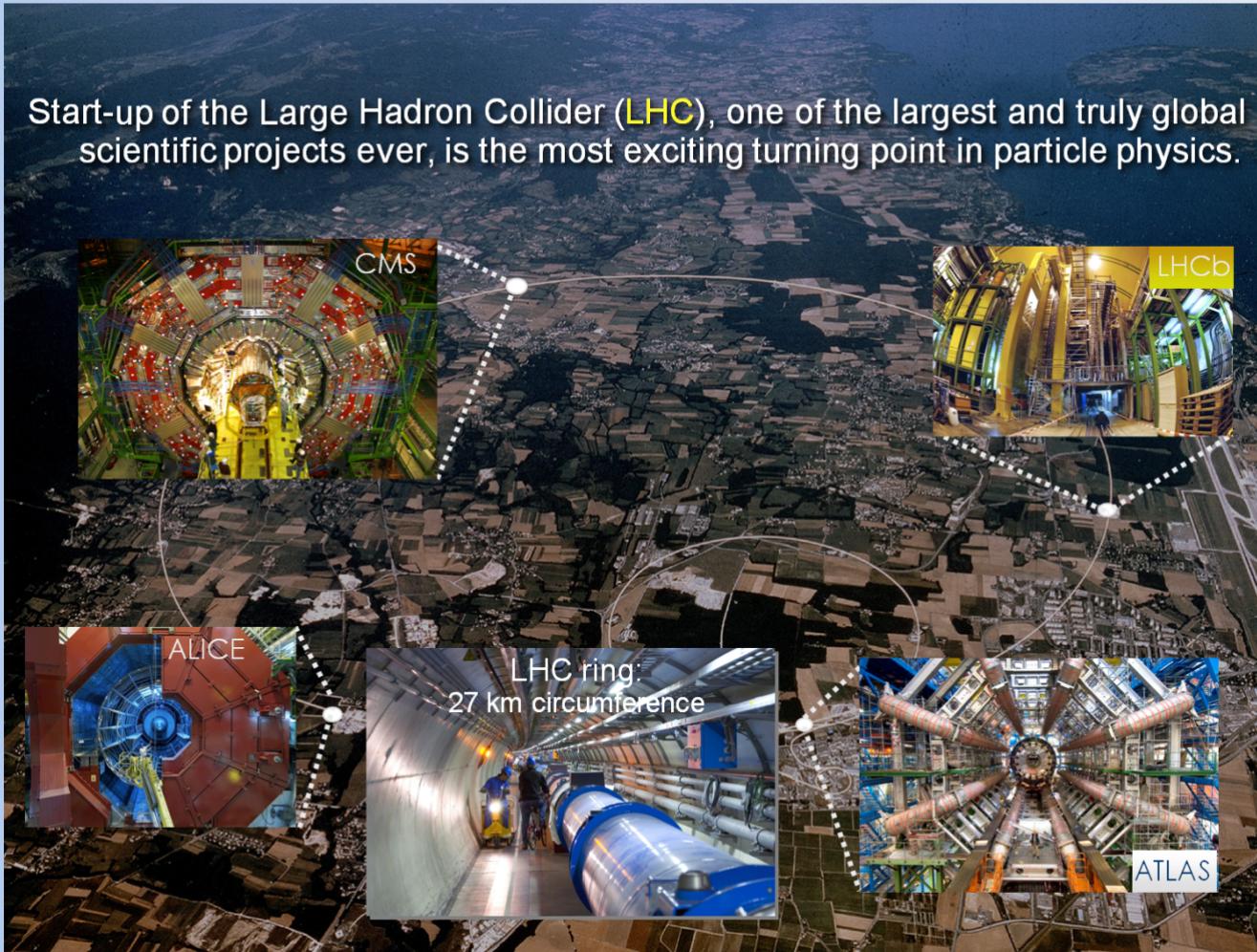


Эксперименты в физике высоких энергий (на примере LHC)



С. Смирнов (НИЯУ МИФИ)

О чём ... о детекторах

Детектор - емкое слово.

Классификаций много.

Принципы регистрации,
типы конструкции.

Комплексы детекторов - Детектор.

Введение

Главная цель Физики высоких энергий – изучение «фундаментальных» или «элементарных» частиц и их взаимодействий.

Что для этого надо?

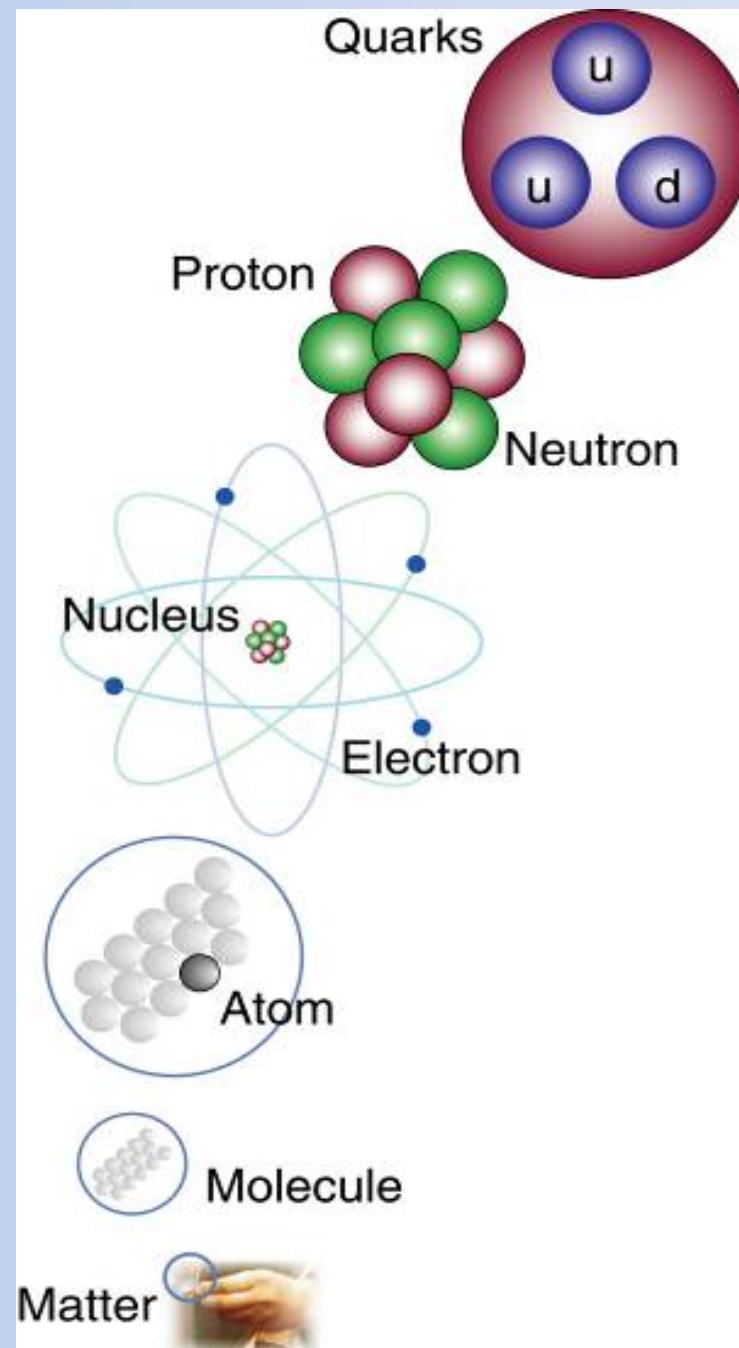
Теория (CM, SUSY ...) или идея Фикс

Ускорители (LEP, Tevatron, LHC, ...)

Детекторы (Огромные комплексы...)

Введение

Quarks (Gell-Mann)
1964



Регистрация частиц

■ What is a particle

- Irreducible representation of the Poincaré group (E.Wigner)

■ What is a detector

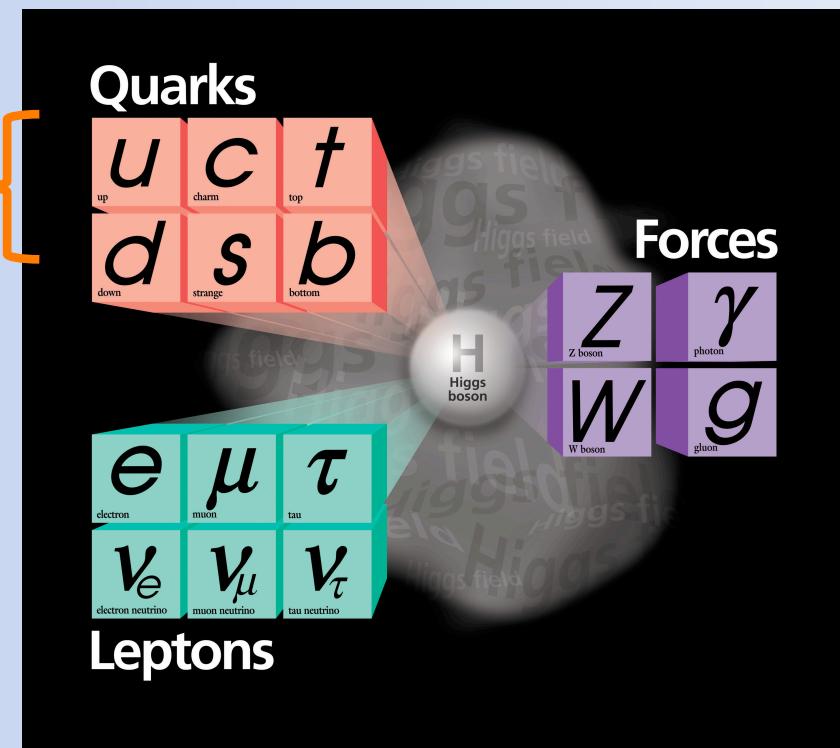
- an instrument to measure the all properties (E, p, m, lifetime, quantum numbers,...) of a particle and identifying it

Elementary particles

Weak
Interaction

Electro-
magnetic
Interaction

Strong
interaction



Введение

Standard model Столп I: Материя

It is a theory that explains all the hundreds of particles and complex interactions with only 6 quarks and 6 leptons.

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

Most quarks and all charged leptons very deeply scrutinized

Neutrinos not really testable at hadron colliders

Up to now some thousand Top quarks observed...
Many open issues yet!

Введение

Standard model Столп II: Силы



All interactions very precisely determined:

$$\alpha_{em} = 1/137.03599976(50)$$

$$G_\mu = 1.16639(1) \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

$$M_Z = 91.1882(22) \text{ GeV}$$

Введение

Столп III: Higgs

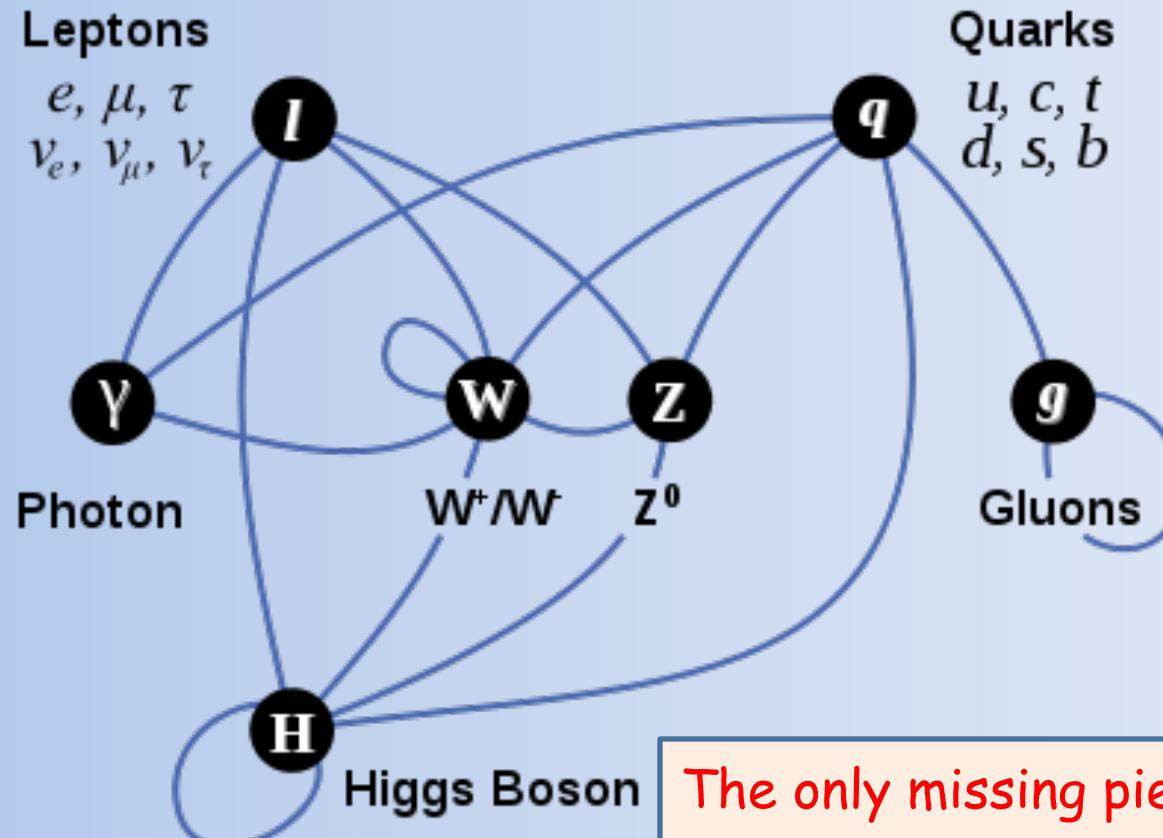
Boson masses and fermion masses break gauge symmetries

=> Non renormalisable theory!

Standard Model way out: Four Higgs fields

- Three give mass to W/Z

- One is physical with well defined properties (except mass)



Введение

Суперсимметрия (SUSY)

(Julius Wess and Bruno Zumino, 1974)

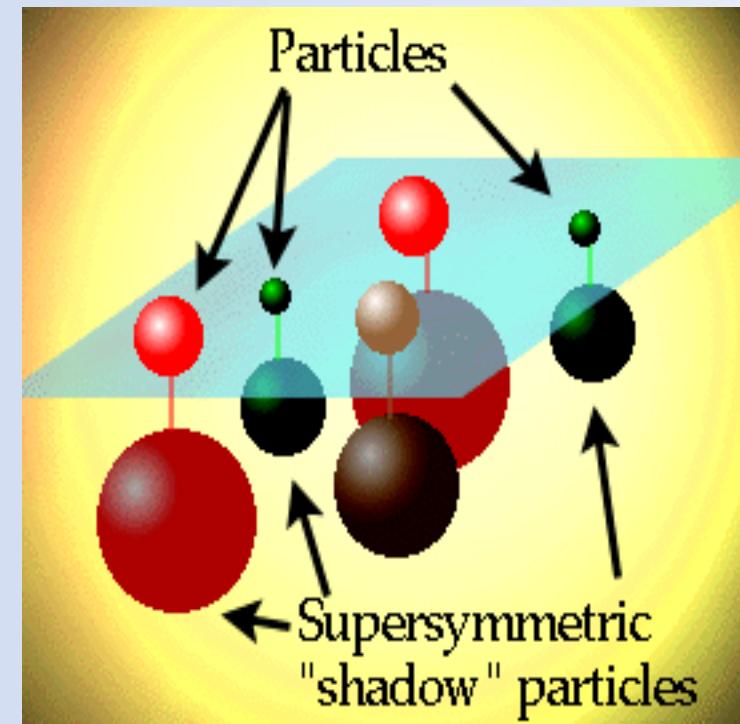
Establishes a symmetry between fermions (matter) and bosons (forces):

- Each particle p with spin s has a SUSY partner \tilde{p} with spin $s - 1/2$

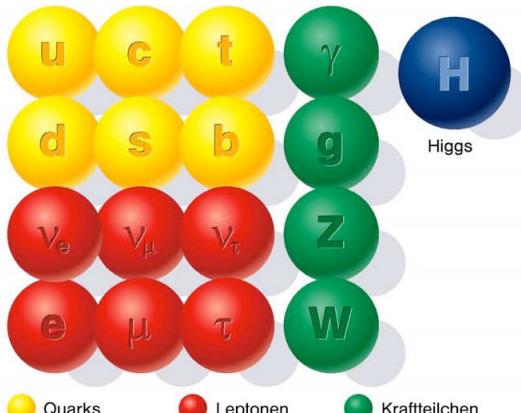
- Examples $q \text{ (s=1/2)} \rightarrow \tilde{q} \text{ (s=0)} \quad \text{squark}$
- $g \text{ (s=1)} \rightarrow \tilde{g} \text{ (s=1/2)} \quad \text{gluino}$

Our known world

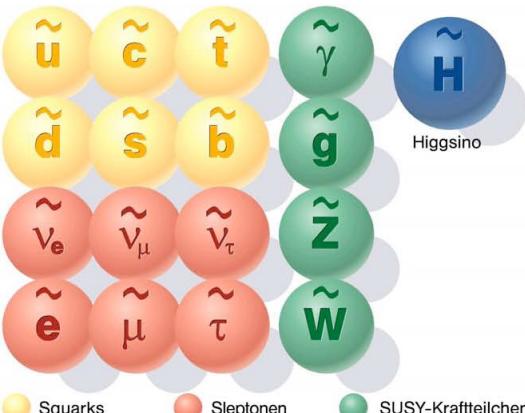
Maybe a new world?



Standard-Teilchen



SUSY-Teilchen



LHC Dream-Reality-Vision

Russian Teachers Programme, November 2013

Motivation:

- Unification (fermions-bosons, matter-forces)
- Solves some deep problems of the Standard Model

Введение

ЧТО МЫ МЕНЬШЕ ЗНАЕМ ПОКА...

- Темная материя

Universe is dominated by "unknown" dark matter/energy.
Constituents of dark matter are **new particles?** Can be detected?

- Суперсимметрия

Predictions from String theory:
Every particle should have a massive "shadow" super-partner.
This new symmetry between particles of matter and carriers-of-force is called supersymmetry.
One of these might be a dark matter particle.

- Extra dimensions
of space

- Унификация сил

Grand Unified Theory.

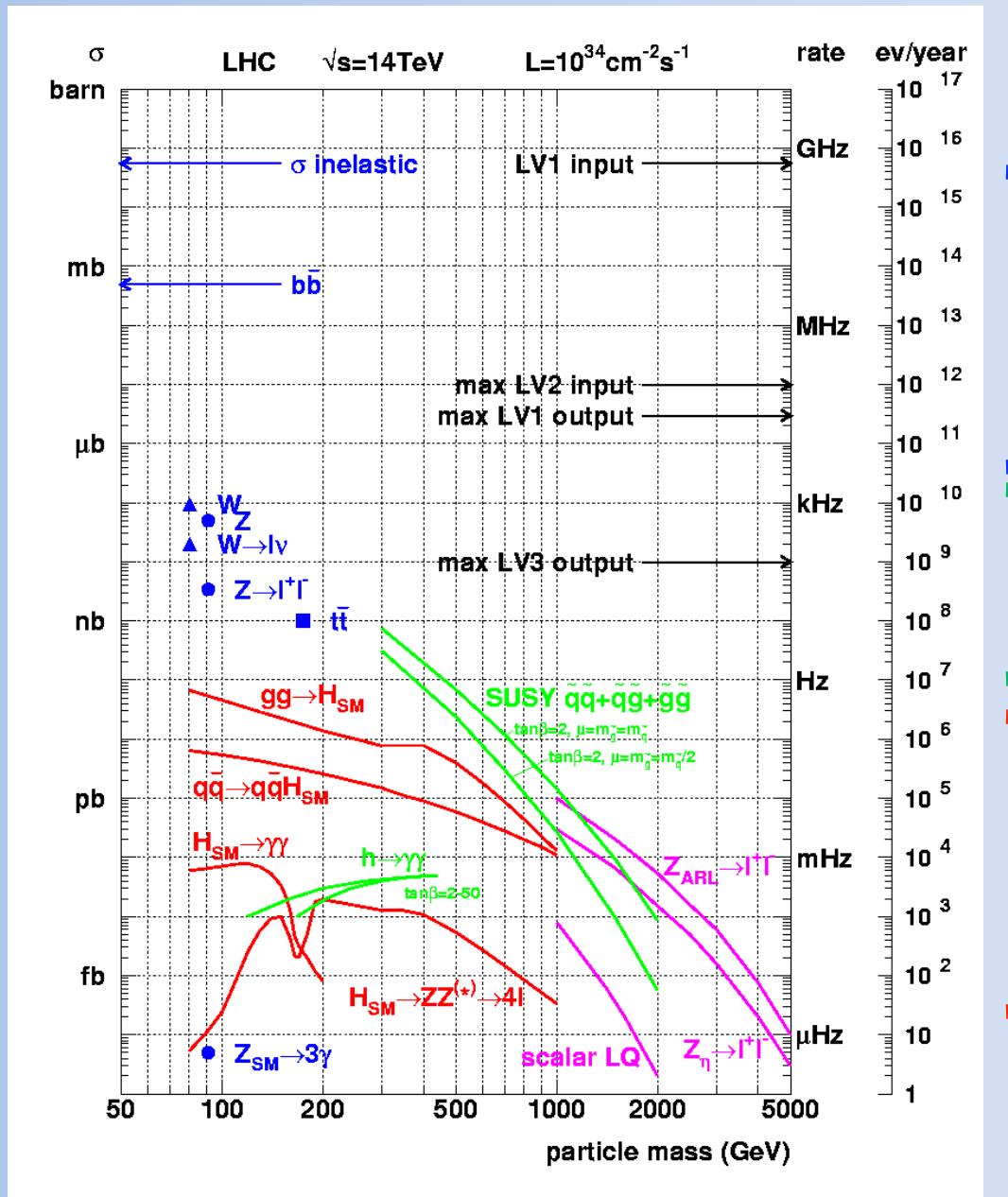
There is some evidence that electromagnetic, weak, and strong forces (interactions) merge into one unified force. New force? W' , Z' .

- Новые силы

Will explore the tiny difference that exist between matter and antimatter

- Антиматерия

Введение



«Хорошо изученные процессы»,

нет необходимости регистрировать все события...

Физика LEP - большого электрон-позитронного коллайдера

«Новая Физика»

Это мы хотим выделить и записать для дальнейшего анализа...

Введение

<http://pdg.lbl.gov>

~ 180 Selected Particles

18

$\pi, W^\pm, Z^0, g, e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \pi^\pm, \pi^0, \eta, f_0(600), g(2300)$,
 $w(782), \eta'(858), f_0(980), a_0(980), \phi(1020), h_1(1170), b_1(1235)$,
 $a_1(1260), f_2(1270), f_1(1285), \eta(1295), \pi(1300), a_2(1320)$,
 $f_0(1370), f_1(1420), w(1420), \eta(1440), a_0(1450), g(1450)$,
 $f_0(1500), f_2(1525), w(1650), w_3(1670), \pi_2(1670), \phi(1680)$,
 $g_3(1690), g(1700), f_0(1710), \pi(1800), \phi_3(1850), f_2(2010)$,
 $a_4(2040), f_4(2050), f_2(2300), f_2(2340), K^\pm, K^0, K_s^0, K_L^0, K^*(892)$,
 $K_1(1270), K_1(1400), K^*(1410), K_b^*(1430), K_2^*(1430), K^*(1680)$,
 $K_2(1770), K_3^*(1780), K_2(1820), K_4^*(2045), D^\pm, D^0, D^*(2007)^0$,
 $D^*(2010)^\pm, D_1(2420)^0, D_2^*(2460)^0, D_2^*(2460)^\pm, D_s^\pm, D_s^{*\pm}$,
 $D_{s1}(2536)^\pm, D_{s1}(2573)^\pm, B^\pm, B^0, B^*, B_s^0, B_c^+, \eta_c(1S), J/\psi(1S)$,
 $\chi_{c0}(1P), \chi_{c1}(1P), \chi_{c2}(1P), \psi(2S), \psi(3770), \psi(4040), \psi(4160)$,
 $\psi(4415), \tau(1S), \chi_{b0}(1P), \chi_{b1}(1P), \chi_{b2}(1P), \tau(2S), \chi_{b3}(2P)$,
 $\chi_{c2}(2P), \tau(3S), \tau(4S), \tau(10860), \tau(11020), p, n, N(1440)$,
 $N(1520), N(1535), N(1650), N(1675), N(1680), N(1700), N(1710)$,
 $N(1720), N(2190), N(2220), N(2250), N(2600), \Delta(1232), \Delta(1600)$,
 $\Delta(1620), \Delta(1700), \Delta(1905), \Delta(1910), \Delta(1920), \Delta(1930), \Delta(1950)$,
 $\Delta(2420), \Lambda, \Lambda(1405), \Lambda(1520), \Lambda(1600), \Lambda(1670), \Lambda(1680)$,
 $\Lambda(1800), \Lambda(1810), \Lambda(1820), \Lambda(1830), \Lambda(1890), \Lambda(2100)$,
 $\Lambda(2110), \Lambda(2350), \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Sigma(1385), \Sigma(1660), \Sigma(1670)$,
 $\Sigma(1750), \Sigma(1775), \Sigma(1915), \Sigma(1940), \Sigma(2030), \Sigma(2250), \Xi^0, \Xi^-$,
 $\Xi(1530), \Xi(1690), \Xi(1820), \Xi(1950), \Xi(2030), \Omega^-, \Omega(2250)^-$,
 $\Lambda_c^+, \Lambda_c^+, \Sigma_c(2455), \Sigma_c(2520), \Xi_c^+, \Xi_c^0, \Xi_c^{'+}, \Xi_c^0, \Xi(2645)$,
 $\Xi_c(2780), \Xi_c(2815), \Omega_c^0, \Lambda_b^0, \Xi_b^0, \Xi_b^-, t\bar{t}$

There are Many more

Введение

Общие замечания...

Мы не будем рассматривать все известные частицы...

Сконцентрируемся только на частицах с достаточно большим временем жизни, позволяющим их зарегистрировать

γ , e, μ , π , K, p, n

Частица, что бы быть зарегистрированной, должна испытать какое-то взаимодействие с Детектором

Если после этого, частица не сильно меняет свои свойства, взаимодействие должно быть **электромагнитным**

Взаимодействие частиц с веществом

Что случается с частицами, проходящими через вещество -
в зависимости от типа частицы она тем или иным способом
взаимодействует с атомами вещества (ядра, электроны...)

Заряженные частицы

испытывают:

Упругое рассеяние

Многократное рассеяние

теряют энергию:

Ионизация и возбуждение

Тормозное излучение

Черенковское излучение

Переходное излучение

ФОТОНЫ: Фото-эффект, Комptonовское рассеяние,
Рождение пары электрон-позитрон

Адроны: Неупругие ядерные процессы, нейтроны

Мюоны: Ионизационные потери, слабое взаимодействие

Каскады

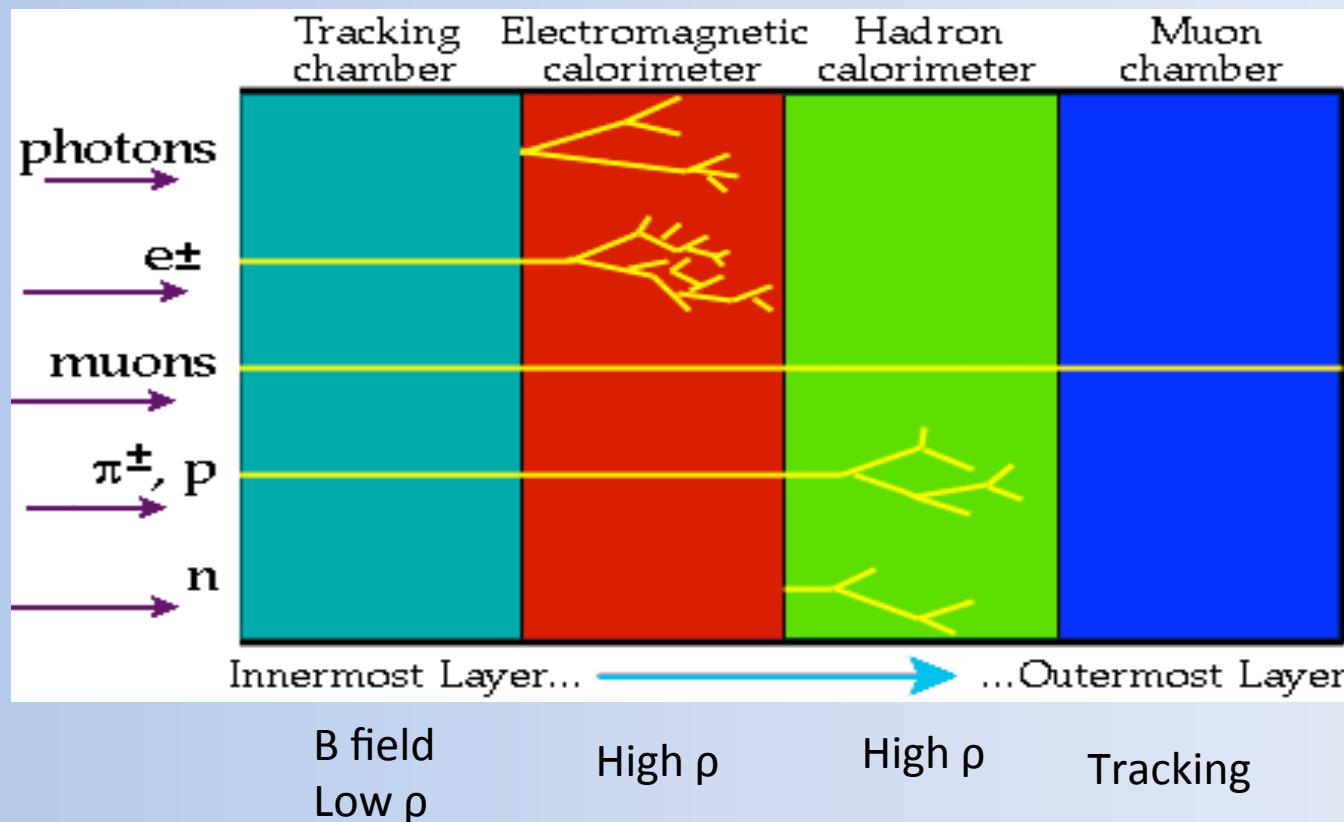
Для электронов и фотонов

Электро-магнитные ливни

Для адронов

Адронные ливни

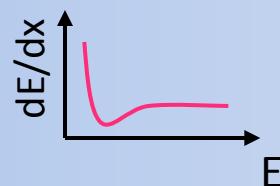
Идентификация частиц



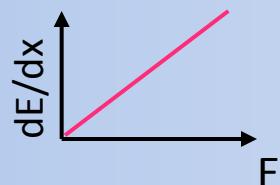
- Electrons ionize and bremsstrahlung due to their small mass
- Photons do no ionize but undergo pair production in high Z material
- Charge hadrons ionize and produce hadron shower in dense material
- Neutral hadron do not ionize but produce hadron shower in dense material

e^+ / e^-

- Ионизация

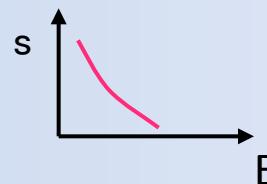


- Тормозное излучение

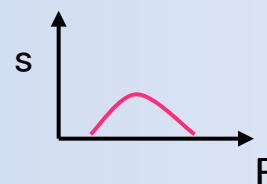


g

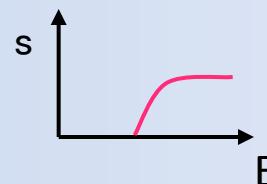
- Фото-эффект



- Эффект Комptonа

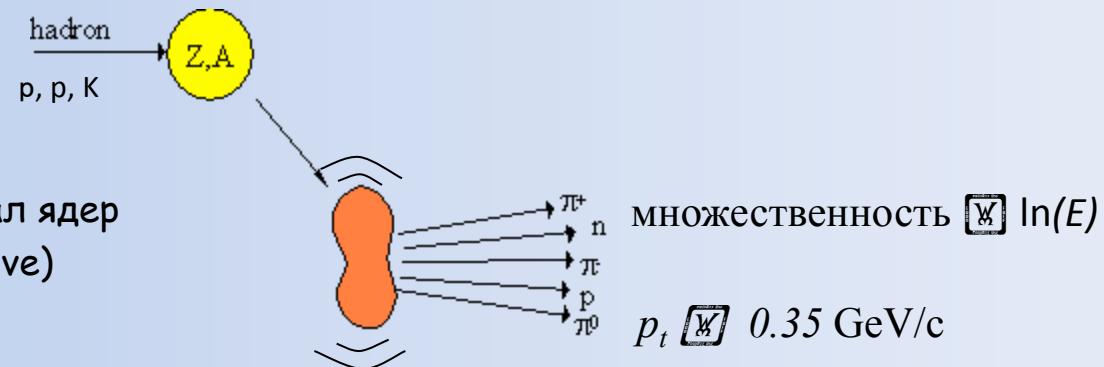


- Рождение пар



Ядерные взаимодействия

Взаимодействие адронов высоких энергий с веществом происходит в основном посредством неупругих ядерных процессов.



Начиная с энергий ($>1 \text{ GeV}$) сечение слабо зависит от энергии и от типа налетающей частицы ($p, p, n, K\dots$).

$$\sigma_{inel} \approx \sigma_0 A^{0.7} \quad \sigma_0 \approx 35 \text{ mb}$$

По аналогии с X_0 вводится адронная длина поглощения

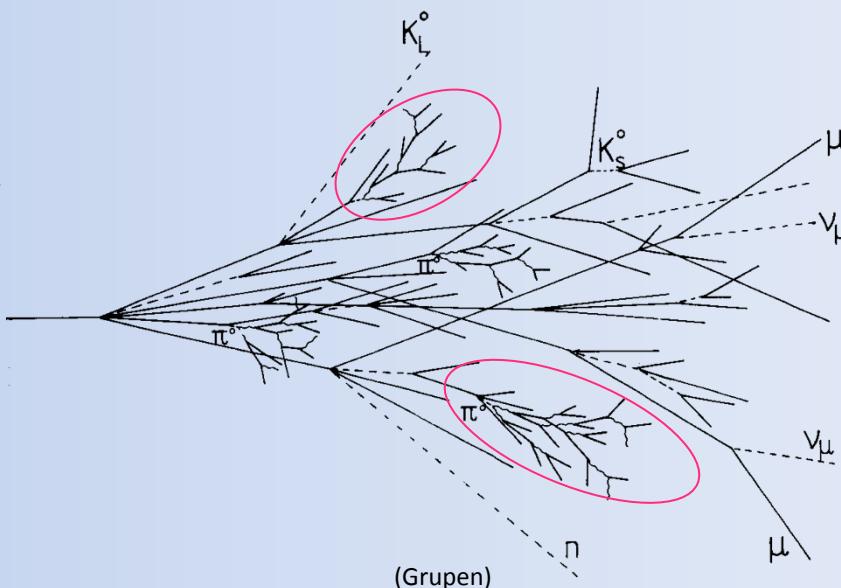
$$\lambda_a = \frac{A}{N_A \sigma_{inel}} \propto A^{\frac{1}{4}} \quad \text{because} \quad \sigma_{inel} \approx \sigma_0 A^{0.7}$$

и ядерная длина взаимодействия

$$\lambda_I = \frac{A}{N_A \sigma_{total}} \propto A^{\frac{1}{3}} \quad \lambda_I < \lambda_a$$

Вовлечены разнообразные процессы.

Намного более сложная картина по сравнению с электромагнитными каскадами.



Адронный ливень включает 2 компоненты:

адронную

+

электромагнитную



Заряженные адроны p, p^{\pm}, K^{\pm} ,

Ядерные фрагменты

От развала ядер (энергия связи)

нейтроны, нейтрино, мягкие г, мюоны

Нейтральные пионы π^0

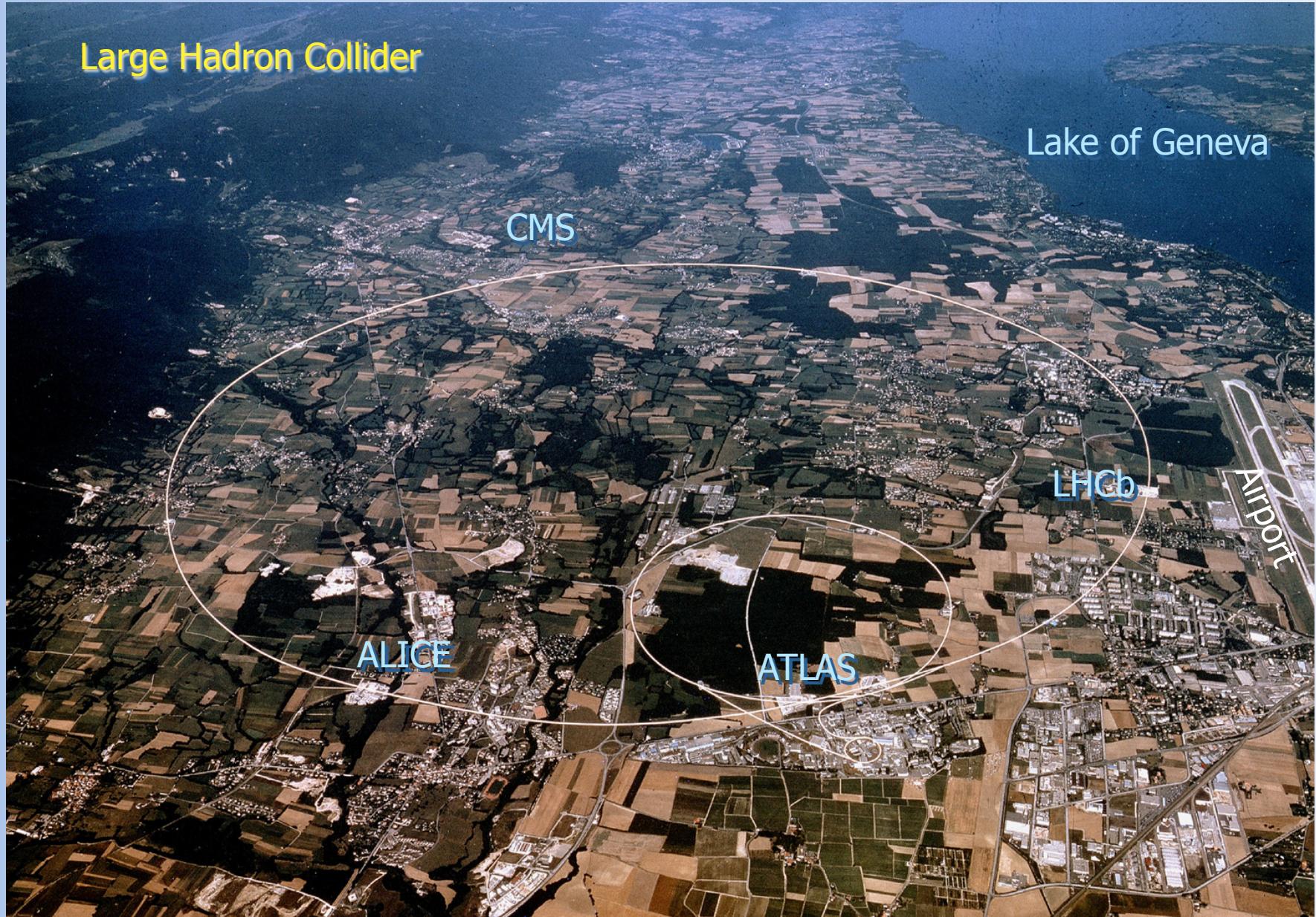
$2g$ электромагнитные каскады

$$n(\pi^0) \approx \ln E(\text{GeV}) - 4.6$$

Пример $E = 100 \text{ GeV}$: $n(\pi^0) \approx 18$

невидимая энергия Δ большие флуктуации Δ энергетическое разрешение

Детекторы на LHC



Основные принципы выбора конструкции Детектора:

Концепция Детектора зависит от того, что изучать

- * Должны быть сигнатуры из теории (Higgs, Sparticles, etc ...)
- * Как измерять (различная экспериментальная техника)

Сильное магнитное поле

Герметичность, но легкий доступ после **открытия**
детектора

Модульность

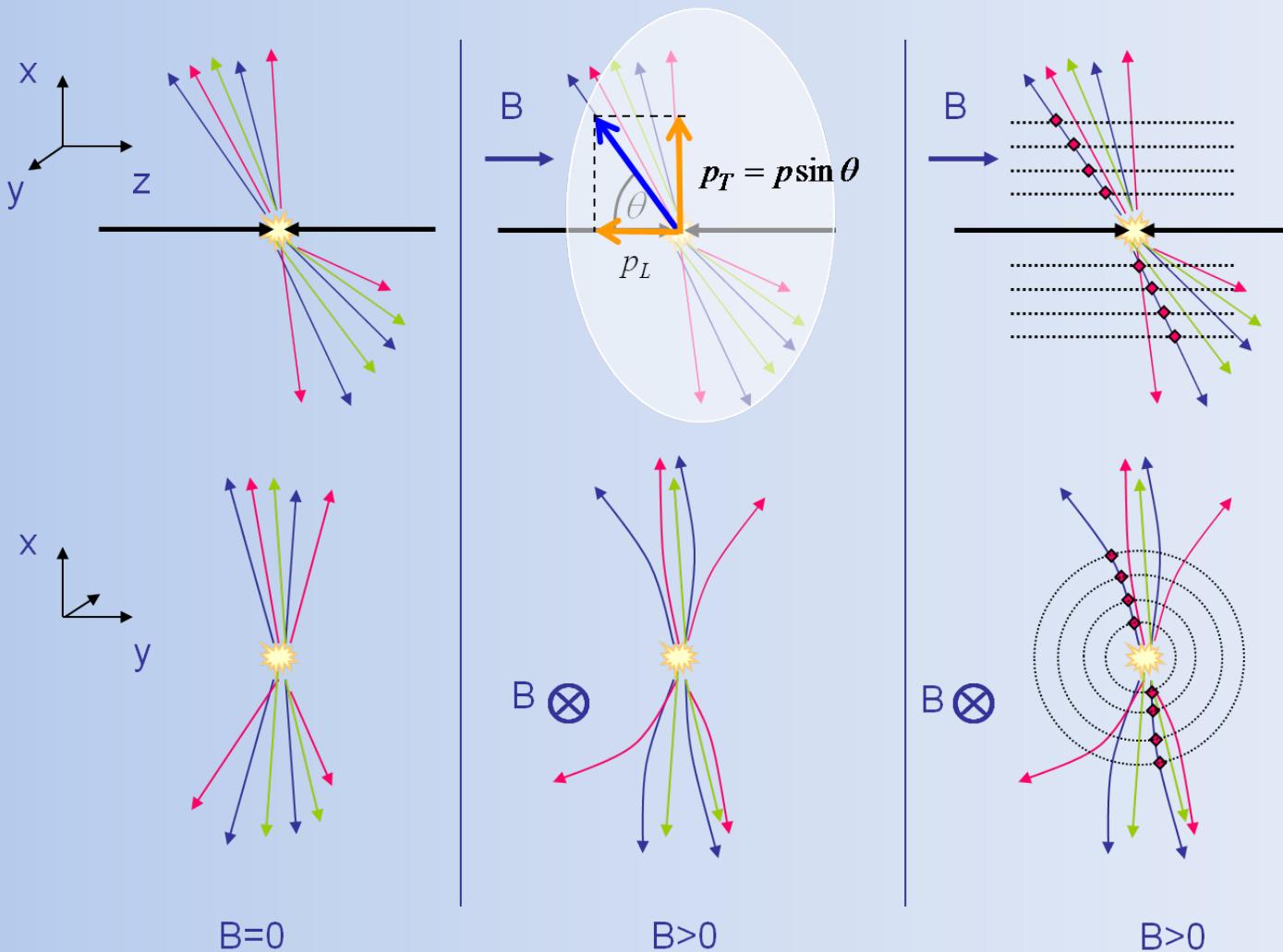
Надо помнить

Стоимость установки увеличивается пропорционально **~объему**

Как можно меньше материала перед каллориметрами

Как можно больше материала перед **мюонным спектрометром**

Заряженная частица в магнитном поле



3-3

Характерные требования

Детектор должен отработать 10 лет или больше

Радиационное разрушение материалов и электроники

Воздействие на всю экспериментальную зону (neutrons): NEW!

Должен быть максимально быстродействующим

25 ns - время между столкновениями бичей: NEW!

Должен иметь хорошую гранулярность

Необходимо минимизировать эффект наложения: NEW!

Должен идентифицировать очень редкие события

Идентификация лептонов по отношению к огромному
КХД фону, так как e/jet отношение на LHC $\sim 10^{-5}$,
т.е. ~ 100 хуже, чем на Tevatron

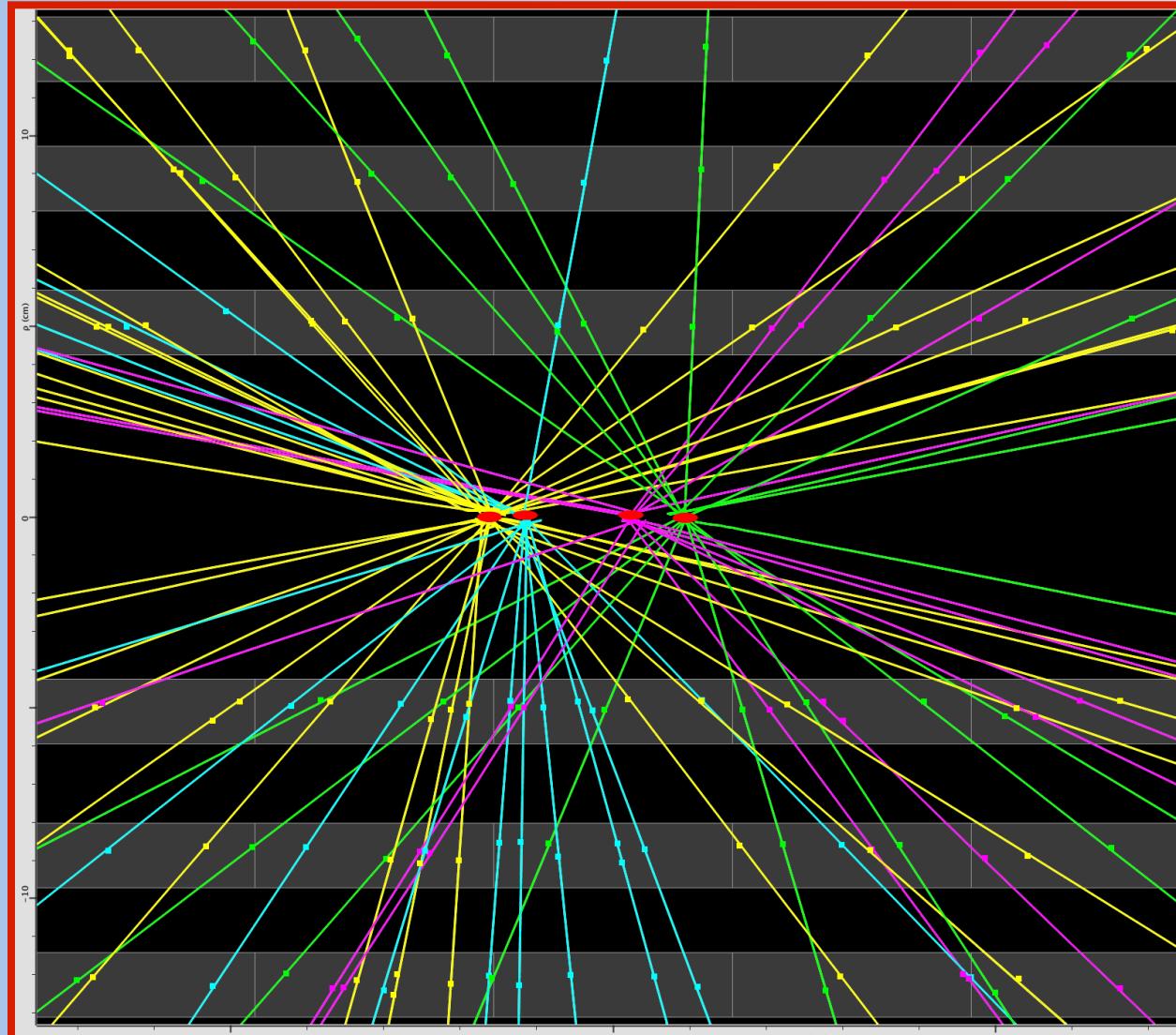
Сечение СИГНАЛА $\sim 10^{-14}$ от полного сечения: NEW!

On-line режекция должна быть $\sim 10^7$: NEW!

Хранение данных $\sim 10^9$ событий 1 Mb-ного размера в год: NEW!

Preparing for the future : pile-up reconstruction

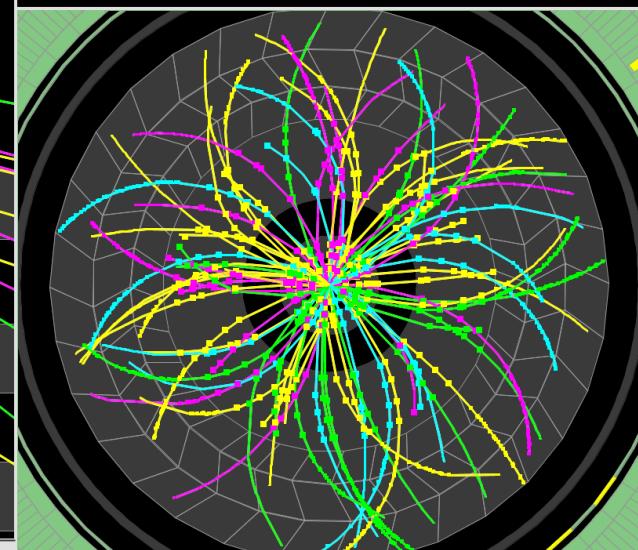
4 pp interactions in the same bunch-crossing



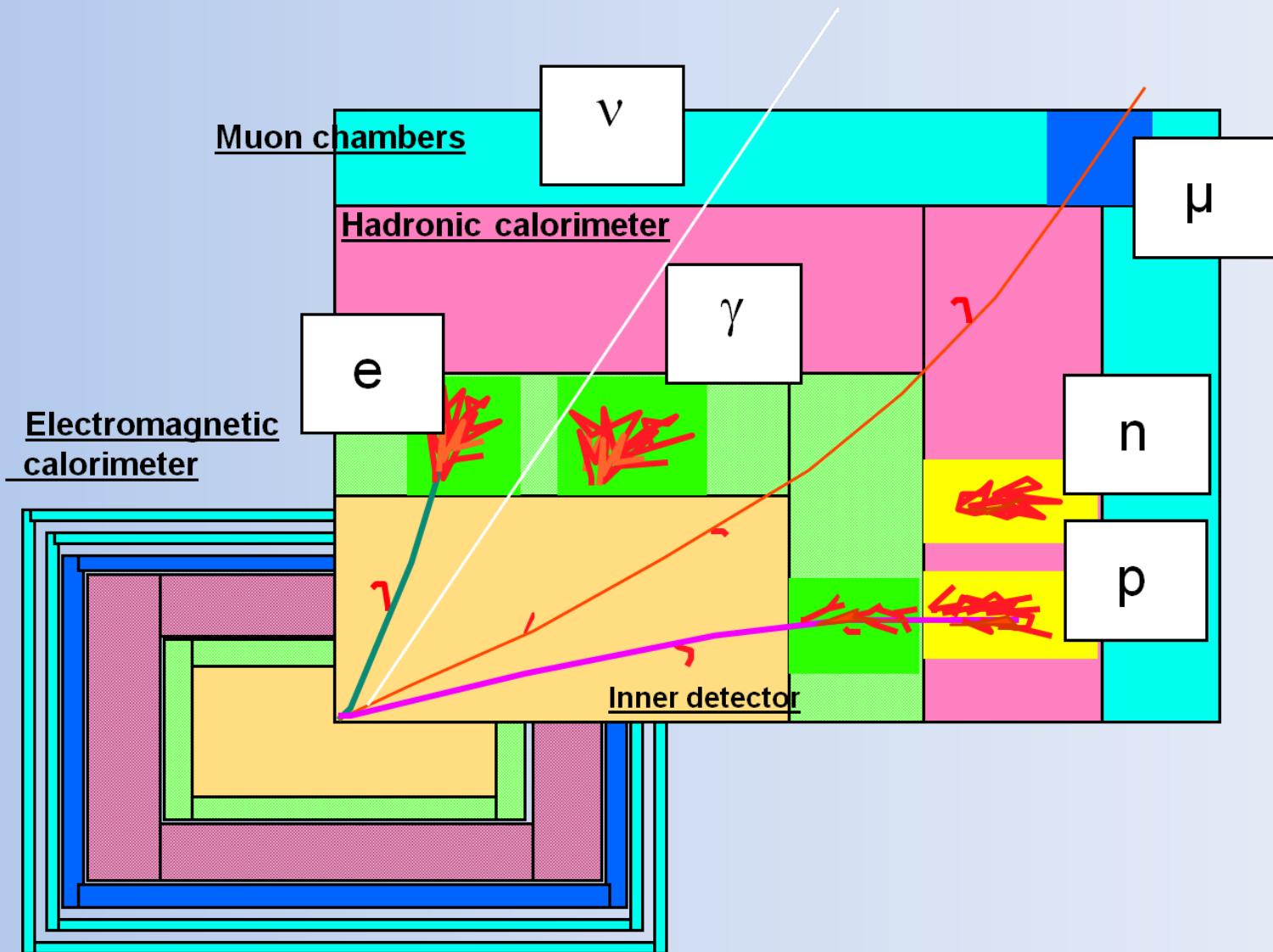
Run Number: 153565, Event Number: 4487360

Date: 2010-04-24 04:18:53 CEST

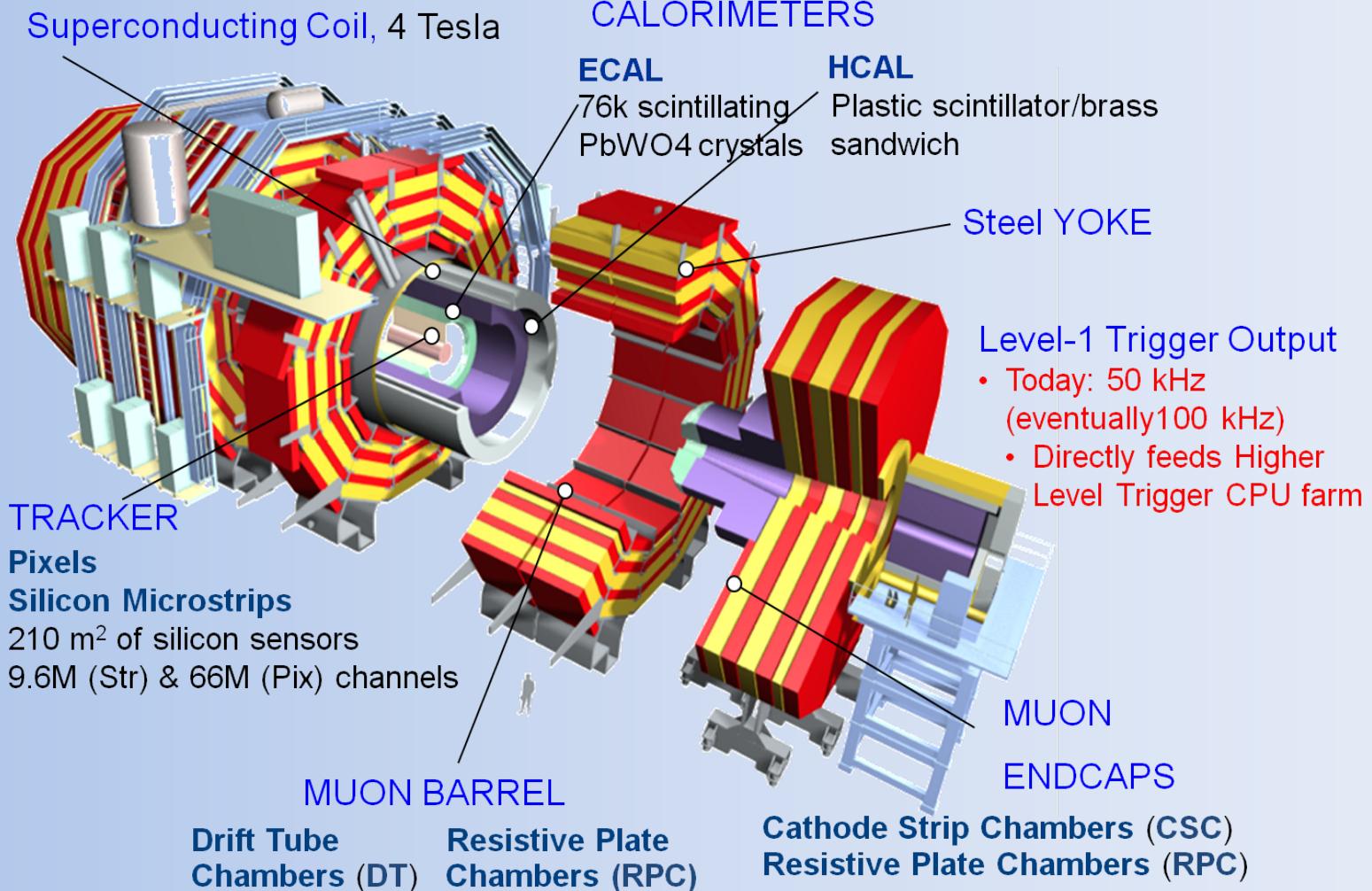
Event with 4 Pileup Vertices
in 7 TeV Collisions



Детекторы на LHC



CMS Detector

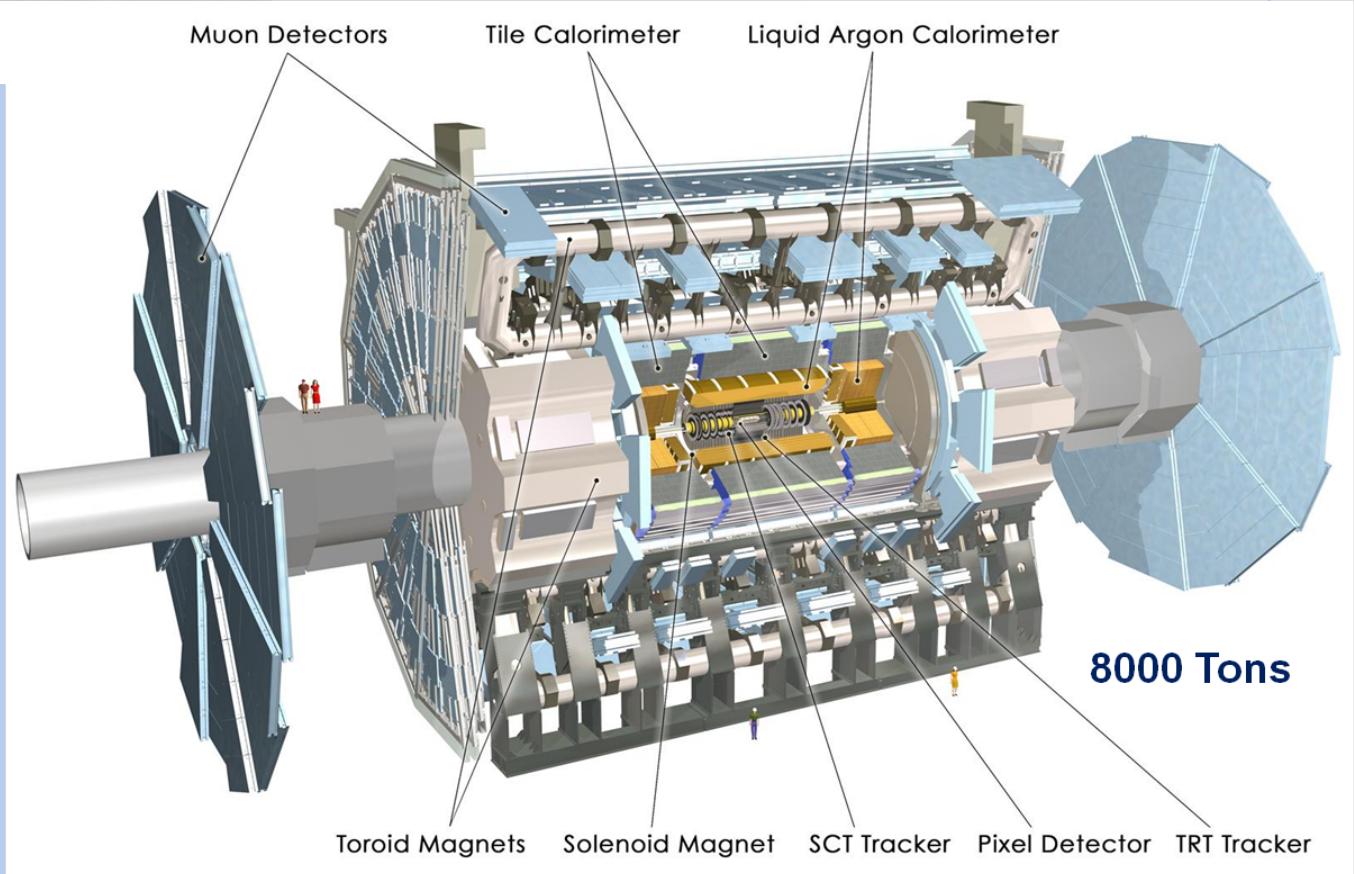




ATLAS Detector

ATLAS superimposed to
the 5 floors of building 40

25 m





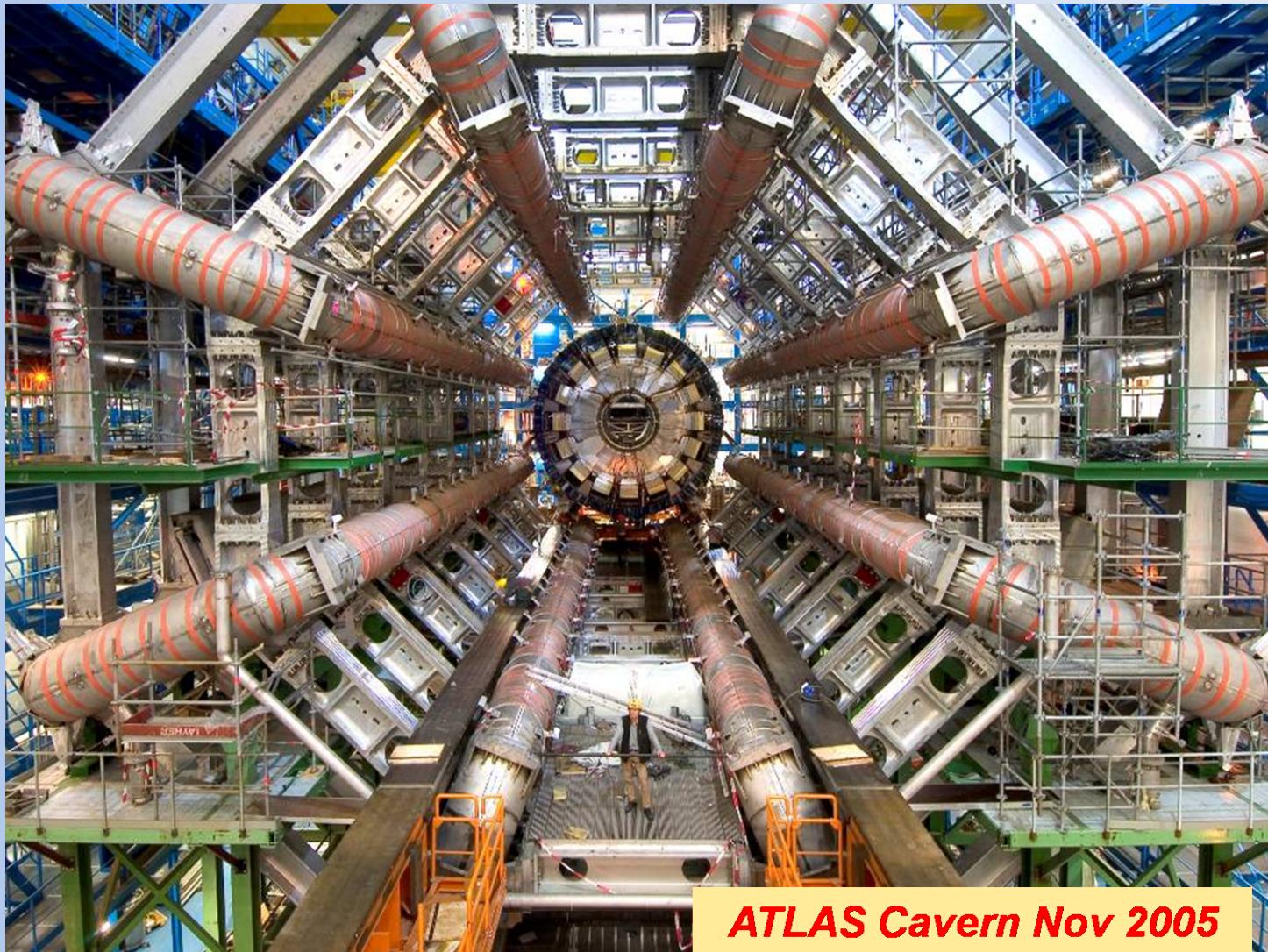
ATLAS Collaboration



July 2010

38 стран, 180 университетов, институтов и научных центров, 3000 специалистов, включая 1000 аспирантов

Детектор ATLAS

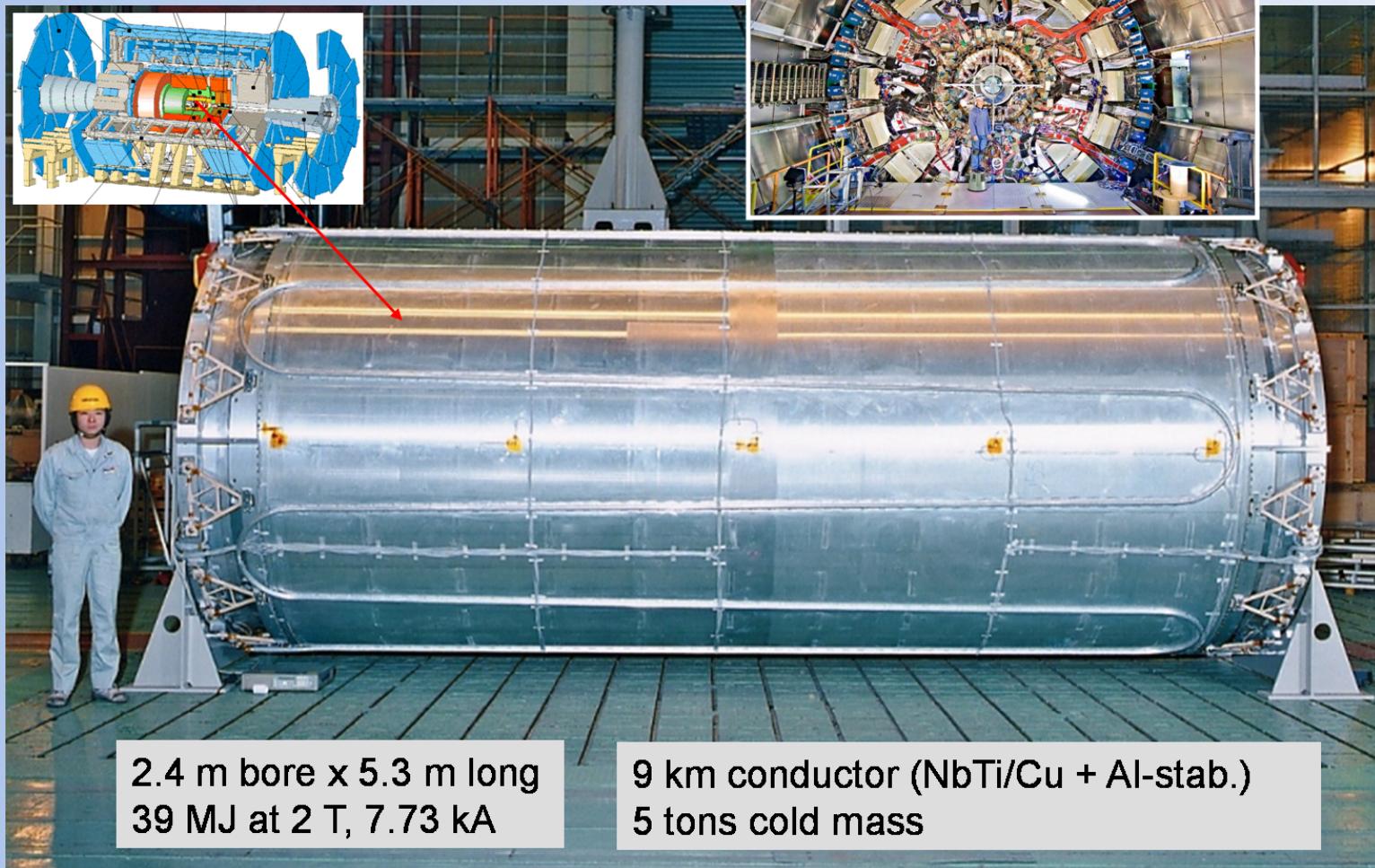


ATLAS Cavern Nov 2005

Barrel Toroid components for integration



Central Solenoid

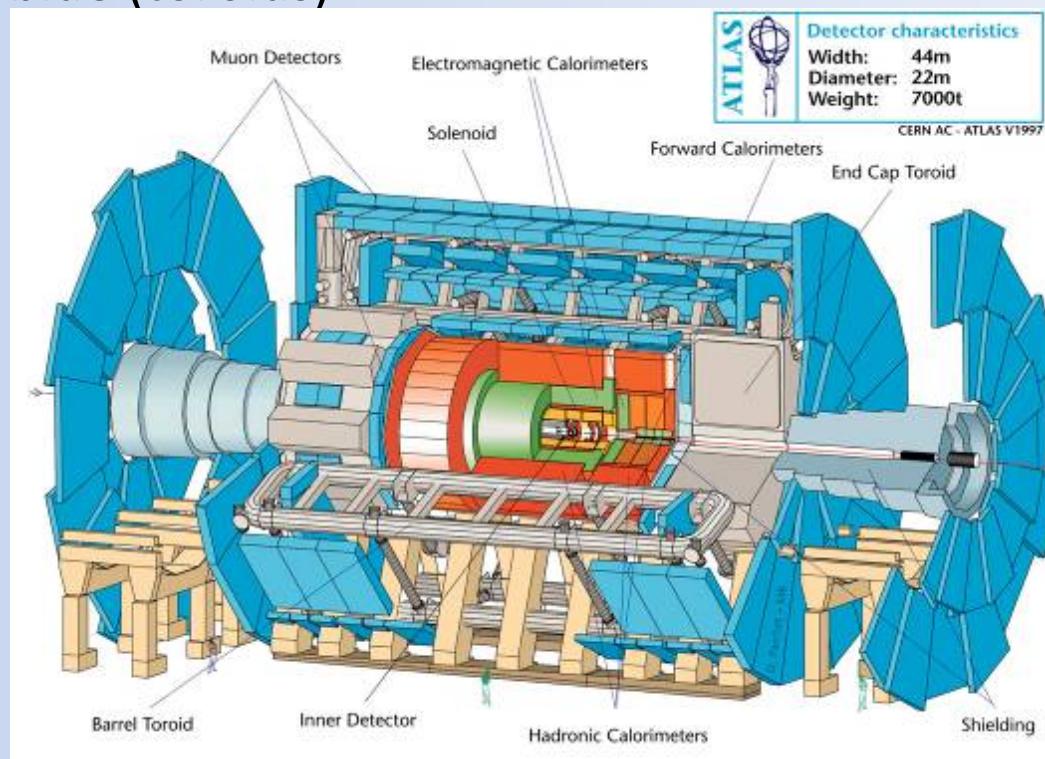


2.4 m bore x 5.3 m long
39 MJ at 2 T, 7.73 kA

9 km conductor (NbTi/Cu + Al-stab.)
5 tons cold mass

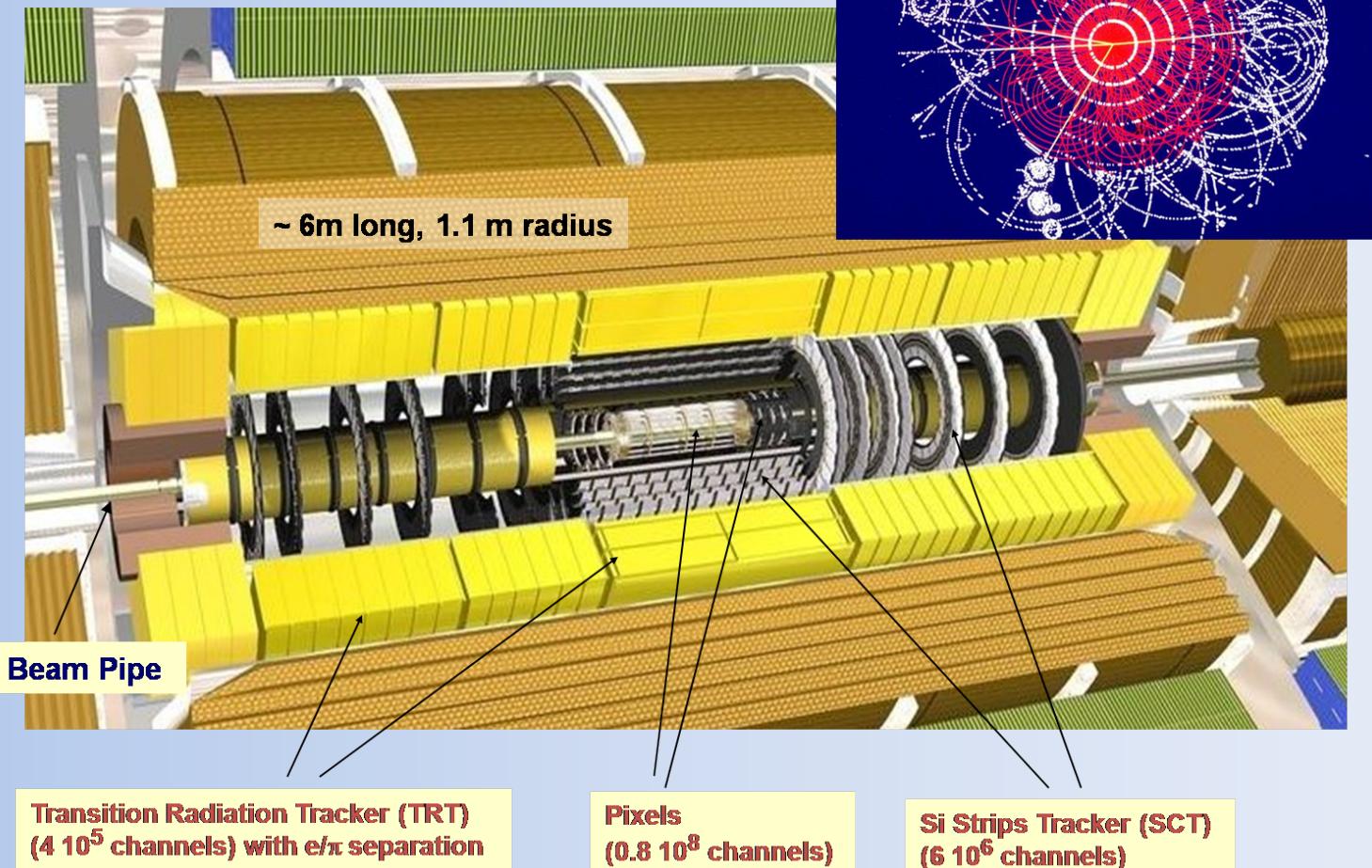
ATLAS superconducting magnets

- 1 Barrel Toroid, 2 End Cap Toroids and 1 Central Solenoid
- 4 magnets provide 2 T magnetic field for the inner detector (solenoid) and ~1 T for the muon detectors in blue (toroids)
- 20 m diameter x 25 m long
- 1000 m³ volume with field
- 90 km superconductor
- 170 t superconductor
- 700 t cold mass
- 20.5 kA at 4.1 T
- 1.6 GJ stored energy
- 4.7 K conduction cooled
- 10 yrs of construction 97-07



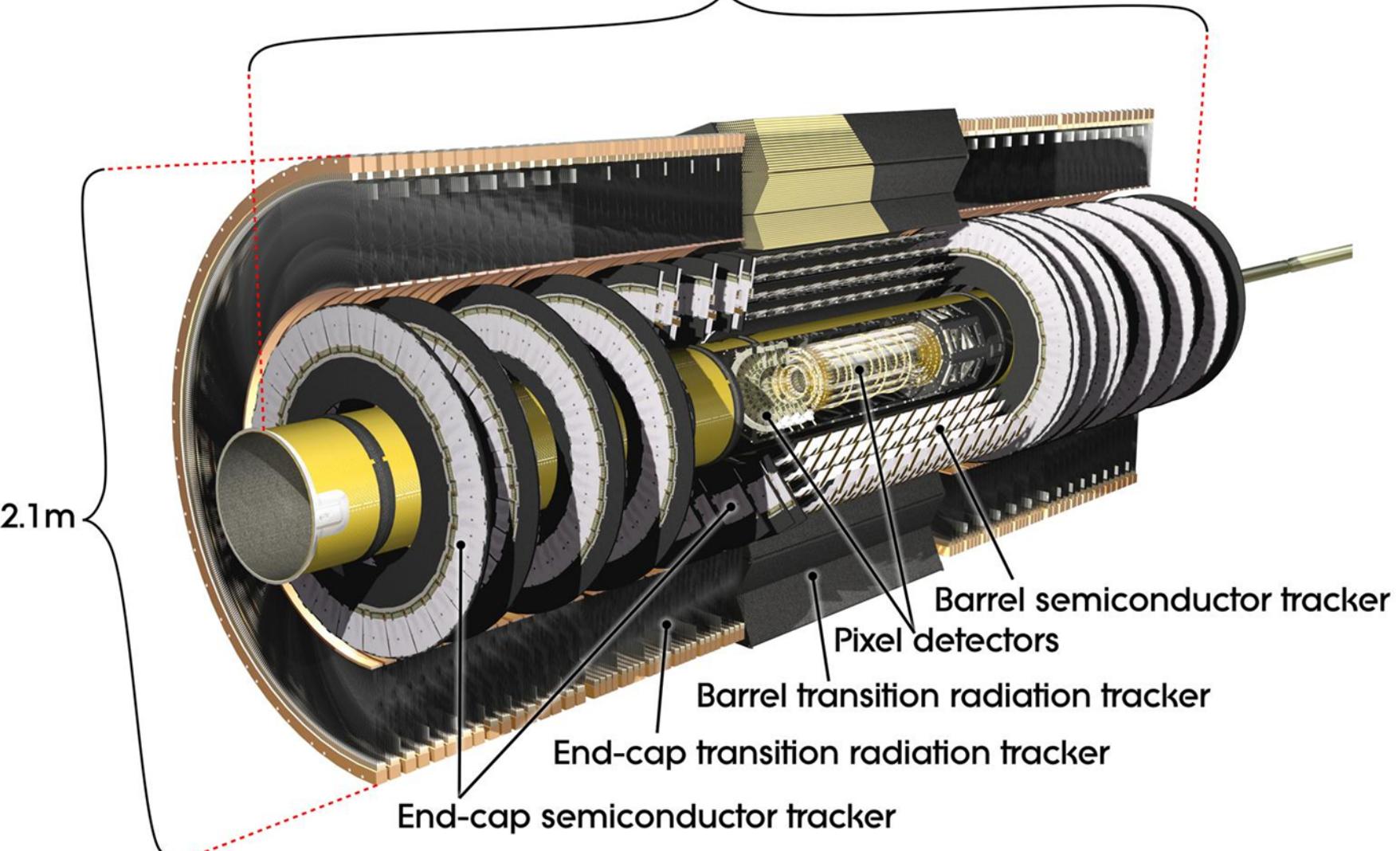
ATLAS Tracking Detectors

2 Tesla solenoid $\sigma/p_T \sim 5 \times 10^{-4} p_T \oplus 0.01$



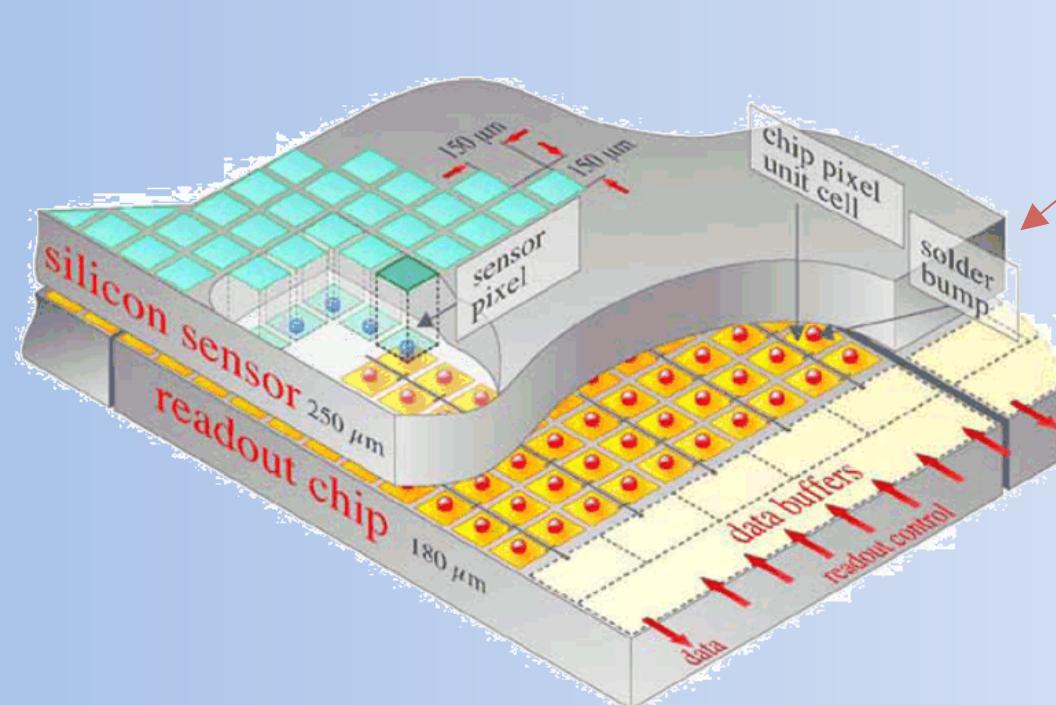
ATLAS Inner Tracking Detector (ID)

6.2m

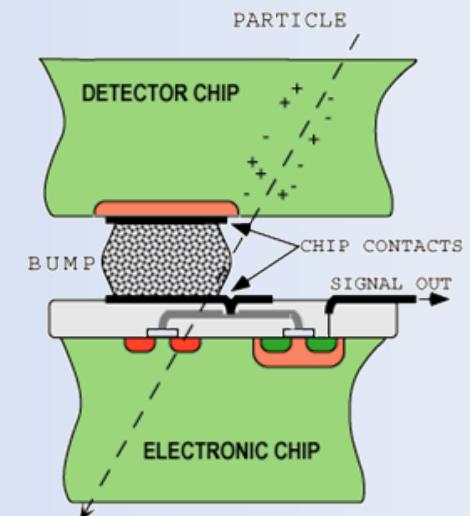
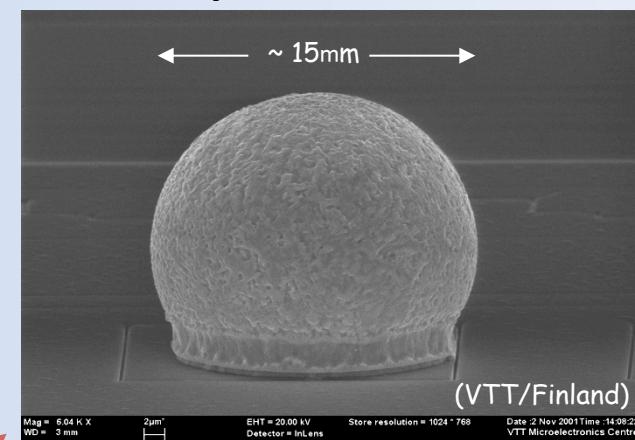


HAPS – Гибридный активный пиксельный сенсор

- ☒ Сегмент Si с высокой гранулярностью
(☒ true 2D, нет проблем с x-y неопределенностью)
- ☒ Считывающая электроника с той же геометрией
(каждая ячейка - к своему каналу)
- ☒ соединение посредством "bump bonding"
- ☒ Широко используются в LHC экспериментах:
ATLAS, ALICE, CMS and LHCb



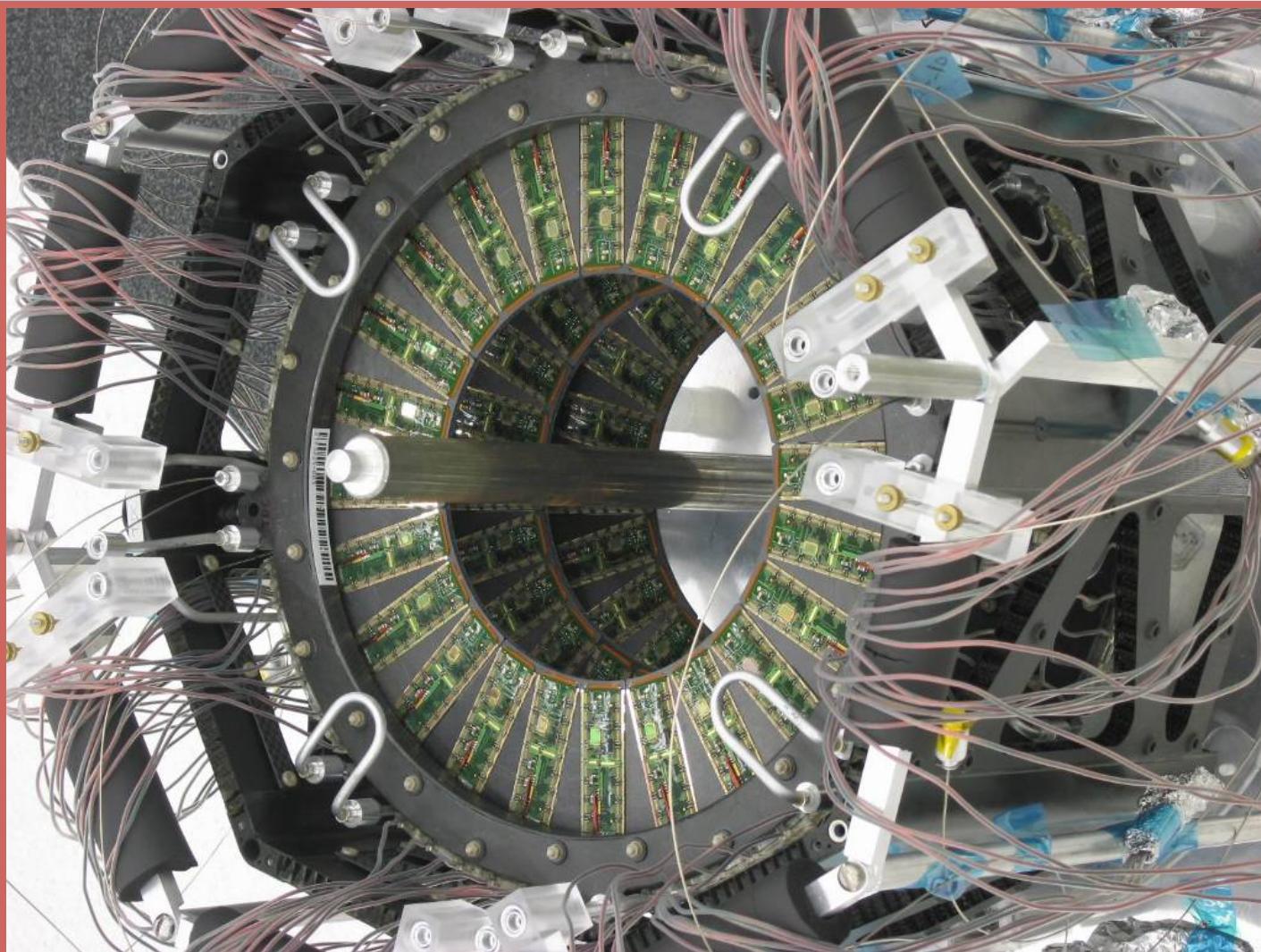
Solder Bump: Pb-Sn



Flip-chip technique

Твердотельные детекторы

ATLAS Три пиксельных
диска готовы



■ Детекторные модули - “Основные элементы трековых детекторов”

☒ Si сенсоры

☒ Механические держатели (**охлаждение**)

☒ Front-end электроника и передача сигналов

SCT = SemiConductor Tracker

ASICS = Application Specific

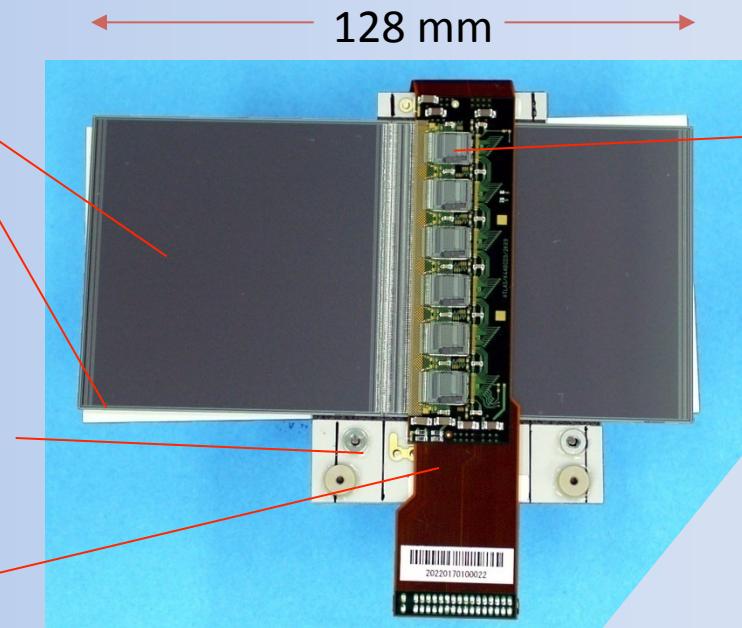
Integrated CircuitS

TPG = Thermal Pyrolytic Graphite

■ Пример: ATLAS SCT Barrel Module

☒ Silicon sensors (x4)

- 64 x 64 mm²
- p-in-n, single sided
- AC-coupled
- 768 strips
- 80 μm pitch/12mm width



☒ Mechanical support

- TPG baseboard
- BeO facings

☒ Hybrid (x1)

- flexible 4 layer copper/kapton hybrid
- mounted directly over two of the four silicon sensors
- carrying front end electronics, pitch adapter, signal routing, connector

s(rf) ~ 16 mm, s(z) ~ 850mm [NIMA538 (2005) 384]

☒ ASICS (x12)

- ABCD chip (binary readout)
- DMILL technology
- 128 channels

☒ Wire bonds (~3500)

- 25 mm Al wires

■ ATLAS – SCT

- 15.552 microstrip sensors
- 2.112 barrel modules
- 1.976 forward modules
- 61 m² silicon,
- $6.3 \cdot 10^6$ strips

Калориметры

Калориметрия = измерение Энергии путем полного поглощения,

Обычно объединяется с пространственной реконструкцией. Деструктивный метод!

Частицы исчезают.

Два типа калориметров

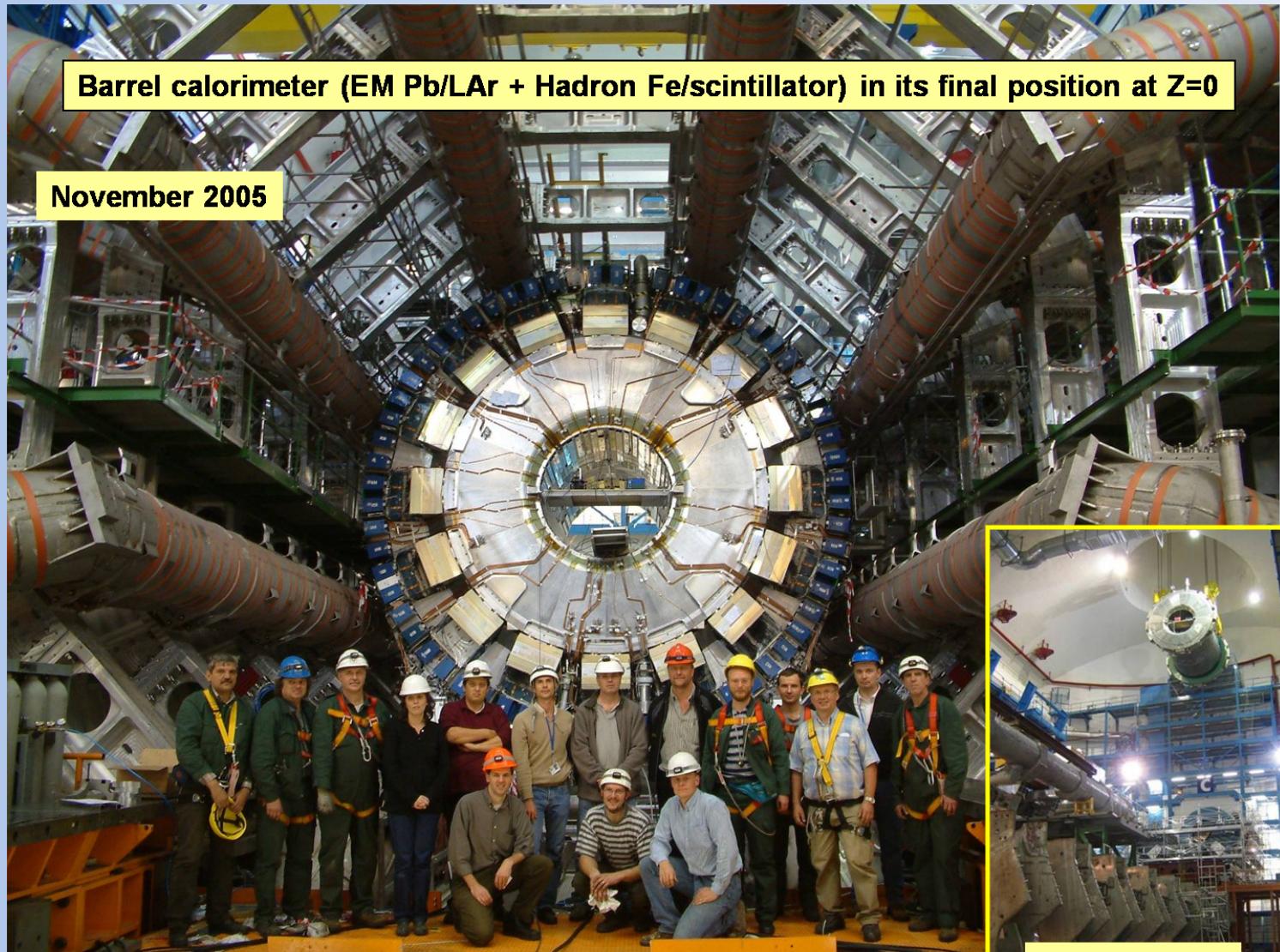
- > электроны и фотоны (**Электромагнитный калориметр**)
- > протоны, нейтроны и пионы (**Адронный калориметр**)

Два способа измерений :

Гомогенные калориметры: Детектор = абсорбер (сцинтилляционные кристаллы)
Используются только для электромагнитных калориметров

Сэмплинг калориметры = чередующиеся Абсорбер + детектор
(газовые, жидкостные, твердотельные)

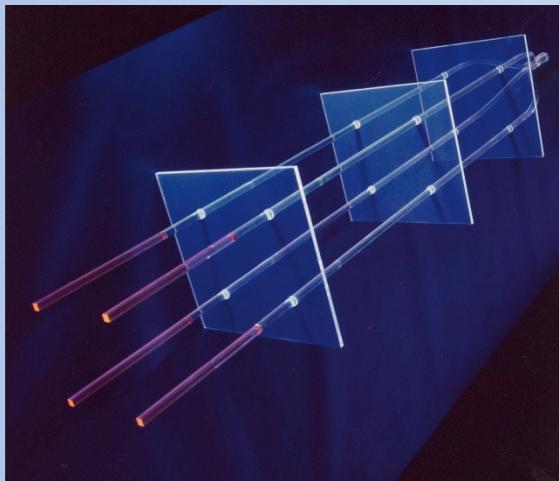
Много разных типов конкретной реализации в разных экспериментах



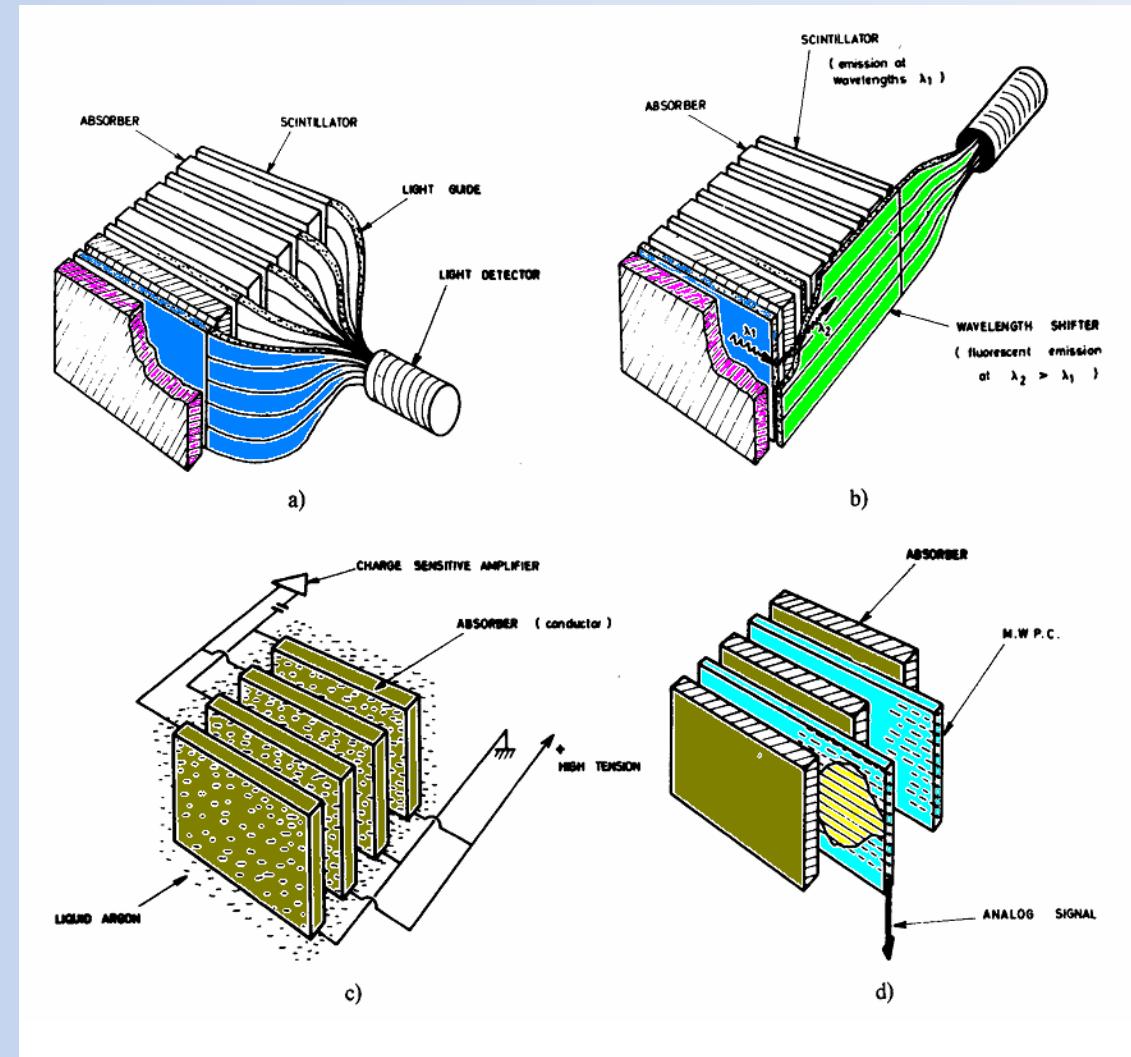
Калориметры

Сэмплинговые – как электромагнитные, так и адронные калориметры

- MWPC, стримерные трубы,
- жидкости (TMP = tetra-methylpentane, TMS = tetra-methylsilane)
- жидкие инертные газы : LAr (LXe, LKr)
- сцинтилляторы, файберы,
- кремниевые детекторы



Светосбор типа 'Шашлык'

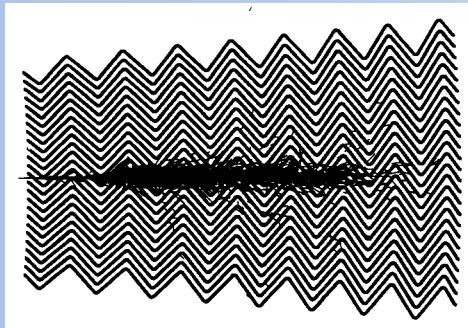


Калориметры

Пример ECAL (сэмплинг)

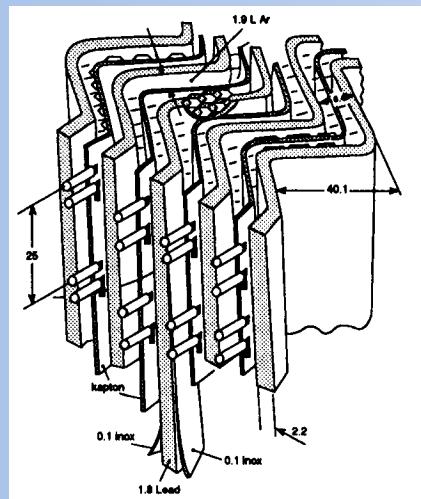
ATLAS электромагнитный калориметр

Абсорбер с «аккордеонной» геометрией в Liquid Argon



LAr (90K)

- + свинцово-железный (1-2 mm)
 - + многослойная медно-полиамидная плата
 - = ионизационная камера.
- 1 GeV E-выделение $\rightarrow 5 \times 10^6 e^-$



Минимум мертвых зон.
LAr радиационно стойкий.
Плата считывания позволяет
тонкую сегментацию.

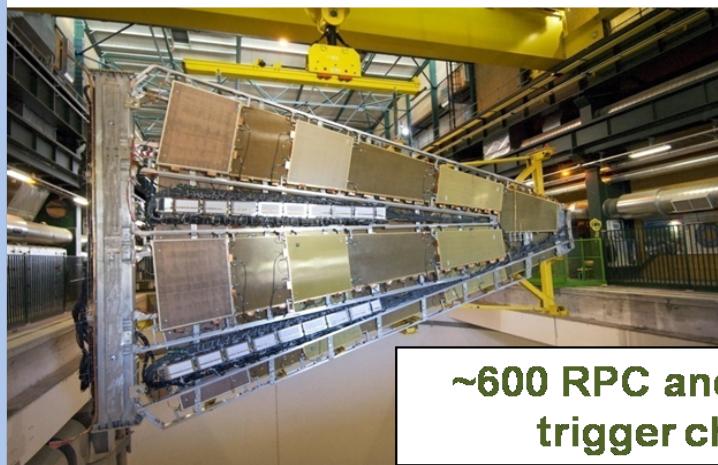
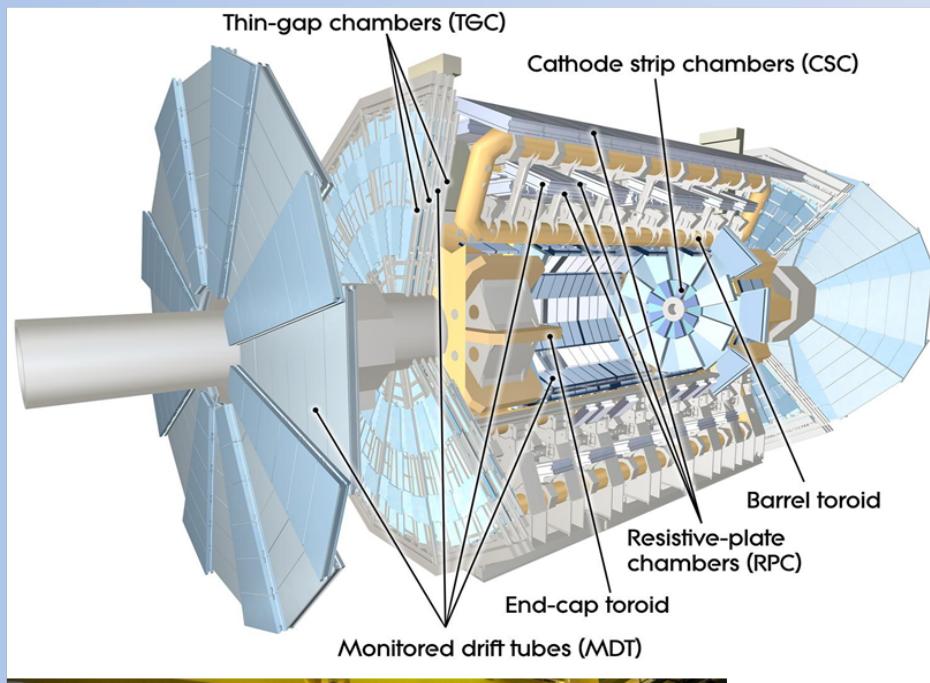


Разрешение

$$\sigma(E)/E = 9.24\%/\sqrt{E} \oplus 0.23\%$$

Пространственное разрешение
5 mm / \sqrt{E}

Muon System

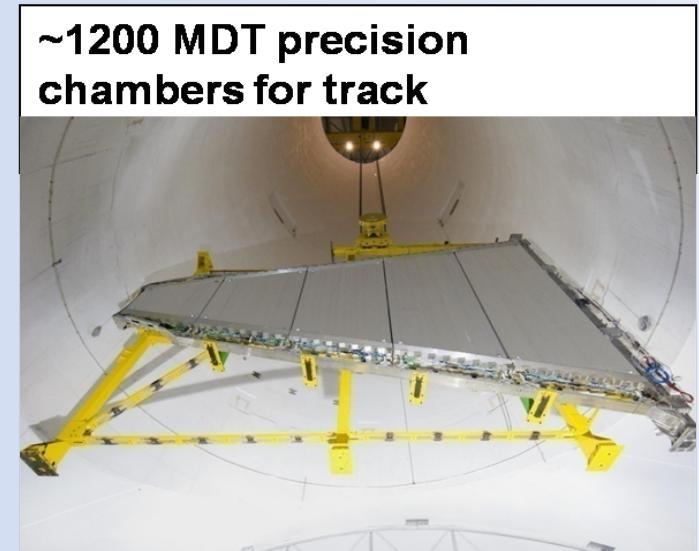


~600 RPC and ~3600 TGC
trigger chambers

Stand-alone momentum resolution
 $\Delta pT/pT < 10\%$ up to 1 TeV

2-6 Tm $|\eta| < 1.3$ 4-8 Tm $1.6 < |\eta| < 2.7$

~1200 MDT precision
chambers for track

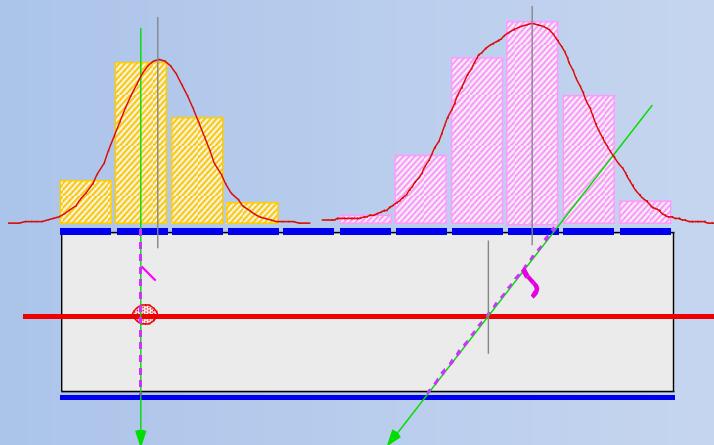


Газовые детекторы

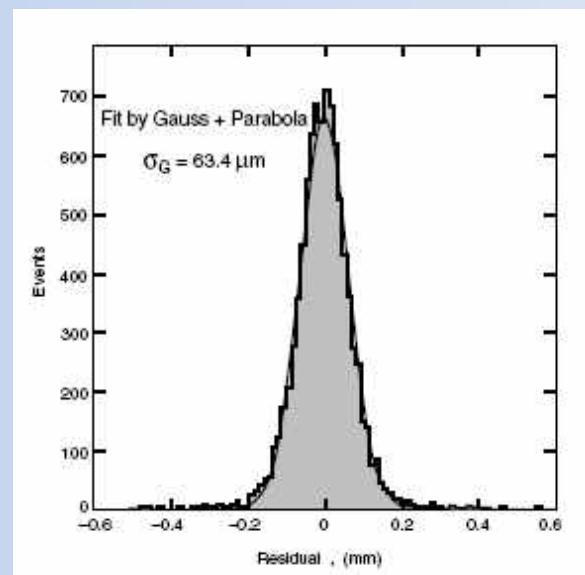
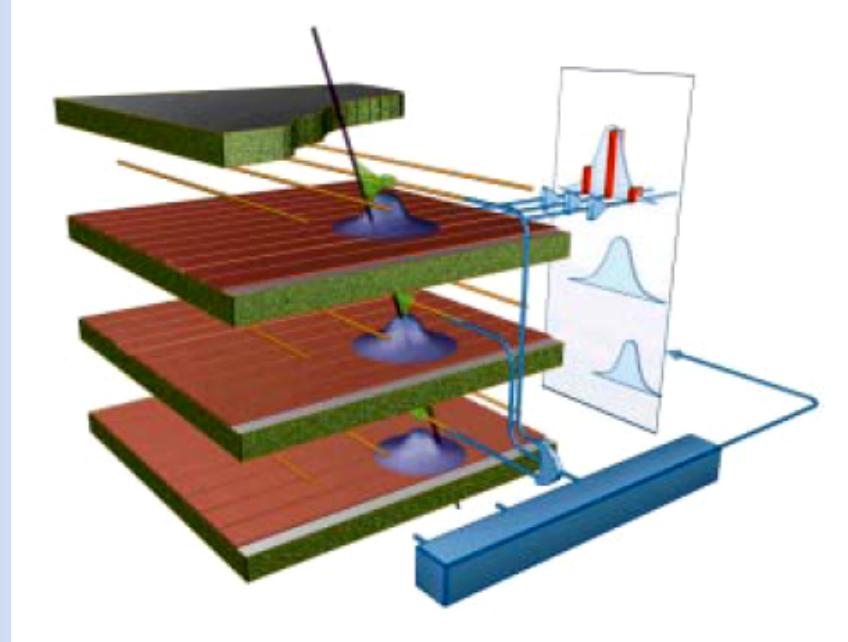
Считывание с катодных стрипов или падов.

Определение второй координаты с помощью интерполяции индуцированного сигнала на стрипы или пады.

Маленький зазор → быстрый детектор.



Метод взвешивания
наведенного сигнала.

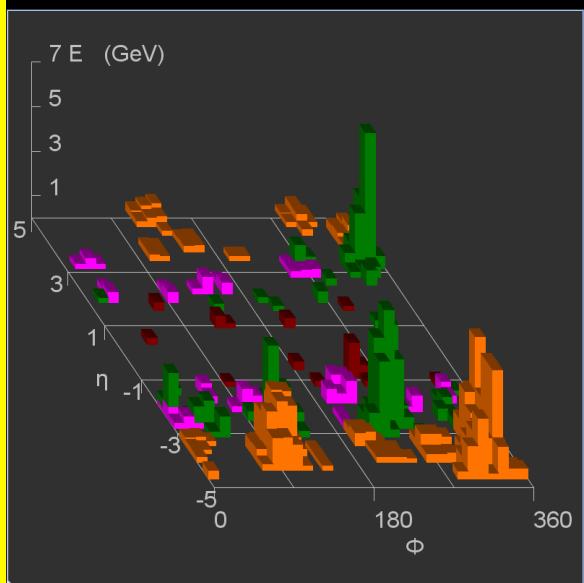
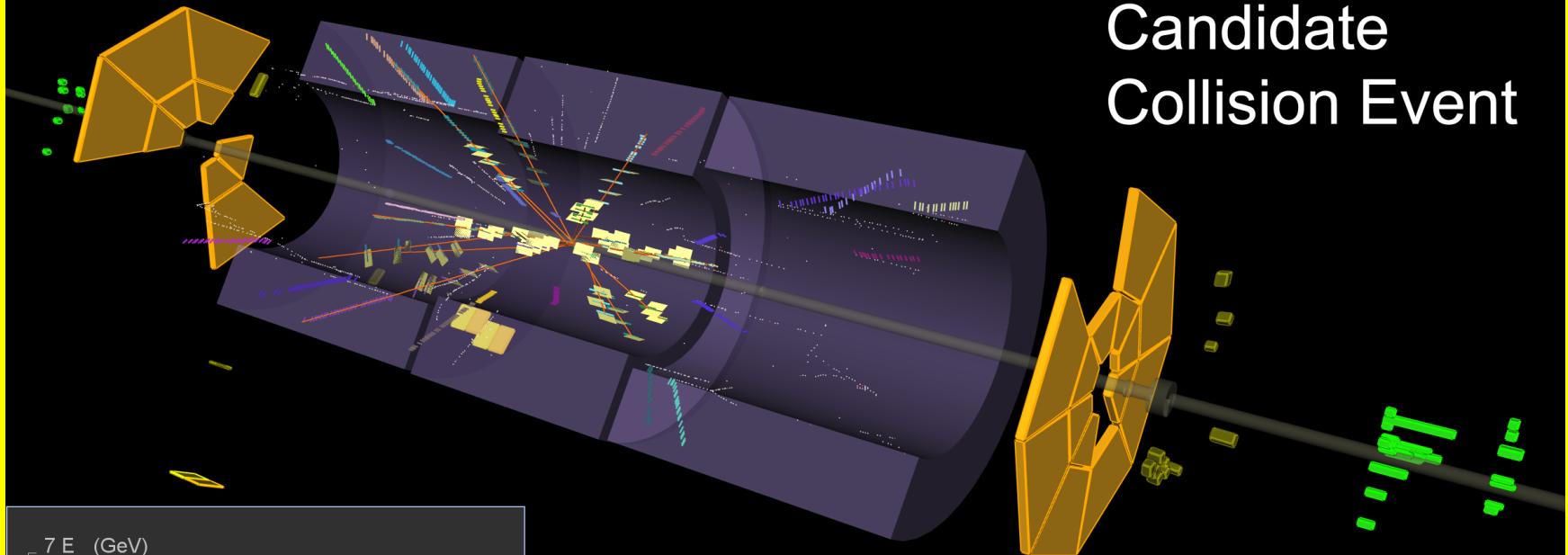


Разрешение



First collisions at the LHC end of November 2009

Candidate
Collision Event

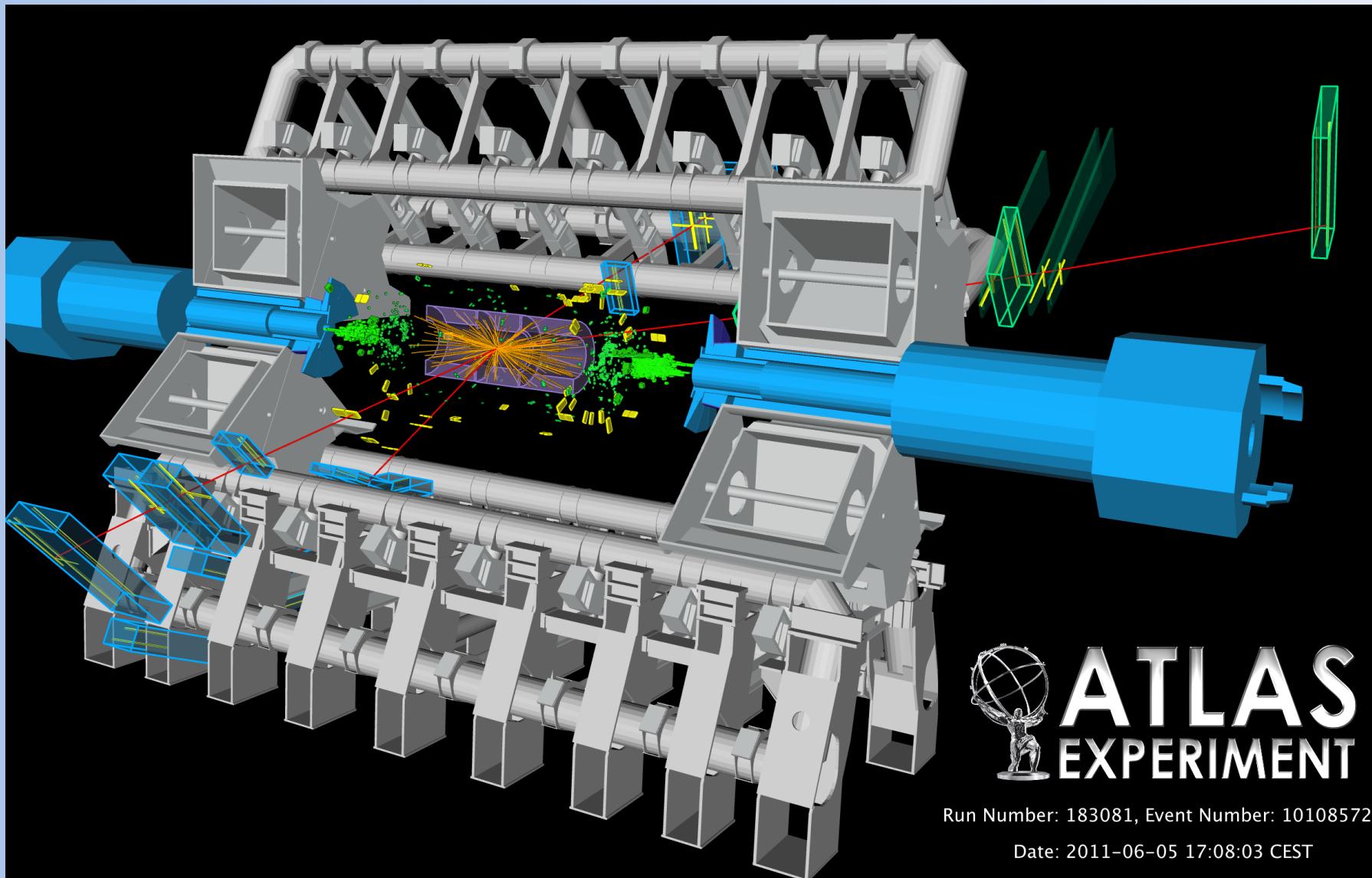


ATLAS
EXPERIMENT

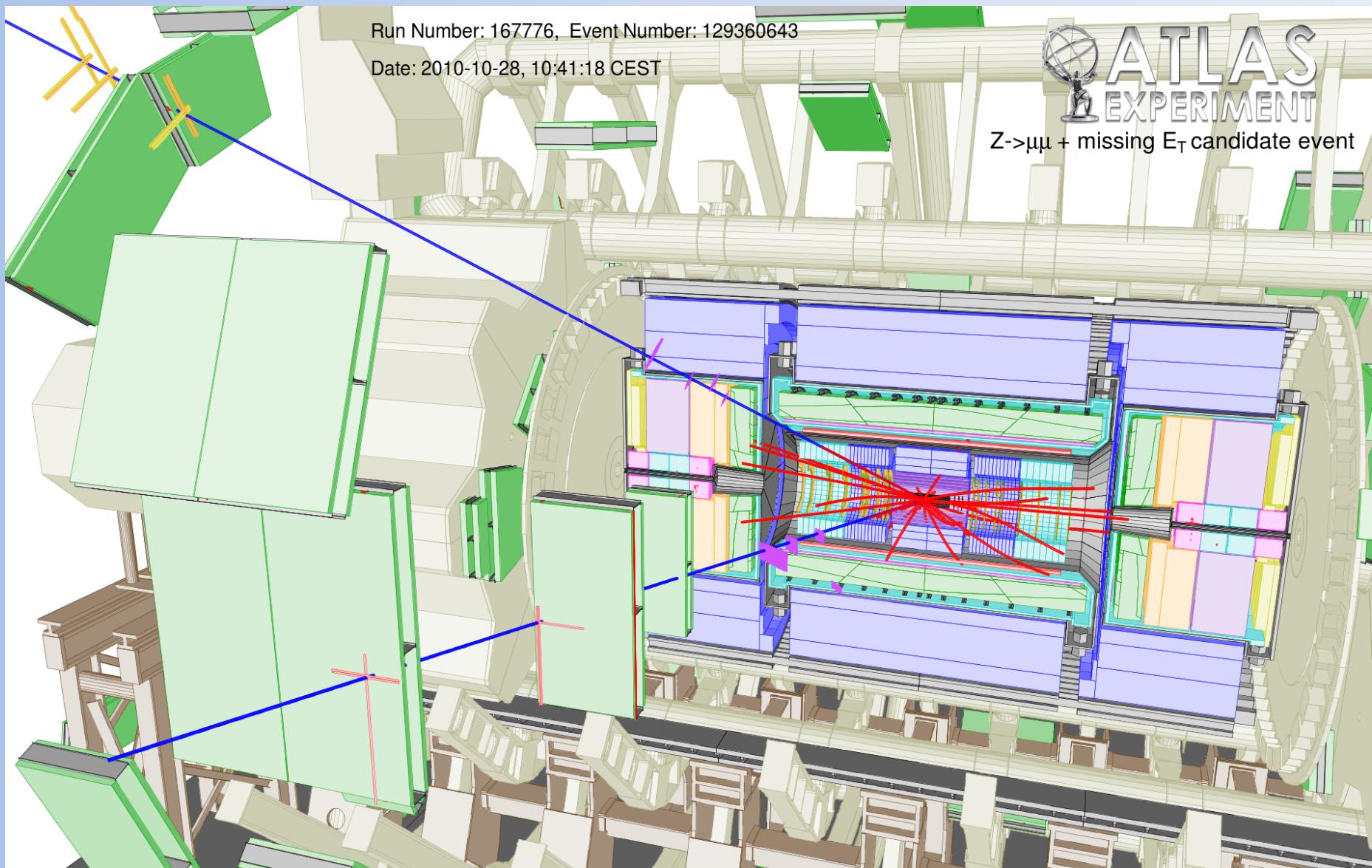
2009-11-23, 14:22 CET
Run 140541, Event 171897

<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html>

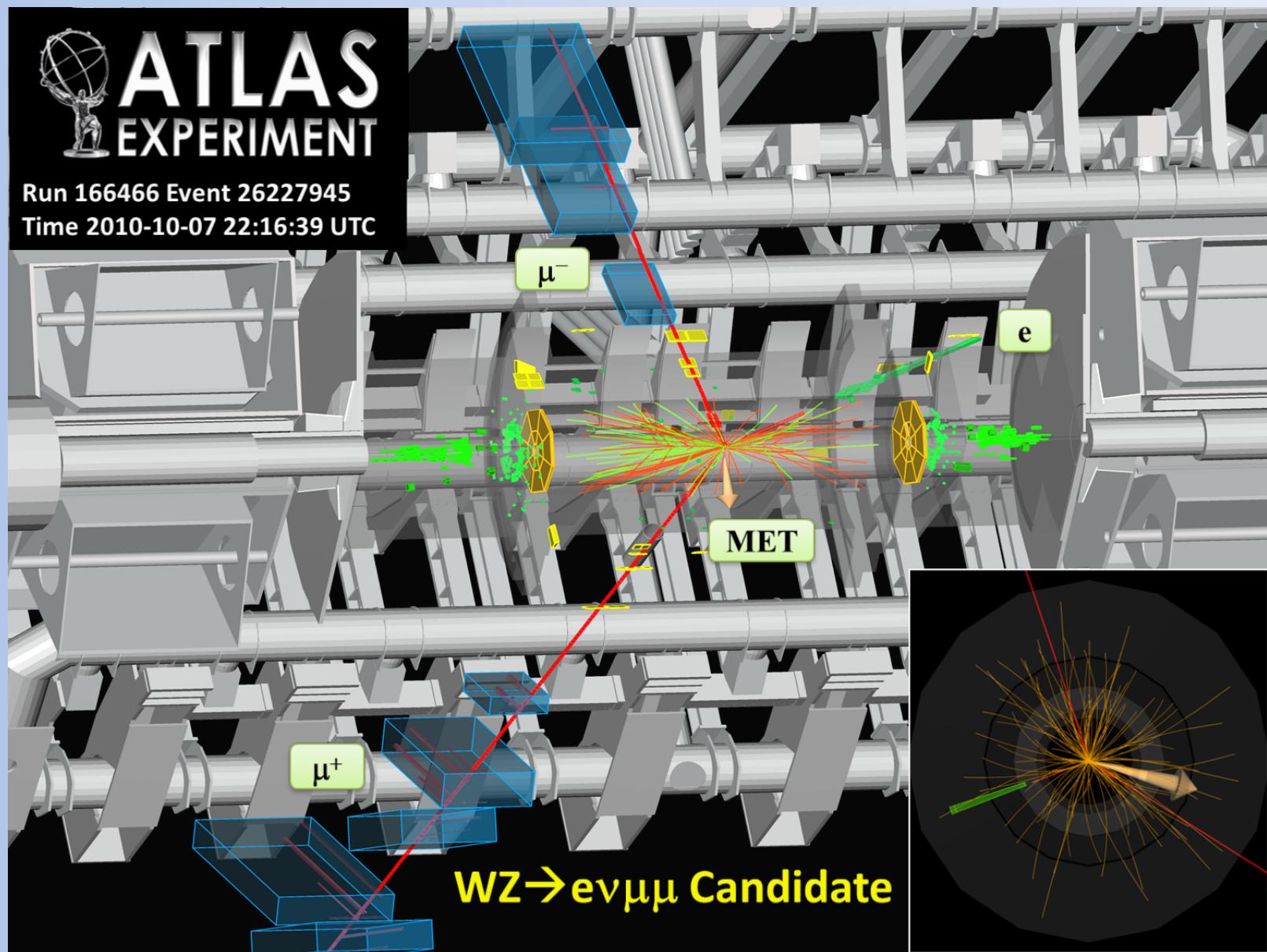
Детектор ATLAS



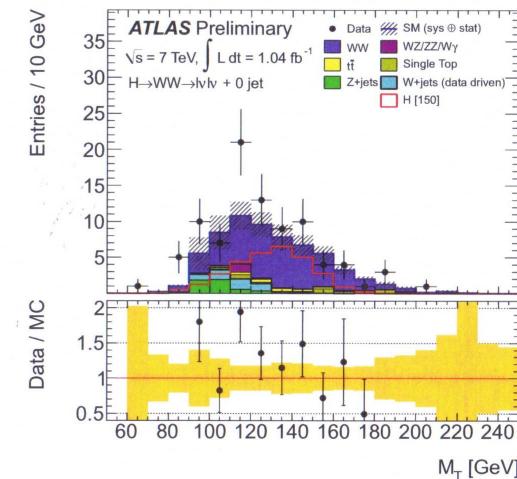
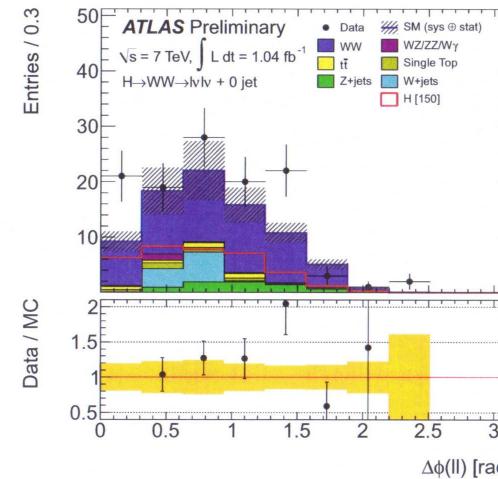
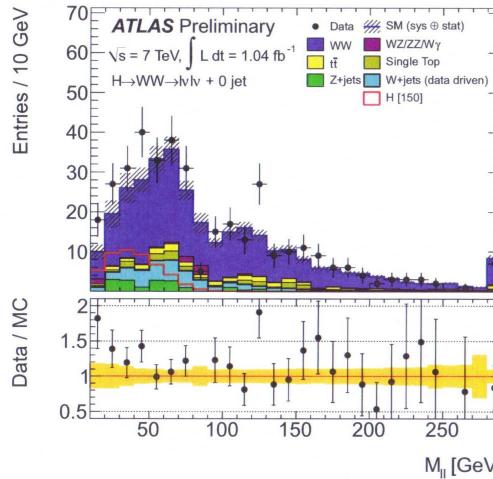
Детектор ATLAS



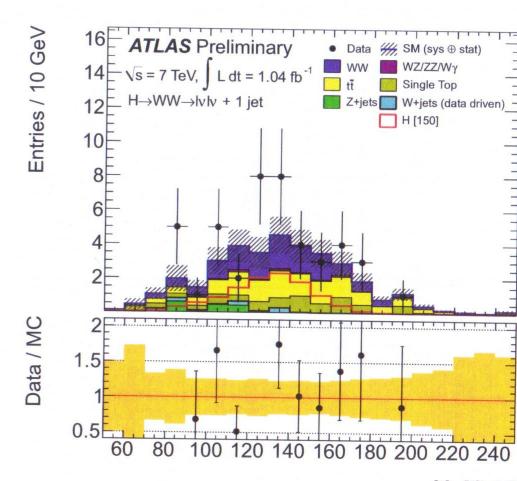
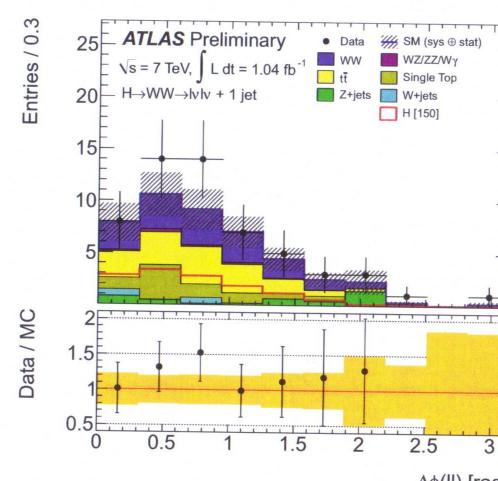
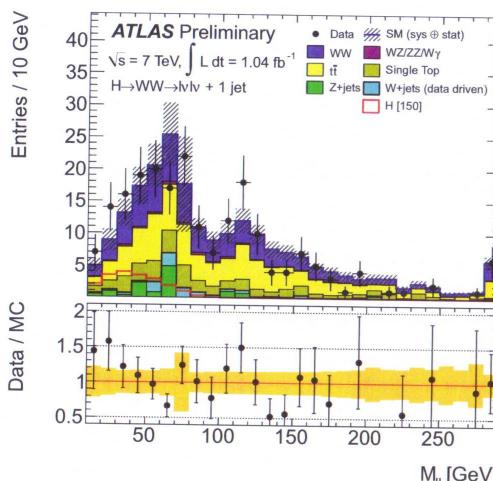
Детектор ATLAS



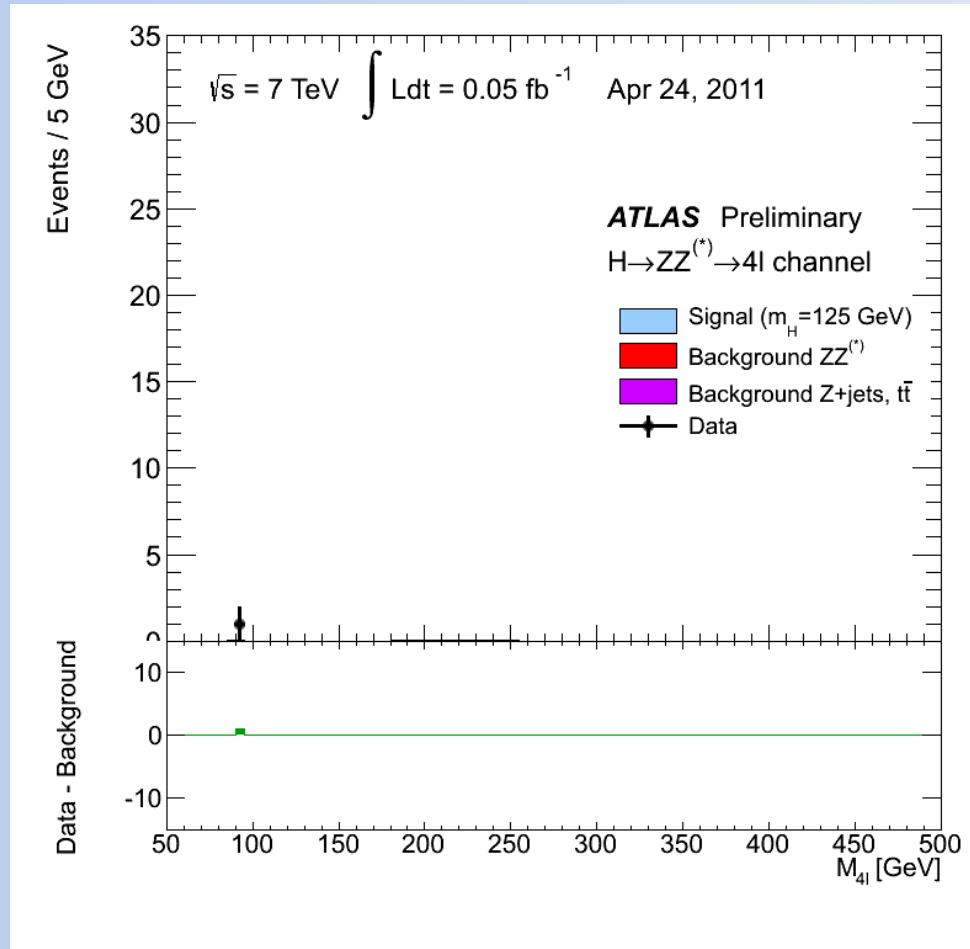
The $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu + 0$ Jet Channel



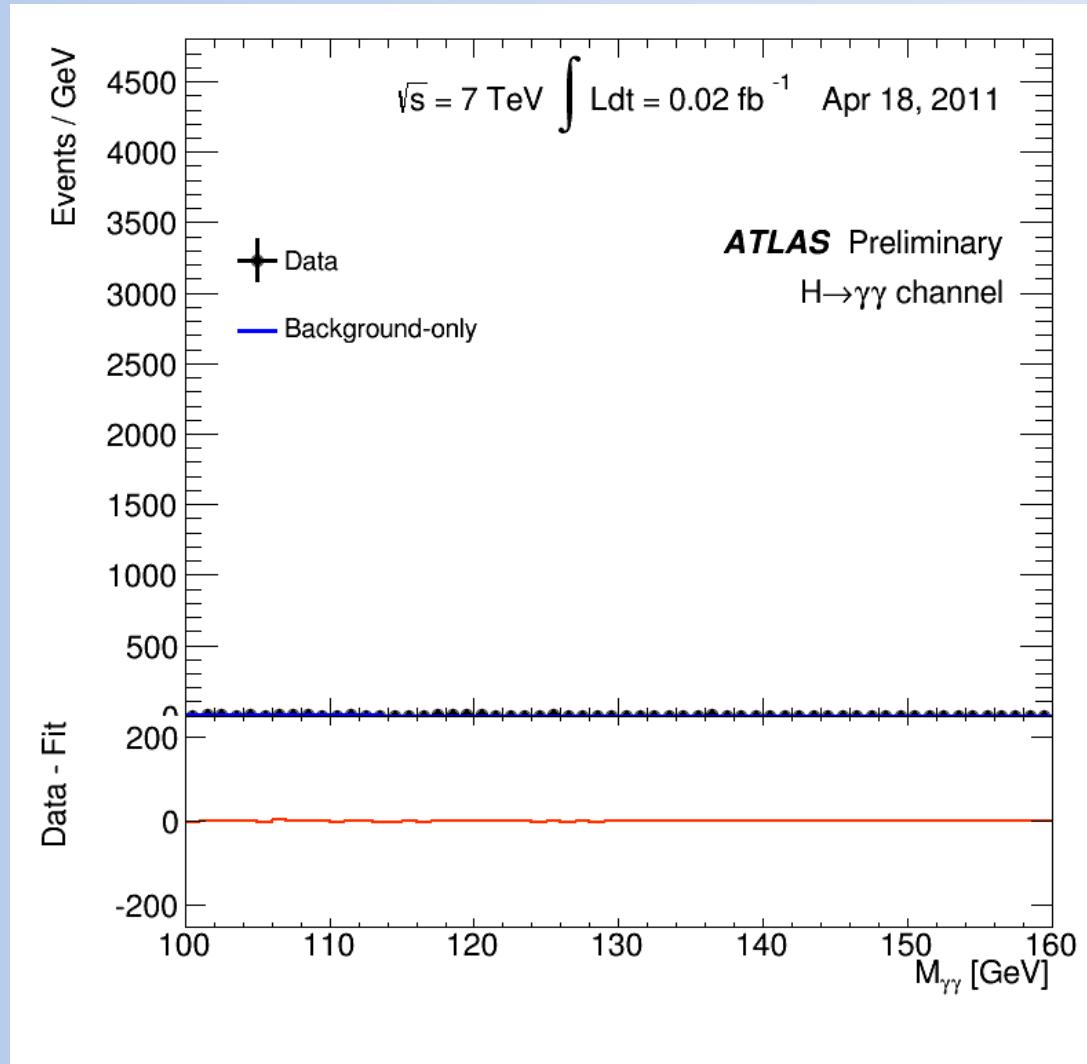
The $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu + 1$ Jet Channel



Открытие Хиггс-бозона



Открытие Хиггс-бозона



Огромное спасибо за
внимание !