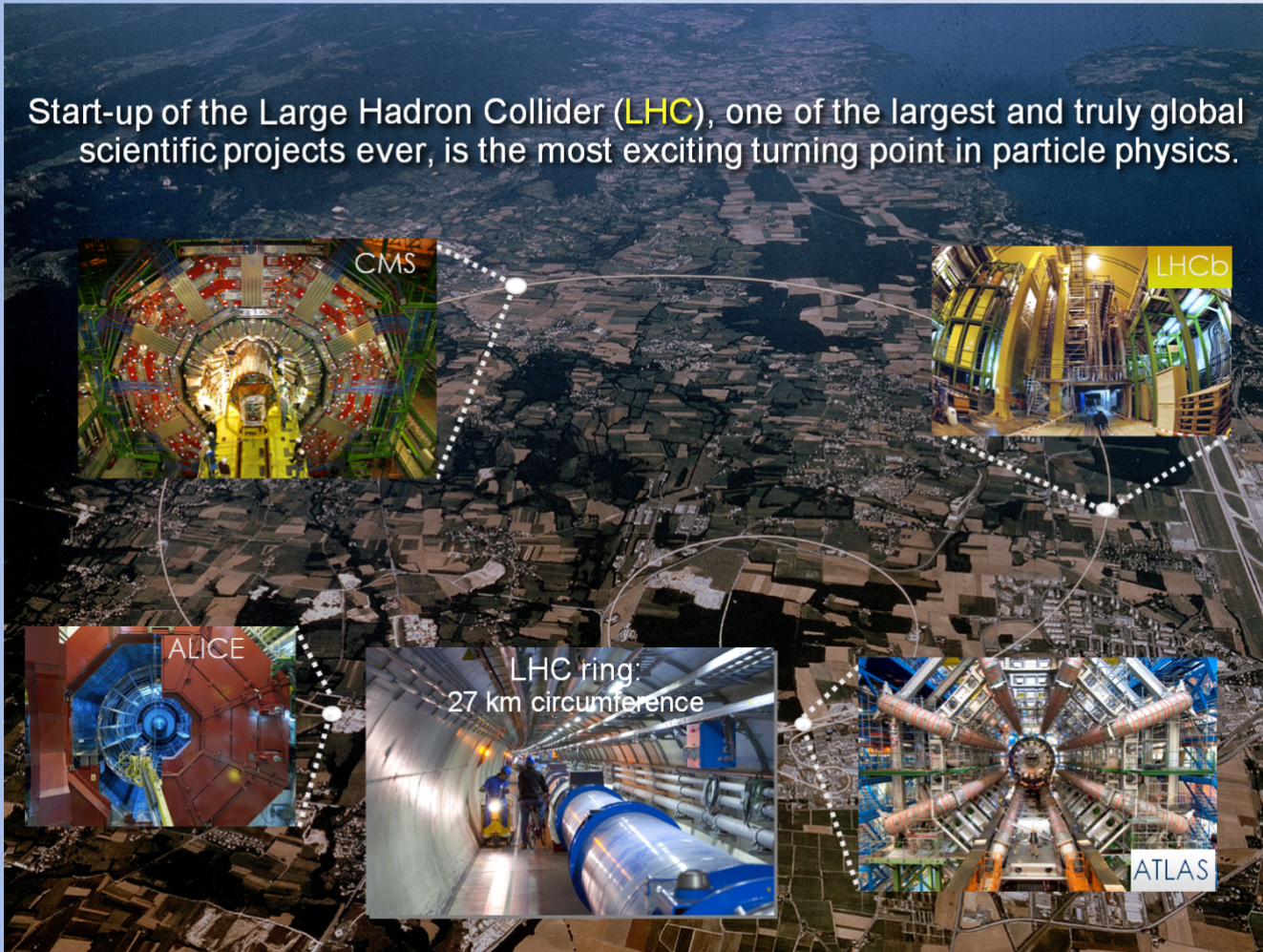


Эксперименты в физике высоких энергий (на примере LHC)



С. Смирнов (НИЯУ МИФИ)

О чем ... о детекторах

Детектор - основной инструмент физики
высоких энергий / физики элементарных
частиц

Принципы регистрации,
типы конструкции.

Комплексы детекторов

Введение

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

Что для этого надо?

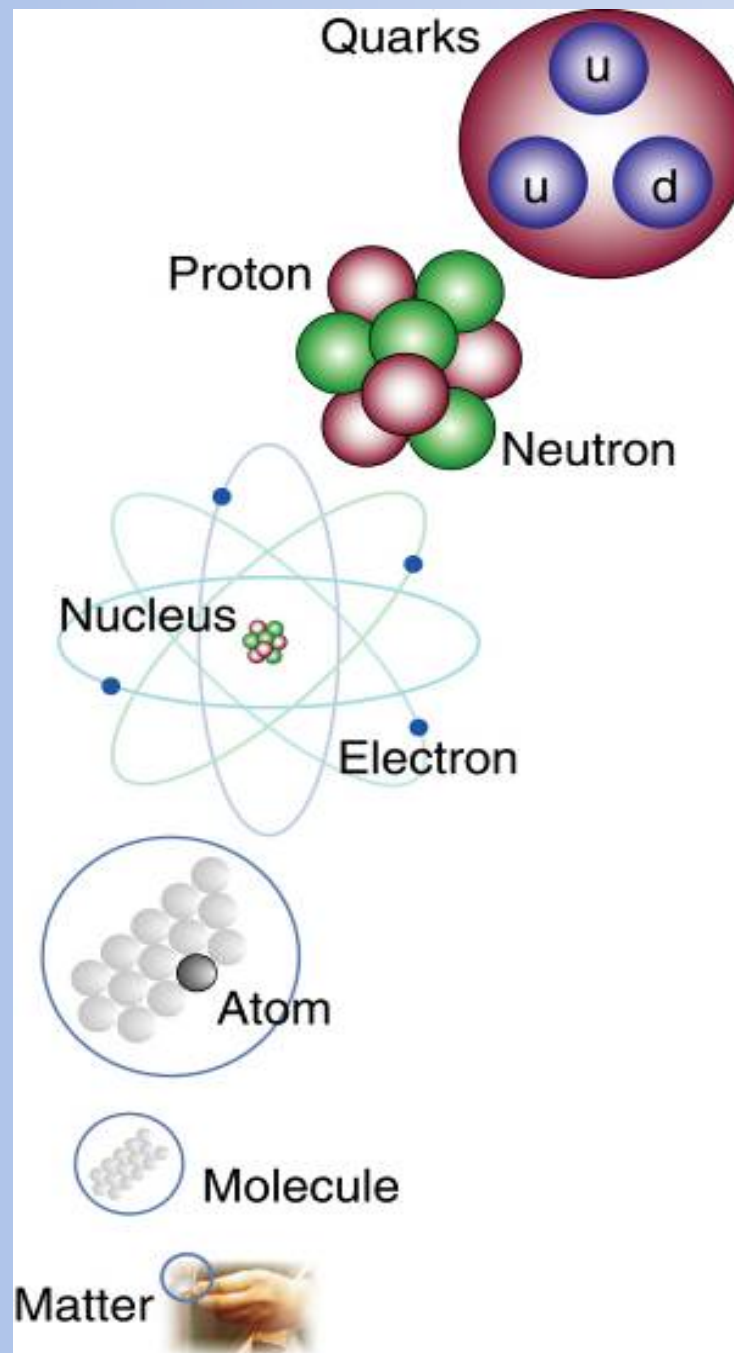
Теория (SM, SUSY ...) или идея Фикс

Ускорители (LEP, Tevatron, LHC, ...) или космические лучи

Детекторы (Огромные комплексы...)

Введение

Кварки (M.Gell-Mann)
1964



Регистрация частиц

■ Что такое частица

- Irreducible representation of the Poincaré group (E.Wigner) (неприводимое представление группы Пуанкаре)

■ Что такое детектор

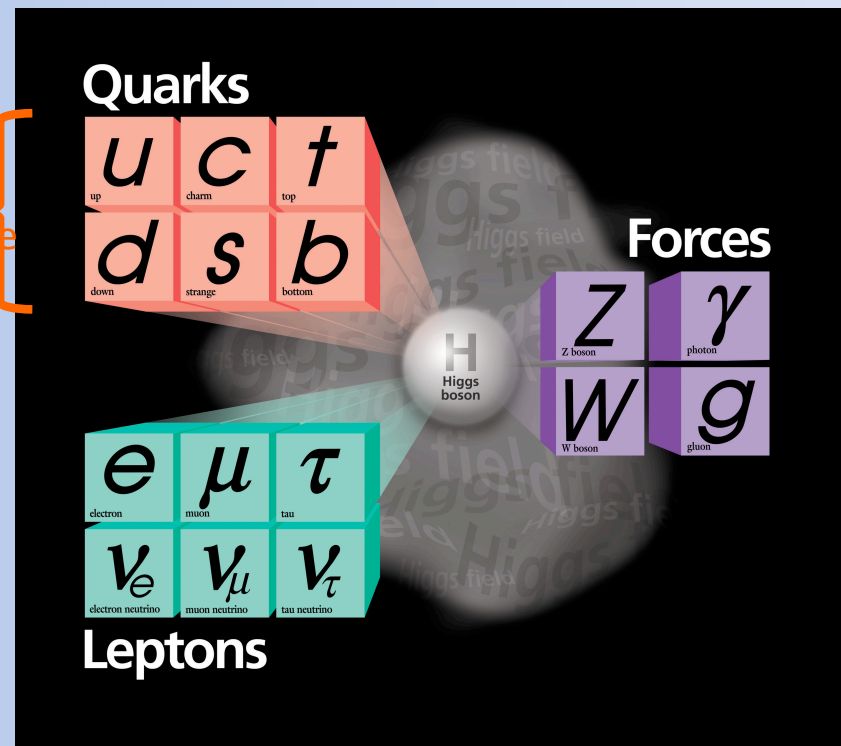
- инструмент для измерения свойств (E, p, m, время жизни, квантовые числа,...) частиц и их идентификация

Элементарные частицы

Слабое взаимодействие

Электро-магнитное взаимодействие

Сильное взаимодействие



Стандартная Модель Столп I: Материя

Это теория, которая объясняет сотни элементарных частиц и их сложные взаимодействия всего лишь с помощью 6 кварков и 6 лептонов

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

Большинство кварков и все заряженные лептоны уже тщательно изучены

Нейтрино практически невозможно изучать на адронном коллайдере

К настоящему моменту наблюдалось только несколько тысяч t -кварков. Это очень интересная и наименее изученная частица !

Стандартная Модель Столп II: Силы

Все взаимодействия достаточно
хорошо изучены:



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

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

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

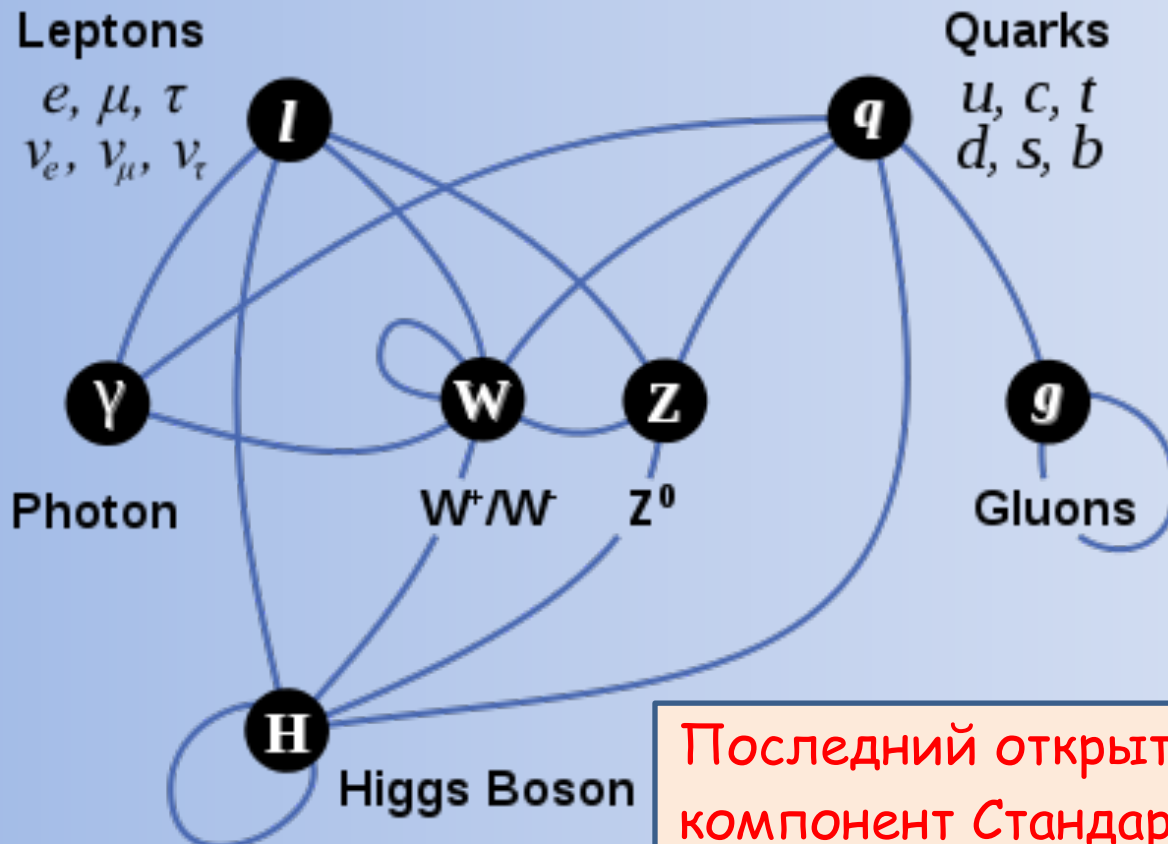
Стандартная Модель Столп III: Higgs

Массы бозонов и фермионов нарушают калибровочную симметрию => неперенормируемая теория!

Выход (согласно СМ): четыре Хиггсовских поля

- Три дают массы W/Z

- Один - физическая частица с хорошо определяемыми свойствами (кроме массы)



Последний открытый компонент Стандартной Модели

Суперсимметрия (SUSY)

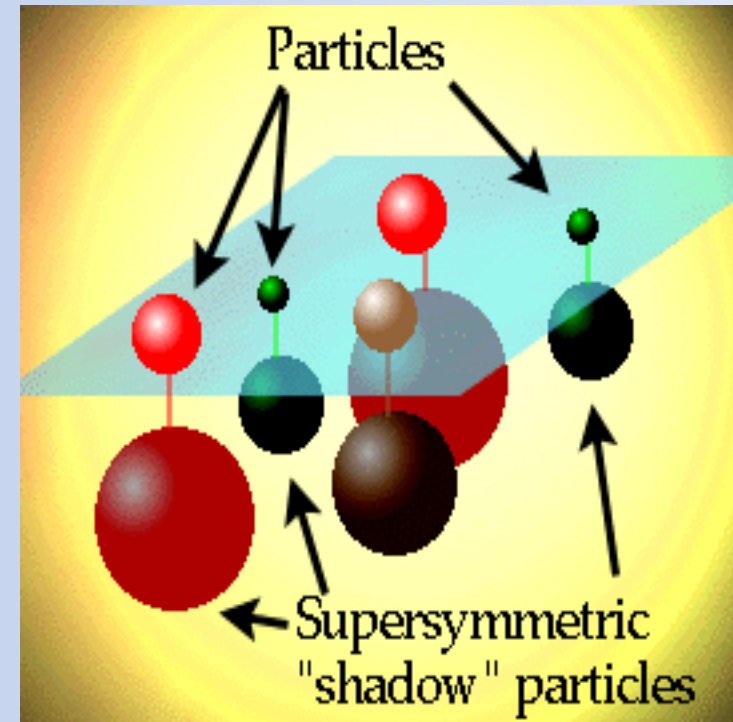
(J. Wess and B. Zumino, 1974)

Устанавливает симметрию между фермионами (материя) и бозонами (силы) :

- Каждая частица p со спином s имеет SUSY партнера \tilde{p} со спином $s-1/2$

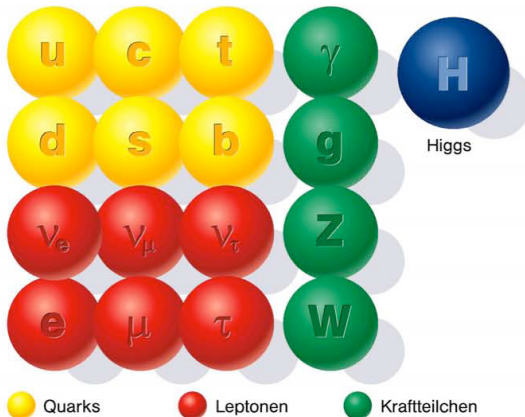
- Примеры: $q (s=1/2) \rightarrow \tilde{q} (s=0)$ скварк

$g (s=1) \rightarrow \tilde{g} (s=1/2)$ глюино



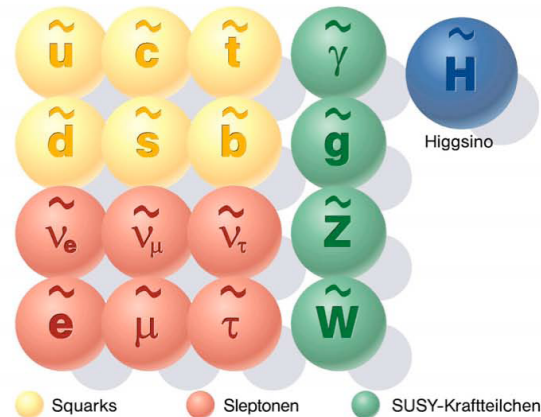
Наш известный мир

Standard-Teilchen



Новый мир?

SUSY-Teilchen



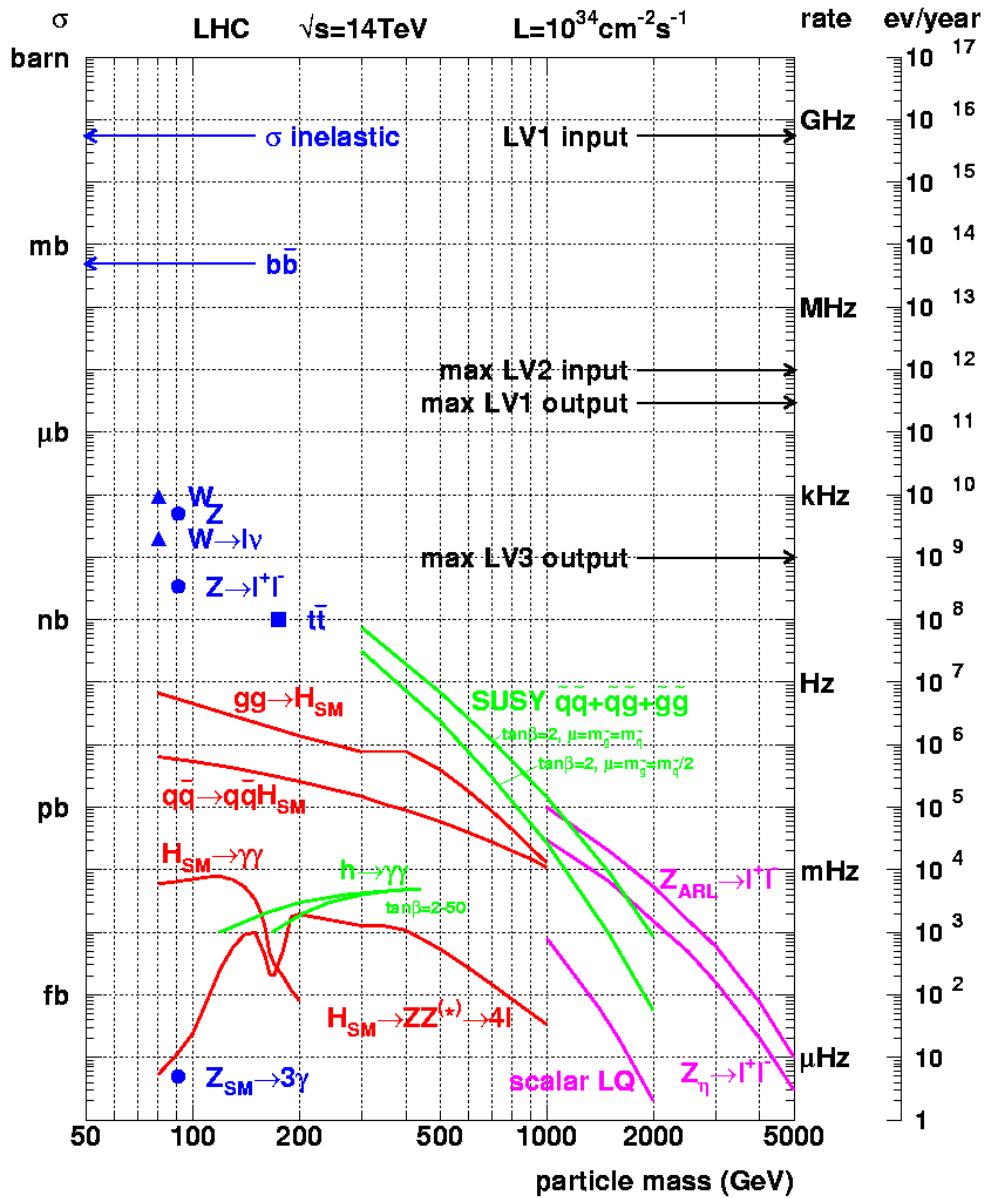
LHC Dream-Reality-Vision

Мотивация:

- Унификация (фермионы - бозоны, материя - силы)
- Решение некоторых глубоких проблем Стандартной Модели

Что мы пока еще не знаем...

- Темная материя
- Суперсимметрия
- Extra dimensions
- Унификация сил
- Новые силы
- Антиматерия



«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...

http://pdg.lbl.gov

~ 180 Selected Particles

$\pi, W^\pm, Z^0, g, e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \tau^\pm, \pi^0, \eta, f_0(660), g(892),$
 $\omega(782), \eta'(958), f_0(980), a_0(980), \phi(1020), h_1(1170), b_1(1235),$
 $a_1(1260), f_2(1270), f_1(1285), \eta(1295), \pi(1300), a_2(1320),$
 $f_0(1370), f_1(1420), \omega(1420), \eta(1440), a_0(1450), g(1450),$
 $f_0(1500), f_2'(1525), \omega(1650), \omega_3(1670), \pi_2(1670), \phi(1680),$
 $g_3(1690), g(1700), f_0(1710), \pi(1800), \phi_3(1850), f_2(2010),$
 $a_4(2040), f_4(2050), f_2(2300), f_2(2340), K^\pm, K^0, K_S^0, K_L^0, K^*(892),$
 $K_1(1270), K_1(1400), K^*(1410), K_b^*(1430), K_2^*(1430), K^*(1680),$
 $K_2(1770), K_3^*(1780), K_2(1820), K_4^*(2045), D^\pm, D^0, D^*(2007)^0,$
 $D^*(2010)^\pm, D_1(2420)^0, D_2^*(2460)^0, D_2^*(2460)^\pm, D_s^\pm, D_s^{*\pm},$
 $D_{s1}(2536)^\pm, D_{s1}(2573)^\pm, B^\pm, B^0, B^*, B_S^0, B_c^\pm, \eta_c(1S), J/\psi(1S),$
 $\chi_{c0}(1P), \chi_{c1}(1P), \chi_{c2}(1P), \psi(2S), \psi(3770), \psi(4040), \psi(4160),$
 $\psi(4415), \Upsilon(1S), \chi_{b0}(1P), \chi_{b1}(1P), \chi_{b2}(1P), \Upsilon(2S), \chi_{b0}(2P),$
 $\chi_{b2}(2P), \Upsilon(3S), \Upsilon(4S), \Upsilon(10860), \Upsilon(11020), p, n, N(1440),$
 $N(1520), N(1535), N(1650), N(1675), N(1680), N(1700), N(1710),$
 $N(1720), N(2190), N(2220), N(2250), N(2600), \Delta(1232), \Delta(1600),$
 $\Delta(1620), \Delta(1700), \Delta(1905), \Delta(1910), \Delta(1920), \Delta(1930), \Delta(1950),$
 $\Delta(2420), \Lambda, \Lambda(1405), \Lambda(1520), \Lambda(1600), \Lambda(1670), \Lambda(1690),$
 $\Lambda(1800), \Lambda(1810), \Lambda(1820), \Lambda(1830), \Lambda(1890), \Lambda(2100),$
 $\Lambda(2110), \Lambda(2350), \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Sigma(1385), \Sigma(1660), \Sigma(1670),$
 $\Sigma(1750), \Sigma(1775), \Sigma(1915), \Sigma(1940), \Sigma(2030), \Sigma(2250), \Xi^0, \Xi^-,$
 $\Xi(1530), \Xi(1690), \Xi(1820), \Xi(1950), \Xi(2030), \Omega^-, \Omega(2250)^-,$
 $\Lambda_c^+, \Lambda_c^+, \Sigma_c(2455), \Sigma_c(2520), \Xi_c^+, \Xi_c^0, \Xi_c^+, \Xi_c^0, \Xi(2645)$
 $\Xi_c(2780), \Xi_c(2815), \Omega_c^0, \Lambda_b^0, \Xi_b^0, \Xi_b^-, t, \bar{t}$

There are Many more

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

Многokrатное рассеяние

теряют энергию:

Ионизация и возбуждение

Тормозное излучение

Черенковское излучение

Переходное излучение

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

Адроны: Неупругие ядерные процессы, нейтроны

Мюоны: Ионизационные потери, слабое взаимодействие

Каскады

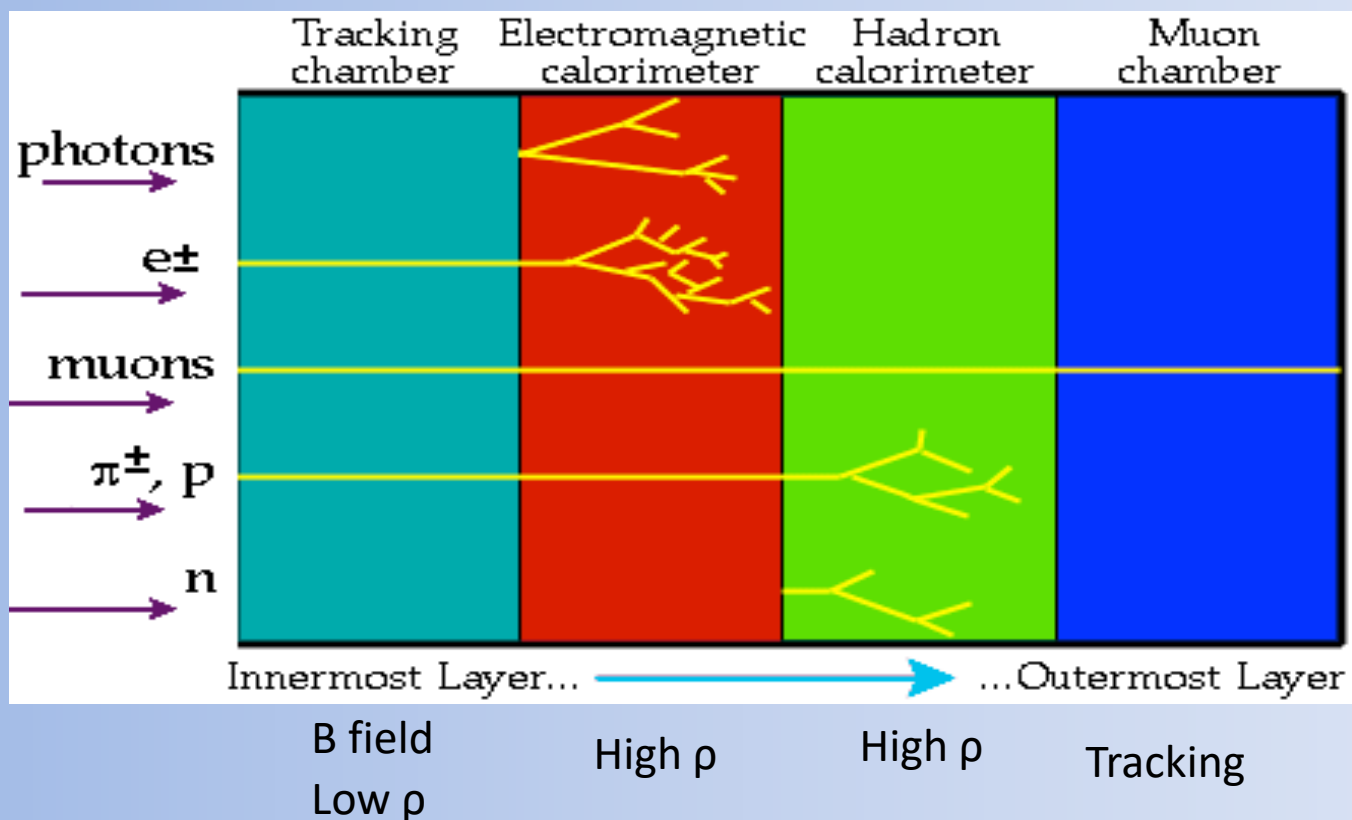
Для электронов и фотонов

Электромагнитные ливни

Для адронов

Адронные ливни

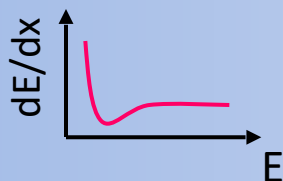
Идентификация частиц



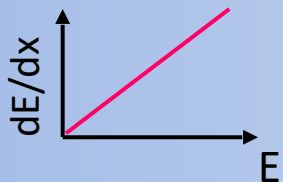
- Электроны: ионизационные потери и тормозное излучение
- Фотоны: нет ионизационных потерь, есть образование пар в материале
- Заряженные адроны: ионизационные потери и образование ливней
- Нейтральные адроны: нет ион. потерь, но есть образование ливней

e^+ / e^-

■ Ионизация

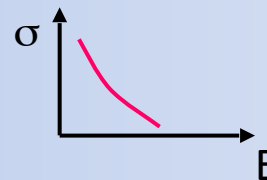


■ Тормозное излучение

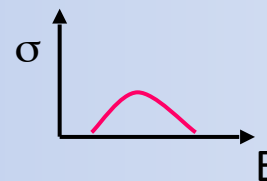


γ

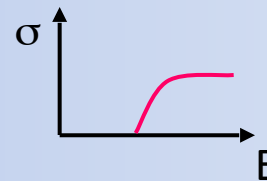
■ Фото-эффект



■ Эффект Комптона

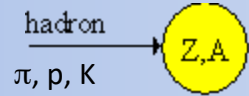


■ Рождение пар

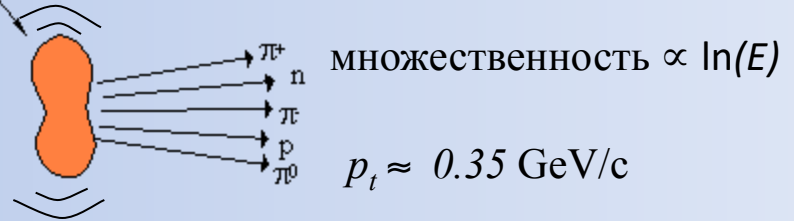


Ядерные взаимодействия

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



Происходит возбуждение и развал ядер
 → Ядерные фрагменты (radioactive)
 + рождение вторичных частиц.



Начиная с энергий (>1 GeV) сечение слабо зависит от энергии и от типа налетающей частицы (π, p, n, K...).

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

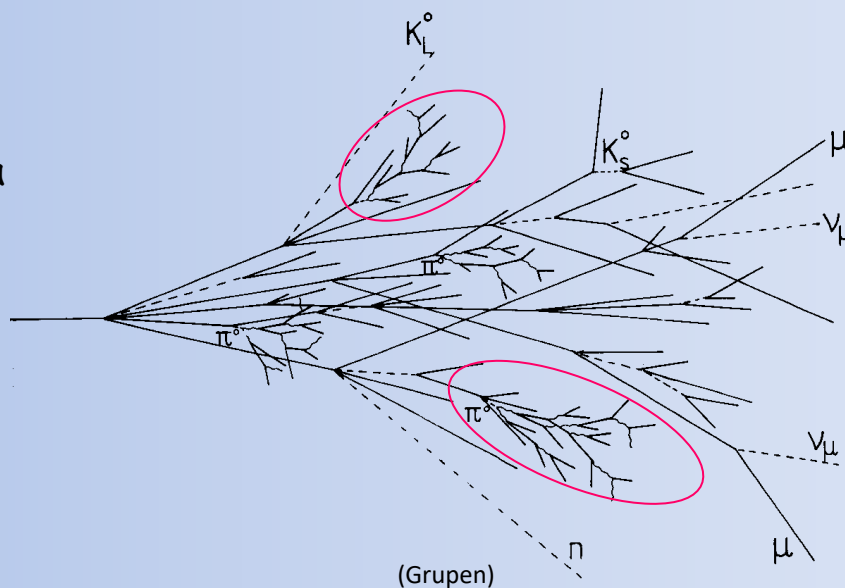
По аналогии с X_0 вводится адронная длина поглощения

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

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, π^\pm, K^\pm

Ядерные фрагменты

От развала ядер (энергия связи)

нейтроны, нейтрино, мягкие γ , мюоны



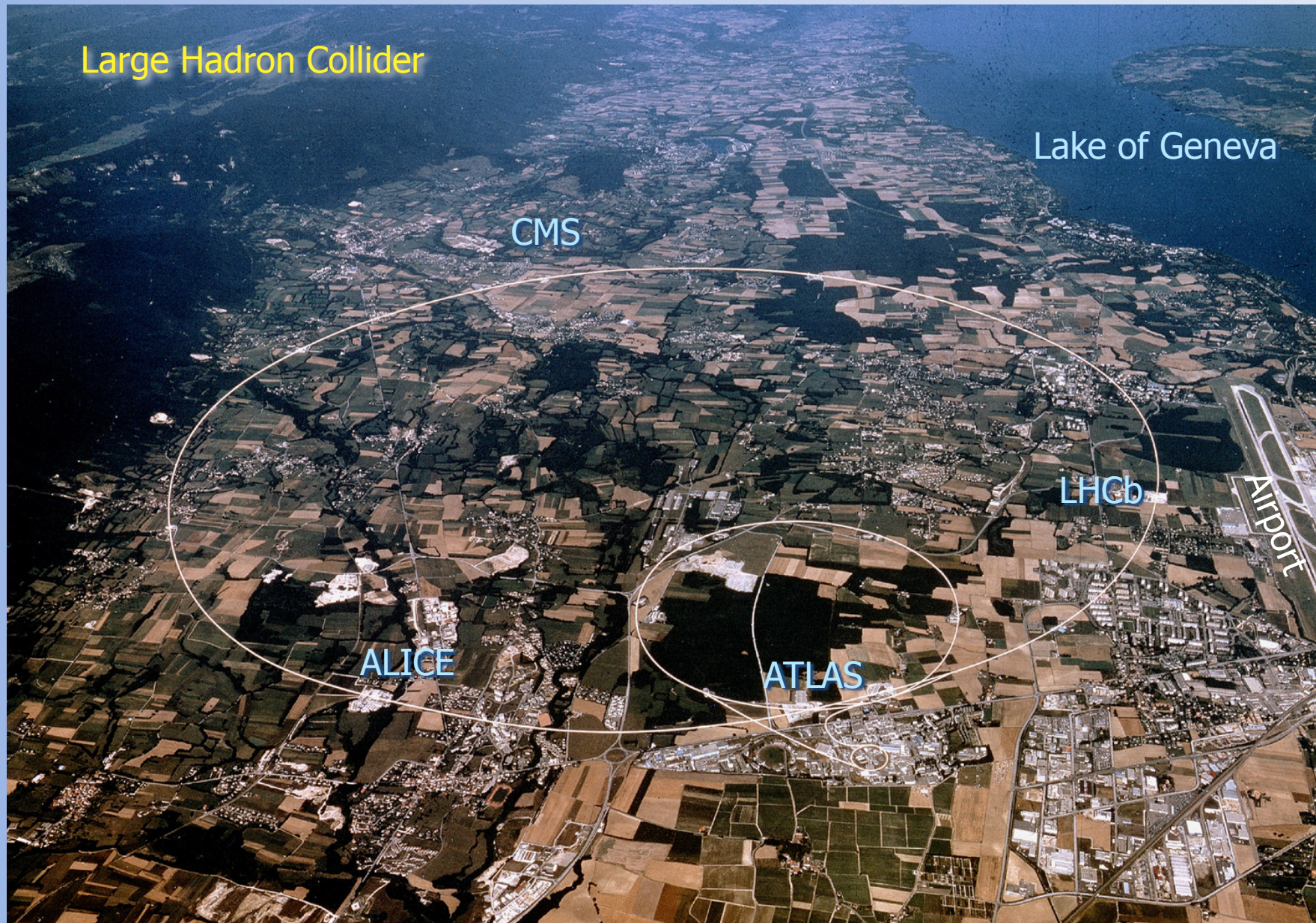
Нейтральные пионы $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$

→ электромагнитные каскады

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

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

невидимая энергия → большие флуктуации → энергетическое разрешение



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

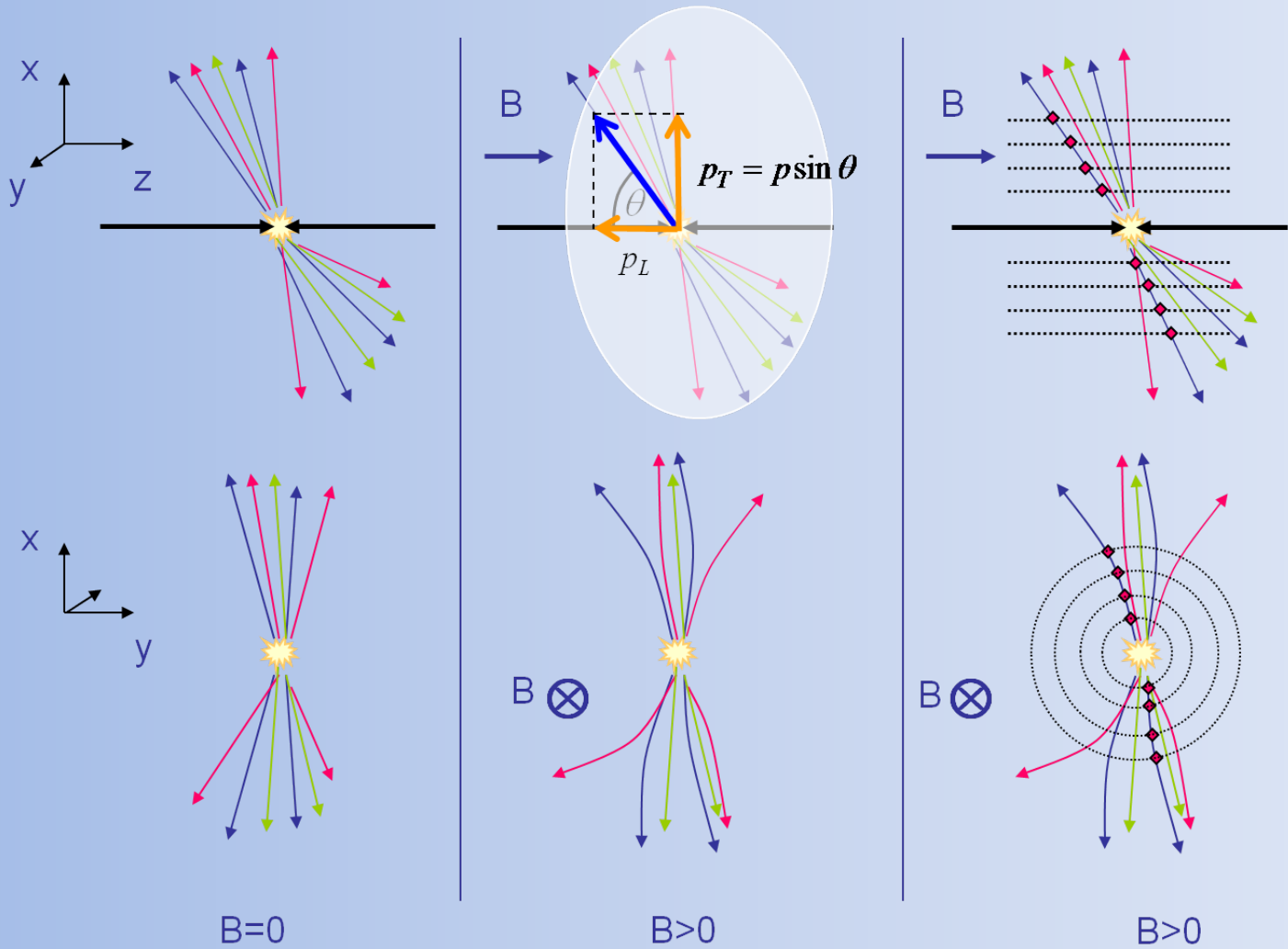
Надо помнить

Стоимость установки увеличивается пропорционально ~объему

Как можно меньше материала перед калориметрами

Как можно больше материала перед мюонным спектрометром

Заряженная частица в магнитном поле



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 банчей: 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!

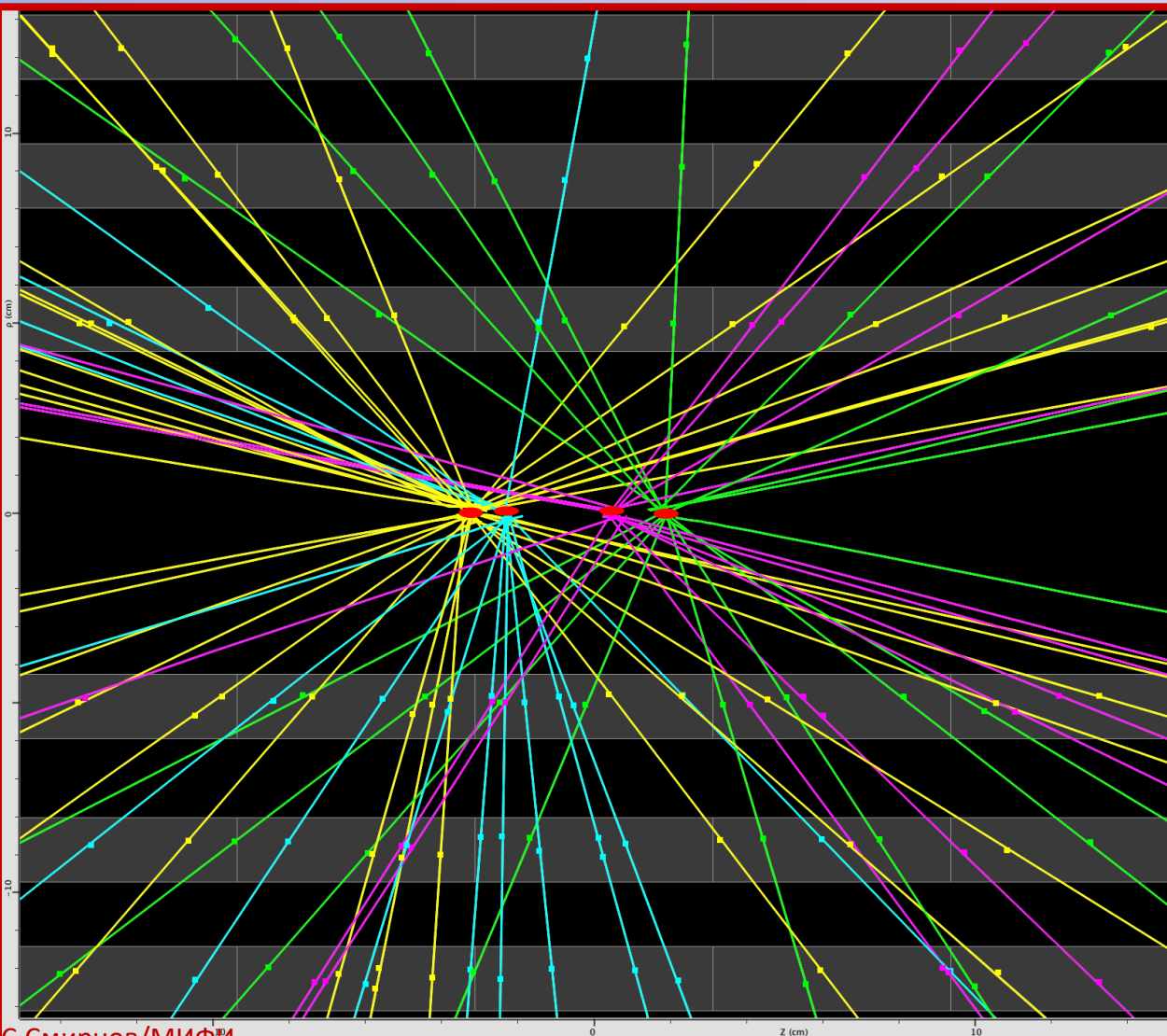
On-line режекция должна быть $\sim 10^7$: NEW!

Хранение данных $\sim 10^9$ событий мегабайтного размера в год:

NEW!

A pileup event in ATLAS (prob. per triggered event $1.8 \times 10^{-4} \rightarrow$ expect ~ 910 pileup events in run)

Preparing for the future : pile-up reconstruction
4 pp interactions in the same bunch-crossing



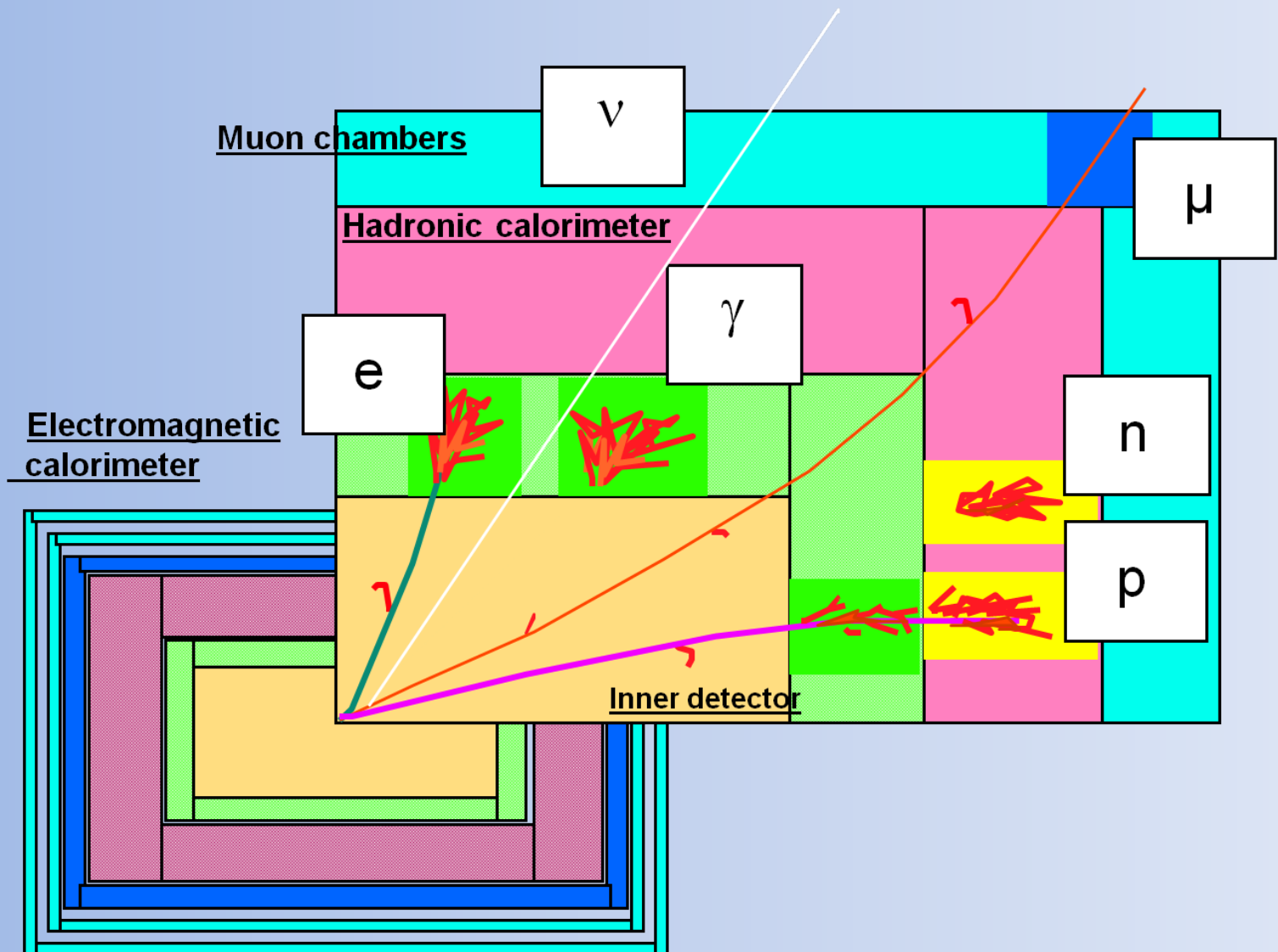
ATLAS
EXPERIMENT

Run Number: 153565, Event Number: 4487360
Date: 2010-04-24 04:18:53 CEST

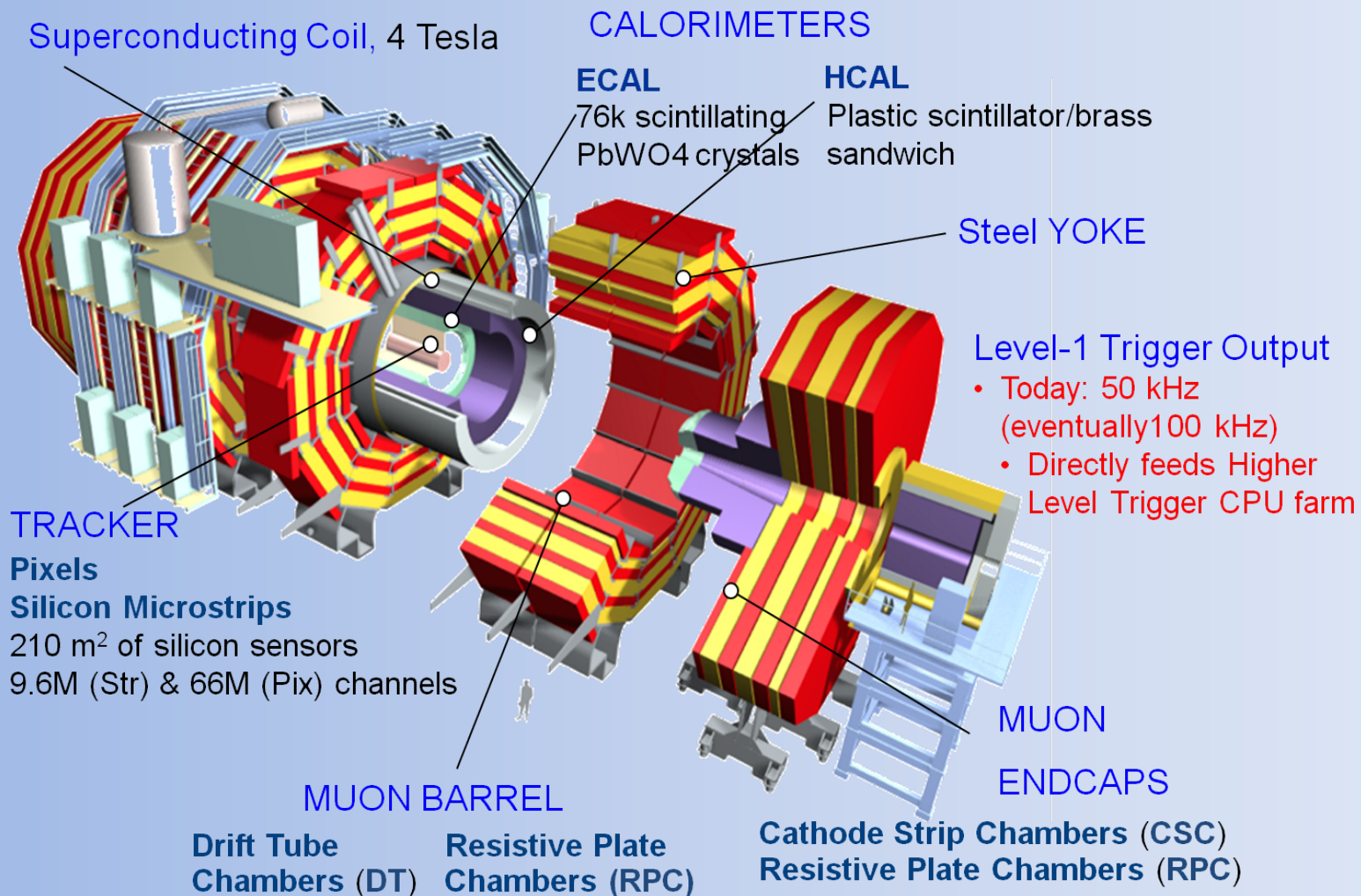
Event with 4 Pileup Vertices
in 7 TeV Collisions

A top-down view of the particle tracks from the event, showing a dense, star-like pattern of tracks originating from a central region. The tracks are color-coded and extend outwards, illustrating the complexity of reconstructing individual interactions in a high-pileup environment.

Детекторы на LHC



CMS Detector



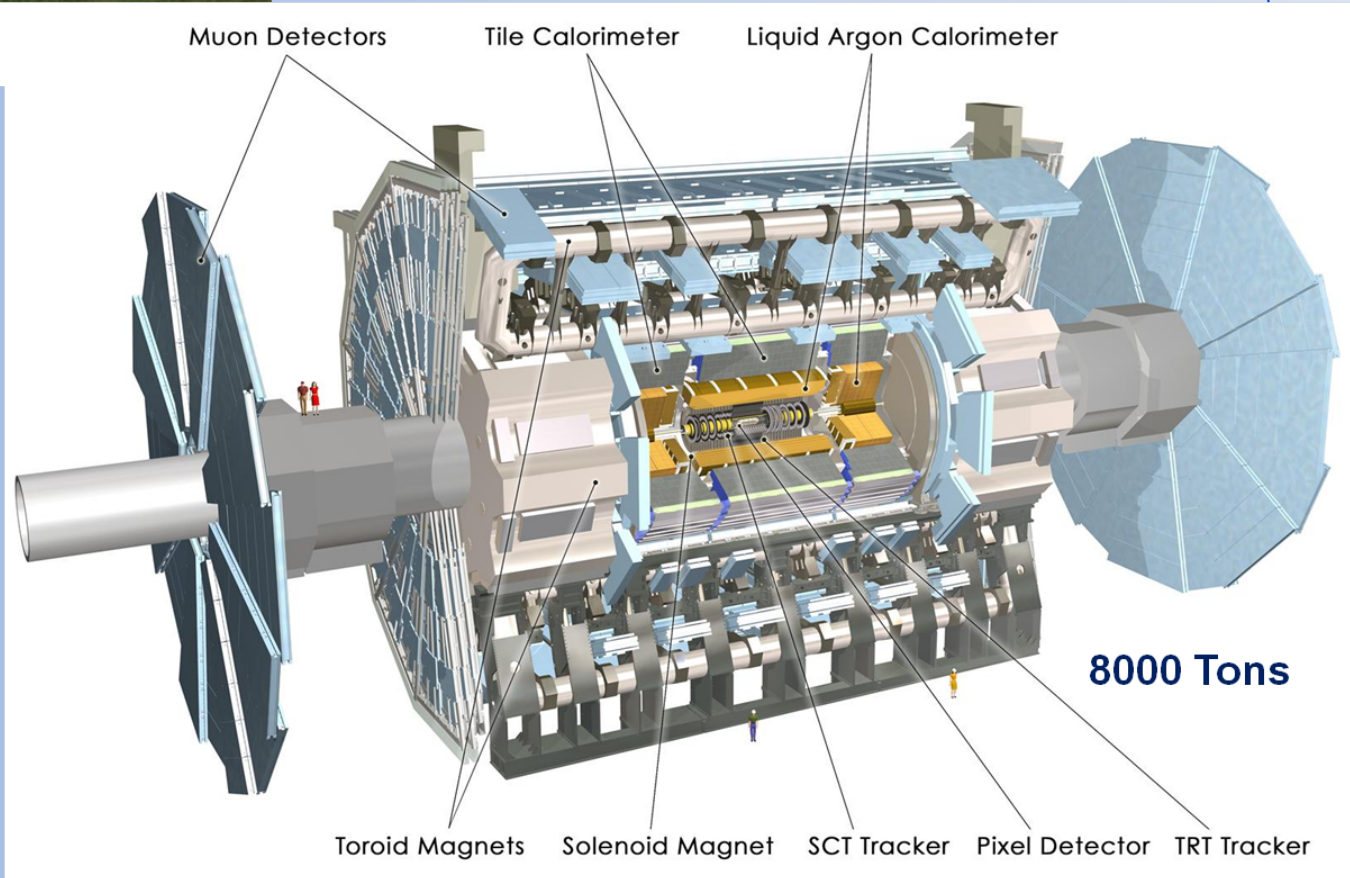


ATLAS superimposed to the 5 floors of building 40

ATLAS Detector

45 m

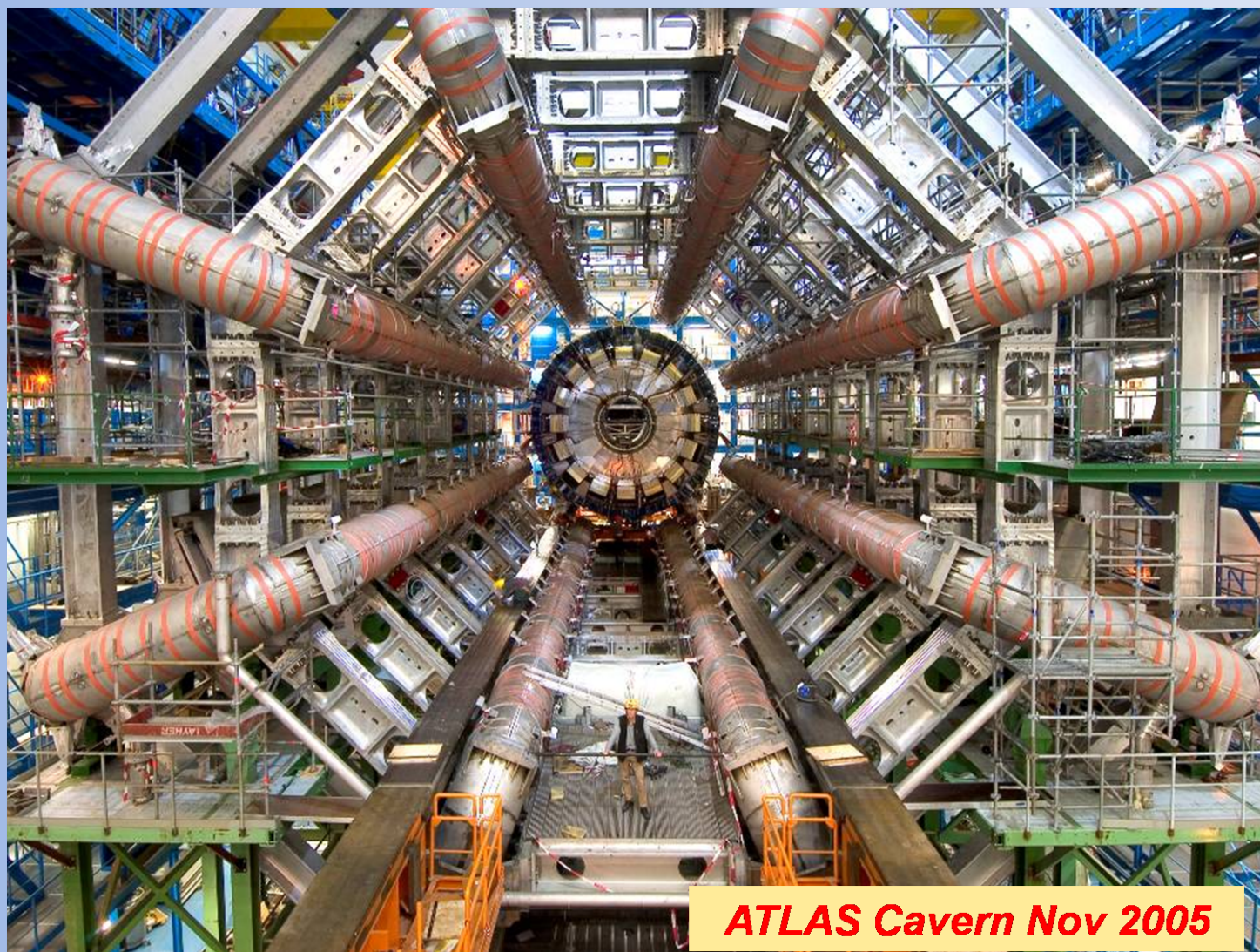
25 m





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

Детектор ATLAS

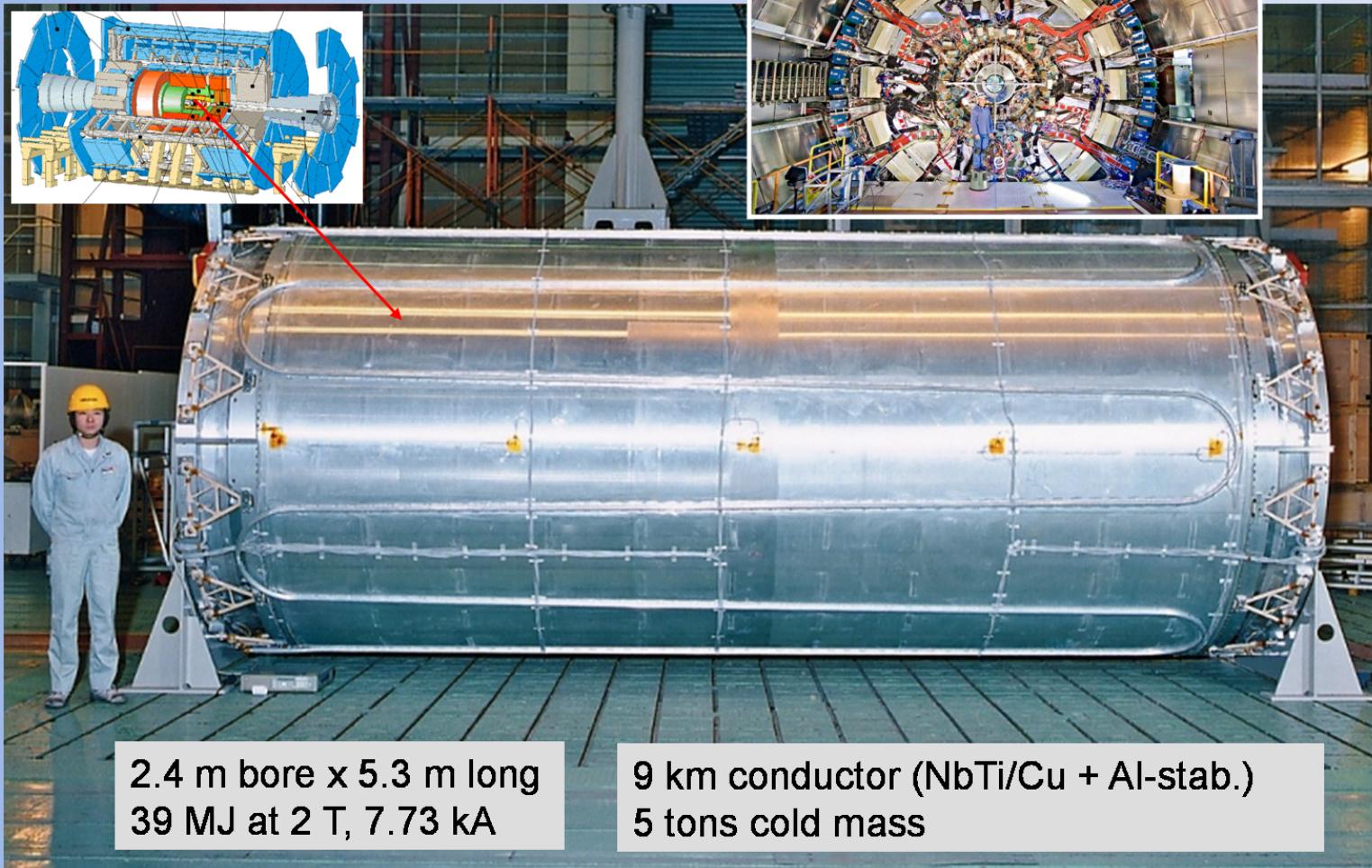
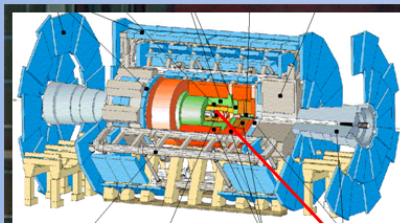


ATLAS Cavern Nov 2005

Barrel Toroid components for integration



Central Solenoid

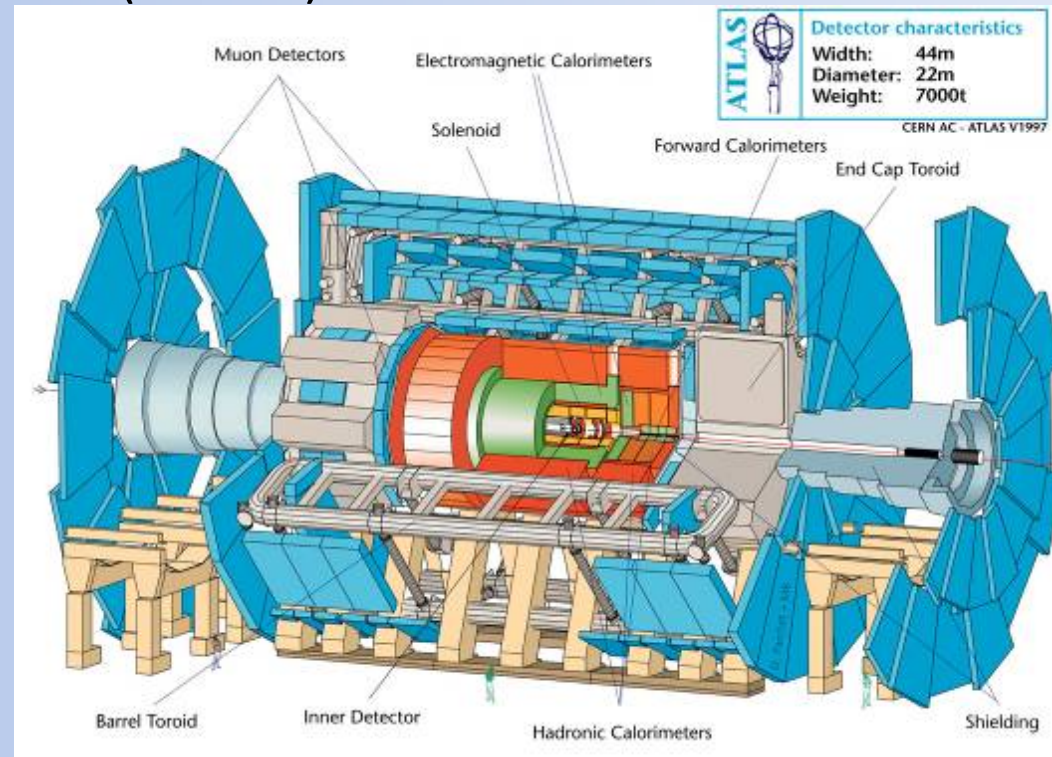


2.4 m bore x 5.3 m long
39 MJ at 2 T, 7.73 kA

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

ATLAS superconducting magnets

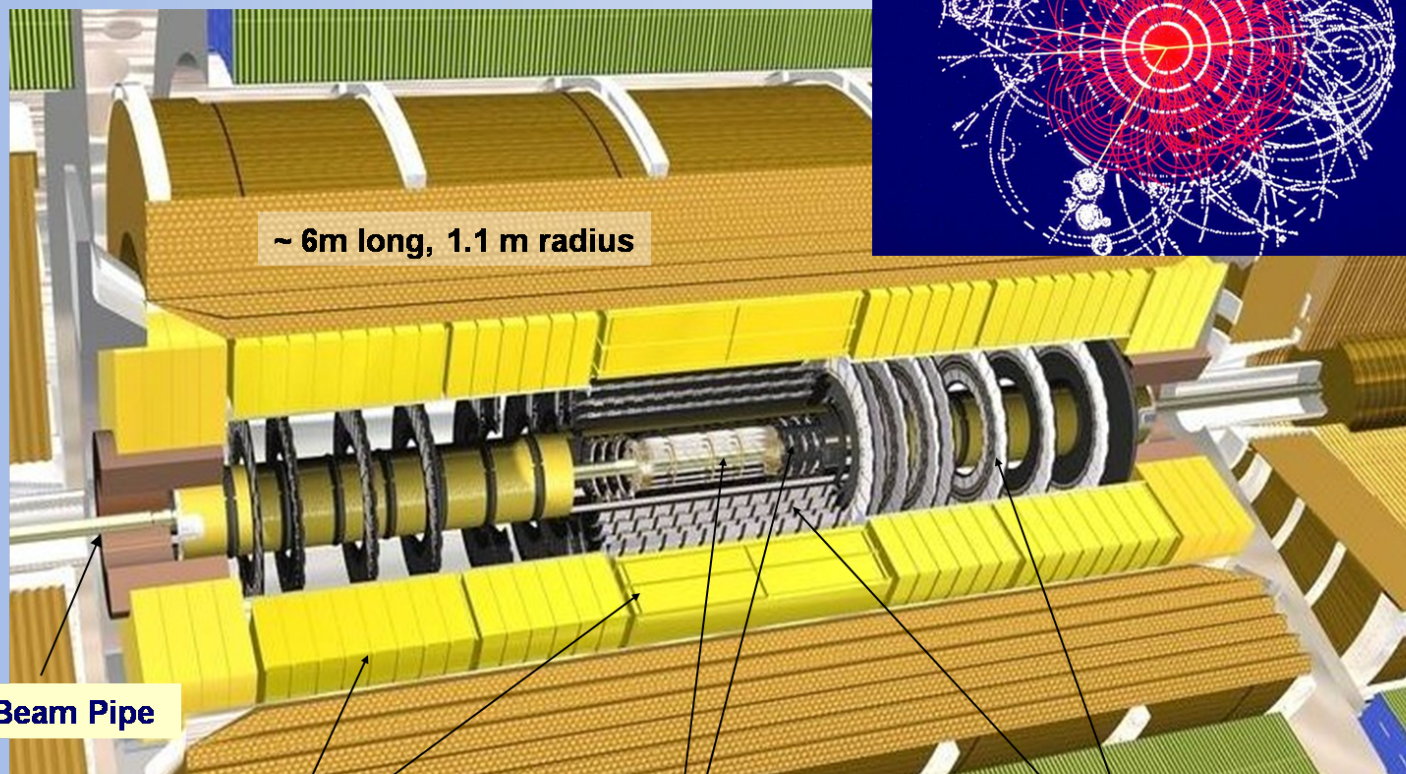
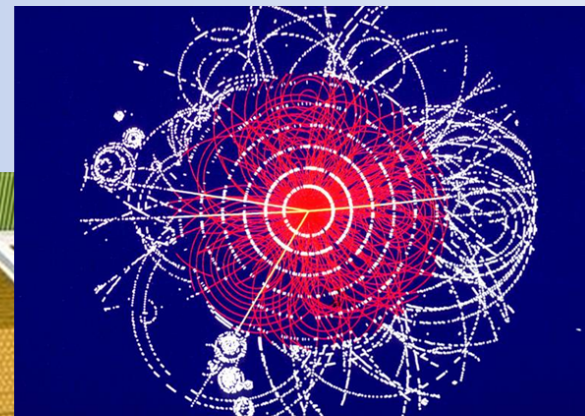
- 1 Barrel Toroid, 2 End Cap Toroids and 1 Central Solenoid
- 4 magnets provide 2 T magnetic field for the inner detector (solenoid) and ~ 1 T for the muon detectors in blue (toroids)
- 20 m diameter x 25 m long
- 1000 m³ volume with field
- 90 km superconductor
- 170 t superconductor
- 700 t cold mass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



The largest trio of toroids ever built

ATLAS Tracking Detectors

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



~ 6m long, 1.1 m radius

Beam Pipe

Transition Radiation Tracker (TRT)
($4 \cdot 10^5$ channels) with e/π separation

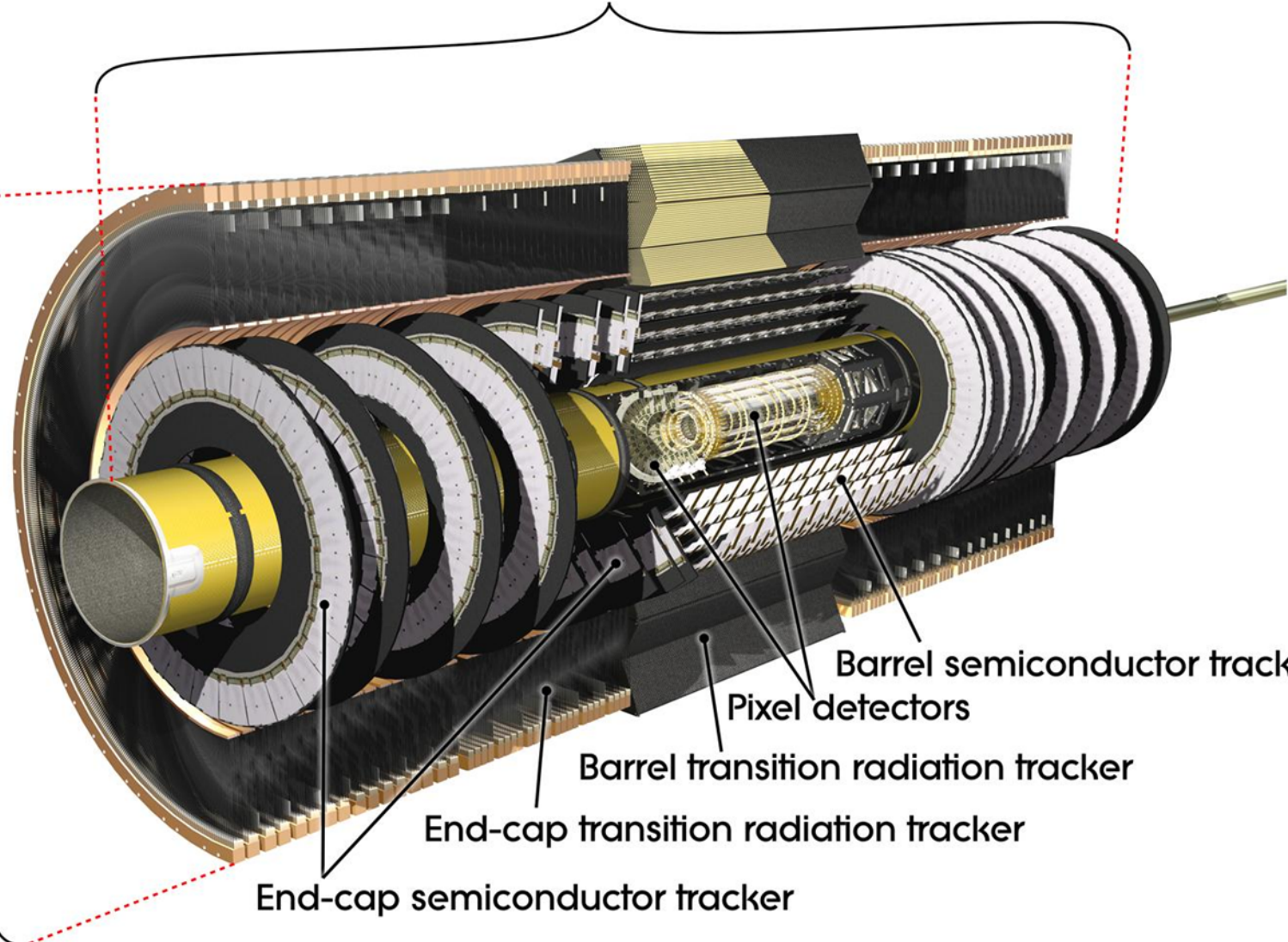
Pixels
($0.8 \cdot 10^8$ channels)

Si Strips Tracker (SCT)
($6 \cdot 10^6$ channels)

ATLAS Inner Tracking Detector (ID)

6.2m

2.1m

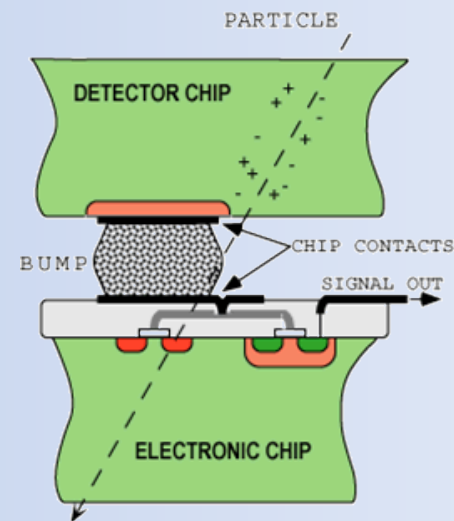
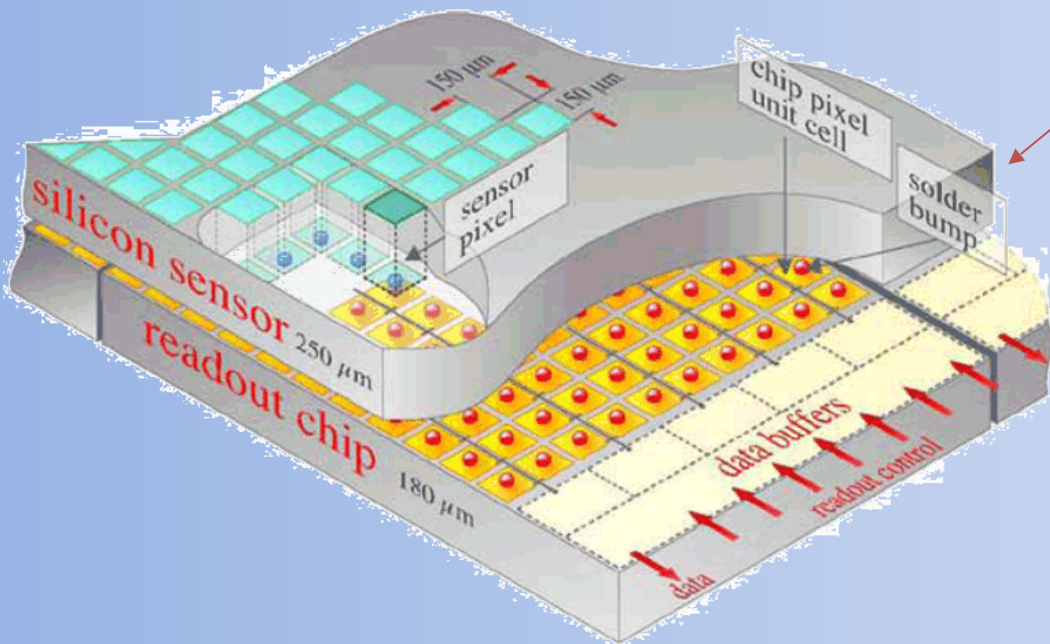
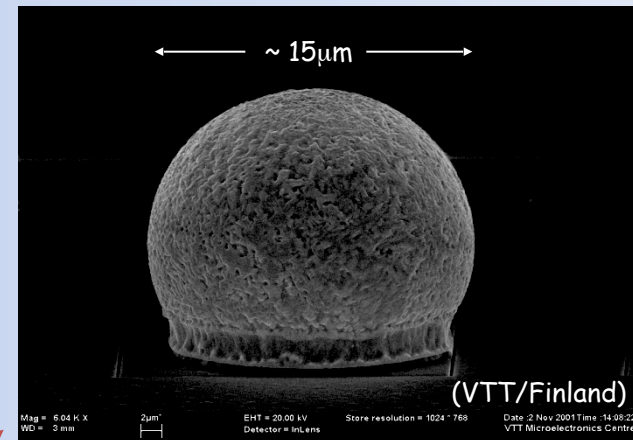


- Barrel semiconductor tracker
- Pixel detectors
- Barrel transition radiation tracker
- End-cap transition radiation tracker
- End-cap semiconductor tracker

■ HAPS – Гибридный активный пиксельный сенсор

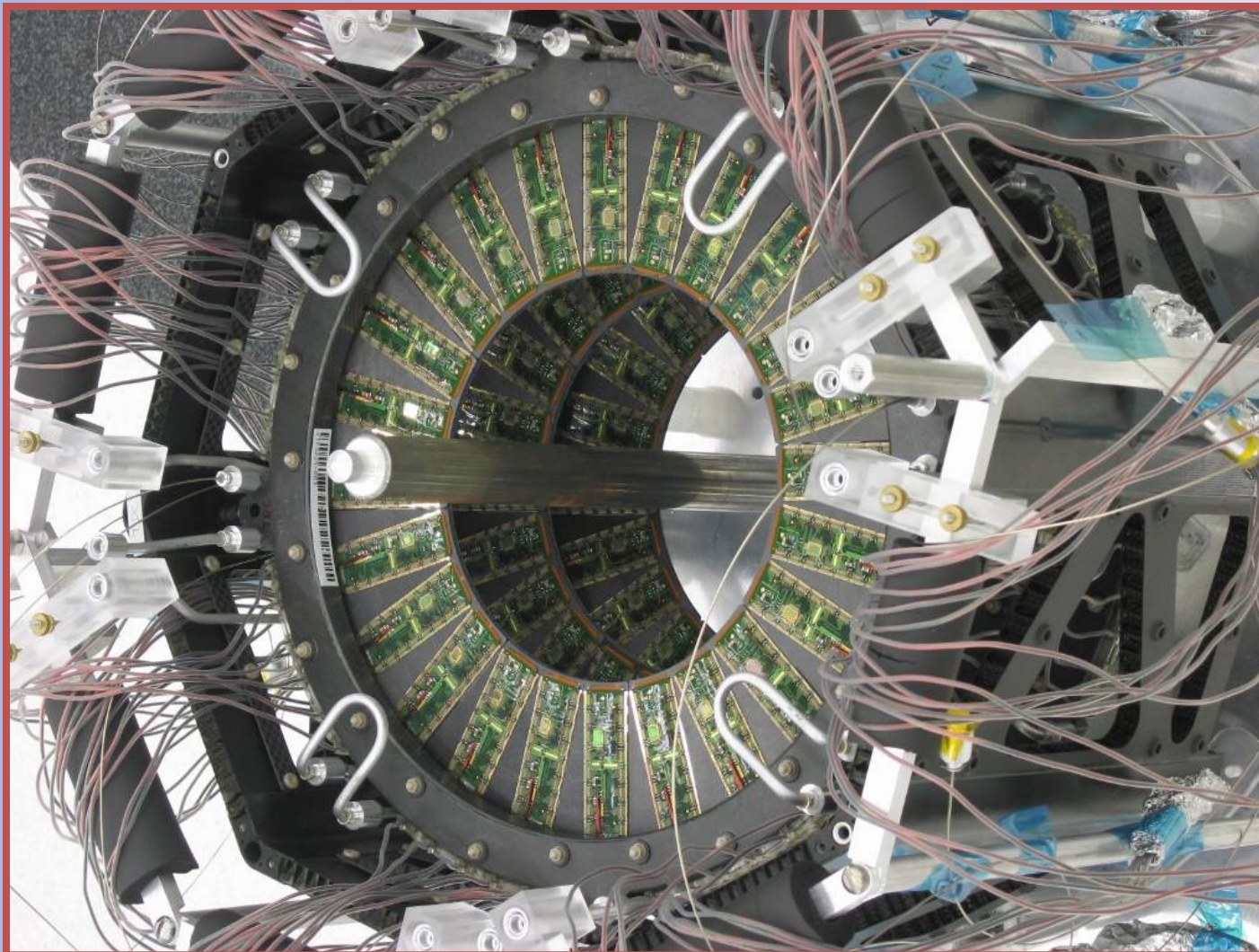
- Сегмент Si с высокой гранулярностью
(\Rightarrow true 2D, нет проблем с x-y неопределенностью)
- Считывающая электроника с той же геометрией
(каждая ячейка - к своему каналу)
- соединение посредством "bump bonding"
- Широко используются в LHC экспериментах:
ATLAS, ALICE, CMS and LHCb

Solder Bump: Pb-Sn



Flip-chip technique

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
- 80µm pitch/12µm width

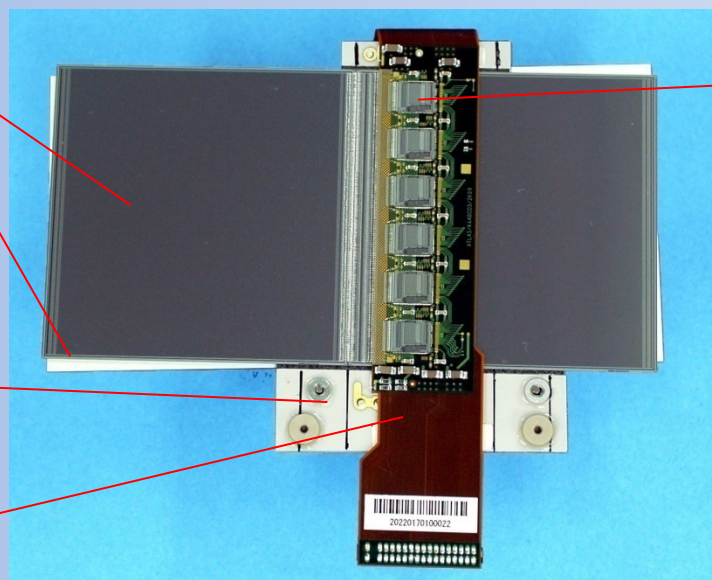
• Mechanical support

- 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

128 mm



• ASICS (x12)

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

• Wire bonds (~3500)

- 25 µm Al wires

■ ATLAS – SCT

- 15.552 microstrip sensors
- 2.112 barrel modules
- 1.976 forward modules
- 61 m² silicon,

6.3·10⁶strips

$\sigma(r\phi) \sim 16 \mu\text{m}$, $\sigma(z) \sim 850\mu\text{m}$ [NIMA538 (2005) 384]

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 :

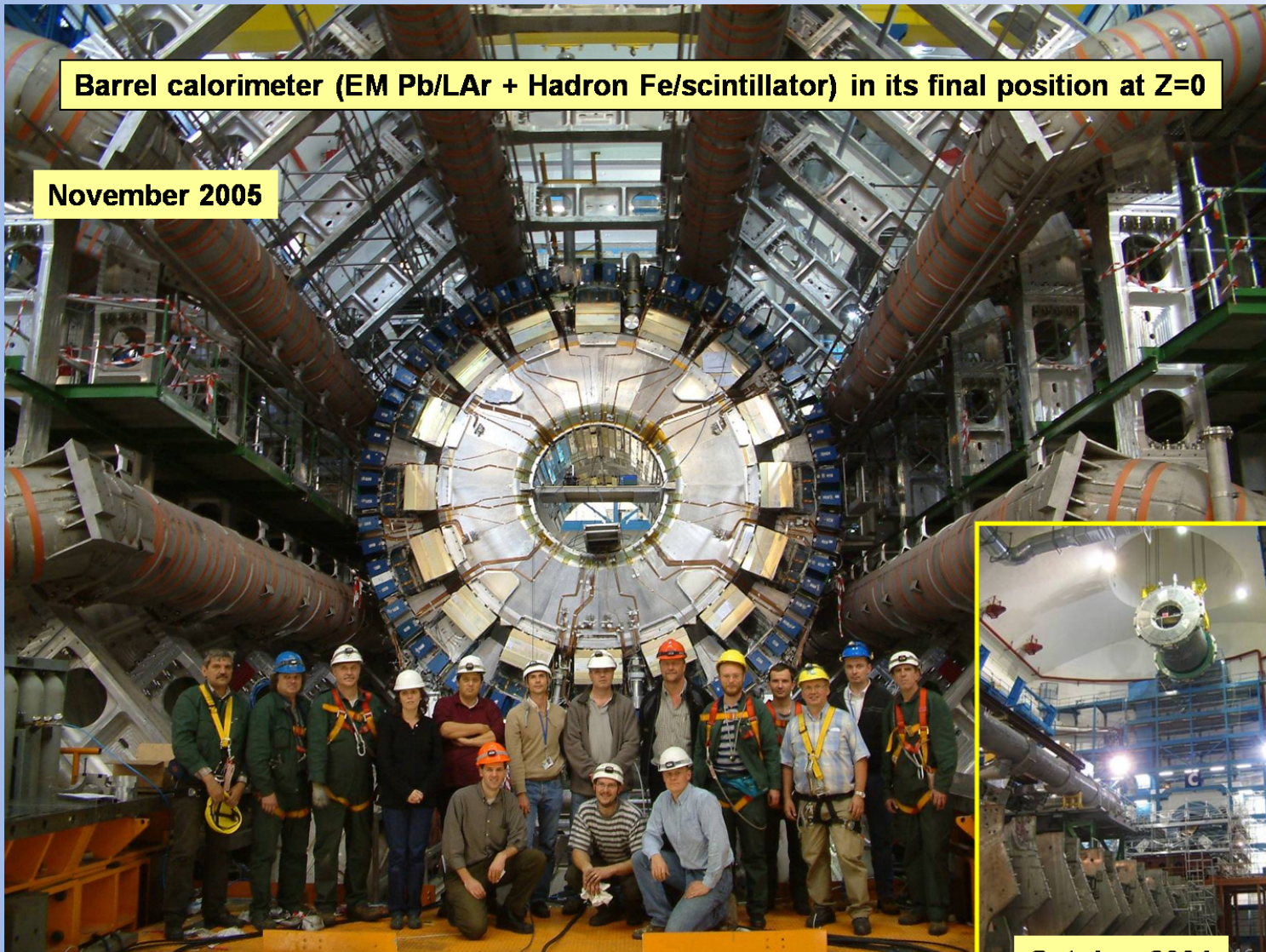
Гомогенные калориметры: Детектор = абсорбер (сцинтилляционные кристаллы)
Используются только для электромагнитных калориметров

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

Много разных типов конкретной реализации в разных экспериментах

Barrel calorimeter (EM Pb/LAr + Hadron Fe/scintillator) in its final position at Z=0

November 2005



ASP, НИТФР, 1-21 Aug 2010
Peter Jenni (CERN)

LHC Dream-Reality-Vision



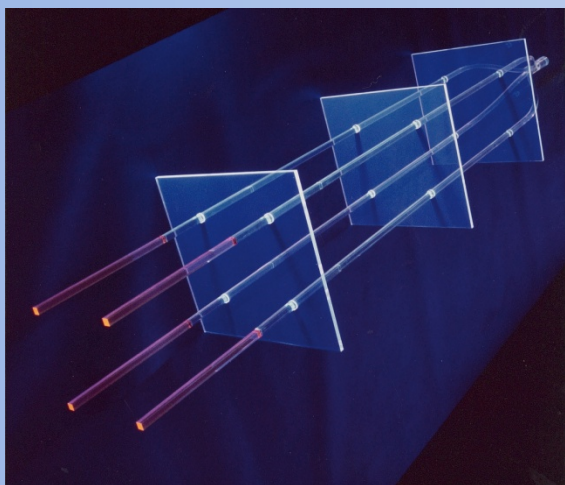
October 2004

46

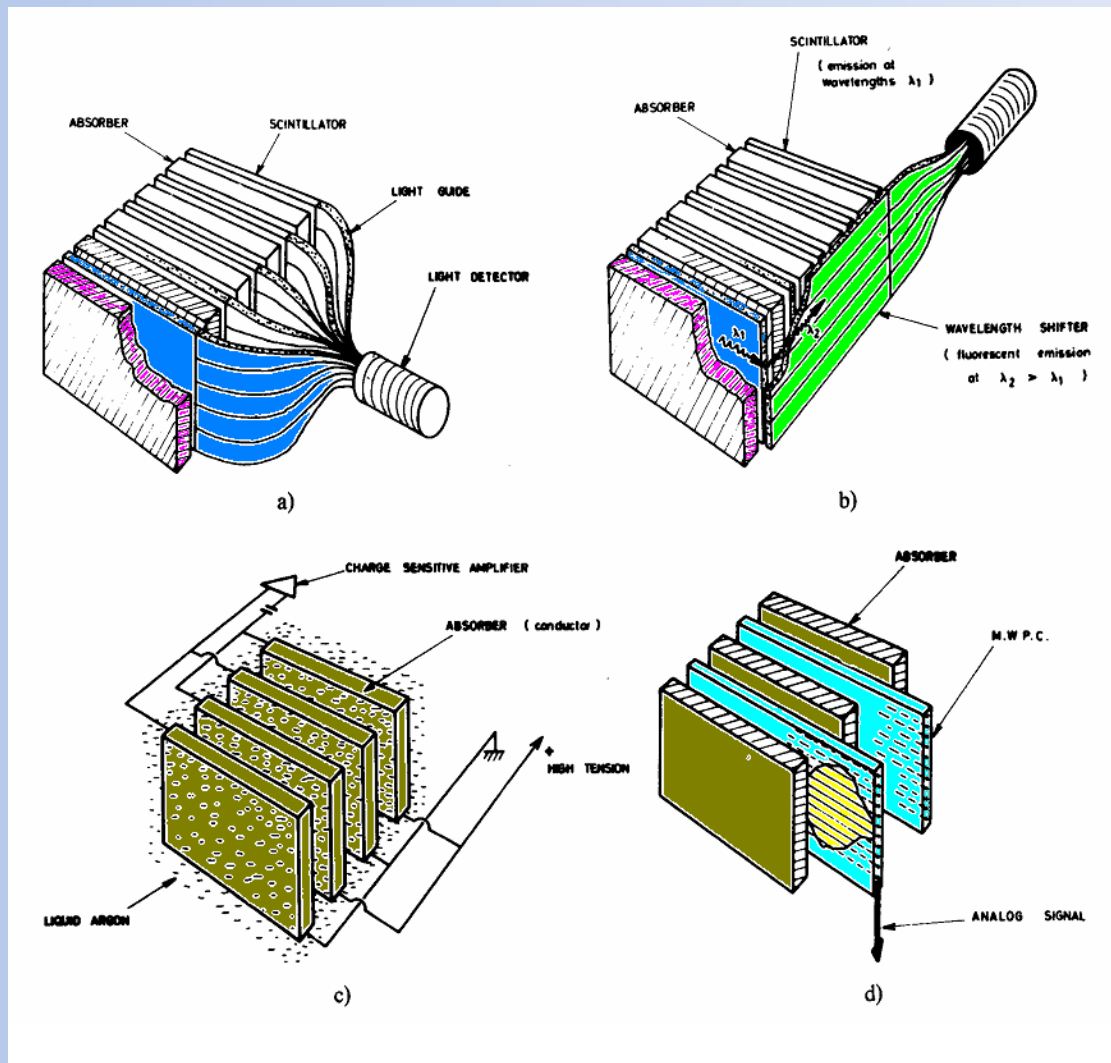
Калориметры

Сэмплинговые – как электромагнитные, так и адронные калориметры

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



Светосбор типа 'Шашлык'



Пример ECAL (сэмплинг)

ATLAS электромагнитный калориметр

Абсорбер с «аккордеонной» геометрией в Liquid Argon



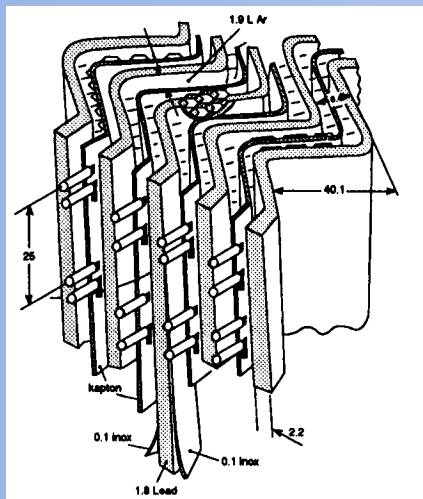
LAr (90 K)

+ свинцово-железный (1-2 mm)

+ многослойная медно-полиамидная плата

= ионизационная камера.

1 GeV E-выделение -> $5 \times 10^6 e^-$



Минимум мертвых зон.

LAr радиационно стойкий.

Плата считывания позволяет тонкую сегментацию.



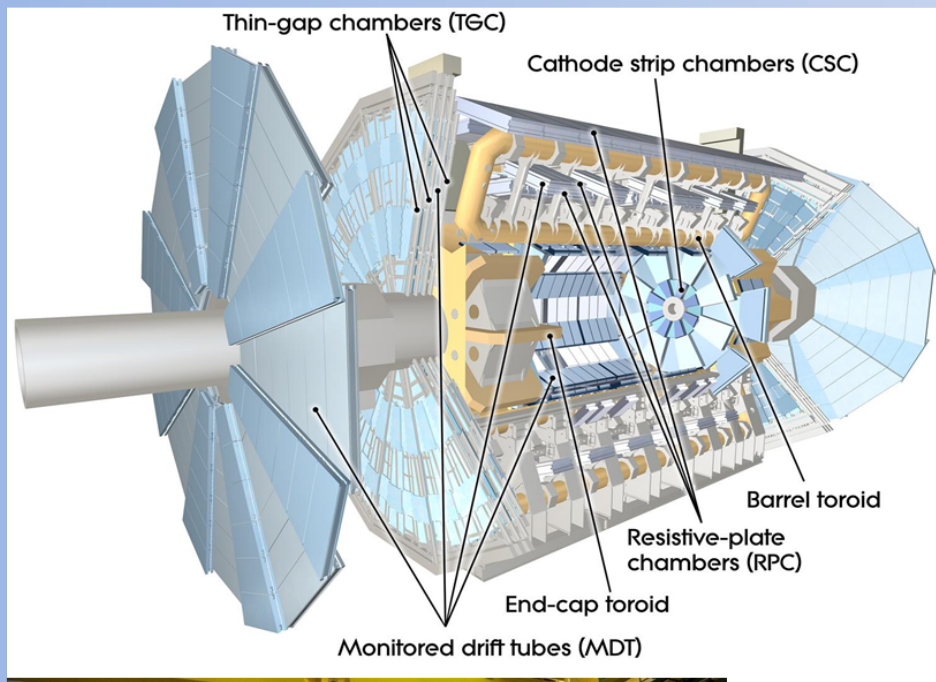
Разрешение

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

Пространственное разрешение

$$5 \text{ mm} / \sqrt{E}$$

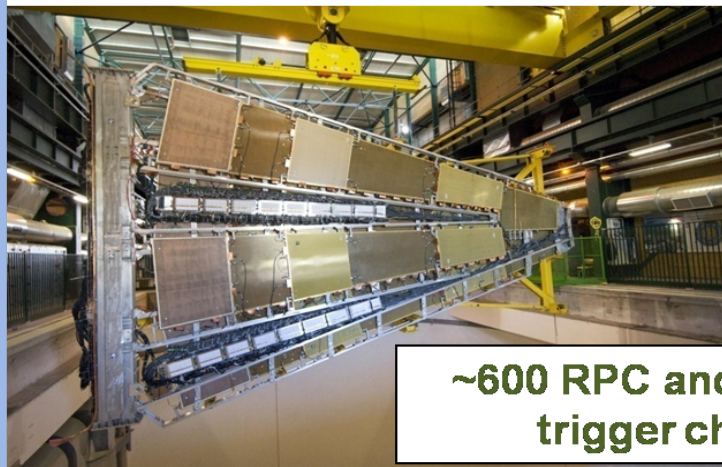
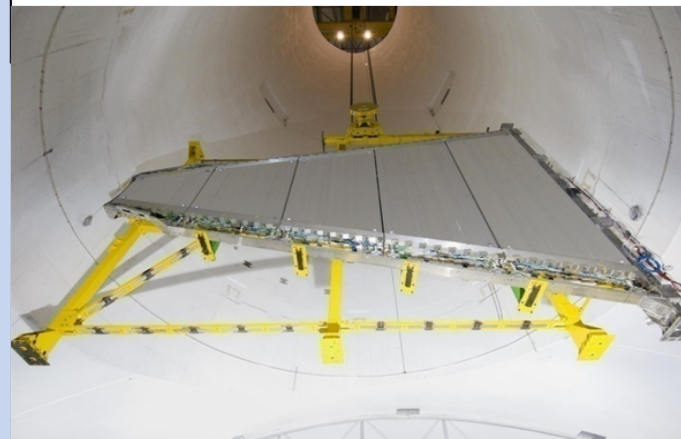
Muon System



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

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

~1200 MDT precision
chambers for track



~600 RPC and ~3600 TGC
trigger chambers

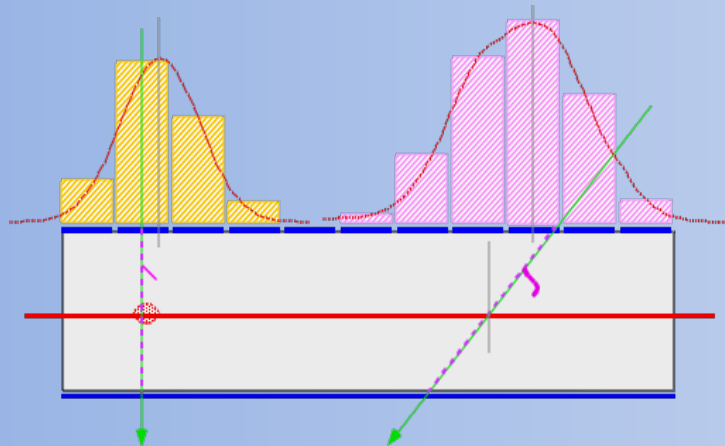
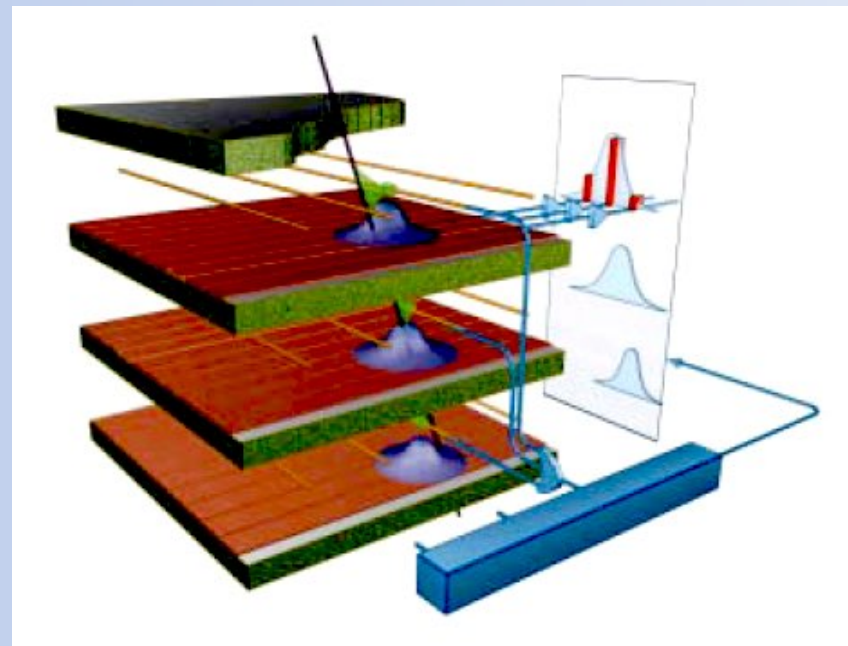


Газовые детекторы

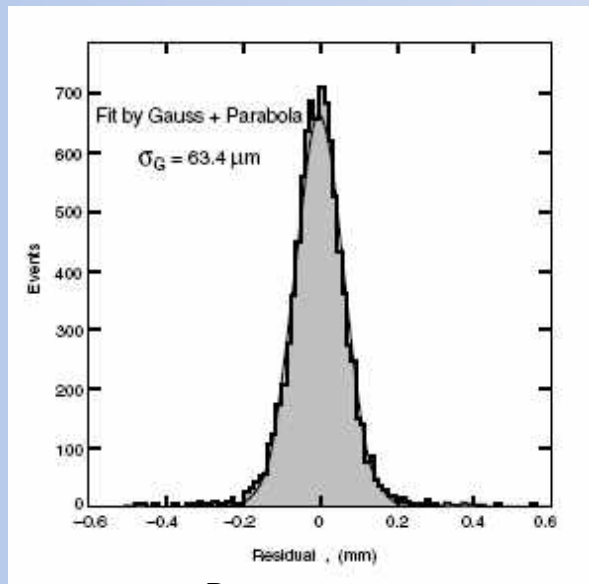
Считывание с катодных стрипов или падов.

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

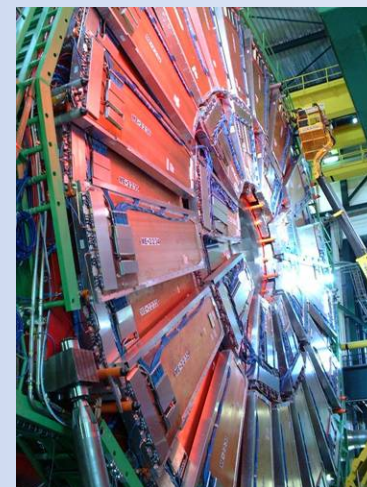
Маленький зазор \rightarrow быстрый детектор.



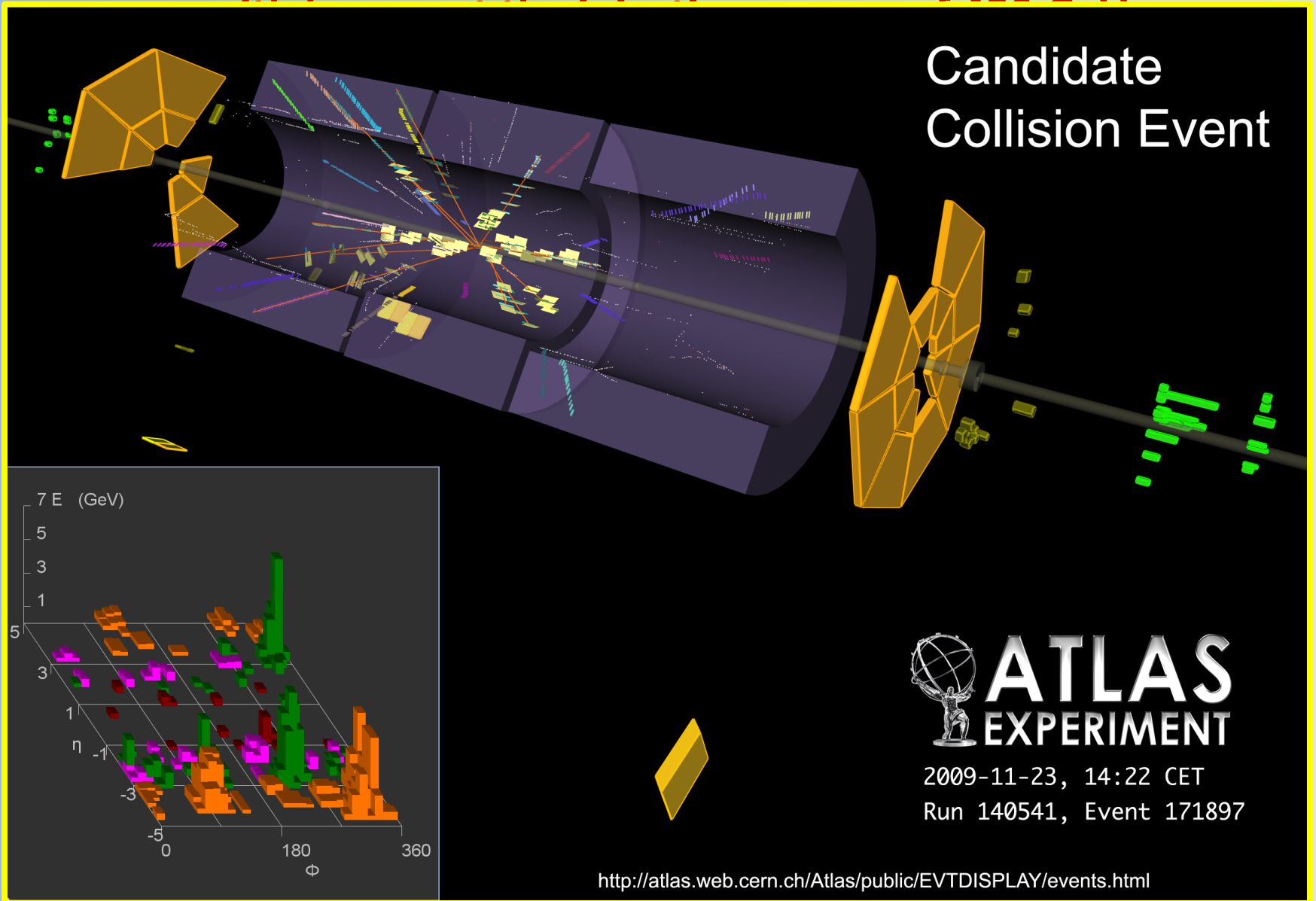
Метод взвешивания
наведенного сигнала.

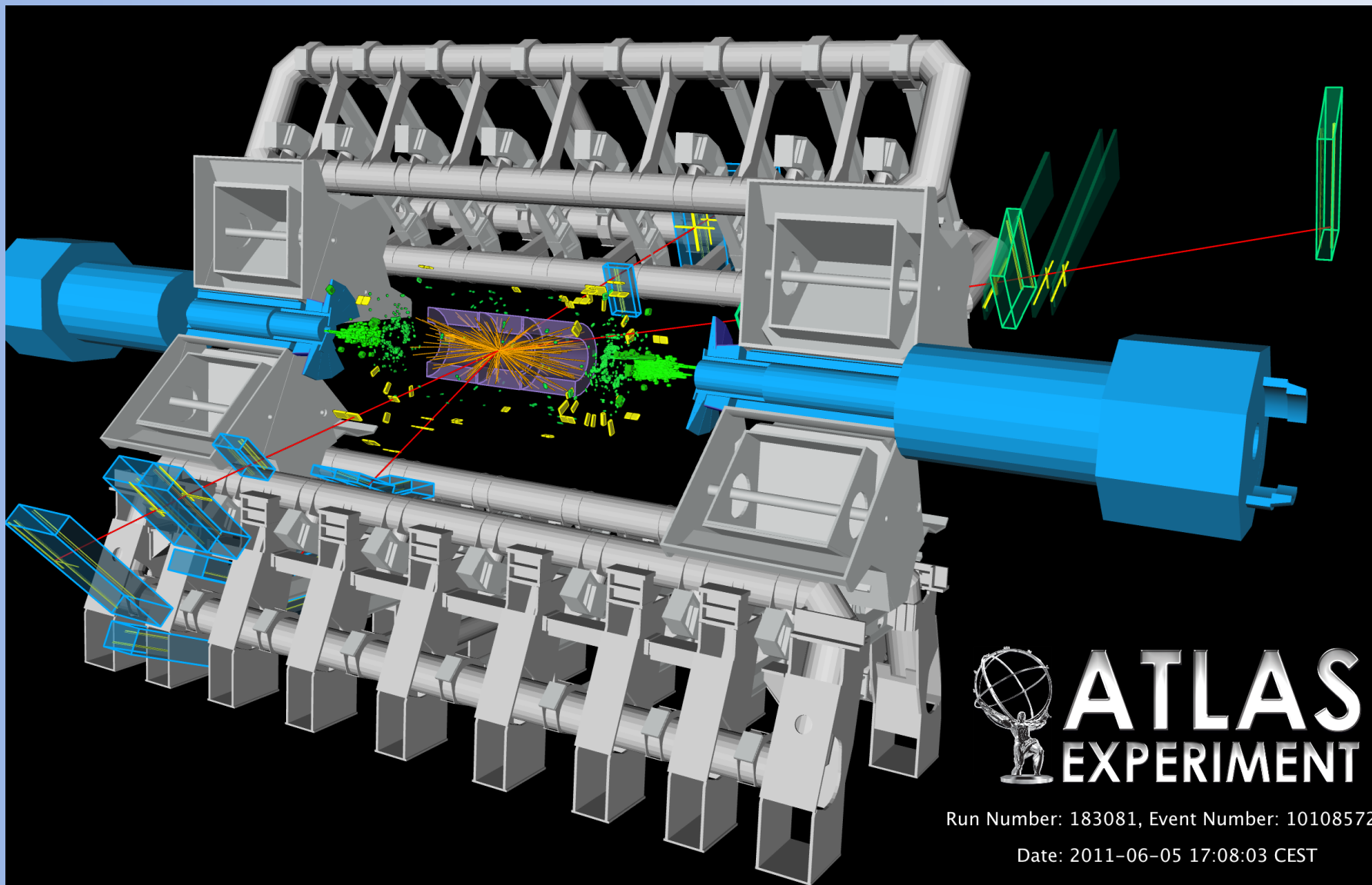


Разрешение



First collisions at the LHC end of November 2009



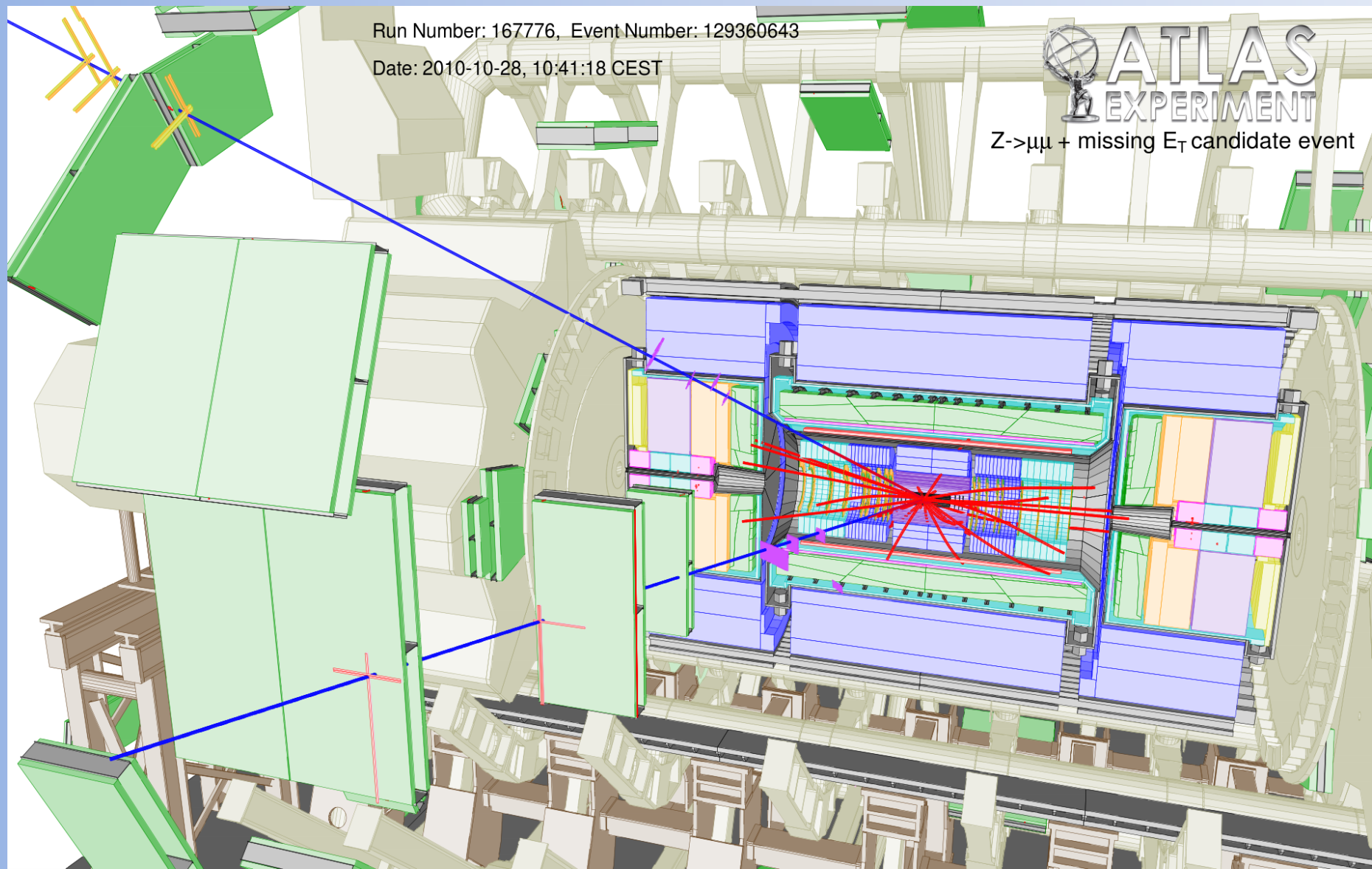


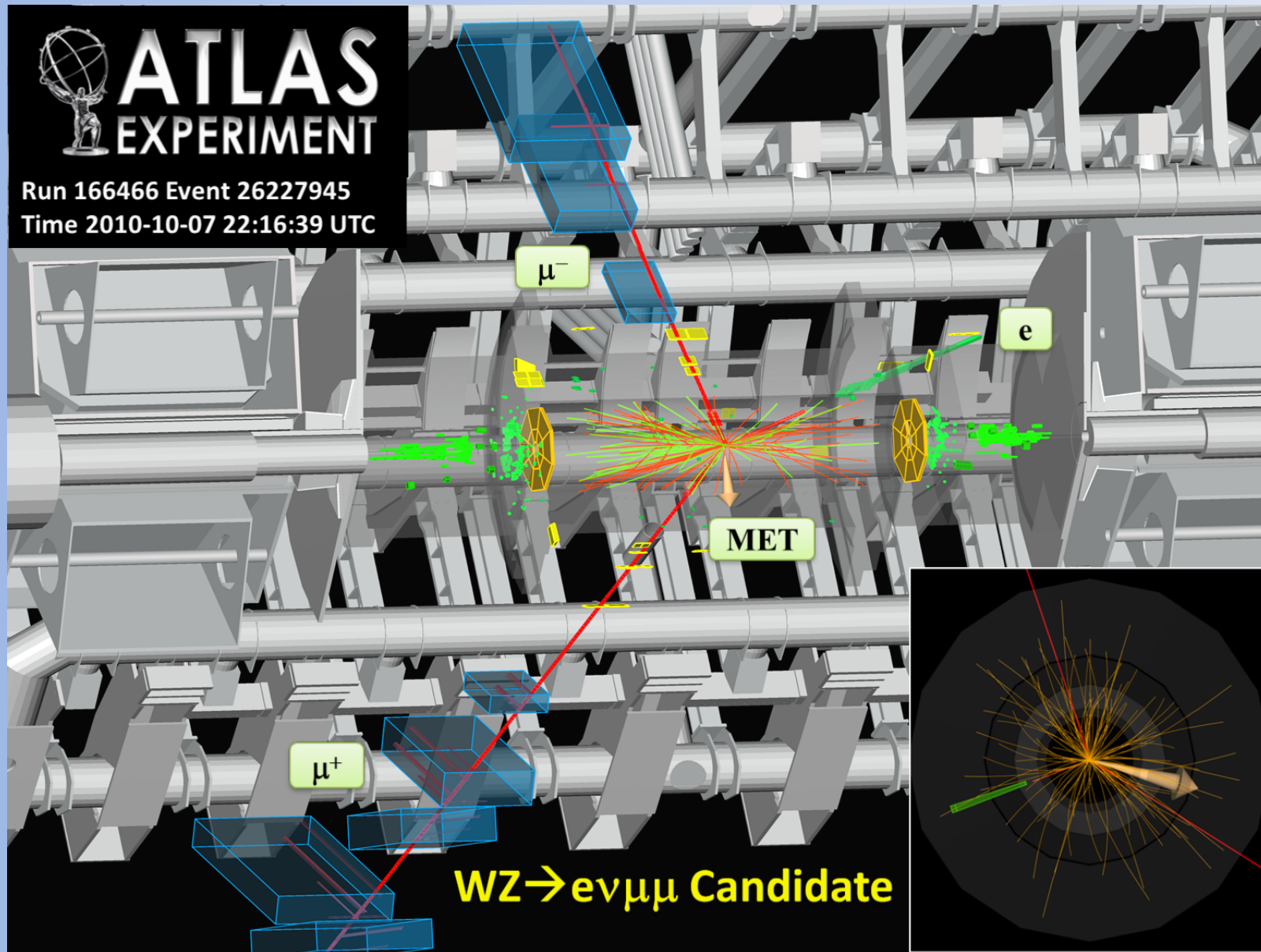
Run Number: 167776, Event Number: 129360643

Date: 2010-10-28, 10:41:18 CEST



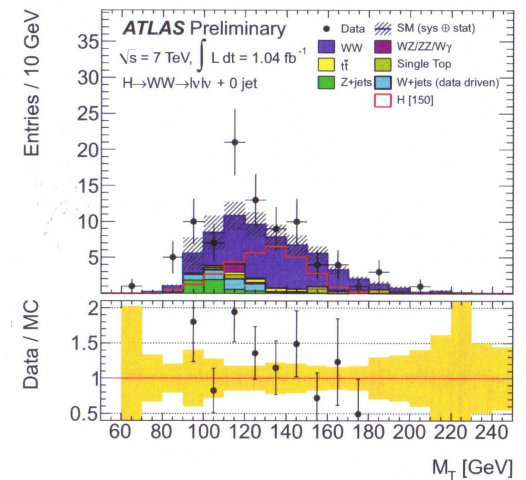
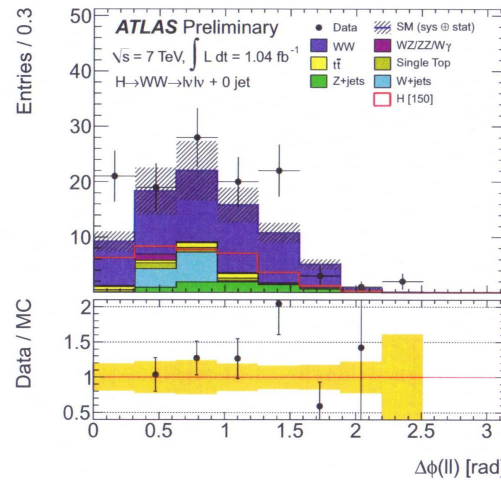
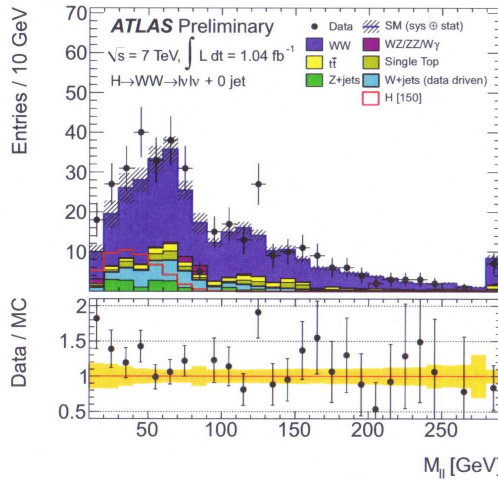
Z \rightarrow $\mu\mu$ + missing E_T candidate event



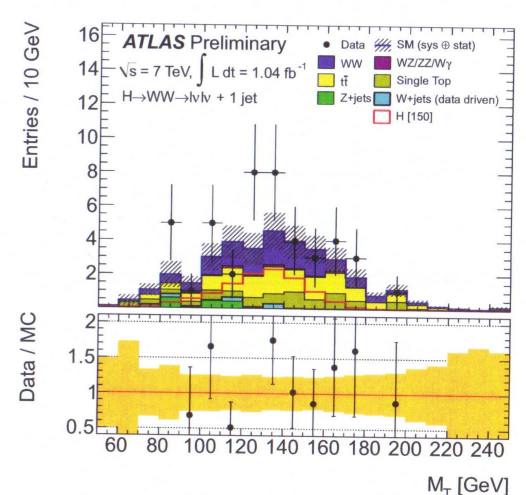
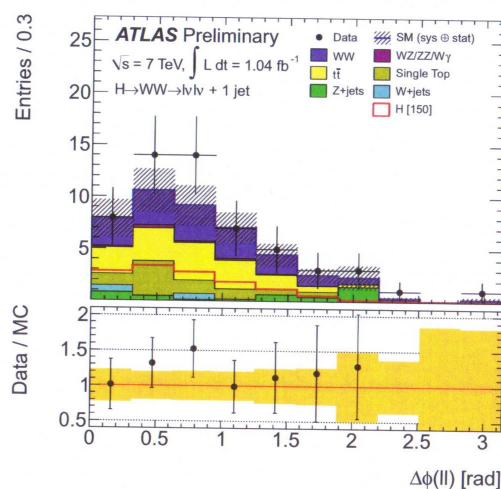
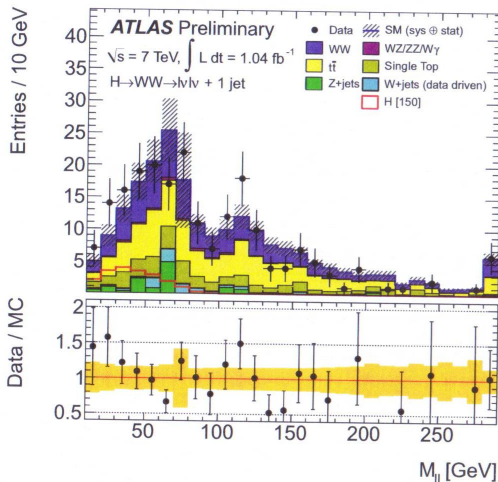




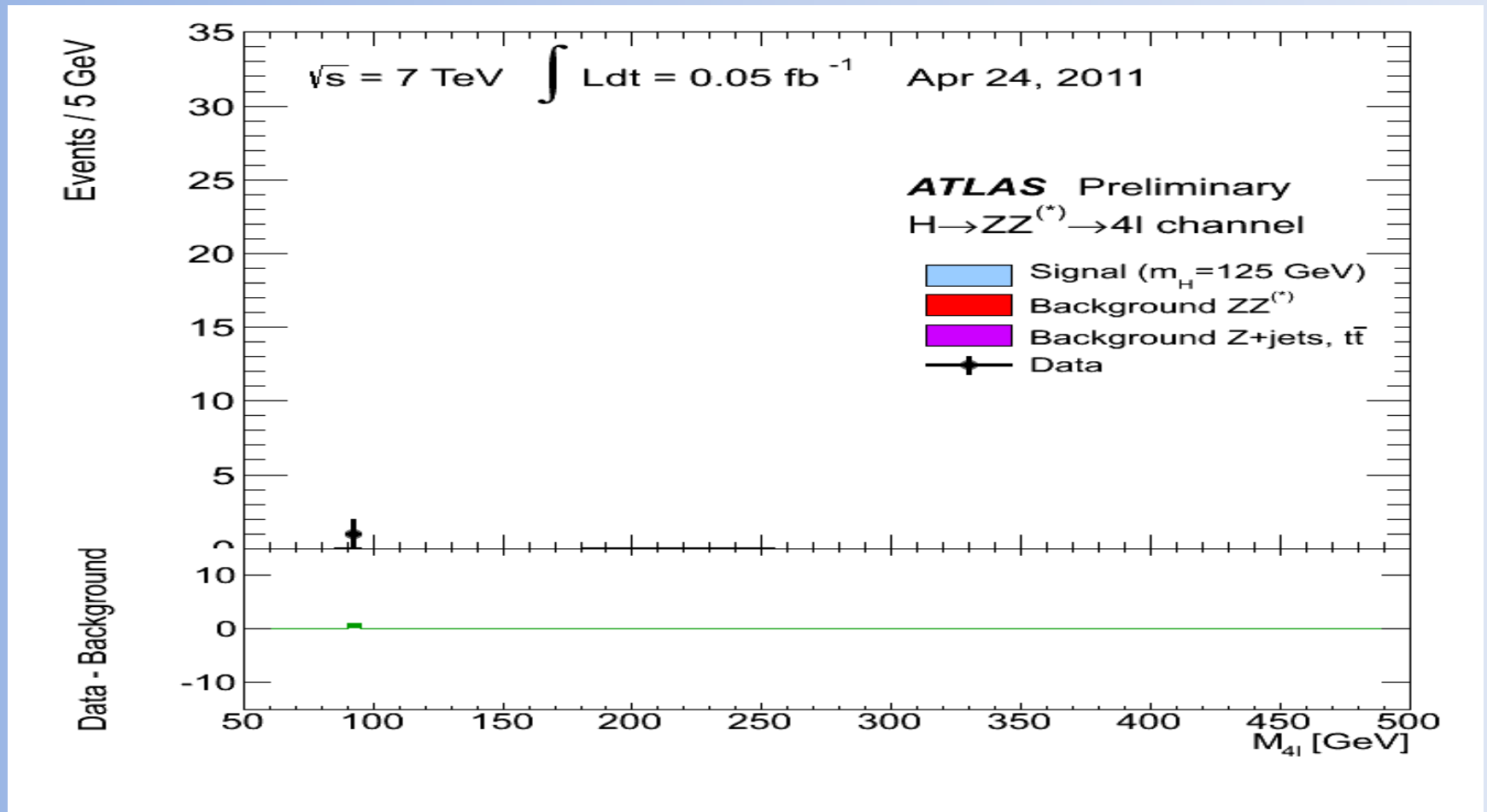
The $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu + 0$ Jet Channel



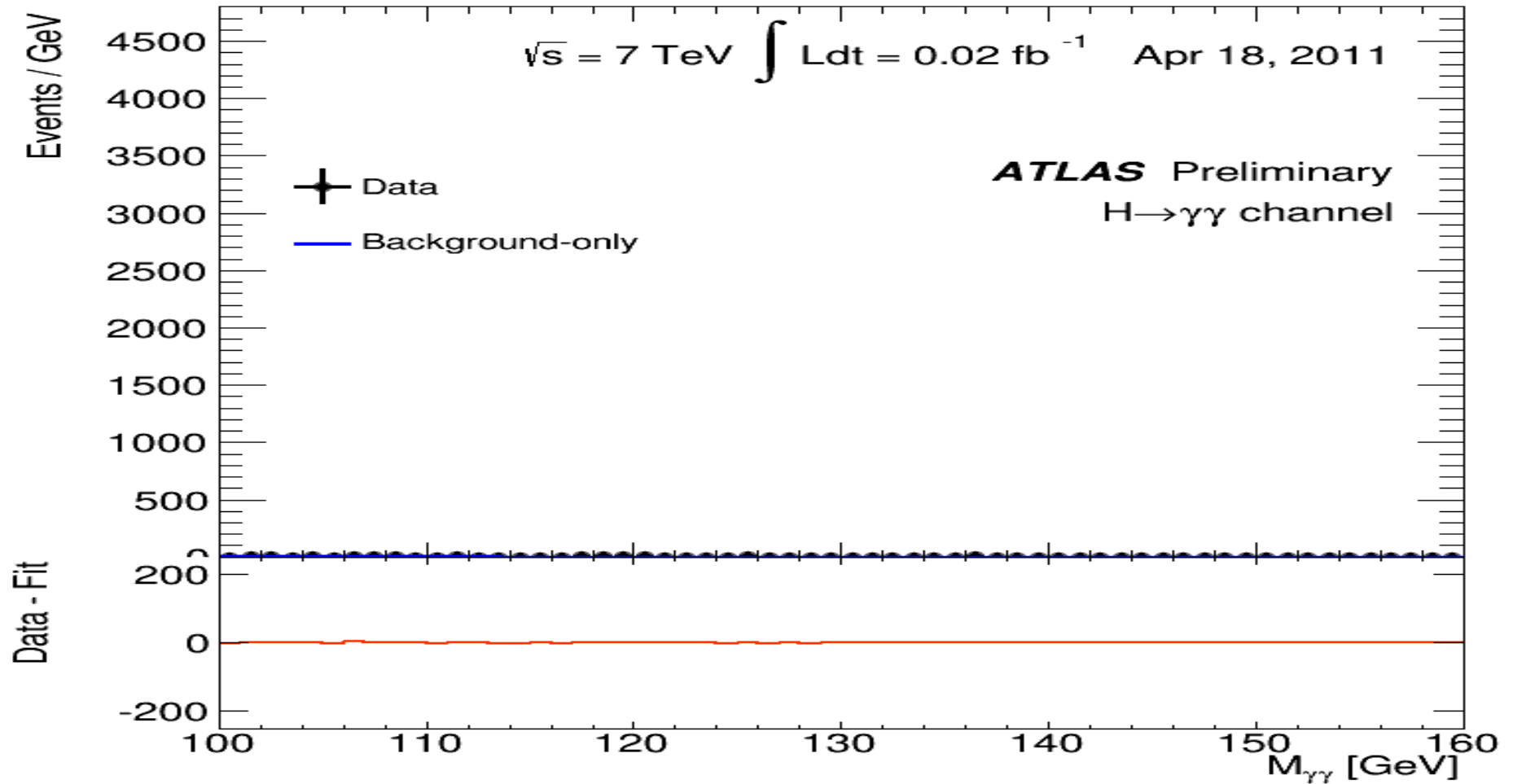
The $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu + 1$ Jet Channel



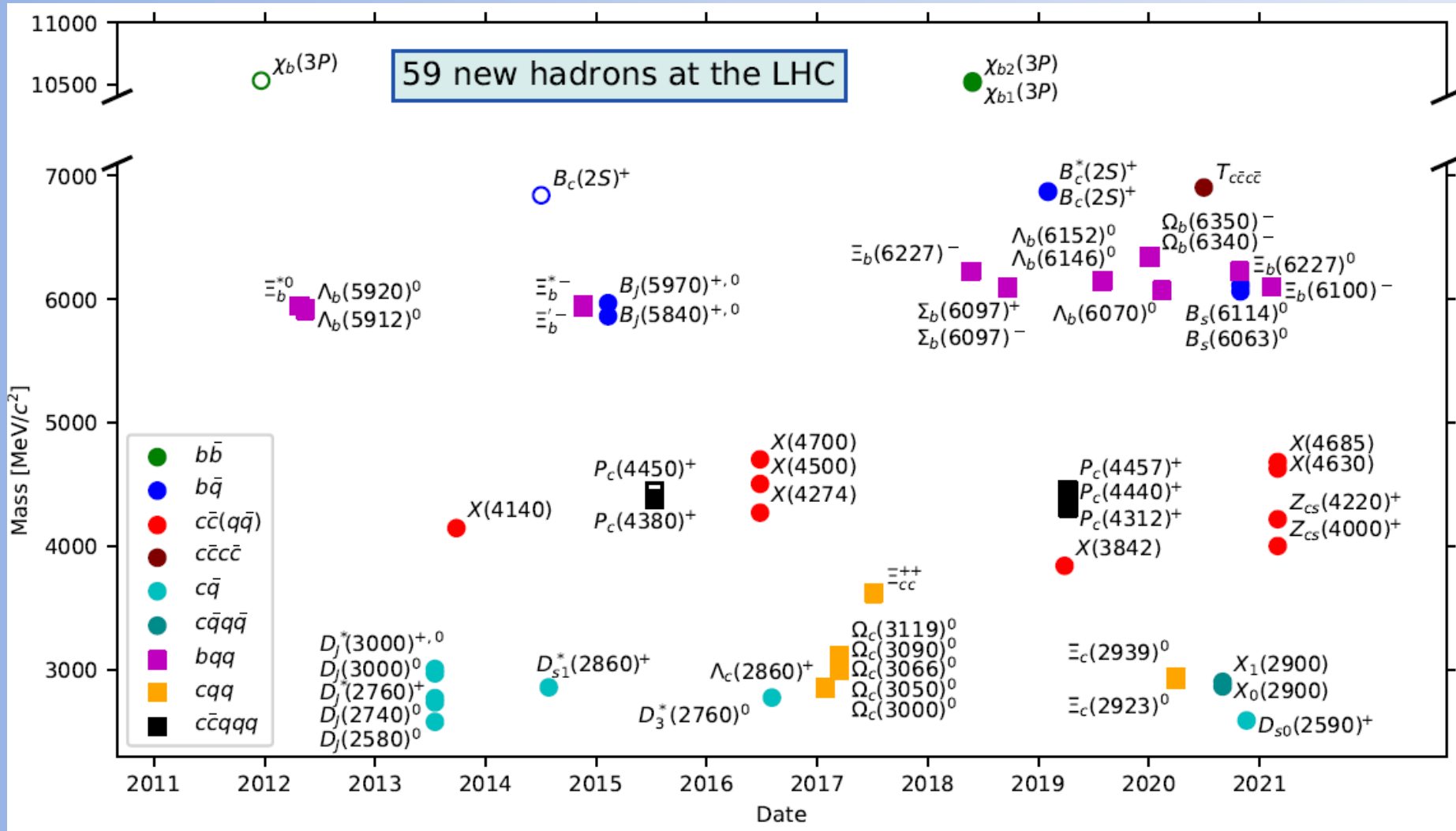
Открытие Хиггс-бозона



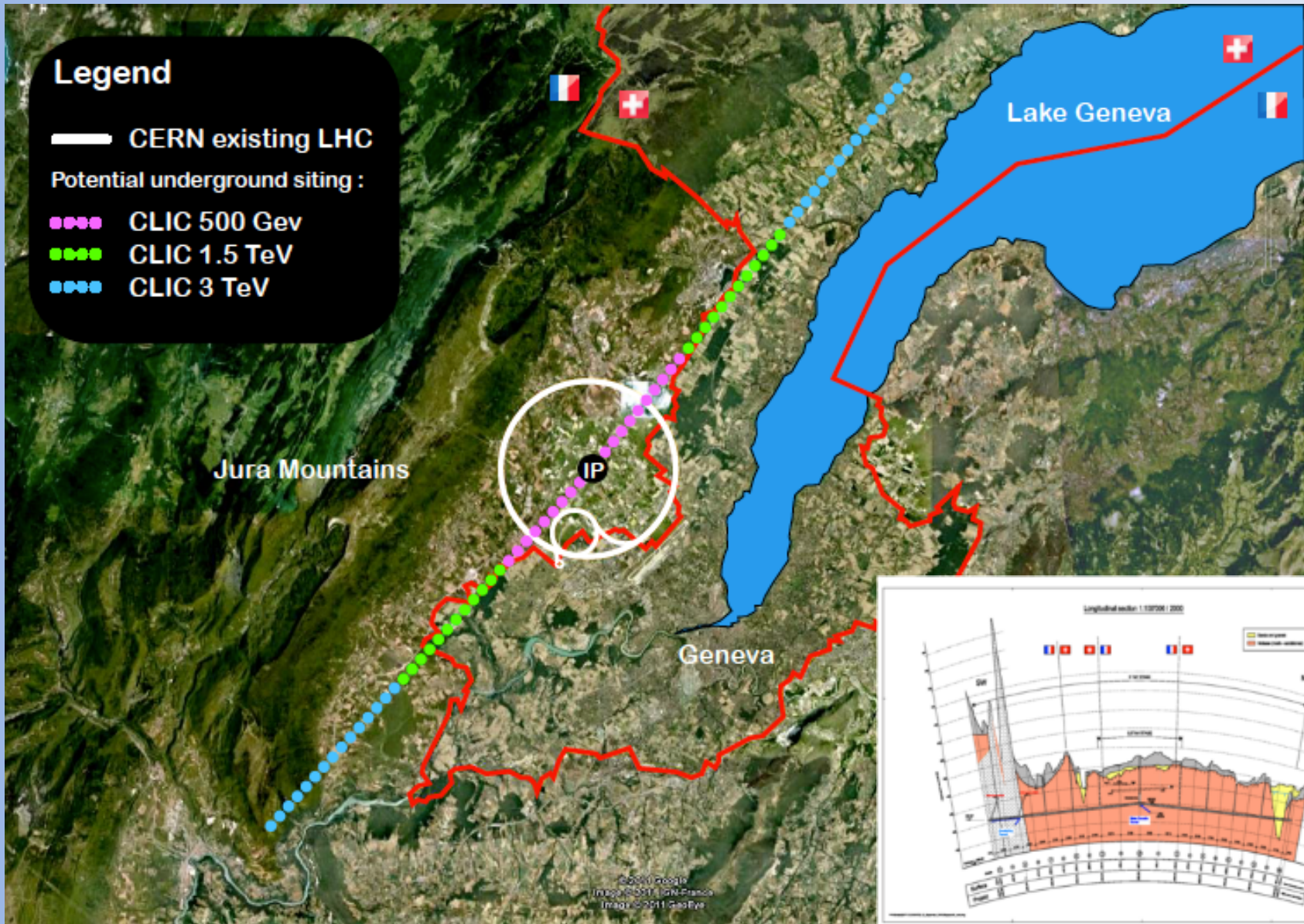
Открытие Хиггс-бозона



Частицы, открытые на LHC



Будущие проекты CERN: CLIC (Compact Linear Collider)



Будущие проекты CERN: FCC (Future Circular Collider)



pp -коллайдер: 16 Т -> 100 ТэВ

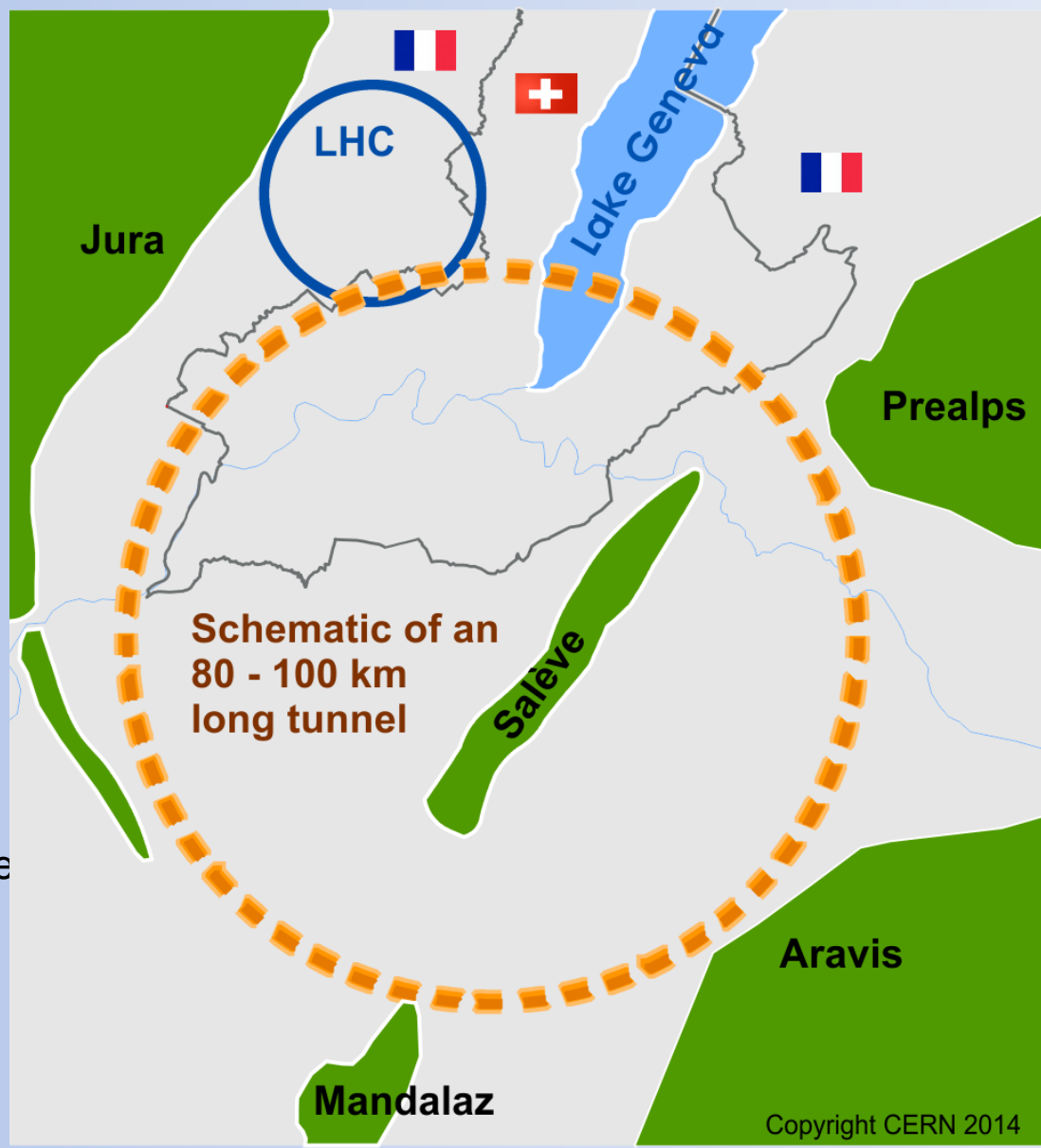
длина туннеля 80-100 км

вариант e^+e^- столкновений

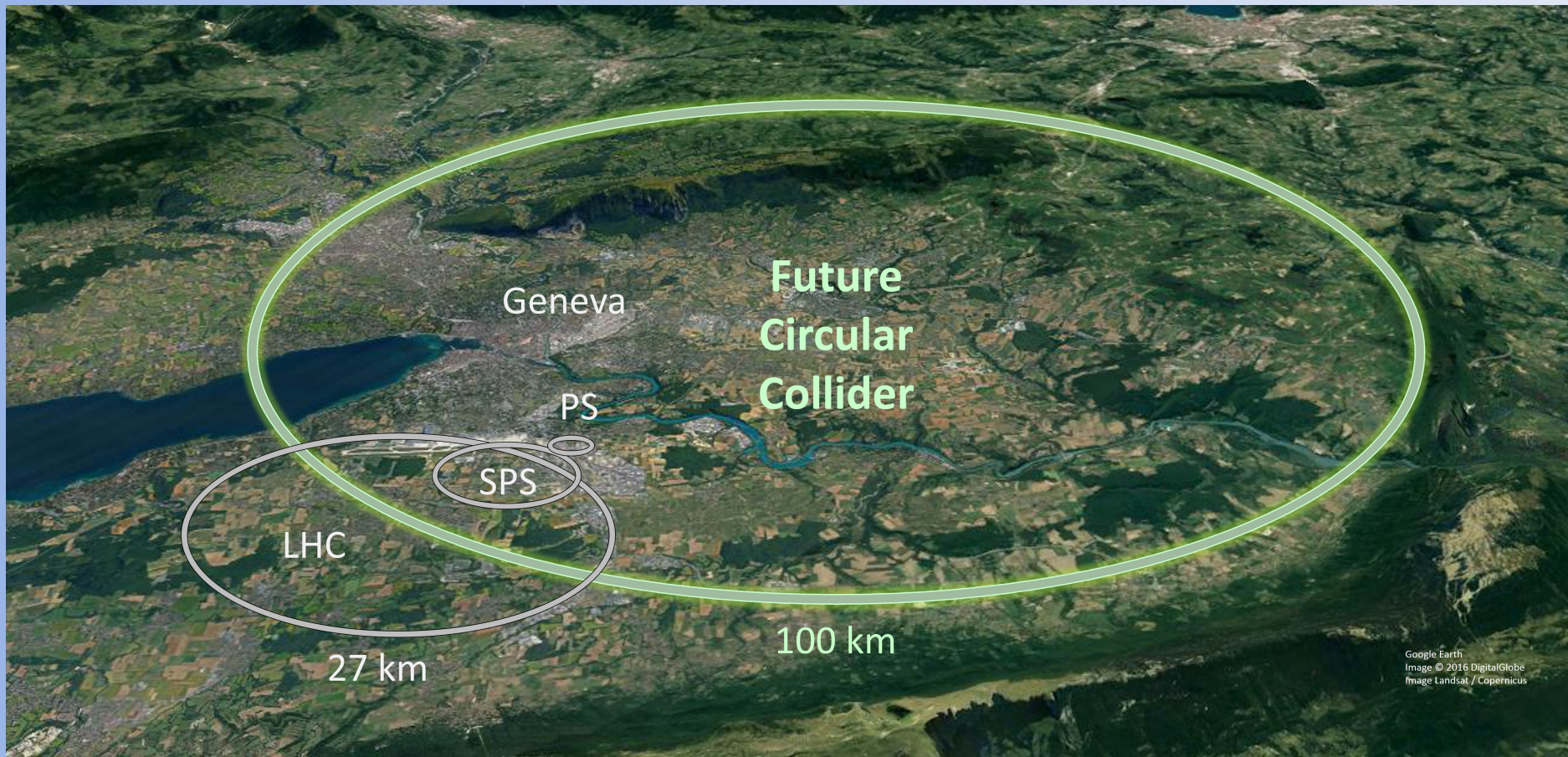
вариант p - e столкновений

Дополнительная информация:

[http://elementy.ru/novosti_nauki/433312/
Kuda_dvigatsya_kollaydernoj_fizike_v_sle
duyushchem_desyatiletii](http://elementy.ru/novosti_nauki/433312/Kuda_dvigatsya_kollaydernoj_fizike_v_sleduyushchem_desyatiletii)



Расположение FCC



Спасибо за
внимание !