Регистрация (детектирование) частиц - 2

Николай Зимин

Трековые детекторы:

а) газовые (жидкостные)

б) твердотельные

Калориметры:

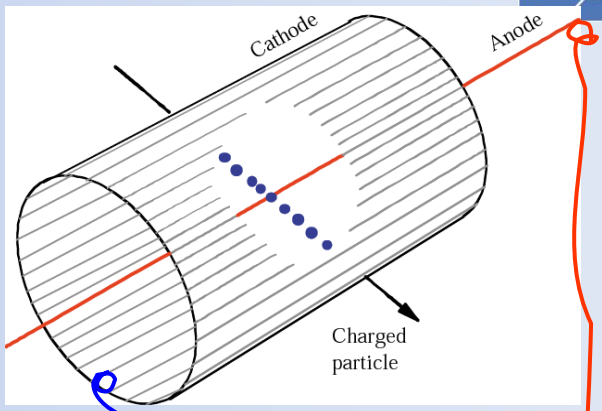
а) электромагнитные

б) адронные

Детекторы на LHC

Газовые детекторы

«Соломеная» трубка

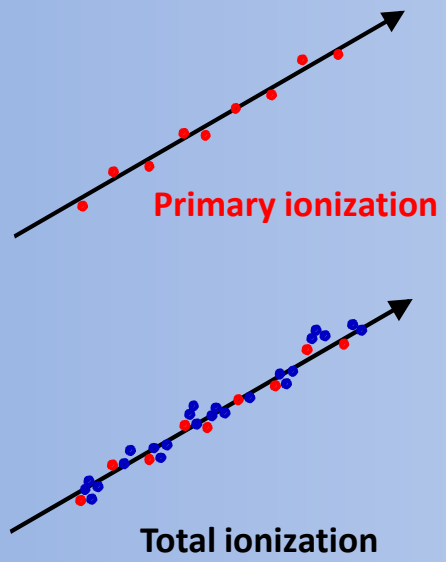


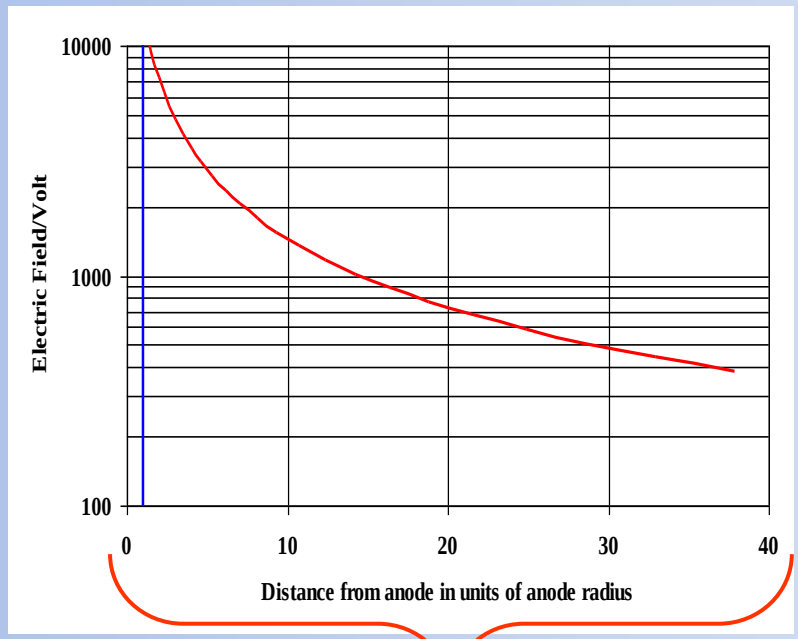
Катод: Металлическая трубка диаметром R

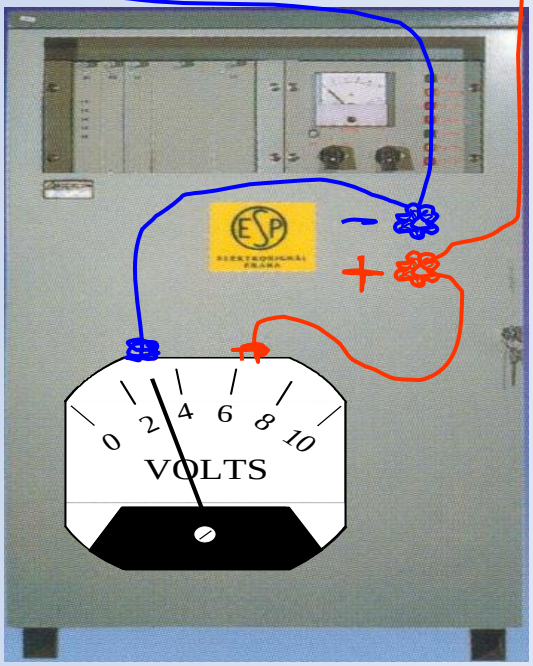
Анод: Золоченая вольфрамовая проволочка r_0

$r_0 = 10\ \mu m$

$R/r_0 = 1000$







$$\sigma(ionization) = f(E, gas)$$

→ Газовое усиление

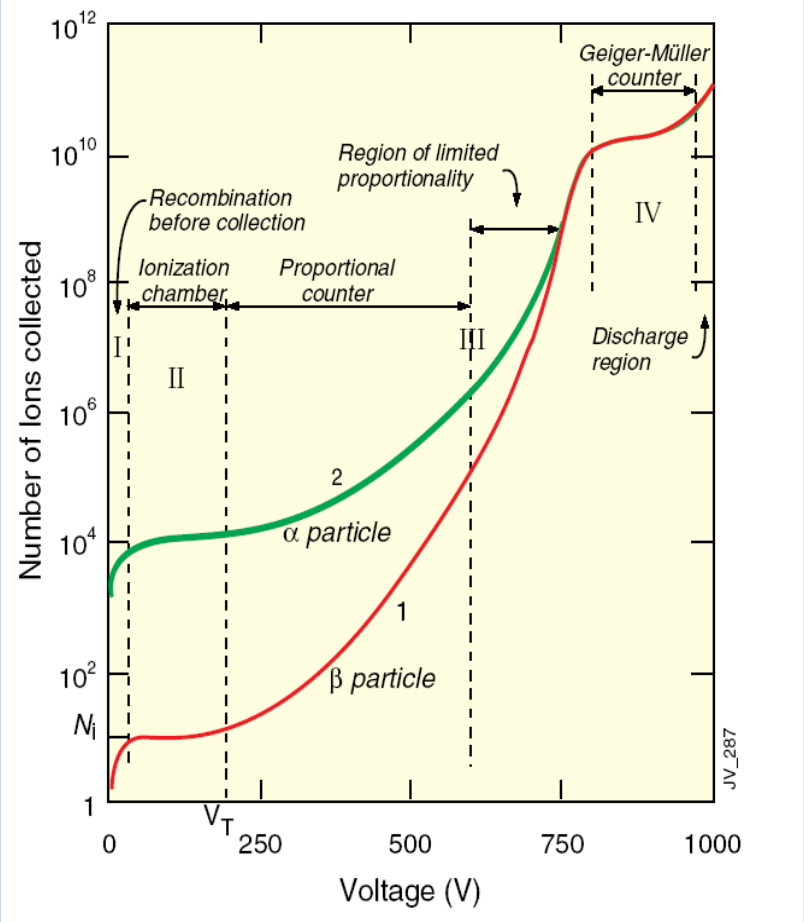
Режимы работы

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

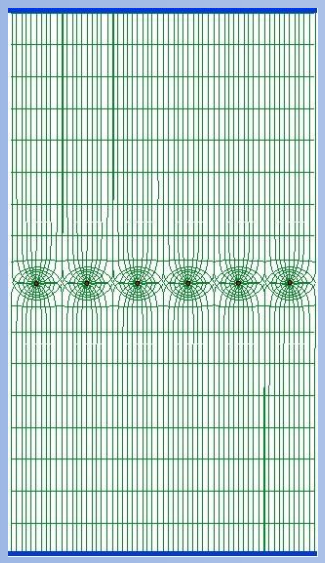
Пропорциональная – усиление ионизации; сигнал пропорционален начальной ионизации → возможно измерение (dE/dx); вторичные лавины должны быть подавлены; усиление ~ 10^4 – 10^5

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

Гейгеровская – массивная фотоэмиссия; разряд по всей длине проволоки ; останавливается снятием HV ; нужны сильные поглотители



Многопроволочная пропорциональная камера MWPC



Идея разместить много проволочек: Nobel Prize 1992

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

Типичная геометрия

5mm, 1mm, 20 μm

Цифровое считывание :
Пространственное разрешение

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

Для d = 1 mm σ_x = 300 μm

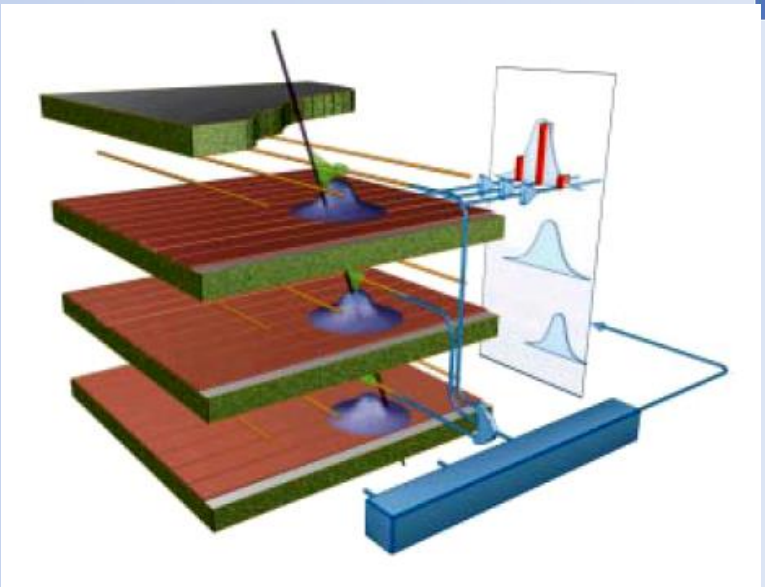
G. Charpak, F. Sauli and J.C. Santiard

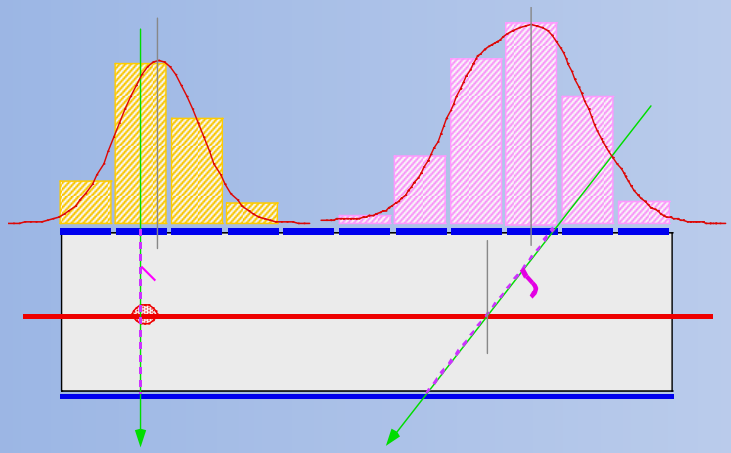
Газовые детекторы

Считывание с катодных стрипов или падов.

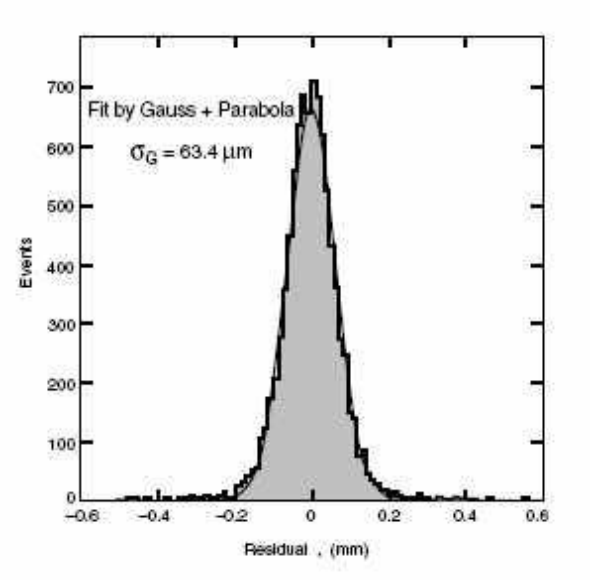
Определение второй координаты с помощью интерполяции индуцированного сигнала на стрипы или пады.

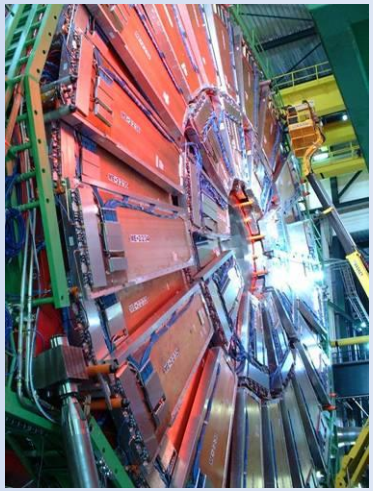
Маленький зазор -> быстрый детектор.



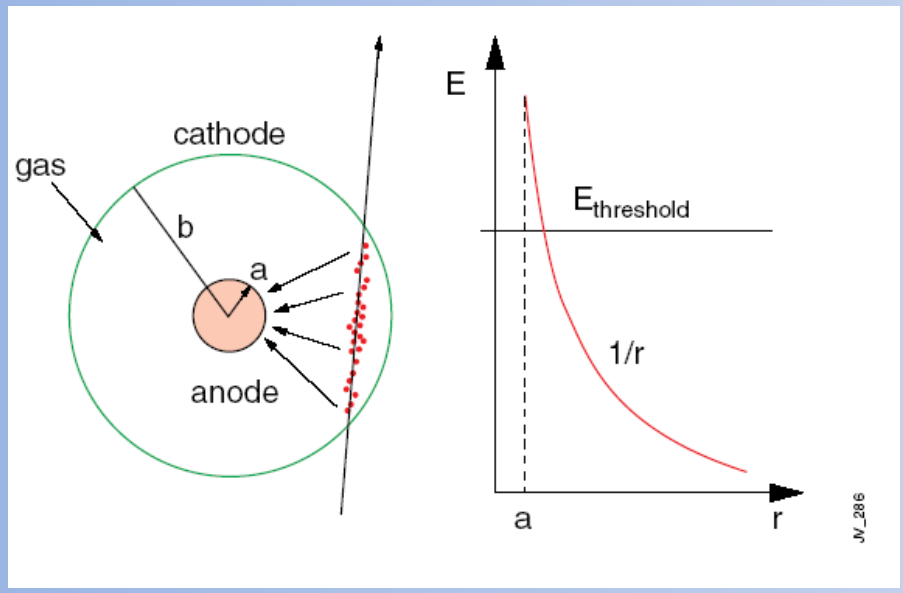


Метод взвешивания наведенного сигнала.





Газовые детекторы

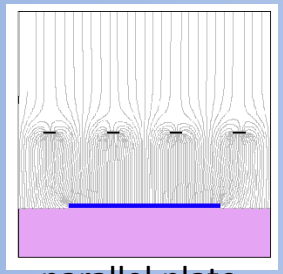


Анод

e^- начальный электрон

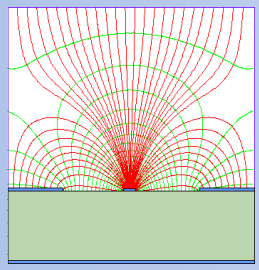
Другие геометрии, создающие градиент E-поля: СОВРЕМЕННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Микромеш



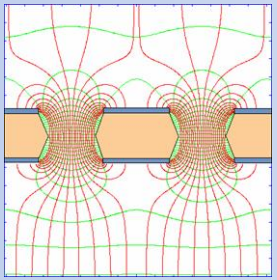
parallel plate

Микрострип

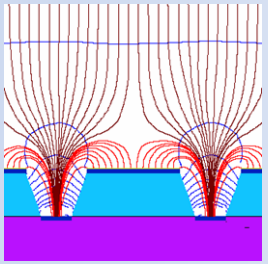


strip

GEM газовый электронный усилитель

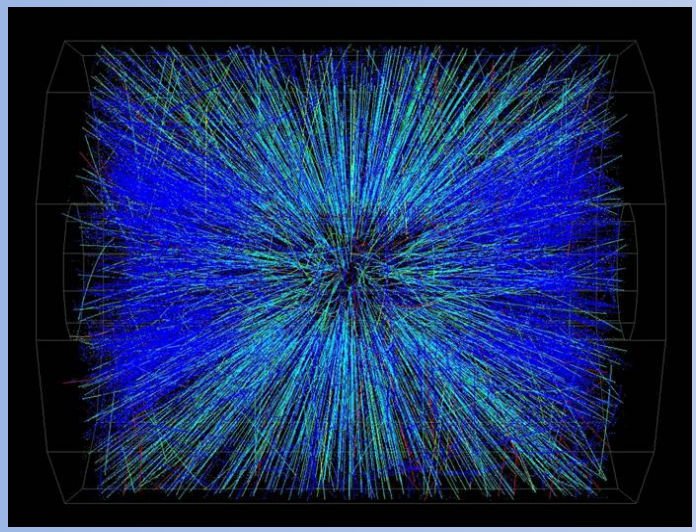


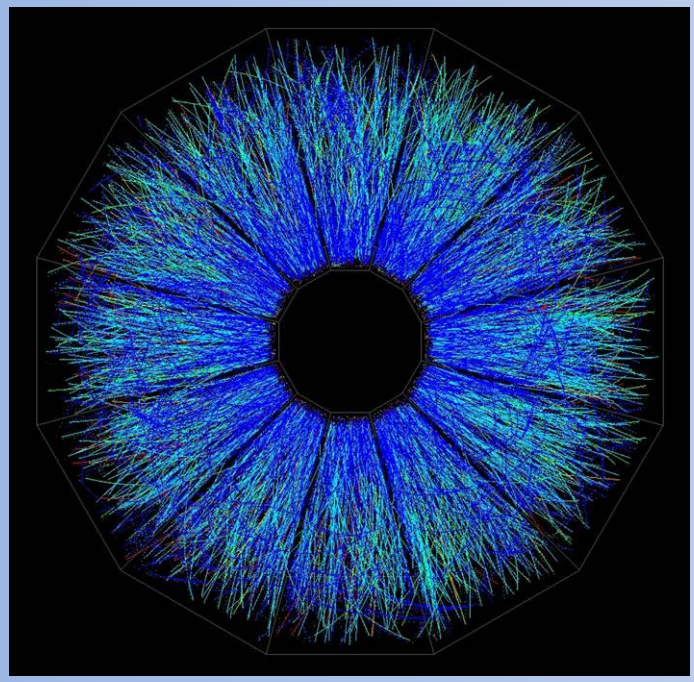
hole

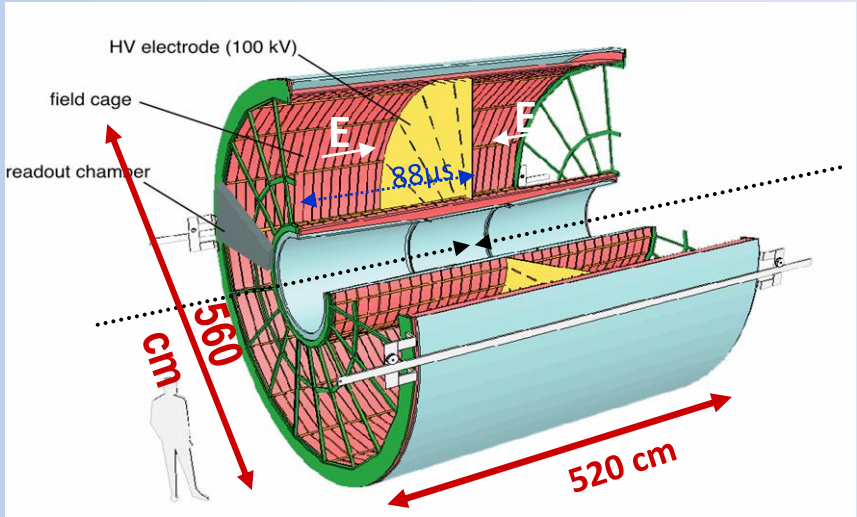


groove

TPC







Alice TPC
HV central electrode at –100 kV
Drift lenght 250 cm at E=400 V/cm
Gas Ne-CO_2 90-10
Space point resolution ~500 мкм
dp/p 2%@1GeV; 10%@10GeV

Events from STAR TPC at RHIC
Au-Au collisions at CM energy of 130 GeV/n
Typically ~2000 tracks/event

Твердотельные детекторы

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

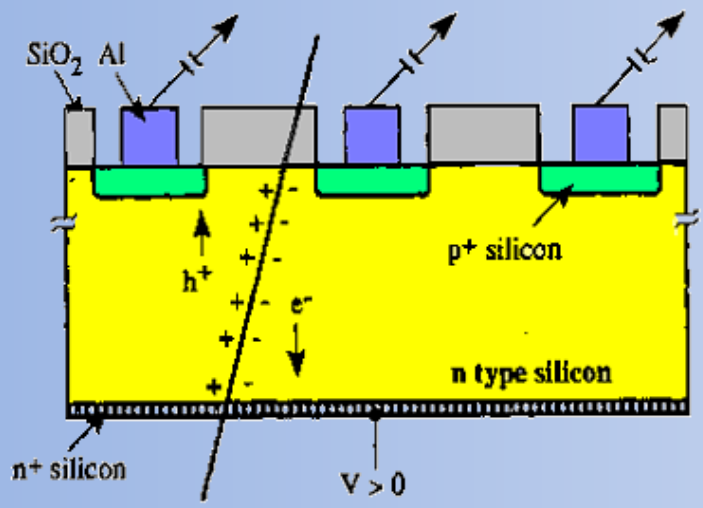
Начальный заряд ~ 10000 больше -> не нужно усиление

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

-> короткие сигналы, быстрые детекторы.

Односторонний стриповый детектор

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



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

Используется n-тип Si с сопртивлением

ρ = 2 KΩcm (N_D ~$2.2 \cdot 10^{12} cm^{-3}$)

Напряжение ~ 150 V

- Разрешение σ зависит от pitch (расстояния между стрипами)

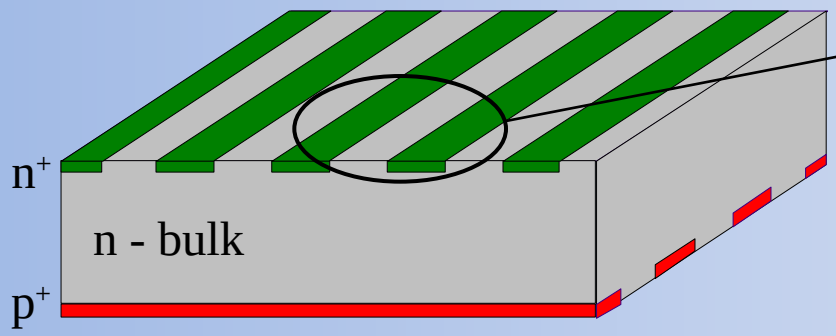
$$\sigma = \frac{p}{\sqrt{12}}$$

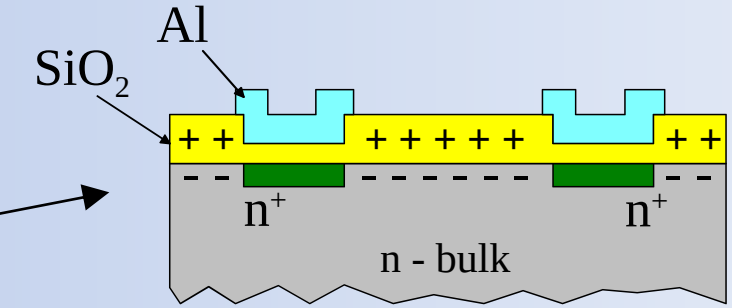
Типичная геометрия 20 μm– 150 μm $\Rightarrow$ **50 μm** pitch дает разрешение 14.4 **μm**

Двухсторонний стриповый детектор

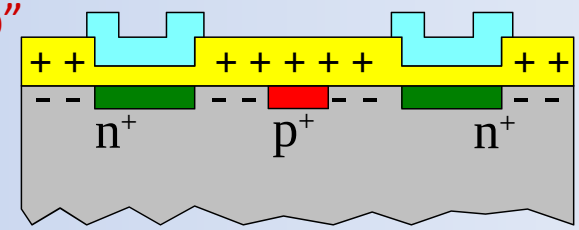
- **Измерение 2ой координаты**

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

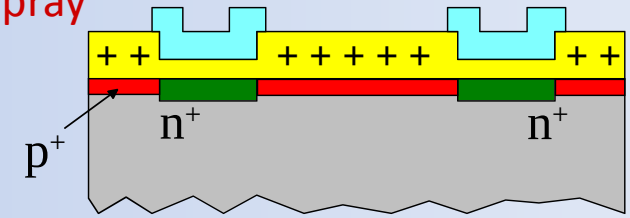




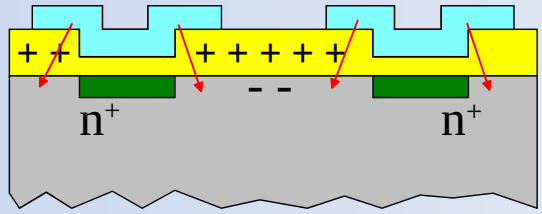
"p-stop"



"p-spray"



"field plates"



- **Problem: Electron accumulation layer**

  n^+-strips are not isolated because of an electron accumulation layer at the Si-SiO_2 interface. This effect is due to the presence of positive charge in SiO_2 layer which attracts electrons.

- **Solution:** "Break" accumulation layer

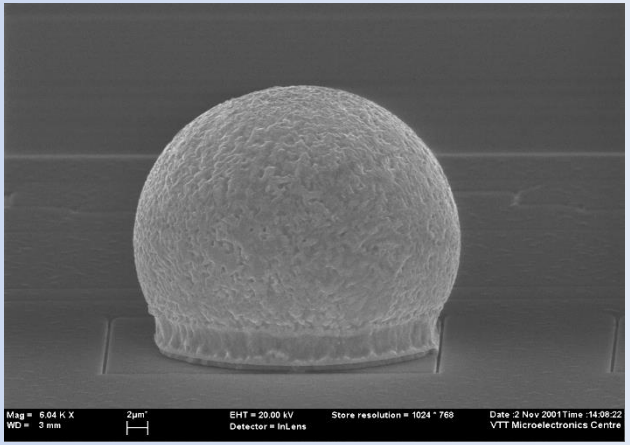
  - p-strips in between the n-strips ("**p-stop**")
  - moderate p^+-implantation over all surface ("**p-spray**")
  - "**field plates**" (metal over oxide) over the n^+-strips and apply negative potential with respect to n^+-strips to repel electrons.

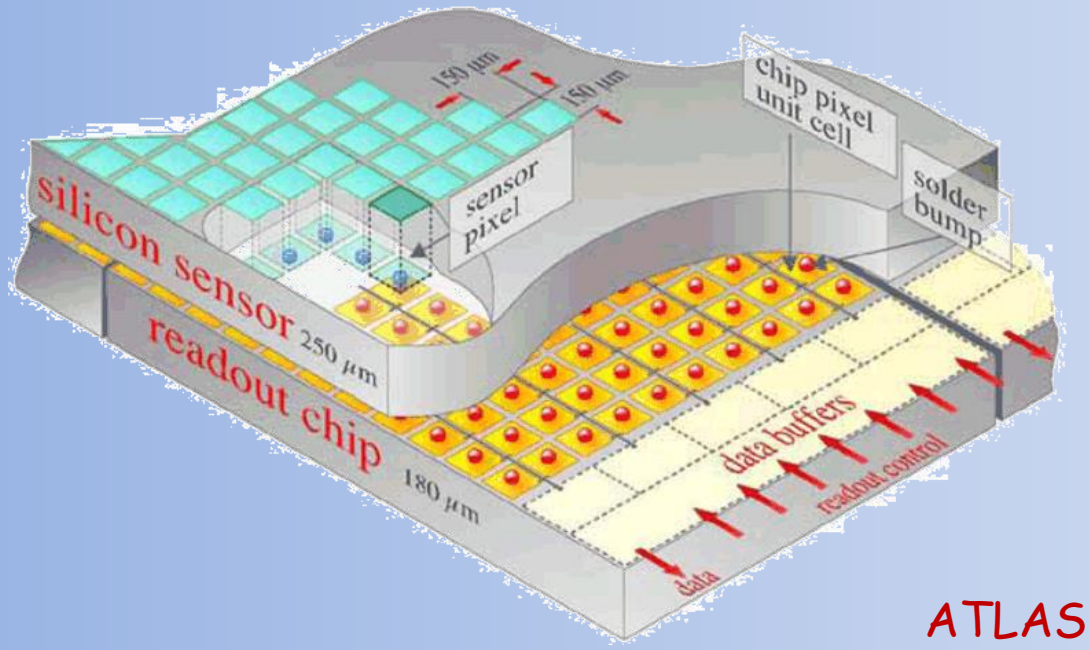
Гибридный пиксельный детектор

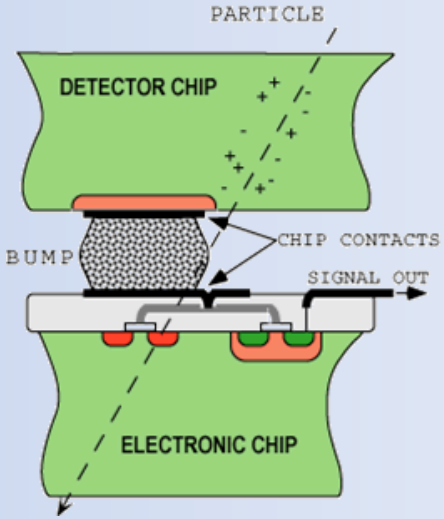
- **HAPS – Гибридный активный пиксельный сенсор**
  - Сегмент Si с высокой гранулярностью
    (⇒ true 2D, нет проблем с x-y неопределенностью)
  - Считывающая электроника с той же геометрией
    (каждая ячейка – к своему каналу)
  - соединение посредством “bump bonding”

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

Solder Bump: Pb-Sn







Flip-chip technique

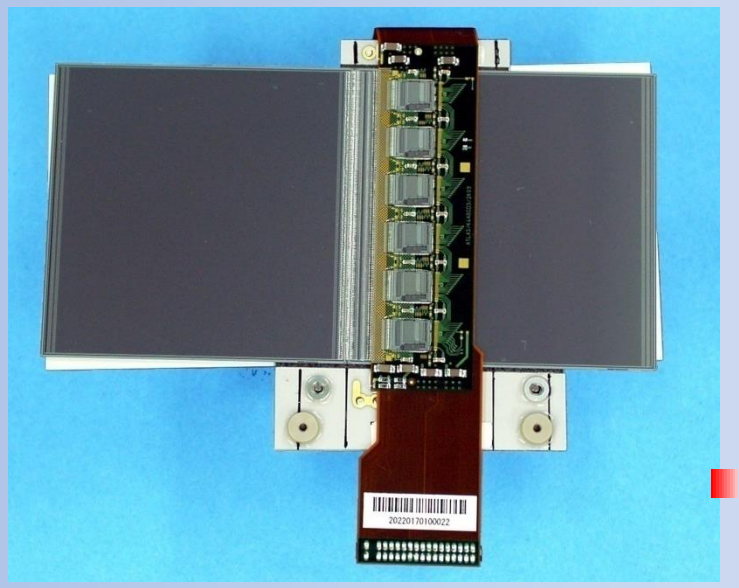
ATLAS <= $80 \cdot 10^6$ **пикселей**

Модуль детектора

- **Детекторные модули** - “Основные элементы трековых детекторв”
  - Si сенсоры
  - Механические держатели (охлаждение)
  - Front-end электроника и передача сигналов

Пример: ATLAS SCT Barrel Module

- **Silicon sensors (x4)**
  - 64 x 64 mm^2
  - p-in-n, single sided
  - AC-coupled
  - 768 strips
  - 80μm pitch/12μm width

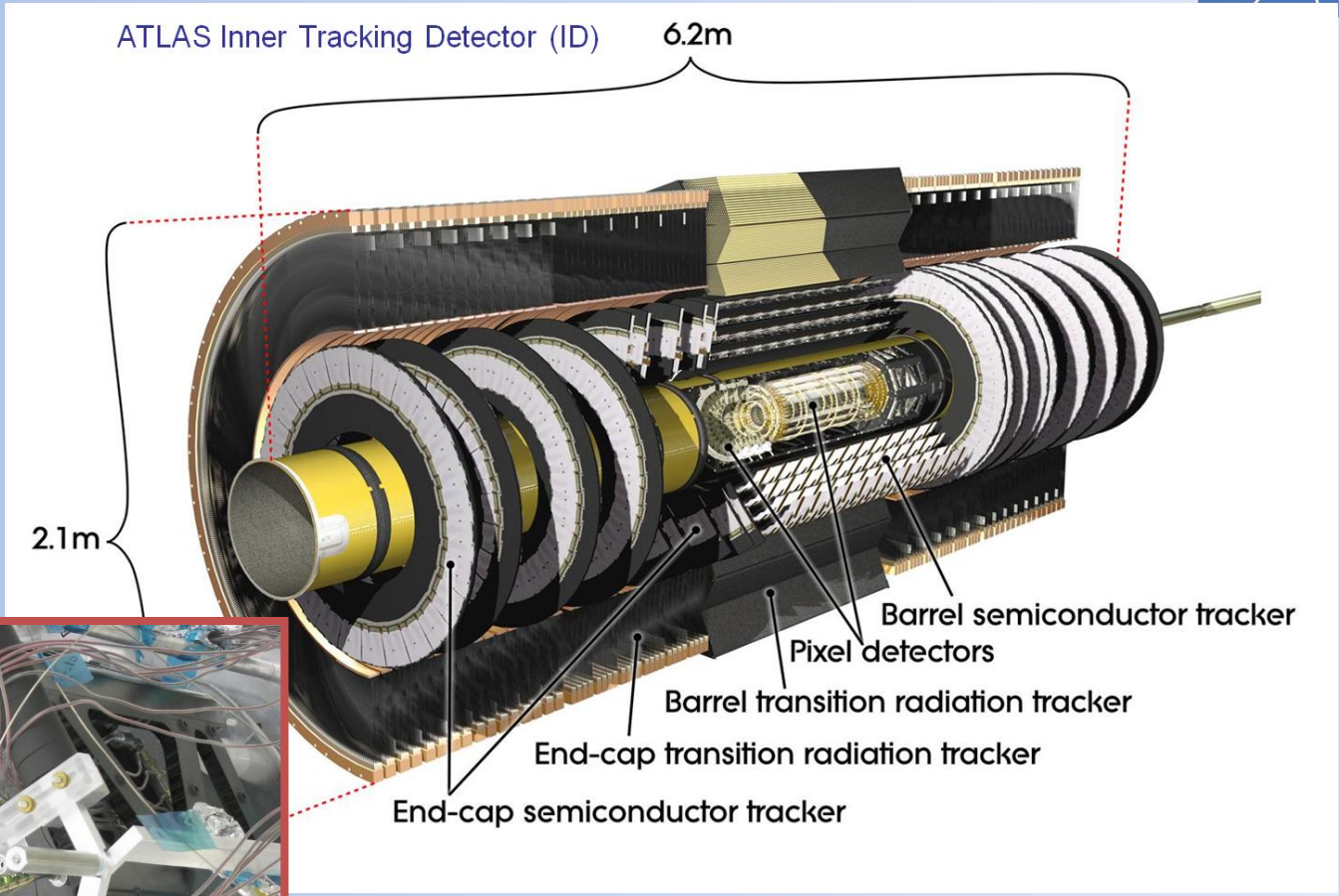


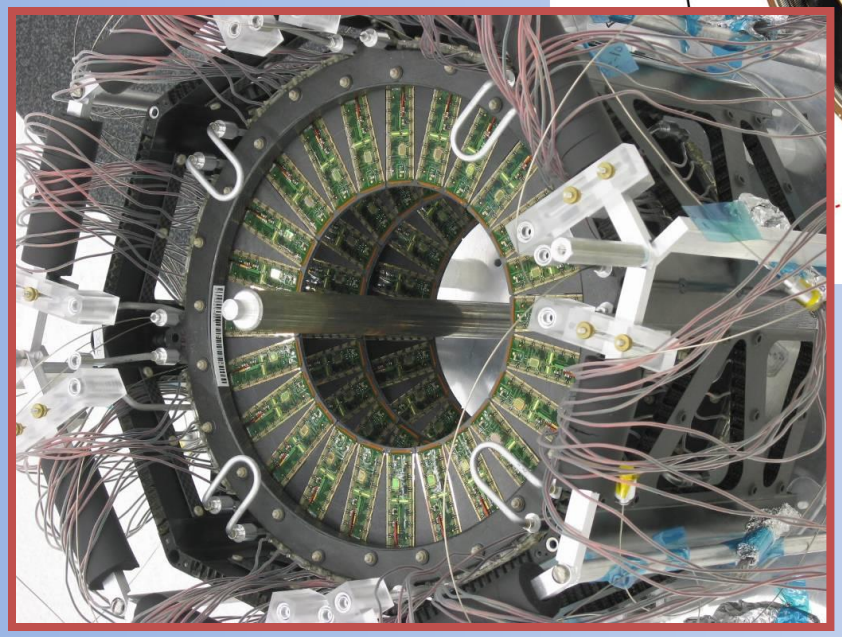
- **ASICS (x12)**
  - ABCD chip (binary readout)
  - DMILL technology
  - 128 channels
- **Wire bonds** (~3500)
  - 25 μm Al wires
- **Mechanical support**
  - TPG baseboard
  - BeO facings
- **Hybrid (x1)**
  - flexible 4 layer copper/kapton hybrid
  - mounted directly over two of the four silicon sensors
  - carrying front end electronics, pitch adapter, signal routing, connector

ATLAS – SCT
- 15.552 microstrip sensors
- 2.112 barrel modules
- 1.976 forward modules
- **61 m^2 silicon**

ATLAS <= 6.3·10^6 strips

Твердотельные детекторы





Реальные детекторные модули

Опоры-поддержки

Кабели считывания и управления

Сложная система охлаждения

Твердотельные детекторы

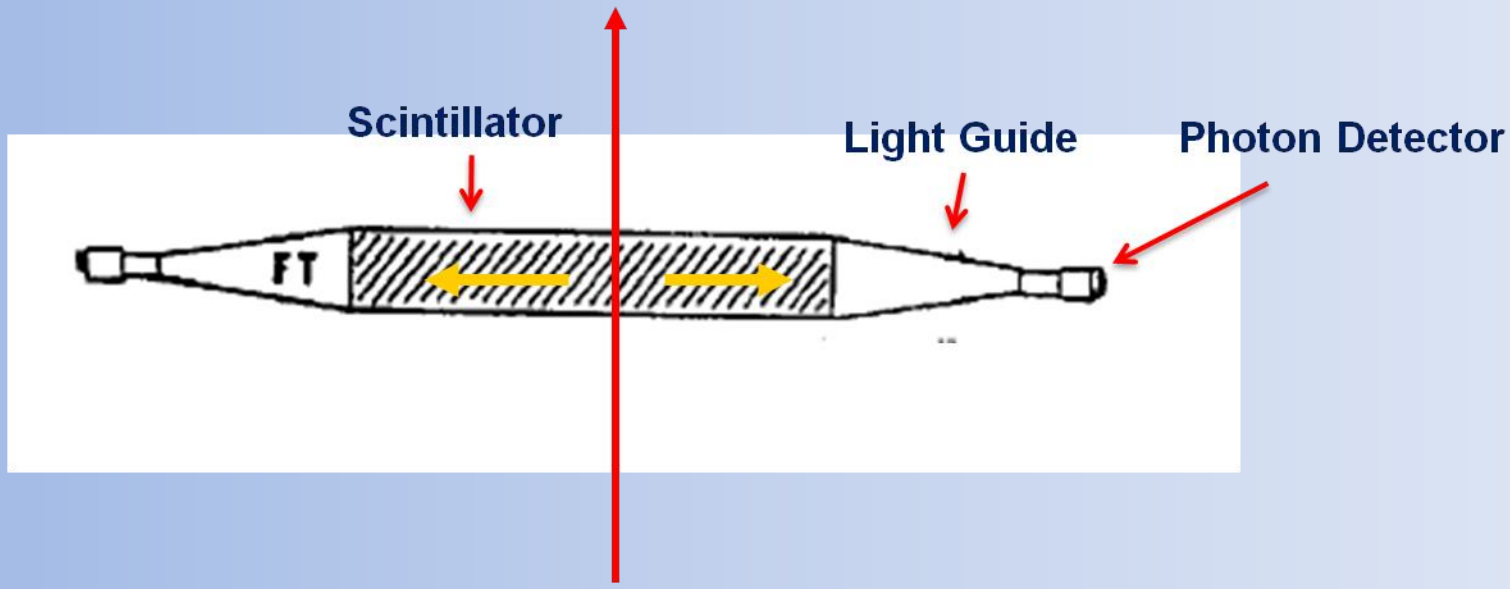
Детекторы, регистрирующие свет от возбужденных атомов
→ Сцинтилляторы

«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 (<1ns) ,

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

Калориметры

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 + детектор

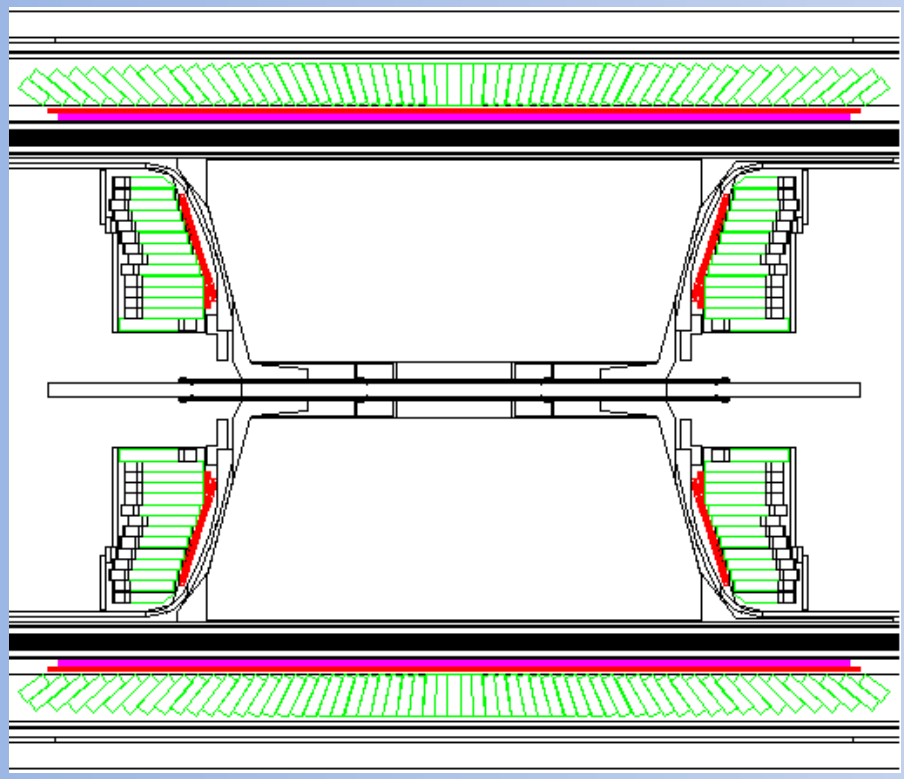
(газовые, жидкостные, твердотельные)

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)

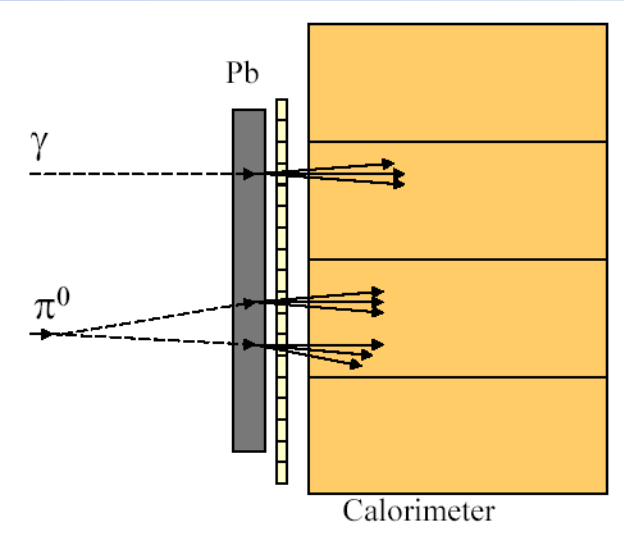


10’500 blocks (10 x 10 x 37 cm^3, 24.6 X_0),
PM (barrel) or PT (end-cap) readout.

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

Пространственное разрешение ~ 11 mm при 6 GeV

Принцип работы
pre-shower детектора



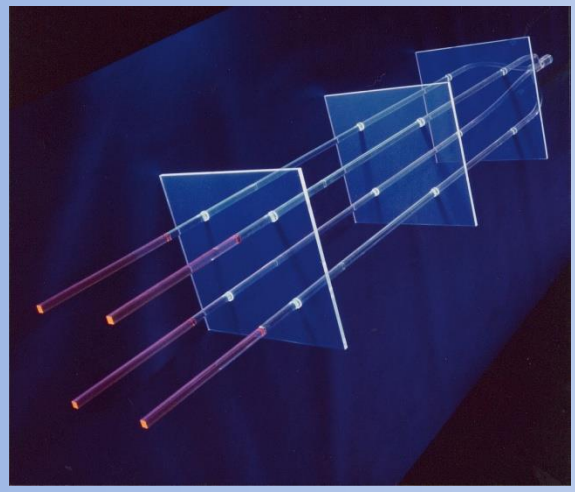
Пример устройства. Высокая гранудярность полезна для γ/π^0, e/γ, $e/\pi^{\pm}$ сепарации.

Обычно газовые,
теперь Si детекторы.

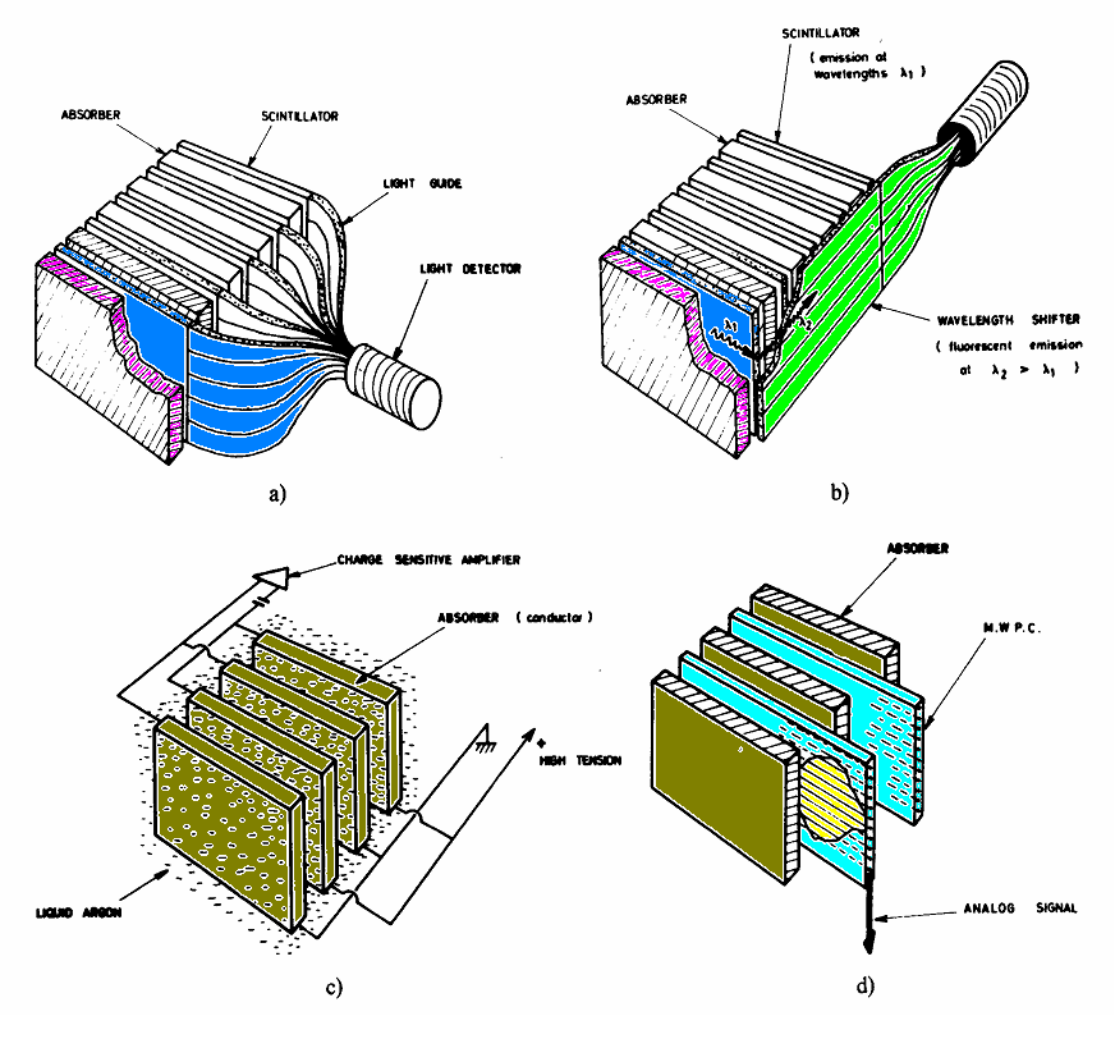
Калориметры

Сэмплинговые – как электромагнитные, так и адронные калориметры

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

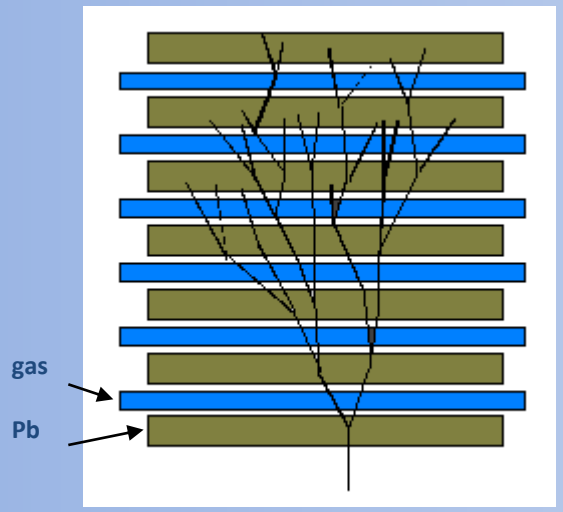


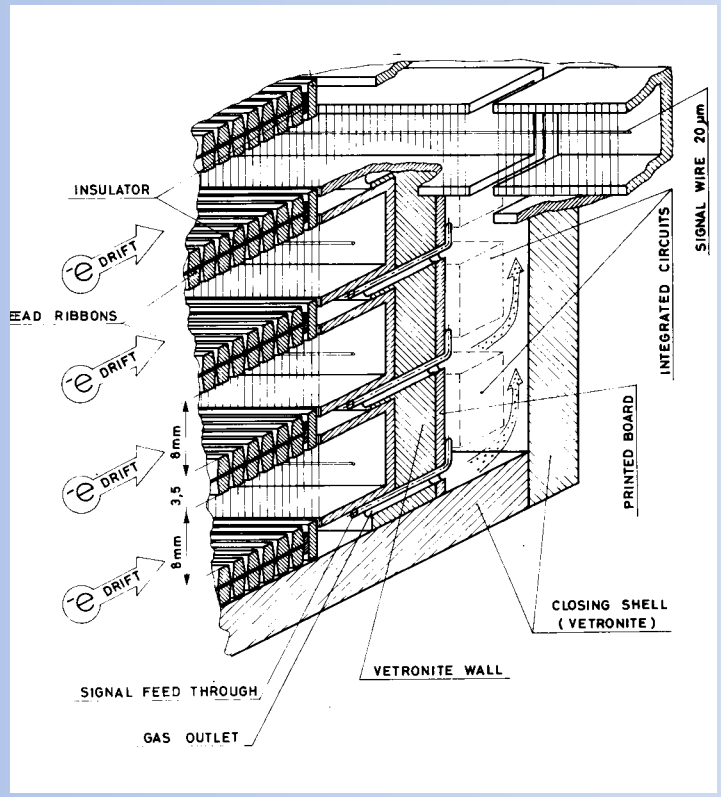
Светосбор типа ‘Шашлык’



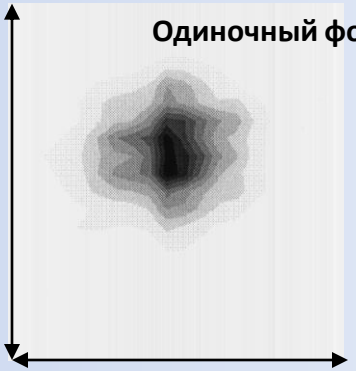
Пример ECAL (сэмплинг)

Пример ECAL: DELPHI High Density Projection Chamber (HPC)

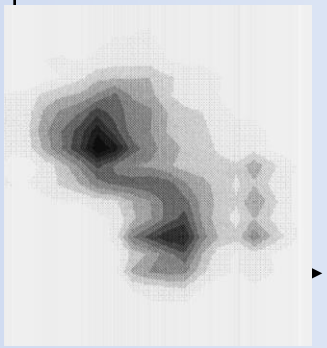




Поперечное распределение заряда в DELPHI HPC



Наложение двух фотонов от распада 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

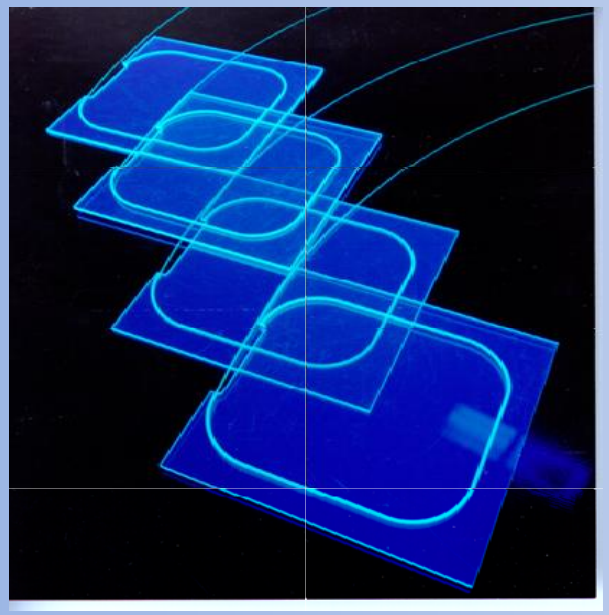
2 x 18 клиньев (barrel)

+ 2 x 18 клиньев (endcap)

~ 15000 T абсорбера

5.8 λ_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**

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

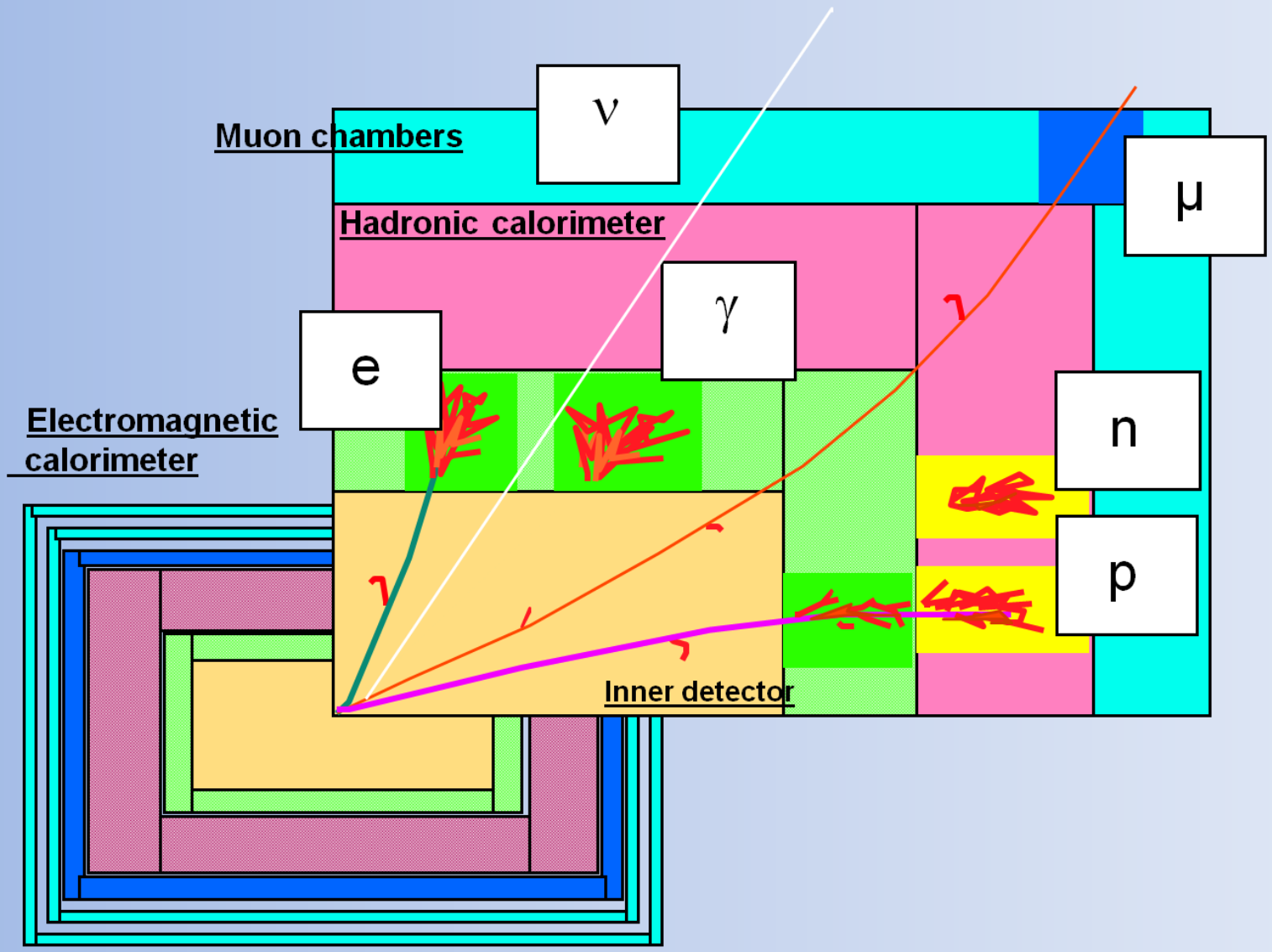
Идентификация лептонов по отношению к огромному КХД фону, так как e/jet отношение на LHC ~ 10^{-5}, т.е. ~ 100 хуже, чем на Tevatron

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



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)

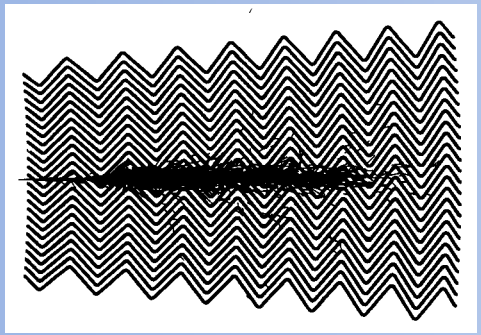
CMS: Muon detector (drift tubes, CSC), RPC (muon trigger)

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

Пример ECAL (сэмплинг)

ATLAS электромагнитный калориметр

Абсорбер с «аккордеонной» геометрией в Liquid Argon



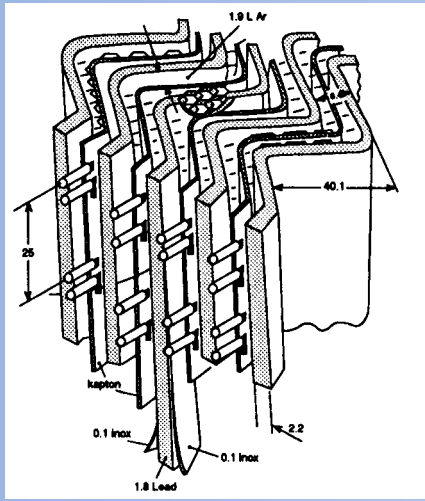
LAr (90K)

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

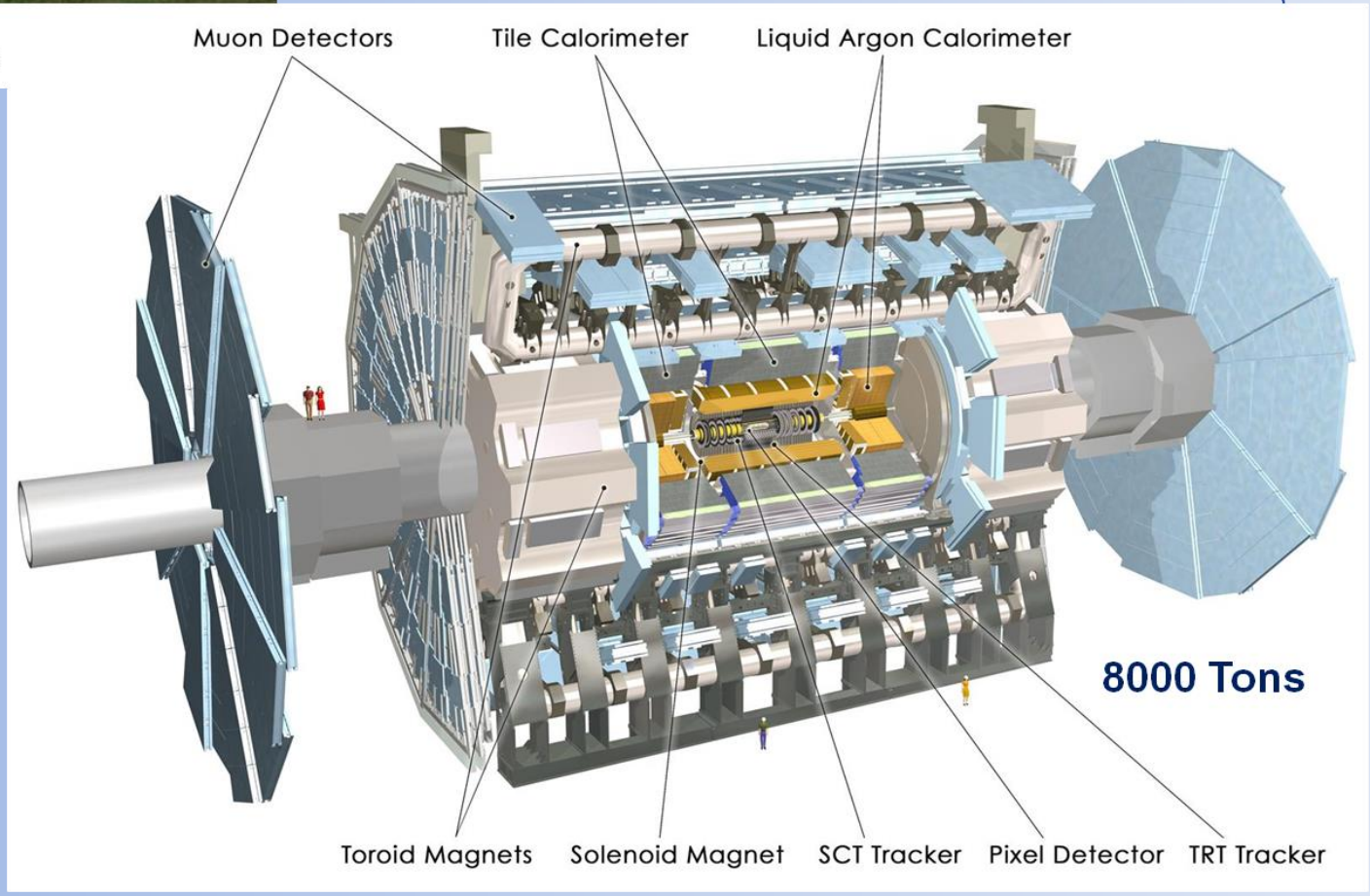
Пространственное разрешение 5 mm /√ E

ATLAS superimposed to
he 5 floors of building 40

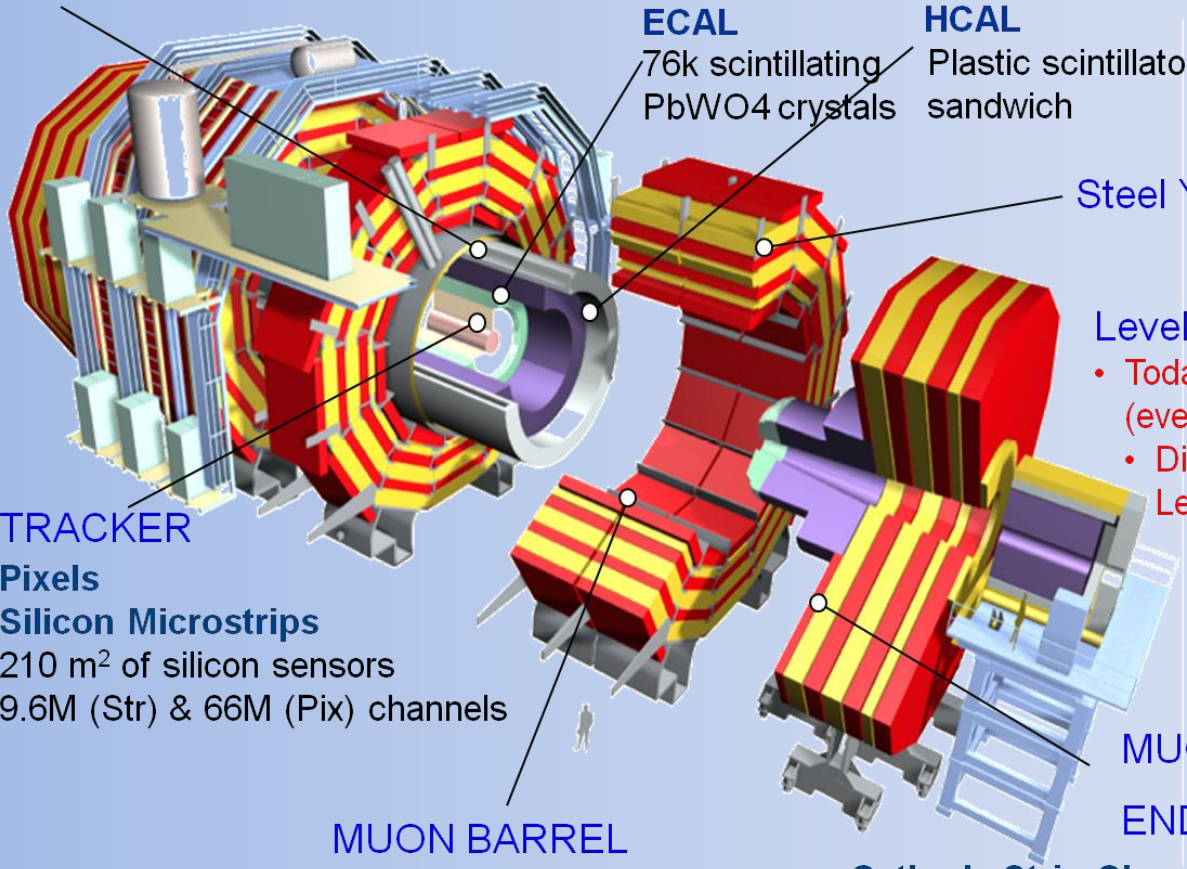
ATLAS Detector

45 m

25 m



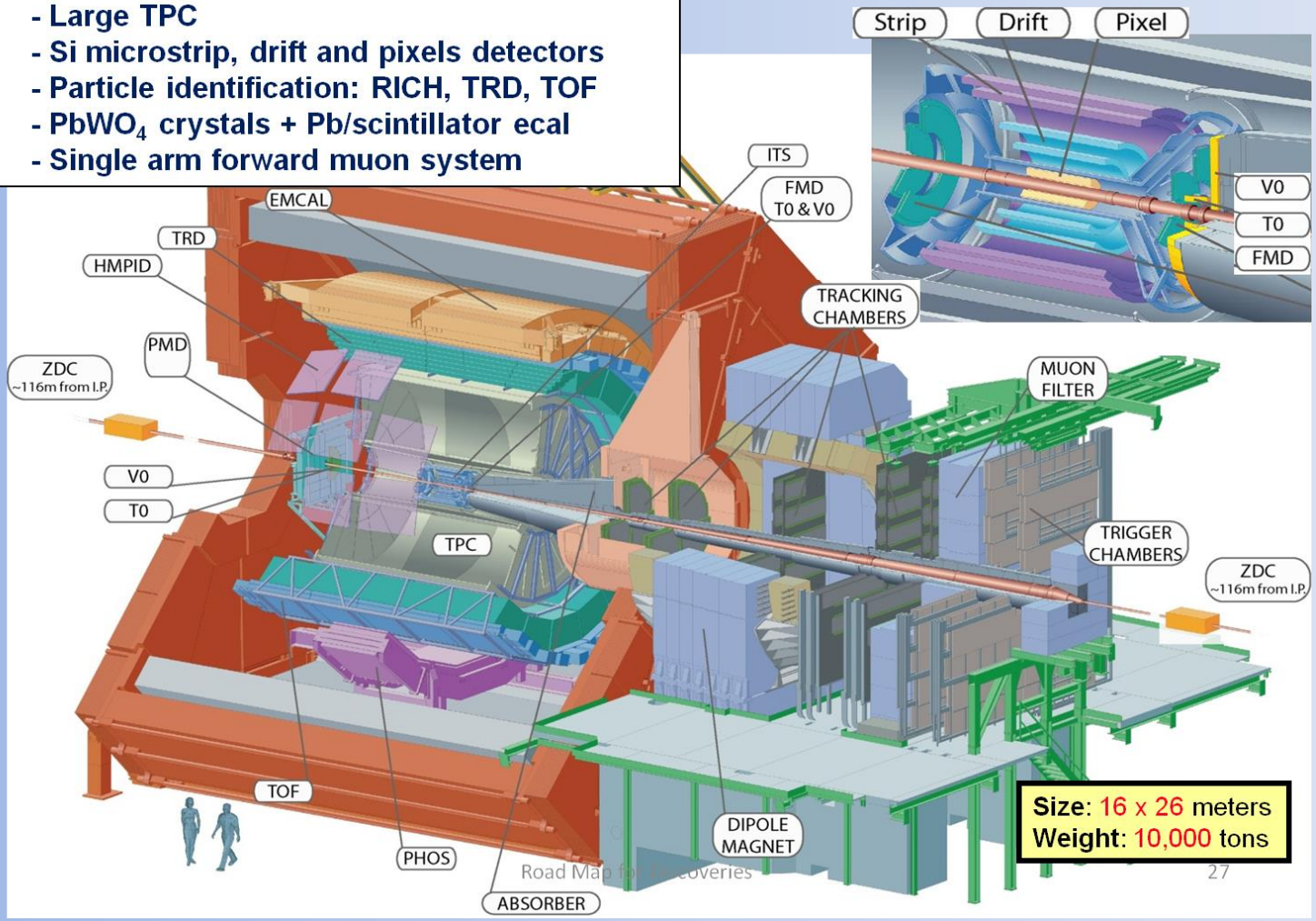
CMS Detector



Детекторы на LHC

ALICE: study of quark-gluon plasma

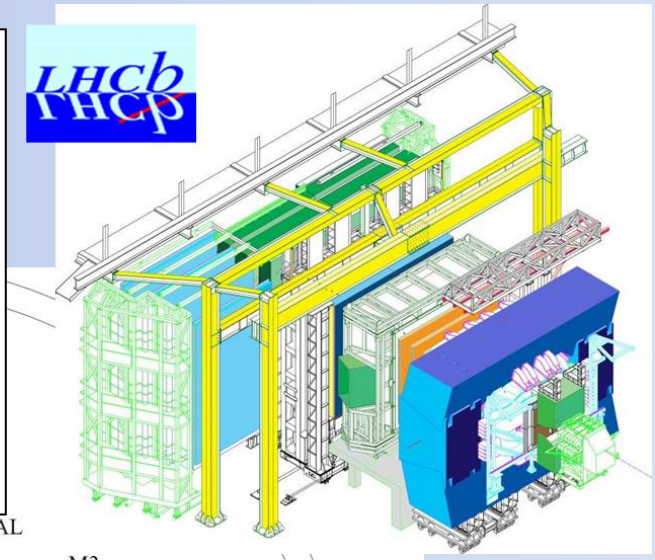
- L3 solenoid
- Large TPC
- Si microstrip, drift and pixels detectors
- Particle identification: RICH, TRD, TOF
- $PbWO_4$ crystals + Pb/scintillator ecal
- Single arm forward muon system

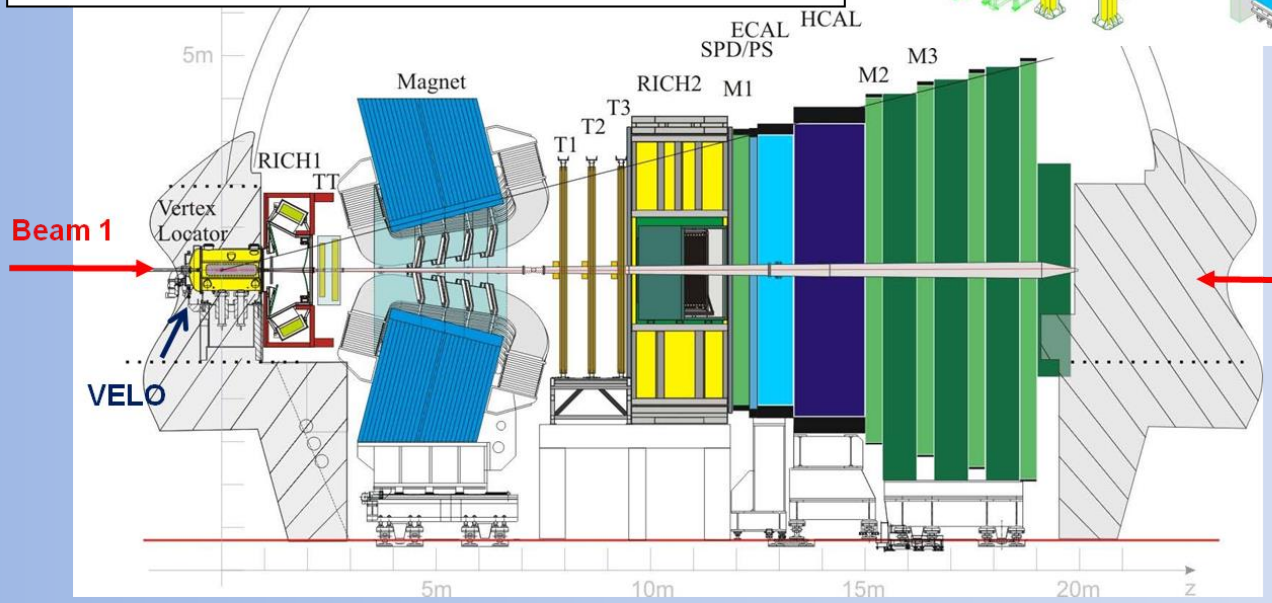


Детекторы на LHC

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





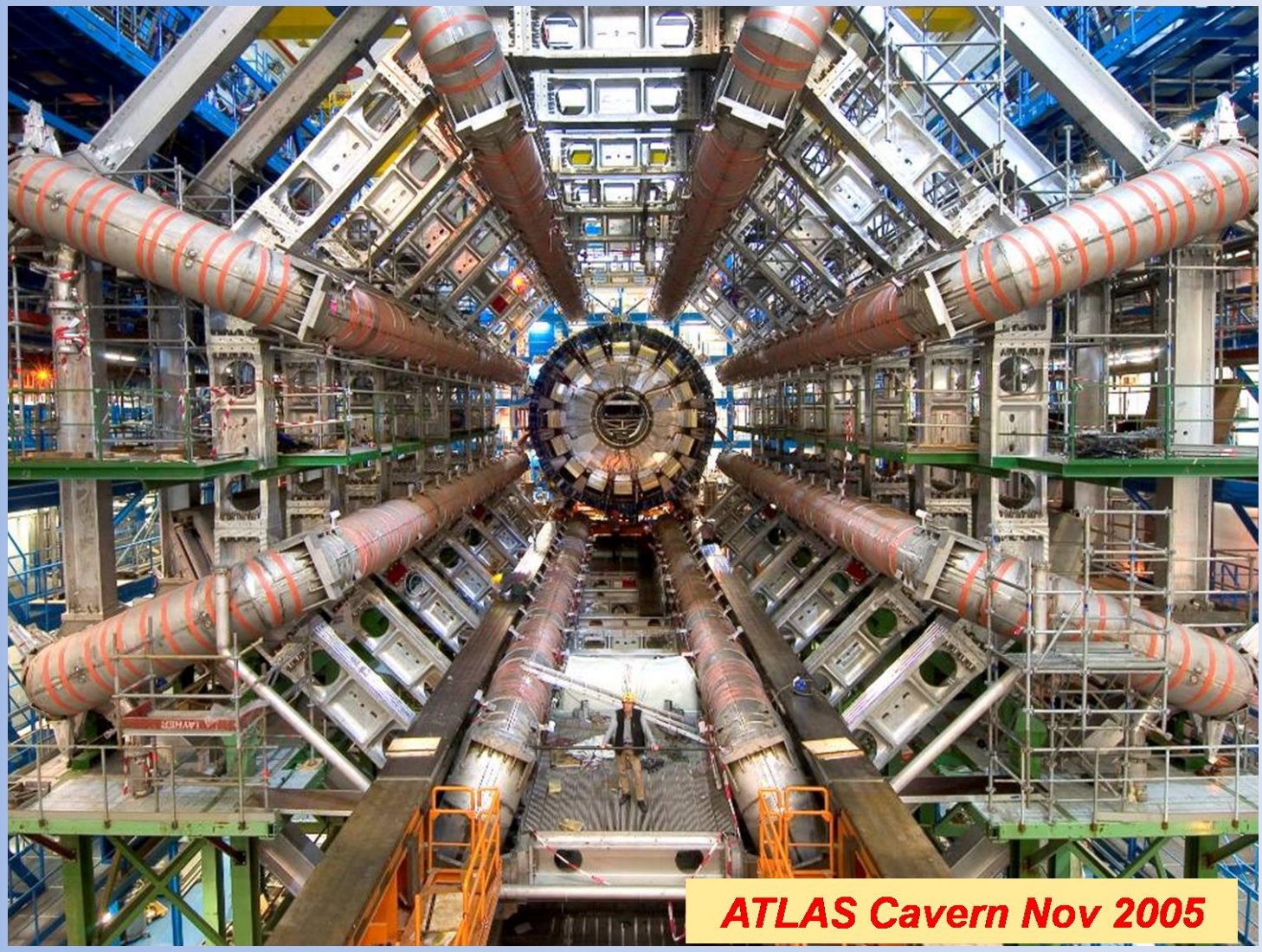
ATLAS Collaboration

(Status August 2010)

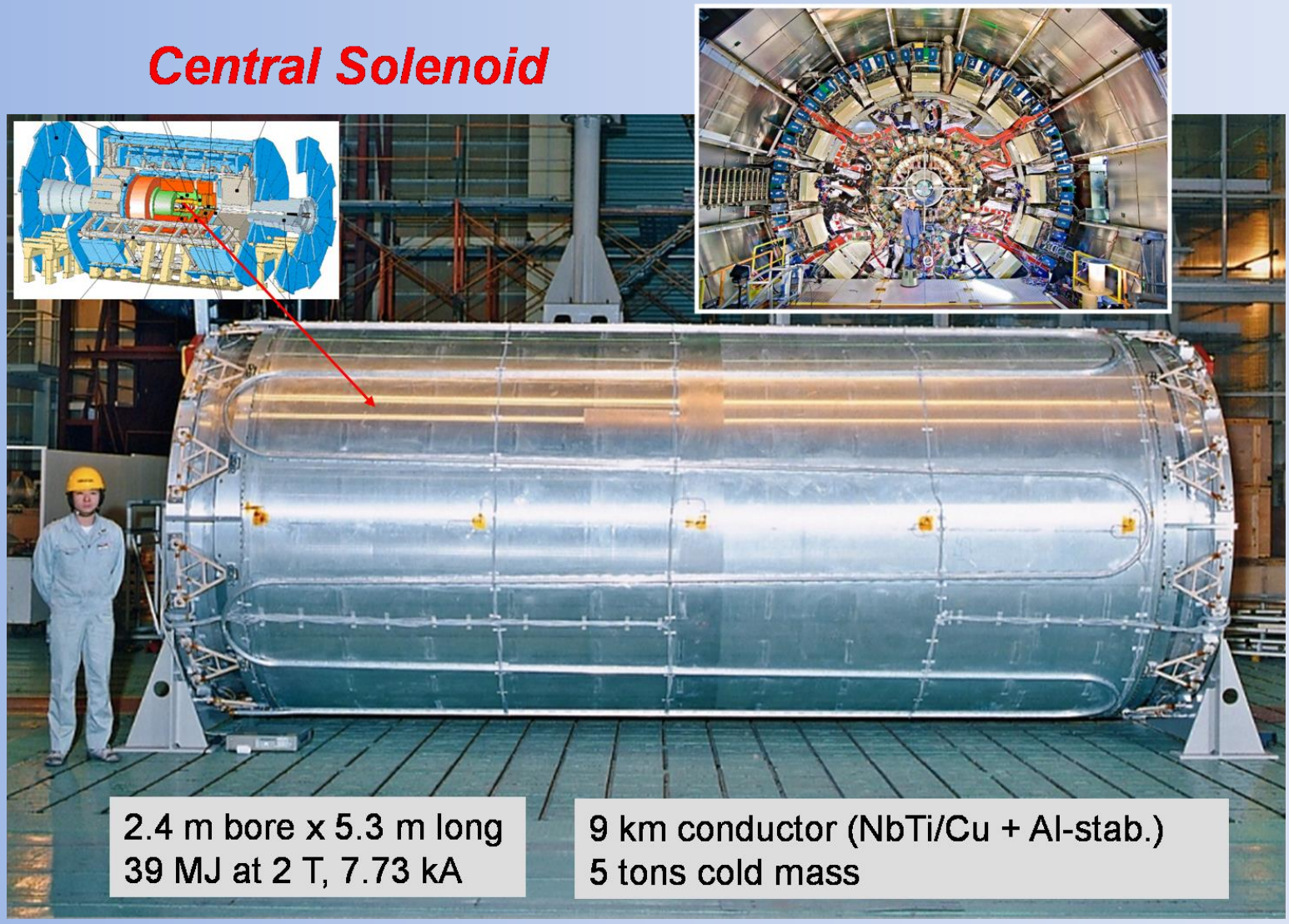
38 Countries
174 Institutions
3000 Scientific participants total
(1000 Students)

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

Детекторы на LHC

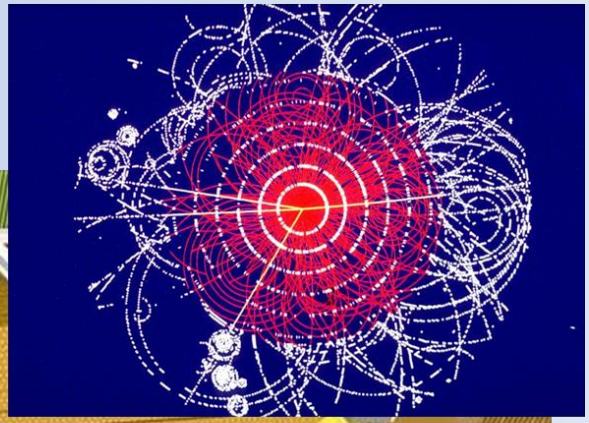


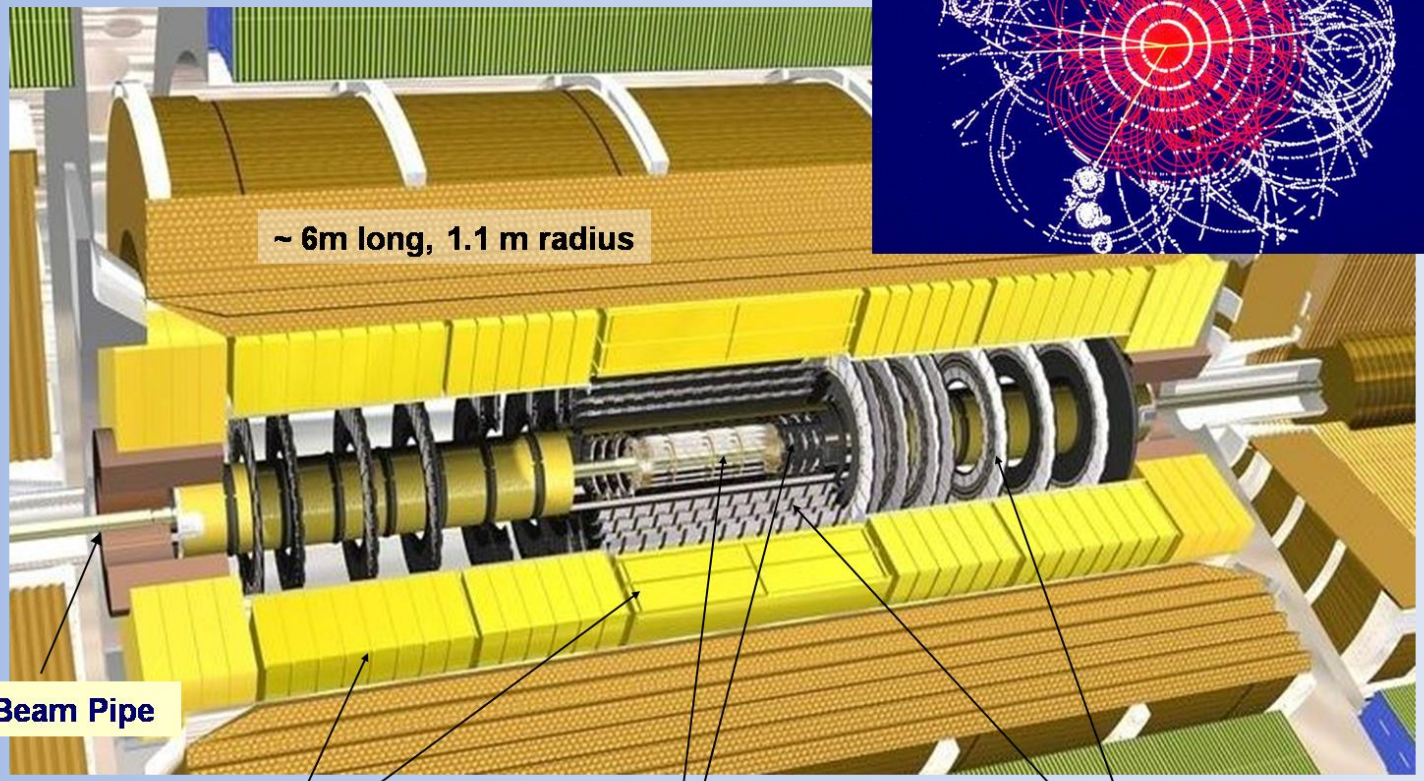
Central Solenoid



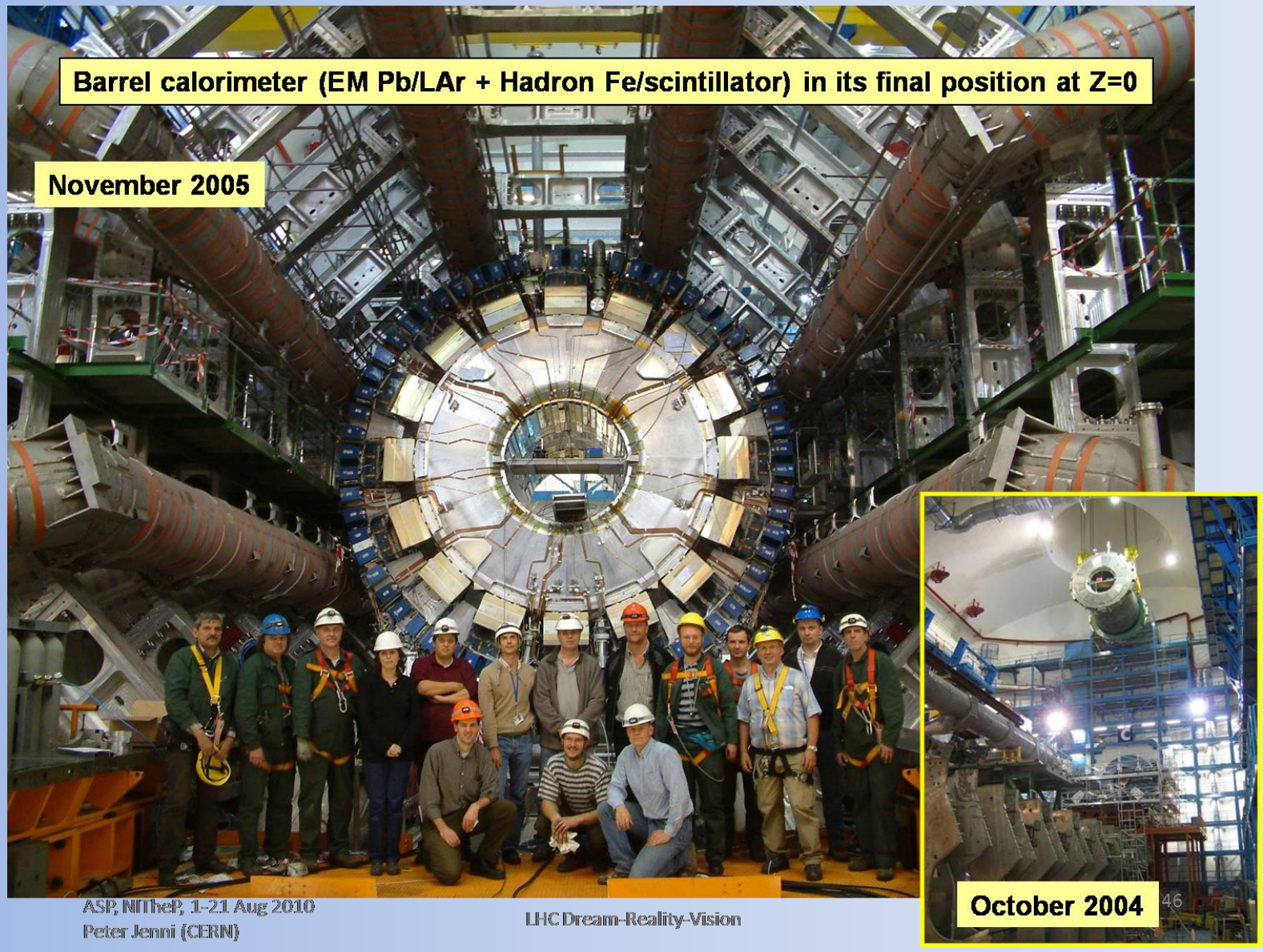
ATLAS Tracking Detectors

2 Tesla solenoid $\sigma/p_T \sim 5\times10^{-4}\, p_T \oplus 0.01$

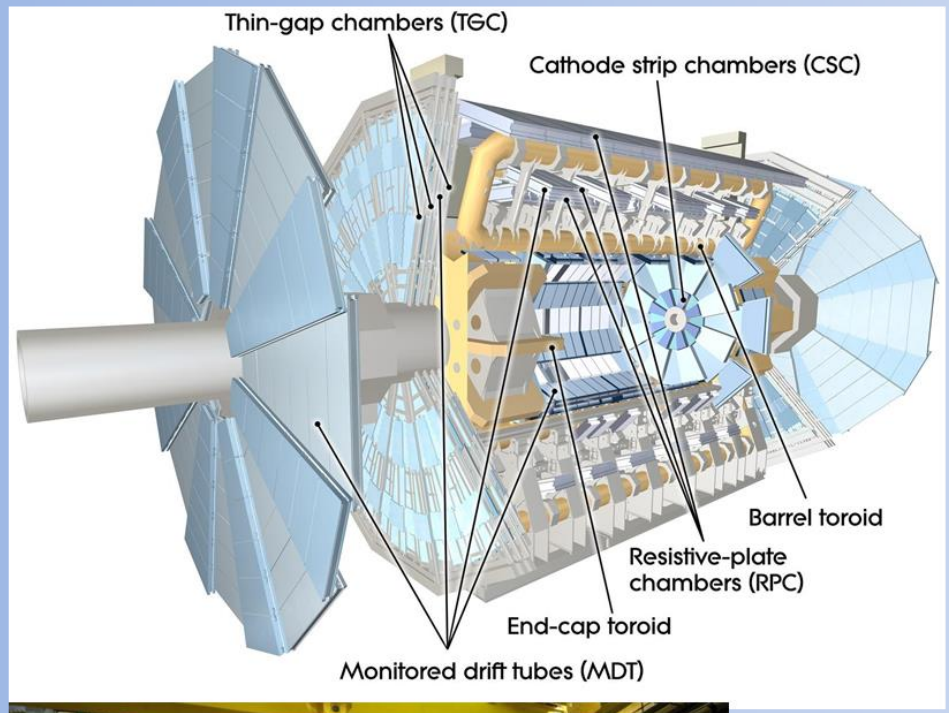




Детекторы на LHC



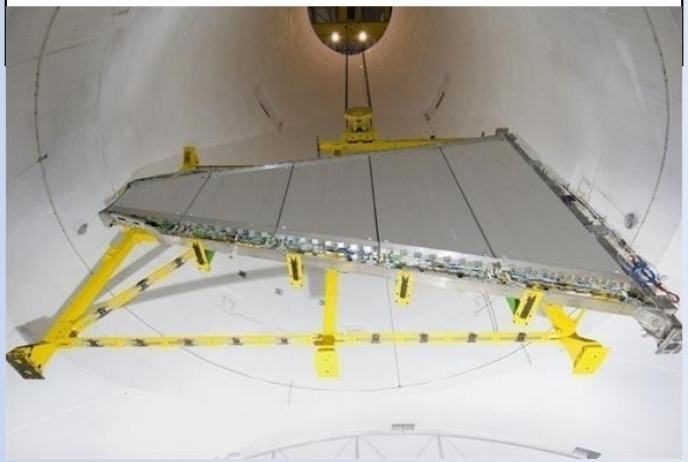
Muon System

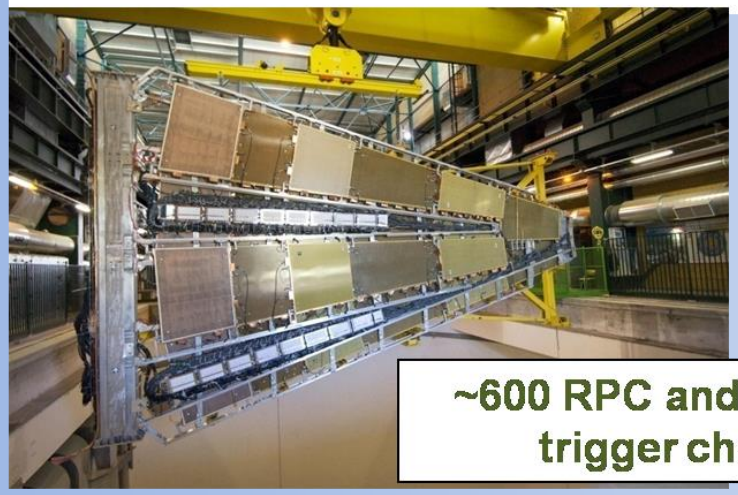


Stand-alone momentum resolution
$\Delta pT/pT < 10\%$ up to 1 TeV

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

~1200 MDT precision chambers for track





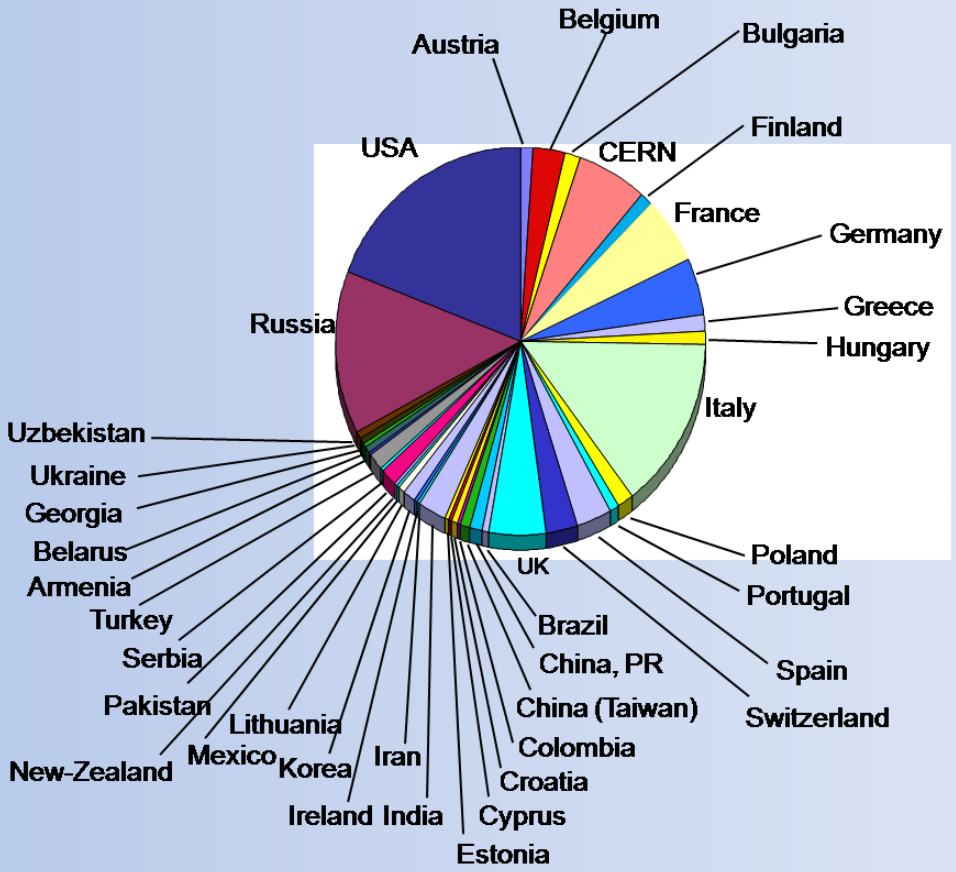
~600 RPC and ~3600 TGC trigger chambers

The CMS Collaboration

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

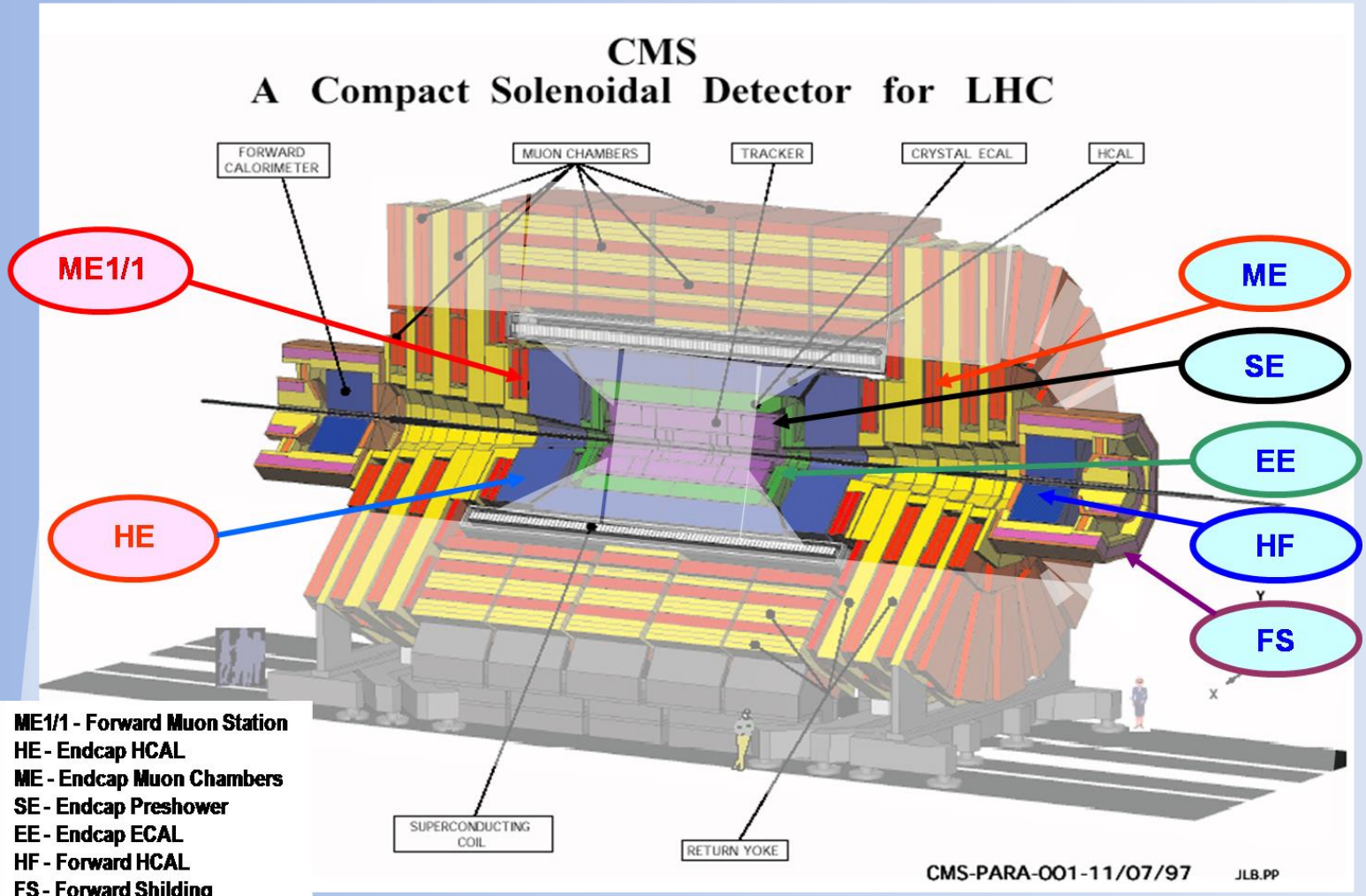
	# Scientific Authors
Member States	1084
Non-Member States	503
USA	723
Total	2310

Associated Institutes	
Number of Scientists	62
Number of Laboratories	9



2310 Scientific Authors
38 Countries
175 Institutions

RDMS Participation in CMS



ALICE Collaboration

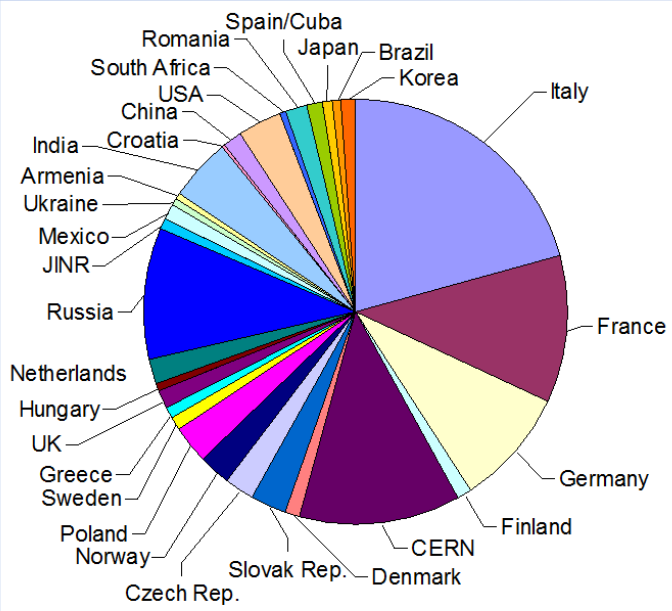
~ 1000 **Members**

(63% from CERN MS)

~30 **Countries**

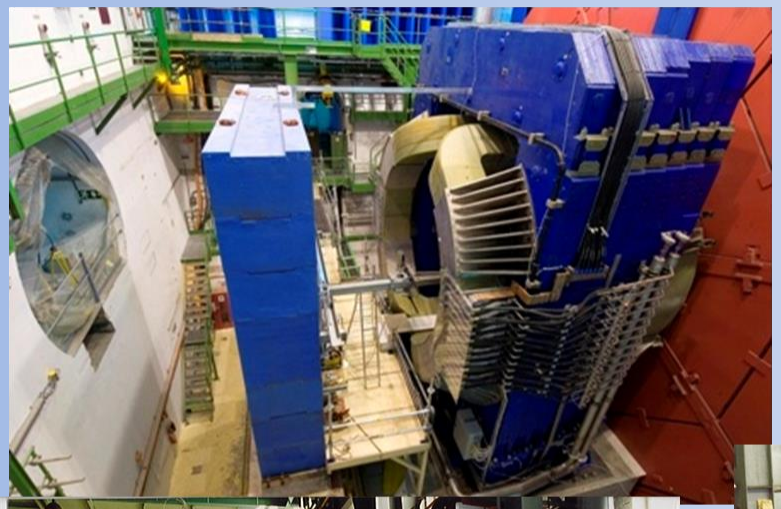
~100 **Institutes**

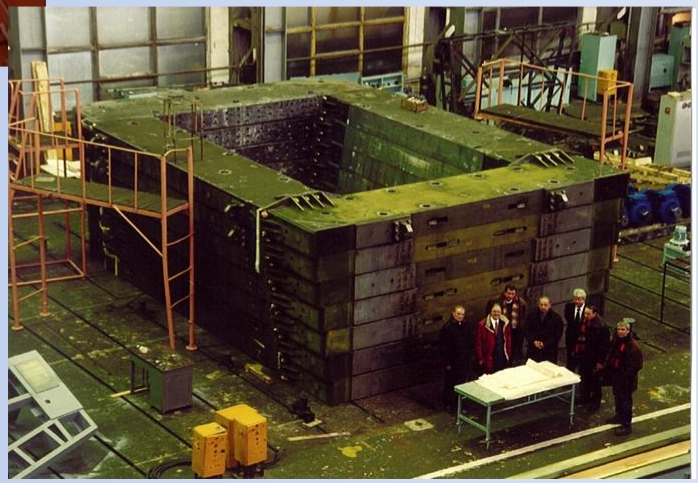
~ 150 **MCHF capital cost (+ 'free' magnet)**



Large Dipole Magnet for Dimuon Spectrometer

(850 ton, 9 x 7 x 4.5 m)





Благодарности…

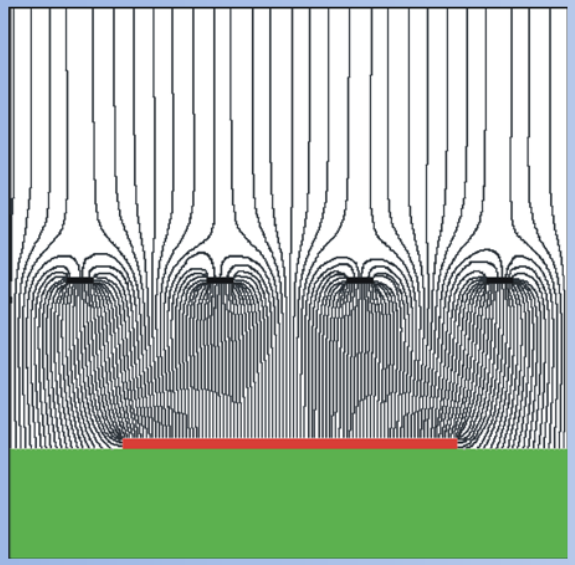
Werner Riegler (CERN, ALICE)
Olav Ullaland (CERN, LHCb)
Peter Jenni (CERN, ATLAS)
Christian Goram (CERN, PH)
Herman ten Kate (CERN, ATLAS)
Daniel Froidevaux (CERN, ATLAS)
Александр Чеплаков (ОИЯИ, ATLAS)
Андрей Голутвин (Imperial College, ITEPh, CERN, LHCb)
Владимир Каржавин (ОИЯИ, CMS)
Александр Водопьянов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

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

Огромное спасибо за неослабевающее внимание !

Detector Simulation

Electric Fields in a Micromega Detector

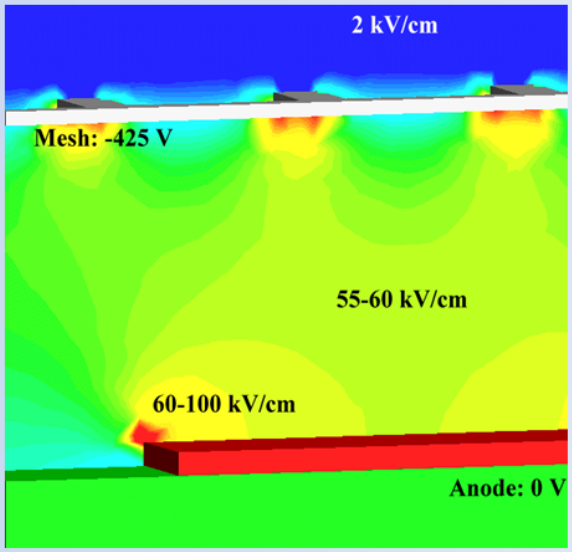
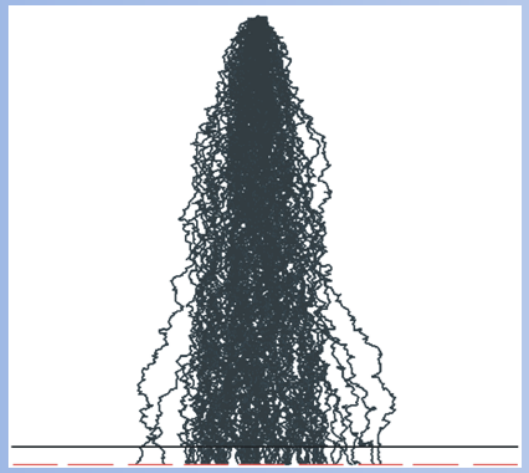
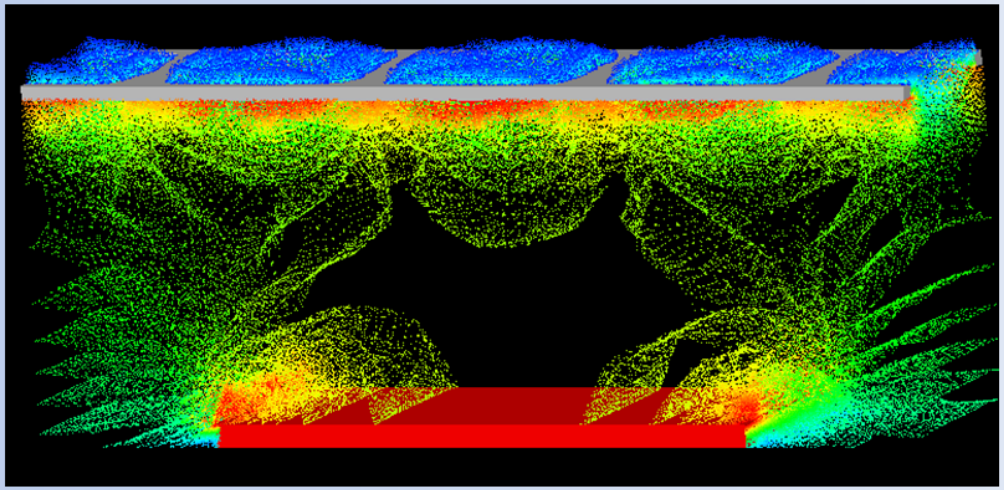


Very accurate simulations of particle detectors are possible due to availability of Finite Element simulation programs and computing power.

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