

Введение в детектирование частиц

Татьяна Берже-Гринева
(LAPP Аннесу, Франция)

Украина в ЦЕРНе

- 1993 Украина и ЦЕРН подписали соглашение о сотрудничестве
- Украина принимает участие в ALICE, CMS и LHCb экспериментах на БАКе и в научных исследованиях и разработках новых ускорительных технологий.
- 2011 МАНУ и ЦЕРН подписали декларацию об участии студентов и учителей в программах ЦЕРНа (2011, 2012, 2013, 2016)
- 2016 Украина принята в Ассоциированные члены ЦЕРНа



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

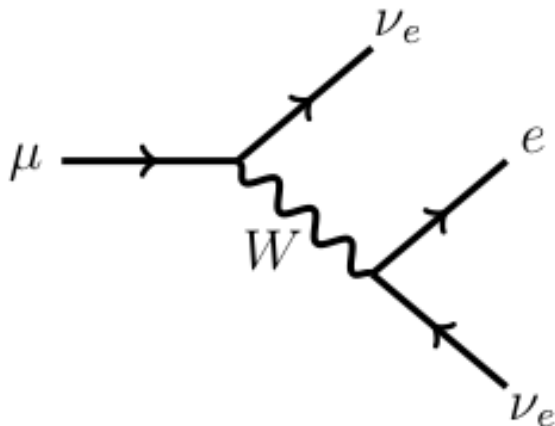
Natural units ($\hbar = c = 1$)

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

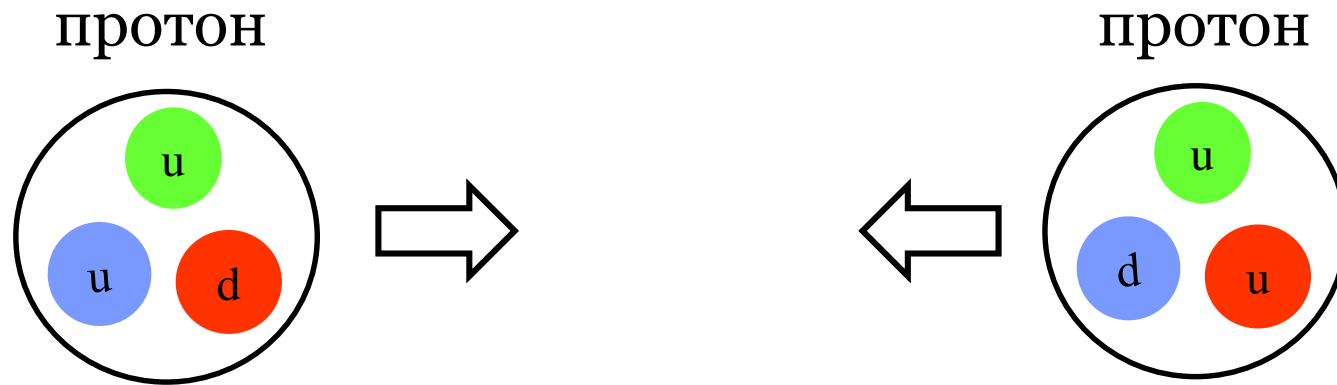
Стабильные частицы: **e** (электрон), γ (фотон), нейтрино, p(uud) протон

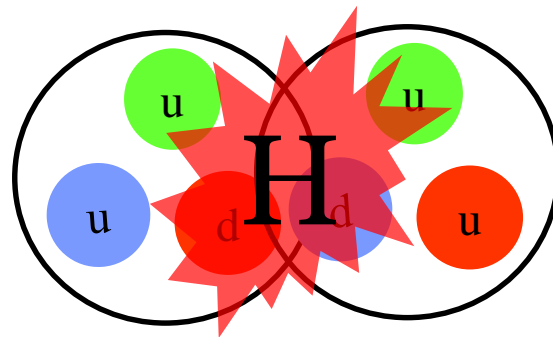
Долгоживущие частицы: **μ** (мюон), π^+ (u \bar{d}) пион, K^+ (u \bar{s}) каон, n(udd) нейтрон...



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

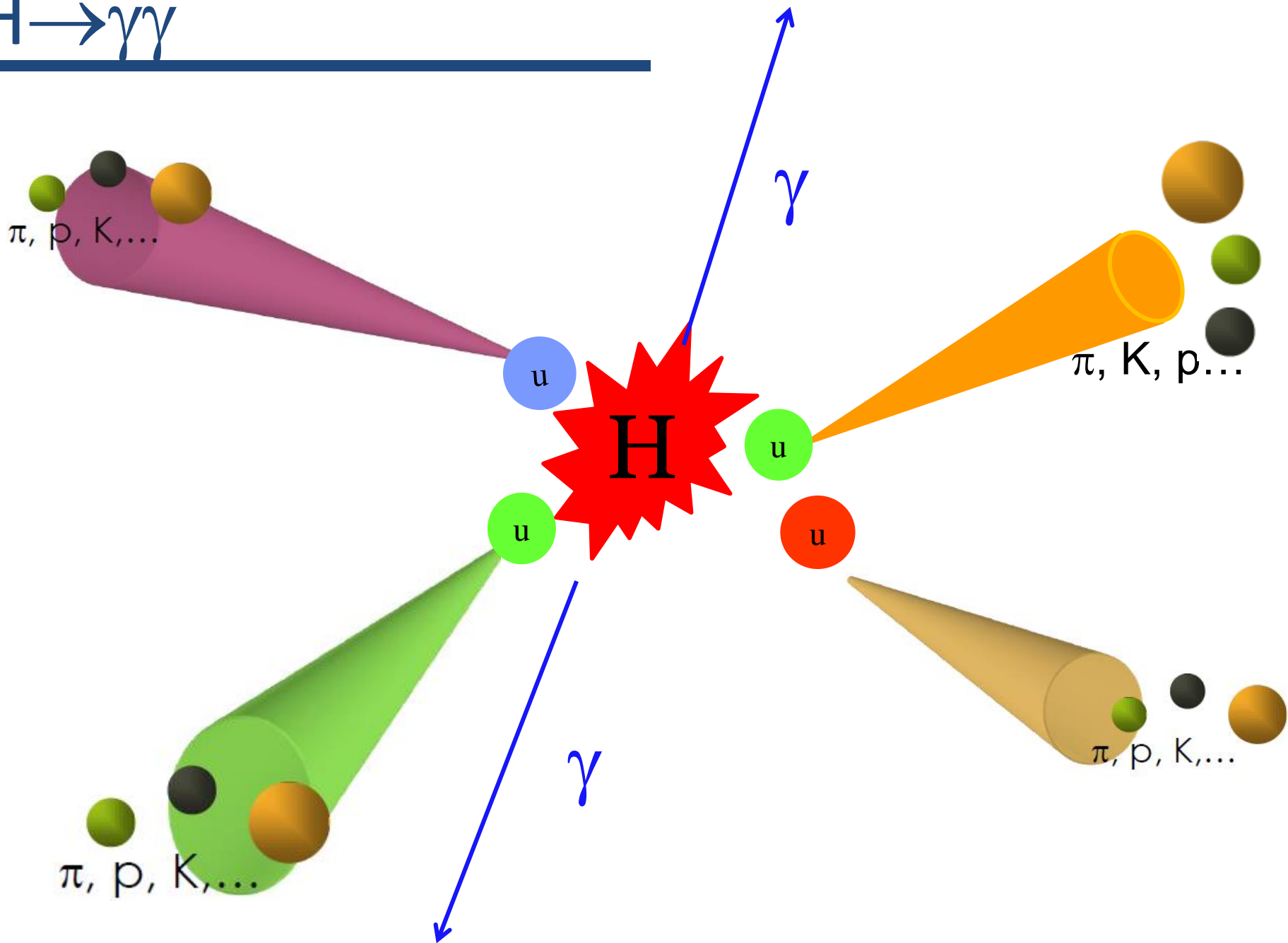
А другие частицы? Пример события



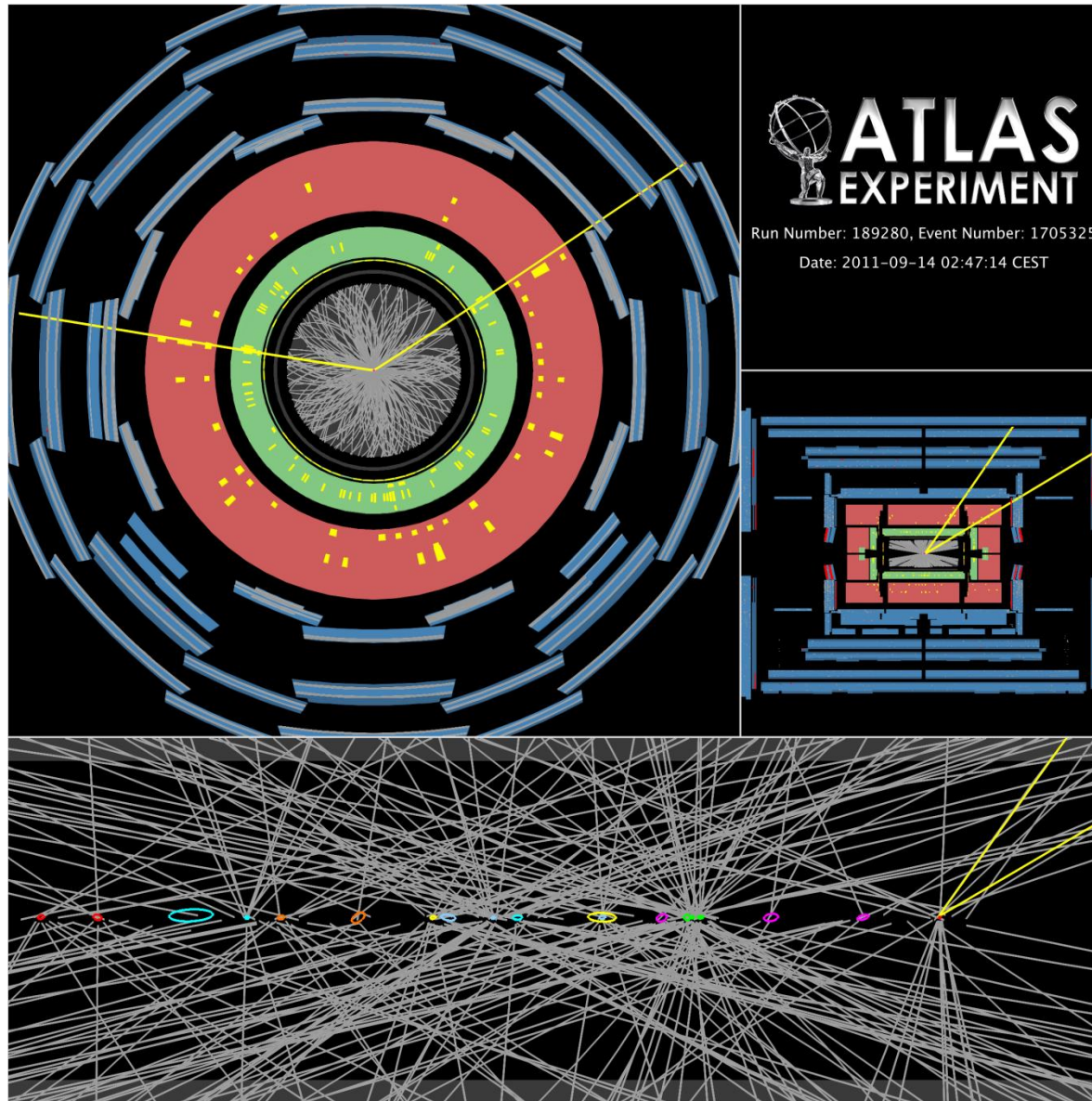


Бозон Хигса

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

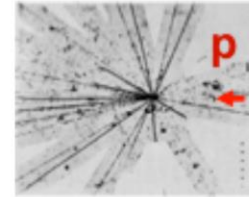


Много столкновений одновременно!

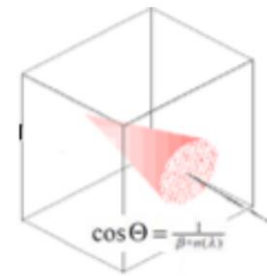
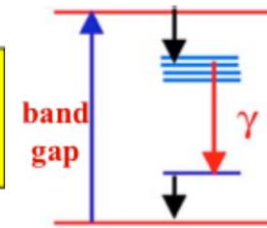
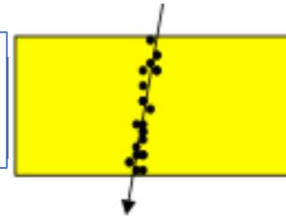


Этапы детектирования

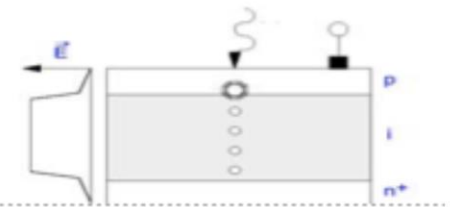
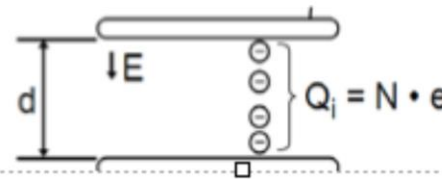
1. Разные частицы взаимодействуют с веществом по-разному



2. Энергия преобразуется в сигнал, зависит от материала



3. Сбор сигнала, зависит от сигнала и типа детектора



4. Конструкция детектора зависит от физических процессов и условий эксперимента



Задача детектора

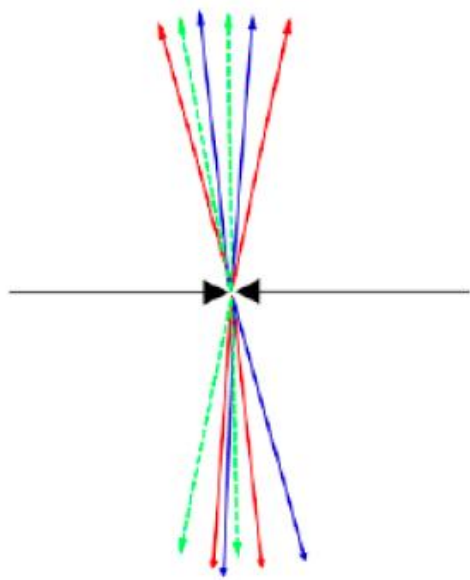
Для того чтобы понять, что произошло при столкновении надо

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

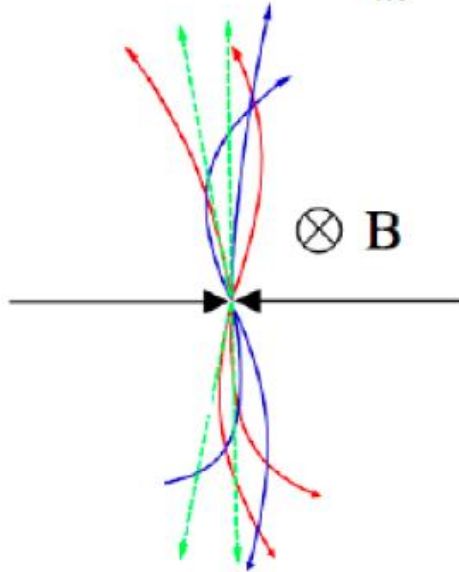
Разные частицы взаимодействуют с веществом по разному

Измерение заряда и импульса частиц

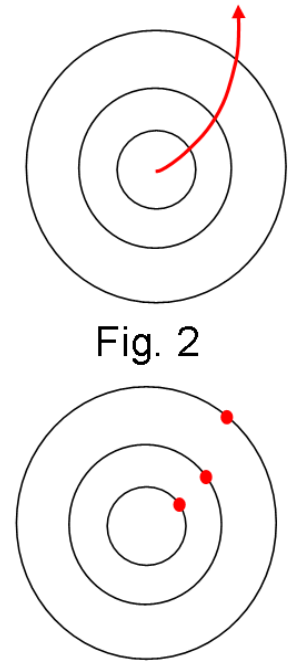
— $q > 0$ — $q = 0$ — $q < 0$ $\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$



без поля



с магнитным полем



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.

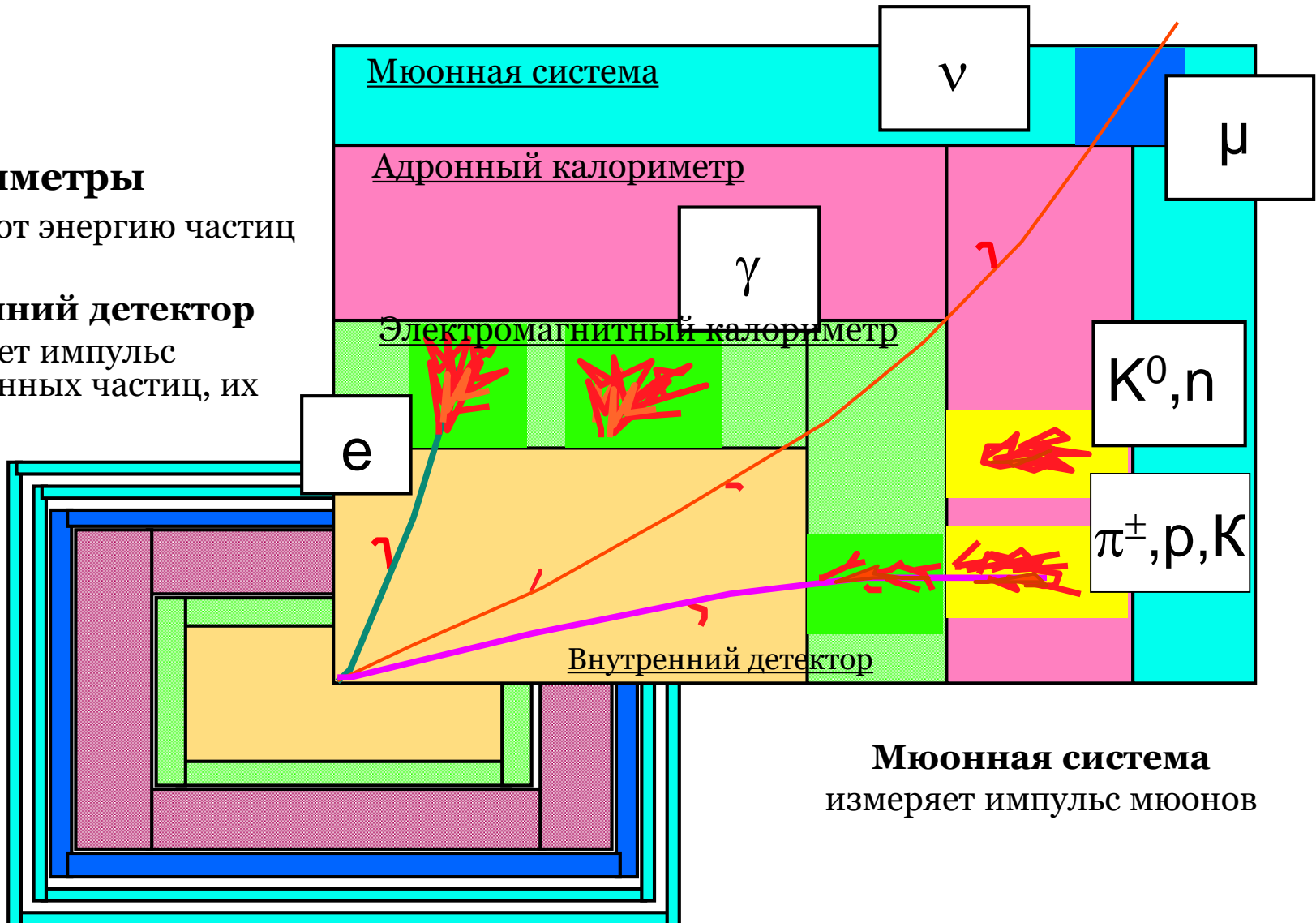
Современные детекторы

Калориметры

- измеряют энергию частиц

Внутренний детектор

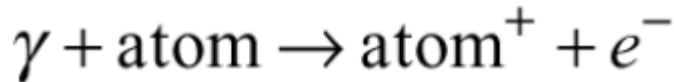
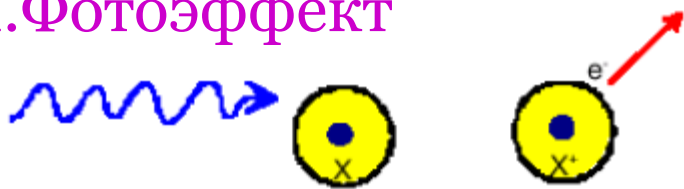
- измеряет импульс заряженных частиц, их заряд



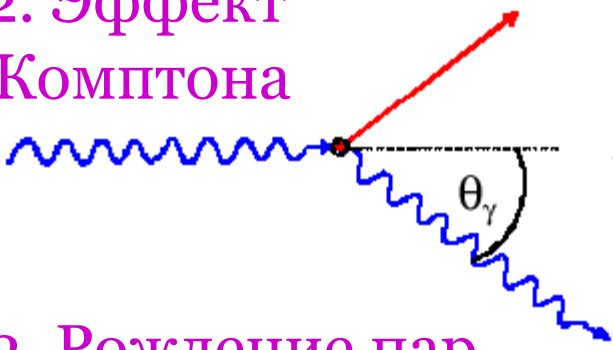
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ С ВЕЩЕСТВОМ

ФОТОНЫ (γ)

1. Фотоэффект



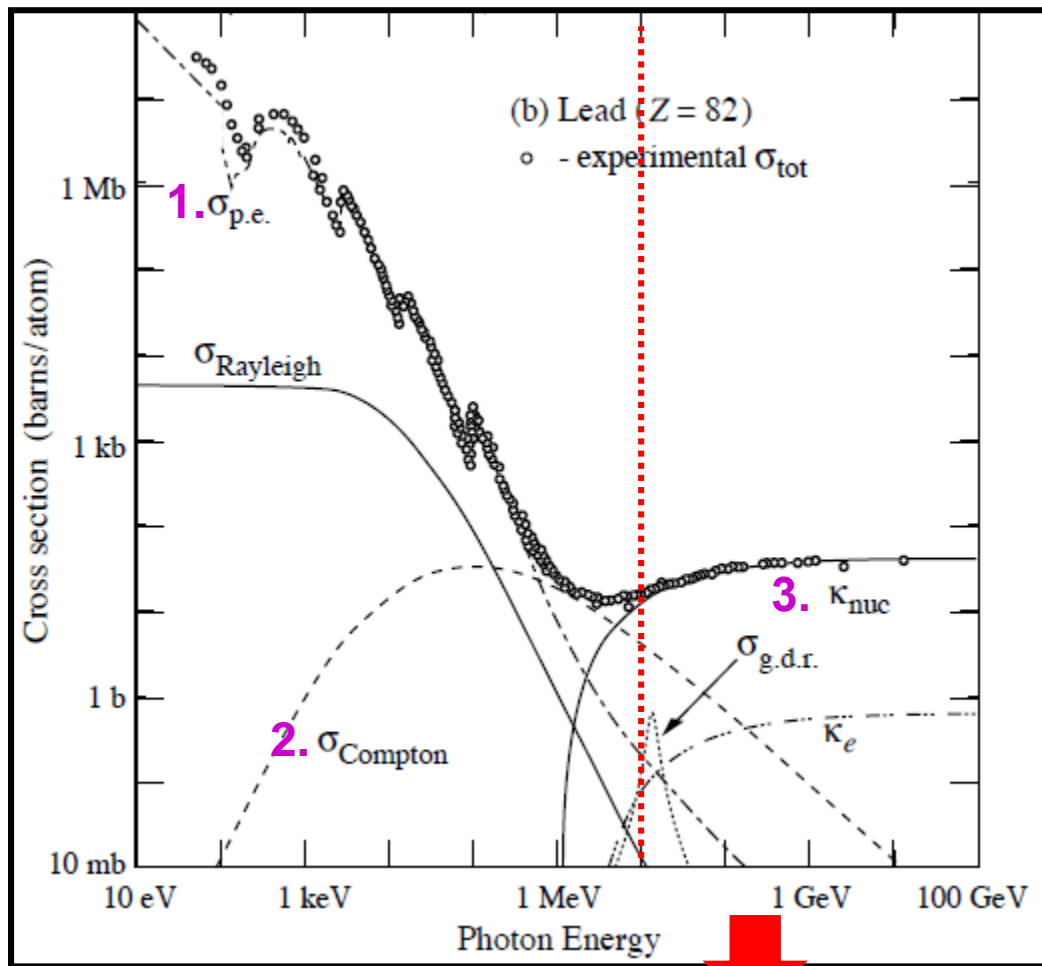
2. Эффект Комптона



3. Рождение пар e^+e^- в поле ядра

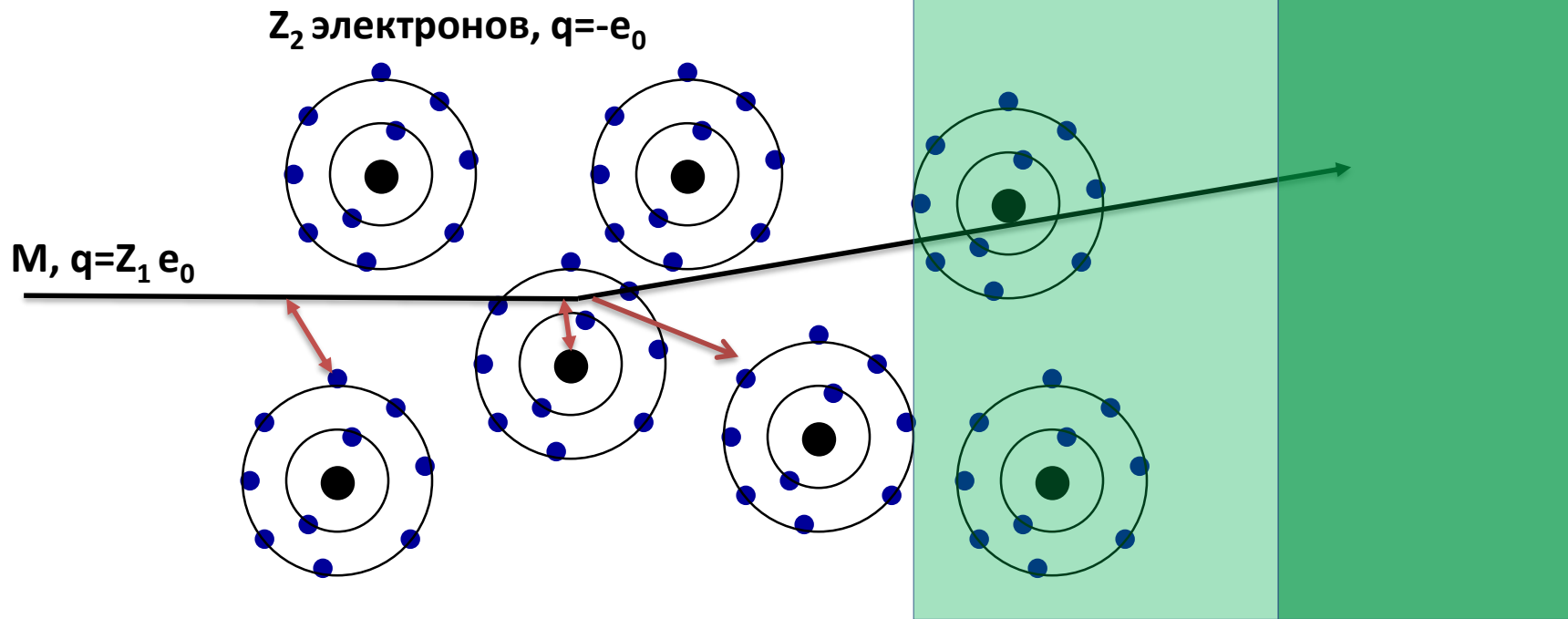


Plots from C.Joram



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

Электроны и другие заряженные частицы



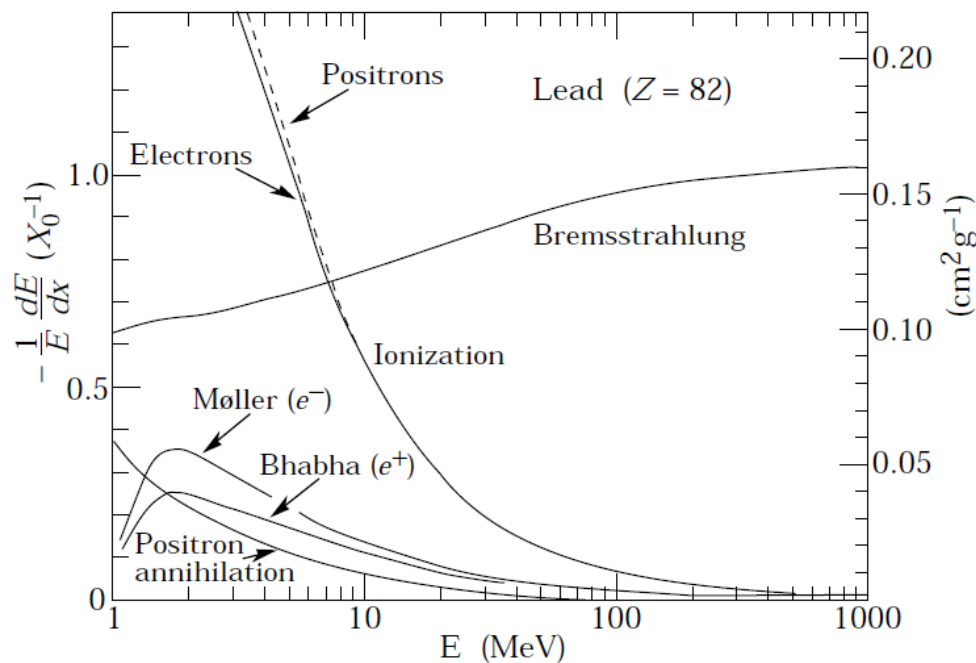
Потеря энергии при взаимодействии с атомарными электронами,
 \Rightarrow
атомы
ионизируются

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



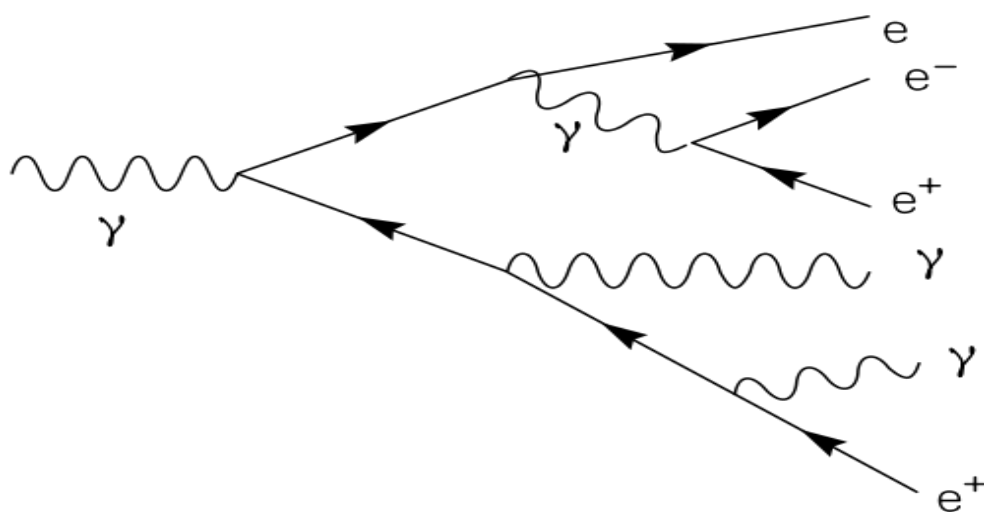
При энергиях электрона $>5-10$ ГэВ тормозное излучение доминирует.

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

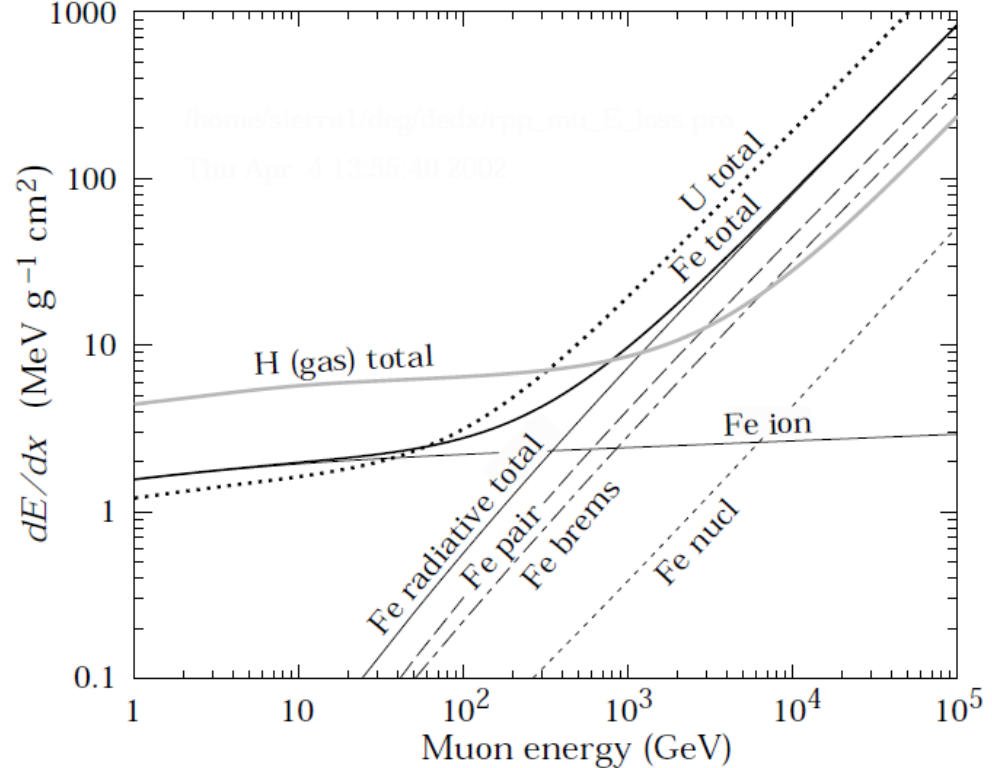
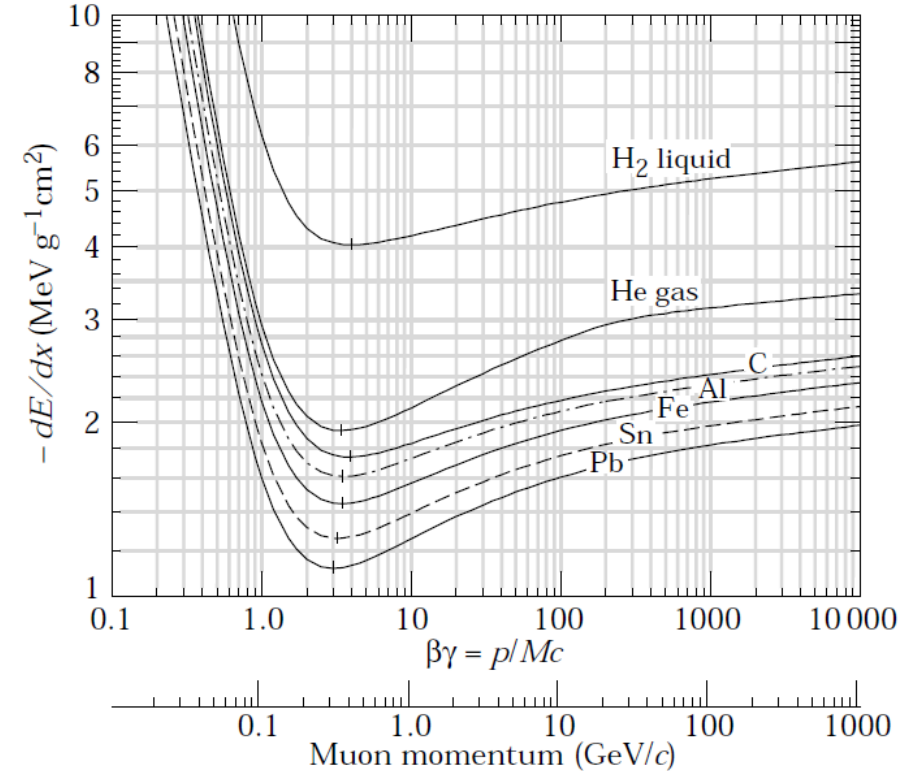
Электроны излучают фотоны, те производят электрон-позитронные пары и т.д. (электро-магнитные ливни)

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

Тысячи частиц при начальной энергии E_0 больше чем 1 ГэВ



Мюоны (μ)

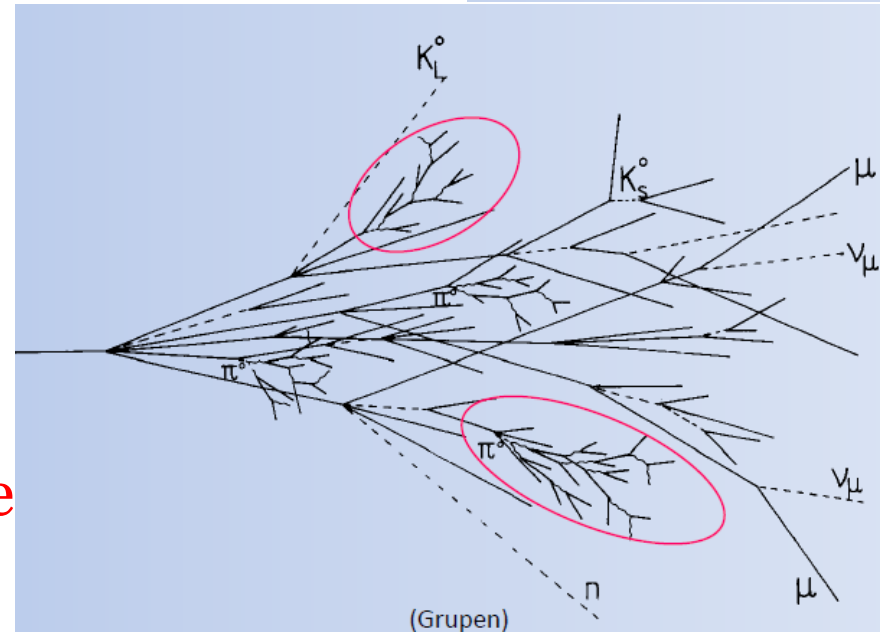
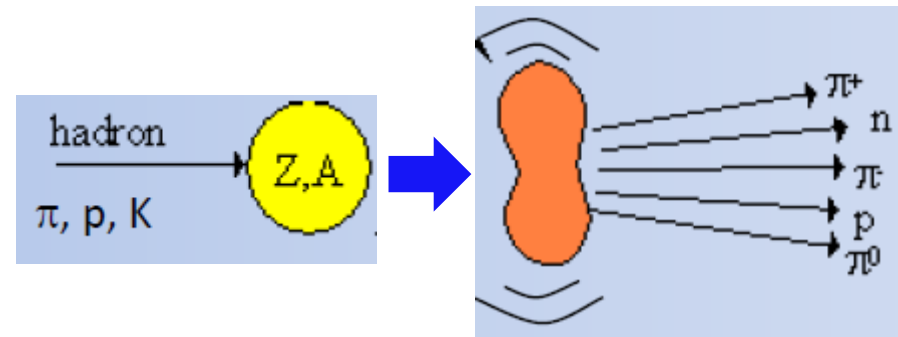


- Мюон – тяжелый электрон
 - Тормозное излучение при энергиях > 500 ГэВ
 - Минимально ионизирующая частица
 - Почти не взаимодействует

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**)

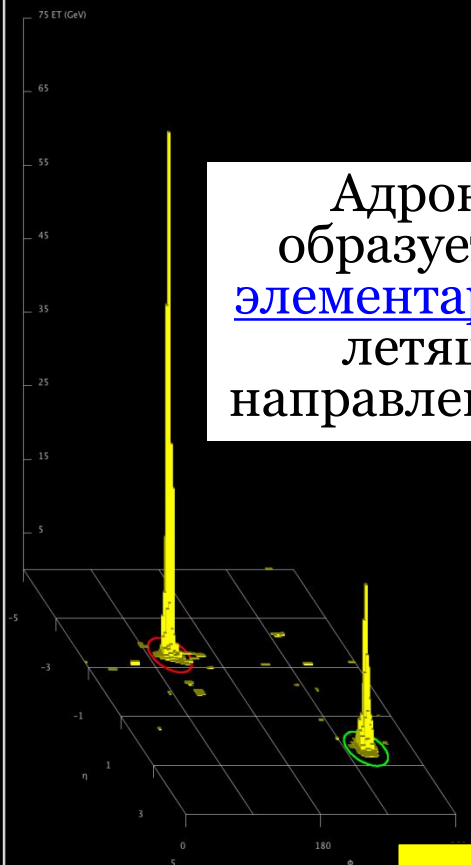
- Физика довольно сложна
- Внутри ливня появляются также фотоны и электроны, рождая электромагнитные ливни
- Размножение пока энергия частиц в ливне достаточно большая $> \text{ГэВ}$



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

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

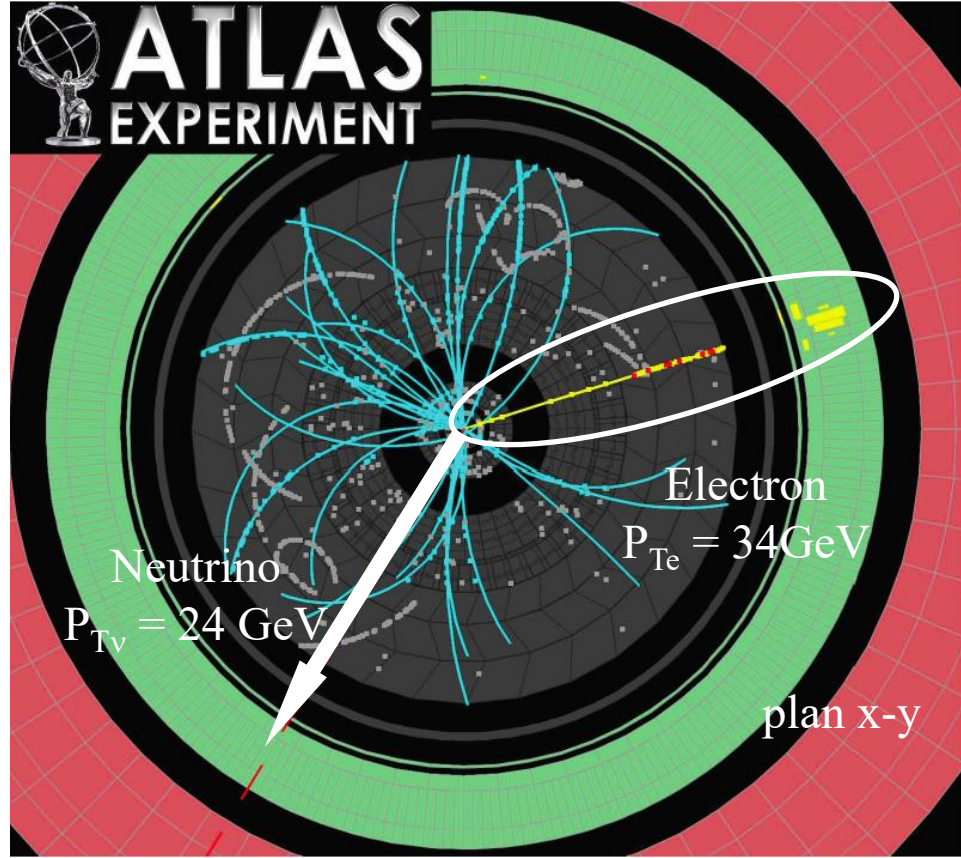
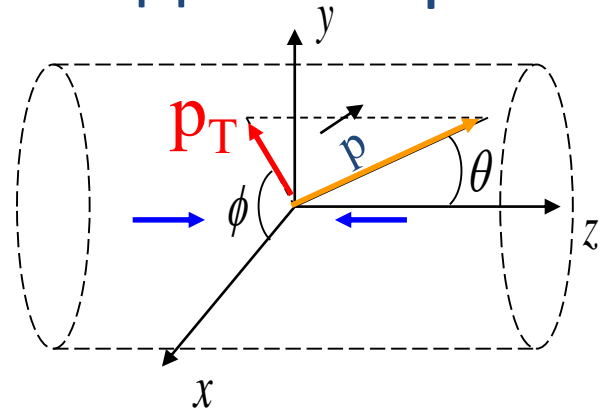
Недостающая энергия

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

– Это может быть нейтрино...

Или новая частица!

...но об этом в других лекциях...



ПРИНЦИПЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Первые детекторы

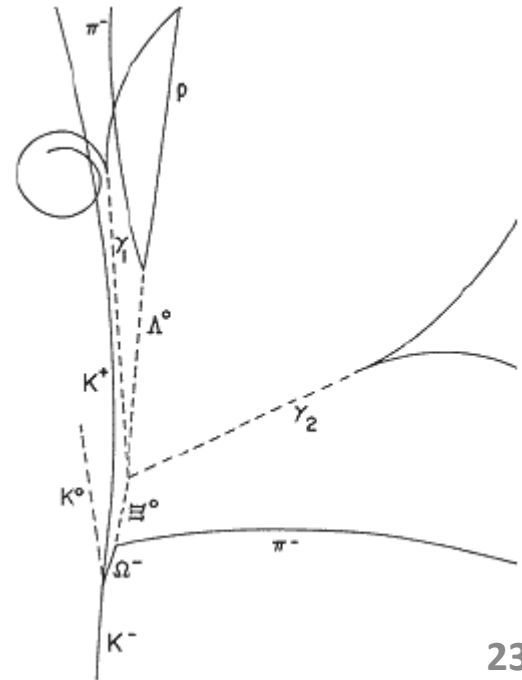
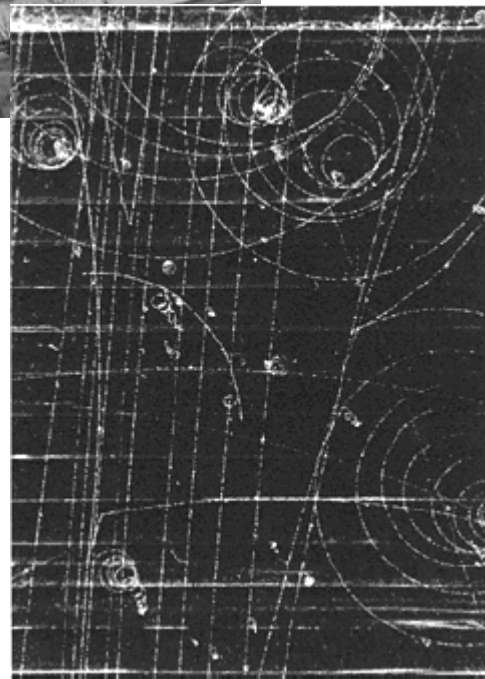
- «Типичные» энергии очень малы по сравнению с макроскопическими размерами детекторов
- Надо использовать физические эффекты чувствительные к малым возмущениям
- Системы в состоянии неустойчивого равновесия
 - переохлажденный пар **туманной камере Вильсона** (Нобелевская Премия 1927)
 - Образование капелек 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.

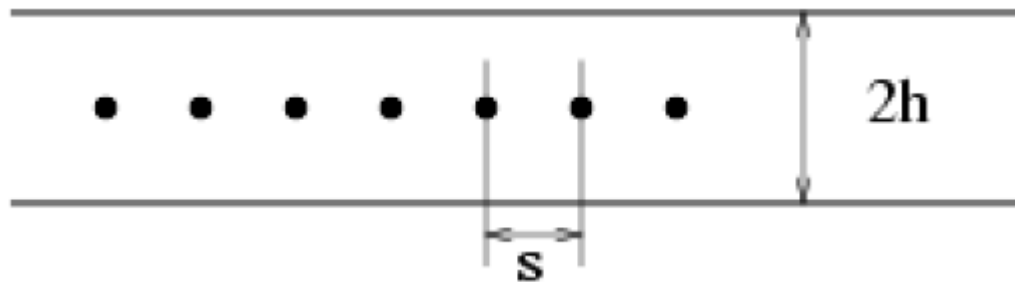


К современным детекторам

- 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

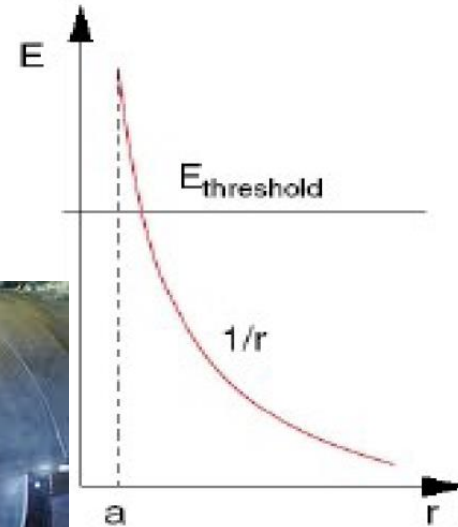
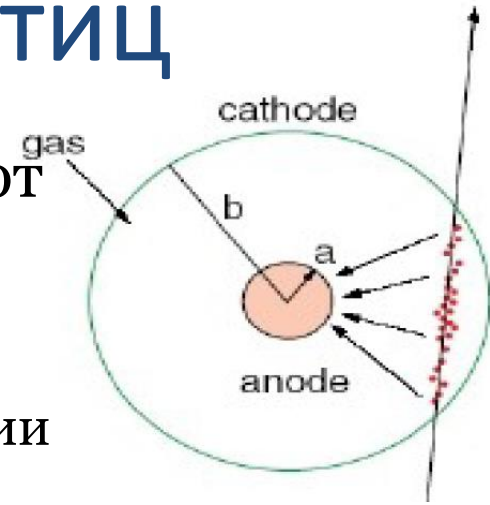


Измерение траектории частиц

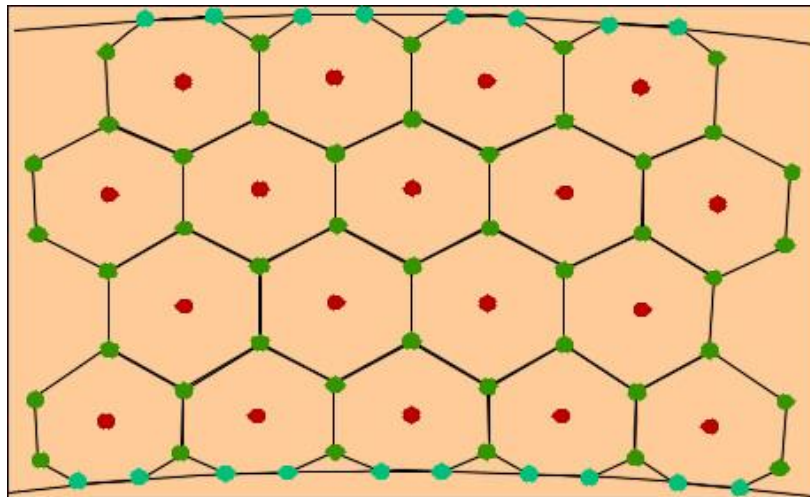
Частица ионизирует газ, электроны дрейфуют к тонкой проволоочке под напряжением

- 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



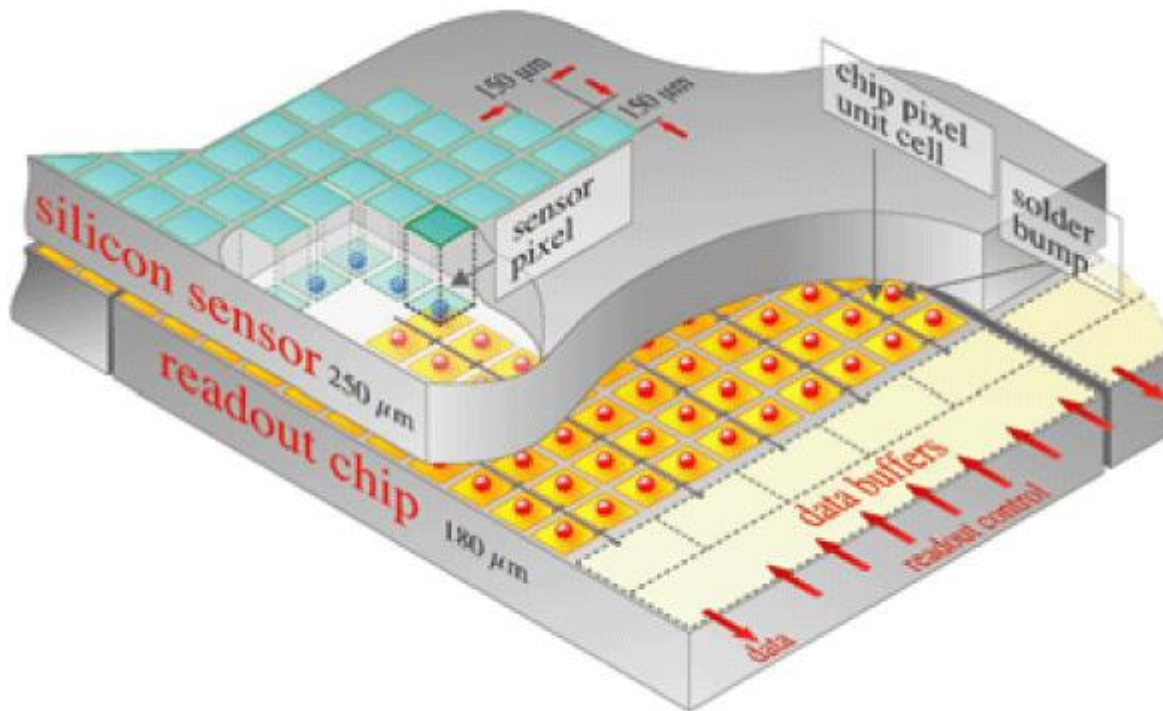
● сенсор ● под напряжением

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



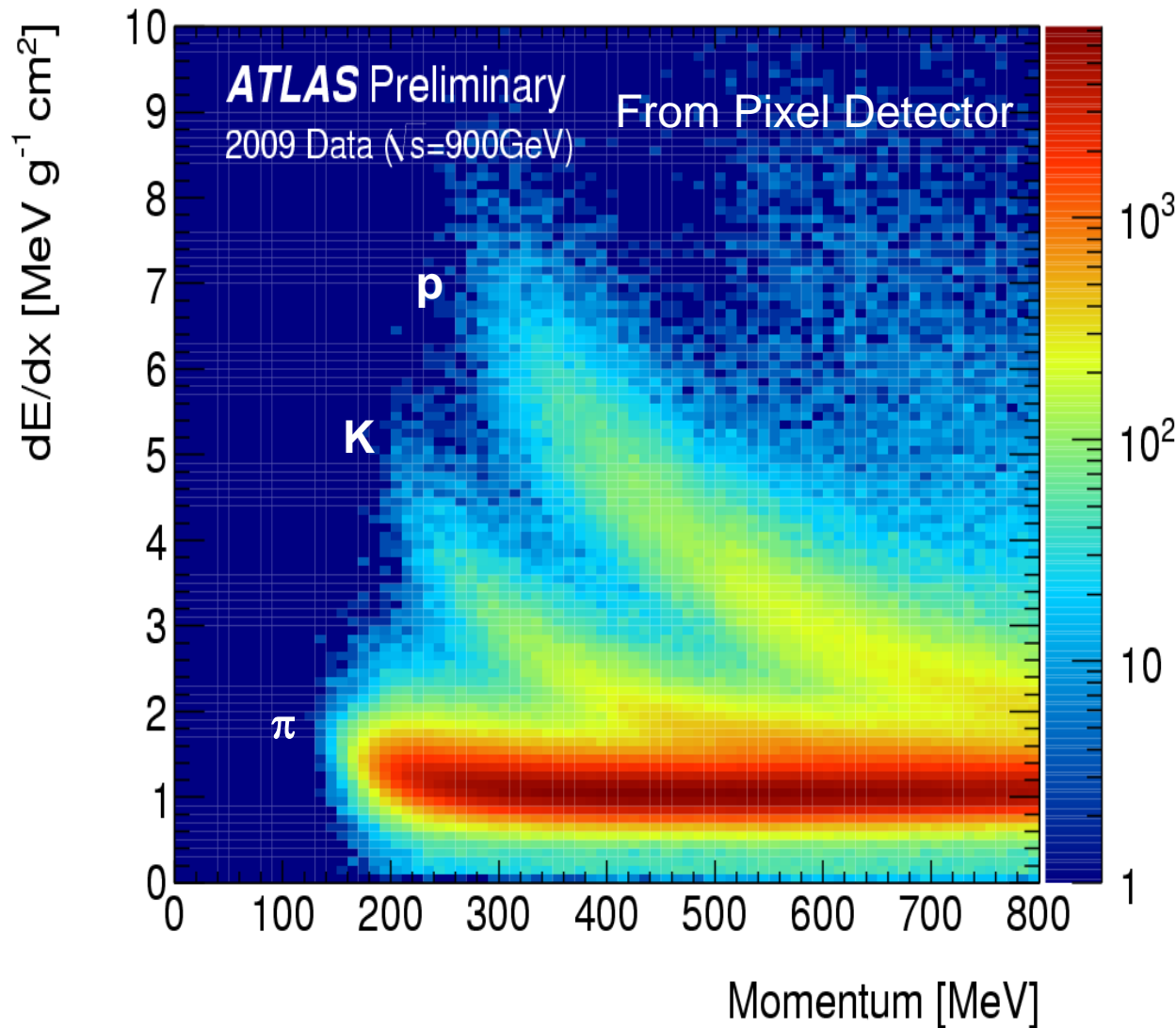
Точности: 5-50 μm

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.

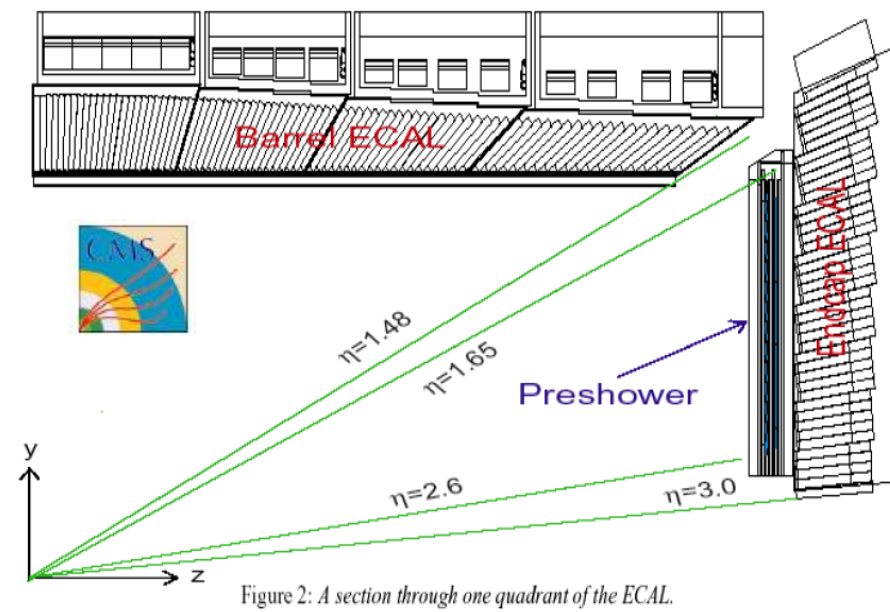
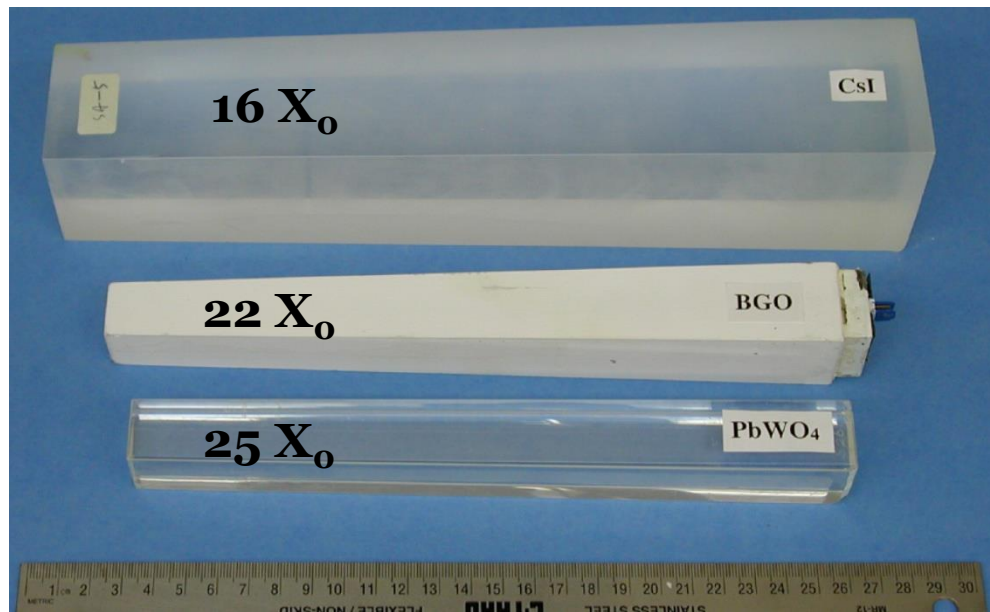


Figure 2: A section through one quadrant of the ECAL.

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

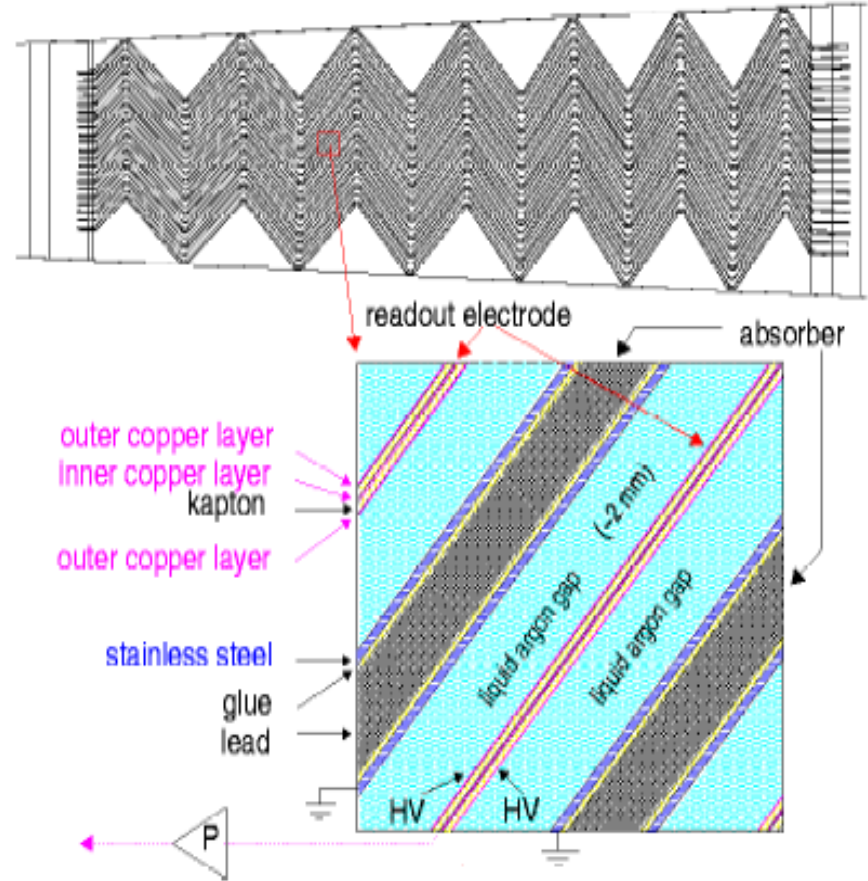
Детектор: пластиковый
сцинтиллятор или
инертная жидкость (Ar, Kr)

- 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

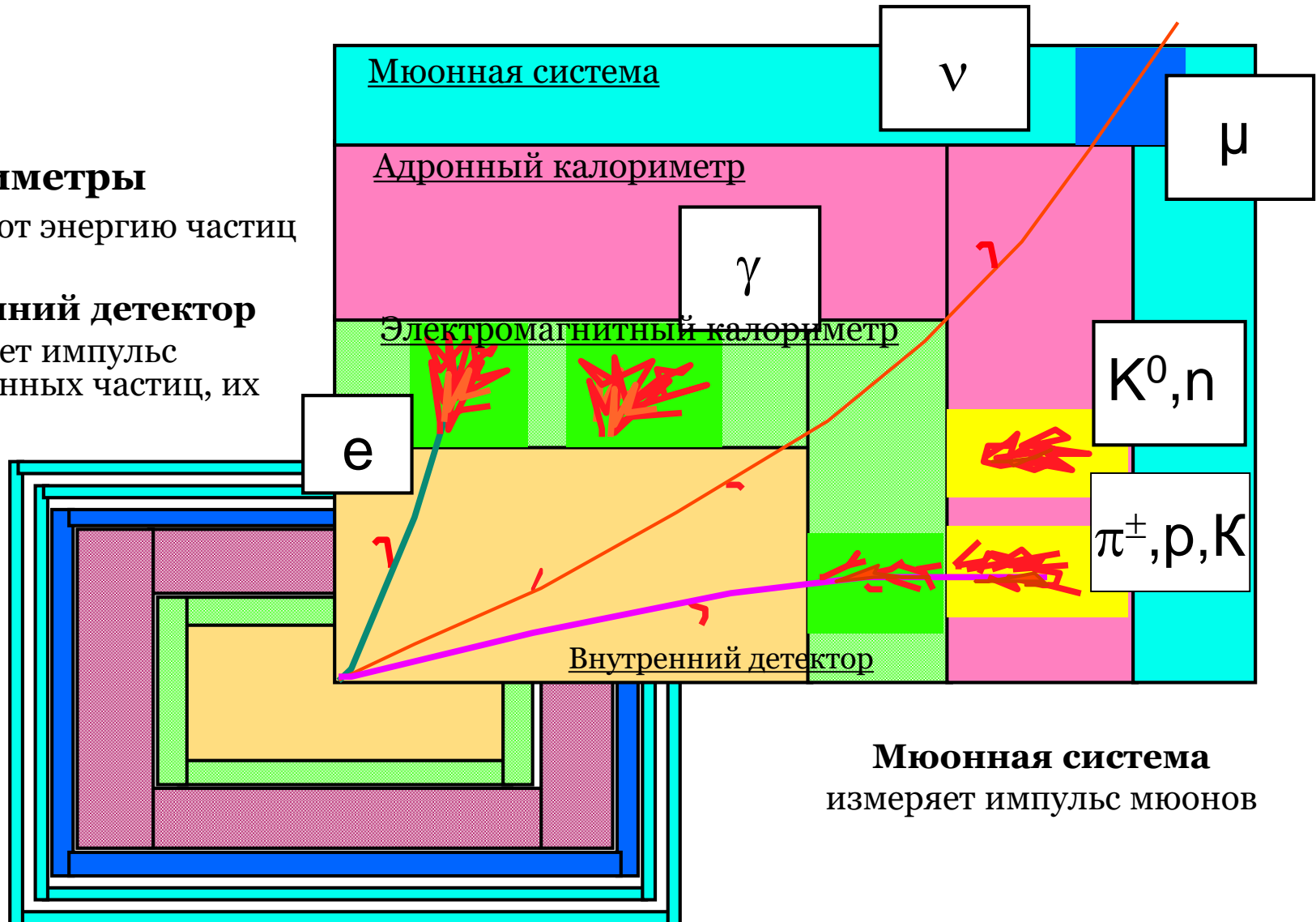
Современные детекторы

Калориметры

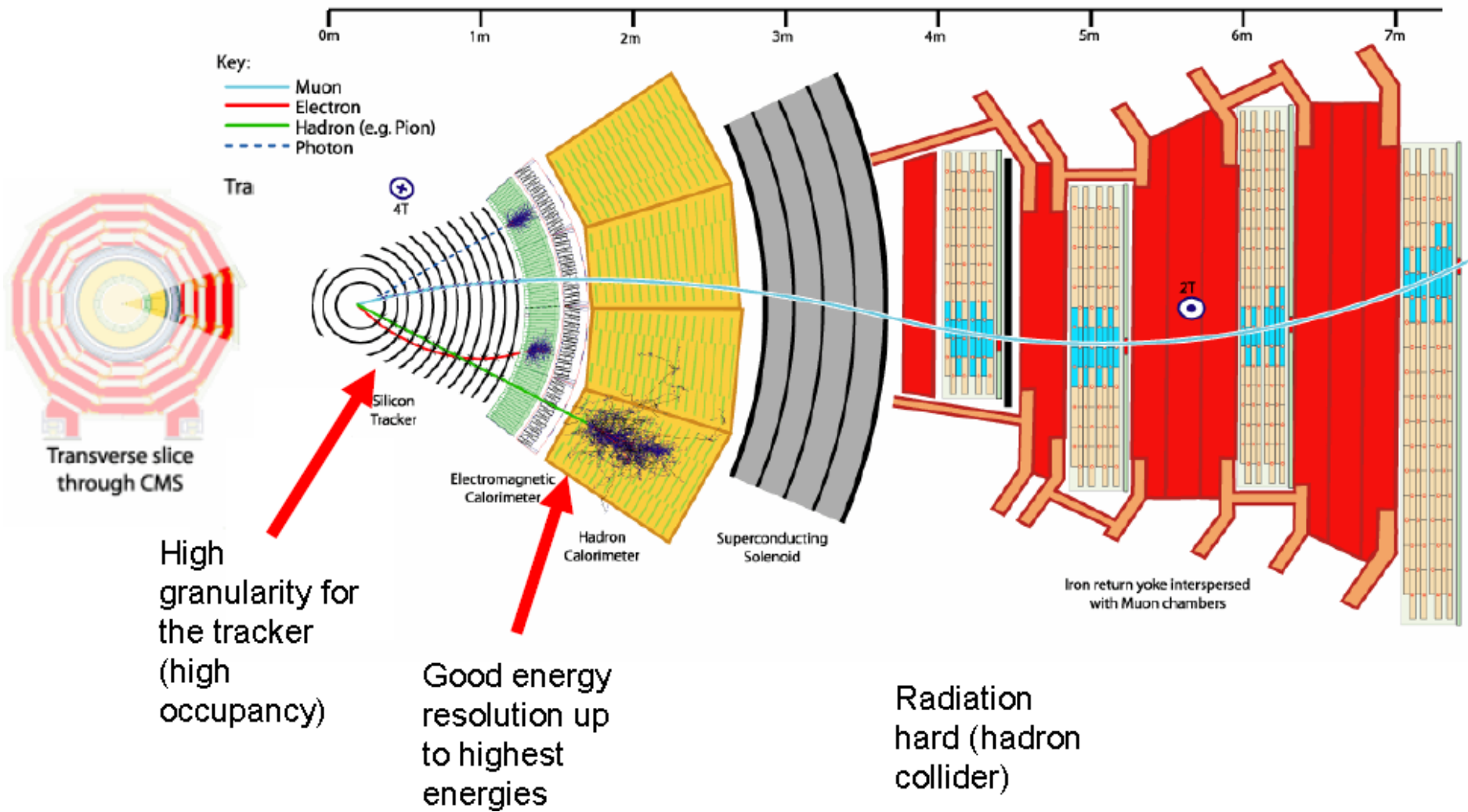
- измеряют энергию частиц

Внутренний детектор

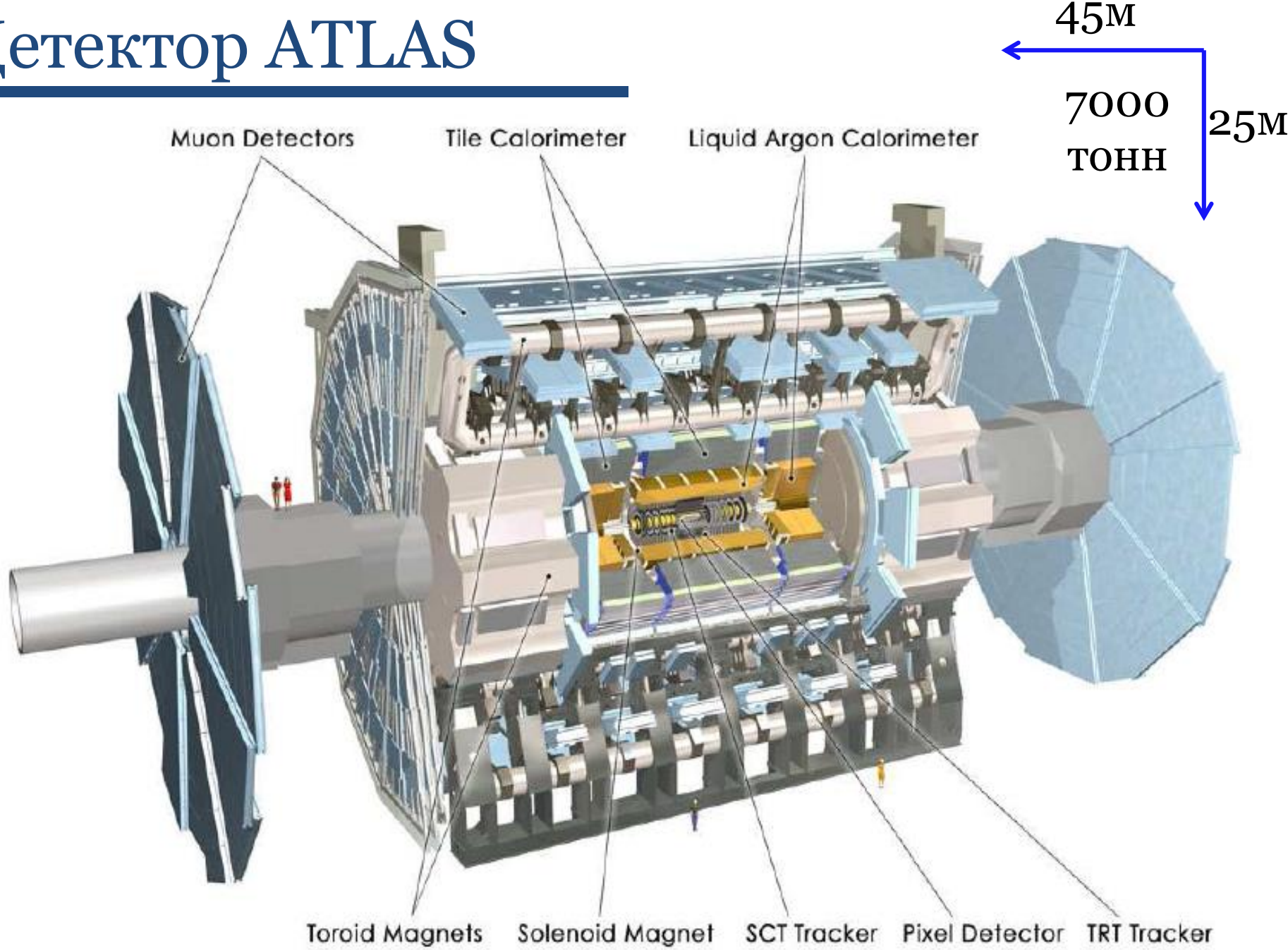
- измеряет импульс заряженных частиц, их заряд



Детектор CMS

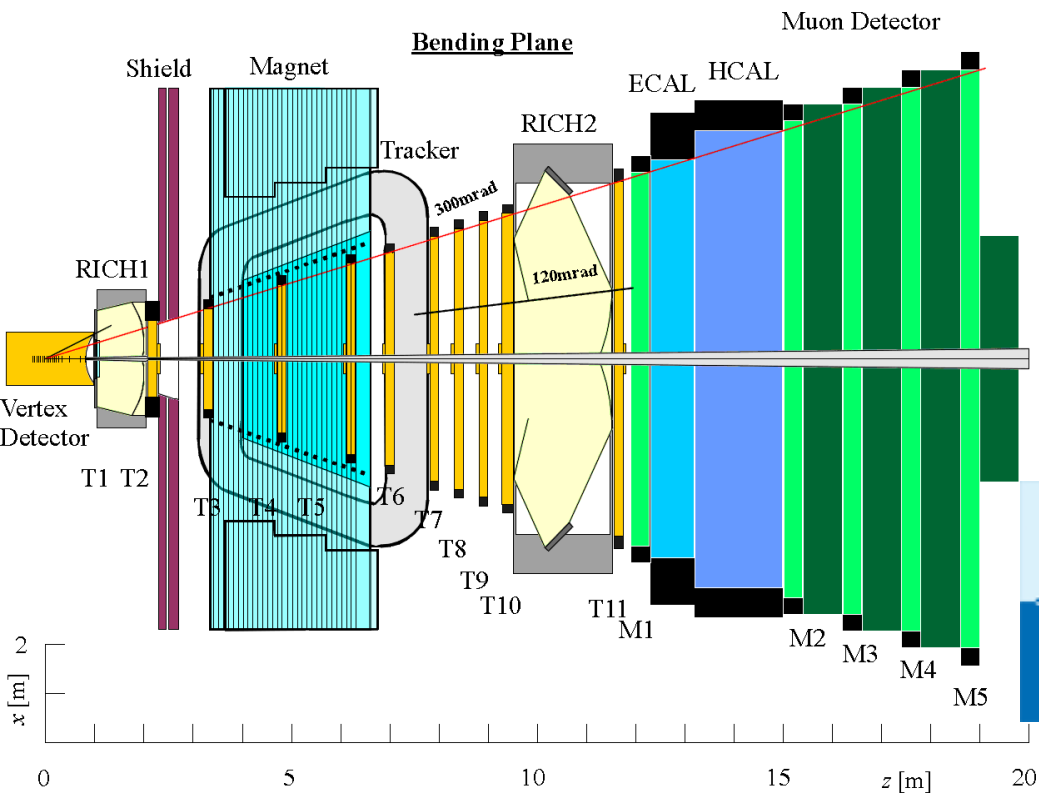
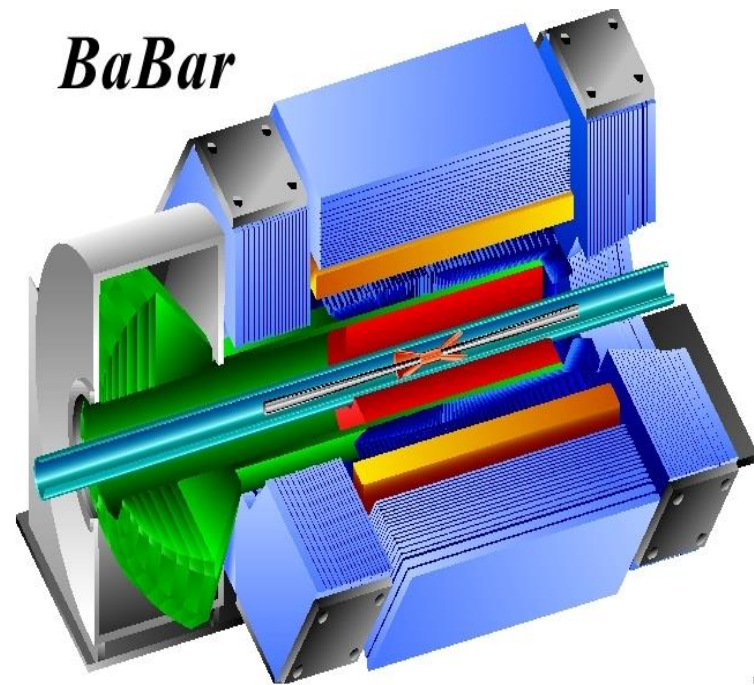


Детектор ATLAS



Асимметричные детекторы

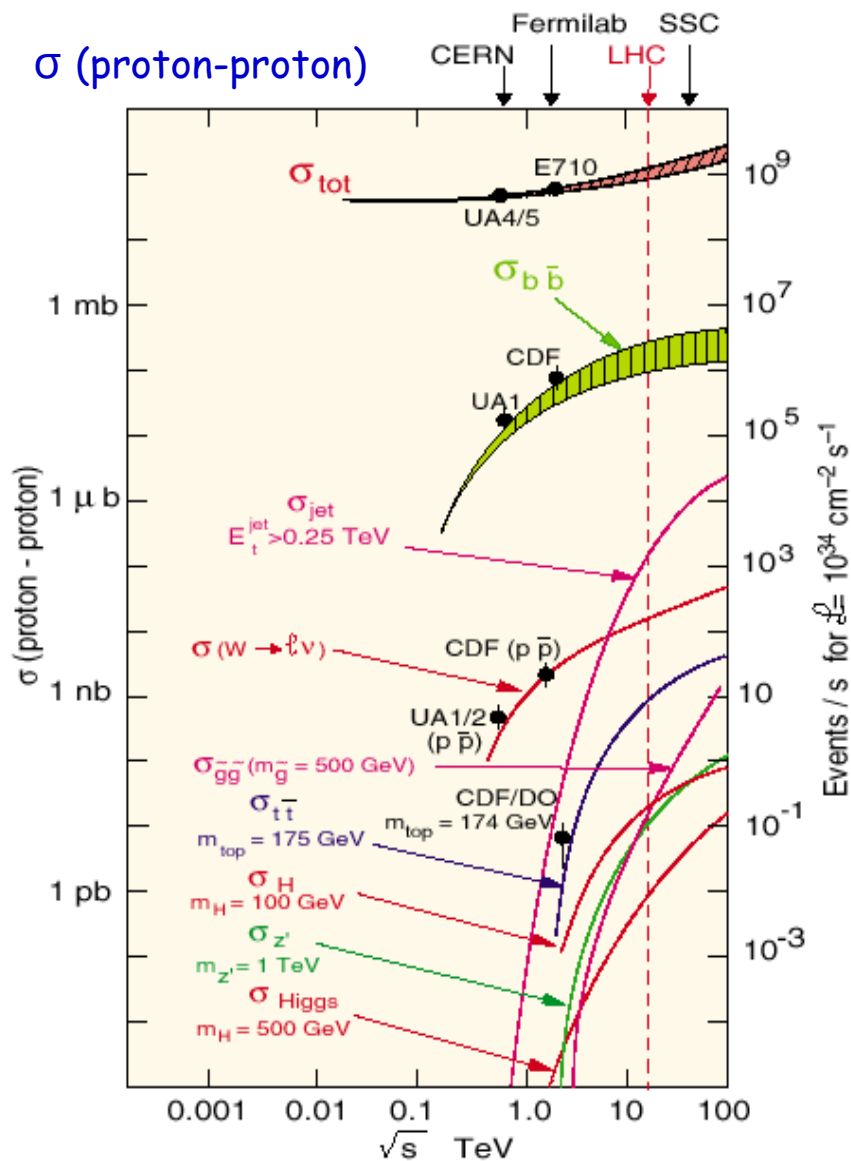
- rivelatore di mu (IFR)
- magnete
- calorimetro elettromagnetico (EMC)
- rivelatore Cherenkov (DIRC)
- rivelatore di tracce (DCH)
- tubo di supporto
- rivelatore di vertice (SVT)



8-99
8488A1

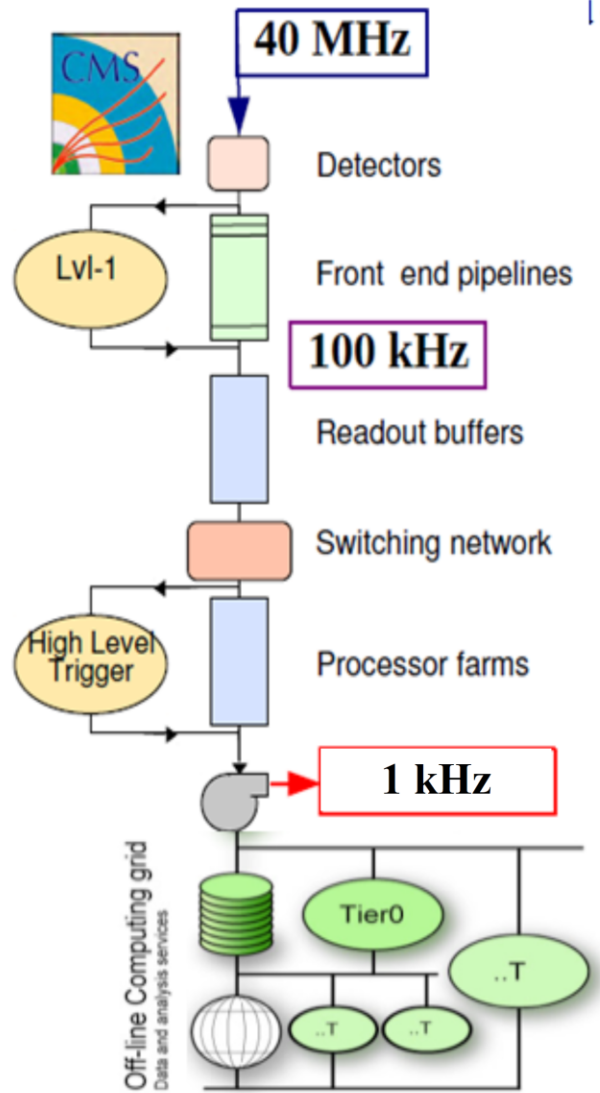
Эффективное поперечное сечение

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





Триггерная система (HLT)



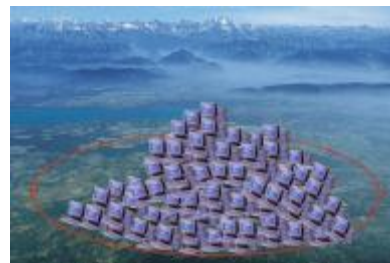
- ▶ HLT - компьютерный центр с 13 тысячами процессоров
 - ▶ Обрабатывает ~100GB/сек чтобы получить не больше 1kHz на выходе
- ▶ Поток данных для сохранения: ~1GB/сек
- ▶ Каждое отобранное событие будет иметь минимум две копии на пленочных накопителях, что бы избежать потери данных
- ▶ Типичный годовой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



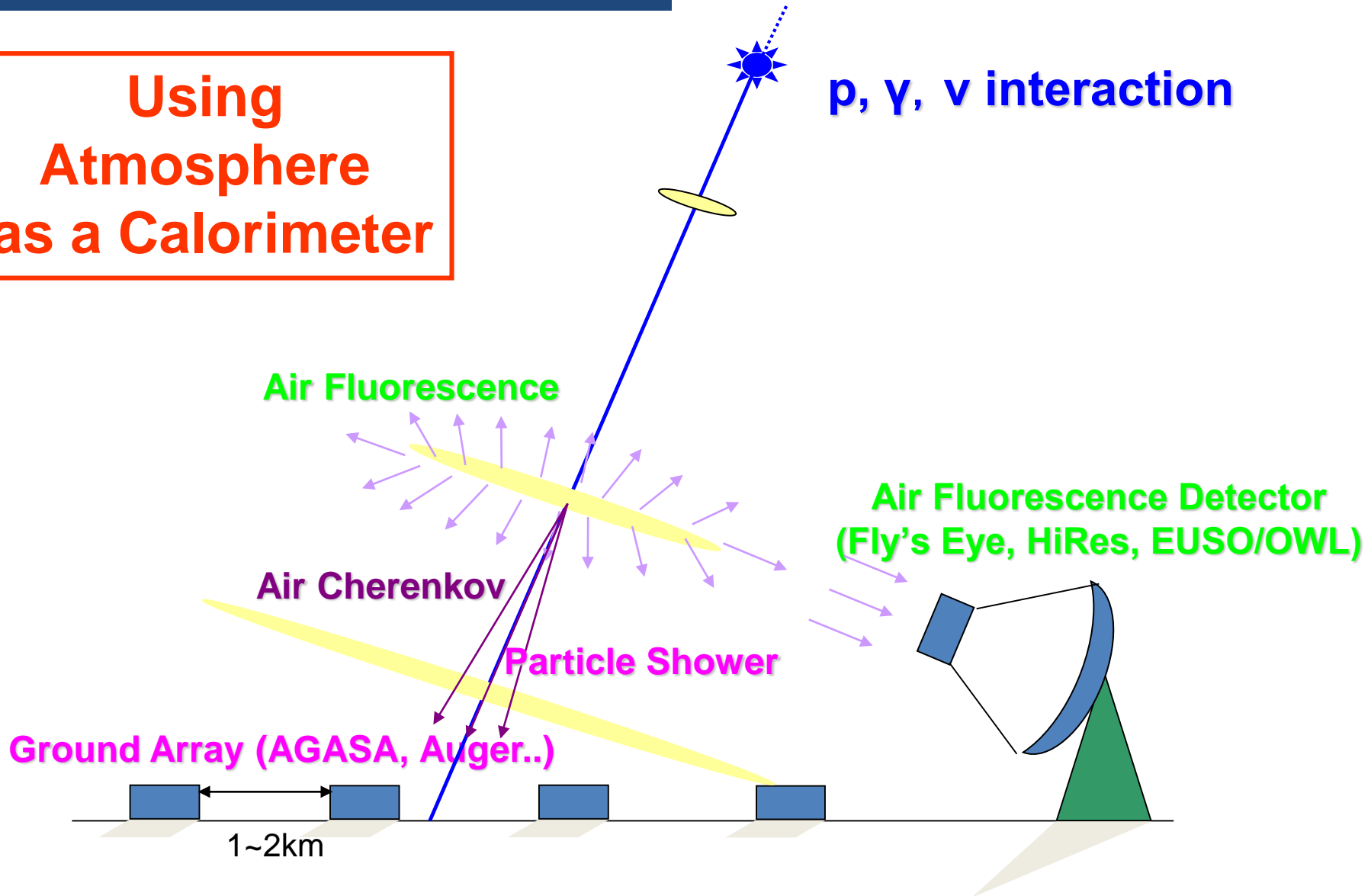
Компьютерный центр ЦЕРНа даже после существенной модернизации последних лет может обеспечить только ~40% ресурсов для хранения данных и около 30% требуемых вычислительных ресурсов.

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

Cosmic Ray Air Shower Detection

Using
Atmosphere
as a Calorimeter

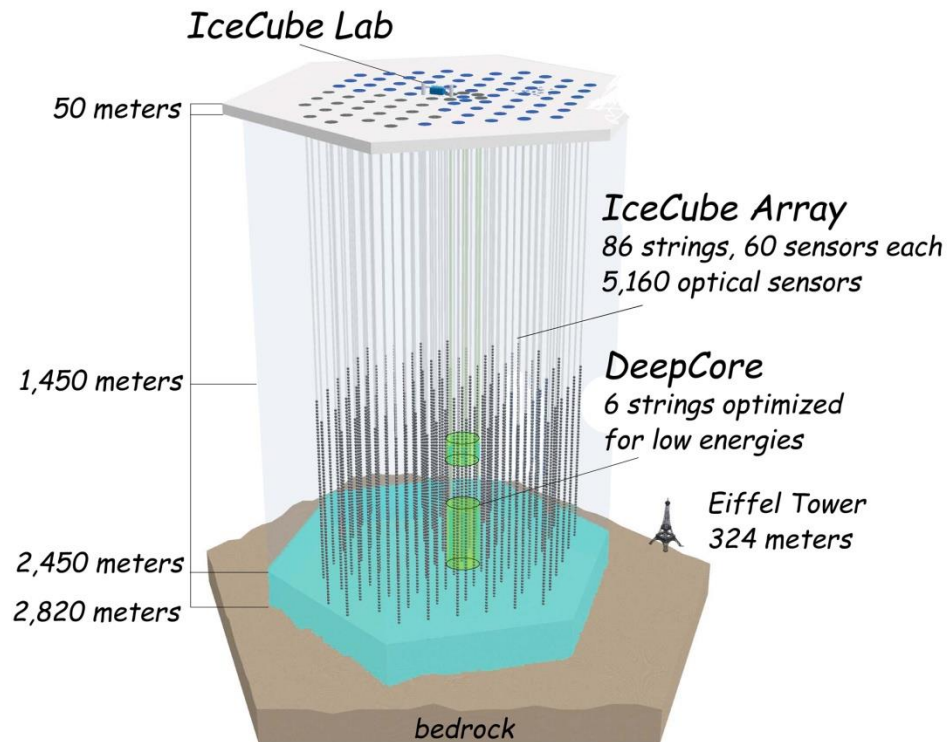
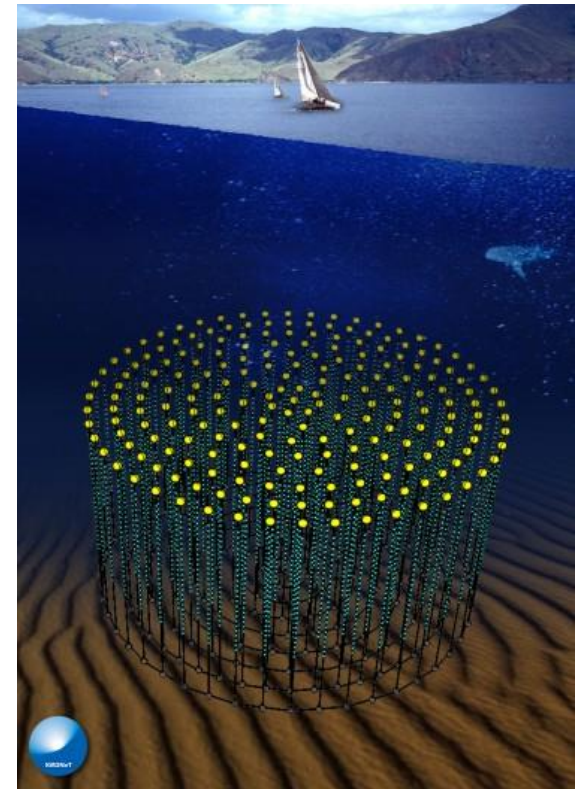


From Katsushi Arisaka, Calor 2002

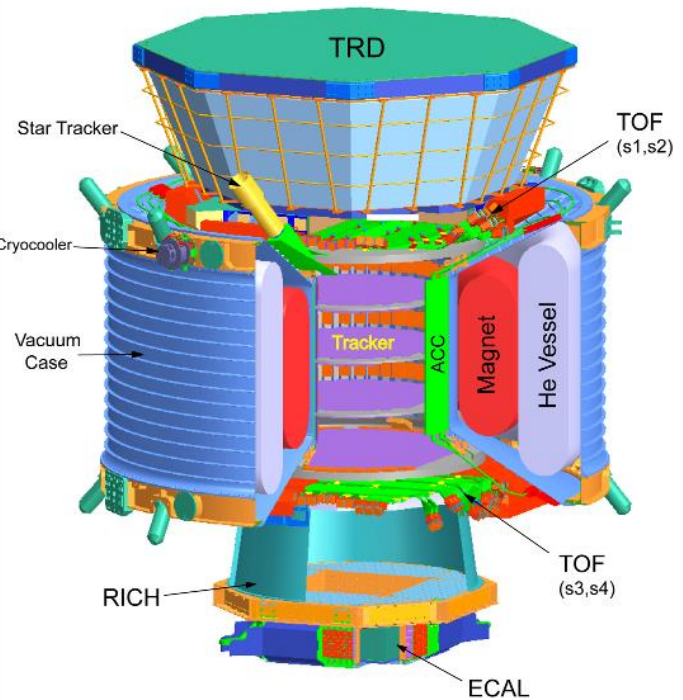
IceCube at the South Pole



Antares Neutrino Observatory



AMS 02 (Alpha Magnetic Spectrometer)



AMS on ISS for 3 years

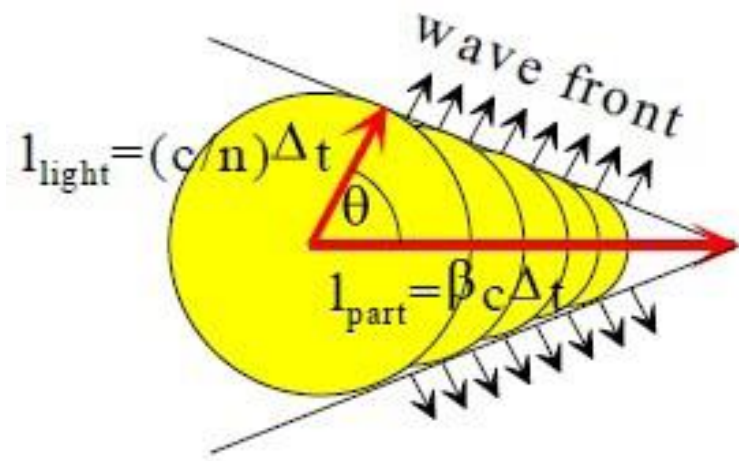


СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРОЗРАЧКИ

Детекторы Черенковского излучения

При скорости частицы больше скорости света в среде (но меньше скорости света в вакууме) возникает **Черенковское излучение.**



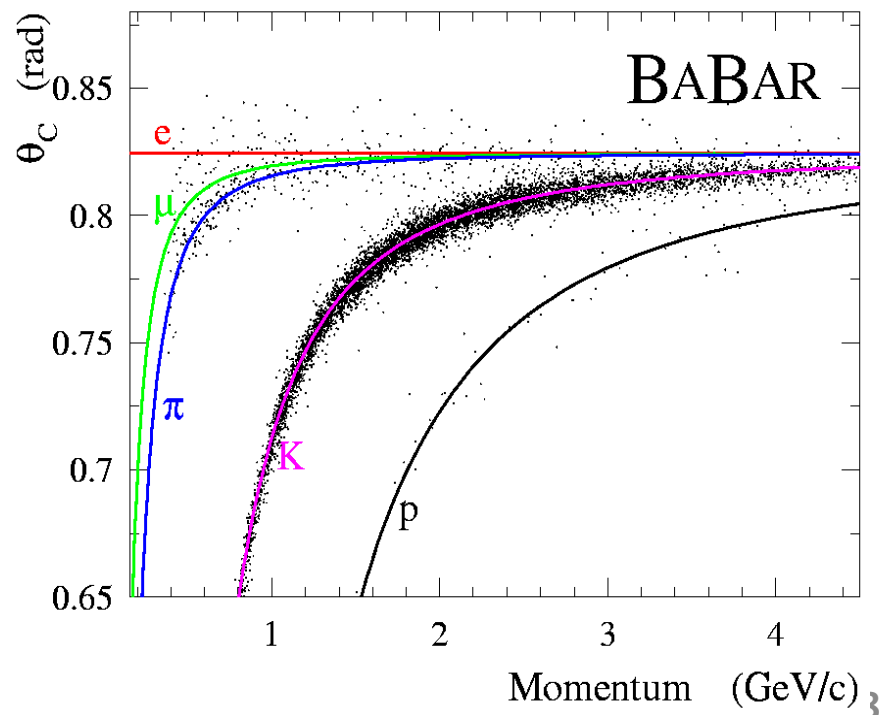
- Конус черенковского света

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

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)

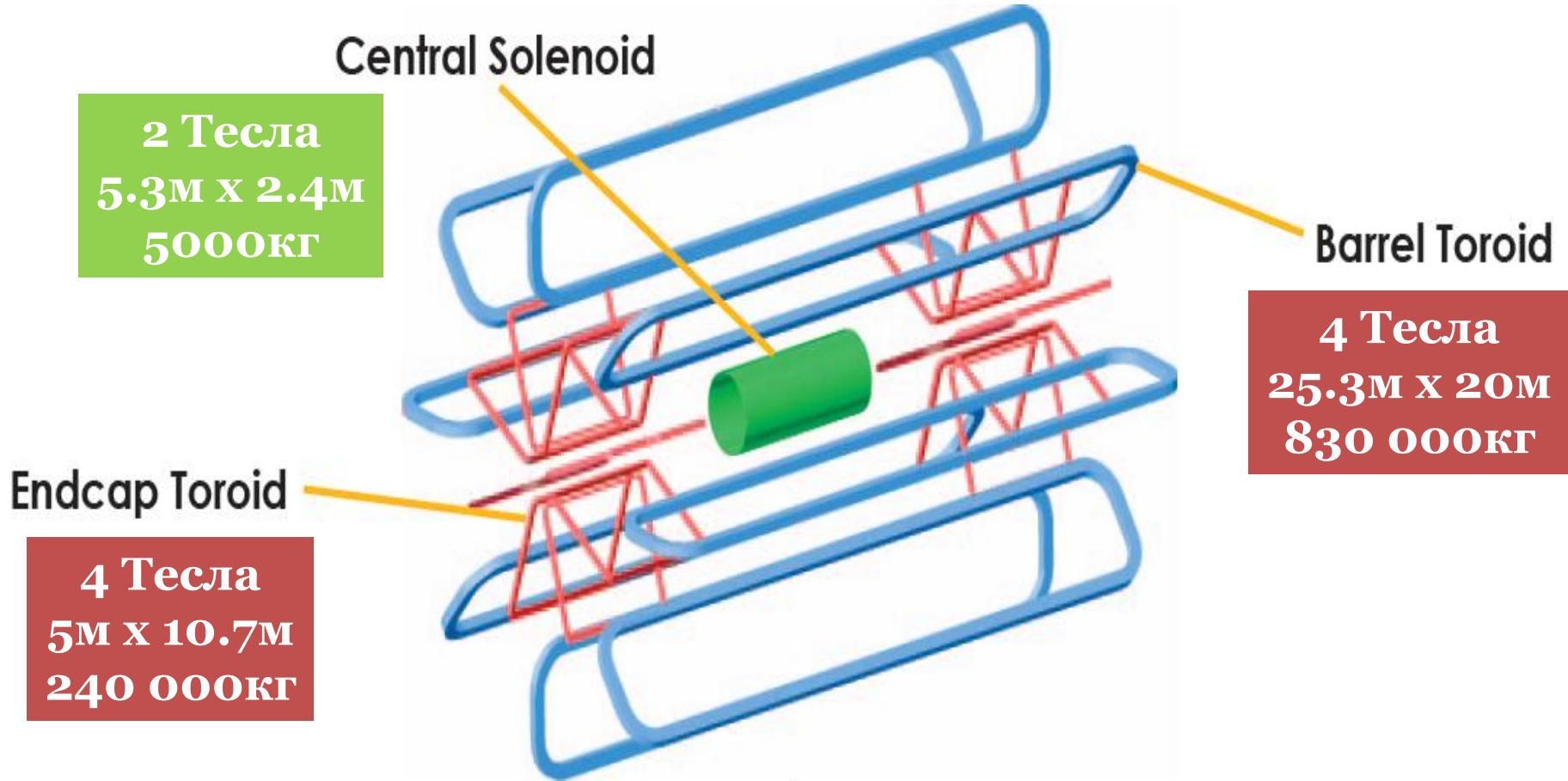
Надо помнить

Стоимость установки увеличивается пропорционально
~объему

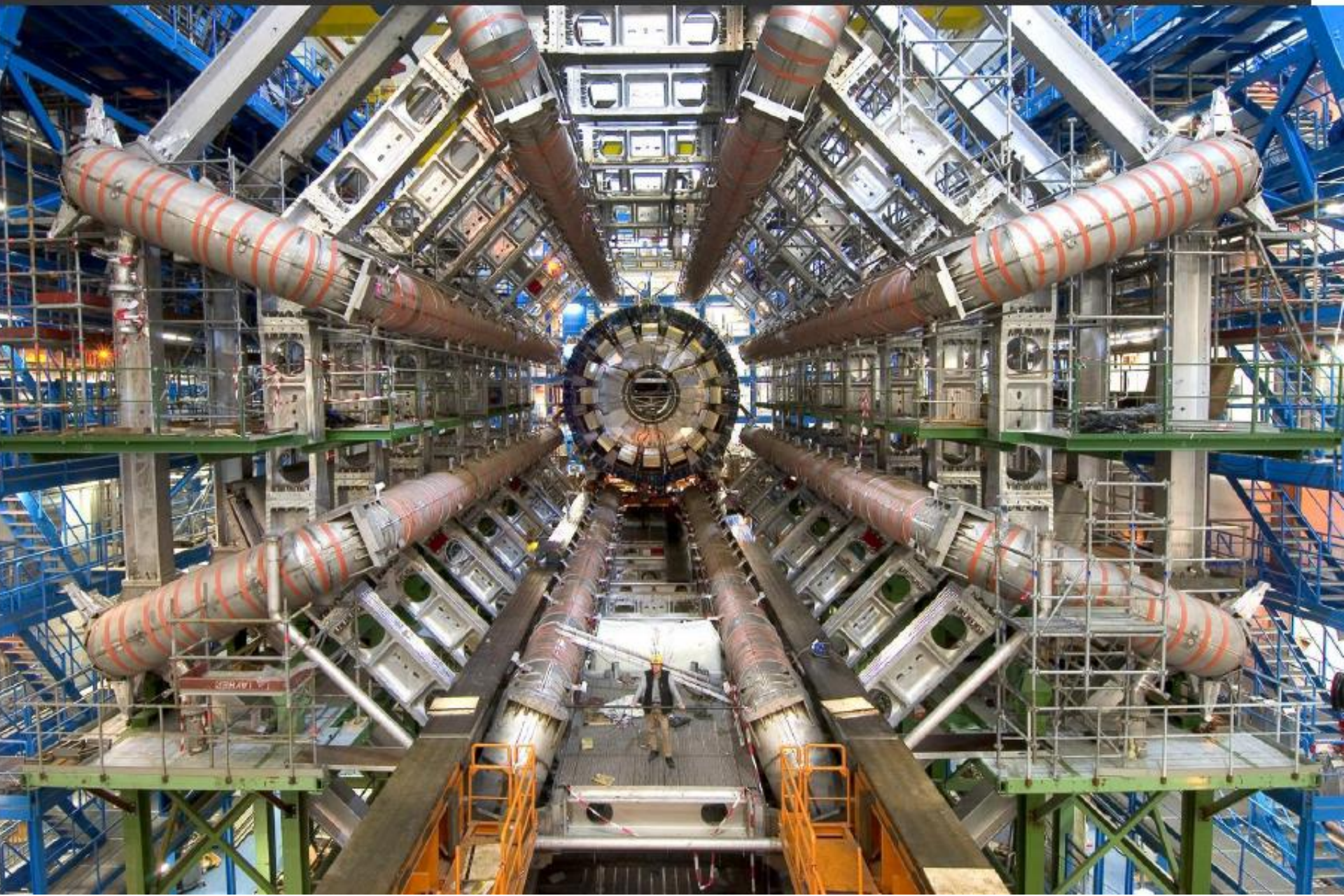
Как можно меньше материала перед калориметрами

Как можно больше материала перед мюонным спектрометром

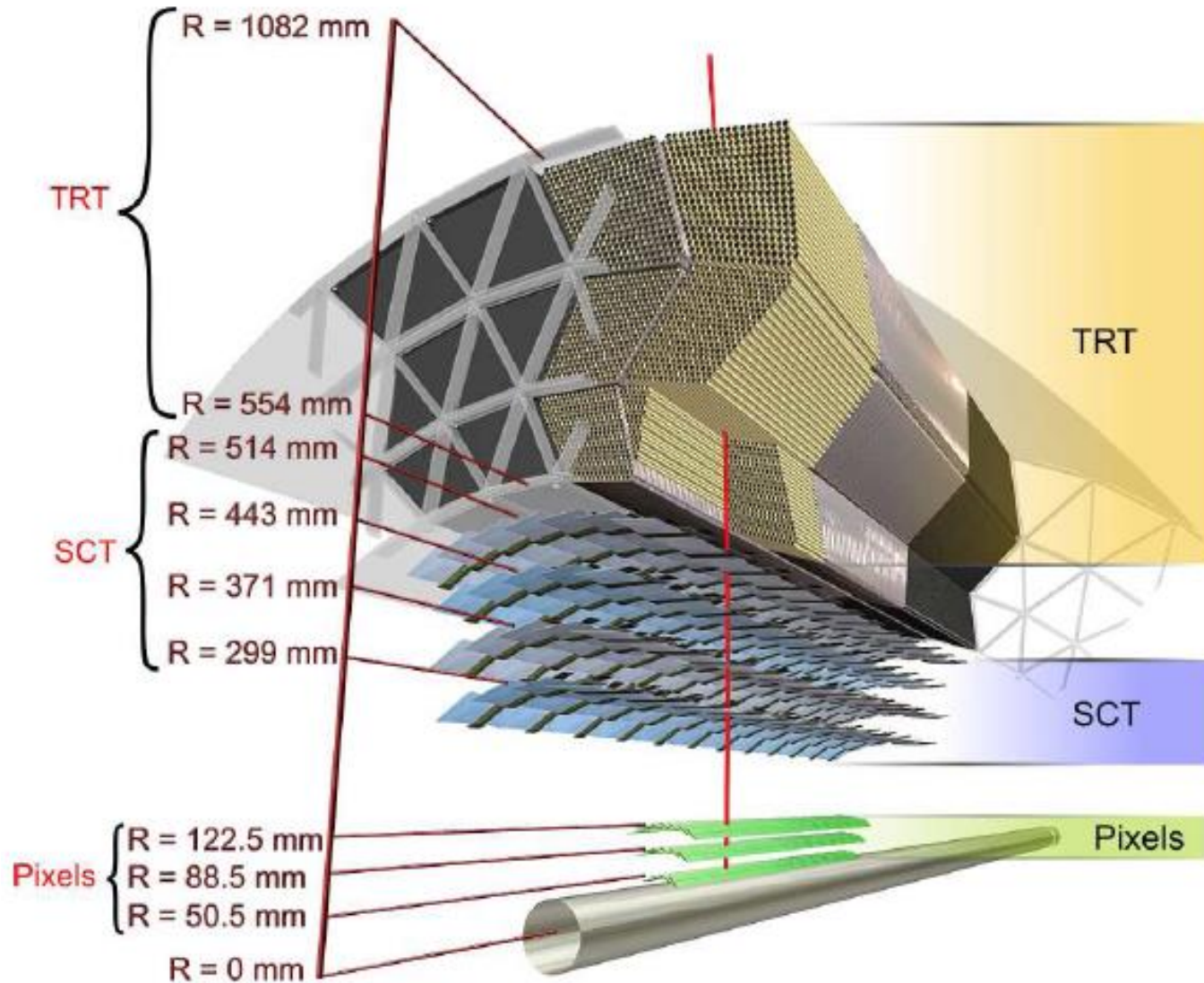
Магнитное поле



Магнит – самая видимая часть детектора



Внутренний детектор



**Детектор
Переходного
Излучения (TRT):**
Соломинки-Газ
350 к каналов
36 точки измерения
 $\sigma \sim 130$ mm

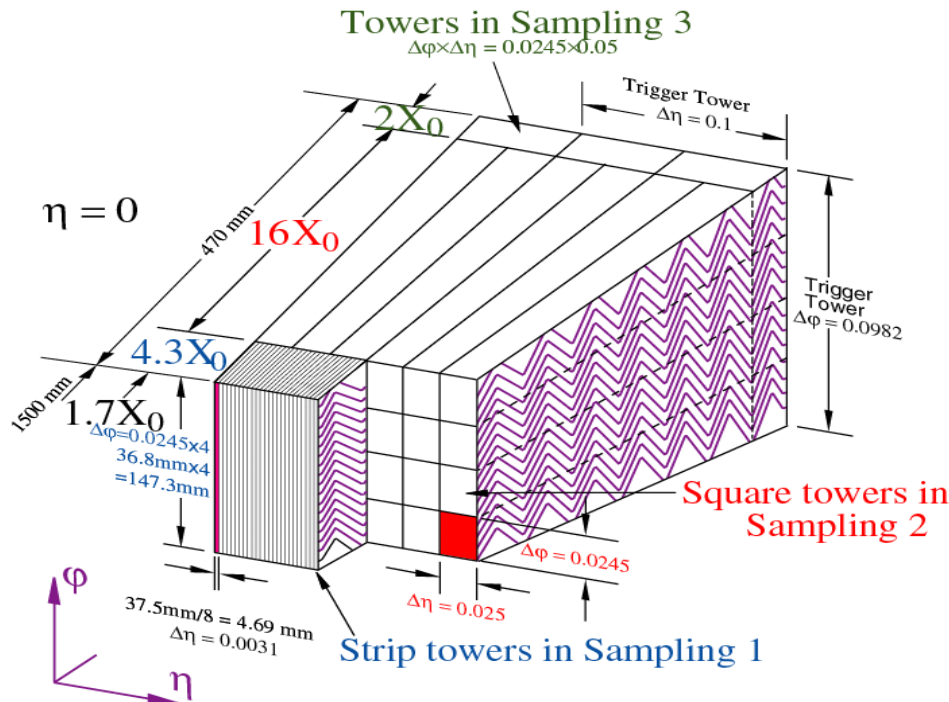
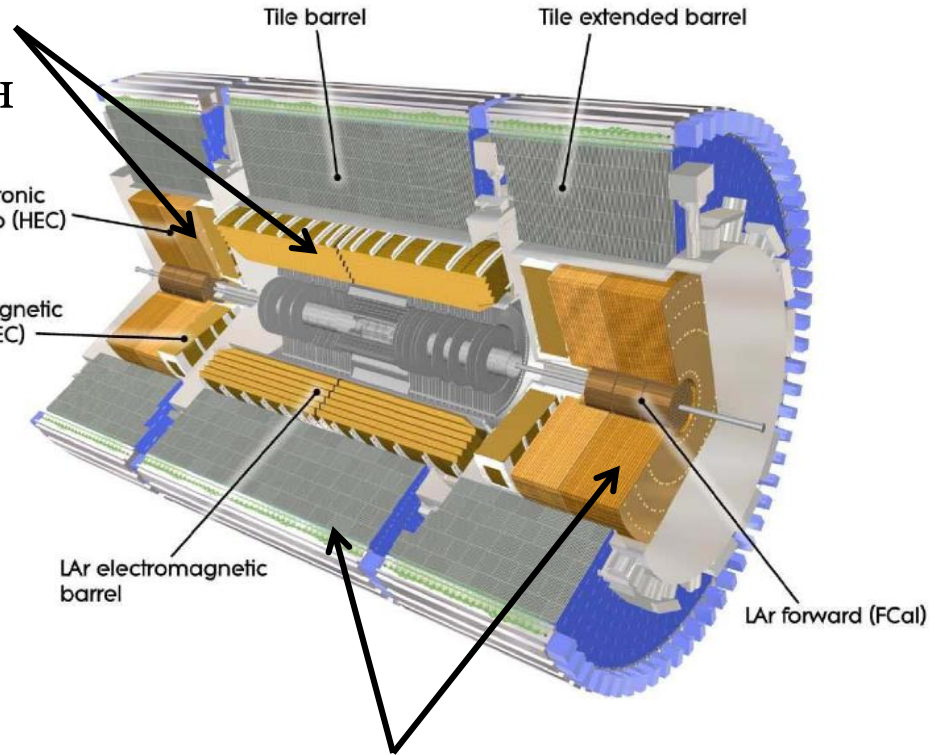
Стрипы (SCT)
Кремний
6.2 М каналов
4 точки измерения
 $\sigma \sim 16$ mm

Пиксели (Pixel):
Кремний
80 М каналов
3 точки измерения
 $\sigma \sim 10$ mm

Калориметры ATLAS

Электро-магнитный Калориметр

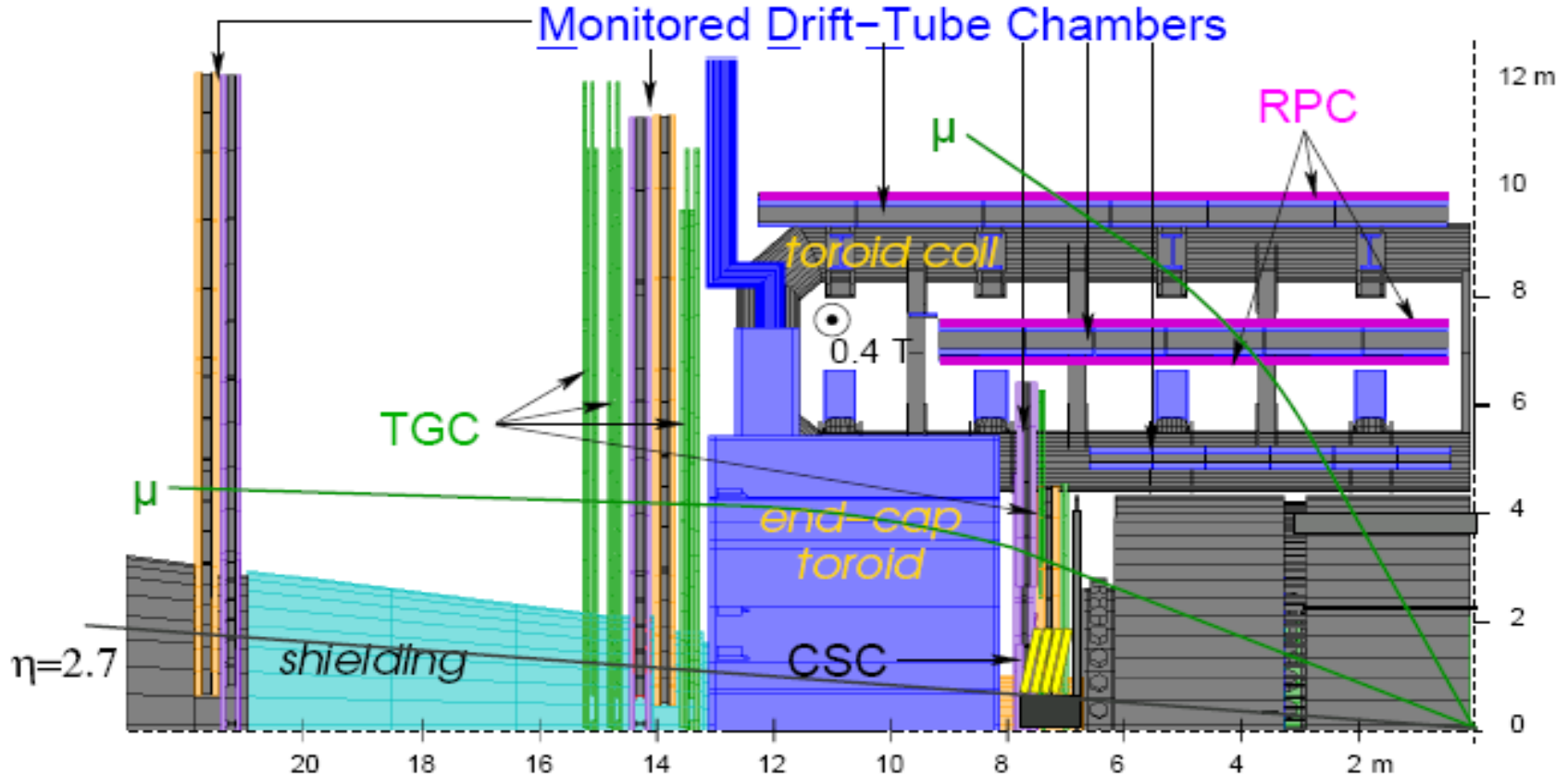
- «Акордеон» Свинец/Жидкий Аргон
- ~180 000 каналов
- Работает при -183°C
- 3 слоя разного размера
 - направление частиц
 - идентификация
- $\sigma_E/E = 10\%/\sqrt{E} \oplus 24.5\%/E \oplus 0.7\%$



Адронный Калориметр

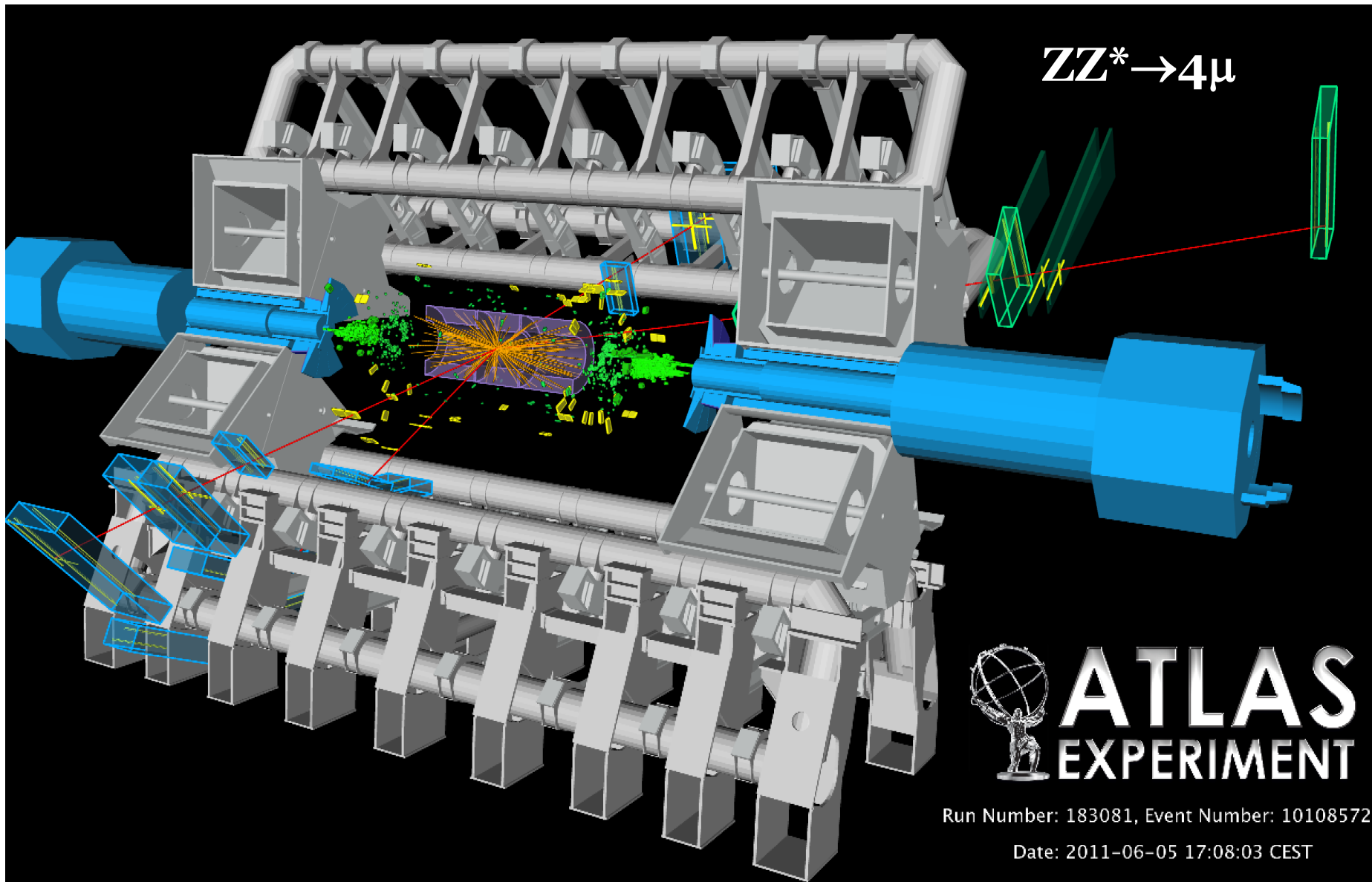
- 500к пластин из пластикового сцинтиллятора и сталь в центре
- Жидкий Аргон / Медь
- 3-4 слоя

Мюонная система

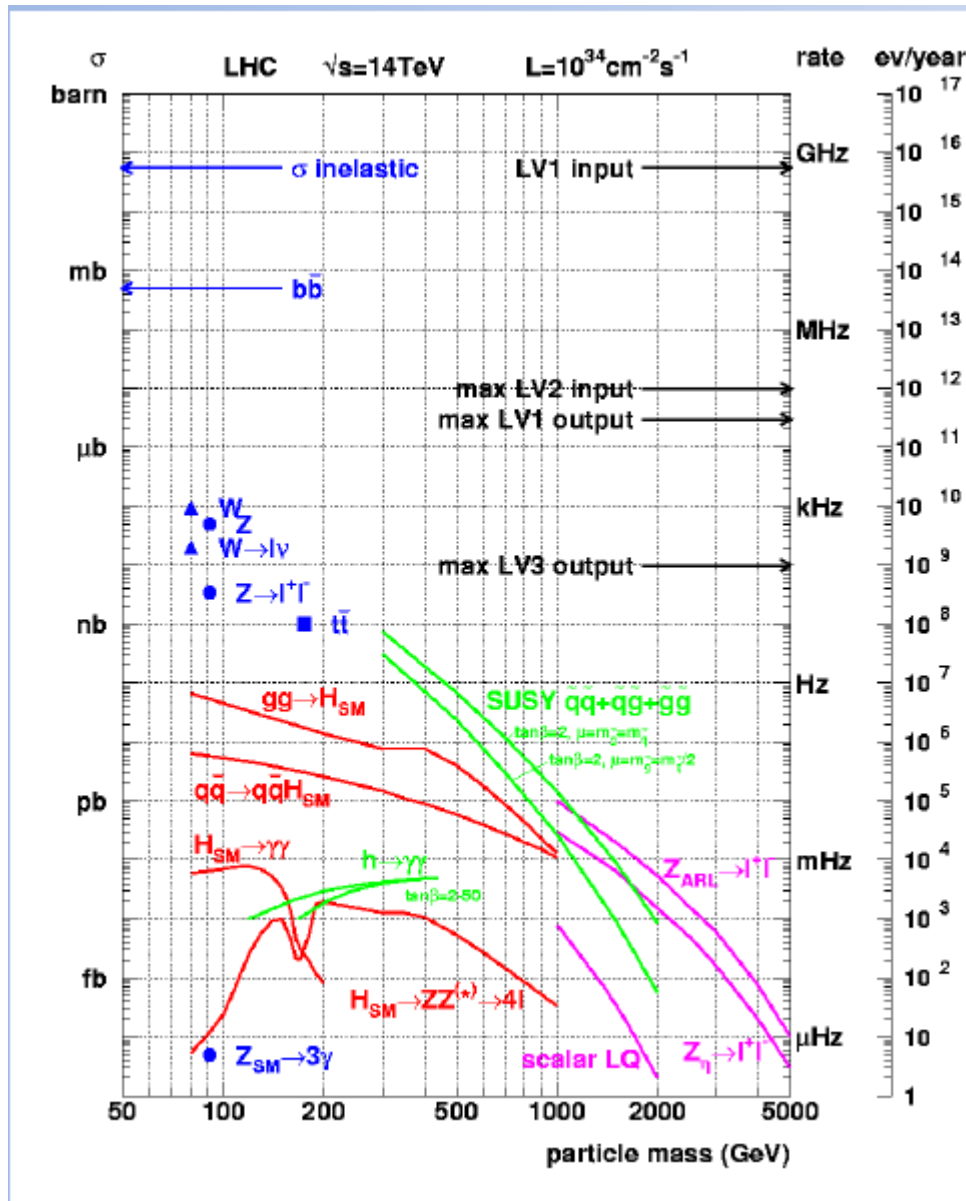


Мюоны проходят через весь детектор почти не теряя энергии
Для них после калориметра есть специальная трековая система

	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

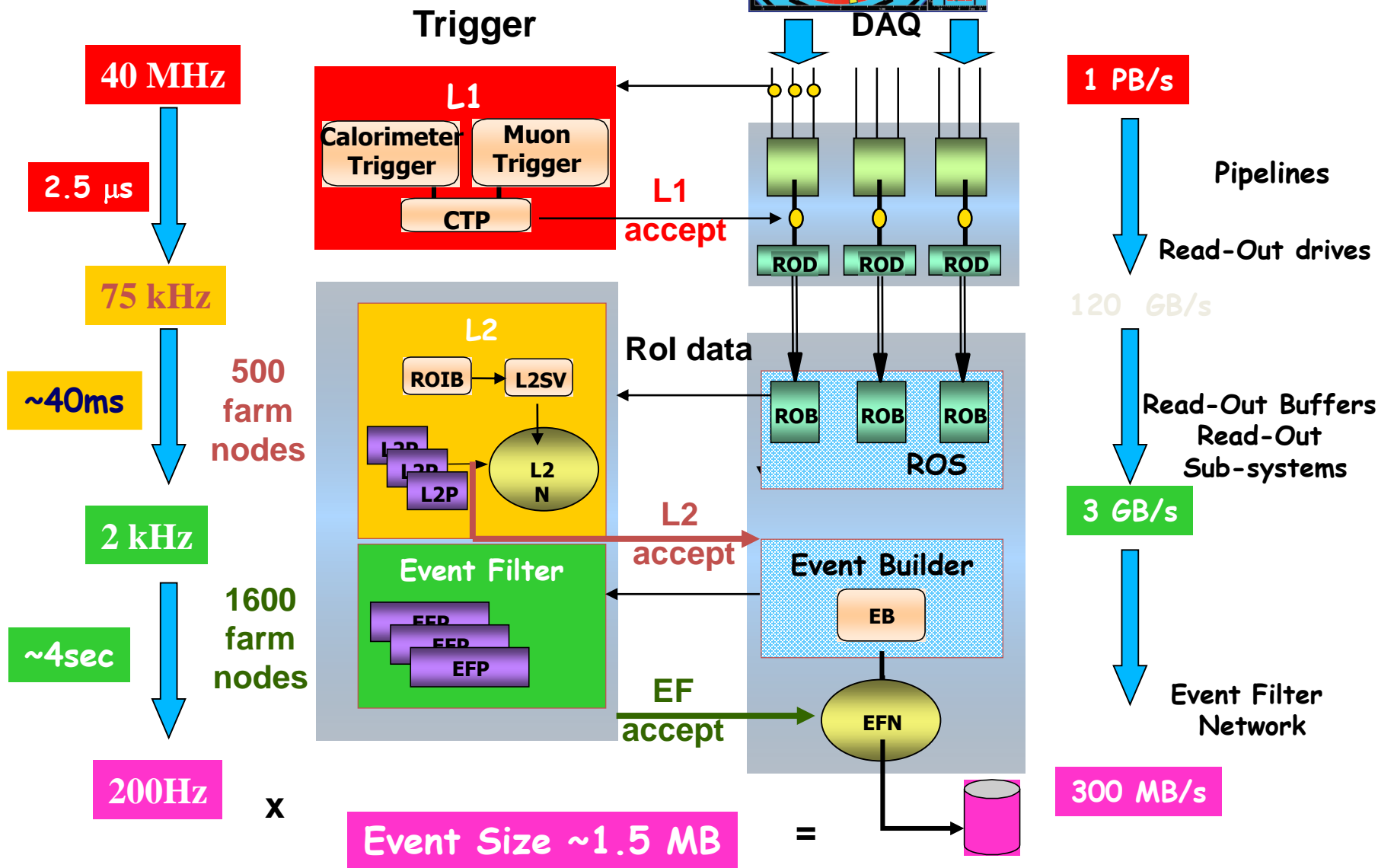
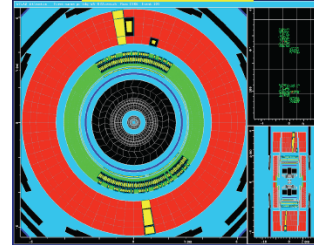


«Хорошо изученные процессы»,
нет необходимости регистрировать все события...

Физика LEP - большого электрон-позитронного коллайдера

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

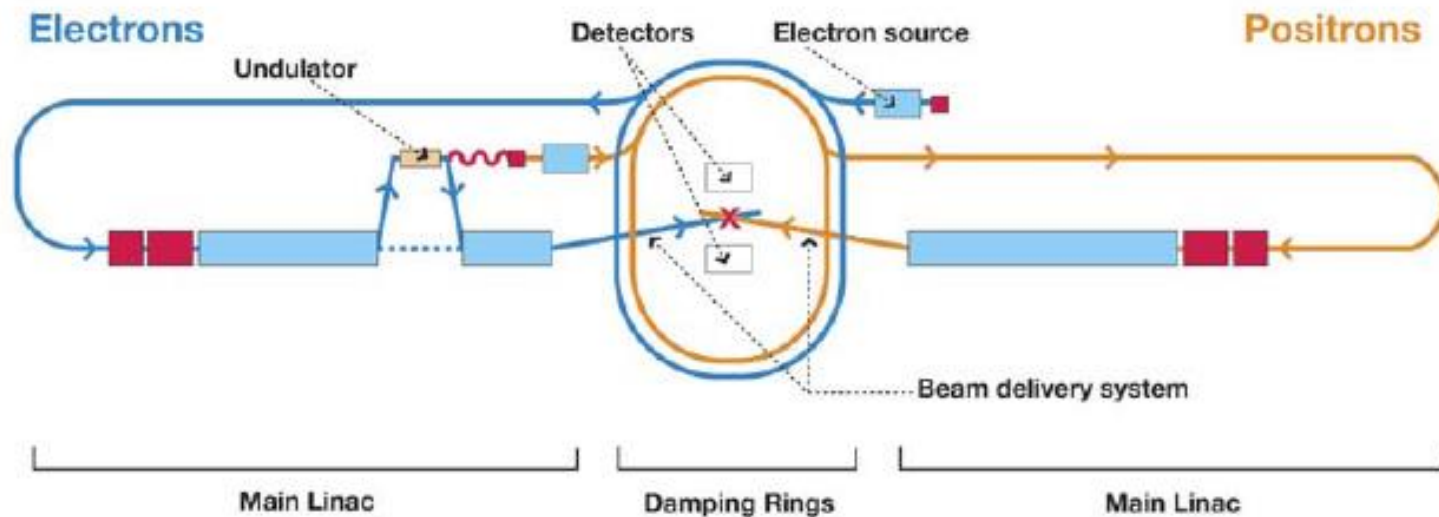
Сбор данных



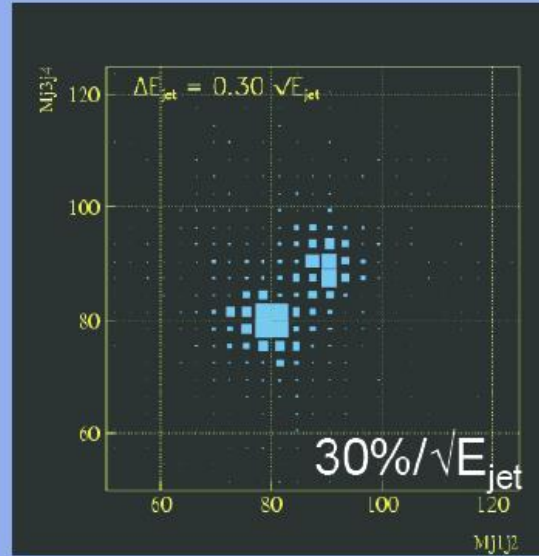
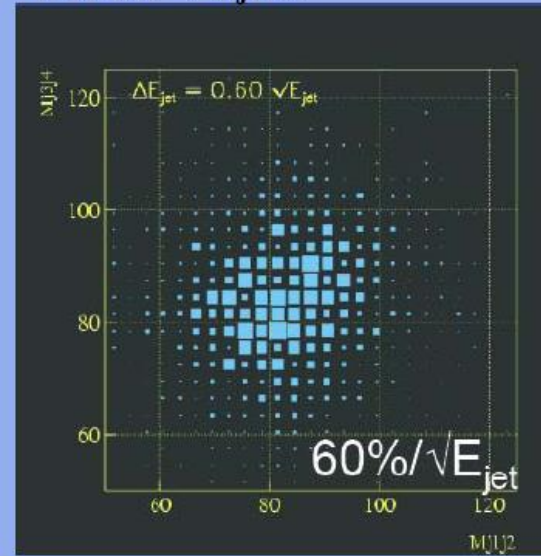
Международный линейный ускоритель



- 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	$\frac{\sigma_E}{E} \sim 45\%/\sqrt{E}$	$\sim 15\%/\sqrt{E_{jet}}$

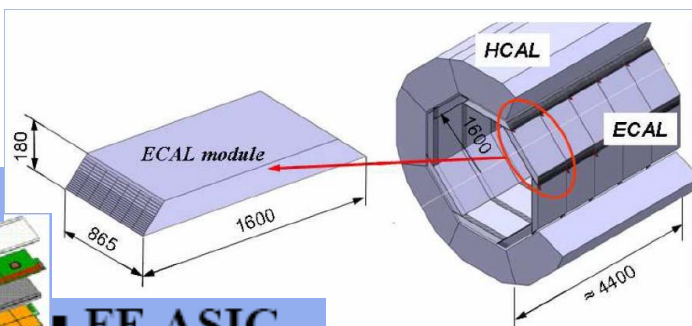


Будущие эксперименты

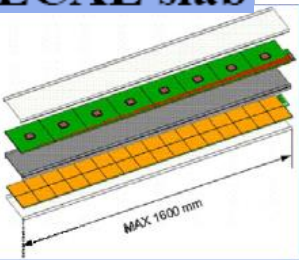
Электромагнитный калориметр

- W/Si

ECAL slab



- FE ASIC
- PCB board
- Si pads



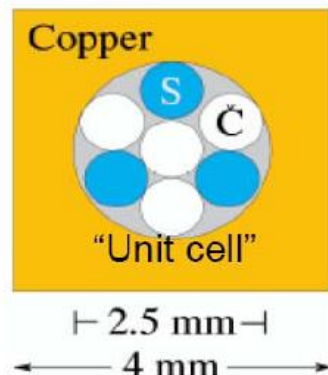
- Электроника в детекторе
- 5x5мм² сегментация
- 0.6-1.2X₀ сегмент. глубины (23X₀)

- W+сцинт. стрипы

- DREAM:

сцинтиллятор+

Черенков волокна

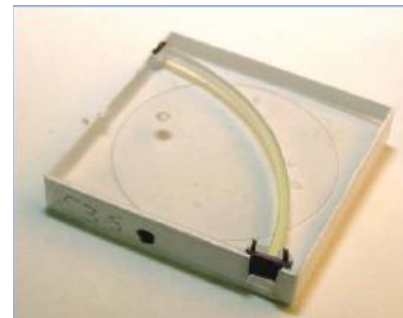


Адронный калориметр

- Аналоговые сцинт тайлы

-3x3см²

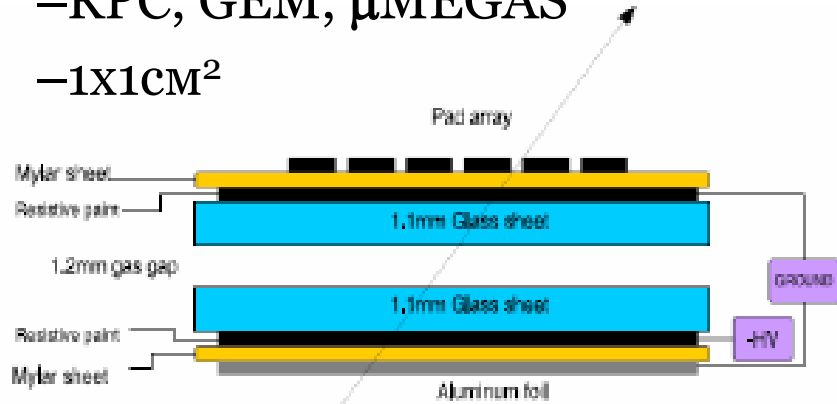
-Кремневый ФЭУ



- Газовый цифровой

-RPC, GEM, μMEGAS

-1x1см²

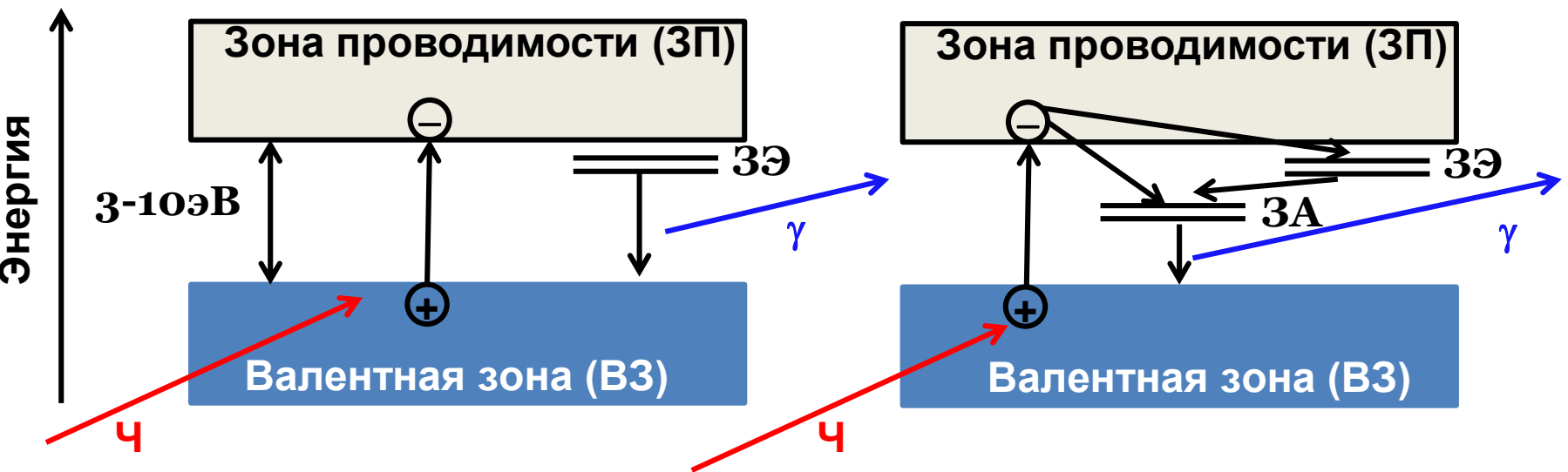


Сцинтилляторы

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

Зонные уровни

Зонные уровни с примесями



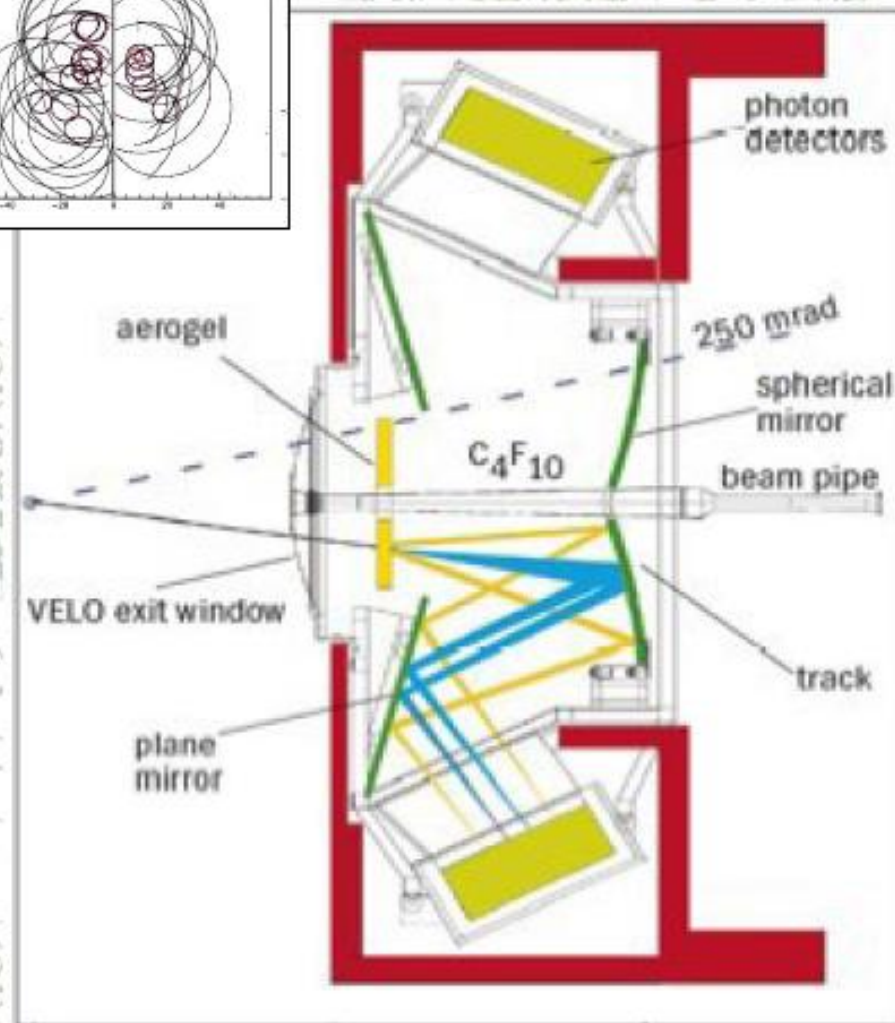
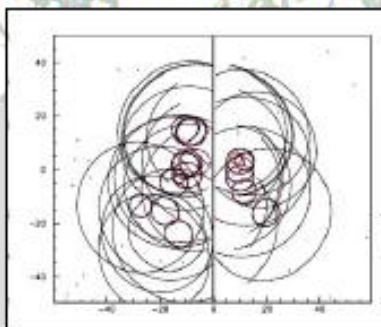
Входящая частица (Ч) выбивает электрон в зону проводимости.

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)

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

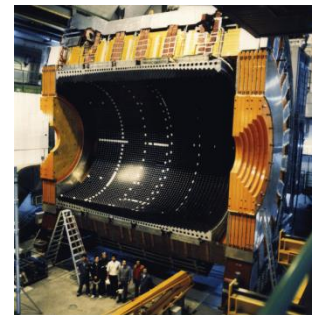
$$N_{eh} \approx 10^5$$

- ✗ Оптимальны для низких энергий
- ✗ Очень дорогие

Черенков (PbO)

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

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



Инертная жидкость (LKr)

- ✓ Хорошая радиационная стойкость
- ✓ Однородность детектора

Необходимость охлаждающего и очистительного оборудования



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

Сцинтилляторы

Очень популярны!

- ✓ Высокий световыход
- ✓ Высокая плотность

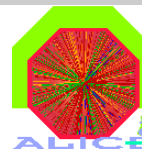
Не однородность кристаллов

Цена

- ✓ Свойства «на заказ»

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

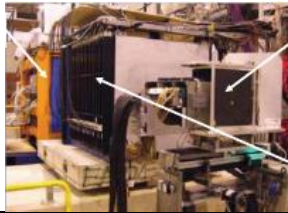
KTEV
Kaons at the Tevatron



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 световыход
- ✓ Компенсируемые
- ✗ Старение, радиация
- ✗ Неоднородность световыхода



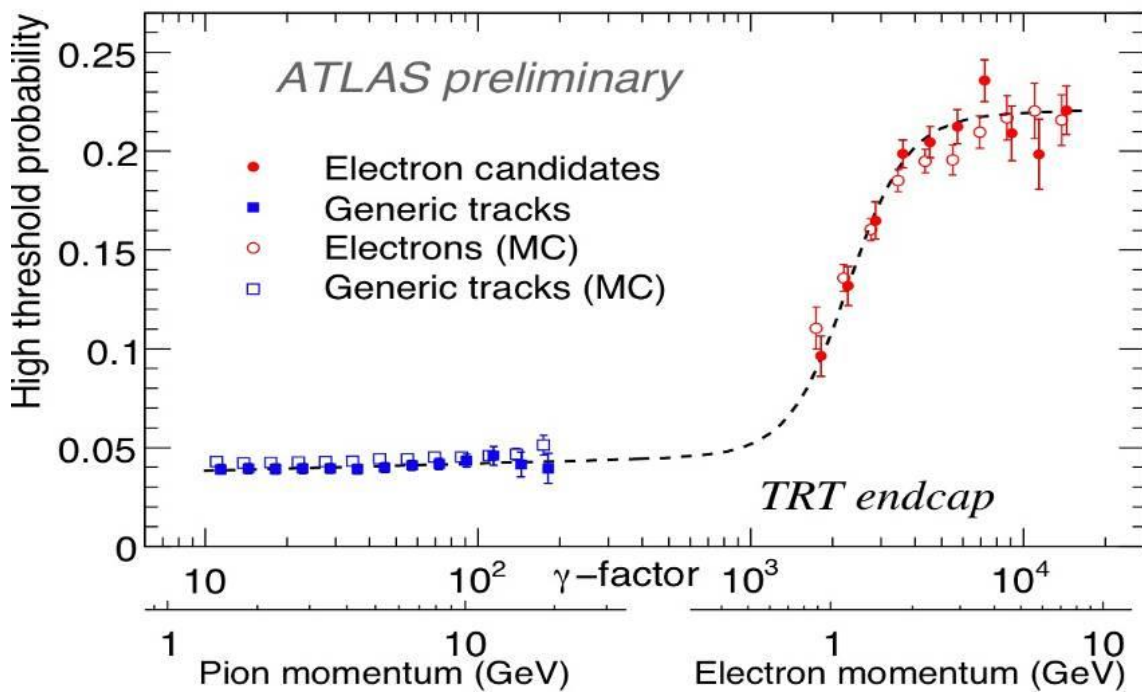
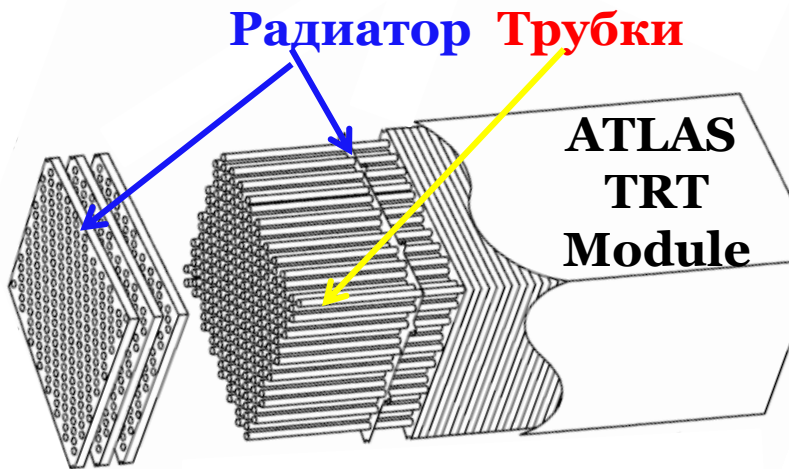
Детекторы переходного излучения

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