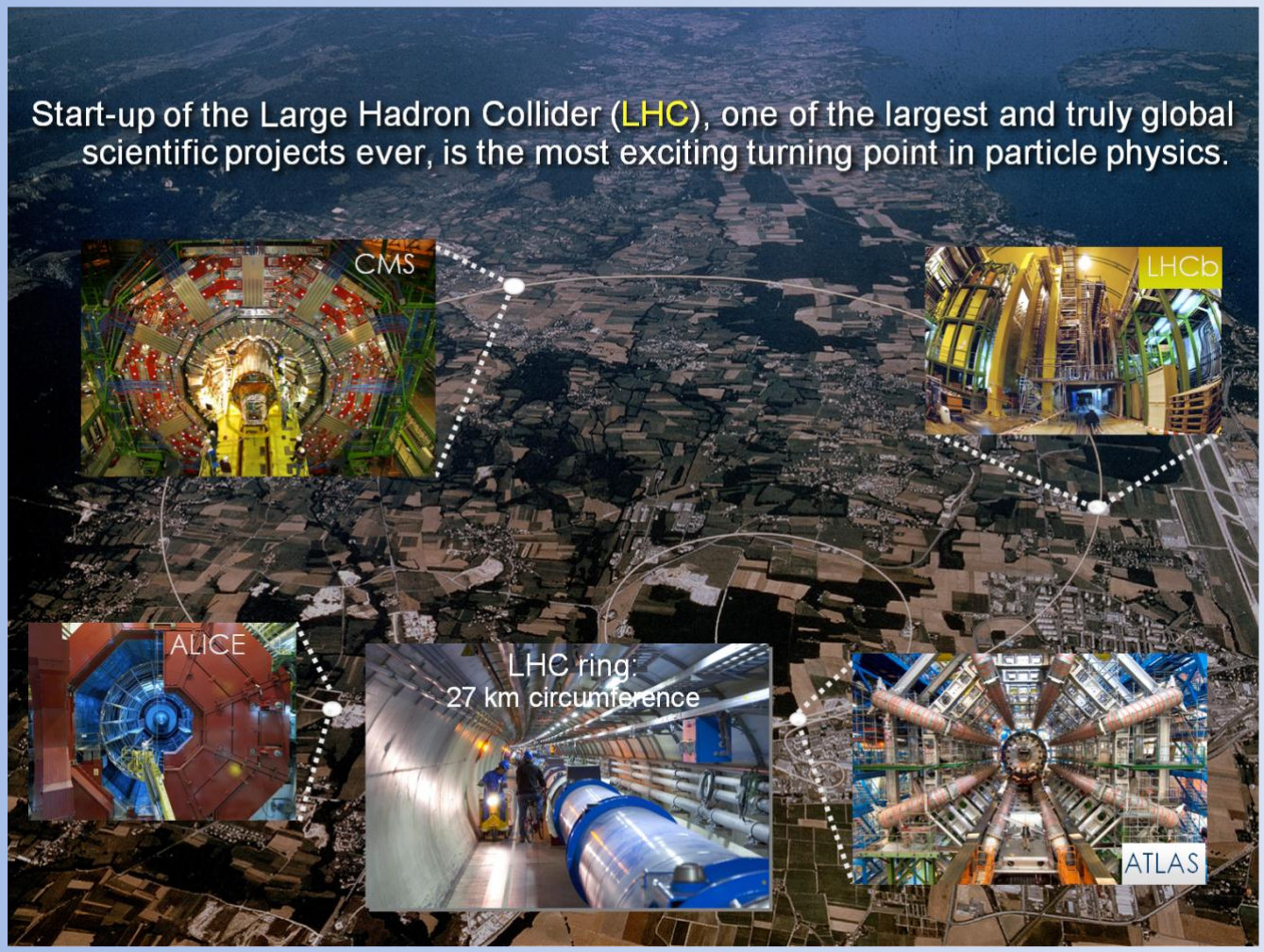
Детектор ATLAS

Николай Зимин



О чем …

Детектор – емкое слово.

Классификаций много.

Принципы регистрации,

типы конструкции.

Комплексы детекторов - Детектор.

Благодарности…

- Christian Goram (CERN, PH)
- Olav Ullaland (CERN, LHCb)
- Werner Riegler (CERN, ALICE)
- Peter Jenni (CERN, ATLAS)
- Herman ten Kate (CERN, ATLAS)
- Daniel Froidevaux (CERN, ATLAS)
- Александр Чеплаков (ОИЯИ, ATLAS)
- Андрей Голутвин (Imperial College, ITEPh, CERN, LHCb)
- Владимир Каржавин (ОИЯИ, CMS)
- Александр Водопьянов (ОИЯИ, ALICE)
- Владимир Рыжов (CERN,ОИЯИ, CMS)

Введение

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

Что для этого надо?

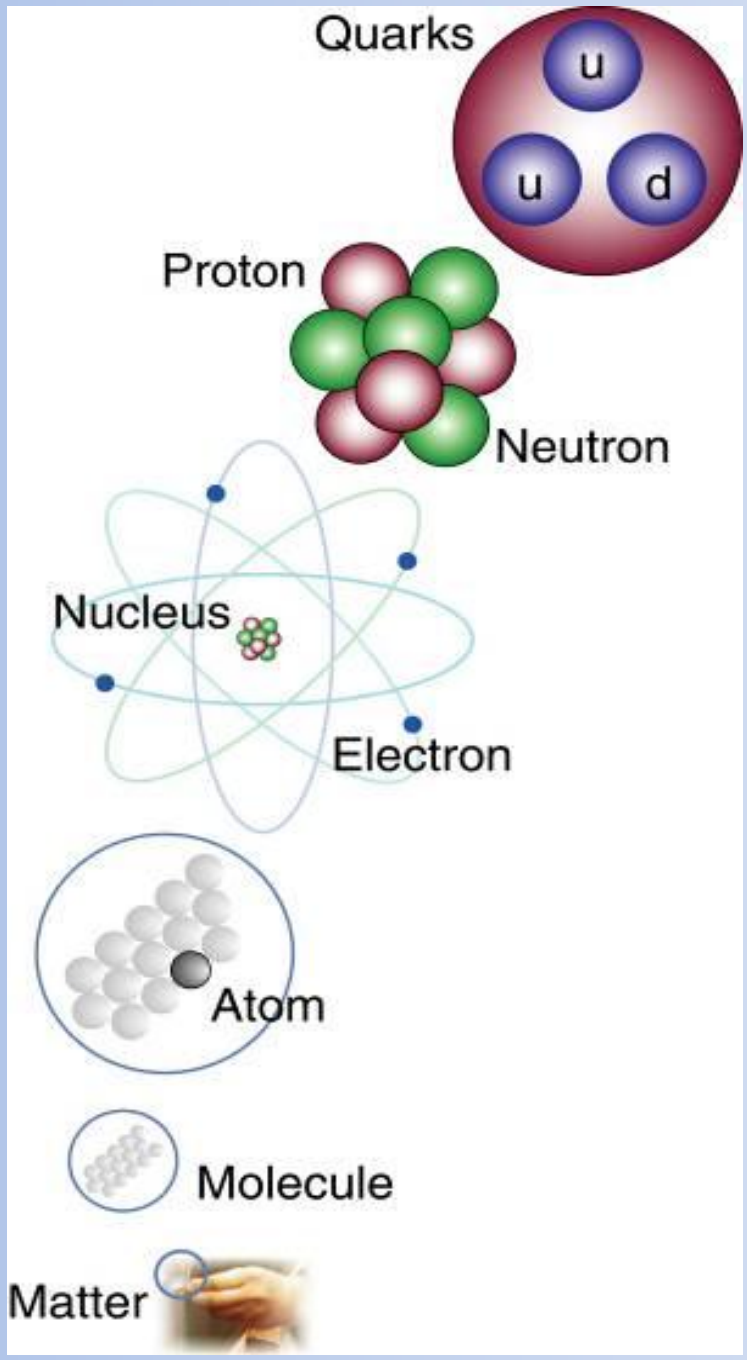
Теория (СМ, SUSY …) или идея Фикс

Ускорители (LEP, Tevatron, LHC, …)

Детекторы (Огромные комплексы...)

Введение

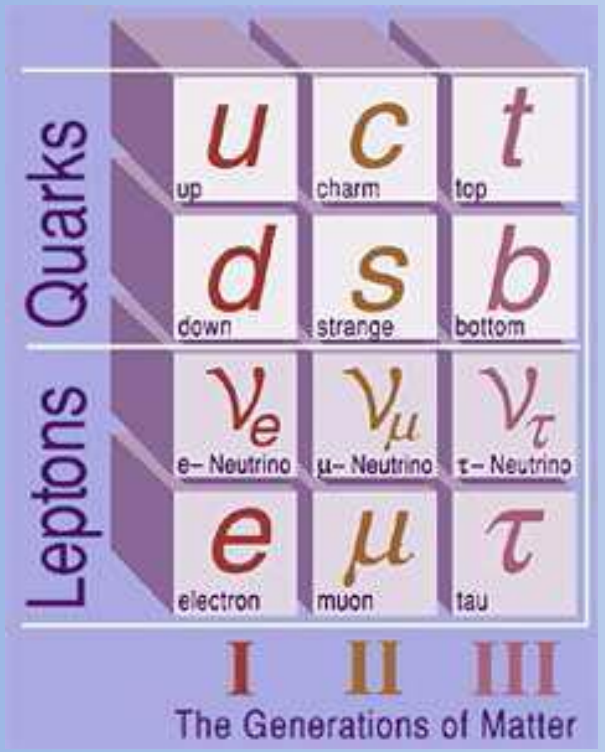
Quarks (Gell-Mann)
1964



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.



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:

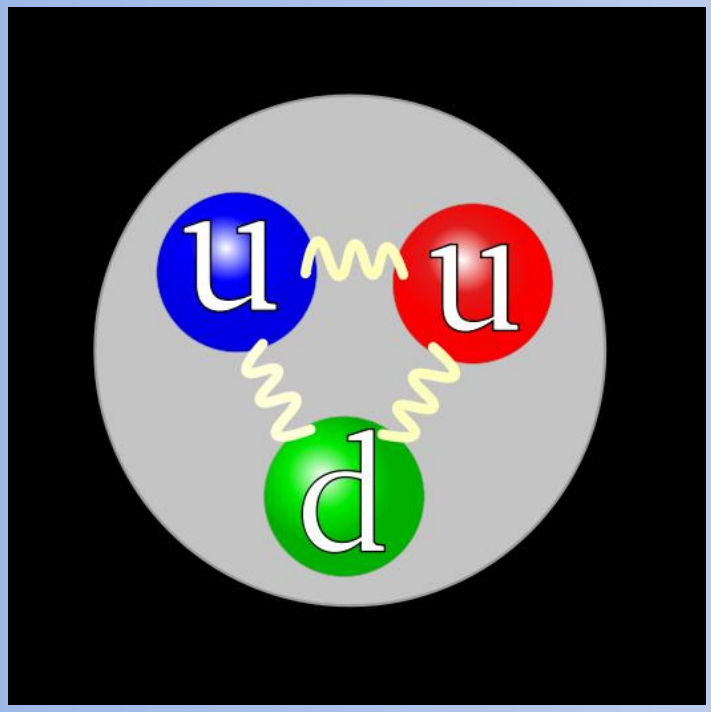
$\alpha_{em} = 1/137.03599976(50)$

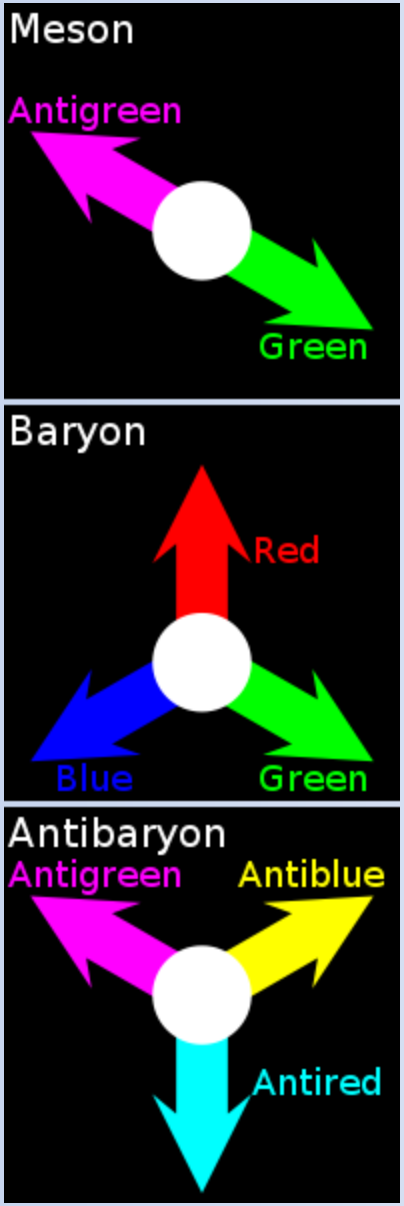
$G_\mu = 1.16639(1) \cdot 10{-}5\ \mathrm{GeV}{-}2$

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

Введение
(From Wikipedia)

All known particles can be constructed in such a manner.
Colours for quarks !!! QCD

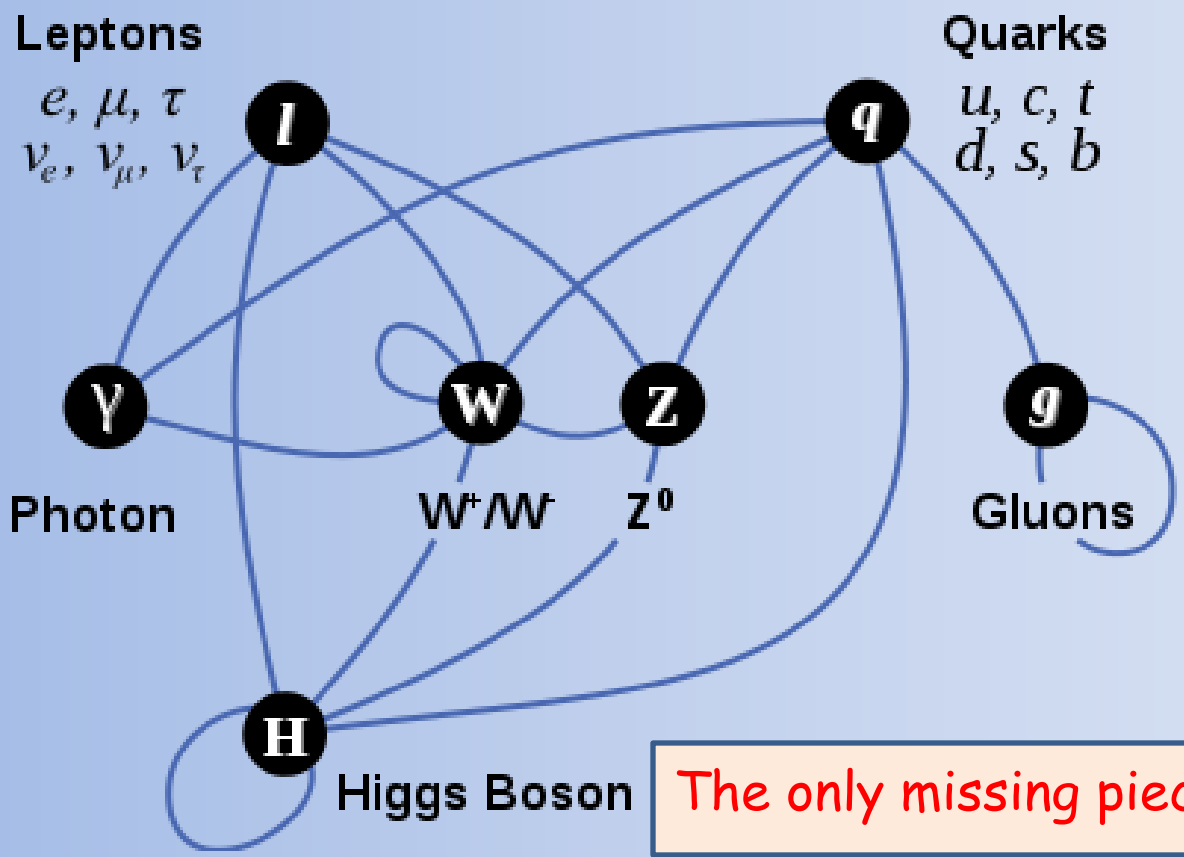




Введение

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)



The only missing piece of the SM

Введение

Суперсимметрия (SUSY)

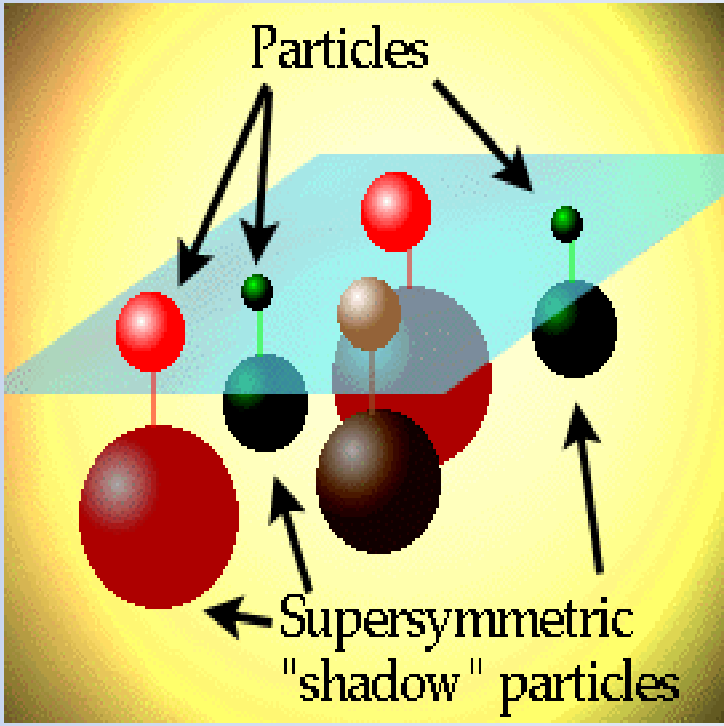
(Julius Wess and Bruno Zumino, 1974)

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

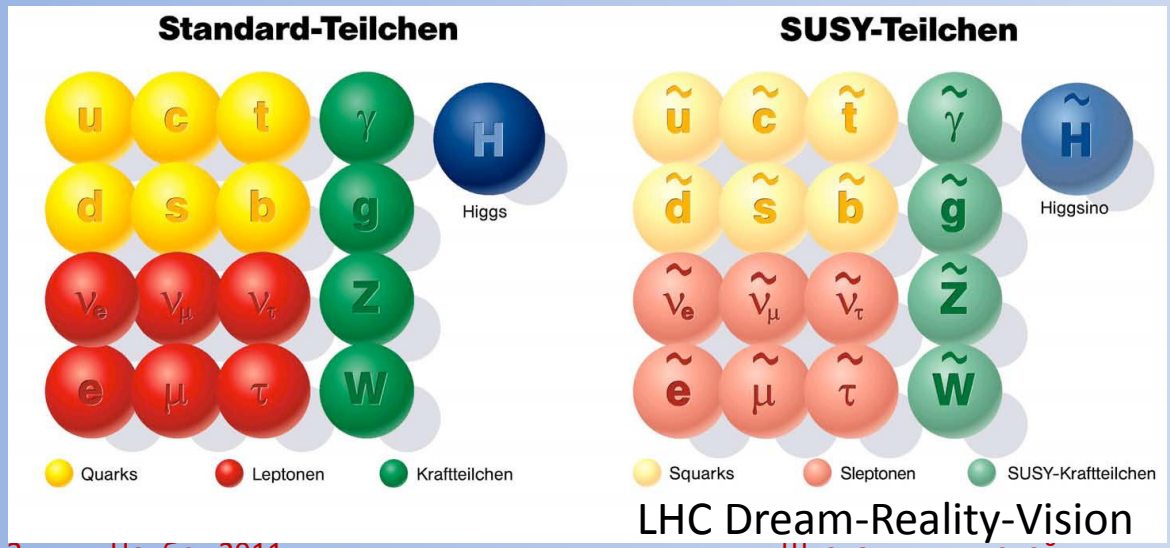
- Each particle p with spin s has a SUSY partner $\tilde{p}$ with spin s -1/2

- Examples **q (s=1/2) → $\tilde{q}$ (s=0) squark**

g (s=1) → $\tilde{g}$ (s=1/2) gluino



Our known world **Maybe a new world?**



LHC Dream-Reality-Vision

Motivation:

- Unification (fermions-bosons, matter-forces)

- Solves some deep problems of the Standard Model

Введение

Что мы меньше знаем пока…

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

-Черная материя

-Суперсимметрия

-Extra dimensions of space

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.

-Унификация сил

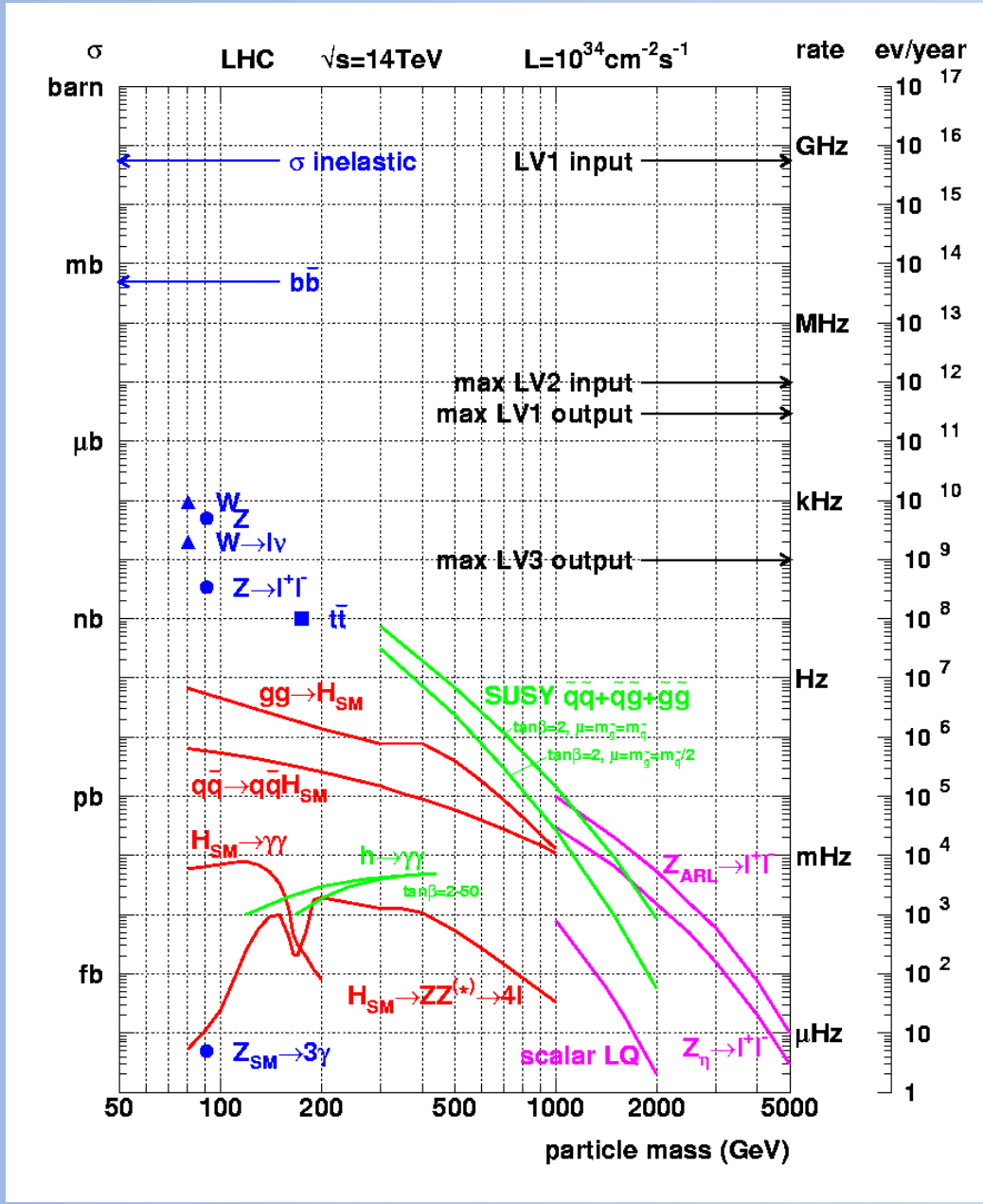
- Новые силы

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

- Антиматерия

Will explore the tiny difference that exist between matter and antimatter

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

18

http://pdg.lbl.gov ~ 180 Selected Particles

γ, $W^{\pm}$, Z^0, g, e, μ, τ, ν_e, ν_μ, ν_τ, $\pi^{\pm}$, π^0, η, $f_0(660)$, $\rho(770)$,
$\omega(782)$, $\eta'(958)$, $f_0(980)$, $a_0(980)$, $\phi(1020)$, $h_1(1170)$, $b_1(1235)$,
$a_1(1260)$, $f_2(1270)$, $f_1(1285)$, $\eta(1295)$, $\pi(1300)$, $a_2(1320)$,
$f_0(1370)$, $f_1(1420)$, $\omega(1420)$, $\eta(1440)$, $a_0(1450)$, $\rho(1450)$,
$f_0(1500)$, $f_2'(1525)$, $\omega(1650)$, $\omega_3(1670)$, $\pi_2(1670)$, $\phi(1680)$,
$\rho_3(1690)$, $\rho(1700)$, $f_0(1710)$, $\pi(1800)$, $\phi_3(1850)$, $f_2(2010)$,
$a_4(2040)$, $f_4(2050)$, $f_2(2300)$, $f_2(2340)$, $K^{\pm}$, K^0, K^0_S, K^0_L, $K^*(892)$,
$K_1(1270)$, $K_1(1400)$, $K^*(1410)$, $K_0^*(1430)$, $K_2^*(1430)$, $K^*(1680)$,
$K_2(1770)$, $K_3^*(1780)$, $K_2(1820)$, $K_4^*(2045)$, $D^{\pm}$, D^0, $D^*(2007)^0$,
$D^*(2010)^{\pm}$, $D_1(2420)^0$, $D_2^*(2460)^0$, $D_2^*(2460)^{\pm}$, $D_s^{\pm}$, $D_s^{*\pm}$,
$D_{s1}(2536)^{\pm}$, $D_{sJ}(2573)^{\pm}$, $B^{\pm}$, 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, $N(1440)$,
$N(1520)$, $N(1535)$, $N(1650)$, $N(1675)$, $N(1680)$, $N(1700)$, $N(1710)$,
$N(1720)$, $N(2190)$, $N(2220)$, $N(2250)$, $N(2600)$, $\Delta(1232)$, $\Delta(1600)$,
$\Delta(1620)$, $\Delta(1700)$, $\Delta(1905)$, $\Delta(1910)$, $\Delta(1920)$, $\Delta(1930)$, $\Delta(1950)$,
$\Delta(2420)$, Λ, $\Lambda(1405)$, $\Lambda(1520)$, $\Lambda(1600)$, $\Lambda(1670)$, $\Lambda(1690)$,
$\Lambda(1800)$, $\Lambda(1810)$, $\Lambda(1820)$, $\Lambda(1830)$, $\Lambda(1890)$, $\Lambda(2100)$,
$\Lambda(2110)$, $\Lambda(2350)$, Σ^+, Σ^0, Σ^-, $\Sigma(1385)$, $\Sigma(1660)$, $\Sigma(1670)$,
$\Sigma(1750)$, $\Sigma(1775)$, $\Sigma(1915)$, $\Sigma(1940)$, $\Sigma(2030)$, $\Sigma(2250)$, Ξ^0, Ξ^-,
$\Xi(1530)$, $\Xi(1690)$, $\Xi(1820)$, $\Xi(1950)$, $\Xi(2030)$, Ω^-, $\Omega(2250)^-$,
Λ_c^+, Λ_c^+, $\Sigma_c(2455)$, $\Sigma_c(2520)$, Ξ_c^+, Ξ_c^0, $\Xi_c'^+$, $\Xi_c'^0$, $\Xi(2645)$
$\Xi_c(2790)$, $\Xi_c(2815)$, Ω_c^0, Λ_b^0, Ξ_b^0, Ξ_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

$$\gamma, e, \mu, \pi, K, p, n$$

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

Если после этого, частица не сильно меняет свои свойства, взаимодествие 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, Комптоновское рассеяние,
Рождение пары электрон-позитрон

Адроны: Неупругие ядерные процессы, нейтроны

Мюоны: Ионизационные потери, слабое взаимодействие

Каскады

Для элетронов и фотонов
Электро-магнитные ливни

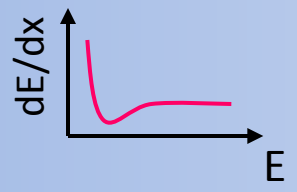
Для адронов
Адронные ливни

Взаимодействие частиц с веществом

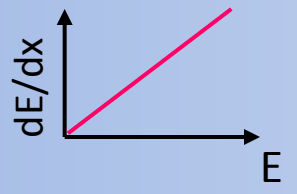
Заряженные частицы и фотоны

e^+ / e^-

- Ионизация

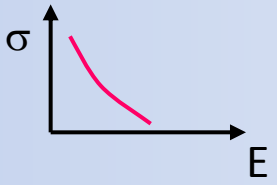


- Тормозное излучение

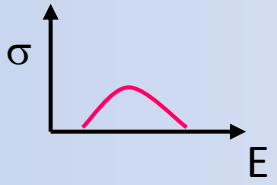


γ

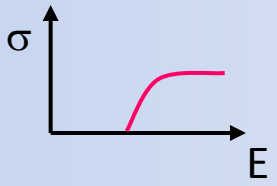
- Фото-эффект



- Эффект Комптона

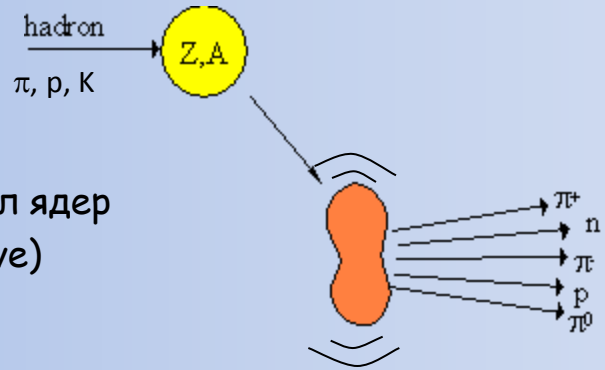


- Рождение пар



Ядерные взаимодействия

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



множественность $\propto \ln(E)$

$p_t \approx 0.35$ GeV/c

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**…).

$$\sigma_{inel} \approx \sigma_0 A^{0.7} \qquad \sigma_0 \approx 35\, mb$$

По аналогии с X_0 вводится адронная длина поглощения

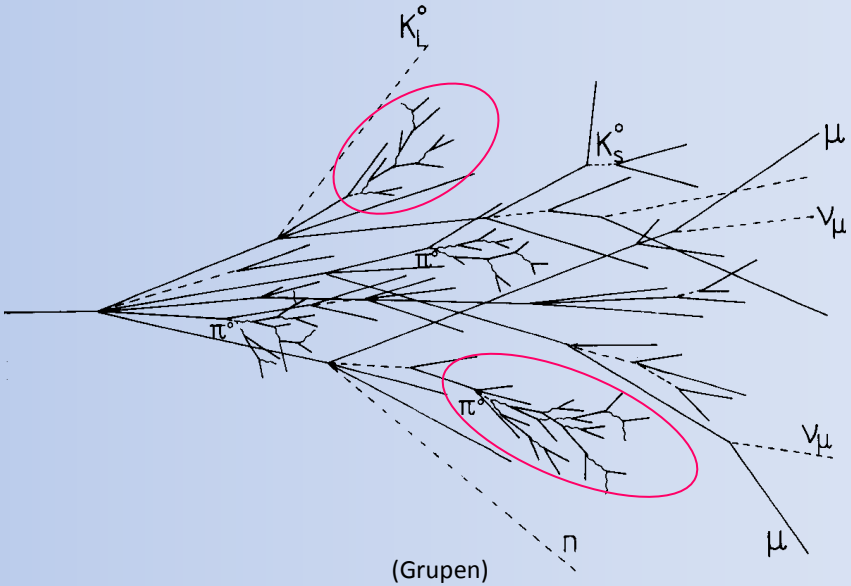
$$\lambda_a = \frac{A}{N_A \sigma_{inel}} \propto A^{\frac{1}{4}} \quad \text{because} \quad \sigma_{inel} \approx \sigma_0 A^{0.7}$$

и ядерная длина взаимодействия

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

Адронные ливни

Вовлечены разнообразные процессы.
Намного более сложная картина по сравнению с электромагнитными каскадами.



Адронный ливень включает 2 компоненты:

адронную + **электромагнитную**

↓

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

Ядерные фрагменты ….

От развала ядер (энергия связи)

нейтроны, нейтрино, мягкие γ, мюоны

↓

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

$\rightarrow$ электромагнитные каскады

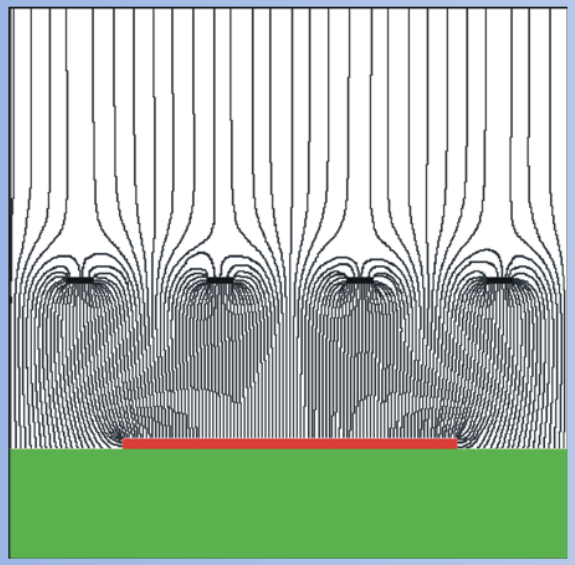
$$n(\pi^0) \approx \ln E(GeV) - 4.6$$

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

невидимая энергия $\rightarrow$ большие флуктуации $\rightarrow$ энергетическое разрешение

Detector Simulation

Electric Fields in a Micromega Detector

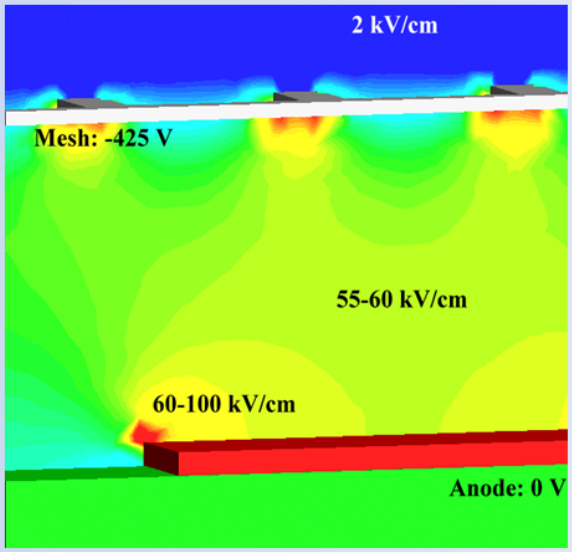


Very accurate simulations of particle detectors are possible due to availability of Finite Element simulation programs and computing power.

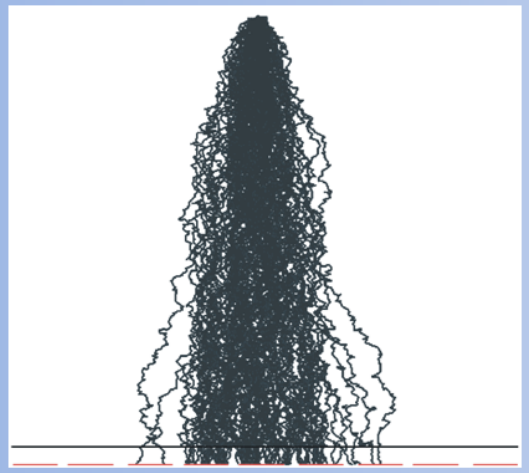
Follow every single electron by applying first principle laws of physics.

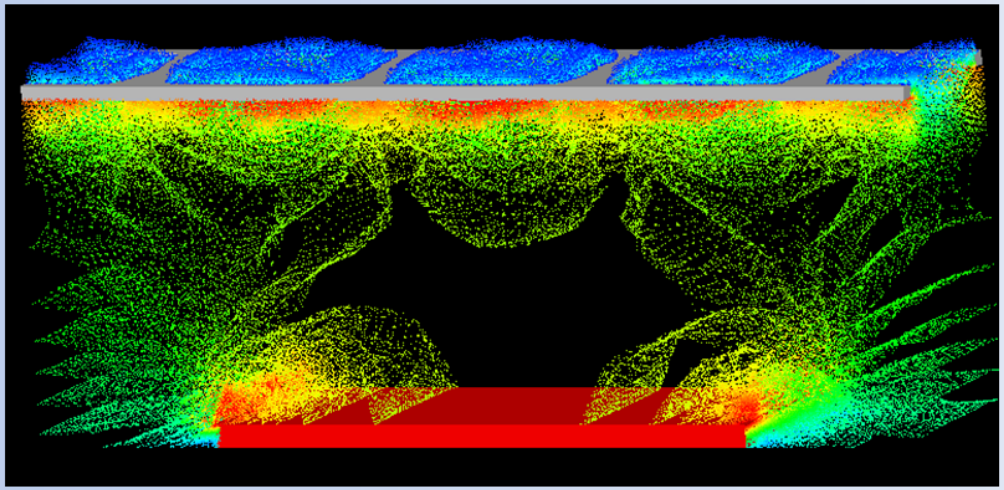
For Gaseous Detectors: GARFIELD by R. Veenhof

Electric Fields in a Micromega Detector

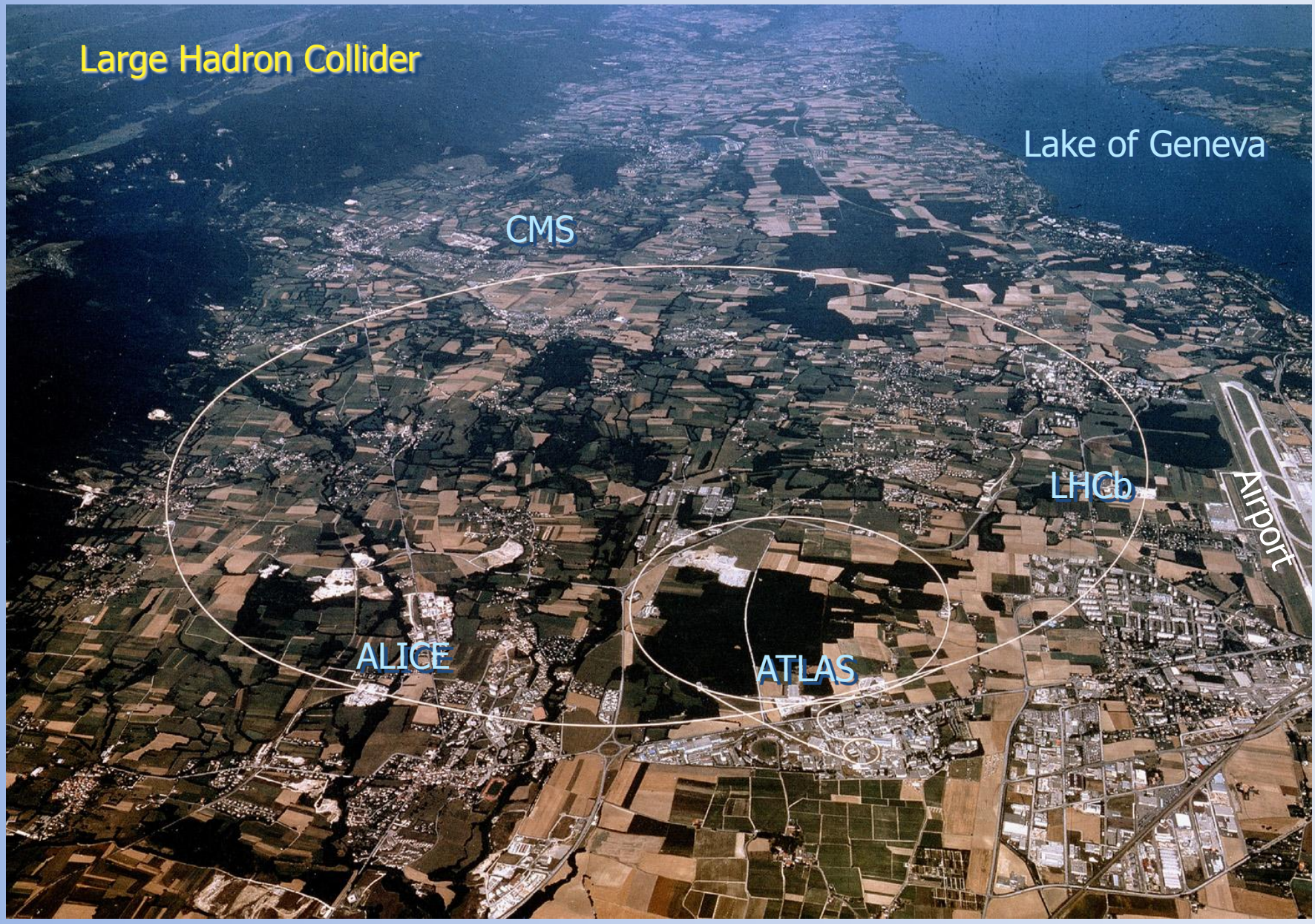


Electrons avalanche multiplication





Детекторы на LHC



Основные принципы выбора конструкции Детектора:

Концепт Детектора зависит от того, что изучать

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

Сильное магнитное поле

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

Модульность

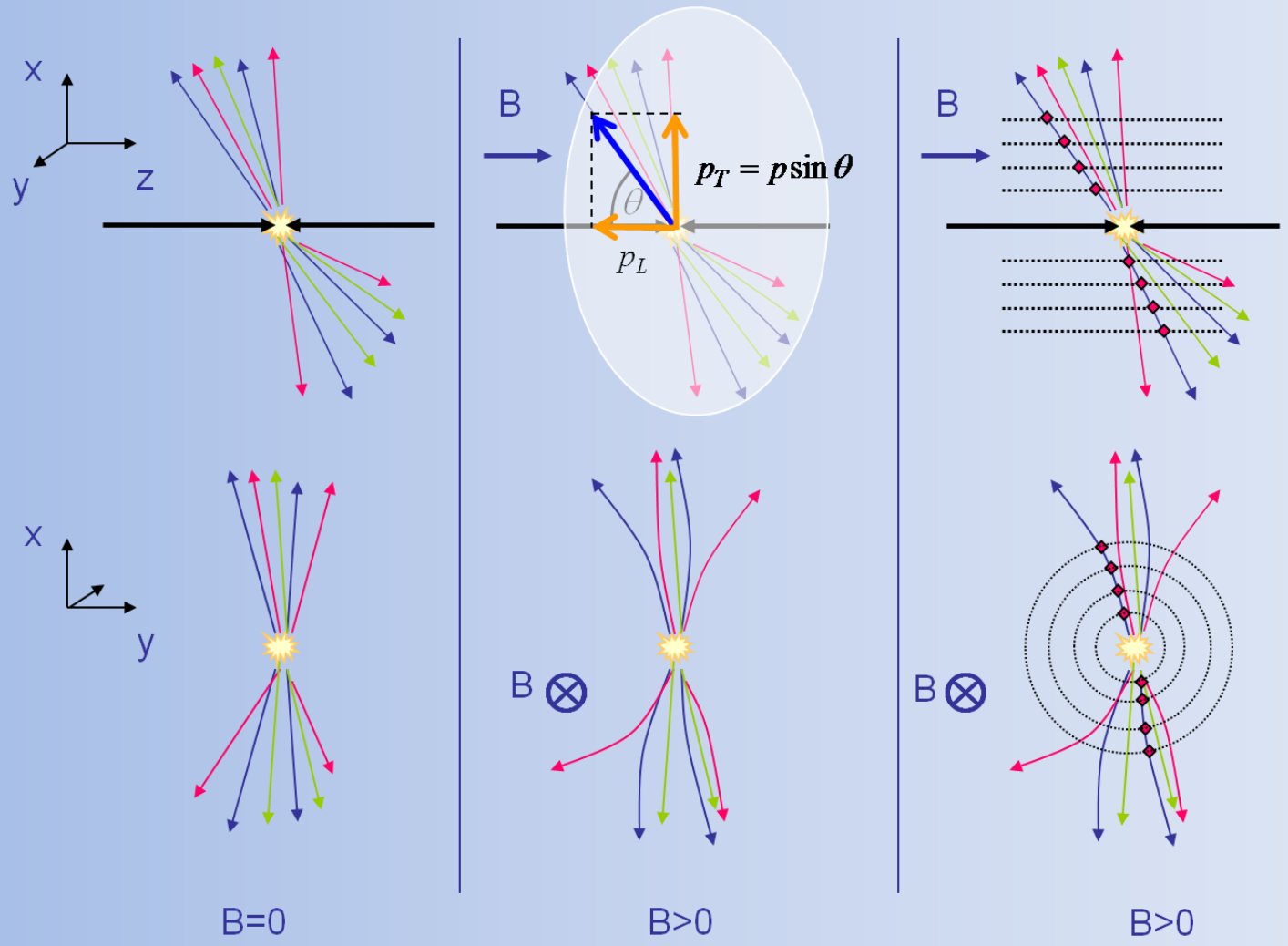
Надо помнить

Стоимость установки увеличивается пропорционально **~объему**

Как можно меньше **материала** перед **каллориметрами**

Как можно больше **материала** перед **мюонным спектрометром**

Заряженная частица в магнитном поле



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 индентифицировать очень редкие события

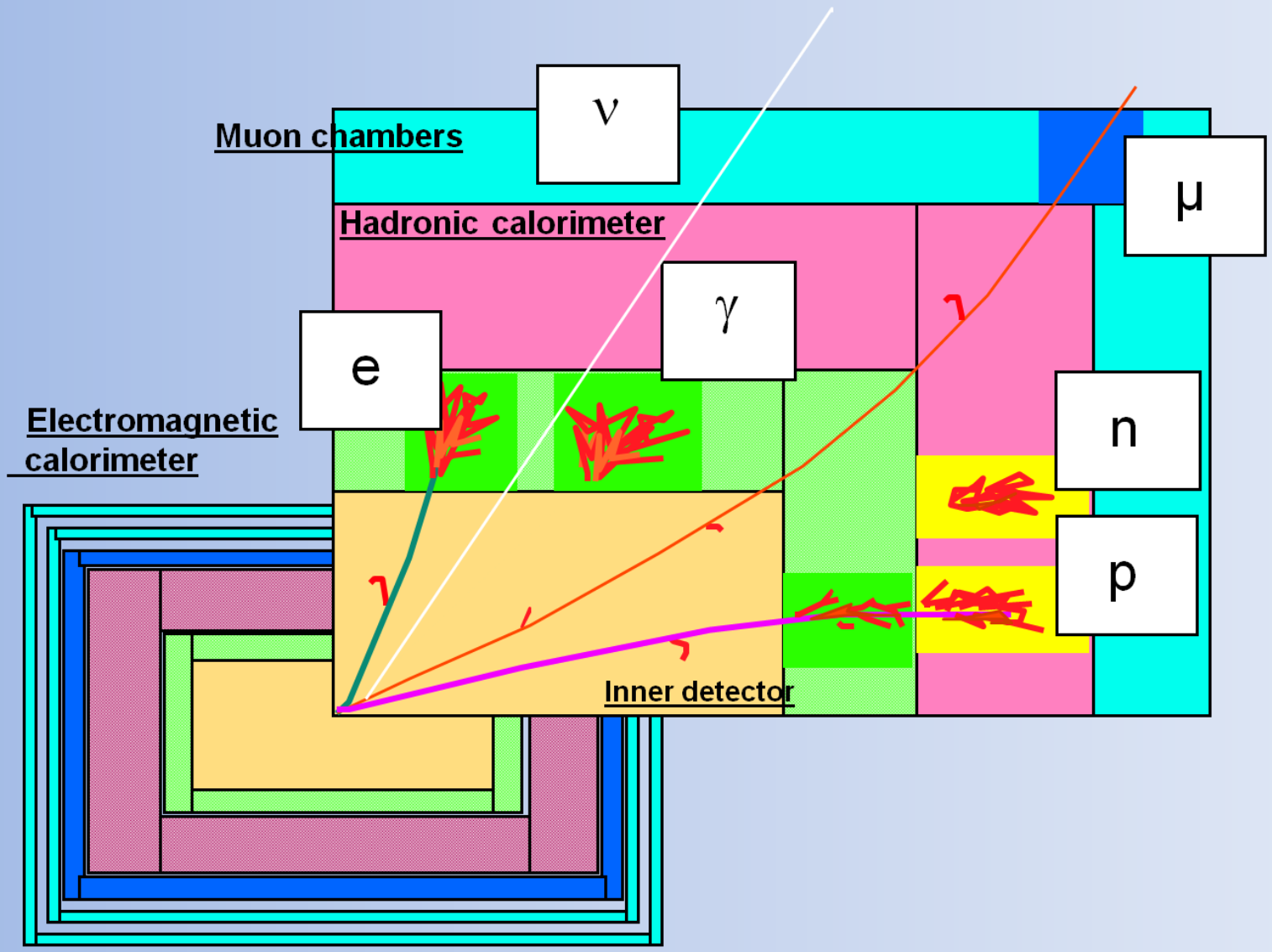
Идентификация лептонов по отношению к огромному КХД фону, так как e/jet отношение на LHC ~ 10^{-5}, т.е. ~ 100 хуже, чем на Tevatron

Сечение СИГНАЛА ~ 10^{-14} от полного сечения: NEW!

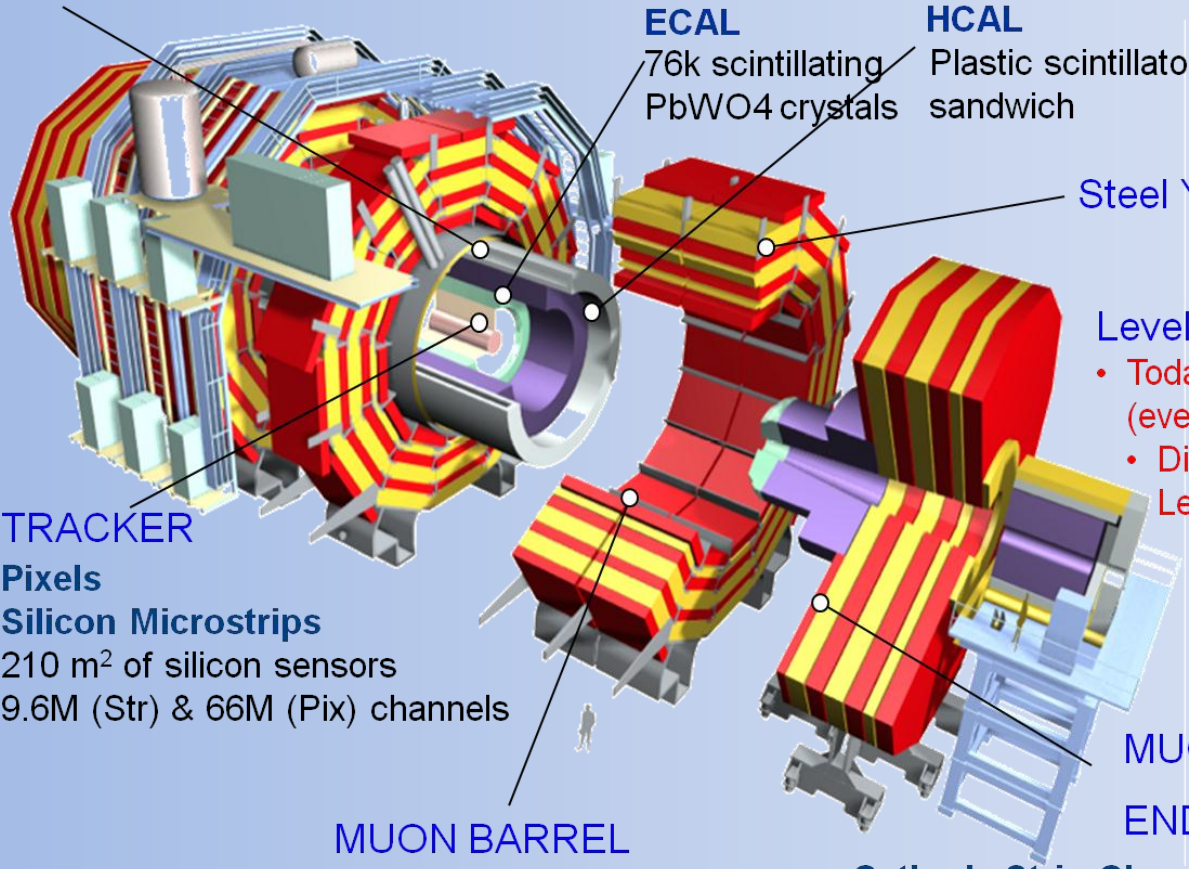
On-line режекция должна быть ~ 10^{7}: NEW!

Хранение данных ~ 10^{9} событий 1 Mb-ного размера в год: NEW!

Детекторы на LHC



CMS Detector

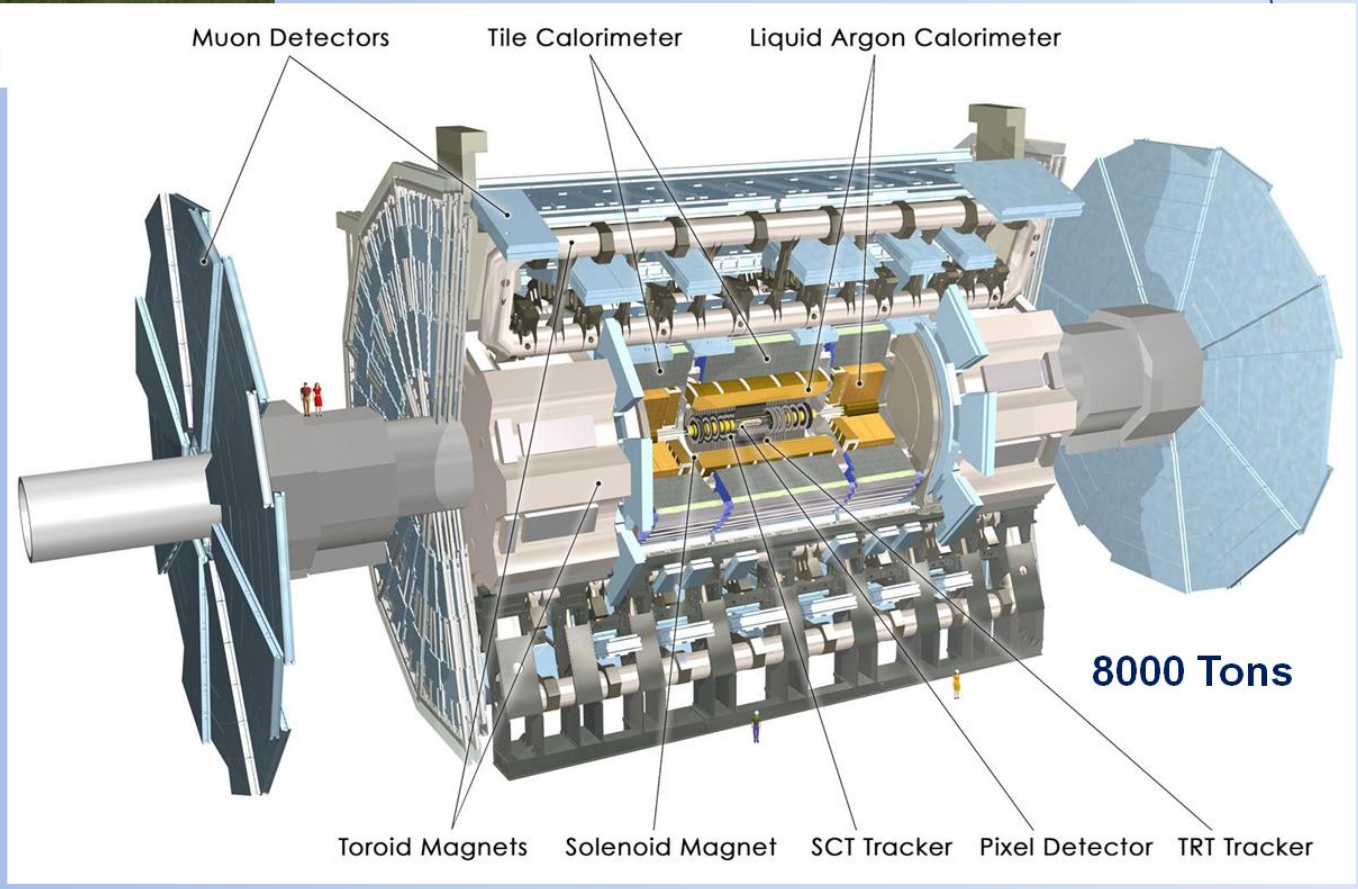


ATLAS Detector

ATLAS superimposed to the 5 floors of building 40

45 m

25 m



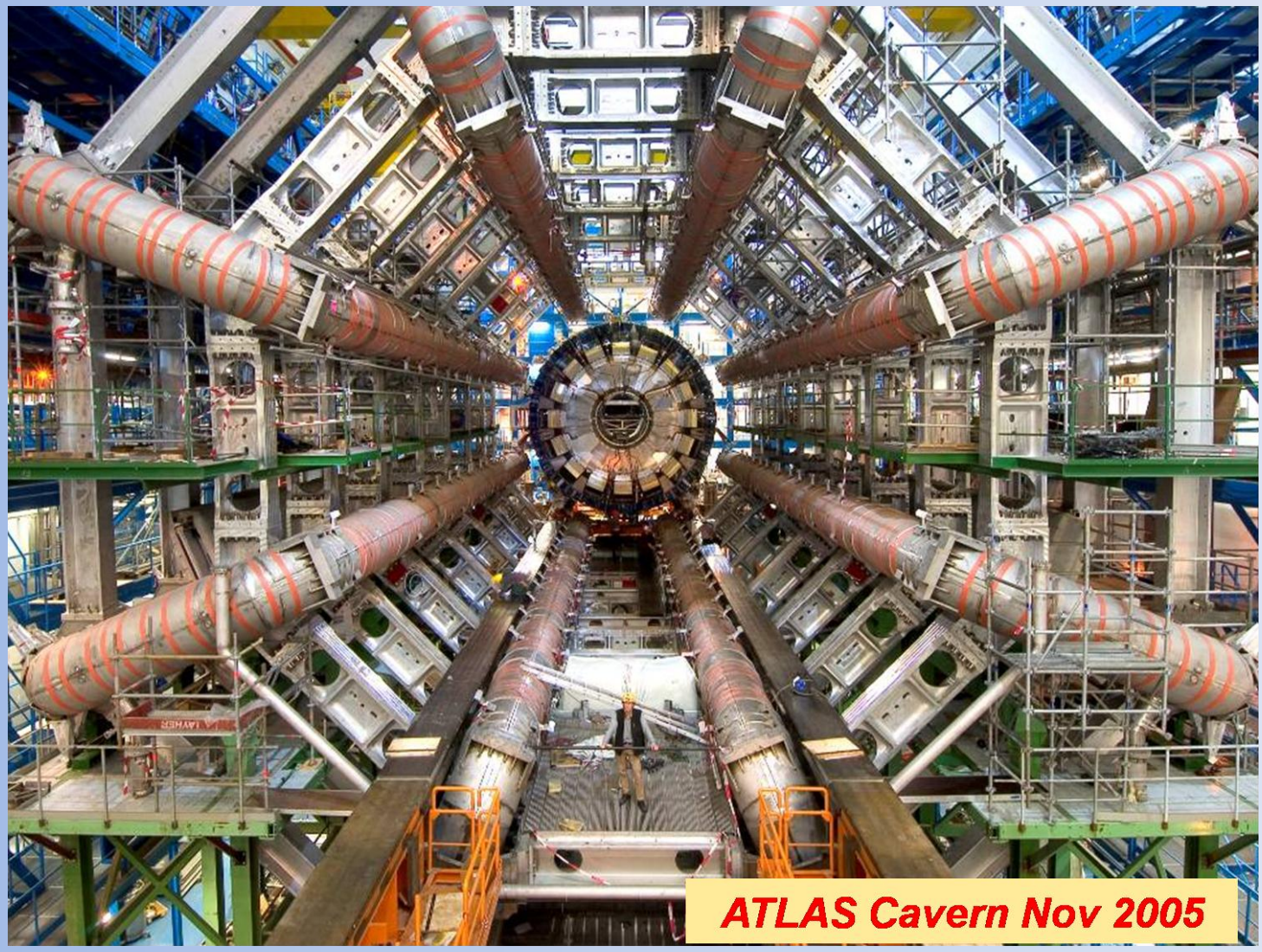
ATLAS Collaboration

(Status August 2010)

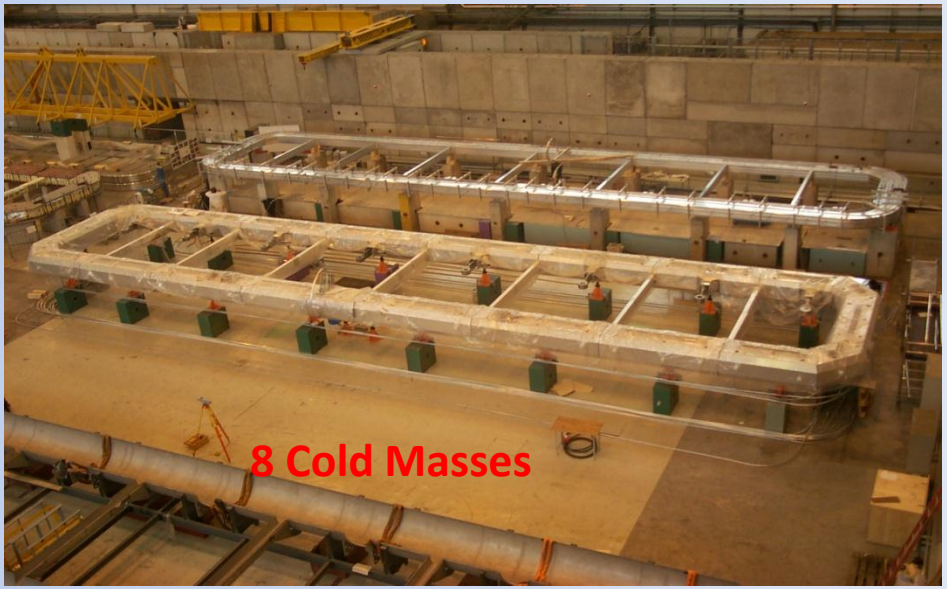
38 Countries
174 Institutions
3000 Scientific participants total
(1000 Students)

Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Annecy, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, HU Berlin, Bern, Birmingham, UAN Bogota, Bologna, Bonn, Boston, Brandeis, Brasil Cluster, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Buenos Aires, Bucharest, Cambridge, Carleton, CERN, Chinese Cluster, Chicago, Chile, Clermont-Ferrand, Columbia, NBI Copenhagen, Cosenza, AGH UST Cracow, IFJ PAN Cracow, SMU Dallas, UT Dallas, DESY, Dortmund, TU Dresden, **JINR Dubna**, Duke, Edinburgh, Frascati, Freiburg, Geneva, Genoa, Giessen, Glasgow, Göttingen, LPSC Grenoble, Technion Haifa, Hampton, Harvard, Heidelberg, Hiroshima IT, Indiana, Innsbruck, Iowa SU, Iowa, UC Irvine, Istanbul Bogazici, KEK, Kobe, Kyoto, Kyoto UE, Lancaster, UN La Plata, Lecce, Lisbon LIP, Liverpool, Ljubljana,
QMW London, RHBNC London, UC London, Lund, UA Madrid, Mainz, Manchester, CPPM Marseille, Massachusetts, MIT, Melbourne, Michigan, Michigan SU, Milano, **Minsk NAS, Minsk NCPHEP**, Montreal, McGill Montreal, RUPHE Morocco, **FIAN Moscow, ITEP Moscow, MEPhI Moscow, MSU Moscow**, LMU Munich, MPI Munich, Nagasaki IAS, Nagoya, Naples, New Mexico, New York, Nijmegen, Northern Illinois, **BINP Novosibirsk**, Ohio SU, Okayama, Oklahoma, Oklahoma SU, Olomouc, Oregon, LAL Orsay, Osaka, Oslo, Oxford, Paris VI and VII, Pavia, Pennsylvania, **NPI Petersburg**, Pisa, Pittsburgh, CAS Prague, CU Prague, TU Prague, **IHEP Protvino**, Regina, Rome I, Rome II, Rome III, Rutherford Appleton Laboratory, DAPNIA Saclay, Santa Cruz UC, Sheffield, Shinshu, Siegen, Simon Fraser Burnaby, SLAC, South Africa, Stockholm, KTH Stockholm, Stony Brook, Sydney, Sussex, AS Taipei, Tbilisi, Tel Aviv, Thessaloniki, Tokyo ICEPP, Tokyo MU, Tokyo Tech, Toronto, TRIUMF, Tsukuba, Tufts, Udine/ICTP, Uppsala, UI Urbana, Valencia, UBC Vancouver, Victoria, Waseda, Washington, Weizmann Rehovot, FH Wiener Neustadt, Wisconsin, Wuppertal, Würzburg, Yale, Yerevan

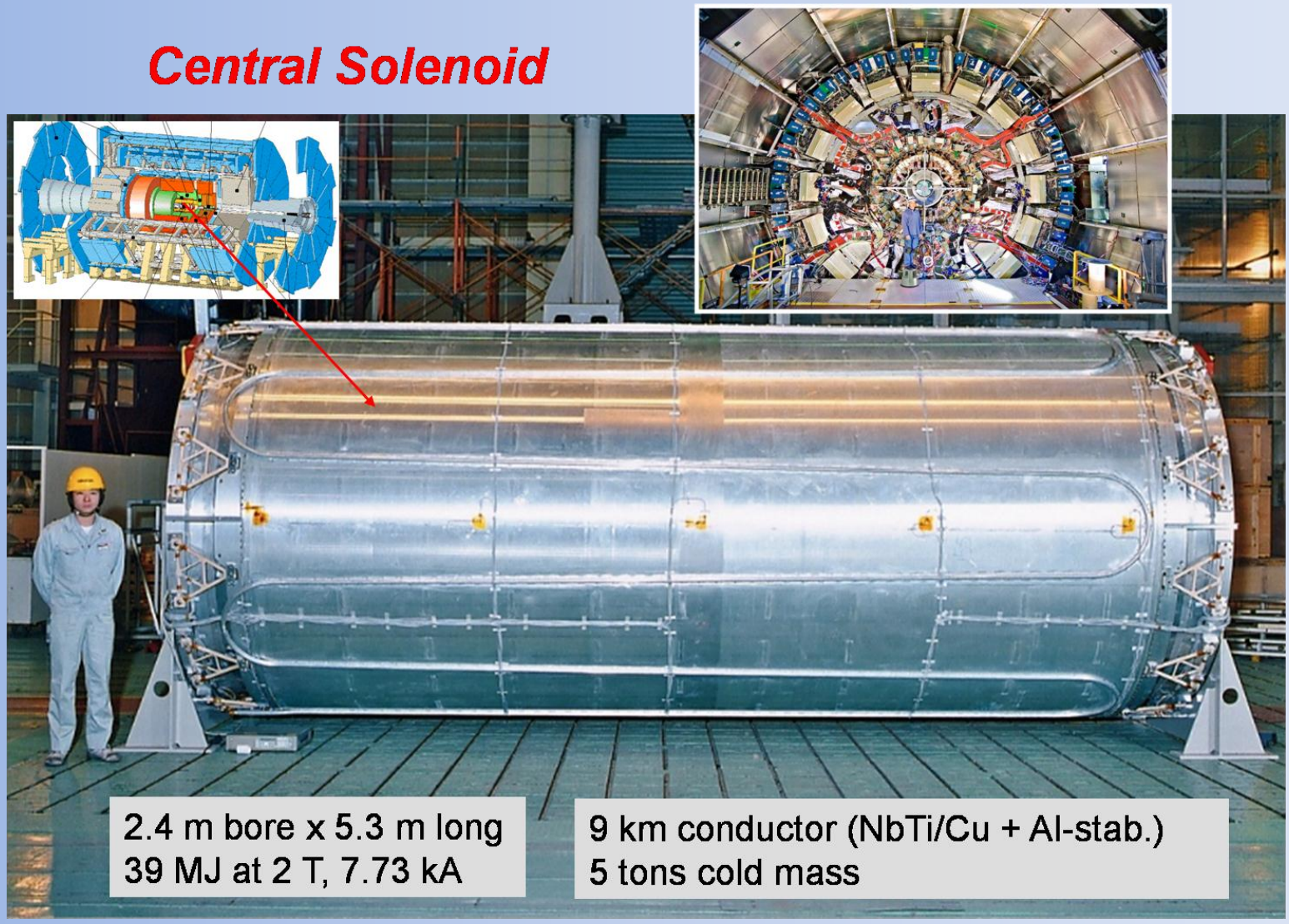
Детектор ATLAS



Barrel Toroid components for integration

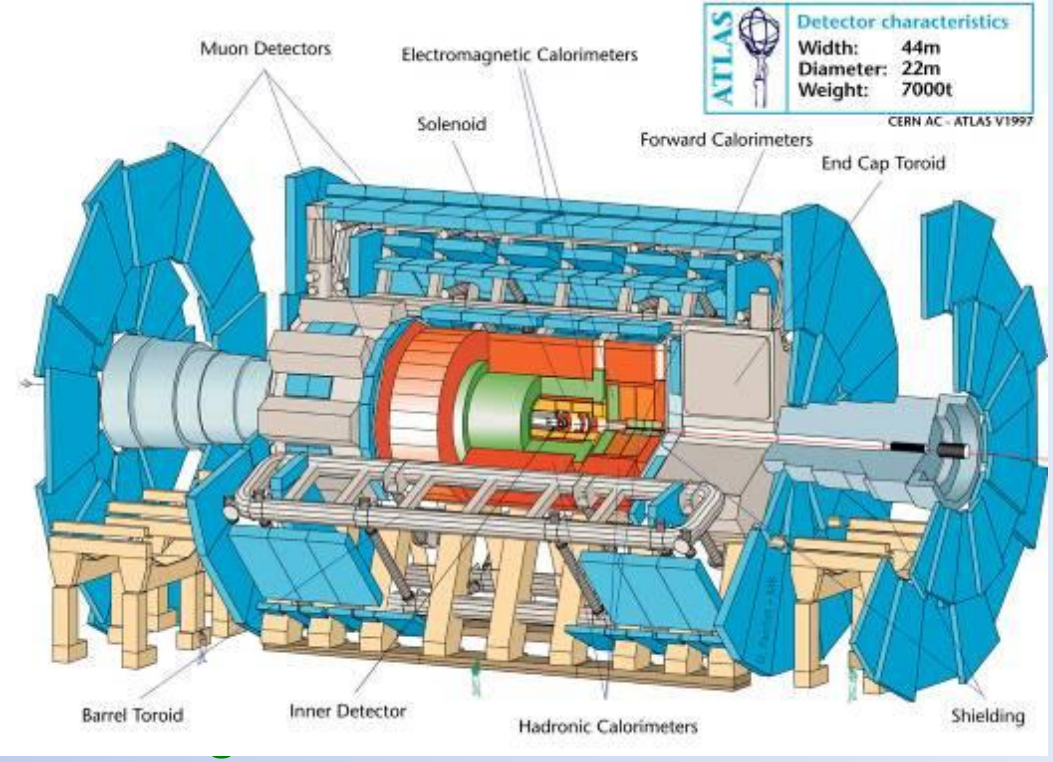


Central Solenoid



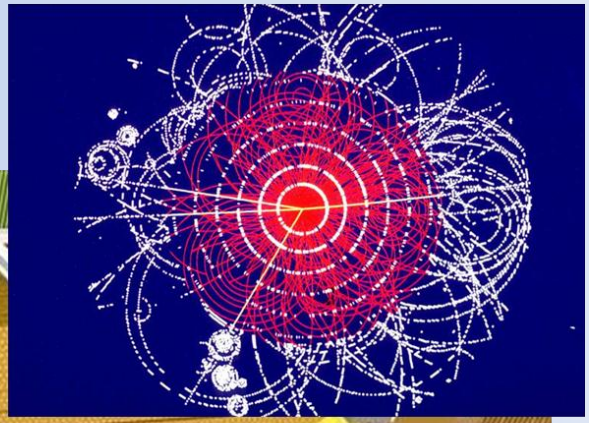
ATLAS superconducting magnets

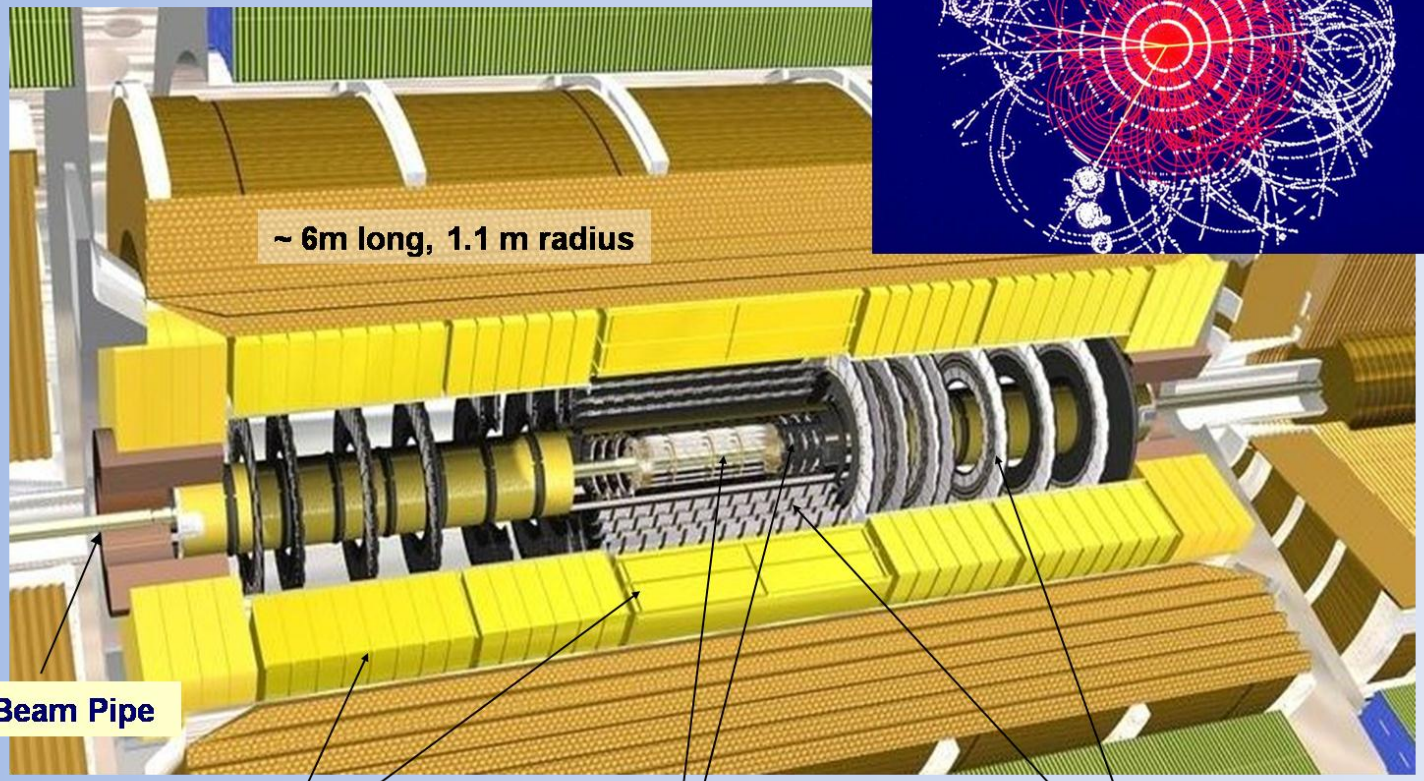
- 1 Barrel Toroid, 2 End Cap Toroids and 1 Central Solenoid
- 4 magnets provide 2 T magnetic field for the inner detector (solenoid) and ~1 T for the muon detectors in blue (toroids)
- 20 m diameter x 25 m long
- 1000 m^3 volume with field
- 90 km superconductor
- 170 t superconductor
- 700 t cold mass
- 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 $\sigma/p_T \sim 5\times10^{-4}\, p_T \oplus 0.01$

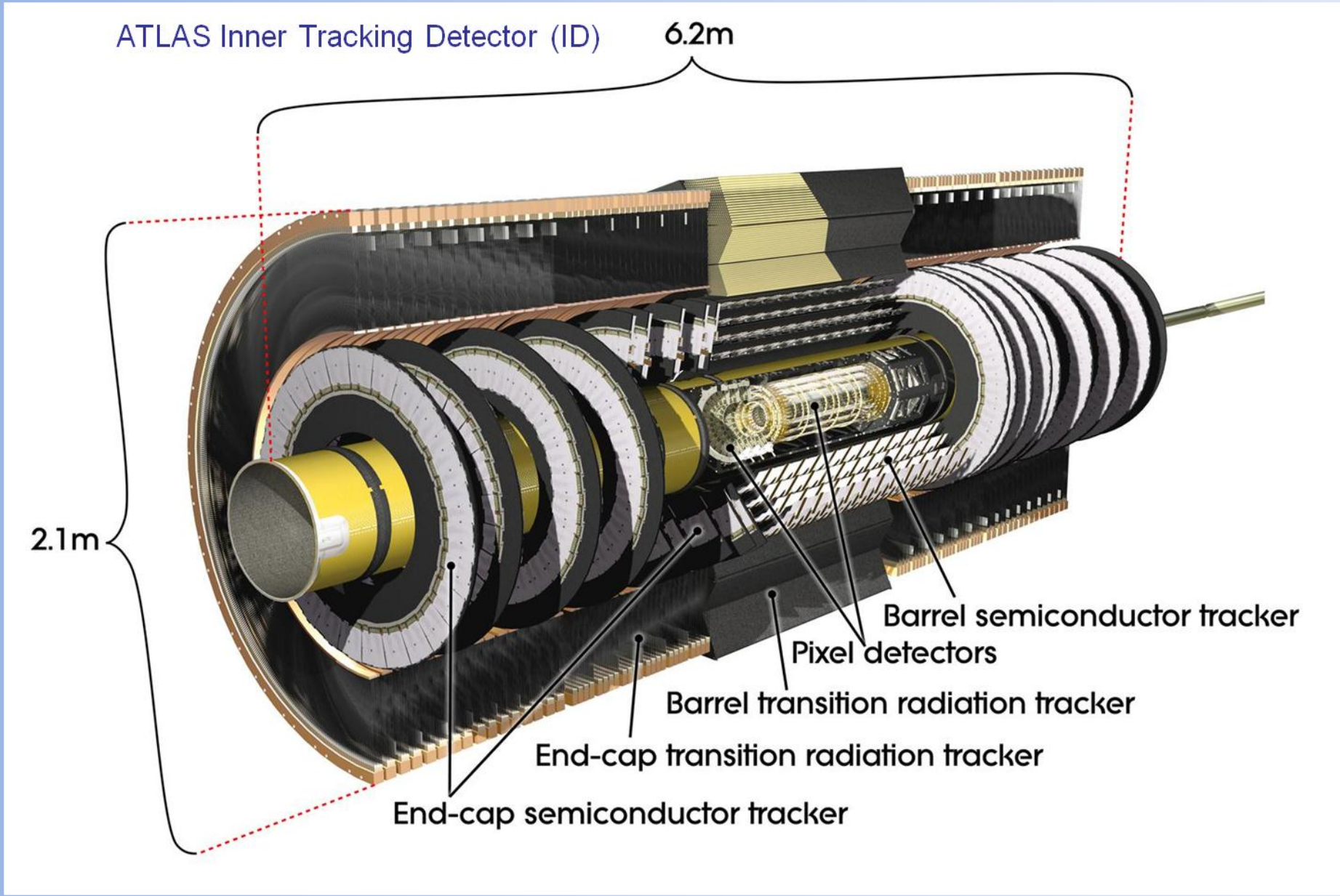




Transition Radiation Tracker (TRT)
(4 10^5 channels) with e/π separation

Pixels
(0.8 10^8 channels)

Si Strips Tracker (SCT)
(6 10^6 channels)

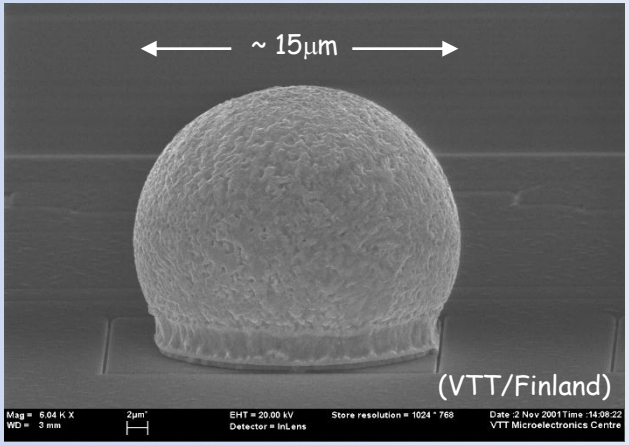

ATLAS Inner Tracking Detector (ID)
6.2m
2.1m
Barrel semiconductor tracker
Pixel detectors
Barrel transition radiation tracker
End-cap transition radiation tracker
End-cap semiconductor tracker

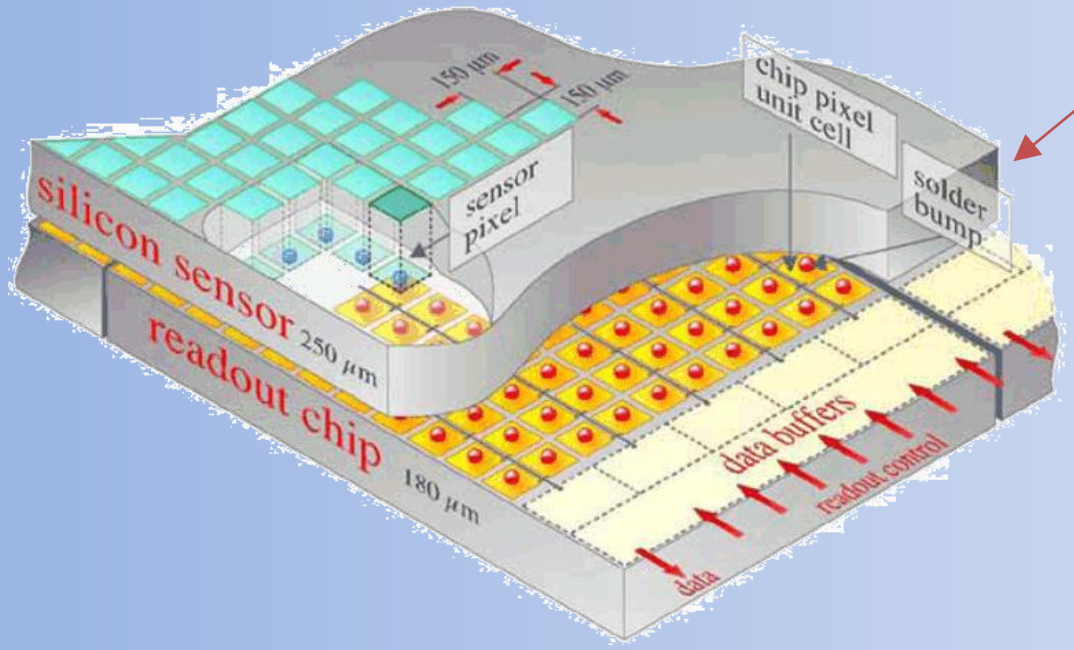
Гибридный пиксельный детектор

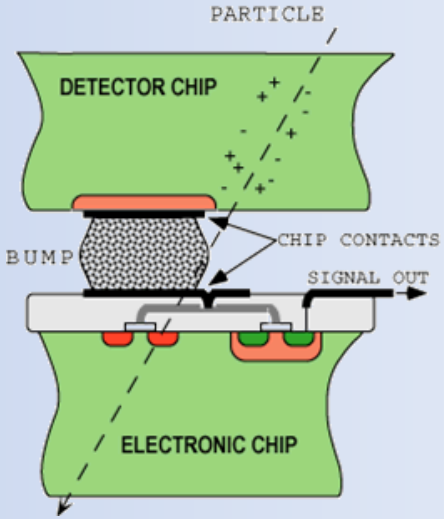
- **HAPS – Гибридный активный пиксельный сенсор**
  - Сегмент Si с высокой гранулярностью
    (⇒ true 2D, нет проблем с x-y неопределенностью)
  - Считывающая электроника с той же геометрией
    (каждая ячейка – к своему каналу)
  - соединение посредством “bump bonding”

  - Широко используются в LHC экспериментах:
    ATLAS, ALICE, CMS and LHCb

Solder Bump: Pb-Sn



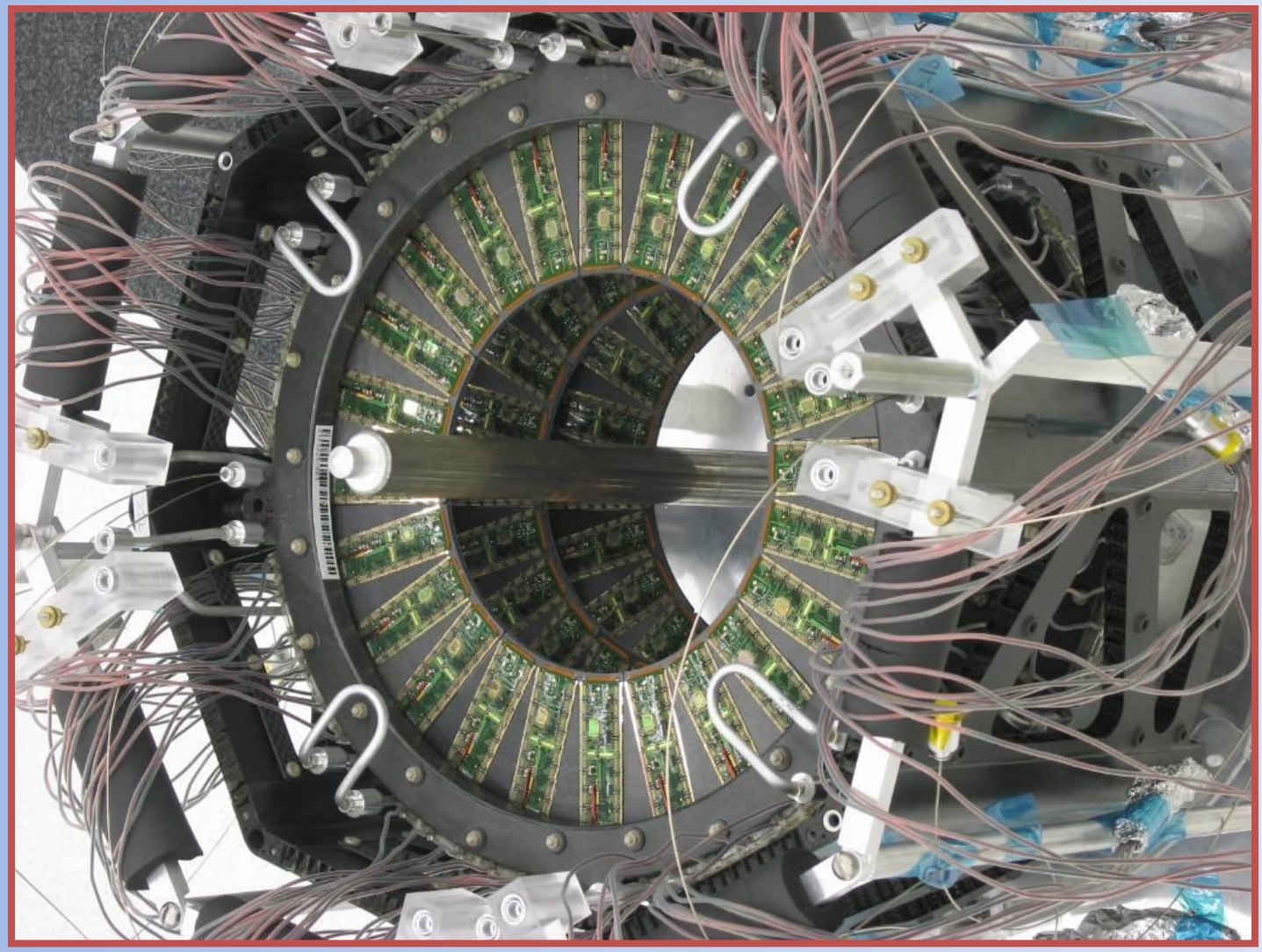




Flip-chip technique

Твердотельные детекторы

ATLAS Три пиксельных диска готовы



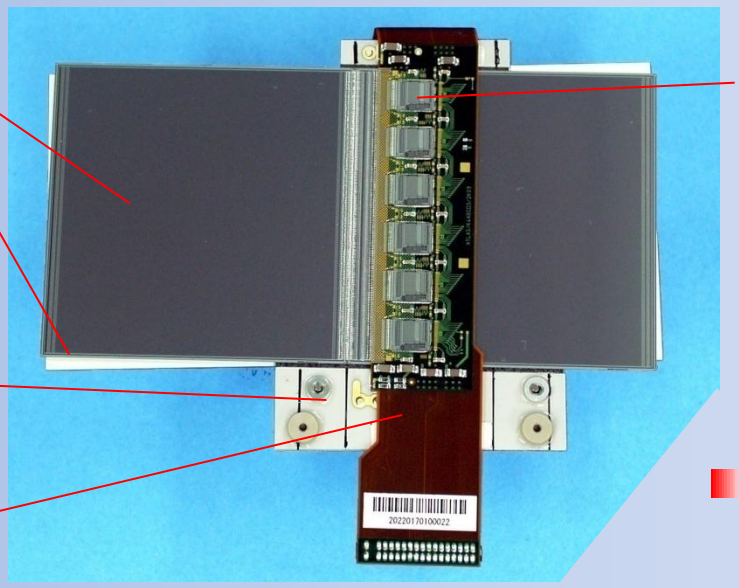
Detector Module

- **Детекторные модули** - “Основные элементы трековых детекторв”
  - 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

128 mm



- **Silicon sensors (x4)**
  - 64 x 64 mm^2
  - p-in-n, single sided
  - AC-coupled
  - 768 strips
  - 80μm pitch/12μm width
- **ASICS (x12)**
  - ABCD chip (binary readout)
  - DMILL technology
  - 128 channels
- **Wire bonds** (~3500)
  - 25 μm Al wires
- **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

$\sigma(r\phi)$ ~ 16 μm, $\sigma(z)$ ~ 850μm [NIMA538 (2005) 384]

ATLAS – SCT

- 15.552 microstrip sensors
- 2.112 barrel modules
- 1.976 forward modules
- 61 m^2 silicon, $6.3 \cdot 10^6$ strips

Калориметры

Калориметрия = измерение Энергии путем полного поглощения,

Обычно объединяется с пространстенной реконструкцией. Деструктивный метод!

Частицы исчезают.

Два типа калориметров

-> электроны и фотоны (Электромагнитный калориметр)

-> протоны, нейтроны и пионы (Адронный калориметр)

Два способа измерений :

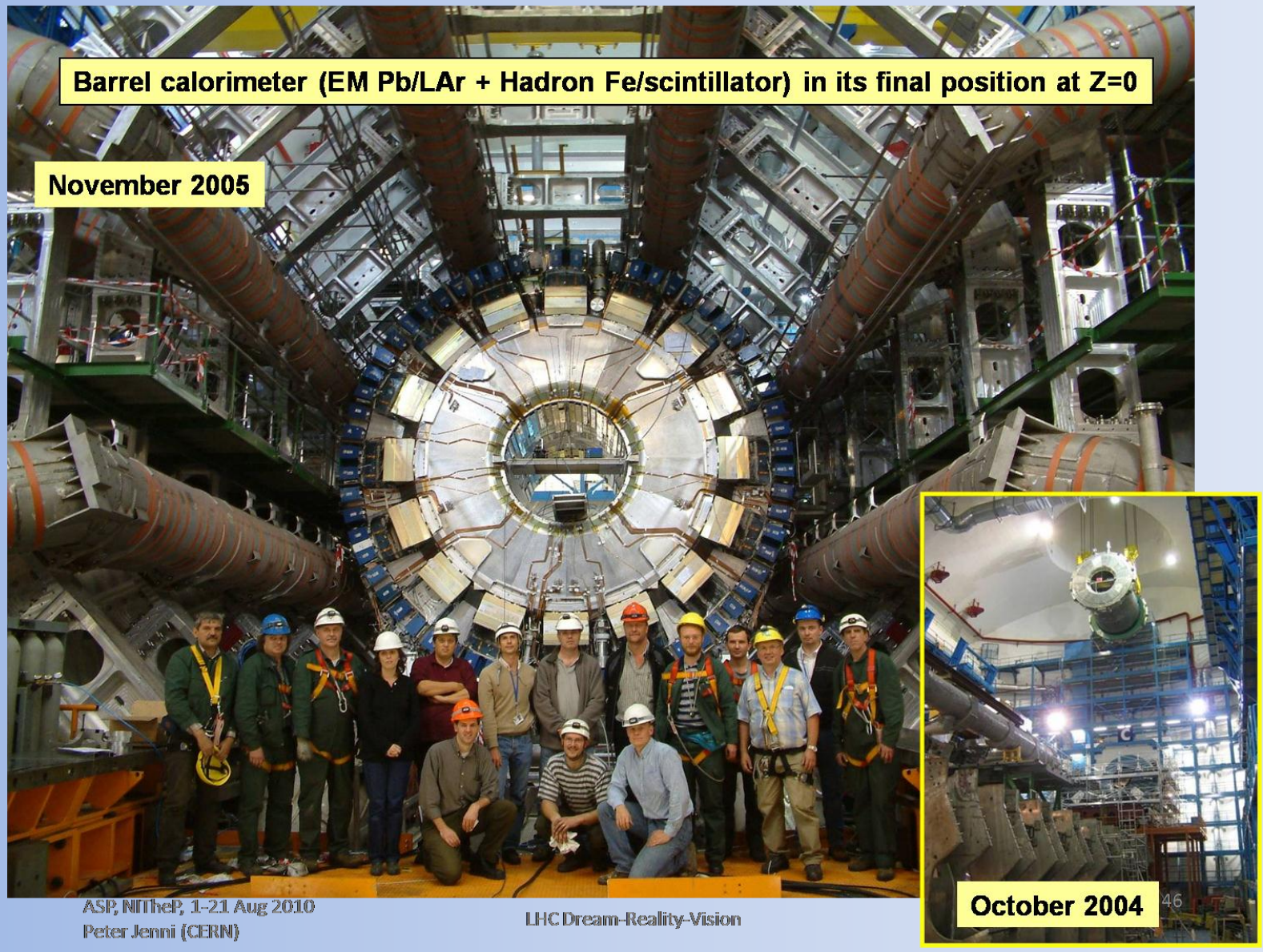
Гомогенные калориметры: Детектор = абсорбер (сцинтилляционные кристаллы)

Используются только для электромагнитных калориметров

Сэмплинг калориметры = чередующиеся Абсорбер + детектор

(газовые, жидкостные, твердотельные)

Много разных типов конкретной реализации в разных экспериментах

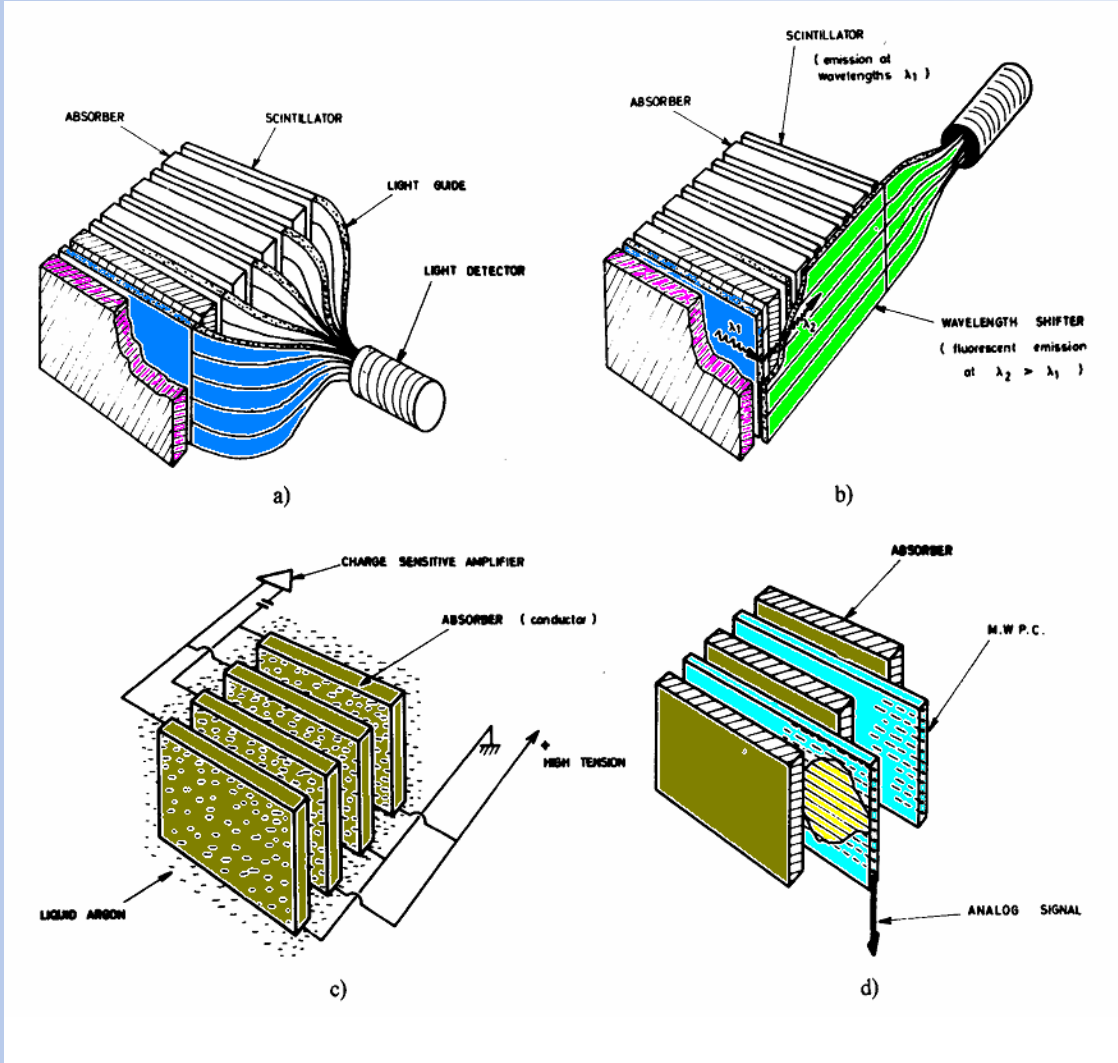


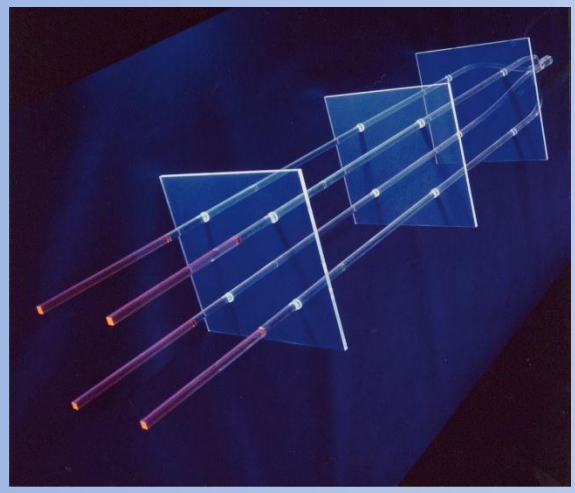
ASP, NITheP, 1-21 Aug 2010
Peter Jenni (CERN)

LHC Dream-Reality-Vision

Сэмплинговые – как электромагнитные, так и адронные калориметры

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



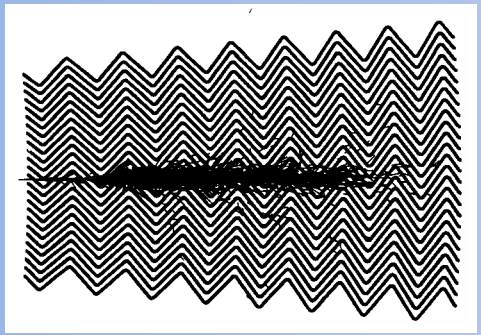


Светосбор типа ‘Шашлык’

Пример ECAL (сэмплинг)

ATLAS электромагнитный калориметр

Абсорбер с «аккордеонной» геометрией в Liquid Argon



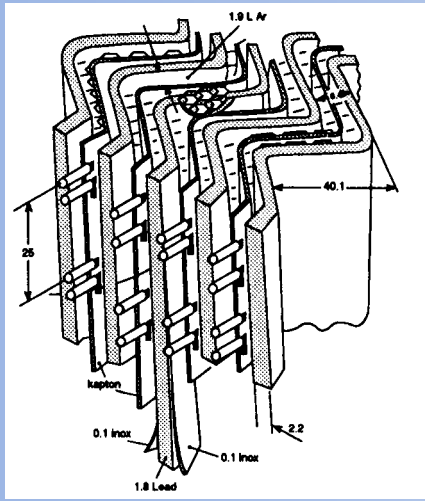
LAr (90K)

+ свинцово-железный (1-2 mm)

+ многослойная медно-полиамидная плата

= ионизационная камера.

1 GeV E-выделение -> 5 x10^6 e^-



Минимум мертвых зон.

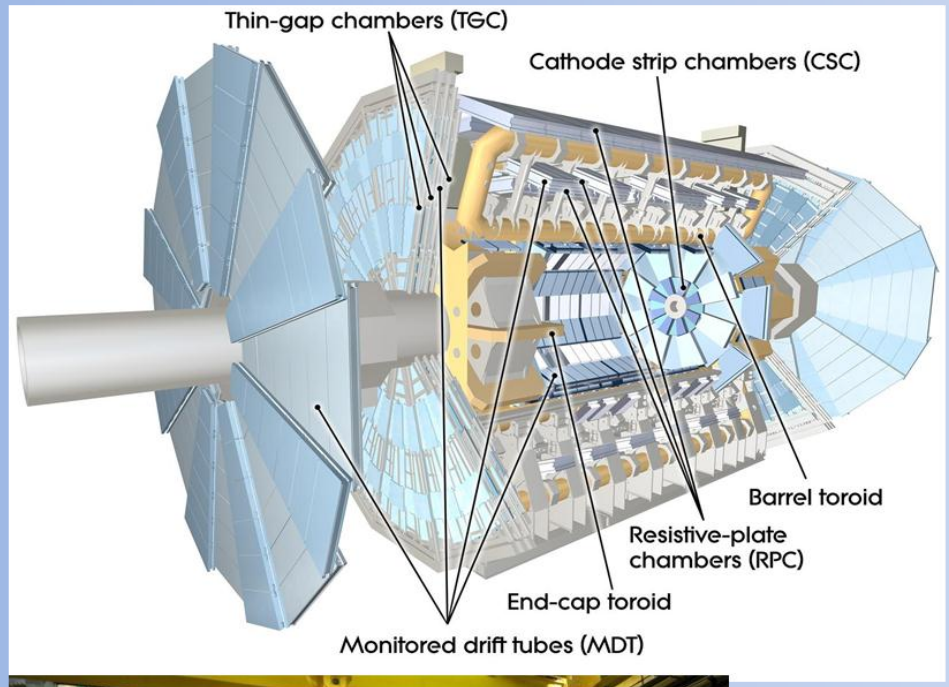
LAr радиационно стойкий.

Плата считывания позволяет тонкую сегментацию.

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

Пространственное разрешение 5 mm /√ E

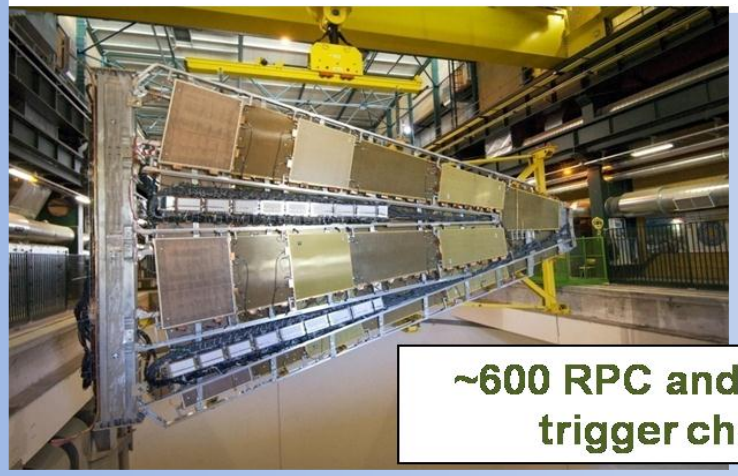
Muon System



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



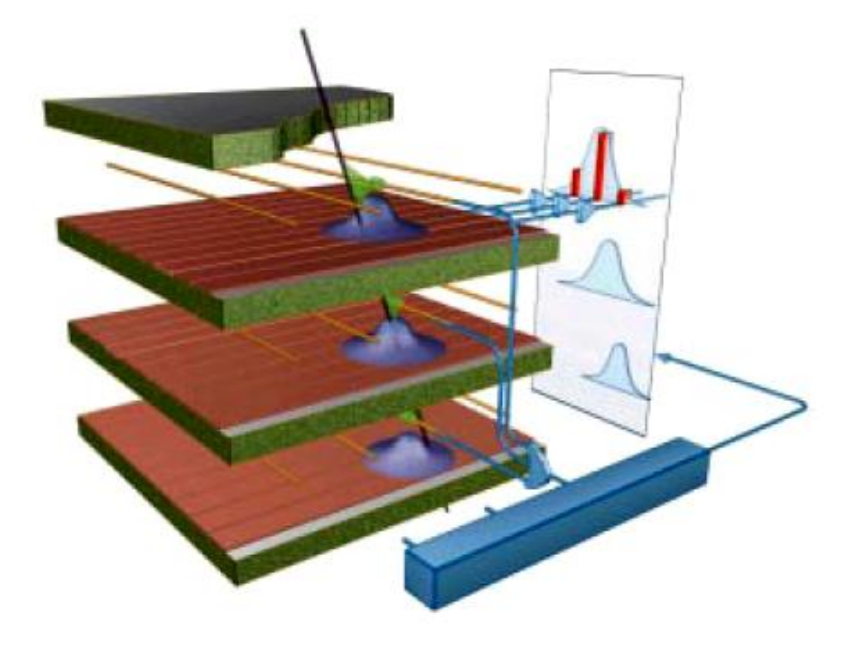
~600 RPC and ~3600 TGC trigger chambers

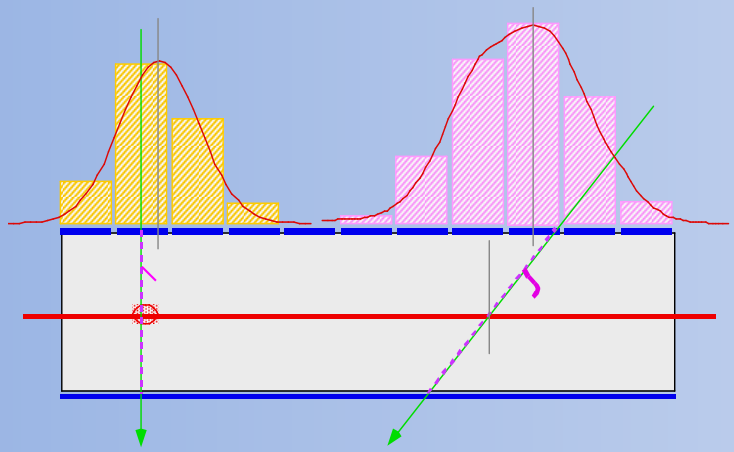
Газовые детекторы

Считывание с катодных стрипов или падов.

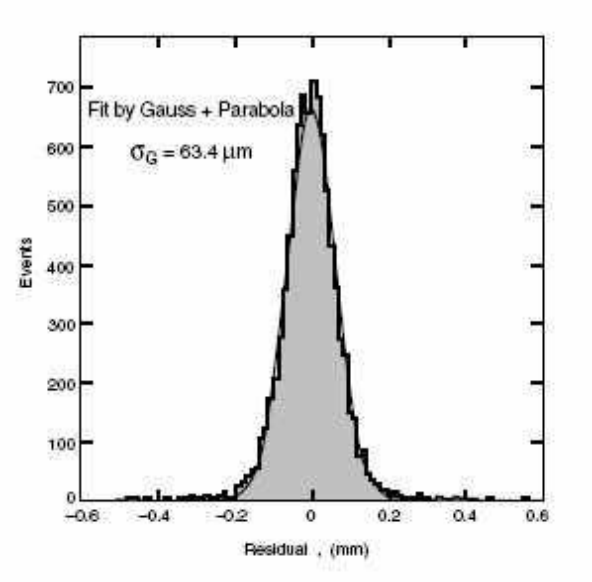
Определение второй координаты с помощью интерполяции индуцированного сигнала на стрипы или пады.

Маленький зазор -> быстрый детектор.

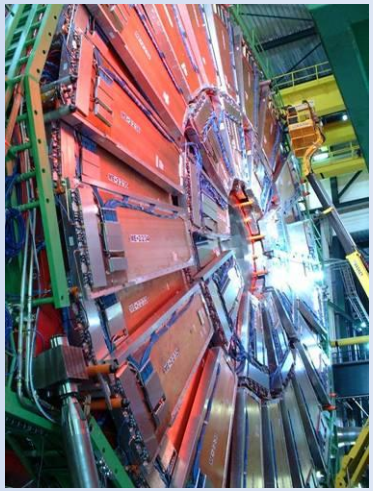




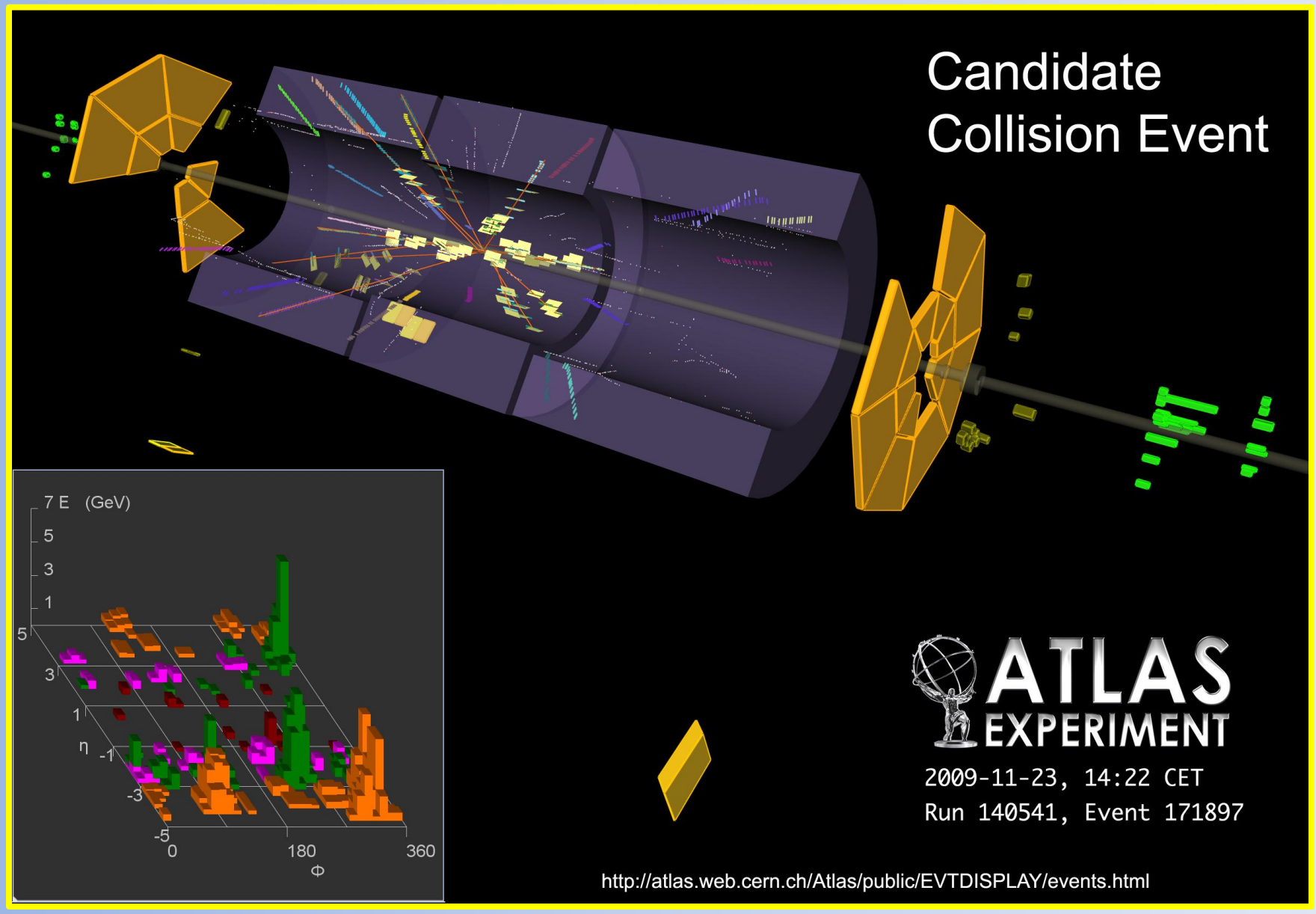
Метод взвешивания наведенного сигнала.



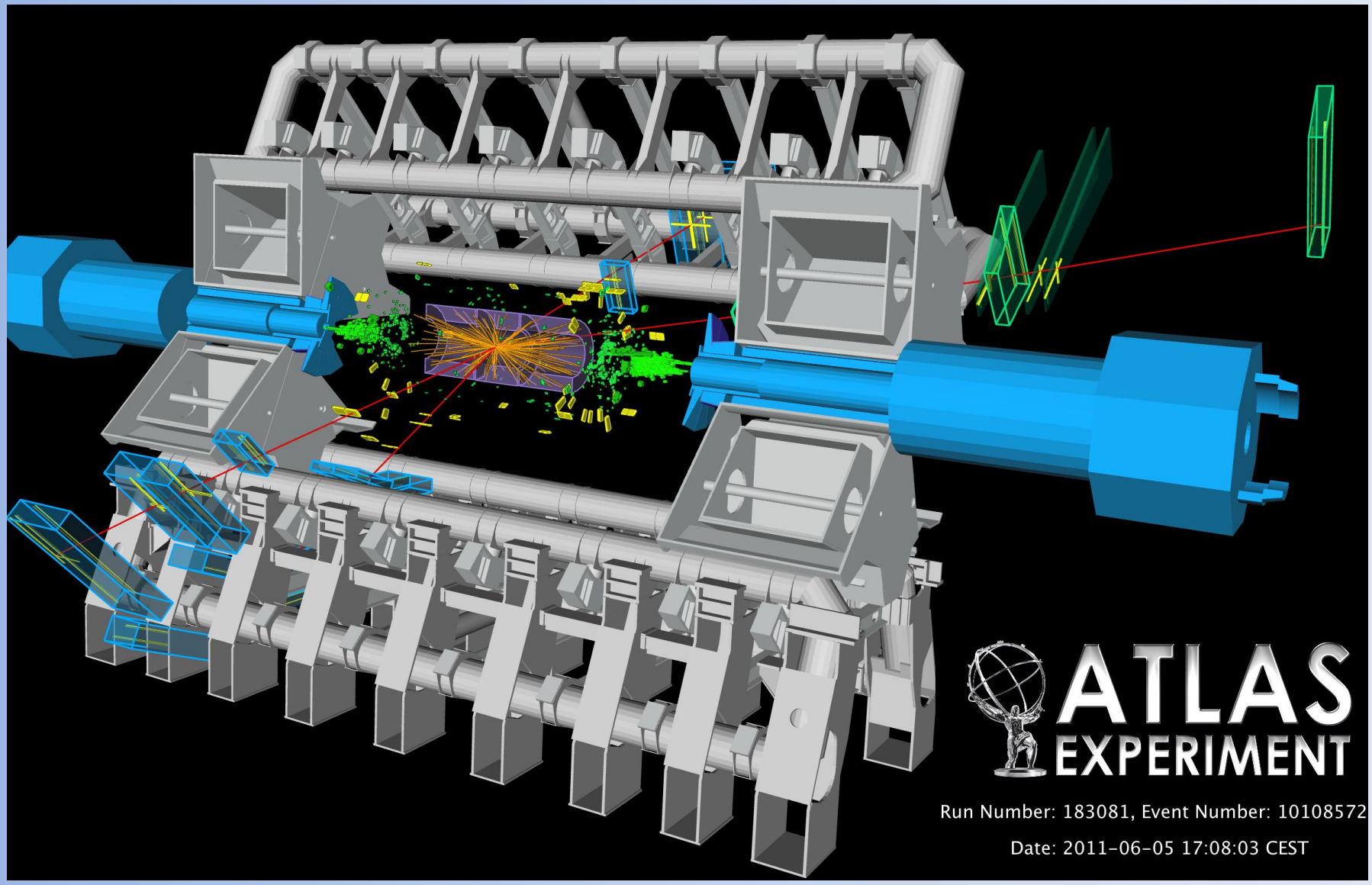
Разрешение



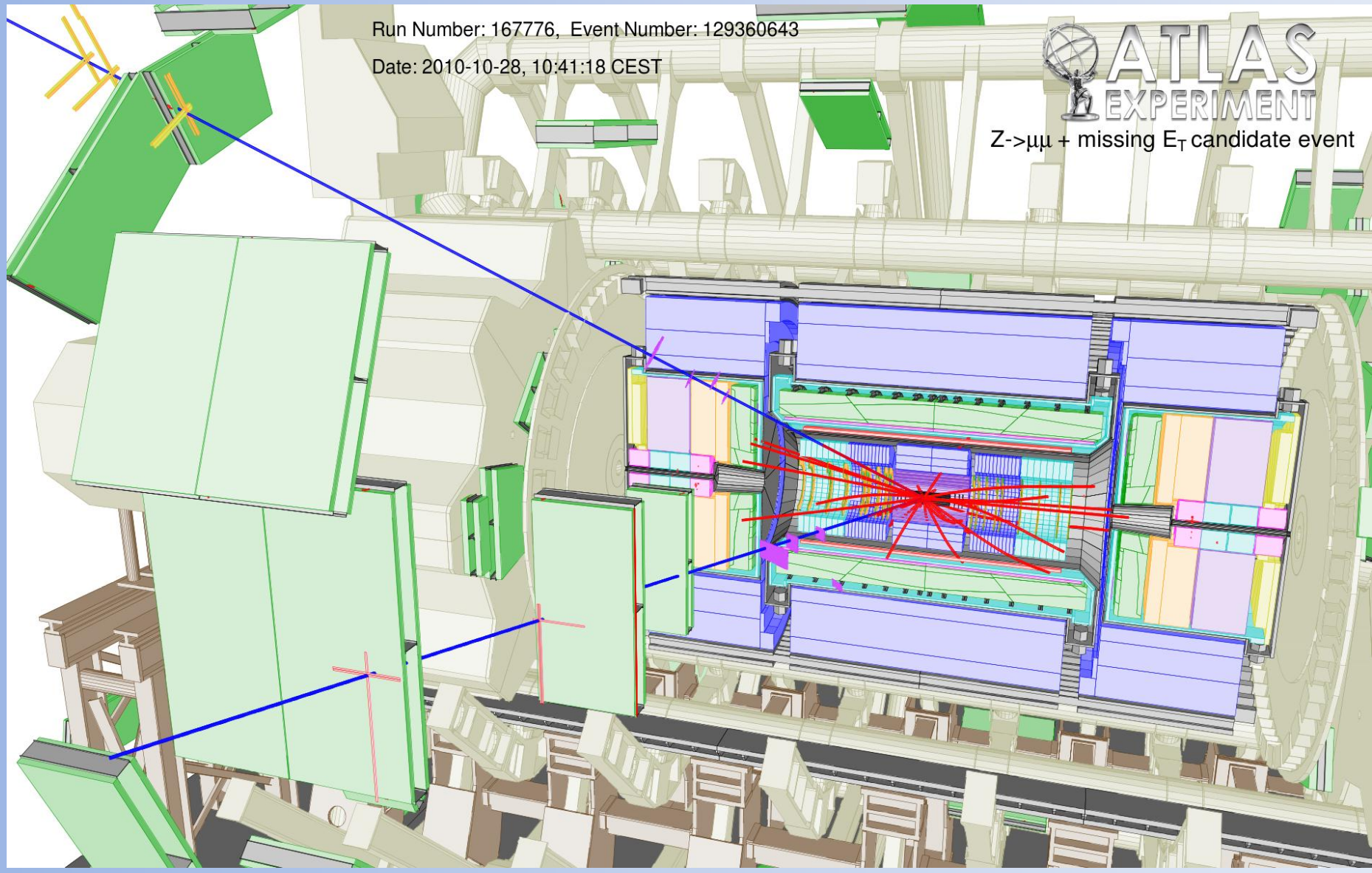
First collisions at the LHC end of November 2009



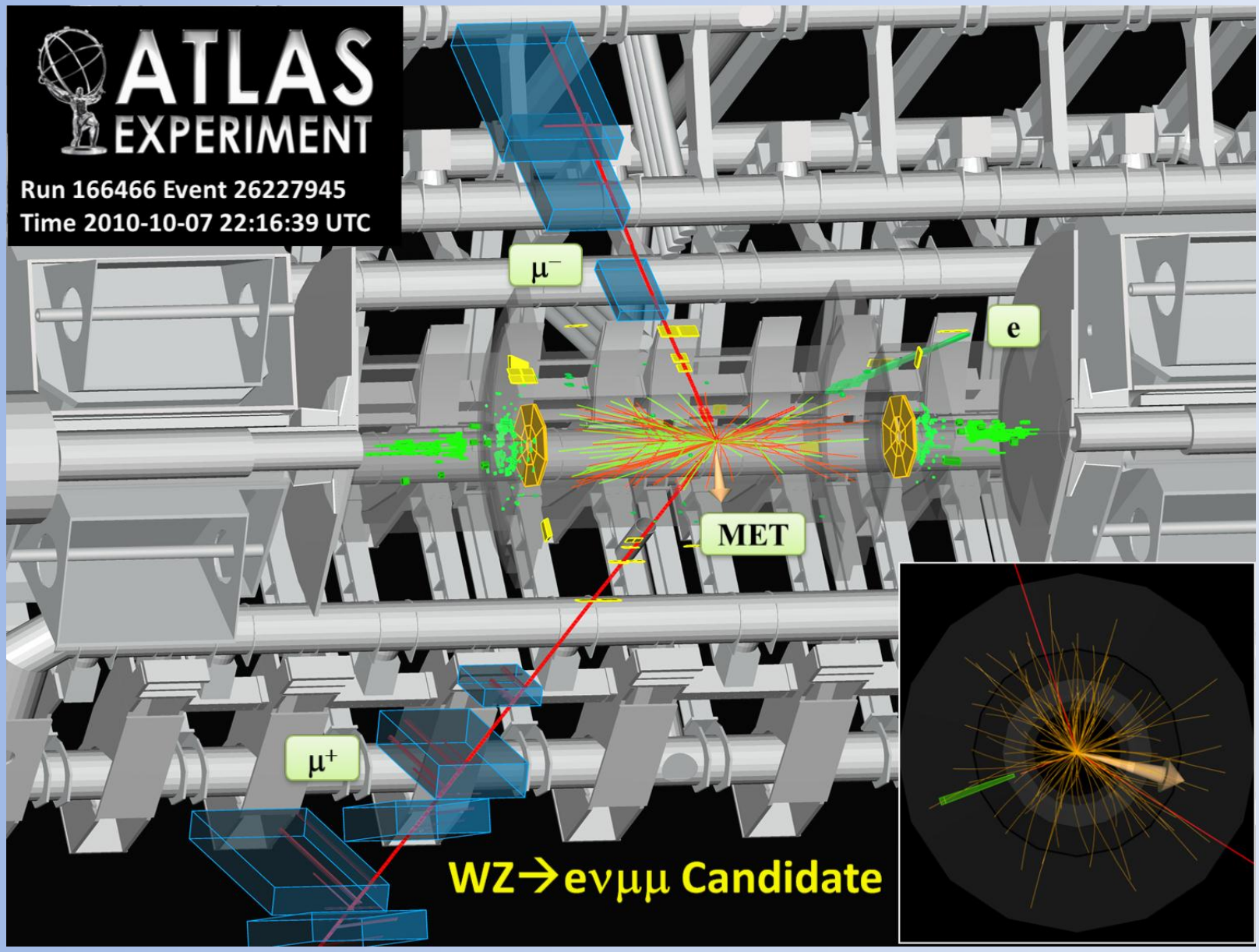
Детектор ATLAS



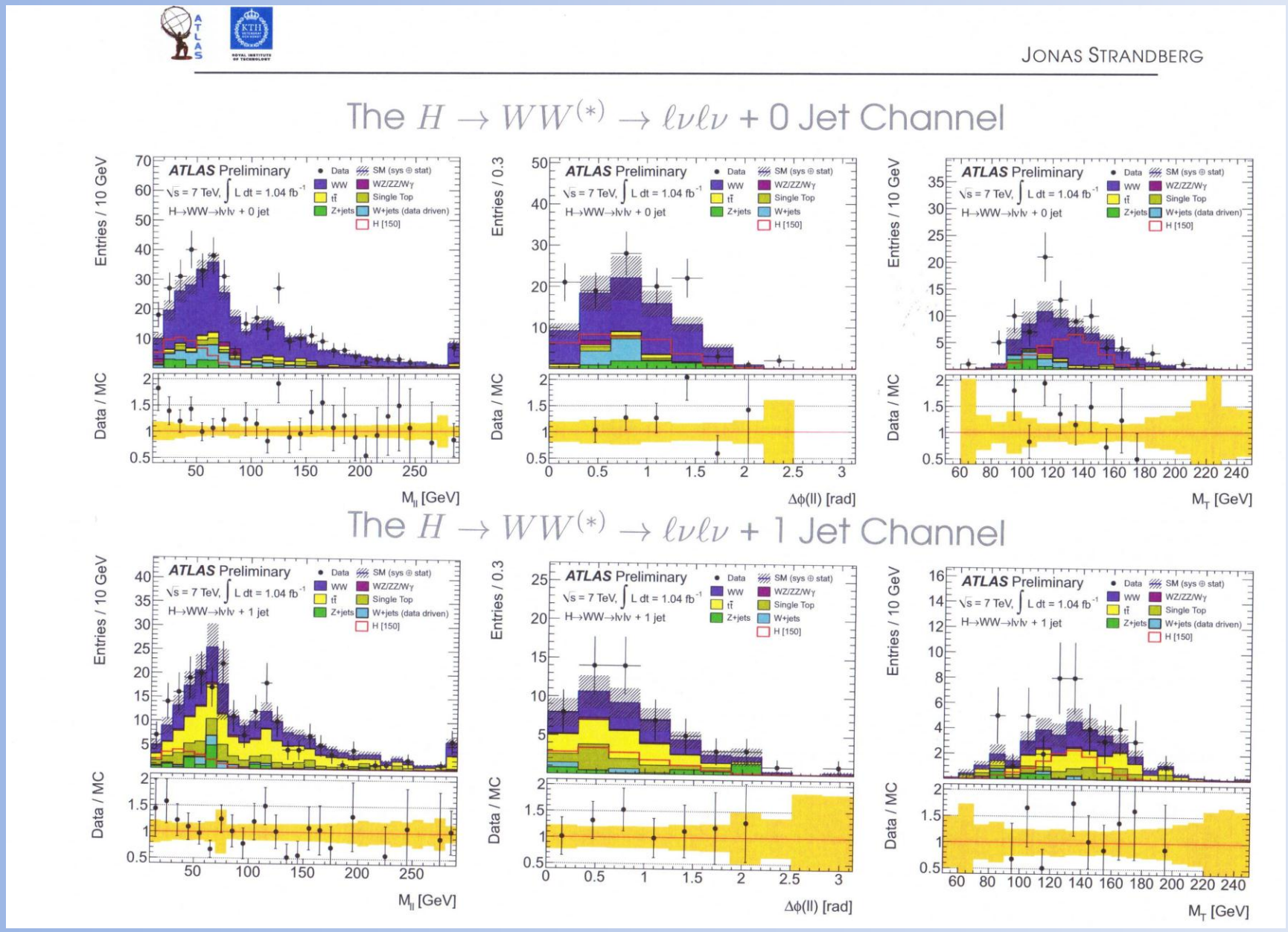
Детектор ATLAS



Детектор ATLAS



Детектор ATLAS



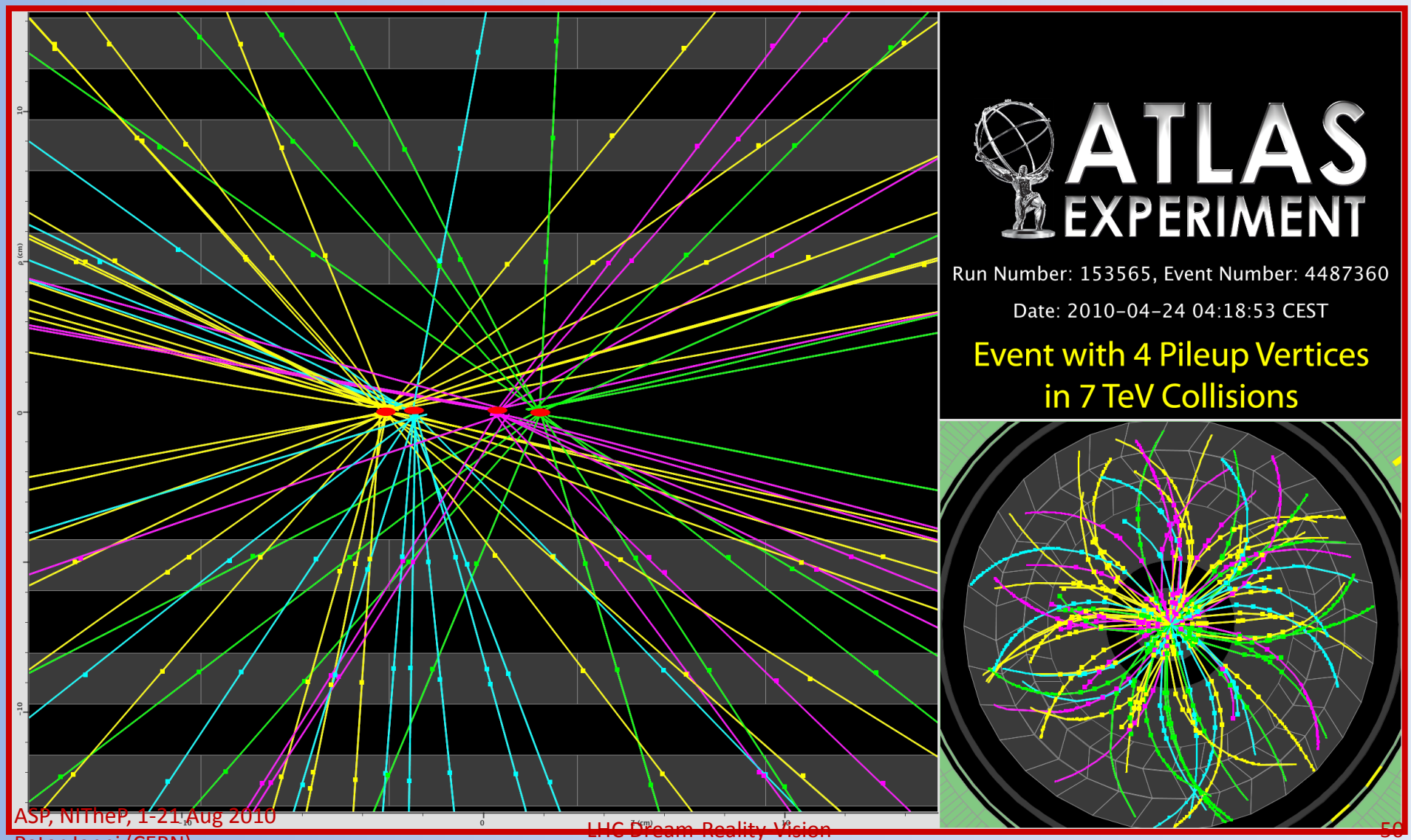
Уроки из последних результатов LHC

- СМ (EW and QCD) успешна настолько, что в это трудно верится

- Область существования Higgs бозона уменьшилась

- Нет указаний на открытие «Новой физики»

Огромное спасибо за неослабевающее внимание !

A pileup event in ATLAS (prob. per triggered event 1.8 x 10^{-4} → expect ~910 pileup events in run)

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