


Введение в детектирование частиц



Татьяна Берже-Гринева
(LAPP Аннесу, Франция)

Программа для украинских
учителей в ЦЕРНе

24/04/2018

Единицы измерения

Quantity	HEP units	SI Units
length	1 fm	10^{-15} m
energy	1 GeV	$1.602 \cdot 10^{-10}$ J
mass	1 GeV/c ²	$1.78 \cdot 10^{-27}$ kg
$\hbar = h/2$	$6.588 \cdot 10^{-25}$ GeV s	$1.055 \cdot 10^{-34}$ Js
c	$2.988 \cdot 10^{23}$ fm/s	$2.988 \cdot 10^8$ m/s
$\hbar c$	0.1973 GeV fm	$3.162 \cdot 10^{-26}$ Jm

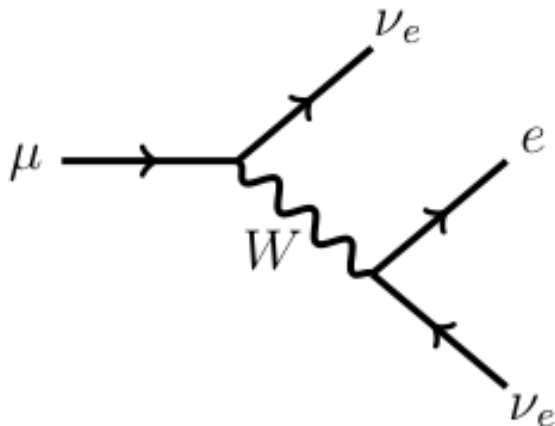
Natural units ($\hbar = c = 1$)

mass	1 GeV
length	$1 \text{ GeV}^{-1} = 0.1973 \text{ fm}$
time	$1 \text{ GeV}^{-1} = 6.59 \cdot 10^{-25} \text{ s}$

Частицы

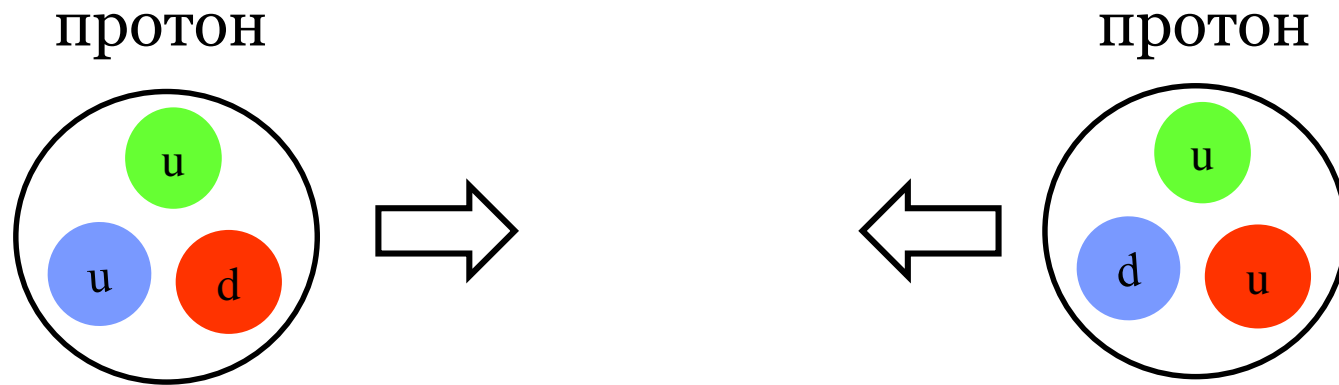
Стабильные частицы: **e** (электрон), γ (фотон), нейтрино, p(uud) протон

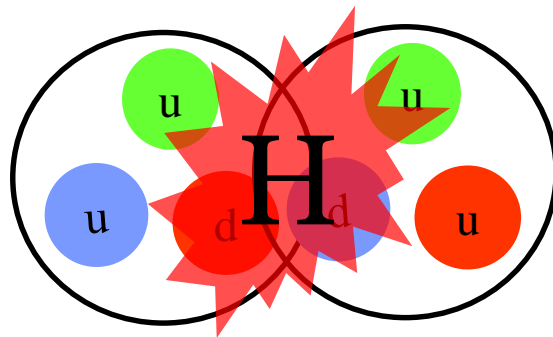
Долгоживущие частицы: μ (мюон), π^+ (u \bar{d}) пион, K^+ (u \bar{s}) каон, n(udd) нейтрон...



1968: SLAC u up quark	1974: Brookhaven & SLAC c charm quark	1995: Fermilab t top quark	1979: DESY g gluon
1968: SLAC d down quark	1947: Manchester Univ.. s strange quark	1977: Fermilab b bottom quark	1923: Washington Univ. γ photon
1956: Savannah River Plant ν_e electron neutrino	1982: Brookhaven ν_μ muon neutrino	2000: Fermilab ν_τ tau neutrino	1983: CERN W W boson
1897: Cavendish Laboratory e electron	1937: Caltech & Harvard μ muon	1976: SLAC τ tau	1983: CERN Z Z boson
			2012: CERN H Higgs boson

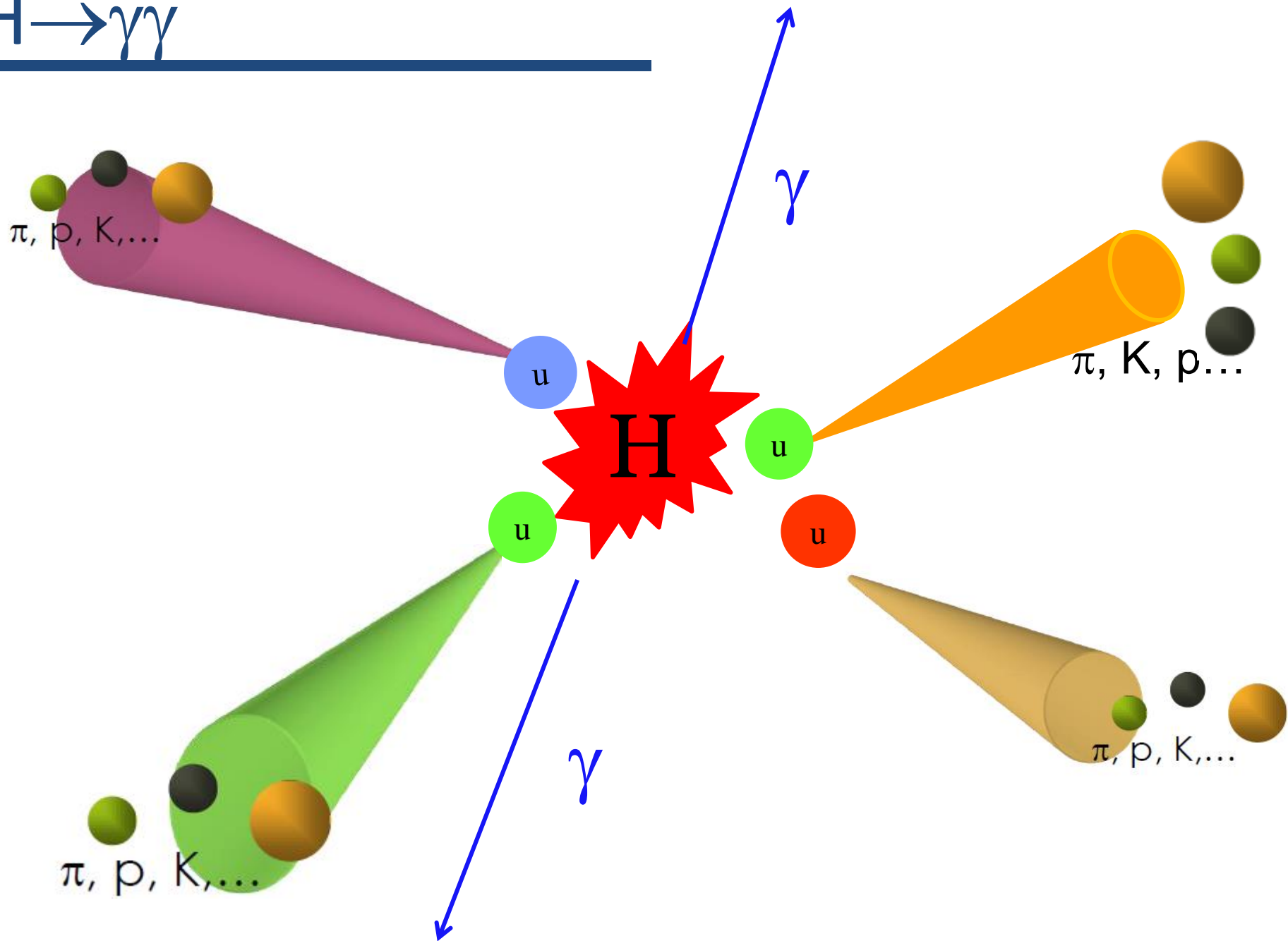
А другие частицы? Пример события



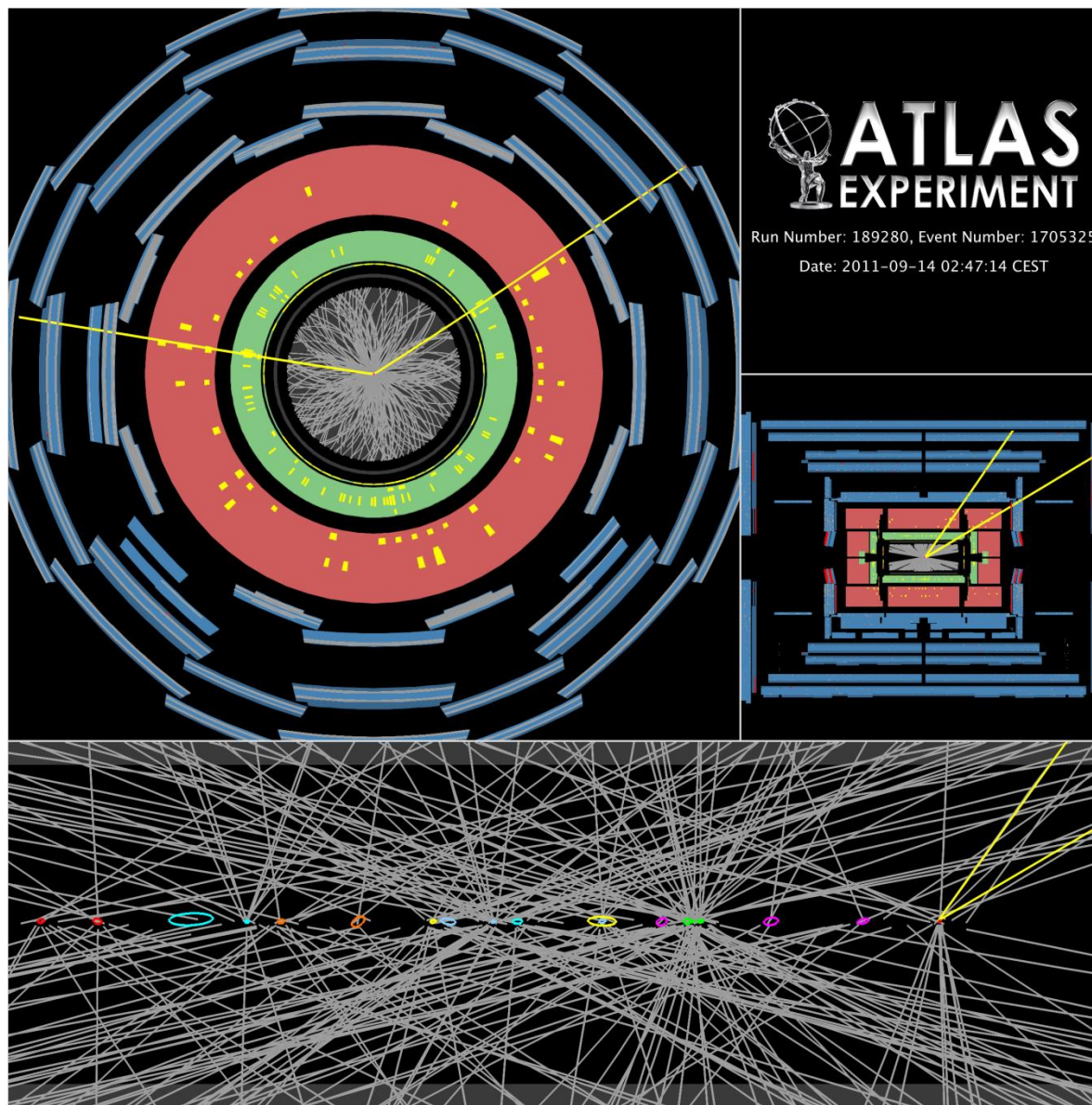


Бозон Хигса

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



Много столкновений одновременно!



Задача детектора

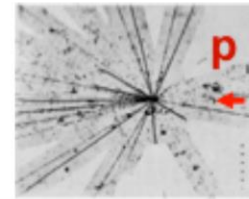
Для того чтобы понять, что произошло при столкновении надо

- Зарегистрировать все возможные частицы
- Измерить их импульс или энергию, заряд
- Их идентифицировать

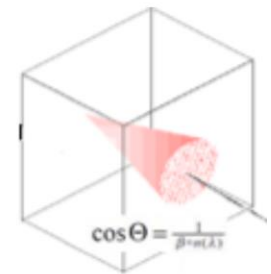
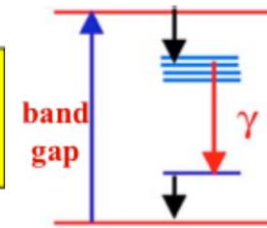
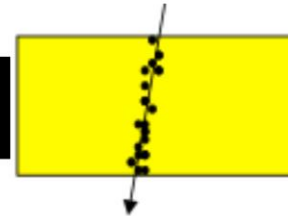
Разные частицы взаимодействуют с веществом по разному

Этапы детектирования

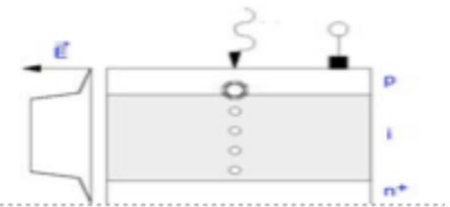
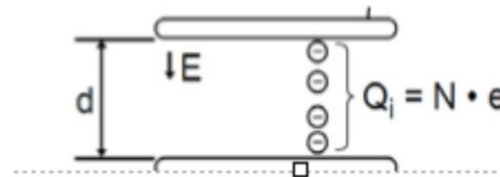
1. Les particules interagissent avec la matière
dépend de la nature de la particule et de la matière



2. Energie déposée est convertie en signal détectable
dépend du matériau



3. Collection du signal
dépend du signal et du type de détection

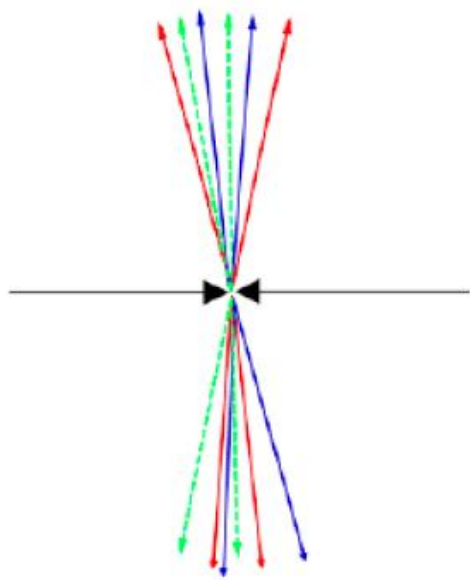


4. CONSTRUCTION d'un SYTEME (détecteur)
dépend de la physique et des conditions expérimentales

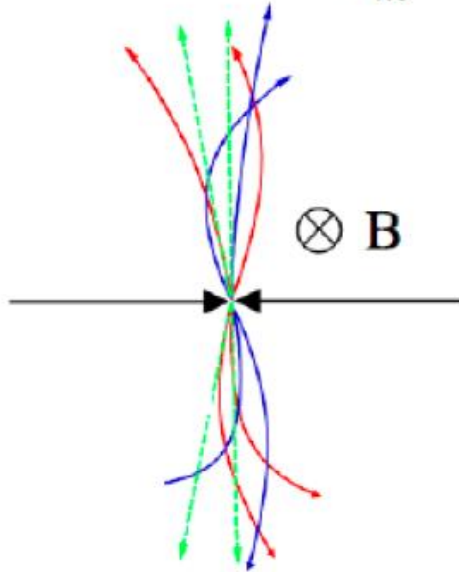


Измерение заряда и импульса частиц

— $q > 0$ — $q = 0$ — $q < 0$ $\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$



без поля



с магнитным полем

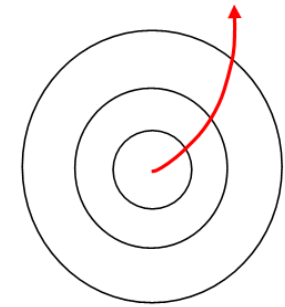
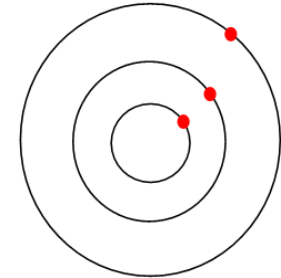


Fig. 2



детектор с

магнитным полем

Заряд частицы определяется по направлению отклонения в магнитном поле (B), а **импульс** по радиусу кривизны.

Чем сильнее магнитное поле B и больше размеры детектора, тем надежнее можно измерить ее импульс частицы.

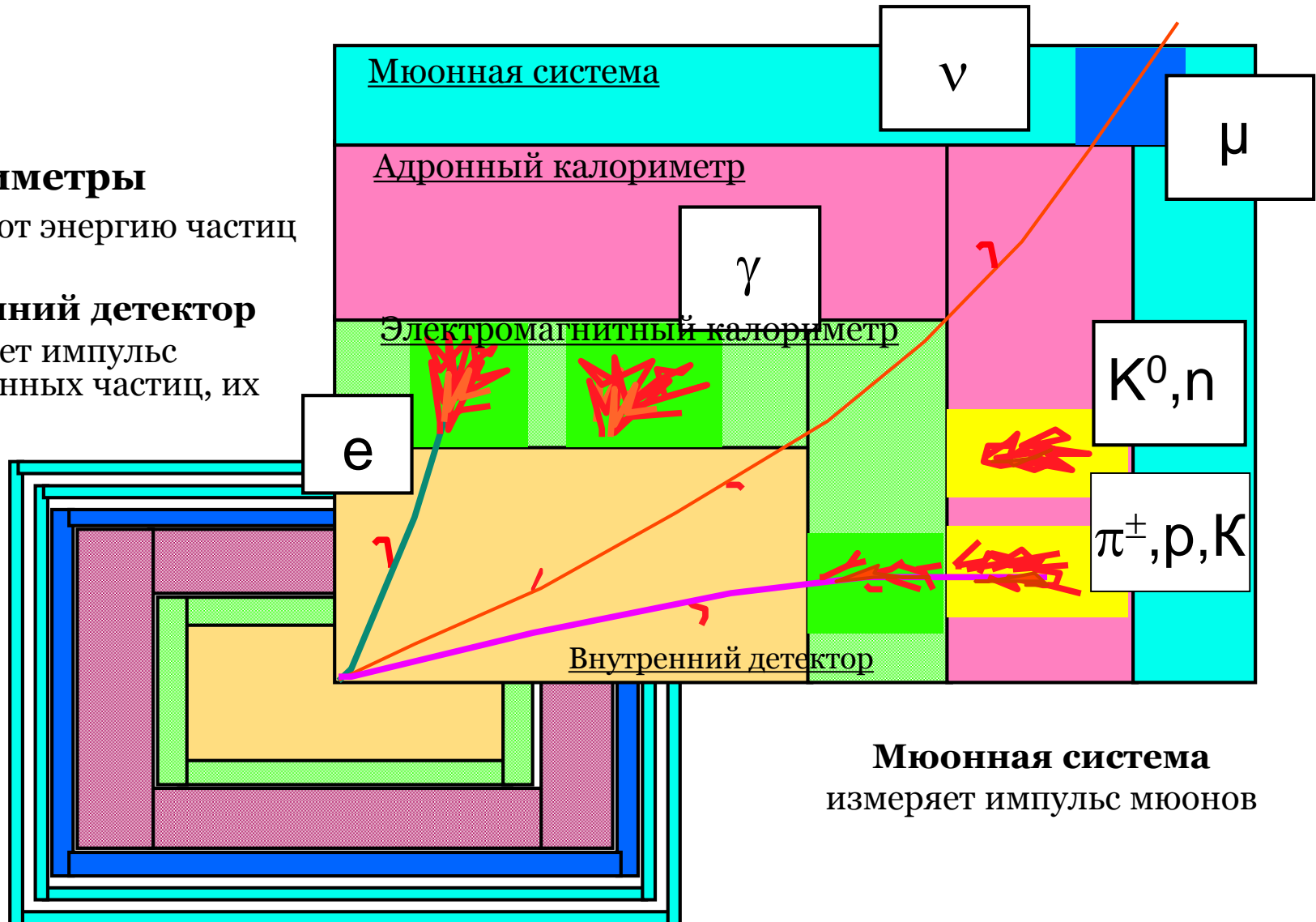
Современные детекторы

Калориметры

- измеряют энергию частиц

Внутренний детектор

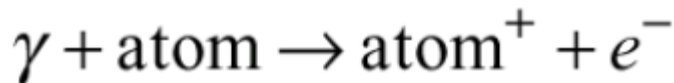
- измеряет импульс заряженных частиц, их заряд



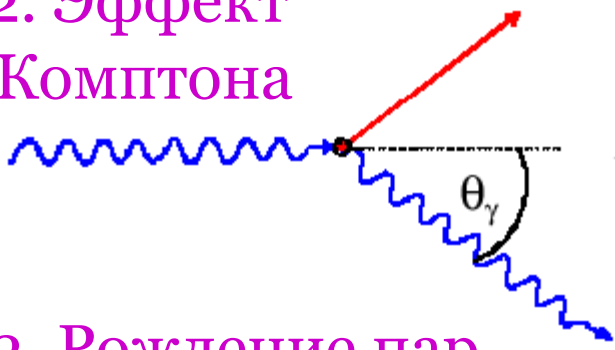
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ С ВЕЩЕСТВОМ

ФОТОНЫ (γ)

1. Фотоэффект



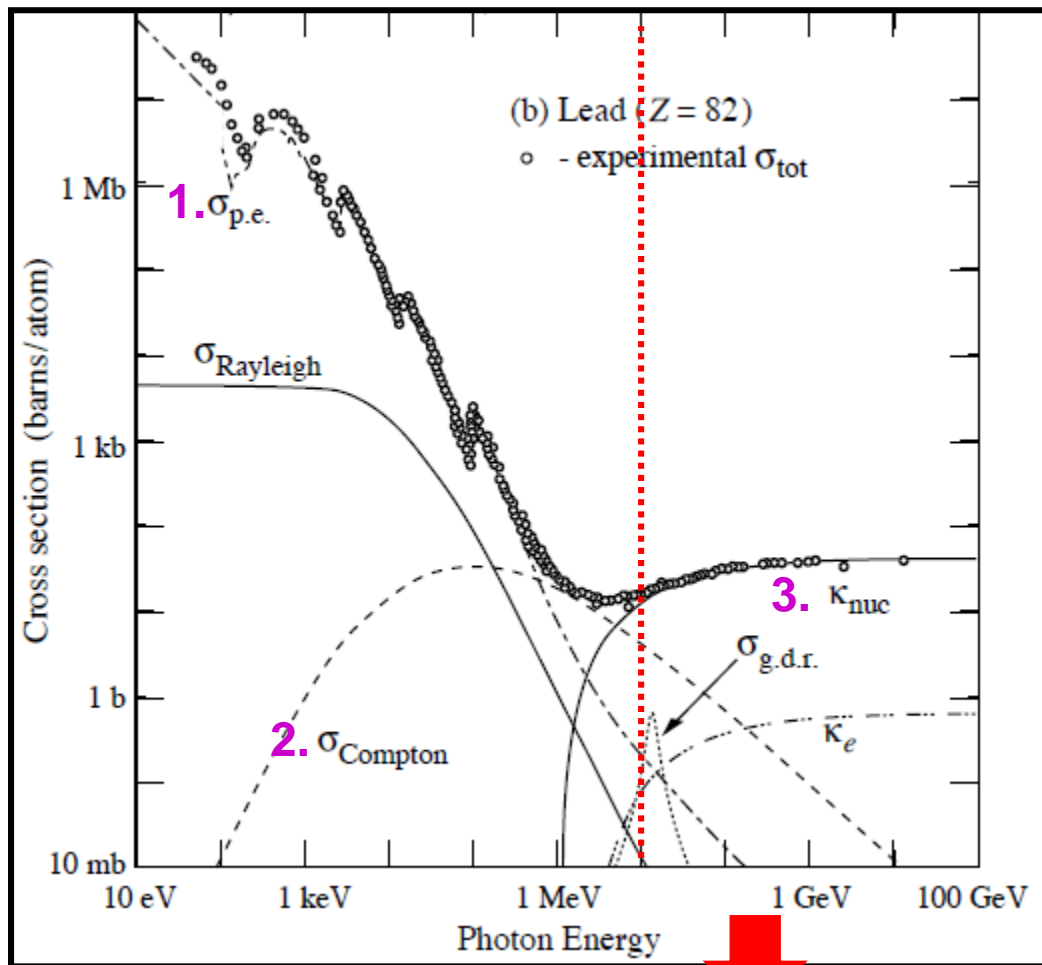
2. Эффект Комптона



3. Рождение пар e^+e^- в поле ядра

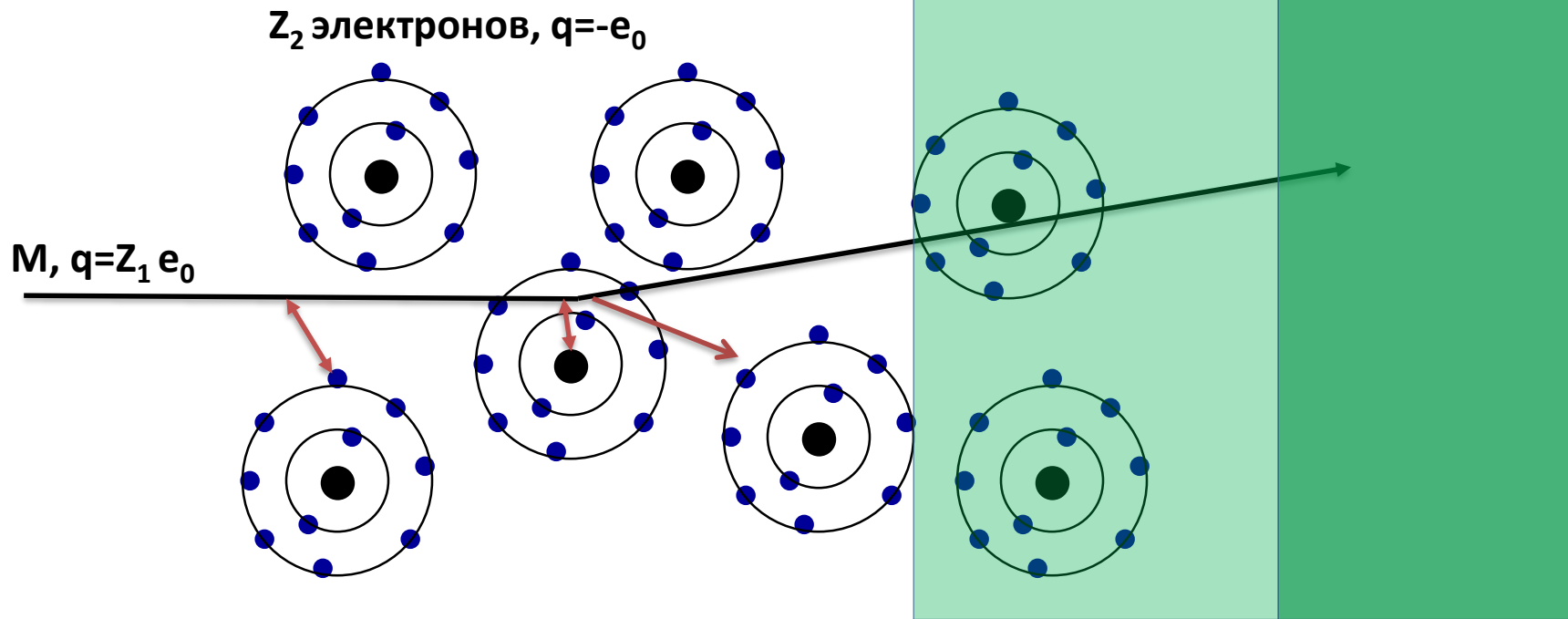


Plots from C. Joram



Рождение пар e^+e^- в поле ядра
доминирует при высоких энергиях

Электроны и другие заряженные частицы



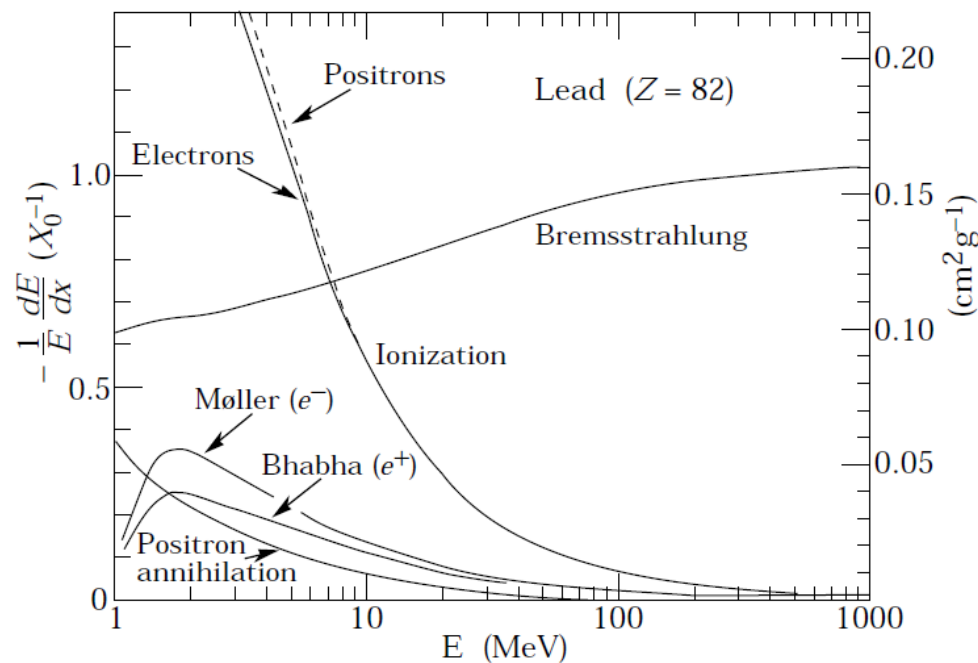
Потеря энергии при взаимодействии с атомарными электронами,
 \Rightarrow
атомы ионизируются

Многokратное рассеяние при взаимодействии с ядрами. При этом может излучиться фотон (тормозное излучение)

При скорости частицы больше скорости света в среде возникает **Черенковское излучение**.

При переходе из одной среды в другую в 1% случаев может быть излучен фотон (Переходное излучение).

Электроны (e) и электро-магнитные ливни



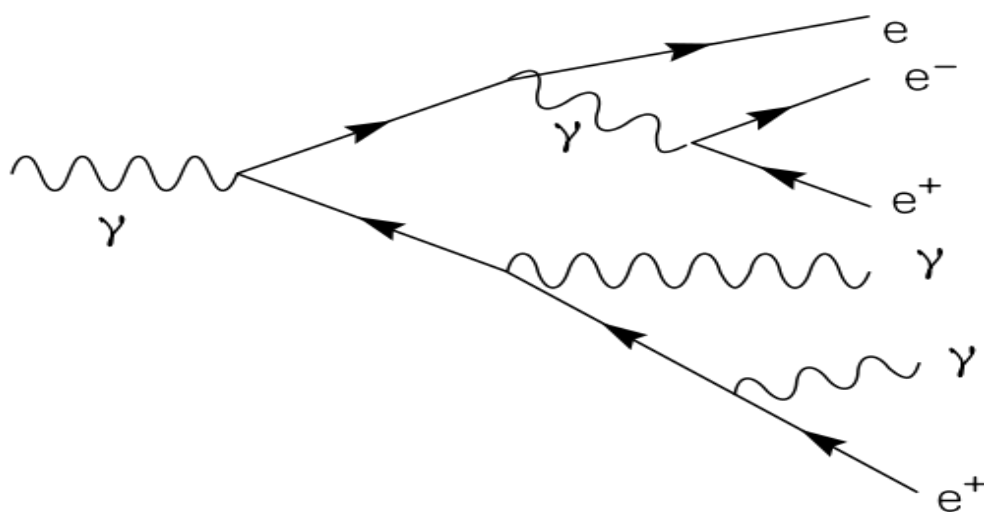
При энергиях электрона $>5-10$ ГэВ тормозное излучение доминирует.

Радиационная длина (X_0) расстояние за которое электрон теряет $1/e$ энергии на тормозное излучение.

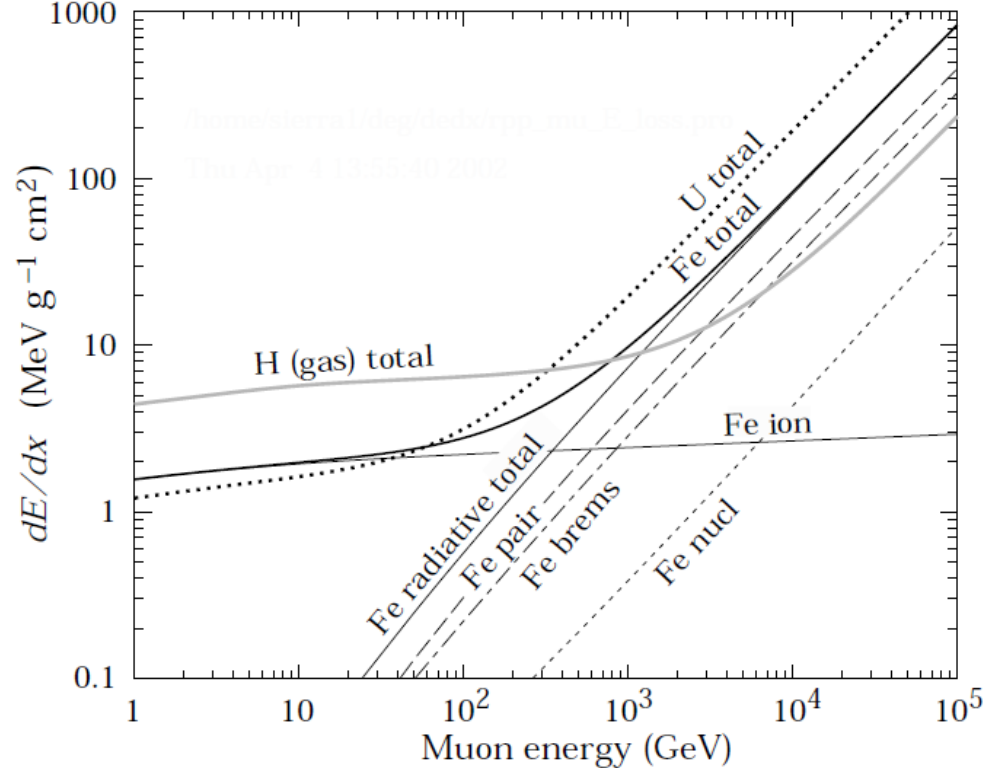
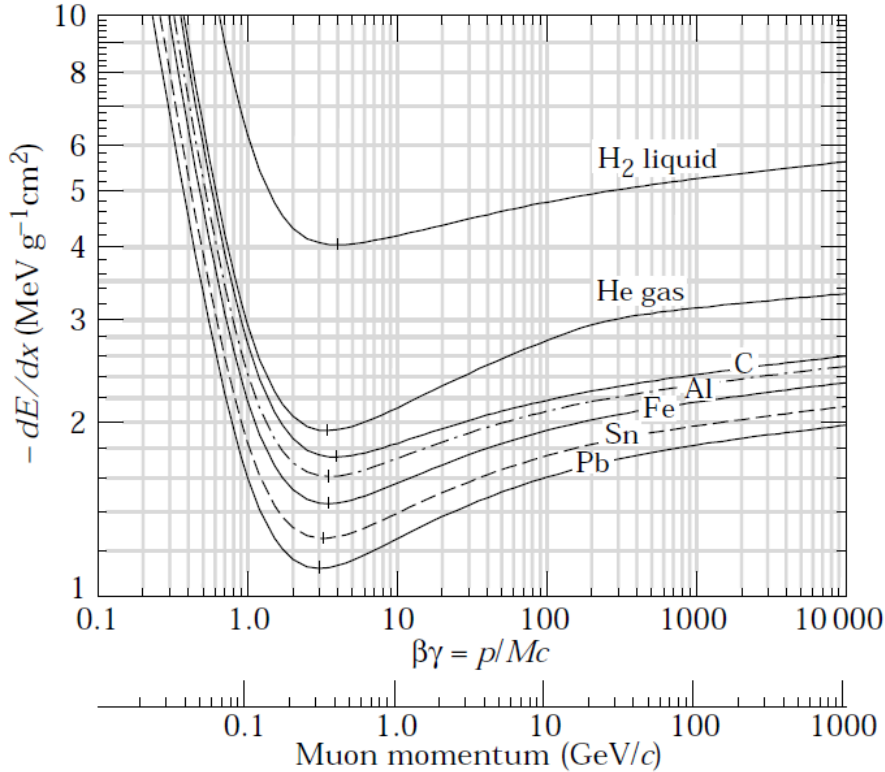
Электроны излучают фотоны, те производят электрон-позитронные пары и т.д. (электро-магнитные ливни)

Процесс размножения продолжается пока энергия достаточно велика $E > E_{\text{крит}}$

Тысячи частиц при начальной энергии E_0 больше чем 1 ГэВ



Мюоны (μ)

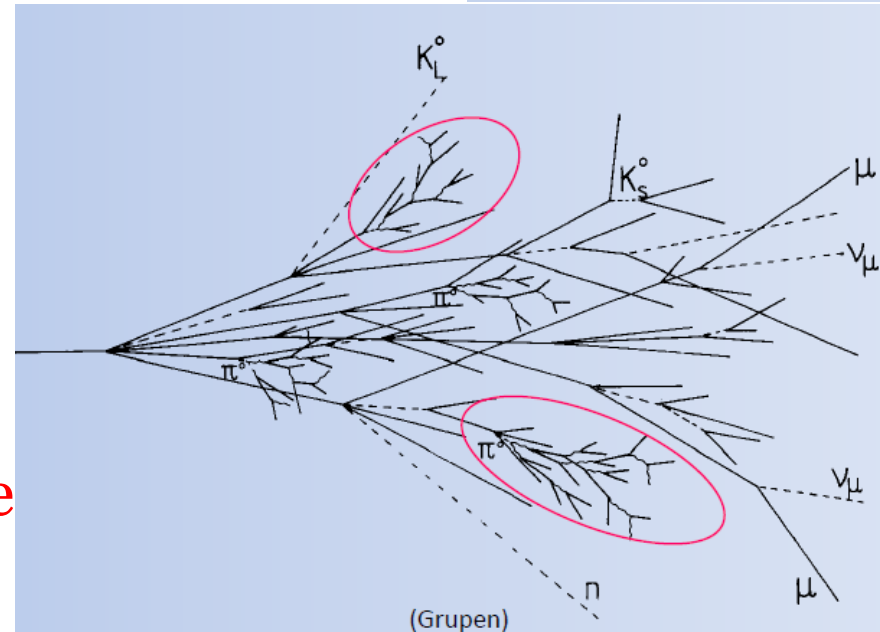
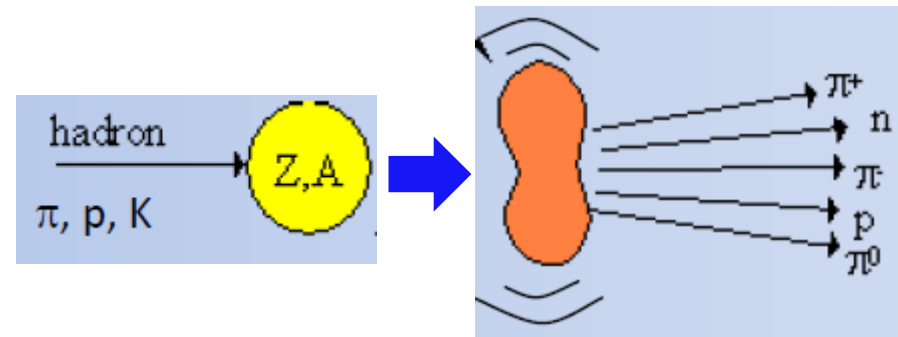


- Мюон – тяжелый электрон
 - Тормозное излучение при энергиях > 500 ГэВ
 - Минимально ионизирующая частица
 - Почти не взаимодействует

Адроны (p, K, π, n)

- Заряженные адроны взаимодействуют, как μ
- Но также участвуют в неупругих ядерных процессах с выделением ядерных осколков и других адронов (**адронные ливни**)

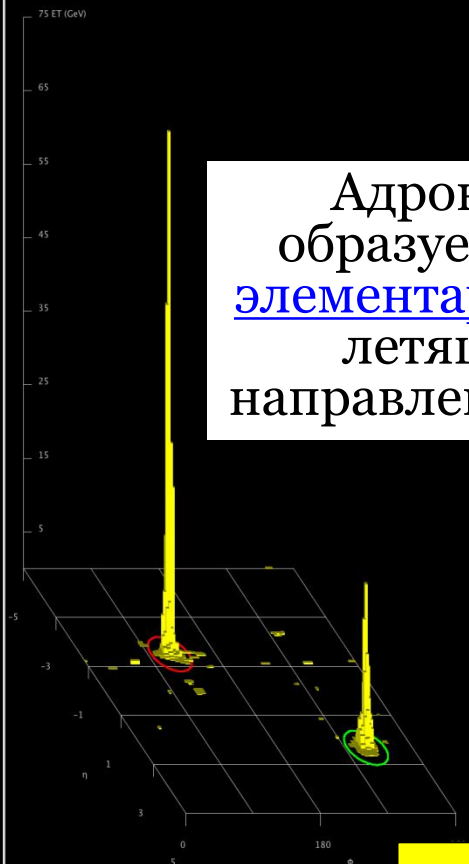
- Физика довольно сложна
- Внутри ливня появляются также фотоны и электроны, рождая электромагнитные ливни
- Размножение пока энергия частиц в ливне достаточно большая $> \text{ГэВ}$



Адронные ливни длиннее и шире электро-магнитных

Струя

Адронная струя (jet) образуется несколькими элементарными частицами, летящими в одном направлении в узком конусе



В данном событии присутствуют 2 струи $M_{jj} = 2.55 \text{ TeV}$



Run Number: 158548, Event Number: 5917927

Date: 2010-07-04 07:24:40 CEST

Если частицы не взаимодействуют с детектором?

- Самые слабо взаимодействующие частицы: нейтрино
- Они не оставят следа в «обычном» детекторе

Специальные детекторы, как Super Kamiookande 50 000 тонн ультра чистой воды (д 39 м × в 42 м)

- Используем закон сохранения (поперечного) импульса:

$$\mathbf{p}_T^{\text{нач}} = \mathbf{p}_T^{\text{кон}} = 0;$$

Иногда $\mathbf{p}_T^{\text{кон}} = \sum \mathbf{p}_T^i \neq 0$, но

$$\sum \mathbf{p}_T^i + \mathbf{p}_T^{\nu} = 0$$

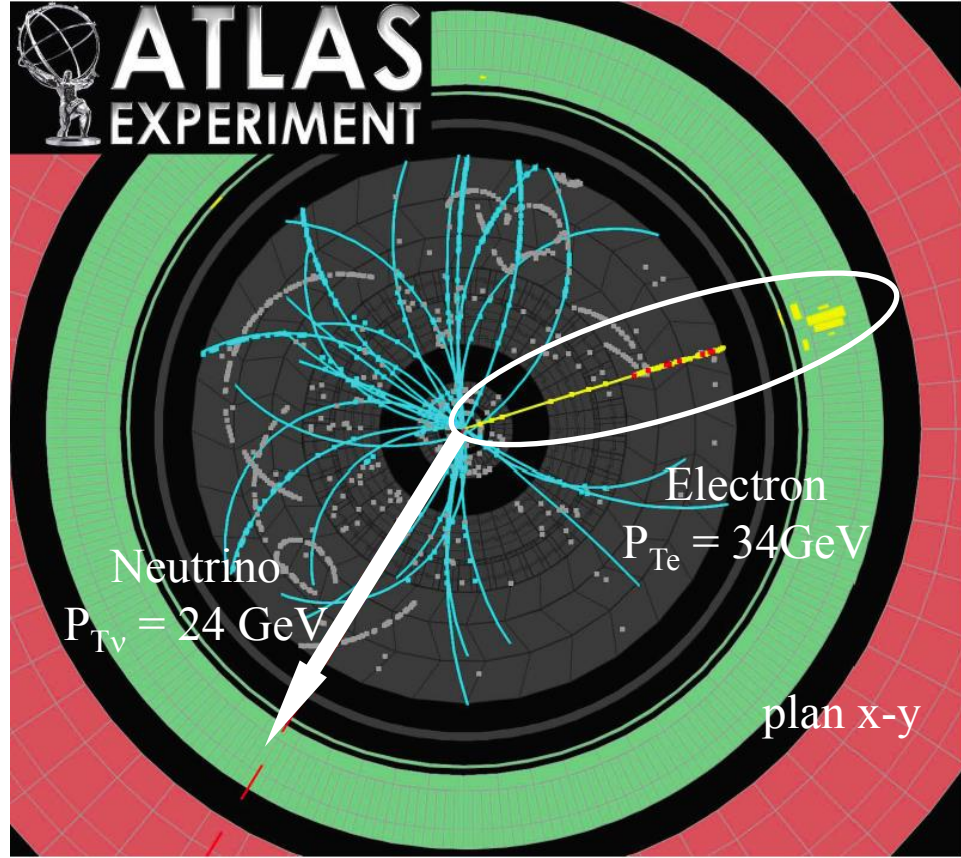
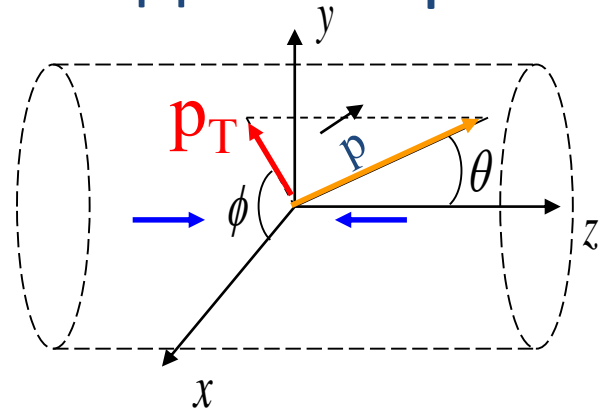
Недостающая энергия

$$E_T^{\text{miss}} = |\mathbf{p}_T^{\nu}| = E^{\nu}$$

– Это может быть нейтрино...

Или новая частица!

...но об этом в других лекциях...



ПРИНЦИПЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Первые детекторы

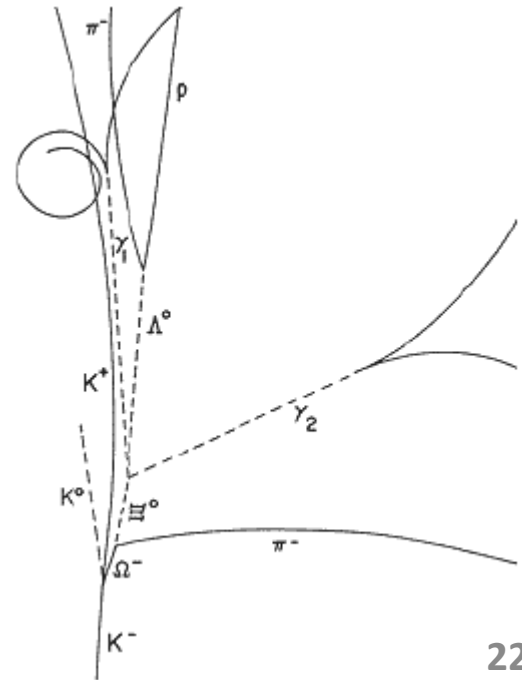
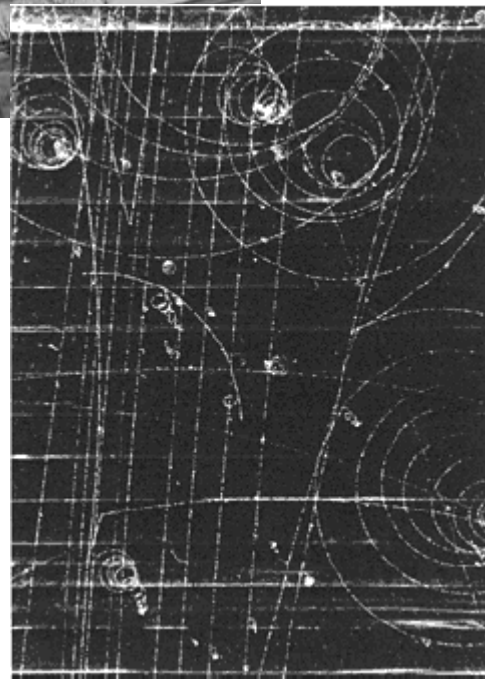
- «Типичные» энергии очень малы по сравнению с макроскопическими размерами детекторов
- Надо использовать физические эффекты чувствительные к малым возмущениям
- Системы в состоянии неустойчивого равновесия
 - переохлажденный пар **туманной камере Вильсона** (Нобелевская Премия 1927)
 - Образование капелек конденсата («тумана») вдоль движения заряженной частицы
 - Перегретая жидкость в **пузырьковой камере** (Нобелевская Премия, Д. Глазер, 1960)
 - Заряженная частица ионизирует жидкость, жидкость вскипает вдоль ее движения, образуя ряд мельчайших пузырьков, которые можно сфотографировать

Пузырьковые камеры



Пузырьковая камера
Гаргамель. ЦЕРН
1970-1978 гг
22×44 метраметра
12 м³ фреона
Открытие нейтральных
токов в 1973.

BNL 80 inch
пузырьковая камера:
Открытие Ω^- в 1964.

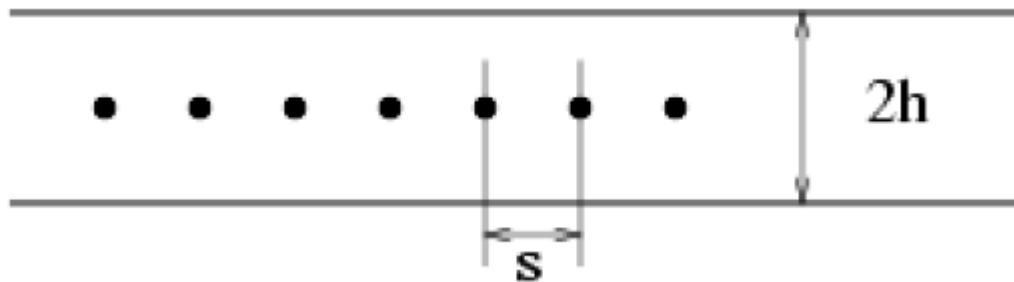


К современным детекторам

- Интерес к более редким процессам
 - Необходимость увеличения скорости записи событий
- Визуальное сканирование фотографий и эмульсий заменяется электронным считыванием и обработкой данных
- Прогресс в развитии электроники позволяет усилить слабые сигналы и уменьшить шумы

1968 Многопроводочная пропорциональная камера (Нобелевская Премия 1992, Георгий Харпак)

Провода под напряжением

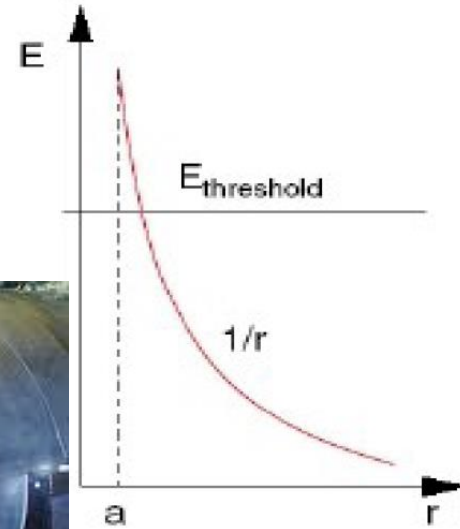
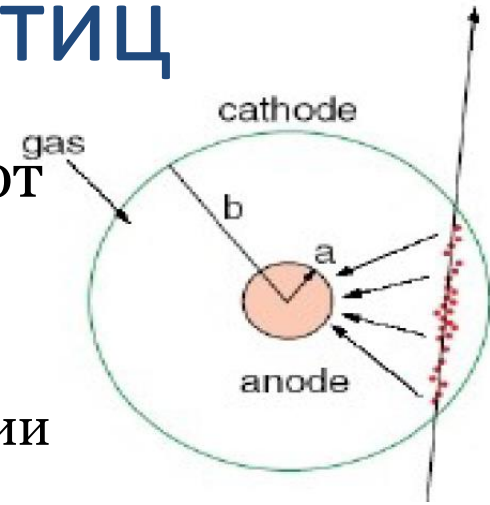


Измерение траектории частиц

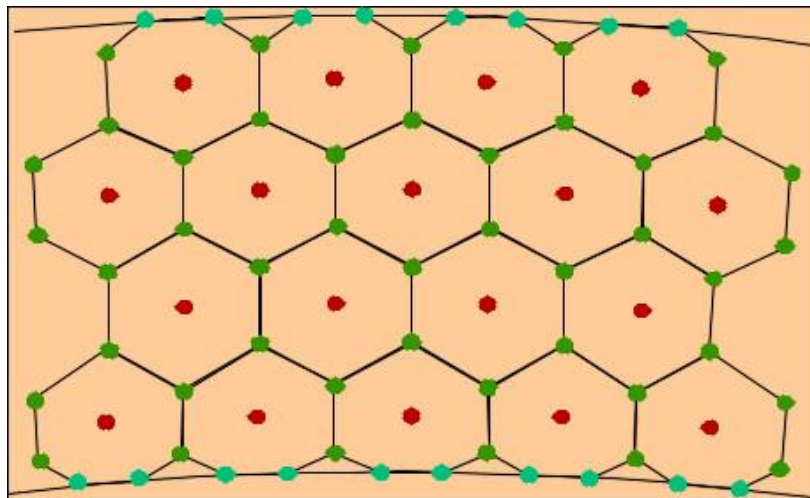
Частица ионизирует газ, электроны дрейфуют к тонкой проволоочке под напряжением

- Электронная лавина
- Малое усиление: сигнал пропорционален ионизации
- Слишком большое усиление: счетчик Гейгера
- Измеряя время прихода сигнала и зная положение проволоки можно узнать где проходила частица

Дрейфовая камера



Измеряется сигнал выше порога



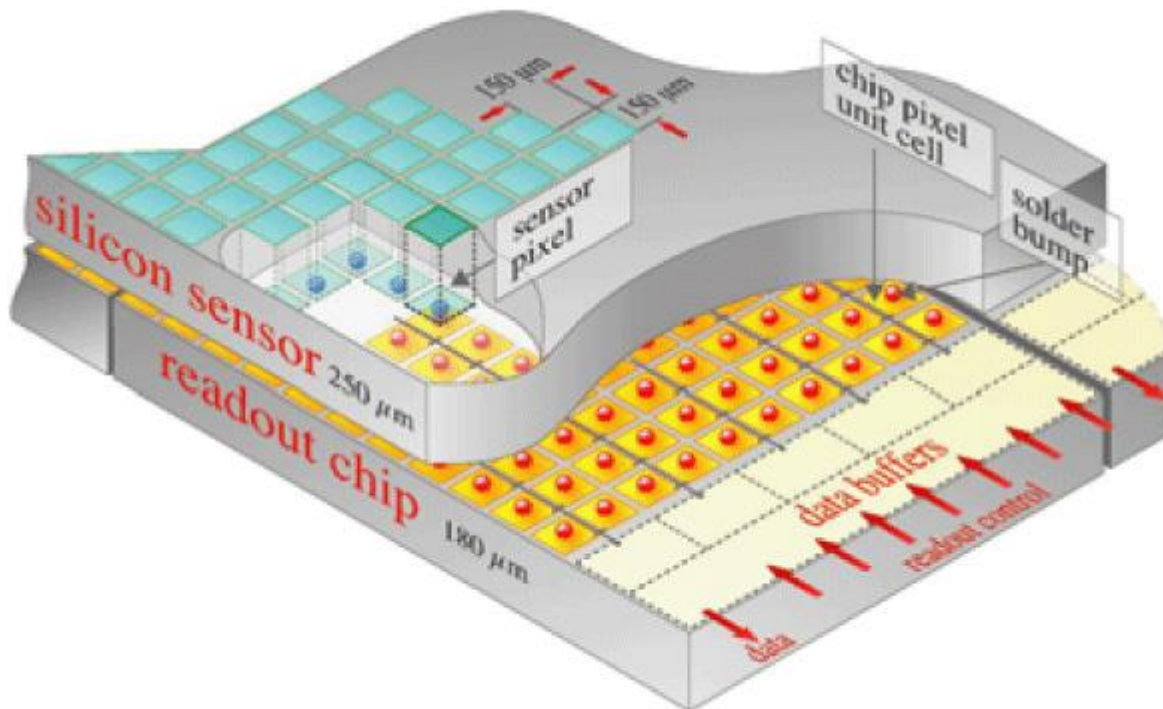
● сенсор ● под напряжением

Кремневые детекторы

Многослойный Si детектор из отдельных тонких пластинок с нанесенной прямо на них электроникой.

Начальная ионизация больше, чем в газах, но нет усиления \Rightarrow Нужна чувствительная и малошумящая электроника.

Узнав координаты точек пересечения частицы с несколькими идущими подряд пластинками пиксельного детектора, можно восстановить трехмерные траектории частиц



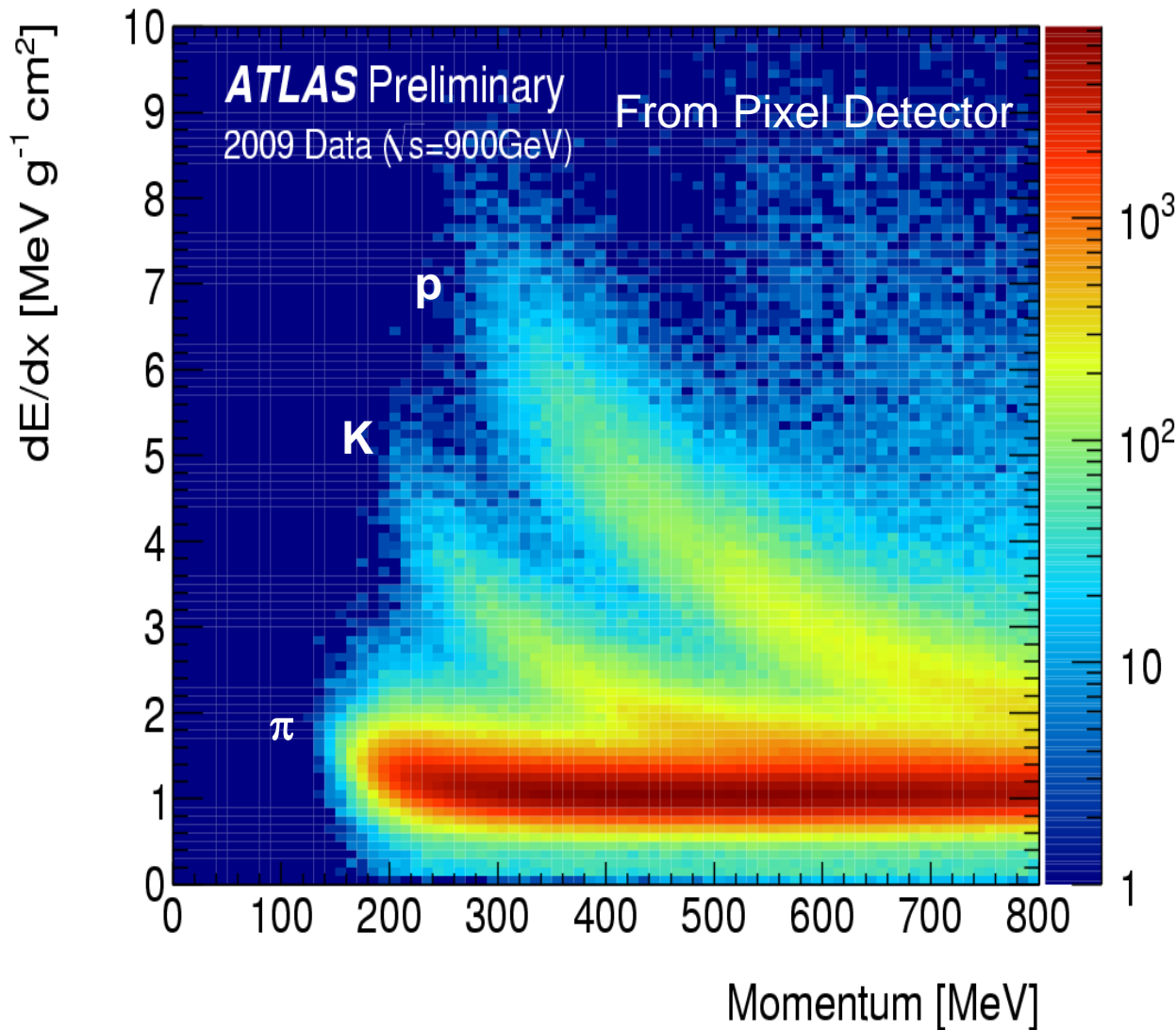
Точности: 5-50 μm

Геометрия:

- Полоски «стрипы»
- Прямоугольники «пиксели»

Много (десятков)
миллионов каналов
считывания

Идентификация заряженных частиц



Ионизационные
потери как
функция импульса
зависят от
массы частицы

Это позволяет
идентифицировать
частицы

Только при низких
импульсах $< 0.7 \text{ ТэВ}$

Измерение энергии частиц

Калориметрия = измерение энергии путем полного поглощения, Обычно объединяется с пространственной реконструкцией. Частицы исчезают.

Чувствителен к **заряженным и незаряженным** частицам!

Два типа калориметров

- **Электро-магнитный** (электроны и фотоны)
- **Адронный** (протоны, нейтроны и пионы)

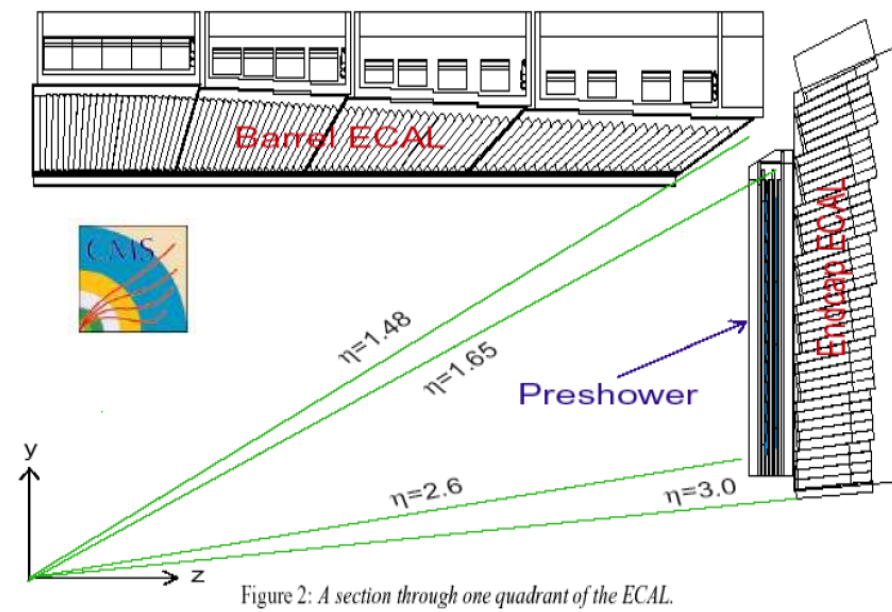
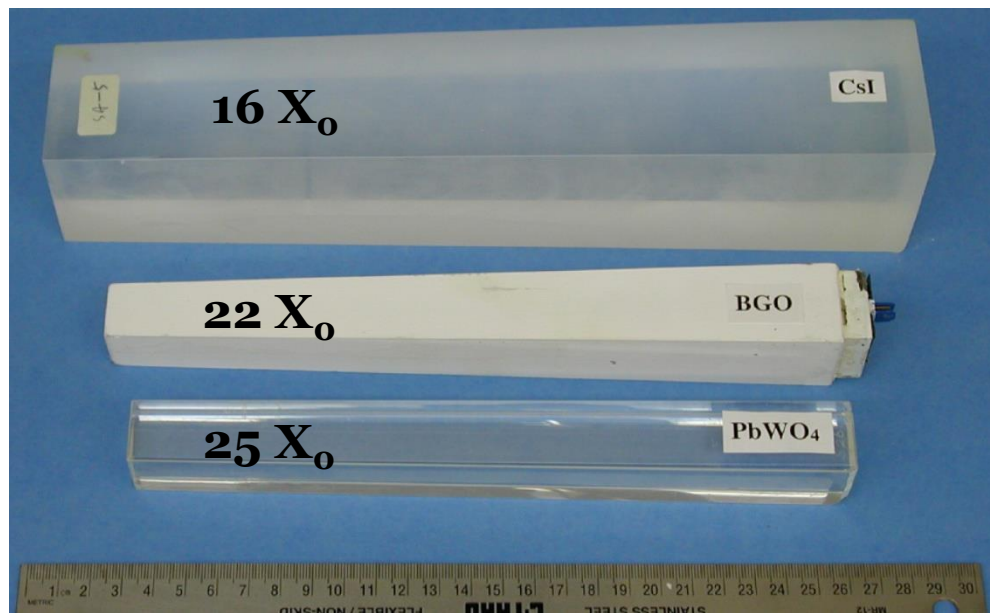
Два способа измерений :

- **Однородные калориметры** (только электро-магнитные)
детектор = абсорбер
- **Неоднородные калориметры** = чередующиеся Абсорбер + детектор (газовые, жидкостные, твердотельные)

Однородные калориметры

Материал чаще всего: сцинтилляционные кристаллы

При пересечении кристалла частицами возникают сцинтилляционные фотоны, регистрируемые фотодиодом.



Длина, сечение и материал подбираются для эксперимента
Очень точное измерение энергии, но нет информации о
начале ливня

Неоднородные калориметры

Конструкция: чередующиеся
слои абсорбера и детектора

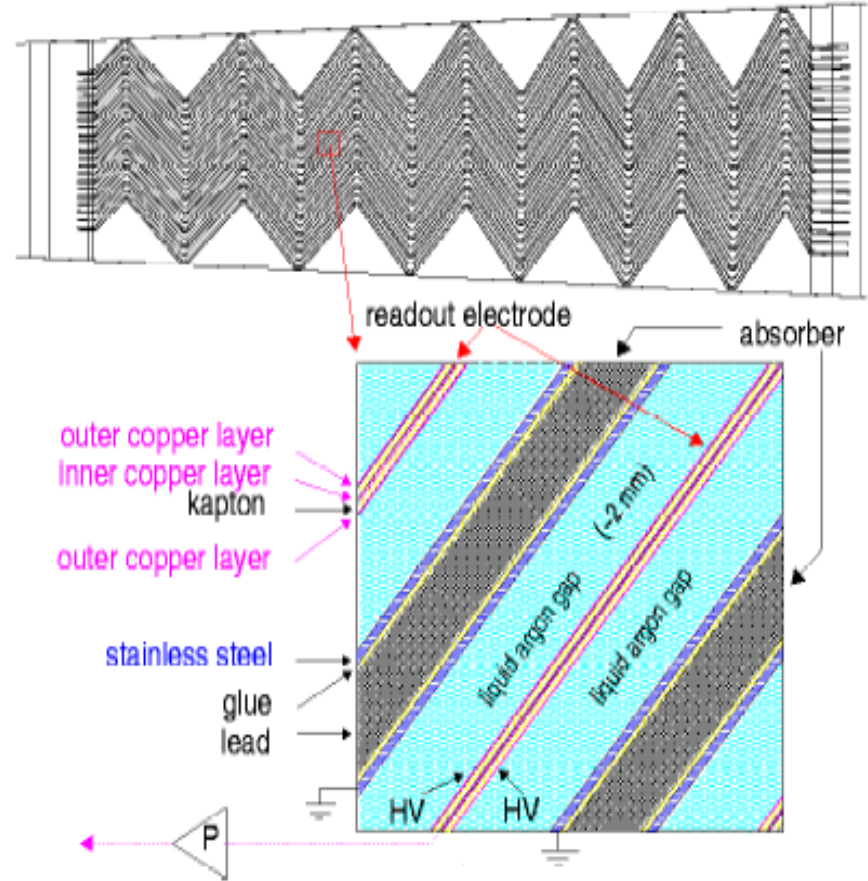
Абсорбер: Pb, W, Fe, Cu

- создает ливни частиц

Детектор: пластиковый
сцинтиллятор или
инертная жидкость (Ar, Kr)
- детектирует ливни частиц
- сигнал: сцинтилляция или
ионизация

Возможна сегментация по
длине: развитие ливня,
«траектория» частицы

Не такое точное определение
энергии



Геометрия калориметров

Гомогенные/Однородные

Неоднородные/Сандвич

слоя поглощающего (большое Z) и детектирующего материалов

Энергетическое разрешение

😊 (2-5%)

😞 (5-20%,

$\sim \sqrt{\text{толщина поглощающего слоя}}$

Сегментация



(поперечная)

(поперечная и продольная)

Компенсация : разница между сигналом от электронов и адронов (для измерения энергий струй)



Цена



Все адронные калориметры

Преимущества калориметров

- Чувствительность ко всем видам частиц (заряженных и нет)
- Энергетическое разрешение улучшается с E

$$\frac{\sigma}{E} \approx \frac{1}{\sqrt{E}} \quad \text{калориметр}$$

$$\frac{\sigma}{p} \approx p \quad \text{магнитный спектрометр}$$

- Многопрофильные детекторы
 - Измерение энергии (основное применение)
 - Измерение направления частицы, начала ливня (сегментация)
 - Идентификация частиц (различный сигнал от электронов, адронов, гамма-квантов)
 - Измерение времени прихода частиц
 - Быстрая реакция → удобно для триггерной системы
- Достаточно выгодны по цене
 - Толщина для поглощения ливня $\sim \log E$ (в спектрометре $\sim \sqrt{p}$)

Что мы можем узнать о частицах?

- Зарегистрировать все возможные частицы
 - Заряженные во внутреннем детекторе и калориметрах
 - Нейтральные в калориметре
- Измерить их импульс и заряд во внутреннем детекторе
- Измерить их энергию в калориметре
- Их идентифицировать

**Все это надо сделать одновременно:
многослойный детектор**

ПРИМЕРЫ ДЕТЕКТОРОВ

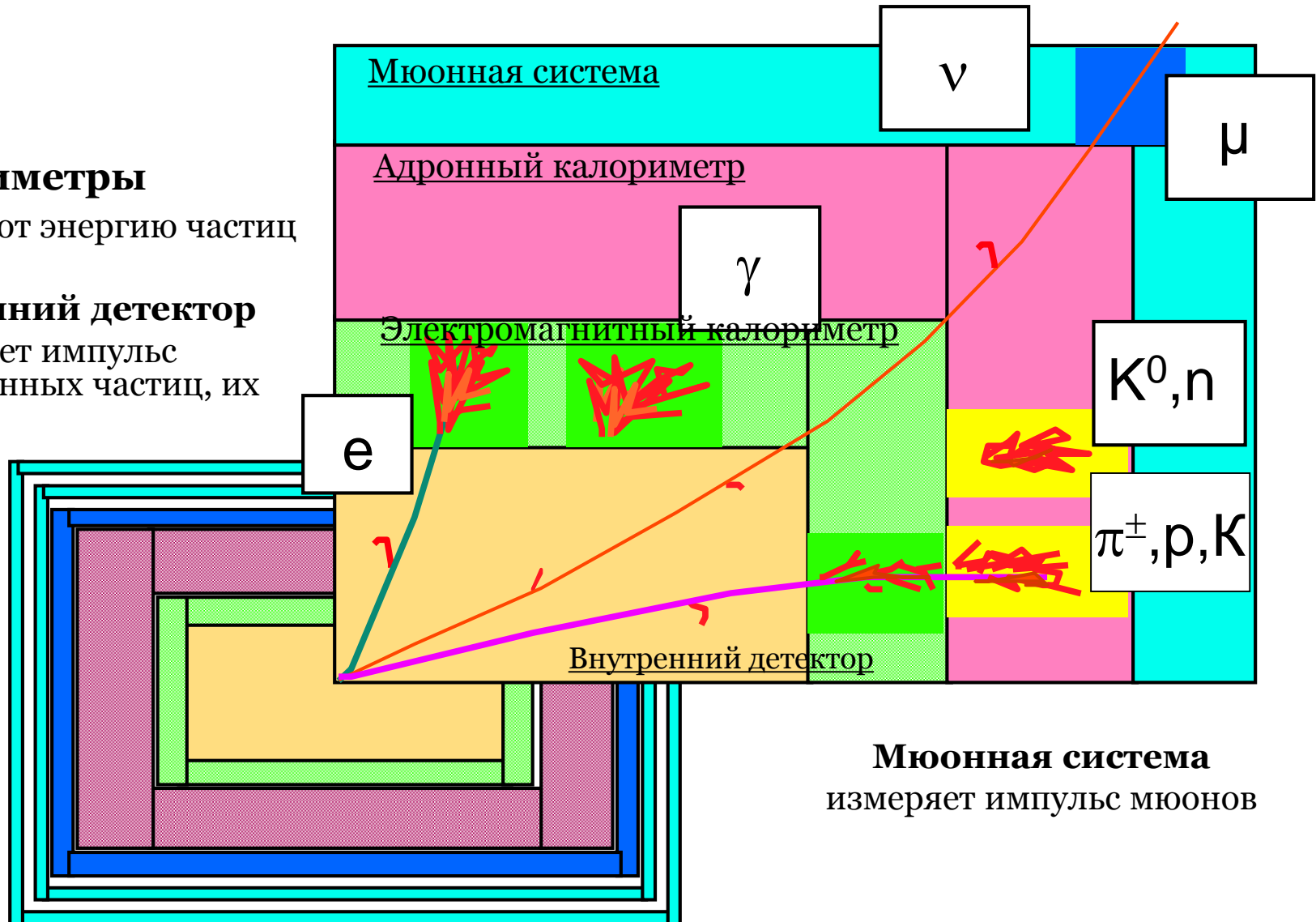
Современные детекторы

Калориметры

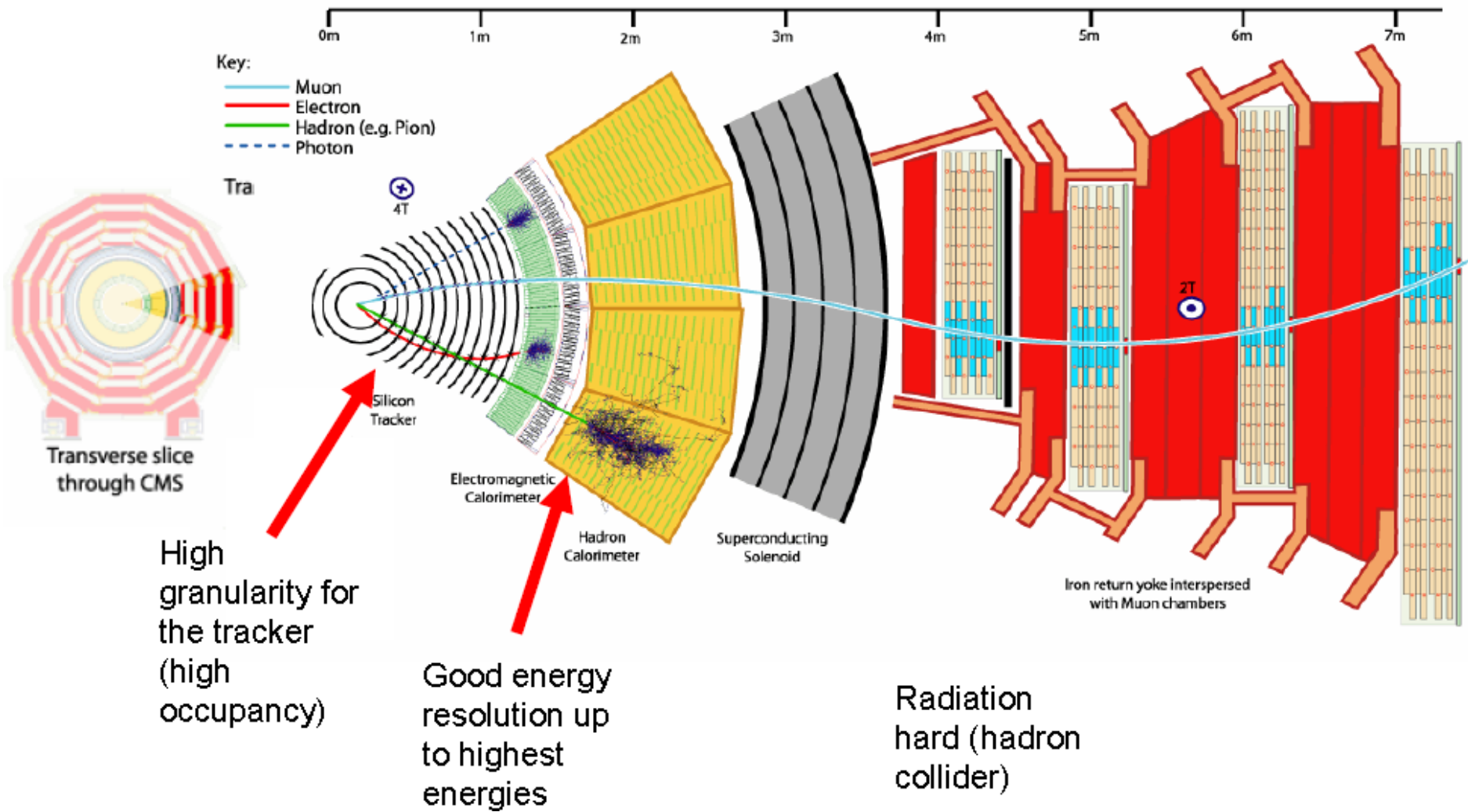
- измеряют энергию частиц

Внутренний детектор

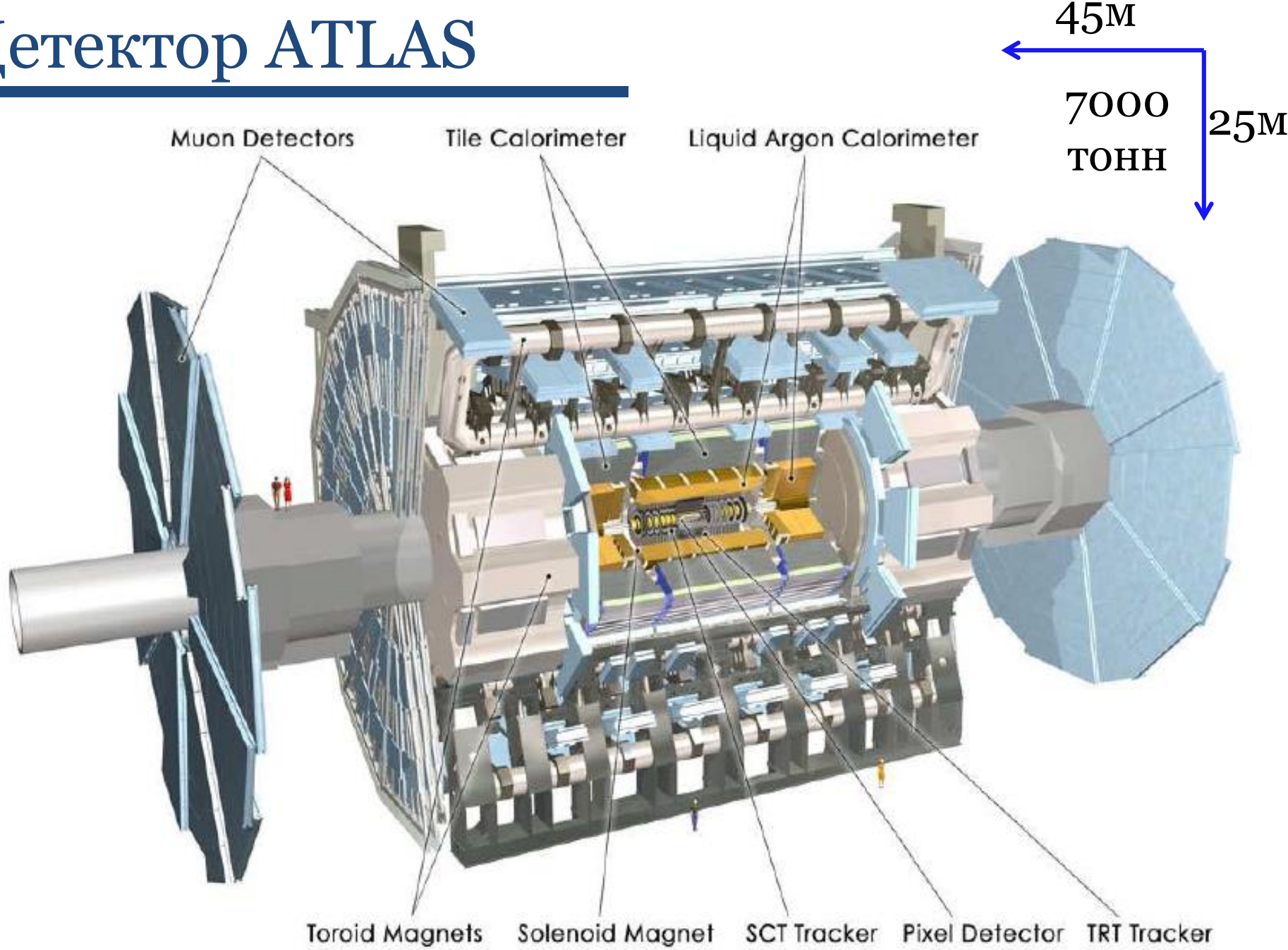
- измеряет импульс заряженных частиц, их заряд



Детектор CMS

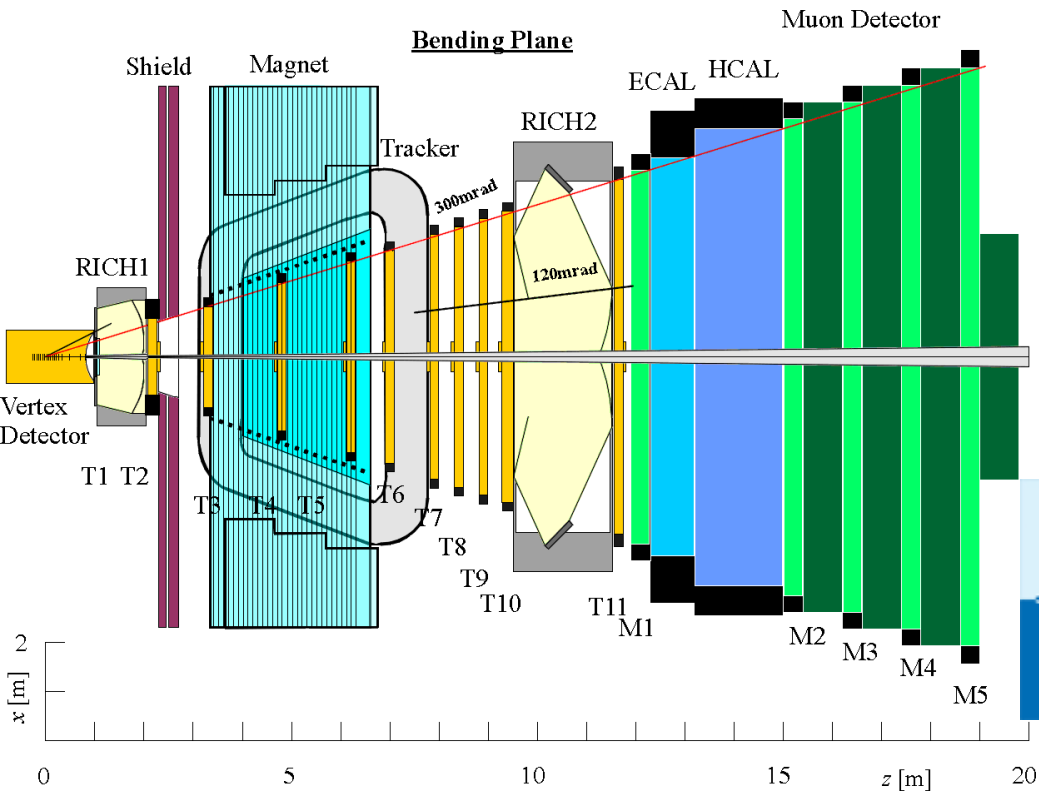
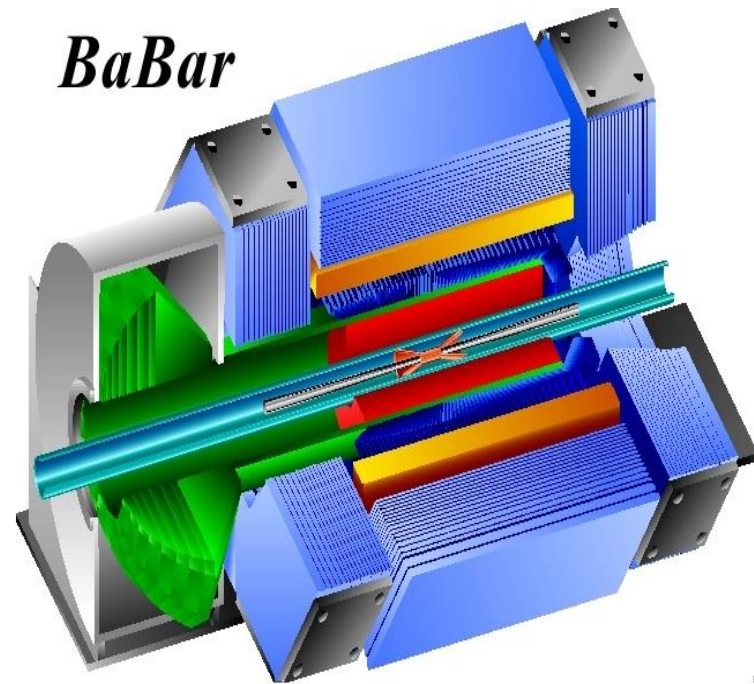


Детектор ATLAS



Асимметричные детекторы

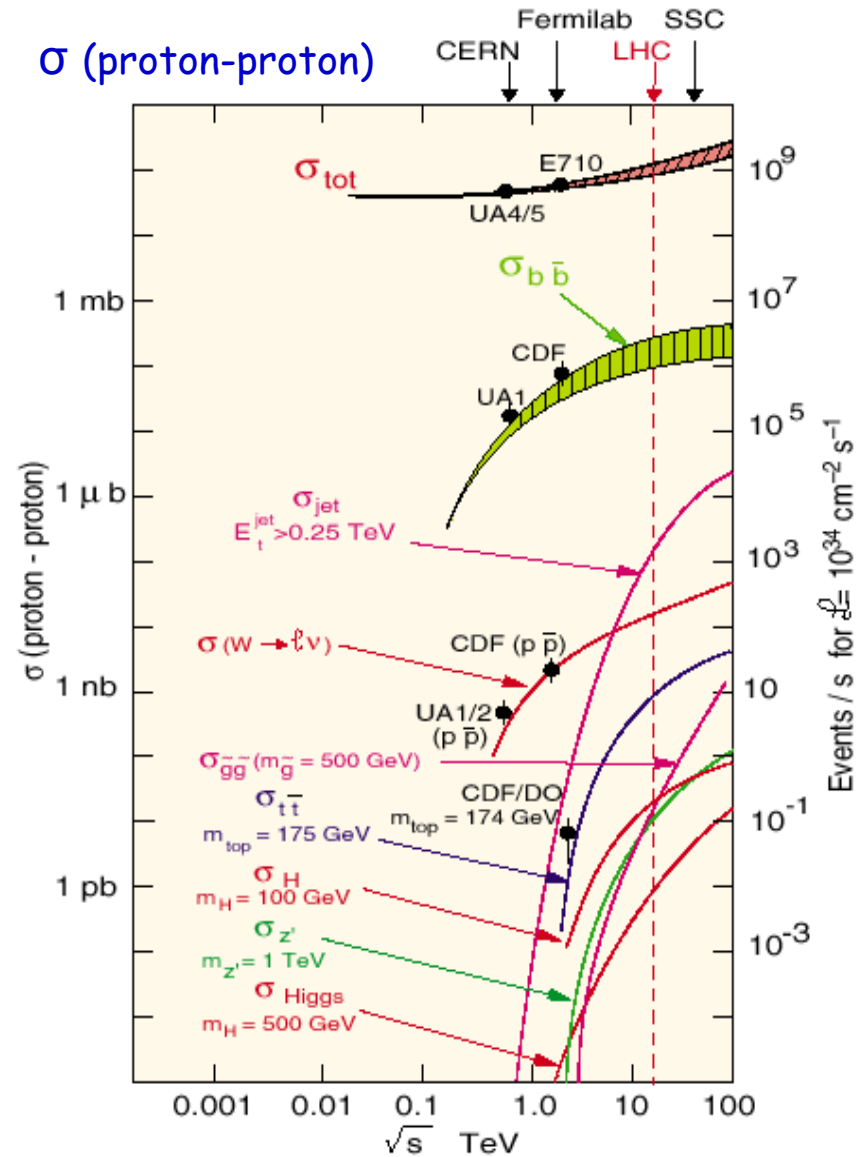
- rivelatore di mu (IFR)
- magnete
- calorimetro elettromagnetico (EMC)
- rivelatore Cherenkov (DIRC)
- rivelatore di tracce (DCH)
- tubo di supporto
- rivelatore di vertice (SVT)



8-99
8488A1

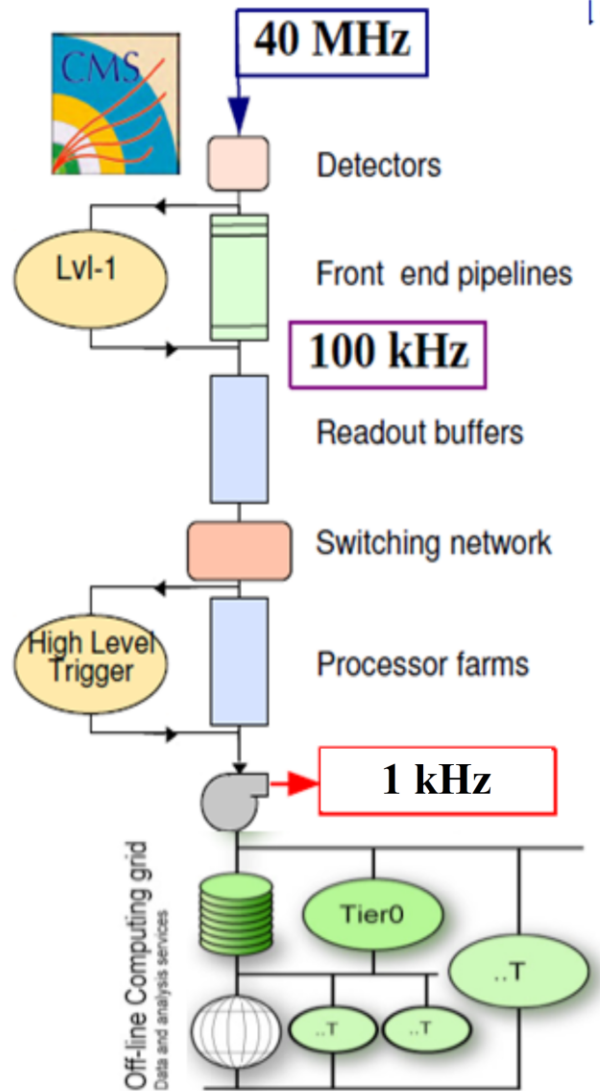
Эффективное поперечное сечение

- **Эффективное поперечное сечение (σ)** — это физическая величина, характеризующая вероятность перехода системы двух взаимодействующих частиц в определённое конечное состояние.





Триггерная система (HLT)



- ▶ HLT - компьютерный центр с 13 тысячами процессоров
 - ▶ Обрабатывает ~100GB/сек чтобы получить не больше 1kHz на выходе
- ▶ Поток данных для сохранения: ~1GB/sec
- ▶ Каждое отобранное событие будет иметь минимум две копии на пленочных накопителях, что бы избежать потери данных
- ▶ Типичный годовой объем одной копии сырых необработанных данных: 5-10 PByte

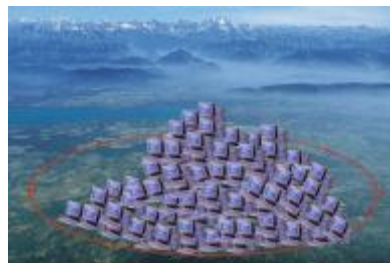


В шести экспериментах производится 15-20 петабайт (15-20 млн. гигабайт) данных в год. Их нужно сохранить и проанализировать.

Данные только одного эксперимента	ежегодно	Вес DVD дисков
Первичные данные	~ 4 PB	14000 кг
Физические данные	0.2 PB	784 кг

Для всех экспериментов – около 4 млн. DVD дисков или около 20 млн. CD дисков

Для обработки и анализа этих данных требуется около 100000 персональных компьютеров (конец прошлого – начало нынешнего столетий)



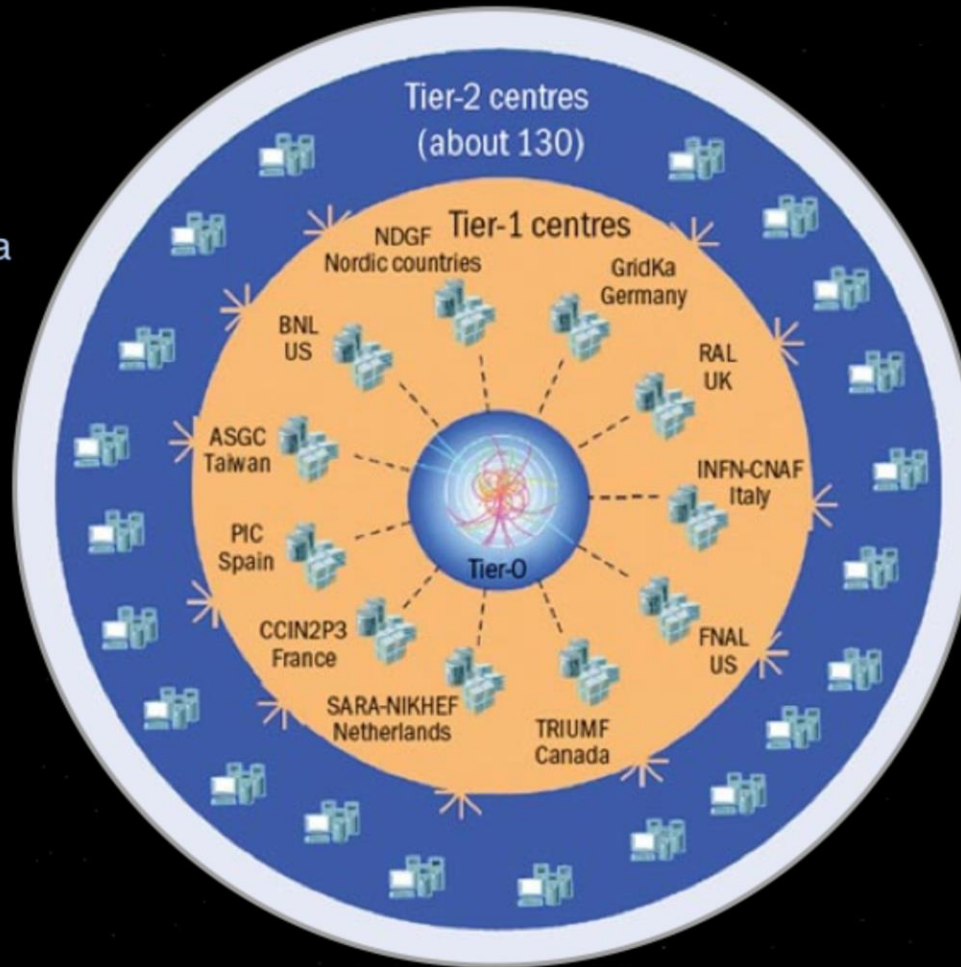
Компьютерный центр ЦЕРНа даже после существенной модернизации последних лет может обеспечить только ~40% ресурсов для хранения данных и около 30% требуемых вычислительных ресурсов.

The Worldwide LHC Computing Grid

Tier-0 (CERN): data recording, reconstruction and distribution

Tier-1: permanent storage, re-processing, analysis

Tier-2: Simulation, end-user analysis



nearly 160 sites,
35 countries

~350'000 cores

200 PB of storage

> 2 million jobs/day

10 Gb links

WLCG:

An International collaboration to distribute and analyse LHC data

Federation of National Infrastructures. In the U.S.A.: Open Science Grid

Integrates computer centres worldwide that provide computing and storage resource into a single infrastructure accessible by all LHC physicists

Український Грід

Розпочав роботу 2006 року.

На поточний момент ґрід інфраструктура України об'єднує 38 кластерів з загальною кількістю ядер більше за 2900 и доступним дисковим об'ємом 250TB.

Кластери працюють під управлінням Nordugrid ARC.

Використовується для досліджень у сферах фізики, біології, медицини та ін.

BITP ARC Training	11	0+0	0+0
BITP Cluster	88	0+34	0+0
CHIMERA	120	0+0	116+0
CSTU ARC CE	4	0+0	0+0
DFTI Cluster	112	0+44	1+0
HPC and FOSS Center	13	0+0	0+0
IAP Cluster	16	0+8	0+0
IAPMM Cluster	16	4+8	0+0
ICMP Cluster	192	0+89	0+0
ICYB SCIT-3	1036	32+504	0+0
IEP Cluster	48	0+0 (queue inactive)	0+0
IFBG Cluster	72	16+41	0+0
ILTPE ARC UA	88	0+0	1+0
ILTPE Cluster	88	0+62	0+0
IMAG cluster	44	0+0	0+0
IMATH Cluster	16	0+2	0+0
IMBG ARC	100	96+0	2+0
IMMSP Cluster	40	0+0	6+0
IMP ARC CE	84	0+0	0+0
INPARCOM Cluster	8	0+0	0+0
INPARCOM GPU Cluster	8	0+0	0+0
IOP Cluster	104	0+0	0+0
IPM Cluster	44	0+5 (queue inactive)	0+0
IPMS Cluster	20	0+0	0+0
IRE Cluster	64	0+0	0+0
ISMA cluster	332	0+305	0+39
ISOFTS Cluster	8	0+0	0+7605
KIPT IPP	2	0+0	0+0
KMA Grid Cluster	0	0+0	0+0
KNU ARC	40	0+37	13+11
KPI training cluster	24	0+0	0+0
LNU Training Cluster	28	0+28	0+0
MAO Cluster	104	0+48	0+0
MHI Cluster	120	0+0	0+0
PIMEE ARC	24	16+0	6+0
RIAN	1	0+0	0+0
SRI cluster	4	0+0	0+0

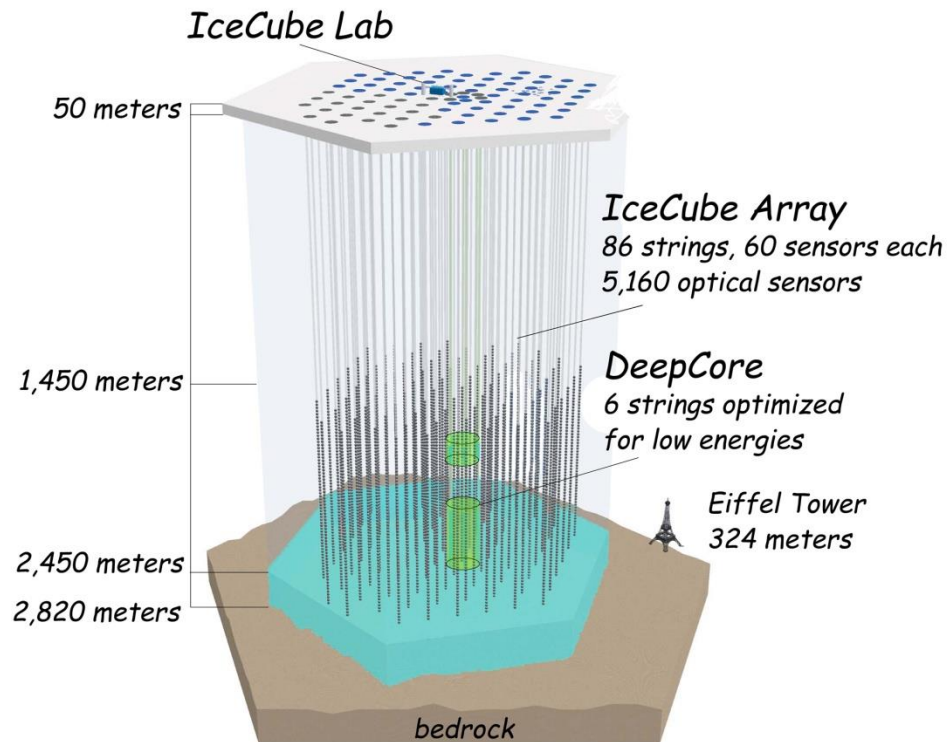
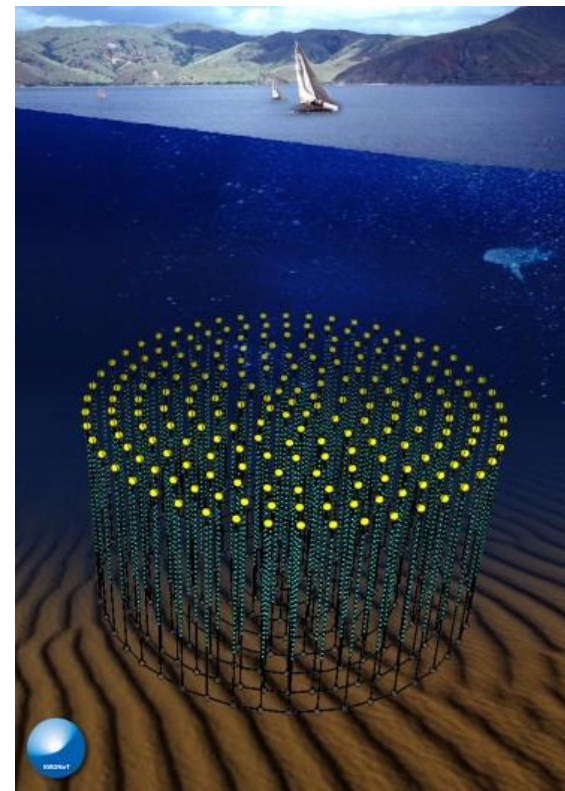
Заключение

- В этой лекции мы коснулись основных принципов работы детекторов физики высоких энергий
- Большая часть времени при постройке уходит на практическое применение:
 - Как оптимально разместить сенсоры?
 - Как потянуть кабели, как их соединить
 - ...
- Сейчас идет работа в следующих областях:
 - Upgrade детекторов LHC
 - Другие эксперименты

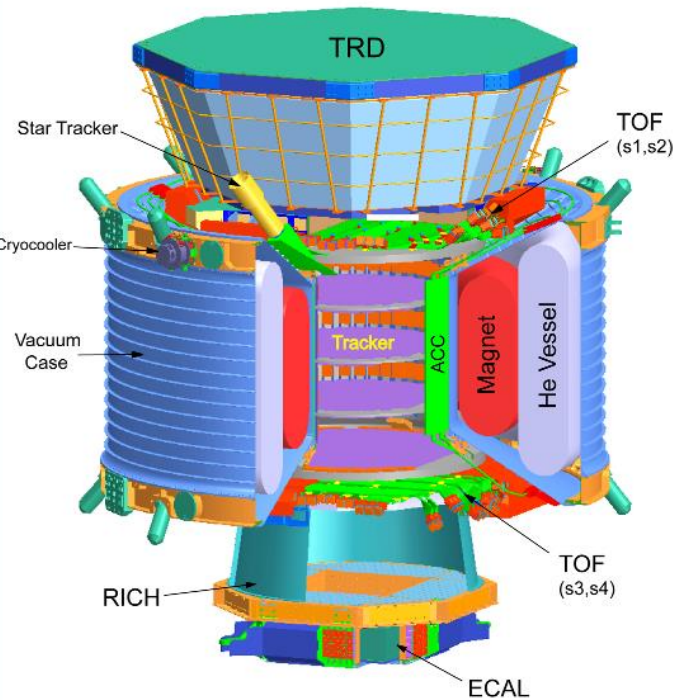
IceCube at the South Pole



Antares Neutrino Observatory



AMS 02 (Alpha Magnetic Spectrometer)



AMS on ISS for 3 years



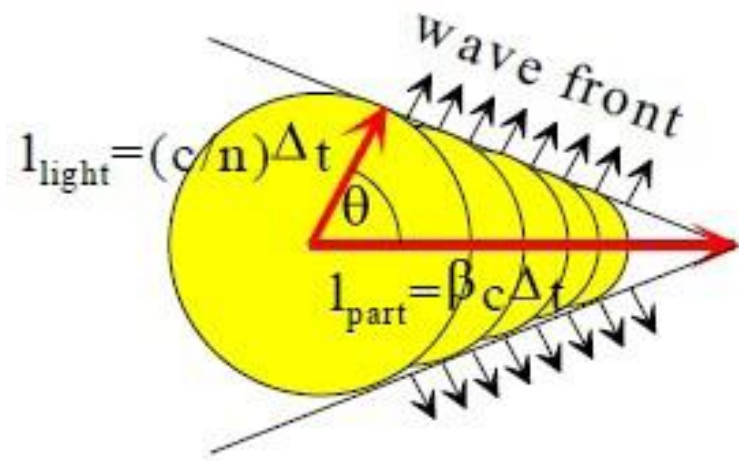
СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРОЗРАЧКИ

Детекторы Черенковского излучения

При скорости частицы больше скорости света в среде (но меньше скорости света в вакууме) возникает

Черенковское излучение.



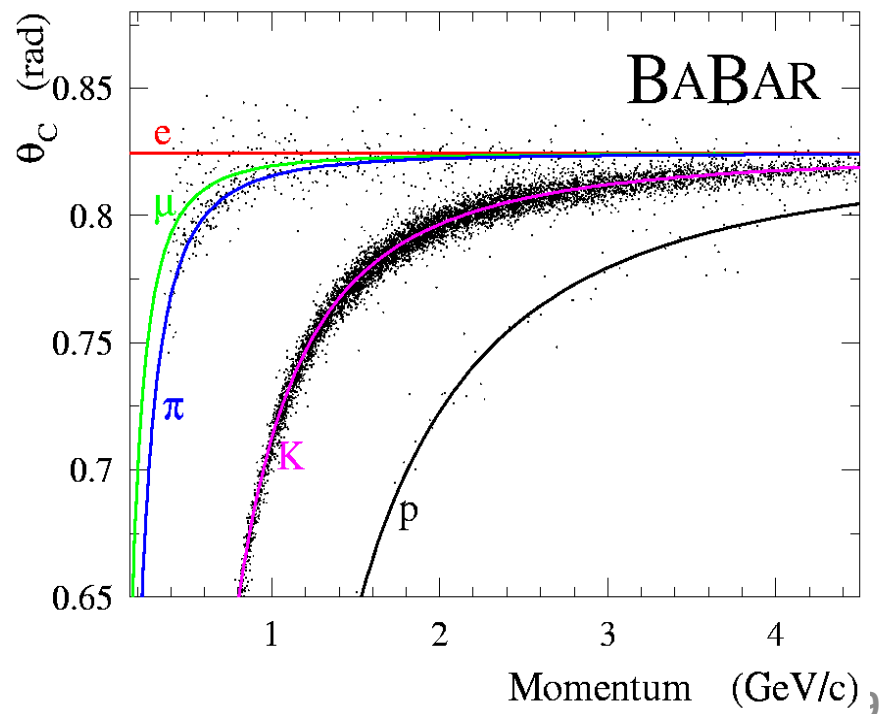
- Конус черенковского света

$$\cos \theta_c = 1/(n\beta)$$

n индекс рефракции

$\beta = v/c$

- Зная раствор конуса – измеряем скорость
- Зная импульс частицы, измеряем массу



Принципы выбора конструкции

Требования в Физике Высоких Энергий:

- Радиационная стойкость
- Сильное магнитное поле
- Герметичность и легкий доступ после открытия детектора, Модульность, Гранулярность
- Детектор должен отработать 10 лет или больше
- Необходимость выбрать 100 интересных событий из $1 \cdot 10^7$ за 1сек
- Хранение данных $\sim 4 \cdot 10^3 \text{Tb}$ в год (1M DVDs a year)

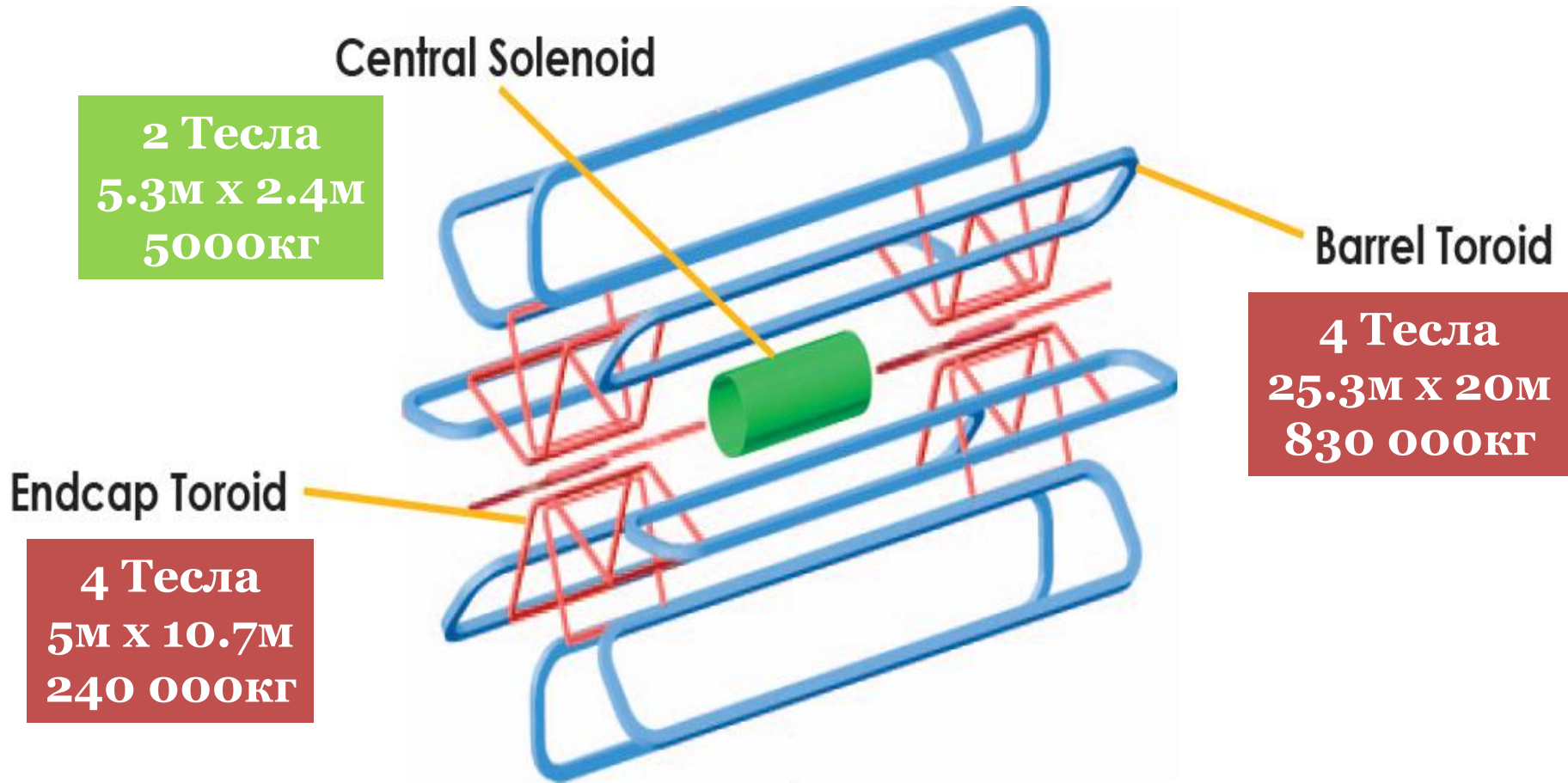
Надо помнить

Стоимость установки увеличивается пропорционально
 \sim объему

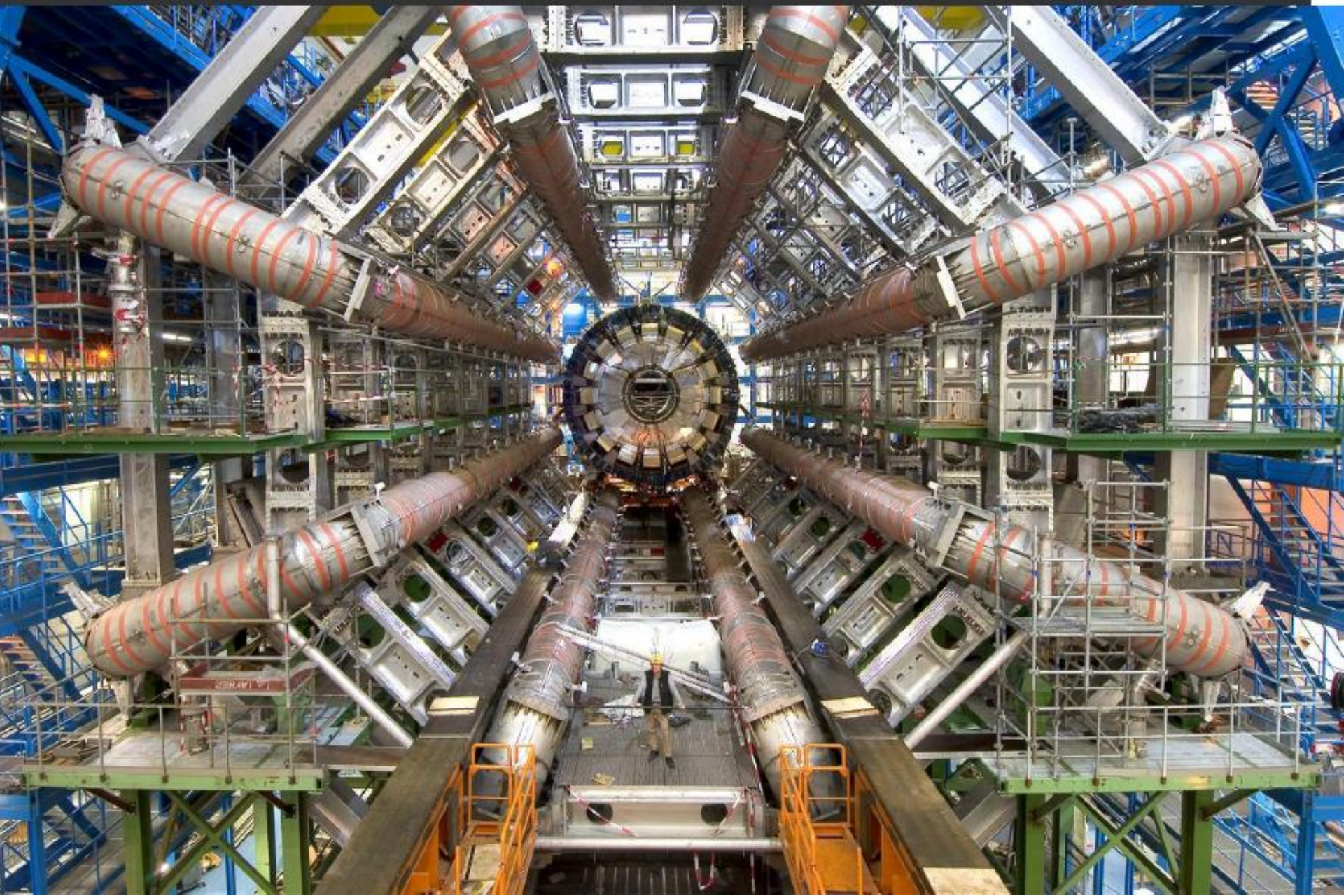
Как можно меньше материала перед калориметрами

Как можно больше материала перед мюонным спектрометром

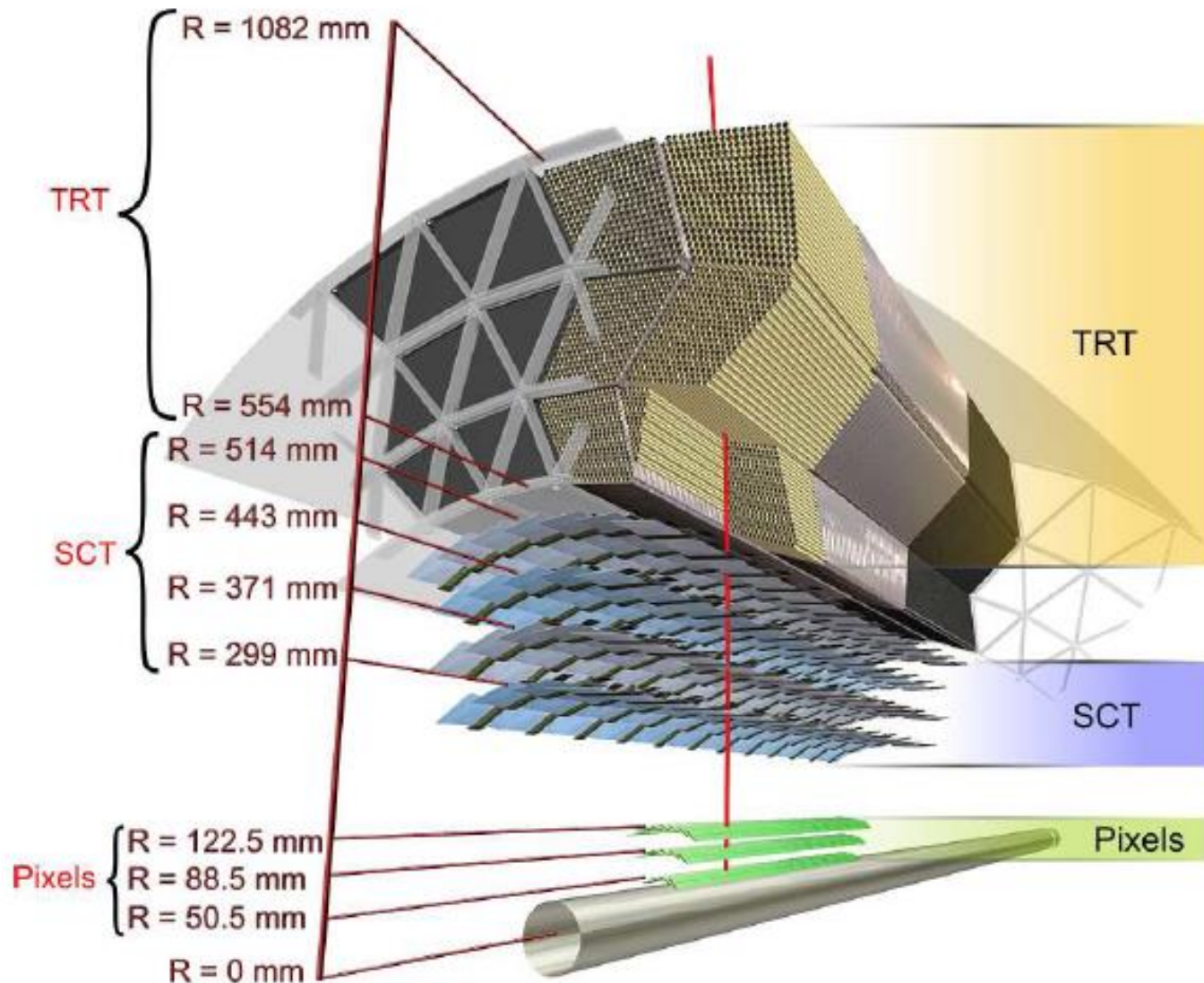
Магнитное поле



Магнит – самая видимая часть детектора



Внутренний детектор



Детектор Переходного Излучения (TRT):

Соломинки-Газ
350 к каналов
36 точки измерения
 $\sigma \sim 130 \text{ mm}$

Стрипы (SCT)

Кремний
6.2 М каналов
4 точки измерения
 $\sigma \sim 16 \text{ mm}$

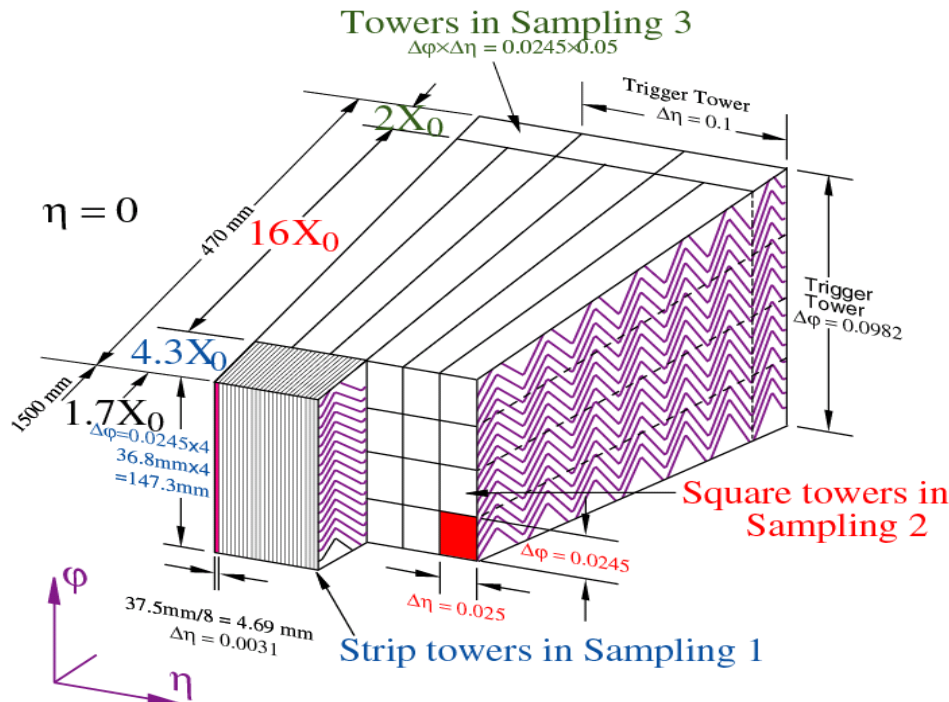
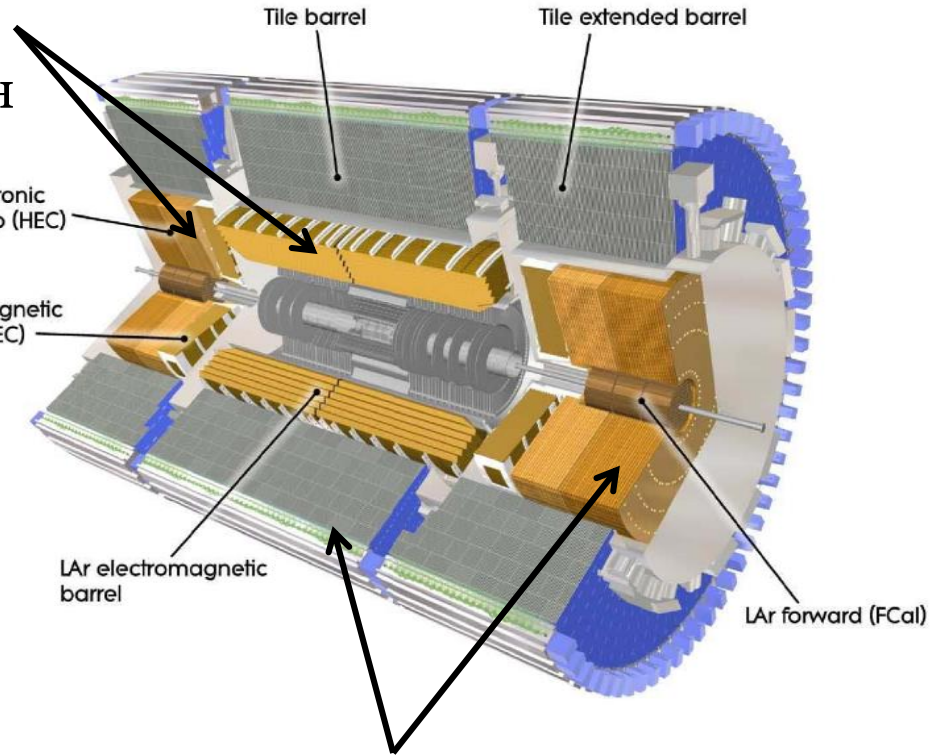
Пиксели (Pixel):

Кремний
80 М каналов
3 точки измерения
 $\sigma \sim 10 \text{ mm}$

Калориметры ATLAS

Электро-магнитный Калориметр

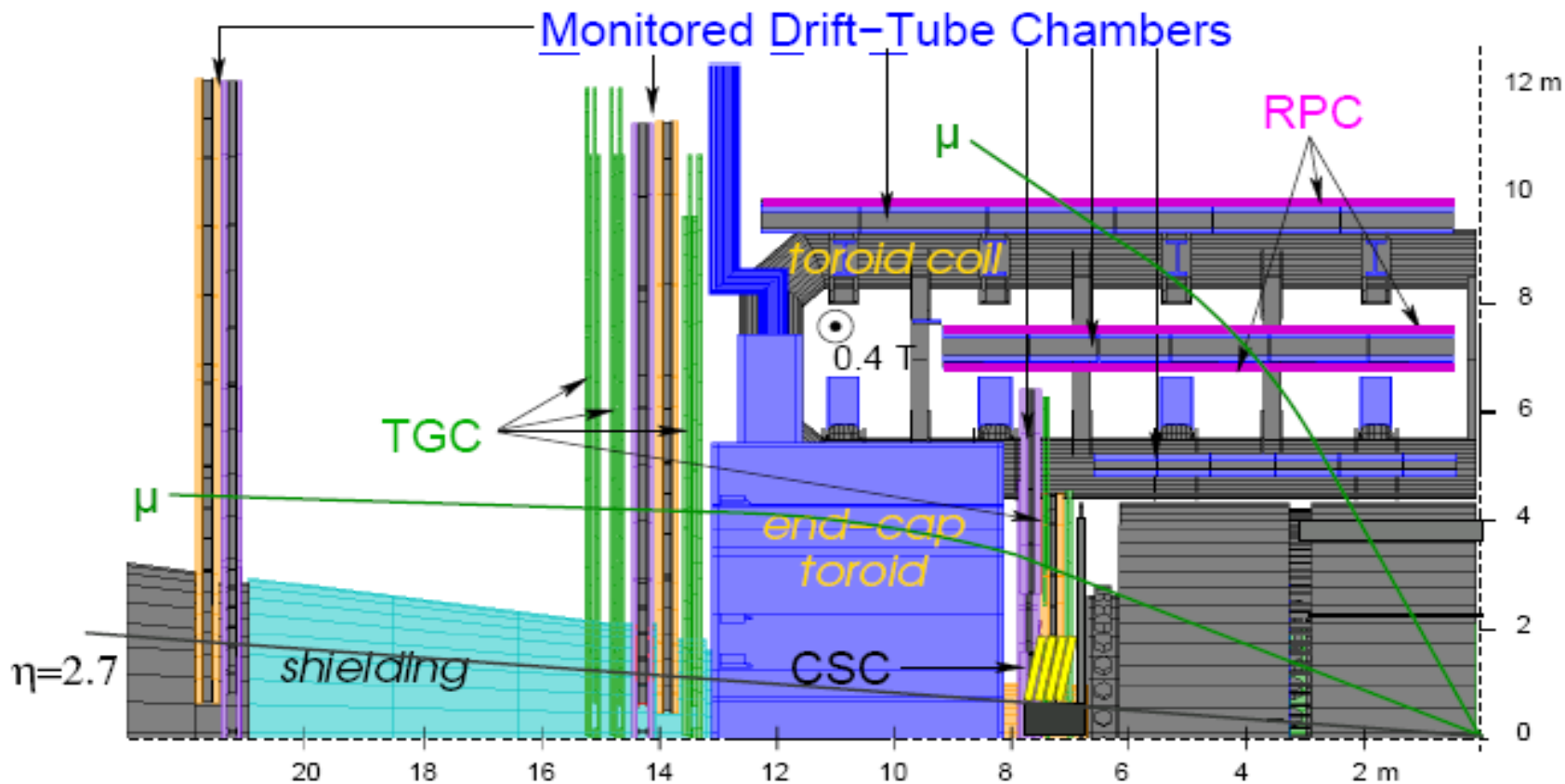
- «Акордеон» Свинец/Жидкий Аргон
- ~180 000 каналов
- Работает при -183°C
- 3 слоя разного размера
 - направление частиц
 - идентификация
- $\sigma_E/E = 10\%/\sqrt{E} \oplus 24.5\%/E \oplus 0.7\%$



Адронный Калориметр

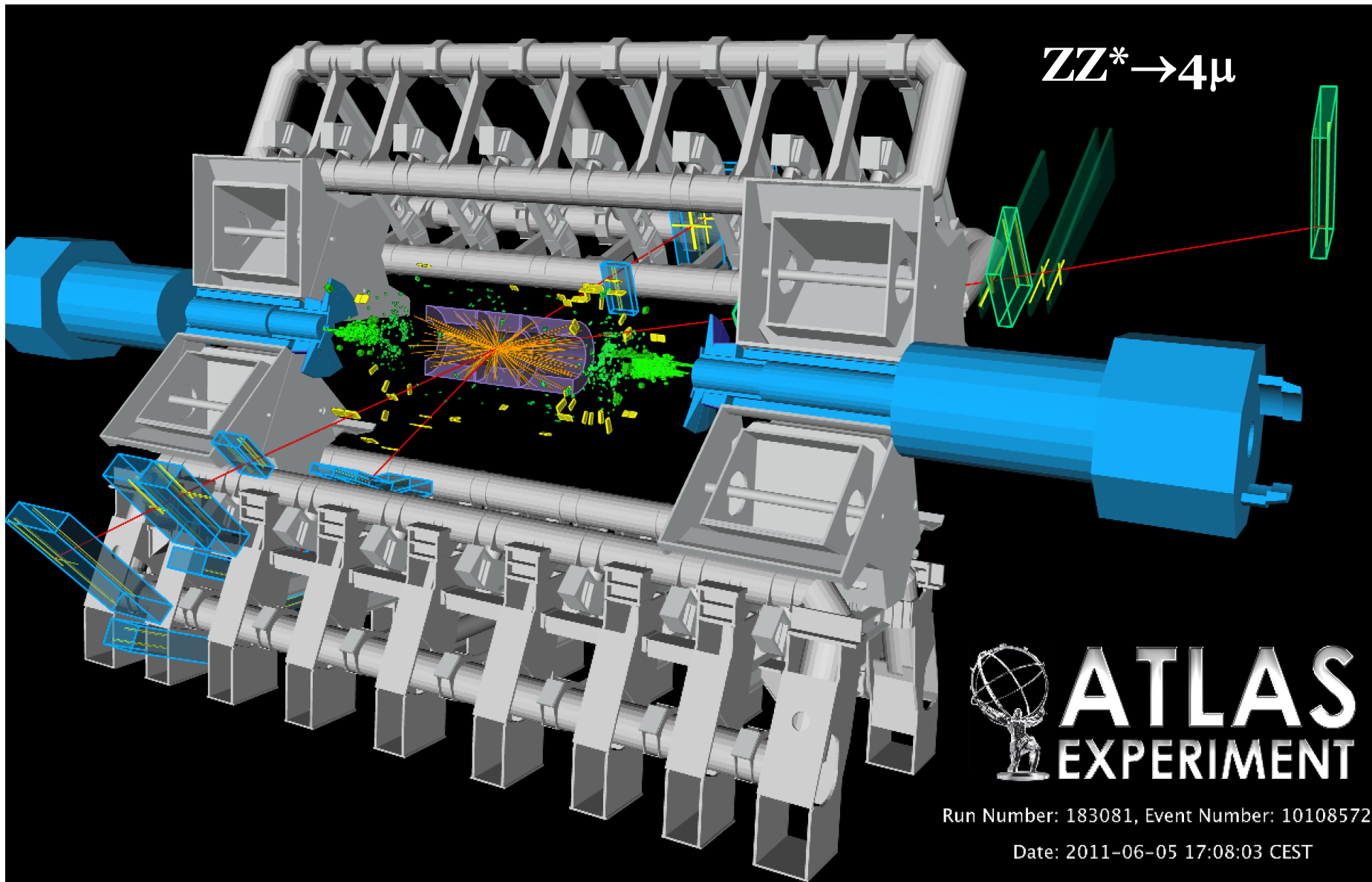
- 500к пластин из пластикового сцинтиллятора и сталь в центре
- Жидкий Аргон / Медь
- 3-4 слоя

Мюонная система

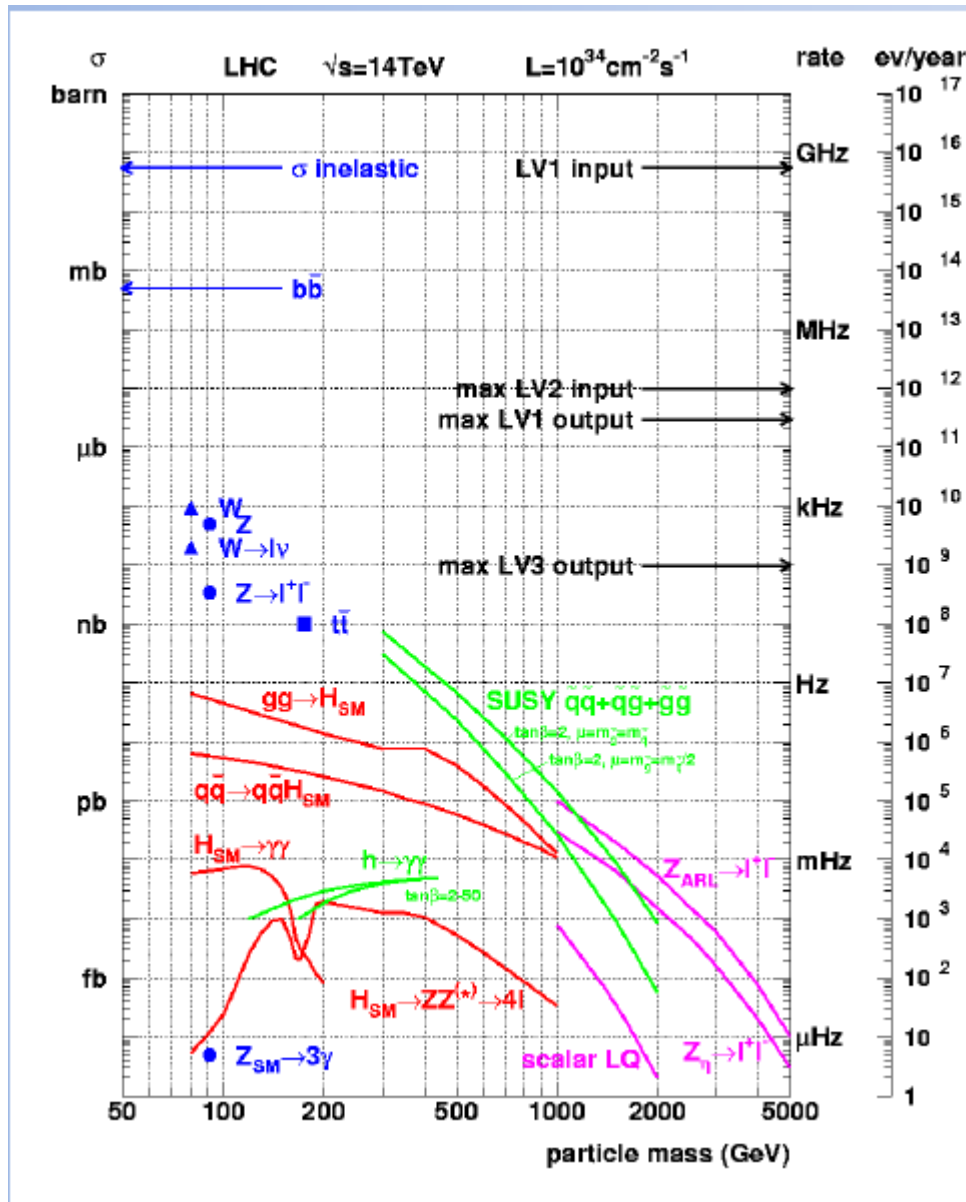


Мюоны проходят через весь детектор почти не теряя энергии
 Для них после калориметра есть специальная трековая система

	Измерение (точные)	Триггер (быстрые)
Центр	Monitored Drift Tubes (~1200)	Resistive Place Chambers (RPC) ~600
Концы	Cathode Strip Chambers (CSC)	Thin Gap Chambers (TGC) ~3600



Сечение рассеяния на БАК

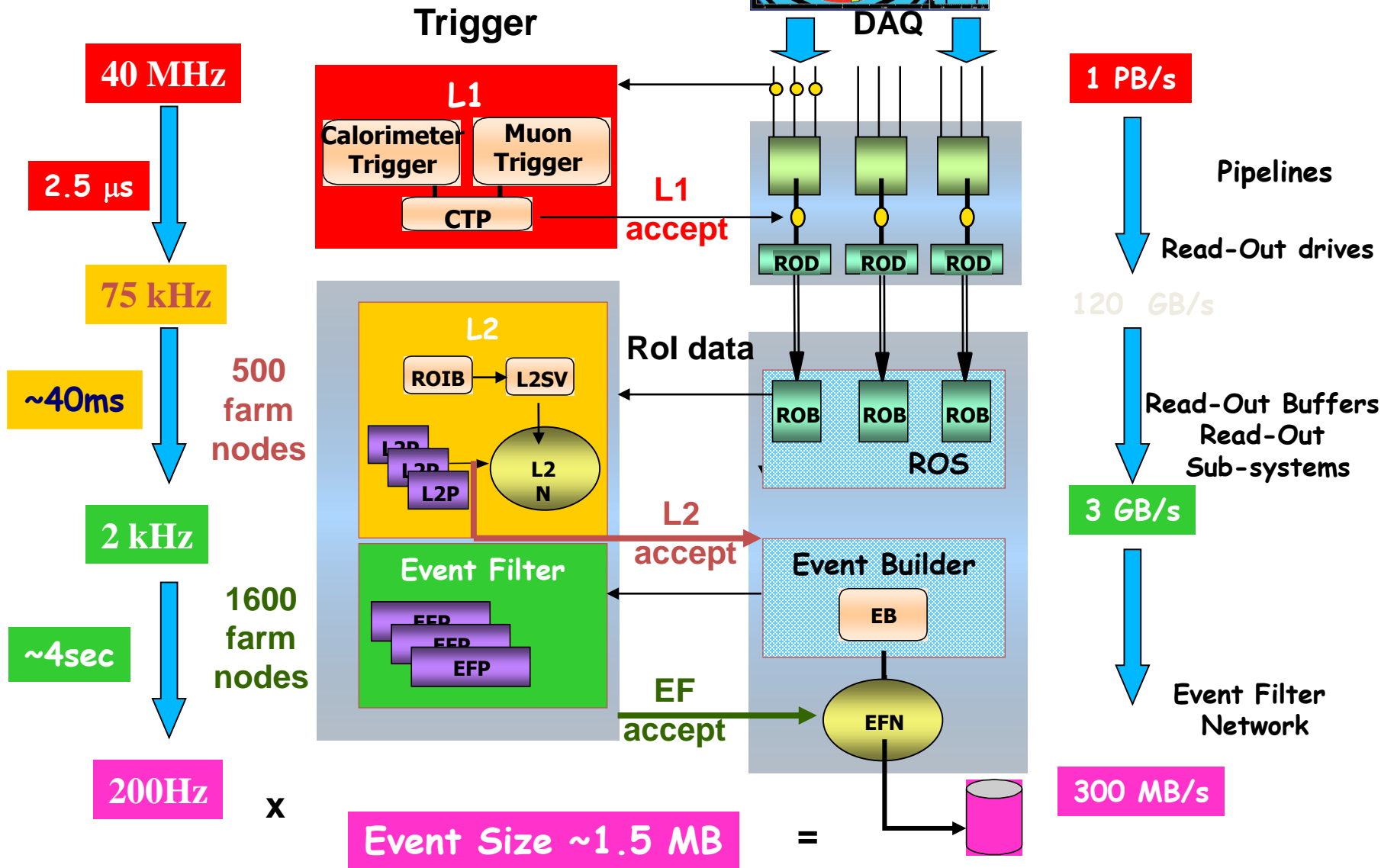
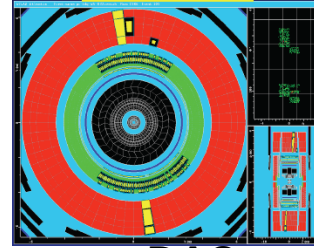


«Хорошо изученные процессы»,
нет необходимости регистрировать все события...

Физика LEP - большого электрон-позитронного коллайдера

«Новая Физика»
Это мы хотим выделить и записать для дальнейшего анализа...

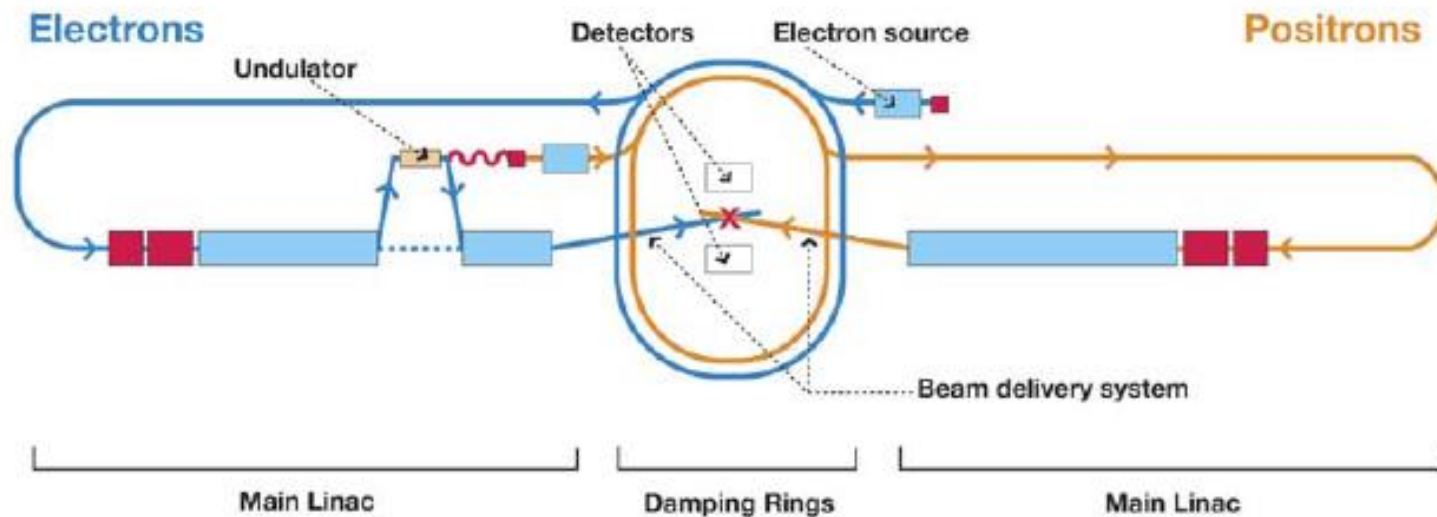
Сбор данных



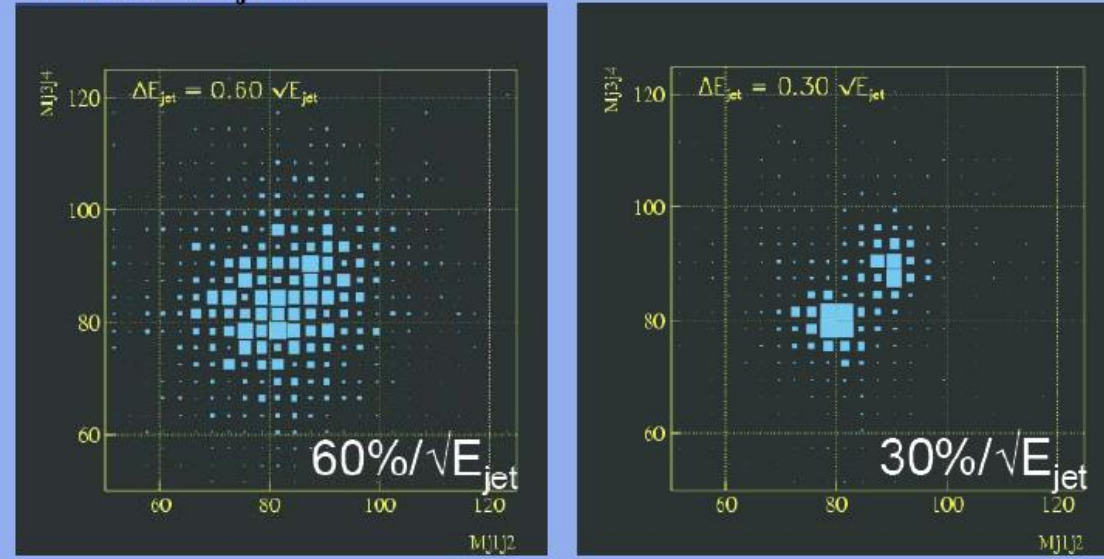
Международный линейный ускоритель



- Следующий большой проект: ILC
- Энергия: $2 \times 250 \text{ ГэВ}$ (upgrade $2 \times 500 \text{ ГэВ}$)
- 1 interaction region
- 2 детектора (3-4 проекта)



■ WW/ZZ → 4 jets:



Сегментация очень важна для разрешения струй!

Алгоритм потока частиц: калориметр работает как треккер.

particles in jet	fraction of energy in jet	detector	single particle resolution	jet energy resolution
charged particles	60 %	tracker	$\frac{\sigma_{p_t}}{p_t} \sim 0.01\% \cdot p_t$	negligible
photons	30 %	ECAL	$\frac{\sigma_E}{E} \sim 15\%/\sqrt{E}$	$\sim 5\%/\sqrt{E_{jet}}$
neutral hadrons	10 %	HCAL+ECAL	$\frac{\sigma_E}{E} \sim 45\%/\sqrt{E}$	$\sim 15\%/\sqrt{E_{jet}}$

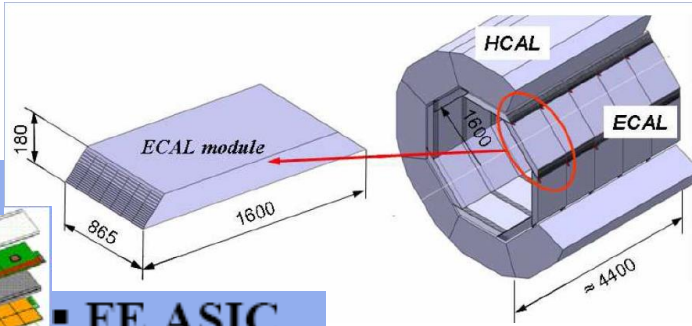


Будущие эксперименты

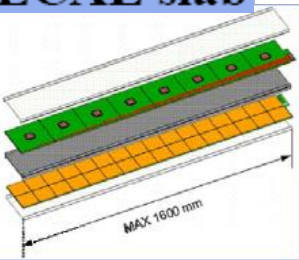
Электромагнитный калориметр

- W/Si

ECAL slab



- FE ASIC
- PCB board
- Si pads



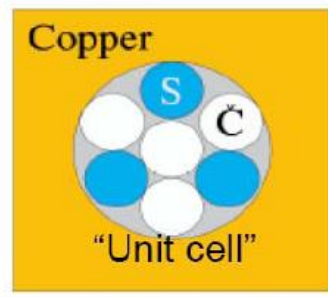
- Электроника в детекторе
- 5x5мм² сегментация
- 0.6-1.2X₀ сегмент. глубины (23X₀)

- W+сцинт. стрипы

- DREAM:

сцинтиллятор+

Черенков волокна

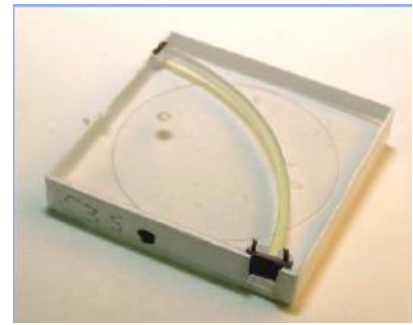


Адронный калориметр

- Аналоговые сцинт тайлы

-3x3см²

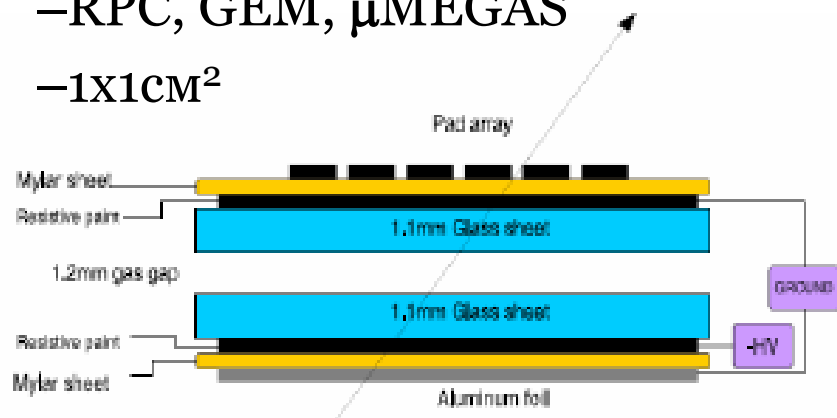
-Кремневый ФЭУ



- Газовый цифровой

-RPC, GEM, μMEGAS

-1x1см²

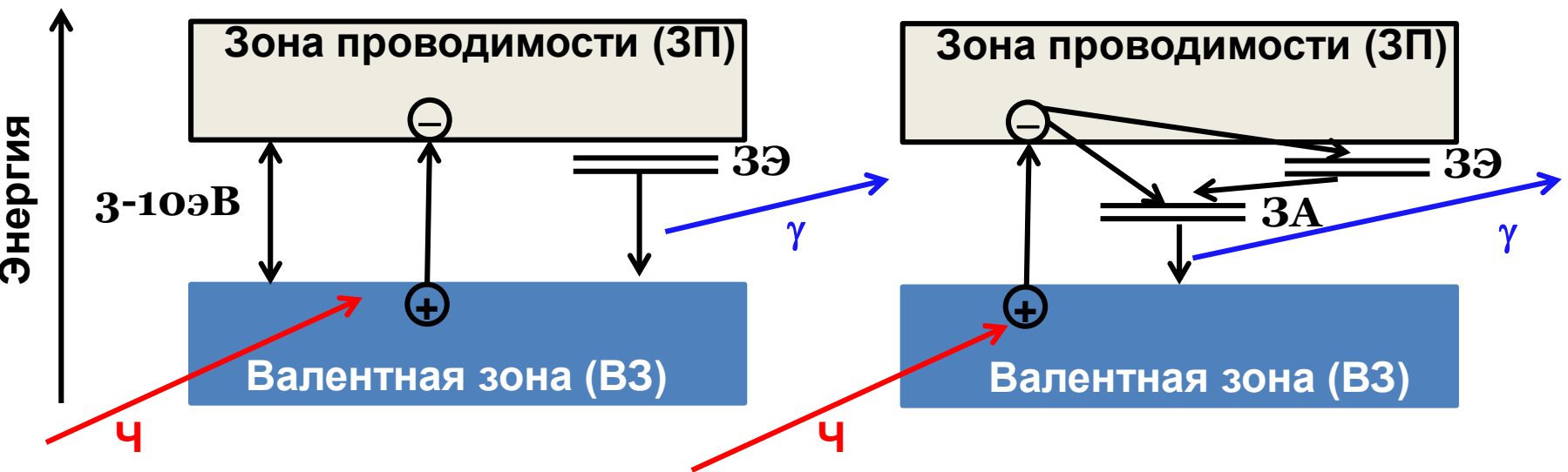


Сцинтилляторы

- Вещества излучающие фотоны при облучении (непроводники)
- Органические (пласмасы) и неорганические (кристаллы)...

Зонные уровни

Зонные уровни с примесями



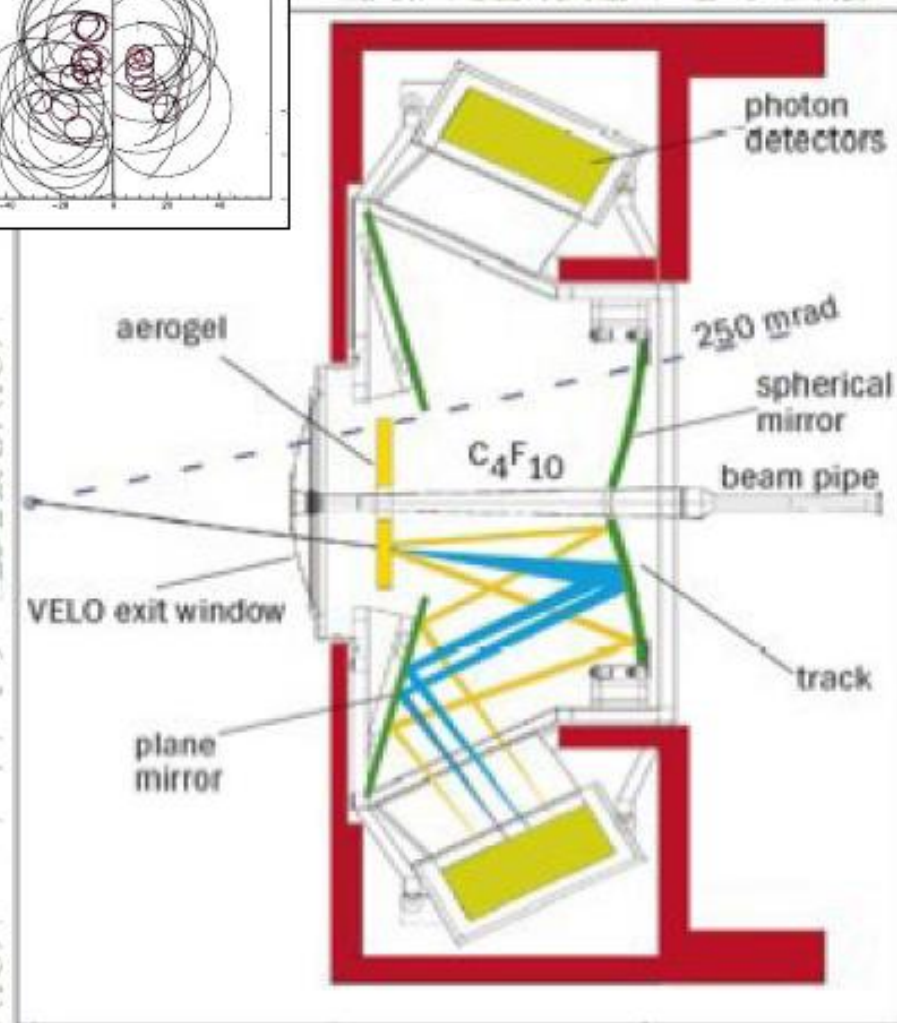
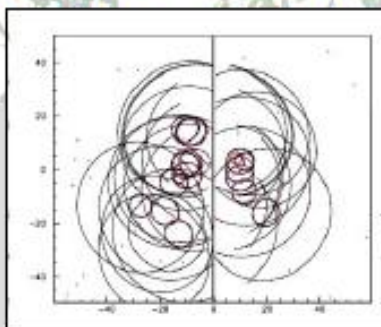
Входящая частица (Ч) выбивает электрон в зону проводимости.

Электрон рекомбинирует с дыркой или образует экситон (электронно-дырочное состояние). Зона экситонов (ЗЭ) ниже ЗП.

При де-экситации экситона производится **фотон (γ)**.

Примеси создают дополнительные уровни (ЗА) и облегчают процесс.

- Важный элемент эксперимента LHCb
- Уникальный для LHCb
- Позволяет различать заряженные частицы, в частности отличать каоны от пионов
- Открывает массу интересных возможностей



Преимущества калориметров

- Чувствительность ко всем видам частиц (заряженных и нет)
- Энергетическое разрешение улучшается с E

$$\frac{\sigma}{E} \approx \frac{1}{\sqrt{E}} \quad \text{калориметр}$$

$$\frac{\sigma}{p} \approx p \quad \text{магнитный спектрометр}$$

- Многопрофильные детекторы
 - Измерение энергии (основное применение)
 - Измерение направления частицы, начала ливня (сегментация)
 - Идентификация частиц (различный сигнал от электронов, адронов, гамма-квантов)
 - Измерение времени прихода частиц
 - Быстрая реакция → удобно для триггерной системы
- Достаточно выгодны по цене
 - Толщина для поглощения ливня $\sim \log E$ (в спектрометре $\sim \sqrt{p}$)

Геометрия калориметров

Гомогенные/Однородные

Неоднородные/Сандвич

слоя поглощающего (большое Z) и детектирующего материалов

Энергетическое разрешение

😊 (2-5%)

☹️ (5-20%,

$\sim \sqrt{\text{толщина поглощающего слоя}}$

Сегментация



(поперечная)



(поперечная и продольная)

Компенсация : разница между сигналом от электронов и адронов (для измерения энергий струй)



Цена



Все адронные калориметры



Однородные калориметры

Полупроводниковые (Ge, Si)

- ✓ Великолепное разрешение (~кэВ)

$$\frac{\sigma}{E} \propto \frac{\sqrt{F}}{\sqrt{N_{eh}}}, \quad F \ll 1 \text{ (фактор Фано)} \\ N_{eh} \approx 10^5$$

- ✗ Оптимальны для низких энергий
- ✗ Очень дорогие

Инертная жидкость (LKr)

- ✓ Хорошая радиационная стойкость
- ✓ Однородность детектора

- ✗ Необходимость охлаждающего и очистительного оборудования

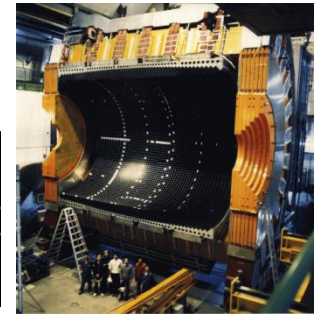


$$3.2\% / \sqrt{E} \oplus 0.42\% \oplus 0.09/E$$

Черенков (PbO)

- ✗ Низкий световыход ($1/10^4$ NaI)
- ✗ Плохая радиационная стойкость (PbF₂ лучше)
- ✗ $\lambda < 300-350\text{nm}$

$$5\% / \sqrt{E}$$



Сцинтилляторы

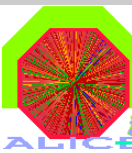
Очень популярны!

- ✓ Высокий световыход
- ✓ Высокая плотность
- ✗ Не однородность кристаллов
- ✗ Цена

✓ Свойства «на заказ»

$$2-3\% / \sqrt{E} \oplus 0.5-1.4\% \oplus 0.0-0.2/E$$

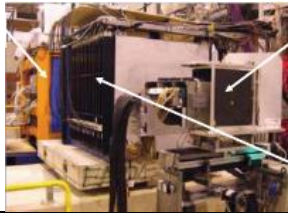
KTeV
Kaons at the Tevatron



Неоднородные калориметры

Полупроводниковые (Si)

- ✓ Высокая плотность
- ✓ Хороший сигнал
- ✓ Радиационная стойкость?
- ✗ Дорого



Инертная жидкость

- ✓ Хорошая радиационная стойкость
- ✓ Однородность детектора
- ✓ Легко калибруются
- ✓ Хорошее разрешение
- ✗ Необходимость охладительного и очистительного оборудования



$$\lesssim 10\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

Газовые

$$\lesssim 20\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

- ✗ Низкая плотность
- ✗ Плохая стабильность
- ✗ Плохая однородность
- ✓ Легко сегментируются
- ✓ Дешево



ALEPH

Сцинтилляторы

$$5.7-18\% / \sqrt{E}$$

- ✓ Легко сегментируются
- ✓ Не дороги
- ✓ Быстрый сигнал
- ✓ Достаточный световой выход
- ✓ Компенсируемые
- ✗ Старение, радиация
- ✗ Неоднородность световых выходов



ZEUS



ГНСП

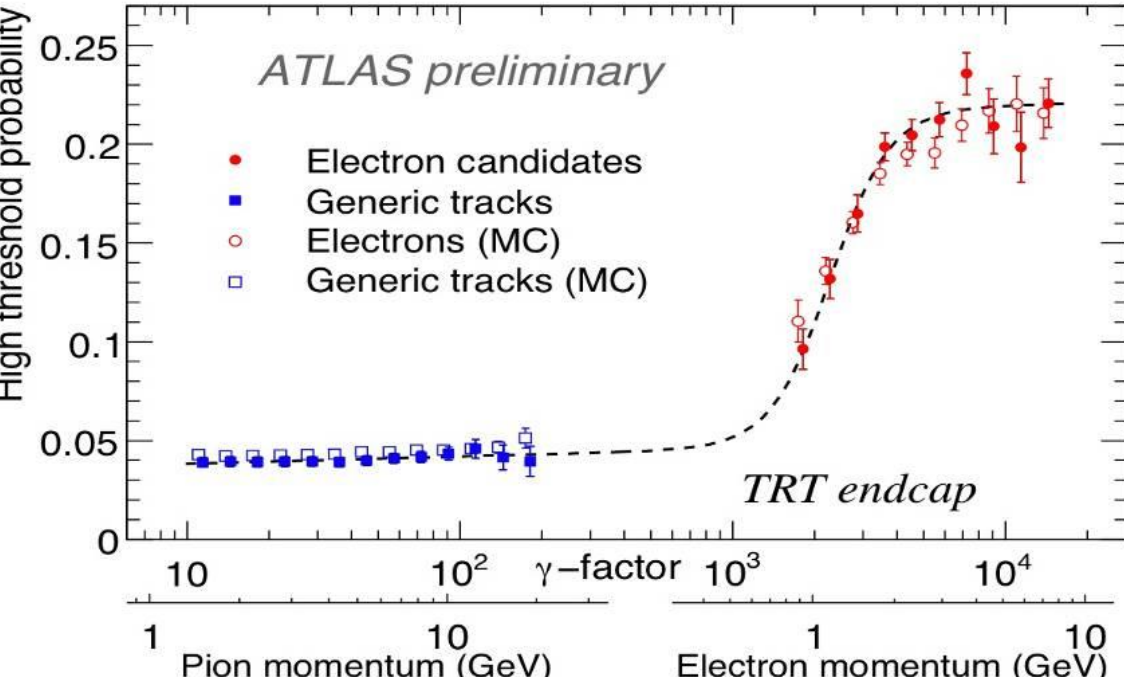
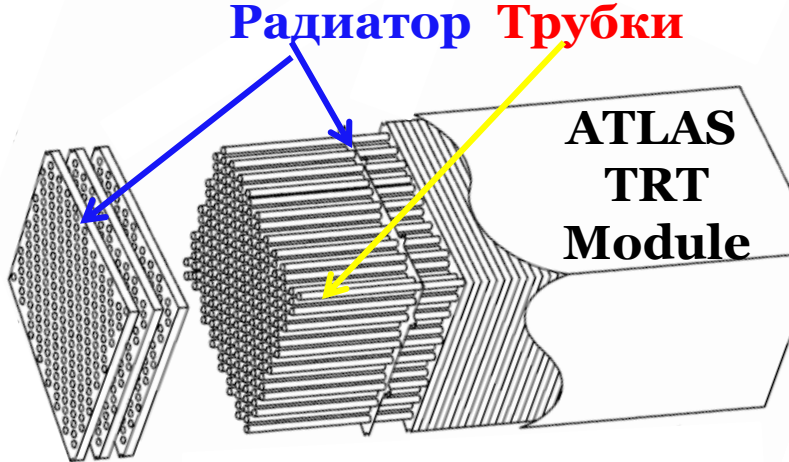
Детекторы переходного излучения

Фотоны переходного излучения возникают при переходе ультра-релятивистской заряженной частицы ($\gamma = E/m > 10^3$) из одной среды в другую

Провода в «соломенных трубках» заполнены 70% Xe+27% CO₂+3% O₂

Радиатор: полипропилен (волокна/фольга)

Два порога считывания сигнала



Из-за малой массы скорость электрона выше других частиц той же энергии.

Больше переходных фотонов. Больше высокопороговых сигналов.

Идентификация электронов $1 < p_T < 150$ ГэВ