

# КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД

---

**CMS**

Леся Щуцкая

Университет Флориды

LHC

SPS

PS

Комплекс ускорителей LHC

# ~ 1/5 ЧАСТЬ ЛЮДЕЙ, РАБОТАВШИХ НАД CMS



CMS – это ~5250 ученых (включая 927 аспирантов), инженеров и технических специалистов из 45 стран и 198 институтов

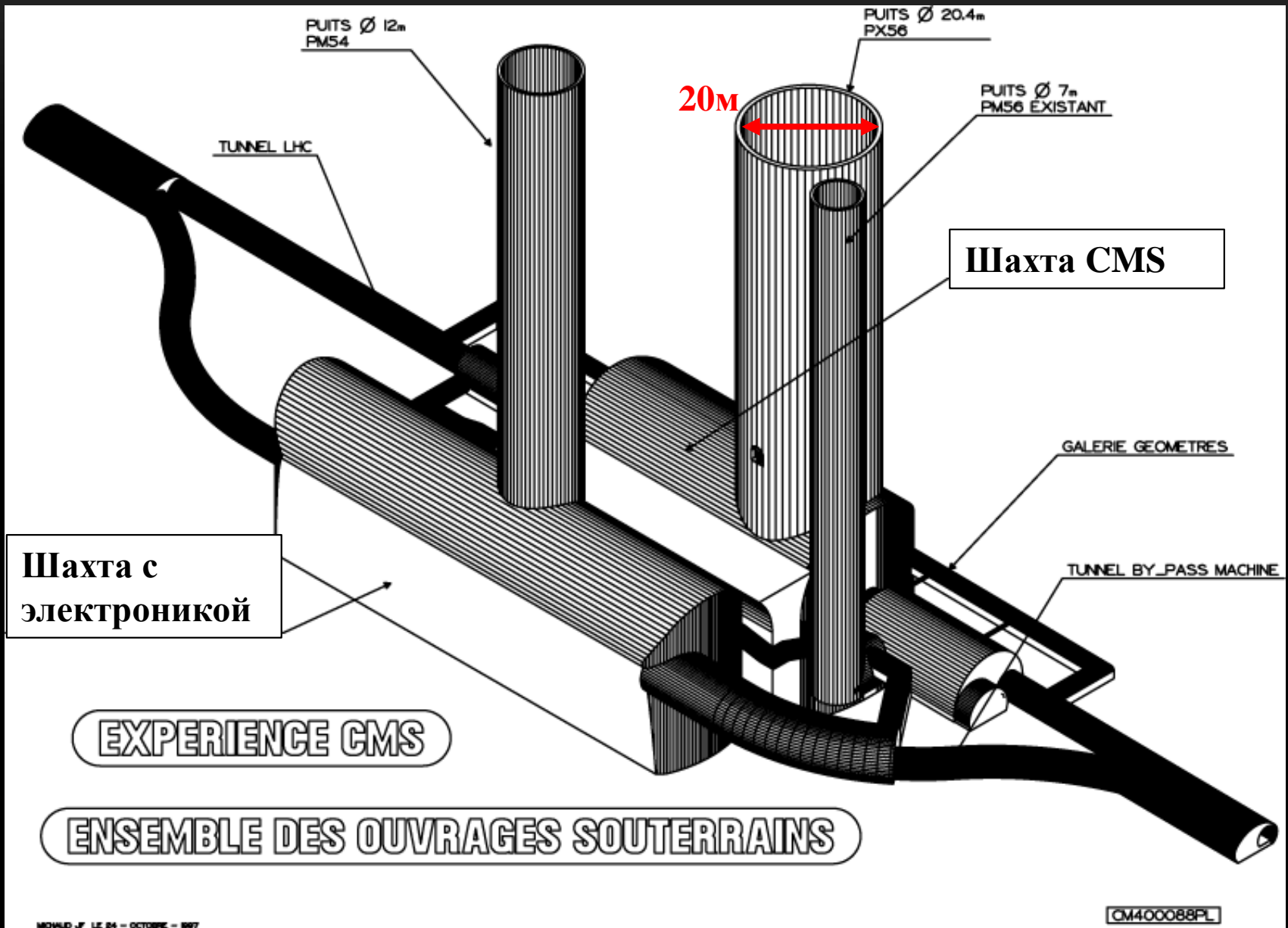


2000 г.

Пучки ЛНС 100 м  
под землей

**Здание на поверхности для предварительной сборки детектора  
и доступа в ЛНС**

# ПОДЗЕМНЫЕ ОТДЕЛЕНИЯ



# ВЗЛЕТЫ И ПАДЕНИЯ



## Подземная река приостановила экскаваторные работы

### Решение:

- пробурить отверстия малого диаметра вокруг шахты (от поверхности и ниже уровня воды)
- в течение нескольких месяцев циркулировать соленую воду охлажденную до  $\sim -5^{\circ}\text{C}$
- заменить соленую воду жидким азотом, чтобы заморозить воду в шахте
- выкопать воду и зацементировать стенки шахты!

Конец 2004 г.

Точка столкновения  
пучков LHC

53 м × 27 м × 24 м

люди



Можно разместить > 2  
сессионных залов  
Верховной Рады

На другом конце шахты: тут будет CMS

# КОНЦЕПЦИЯ ДЕТЕКТОРА

---



# ДЕТЕКТОР-МАТРЁШКА

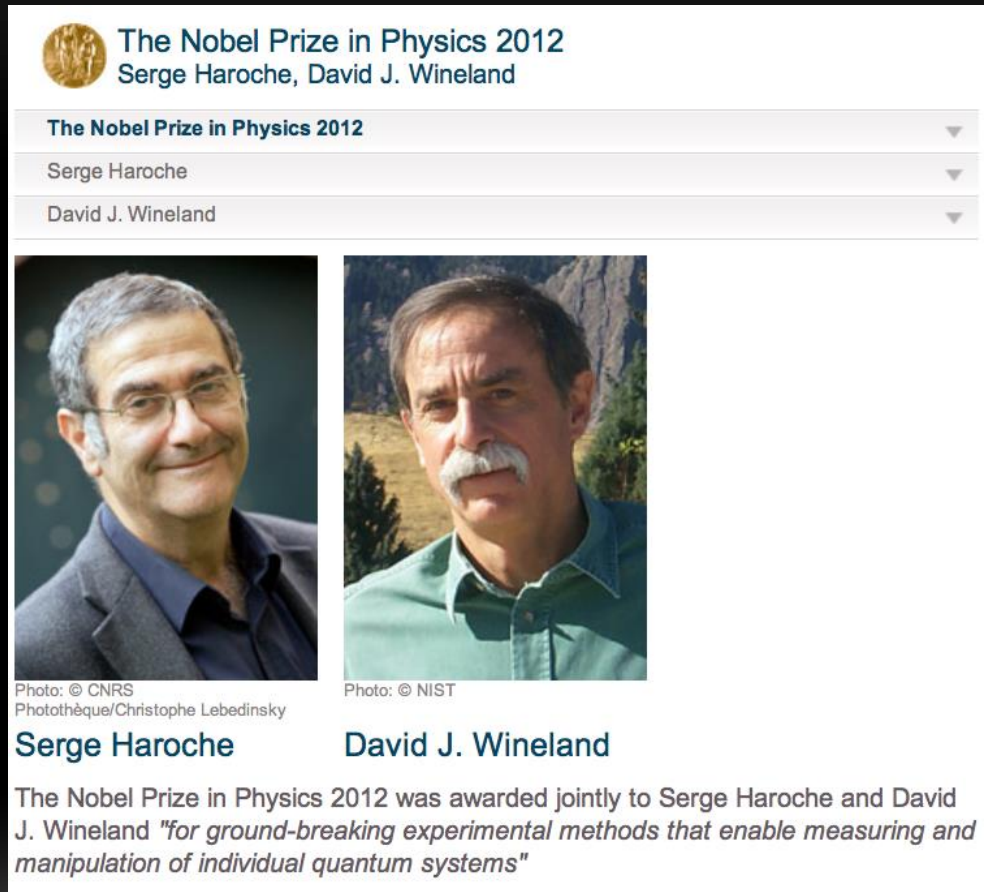


## Нобелевская Премия по физике 2012\*

“Нобелевские лауреаты открыли новую эру в экспериментах по квантовой механике, показав, что можно измерять состояния отдельных частиц, не разрушая их (состояния)”

\*разочарование 2012 года в ЦЕРНе

Исправлено в 2013 году



The screenshot shows the Nobel Prize website for the 2012 Physics award. At the top, there is a gold medal icon and the text "The Nobel Prize in Physics 2012" followed by the names "Serge Haroche, David J. Wineland". Below this is a navigation menu with "The Nobel Prize in Physics 2012" selected. Underneath, the names "Serge Haroche" and "David J. Wineland" are listed with dropdown arrows. The main content area features two side-by-side portraits. The left portrait is of Serge Haroche, a man with glasses and a dark jacket, with a caption "Photo: © CNRS Photothèque/Christophe Lebedinsky". The right portrait is of David J. Wineland, a man with a mustache and a green shirt, with a caption "Photo: © NIST". Below the portraits are the names "Serge Haroche" and "David J. Wineland" in blue text. At the bottom, a paragraph states: "The Nobel Prize in Physics 2012 was awarded jointly to Serge Haroche and David J. Wineland *for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems*".

**The Nobel Prize in Physics 2012**  
Serge Haroche, David J. Wineland

**The Nobel Prize in Physics 2012**

Serge Haroche

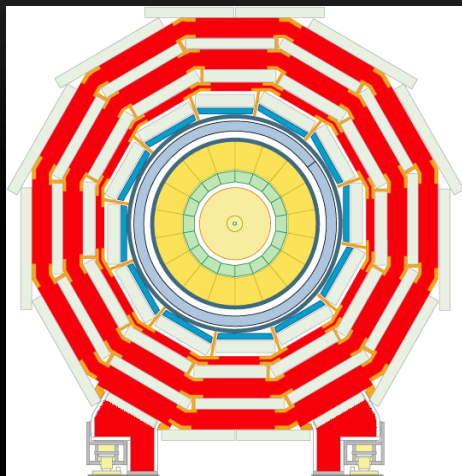
David J. Wineland

**Serge Haroche**

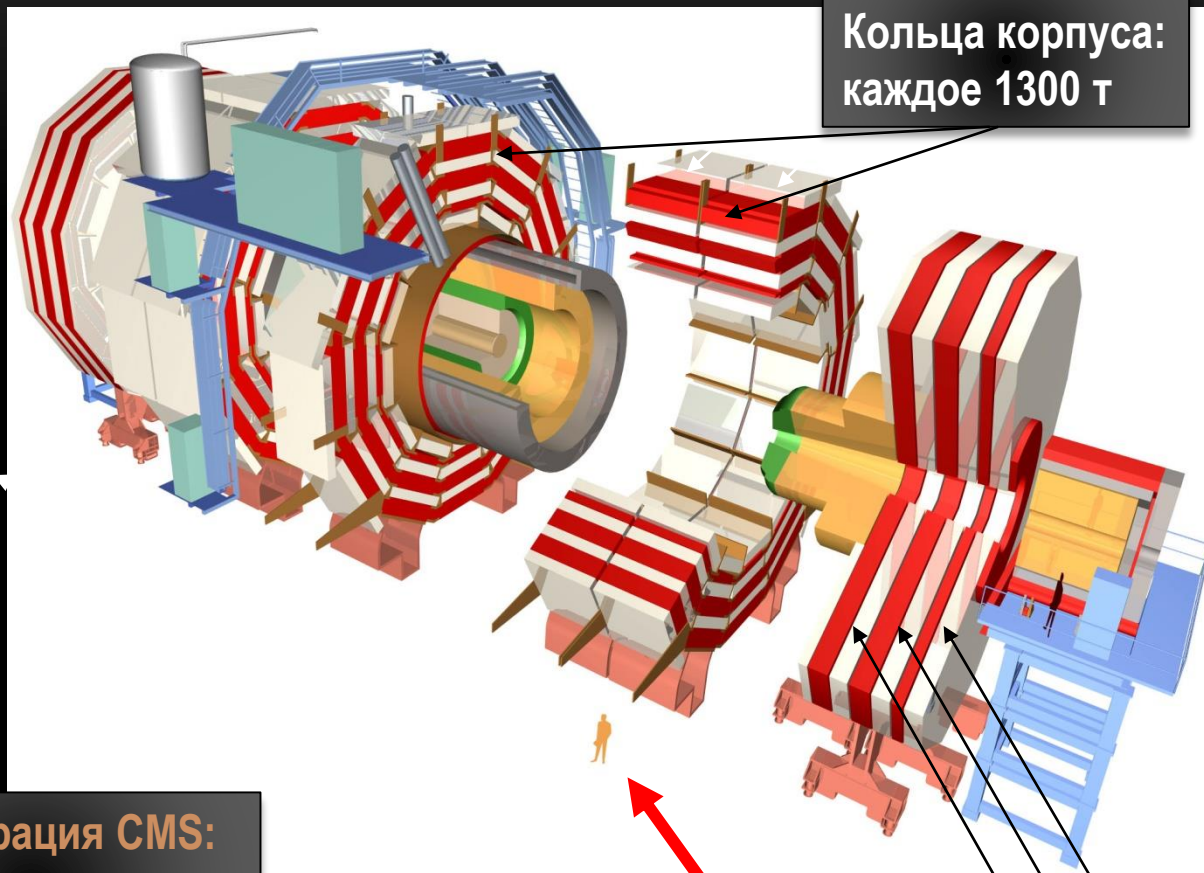
**David J. Wineland**

The Nobel Prize in Physics 2012 was awarded jointly to Serge Haroche and David J. Wineland *for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems*

# CMS: МАТРЁШКА ВЕСОМ 12500 Т



12500 т  
Железа хватит на  
Эйфелеву башню



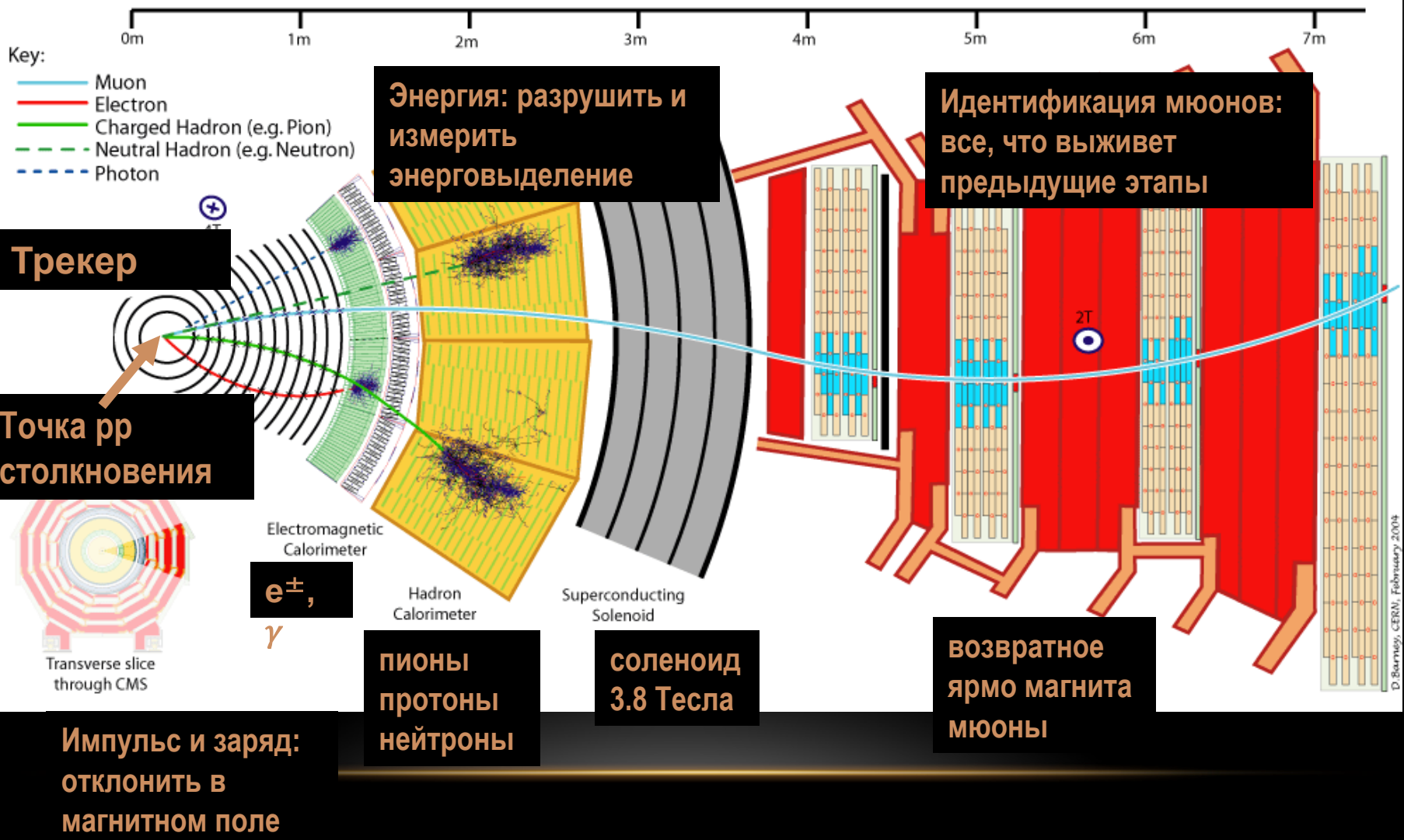
Кольца корпуса:  
каждое 1300 т

Человек

Диски торца

Коллаборация CMS:  
2930 ученых  
184 института

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ В CMS

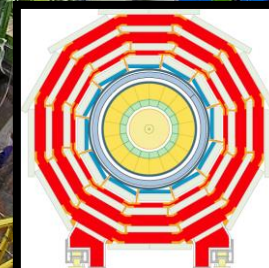
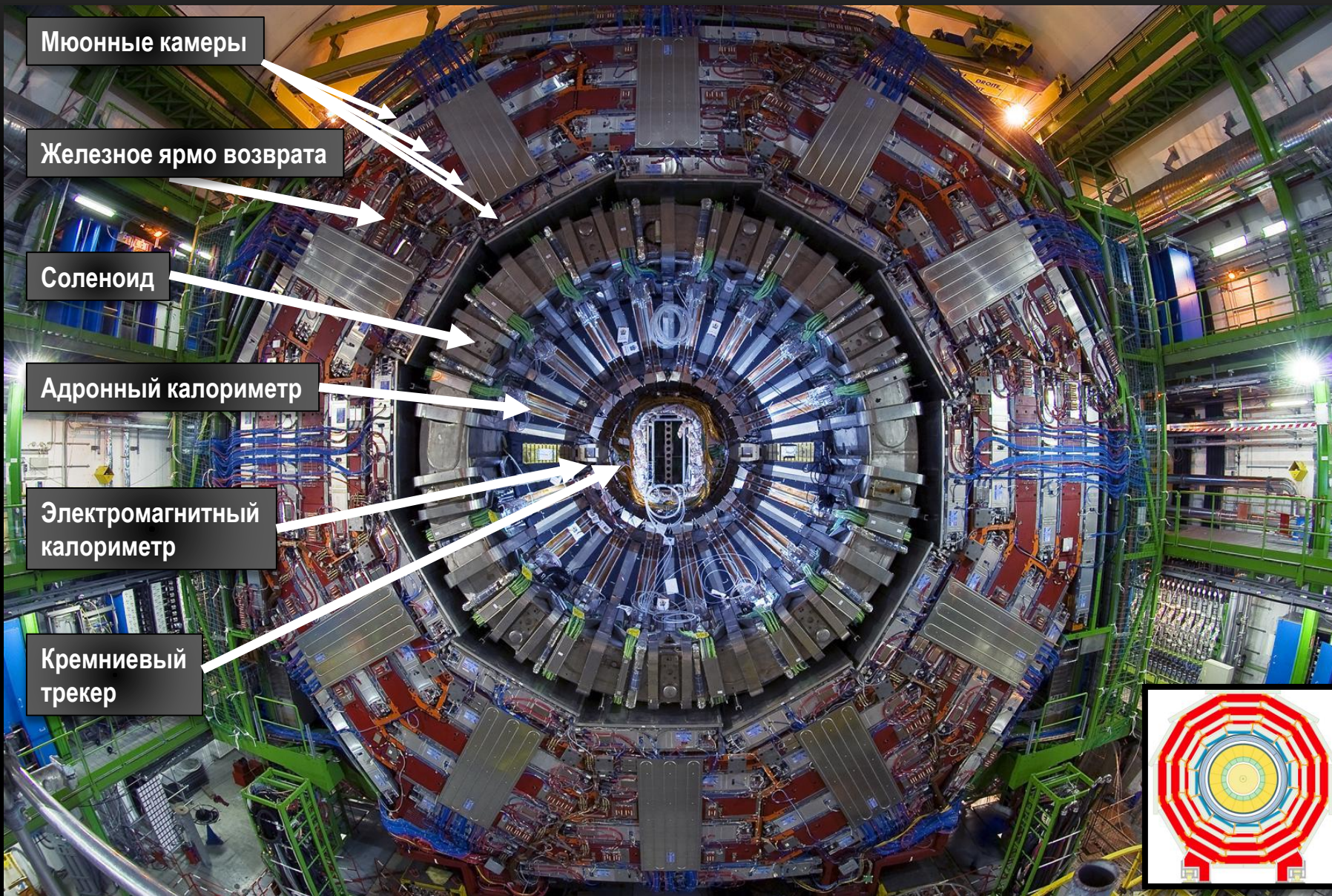


# СБОРКА ДЕТЕКТОРА CMS

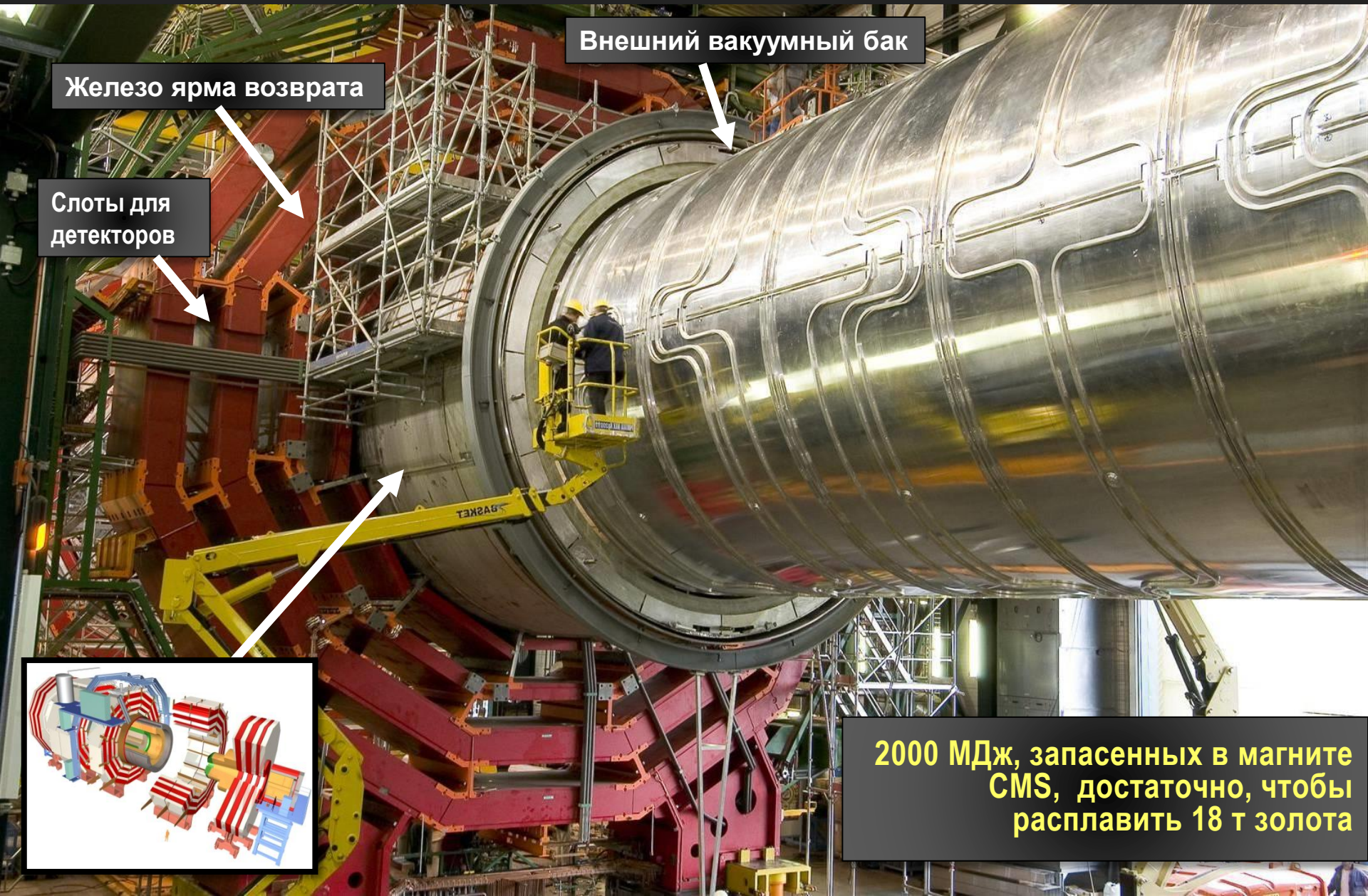
---

1998-2008

# СБОРКА КОРПУСА ЗАВЕРШЕНА



# МАГНИТ

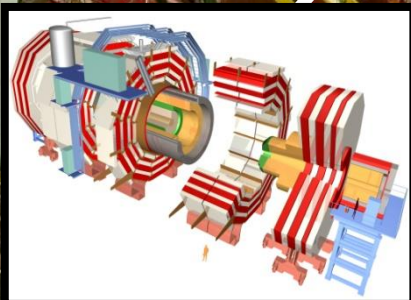


Внешний вакуумный бак

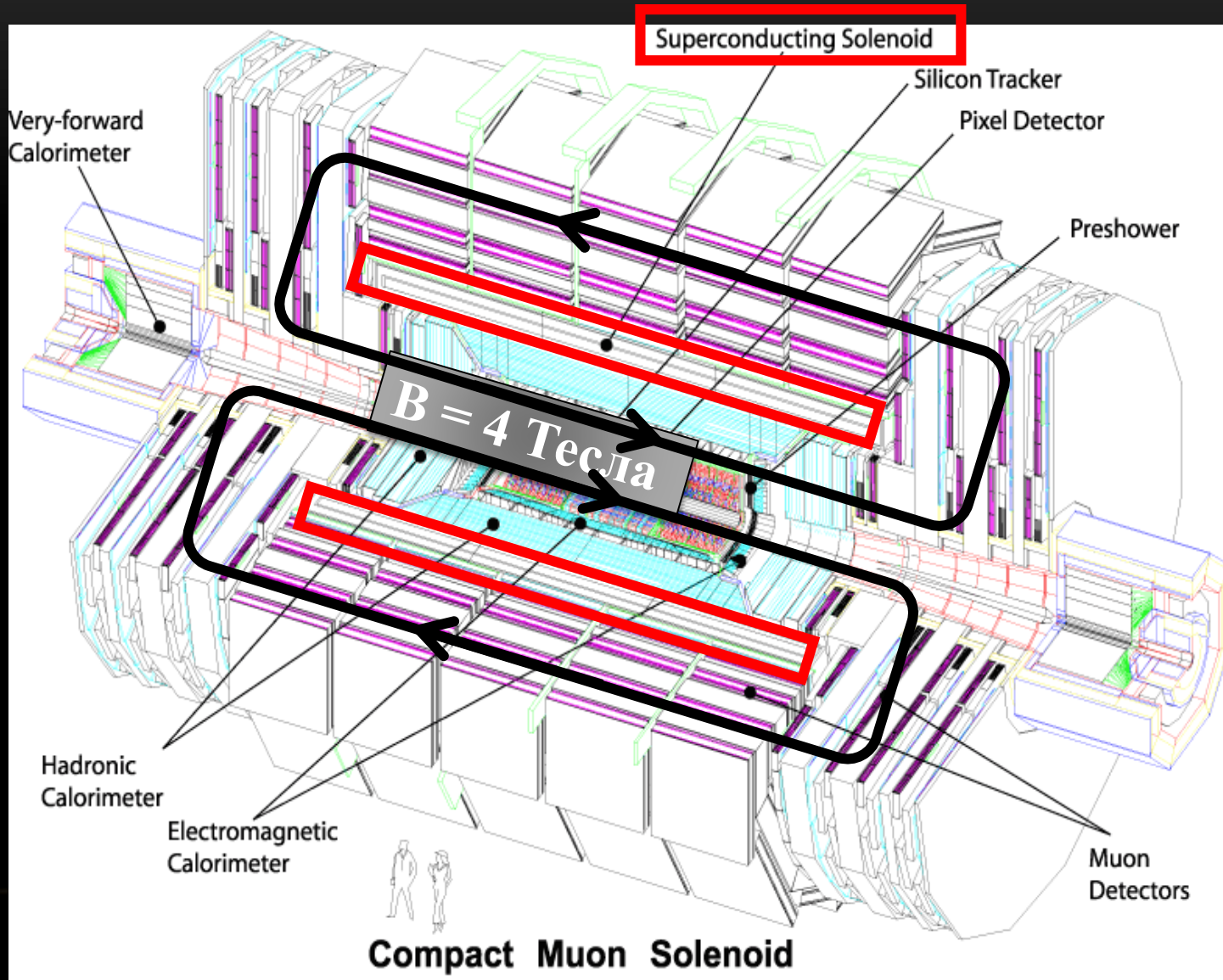
Железо ярма возврата

Слоты для детекторов

2000 МДж, запасенных в магните CMS, достаточно, чтобы расплавить 18 т золота

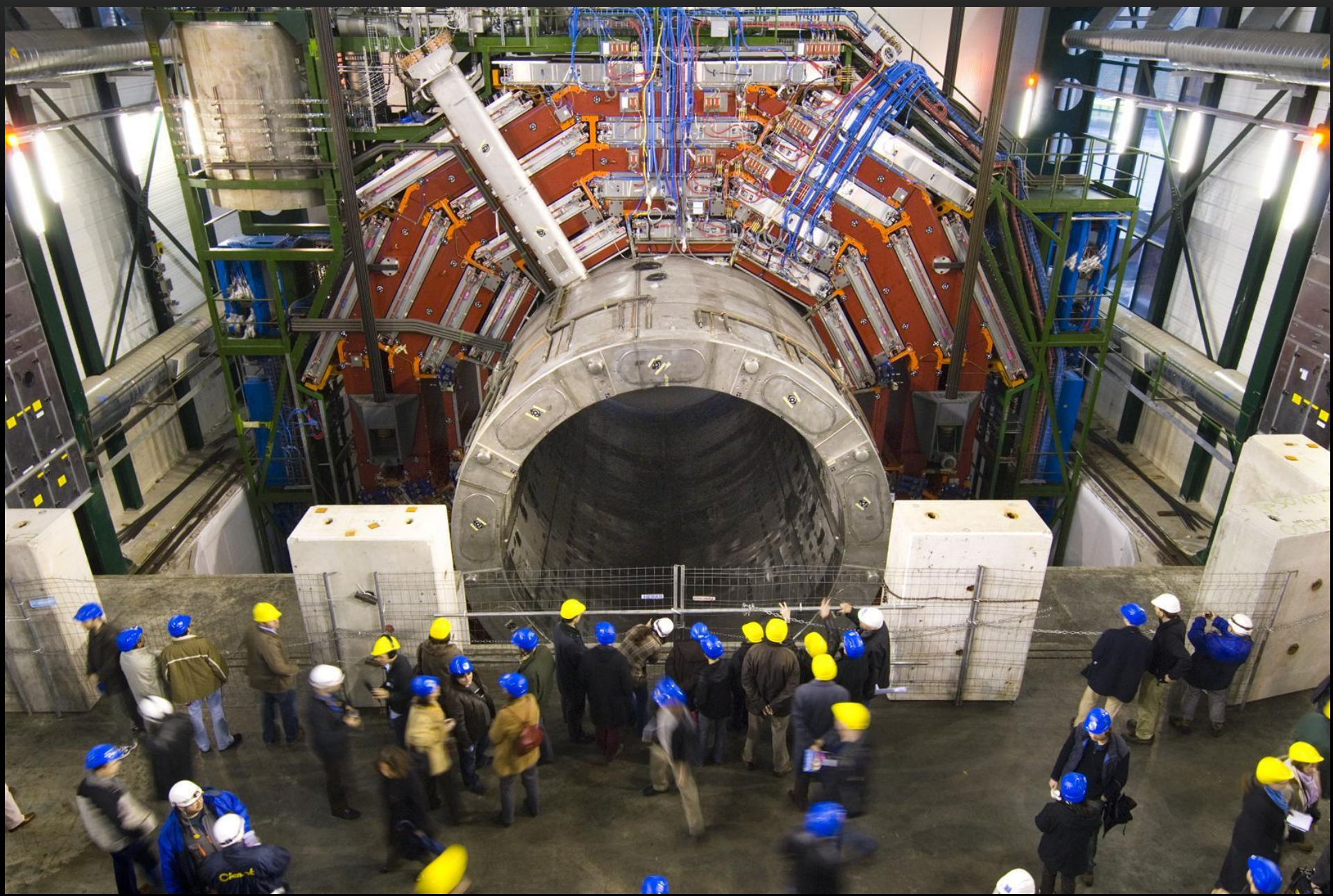


# КОНФИГУРАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

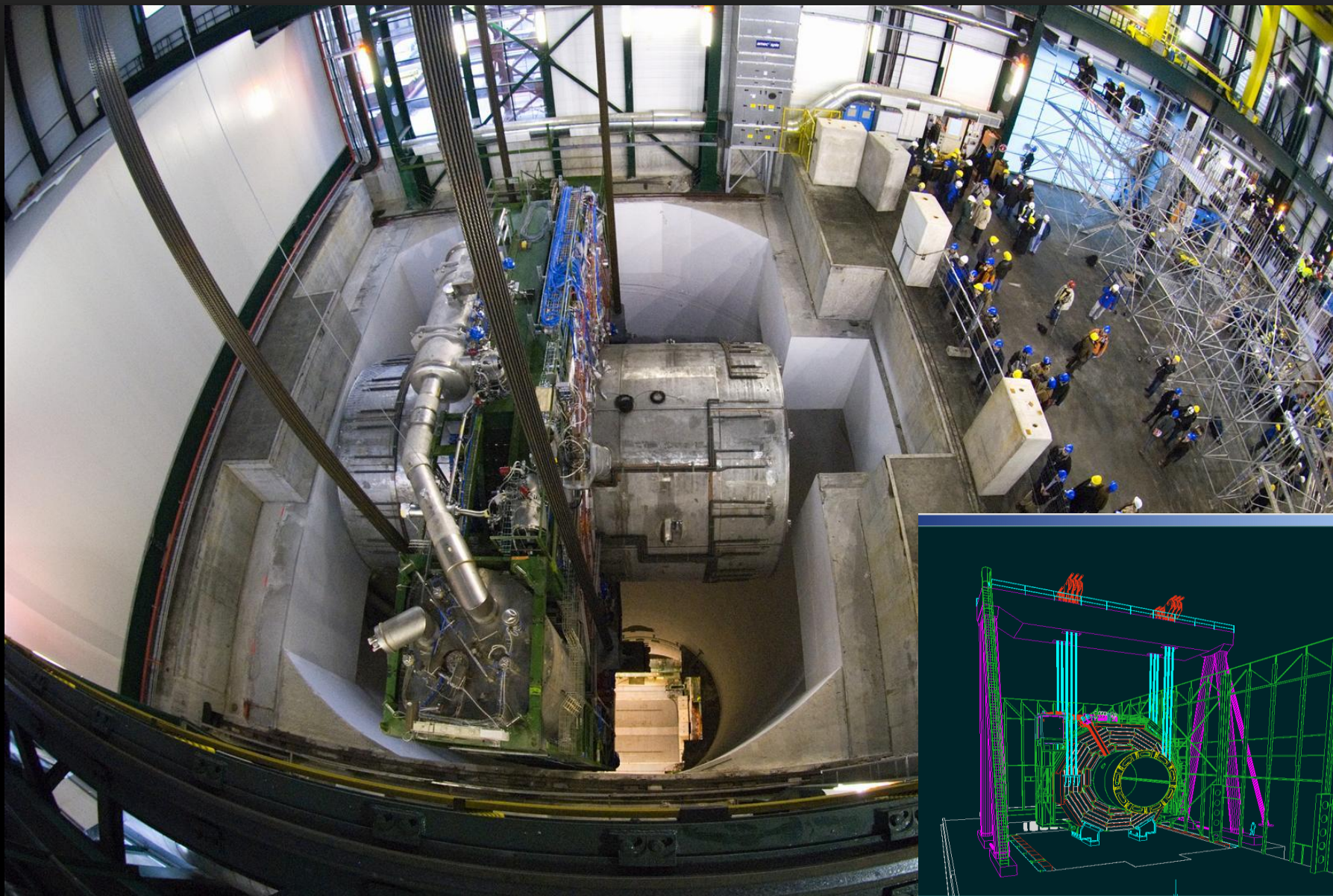




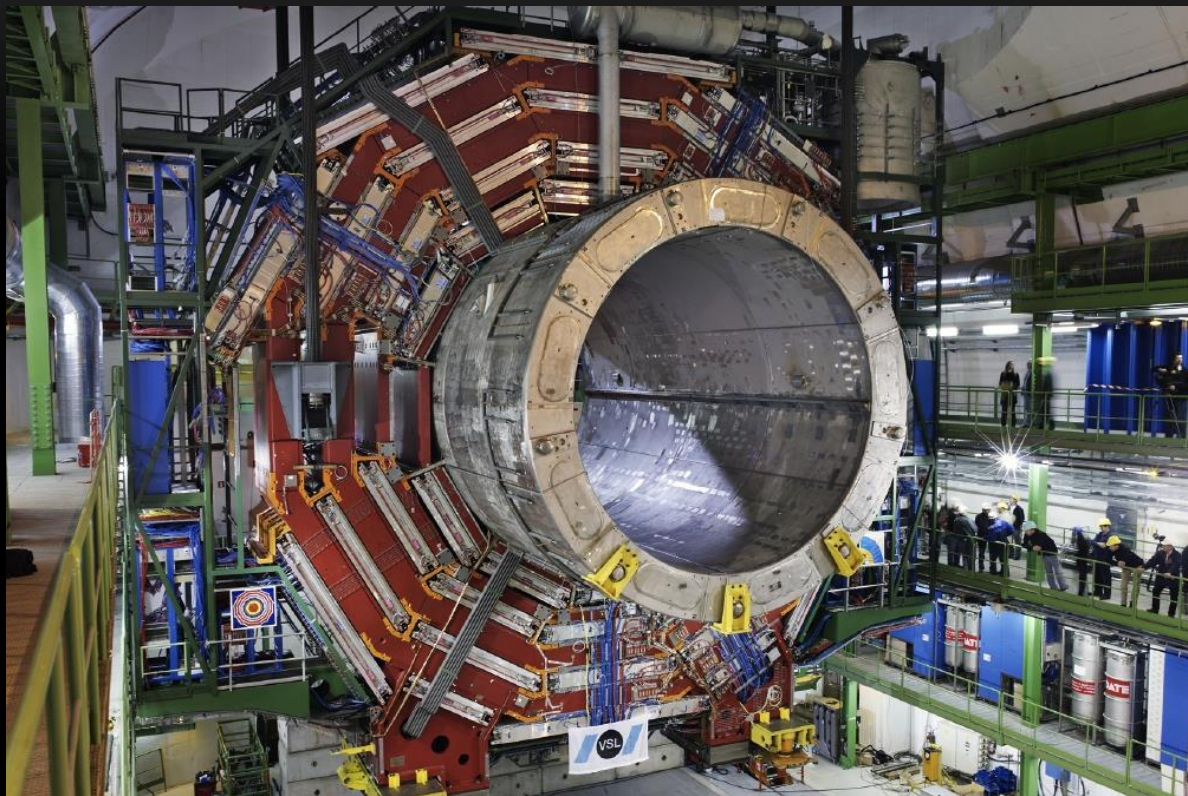
# БЕРЕЖНЫЙ СПУСК ОБОРУДОВАНИЯ СТОИМОСТЬЮ €60М



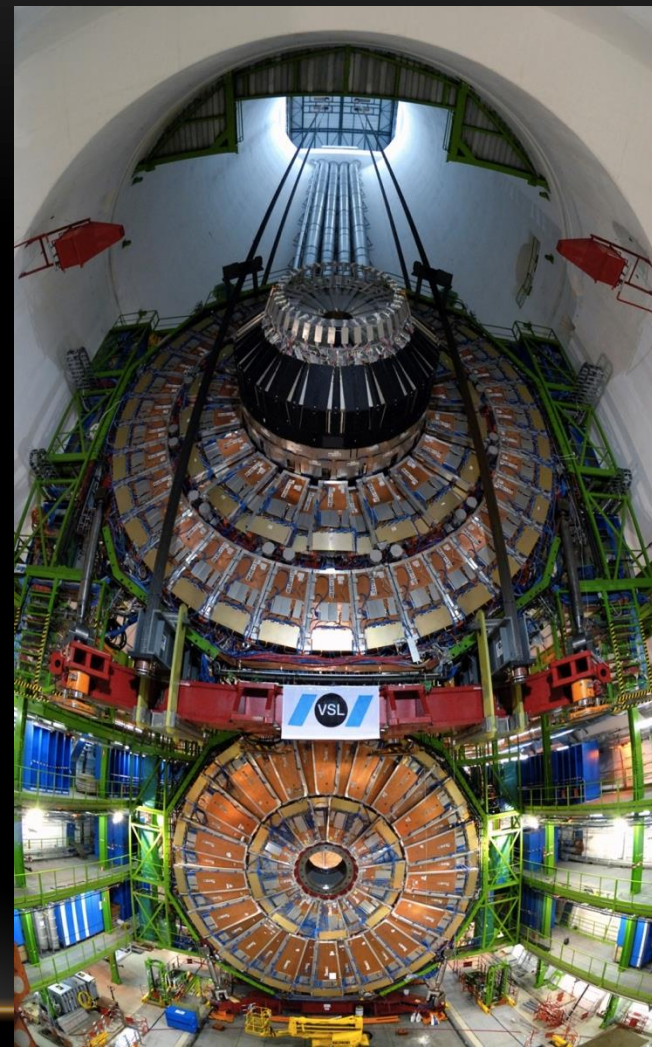
ЕЛЕ ПОМЕСТИЛСЯ!



# СПУСК СЕКТОРОВ CMS ~30 ЭТАЖЕЙ

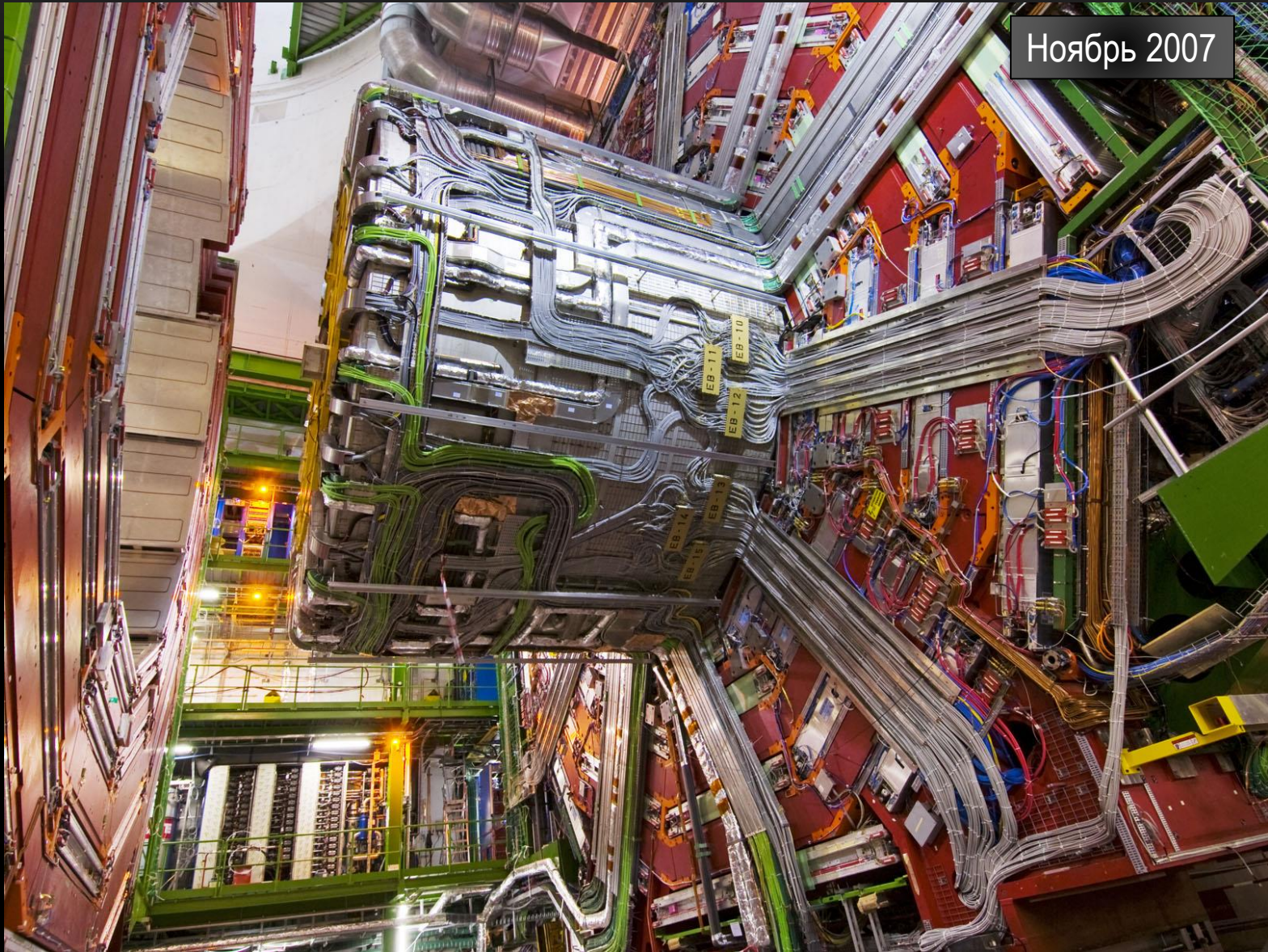


СОЛЕНОИД В ШАХТЕ



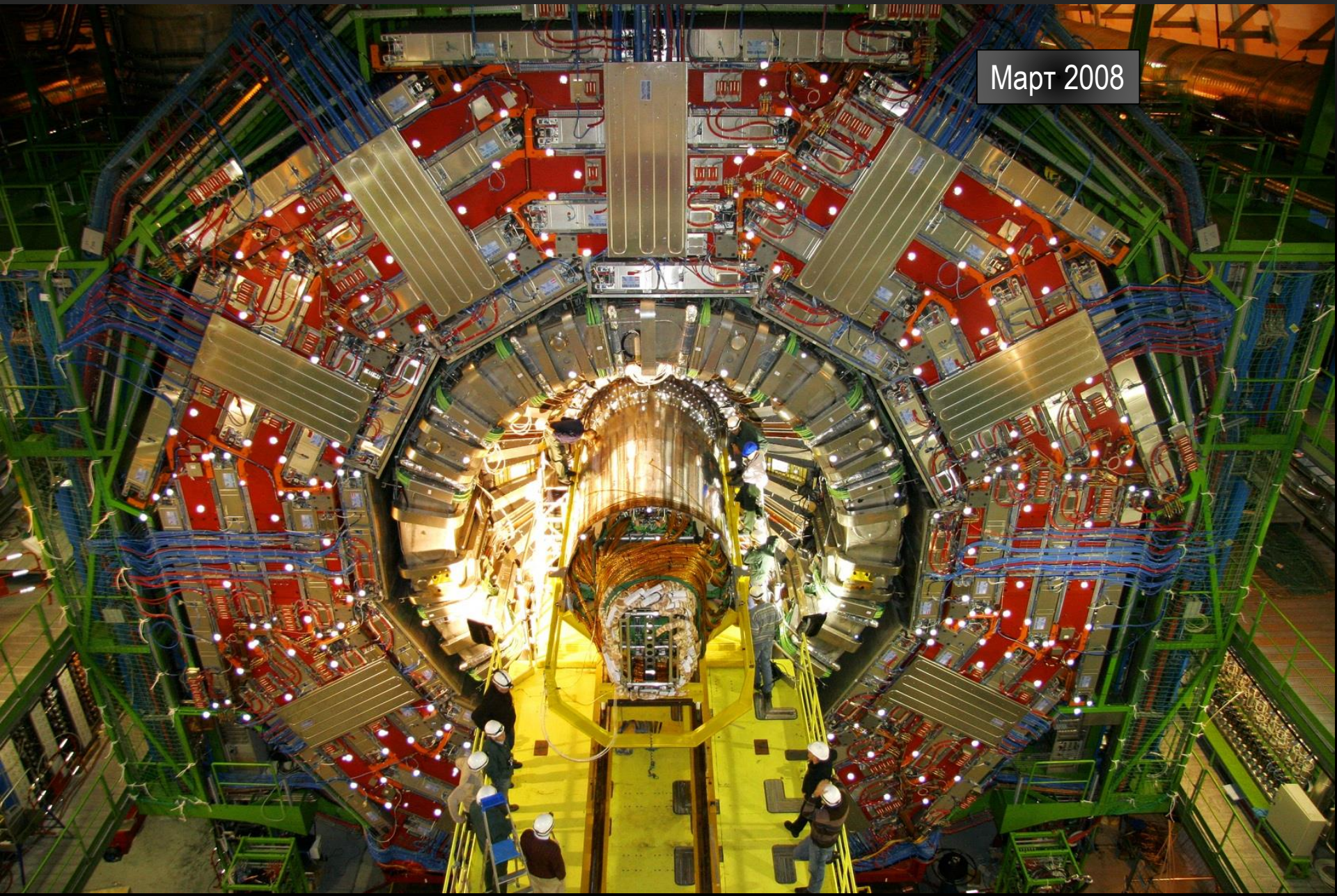
# КАБЕЛИ ЭЛЕКТРОНИКИ

Ноябрь 2007



# УСТАНОВКА СИ ТРЕКЕРА L=6 M, S=200 M<sup>2</sup>

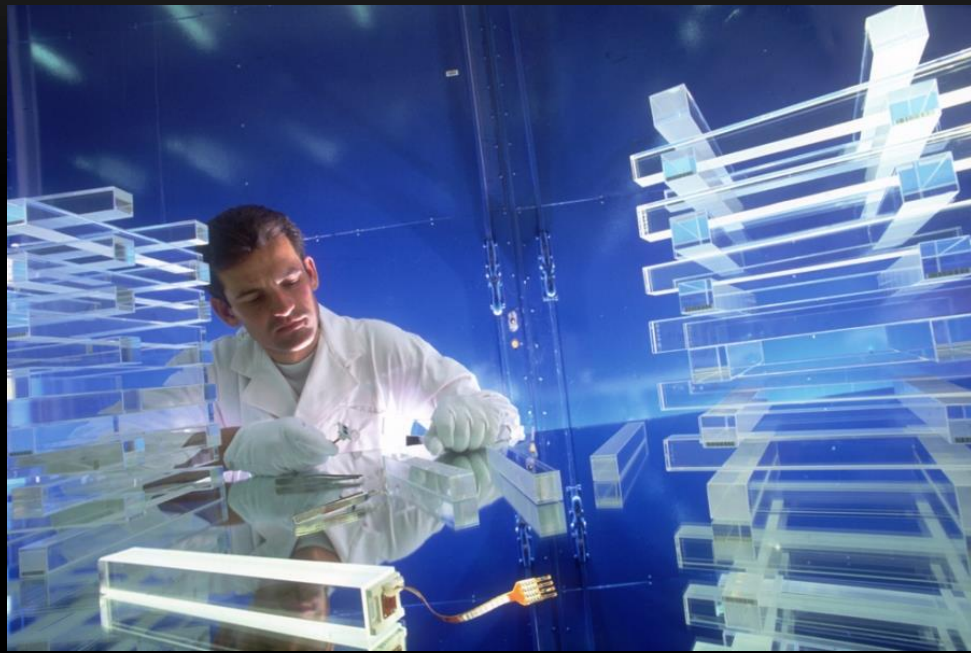
Март 2008



# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАЛОРИМЕТР



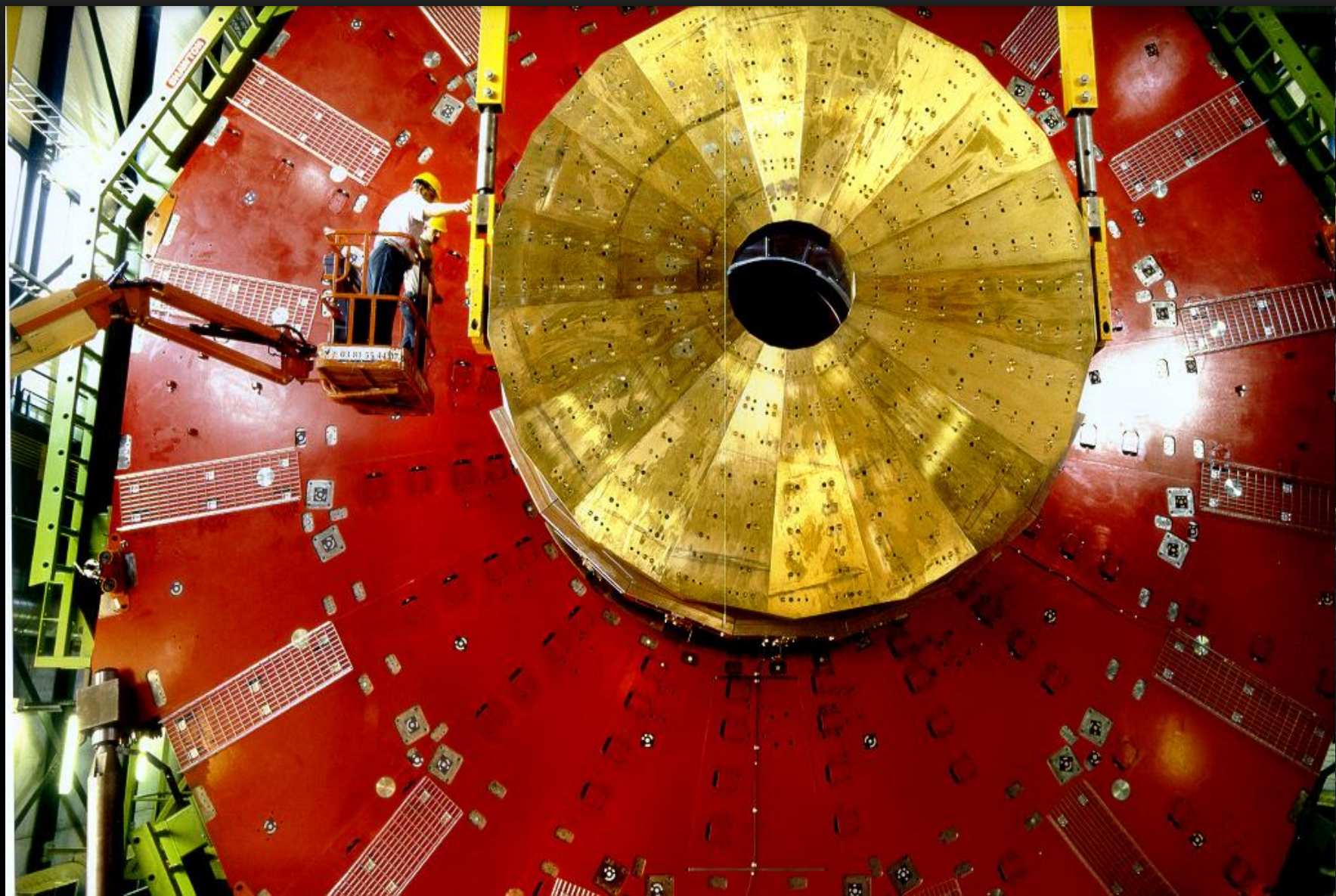
**Выращивание специальных  
кристаллов  $PbWO_4$**



**Кристаллы для детектора**

**Каждый кристалл стоит \$1000  
Количество кристаллов – 82,000**

# ПЕРЕОТЛИТЫЕ ЛАТУННЫЕ ГИЛЬЗЫ ДЛЯ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА

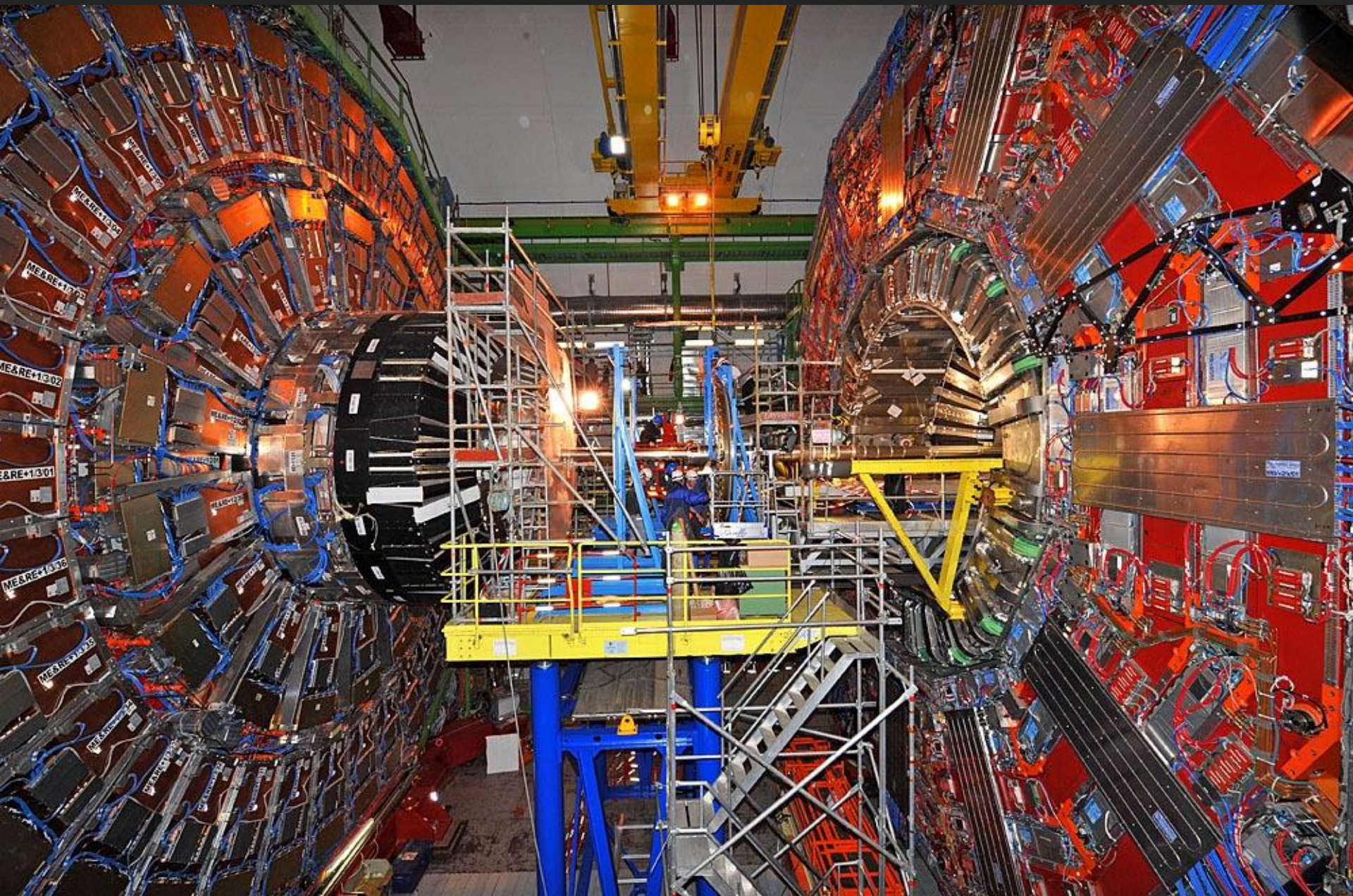


# ПРЕДЛИВНЕВЫЙ ДЕТЕКТОР ТОРЦА

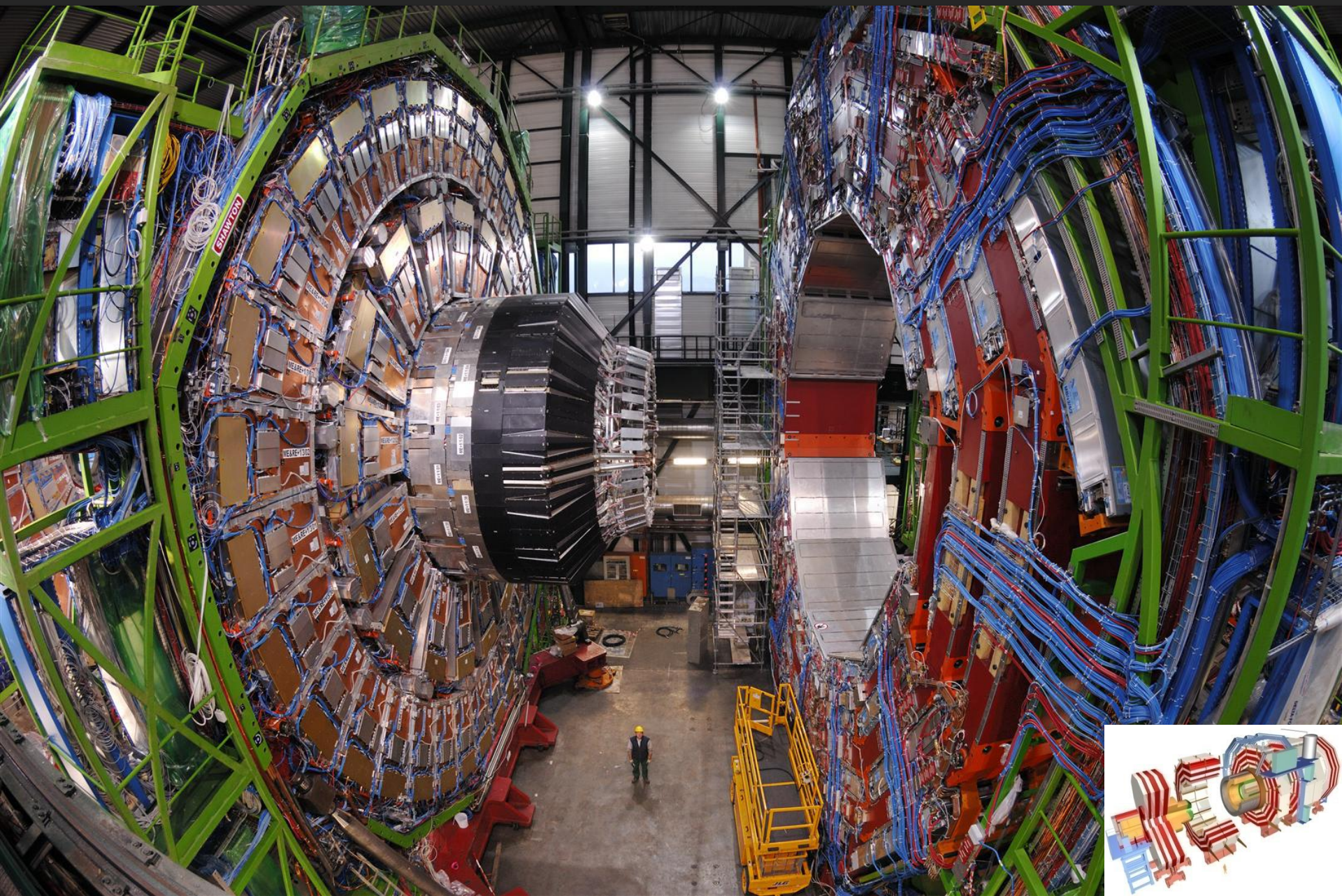




# ПОСЛЕДНИЕ НАСТРОЙКИ



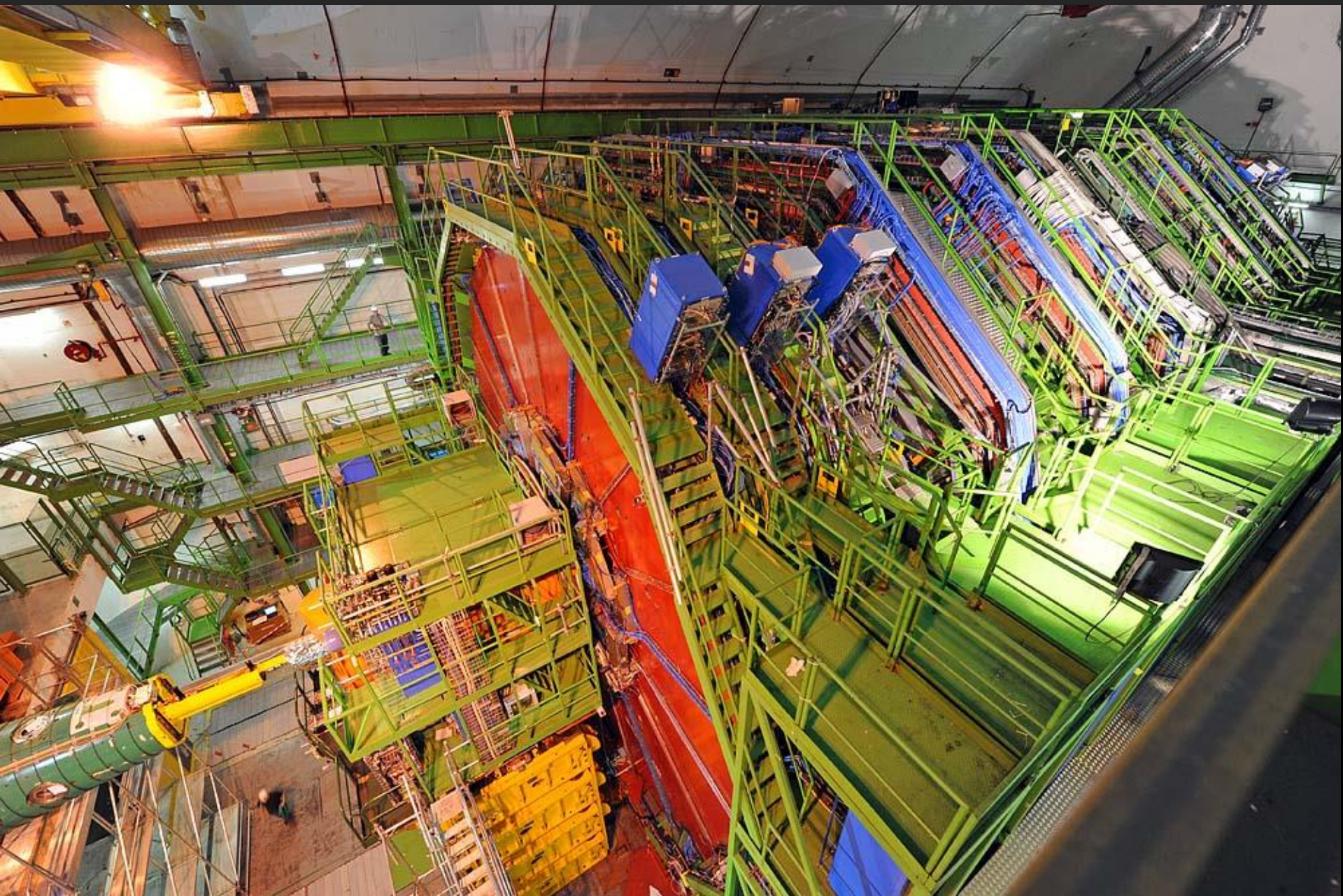
# ЗАВЕРШЕНИЕ СБОРКИ ПОД ЗЕМЛЕЙ



# ПЕРЕД ЗАКРЫТИЕМ



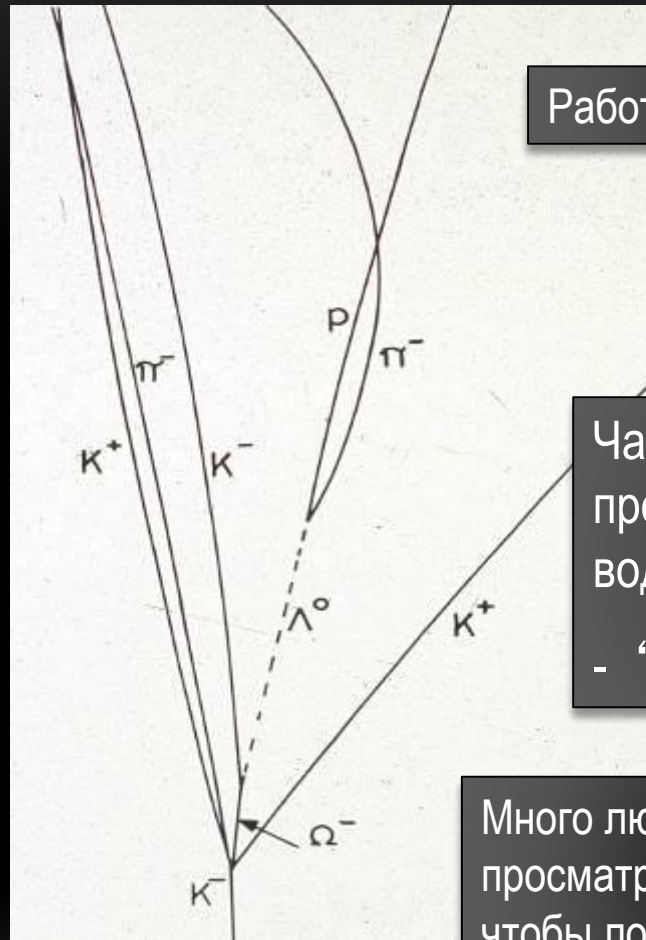
# CMS ГОТОВ К ПУЧКУ



# КАК МЫ РЕКОНСТРУИРУЕМ СОБЫТИЯ

---

# ПЕРВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ЧАСТИЦ: КАК ЭТО БЫЛО...



Работа с космическими лучами

Частица столкнулась с  
протоном в жидком  
водороде

- “Пузырьковая камера”

Много людей должны были  
просматривать фотографии,  
чтобы понять, что происходит

Сейчас это хорошая задача для лабораторной работы

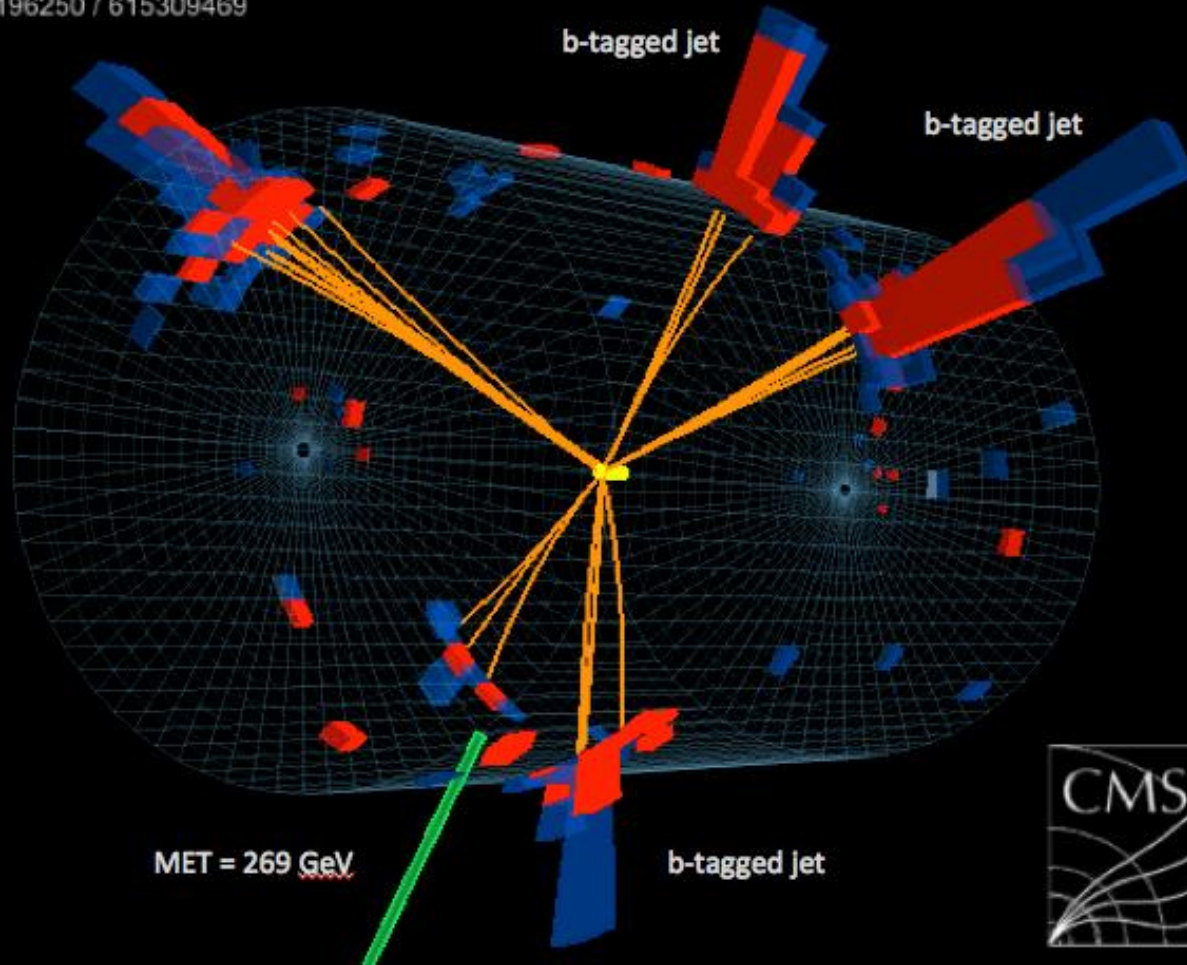
# ... И КАК ЭТО СЕЙЧАС

- CMS это фотоаппарат, который
  - имеет 80 мегапикселей
  - делает 3D-снимки 😊
  - до 40 миллионов фотографий в секунду 😊
  - и со стойкостью оборудования ~10 лет
- Но:
  - не очень портативный (~13 т) 😞
  - невозможно сохранить все: надо отбирать интересные
    - и делать это быстро!



# ... И КАК ЭТО СЕЙЧАС

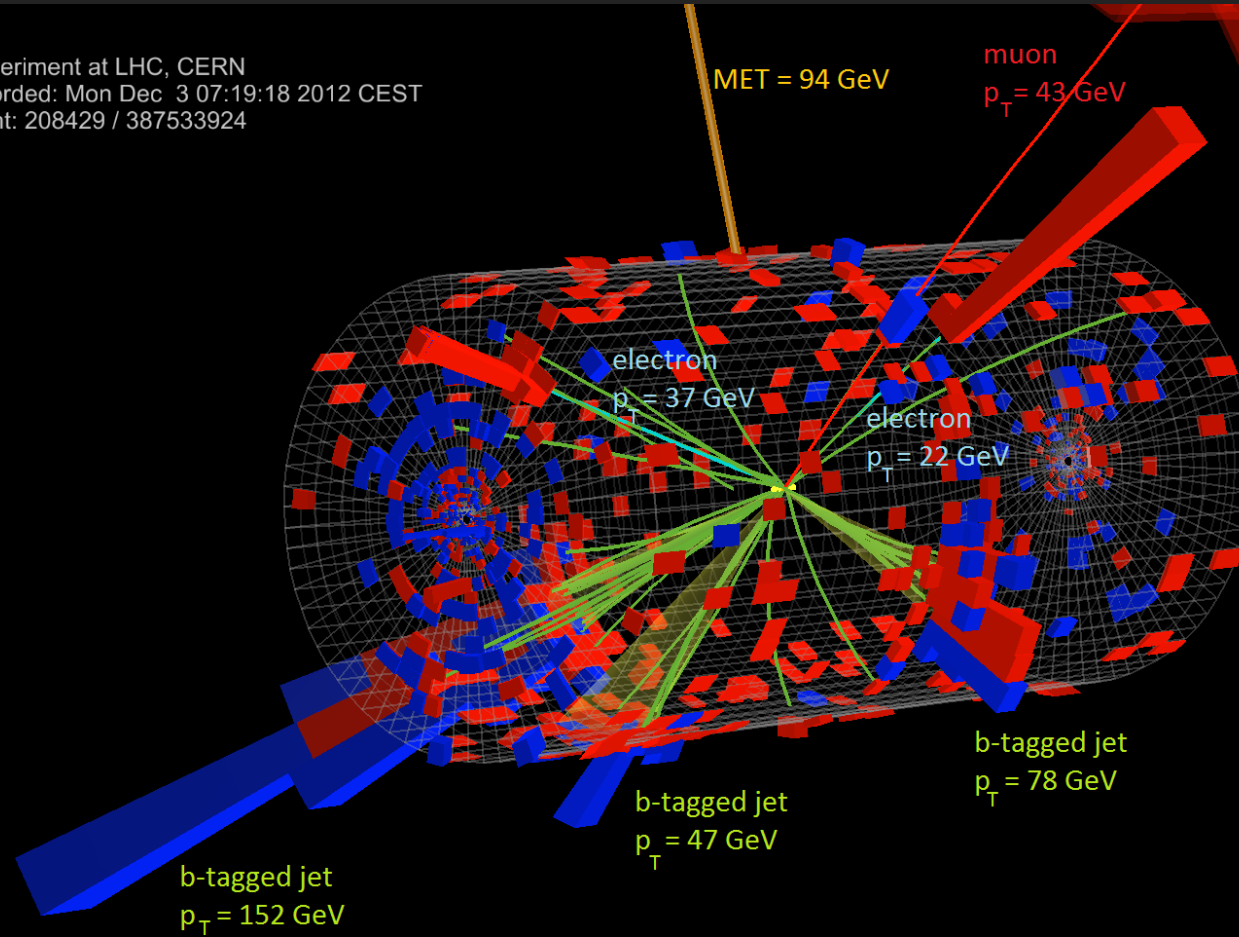
CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Wed Jun 13 21:51:54 2012 PDT  
Run/Event: 196250 / 615309469





# ... И КАК ЭТО СЕЙЧАС

CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon Dec 3 07:19:18 2012 CEST  
Run/Event: 208429 / 387533924



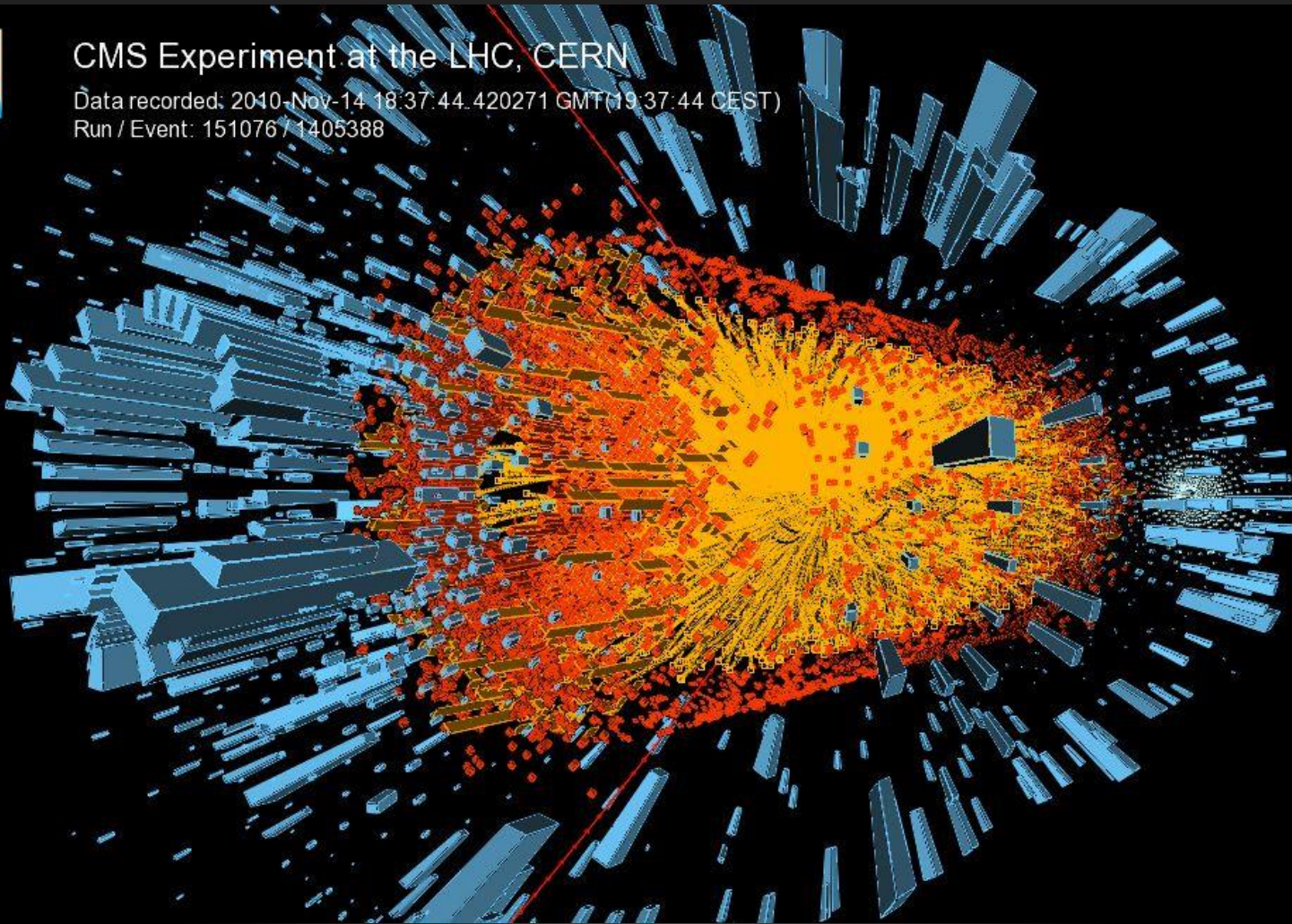
# ... И ДАЖЕ ТАК



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2010-Nov-14 18:37:44.420271 GMT(19:37:44 CEST)

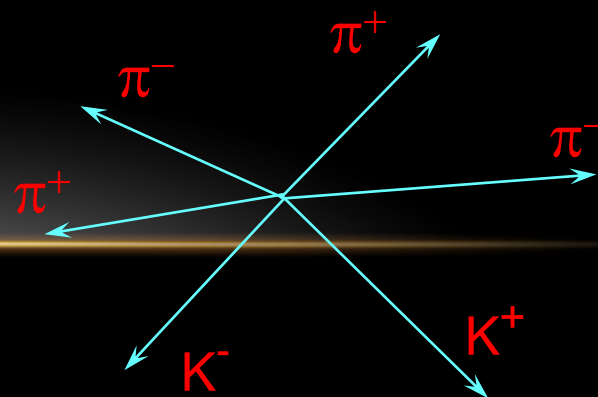
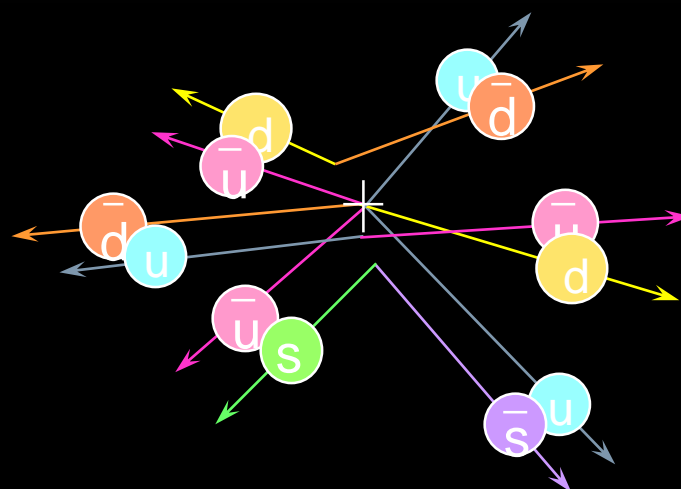
Run / Event: 151076 / 1405388



# НЕИНТЕРЕСНЫЙ СНИМОК: ВЫБРАСЫВАЕМ



- Пример столкновения протона и антипротона:
  - они состоят из кварков и глюонов, которые нельзя разъединить
- Сталкиваются сразу несколько протонов в сгустке, а в каждом протоне несколько частиц
- И чаще всего происходит нечто не очень интересное:



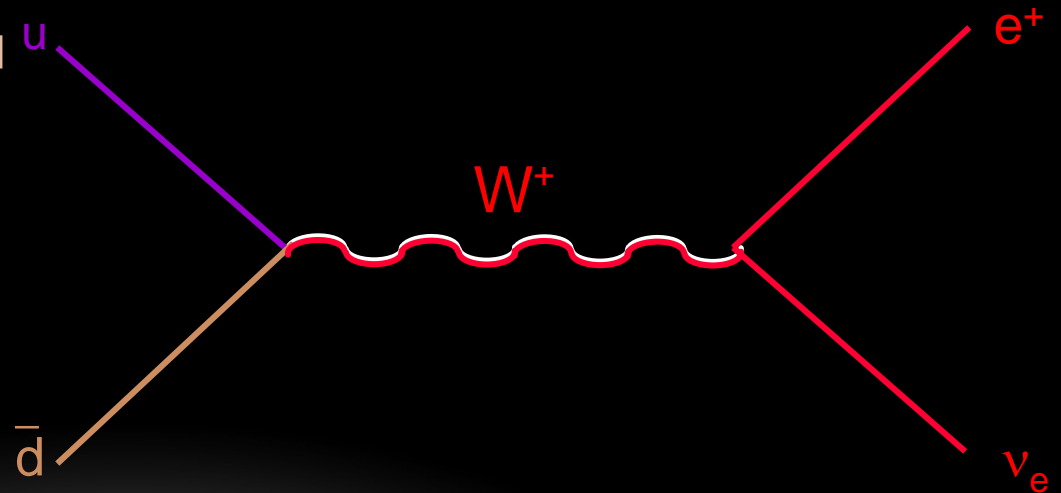
# ИНТЕРЕСНЫЙ СНИМОК: ХРАНИМ



Пример: рождение  $W$ -бозона и его распад на позитрон и нейтрино

(в  $10^7$  раз реже, чем пред.)

(Фейнмановская диаграмма в пространстве-времени)



# ТРУДНОСТИ ВЫБОРА

- Столкновения очень частые:
  - Пересечение сгустков протонов  $\sim 16.5$  миллионов раз в секунду.
  - Около 20-30 пар протонов сталкиваются во время пересечения.
- Интересные события очень редки:
  - менее 1 на 10 миллиардов для наиболее искомых.
- Мы физически можем сохранить 400 событий в секунду.
- Нужно выбирать и принимать решение быстро!
- Уровни решений ('триггера')
  - Предварительный анализ производится в течение  $\sim 10^{-6}$  с и  $10^5$  событий из  $1.7 \times 10^7$  временно хранятся
  - Конечный анализ занимает  $\sim 0.1$  с: мы используем  $\sim 10000$  компьютеров
- И все равно данных остается очень много

# ТРИГГЕР

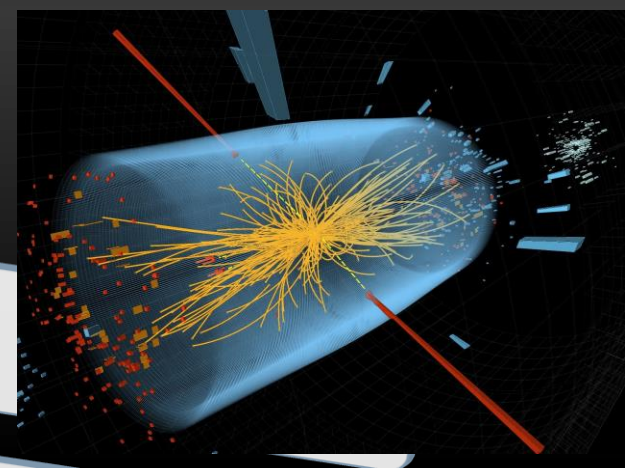
- Уровень 1 (Level 1):

уровень детекторов, отбор по одновременному наличию сигналов в тех или иных считывающих каналах, идентификация частиц и отбор по грубым оценкам координат и энергии

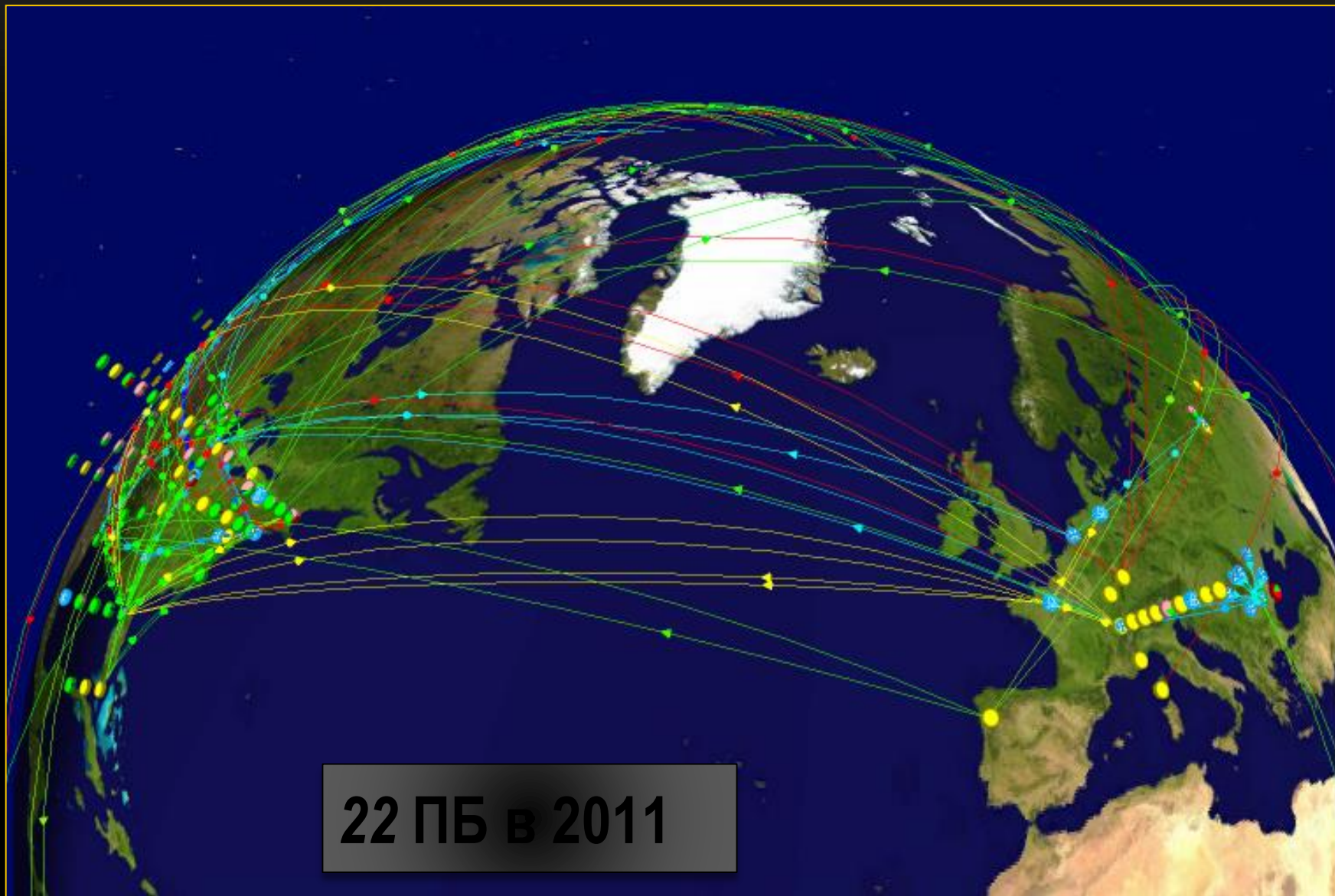
- Триггер высокого уровня (High Level Trigger – HLT):

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

- Результат: 1000 ТБ/с  $\Rightarrow$  100 МБ/с
- Одно событие: ~1 МБ
- Поток: ~3 ПБ/год ( $3 \times 10^{15}$ )



# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАННЫХ: ГРИД





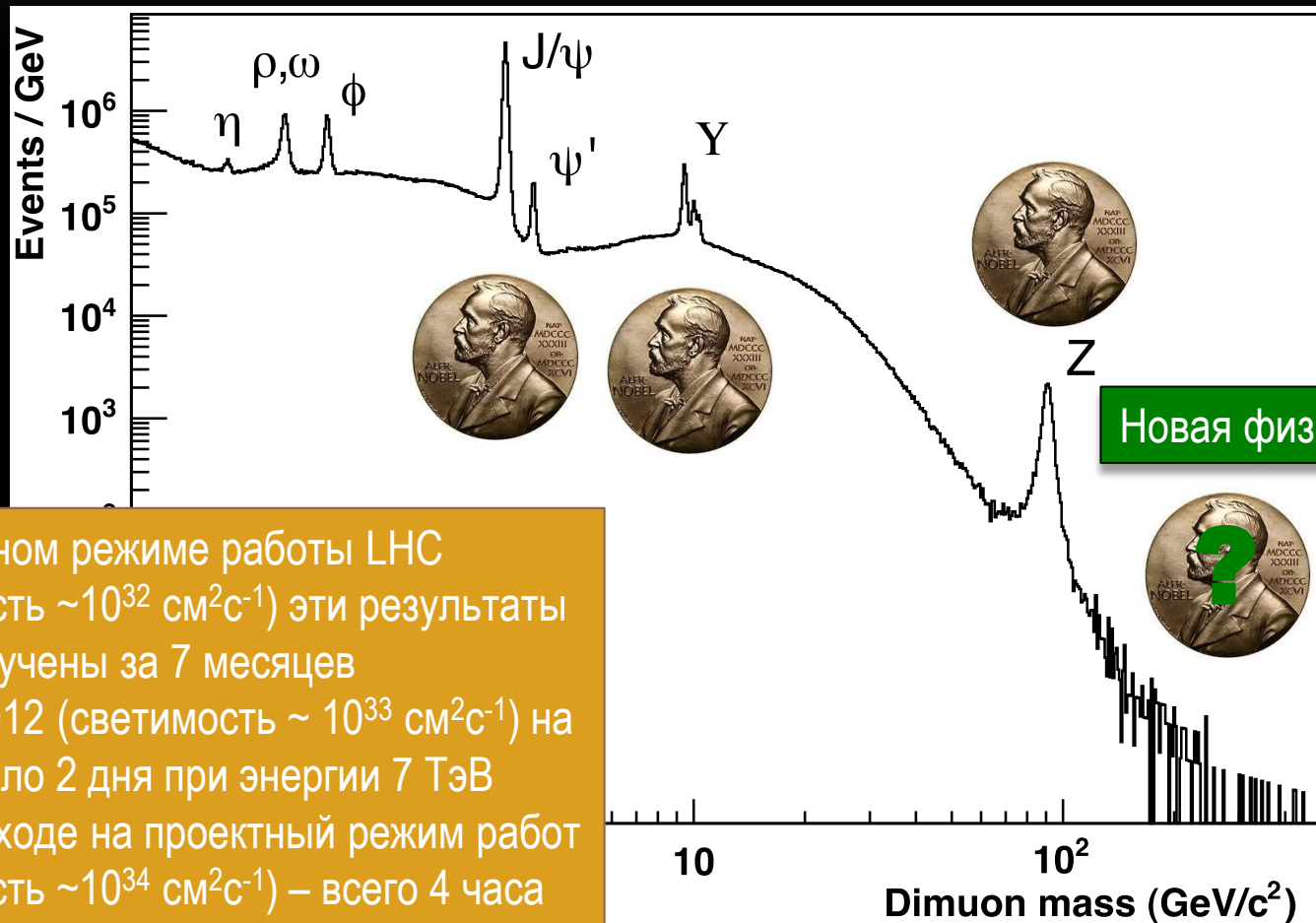


АНАЛИЗ

---

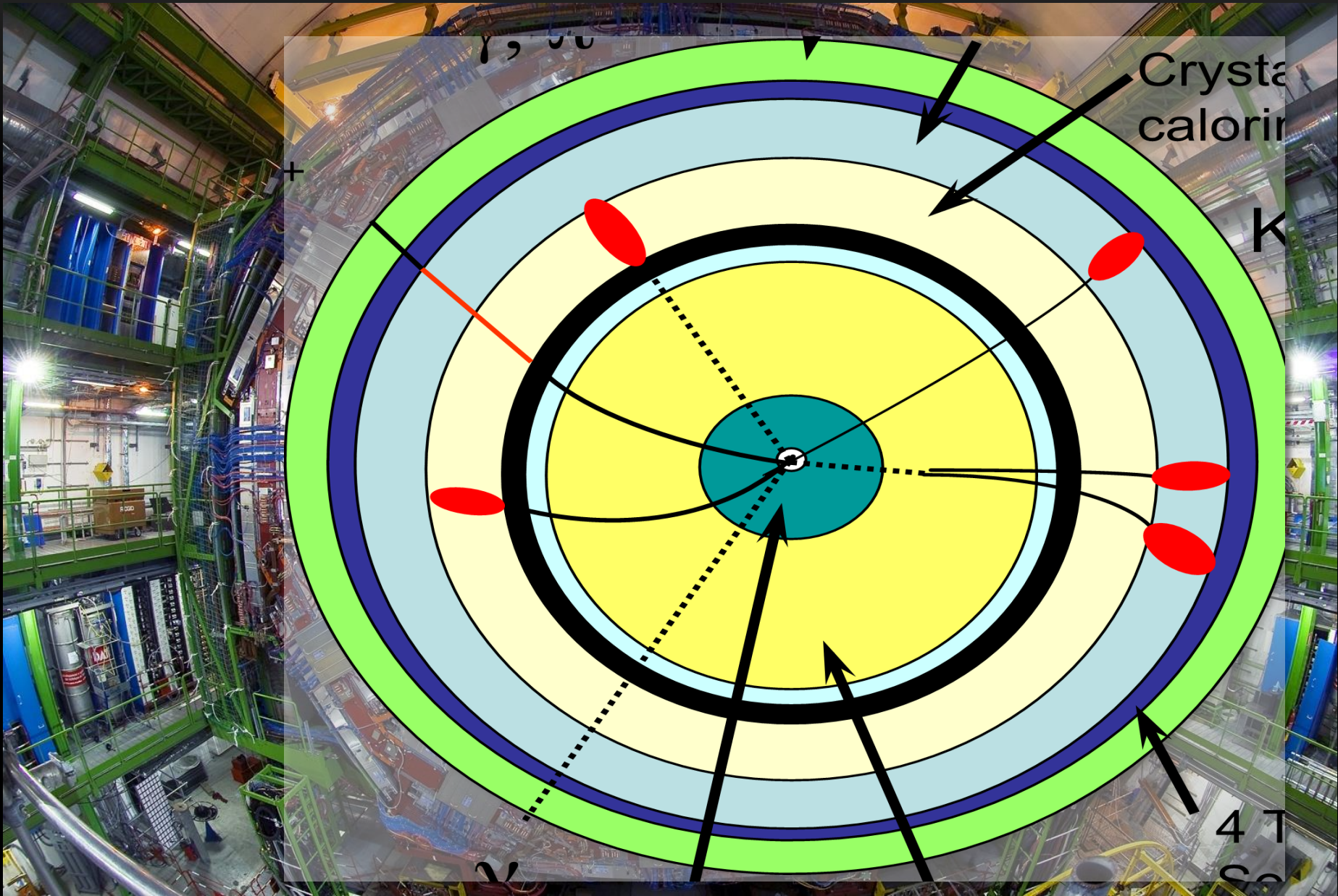
# ПОЧЕМУ МЮОНЫ?

- Тяжело спутать с другими частицами: чистый сигнал
- Часто являются конечным продуктом распада интересующих частиц

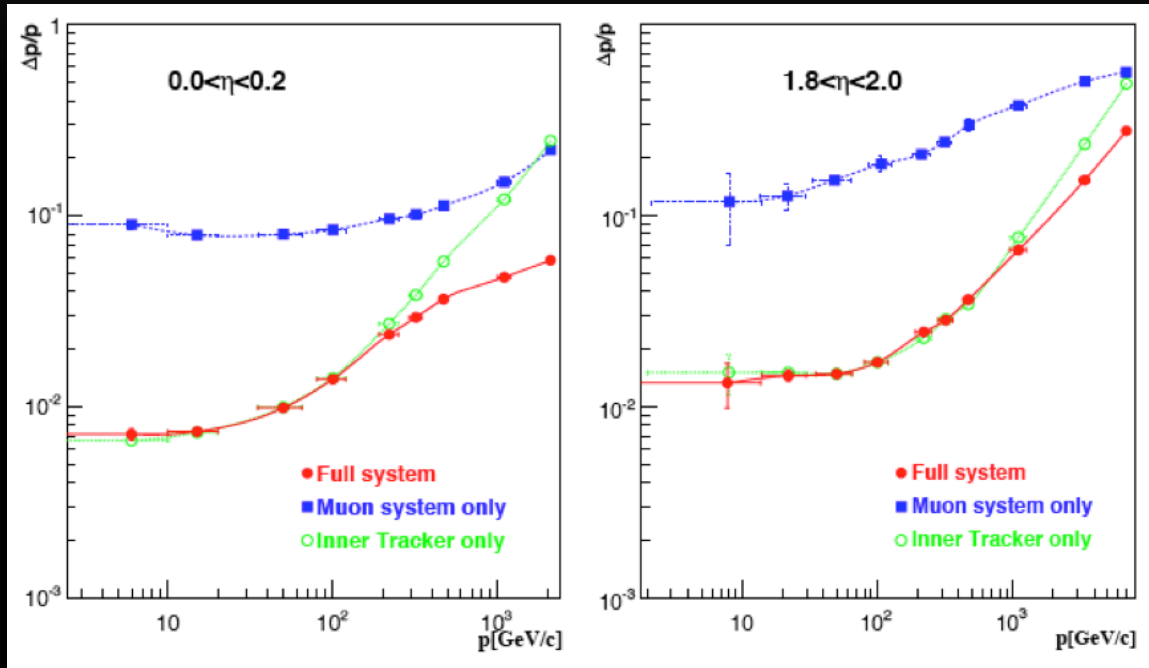


- В начальном режиме работы LHC (светимость  $\sim 10^{32} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$ ) эти результаты были получены за 7 месяцев
- В 2011-2012 (светимость  $\sim 10^{33} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$ ) на это уходило 2 дня при энергии 7 ТэВ
- При переходе на проектный режим работ (светимость  $\sim 10^{34} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$ ) – всего 4 часа при энергии 14 ТэВ

# РЕКОНСТРУКЦИЯ СОБЫТИЙ



# ИЗМЕРЕНИЕ МЮОНОВ

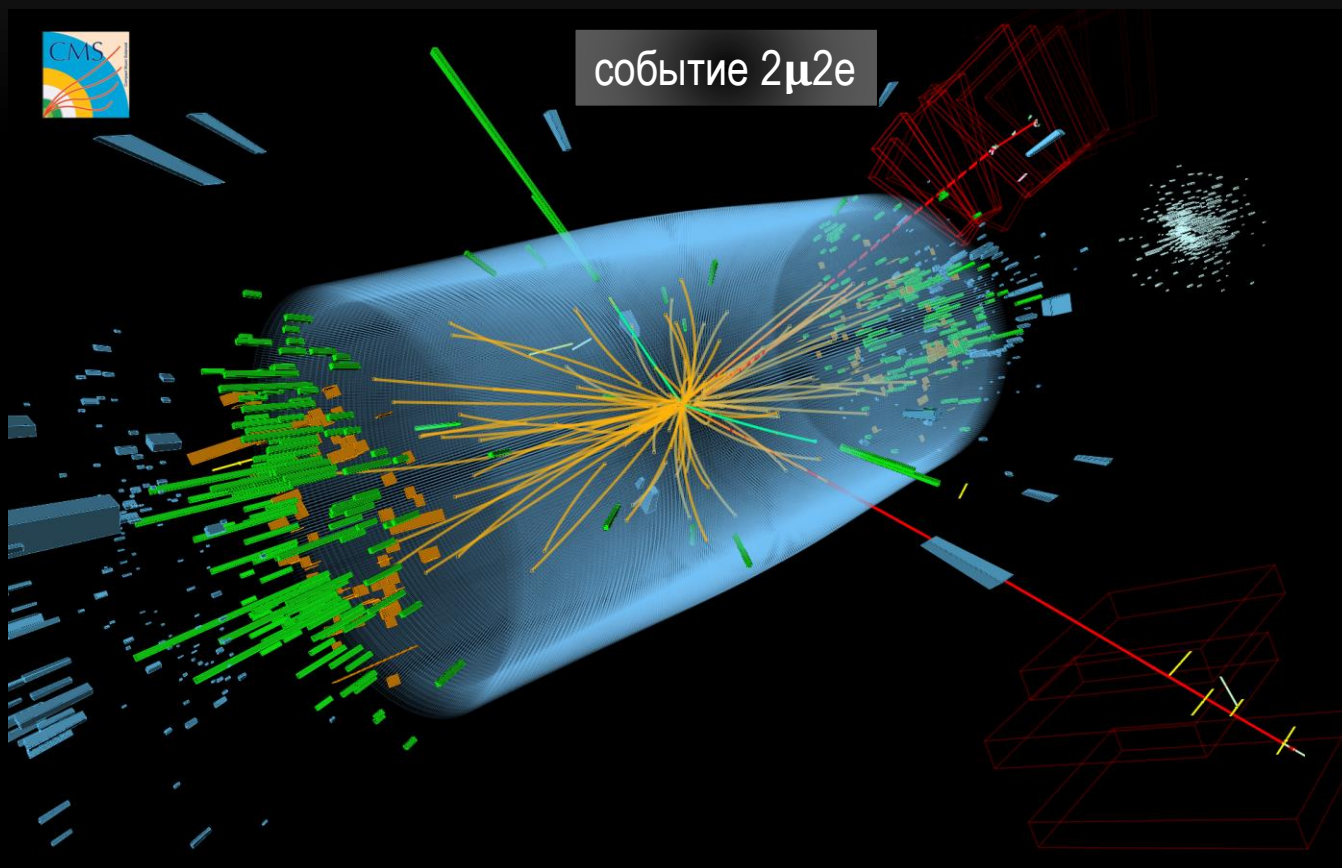


Точность измерения импульса:

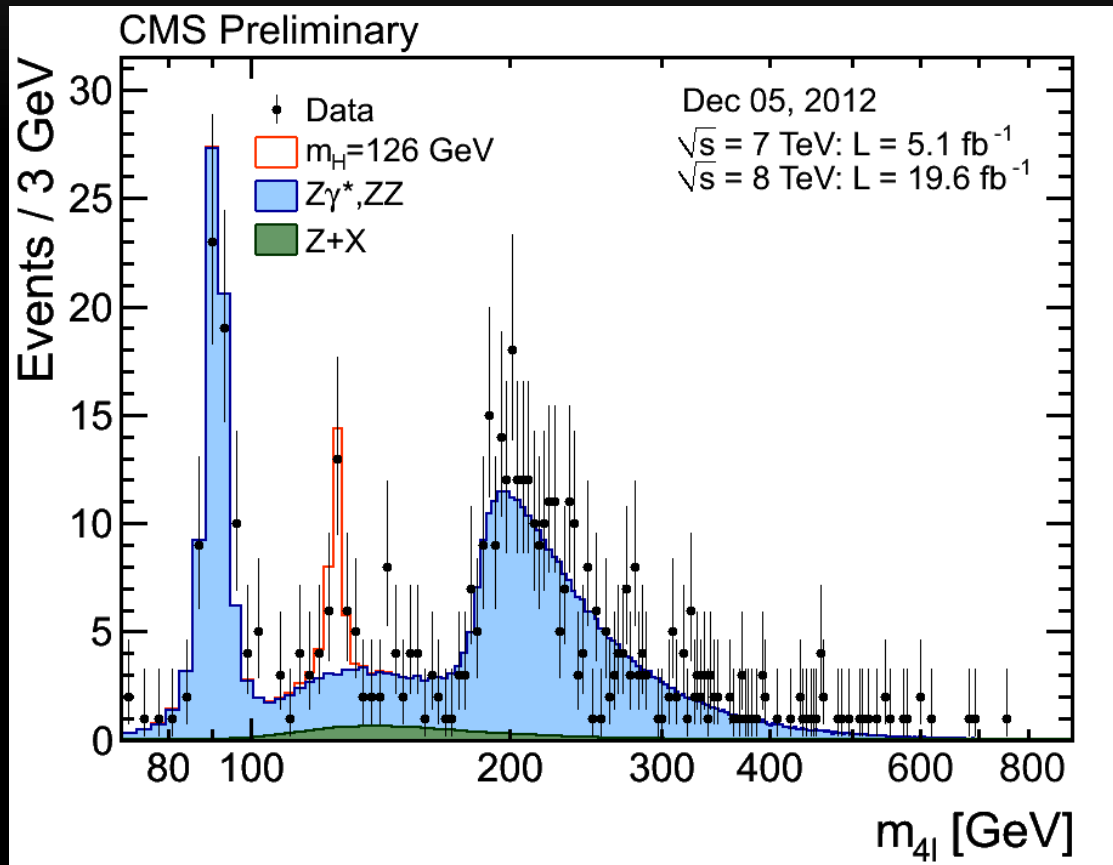
$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\sigma(s)}{s} \propto \frac{k\sigma(x)p}{BL^2}$$

- Цель не только измерить большие импульсы, но измерить их точно: проектная погрешность 10% для  $p=1$  ТэВ
- С заданием справились!

# РЕЗУЛЬТАТ



# БОЗОН ХИГГСА В 4 ЛЕПТОНАХ



# ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ

## 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

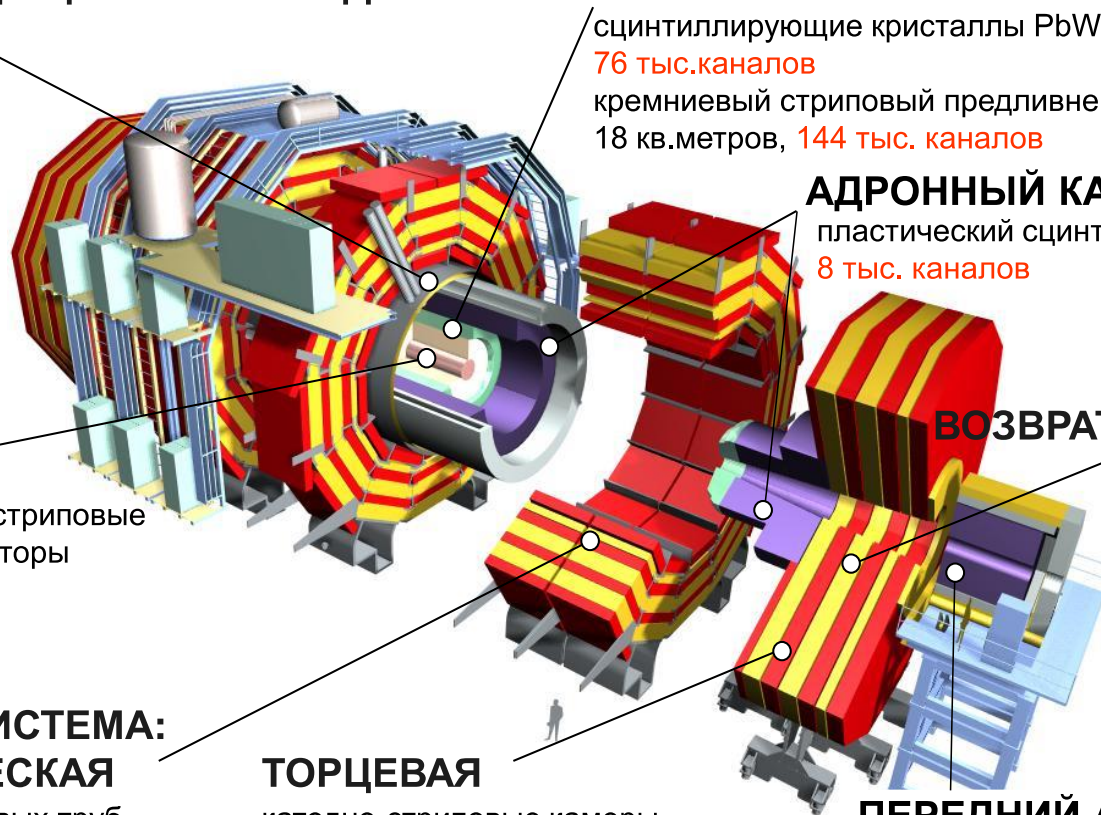
камеры из дрейфовых труб  
250 камер  
192 тыс. каналов  
Резистивные планарные камеры для триггера - RPC - 760 камер

### ТОРЦЕВАЯ

катодно-стриповые камеры  
540 камер  
310 тыс. каналов

### ПЕРЕДНИЙ АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР

кварцевое волокно/железо  
2 тыс. каналов



- В презентации использовались материалы из:
  - <http://cms.web.cern.ch/org/cms-presentations-public>
  - <http://cms.web.cern.ch/news/what-cms>
  - Лекции С.В. Шматова “Результаты эксперимента CMS на LHC в ЦЕРН”
  - Лекции P.Traczyk “The compact muon solenoid detector”