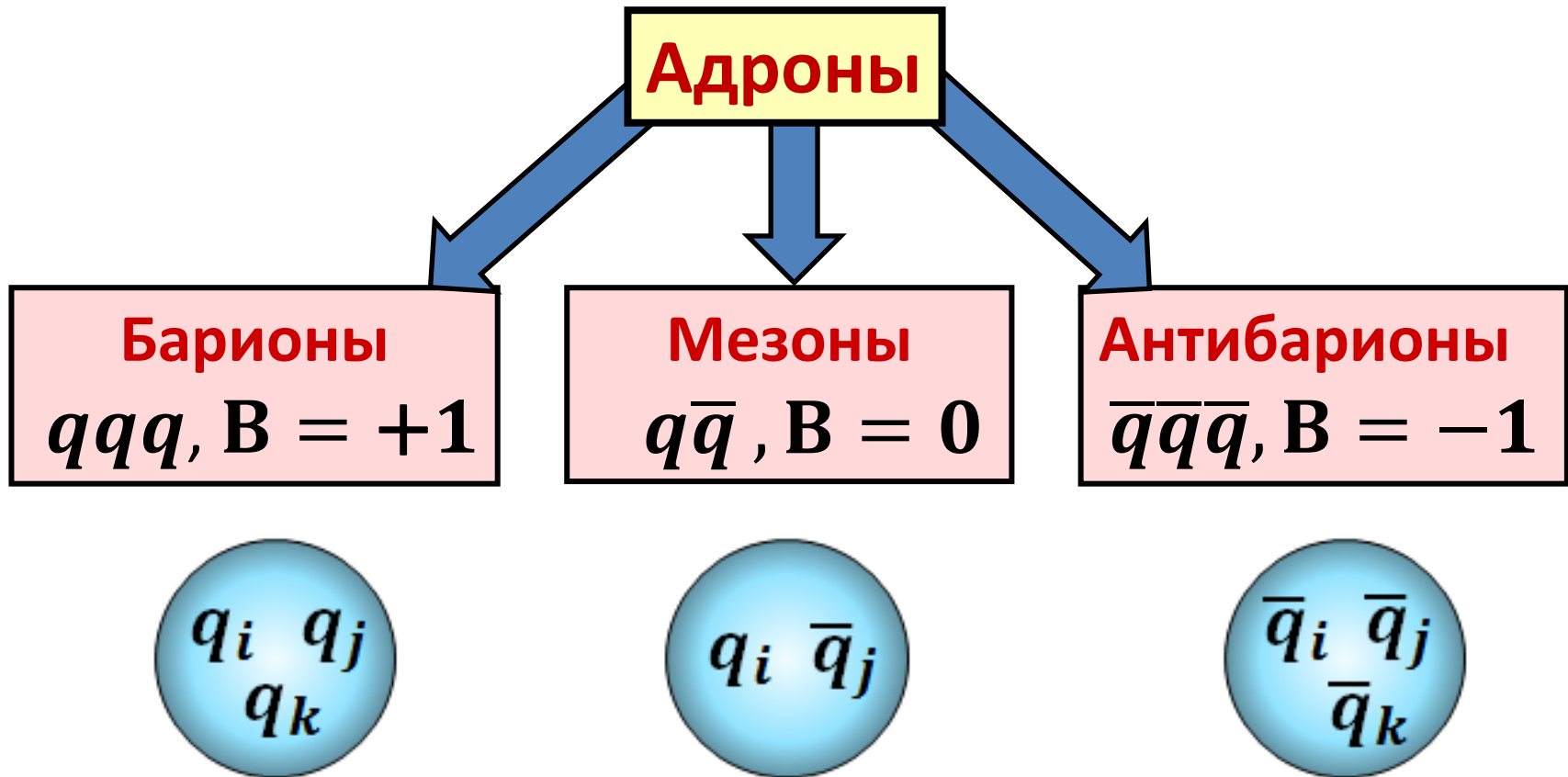
Для всех кварков $J^P = 1/2^+$ и барионный заряд $B = 1/3$

Характеристика	Тип кварка или аромат (flavor)					
	<i>d</i>	<i>u</i>	<i>s</i>	<i>c</i>	<i>b</i>	<i>t</i>
Электрический заряд Q	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$
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 (mc^2)	$4,7 \pm 0,3$ МэВ	$2,2 \pm 0,4$ МэВ	$93,4 \pm 6$ МэВ	$1,27 \pm 0,02$ ГэВ	$4,2 \pm 0,03$ ГэВ	$172,7 \pm 0,3$ ГэВ

Кварковое строение адронов

Кварки (quarks):

d (**down**), u (**up**), s (**strange**), c (**charm**), b (**bottom**), t (**top**).
Каждый кварк имеет **спин $1/2$** и барионный **заряд $+1/3$**
(для антикварков он **$-1/3$**)



Барионный заряд, спин и чётность адронов

Барионы



Мезоны



Антибарионы



Их барионный заряд (барионное число) B :

$$B = +\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = +1$$

$$B = +\frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

$$B = -\frac{1}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = -1$$

J – полуцелое
Это фермионы

J – целое
Это бозоны

J – полуцелое
Это фермионы

Чётность адронов рассчитывается по формулам:

$$P_{\text{барион}} = \pi_{q_i} \pi_{q_j} \pi_{q_k} (-1)^{l_{q_i} + l_{q_j} + l_{q_k}} = L$$

$$P_{\text{мезон}} = \pi_{q_i} \pi_{\bar{q}_j} (-1)^{l_{q_i} + l_{\bar{q}_j}} = L$$

$$P_{\text{антибарион}} = \pi_{\bar{q}_i} \pi_{\bar{q}_j} \pi_{\bar{q}_k} (-1)^{l_{\bar{q}_i} + l_{\bar{q}_j} + l_{\bar{q}_k}} = L$$

Three quarks for Muster Mark!
(Д. Джойс «Поминки по Финнегану»)

**Кварковая модель адронов предложена
В 1964 г. американскими физиками**

Мюрреем Гелл-Манном и Джорджем Цвейгом

Gell-Mann



**(1929-2019)
родился в
Нью-Йорке**

M. Gell-Mann
Physics Letters, 8(1964)214
G. Zweig
CERN Reports, 8182/Th. 401(1964)

**Название «кварки» (quarks)
предложено Гелл-Манном.
Цвейг предложил название
«тузы» (aces).**

Zweig



**родился в
Москве
в 1937 г.**

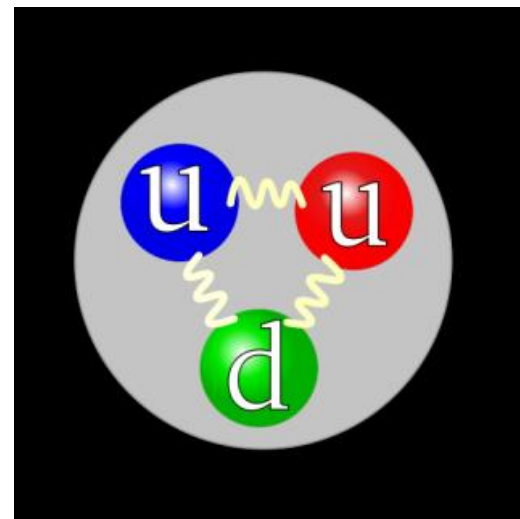
**В 2014 г., через 50 лет
после гипотезы кварков, 77-летний
Джордж Цвейг вновь побывал
на своей родине в Москве и
посетил Объединённый Институт
Ядерных Исследований в г. Дубне**



Протон

Сначала были предложены
три кварка *d*, *u*, *s*.

Из них
можно было построить
все известные тогда адроны.



Кварковое строение нуклонов и пионов
с помощью вышеуказанных трёх кварков
представляется в следующем виде:

$$\text{Протон} = uud$$

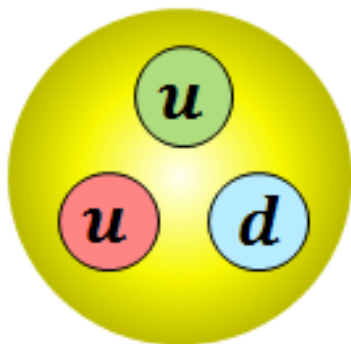
$$\text{Нейтрон} = udd$$

$$\pi^+ = u\bar{d}$$

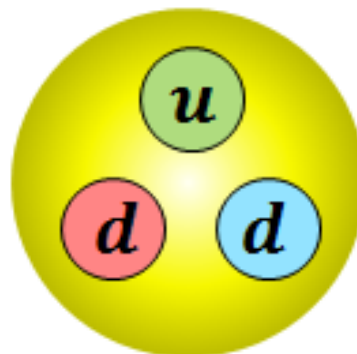
$$\pi^0 = \begin{cases} u\bar{u} \\ d\bar{d} \end{cases}$$

$$\pi^- = \bar{u}d$$

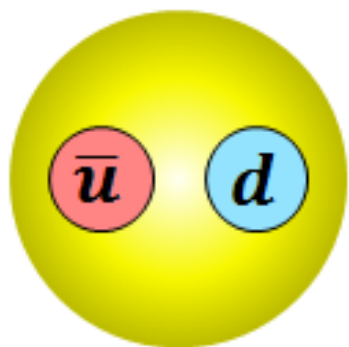
Протон



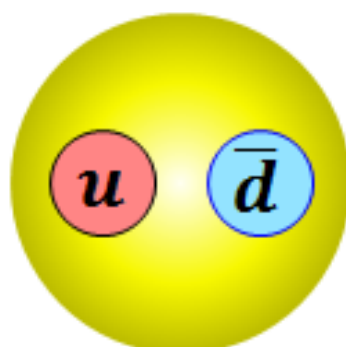
Нейтрон



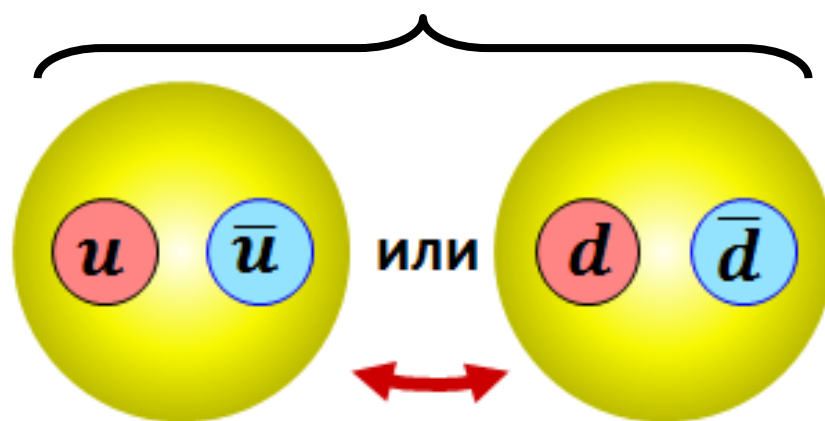
π^-



π^+



π^0



Лептоны имеют специфическое квантовое число – лептонное (лептонный заряд) L

Этот лептонный заряд свой
для лептонов каждого поколения, т.е. имеется
три разновидности лептонного заряда – L_e, L_μ, L_τ

Поколение	Лептон	Электрический заряд, e	Лептонный заряд		
			L_e	L_μ	L_τ
1	e^-	-1	+1	0	0
	ν_e	0	+1	0	0
2	μ^-	-1	0	+1	0
	ν_μ	0	0	+1	0
3	τ^-	-1	0	0	+1
	ν_τ	0	0	0	+1

Для антилептонов
электрические и лептонные заряды меняют знак

Законы сохранения в мире частиц

$$a + b \rightarrow c + d + \dots$$

Аддитивные законы сохранения

(энергии, импульса, момента количества движения и др.).

Сохраняется сумма соответствующих характеристик
(квантовых чисел):

$$N_a + N_b = N_c + N_d + \dots$$

Мультипликативные законы сохранения
(например, пространственной чётности).

Сохраняется произведение
соответствующих характеристик (квантовых чисел):

$$N_a \cdot N_b = N_c \cdot N_d \cdot \dots$$

Аддитивными
сохраняющимися характеристиками
(величинами)
помимо энергии E , импульса \vec{p}
и момента количества движения \vec{J} ,
являются электрический заряд Q ,
барионное квантовое число (барионный заряд) B ,
лептонное квантовое число (лептонный заряд) L ,
изоспин I ,
а также ряд квантовых чисел,
имеющих кварковую природу:
странность (Strangeness) S , очарование (Charm) C ,
Bottomness B , Topness T .

Таблица законов сохранения

<ol style="list-style-type: none">1. Энергии E2. Импульса \vec{p}3. Моментa количества движения \vec{J}4. Электрического заряда Q5. Барионного числа (заряда) B6. Лептонного числа (заряда) L_e, L_μ, L_τ	<p>Универсальные (выполняются во всех взаимодействиях)</p>
<ol style="list-style-type: none">7. Изоспина (Isospin) I	<p>выполняется только в сильном взаимодействии</p>
<ol style="list-style-type: none">8. Проекция изоспина I_39. Странности (Strangeness) S10. Очарования (Charm) C11. Bottomness B12. Topness T	<p>выполняются в сильном и электромагнитном взаимодействиях</p>

Появление нового квантового числа
изоспина I и его проекции **I_3**

есть следствие

зарядовой симметрии

сильного взаимодействия

– независимости сильного взаимодействия
от электрического заряда адрона.

Более подробно об этом квантовом числе
сказано в **Приложении 1** к данной Лекции.

Частицы – Античастицы

При переходе частица \Leftrightarrow античастица

Сохраняются:

спин, масса, время жизни, способ распада, изоспин I и величина магнитного момента.

Меняют знак аддитивные квантовые числа:

электрический заряд Q ,

барионное квантовое число (барионный заряд) B ,

лептонные квантовые числа

(лептонные заряды) L_e, L_μ, L_τ ,

проекция изоспина I_3 , а также кварковые

Квантовые числа: странность S , очарование C ,

Bottomness B , topness T и магнитный момент.

Если все аддитивные квантовые числа частицы (включая заряды) нулевые, то она тождественна своей античастице.

Такие частицы называют **истинно нейтральными**.

Примеры: фотон (γ), нейтральный пион (π^0) и Z -бозон.

Пример: нейтрон - антинейтрон

Частица	mc^2 , МэВ	τ , сек	Q	J	I
Нейтрон	939,565	$878,4 \pm 0,5$	0	1/2	1/2
Анти-Нейтрон	939,565	$878,4 \pm 0,5$	0	1/2	1/2

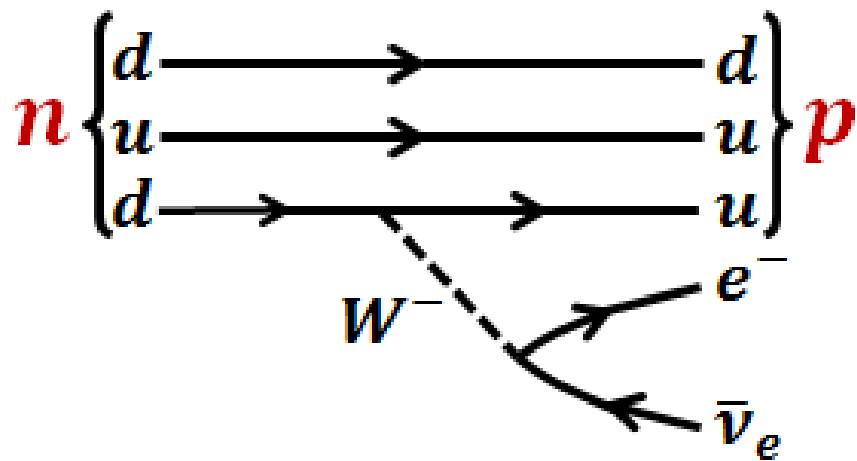
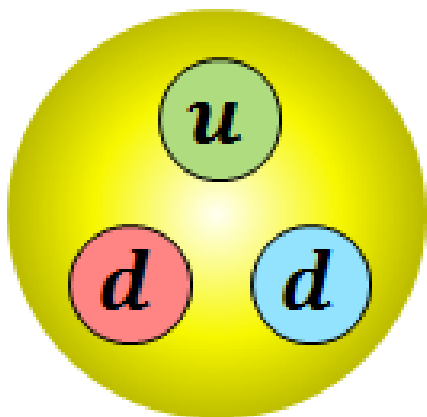
Частица	Барионный заряд, B	Проекция изоспина, I_3	Магнитный момент, μ_N	Чётность
Нейтрон	+1	-1/2	-1,91	+1
Анти-Нейтрон	-1	+1/2	+1,91	-1

Распад:

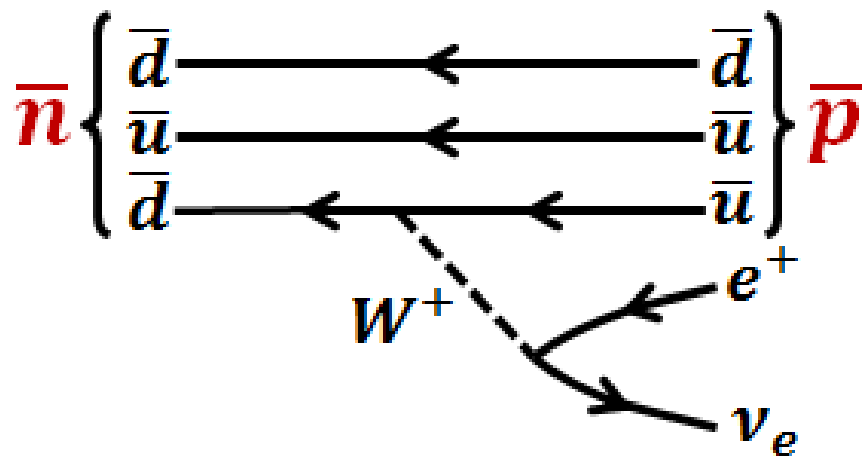
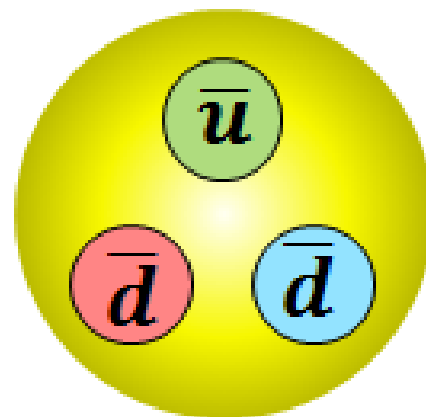
нейтрон: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$,

антинейтрон: $\bar{n} \rightarrow \bar{p} + e^+ + \nu_e$.

Нейтрон



Антинейтрон



Приложение 1:
Зарядовая симметрия
сильного взаимодействия
и квантовое число
ИЗСПИН

Зарядовая независимость сильного взаимодействия

Нуклон-нуклонное рассеяние показало, что если вычесть влияние сил электромагнитной природы, то взаимодействие в парах **нейтрон-нейтрон, протон-протон и нейтрон-протон** в одинаковых квантовых состояниях неразличимо, т.е. собственно сильное (ядерное) взаимодействие не зависит от типа нуклона. Это свойство ядерных сил формулируют как их **зарядовую независимость**.

Этой симметрии соответствует новая приближенно сохраняющаяся физическая величина или квантовое число – **изобарический (изотопический) спин**, для которого используется сокращение **ИЗОСПИН**.



История появления нового квантового числа восходит к 1932 г., когда Гейзенберг стал рассматривать нейтрон и протон как два состояния одной частицы, названной **нуклоном**. По его идее очень небольшое ($\approx 0,1\%$) различие в массах нейтрона и протона

имеет электромагнитную природу.

Если «выключить» электромагнитные силы, то массы нейтрона и протона должны совпасть.

Нейтрон и протон можно рассматривать как два зарядовых состояния нуклона

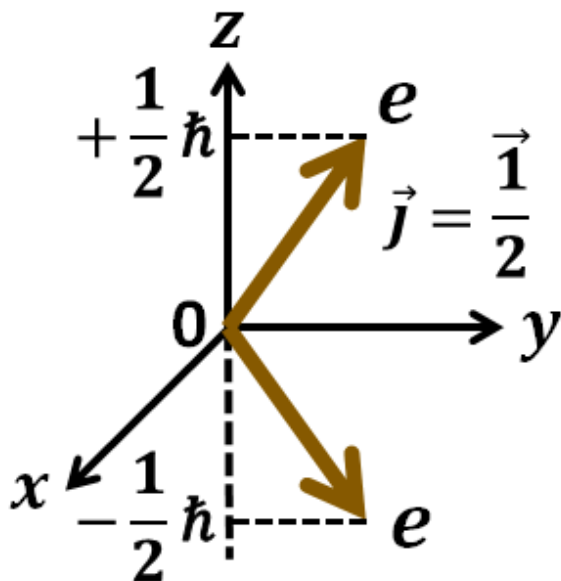
Формальная реализация концепции изоспина

Для формальной реализации двух зарядовых состояний нуклона вводят трёхмерное (с осями **1, 2, 3**) евклидово зарядовое (или изоспиновое) пространство, никак не связанное с обычным пространством, и приписывают нуклону в этом пространстве квантовый вектор $\vec{I} = \frac{\vec{1}}{2}$ с тем, чтобы две возможные проекции этого вектора ($\pm 1/2$) на одну из осей (например, ось **3**) зарядового пространства отвечали двум зарядовым состояниям нуклона. Обычно выбирают $(I_3)_p = +1/2, (I_3)_n = -1/2$.

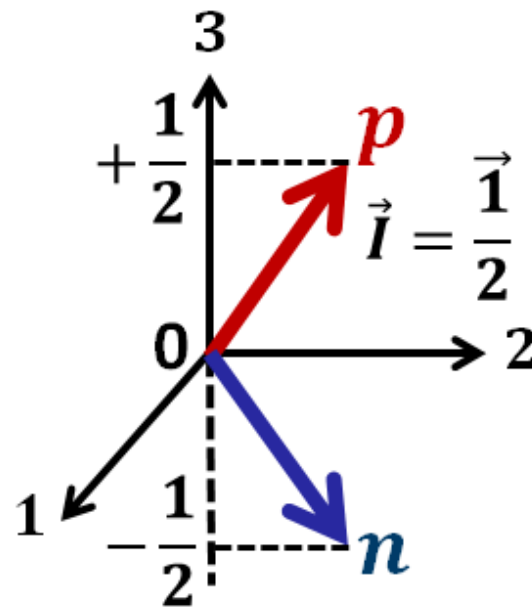
Аналогия спин-изоспин

Два состояния частицы (с обычным спином $1/2$), различающиеся проекцией спина на ось z ($+1/2$) или ($-1/2$), рассматривают не как две разные частицы, а как два состояния одной частицы. Аналогично, протон и нейтрон можно считать не двумя разными частицами, а двумя зарядовыми состояниями одной частицы – нуклона (с изоспином $1/2$, направленным либо вверх вдоль оси 3 (протон), либо вниз (нейтрон)).

Э
Л
Е
К
Т
Р
О
Н



Реальное пространство



Н
У
К
Л
О
Н

Зарядовое пространство

Из зарядовой независимости сильного взаимодействия следует, что куда бы ни был повернут вектор изоспина частицы, это взаимодействие не меняется, т. е. сильновзаимодействующая частица (в данном случае нуклон) инвариантна относительно поворотов в изопространстве.

Непосредственный физический смысл имеет только третья проекция изоспина. Она связана с измеряемой величиной – электрическим зарядом.

Электрический заряд нуклона даётся выражением

$$Q_N = e \left(\frac{1}{2} + I_3 \right)_N ,$$

где e – положительный элементарный заряд (протона или нейтрона)

Изомультиплеты

Не только нуклонам, но и всем адронам можно приписать определённый изоспин I . Их можно разбить на группы (так называемые изомультиплеты), состоящие из частиц с одним и тем же I , но разными проекциями изоспина I_3 . Частицы, образующие изомультиплет, ведут себя одинаково в сильном взаимодействии и имеют приблизительно одинаковые массы (небольшие различия в массах имеют электромагнитную природу). Все члены изомультиплета соответствуют как бы одной частице, различным образом ориентированной в зарядовом (изоспиновом) пространстве, т.е. имеющей разные электрические заряды. Если известны все члены изомультиплета, то легко найти изоспин мультиплета из соотношения $2I + 1 = n$, где n – число частиц в изомультиплете (равное числу проекций изоспинового вектора на ось 3).

Изодублет протон-нейтрон (нуклон)

Тип нуклона	Спин- чётность J^P	Масса, mc^2 , МэВ	Заряд, e	Изоспин I	Проекция изоспина I_3
Протон	$1/2^+$	938,27	+1	1/2	+1/2
Нейтрон	$1/2^+$	939,57	0	1/2	-1/2

Заряд нуклона $Q = e(1/2 + I_3)$

Изотриплет пионов (π^+ , π^0 , π^-)

Тип пиона	Спин- чётность J^P	Масса, mc^2 , МэВ	Заряд, e	Изоспин I	Проекция изоспина I_3
π^+	0^-	140	+1	1	+1
π^0	0^-	135	0	1	0
π^-	0^-	140	-1	1	-1

Заряд пиона $Q = eI_3$

Изомультиплеты различной размерности

Размерность	Частица	Заряд, e	I_3	mc^2 , МэВ
Изосинглет ($I = 0$)	Λ	0	0	1115,7
Изодублет ($I = 1/2$)	p	+1	+1/2	938,3
	n	0	-1/2	939,6
Изотриплет ($I = 1$)	π^+	+1	+1	139,6
	π^0	0	0	135,0
	π^-	-1	-1	139,6
Изоквартет ($I = 3/2$)	Δ^{++}	+2	+3/2	} 1230-1234
	Δ^+	+1	+1/2	
	Δ^0	0	-1/2	
	Δ^-	-1	-3/2	

Небольшое (**0,1-3%**) различие в массах членов изомультиплета Δmc^2 имеет электромагнитную природу и может быть оценено из соотношения e^2/R , для электрической энергии, где e – элементарный заряд, а R – радиус адрона. Так для изодублета протон-нейтрон имеем

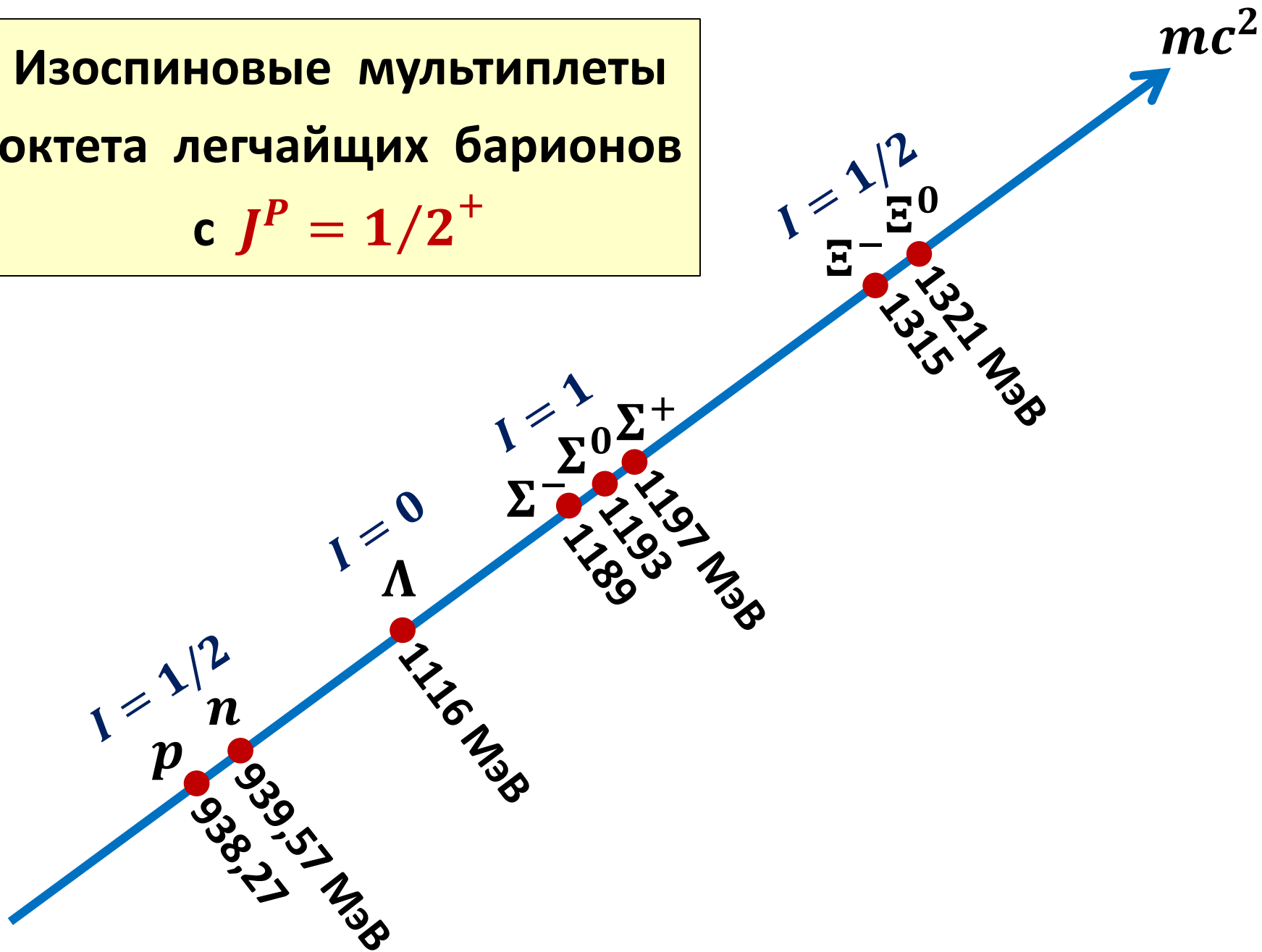
$$\Delta mc^2 \approx \frac{e^2}{R} \approx \frac{e^2}{\hbar c} \cdot \frac{\hbar c}{R} \approx \frac{1}{137} \cdot \frac{200 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}}{1 \text{ Фм}} \approx 1,4 \text{ МэВ.}$$

Признаки изомультиплета:

1. Это должны быть адроны с одними и теми же спин-чётностью.
2. Они должны иметь незначительные (**0,1-3%**) отличия в массах.
3. Они должны иметь различные электрические заряды.
4. Все аддитивные квантовые числа, кроме электрического заряда (проекция изоспина), должны быть одинаковыми.

Изоспиновые мультиплеты
октета легчайших барионов

с $J^P = 1/2^+$



Носителем квантового числа изоспин на кварковом уровне является изодублет кварков u ($up \uparrow$) и d ($down \downarrow$). Эти кварки исполняют роль «ИЗОСПИНОВЫХ КВАНТОВ».

1950 г.
Изодублет
нуклонов

$p (\uparrow)$

$n (\downarrow)$

1964 г.
Изодублет
кварков

$(\uparrow) u$

$(\downarrow) d$



$$p = uud$$

$$n = ddu$$

Приложение 2:

Сохранение электрического заряда

Известно, что электрический заряд строго сохраняется, т.е. имеет место соответствующий закон сохранения.

С каким типом симметрии (с инвариантностью к каким преобразованиям) связан этот закон сохранения?

В квантовой механике – это инвариантность к так называемым *локальным калибровочным преобразованиям*, меняющим фазы волновых функций произвольно в различных точках пространства и времени.

Но к сохранению заряда можно прийти и с помощью более простых рассуждений. Этот закон – следствие того, что не имеет смысла говорить об абсолютном значении электрического потенциала и во всех соотношениях он является относительной величиной. Не возникает никаких новых физических явлений, если этот потенциал изменить (сдвинуть) на одно и то же значение во всех точках

пространства, т.е. имеет место инвариантность нашего мира к таким сдвигам. Проще всего это доказывается с помощью аргументов Э. Вигнера (1949 г.). Они сводятся к следующему:

В электростатике потенциал системы ϕ является относительной величиной. Уравнения всегда содержат *изменение* потенциала и не зависят от абсолютной величины ϕ в любой точке пространства. Предположим, что заряд не сохраняется и может быть создан или уничтожен неким магическим процессом. Чтобы создать заряд Q , требуется работа A , которая при его уничтожении возвращается. Пусть заряд создается в точке, где потенциал в некой выбранной шкале есть ϕ_1 . Работа по его созданию A не зависит от ϕ , поскольку по условию нет физических процессов, зависящих от абсолютной шкалы потенциала. Если теперь передвинуть заряд в точку с потенциалом ϕ_2 , изменение энергии будет $Q(\phi_1 - \phi_2)$. Если затем заряд исчезнет, мы вернемся к системе с энергией, измененной на величину $A - A + Q(\phi_1 - \phi_2)$. Таким образом, сохранение энергии не позволяет создать и уничтожить заряд, если шкала электростатического потенциала является относительной. Другими словами, только сохранение заряда позволяет нам произвольно выбирать шкалу потенциала.