

# Физика фундаментальных взаимодействий

*Замоздра Сергей Николаевич, доцент  
КТФ*

Семестр: 7

Объём: 18 ч лекции + 18 ч

практика

Экзамен

Оценка учитывает:

1. Знание теории (экзамен)
2. Решение домашних задач
3. Устный доклад (10 мин с презентацией)

# §1.

## Введение

# Фундаментальные взаимодействия

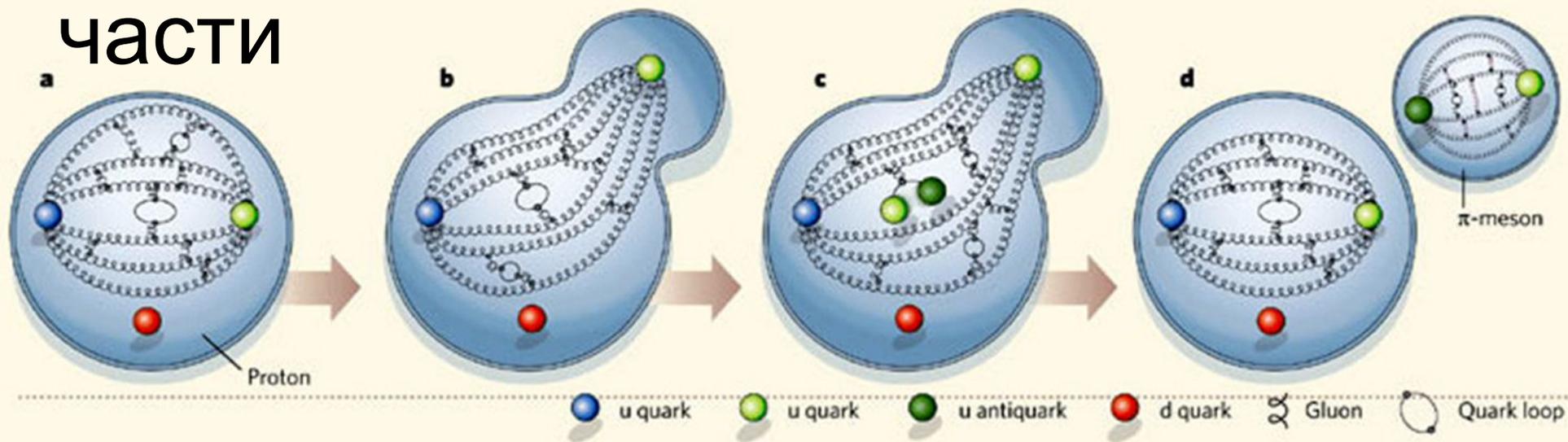
– качественно отличающиеся виды взаимодействия элементарных частиц и их систем

1. Гравитационное
2. Электромагнитное
3. Сильное
4. Слабое
5. Унитарное?

Элементарная частица –  
микрообъект, который пока не  
удалось разделить на части, **и** у  
которого неизвестна структура

Например, у протона известна  
структура, но он не делится на

части



# Базовые классы

частиц

**Бозоны** – частицы с целым спином.

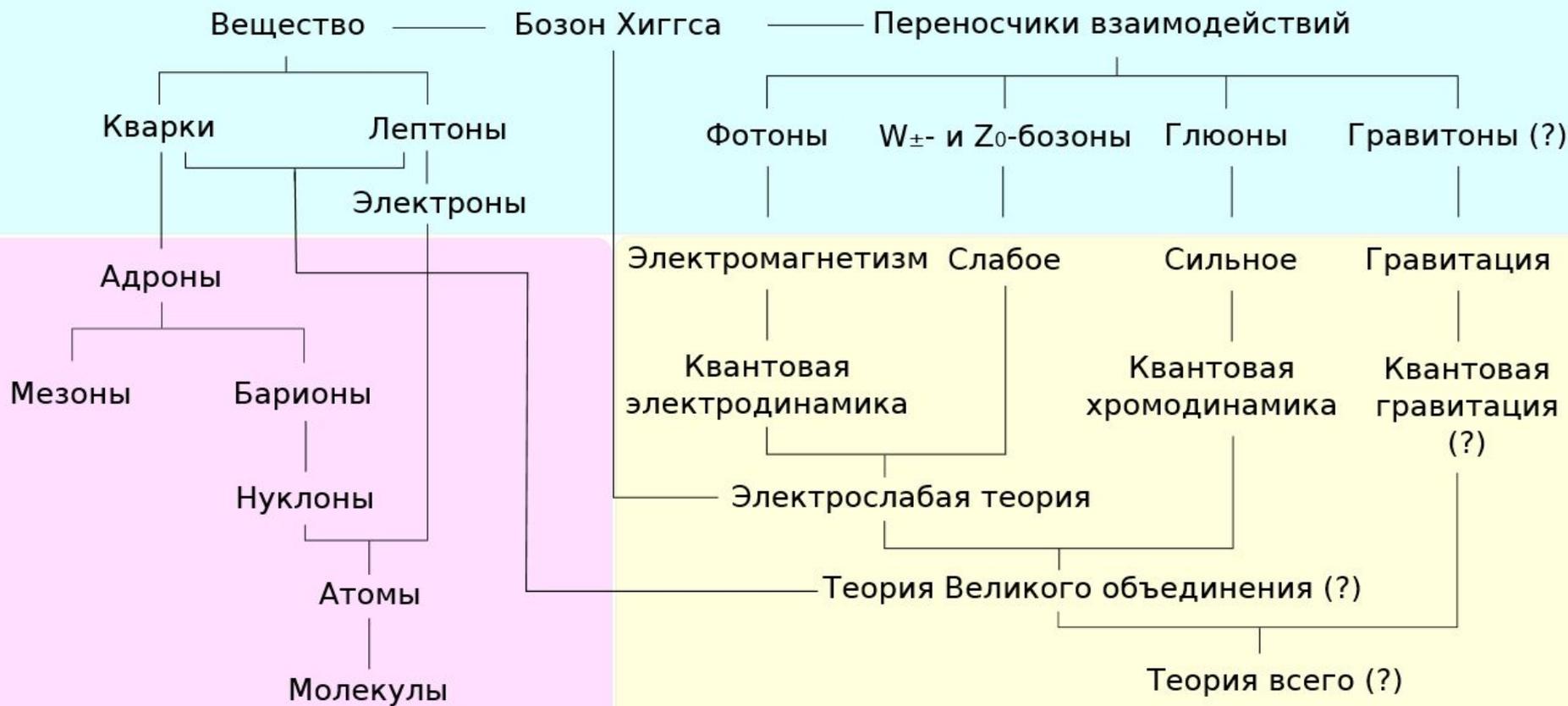
**Фермионы** – частицы с полуцелым спином.

**Адроны** – частицы, участвующие в сильном взаимодействии.

**Лептоны** – фермионы, не участвующие в сильном взаимодействии.

# Теории ФВ

## Элементарные частицы



*Составные частицы*

*Взаимодействия и теории*

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
	<b>u</b>	<b>c</b>	<b>t</b>	<b>g</b>	<b>H</b>
	верхний	очарованный	истинный	глюон	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
	<b>d</b>	<b>s</b>	<b>b</b>	<b>γ</b>
	нижний	странный	прелестный	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
	<b>e</b>	<b>μ</b>	<b>τ</b>	<b>Z</b>
	электрон	мюон	тау	Z бозон

**ЛЕПТОНЫ**

	$< 2.2 \text{ эВ}/c^2$	$< 0.17 \text{ МэВ}/c^2$	$< 15.5 \text{ МэВ}/c^2$
	0	0	0
	1/2	1/2	1/2
	<b>ν<sub>e</sub></b>	<b>ν<sub>μ</sub></b>	<b>ν<sub>τ</sub></b>
	электронное нейтрино	мюонное нейтрино	тау нейтрино

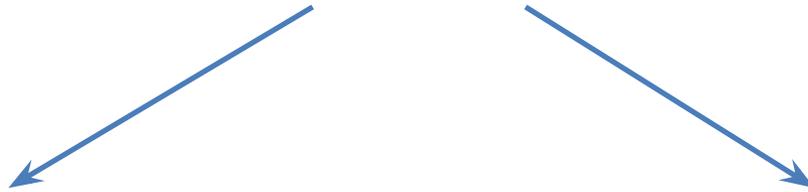
	$80.4 \text{ ГэВ}/c^2$
	±1
	1
	<b>W</b>
	W бозон

**КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ**

## §2. Детекторы

### частиц

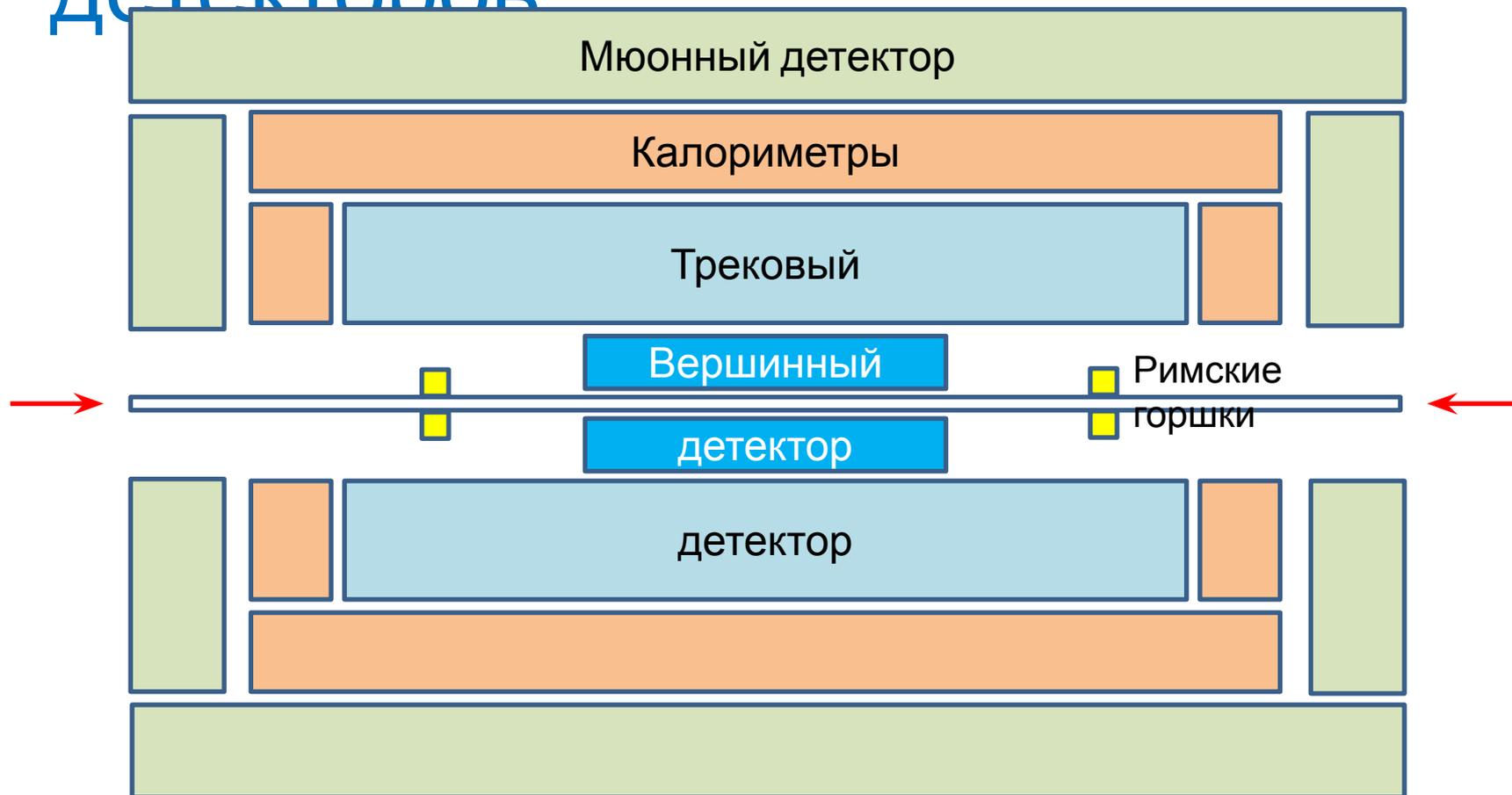
Устройства для измерения траектории, энергии, импульса, заряда, спина и др. характеристик частиц



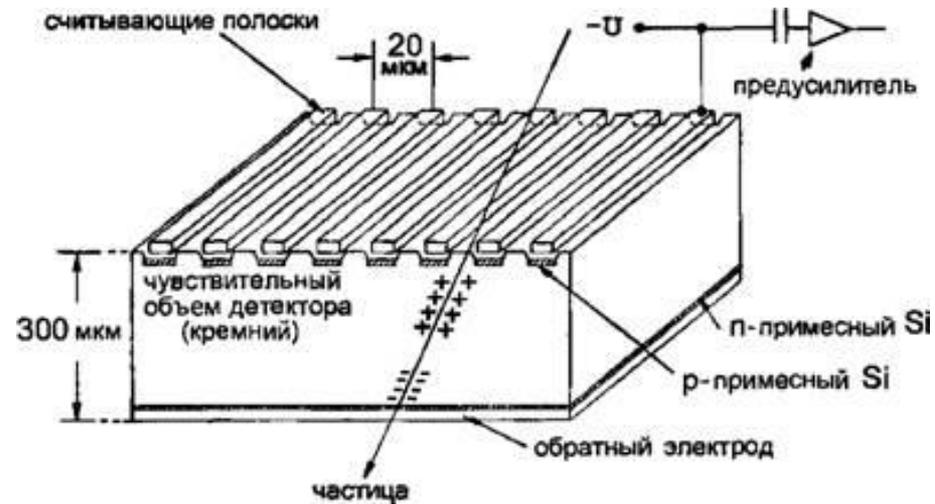
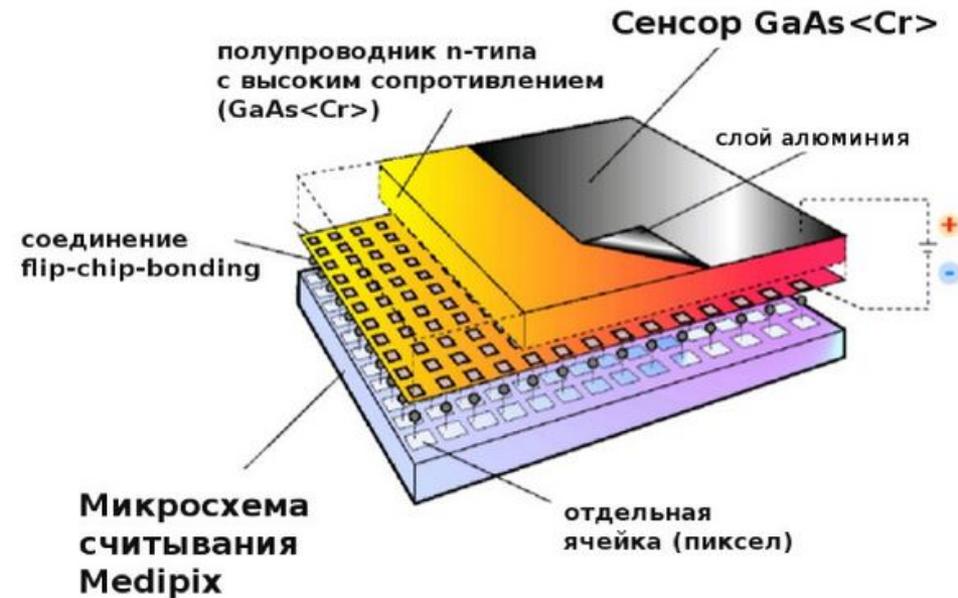
Трековые детекторы:  
измерить след, не  
меняя энергию

Калориметры  
: измерить  
энергию

# 1. Схема расположения детекторов



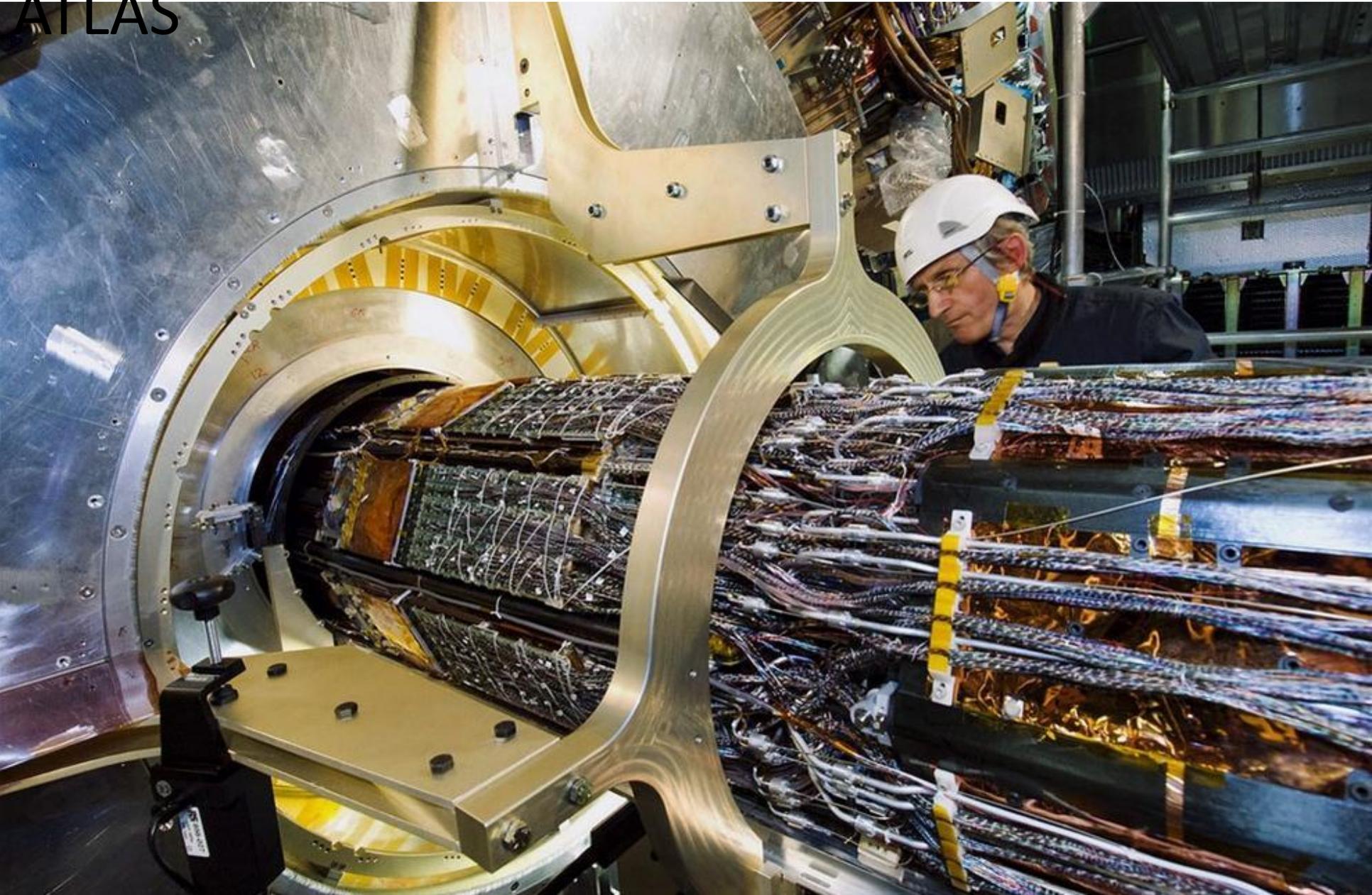
## 2. Вершинный детектор измеряет трек для вычисления вершин – точек рождения частиц



Пиксельный:  
точнее, но

Полосковый:  
дешевле

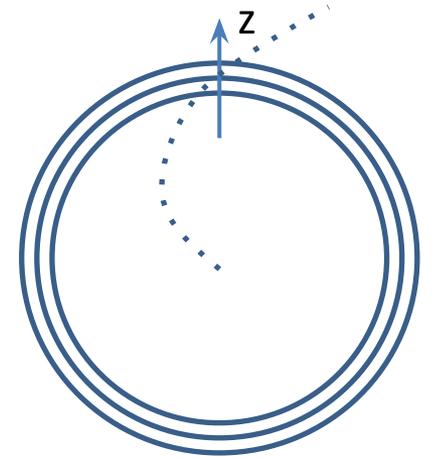
# Пиксельный вершинный детектор в ATLAS



Измеряют положение облачка электронов  $(x, y)$  в каждом слое  $(z)$

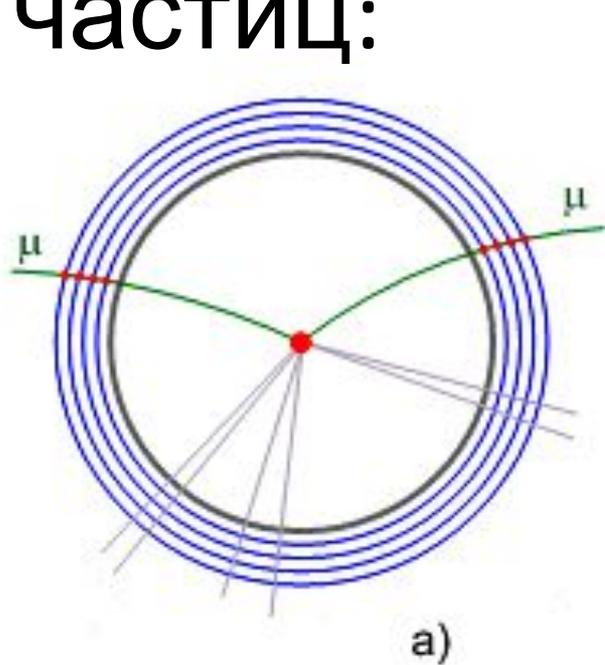


Набор точек  $(x, y, z)$  –  
трек внутри детектора

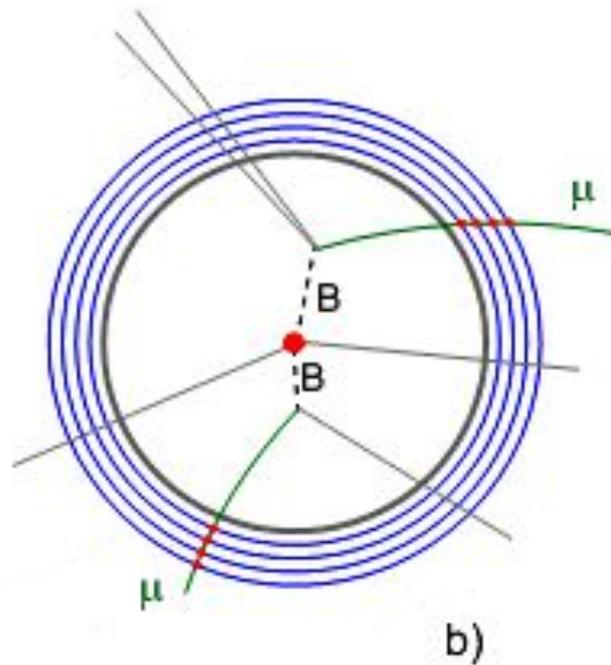


Расчёт (на ЭВМ)  
трека **до** входа в

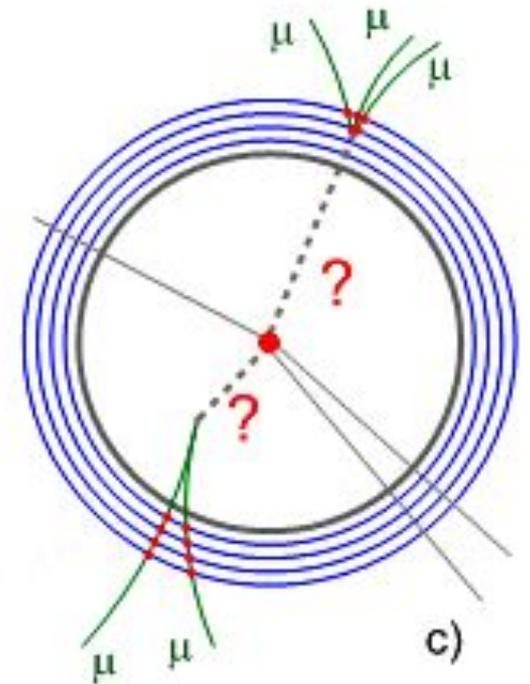
Вершина должна быть на пересечении треков нескольких частиц:



a)



b)



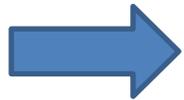
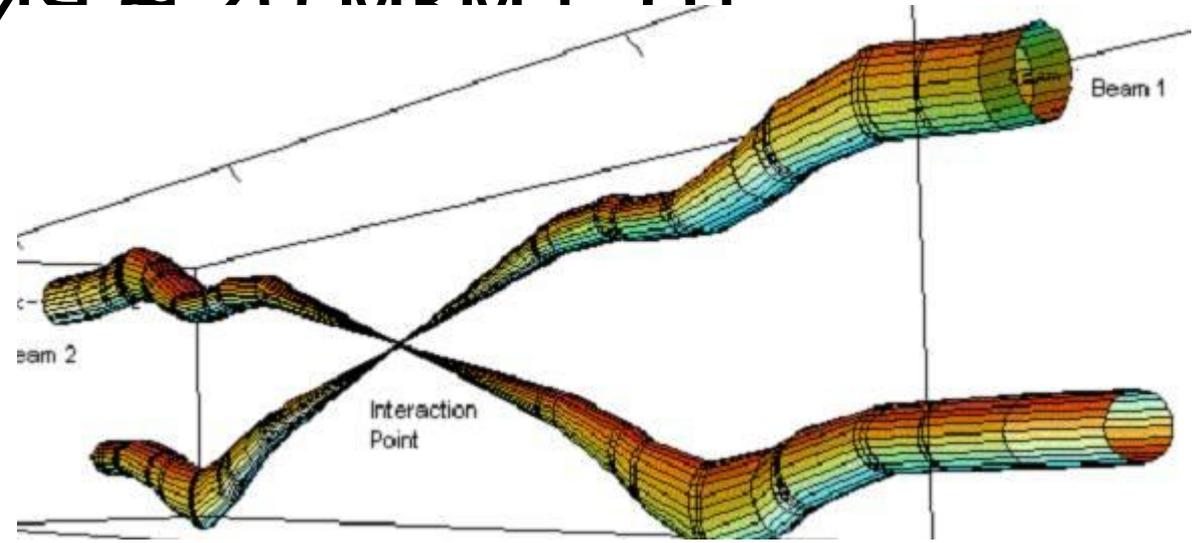
c)

В  
пучке

Вне пучка,  
но внутри

В  
детекторе

Точность определения вершин  $\approx 10$   
Толщина пучка в точке  
столкновения  $\approx 20 \text{ мкм} (-\sigma)$

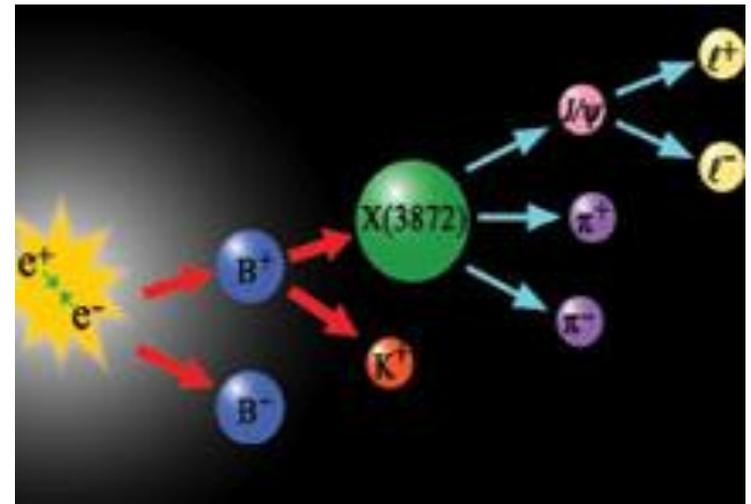


Можно найти вершины,  
отстоящие от оси  
столкновения на 100 и более  
мкм ( $=5\sigma$ )

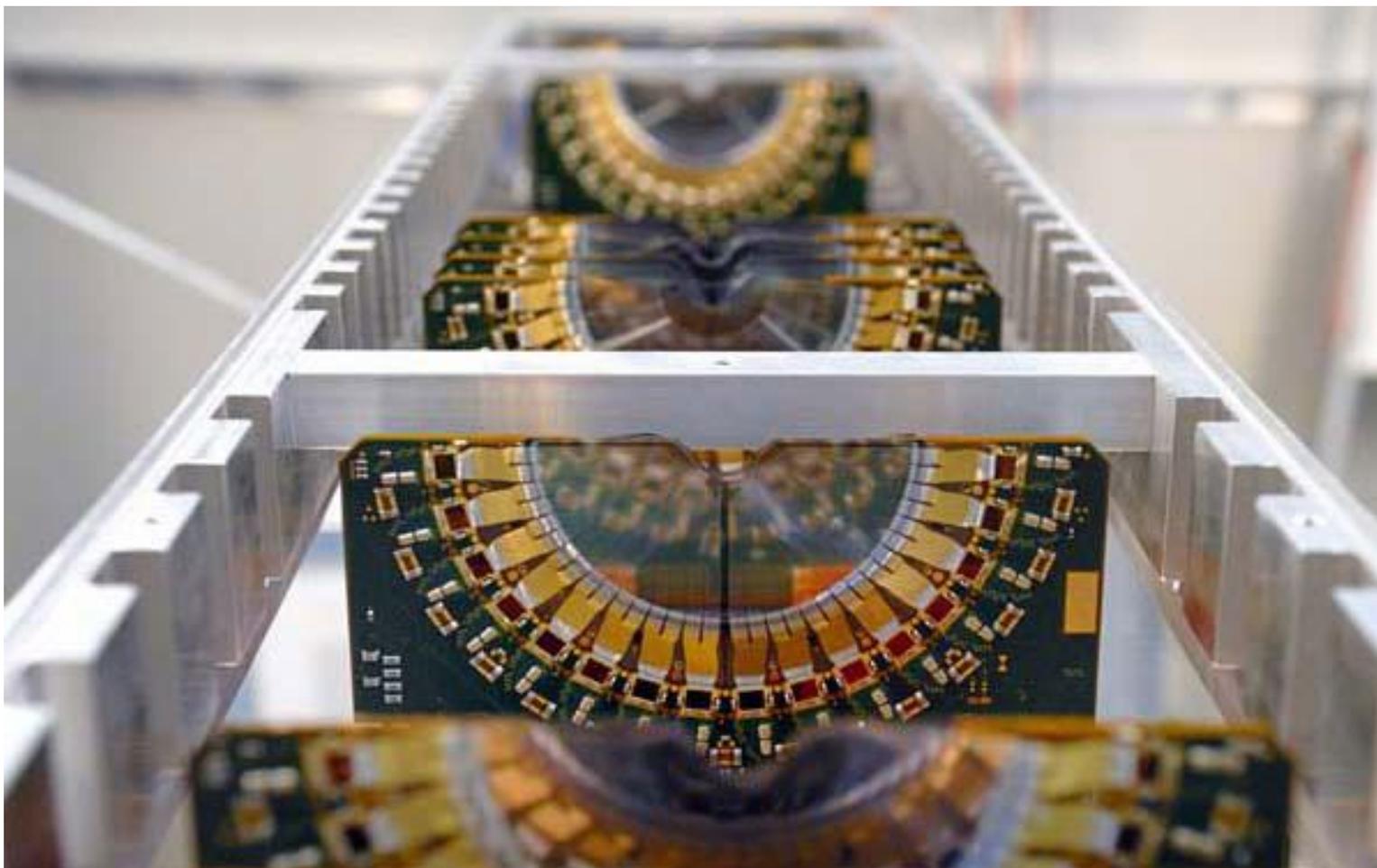
Чем выше точность определения вершин и чем тоньше пучок в точке столкновения, тем больше шансов изучить короткоживущие частицы

$$t = \frac{10^{-4} \text{ м}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} \approx 3.3 \cdot 10^{-13} \text{ с}$$

Например, В-мезоны

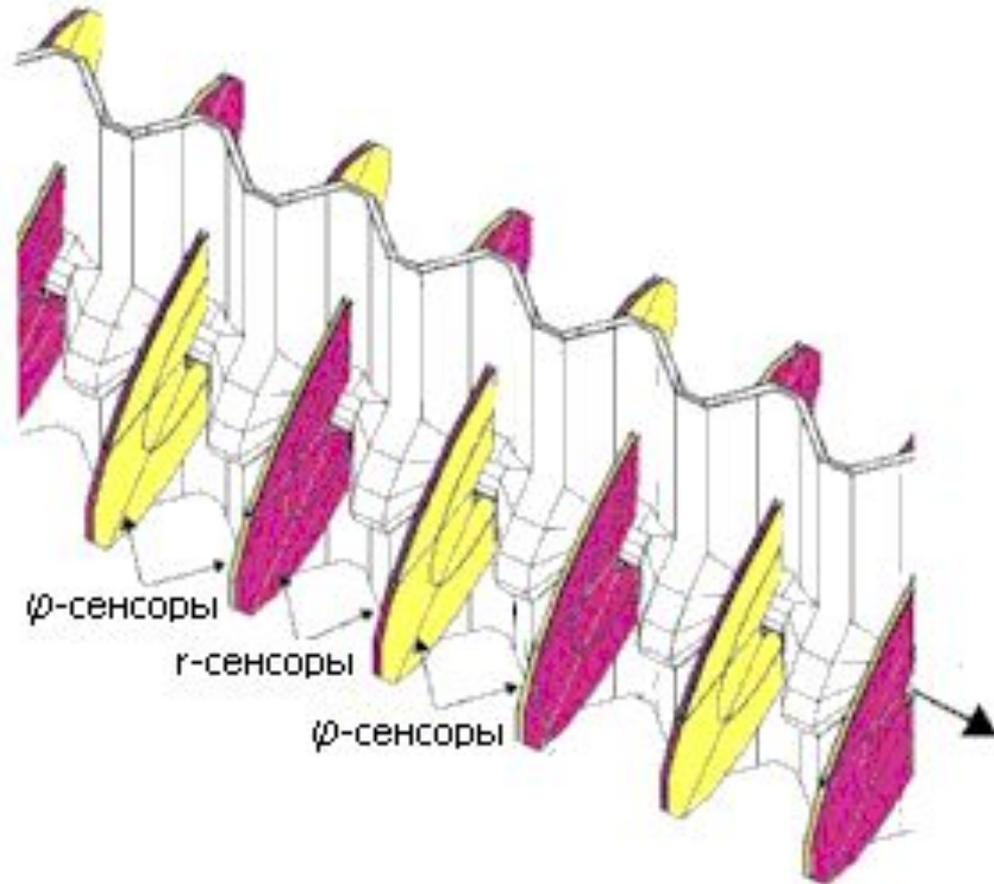
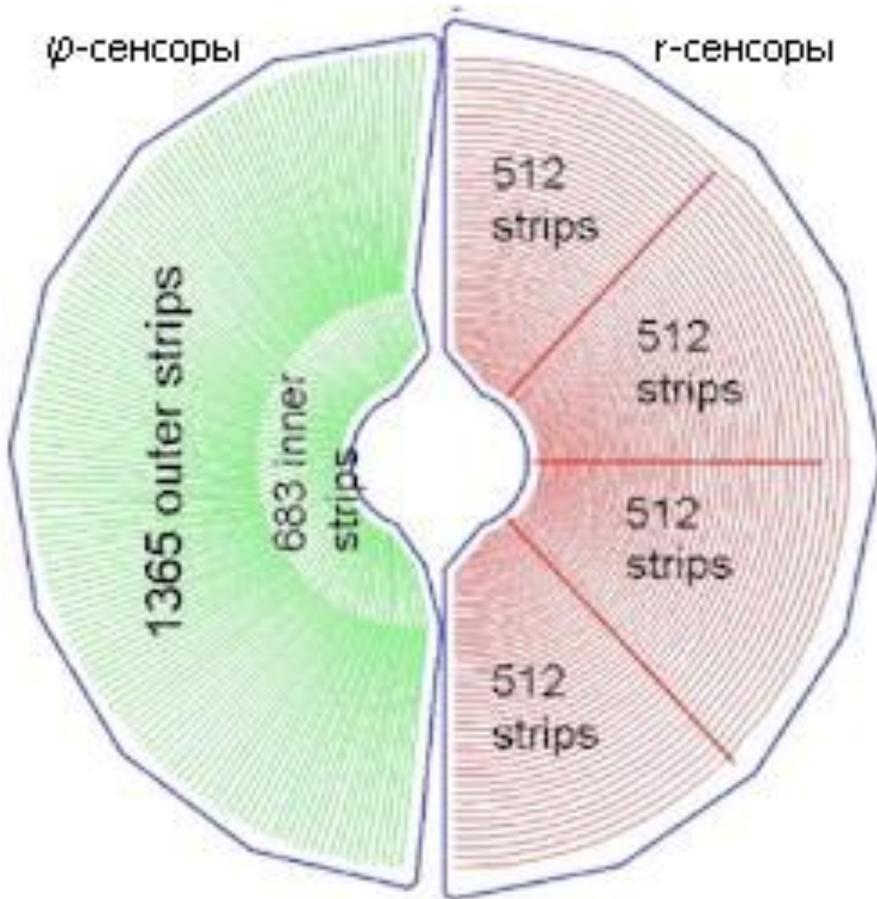


# Вершинный детектор VELO (VErtext LOcator) – внутри трубы БАК!

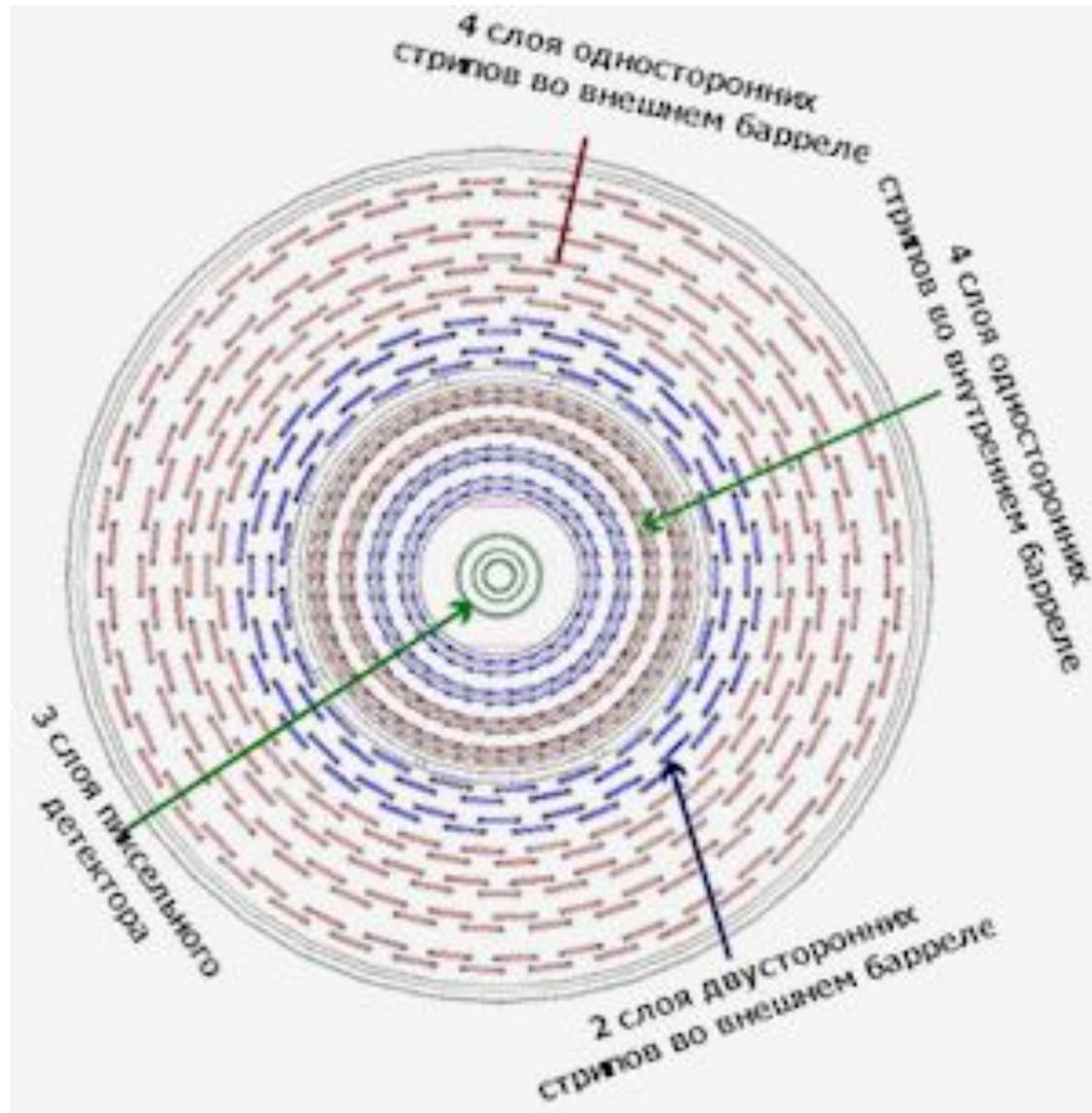


Пододвигается к пучку после его фокусировки

# Расположение сенсоров VELO

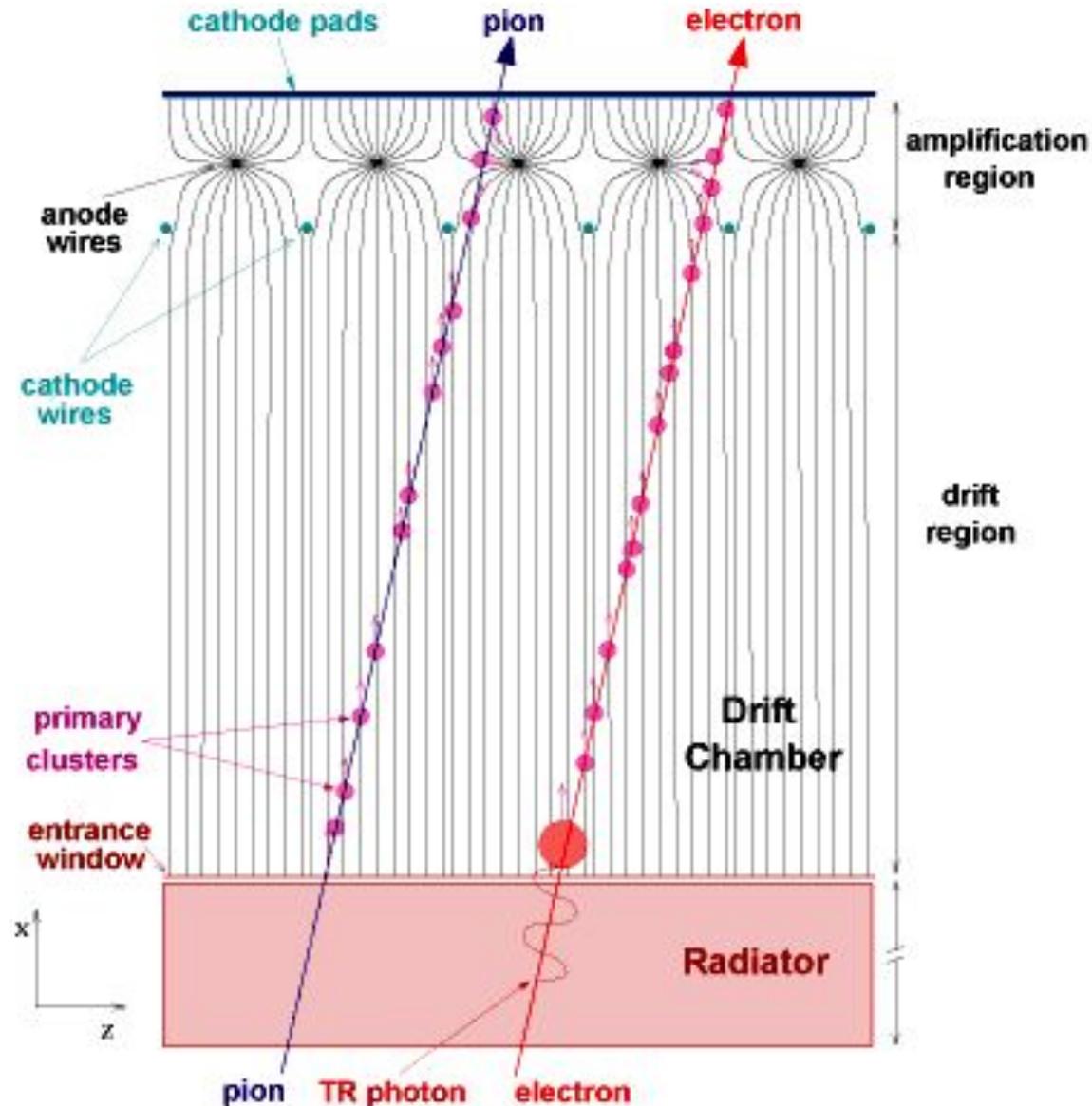


# Слои вершинного детектора в CMS

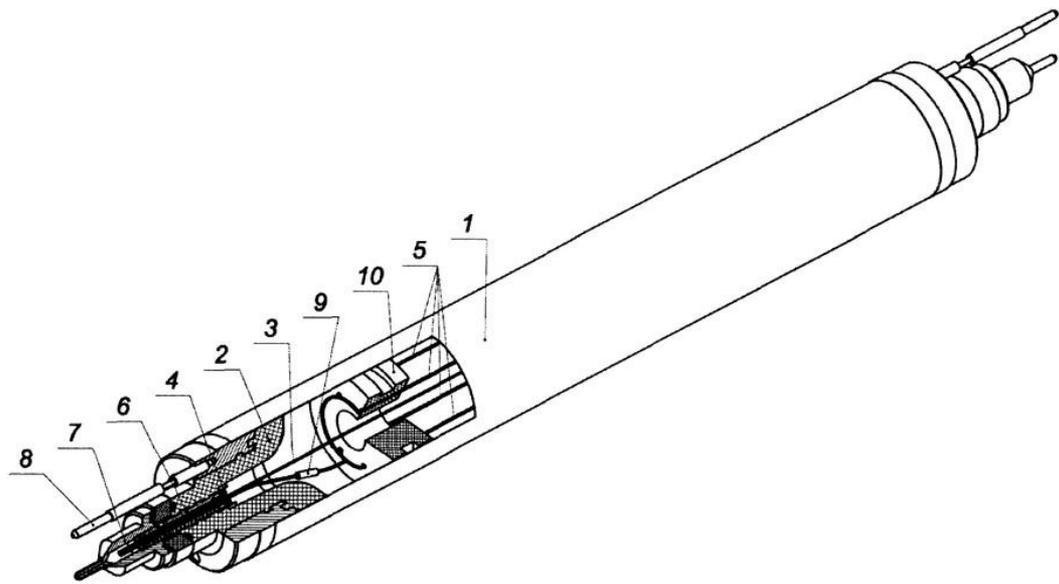


# 3. Трековый детектор из дрейфовых трубок

Координата частицы определяется по времени дрейфа электронов от места ионизации до анода

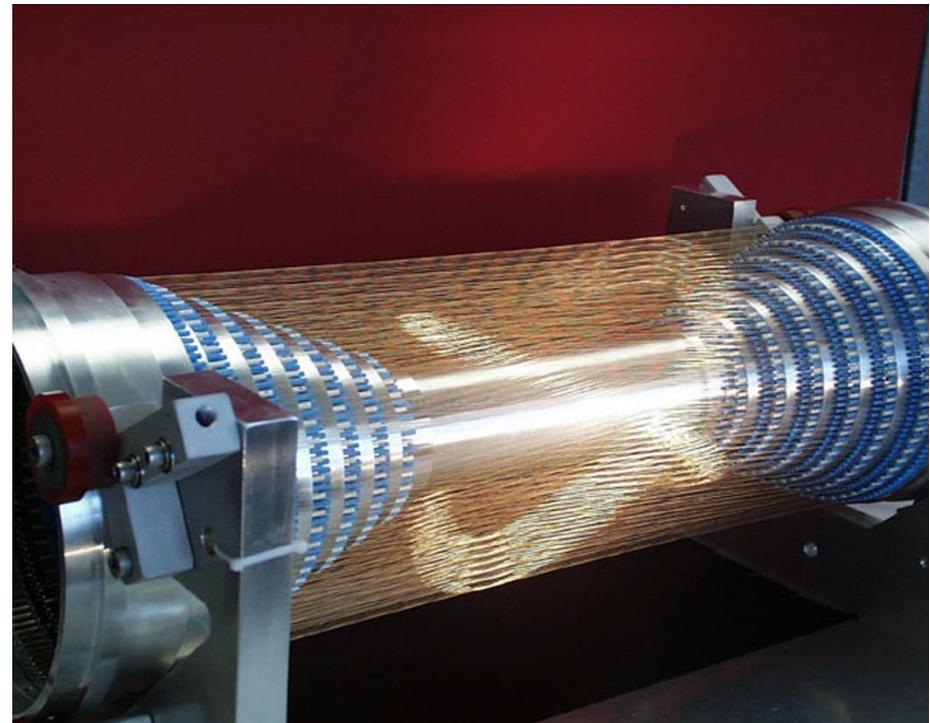
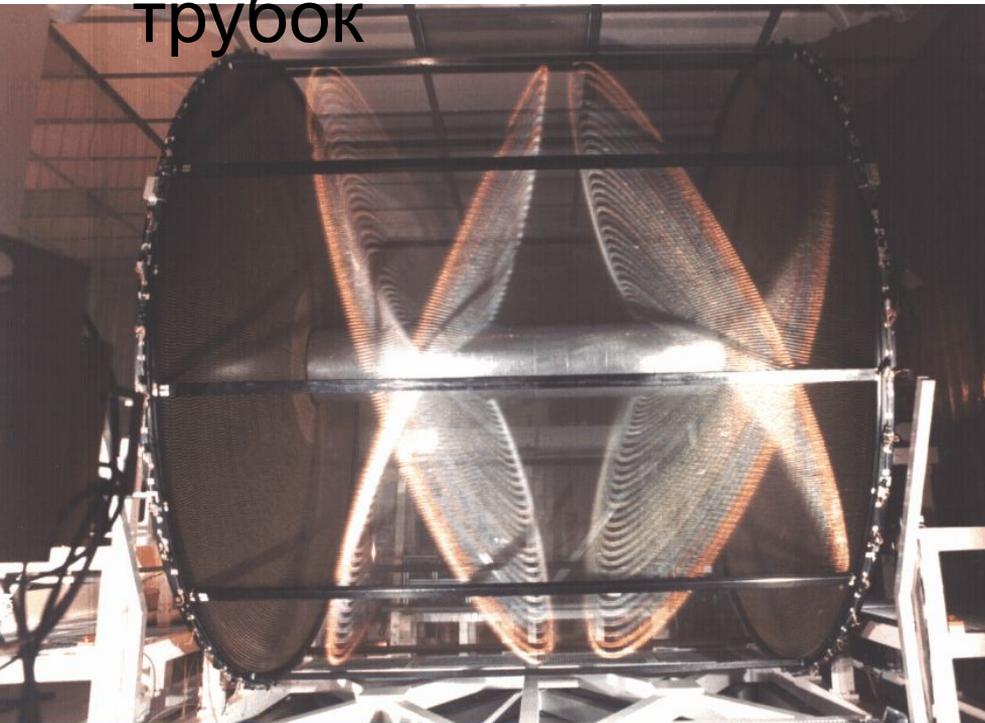


Трубка имеет  
несколько  
слоёв и десятки  
деталей



КЛОЕ: 52 тыс.  
трубок

ZD



# Дрейфовая камера Jefferson

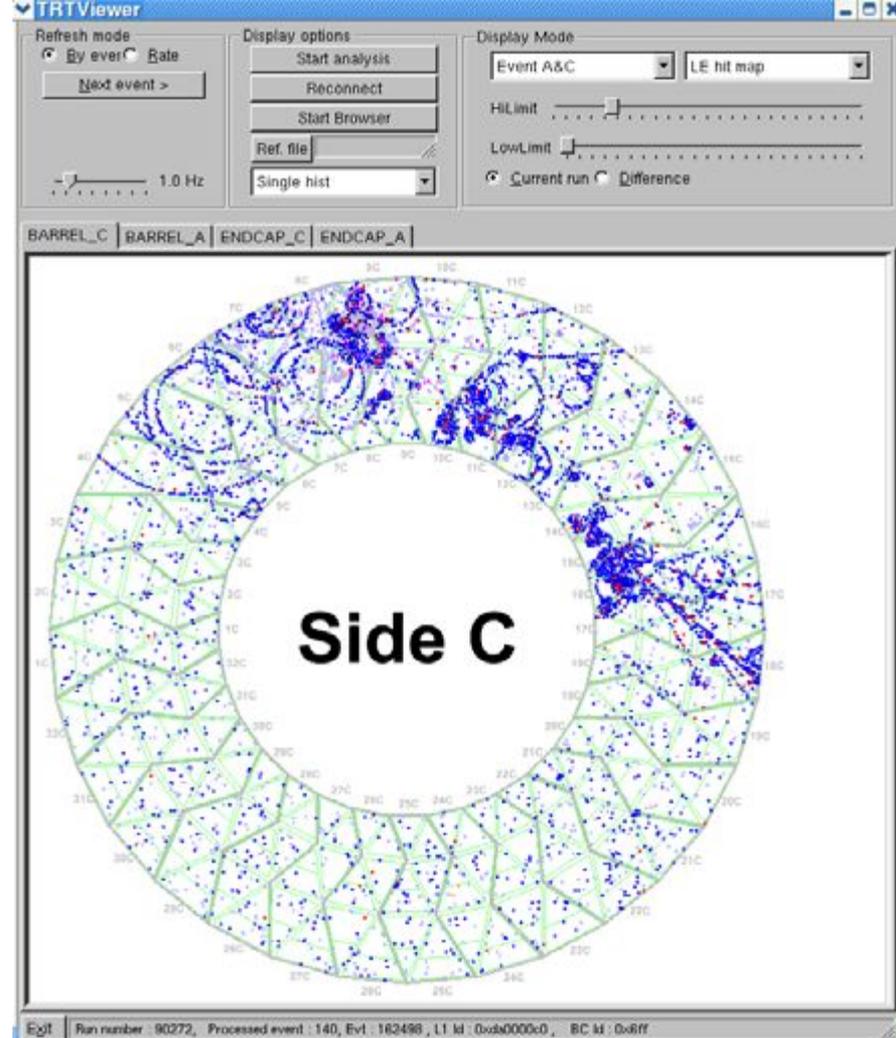
Lab



Петербургский  
Институт  
Ядерной  
Физики:  
армирование  
дрейфовых  
трубок для  
БАК



# Вклейка трубок



- ✓ 245760 трубок в детекторе
- ✓ Трек частицы пересекает 32-45 трубок

# 4. Время-проекционная

камера

Это

большая

дрейфовая

труба, в

которой

след

целиком

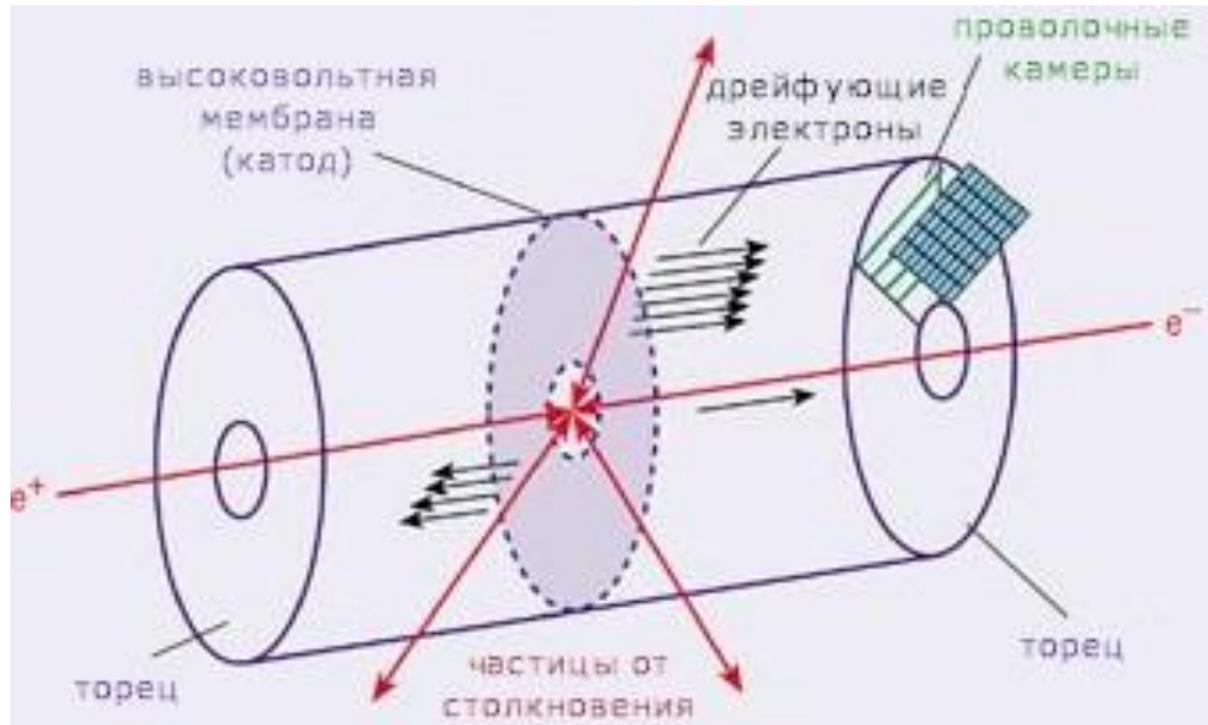
дрейфует к

( $\eta, \phi$ ) по номеру датчика, поймавшего

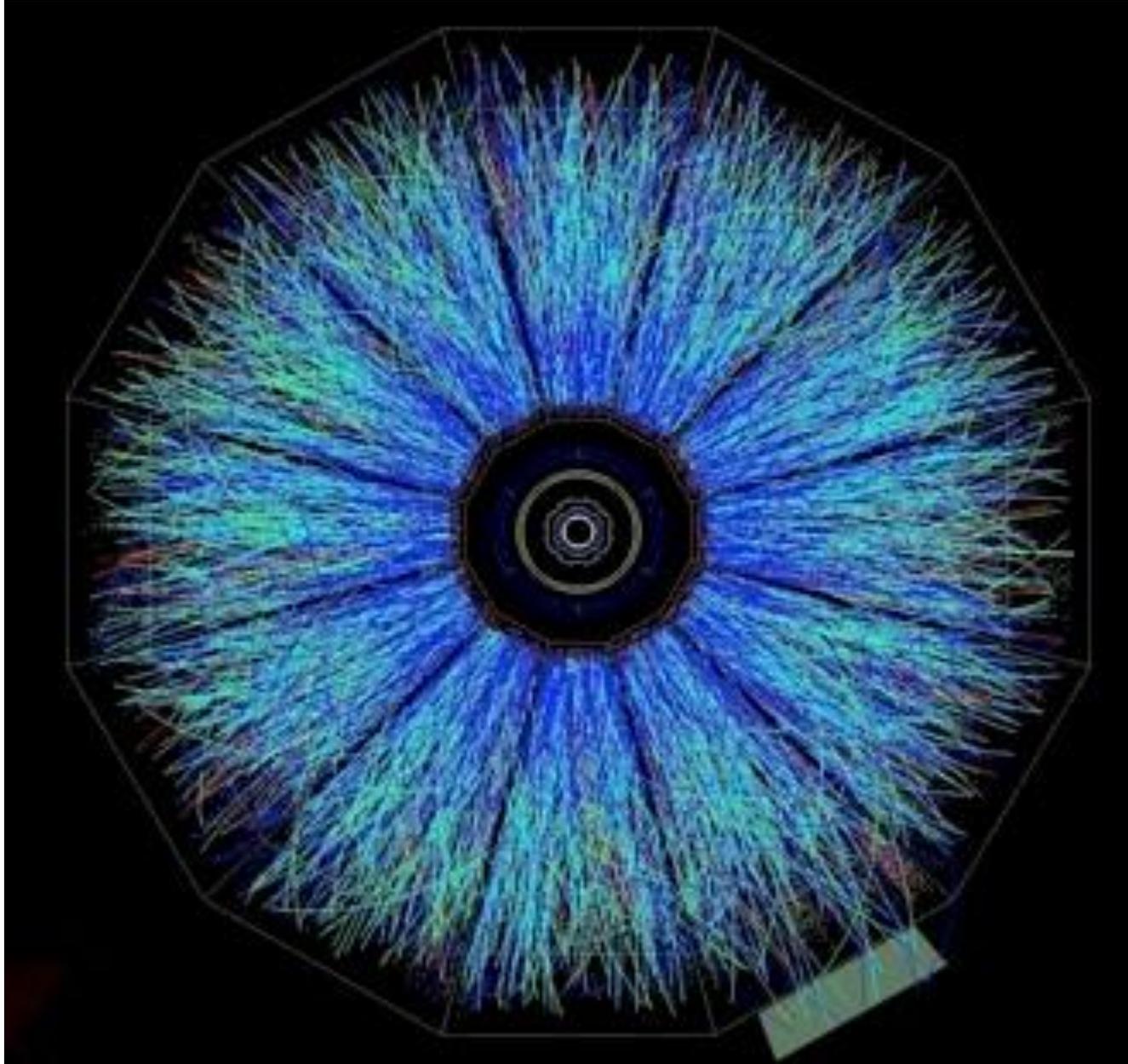
торцам

электроны,  $z$  – по времени их

прихода



# Проекции $(r, \phi)$ треков на торец каме



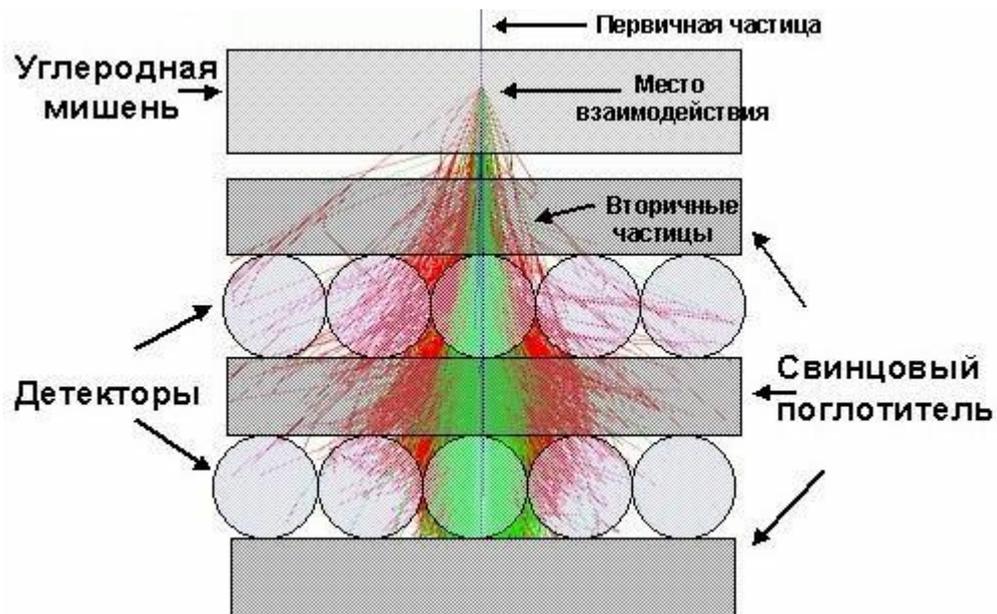
# 5.

## Калориметры

Измерение  
энергии

По вспышке света:  
**сцинтиллятор** –  
вещество,  
поглощающее  
высокоэнергичные  
фотоны, но  
прозрачное для  
видимого света

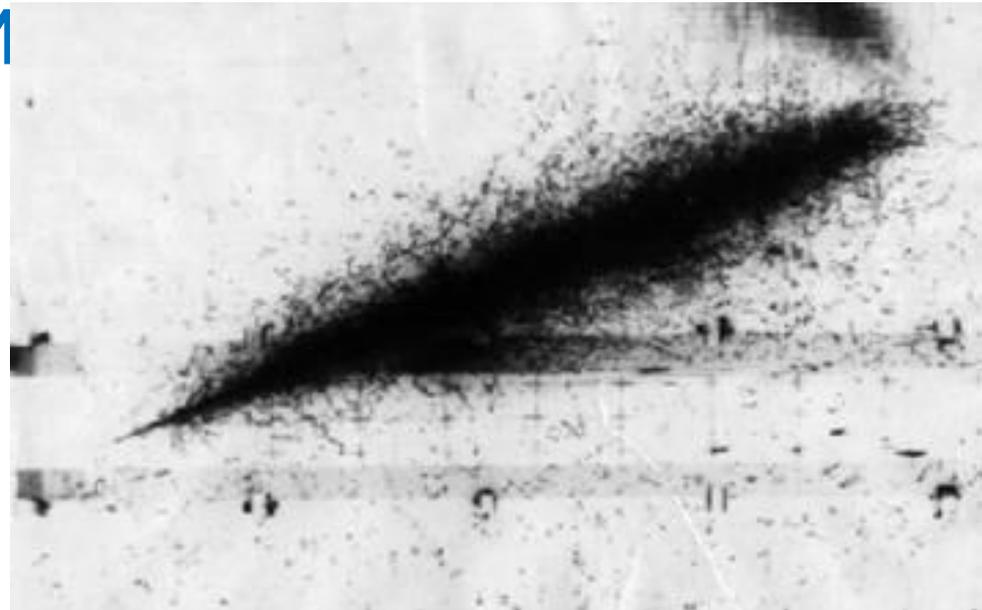
По выбросу  
электронов



Высокоэнергичные электроны и фотоны передают энергию преимущественно электронам атомов



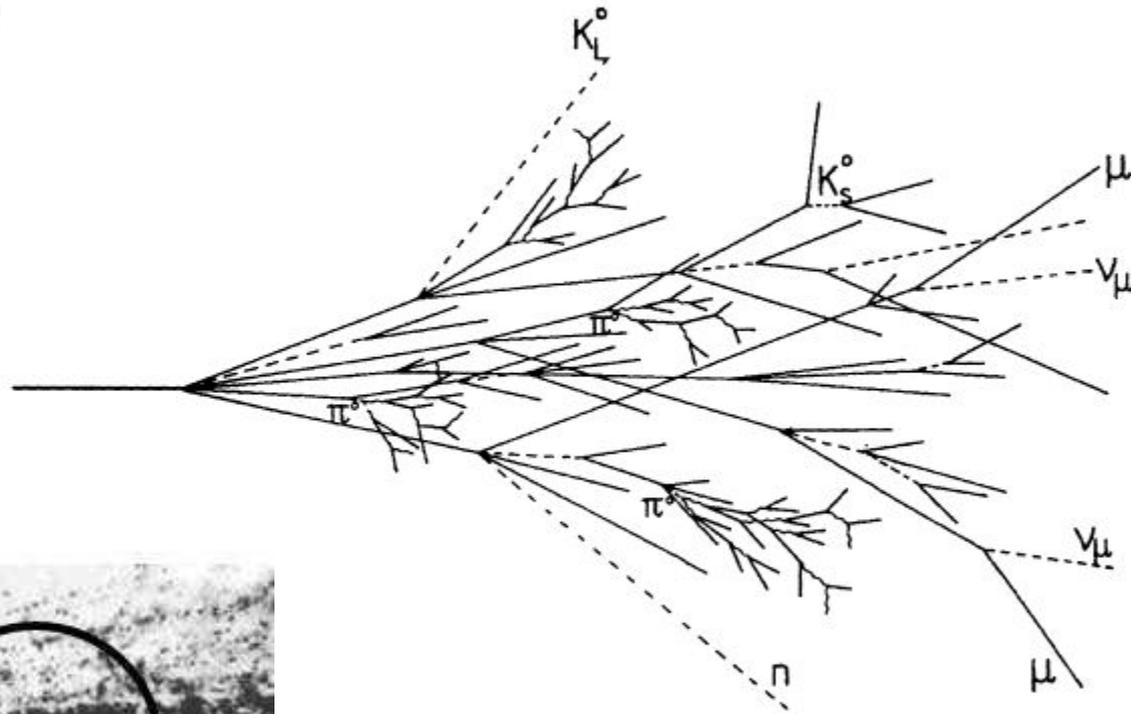
**Электромагнитный ливень** — поток из большого числа электронов, позитронов и фотонов



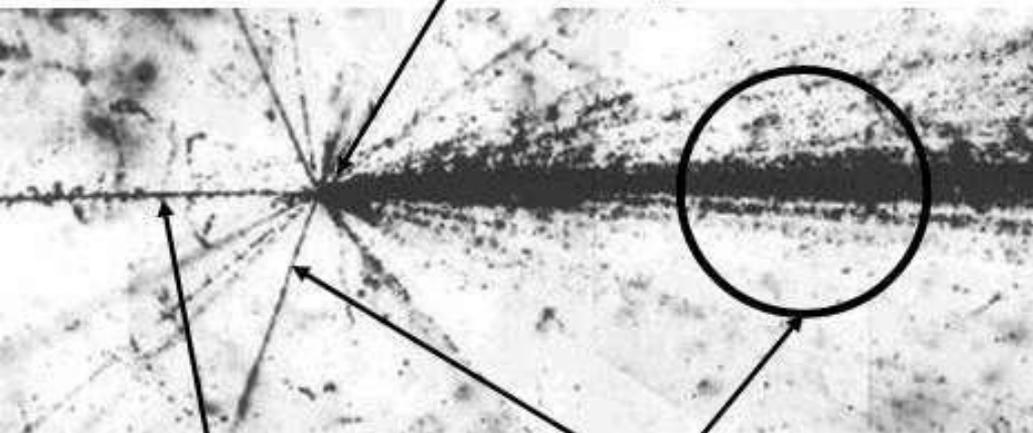
Высокоэнергичные адроны  
передают энергию  
преимущественно



Адронный  
ливень



МЕСТО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ПЕРВИЧНОЙ ЧАСТИЦЫ С ЯДРОМ



ПЕРВИЧНАЯ ЧАСТИЦА

ВТОРИЧНЫЕ ЧАСТИЦЫ

# 5.1 Электромагнитный калориметр



# Требования к сцинтиллятору:

1. Высокая плотность
2. Прозрачность
3. Радиационная стойкость:  $10^5$  Грей
4. Быстрое высвечивание (10 нс)



Кристаллы вольфрамита свинца  
(PbWO<sub>4</sub>)



# Требования к фотодетектору:

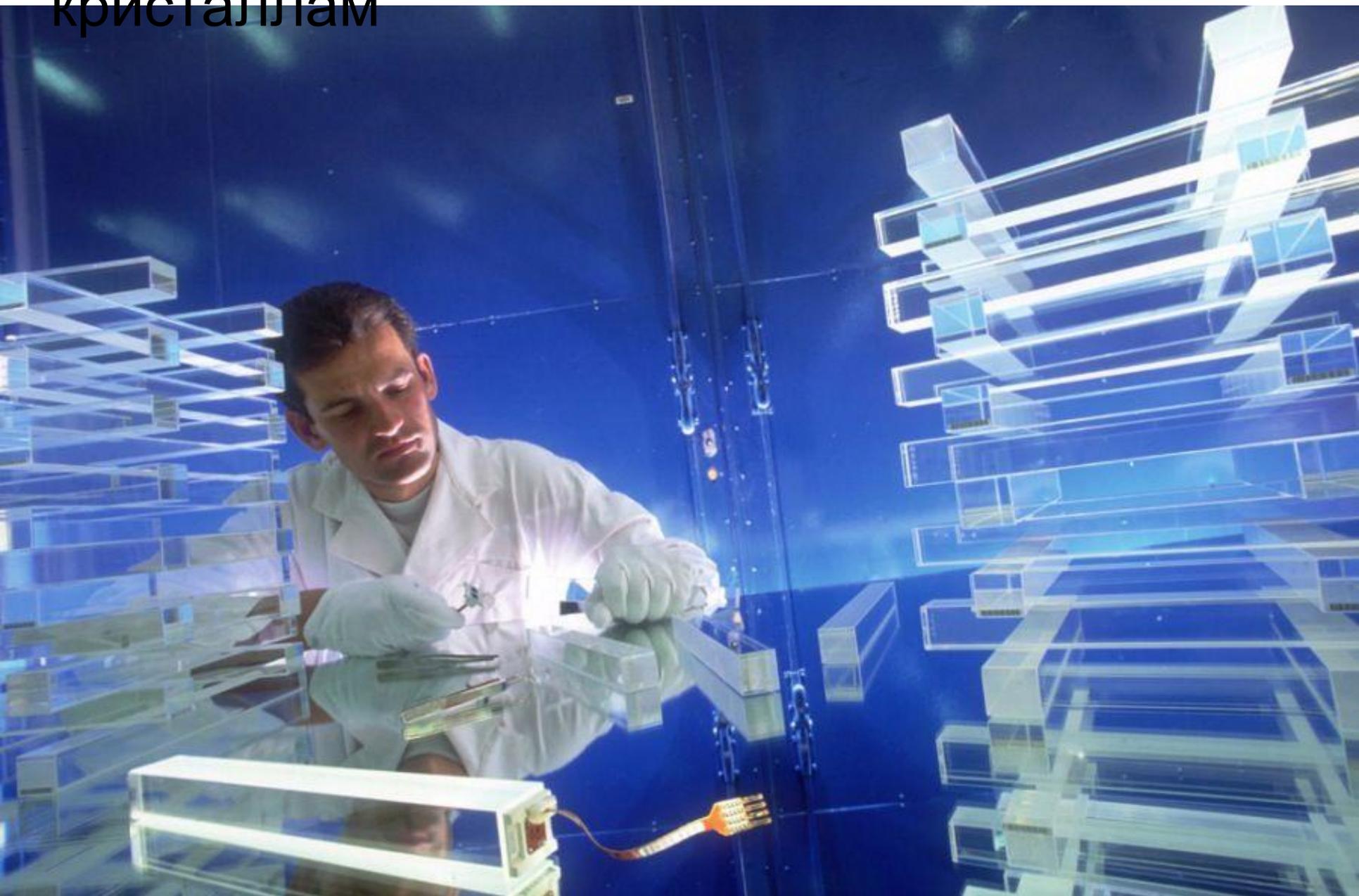
1. Радиационная стойкость
2. Работа в магнитном поле 4

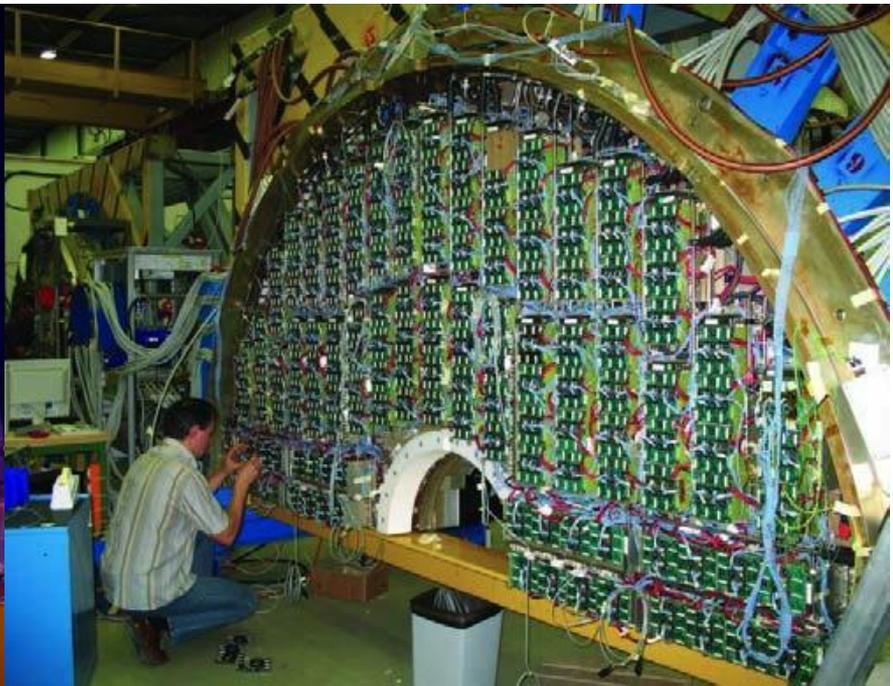
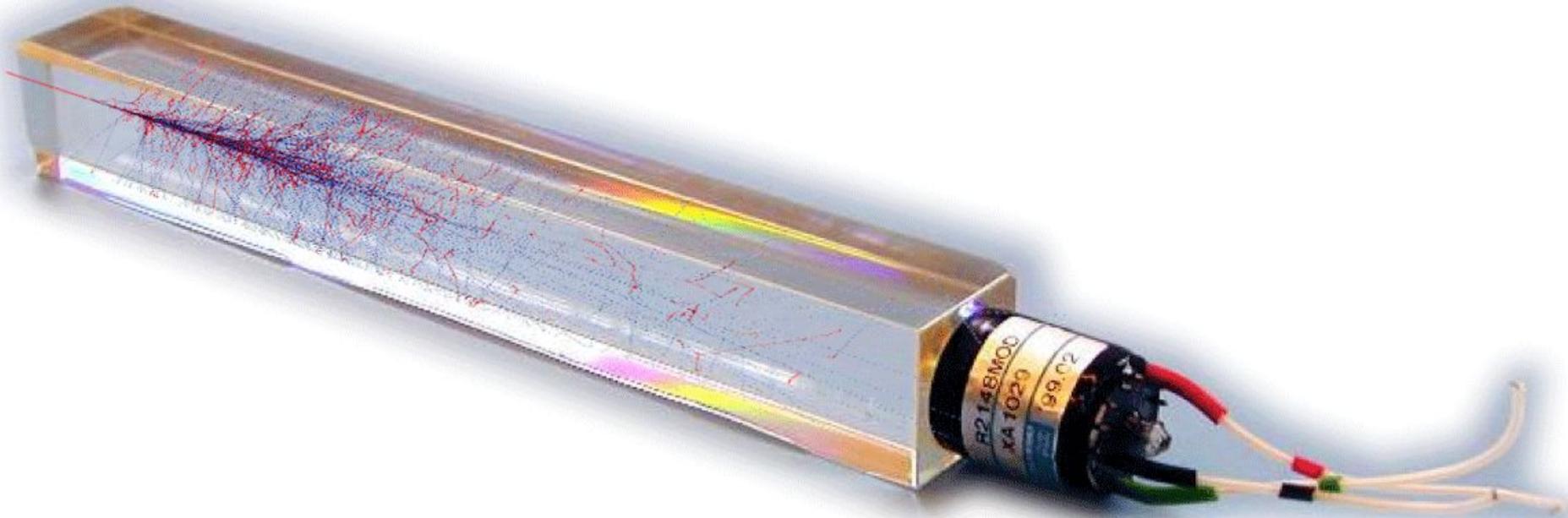
→ Тл  
Вакуумный  
фототриод

Наградить НИИ  
«Электрон» специальной  
Золотой медалью  
CMS-2007 "За  
выдающийся вклад  
промышленности в  
создание детектора CMS"



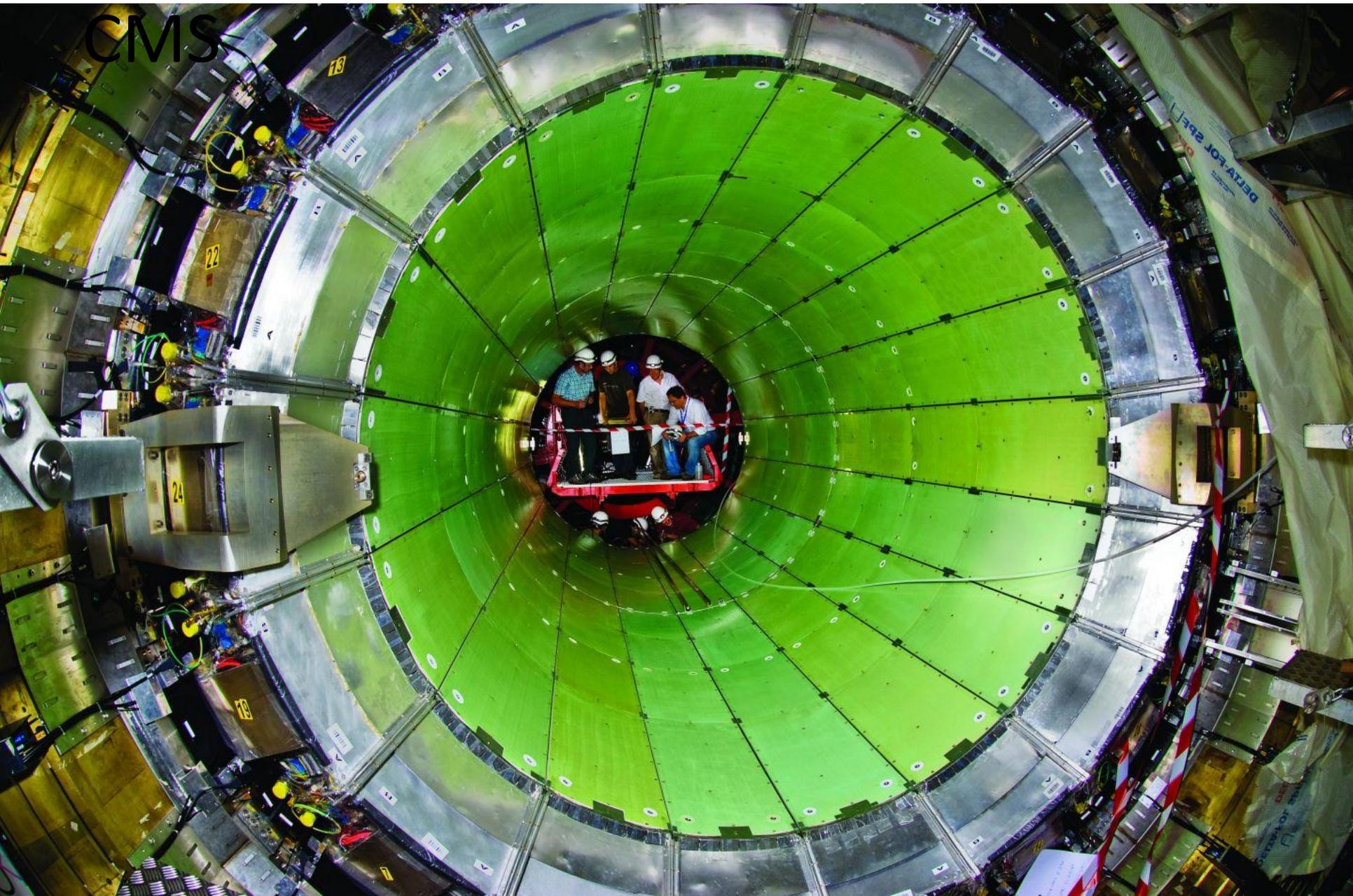
# Приклеивание фотодетекторов к кристаллам



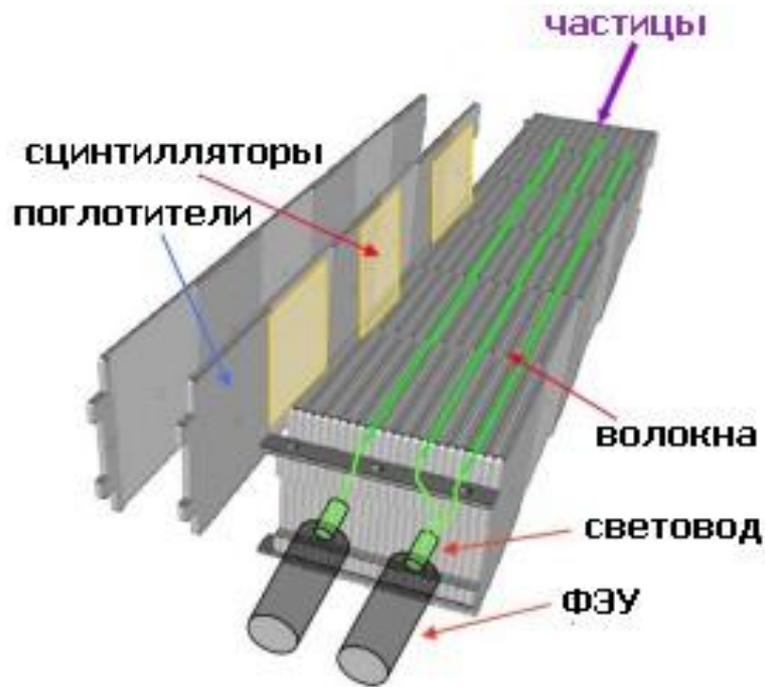


# Электромагнитный калориметр

CMS



# 5.2 Адронный калориметр «Вафля» из металла и сцинтиллятора

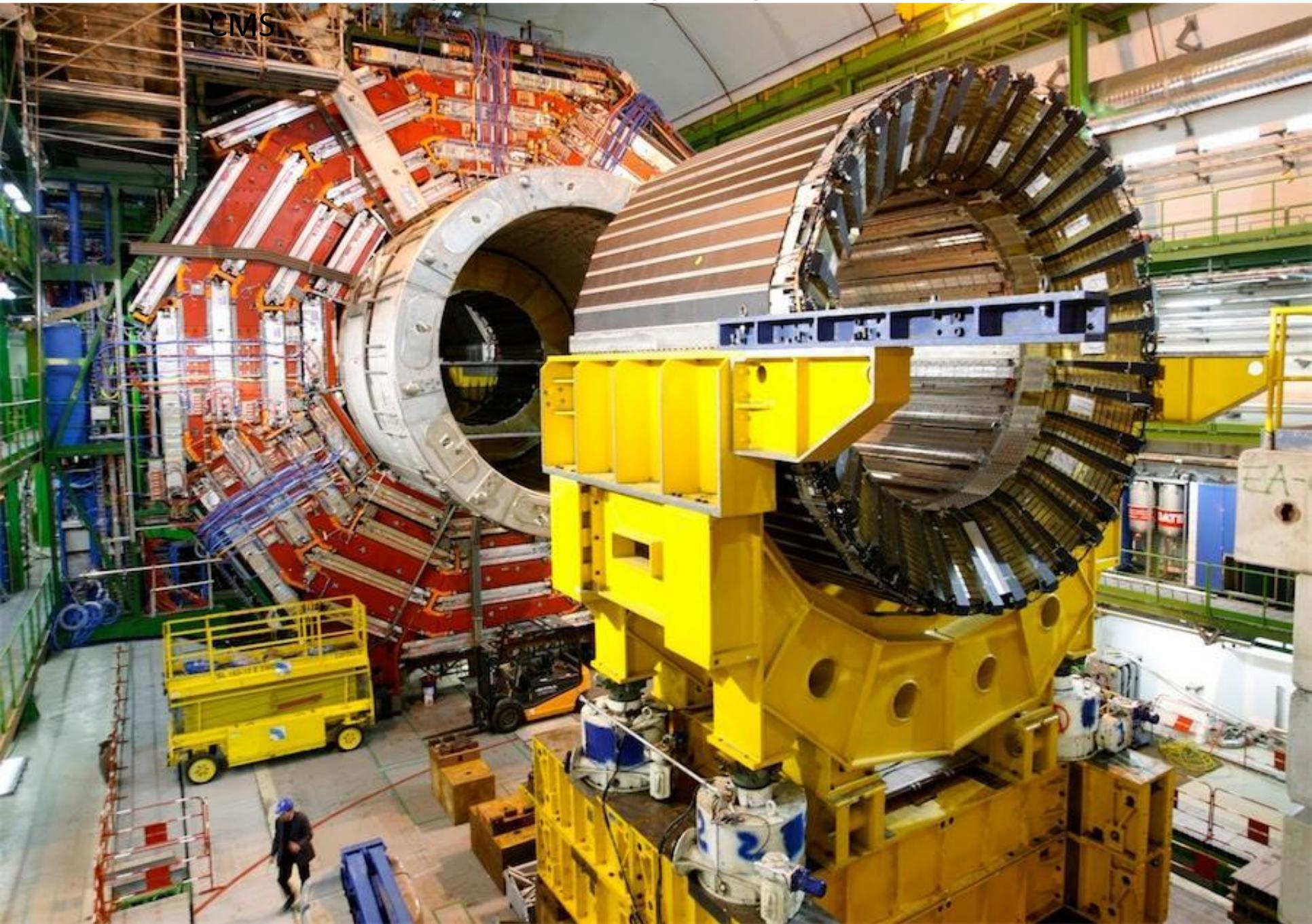


# Латунные гильзы ВМФ РФ для





# Установка адронного калориметра в детектор CMS



## 6. Детекторы

### Мюоны **МЮОНОВ**

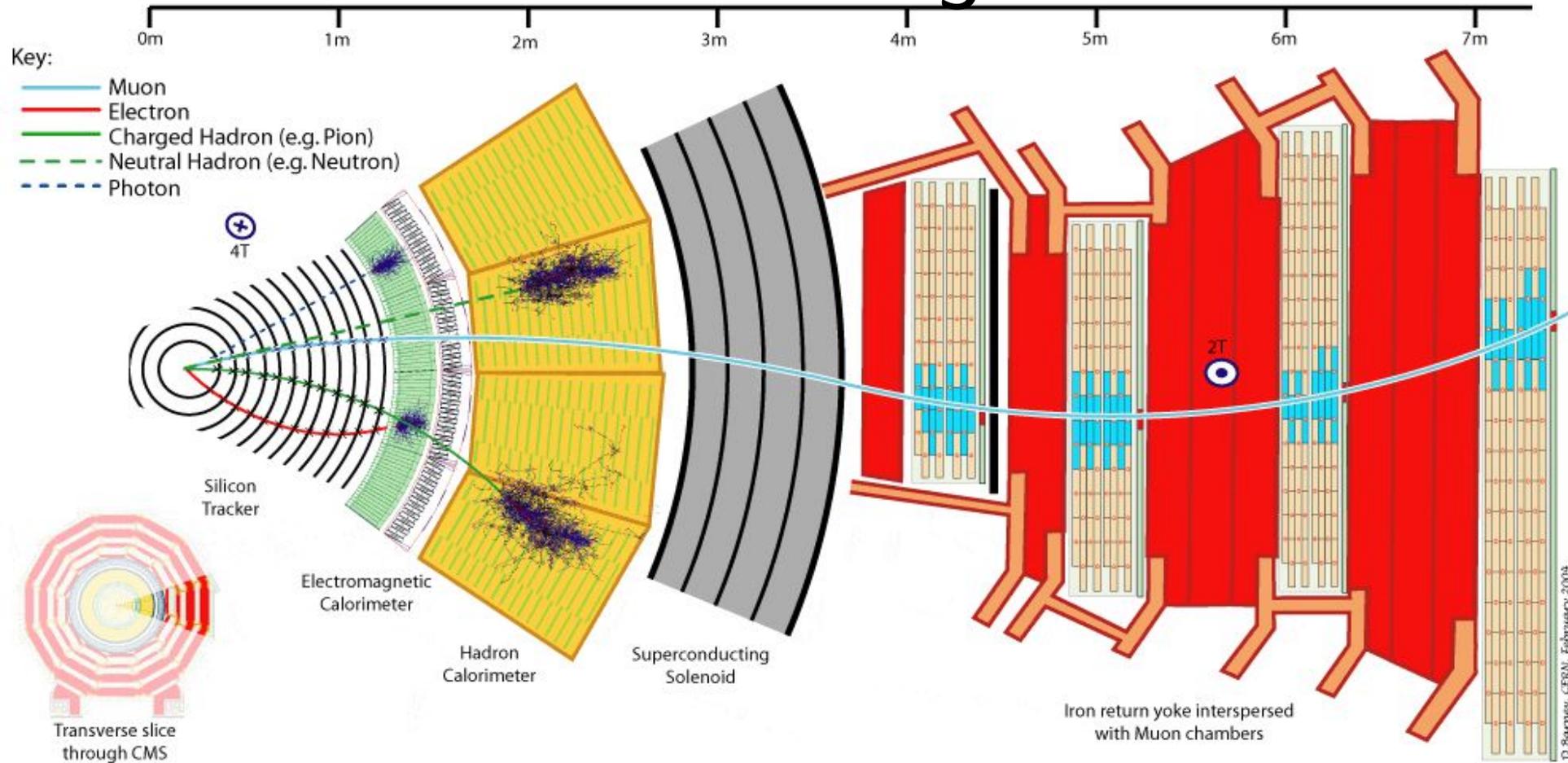
- ✓ тяжёлые  $\Rightarrow$  почти не передают энергию электронам
- ✓ не адроны  $\Rightarrow$  почти не передают энергию ядрам



1. Самые массивные детекторы
2. Образуют внешний слой
3. Измеряют только импульс

# Слои комплекса CMS

15 тыс. T =  
3

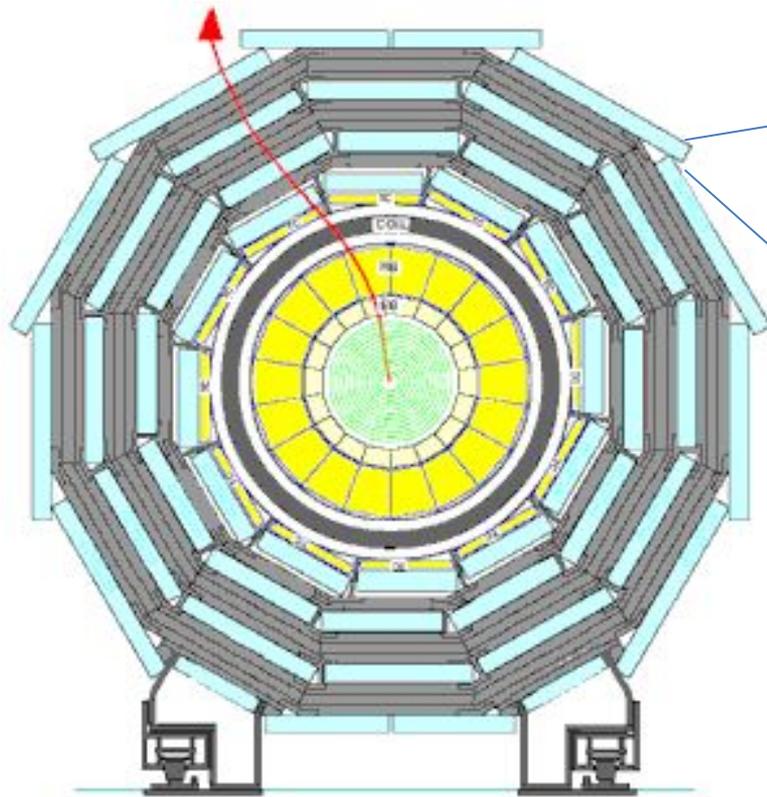
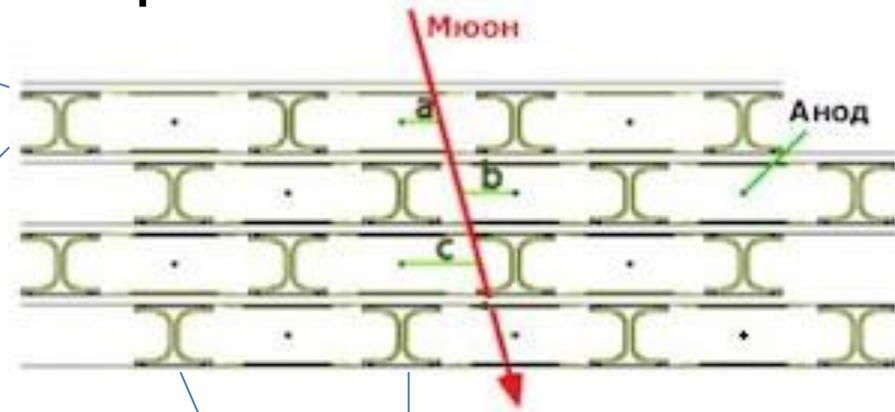


Мюонные камеры чередуются с  
магнитопроводом

В комплексе CMS МП меняет  
знак  $\Rightarrow$  S – образная траектория  
МЮОНОВ



# Мюонный детектор в CMS



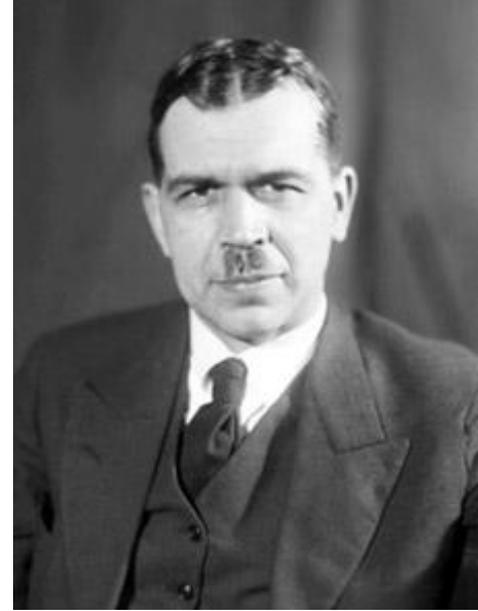
# 7. Черенковские

## детекторы

Используются для

измерения скорости частиц

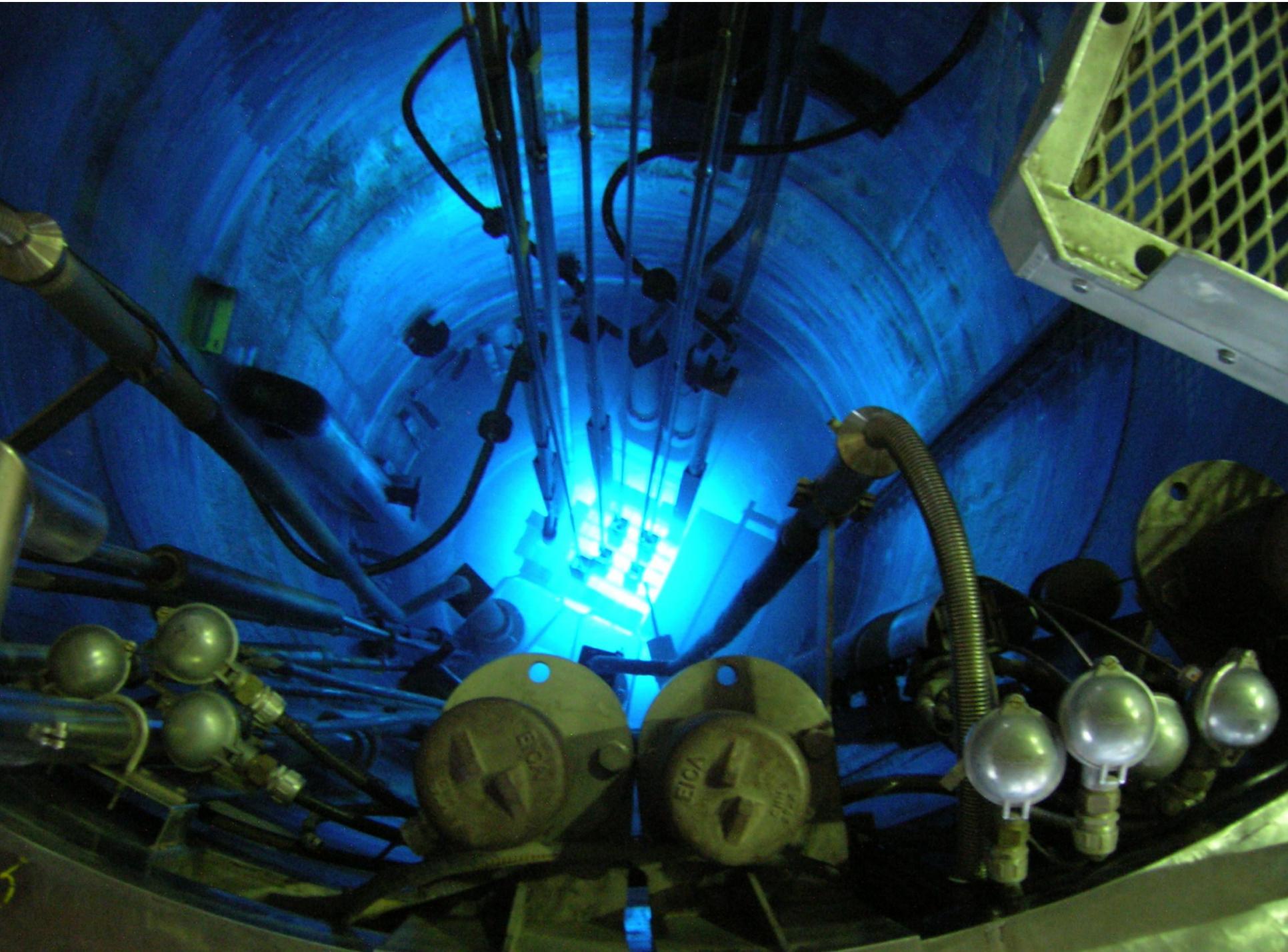
по углу распр. фотонов:  $\cos\theta = \frac{c}{nv}$ ,  $v > \frac{c}{n}$

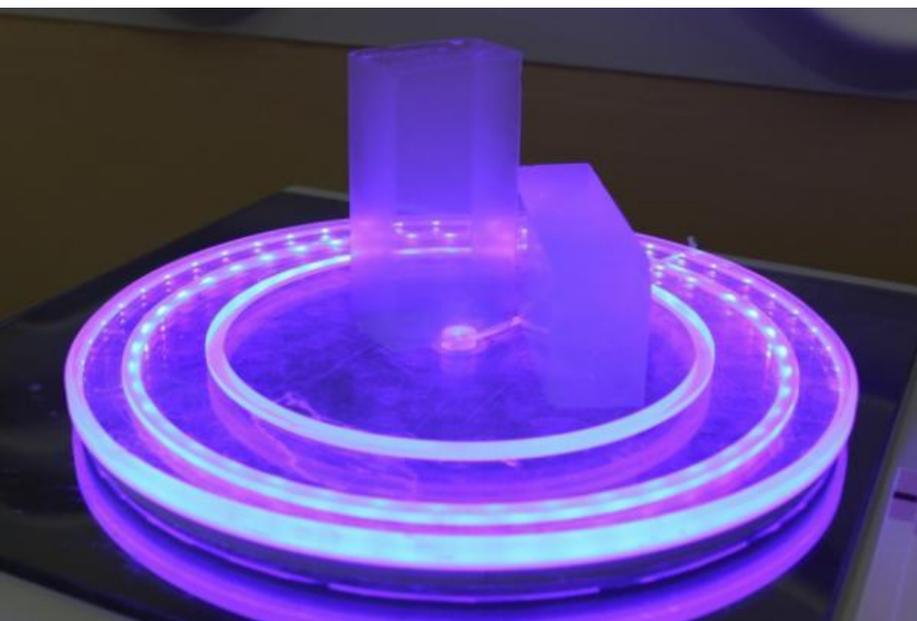
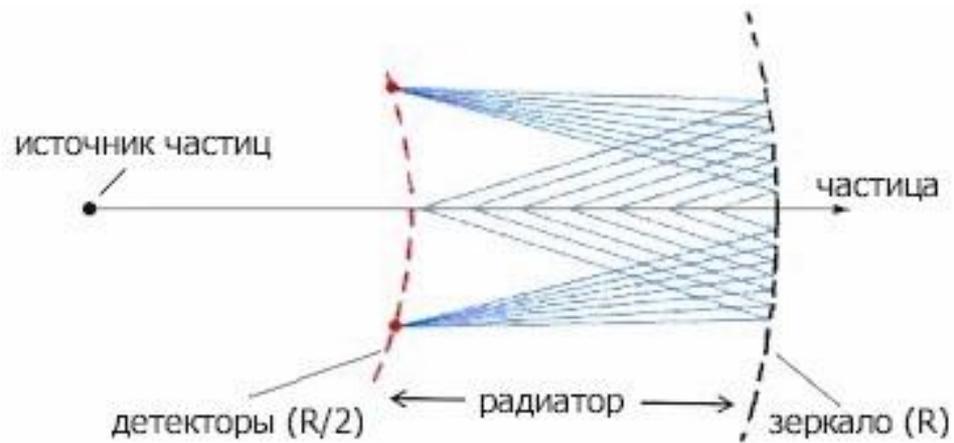


С.И.  
Вавилов

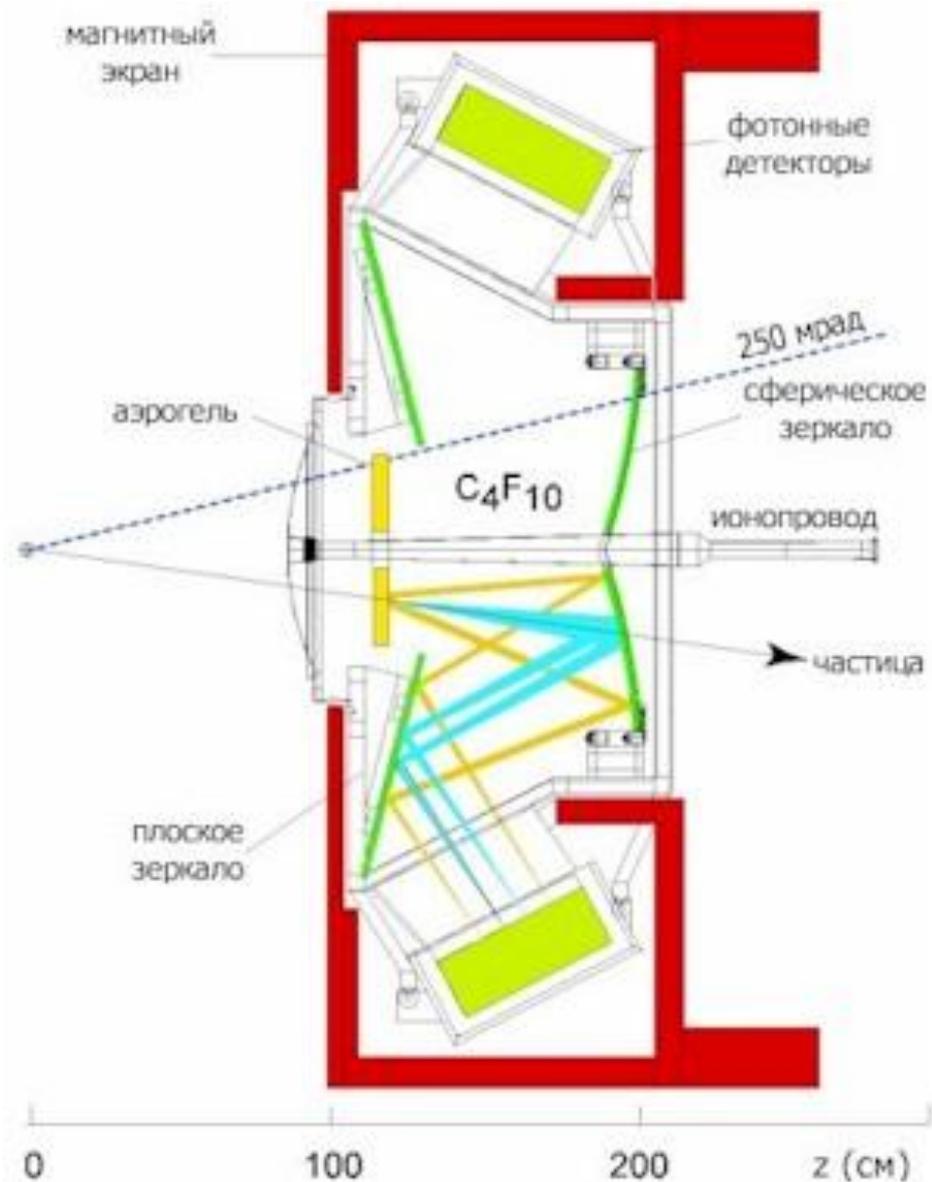


П.А.  
Черенков





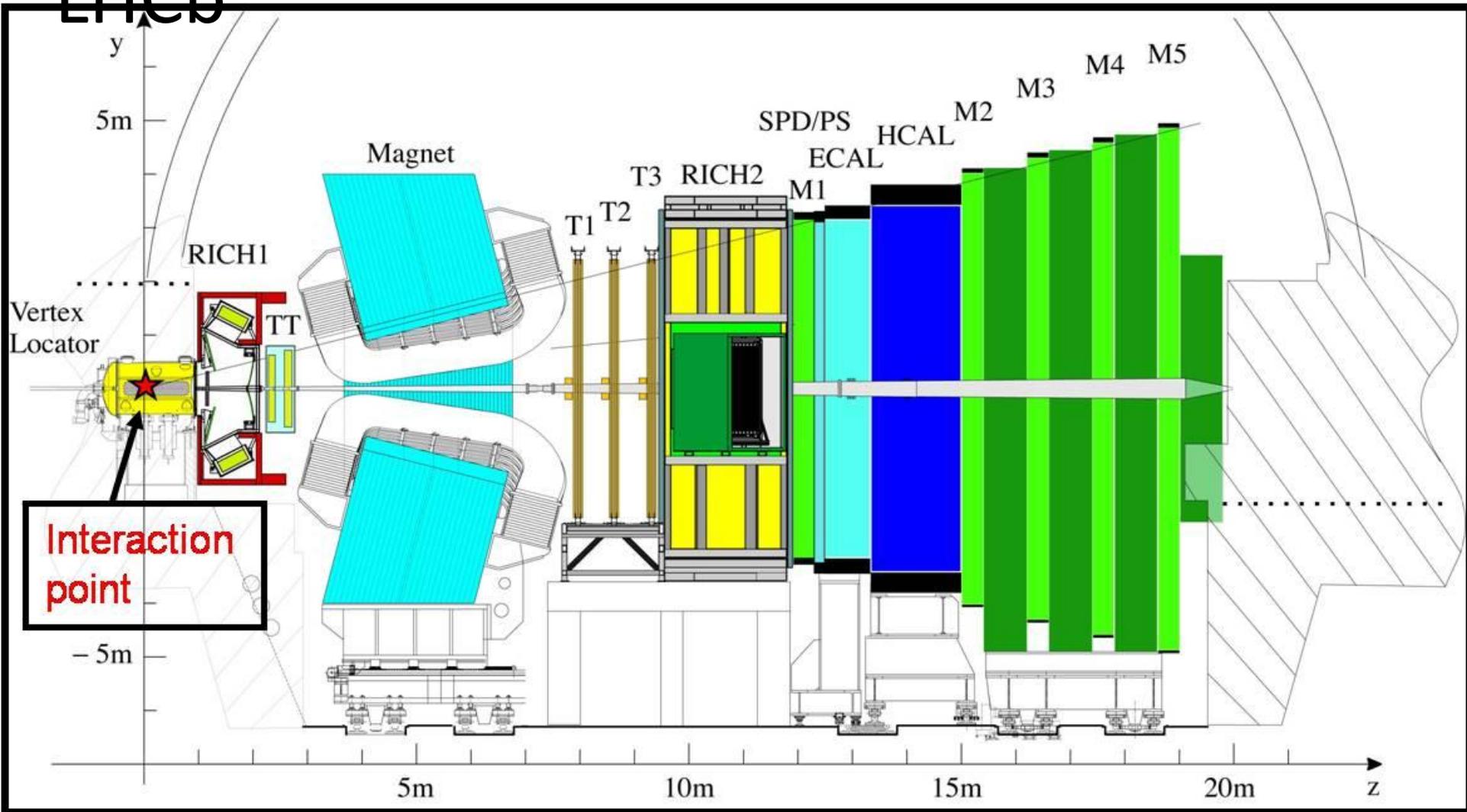
Аэрогел



RICH1 в LHCb

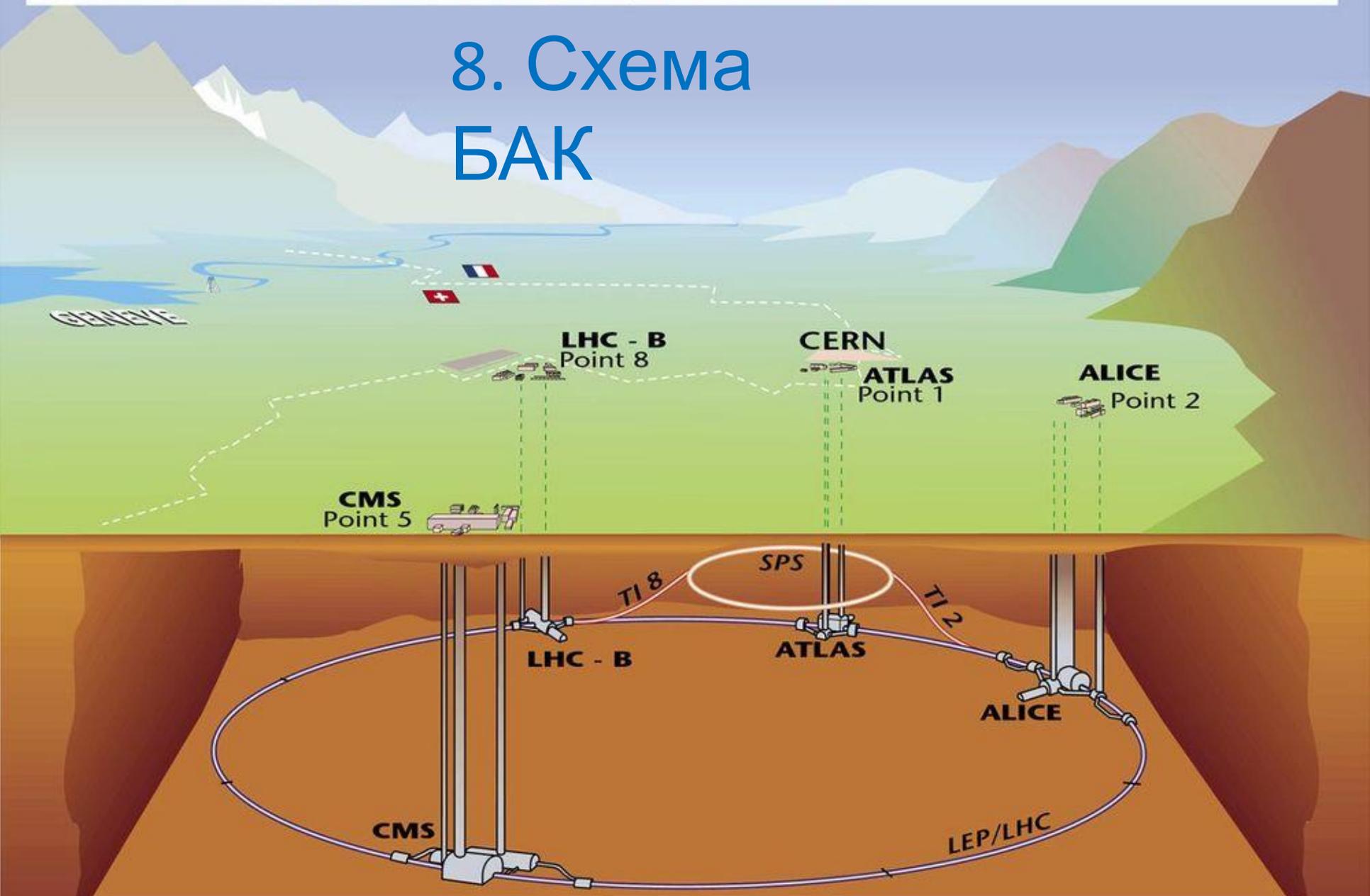
# Комплекс детекторов

## ЛНСб

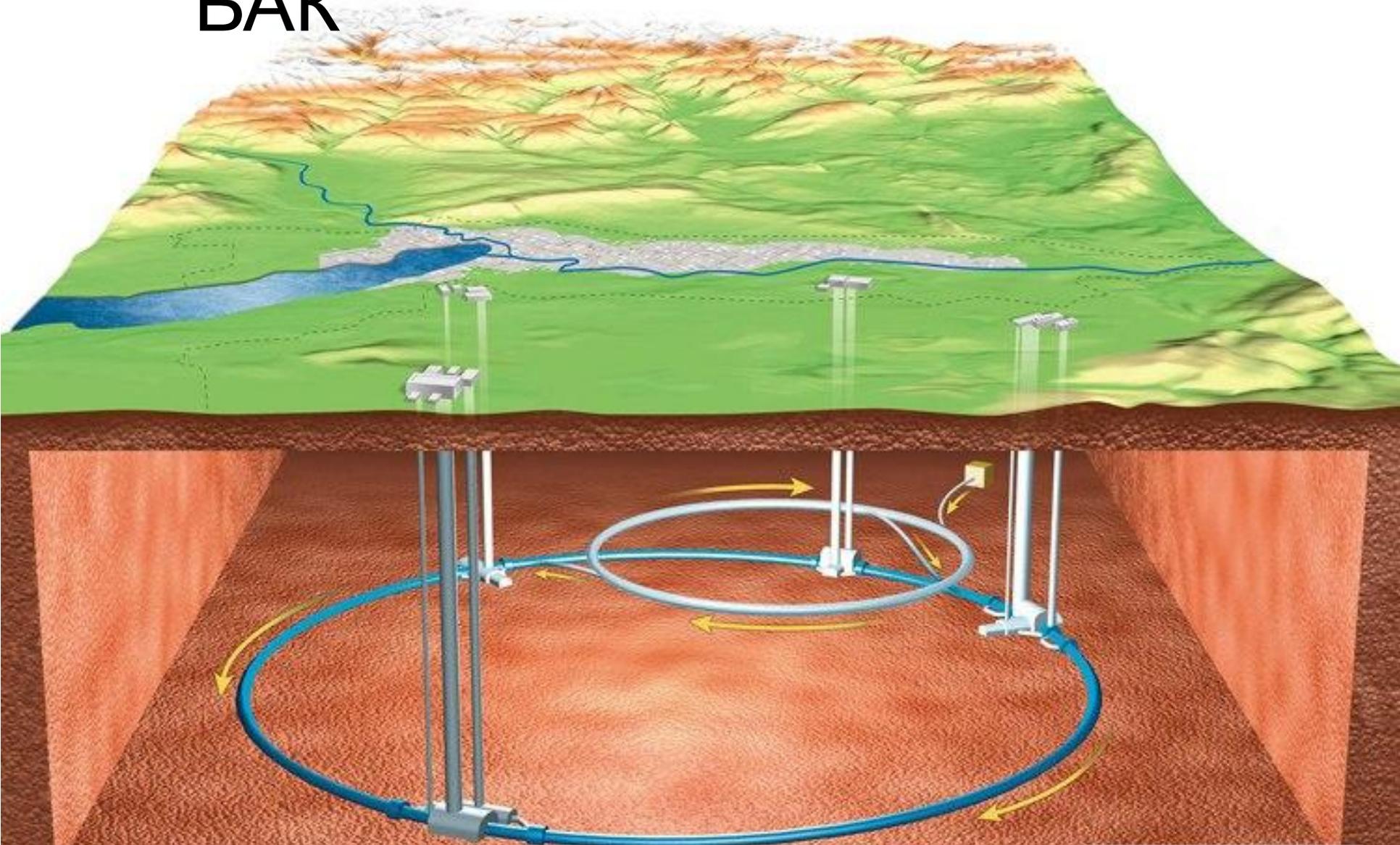


# Overall view of the LHC experiments.

## 8. Схема БАК



# Схема ускорения частиц в БАК





Photograph: Maximilien Brice © 2008 CERN

# Линейный ускоритель Linac2 – инжектор $p^+$ и ионов свинца в БАК



RADIATION

ZONE  
CONTROLEE

FILM BADGE

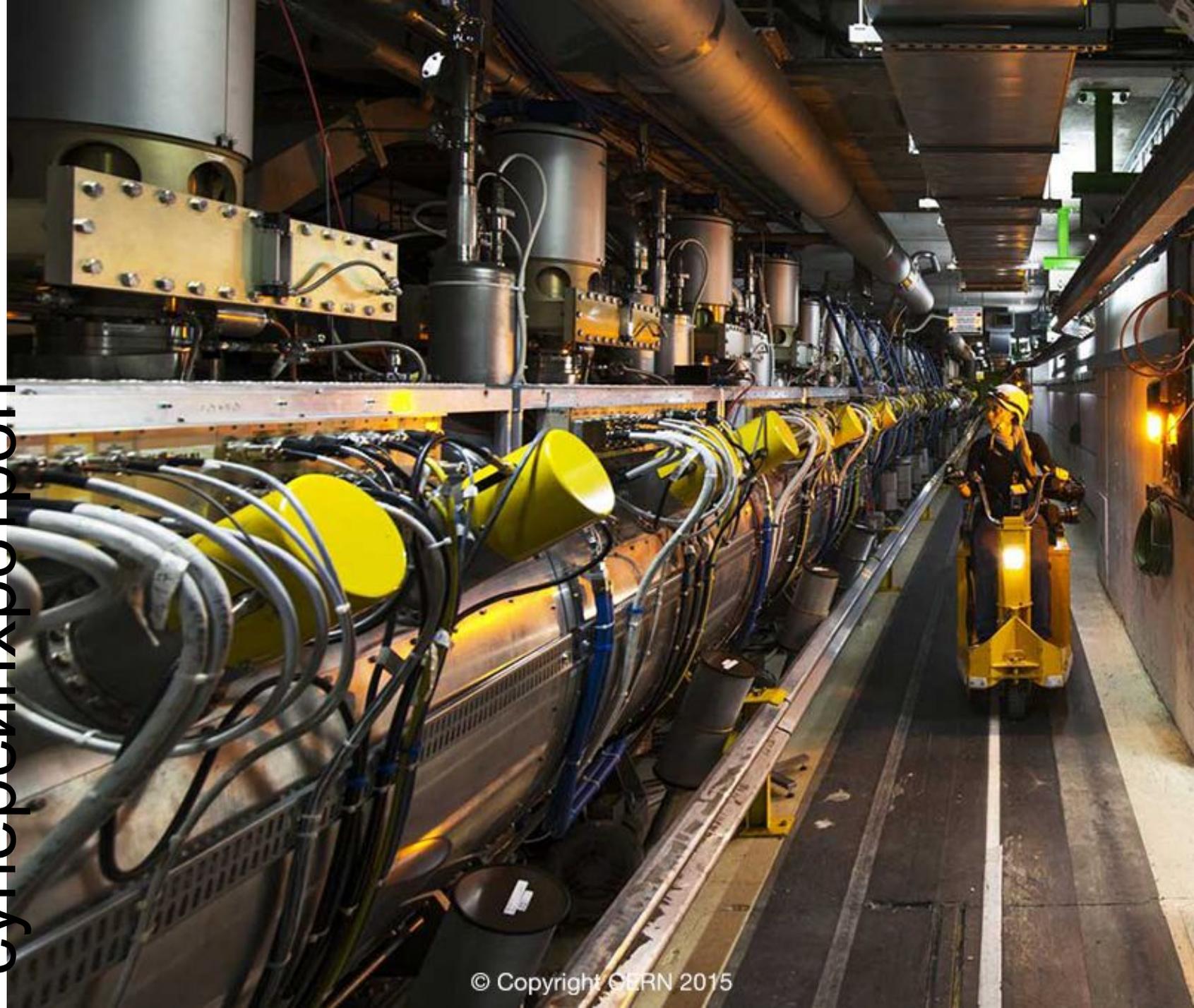
Temps de séjour limité  
Limited occupancy

CONTROLLED  
AREA

OBLIGATOIRE  
REQUIRE



# Протонный суперсинхротрон



# Туннель, трубы и техник

БАК



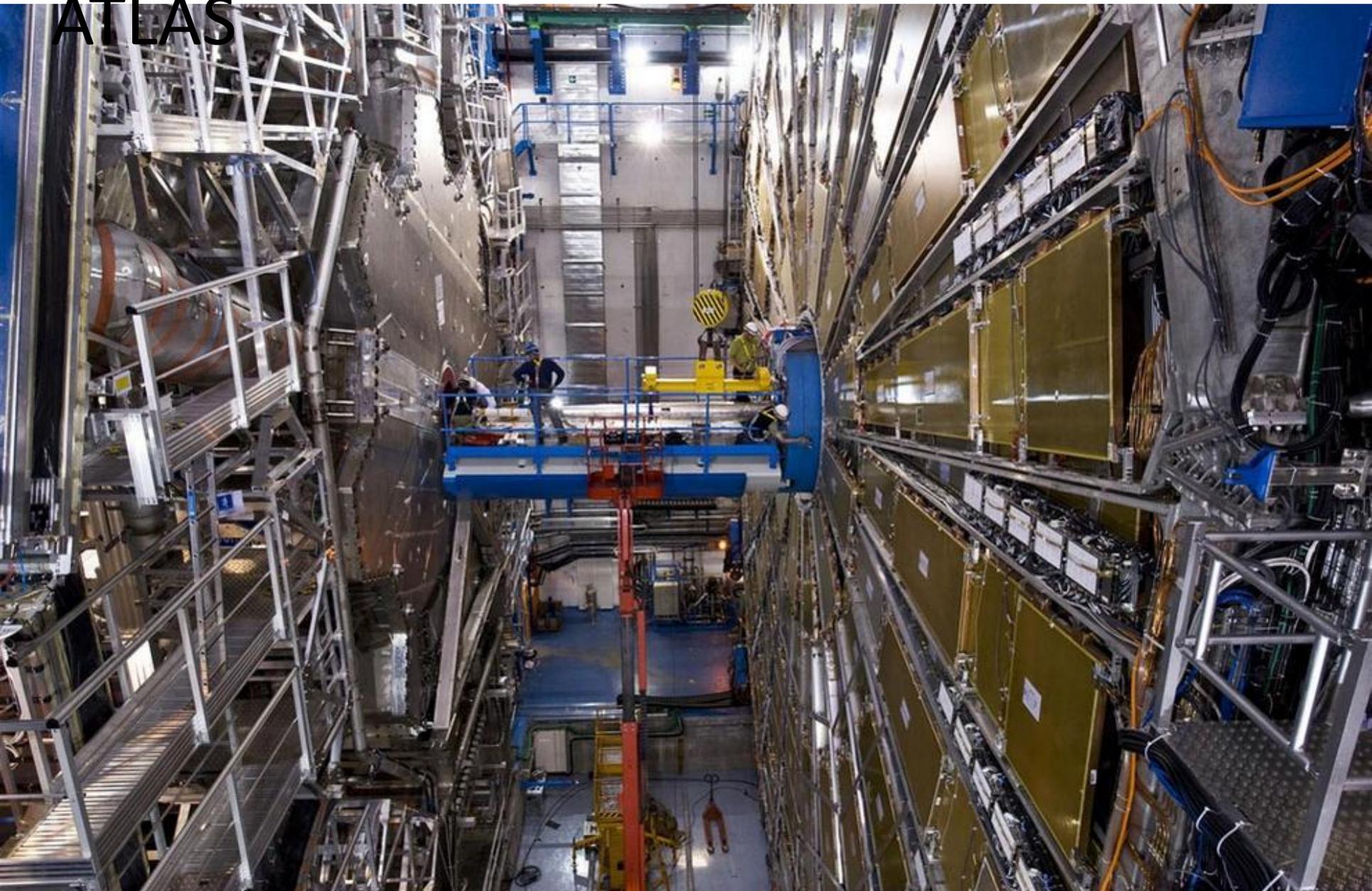
# Сегмент трубы

БАК



# Комплекс детекторов

ATLAS

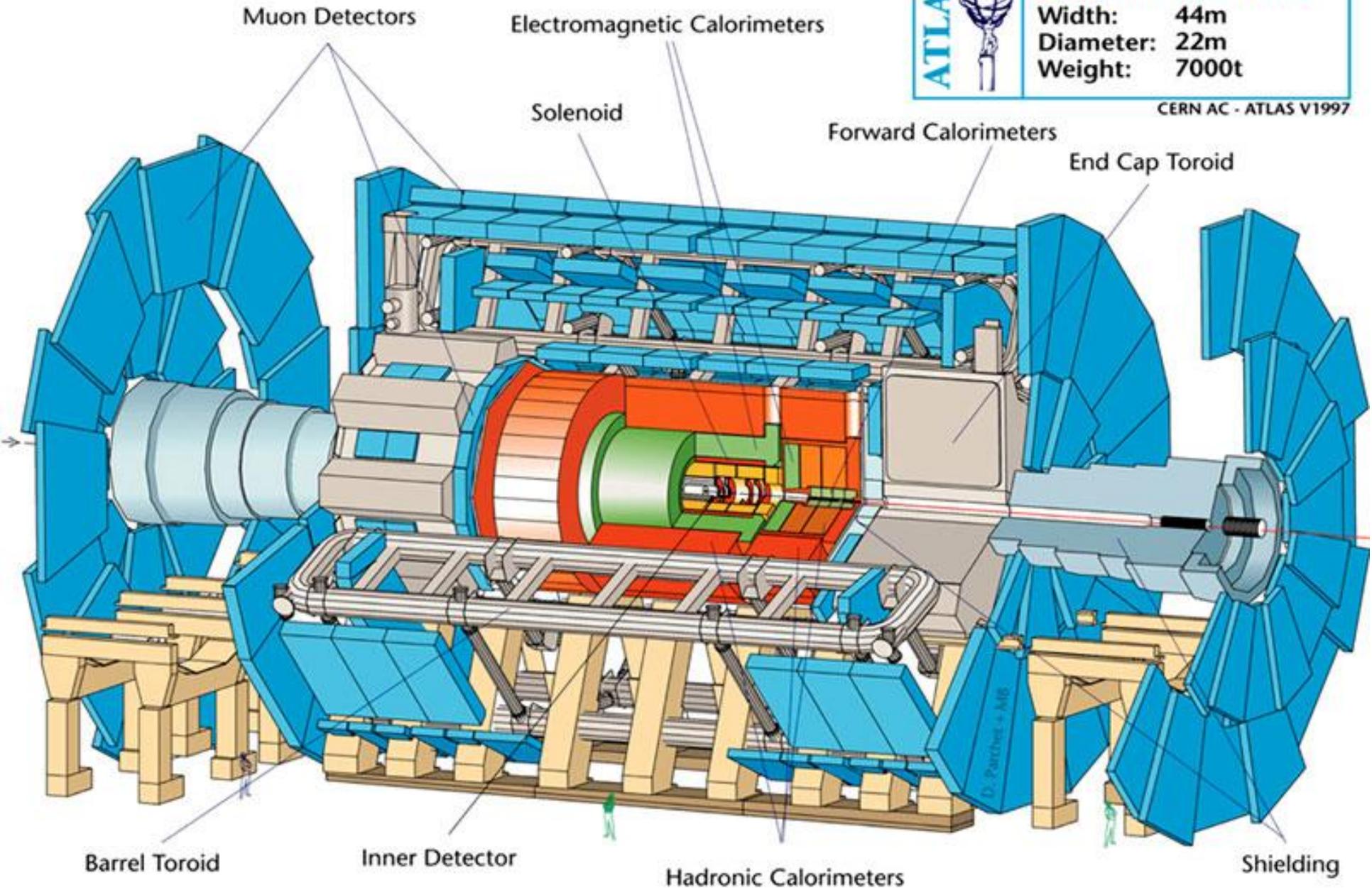




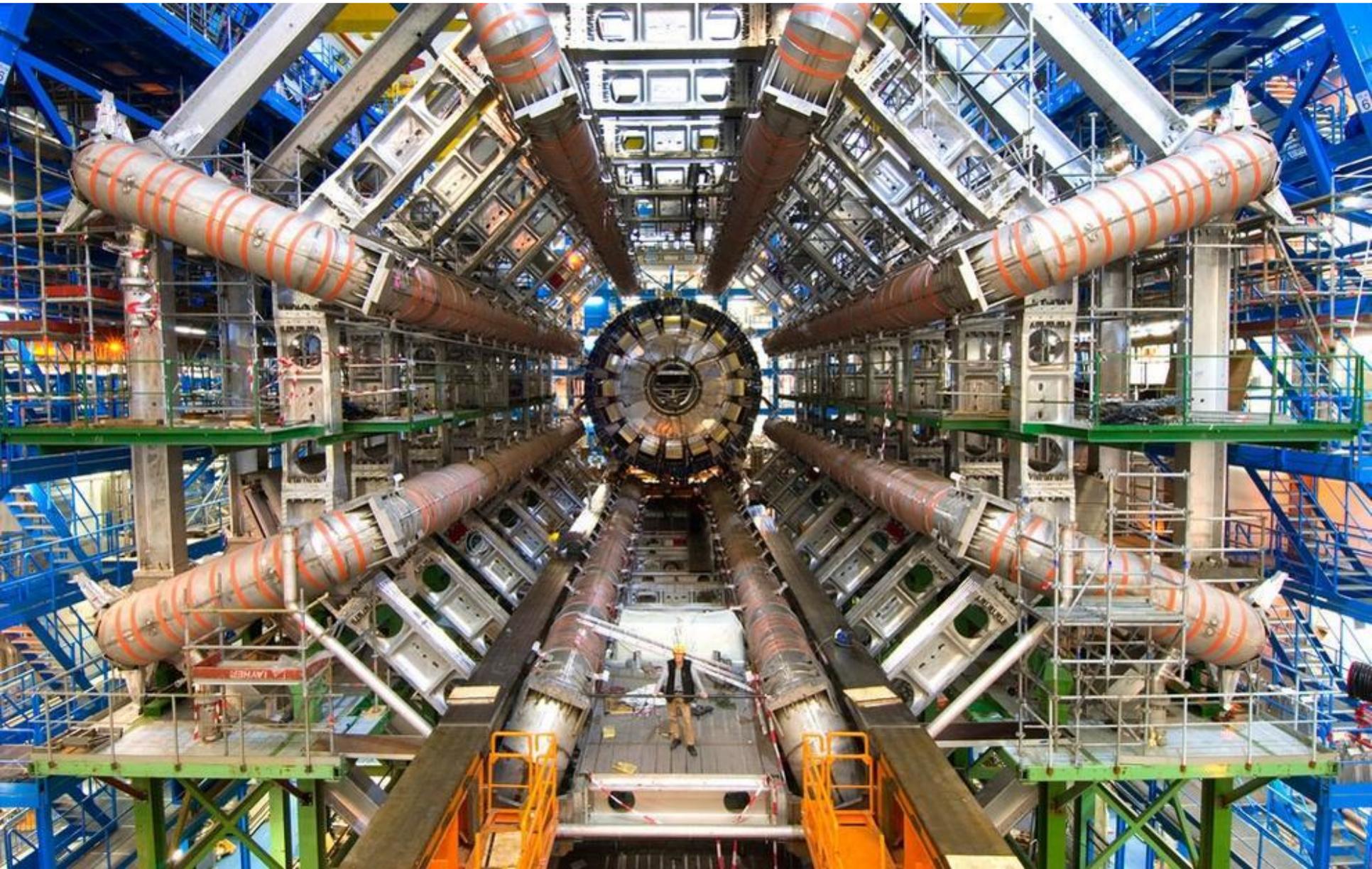
### Detector characteristics

**Width:** 44m  
**Diameter:** 22m  
**Weight:** 7000t

CERN AC - ATLAS V1997



# 8 тороидальных магнитов, окружающих калориметр в ATLAS

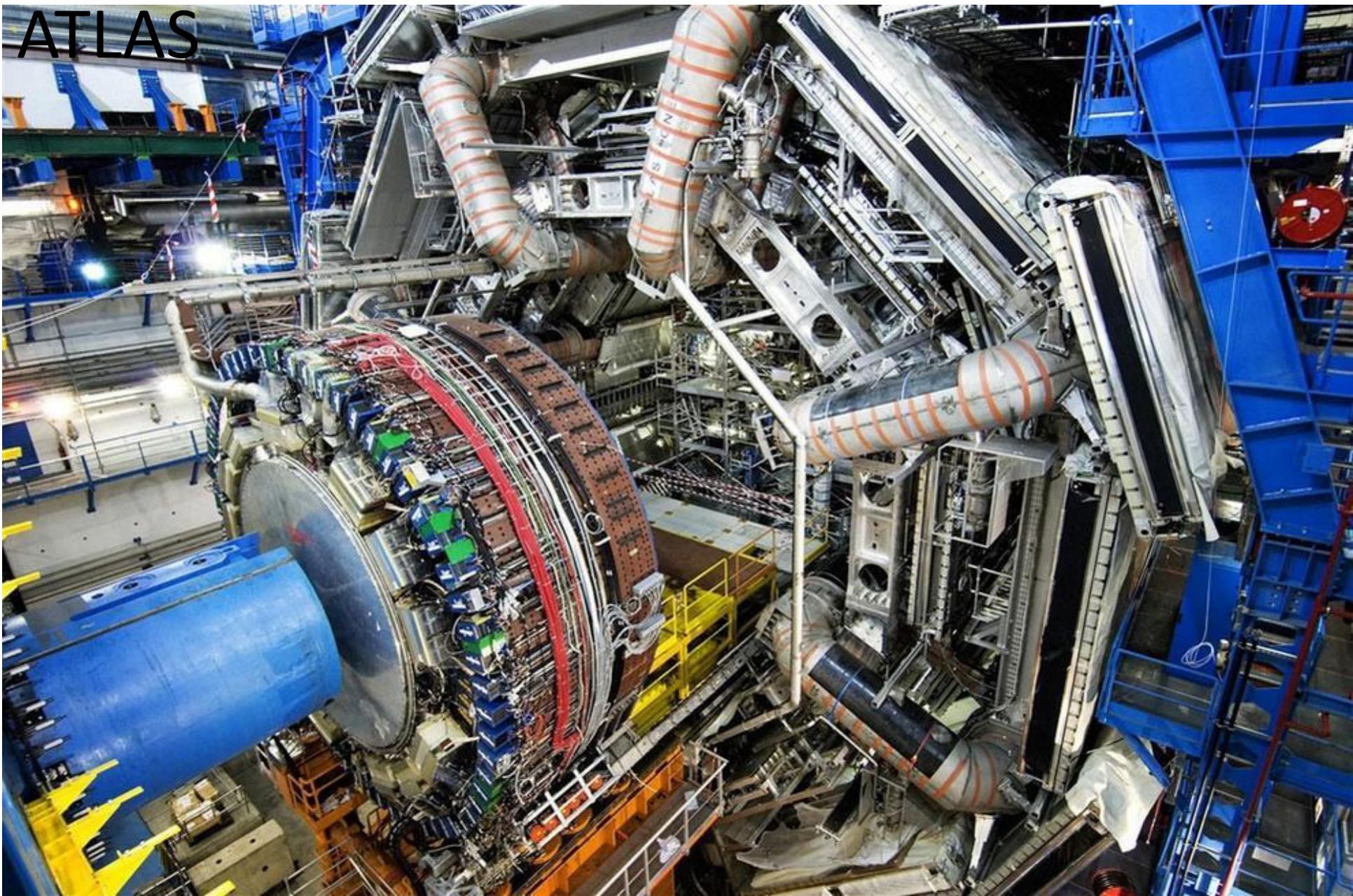


# Заглушка тороидальных магнитов для ATLAS

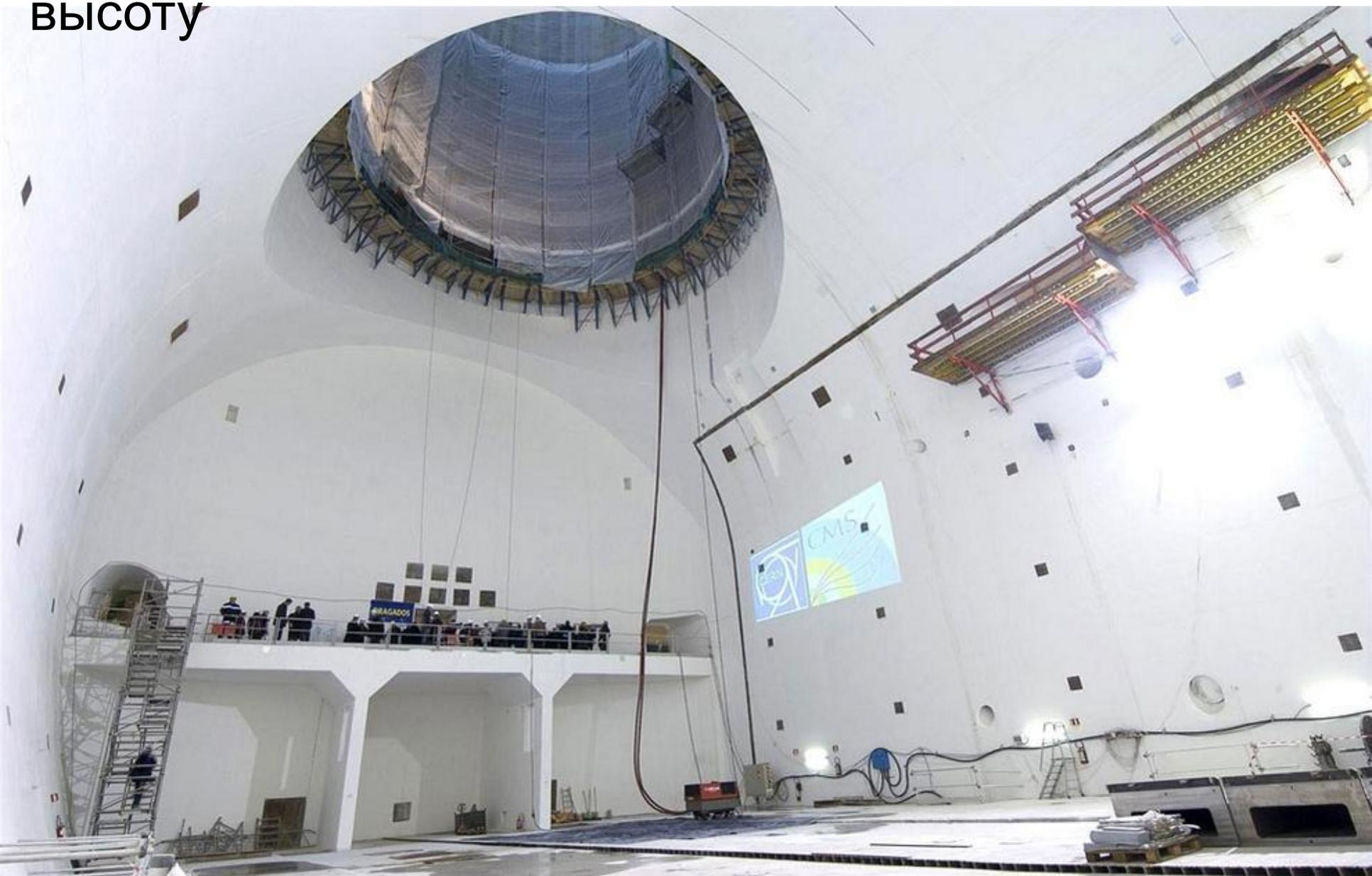


# Калориметр

ATLAS

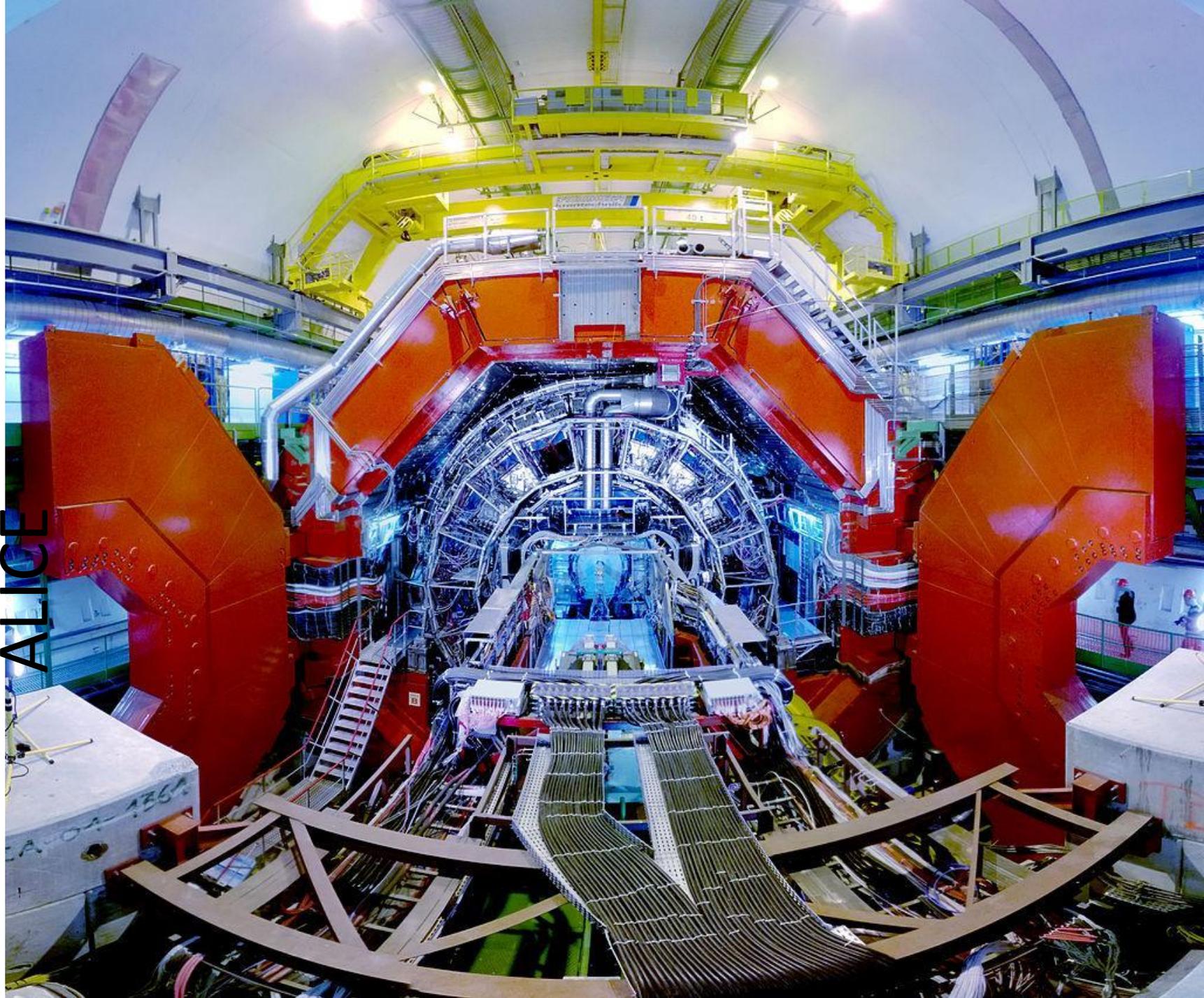


Зал CMS: 53 м в длину, 27 м в ширину и 24 — в  
высоту



Ворота

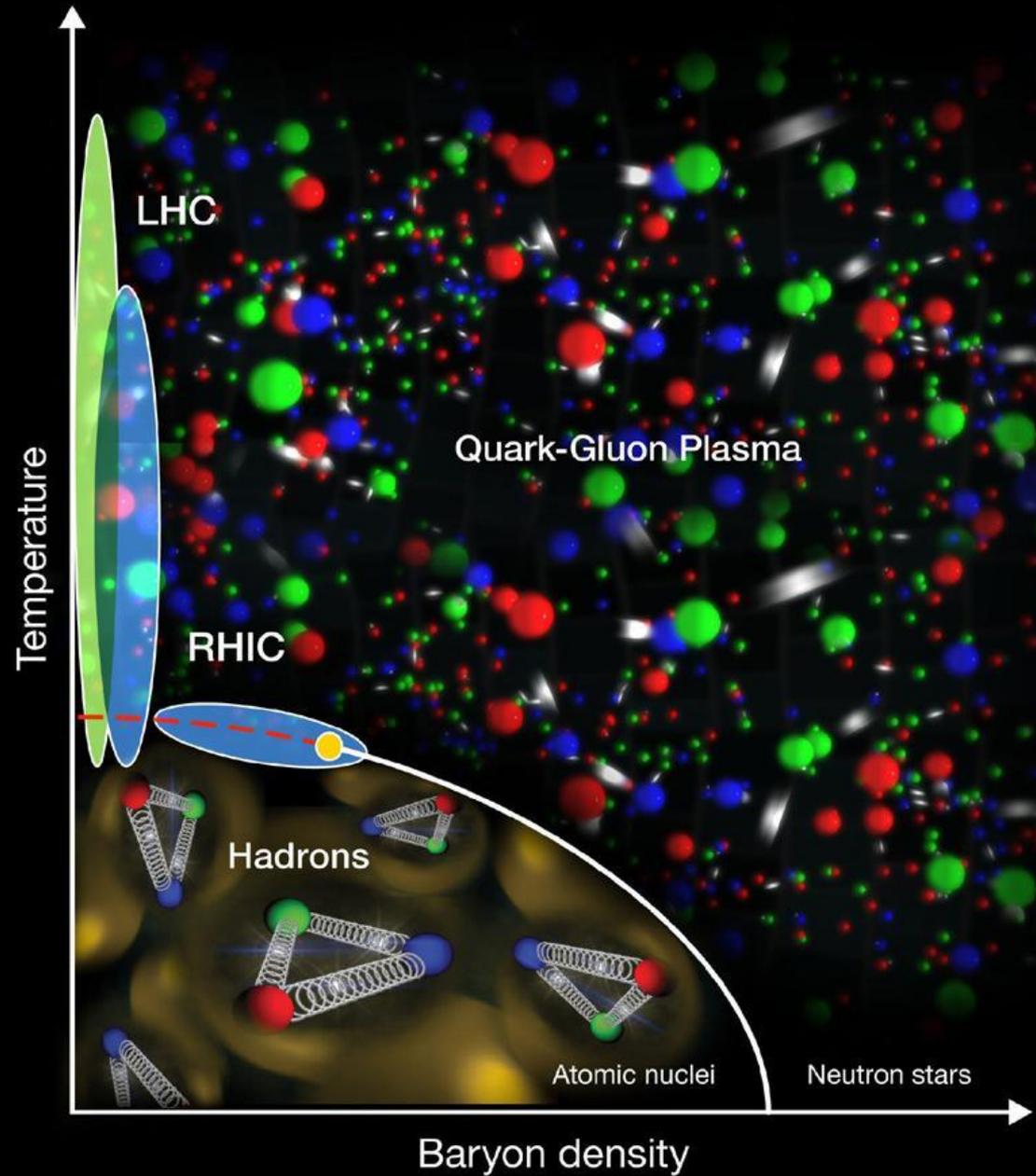
ALICE



# ALICE: фотонный спектрометр с 3 584 кристаллами вольфрамата свинца

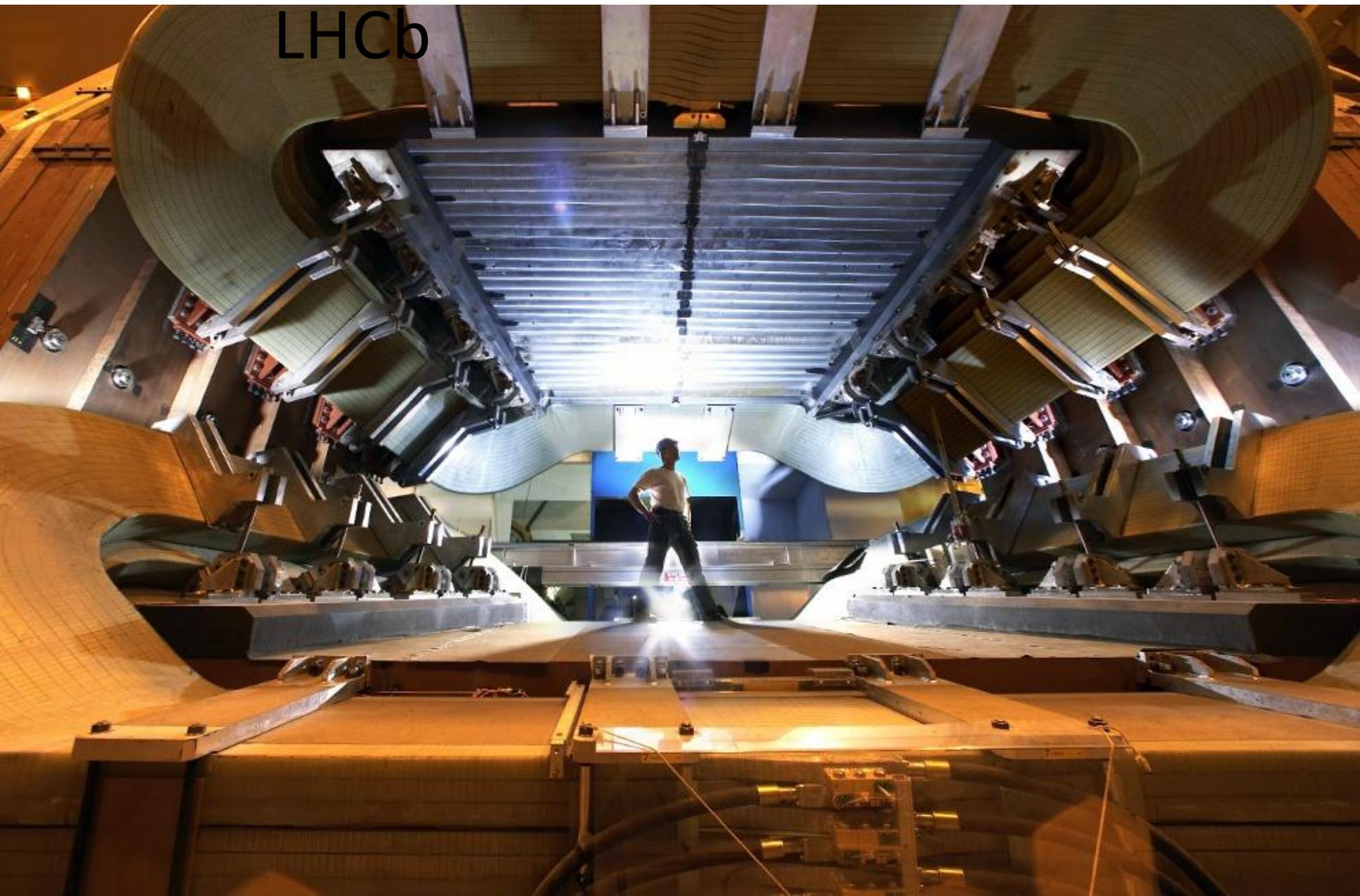


# Фазовая диаграмма ядерной материи



# Магниты комплекса

LHCb



Цель ЛНСб – изучение СР-  
нарушений

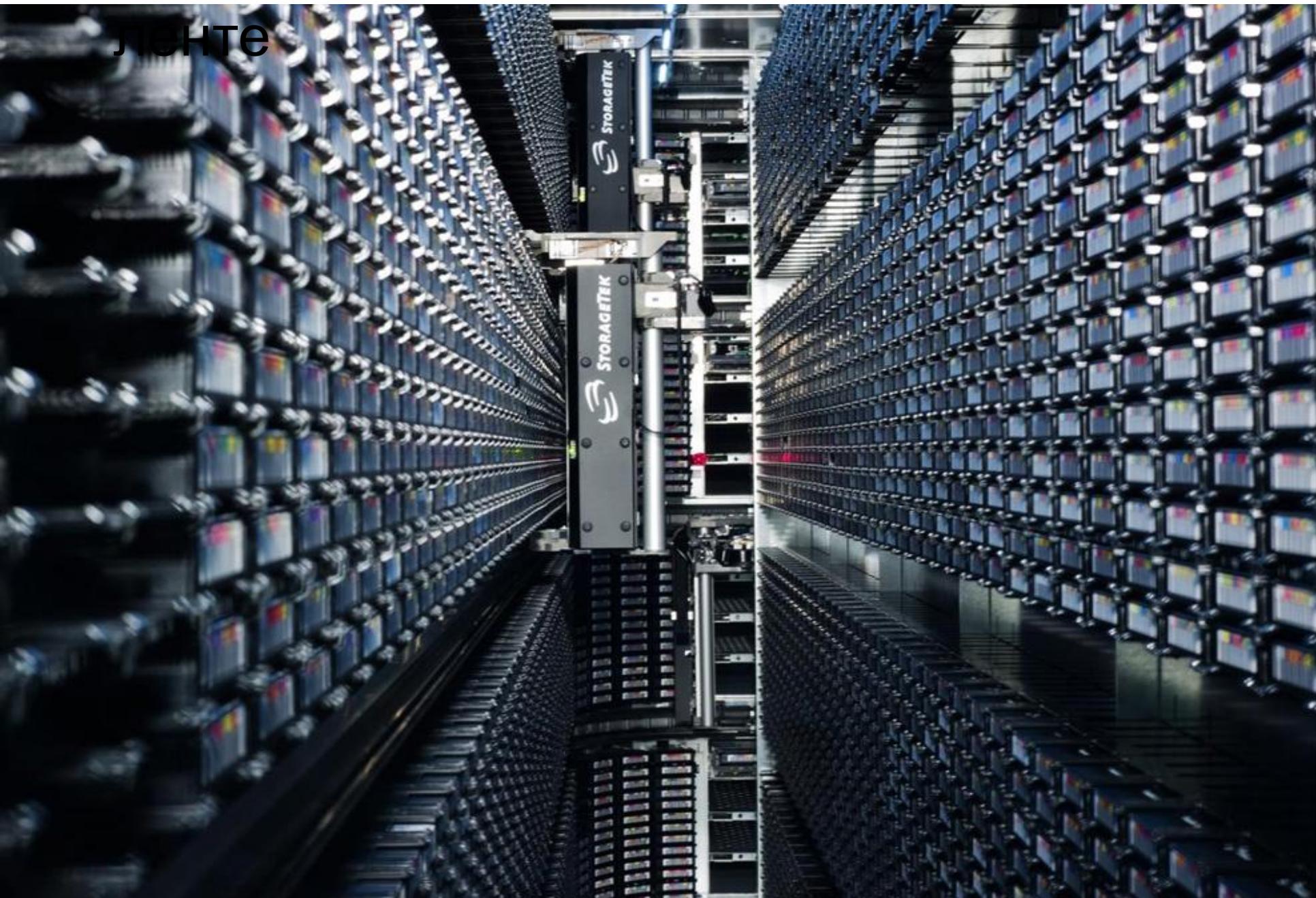
*ЛНСб*  
~~ЛНСР~~

# Криогенная система

БАК



# Архив данных на магнитной ленте



# Центр управления БАК



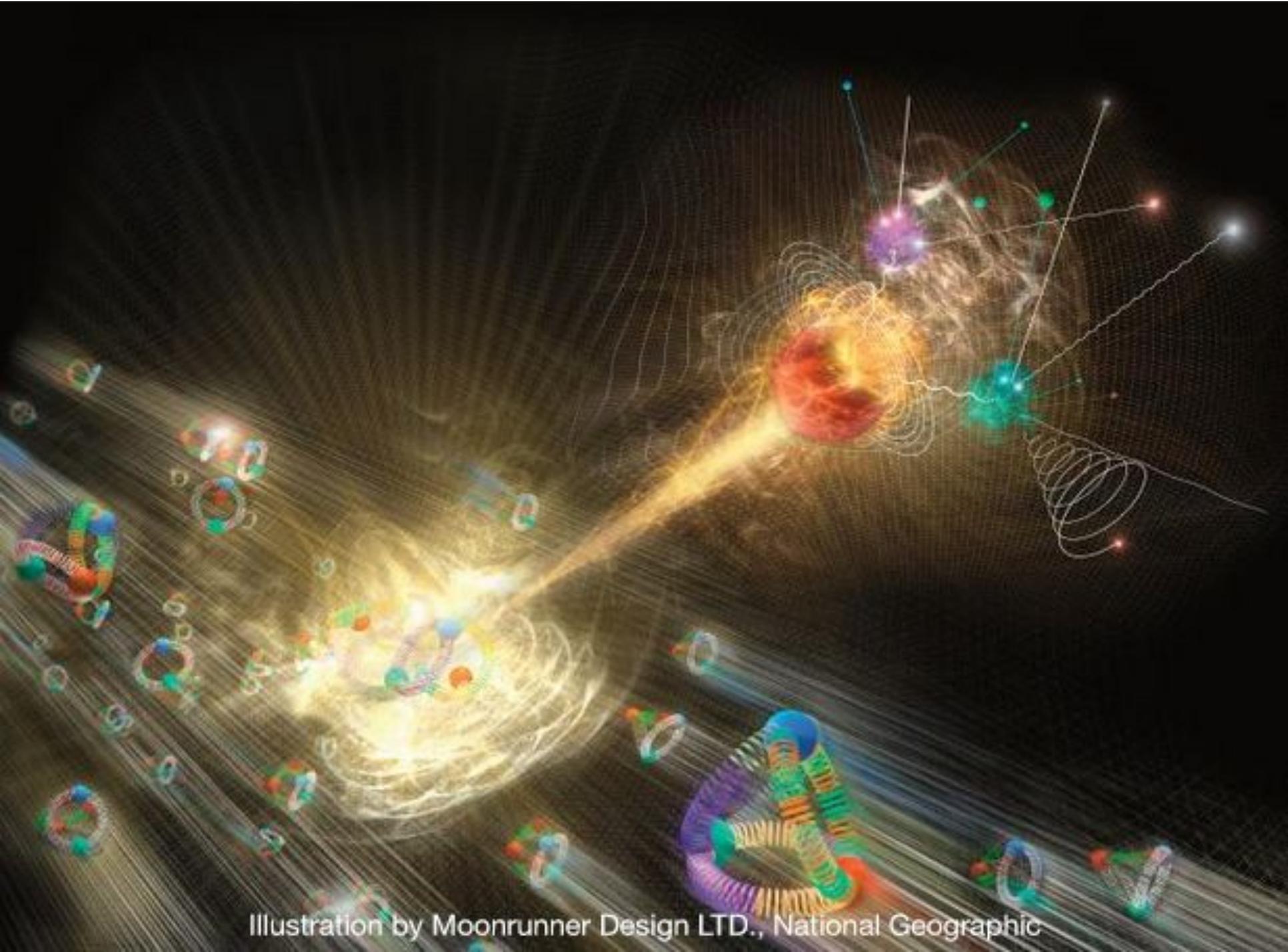


Illustration by Moonrunner Design LTD., National Geographic