

Эксперименты на Большом адронном коллайдере (LHC) в ЦЕРН

С.В. Шматов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

shmatov@cern.ch

X Зимняя Дубненская международная школа современной теоретической физики (DIAS-TH)

“Физика на Большом адронном коллайдере”

Объединенный институт ядерных исследований (Дубна)

31 января 2012 года

- Что такое ЦЕРН?
 - ✓ Краткая история
 - ✓ Ускорительный комплекс
 - ✓ Задачи на современном этапе

- Что и почему мы ожидаем от LHC

- Экспериментальные установки на LHC
 - ✓ общие характеристики
 - ✓ принцип работы
 - ✓ набор данных

- Об установке Компактный мюонный соленоид (CMS)

- Пример первых данных

“Наше внимание сосредоточено на создании новой международной организации для проведения научно-исследовательских работ, выходящих за рамки национальных программ... Эта организация могла бы взять на себя решение таких задач, объем и сущность которых не под силу какому-либо одному национальному институту... Это начинание оправдывает затраченные усилия... укрепит связи между учеными разных стран, расширит сотрудничество, упростит распространение результатов научных работ и информации в целом. Кроме того, создание научного центра явится символом объединения интеллектуальных сил Европы”

Луи де Бройль

1949, Европейская конференция по культуре,
Лозанна, Швейцария

Необходимо «помочь и поддержать создание региональных исследовательских лабораторий для увеличения международного научного сотрудничества»

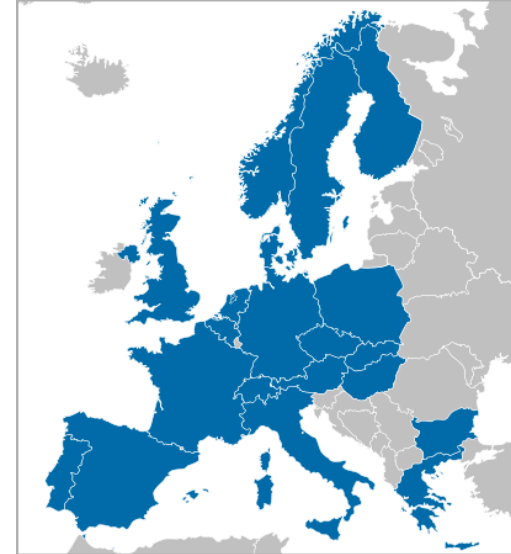
Исидором Раби

1950, V Общая конференции ЮНЕСКО,
Форенции, Италия

- ❑ Декабрь 1951 г. – на межправительственной встрече ЮНЕСКО (Париж) принято решение о создании Европейского совета по ядерным исследованиям
- ❑ В начале 1952 г. 11 стран подписало соглашение о создании временного совета - Conseil Europeen de la Recherche Nucleaire. В октябре было выбрано место – Женева (Швейцария)
- ❑ В июне 1953 референдум жителей кантона Женева одобрил создание центра
- ❑ 29 сентября 1954 года 12 стран-участниц ратифицировали договор о создании Европейской организации по ядерным исследованиям (официальная дата организации)

В настоящий момент в состав ЦЕРН входят

- ✓ 20 стран-участниц
- ✓ 3 страны-кандидата в участники
- ✓ 5 стран-наблюдателей
- ✓ 2 организации-наблюдателя (Европейская Комиссия и ЮНЕСКО)



Около 10000 ученых и инженеров почти 80 стран из 608 научных центров и университетов (половина всех физиков, изучающих микромир) принимают участие исследованиях ЦЕРН

Основные задачи ЦЕРН

“Организация должна обеспечивать сотрудничество между европейскими государствами в области ядерных исследований чисто научного и фундаментального характера. Организация не должна заниматься работами военного предназначения, результаты ее экспериментальных и теоретических работ должны быть публичными и иметь всеобщую доступность.”

Из устава ЦЕРН

Основные направления деятельности:

- Исследования (поиск ответов на основные вопросы о Вселенной)**
- Технологии (продвижении передовых технологий)**
- Сотрудничество (объединение наций посредством науки)**
- Образование (обучение будущих ученых)**

Из чего состоит наш МИР?

Извечный вопрос:

Почему *разные вещи* в нашем мире обладают *схожими характеристиками*? Что *общего* между ними?

Логичный ответ:

Потому что все в нашем мире состоит только из *нескольких фундаментальных частей* -
“кирпичиков” Природы



“Фундаментальных” – это ключевое слово
Это означает **простоту и безструктурность** –
меньше этих “кирпичиков” ничего нет



Вся история физики – это поиск истинной фундаментальности

“Зоопарк” частиц

60-70: Прогресс в физике ускорителей, детекторов, экспериментальной технике



Были открыты более **ста** различных “элементарных” частиц, участвующих в различных взаимодействиях

Необходима была теория, которая объяснила бы весь этот “Зоопарк”



Физики создали такую теорию: **Стандартная Модель** объяснила *что есть мир* and *что удерживает его вместе*.

Простейшая и всеобъемлющая теория, описывающая всю структуру и иерархию частиц, их взаимодействия, на основании фундаментальных кирпичиков (кварков и глюонов)

Зачем нужны ускорители?



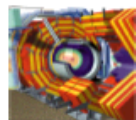
Длина волны пробного излучения должна быть меньше размера объекта

$$\lambda \ll \frac{h}{p} = \frac{hc}{E}$$

Object	Size	Energy of Radiation
Atom	10^{-10} m	0.00001 GeV (electrons)
Nucleus	10^{-14} m	0.01 GeV (alphas)
Nucleon	10^{-15} m	0.1 GeV (electrons)
Quarks	?	> 1 GeV (electrons)

Радиоактивные источники имеют энергию порядка МэВ

Для больших энергий требуются ускорители



“микроскоп” “электронный глаз”

Инструменты



ускорители

LHC
LEP



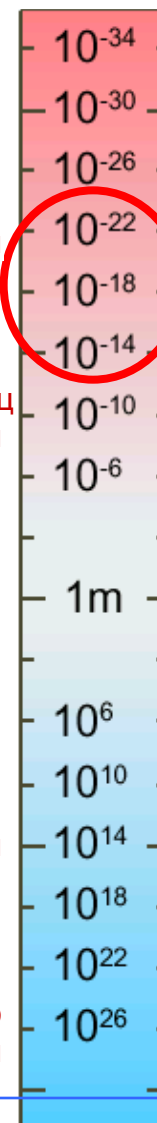
пучки частиц
электронный
микроскоп
микроскоп



телескопы

Радио
телескопы

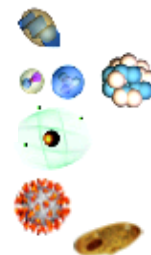
Большой
взрыв



Наблюдаемые

частицы SUSY?
Higgs?
Z/W (range of weak force)

протон
ядро
атом
вирус
клетка



радиус Земли
расстояние до Солнца



Галактики

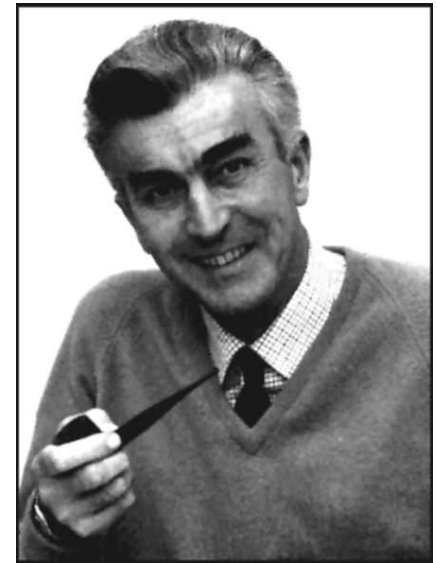
радиус видимой Вселенной



Основные этапы создания ускорительного комплекса ЦЕРН (1954-1981)

- ❑ 1954-1957 – строительство первого ускорителя: протонного синхроциклотрона (SC) на 600 МэВ, с 1964 г. по 1990 г. работал по программе физики тяжелых ионов (PS/ISOLDE)
- ❑ 1959 год – запуск протонного синхротрона (PS)
 - самого мощного на тот момент ускорителя в мире:
 - ✓ энергия протонов до энергий 25 ГэВ, длина 628 м, 277 электромагнитов, включая 100 дипольных магнитов
- ❑ 1967 год – был построен первый в мире коллайдер – ускоритель, в котором осуществляются столкновения встречных пучков частиц (Intersection Storage Rings):
 - ✓ энергия пучков 31.4 ГэВ (≈ 2 ТэВ в лаб. сист.), длина окружности 300 м
- ❑ 1976 год – заработал суперпротонный синхротрон (SpS), который в 1981 году был приспособлен для протон-антипротонных соударений:
 - ✓ энергия протонов до энергий 450 ГэВ, длина 7 км, 1317 электромагнитов, включая 744 дипольных магнитов

Джон Бертрам Адамс



$$E_{c.m} \simeq \sqrt{mc^2 E}$$

**В основе коллайдеров лежат
по крайней мере
два фундаментальных принципа
открытых российскими учеными
в XX веке**

фундаментальный принцип автофазировки

Владимир Иосифович Векслер в 1944 сформулировал принцип автофазировки, дающий возможность существенно повысить предел достижимых энергий в циклических ускорителях

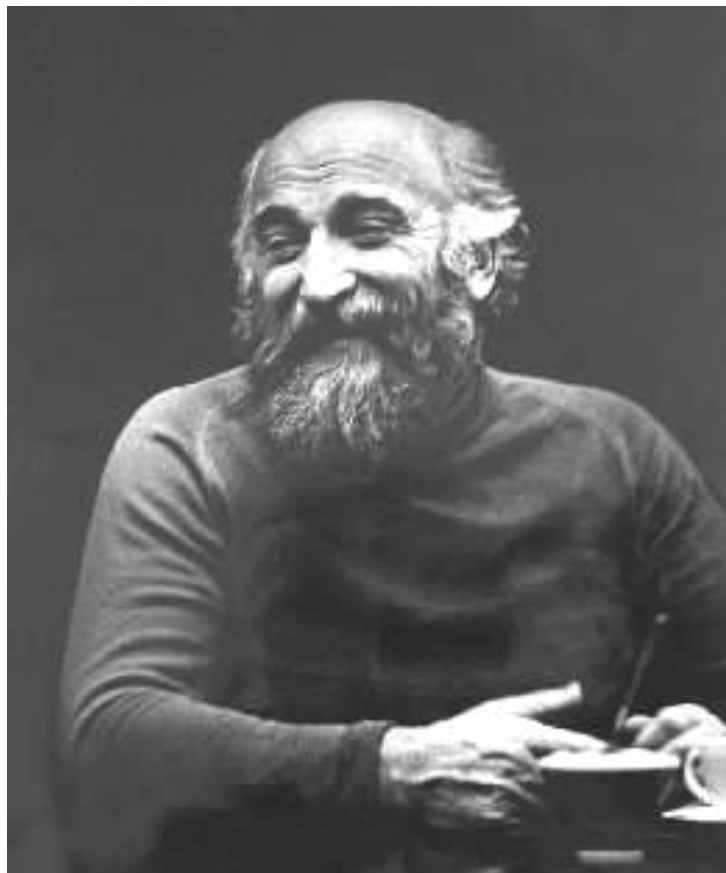
идея заключалась в том, чтобы одновременно с изменением направления электрического поля усиливать магнитное, причем таким образом, чтобы радиус движения заряженной частицы не изменялся



но так как движется не одна частица, а пучок частиц, неизбежно как отставание в движении, так и опережение выход - изменять электрическое поле не в момент амплитудного значения напряжения, а несколько позже



фундаментальный принцип ускорителя на встречных пучках



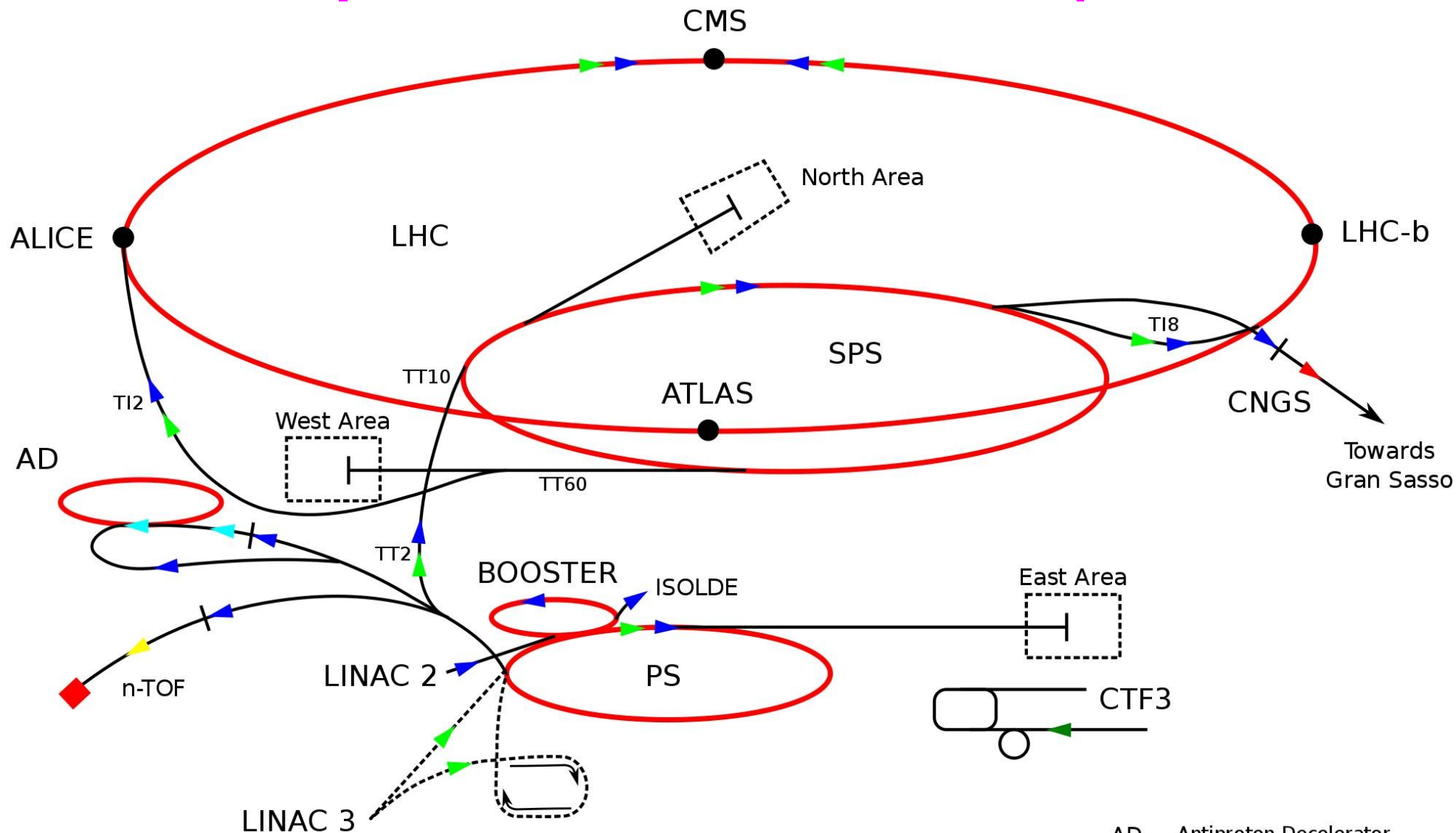
Герш Ицкович Будкер в конце 50-х годов предложил идею ускорителя на встречных пучках, что позволяет удвоить энергию соударения частиц, не увеличивая энергию ускорителя



Основные этапы создания ускорительного комплекса ЦЕРН (1981-2000)

- ❑ 4 апреля 1981 ISR произвел первые в мире столкновения протонов и антипротонов, являясь предварительным ускорителем для более мощной машины – суперпротонного синхротрона – до 1984 г. (при интенсивности $1.4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- ❑ 1986 – начало программы исследований с тяжелыми ионами на SPS (вплоть до 2003 г.)
- ❑ В начале 1980-х годов был предложен проект ускорителя на встречных пучках для столкновения электронов и позитронов при энергии 100 ГэВ – большой электрон-позитронный коллайдер (LEP): длина 27 км, 5176 магнитов, 128 ускорительных секций
- ❑ 1983 – 1988 г.г. - строительство LEP. В точках пересечения встречных пучков ускорителя были построены четыре экспериментальные установки (ALEPH, DELPHI, L3 и OPAL) каждая из которых состояла из большого числа детекторов частиц.
 - ✓ в 1996 энергия LEP была повышена до 200 ГэВ, эксплуатация продолжалась до 2 ноября 2000 г.

Ускорительный комплекс ЦЕРН

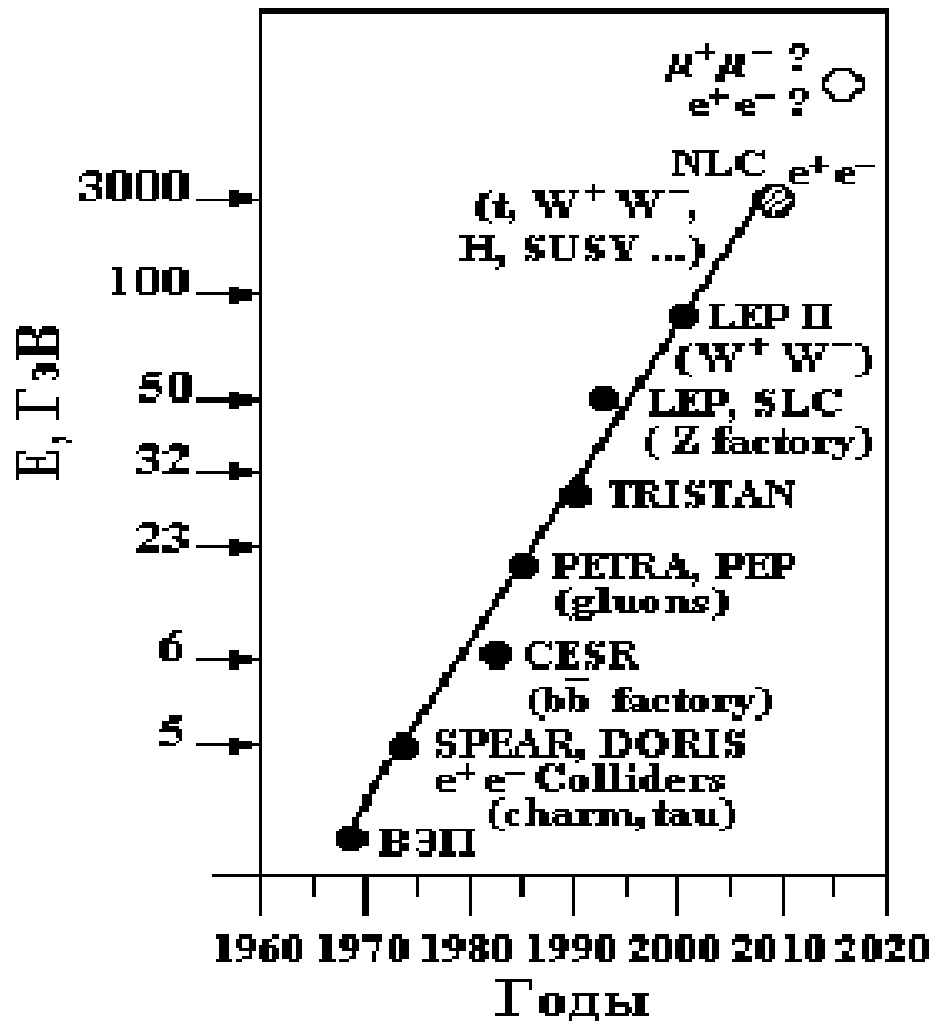


- ▶ protons
- ▶ ions
- ▶ neutrons
- ▶ antiprotons
- ▶ electrons
- ▶ neutrinos

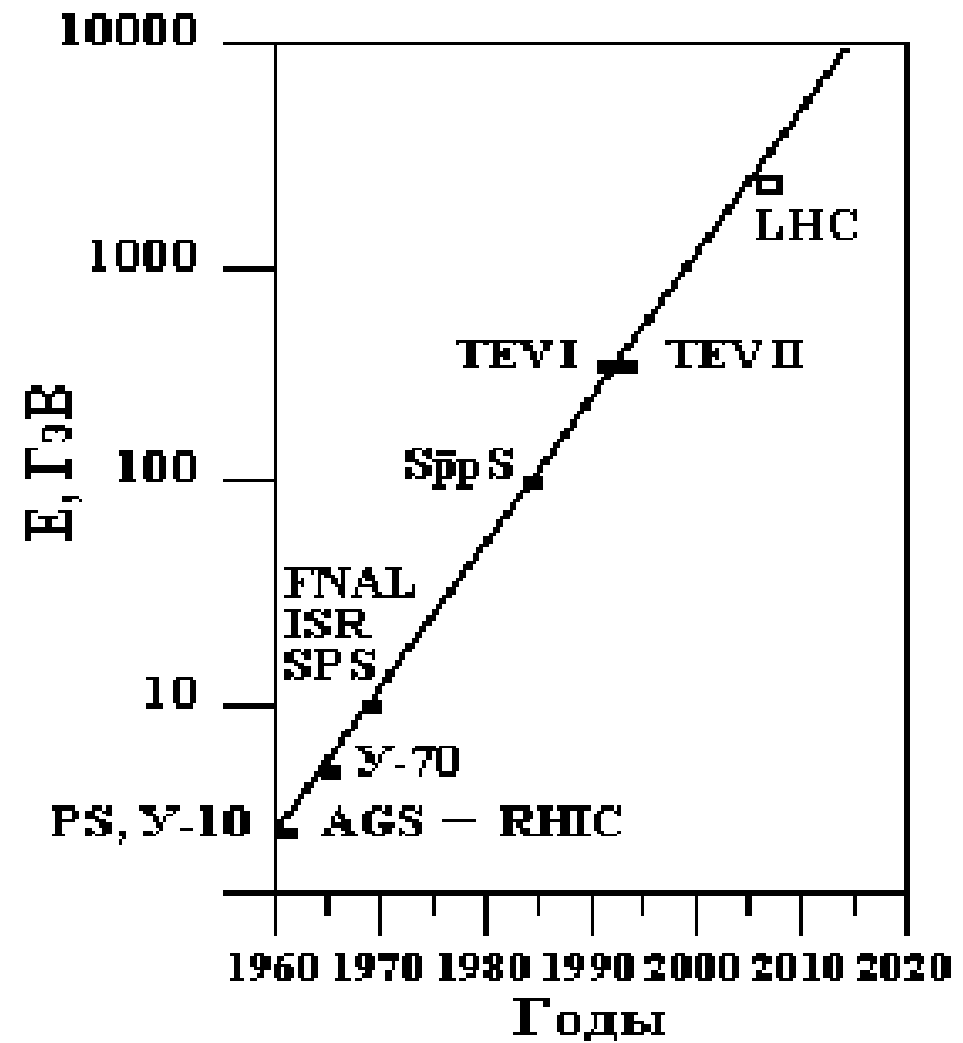
- PS Proton Synchrotron
- SPS Super Proton Synchrotron
- LHC Large Hadron Collider
- AD Antiproton Decelerator
- n-TOF Neutron Time Of Flight
- CNGS CERN Neutrinos Gran Sasso
- CTF3 CLIC Test Facility 3

История ускорителей частиц

Электронные ускорители

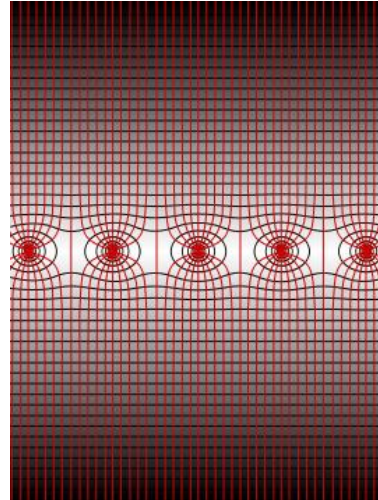
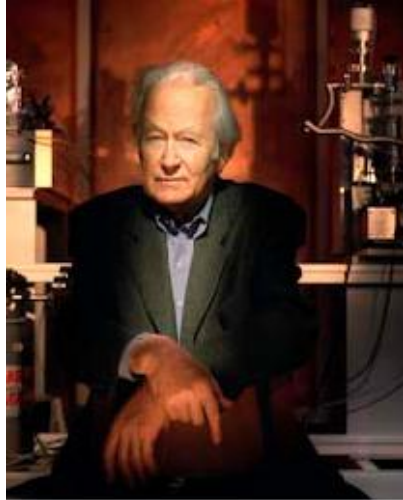


Адронные ускорители

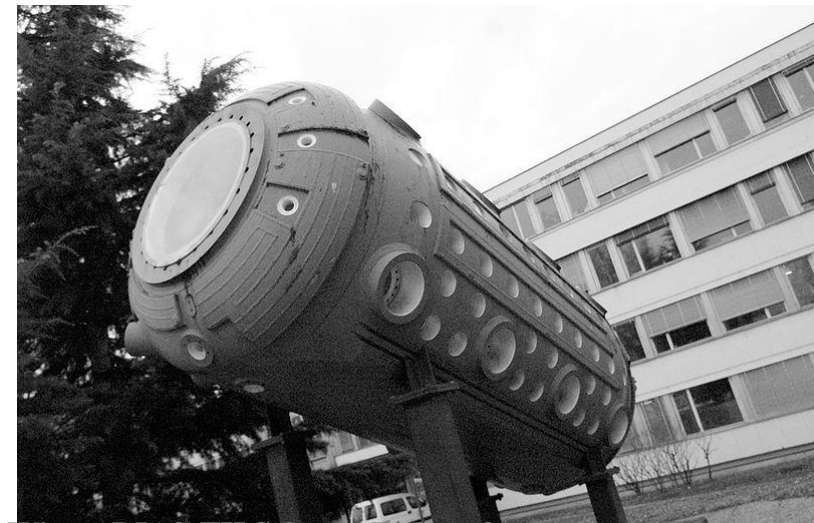


Важнейшие открытия и изобретения ЦЕРН

- 1968 г. – революция в детектирующей аппаратуре: Жорж Шарпак изобрел многопроволочную пропорциональную камеру (Нобелевская премия 1992 г.)

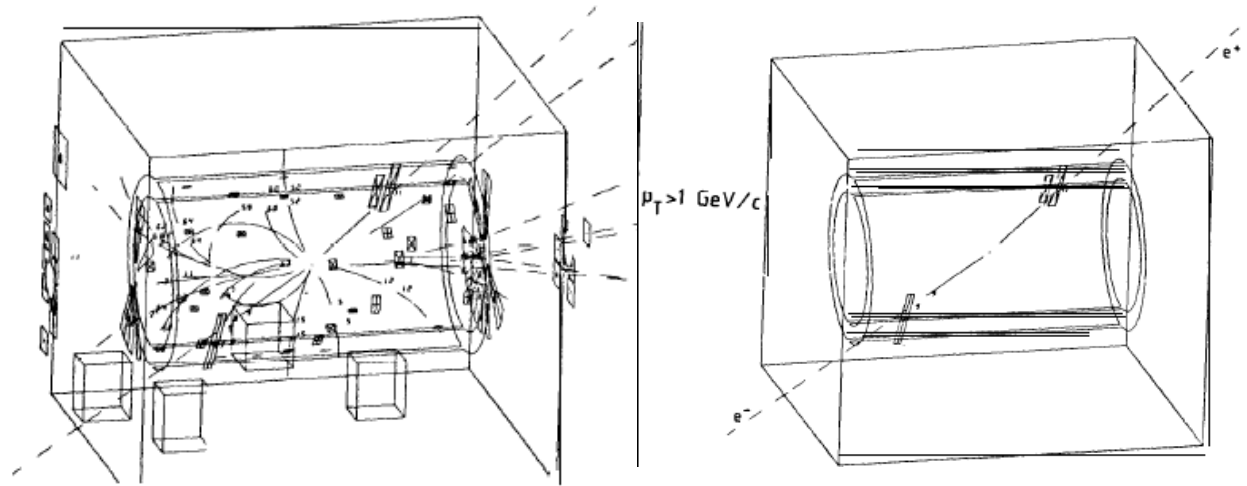
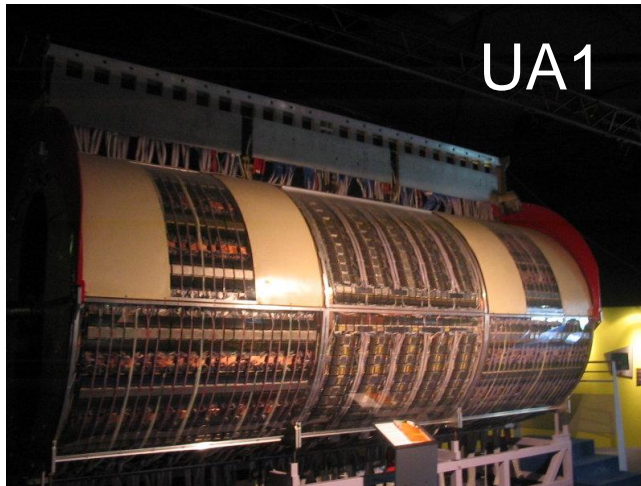


- 1973 г. – открытие нейтральных токов в пузырьковой камере “Гаргамель” в процессах типа $\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^-$, предсказанных А. Саламом, Ш.Глешоу с С.Вайнбергом (Нобелевская премия 1979 г.)



Важнейшие открытия и изобретения ЦЕРН

- 1983 г. – открытие W - и Z -бозонов на SPS под руководством Карло Руббиа и Симона Ван-дер-Меера в экспериментах UA1 и UA2, что привело к подтверждению теории электрослабых взаимодействий (Нобелевская премия 1994 г.)



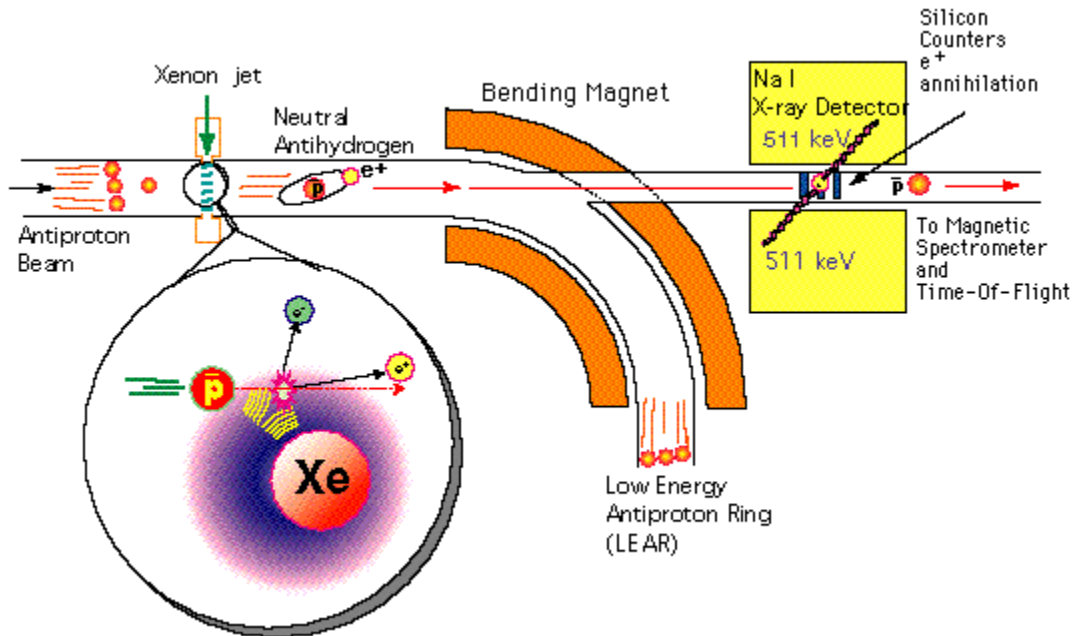
из Нобелевской лекции Карло Руббиа

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1984/rubbia-lecture.pdf

- 1993 г. – точные измерения асимметрии “материя-антиматерия”: эксперимент NA31 обнаружил “прямое” нарушение CP-симметрии. В 2001 г. результаты были подтверждены экспериментом NA48 в распаде нейтральных каонов

Важнейшие открытия и изобретения ЦЕРН

- 1995 г. – первое наблюдение атома антиматерии – атома антиводорода на установке LAER (Low Energy Antiproton Ring)
- 2002 г. – двум экспериментам ATHENA и ATRAP удалось получить тысячи атомов антиводорода в “холодном” состоянии (медленно движущихся) – “удержание” антиматерии



Другие направления исследований ЦЕРН

- ❑ в 1990 году ученый-компьютерщик из Оксфорда, сотрудник ЦЕРН Тим Бернерс-Ли изобрел этот принципиально новый способ свободного доступа в сеть - ЦЕРН подарил нам «Всемирную паутину»



<http://info.cern.ch>

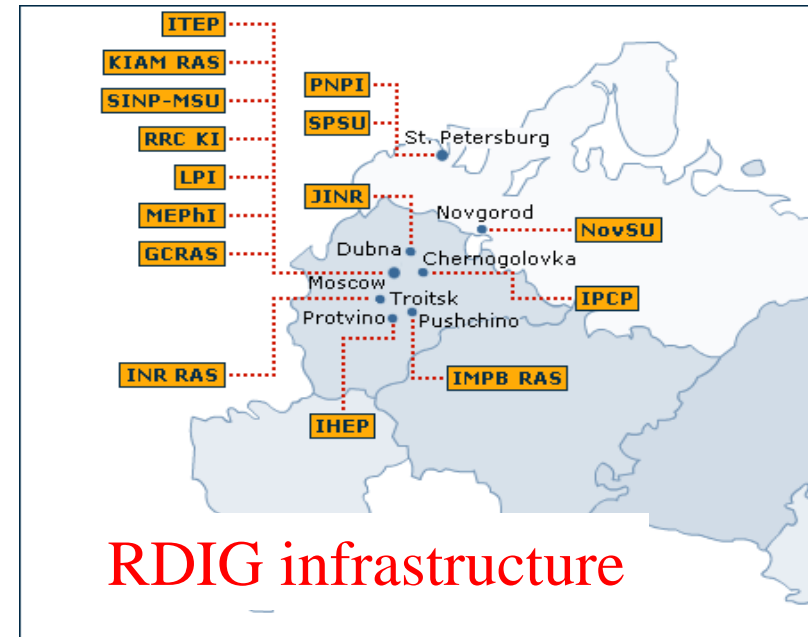
MARCH 2009: A CELEBRATION OF 20 YEARS OF THE WEB
World Wide Web@20
» visit the www@20 site

- ❑ 2000е: Система GRID – расширение WWW
 - ✓ распределенная система обработки, анализа и хранения информации
 - ✓ LHC производит ~ 150 000 DVD/секунду

- ❑ 2000е: позитронная томография (PET) для медицинских приложений

- ❑ Сопутствующие достижения:

- ✓ технология полупроводников,
- ✓ радиационная безопасность, технологии в сфере энергетики и энерго-безопасности, источники излучений для биологии и медицины (синхотронное, нейтроны), новые материалы, криогеника, инженерия, геодезия...
- ✓ информационные технологии, включая информационную безопасность



Большой адронный коллайдер

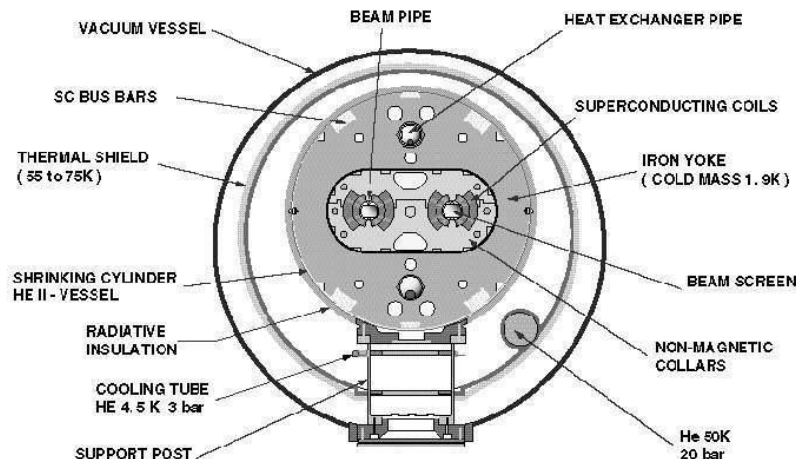


Основные этапы создания ускорительного комплекса ЦЕРН (LHC)

- ❑ Идея нового протонного коллайдера возникла в начале 80-х
- ❑ В 1984 на симпозиуме в Лозане были созданы рабочие для проработки различных аспектов создания LHC
- ❑ 16 декабря 1991 года Совет ЦЕРН одобрил проект ускорителя нового поколения – Большого адронного коллайдера (LHC)



Карло Руббиа



Жоржио Брианти

Проект LHC

LHC FAQ

<https://cdsweb.cern.ch/record/1165534/files/CERN-Brochure-2009-003-Eng.pdf>

Столкновения пучков протонов при энергии **7+7 ТэВ**.

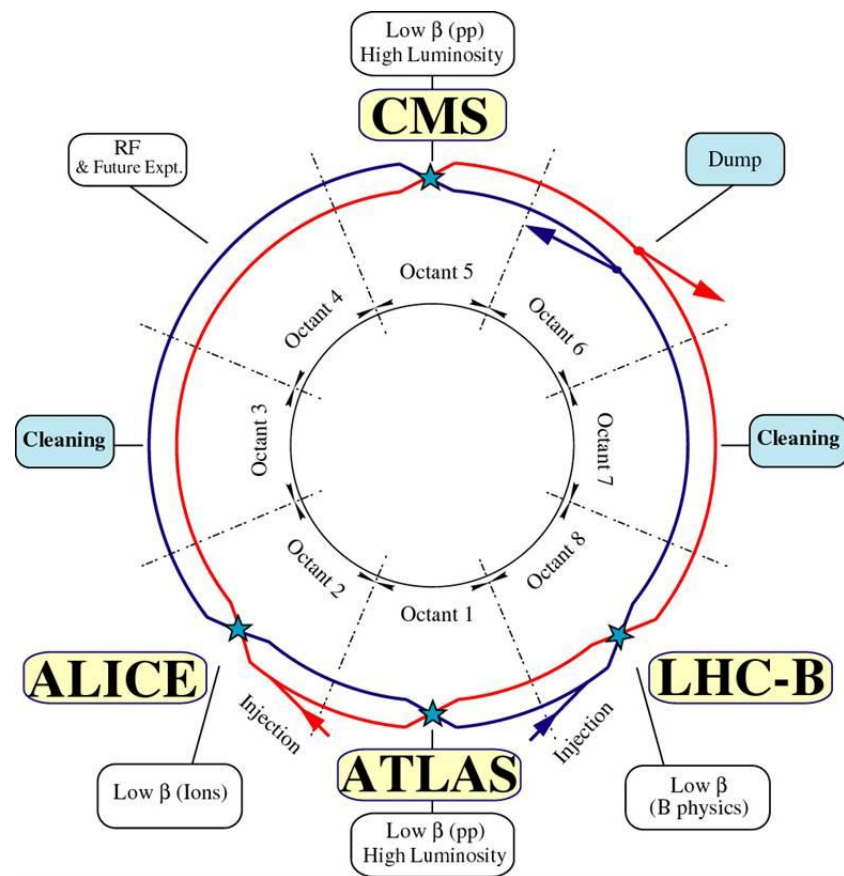
Каждый пучок состоит из **2835** сгустков, содержащий **10^{11}** протонов.

Это обеспечивает **600 миллионов** столкновений в секунду (интенсивность на единицу площади **$10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$** или **100 фбн-1 в год** интегральной светимости)

Предусмотрены эксперименты на пучках ядер свинца при энергии **5.62 ТэВ** (что обеспечивает температуру в т.в. в **100 000** раз больше температуры в центре Солнца) и при светимости интенсивности на единицу площади **$10^{28} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$**

Общая длина – **26 659 м**, давление внутри LHC **10^{-13} атм.** (в **10** раз меньше давления на Луне)

9593 магнитов (в том числе **1232** дипольных магнита по **15 м** и **392** квадрупольных магнита), охлажденных до **1.9 К (-271.3 0С)** с помощью **10 080 тонн** жидкого азота, расчётное потребление энергии составит **180 МВт**



Quantity	number
Circumference	26 659 m
Dipole operating temperature	1.9 K (-271.3°C)
Number of magnets	9593
Number of main dipoles	1232
Number of main quadrupoles	392
Number of RF cavities	8 per beam
Nominal energy, protons	7 TeV
Nominal energy, ions	2.76 TeV/u (*)
Peak magnetic dipole field	8.33 T
Min. distance between bunches	~7 m
Design luminosity	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
No. of bunches per proton beam	2808
No. of protons per bunch (at start)	1.1×10^{11}
Number of turns per second	11 245
Number of collisions per second	600 million

(*) Energy per nucleon

Construction costs (MCHF)	Personnel	Materials	Total
LHC machine and areas ^{*)}	1224	3756	4980
CERN share to detectors	869	493	1362
LHC computing (CERN share)	85	83	168
Total	2178	4332	6510

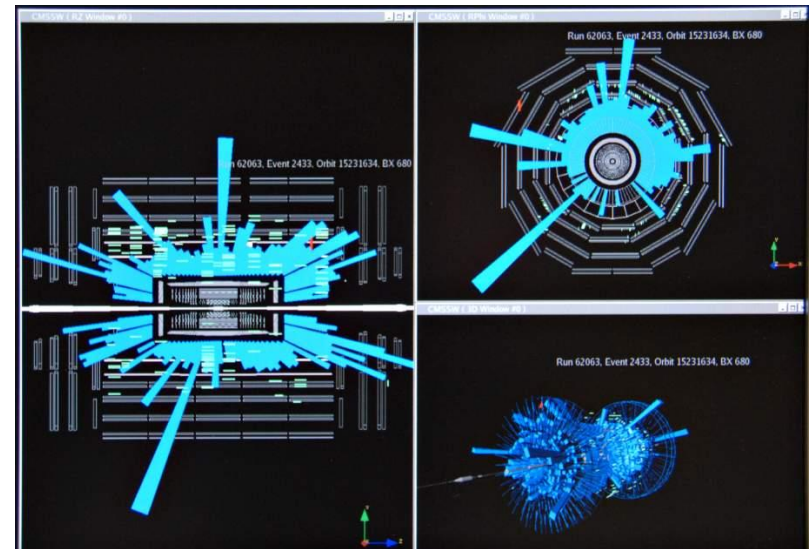
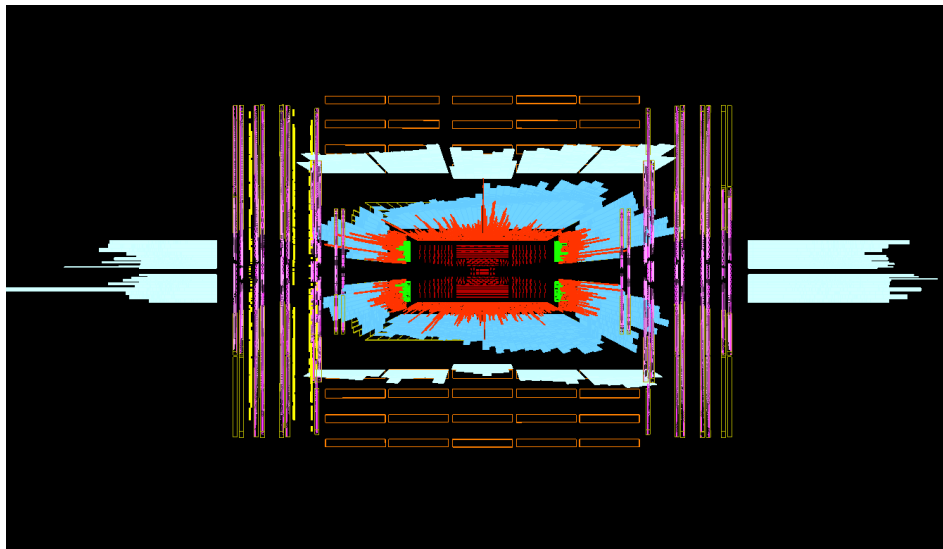
Участие России

- Сотрудничество ЦЕРН с Россией началось в 1960-х годах, когда европейские физики приехали в ИФВЭ (Протвино), чтобы принять участие в исследованиях на самом мощном по тем временам ускорителе (76 ГэВ).
- В 1974 году в ЦЕРН построили ускоритель SPS мощностью 400 ГэВ, российские физики из многих научно-исследовательских институтов приняли участие в 20 проводимых на нем экспериментах.
- Участие в создании LHC и крупнейших экспериментов ALICE, ATLAS CMS и LHCb
 - **важнейшее направление Национальной программы России по физике частиц**, как определено на заседании комитета научной политики национальных российских программ по физике высоких энергий и фундаментальной ядерной физике в Сарове (Арзамас-16) в октябре 1995 г.

В проекте принимает участие до 700 специалистов из России.

Этапы создания ЛНС

- Декабрь 1994 – 2008 - создание
- 10 сентября 2008 – 1-ый запуск при энергии пучков 450 ГэВ
- 20 ноября 2009 – 2-ой запуск при энергии пучков 450 ГэВ
- 23 ноября 2009 – первые столкновения при энергии 900 ГэВ
- 30 ноября 2009 – рекордная энергия пучков 1,18 ТэВ
- первые столкновения при энергии 2,36 ТэВ
- январь 2010 – первые научные публикации



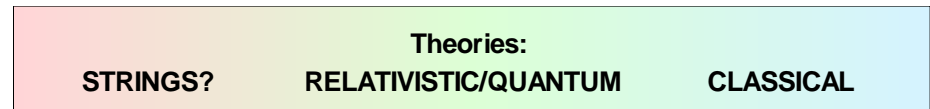
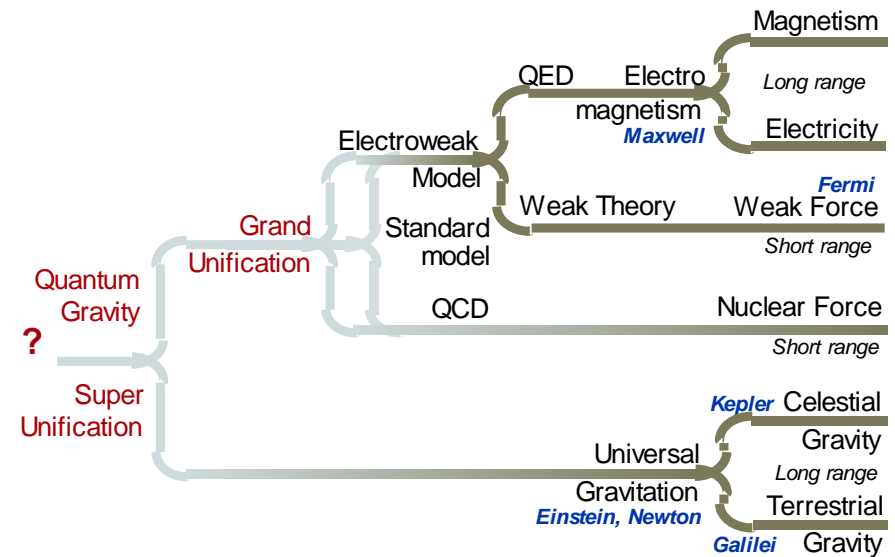
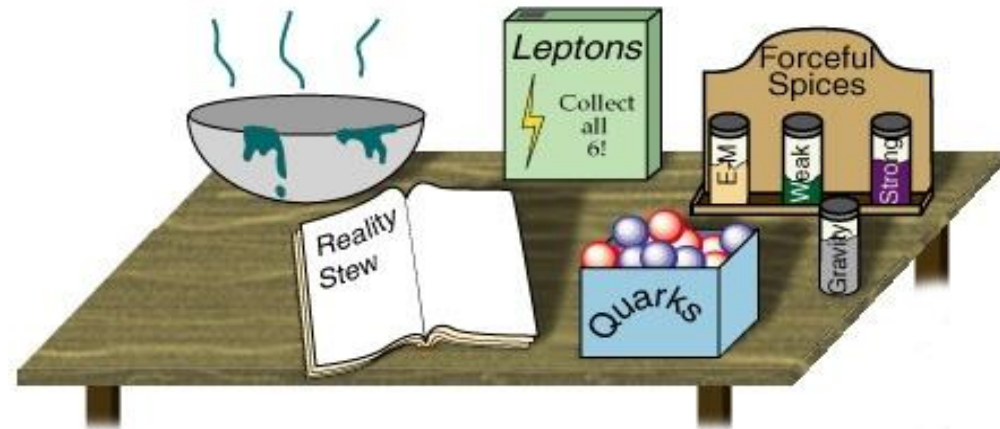
Что было до LHC?

Стандартная Модель

Три поколения материи (Фермионы)

	I	II	III	
масса →	2,4 МэВ	1,27 ГэВ	171,2 ГэВ	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название →	u верхний	c очаровательный	t истинный	γ фотон
Кварки	4,8 МэВ	104 МэВ	4,2 ГэВ	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d нижний	s странный	b прелестный	g глюон
Лептоны	<2,2 эВ	<0,17 МэВ	<15,5 МэВ	91,2 ГэВ
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	Z слабое взаимодействие
	0,511 МэВ	105,7 МэВ	1,777 ГэВ	80,4 ГэВ
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e электрон	μ мюон	τ тау	W[±] слабое взаимодействие

Бозоны (переносчики взаимодействия)



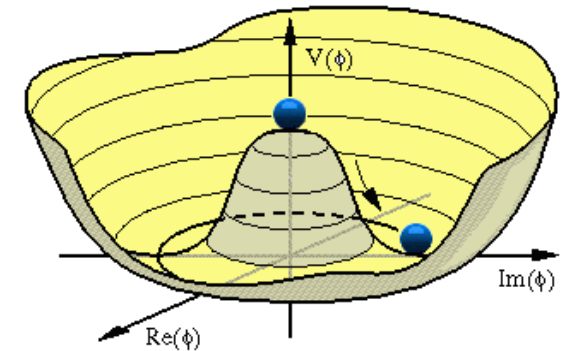
Почему мы считаем, что за пределами
Стандартной модели что-то есть ?

Мотивация 1: Бозон Хиггса

Стандартная Модель (СМ) сильных и электрослабых взаимодействий находится в отличном согласии с экспериментальными данными

Проблема генерации масс частиц теоретически решается посредством механизма Хиггса

НО



масса бозона Хиггса в рамках СМ не предсказывается

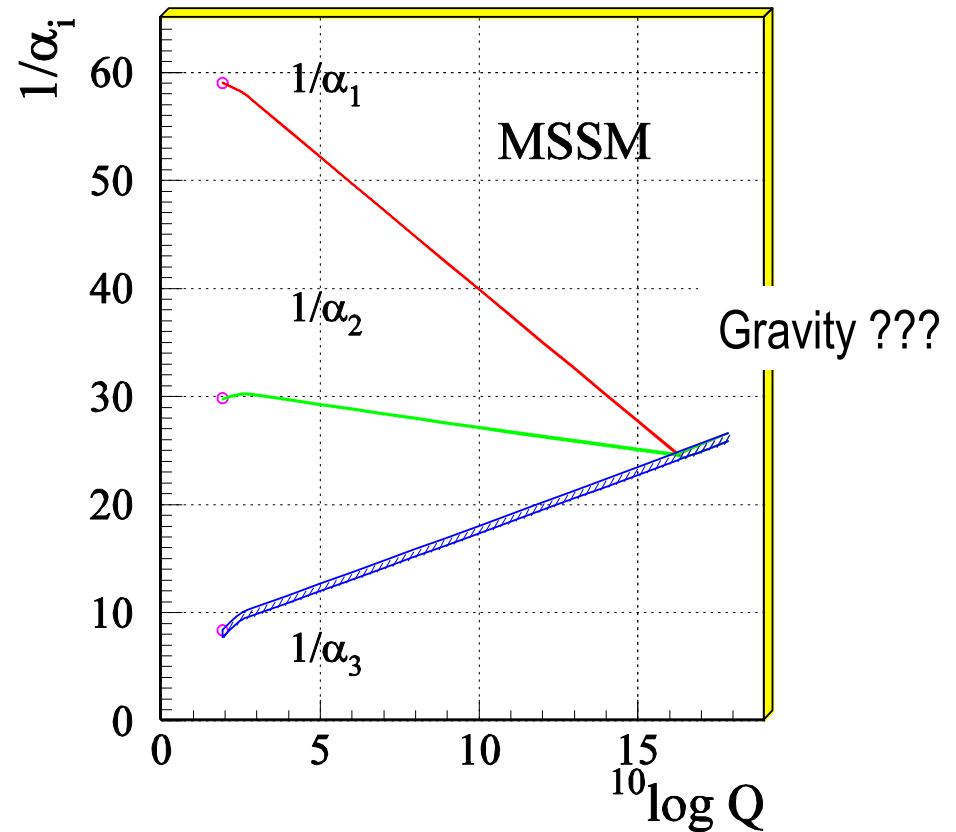
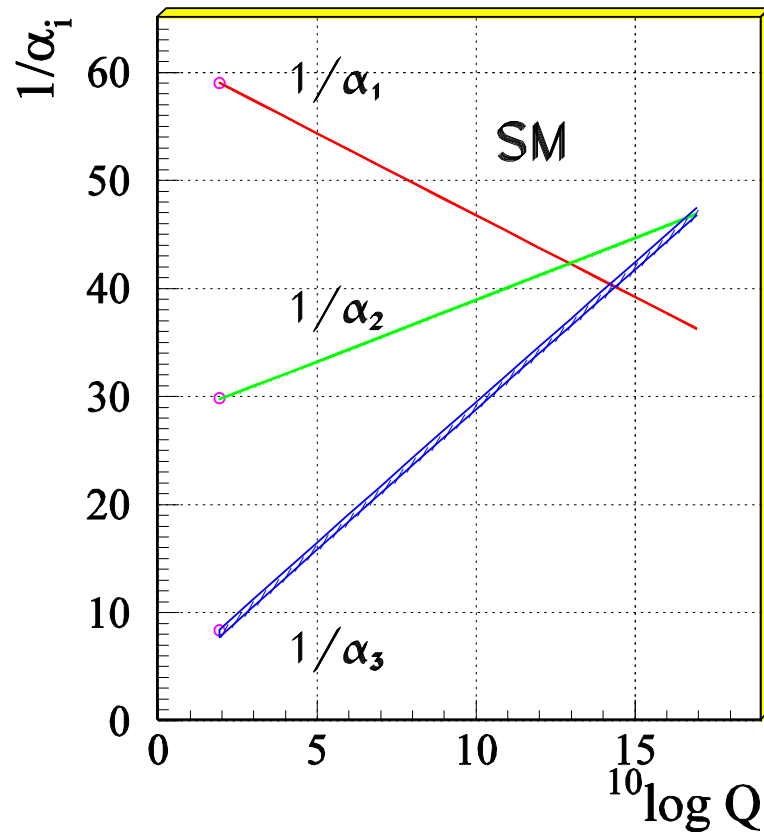
(можно только сделать не прямые оценки из некоторых теоретических предположений и экспериментальных фитов: $m_H > 114$ ГэВ)

Поэтому одной из основных задач экспериментов на LHC является поиск бозона хиггса СМ и ее расширений (MSSM)

если бозон Хиггса будет обнаружен, что дальше?

Мотивация 2: является ли СМ “окончательной” теорией?

Объединение констант взаимодействий в СМ и минимальной суперсимметричной моделях (MSSM)



Вклад суперпартнеров изменяют характер поведения “бегущих” констант :

Объединение констант происходит, если $M_{SUSY} \sim 1 \text{ ТэВ} !!!!$

Мотивация 3: три поколения

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
	I	II	III
	The Generations of Matter		

Вся видимая материя Вселенной состоит из двух кварков (up кварка, down кварка) и электронов.

Тем не менее известны еще 4 кварка и 4 лептона.

Кварки и лептоны объединены в различные наборы, названные **поколениями** материи.

Три поколения выстроены в порядке возрастания масс, входящих в них частиц

Но: Почему три?

Зачем нужны остальные два поколения?

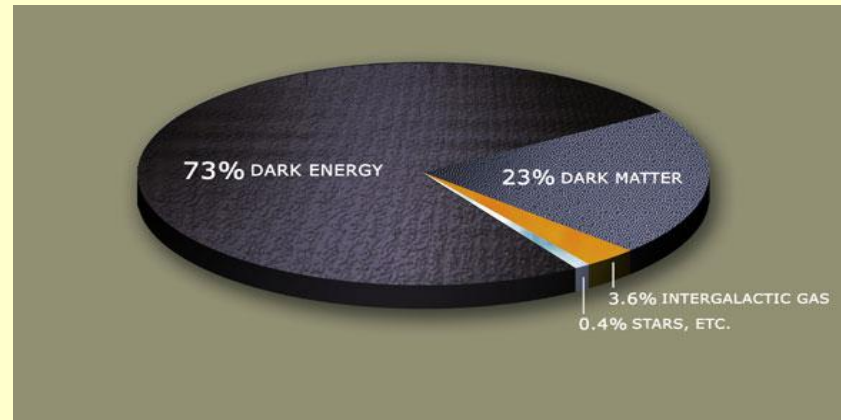


Мотивация 4: “белые” пятна СМ

- ❑ СМ не описывает гравитацию
- ❑ Проблема иерархии - большой разрыв между масштабом электрослабых взаимодействий (10^3 GeV) и масштабом Великого объединения (10^{16} GeV)
- ❑ Большое число свободных параметров, которые не могут быть зафиксированы самой СМ

Космологические открытые вопросы

- ❑ Что (и как) вызвало инфляцию Вселенной на начальных стадиях?
- ❑ Из чего состоит темная материя Вселенной?



- ❑ Почему Вселенная состоит из Вещества? (проблема CP-нарушения в ранней Вселенной и источник доминирования вещества над антивеществом)
- ❑ Почему M_{GUT} близко к M_{Pl} ?

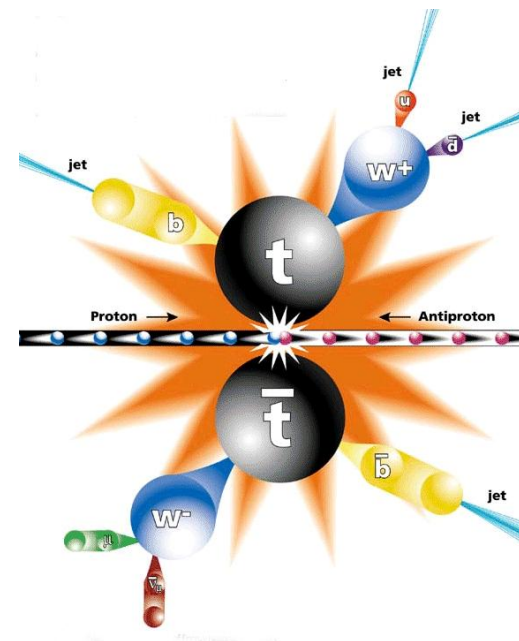
Возможные пути решения

- ❑ **Расширенные калибровочные модели**
основанные на более общих симметриях, чем $SM - E_6$ or $SO(10)$
- ❑ **Суперсимметрия**
асимметрия между фермионными и бозонными полями
⇒ должна быть нарушена на низкоэнергетическом масштабе (? ТэВ)
- ❑ **Теория струн**
многомерность Вселенной - $(9+1)$ измерение
один параметр - M_{Pl}

Что мы хотим найти за границами Стандартной модели

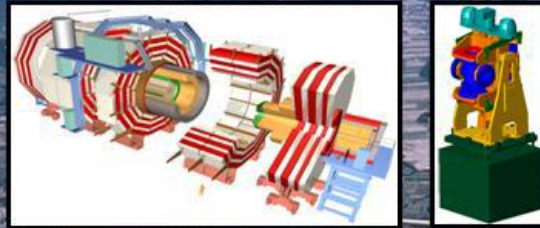
Являясь выдающимся событием на долгом пути поиска истины, Стандартная Модель тем не менее не является всеобъемлющей теорией

- Стандартная модель не описывает гравитацию
- Происхождение массы фундаментальных “кирпичиков” (кварков, лептонов)
- Почему существует три поколения частиц материи
- Причины доминирования материи над антиматерией и образования наблюдаемой структуры Вселенной
- Источник темной материи во Вселенной
- Возможность унификации трех сил

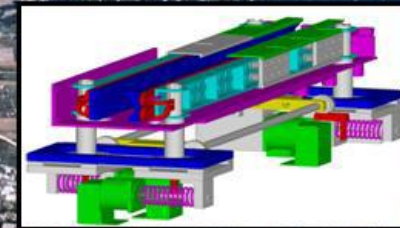
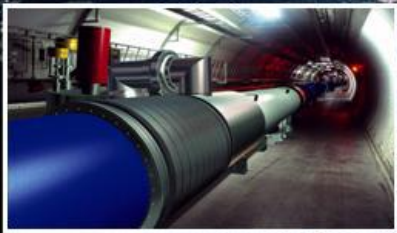


Мы надеемся получить ответы на эти вопросы хотя бы частично с помощью ускорителей нового поколения

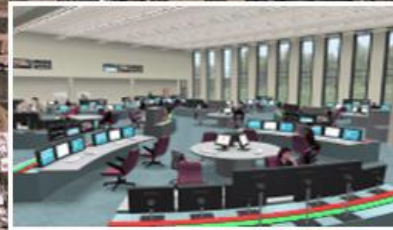
Четыре эксперимента на LHC



Compact Muon Solenoid (CMS)
+ TOTEM (TOTAL Elastic and
diffractive cross section Measurement)



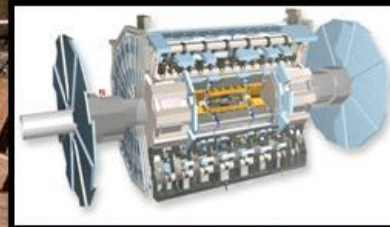
LHC-B



LHCf



A Large Ion Collider
Experiment (ALICE)



A Toroidal LHC Apparatus (ATLAS)

ATLAS и CMS – многоцелевые экспериментальные установки, нацеленные на решение всего спектра физических задач LHC

CMS

LHCb предназначен для измерения параметров CP-нарушения в распадах тяжелых частиц, содержащих b-кварк (B-мезоны) – загадка антиматерии и материи

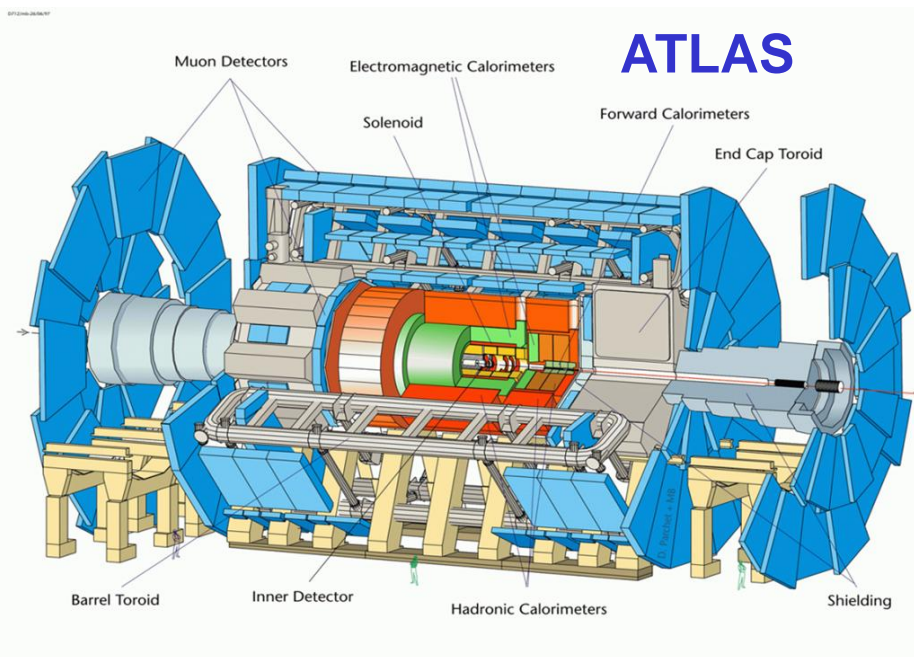
**14 км
15 минут**

ALICE сконструирован для изучения свойств сильновзаимодействующей ядерной материи и поиска кварк-глюонной плазмы

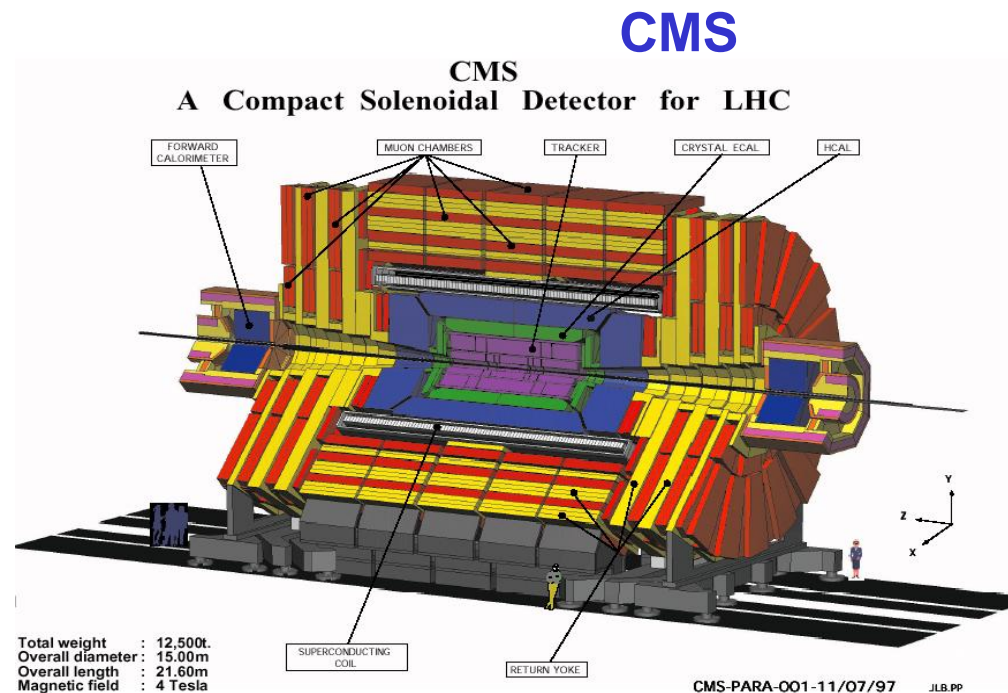
**ЦЕРН
здание 40**



Эксперименты ATLAS и CMS



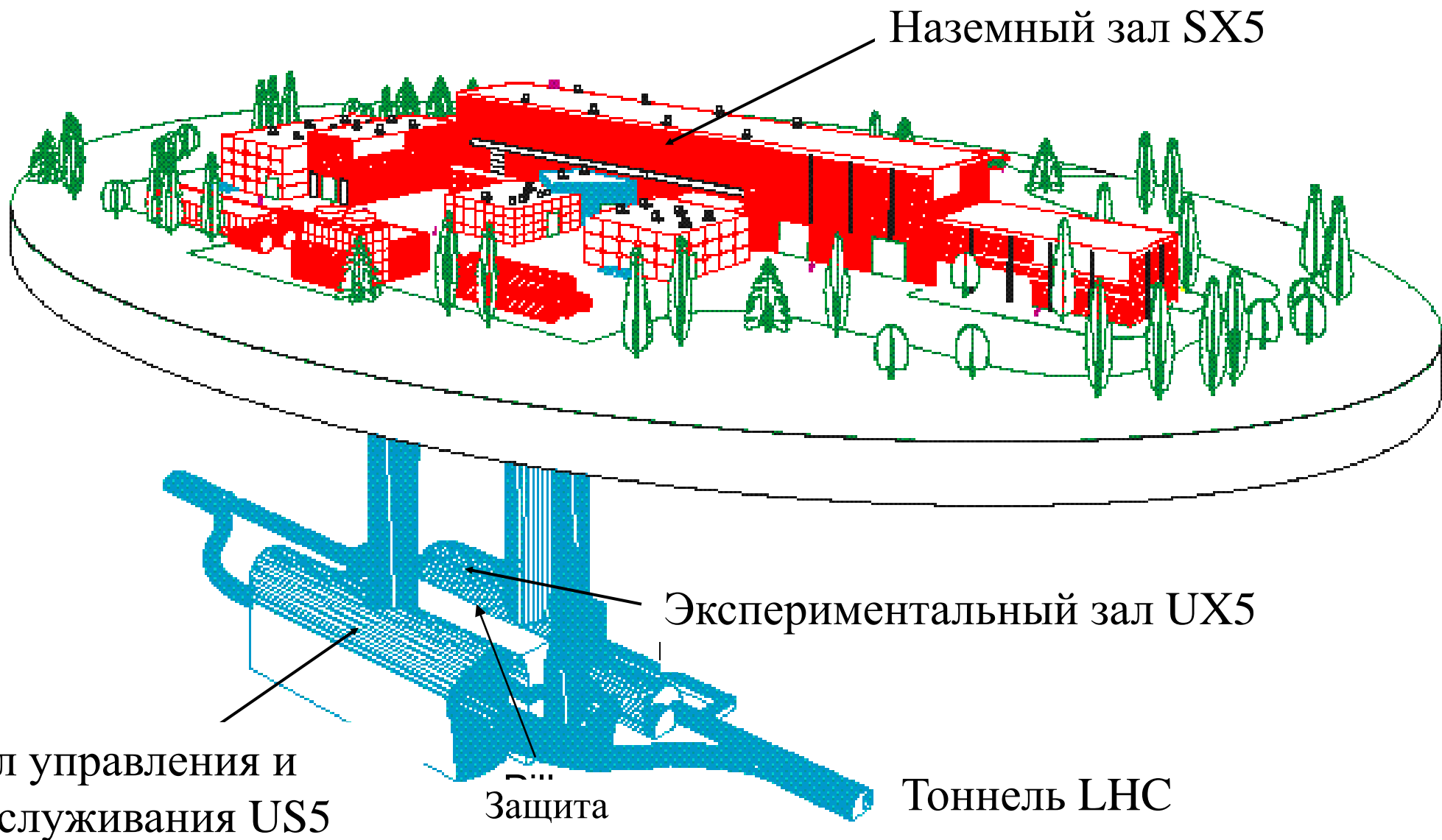
Вес	7000 t
Диаметр	25 m
Длина центрального тороида	26 m
Общая длина	46 m
Магнитное поле	2 Tesla



Вес	12 500 t
Диаметр	15.00 m
Длина	21.6 m
Магнитное поле	3.9 Tesla

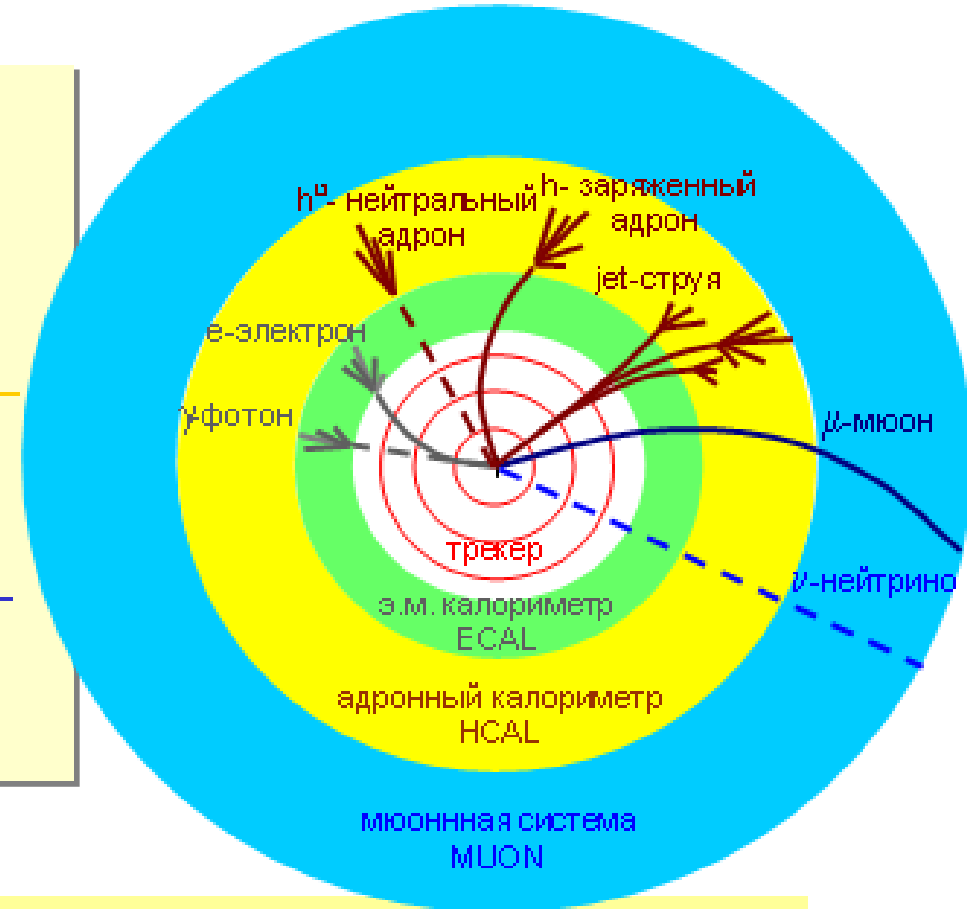
Детекторные системы спроектированы для измерения: энергии и импульса фотонов, электронов, мюонов и струй до значений нескольких ТэВ

Наземный и подземные комплексы CMS



Принцип “Матрешки” – 4 π структуры детектирующих слоев в магнитном поле

- **Трекер** – легкое вещество
- **ECAL** – активное вещество с максимально возможным зарядом Z – сцинтиллирующие кристаллы PWO
- **HCAL** – тяжелое вещество поглотителя – латунь, прослоенная активной средой – пластическим сцинтиллятором
- **Muon** – тяжелое вещество поглотителя – железо возвратного ярма магнита и координатные газовые камеры








- Ни один слой отдельно не может решить задачу идентификации и измерения параметров всех частиц
- Только в совокупности слоев возможно восстановление всей картины первичного взаимодействия

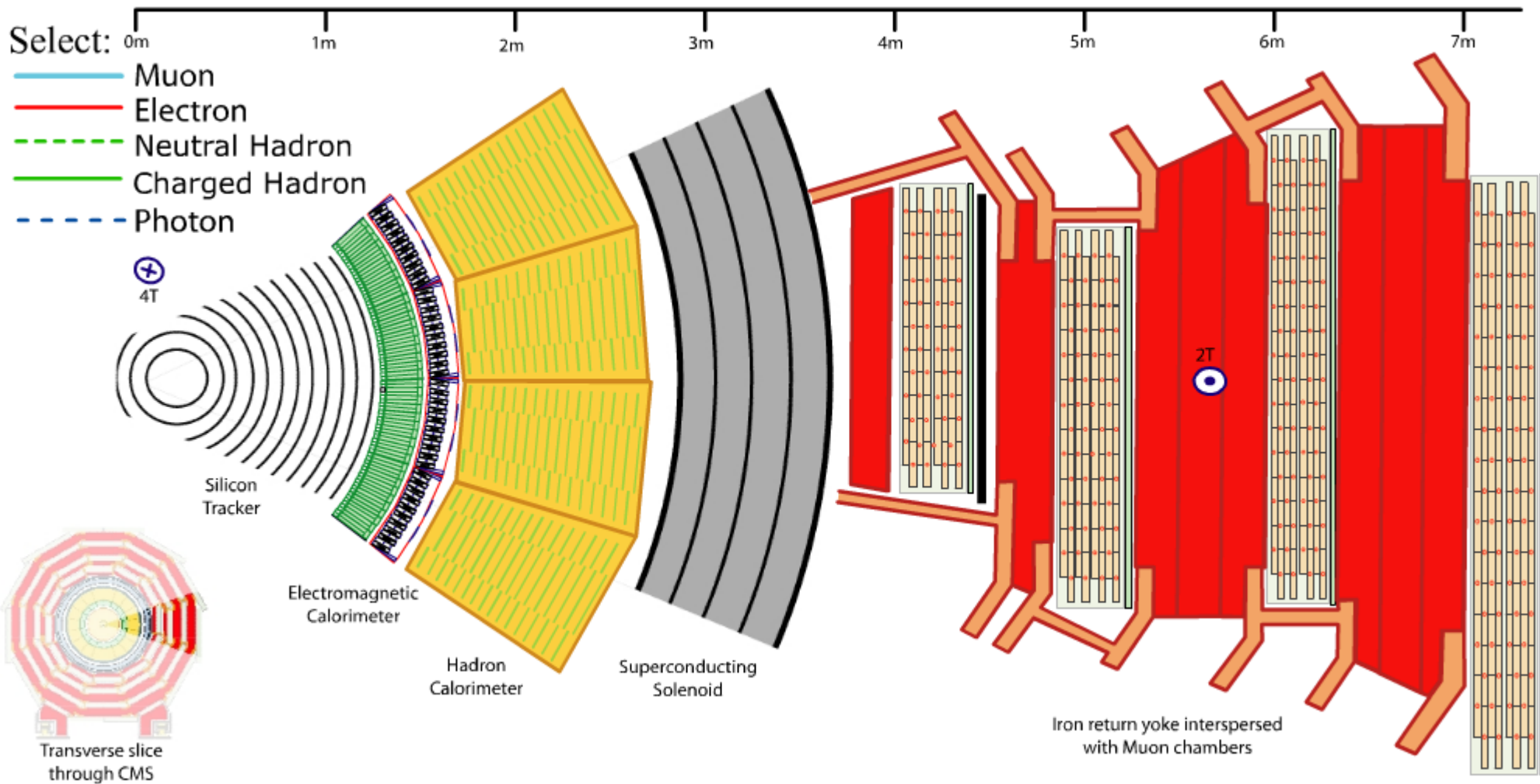
Регистрация фундаментальных частиц

Фундаментальные частицы СМ в конечном состоянии дают сигналы:

γ	γ (ЭМ ливень в ECAL, нет трека)
e	e (ЭМ ливень в ECAL с треком в трекаре)
μ	μ (трек в трекаре и мюонных камерах)
g	струи в ECAL+ HCAL
$q = u, d, s$	струи (узкие) в ECAL+HCAL
$q = c, b$	струи (узкие) + вершина распада
$t \rightarrow W + b$	$W + b$
$\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$	недостающая энергия в ECAL+HCAL
$\tau \rightarrow l + \nu_\tau + \nu_l$	недостающая энергия + заряженный лептон
$W \rightarrow l + \nu_l$	недостающая энергия + заряженный лептон + $E_t \sim M/2$
$Z \rightarrow l^+ + l^-$	пары заряженных лептонов
$\rightarrow \nu_l + \nu_l$	недостающая энергия в ECAL+HCAL

type	tracking	ECAL	HCAL	MUON
γ				
e				
μ				
Jet				
E_t miss				

Прохождение частиц через детектирующие системы (пример установки CMS)



Детекторные системы CMS

Компактный Мюонный Соленоид - CMS

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СОЛЕНОИД

диаметр 15 м
длина 21.6 м
поле 4 Тесла

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАЛОРИМЕТР

сцинтиллирующие кристаллы $PbWO_4$
76 тыс. каналов
кремниевый стриповый предливневый детектор
18 кв. метров, 144 тыс. каналов

АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР

пластический сцинтиллятор/латунь
8 тыс. каналов

ВОЗВРАТНОЕ ЯРМО

ТРЕКЕР

Кремниевые микростриповые
и пиксельные детекторы
223 кв. метров
10 млн. каналов

МЮОННАЯ СИСТЕМА: ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ

камеры из дрейфовых труб
250 камер
192 тыс. каналов

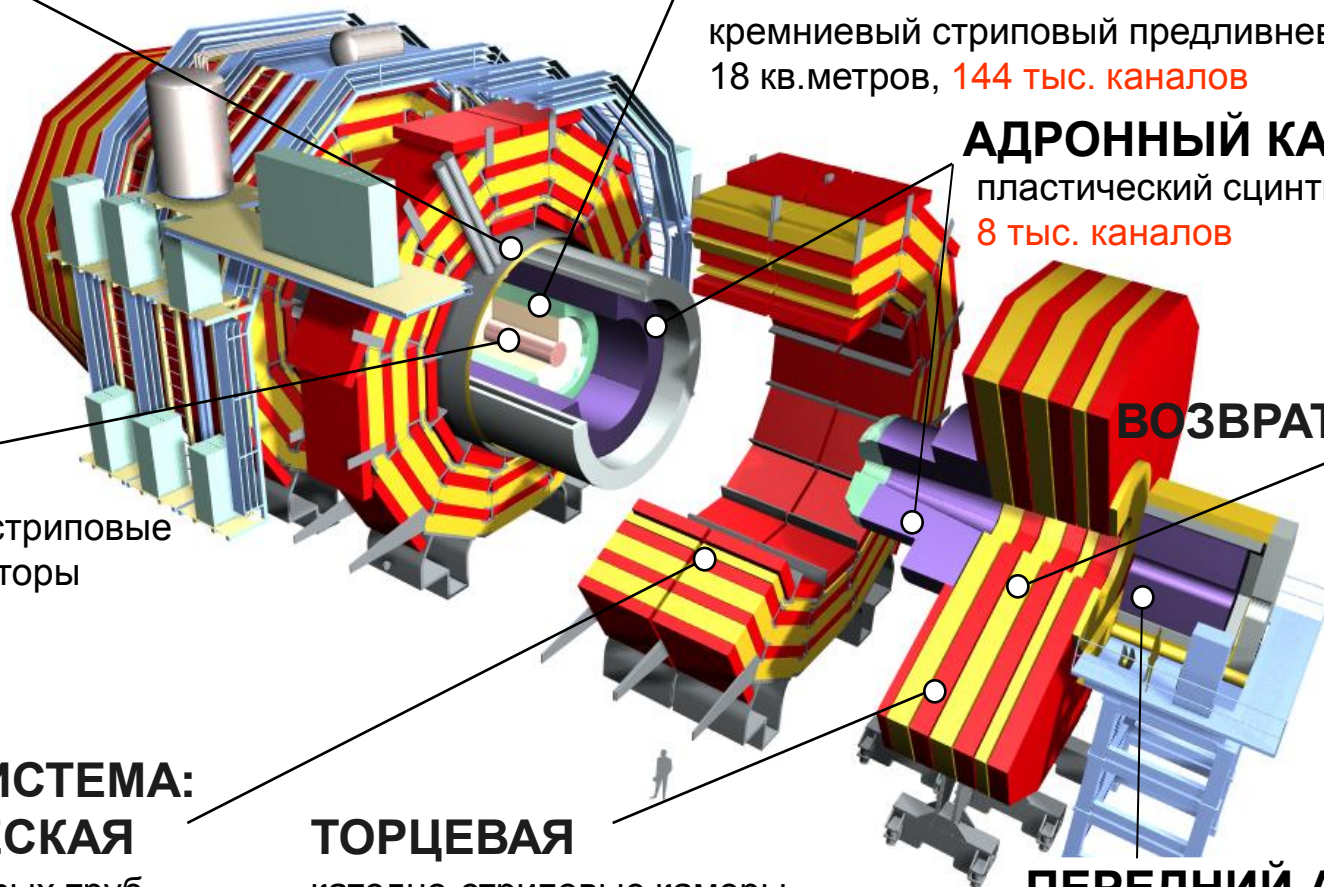
Резистивные планарные камеры для триггера - RPC - 760 камер

ТОРЦЕВАЯ

катодно-стриповые камеры
540 камер
310 тыс. каналов

ПЕРЕДНИЙ АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР

кварцевое волокно/железо
2 тыс. каналов

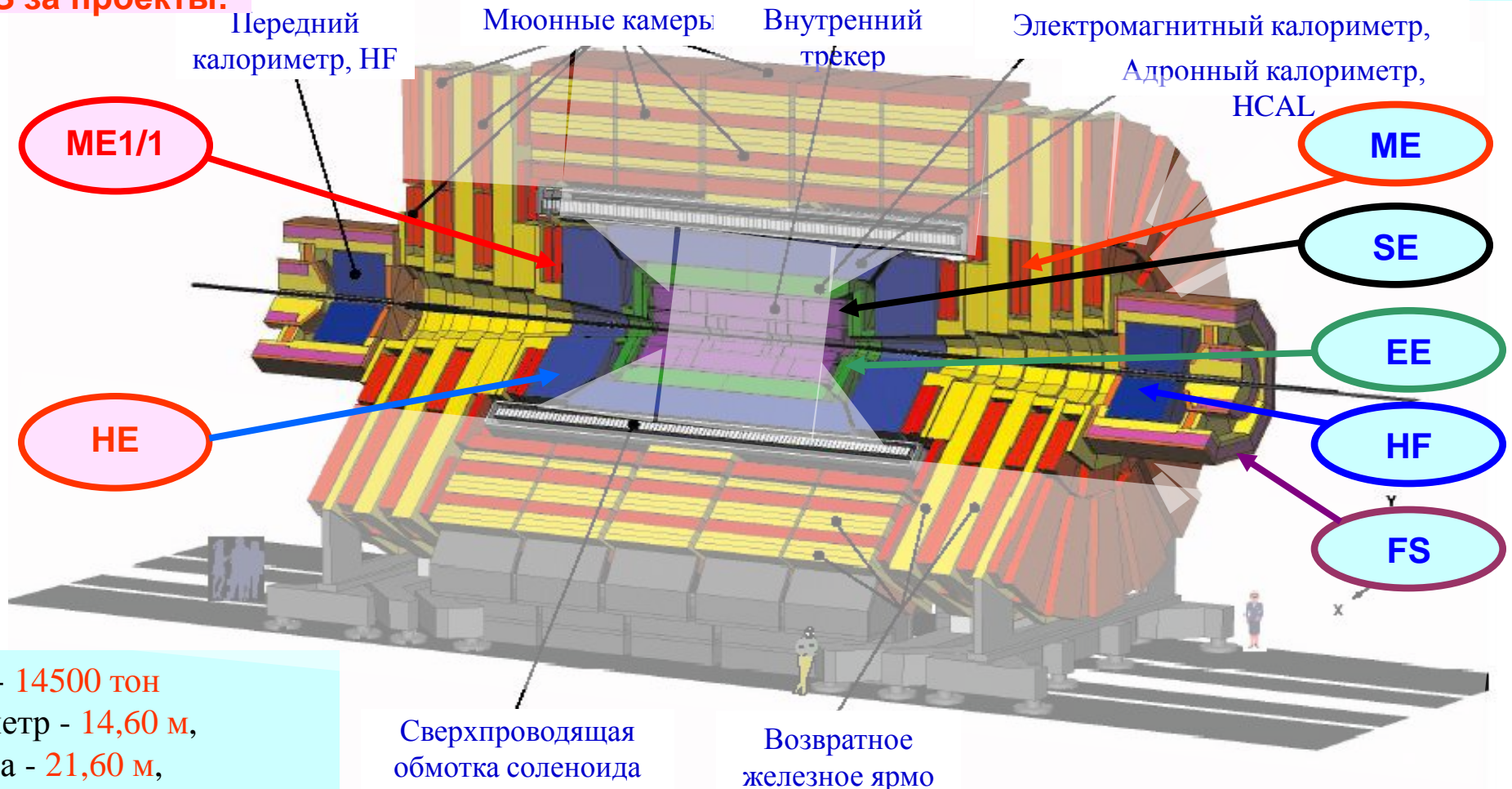


Участие российских институтов в проекте CMS направлено в основном на создание торцевой системы детекторов, которая размещается внутри соленоида с полем 4 Тесла и измеряет энергии и импульсы частиц с помощью калориметров и трековых детекторов

Полная ответственность RDMS за проекты:

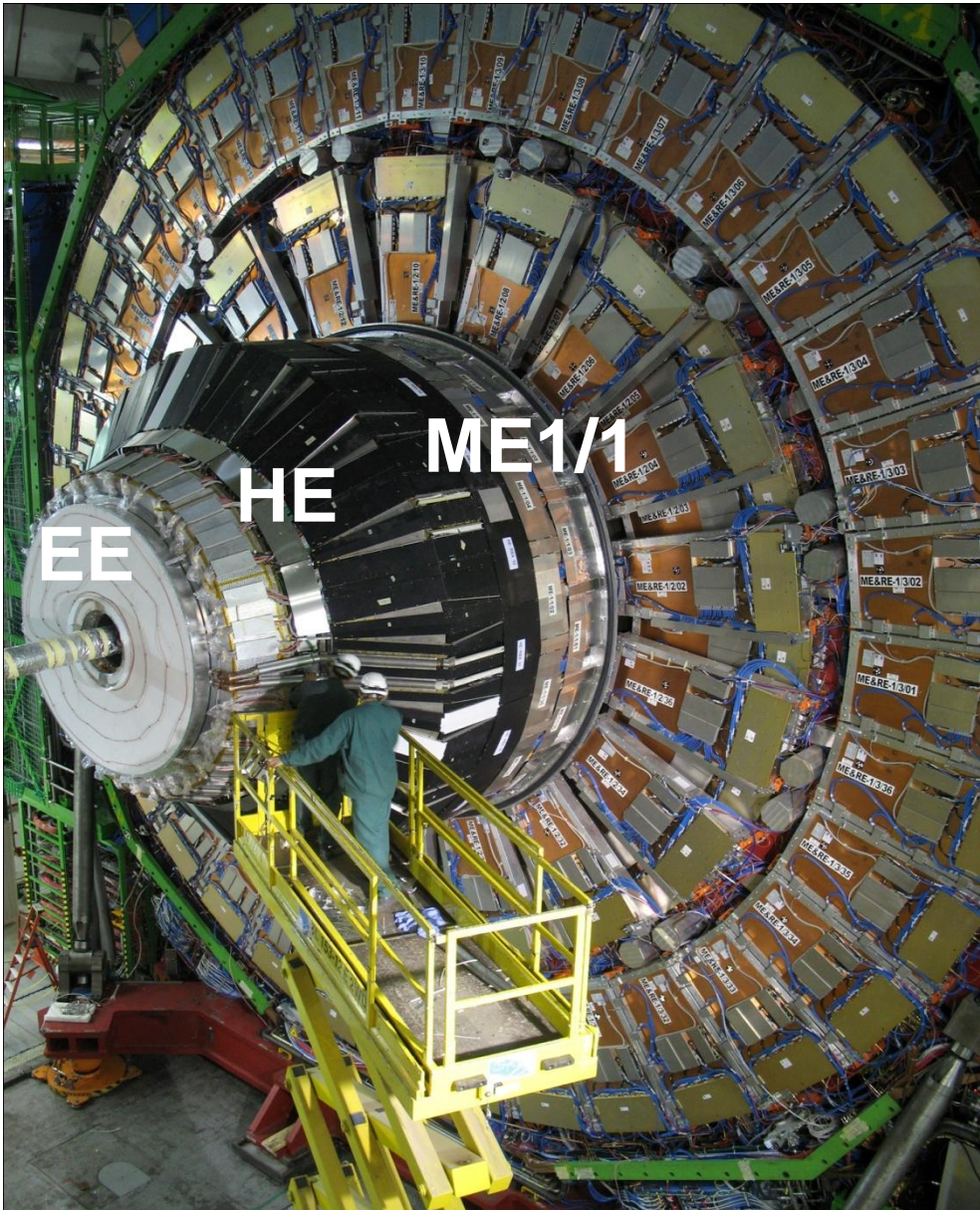
Участие RDMS в проектах:

**CMS
A Compact Solenoidal Detector for LHC**

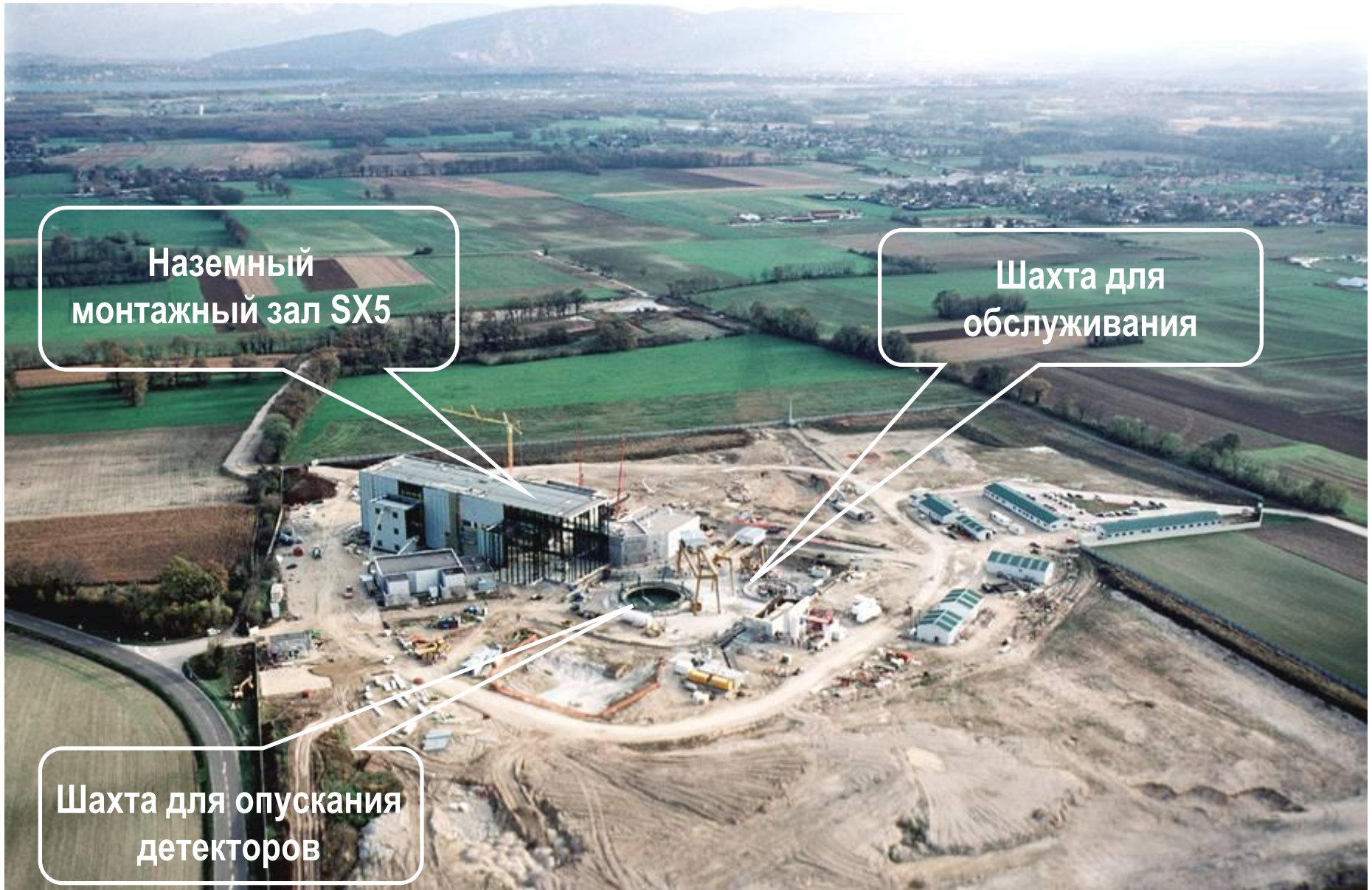


вес - 14500 тонн
 диаметр - 14,60 м,
 длина - 21,60 м,
 магнитное поле 4 Тесла

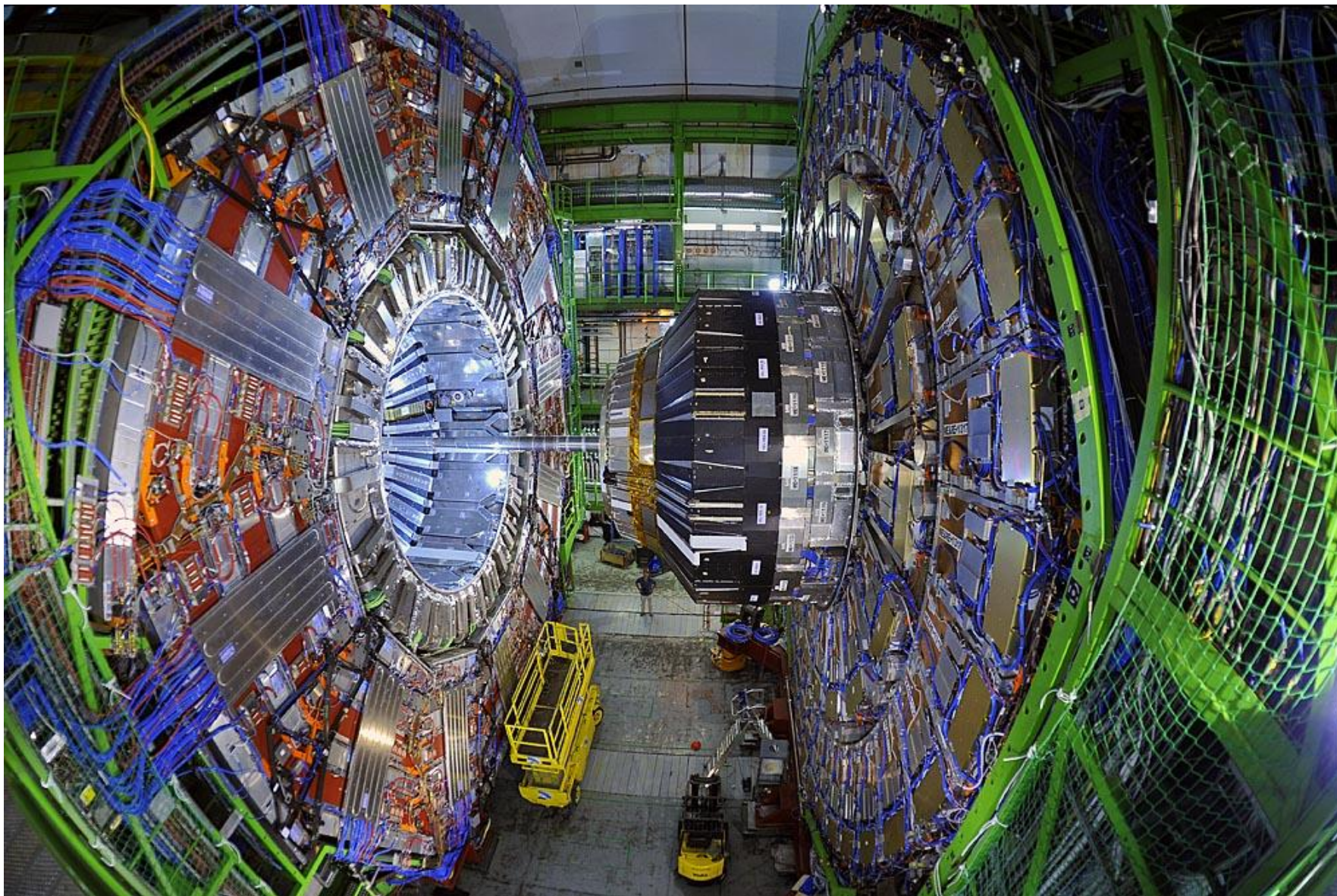
Торцевая часть детектора CMS (полная ответственность RDMS)



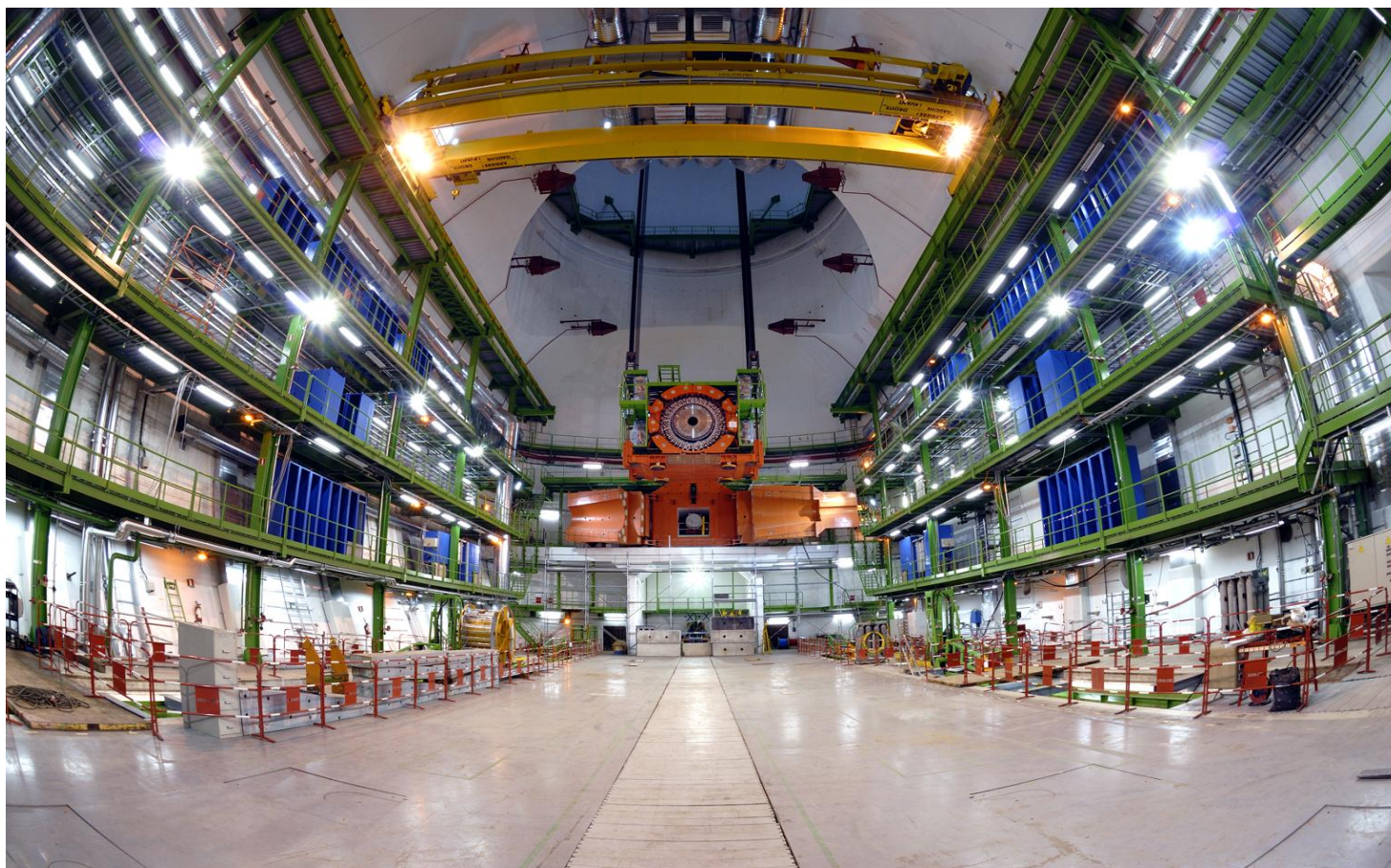
Панорама CMS в точке 5 (2000)



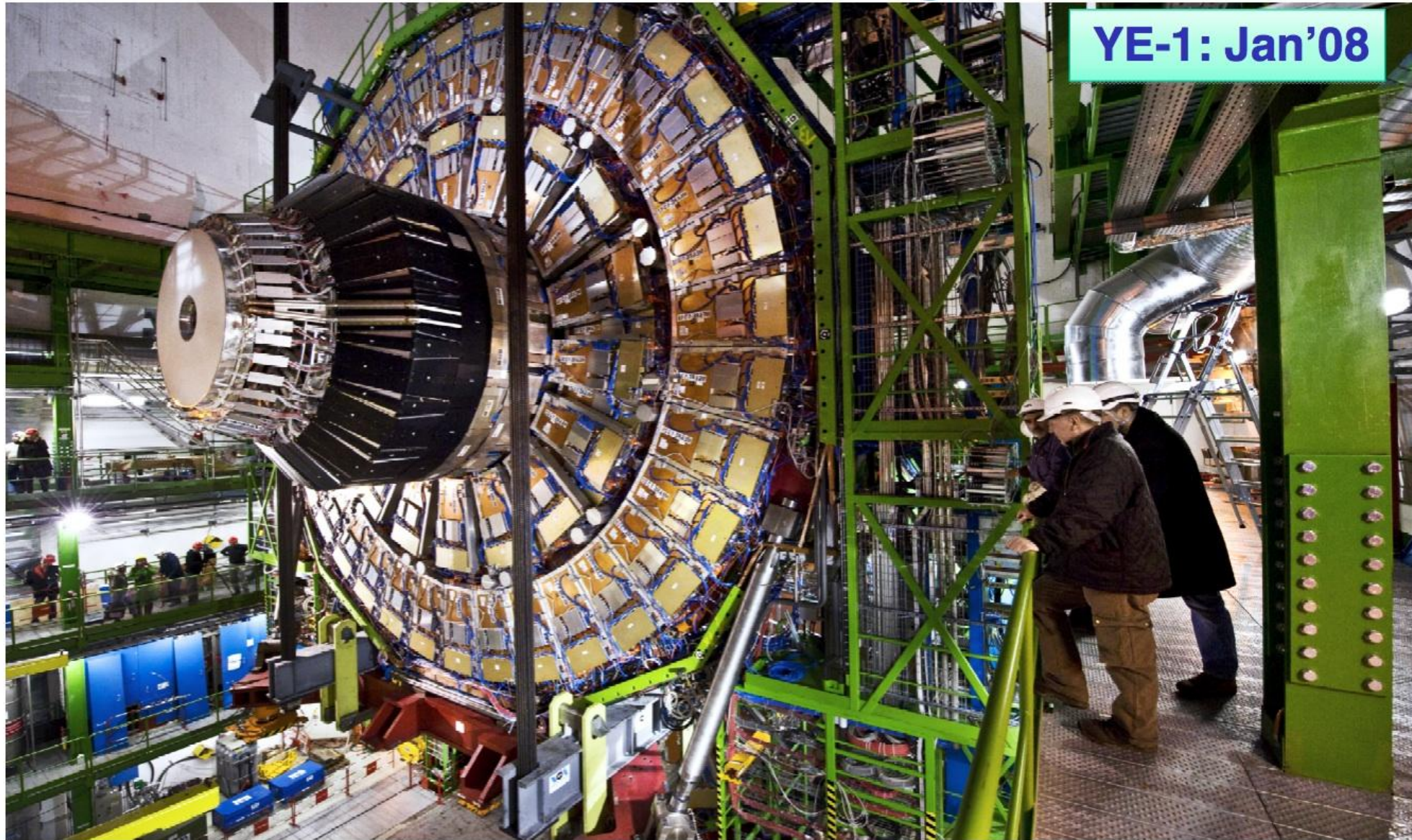
Открытый CMS



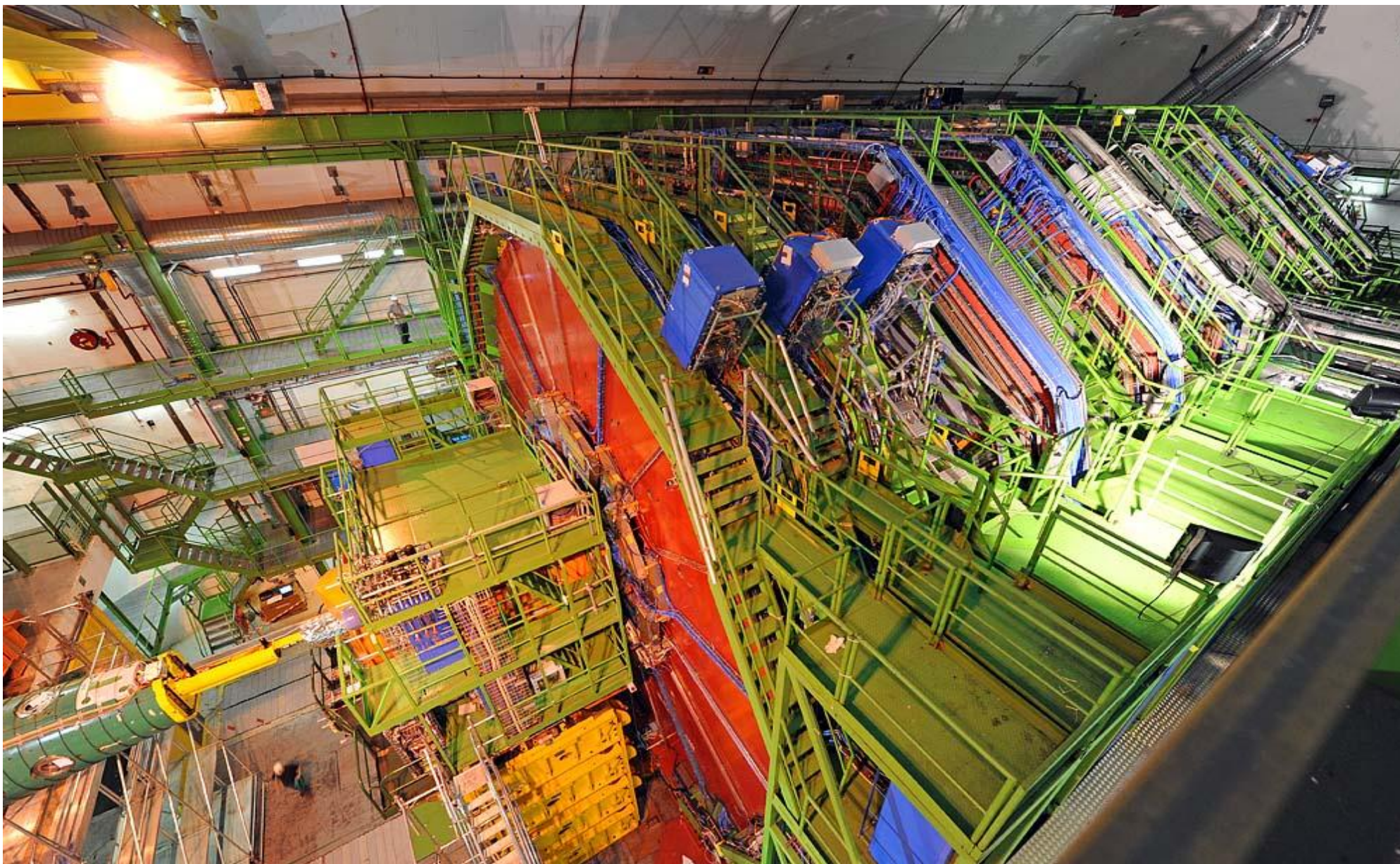
большие части установки были собраны на поверхности, а затем опущены под землю на глубину 100 метров в экспериментальный зал. Вес самой тяжелой части ~ 2000 тонн, на ее опускание ушло 12 часов, зазор между краем груза и стенками шахты был не более 10 сантиметров.



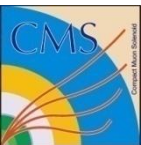
Последний диск опущен в января 2008



CMS был готов в набору данных в 2008



Как происходит накопление
физической информации?



Экспериментальные проблемы

Детекторы LHC, особенно ATLAS и CMS, радикально отличаются от детекторов предыдущих поколений

Высокий поток взаимодействий

Поток pp взаимодействий **1 миллиард взаимодействий в сек**

Запись данных только для $\sim 10^2$ из 40 миллионов столкновений пучков в сек

Решение 1-ого уровня триггера требует $\sim 2-3$ мкс

⇒ электроника должна хранить данные локально (наложение событий)

Большая множественность частиц

$\sim \langle 20 \rangle$ наложенных событий в каждом столкновении пучков

~ 1000 треков в детекторах каждые 25 нс

требуются высоко гранулированные детекторы с хорошим временным разрешением для понижения загрузок

⇒ большое число каналов регистрации (~ 100 миллионов)

Высокий радиационный уровень

⇒ радиационно-стойкие детекторы и электроника

Online: Система на линии с ЭВМ

- Много-уровневый триггер - запуск установки

- Фильтрация фона
- Уменьшение объема данных
- Фактор Online подавления - 10^7

- Меню триггера

- Выбор интересующих событий
- Фильтрация неинтересных событий

В эксперименте CMS поток данных с детектора уменьшается с 1000 TB/sec ($1\text{TB}=10^{12}$ Bytes) на входе триггера первого уровня до 100 MB/sec на выходе триггера третьего уровня.

С такой скоростью данные будут записываться на магнитную ленту или, возможно, на диски в течении нескольких лет для последующего анализа.



CMS событие	- 1 МБ
триггер L1	- 75 ГБ/с
триггер HLT	- 0.1 ГБ/с
поток	~ 3 ПетаБ/год

Физика на LHC

Полный поток “интересных” событий составляет $\sim 10^{-8}$ от полной интенсивности !

Доля событий с сигналами “новой физики” составляет от 10^{-10} (Хиггс и суперсимметрия) до 10^{-15} (физика за пределами СМ)

Процессы WW слияния ($\sim 3 \times 10^4$ соб. в год) позволяют провести проверку СМ и обнаружить бозон Хиггса в области масс до 500 ГэВ

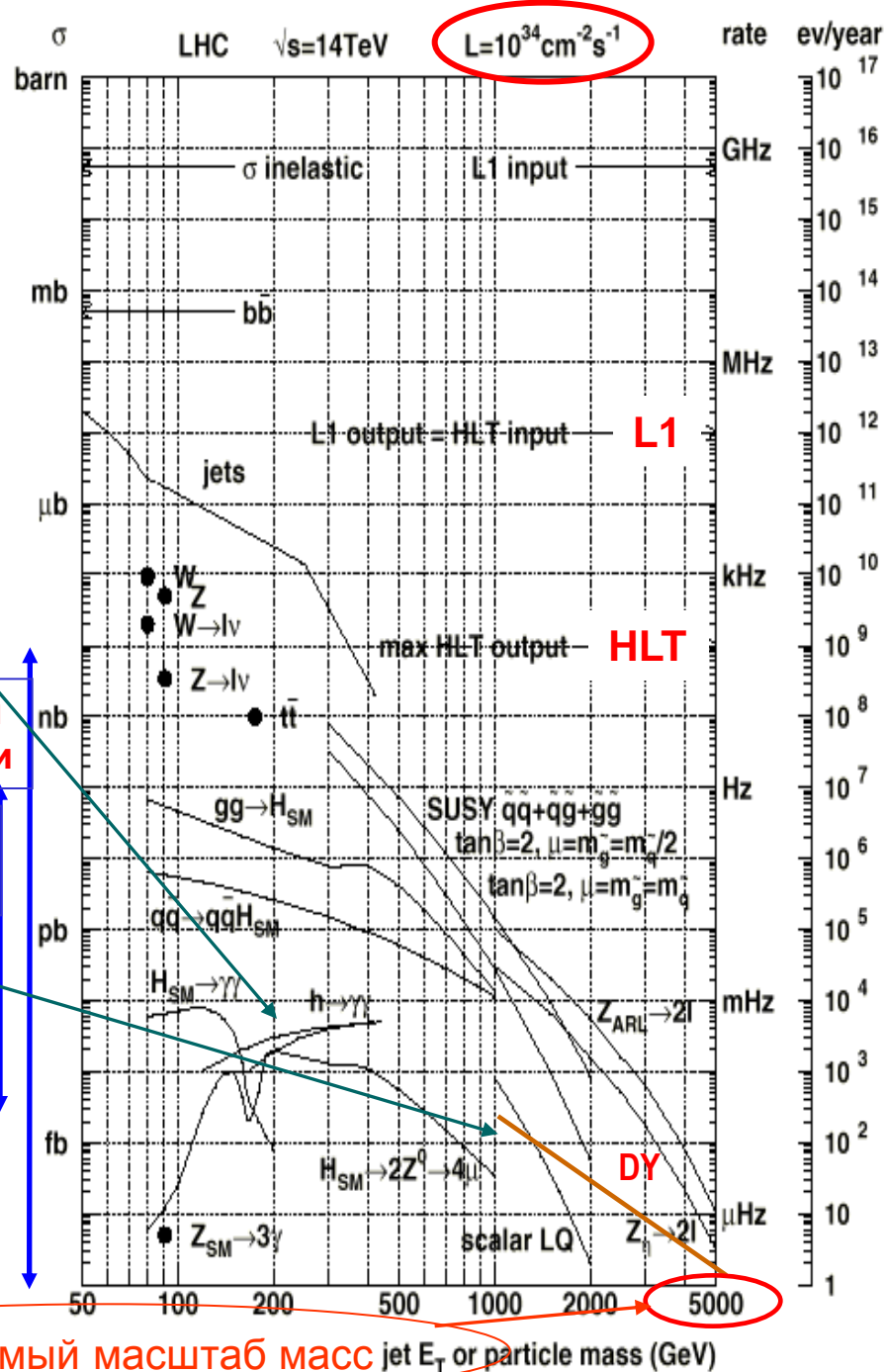
Измерения тяжелых димюонных состояний ($\sim 10^3$ соб. в год) позволит проверить СМ в области инвариантных масс до 3-5 ТэВ и обнаружить сигналы от новых калибровочных бозонов, дополнительных измерений (гравитации на масштабе ТэВ) и т.д.

Подавление выхода димюонных состояний ($\sim 10^6$ соб. в год) служит сигналом образования кварк-глюонной плазмы

Физика Стандартной модели

Физика бозона Хиггса, суперсимметрия

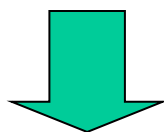
Физика за пределами СМ



достижимый масштаб масс jet E_T or particle mass (GeV)

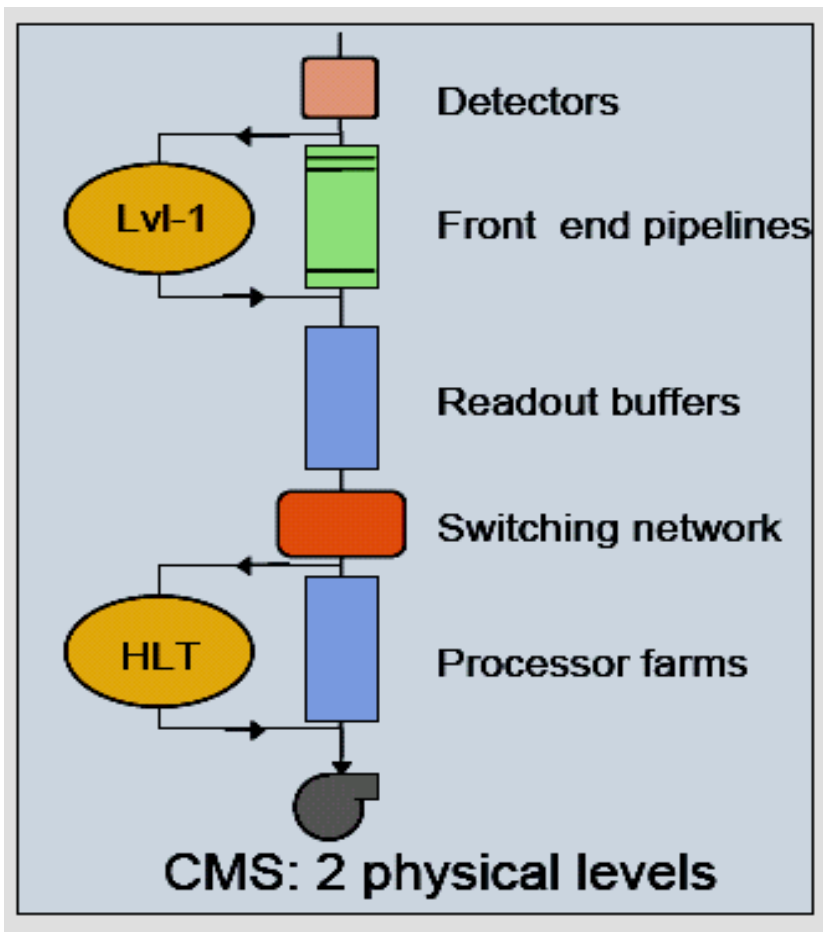
Для записи и последующего хранения, обработки и анализа необходимо выделить только часть событий (в режиме реального времени!!)

- интерес для физиков представит только небольшая часть
- отсутствует возможность обработать весь поток данных с LHC

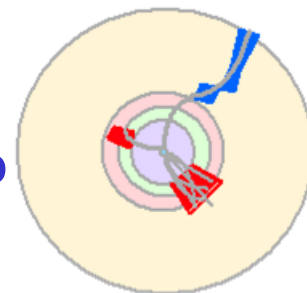


Система обора (триггер)

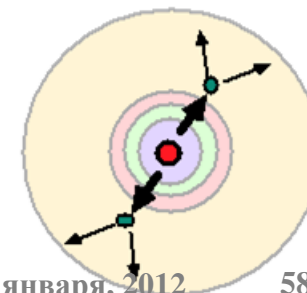
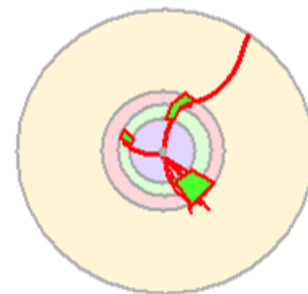
Пример: система триггера CMS



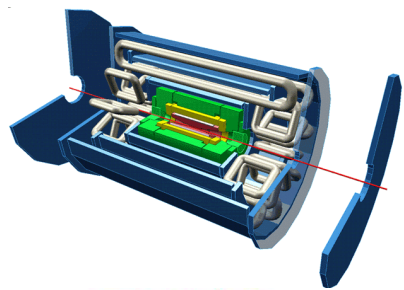
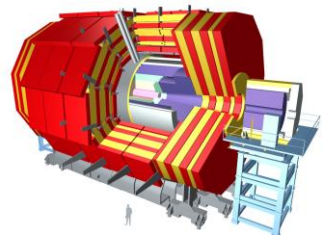
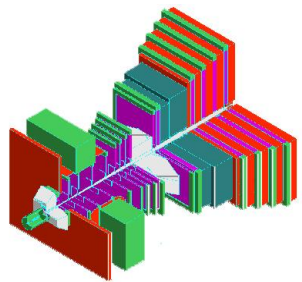
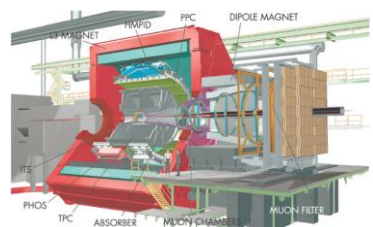
- Уровень-1 (Level-1):
уровень детекторов, отбор по одновременному наличию сигналов в тех или иных считывающих каналах, идентификация частиц и отбор по грубым оценкам координат и энергии



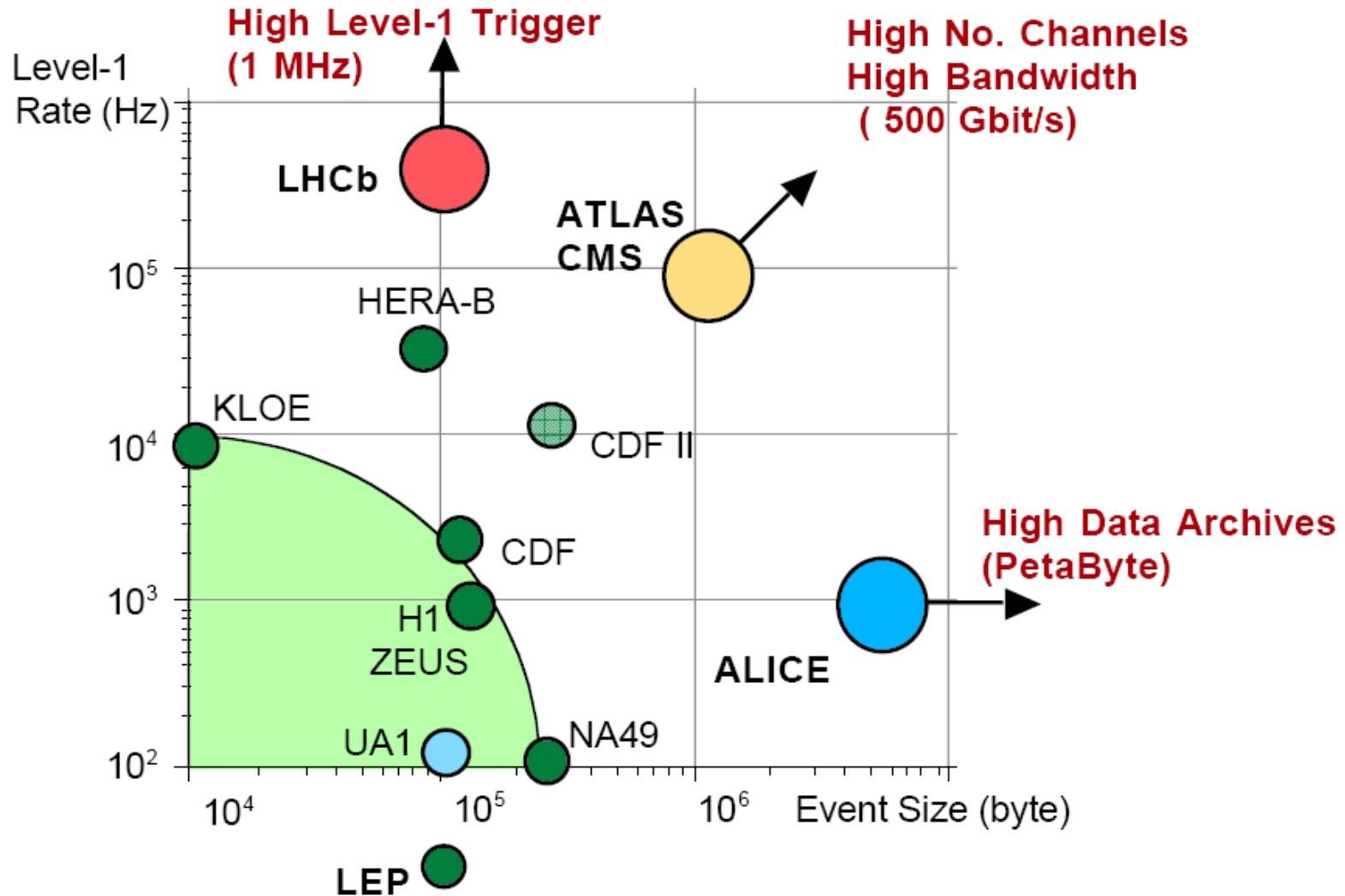
- Триггер высокого уровня (High Level Trigger):
вычислительные фермы для быстрой реконструкции и анализа событий, отбор по заданным порогам на кинематические характеристики частиц (энергия, импульс, угол, изолированность и т.д.), топологии событий



Потоки данных с экспериментов ЛНС

	Level-1 kHz	Event MByte	Storage MByte/s	
	ATLAS 100	1	100	~ 3 ПетаБ/год
	CMS 100	1	100	~ 3 ПетаБ/год
	LHCb 400	0.1	20	
	ALICE 1	25	1500	

Потоки данных и размер событий



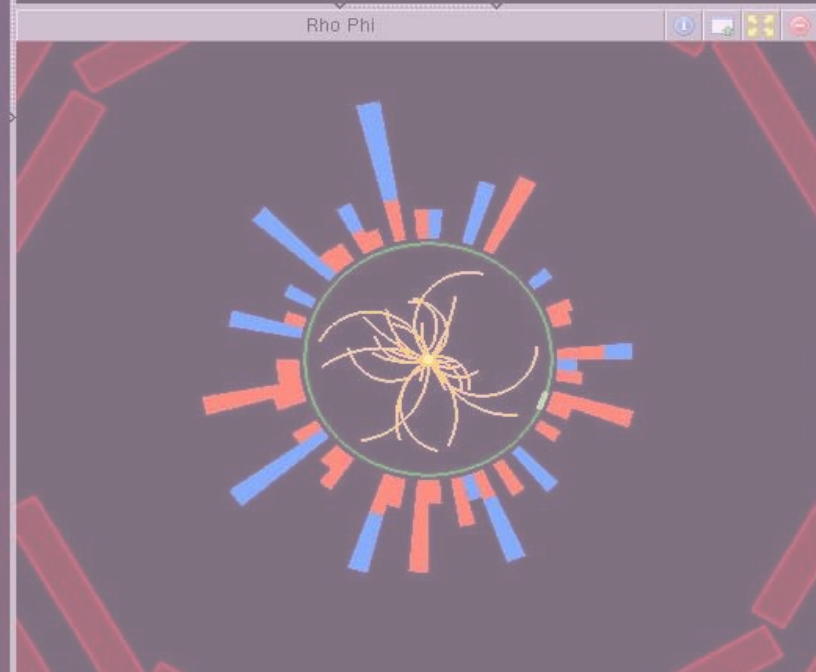
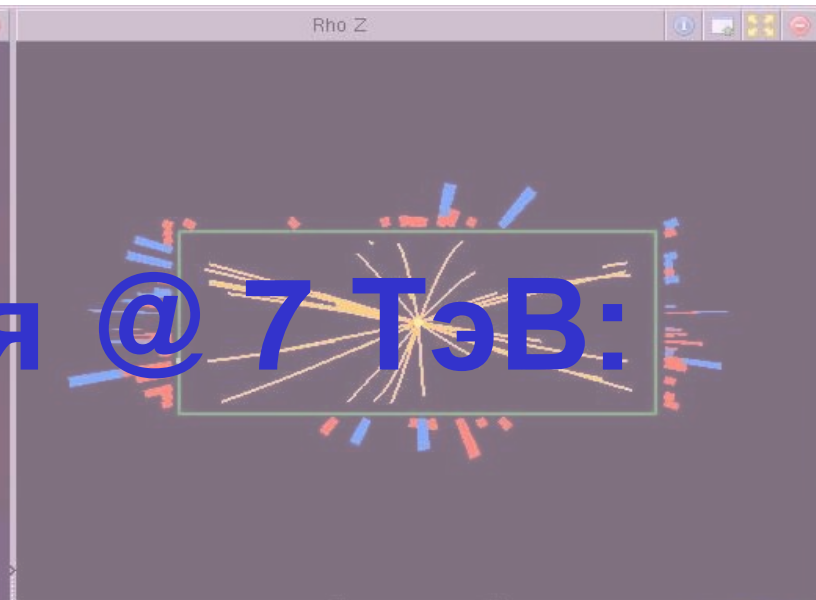


CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Tue Mar 30 12:58:48 2010 CEST
Run/Event: 132440 / 2737921
Lumi section: 124
Orbit/Crossing: 32323764 / 1

Столкновения @ 7 ТэВ:



High - Energy Collisions at 7 TeV
LHC @ CERN
30.03.2010



10 Sep, 9:50 Первое событие на LHC (splash-event)

Event

- Init Event Processor
- Relnit Event Processor
- Next Event Ctrl+N
- Previous Event Ctrl+P
- Auto Events Ctrl+A
- Goto Event... Ctrl+G
- Rewind Ctrl+R
- Skip...
- Auto Print

Run 62063, Event 1534, Orbit 9563911, BX 655

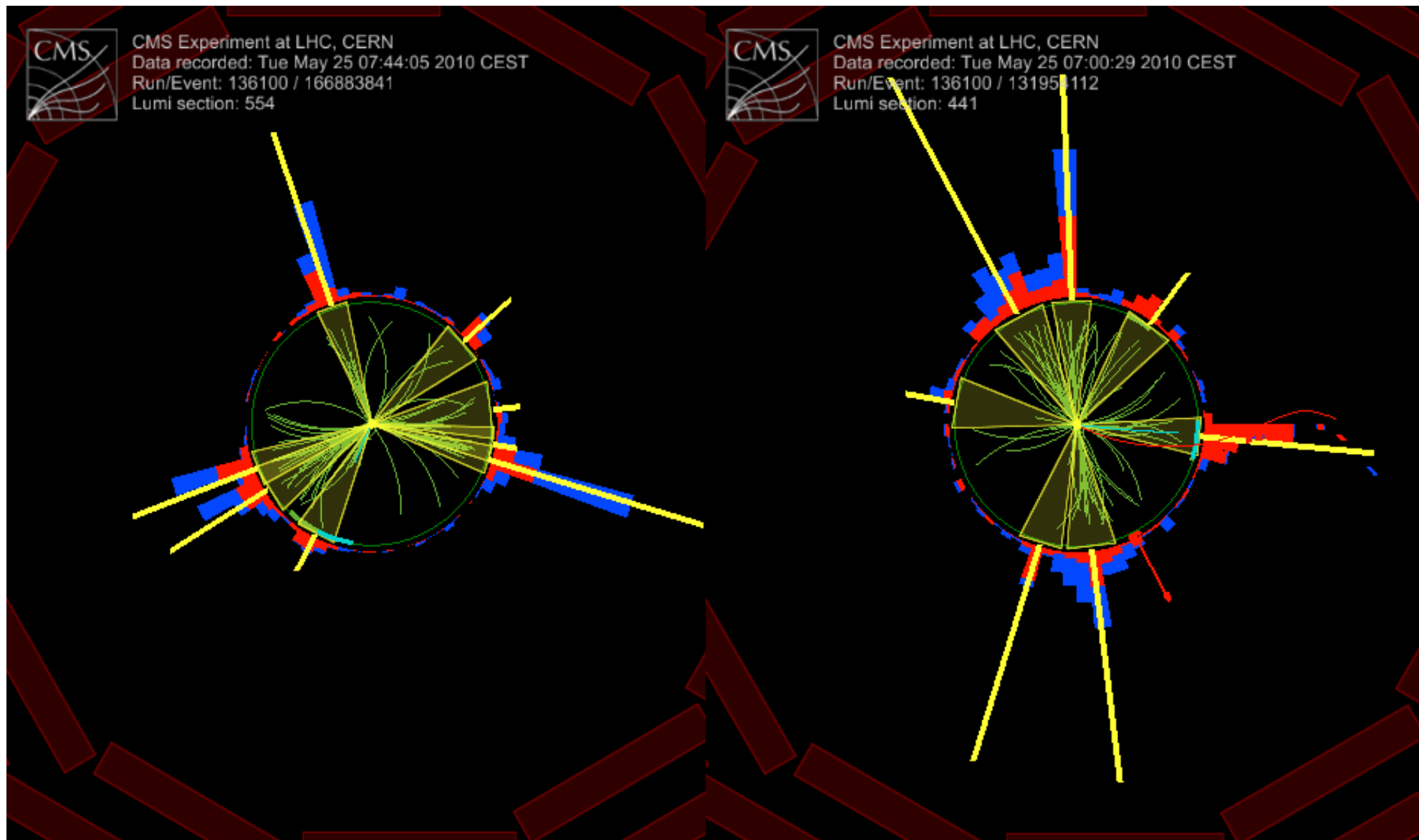
POINT 5 CMS
POINT 4 RF
POINT 6 Dump
POINT 7 Betatron Cleaning
POINT 8 LHCb
POINT 3 Momentum Cleaning
POINT 2 Alice
POINT 1 Atlas
Sector 45
Sector 56
Sector 67
Sector 78
Sector 89
Sector 12
Sector 23
Sector 34
Sector 45
Beam 1
Beam 2
TI2
TI8
10 Sep 2008 09:38
Updated by Roberto Saban

5.1/0.6 fps

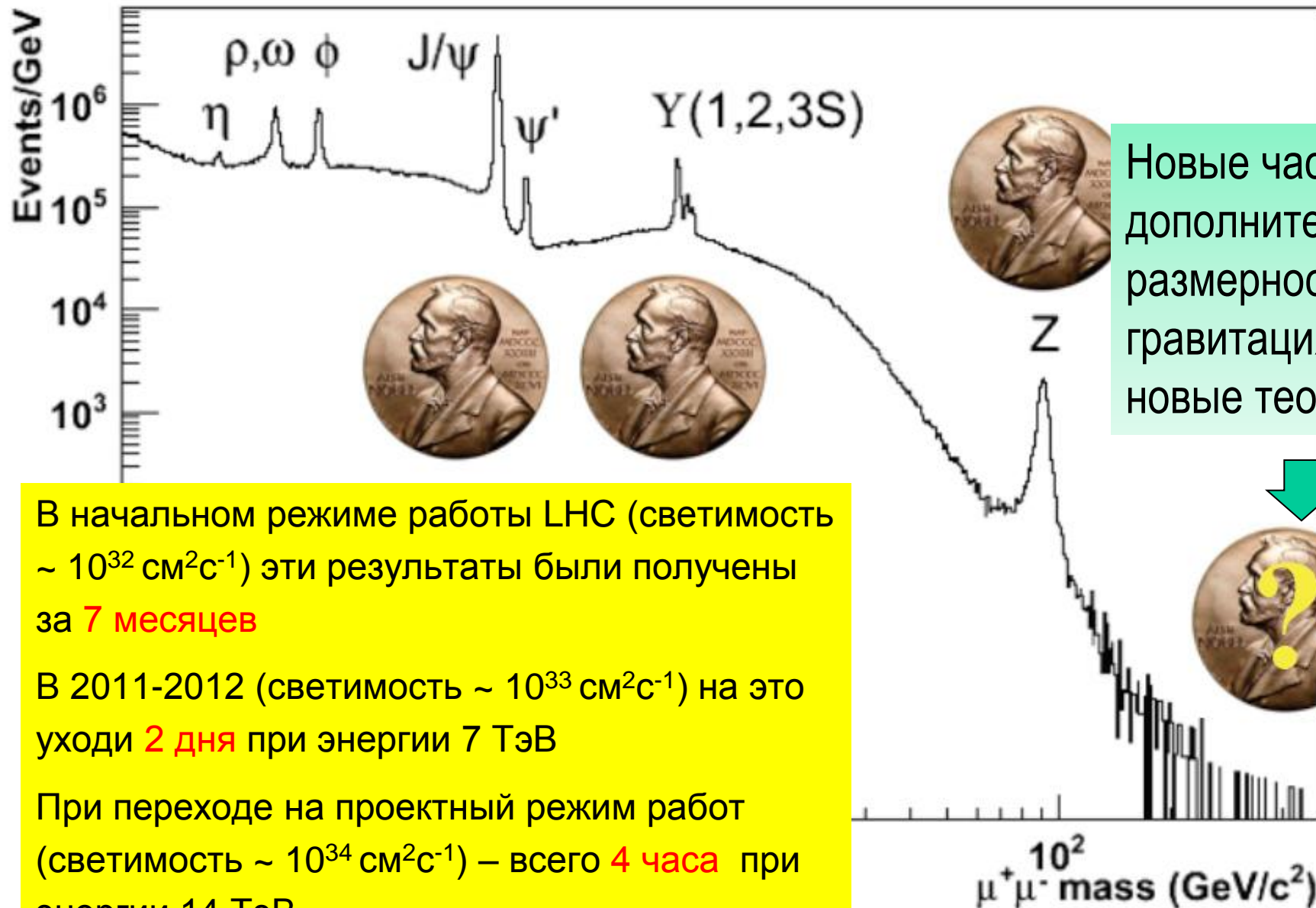
Run # 62063, event # 1534

mzanetti@fuval-C2F11-20: /nfshome0 CMSSW Visualisation - [CMSSW (3D) daqshift@SCX5SCR26/tmp

Первые события (пара струй)



Спектр с парой мюонов



Новые частицы,
дополнительные
размерности,
гравитация и другие
новые теории

В начальном режиме работы LHC (светимость $\sim 10^{32} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$) эти результаты были получены за **7 месяцев**

В 2011-2012 (светимость $\sim 10^{33} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$) на это уходи **2 дня** при энергии 7 ТэВ

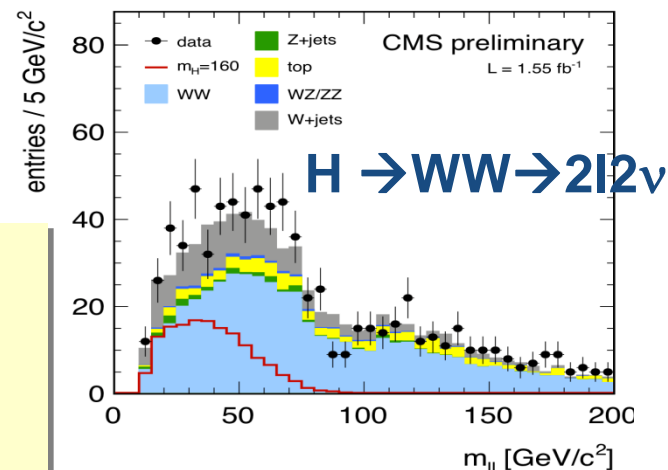
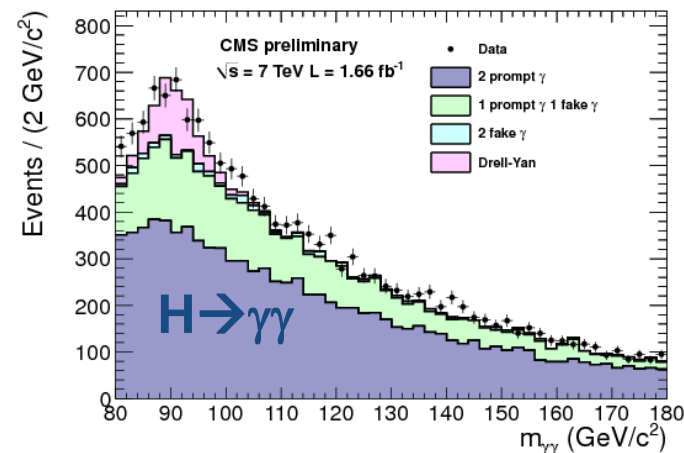
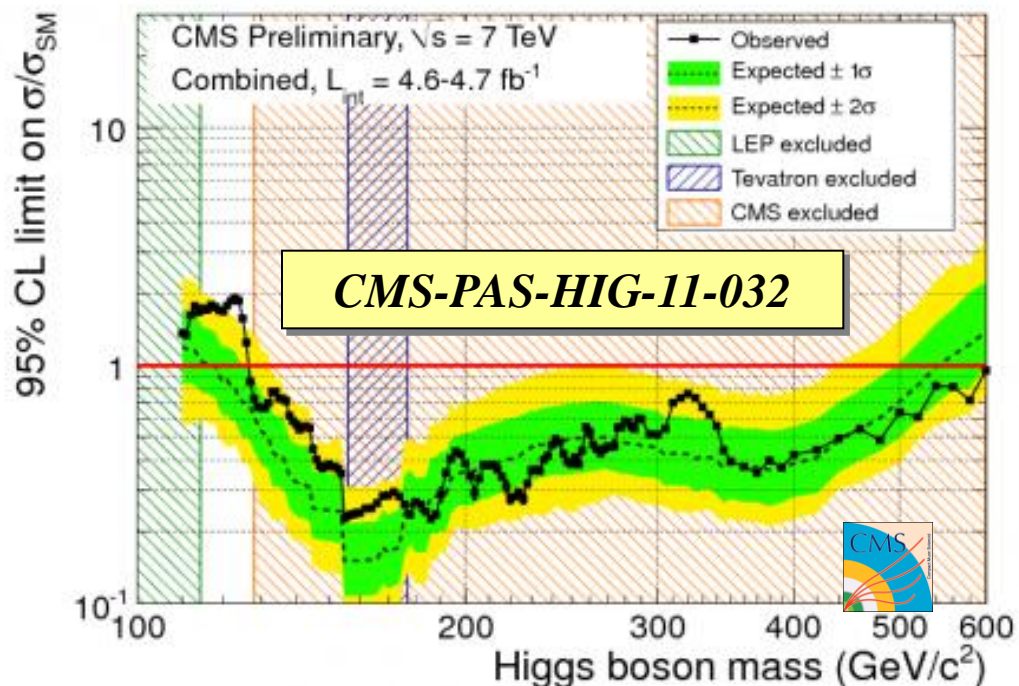
При переходе на проектный режим работ (светимость $\sim 10^{34} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$) – всего **4 часа** при энергии 14 ТэВ

“Охота на Хиггса” в 2011 г.

Поиск бозона Хиггса осуществляется в различных ожидаемых каналах распада:

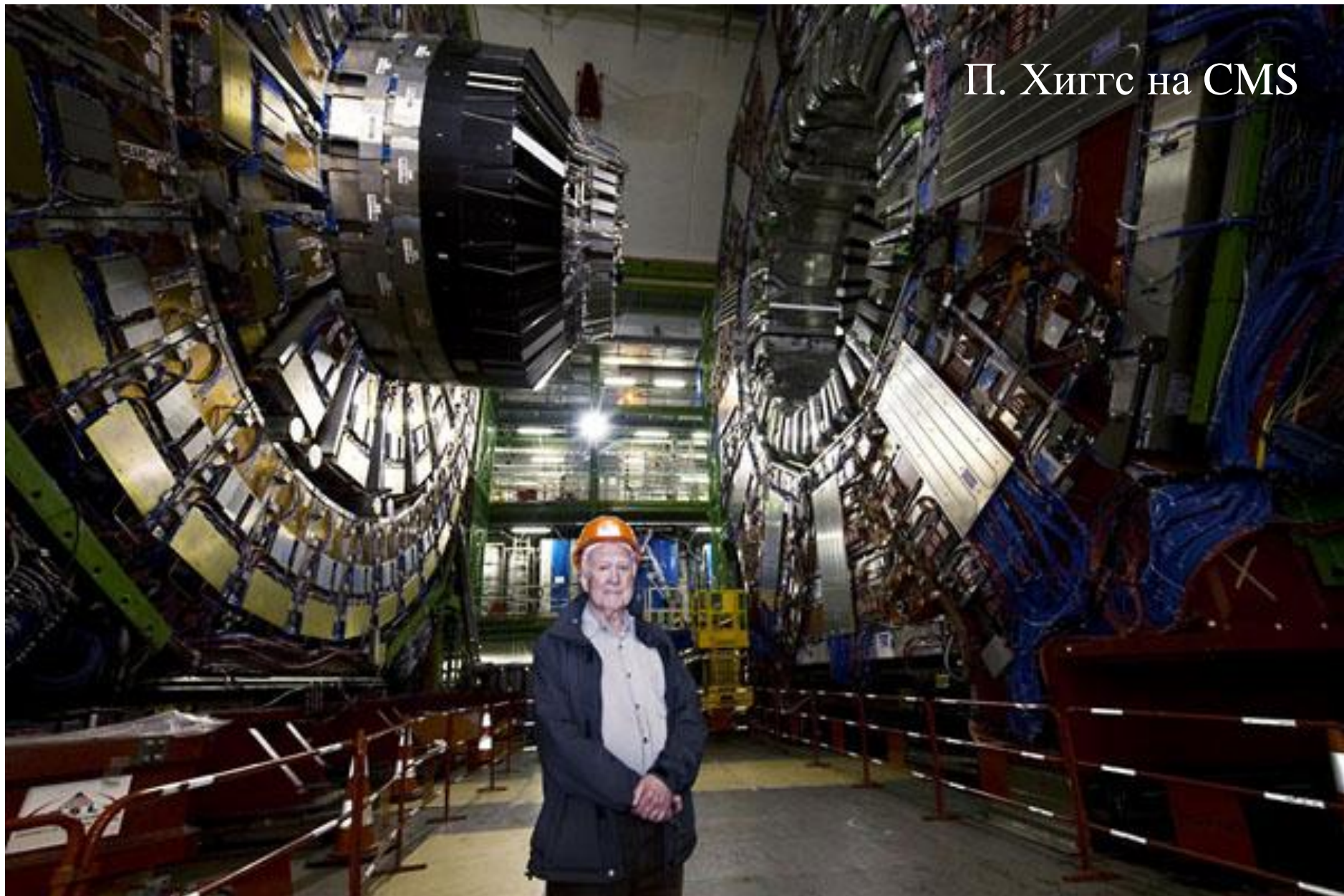
$H \rightarrow \gamma\gamma, \tau\tau, b\bar{b}, WW \rightarrow 2l2\nu, ZZ \rightarrow 4l, ZZ \rightarrow 2l2\nu, ZZ \rightarrow 2l2q$

В настоящее время эксперимент CMS исключает существование бозона Хиггса в диапазоне масс: **127-600 ГэВ при 95% С.Л. (128-525 ГэВ при 99% С.Л.)**



Публичные результаты совместного анализ данных экспериментов ATLAS и CMS используют меньшую статистику (до 2.3 фбн-1) и поэтому исключают меньший диапазон возможных масс (141-476 ГэВ)

Хиггс на CMS



П. Хиггс на CMS

Физические перспективы LHC

- ❑ **Масса:** почему фундаментальные частицы имеют массу и почему эти массы столь различны?
- ❑ **Антиматерия:** куда она исчезла?
- ❑ **Темная материя:** чем она может быть?
- ❑ **Геометрия Вселенной:** существуют ли дополнительные измерения? геометрия многомерного пространства?
- ❑ **Новые частицы:** существуют ли они? (суперпартнеры, дополнительные калибровочные бозоны, гравитонные состояния и т.д.)
- ❑ **КХД-материя:** каковы свойства КХД при больших плотностях энергии, существует ли кварк-глюонная плазма?

Проверка границы применимости Стандартной модели!

- ❑ В.А. Бедняков “Результаты эксперимента ATLAS” – создание, новые данные по поиску бозона Хиггса, суперсимметрии, физики за рамками стандартной модели и т.д.
- ❑ А.В. Леонидов “Столкновения тяжелых ионов на LHC” – программа физики тяжелых ионов на LHC
- ❑ М. В. Савина “Новая физика на LHC” – о возможности проверки многомерных теорий и поиск черных дыр в экспериментах LHC
- ❑ С.В. Шматов “Результаты эксперимента CMS” - новые данные по поиску бозона Хиггса, суперсимметрии, физики за рамками стандартной модели и т.д.

***Успешной школы!
и
Новых знаний о физике на LHC!!!!***

Физика на CMS

Физические исследования коллаборации CMS охватывают все возможные направления физики высоких энергий и осуществляются в рамках соответствующих групп обработки и анализа данных

Квантовая хромодинамика (QCD Physics)

Физика малых углов (Forward Physics)

Физика B-адронов и кваркониев (B-Physics and Quarkonia)

Электрослабые взаимодействия (Electroweak Physics)

Физика t-кварка (Top Physics)

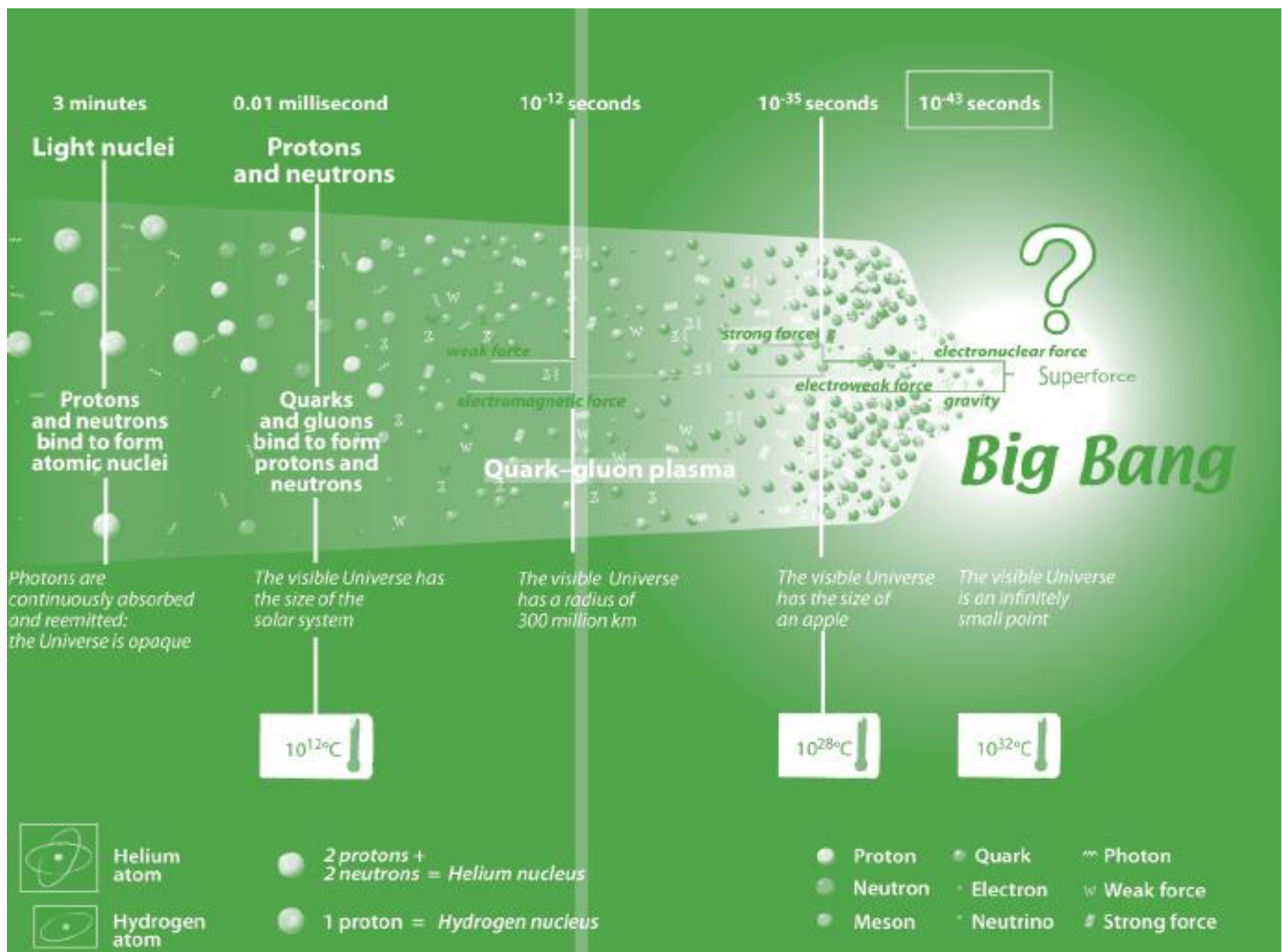
Бозон Хиггса (Higgs Physics)

Суперсимметрия (Supersymmetry)

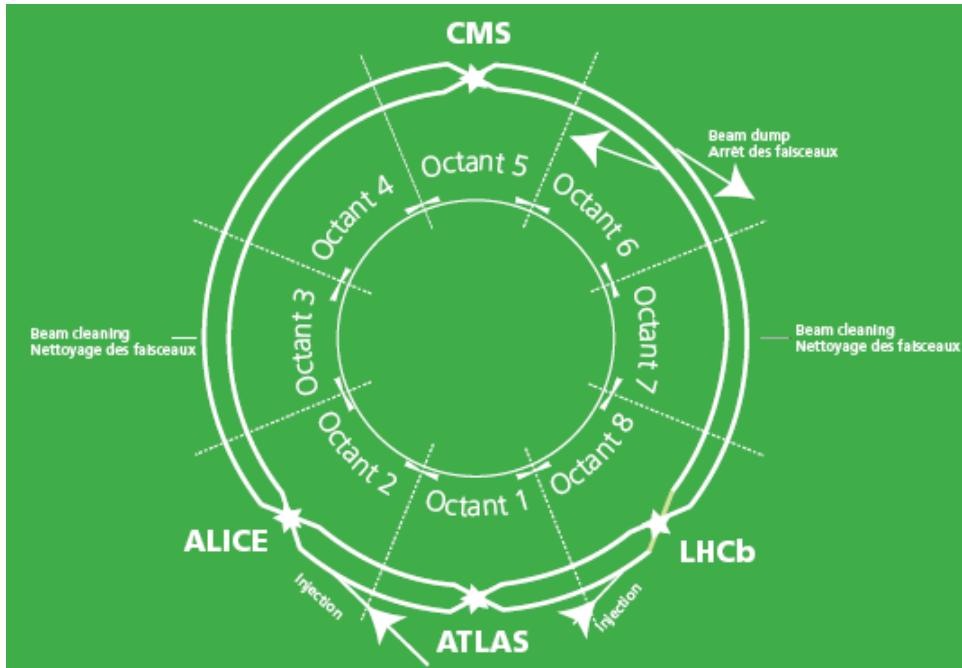
Экзотика (Exotics)

Физика тяжелых ионов (Heavy Ion Physics)

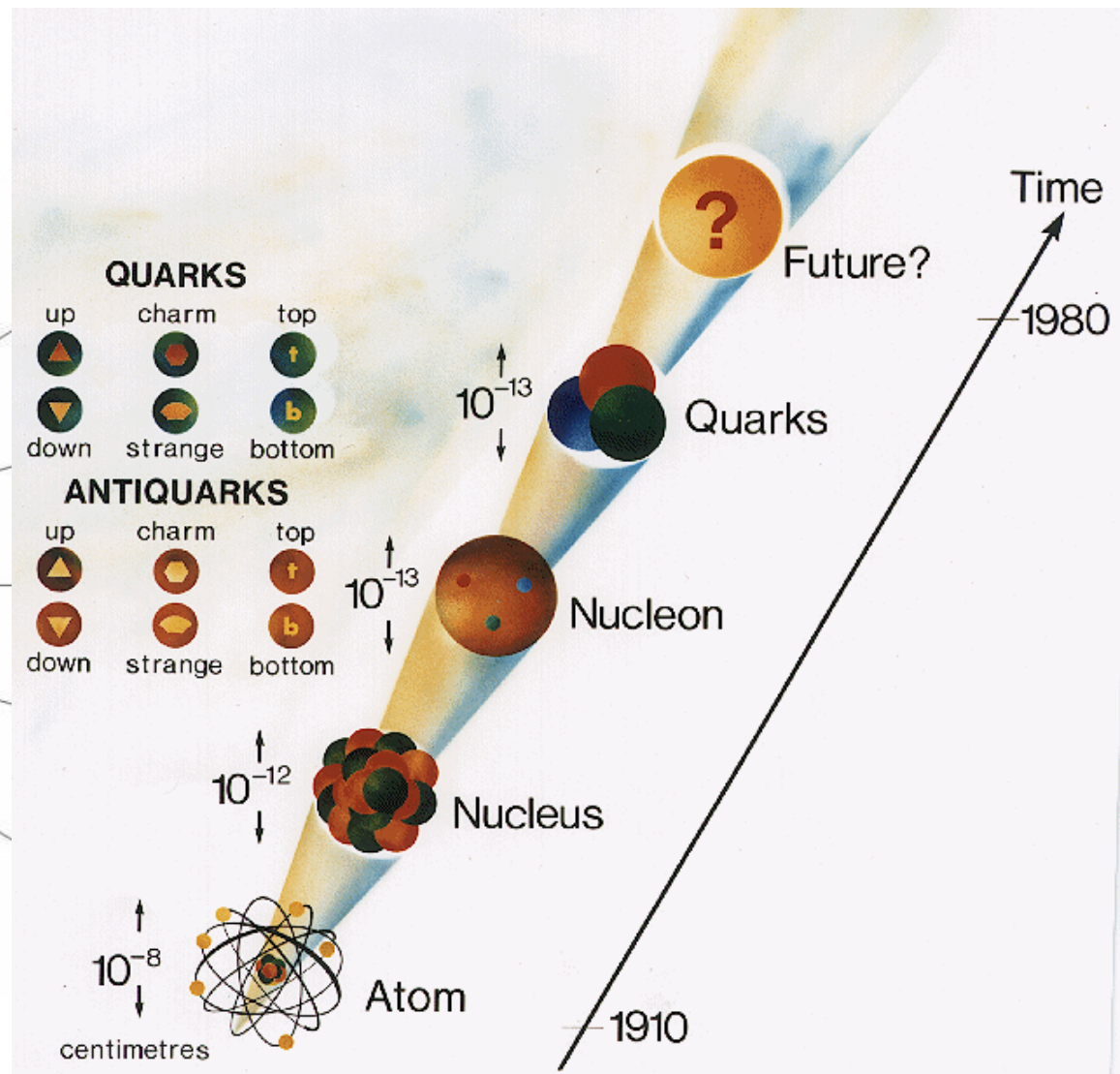
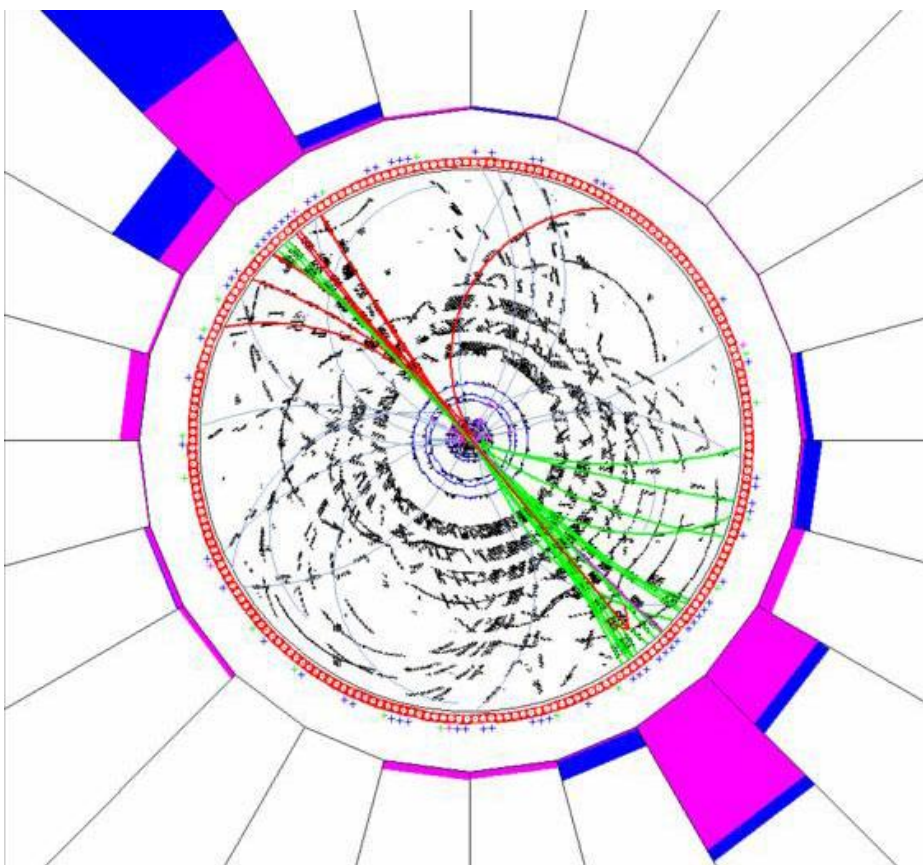
Изучение точности и эффективности регистрации физических объектов (лептонов, фотонов, струй, потоков энергии и т.д.) и создание ПО на основании новых алгоритмов для реконструкции событий происходит в рамках специальных групп (Physics Object Groups) – Tracking, Electron and Photons, Jet and Missing Energy, Muons, Particle Flow, B-tagging and Vertexing



Construction costs (MCHF)	Personnel	Materials	Total
LHC machine and areas*)	1224	3756	4980
CERN share to detectors	869	493	1362
LHC computing (CERN share)	85	83	168
Total	2178	4332	6510



За 100 лет – история Вселенной



Панорама CMS в точке 5 (2000)



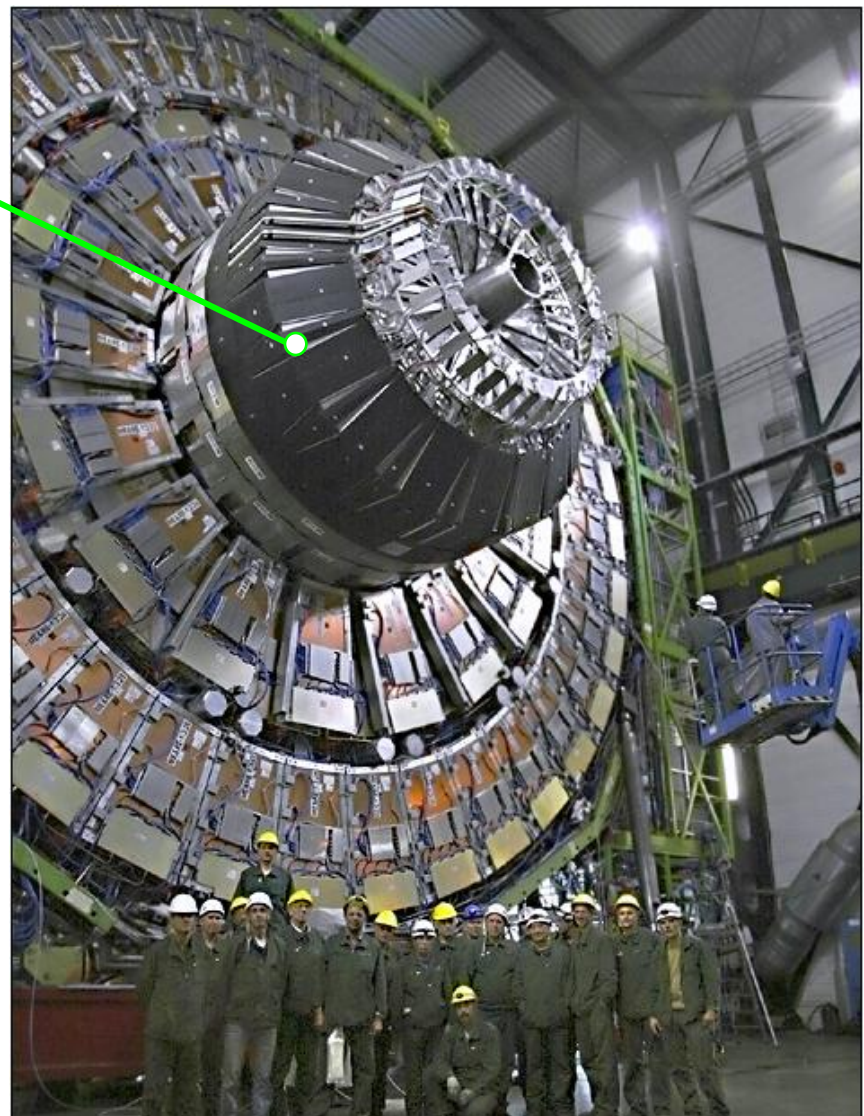
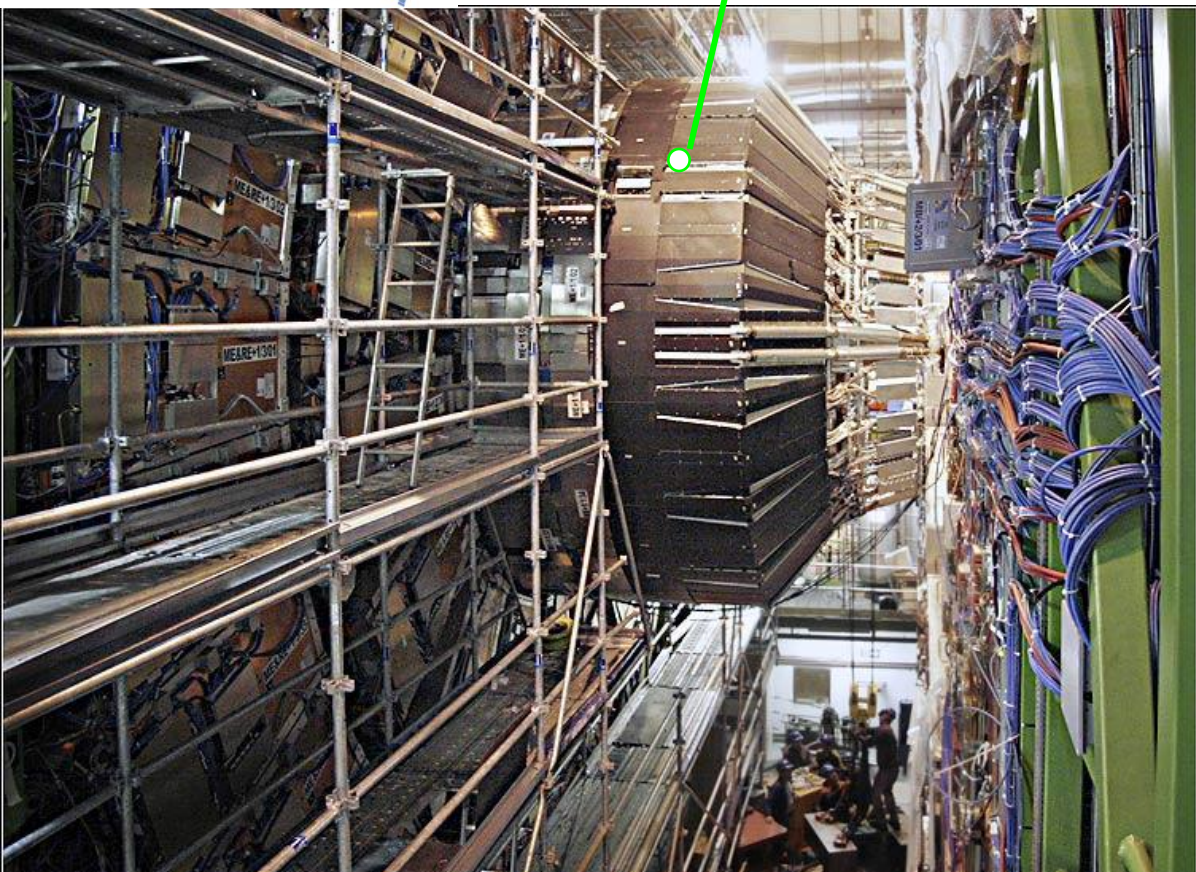
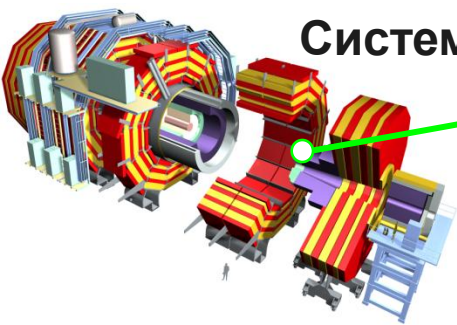
Еще факты о CMS

В ходе работ на поверхности инженеры CMS обнаружили остатки виллы римского периода, в которой были найдены горшки, черепица и монеты

Гидравлические подъемные механизмы и система контроля, использованные для опускания частей CMS в экспериментальный зал, применялись в Дурбане, Южно-Африканская Республика, для установки крыши стадиона для Чемпионата мира по футболу в 2010г.

RDMS в проекте CMS

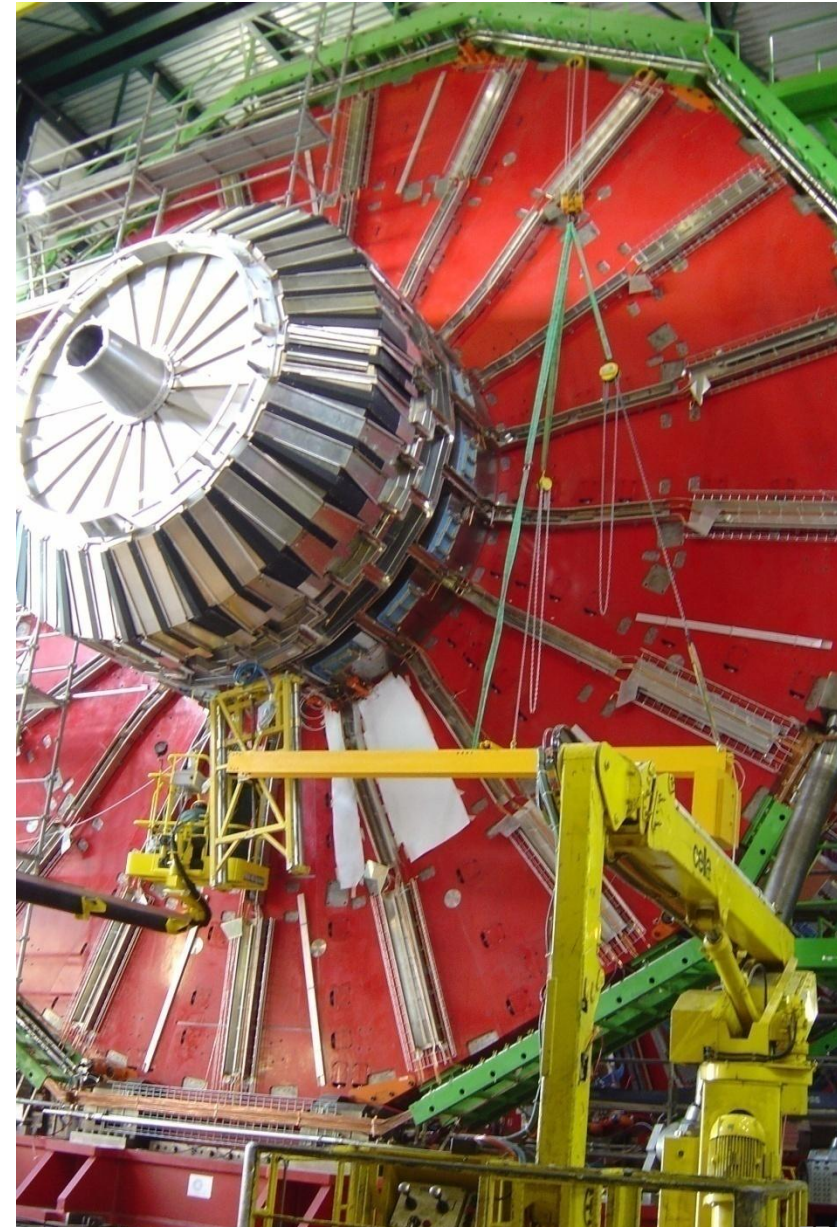
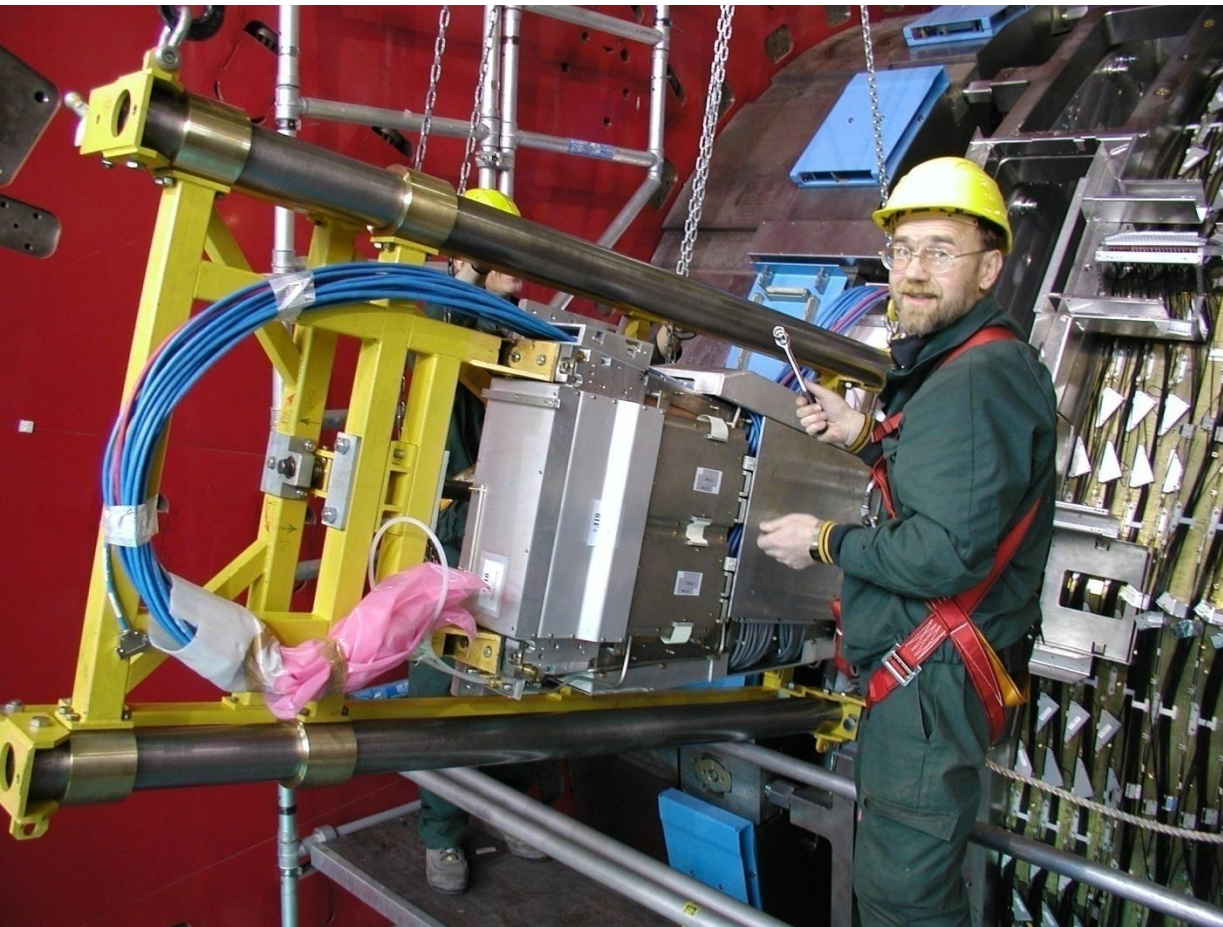
Системы торцевых детекторов



UX5 YE+1, September 26, 2007

SX5 YE-1, September 26, 2007

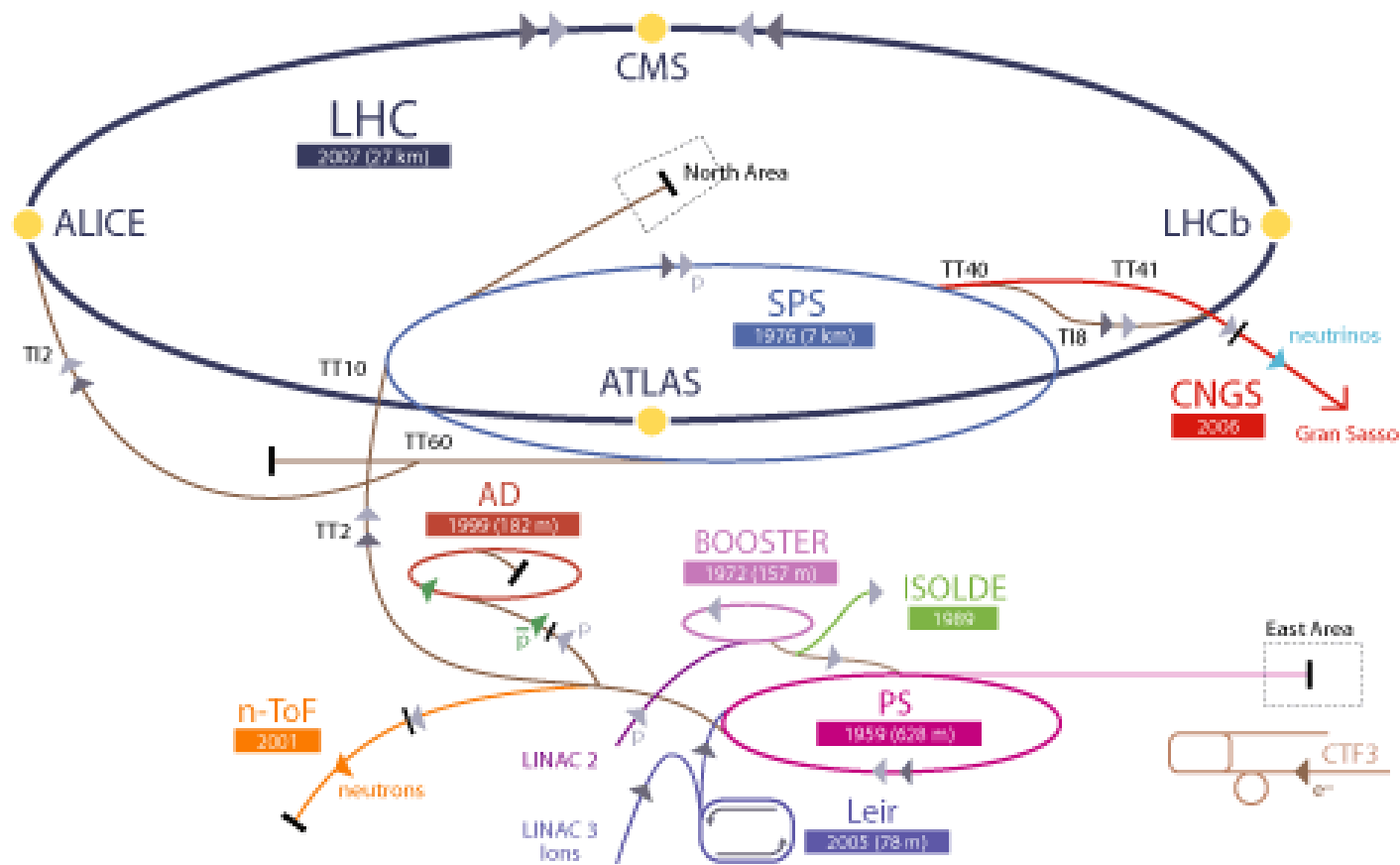
Передняя мюонная станция, ME1/1 (полная ответственность RDMS)



Монтаж камер ME1/1

Ускорительный комплекс ЦЕРН

CERN Accelerator Complex



▶ p (proton) ▶ ion ▶ neutrons ▶ \bar{p} (antiproton) ▶ neutrinos ▶ electron
 ↔↔↔ proton/antiproton conversion

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility

CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice

LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINEar ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight