

# Регистрация (детектирование) частиц - 2 Николай Зимин



## Трековые детекторы:

- а) газовые (жидкостные)
- б) твердотельные

## Калориметры:

- а) электромагнитные
- б) адронные

## Детекторы на LHC

## «Соломенная» трубка

Катод: металлическая трубка диаметром  $R$

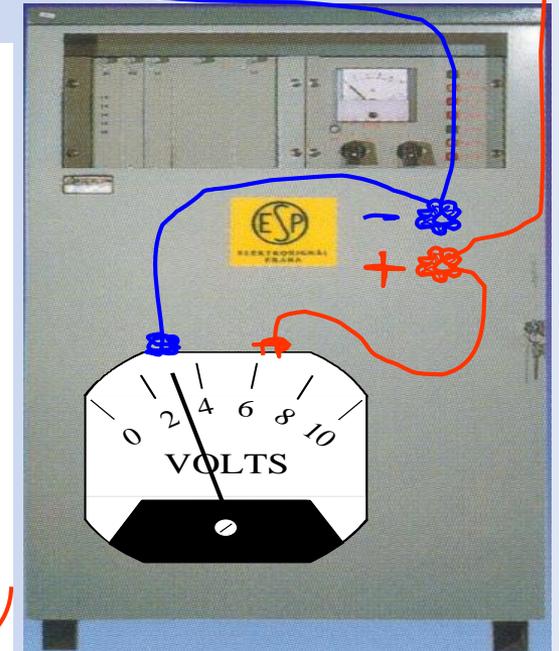
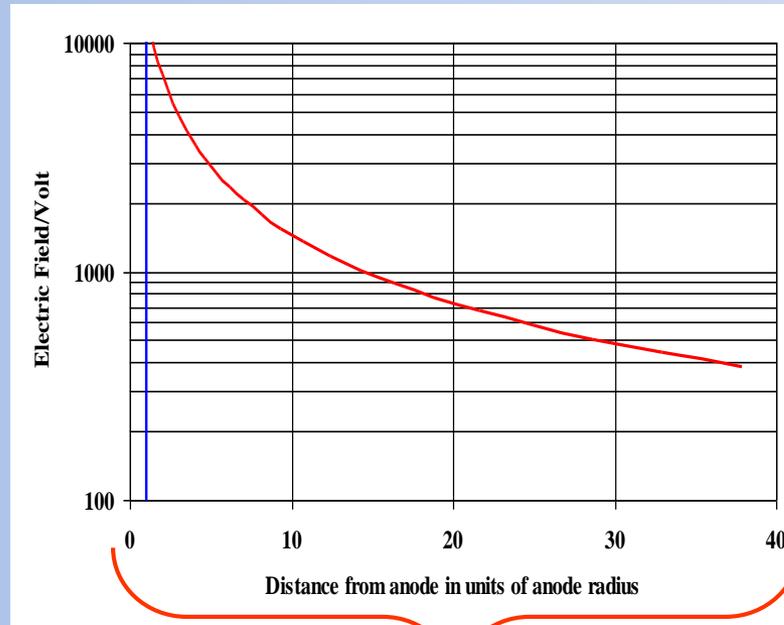
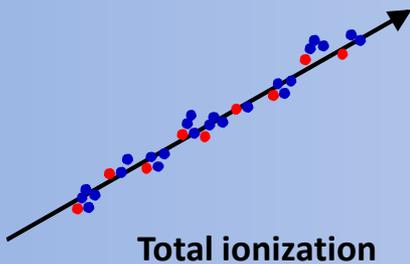
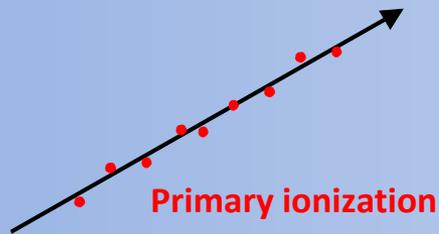
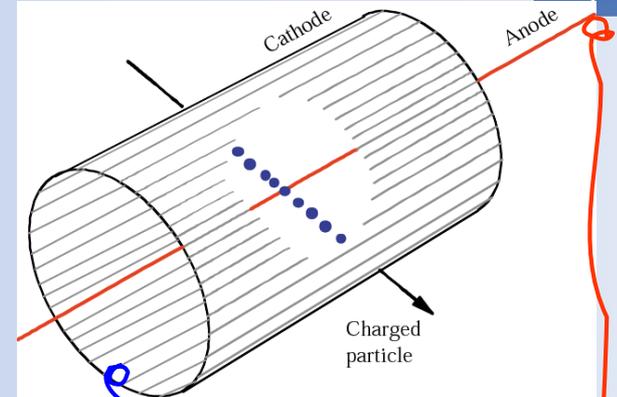
Анод: золоченая вольфрамовая проволока  $r_0$

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

$$R/r_0 = 1000$$

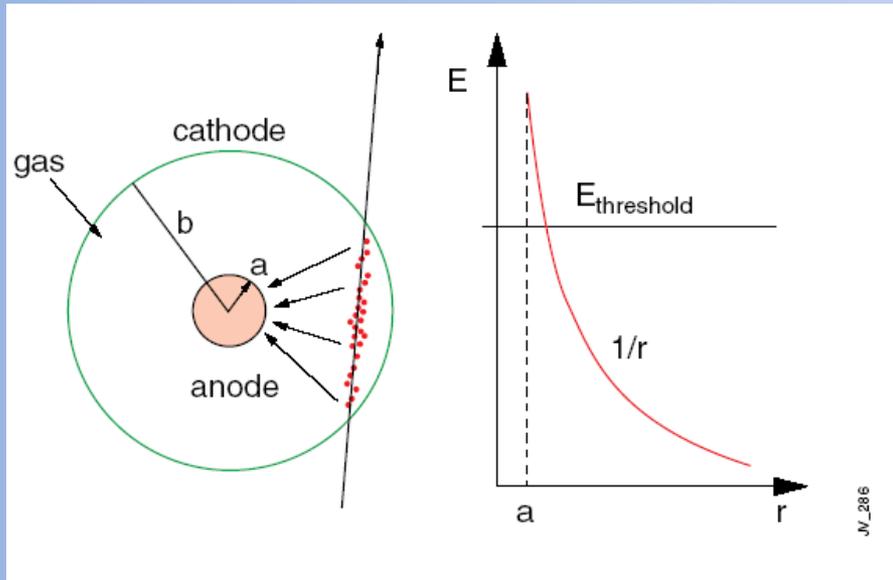
$$V \sim \text{kV}$$

Специальная газовая смесь



$$\sigma(\text{ionization}) = f(E, \text{gas})$$

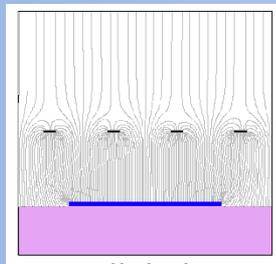
Газовое усиление



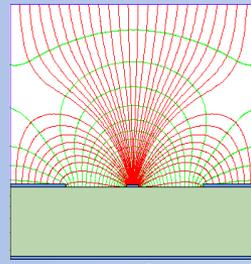
$e^-$  начальный электрон

Другие геометрии, создающие градиент  $E$ -поля: **СОВРЕМЕННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ**

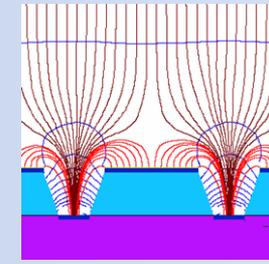
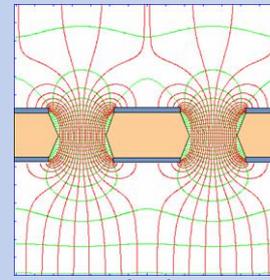
Микромегаз

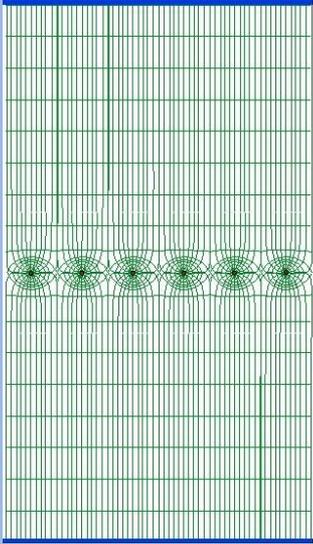


Микрострип



GEM газовый электронный усилитель





Идея разместить много проволочек: Nobel Prize 1992



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

Типичная геометрия

5mm, 1mm, 20  $\mu\text{m}$

Цифровое считывание :  
Пространственное разрешение

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

Для  $d = 1 \text{ mm}$   $\sigma_x = 300 \mu\text{m}$

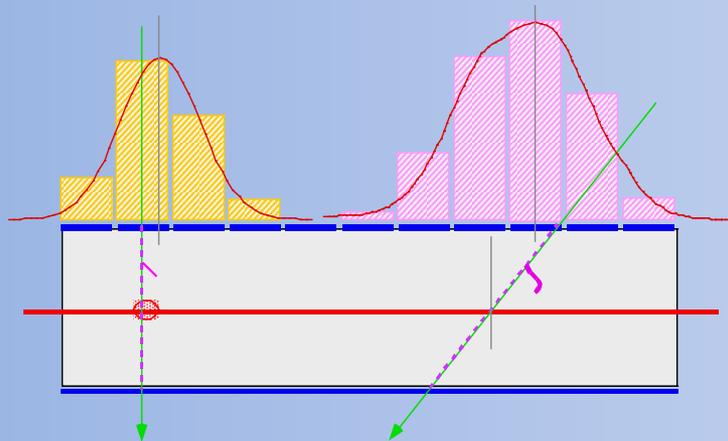
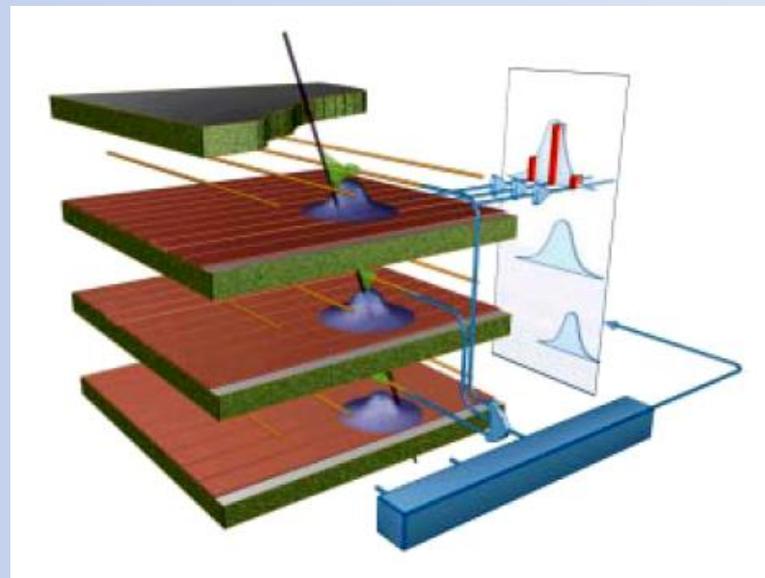


G. Charpak, F. Sauli and J.C. Santiard

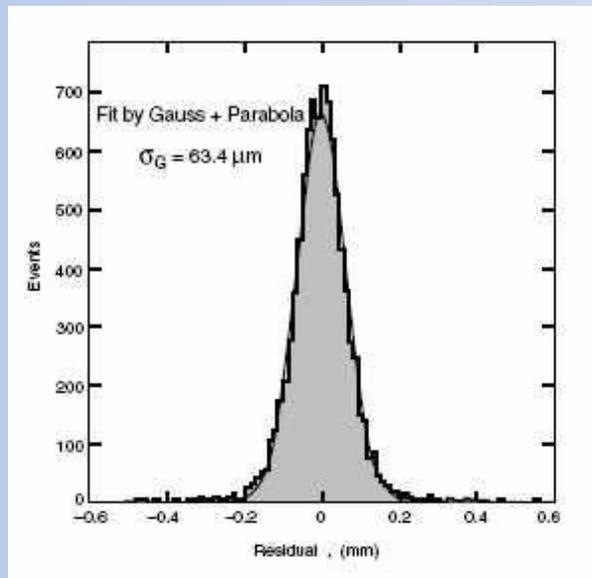
Считывание с катодных стрипов или падов.

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

Маленький зазор  $\rightarrow$  быстрый детектор.



Метод взвешивания наведенного сигнала.

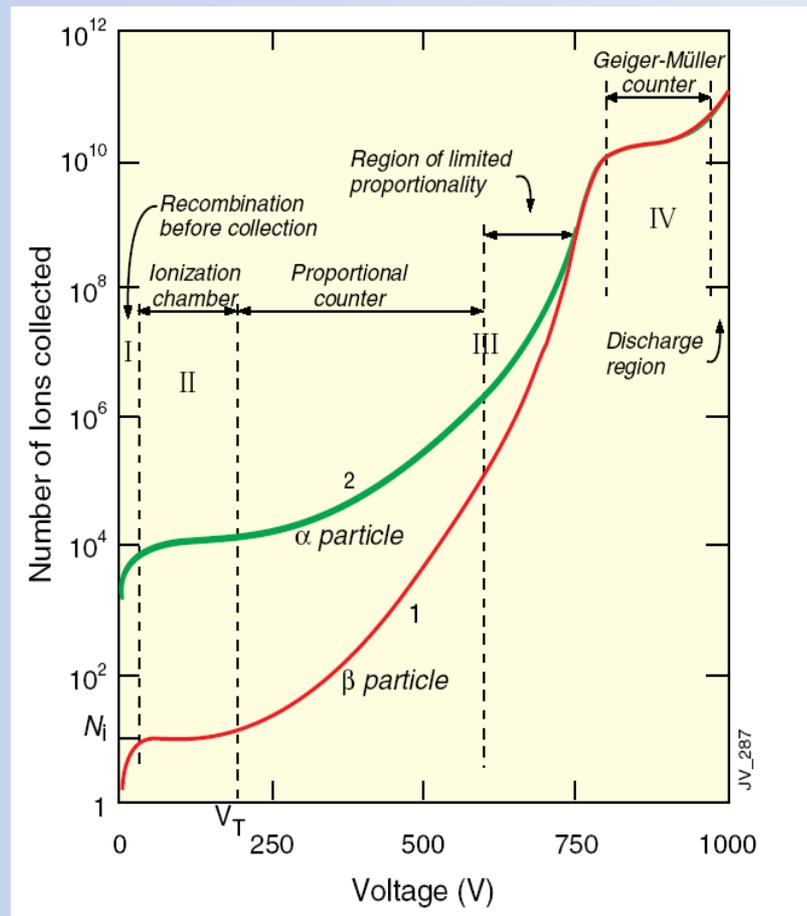


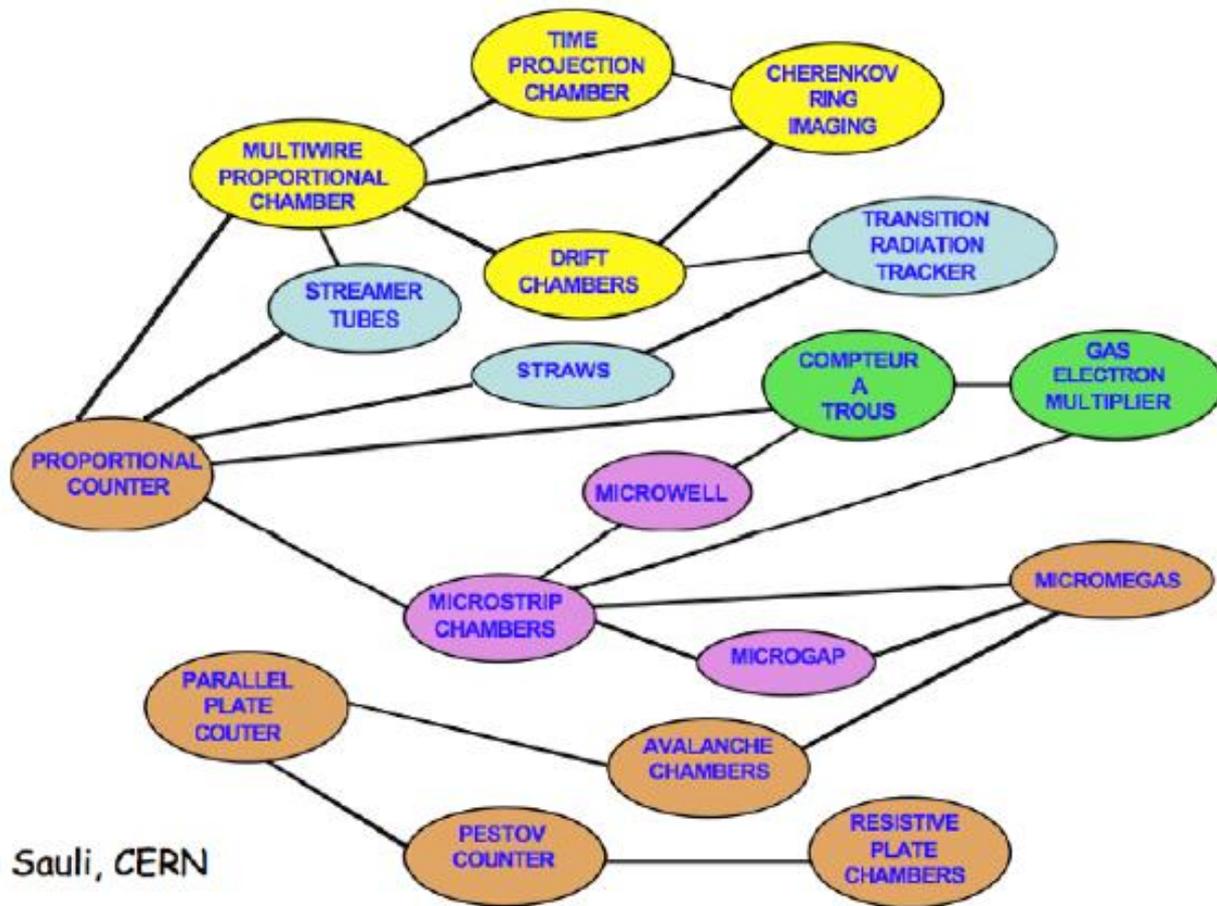
**Ионизационная** – весь заряд собирается,  
газового усиления нет, усиление  $\sim 1$

**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

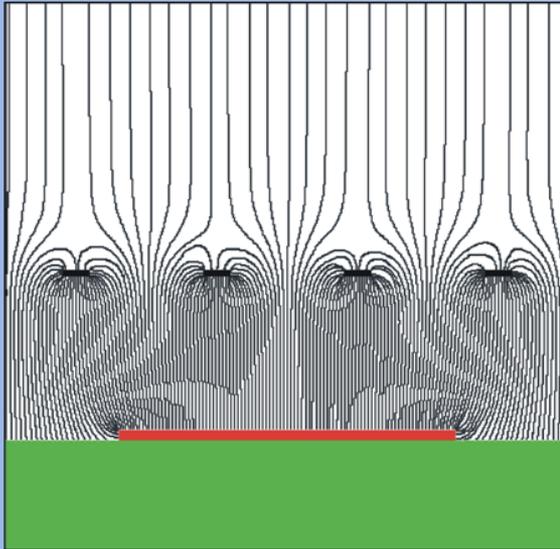




Fabio Sauli, CERN

## Detector Simulation

Electric Fields in a Micromega Detector

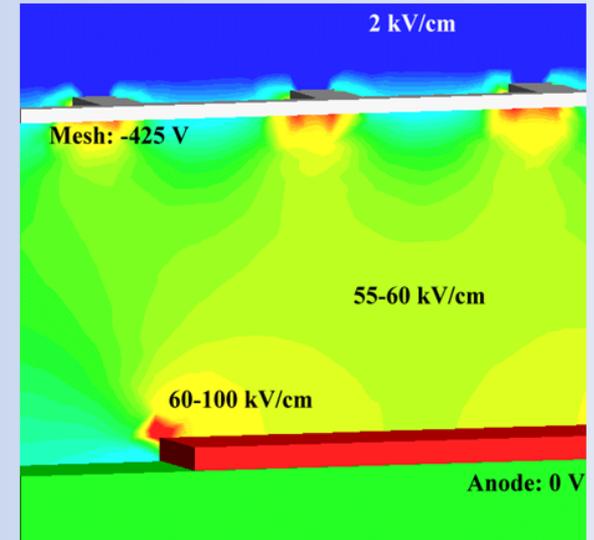


Very accurate simulations of particle detectors are possible due to availability of Finite Element simulation programs and computing power.

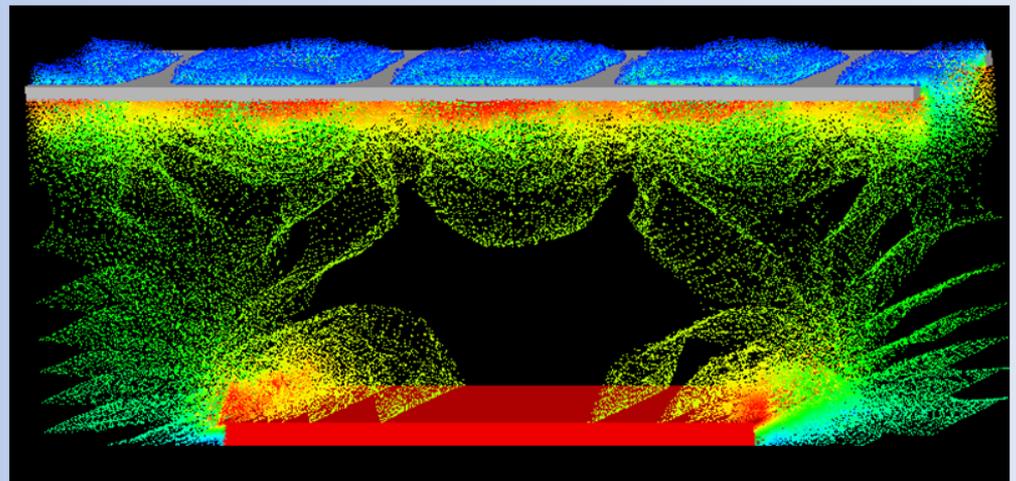
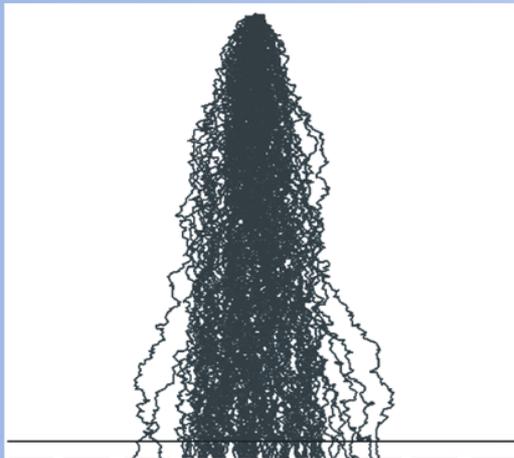
Follow every single electron by applying first principle laws of physics.

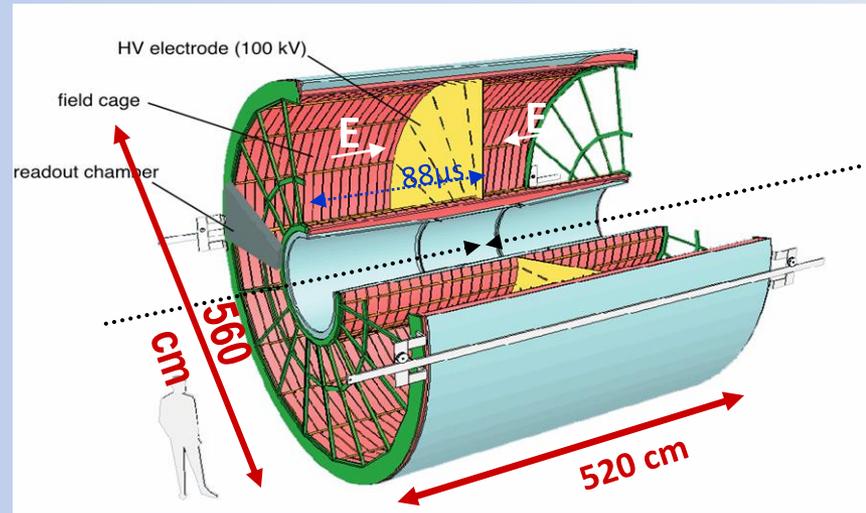
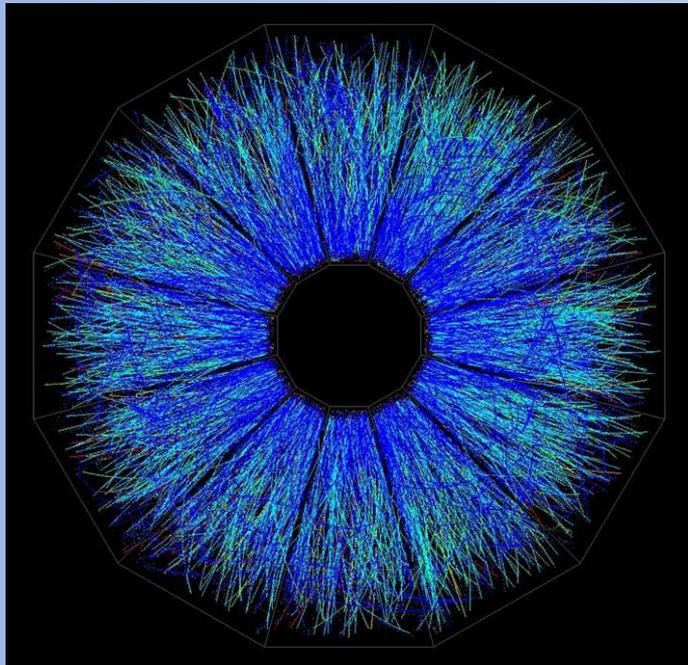
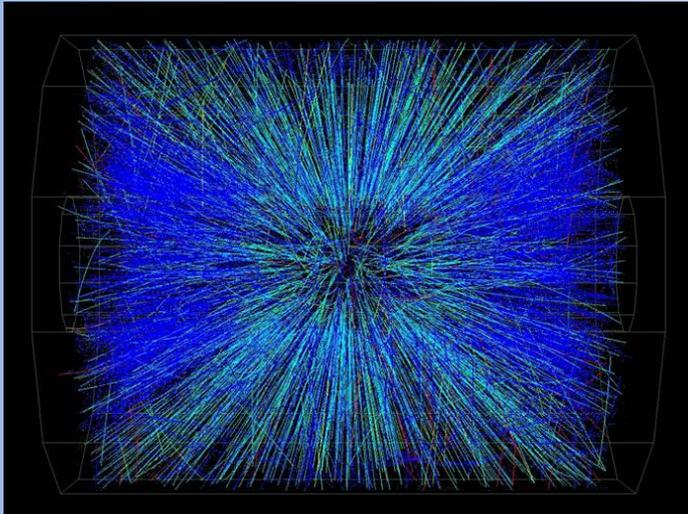
For Gaseous Detectors:  
**GARFIELD** by R. Veenhof

Electric Fields in a Micromega Detector



Electrons avalanche multiplication





## Alice TPC

HV central electrode at -100 kV

Drift length 250 cm at  $E=400$  V/cm

Gas Ne-CO<sub>2</sub> 90/10 %

Space point resolution  $\sim 500$  mkm

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

Events from **STAR TPC** at RHIC

Au-Au collisions at CM energy of 130 GeV/n

Typically  $\sim 2000$  tracks/event

## Полупроводниковые кристаллы *Si, Ge, GaAs, Diamond*

Плотность ~ 1000 раз больше, по сравнению с газовыми

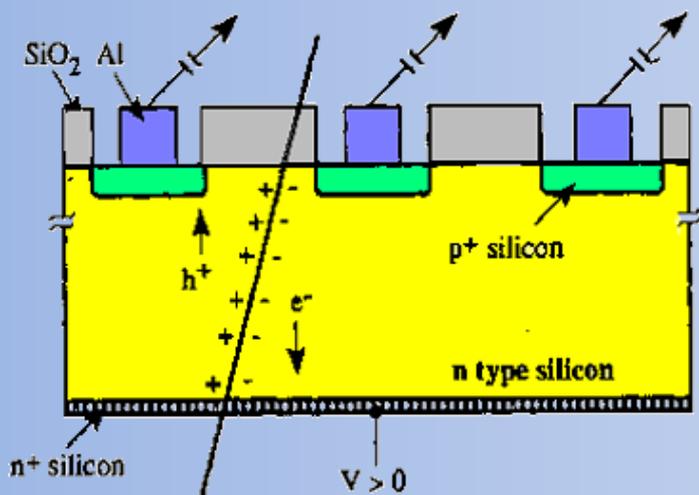
Энергия на создание пары электрон-дырка в 7 раз меньше, чем в Аргоне

Начальный заряд ~ 10000 больше -> не нужно усиление

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

-> короткие сигналы, быстрые детекторы.

- сегментация p<sup>+</sup> 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

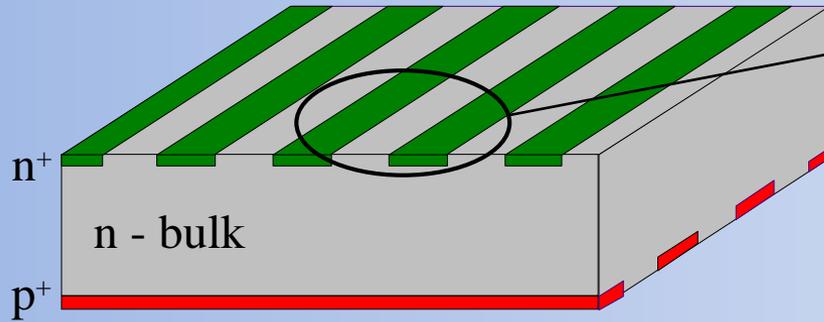
- Разрешение  $\sigma$  зависит от pitch (расстояния между стрипами)

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

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

### ■ Измерение 2<sup>ой</sup> координаты

Размещаем n<sup>+</sup> и p<sup>+</sup> стрипы на разных сторонах и считываем сигнал с обеих

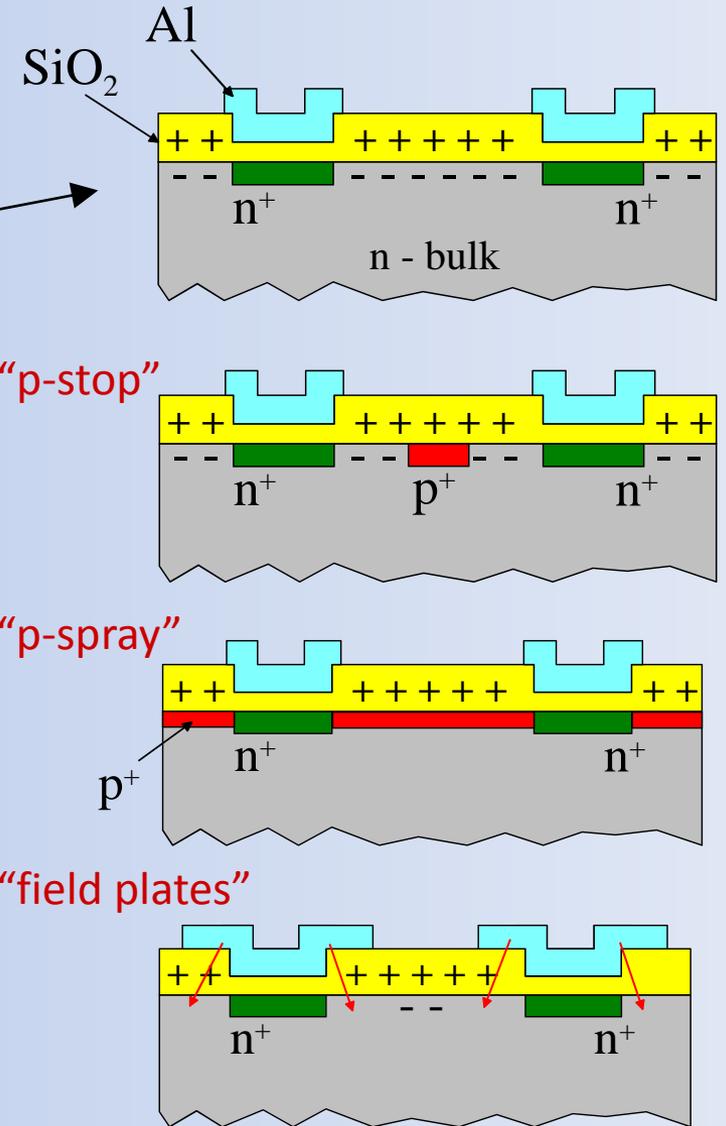


### ■ Problem: Electron accumulation layer

n<sup>+</sup>-strips are not isolated because of an electron accumulation layer at the Si-SiO<sub>2</sub> interface. This effect is due to the presence of positive charge in SiO<sub>2</sub> layer which attracts electrons.

### ■ Solution: "Break" accumulation layer

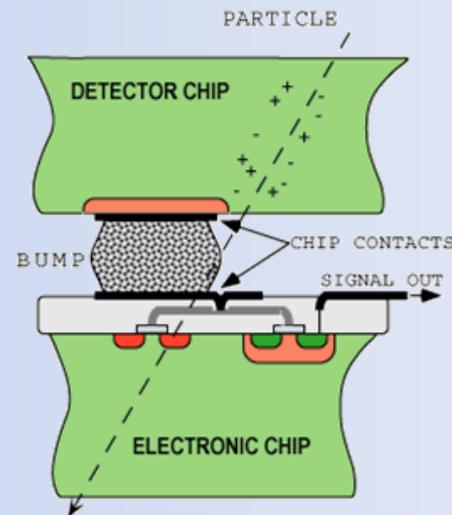
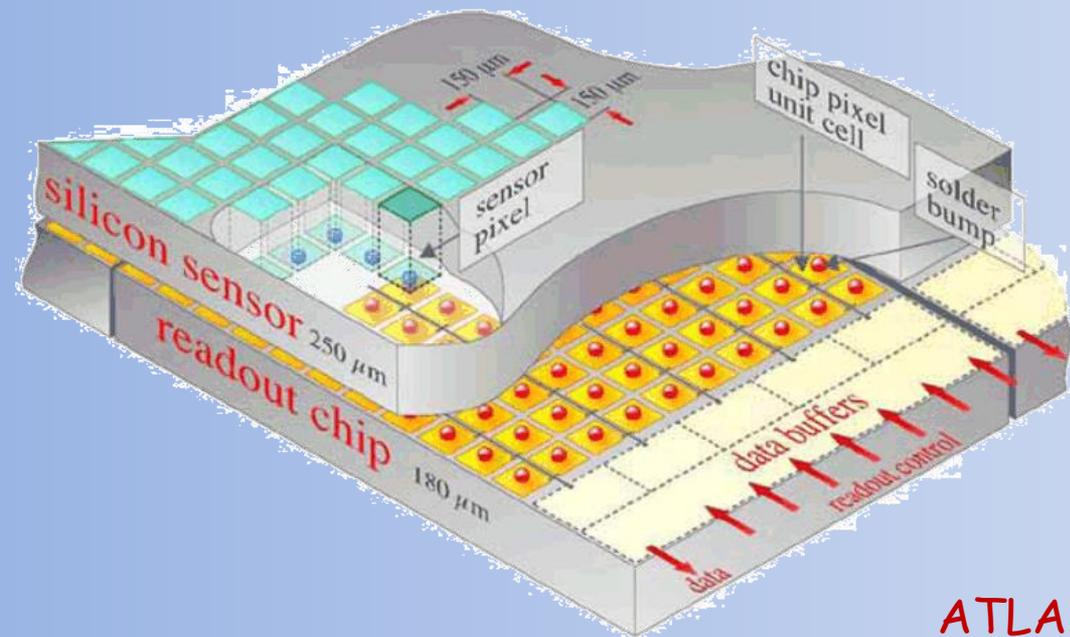
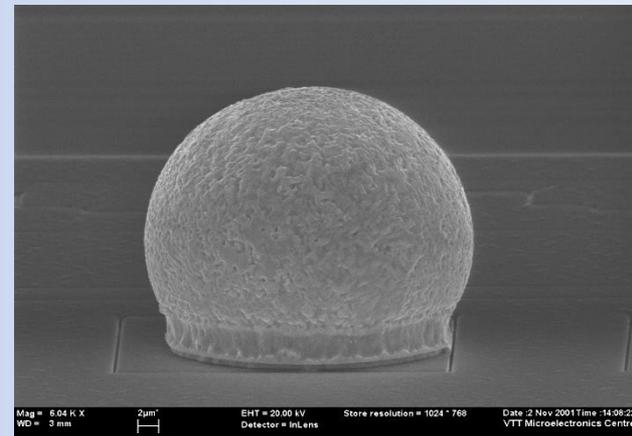
- p-strips in between the n-strips ("**p-stop**")
- moderate p<sup>+</sup>-implantation over all surface ("**p-spray**")
- "**field plates**" (metal over oxide) over the n<sup>+</sup>-strips and apply negative potential with respect to n<sup>+</sup>-strips to repel electrons.



## ■ 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 (охлаждение)
- Front-end электроника и передача сигналов

## ■ Пример: ATLAS SCT Barrel Module

### • Silicon sensors (x4)

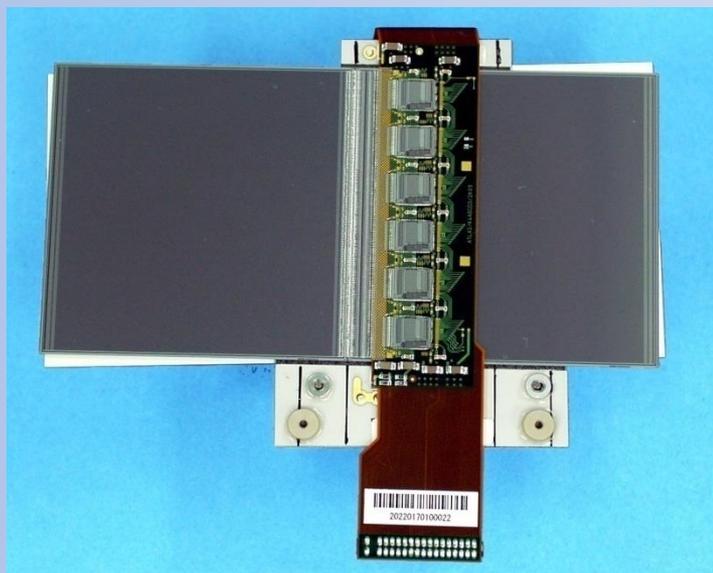
- 64 x 64 mm<sup>2</sup>
- p-in-n, single sided
- AC-coupled
- 768 strips
- 80µm pitch/12µm width

### • 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)

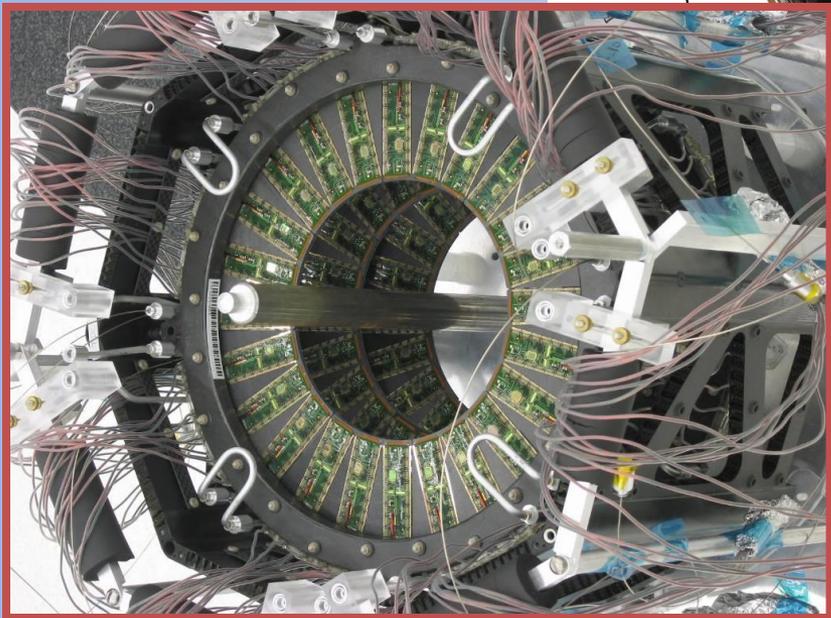
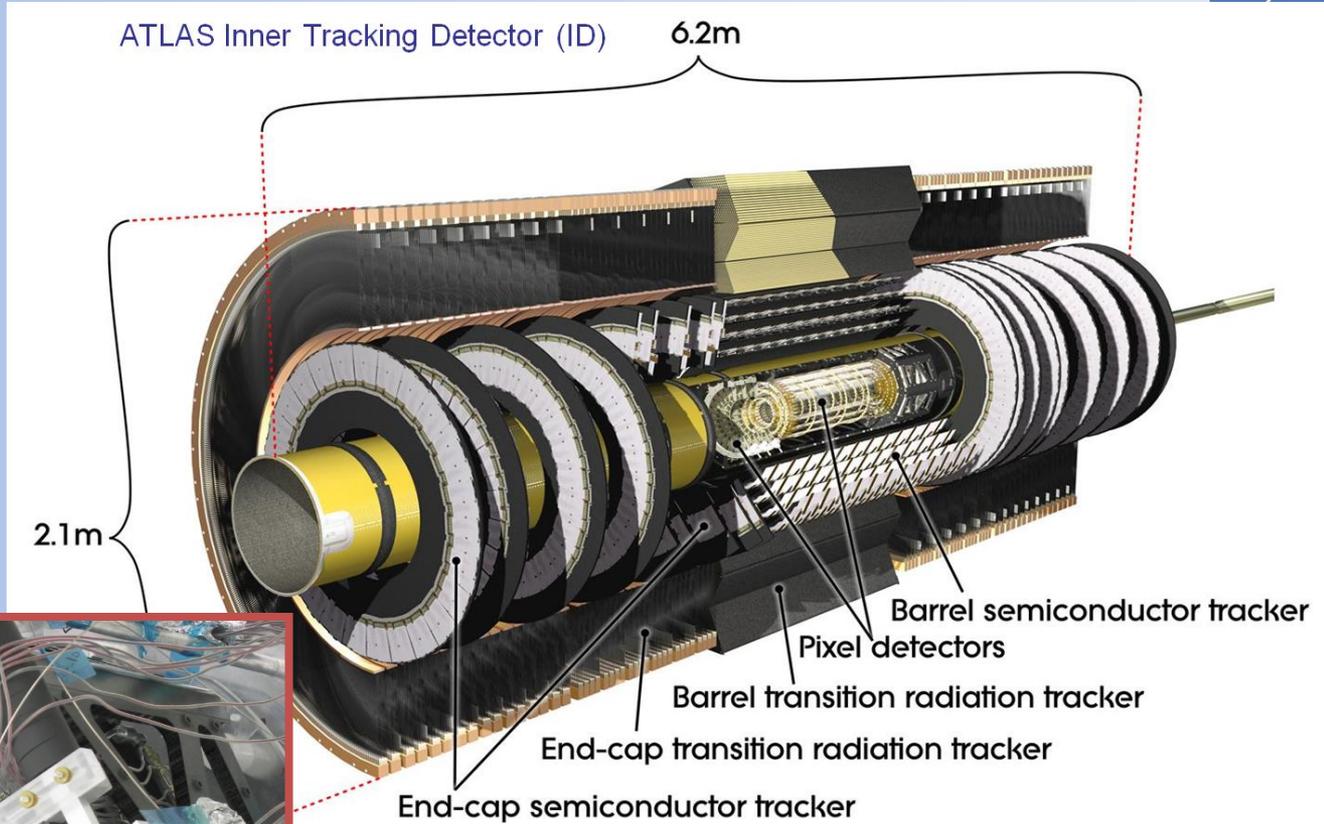
- ABCD chip (binary readout)
- DMILL technology
- 128 channels

### • Wire bonds (~3500)

- 25 µm Al wires

## ■ ATLAS – SCT

- 15.552 microstrip sensors
- 2.112 barrel modules
- 1.976 forward modules
- **61 m<sup>2</sup> silicon**
- **ATLAS ≤ 6.3·10<sup>6</sup> strips**



Реальные детекторные модули

Опоры-поддержки

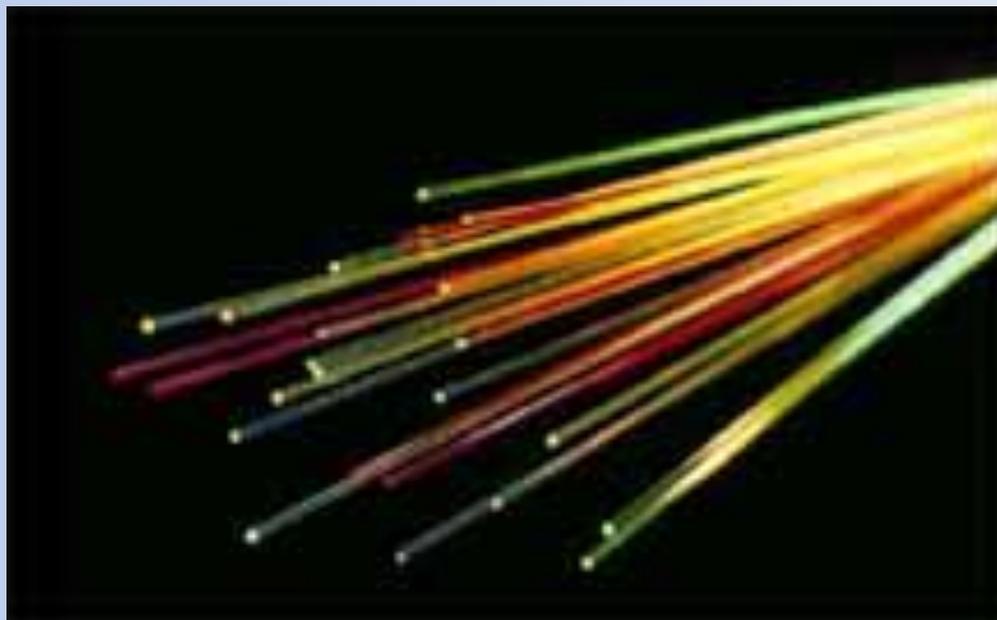
Кабели считывания и управления

Сложная система охлаждения

Детекторы, регистрирующие свет от возбужденных атомов  
→ Сцинтилляторы



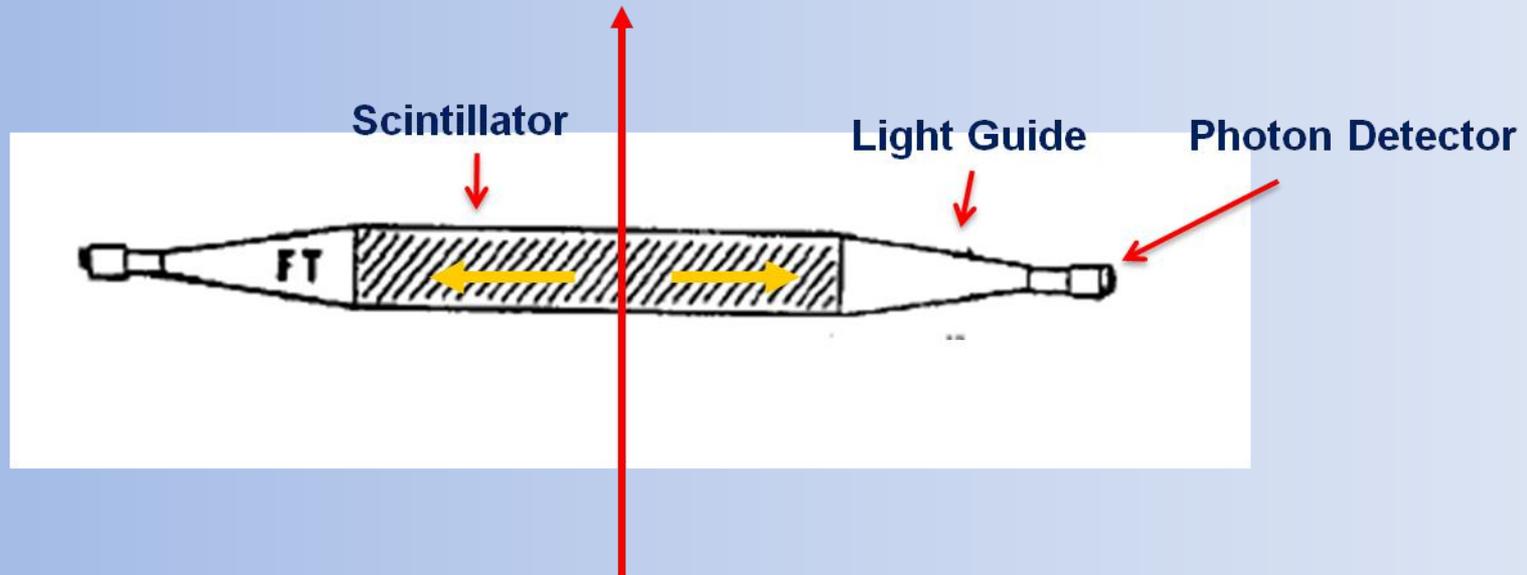
«Всеми «фибрами» души почувствовать...»



# Твердотельные детекторы

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

→ Trigger, Time of Flight, калориметры и т.д.

**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)

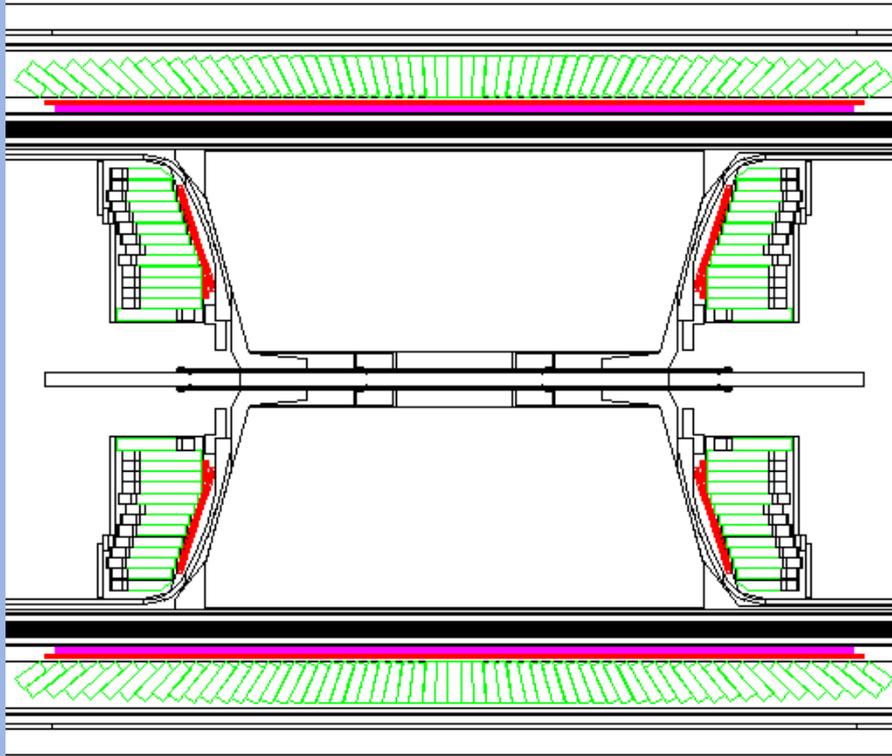
**Регистрирующие элементы** - (газовые, жидкостные, твердотельные)

**Много разных типов конкретной реализации в разных экспериментах**

## Гомогенный OPAL Ecal

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

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

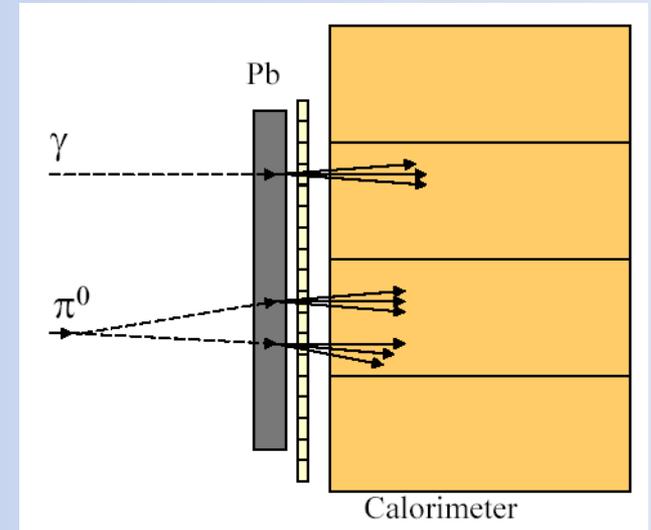


10'500 blocks (10 x 10 x 37 cm<sup>3</sup>, 24.6 X<sub>0</sub>),  
PM (barrel) or PT (end-cap) readout.

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

Пространственное разрешение ~ 11 mm при 6 GeV

Принцип работы  
pre-shower детектора



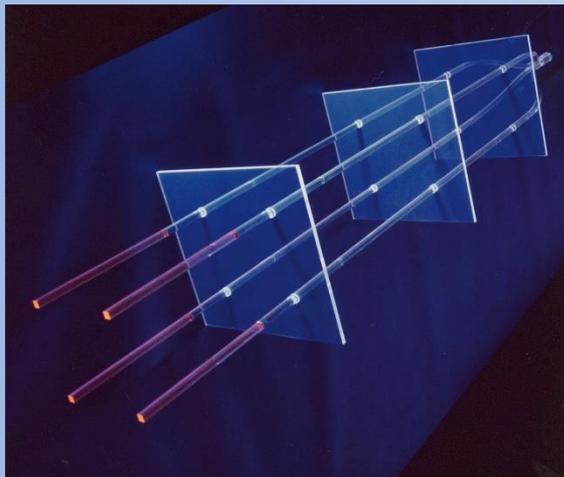
Пример устройства. Высокая  
гранулярность полезна для  
γ/π<sup>0</sup>, e/γ, e/π<sup>±</sup> сепарации.

Обычно газовые,  
теперь Si детекторы.

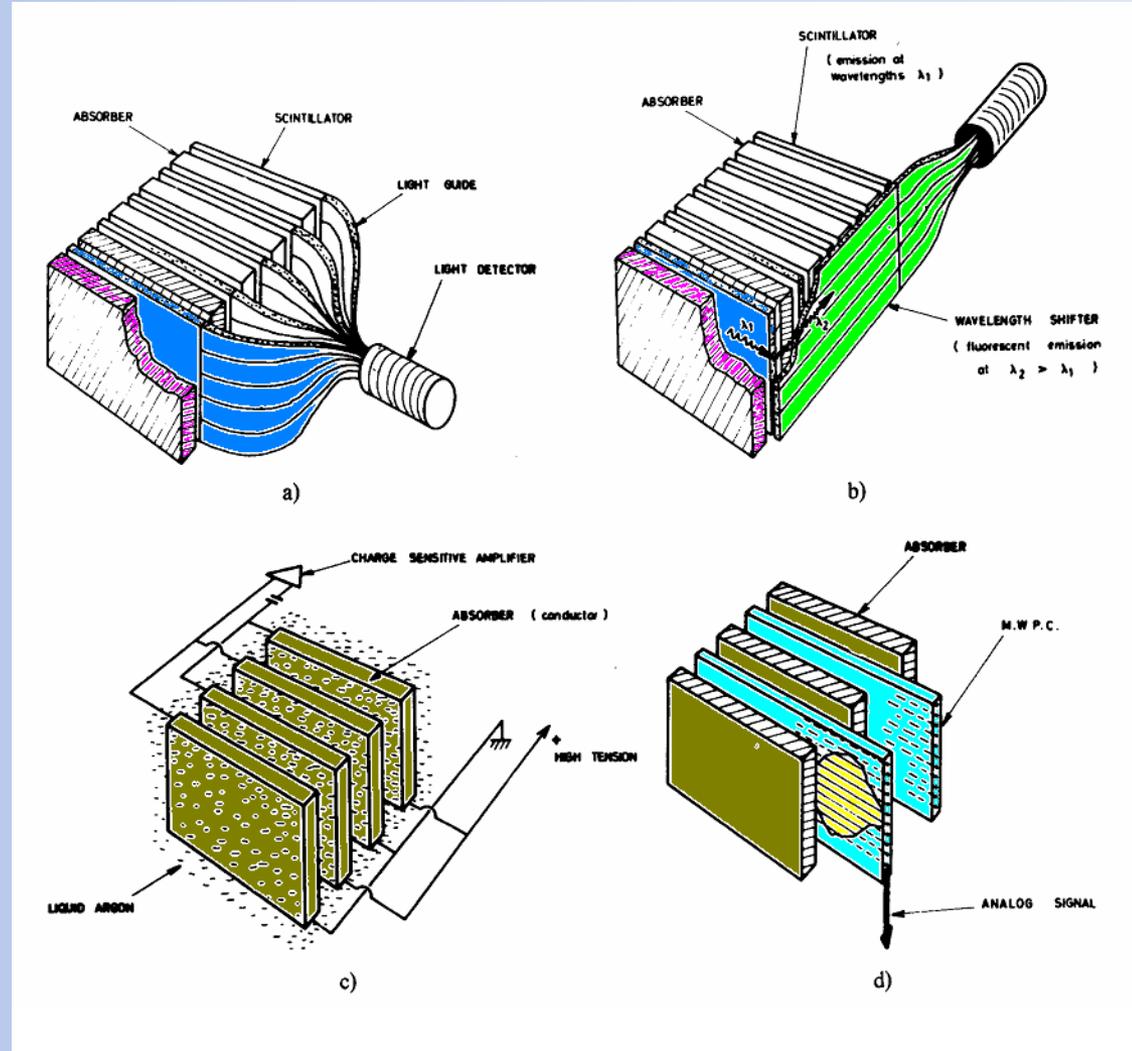
## Сэмплинговые – как электромагнитные, так и адронные калориметры

свинец, медь, железо, уран

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

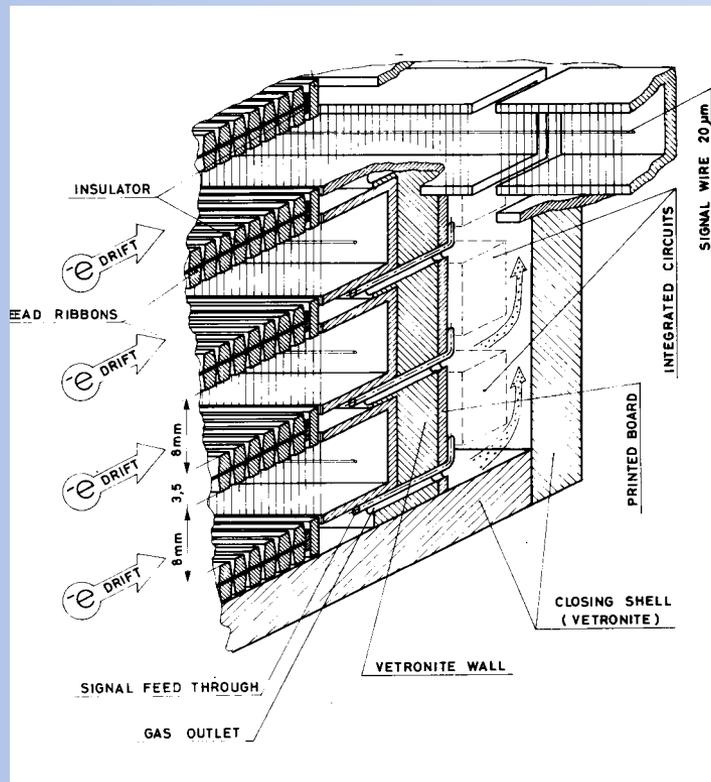
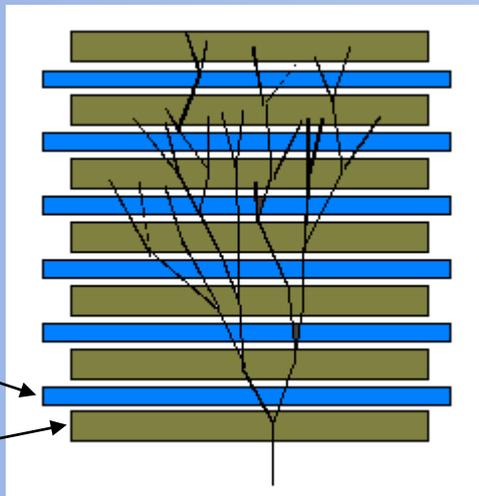


Светосбор типа 'Шашлык'

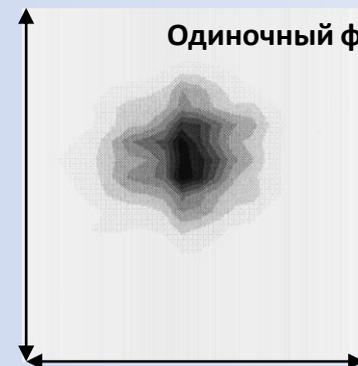


## Пример ECAL (сэмплинг)

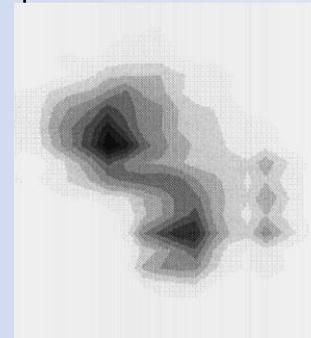
Пример ECAL: DELPHI High Density Projection Chamber (HPC)



Поперечное распределение заряда в DELPHI HPC



Наложение двух фотонов от распада  $\pi^0$



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

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

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

(HPC was placed behind massive RICH detector !)

## Пример HCAL (сэмплинг)

### Адронный калориметр CMS

Бронза + сцинтилляторы

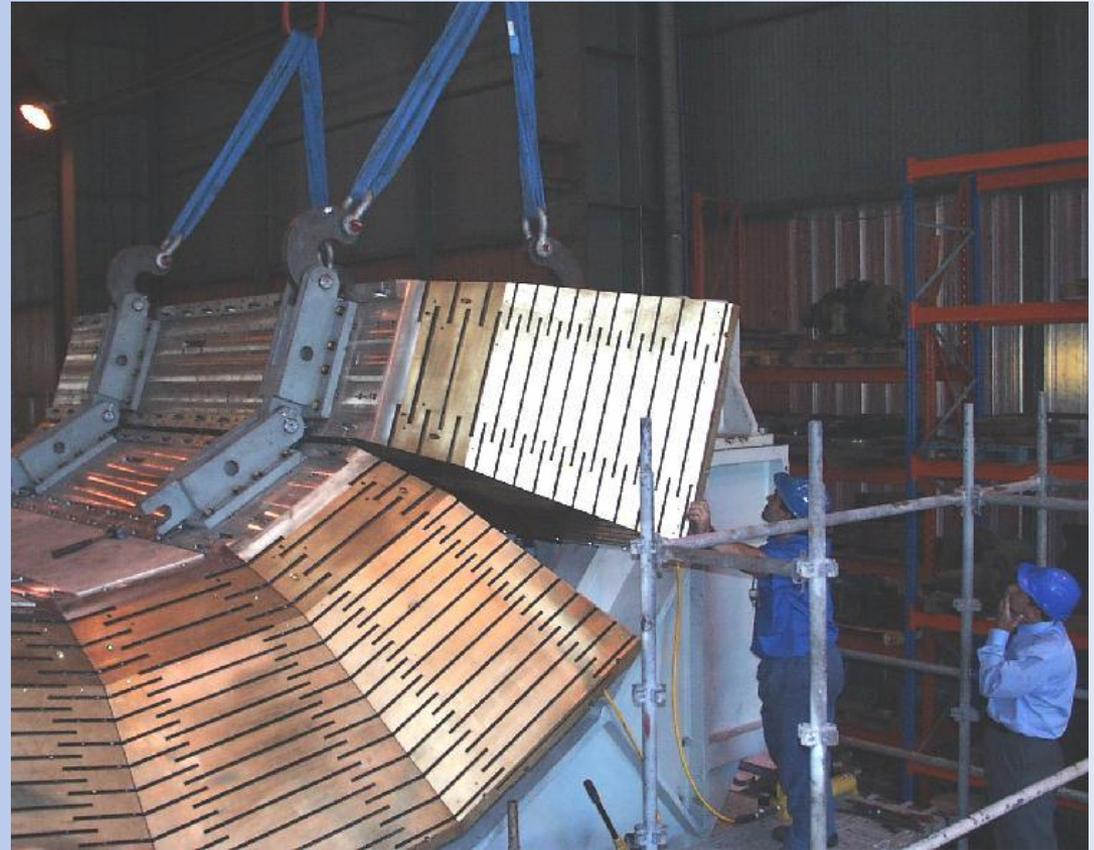
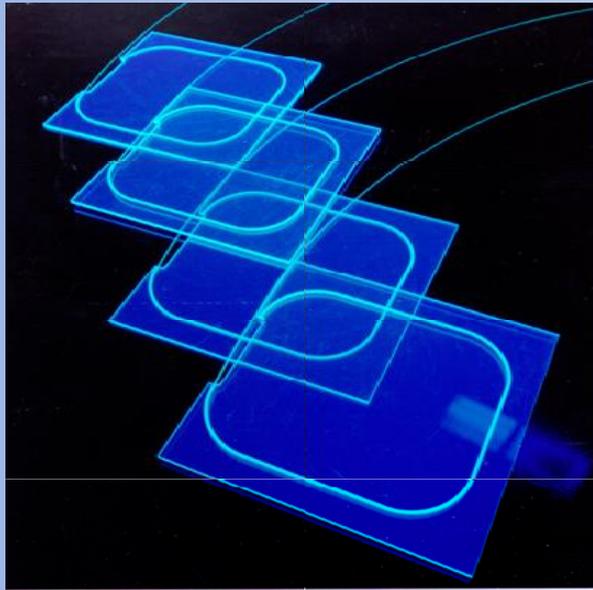
2 x 18 клиньев (barrel)

+ 2 x 18 клиньев (endcap)

~ 15000 T абсорбера

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

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



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

# Детекторы на LHC

Основные принципы выбора конструкции Детектора:

Концепт Детектора зависит от того, что изучать

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

Надо всегда помнить

Стоимость установки увеличивается пропорционально ~объему

Как можно меньше материала перед каллориметрами

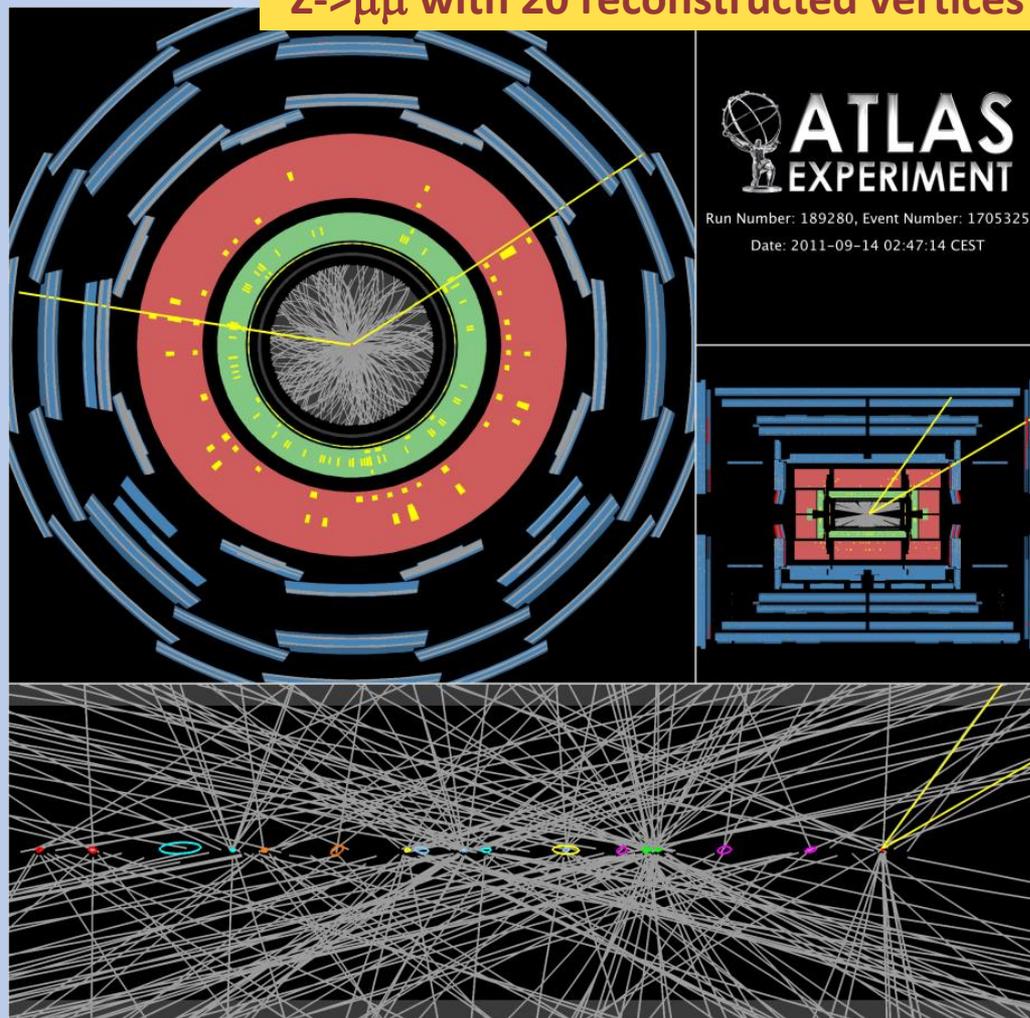
Как можно больше материала перед мюонным спектрометром

Герметичность, но легкий доступ после открытия детектора

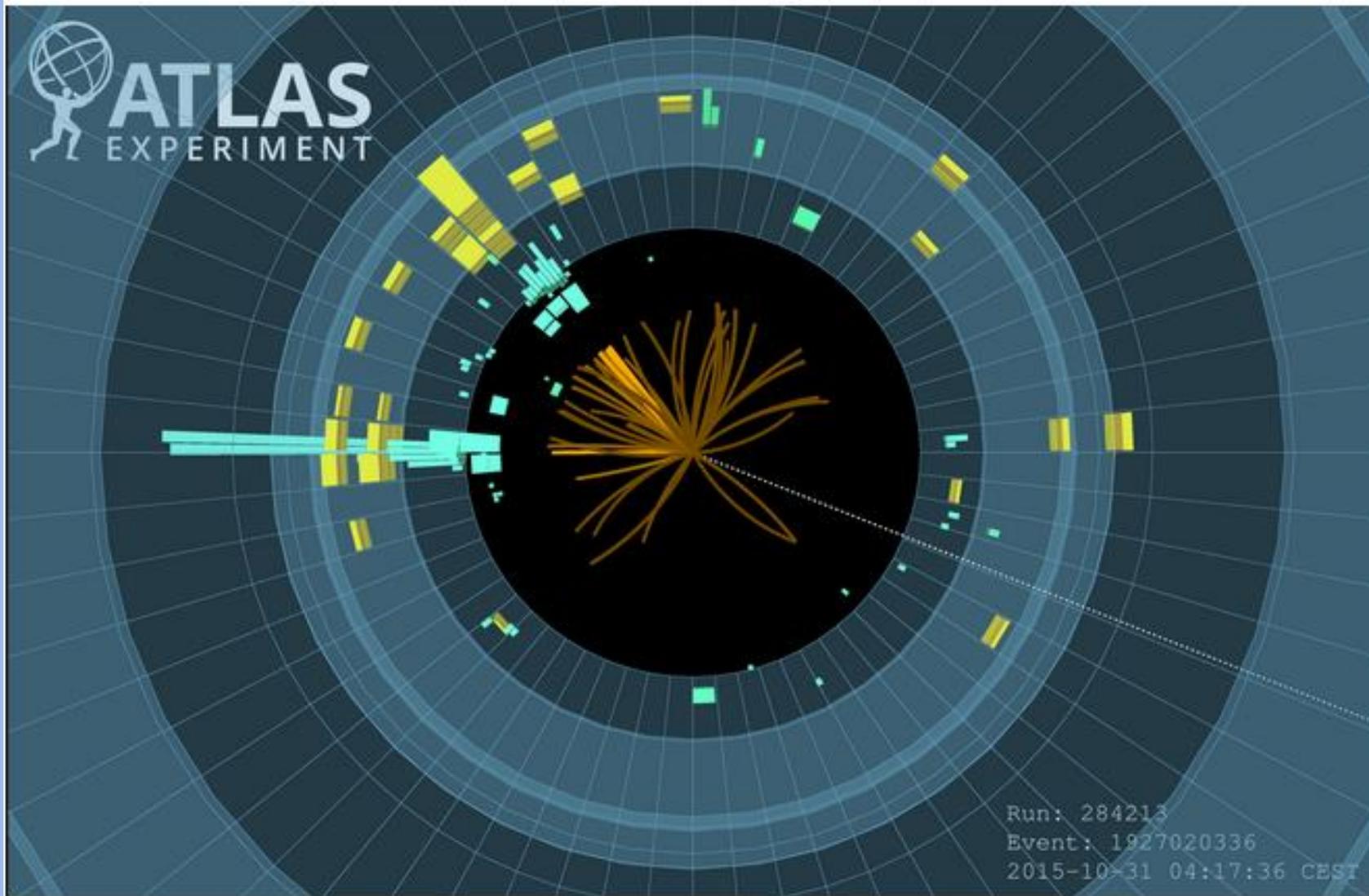


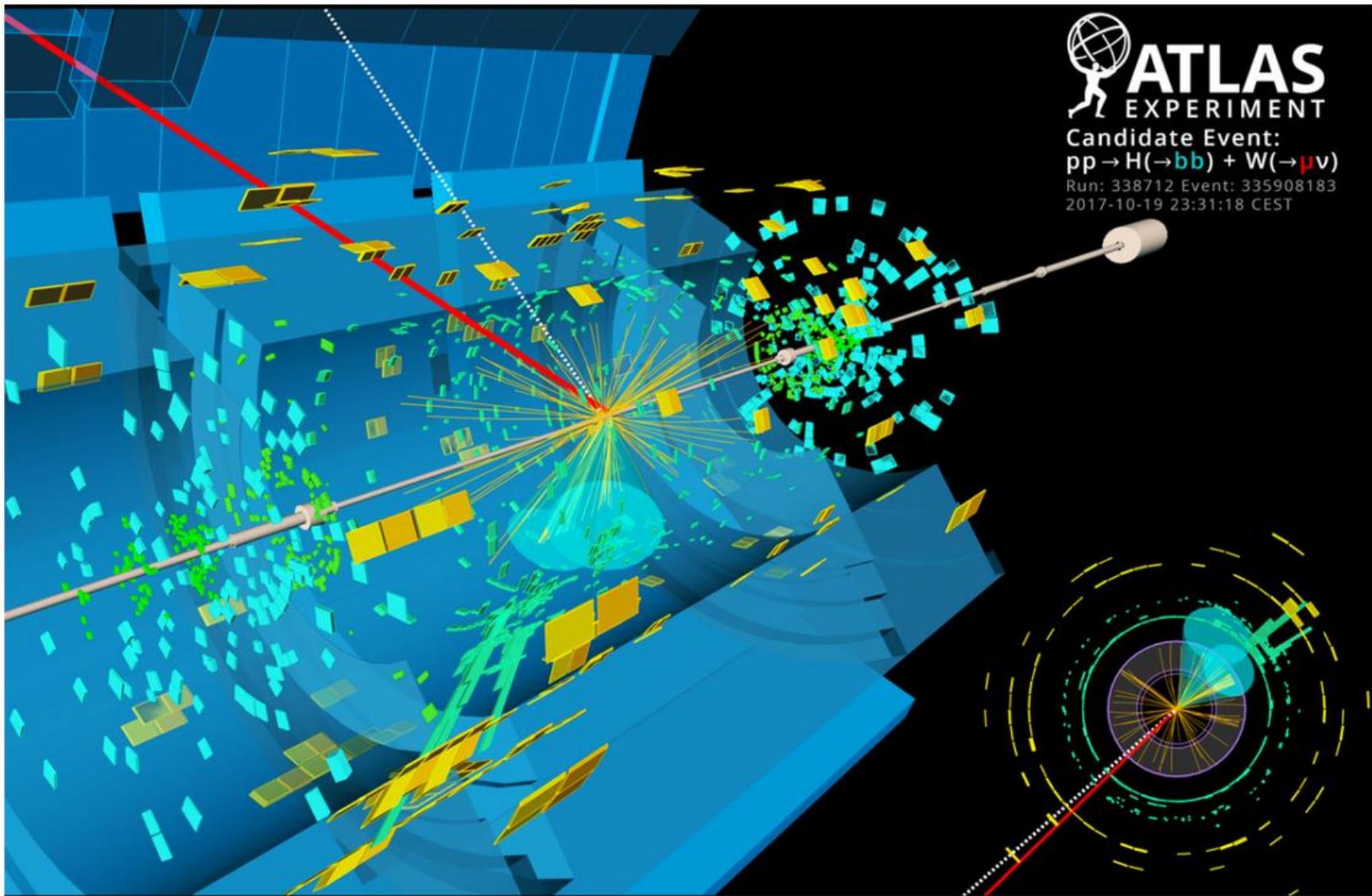
Z- $\rightarrow$  $\mu\mu$  with 20 reconstructed vertices

## Pile-up challenge



- 2018  $\langle$ pile-up $\rangle \sim 50$  (up to 80 max)





## 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  $e/\text{jet}$  отношение на LHC  $\sim 10^{-5}$ ,

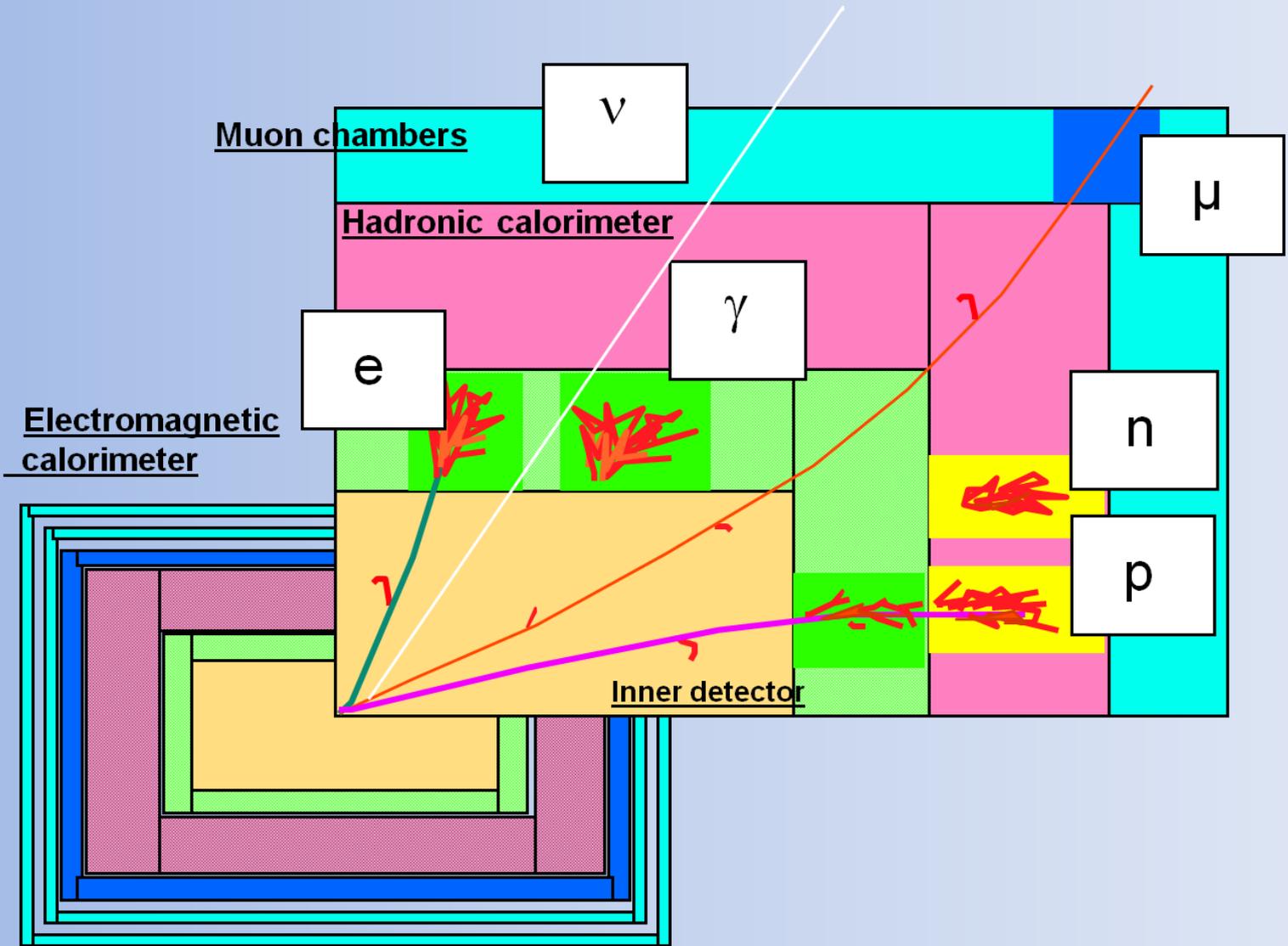
т.е.  $\sim 100$  хуже, чем на Tevatron

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



## 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)

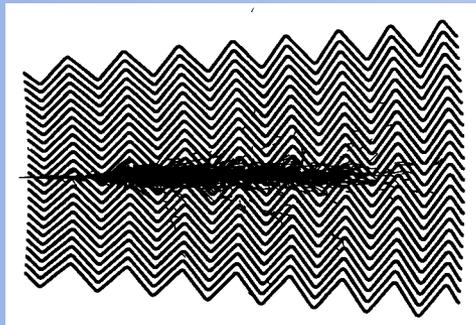
**LHCb:** Tracker (straw tubes), Muon detector (MWPC, GEM)

# Калориметры

## Пример ECAL (сэмплинг)

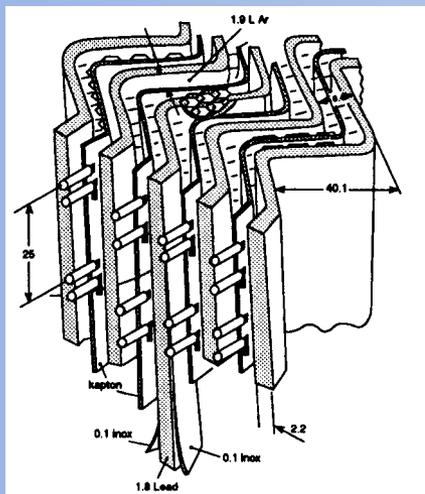
### ATLAS электромагнитный калориметр

Абсорбер с «аккордеонной» геометрией в Liquid Argon



LAr (90K)

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



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



Разрешение

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

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

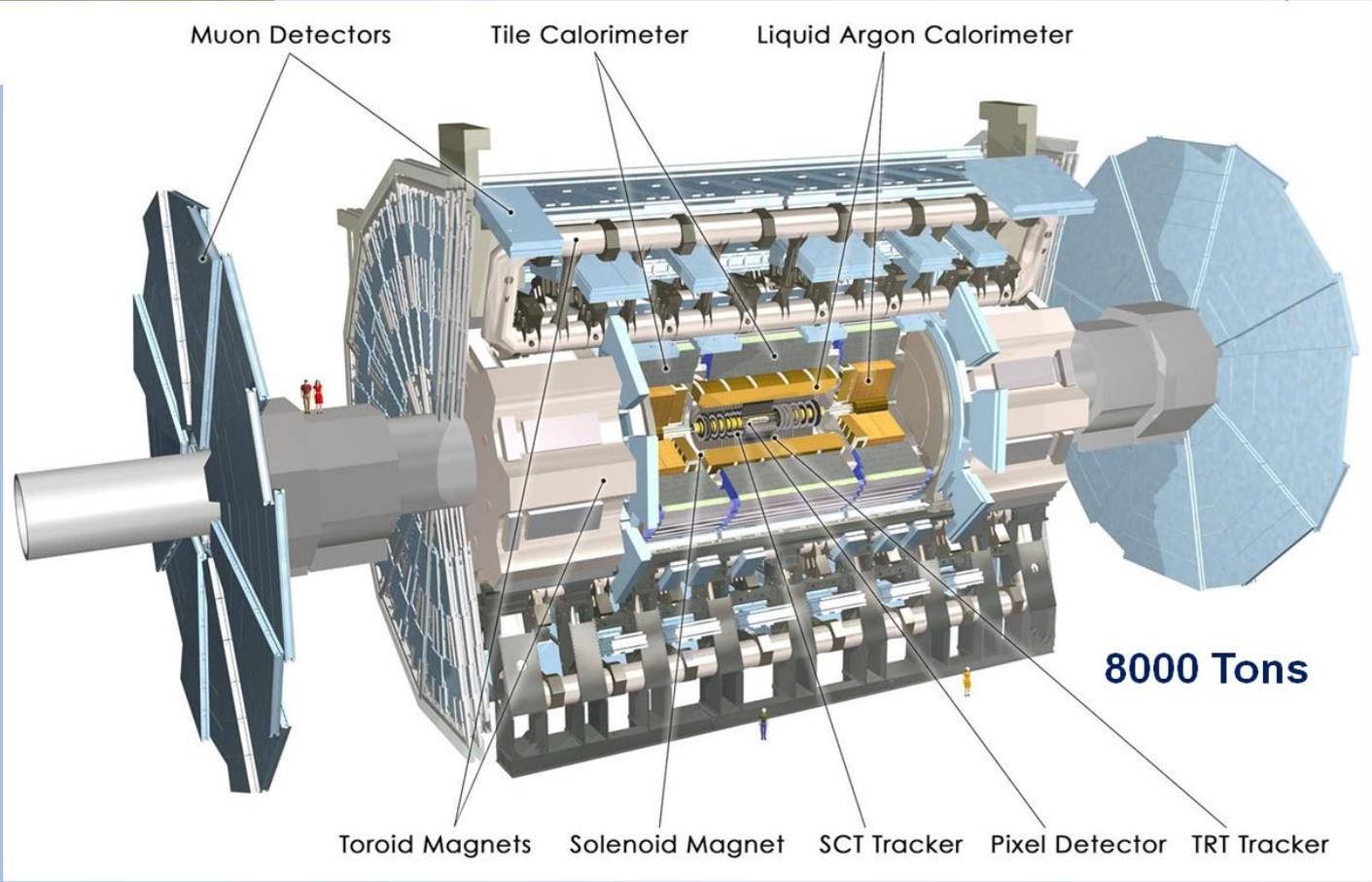


ATLAS superimposed to the 5 floors of building 40

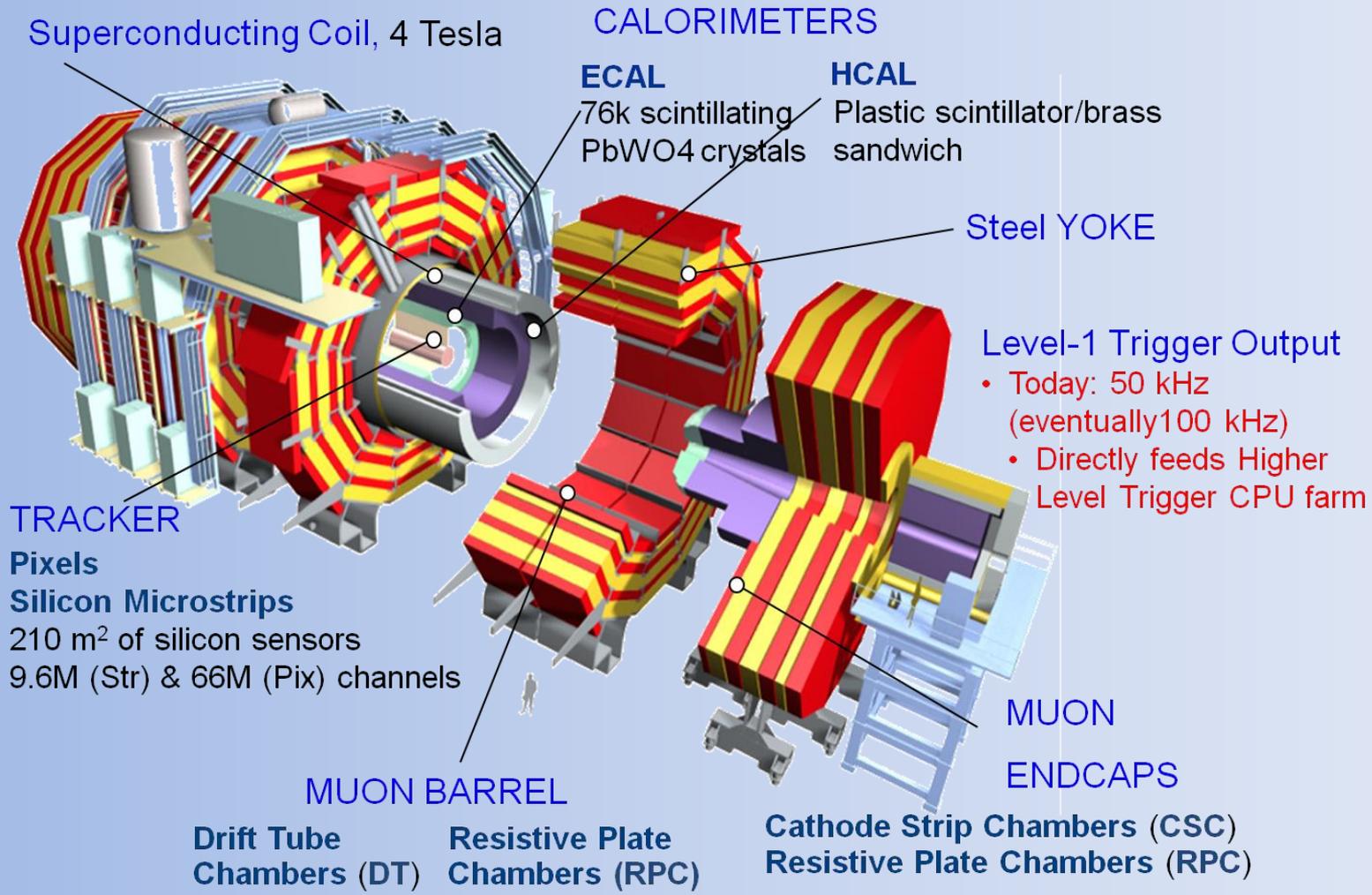
# ATLAS Detector

45 m

25 m

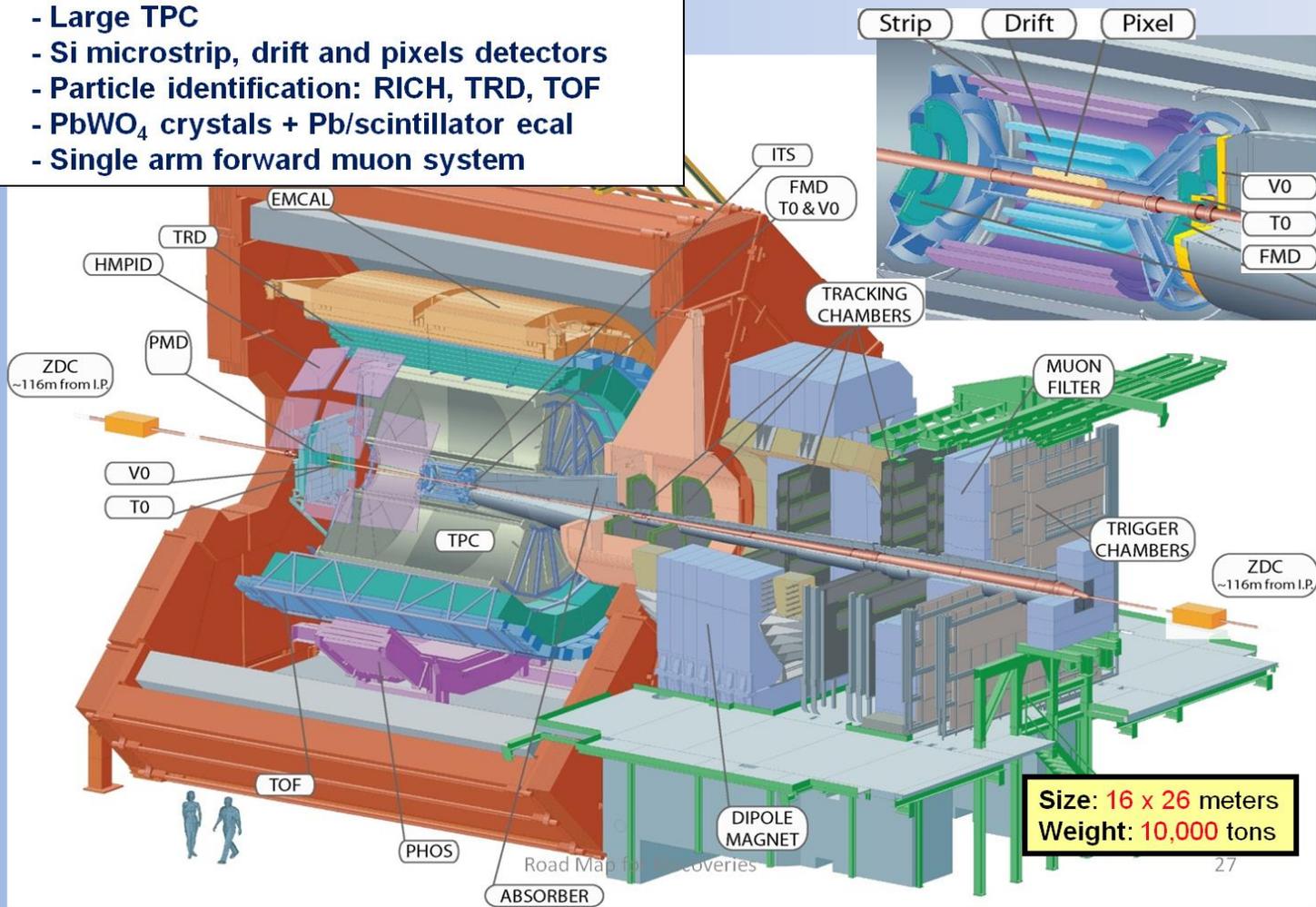


# CMS Detector



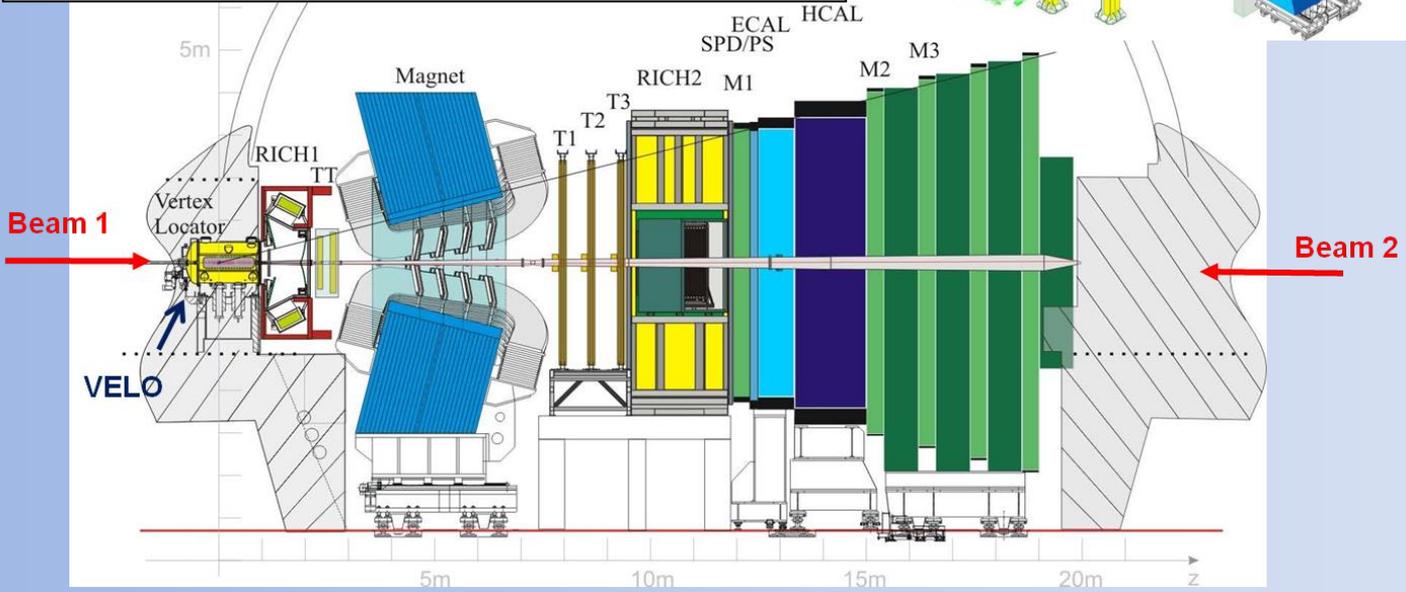
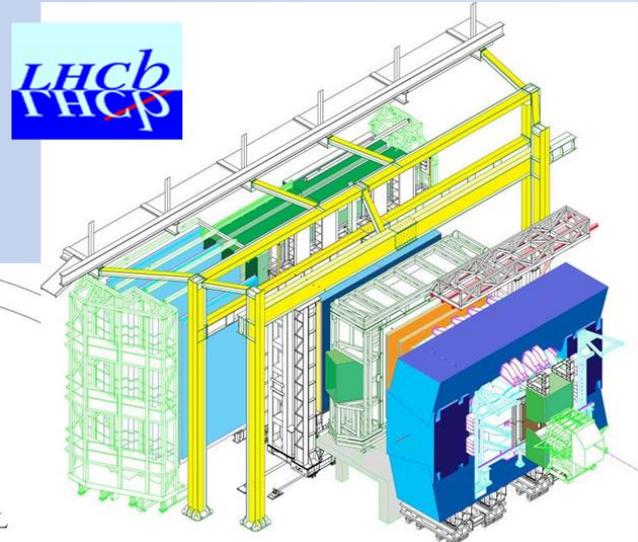
## ALICE: study of quark-gluon plasma

- L3 solenoid
- Large TPC
- Si microstrip, drift and pixels detectors
- Particle identification: RICH, TRD, TOF
- $\text{PbWO}_4$  crystals + Pb/scintillator ecal
- Single arm forward muon system



## 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



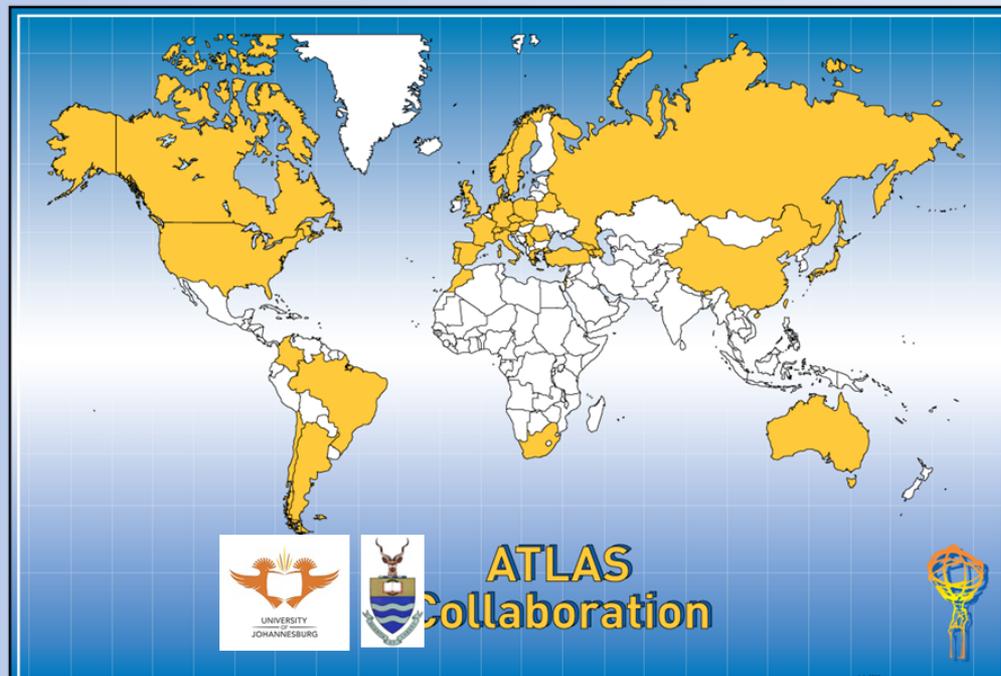
# ATLAS Collaboration

(Status August 2010)

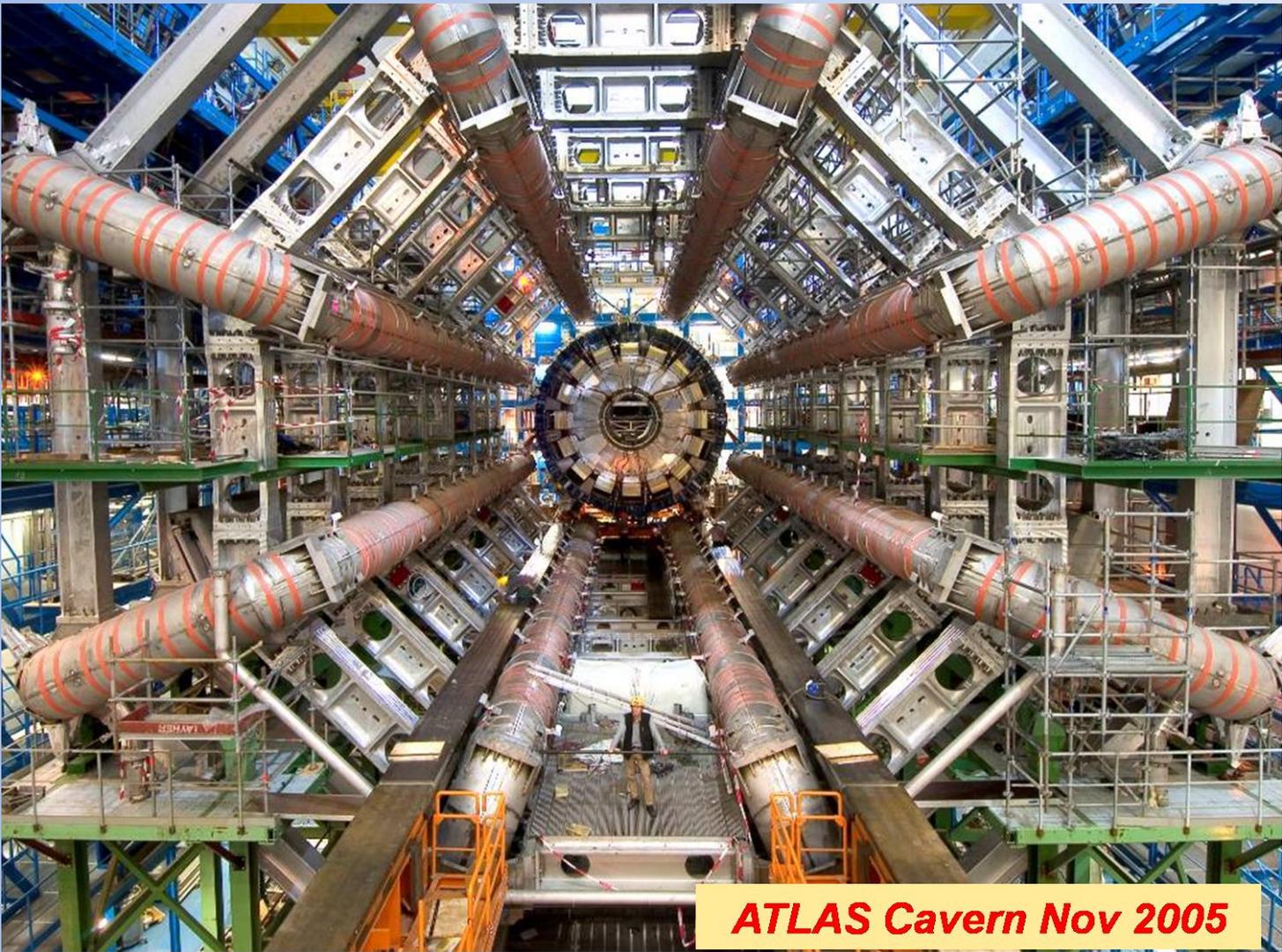
38 Countries

174 Institutions

3000 Scientific participants total  
(1000 Students)

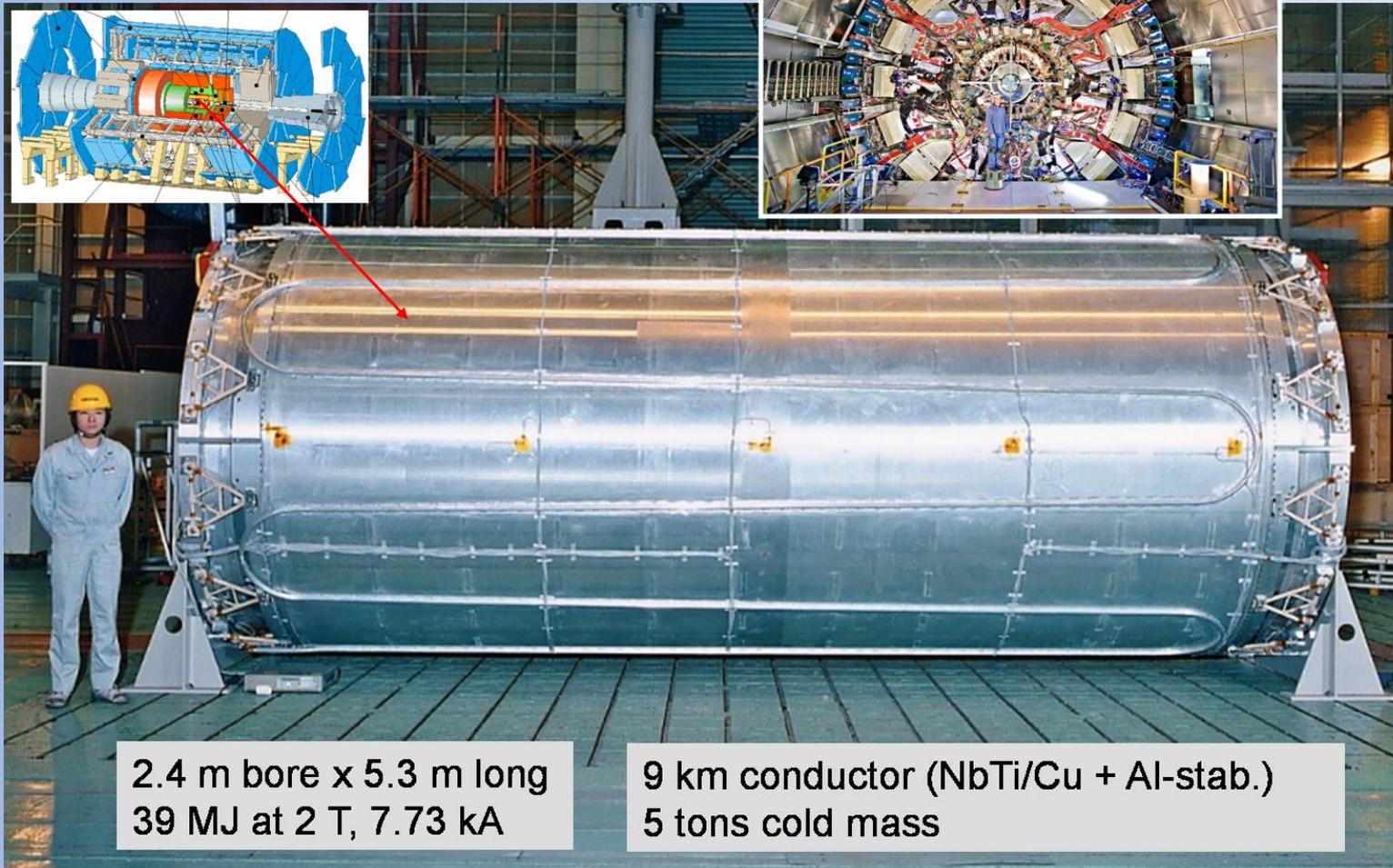
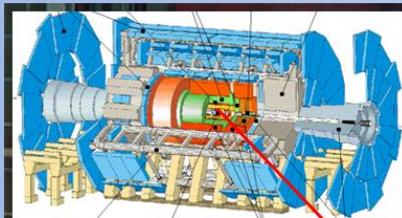


Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Annecy, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, HU Berlin, Bern, Birmingham, UAN Bogota, Bologna, Bonn, Boston, Brandeis, Brasil Cluster, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Buenos 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



**ATLAS Cavern Nov 2005**

## Central Solenoid

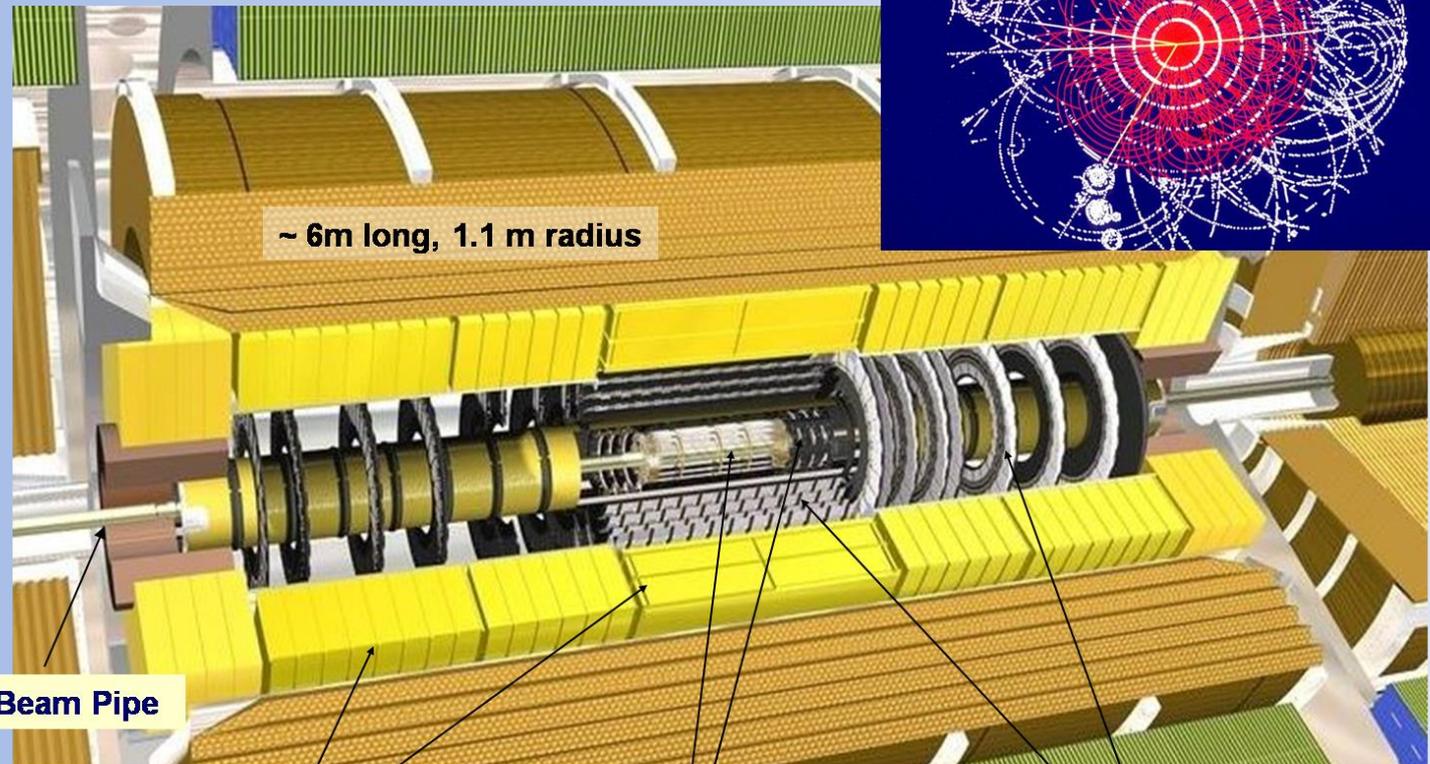
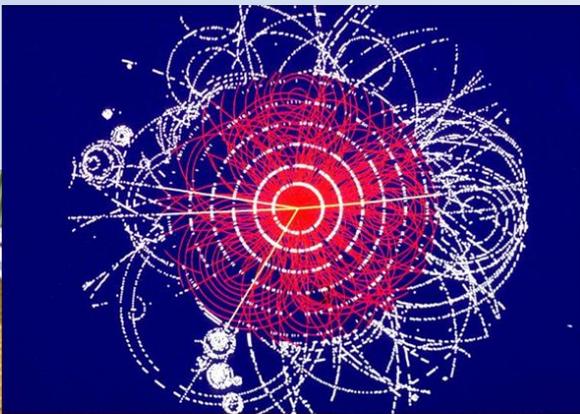


2.4 m bore x 5.3 m long  
39 MJ at 2 T, 7.73 kA

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**

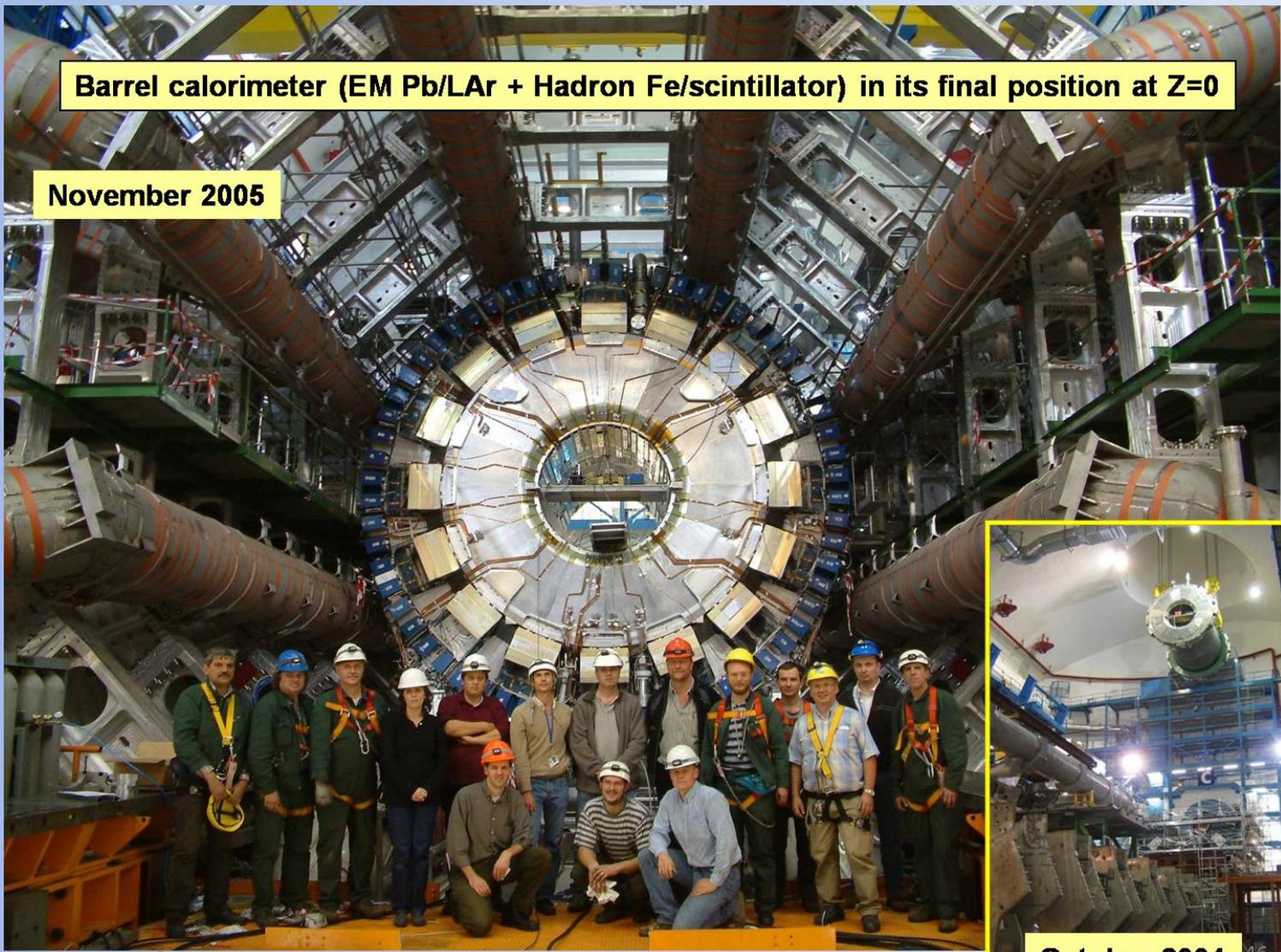
**Transition Radiation Tracker (TRT)**  
( $4 \cdot 10^5$  channels) with  $e/\pi$  separation

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

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

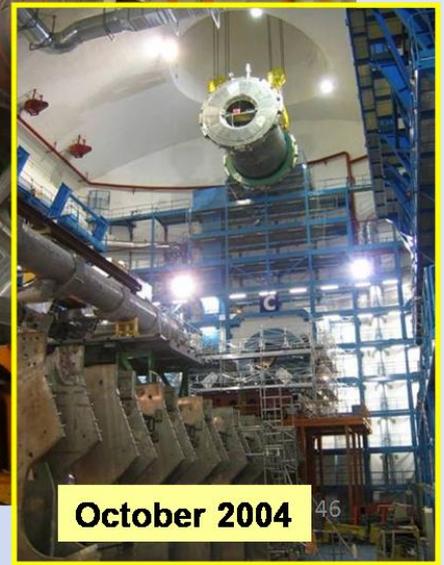
Barrel calorimeter (EM Pb/LAr + Hadron Fe/scintillator) in its final position at Z=0

November 2005



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

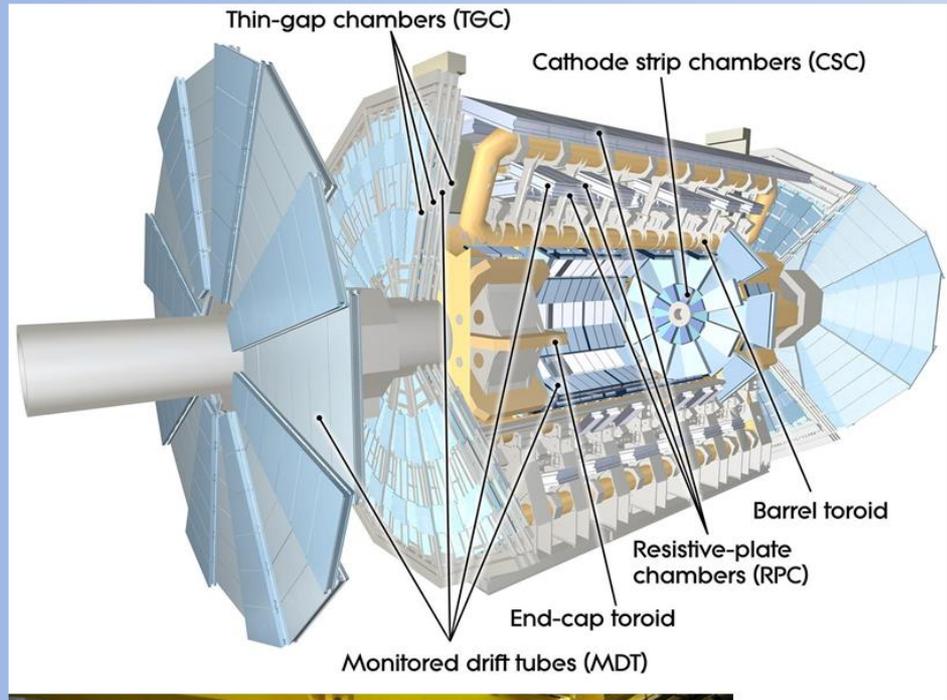
LHC Dream-Reality-Vision



October 2004

46

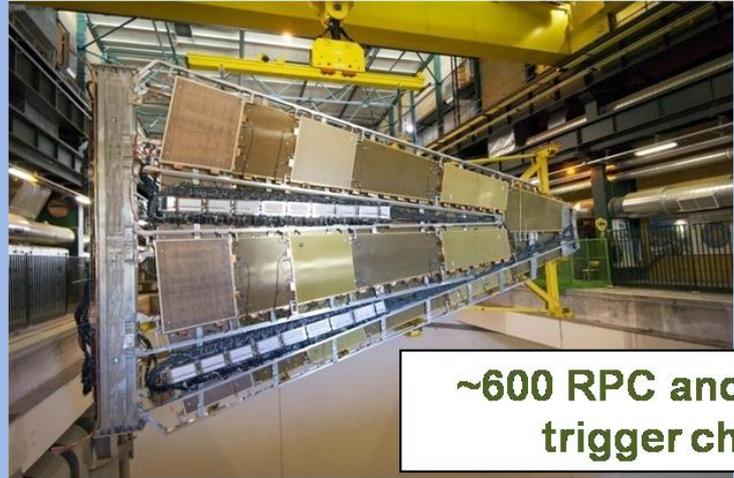
# Muon System



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



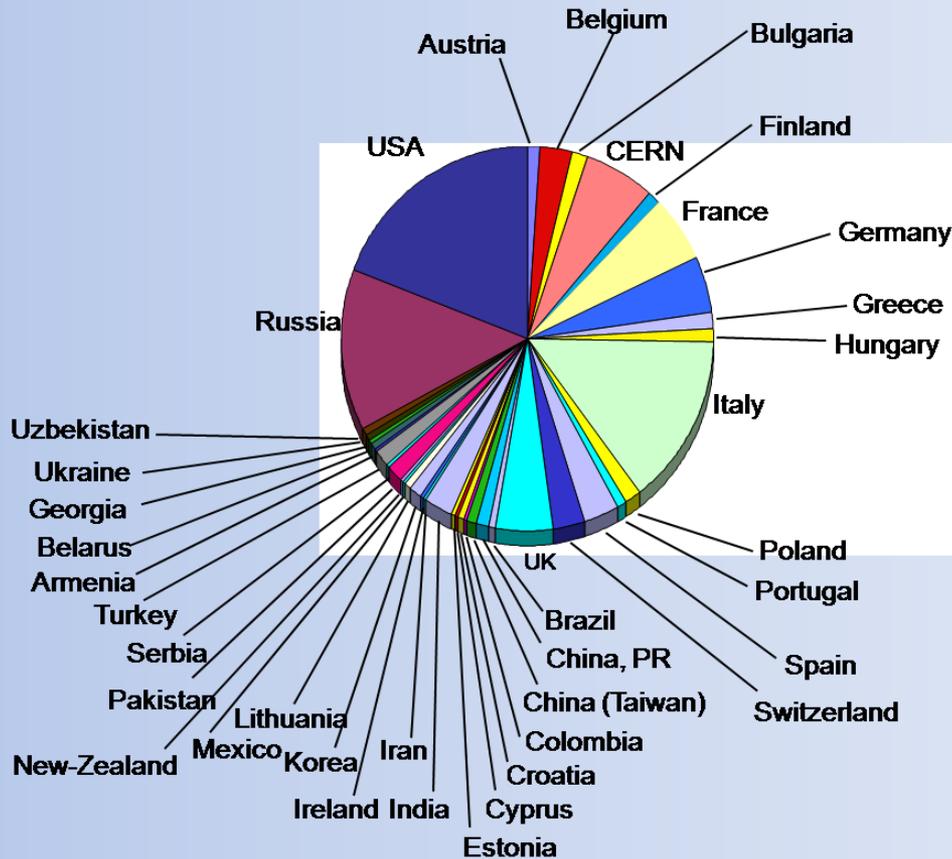
~600 RPC and ~3600 TGC trigger chambers

# 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

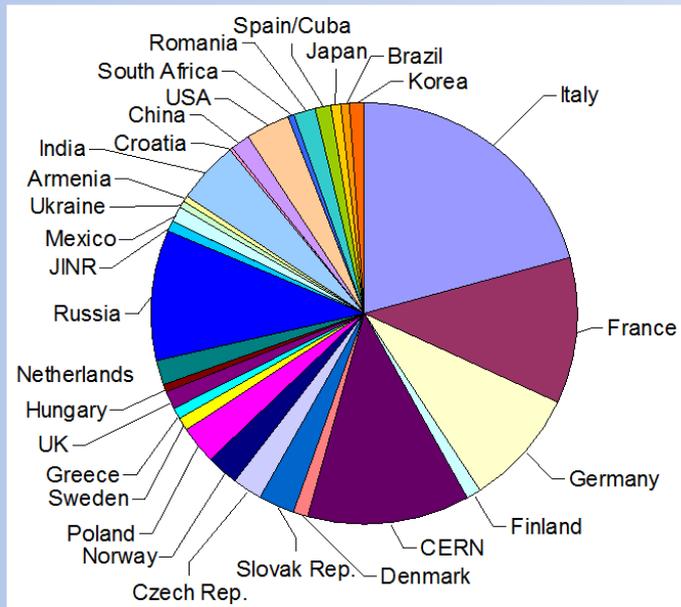
Associated Institutes	
Number of Scientists	62
Number of Laboratories	9



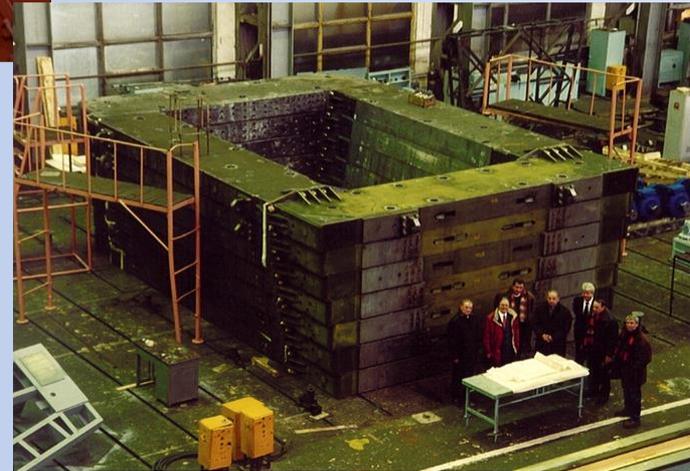
**2310 Scientific Authors**  
**38 Countries**  
**175 Institutions**

# ALICE Collaboration

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



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



Огромное спасибо за  
неослабевающе  
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)

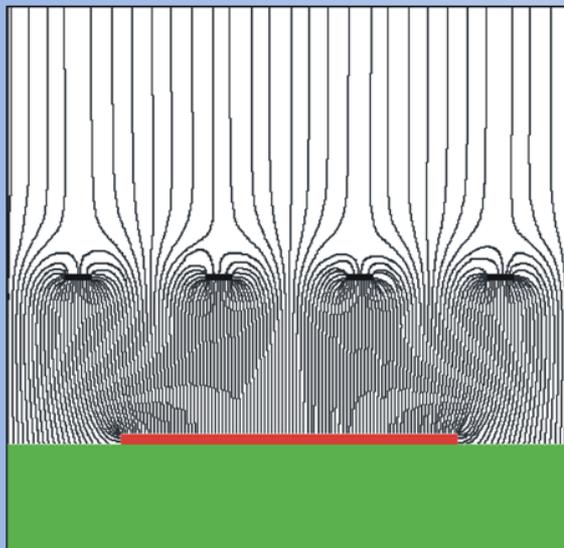
Александр Водопьянов (ОИЯИ, ALICE)

Владимир Рыжов (CERN, (ОИЯИ), CMS)

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

## Detector Simulation

Electric Fields in a Micromega Detector

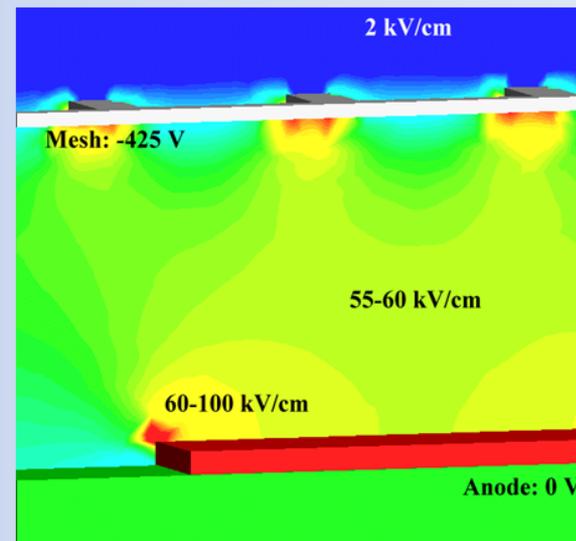


Very accurate simulations of particle detectors are possible due to availability of Finite Element simulation programs and computing power.

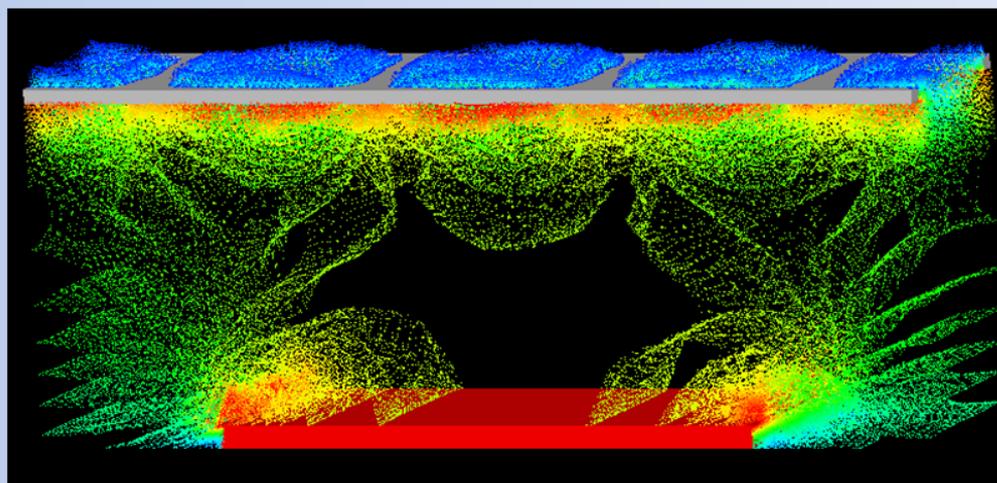
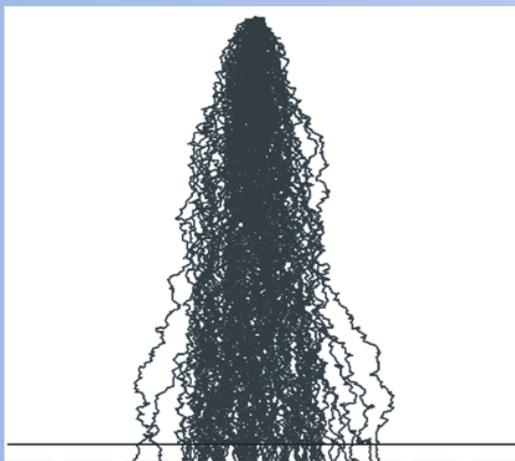
Follow every single electron by applying first principle laws of physics.

For Gaseous Detectors:  
**GARFIELD** by R. Veenhof

Electric Fields in a Micromega Detector



Electrons avalanche multiplication





# RDMS Participation in CMS

