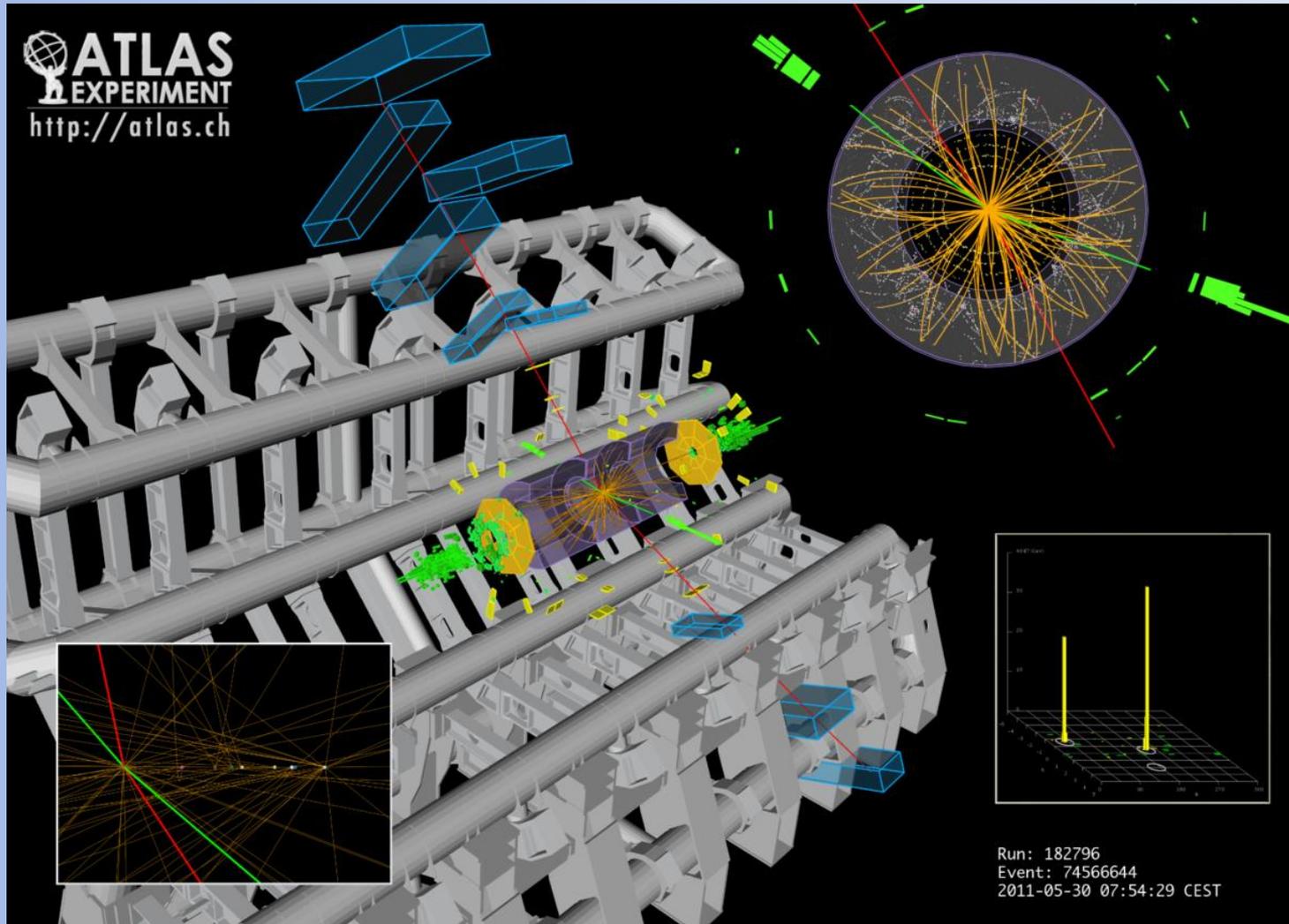


Регистрация (детектирование)

частиц - 2

Николай Зимин и Рустем Оспанов



Трековые детекторы:

- а) газовые
- б) твердотельные

Калориметры:

- а) электромагнитные
- б) адронные

Детекторы на LHC

«Соломенная» трубка

Катод: металлическая трубка диаметром R

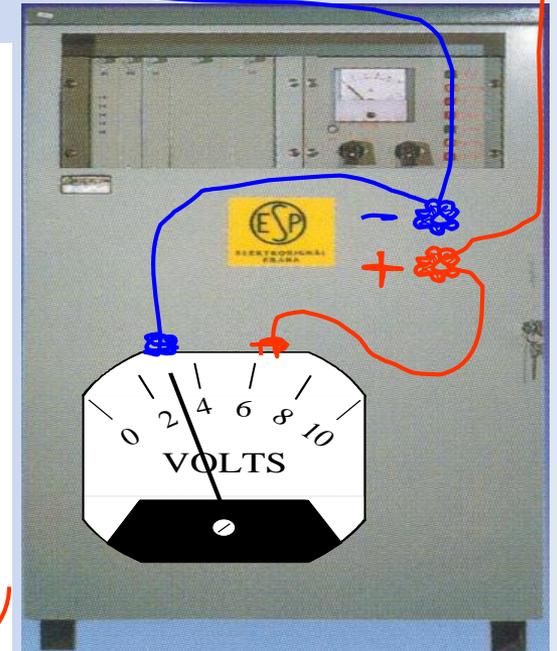
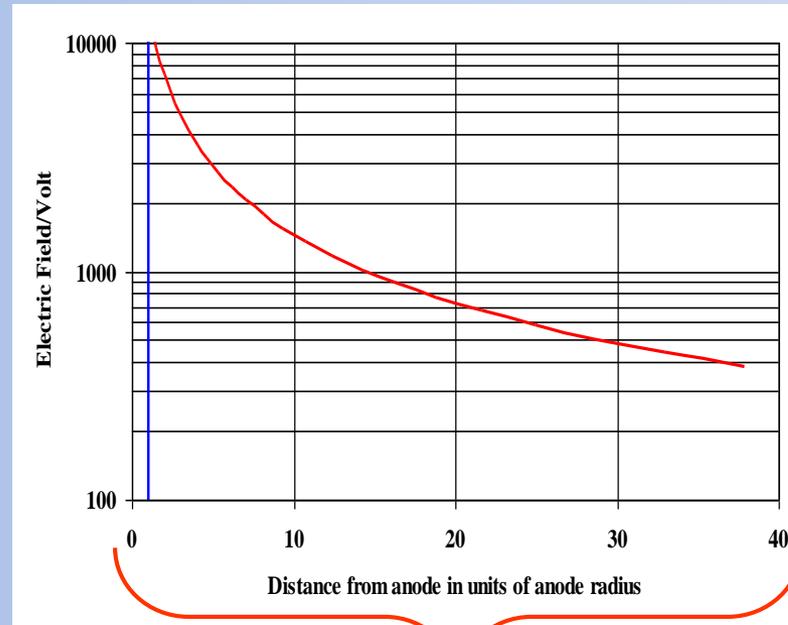
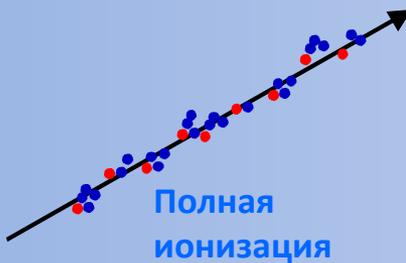
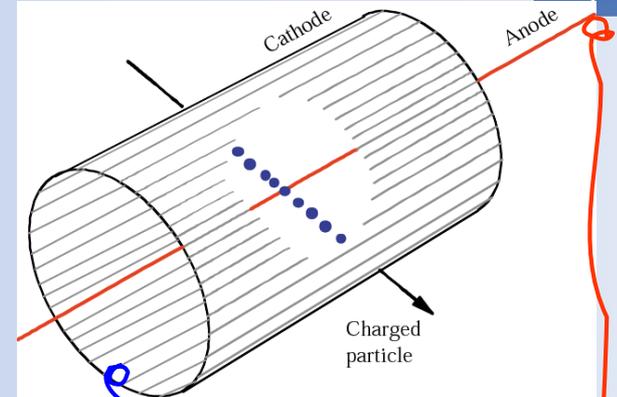
Анод: золоченая вольфрамовая проволока r_0

$$r_0 = 10 \mu\text{m}$$

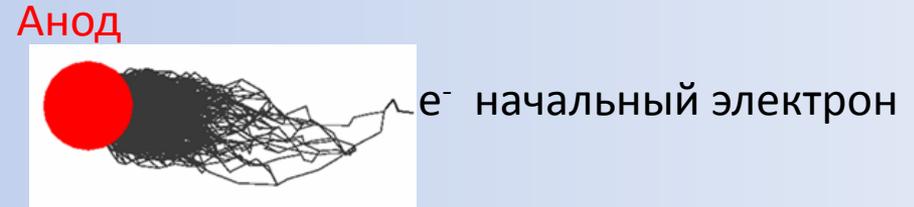
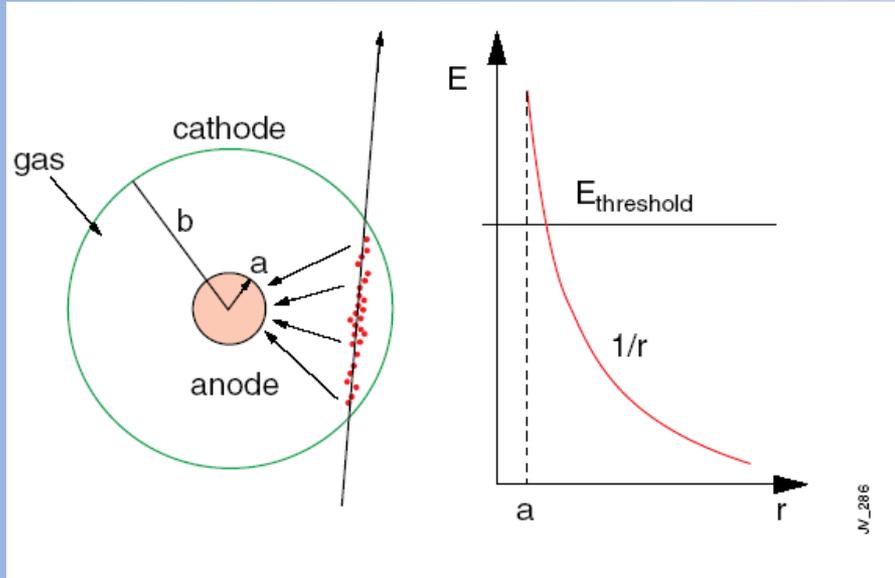
$$R/r_0 = 1000$$

$$V \sim \text{kV}$$

Специальная газовая смесь



$$\sigma(\text{ionization}) = f(E, \text{gas}) \quad \left. \vphantom{\sigma} \right\} \longrightarrow \text{Газовое усиление}$$

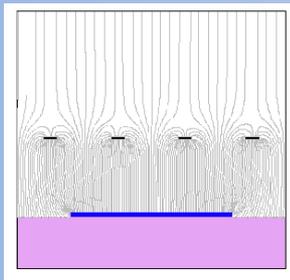


СОВРЕМЕННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ, создающие сильный градиент E-поля:

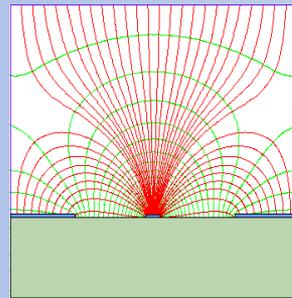
Микромегаз

Микрострип

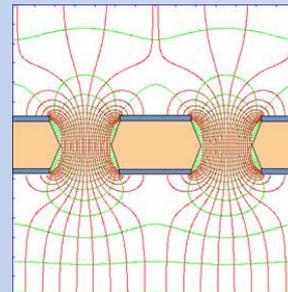
GEM газовый электронный усилитель



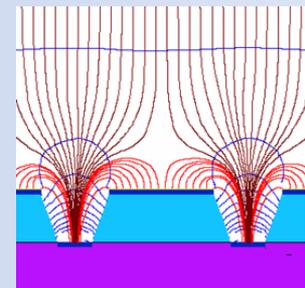
parallel plate



strip



hole



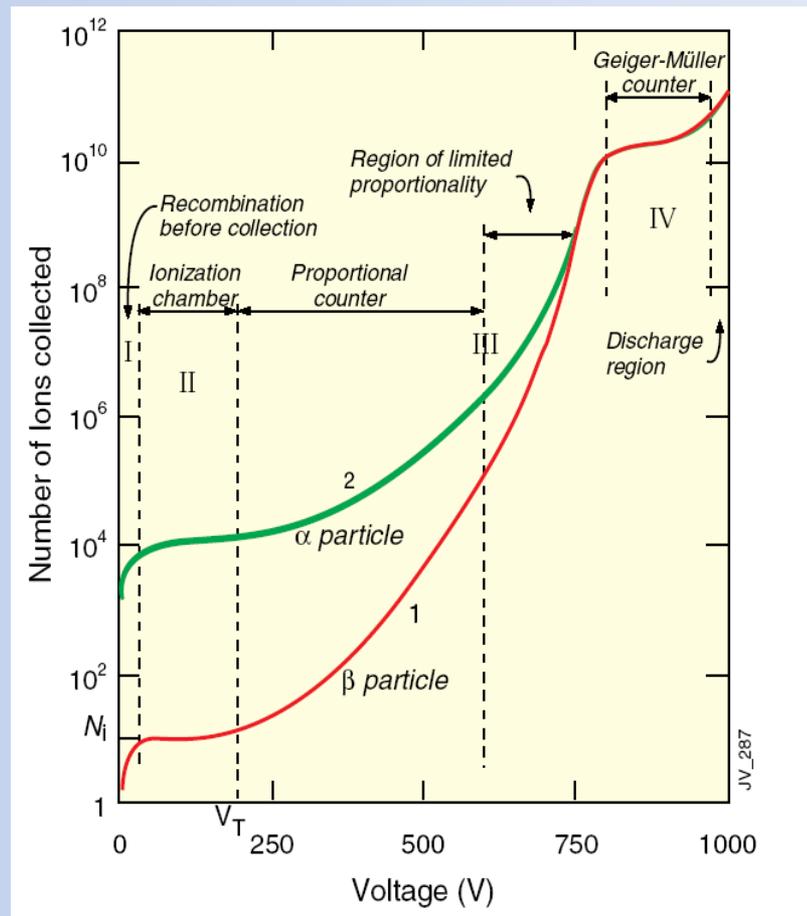
groove

Ионизационная – весь заряд собирается,
газового усиления нет, усиление ~ 1

Пропорциональная – усиление ионизации;
сигнал пропорционален начальной ионизации
→ возможно измерение (dE/dx) ;
вторичные лавины должны быть подавлены;
усиление $\sim 10^4 - 10^5$

Ограниченная пропорциональная (стримерная) –
сильная фотоэмиссия; вторичные лавины
объединяются с начальной; сильные
подавители или импульсное HV;
большой сигнал → простая электроника;
усиление до $\sim 10^{10}$

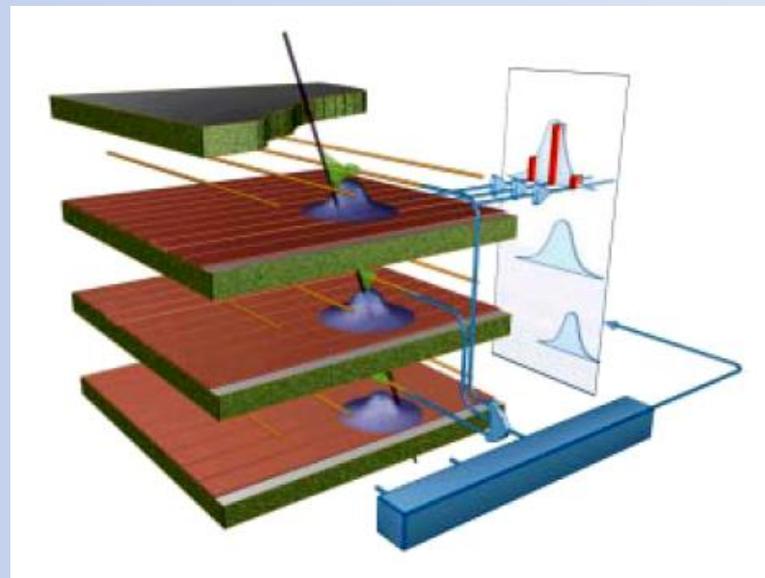
Гейгеровская – массивная фотоэмиссия; разряд по
всей длине проволоки ; останавливается
снятием HV ; нужны сильные поглотители
Большое мёртвое время, медленный.



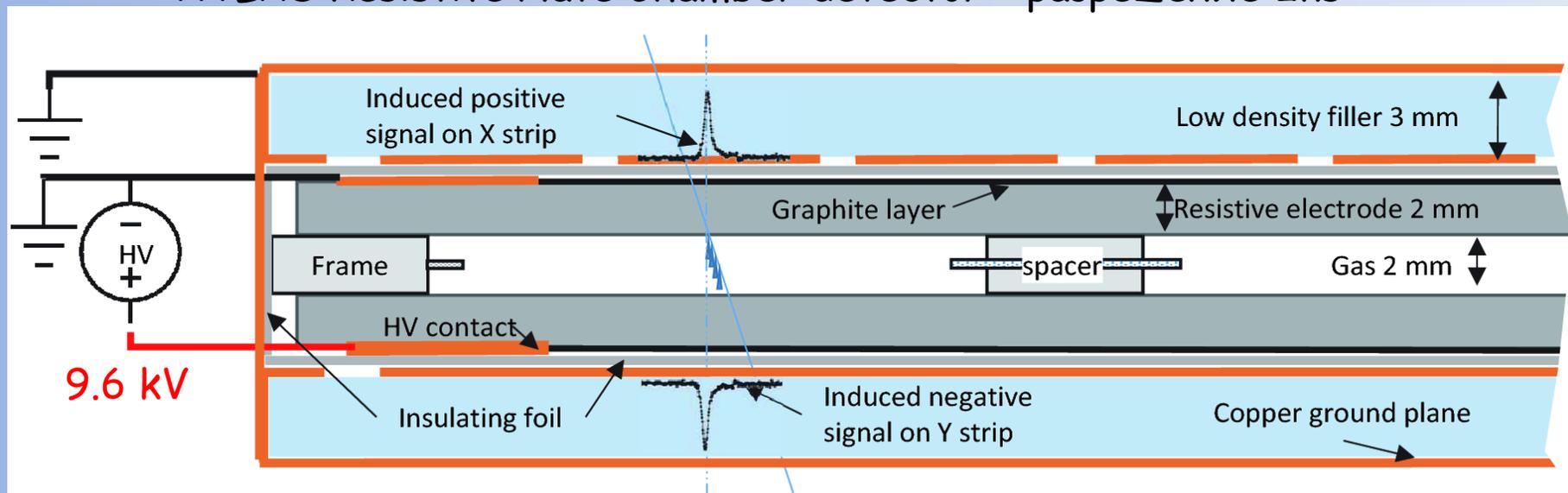
Считывание с катодных стрипов или падов.

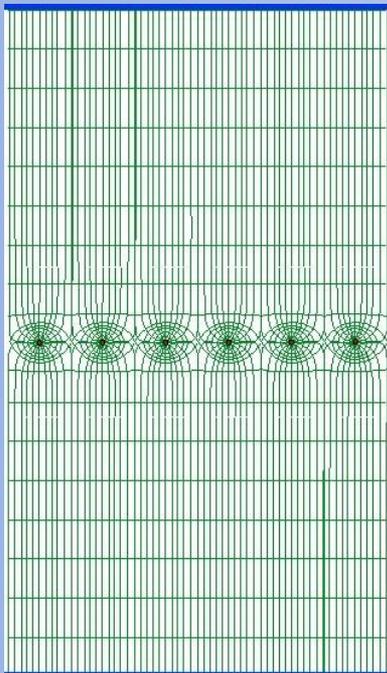
Определение второй координаты с помощью интерполяции индуцированного сигнала на стрипы (полоски) или пады (площадки).

Маленький зазор \rightarrow быстрый детектор.



ATLAS Resistive Plate Chamber detector - разрешение 2ns





Идея разместить **много** проволочек: **Nobel Prize 1992**
Большая площадь, цифровое считывание.



Первое устройство для электронных экспериментов,
позволяющее набирать высокую статистику !!

Типичная геометрия
5mm, 1mm, 20 μm

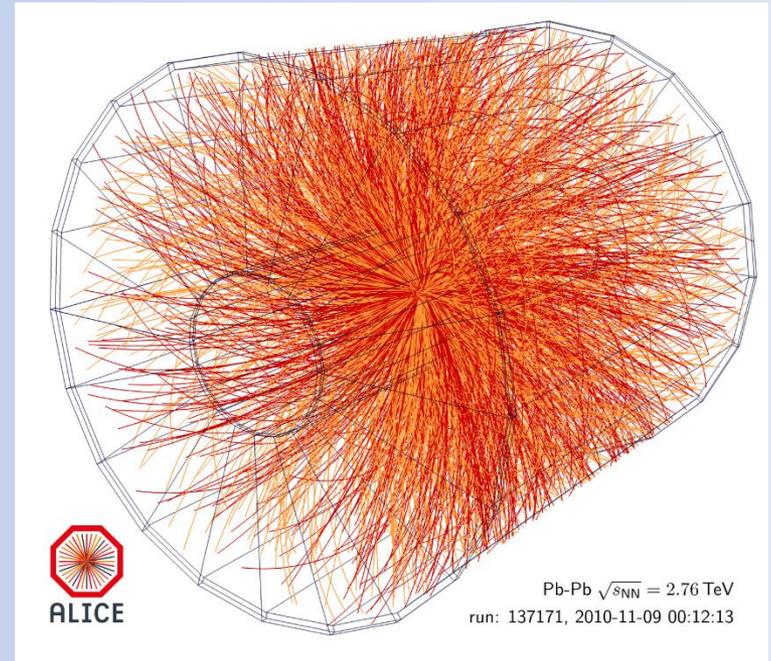
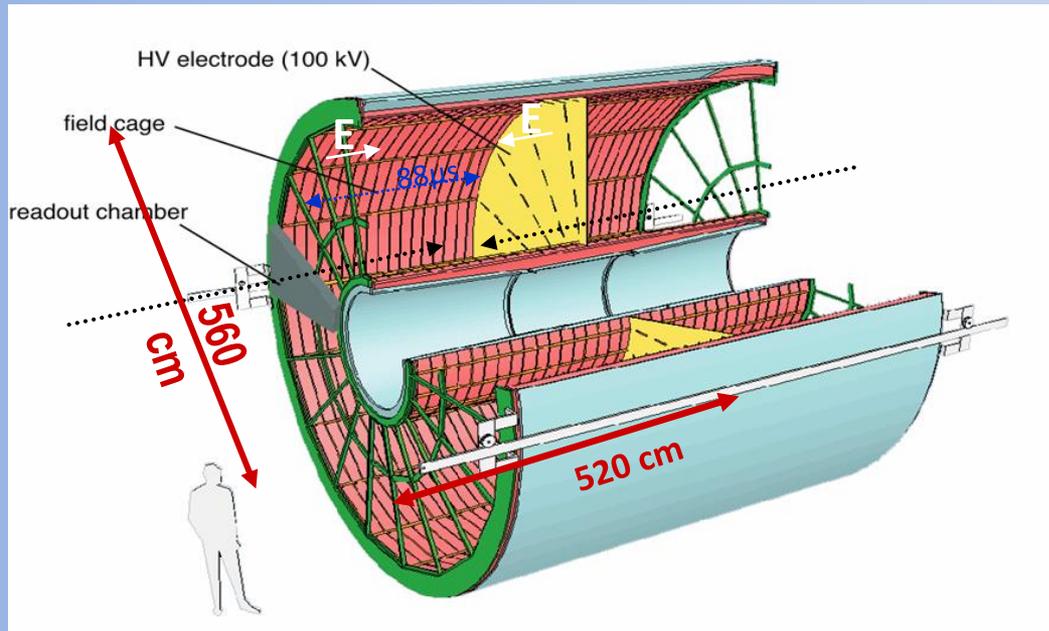
Пространственное разрешение:

$$\sigma_x \approx \frac{d}{\sqrt{12}}$$

Для $d = 1 \text{ mm}$ $s_x = 300 \text{ mm}$



G. Charpak, F. Sauli and J.C. Santiard



Alice TPC

HV central electrode at -100 kV

570132 pads with pad size 7 x 4.5 mm²

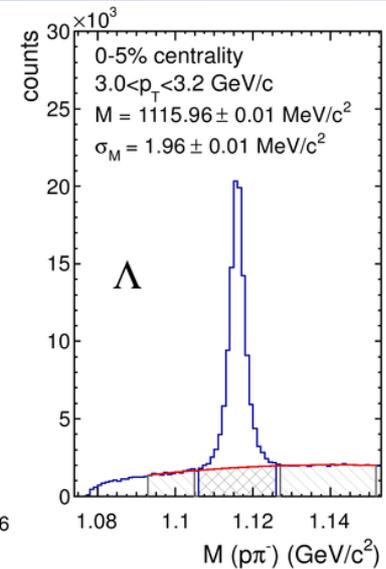
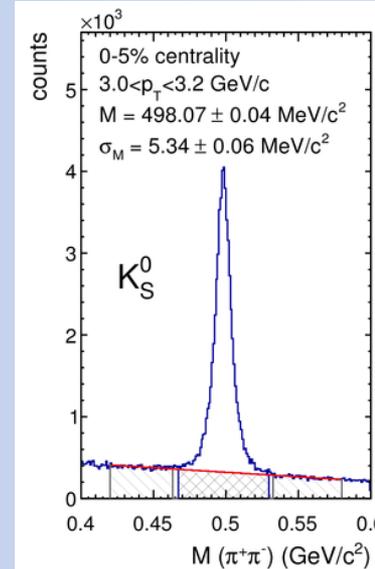
Drift length 250 cm at E=400 V/cm

Gas Ne-CO₂ 90/10 %

Space point resolution ~500 мкм

dp/p 2%@1GeV; 10%@10 GeV

Шедевр газовых детекторов!

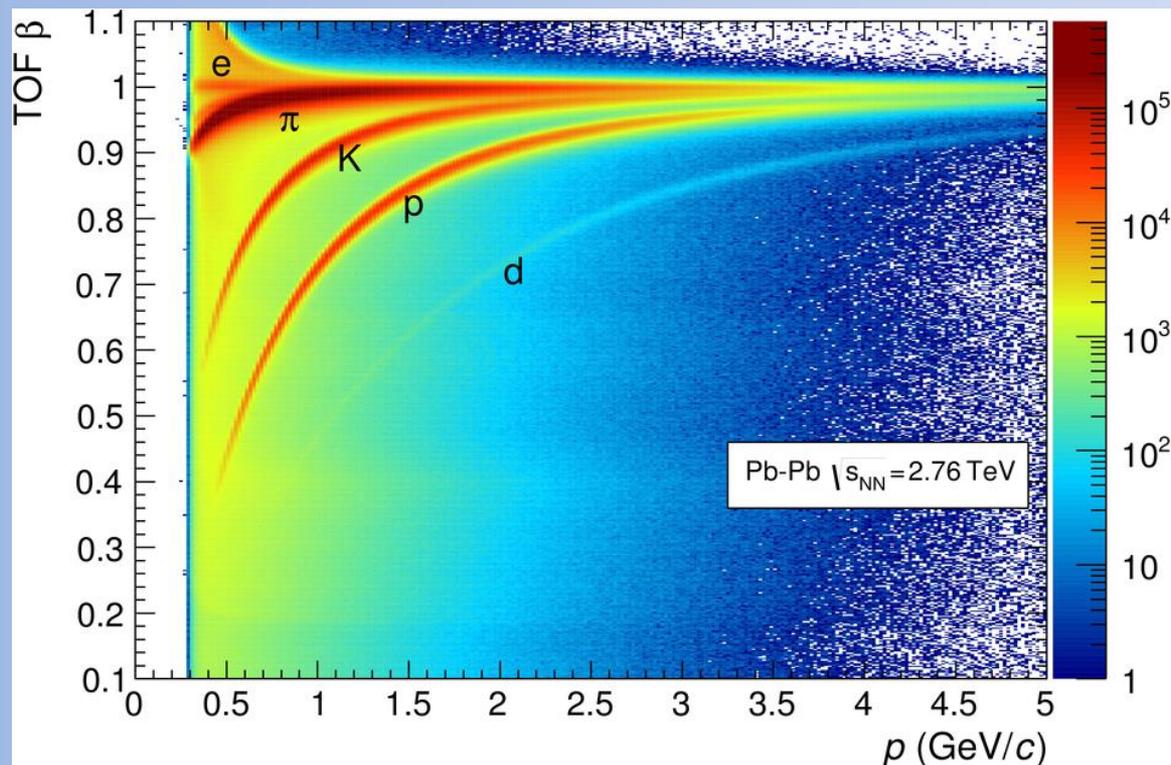
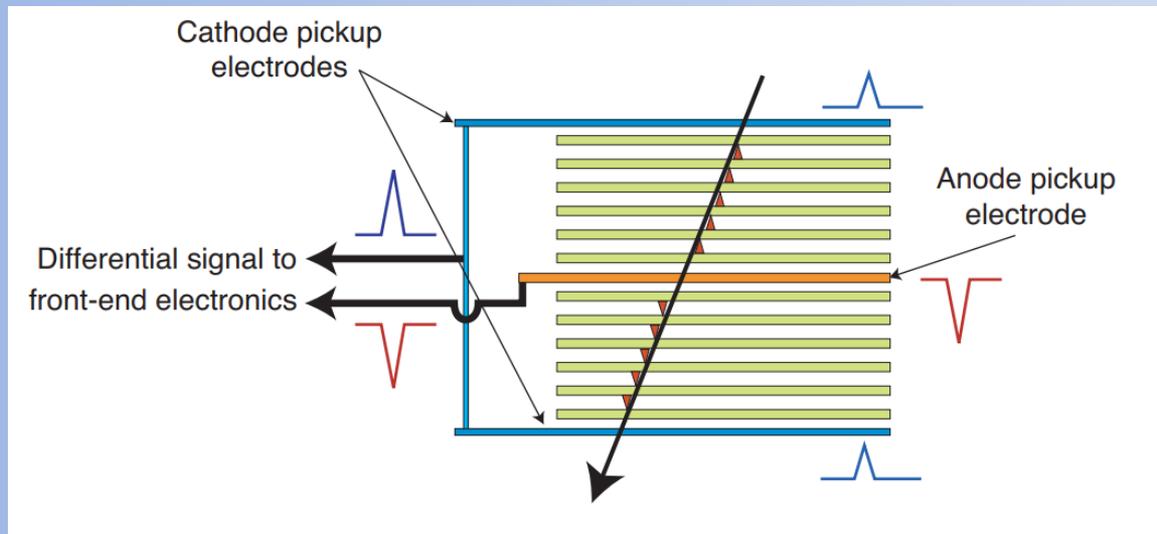


ALICE система времени пролета

Газовый детектор (RPC)

2x5 стеклянных пластин,
250 микрон между пластинами

Разрешение по времени 100ps



Полупроводниковые кристаллы *Si, Ge, GaAs, Diamond*

Плотность ~ 1000 раз больше, по сравнению с газовыми

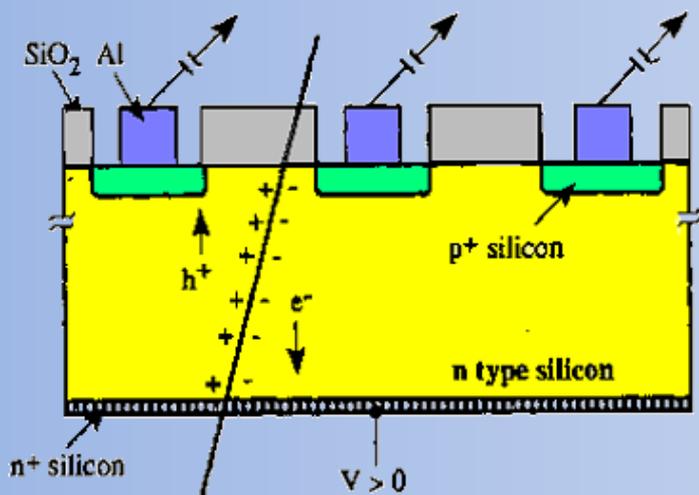
Энергия на создание пары электрон-дырка в 7 раз меньше, чем в Аргоне

Начальный заряд ~ 10000 больше \rightarrow не нужно усиление

В газовых скорость электронов и ионов различается в 1000 раз, в полупроводниковых скорость электронов и дырок \sim одинакова

\rightarrow меньше напряжение, короткие сигналы, быстрые детекторы

- Сегментация p⁺ слоя на стрипы и считывание по индивидуальным каналам дает координатную информацию.



Типичная толщина: 300μm (150μm - 500μm)

Используется n-тип Si с сопротивлением

$$\rho = 2 \text{ K}\Omega\text{cm} (N_D \sim 2.2 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-3})$$

Напряжение ~ 150 V

- Разрешение σ зависит от pitch (расстояния между стрипами)

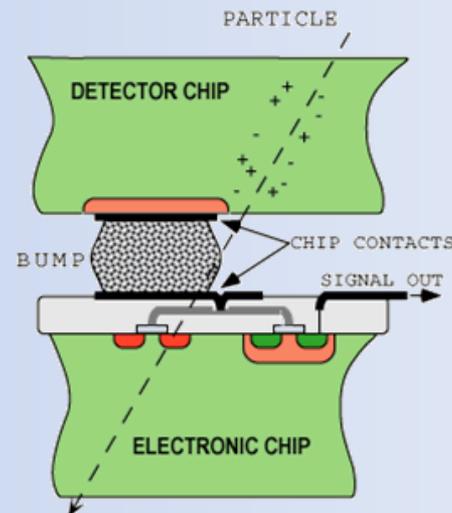
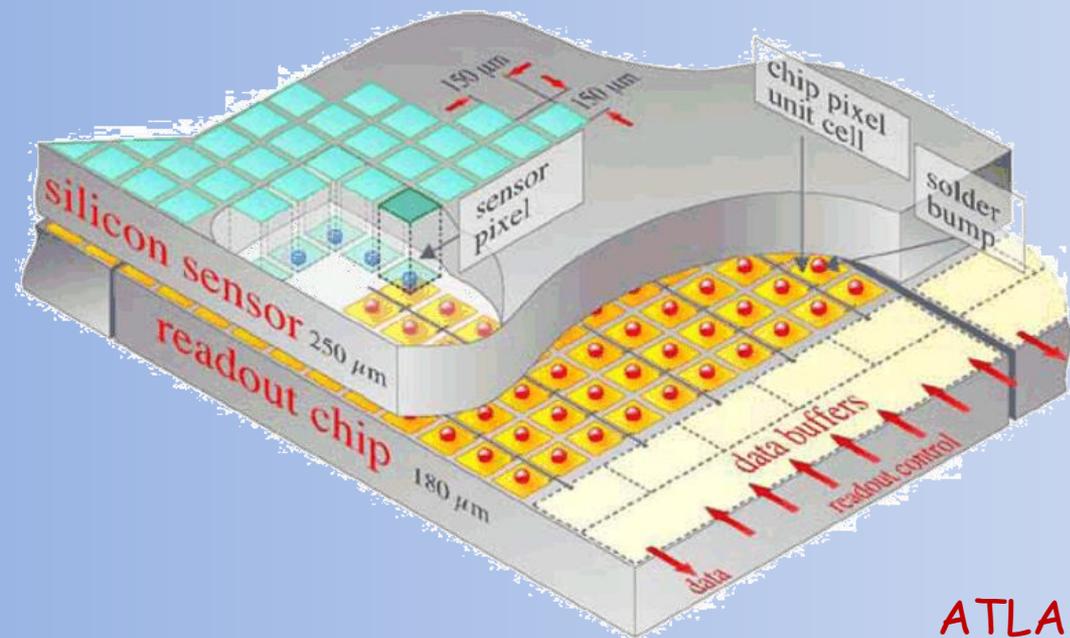
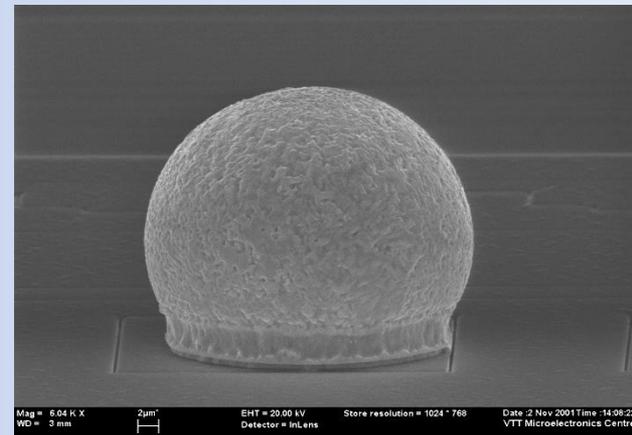
$$\sigma = \frac{p}{\sqrt{12}}$$

Типичная геометрия 20 μm– 150 μm ⇒ 50 μm pitch дает разрешение 14.4 μm

■ 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 $\leq 92 \cdot 10^6$ пикселей

■ Детекторные модули - “Основные элементы трековых детекторов”

- Si сенсоры
- Механические держатели, питание и охлаждение
- Front-end электроника и передача сигналов

■ Пример: ATLAS SCT Barrel Module

• Silicon sensors (x4)

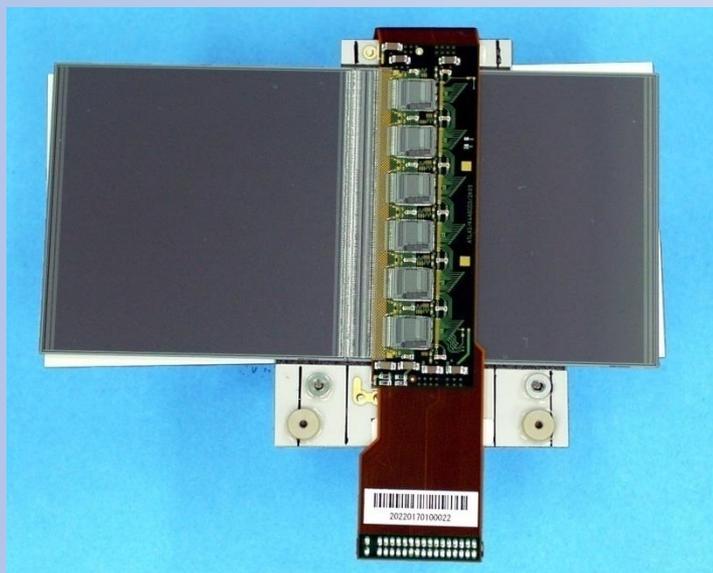
- 64 x 64 mm²
- p-in-n, single sided
- AC-coupled
- 768 strips
- 80µm pitch/12µm width

• 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



• ASICs (x12)

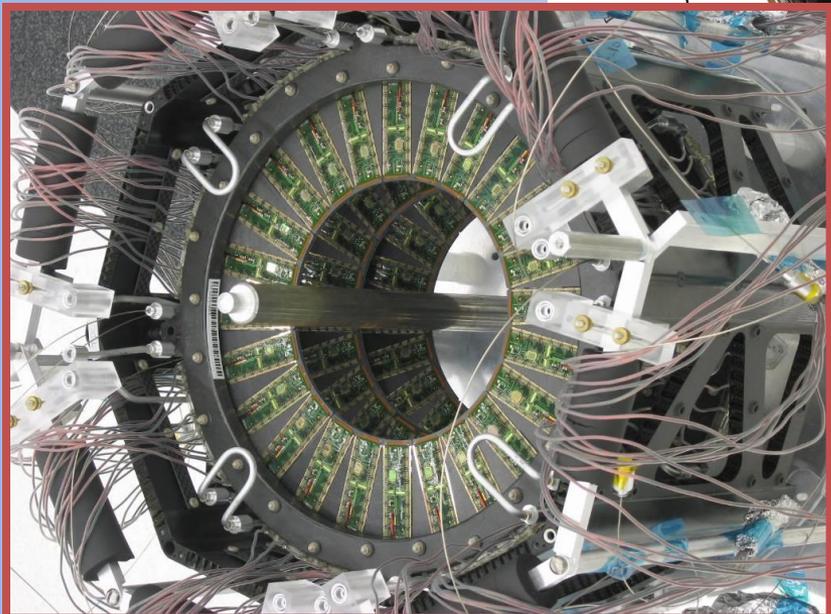
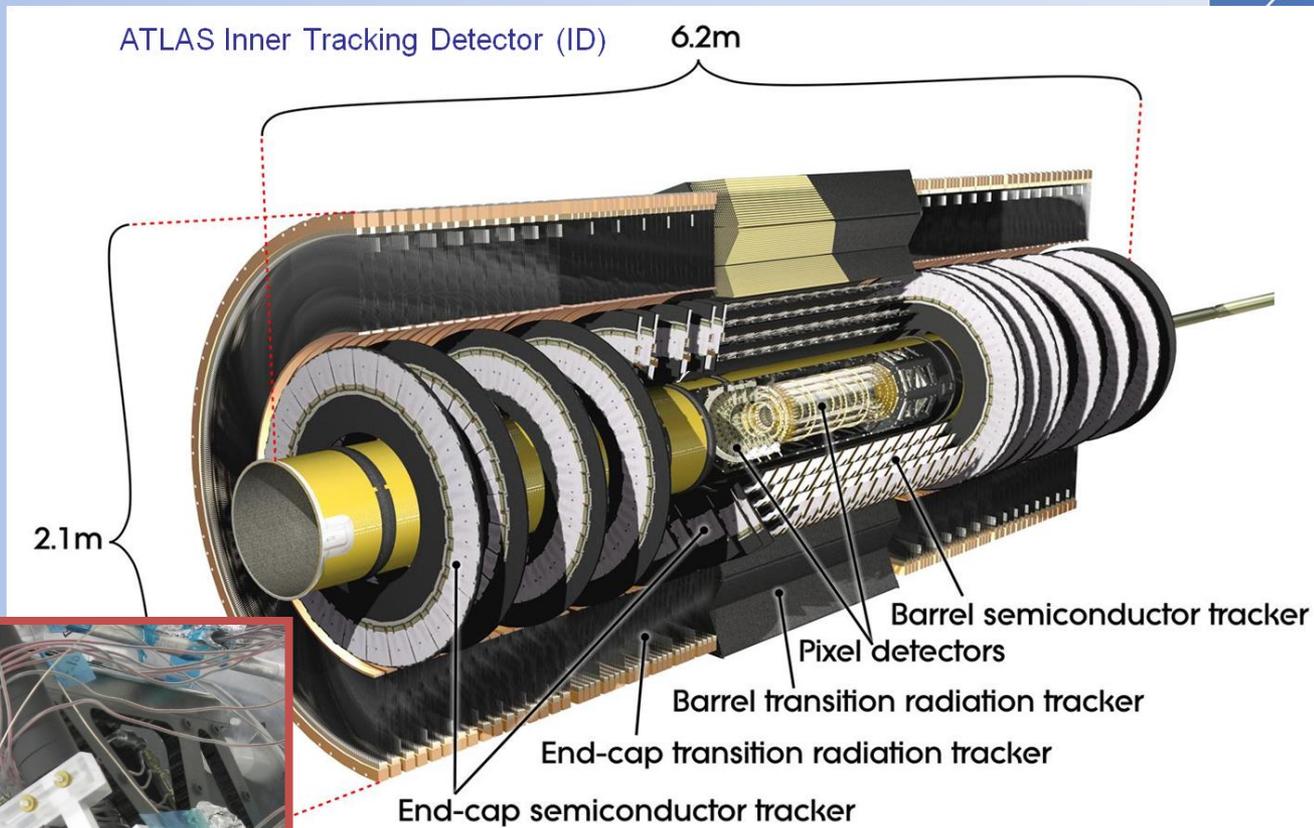
- ABCD chip (binary readout)
- DMILL technology
- 128 channels

• Wire bonds (~3500)

- 25 µm Al wires

■ ATLAS – SCT

- 15.552 microstrip sensors
- 2.112 barrel modules
- 1.976 forward modules
- **61 m² silicon**
- **ATLAS ≤ 6.3·10⁶ strips**



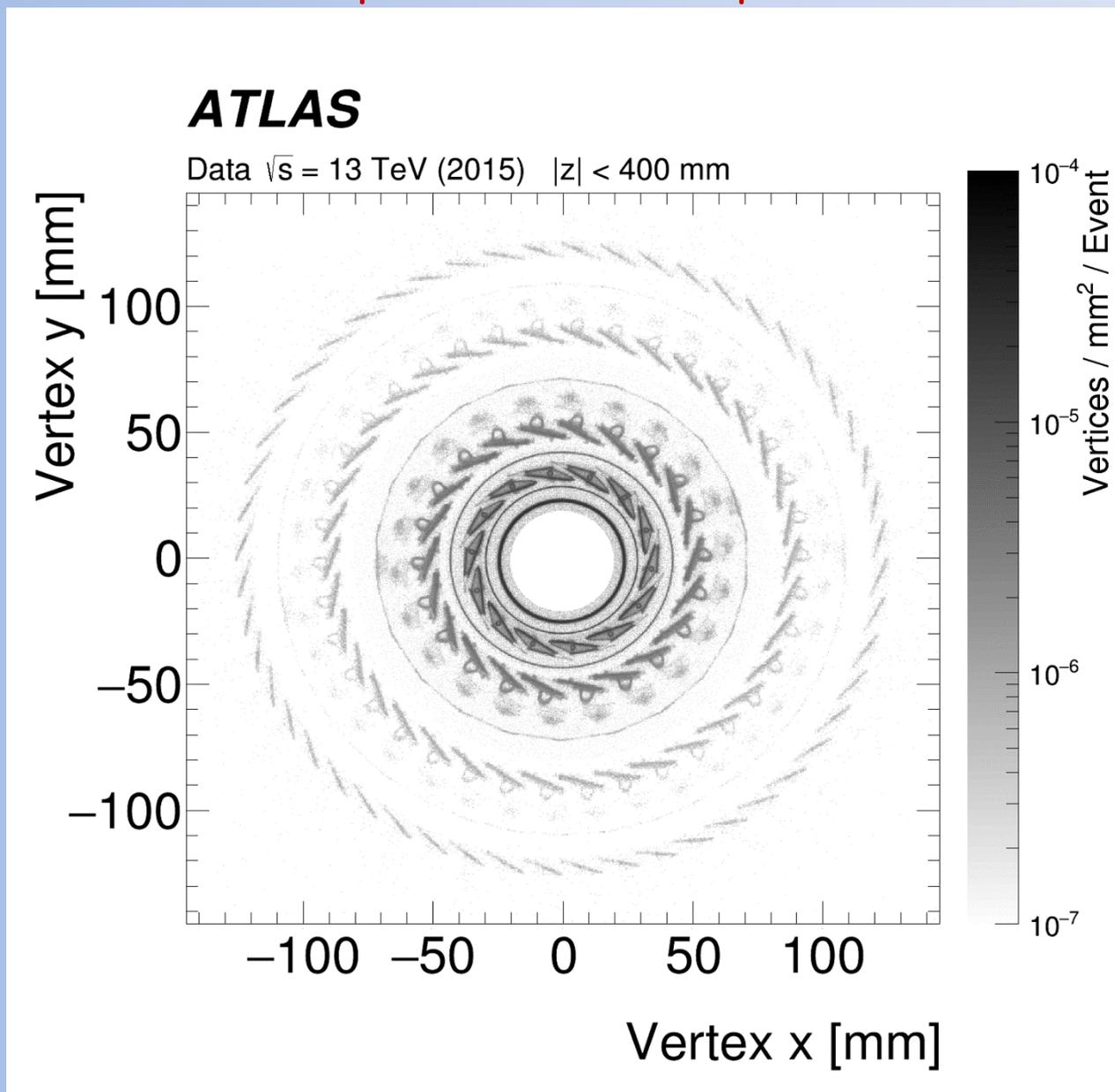
Реальные детекторные модули

Опоры-поддержки

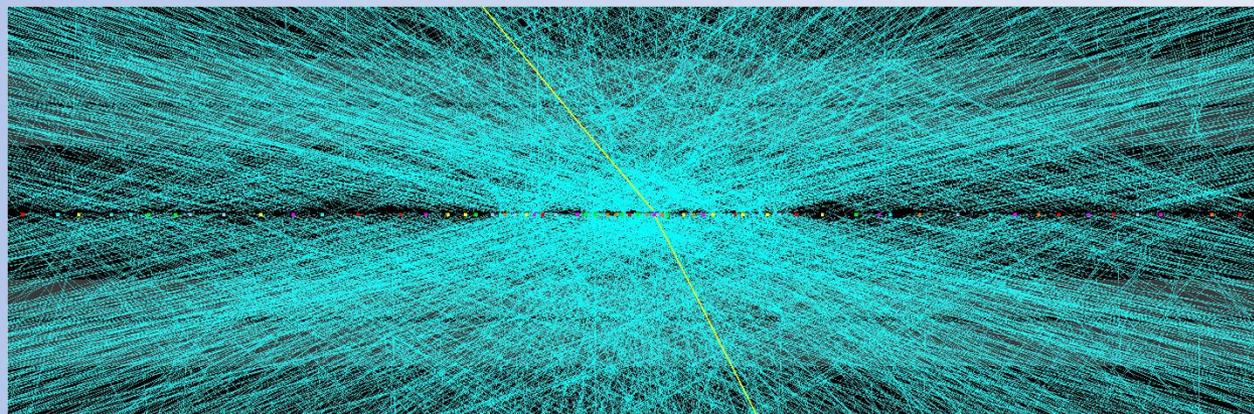
Кабели считывания и управления

Сложная система охлаждения

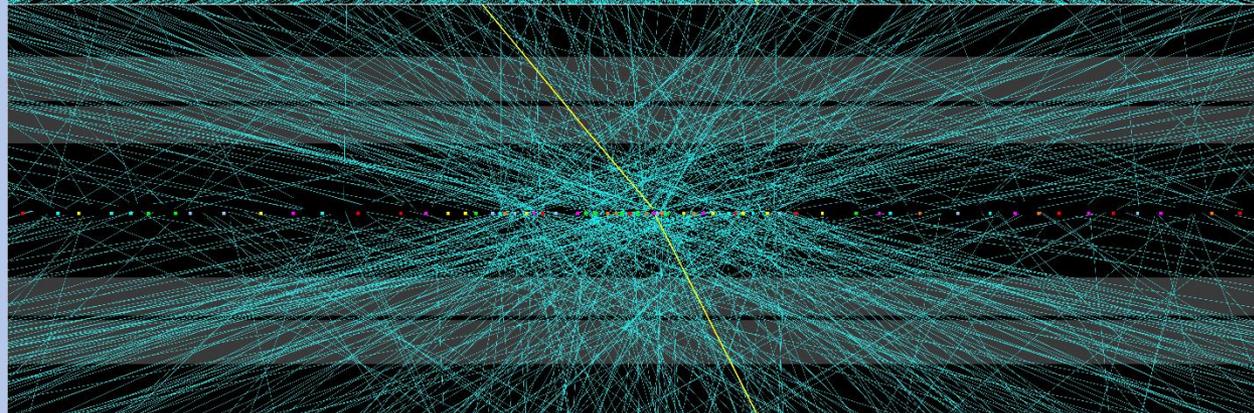
Восстановленная картина адронных взаимодействий в трековом детекторе



$p_T > 0.1 \text{ GeV}$



$p_T > 1 \text{ GeV}$

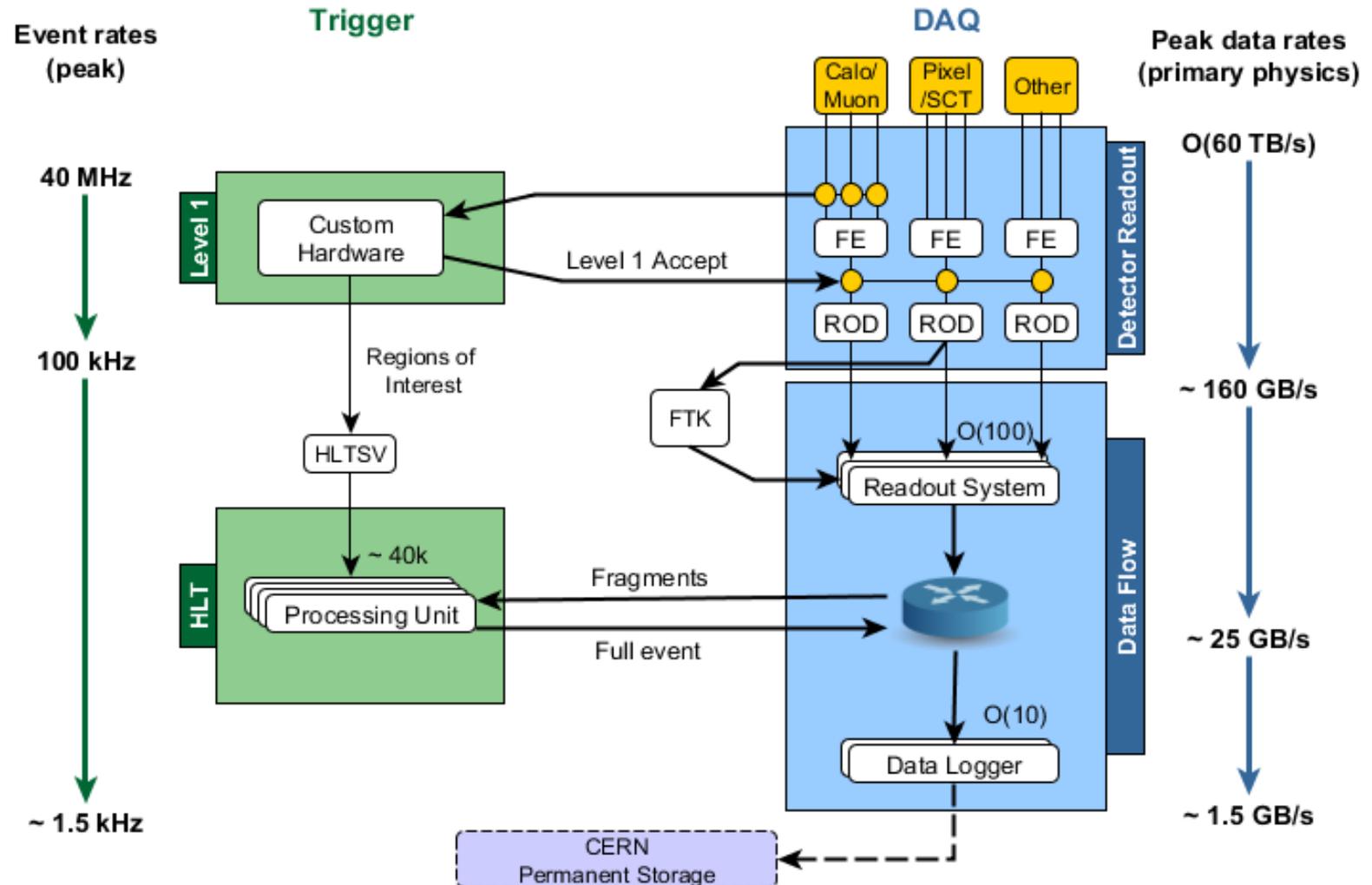


$p_T > 5 \text{ GeV}$



Триггер и система сбора данных

~40 миллионов пересечений пучков в секунду
~1 миллиарда протон протон столкновений в секунду



Калориметрия - измерение энергии путем полного поглощения
Обычно объединяется с «грубой» пространственной реконструкцией
Деструктивный метод - **частицы исчезают!!!**

Два главных 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

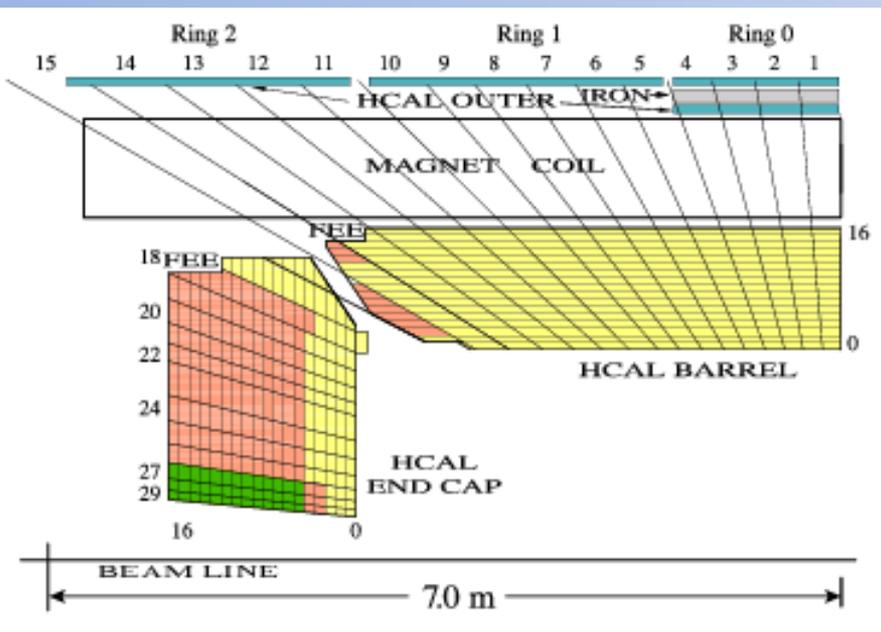
Сэмплинг калориметры = чередующиеся

Абсорбер (плотное вещество -> частые взаимодействия -> вторичные частицы)

Регистрирующие элементы - (газовые, жидкостные, твердотельные)

Много разных типов конкретной реализации в разных экспериментах

CMS Barrel + end-cap электромагнитный калориметр: lead tungsten crystals PbWO_4



78000 кристаллов выращенных в России и Китае за 10 лет (2 дня на кристалл)

Barrel: 1.5 кг $2.2 \times 2.2 \times 23 \text{ cm}^3$, $25.8 X_0$ ($X_0 = 0.89 \text{ cm}$)

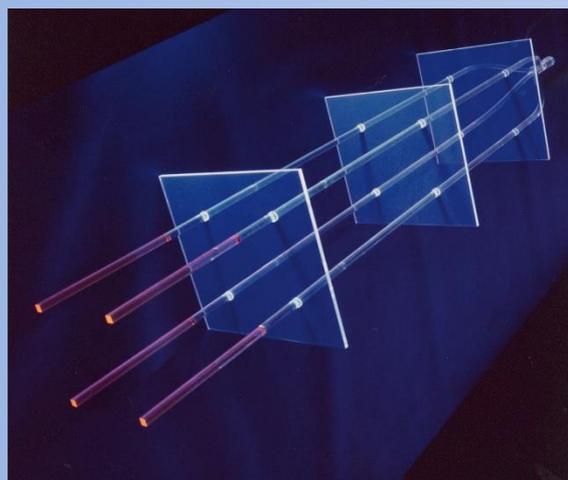
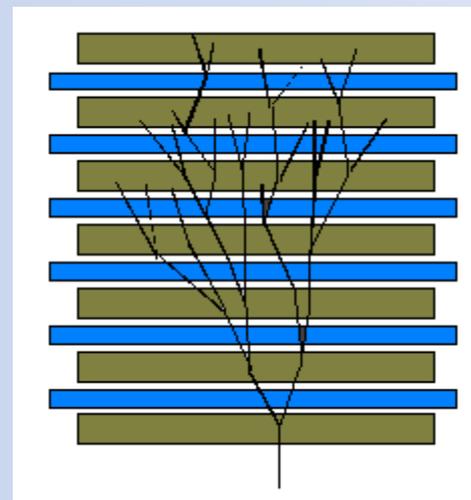
Разрешение энергии фотона примерно 1%

Электромагнитные и адронных калориметры

Поглотитель: свинец, медь, железо, уран,...

Активный элемент:

- Газовые детекторы
- Сцинтилляторы
- Оптоволокно
- Кремниевые детекторы
- Жидкие инертные газы:
Ar, Xe, Kr



Светосбор типа 'Шашлык'



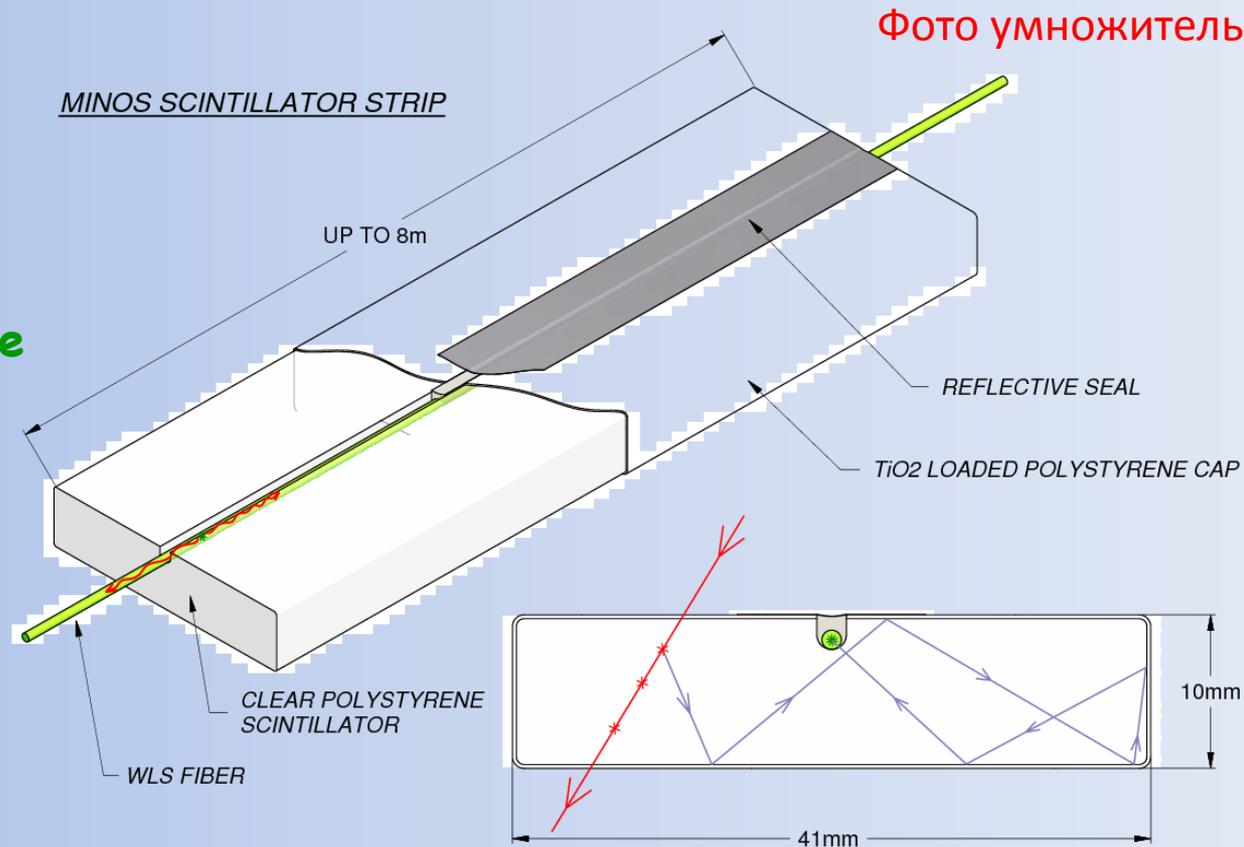
Фотоны отражаются по направлению к концам сцинтиллятора.

По световодам фотоны попадают в Фотоумножитель, где конвертируются в электрический сигнал.

Сегментируя, можно получить пространственное разрешение.

Из-за исключительного быстродействия ($< 1\text{ns}$), используются для

Триггера, время пролета, калориметры и т.д.



Детекторы, регистрирующие свет от возбужденных атомов

- Фото умножитель
- Avalanche photo diode
- Кремневый фото умножитель

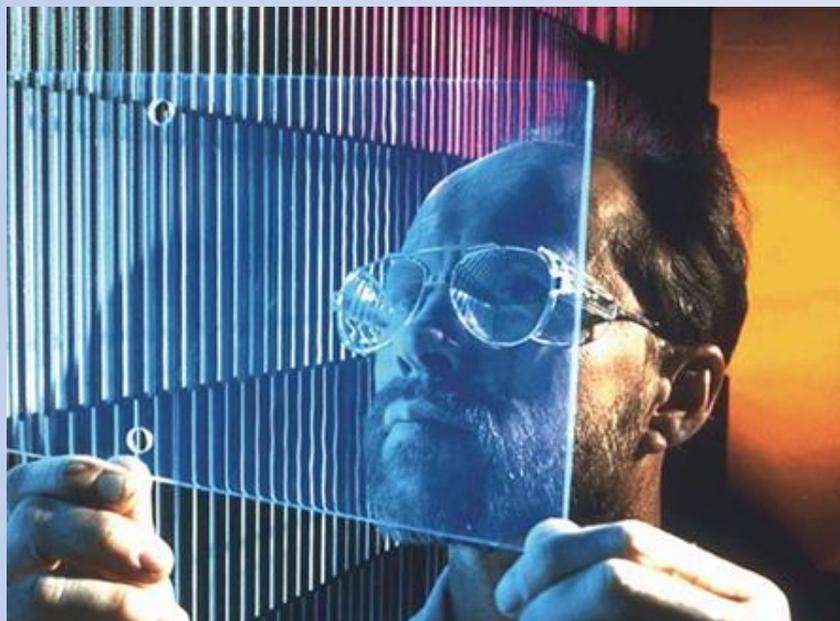
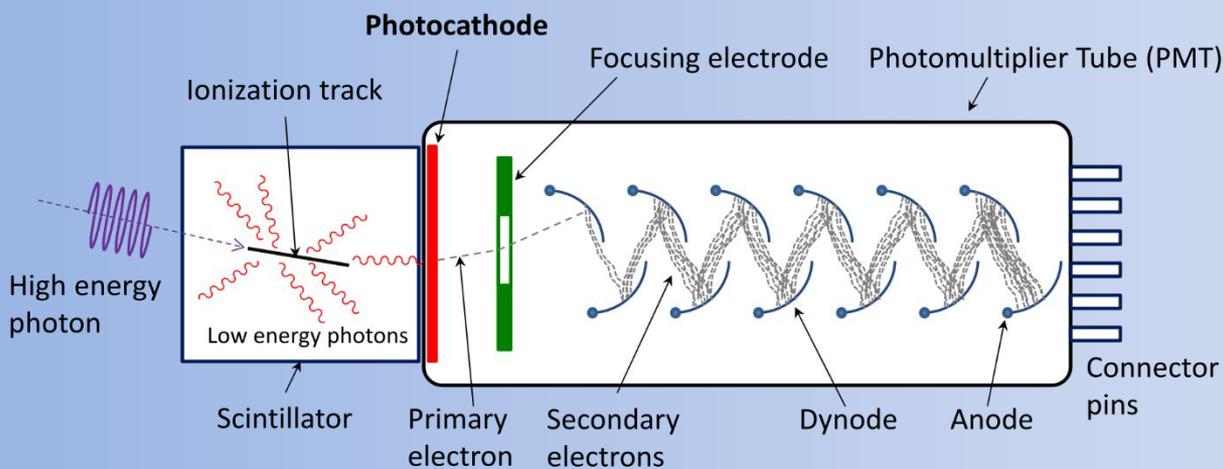
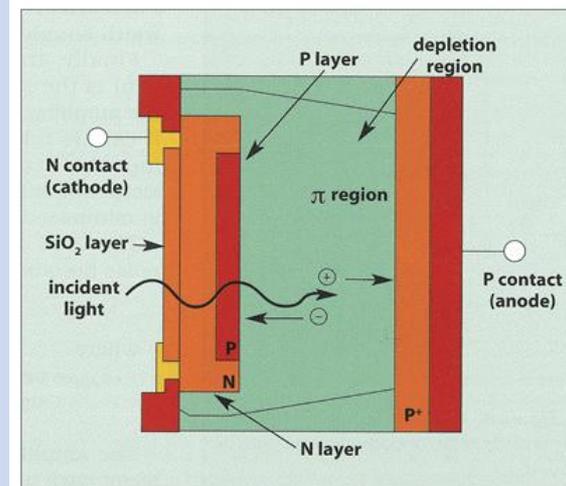


Фото умножитель



Avalanche photo diode (APD)

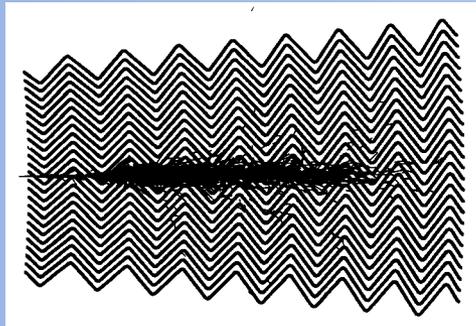


Калориметры

Пример ECAL (сэмплинг)

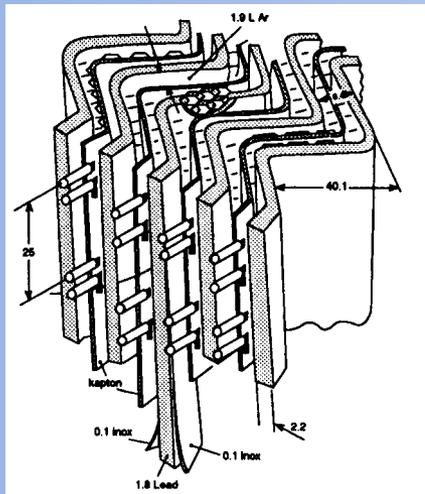
ATLAS электромагнитный калориметр

Абсорбер с «аккордеонной» геометрией в Liquid Argon



LAr (90K)

+ свинцово-железный (1-2 mm)
+ многослойная медно-полиамидная плата
= ионизационная камера.
1 GeV - 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}

Детекторы на LHC

Основные принципы выбора конструкции Детектора:

Концепт Детектора зависит от того, что изучать

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

Надо всегда помнить

Стоимость установки увеличивается пропорционально ~объему

Как можно меньше материала перед каллориметрами

Как можно больше материала перед мюонным спектрометром

Герметичность, но легкий доступ после открытия детектора

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 $\sim 10^{-5}$,

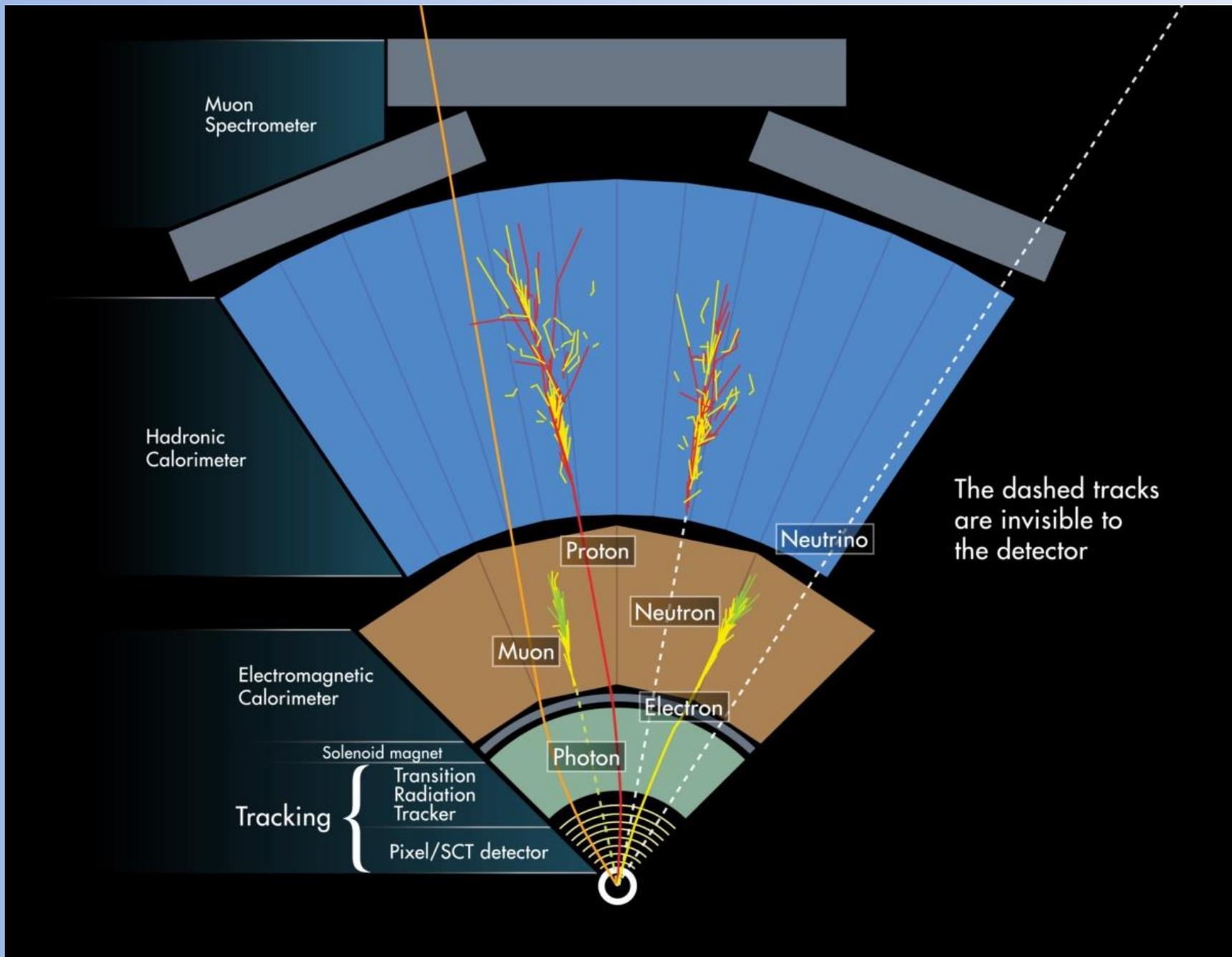
т.е. ~ 100 хуже, чем на Tevatron

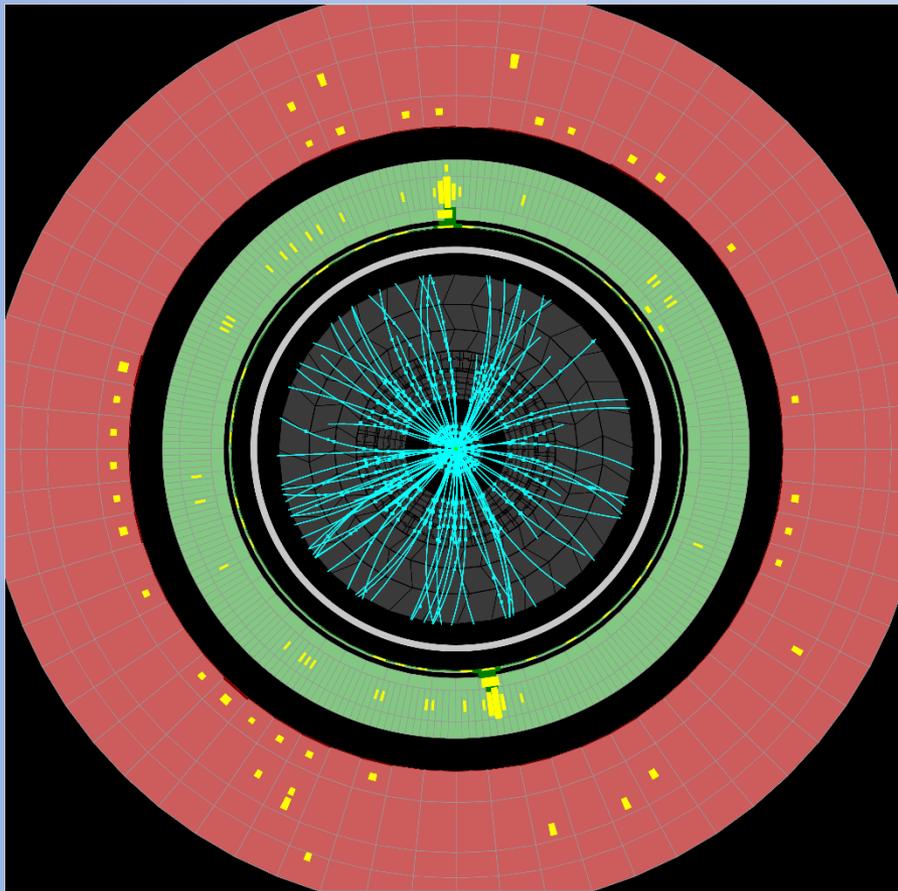
Сечение СИГНАЛА $\sim 10^{-14}$ от полного сечения: NEW!

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

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

Детекторы на LHC





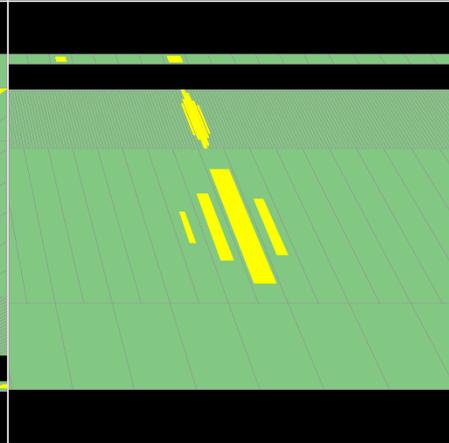
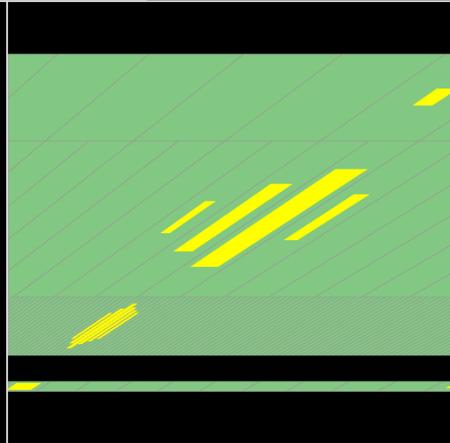
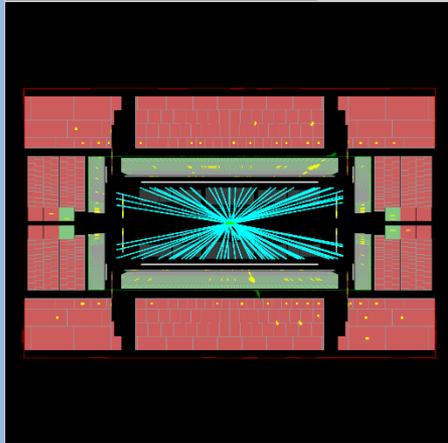
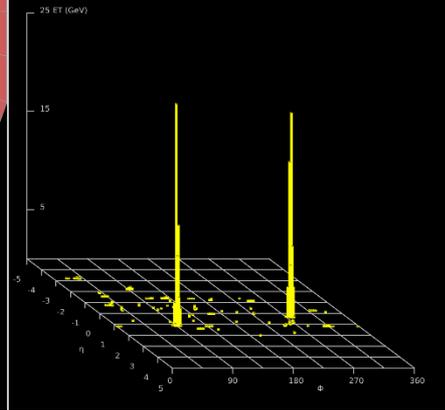

ATLAS
EXPERIMENT

Run Number: 203779, Event Number: 56662314

Date: 2012-05-23 22:19:29 CEST

Распад Бозона
 Хиггса в 2 фотона

$M_{\gamma\gamma} = 127 \text{ GeV}$



LAr Ecal

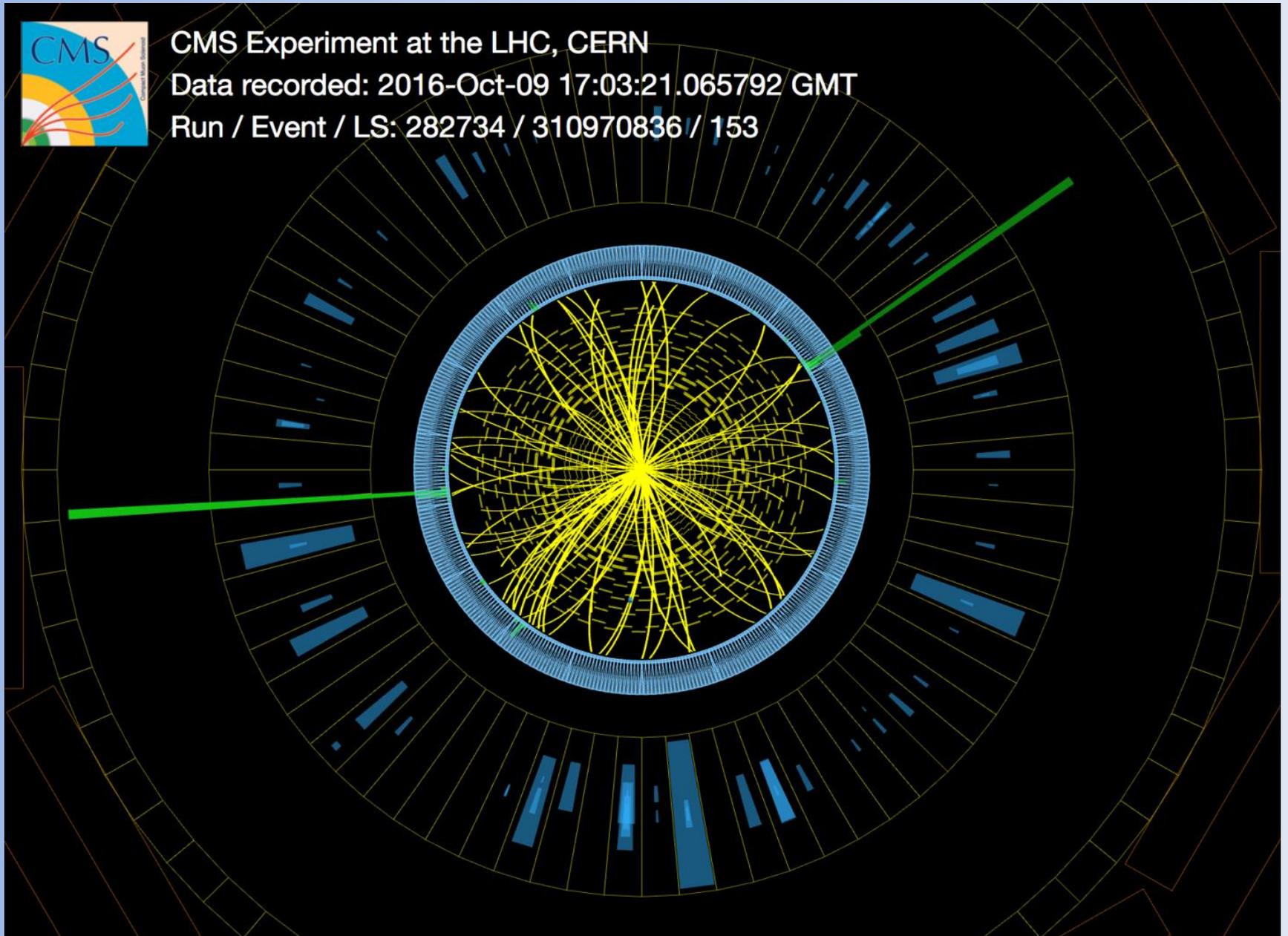
Распад Бозона Хиггса в 2 фотона



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2016-Oct-09 17:03:21.065792 GMT

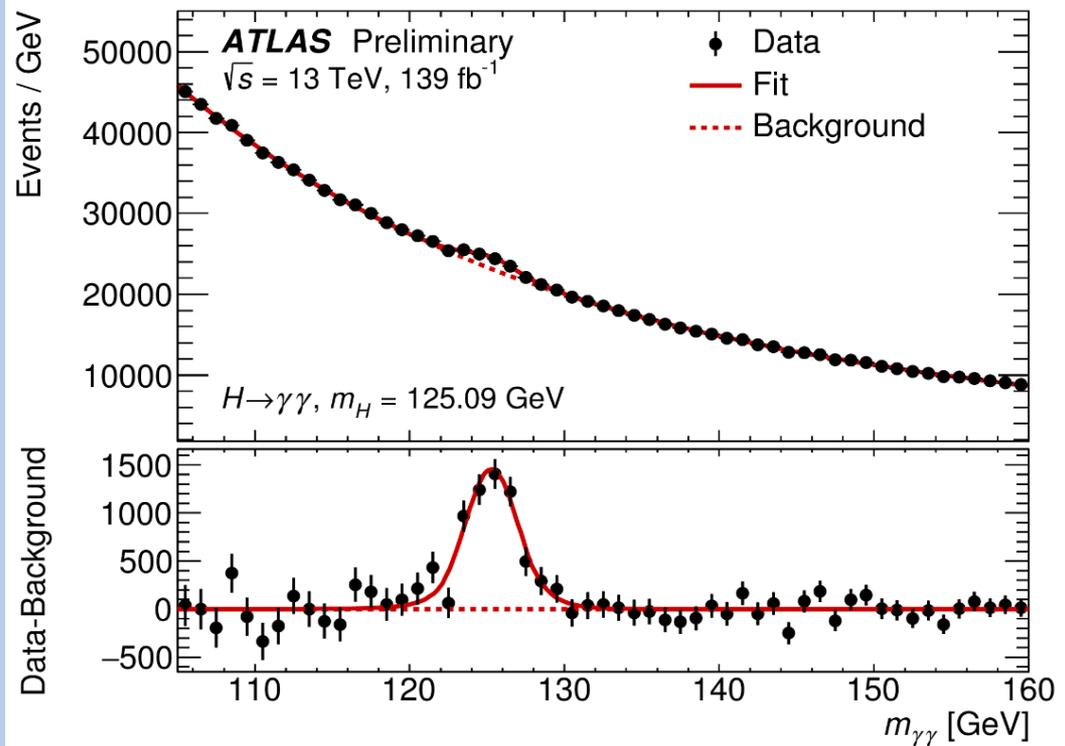
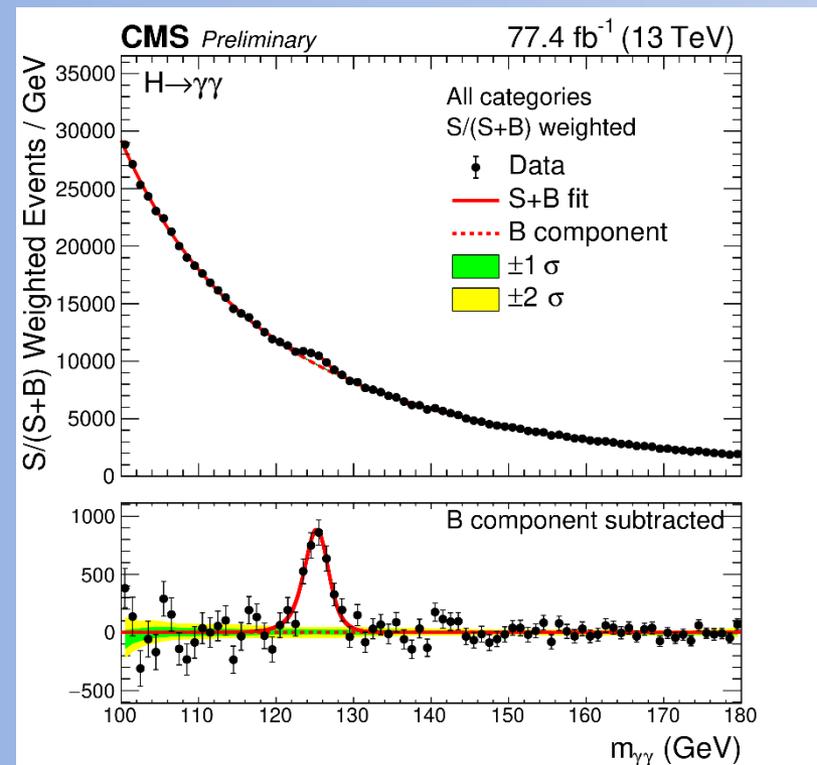
Run / Event / LS: 282734 / 310970836 / 153



Распад Бозона Хиггса в 2 фотона

Электромагнитные калориметры ATLAS и CMS были спроектированы чтобы “увидеть” этот распад Бозона Хиггса. Требуется разрешение энергии фотона с точностью лучше чем 1%.

Оба эксперимента независимо открыли Бозон Хиггса!



2942

PHYSICISTS
(1036 STUDENTS)

1065

ENGINEERS

281

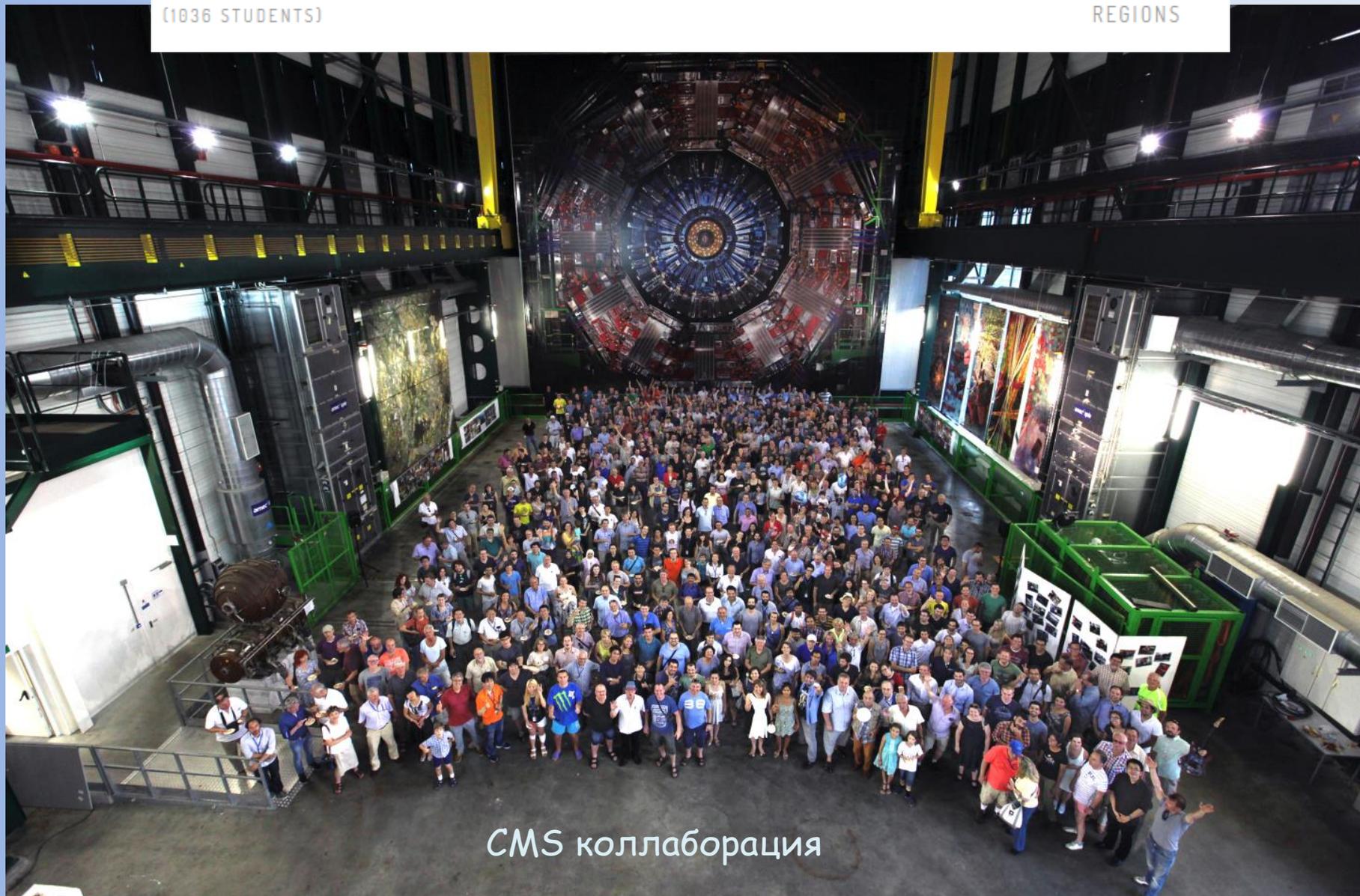
TECHNICIANS

229

INSTITUTES

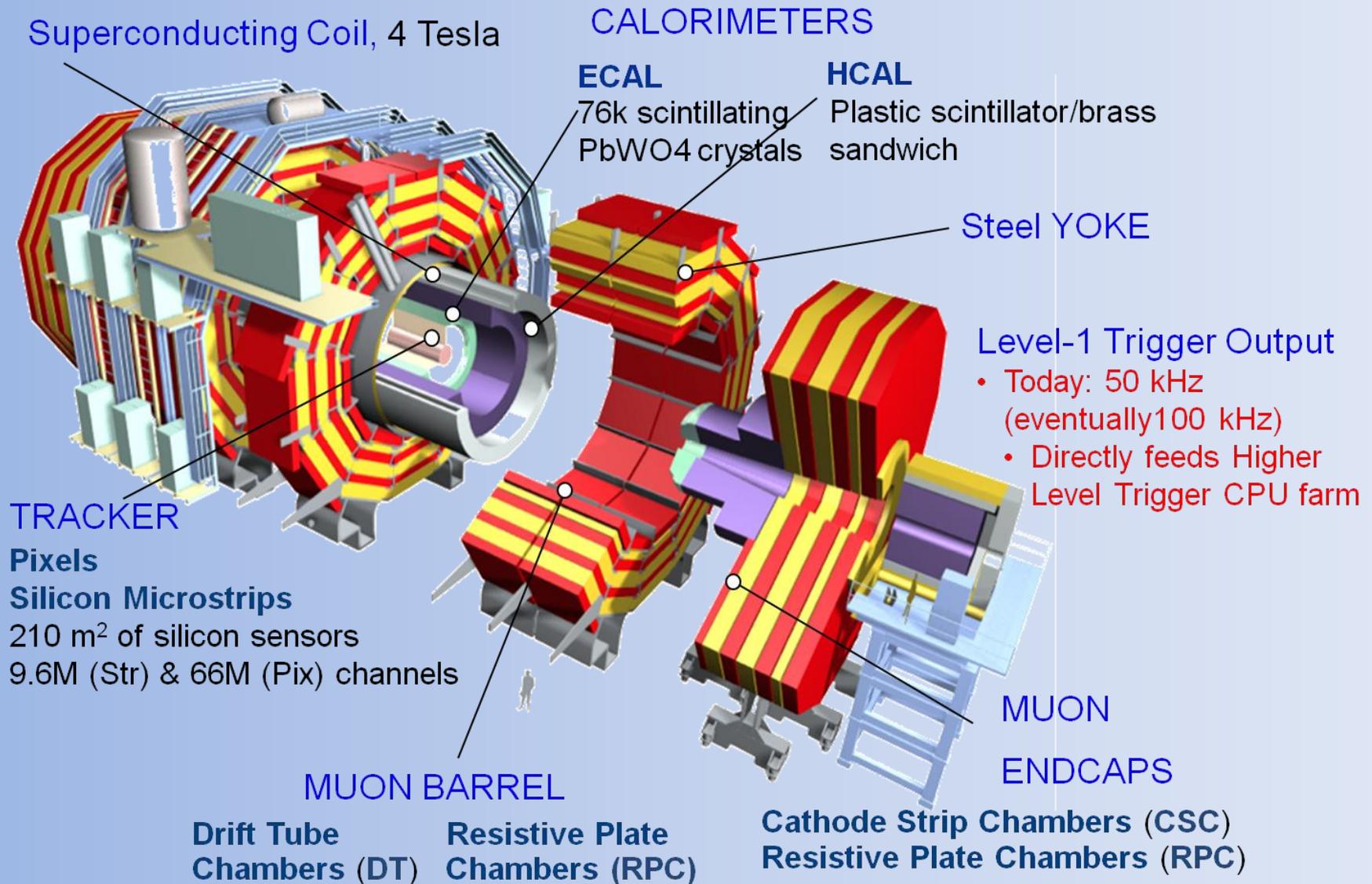
51

COUNTRIES &
REGIONS



СMS коллаборация

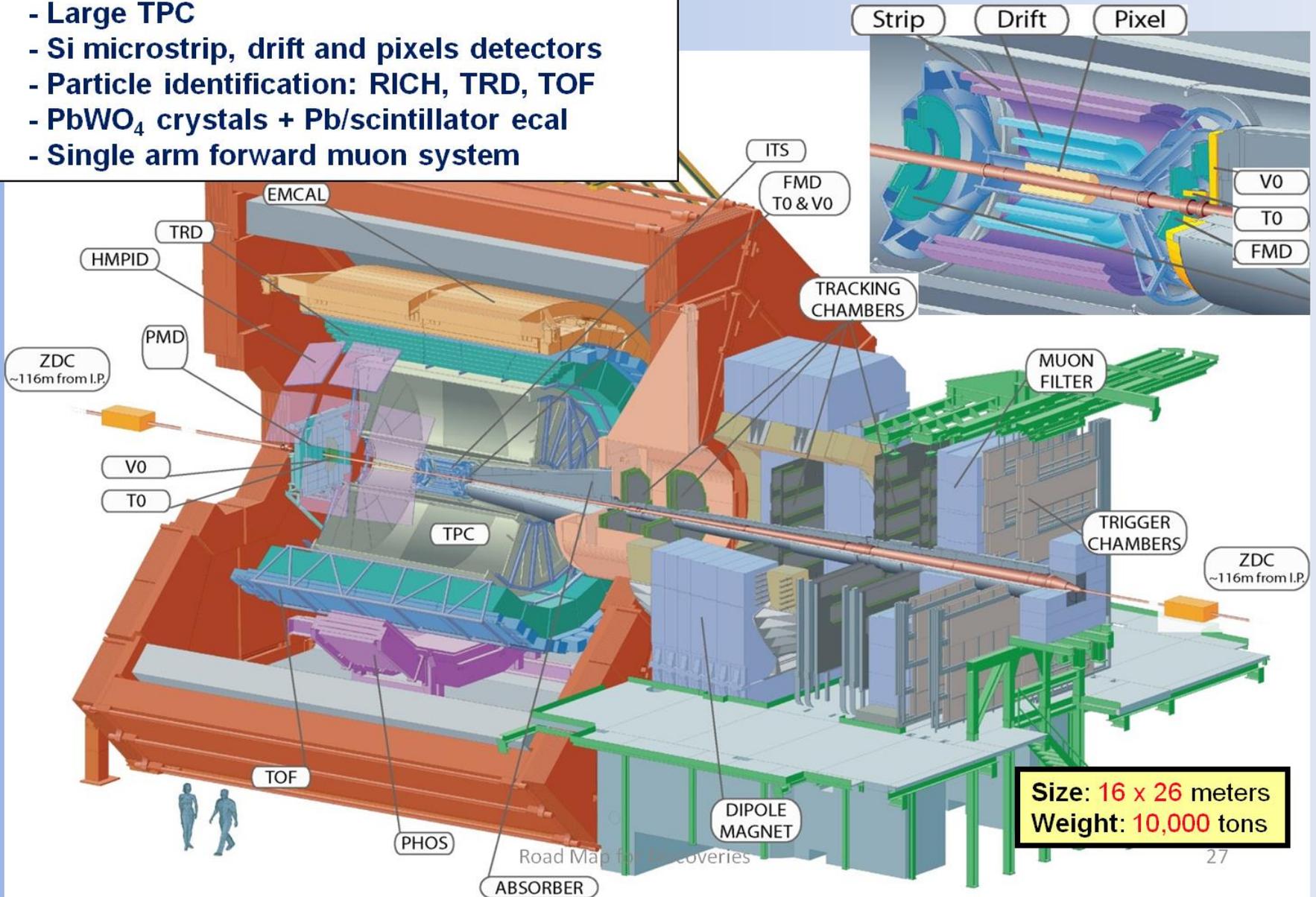
CMS Detector



ALICE: study of quark-gluon plasma

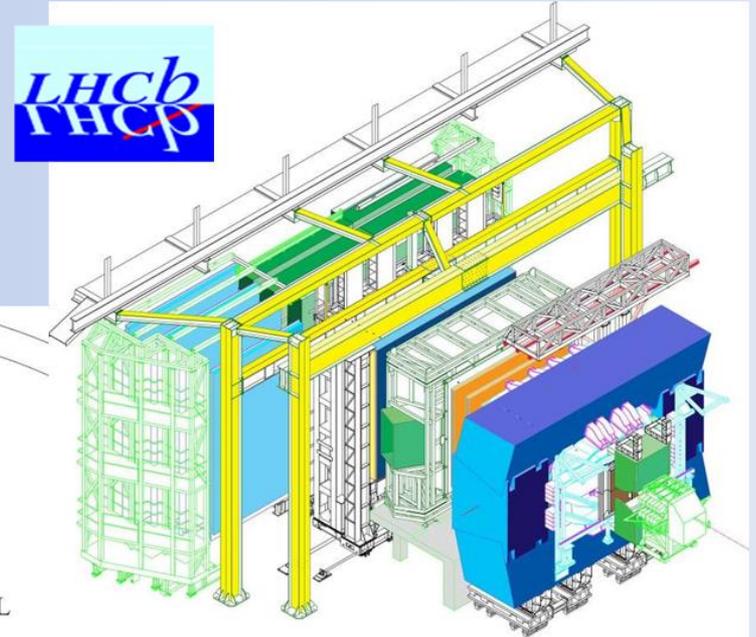
- L3 solenoid
- Large TPC
- Si microstrip, drift and pixels detectors
- Particle identification: RICH, TRD, TOF
- PbWO_4 crystals + Pb/scintillator ecal
- Single arm forward muon system

37 Countries, 154 Institutes,
and over 1500 members



LHCb: Study of B decays and CP Violation (indirect search for New Physics)

- Dipole magnet (4 T.m)
- Particle Identification (2 RICH)
- 21 layer of Si microstrip vertex locator (VELO)
- Tracking: Silicon + long straw tubes
- Shashlik (Pb/scint) em calorimeter
- HCAL (Fe/scint),
- MWPC muon system





- Argentina
- Armenia
- Australia
- Austria
- Azerbaijan
- Belarus
- Brazil
- Canada
- Chile
- China
- Colombia
- Czech Republic
- Denmark
- France
- Georgia
- Germany
- Greece
- Israel
- Italy
- Japan
- Morocco
- Netherlands
- Norway
- Poland
- Portugal
- Romania
- Russia
- Serbia
- Slovakia
- Slovenia
- South Africa
- Spain
- Sweden
- Switzerland
- Taiwan
- Turkey
- UK
- USA
- CERN
- JINR

ATLAS Collaboration

183 institutions (237 institutes) from 38 countries

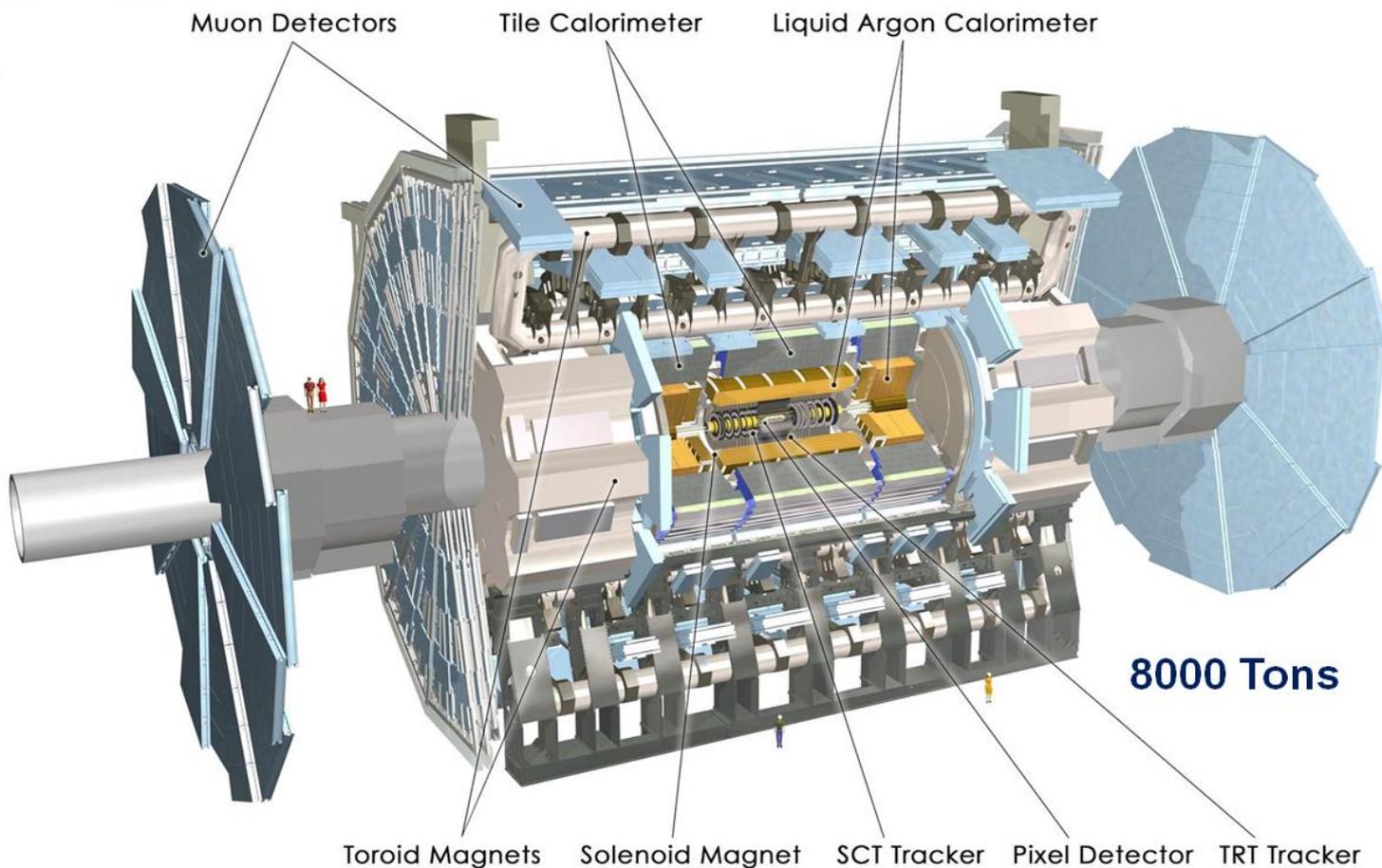


ATLAS Detector

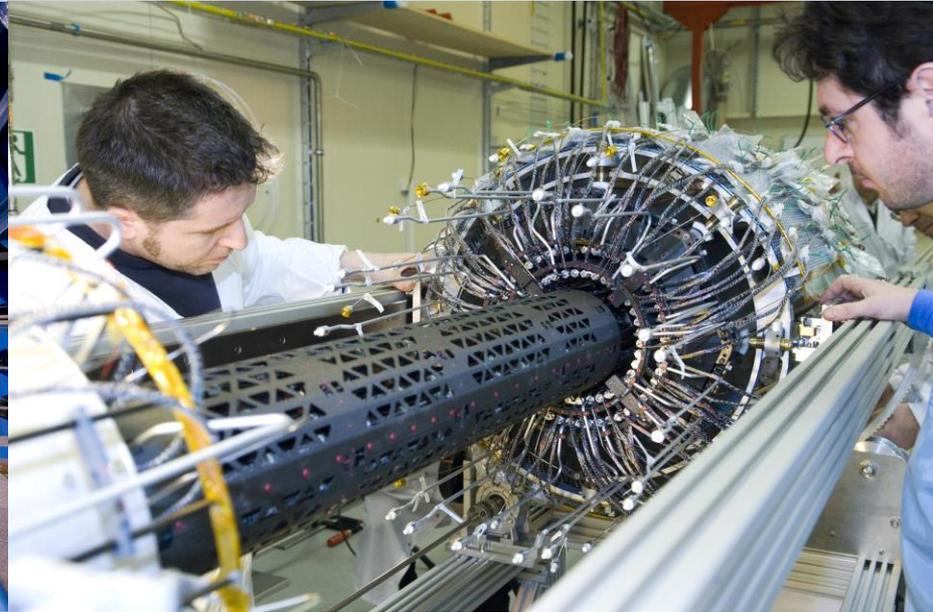
45 m

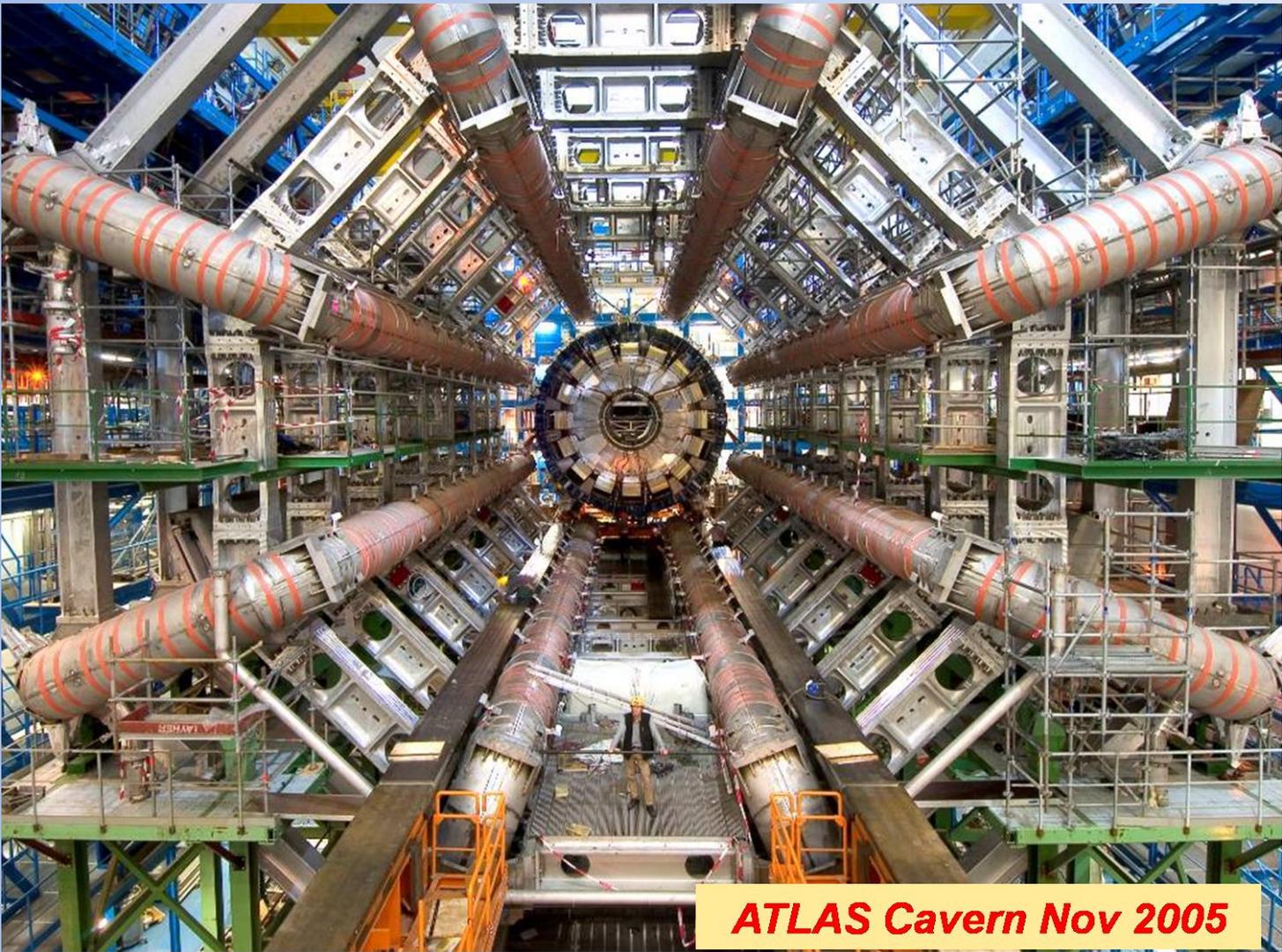
ATLAS superimposed to the 5 floors of building 40

25 m



Как строился ATLAS детектор

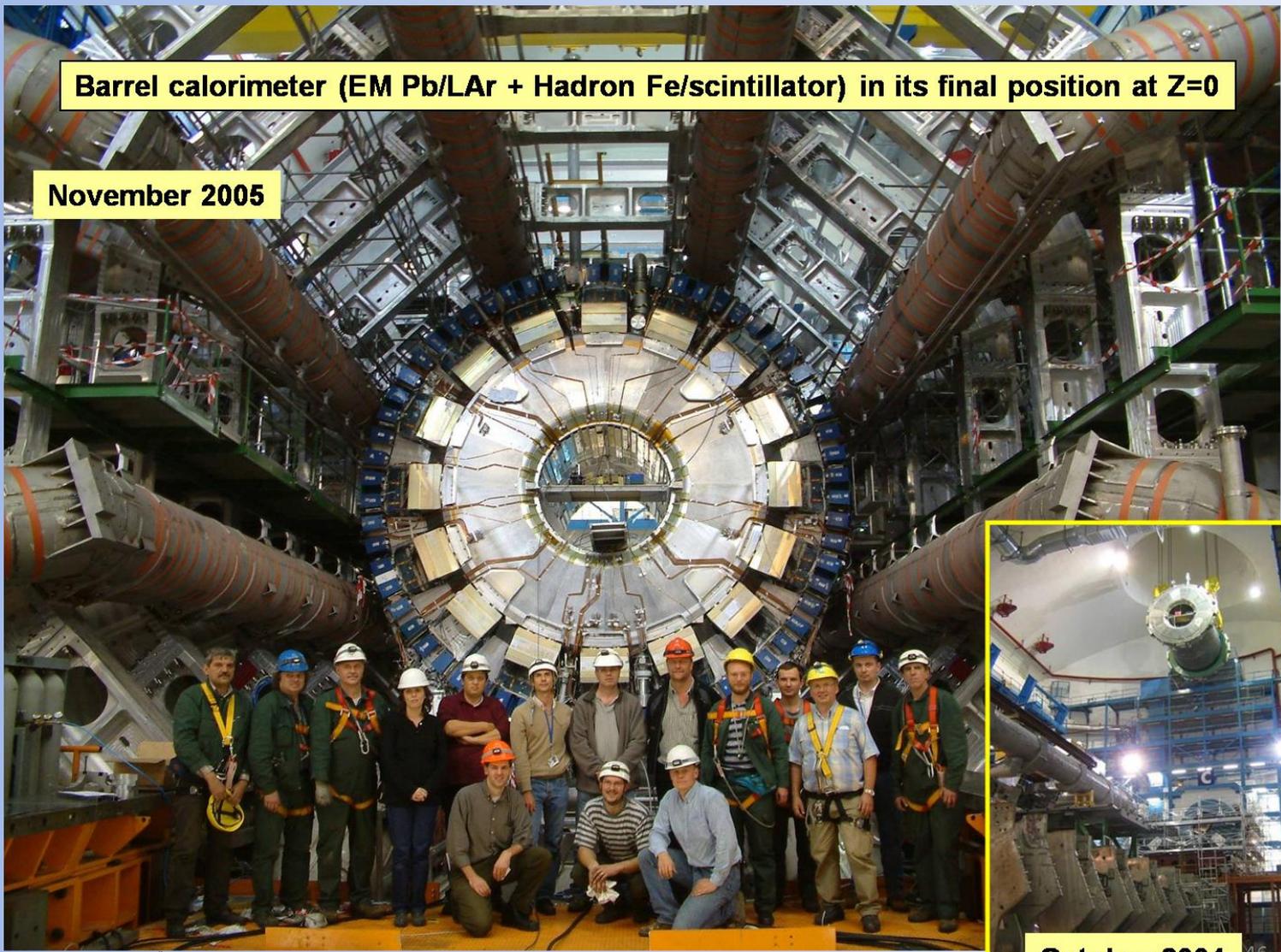




ATLAS Cavern Nov 2005

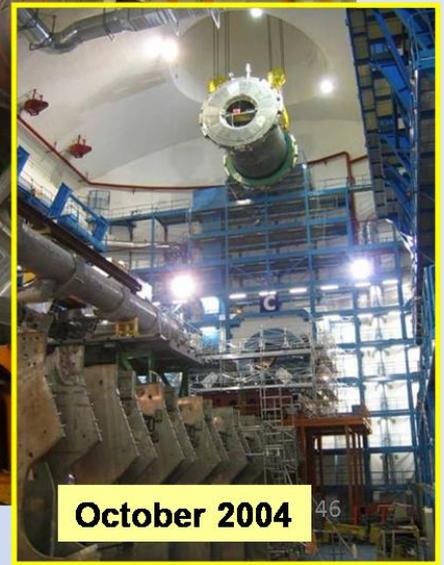
Barrel calorimeter (EM Pb/LAr + Hadron Fe/scintillator) in its final position at Z=0

November 2005



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

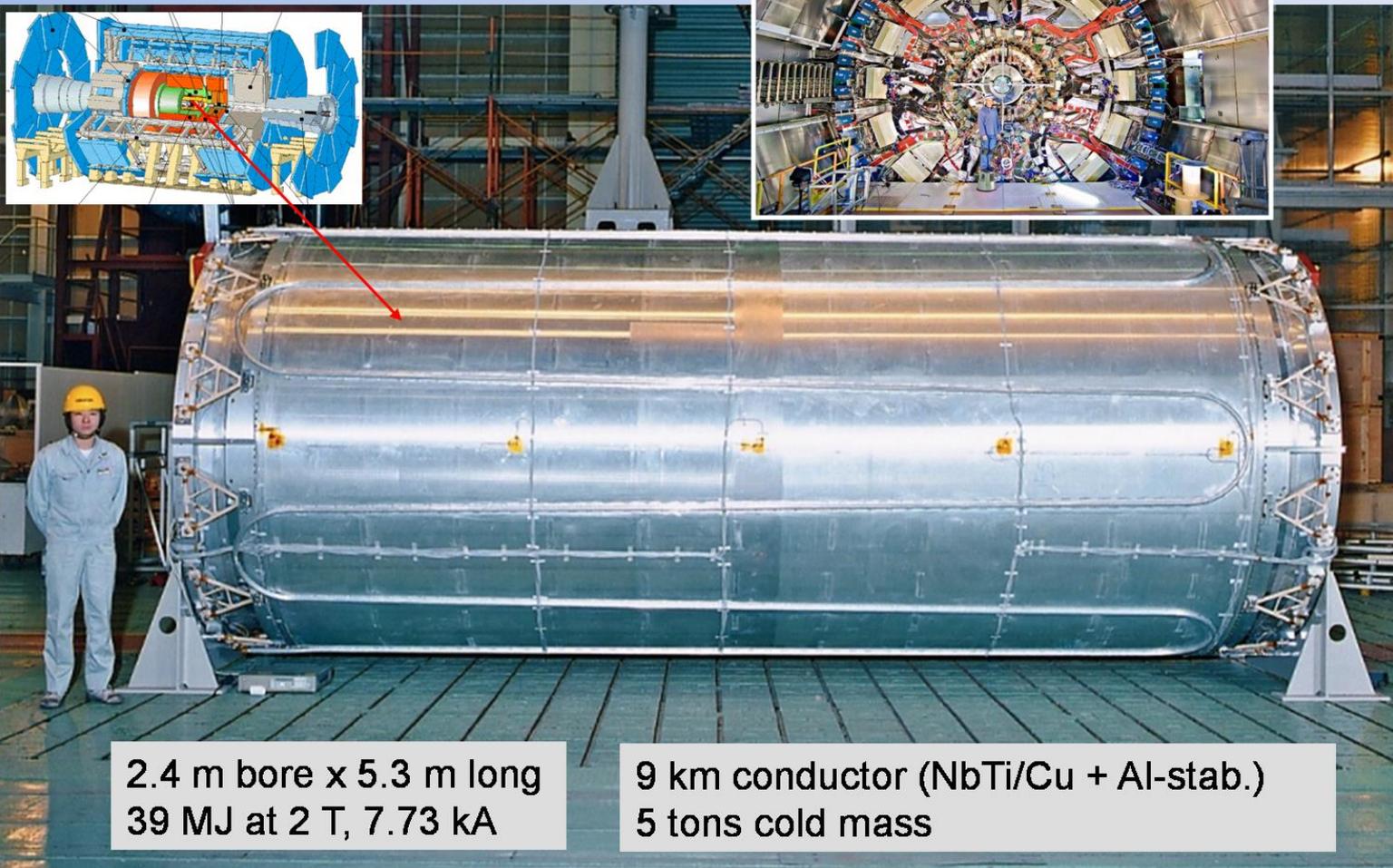
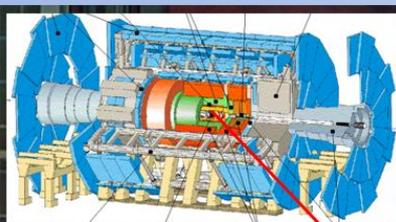
LHC Dream-Reality-Vision



October 2004

46

Central Solenoid

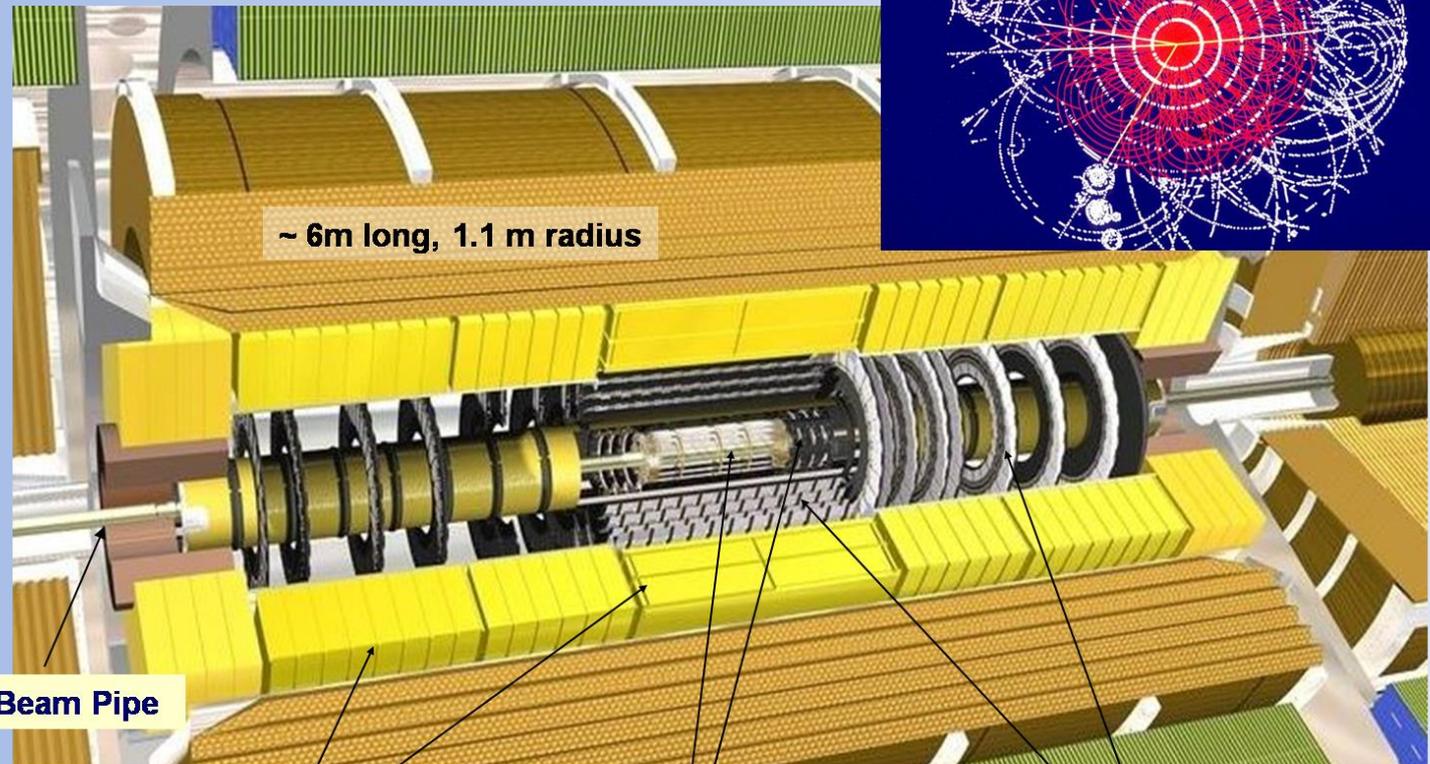
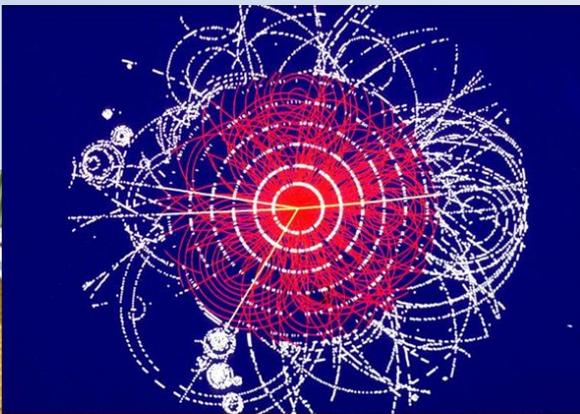


2.4 m bore x 5.3 m long
39 MJ at 2 T, 7.73 kA

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

ATLAS Tracking Detectors

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



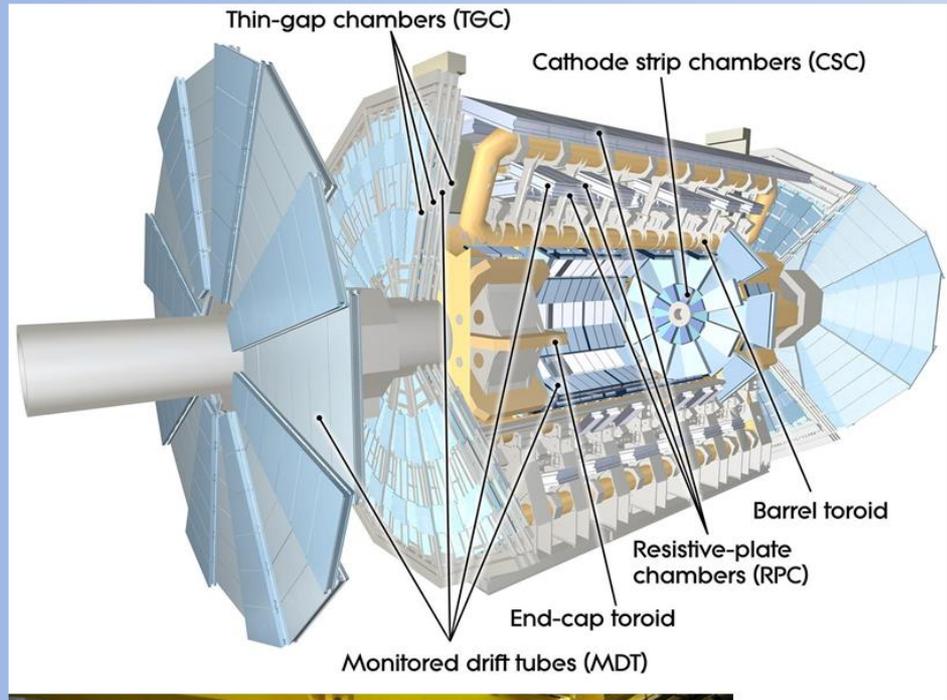
Beam Pipe

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)

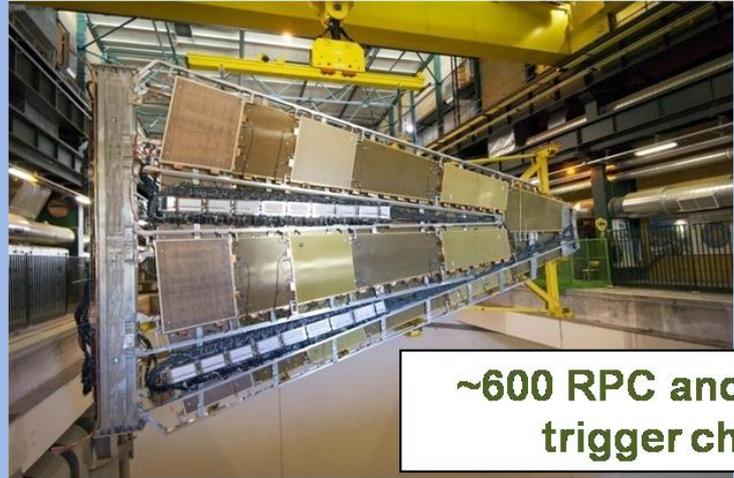
Muon System



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

Огромное спасибо за
внимание !

Благодарности...

Werner Riegler (CERN, ALICE)

Olav Ullaland (CERN, LHCb)

Peter Jenni (CERN, ATLAS)

Christian Goram (CERN, PH)

Herman ten Kate (CERN, ATLAS)

Daniel Froidevaux (CERN, ATLAS)

Александр Чеплаков (ОИЯИ, ATLAS)

Андрей Голутвин (Imperial College, ITEP, CERN, LHCb)

Владимир Каржавин (ОИЯИ, CMS)

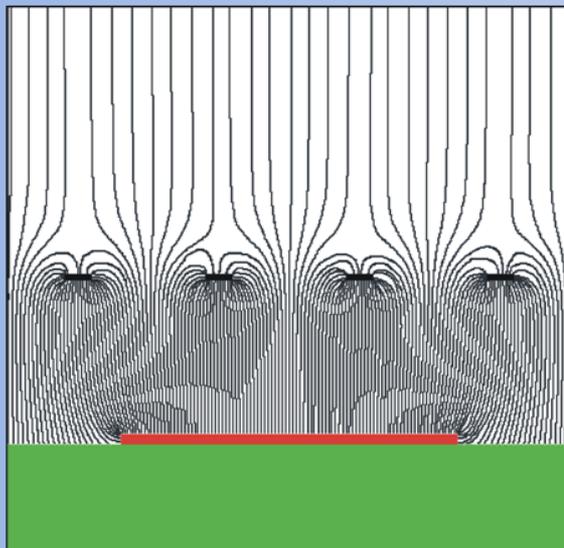
Александр Водопьянов (ОИЯИ, ALICE)

Владимир Рыжов (CERN, (ОИЯИ), CMS)

Выражаю **благодарность** за разрешение на использование материалов из их лекций

Detector Simulation

Electric Fields in a Micromega Detector

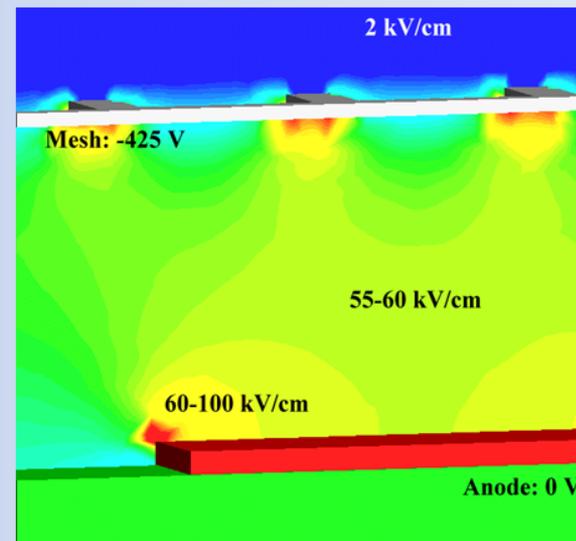


Very accurate simulations of particle detectors are possible due to availability of Finite Element simulation programs and computing power.

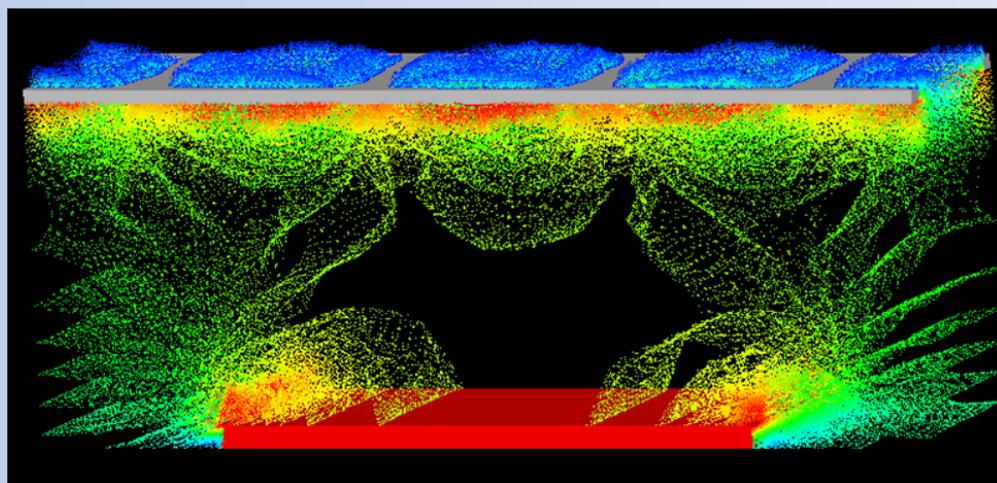
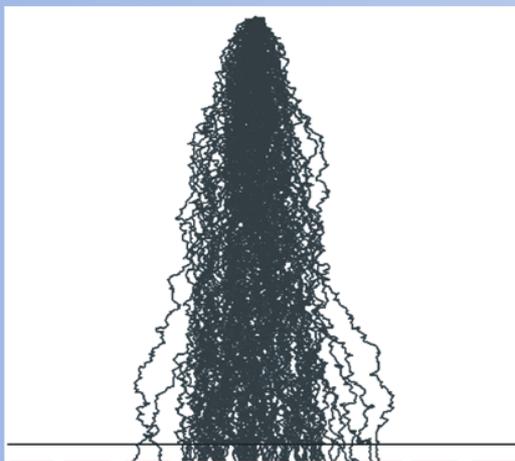
Follow every single electron by applying first principle laws of physics.

For Gaseous Detectors:
GARFIELD by R. Veenhof

Electric Fields in a Micromega Detector

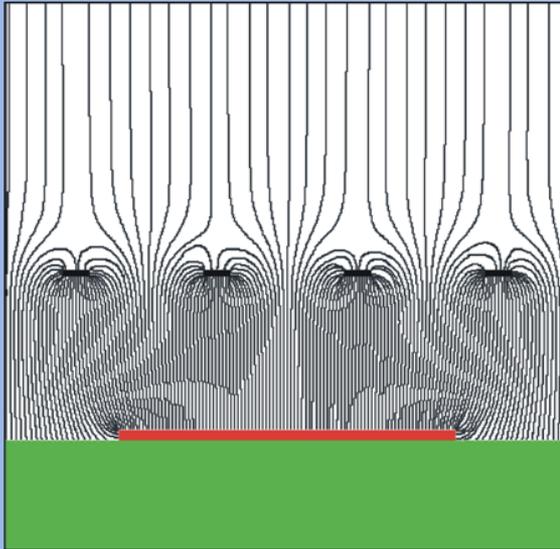


Electrons avalanche multiplication



Detector Simulation

Electric Fields in a Micromega Detector

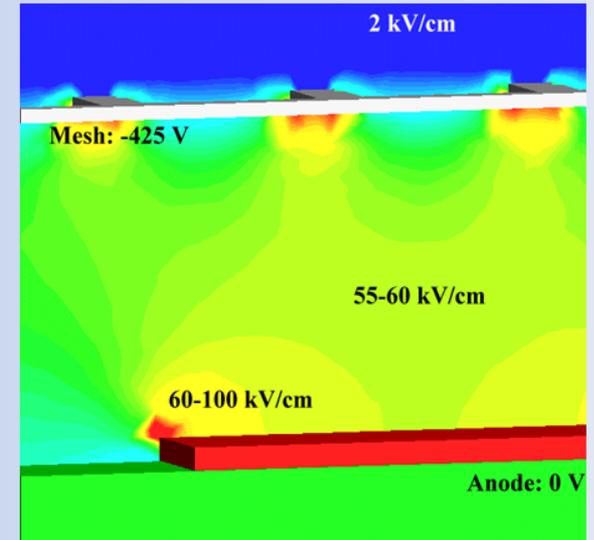


Very accurate simulations of particle detectors are possible due to availability of Finite Element simulation programs and computing power.

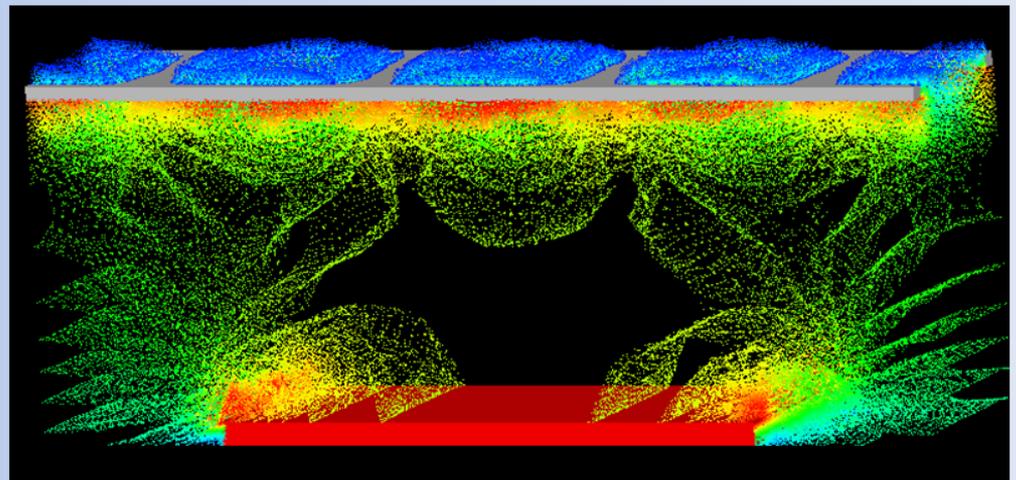
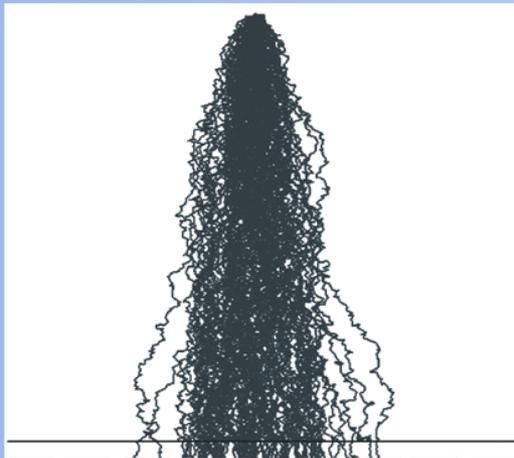
Follow every single electron by applying first principle laws of physics.

For Gaseous Detectors:
GARFIELD by R. Veenhof

Electric Fields in a Micromega Detector

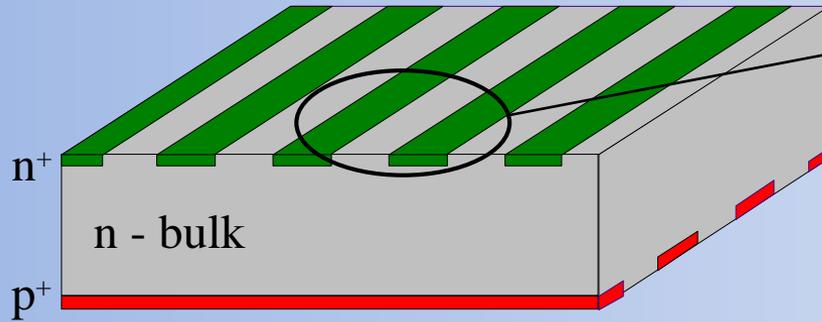


Electrons avalanche multiplication



Измерение 2^{ой} координаты

Размещаем n⁺ и p⁺ стрипы на разных сторонах и считываем сигнал с обеих

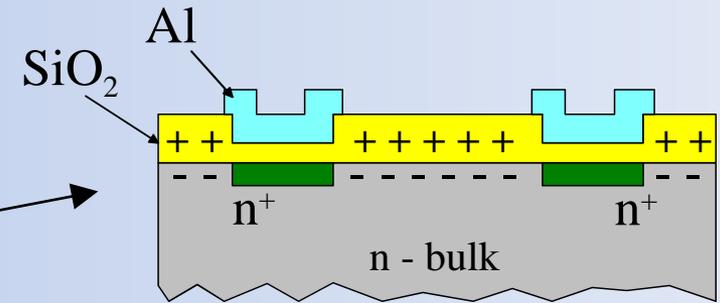


Problem: Electron accumulation layer

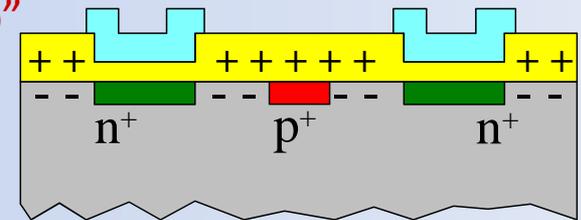
n⁺-strips are not isolated because of an electron accumulation layer at the Si-SiO₂ interface. This effect is due to the presence of positive charge in SiO₂ layer which attracts electrons.

Solution: "Break" accumulation layer

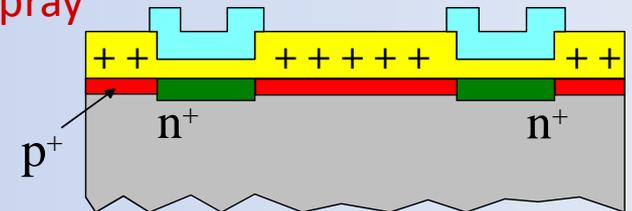
- p-strips in between the n-strips ("**p-stop**")
- moderate p⁺-implantation over all surface ("**p-spray**")
- "**field plates**" (metal over oxide) over the n⁺-strips and apply negative potential with respect to n⁺-strips to repel electrons.



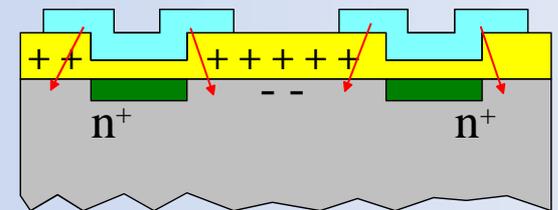
"p-stop"



"p-spray"

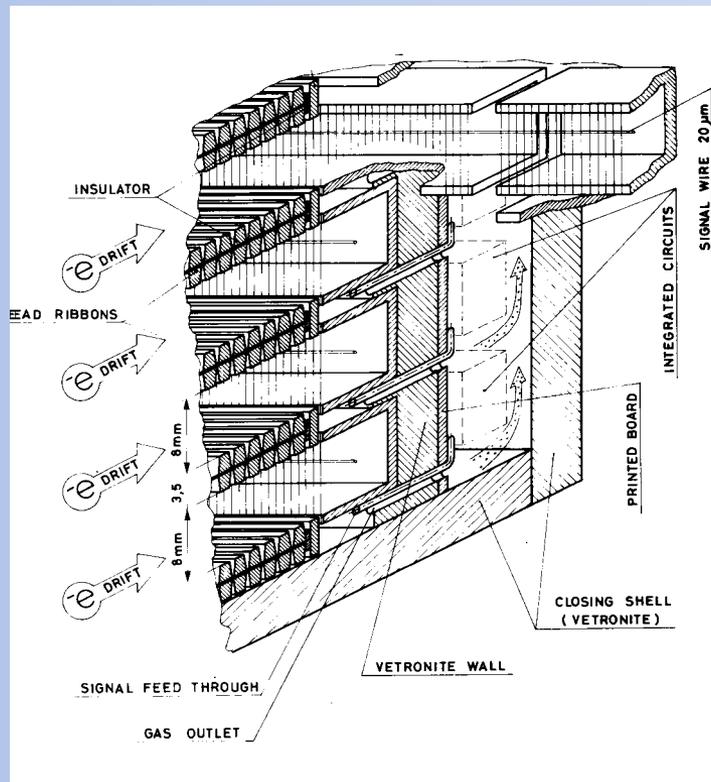
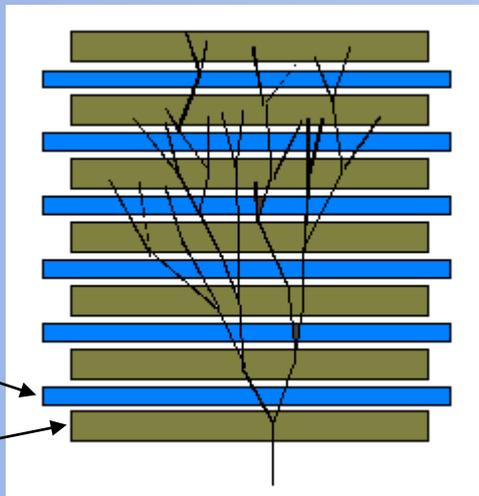


"field plates"

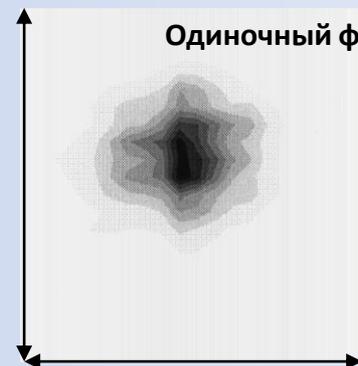


Пример ECAL (сэмплинг)

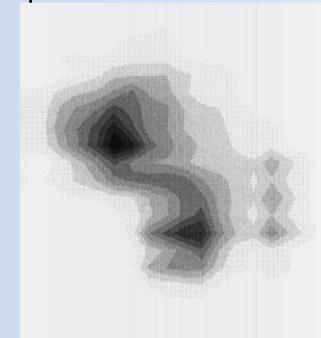
Пример ECAL: DELPHI High Density Projection Chamber (HPC)



Поперечное распределение заряда в DELPHI HPC



Наложение двух фотонов от распада π^0



Сегментированный катод + время дрейфа ('TPC') полная 3D реконструкция ливня

$$\sigma(E)/E = 0.32/\sqrt{E} \oplus 0.043$$

$$\sigma_\varphi = 1.7 \text{ mrad}, \sigma_\theta = 1.0 \text{ mrad}$$

(HPC was placed behind massive RICH detector !)

Пример HCAL (сэмплинг)

Адронный калориметр CMS

Бронза + сцинтилляторы

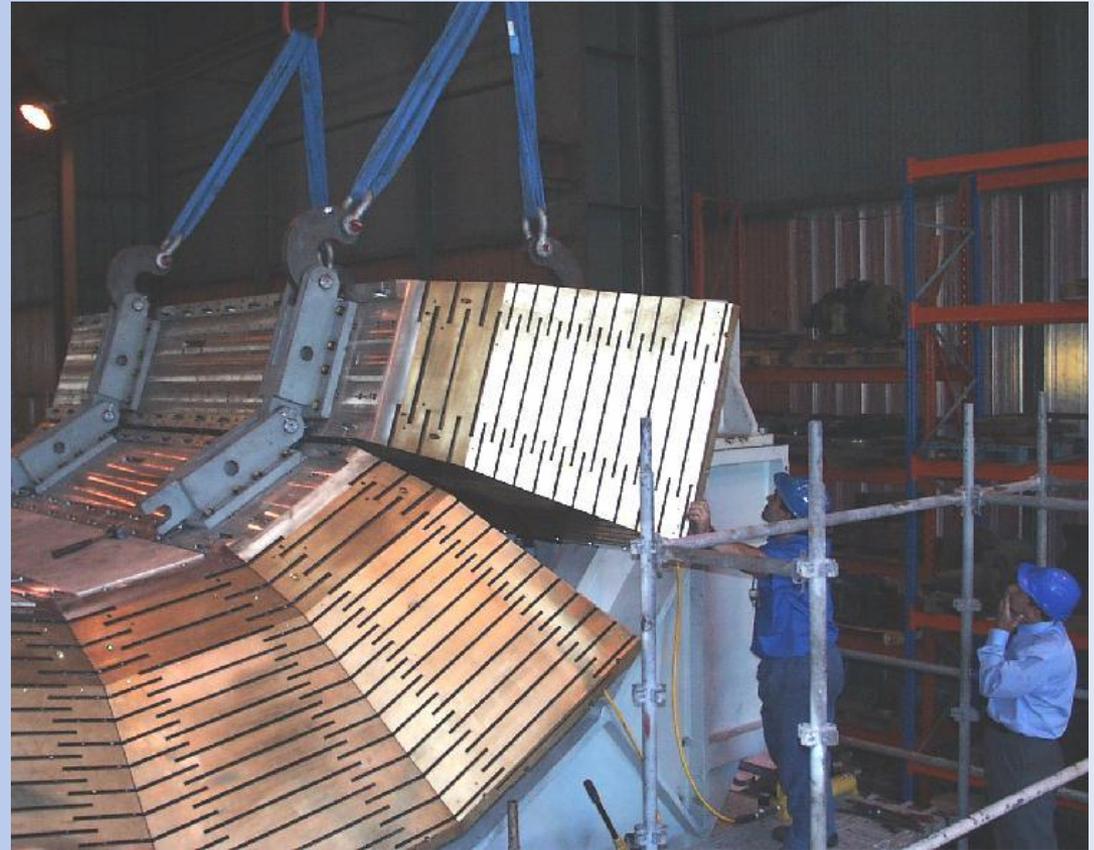
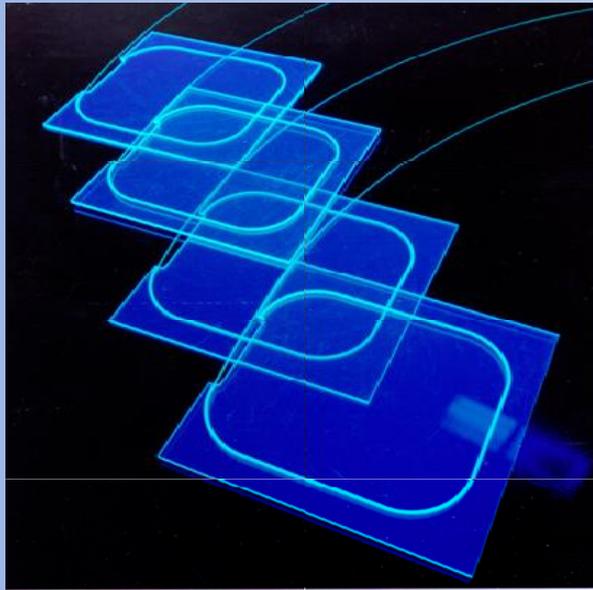
2 x 18 клиньев (barrel)

+ 2 x 18 клиньев (endcap)

~ 15000 T абсорбера

$5.8 \lambda_i$ at $\eta = 0$.

Сцинтилляторы через шифтеры считываются HPD (B = 4T!)

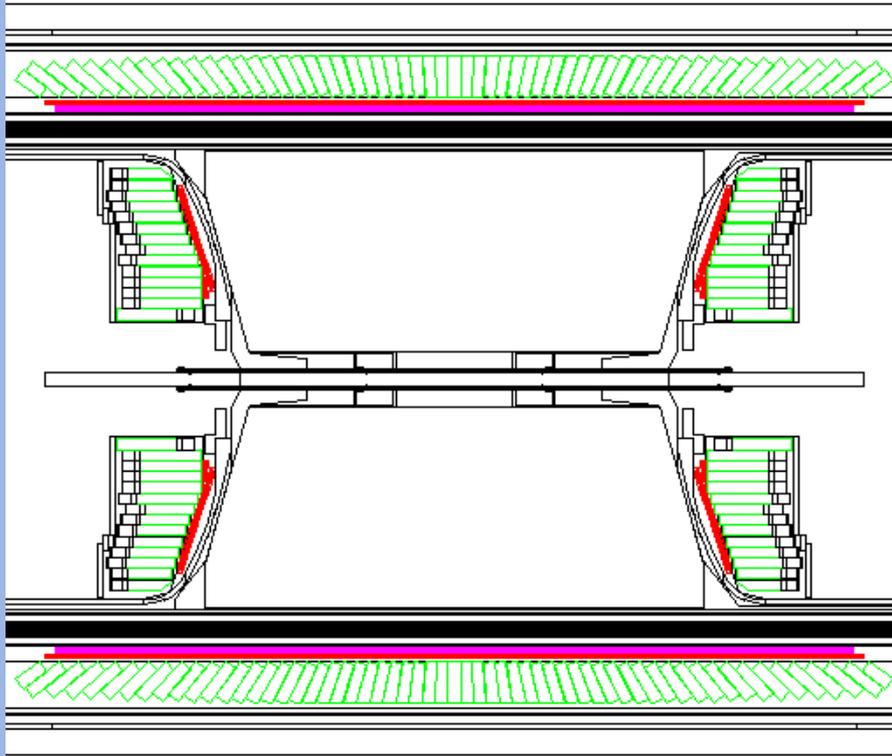


Разрешение !!! $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{65\%}{\sqrt{E}} \oplus 5\%$

Гомогенный OPAL Ecal

OPAL Barrel + end-cap электромагнитный калориметр: **lead glass + pre-sampler**

(OPAL collab. NIM A 305 (1991) 275)

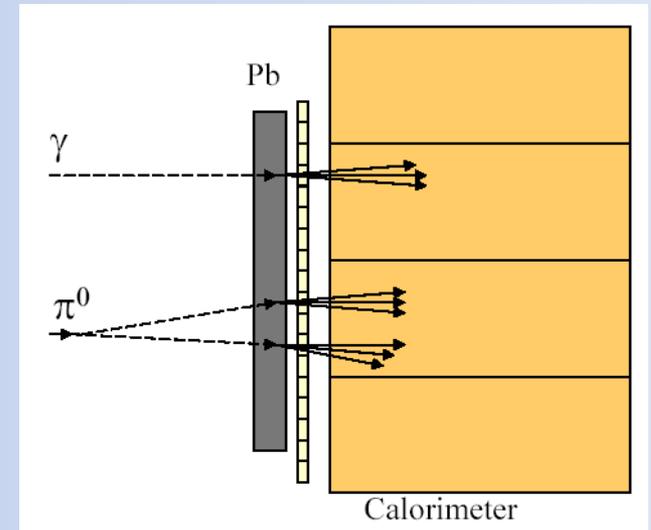


10'500 blocks (10 x 10 x 37 cm³, 24.6 X₀),
PM (barrel) or PT (end-cap) readout.

$$\sigma(E)/E = 0.06/\sqrt{E} \oplus 0.002$$

Пространственное разрешение ~ 11 mm при 6 GeV

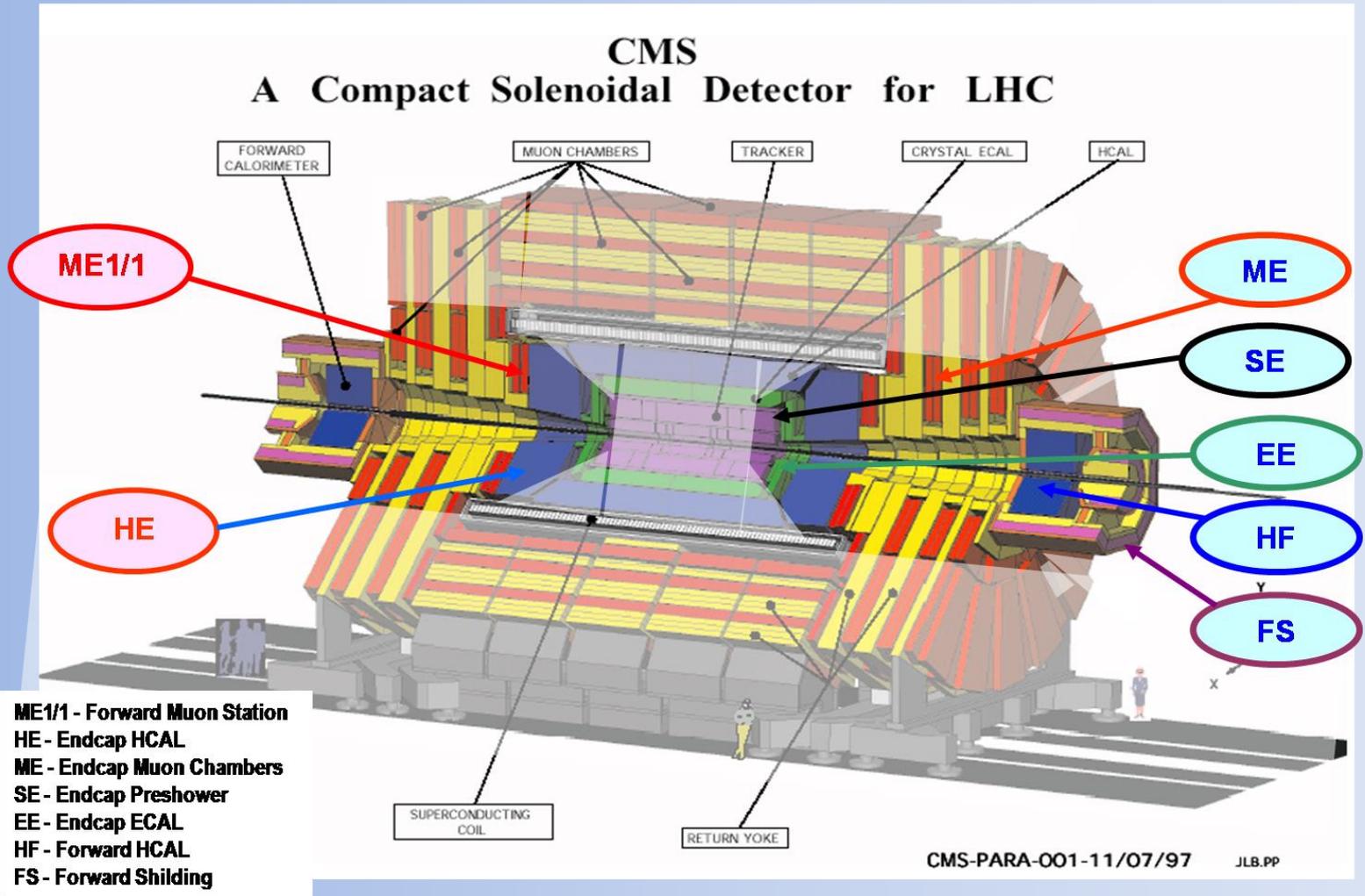
Принцип работы
pre-shower детектора



Пример устройства. Высокая
гранулярность полезна для
γ/π⁰, e/γ, e/π[±] сепарации.

Обычно газовые,
теперь Si детекторы.

RDMS Participation in CMS



В экспериментах на LHC

ALICE: TPC (tracker), TRD (transition rad.), TOF (MRPC),
HMPID (RICH-pad chamber),
Muon tracking (pad chamber), Muon trigger (RPC)

ATLAS: TRD (straw tubes), MDT (muon drift tubes),
Muon trigger (RPC, thin gap chambers)

CMS: Muon detector (drift tubes, CSC), RPC (muon trigger)

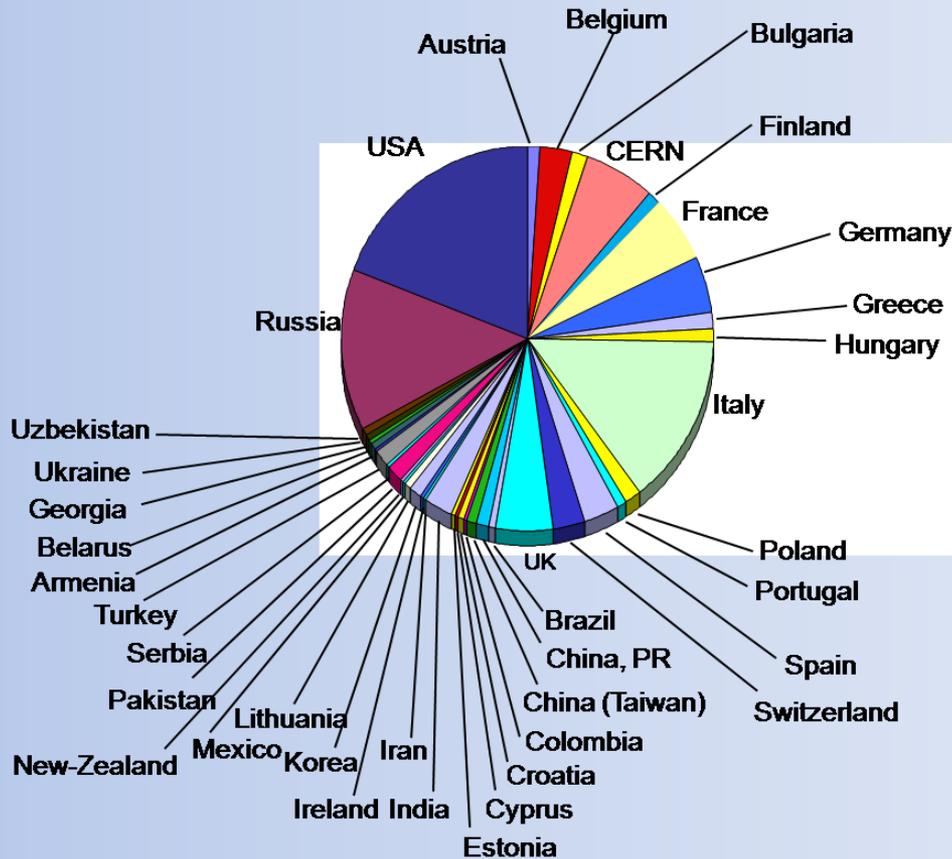
LHCb: Tracker (straw tubes), Muon detector (MWPC, GEM)

The CMS Collaboration

	Number of Laboratories
Member States	59
Non-Member States	67
USA	49
Total	175

	# Scientific Authors
Member States	1084
Non-Member States	503
USA	723
Total	2310

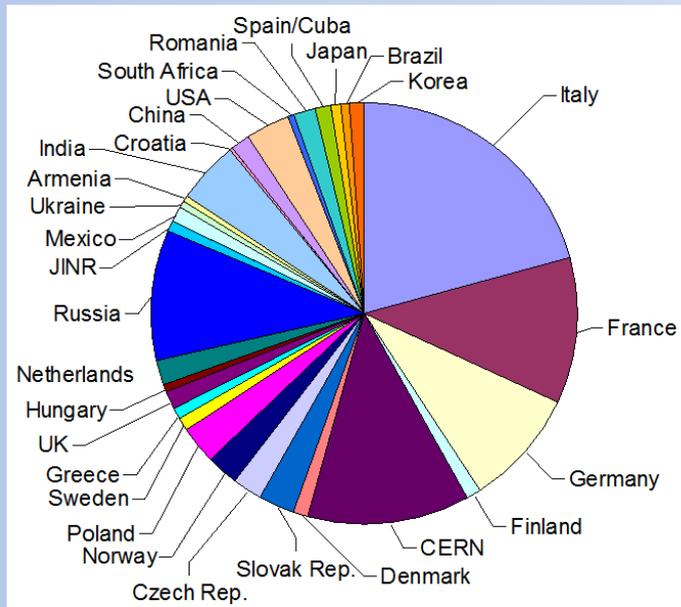
Associated Institutes	
Number of Scientists	62
Number of Laboratories	9

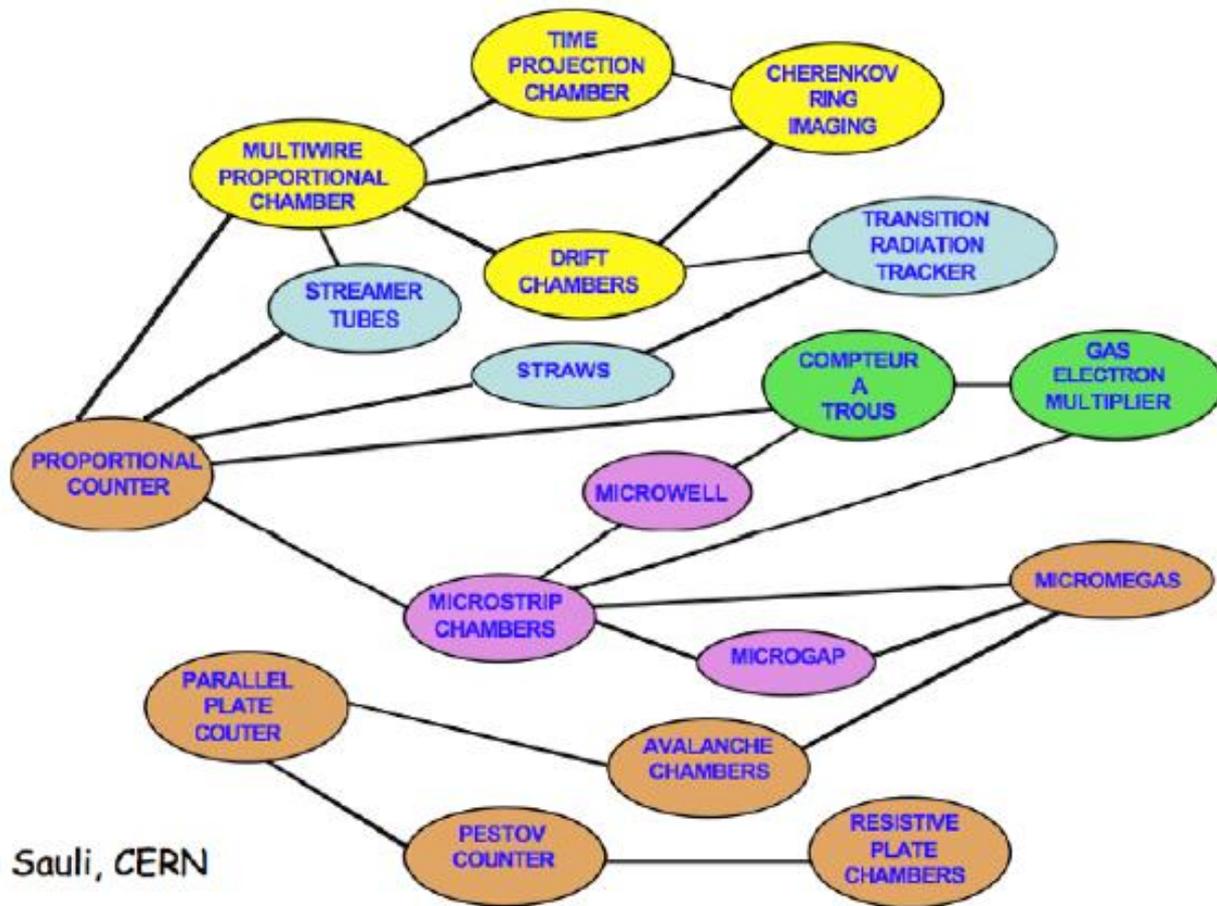


2310 Scientific Authors
38 Countries
175 Institutions

ALICE Collaboration

- ~ 1000 **Members**
(63% from CERN MS)
- ~ 30 **Countries**
- ~ 100 **Institutes**
- ~ 150 **MCHF capital cost** (+ 'free' magnet)





Fabio Sauli, CERN

Large Dipole Magnet for Dimuon Spectrometer (850 ton, 9 x 7 x 4.5 m)

