


Введение в детектирование частиц



Татьяна Берже-Гринева
(LAPP Аннесу, Франция)

Программа для украинских
учителей в ЦЕРНе

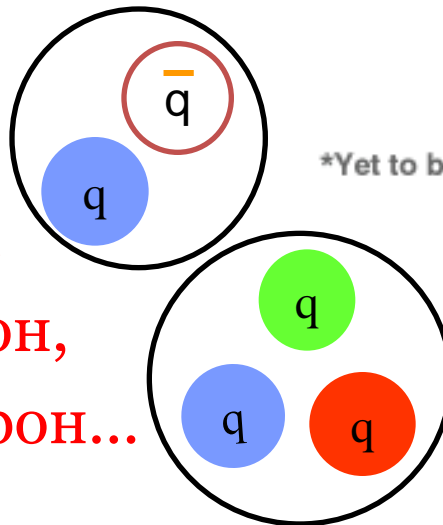
8/10/2013

Стандартная Модель (СМ)

- В СМ много частиц
- Можно зарегистрировать только долгоживущие частицы: e (электрон), μ (мюон), γ (фотон)
 - Одни из самых легких
- Кварки не существуют в свободном состоянии они формируют «бесцветные» адроны:

Мезоны: $\pi^+(u\bar{d})$ пион,
 $K^+(u\bar{s})$ каон...

Барионы: $p(uud)$ протон,
 $n(udd)$ нейтрон...

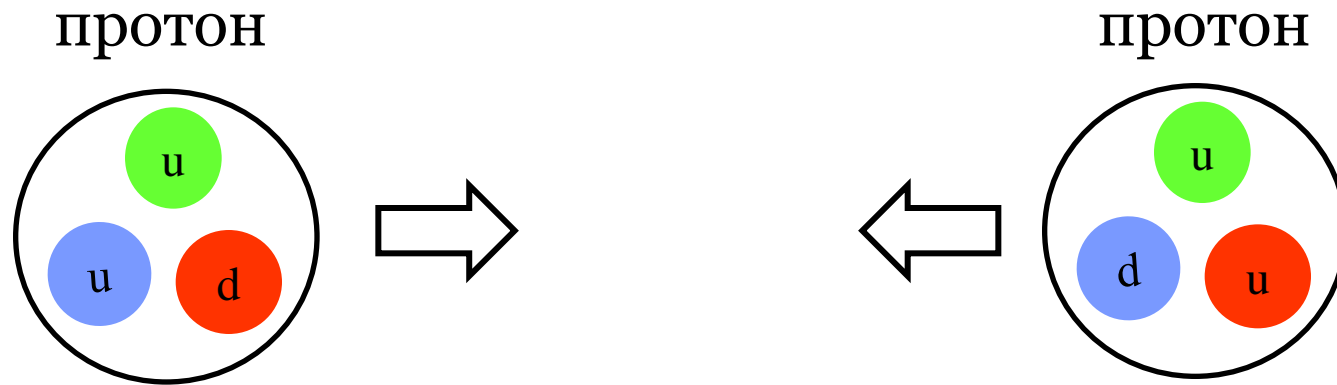


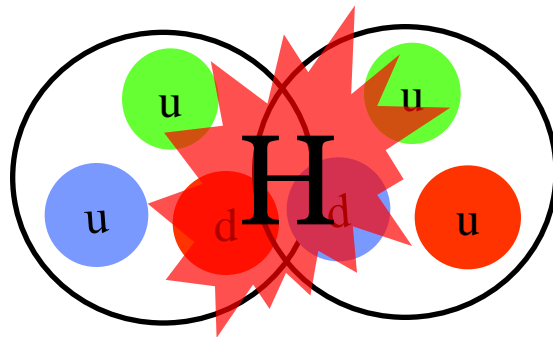
| | Fermions | | | Bosons | |
|---------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|----------------|
| Quarks | u up | c charm | t top | γ photon | Force carriers |
| | d down | s strange | b bottom | Z Z boson | |
| Leptons | ν_e electron neutrino | ν_μ muon neutrino | ν_τ tau neutrino | W W boson | |
| | e electron | μ muon | τ tau | g gluon | |
| | | | | Higgs* boson | |

*Yet to be confirmed

Частицы бывают
 Заряженные: e, μ, π, K, p
 Нейтральные: γ, n

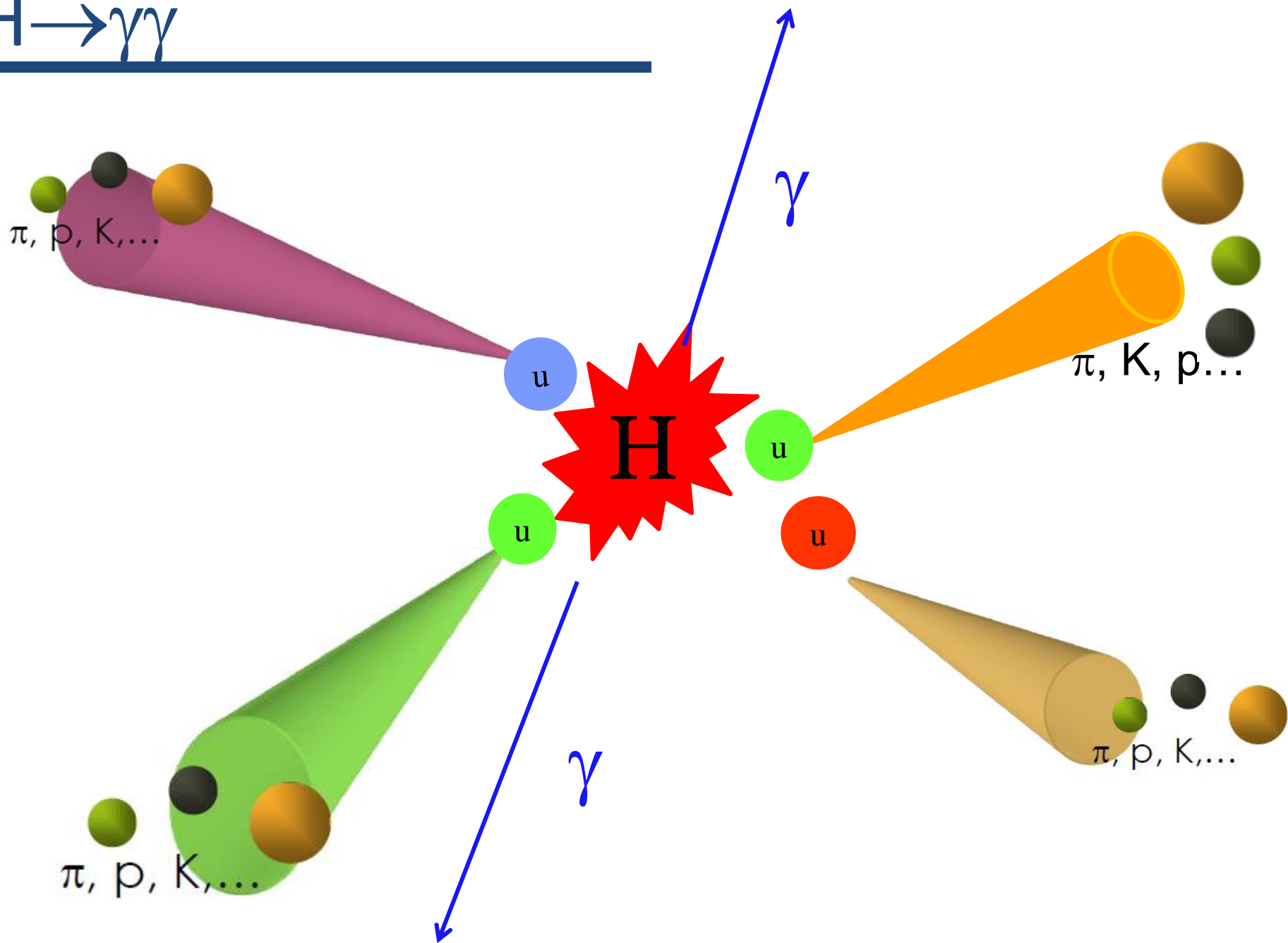
А другие частицы? Пример события



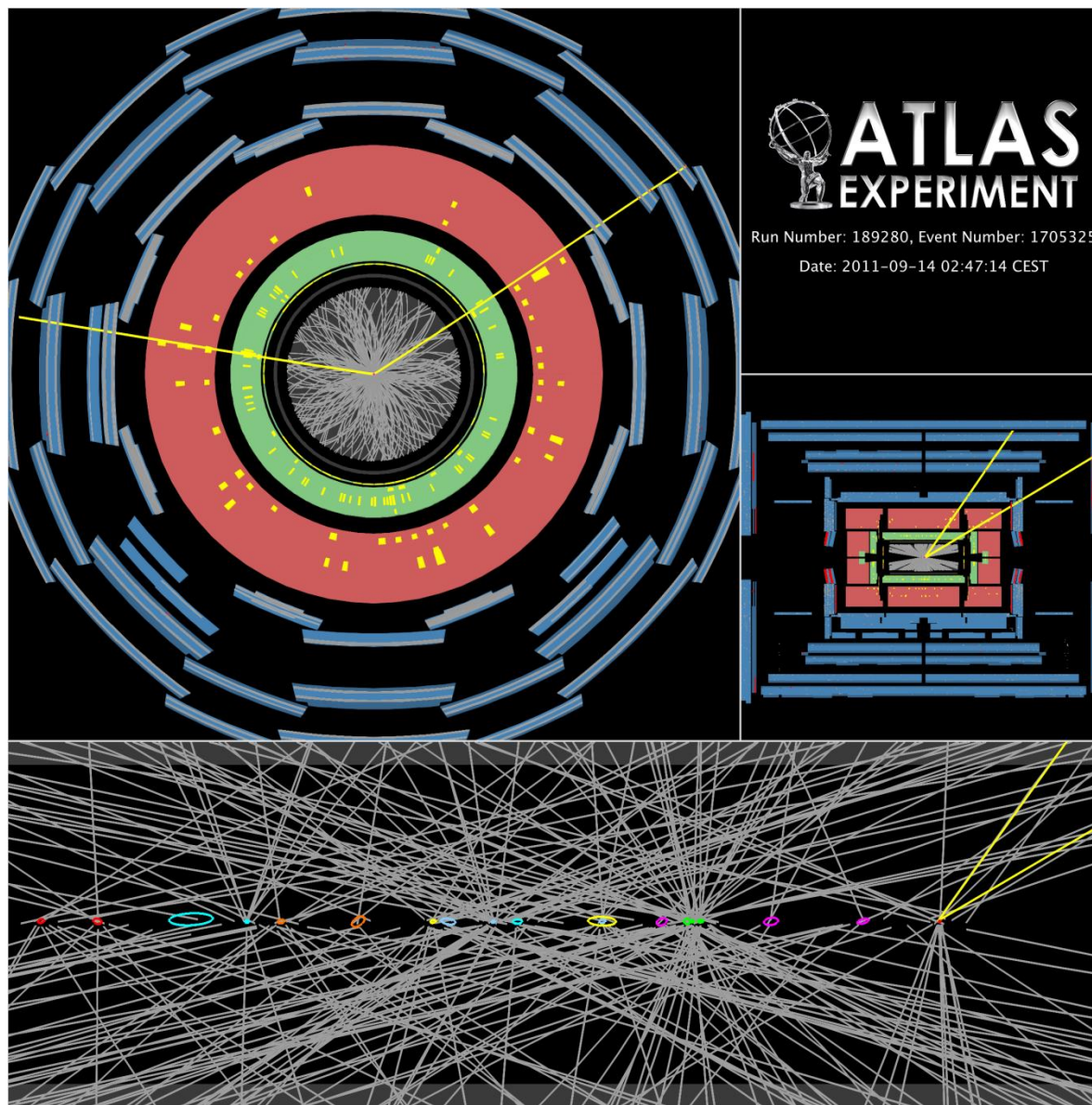


Бозон Хигса

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



Много столкновений одновременно!



Задача детектора

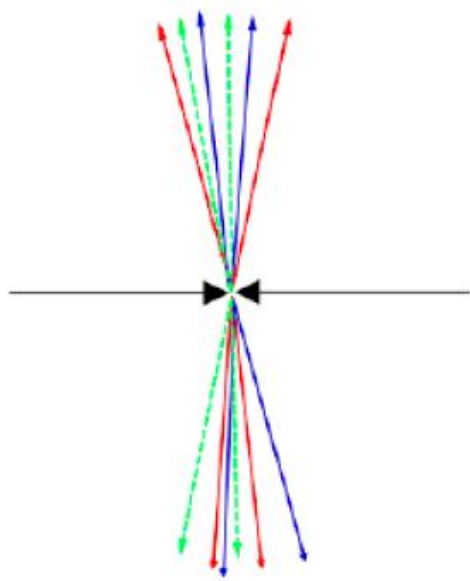
Для того чтобы понять, что произошло при столкновении надо

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

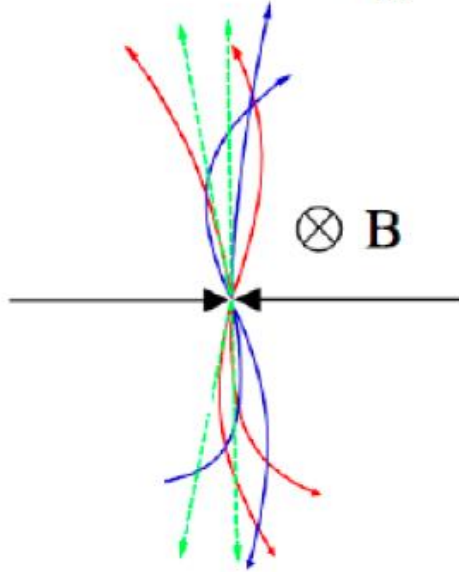
Разные частицы взаимодействуют с веществом по разному

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

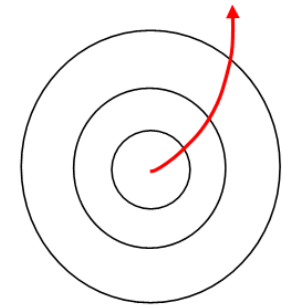
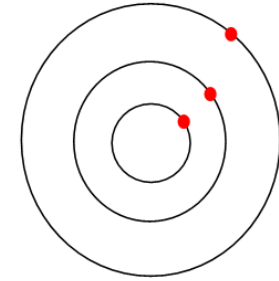


Fig. 2



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.

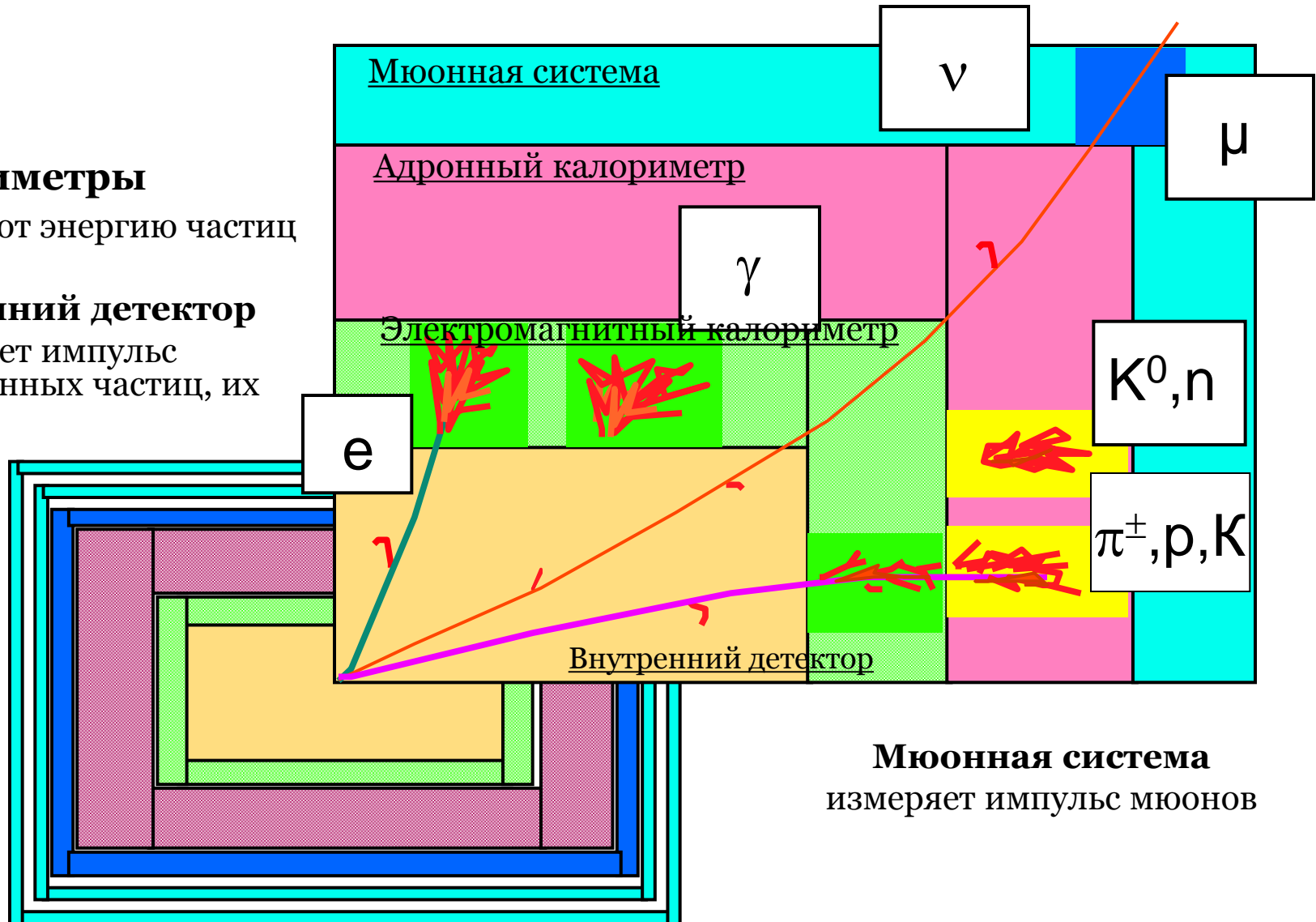
Современные детекторы

Калориметры

- измеряют энергию частиц

Внутренний детектор

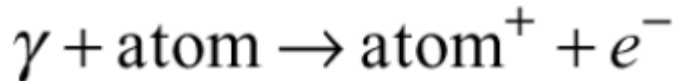
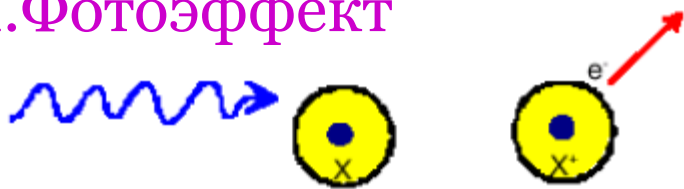
- измеряет импульс заряженных частиц, их заряд



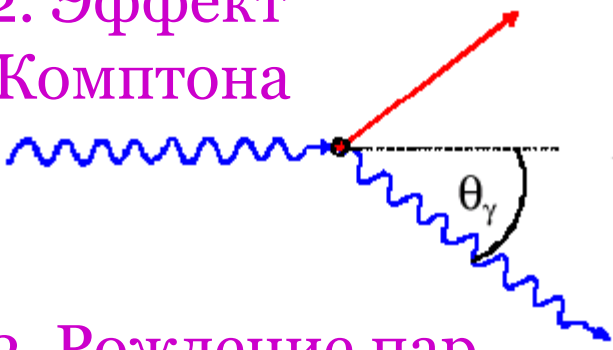
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ С ВЕЩЕСТВОМ

ФОТОНЫ (γ)

1. Фотоэффект



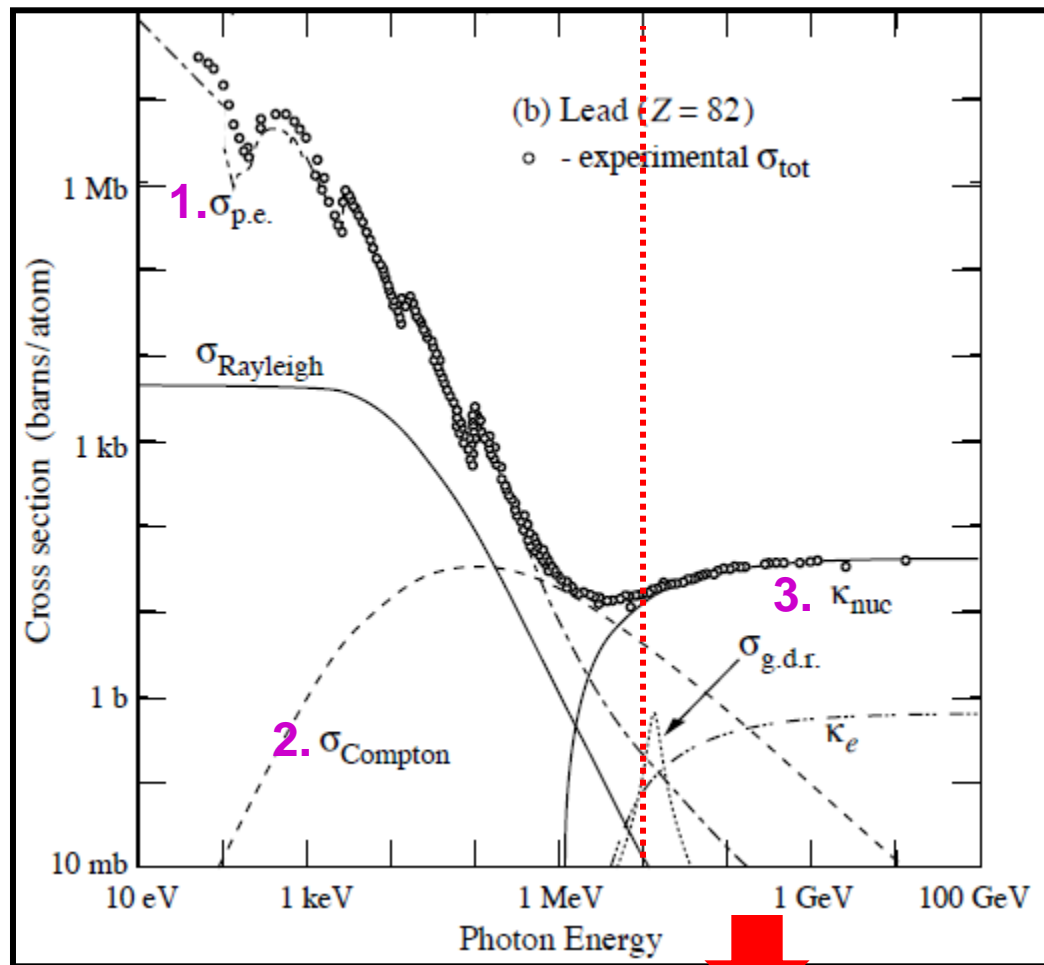
2. Эффект Комптона



3. Рождение пар e^+e^- в поле ядра

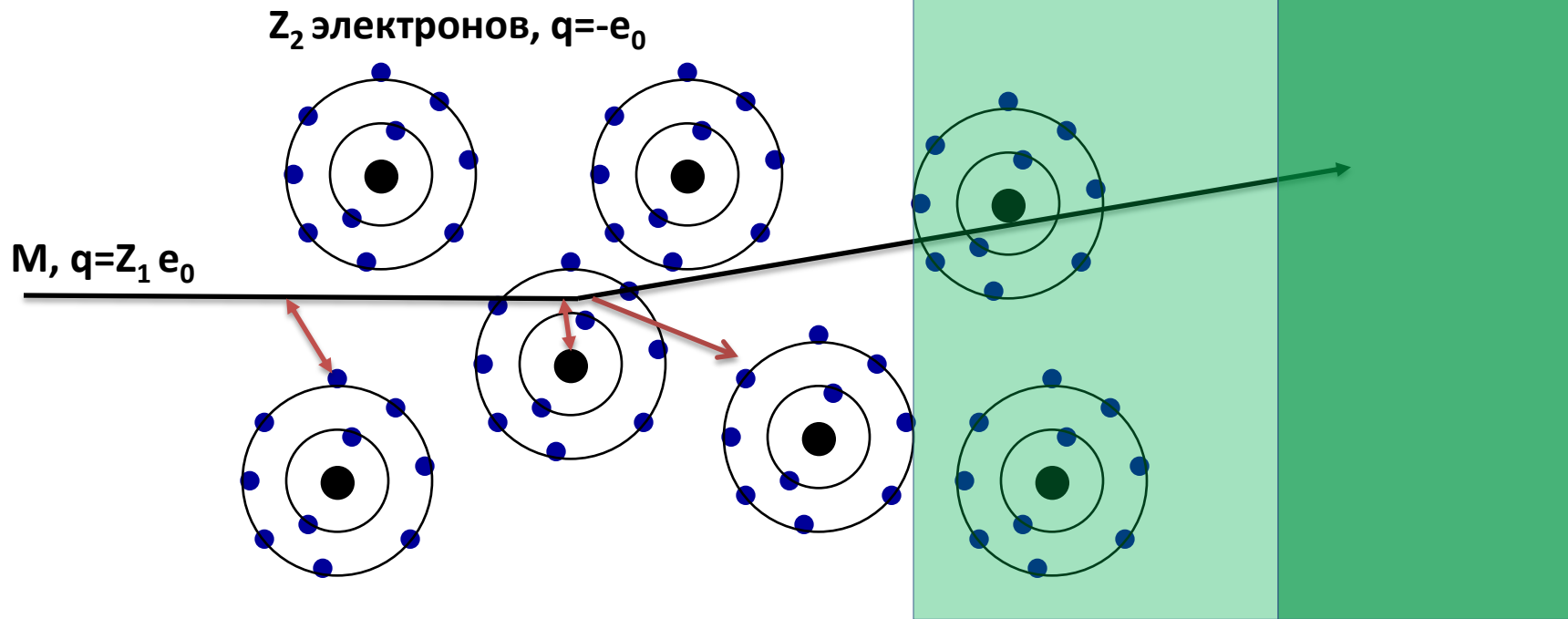


Plots from C.Joram



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

Электроны и другие заряженные частицы



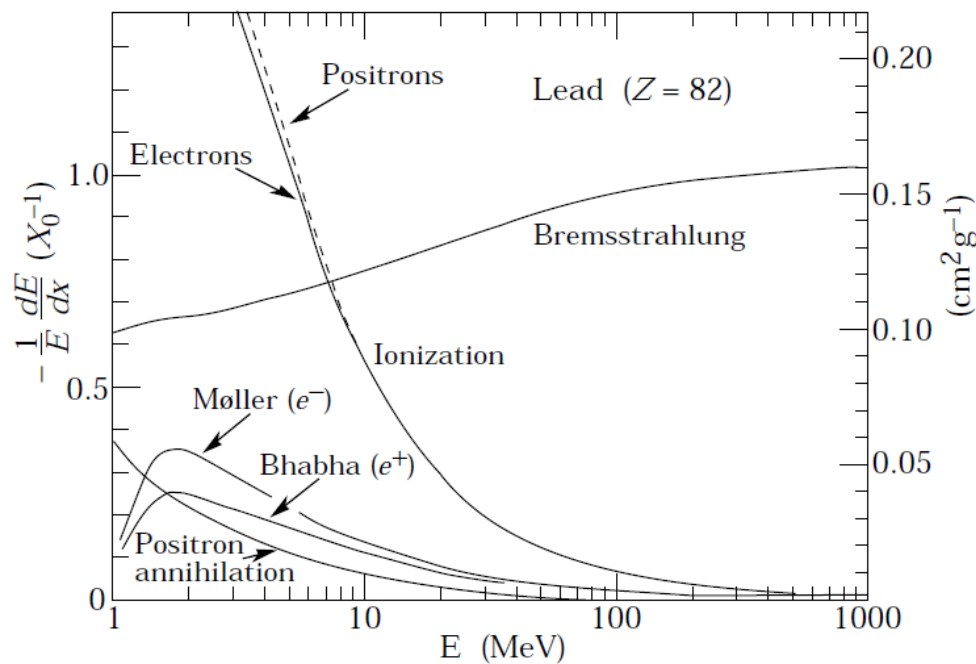
Потеря энергии при взаимодействии с атомарными электронами,
 \Rightarrow
атомы
ионизируются

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



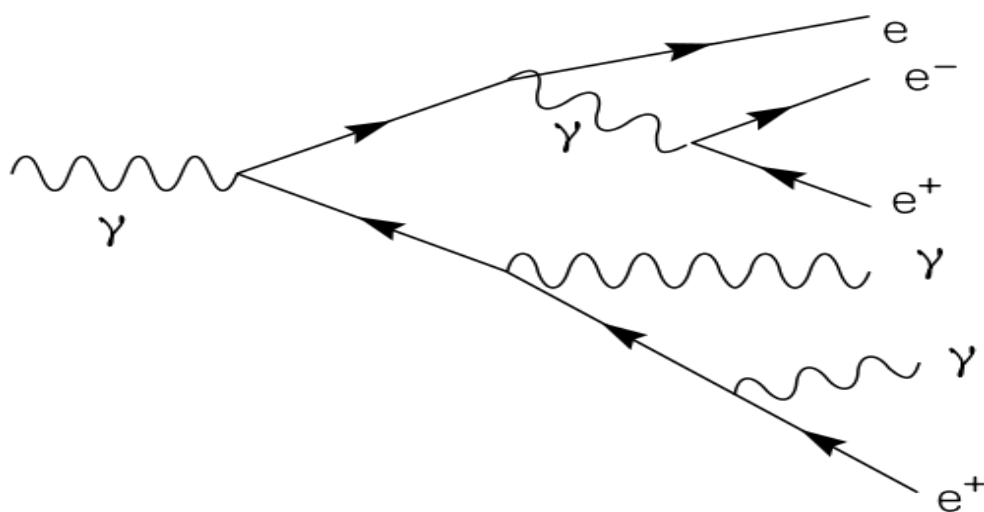
При энергиях электрона $>5-10$ ГэВ тормозное излучение доминирует.

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

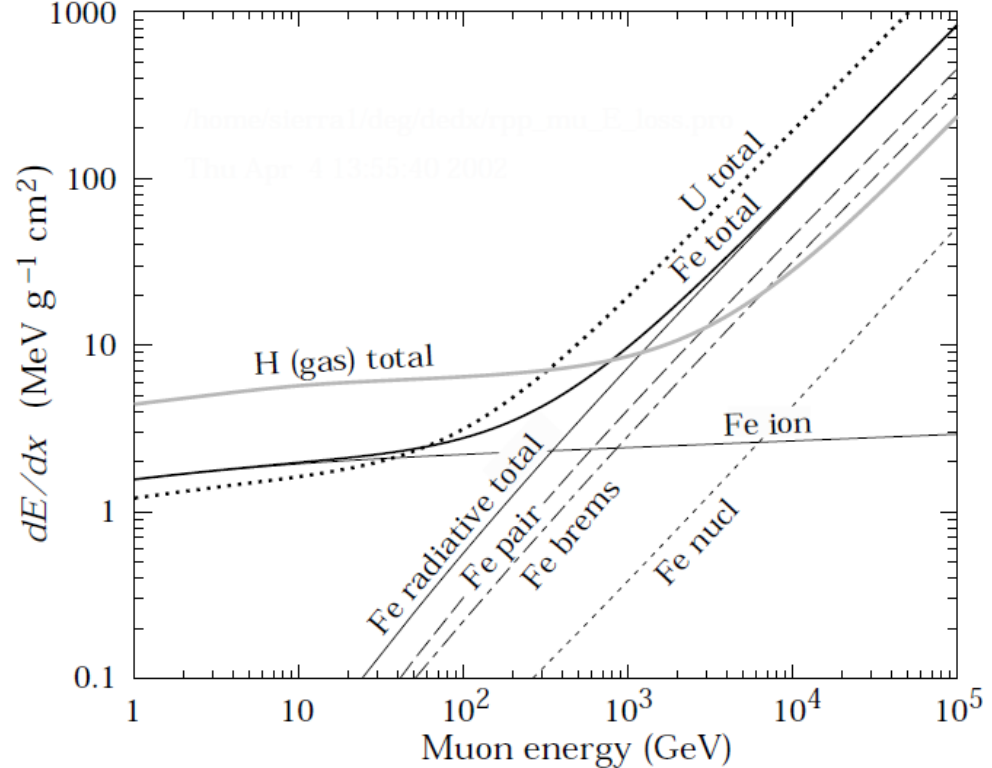
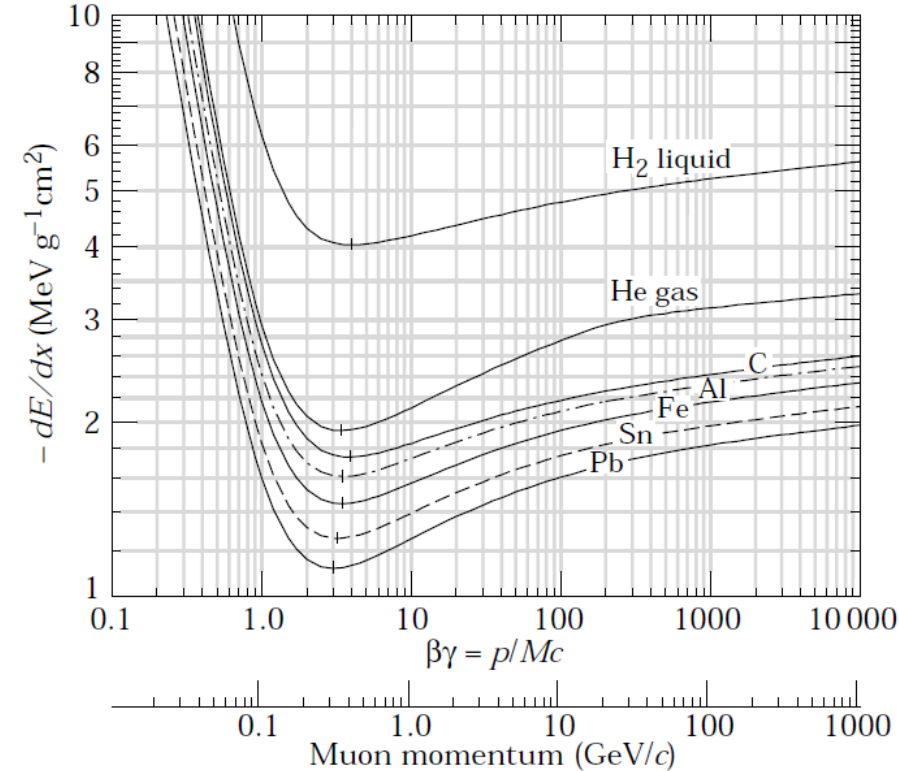
Электроны излучают фотоны, те производят электрон-позитронные пары и т.д. (электро-магнитные ливни)

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

Тысячи частиц при начальной энергии E_0 больше чем 1 ГэВ



Мюоны (μ)

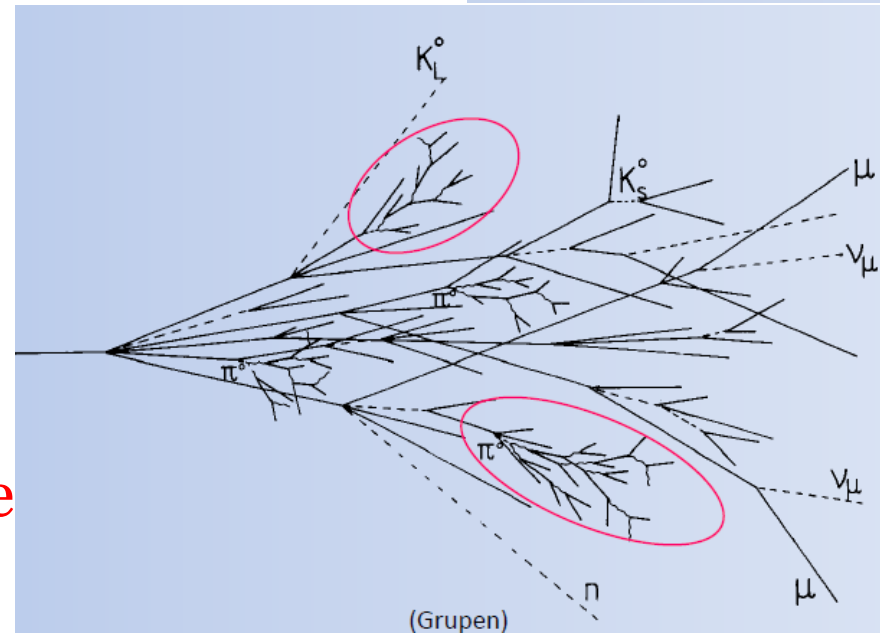
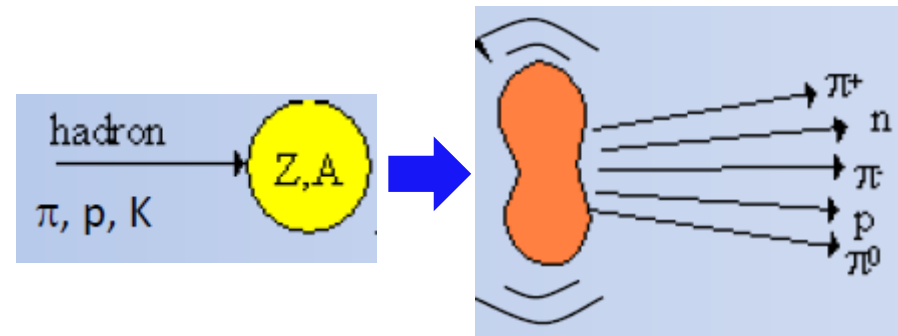


- Мюон – тяжелый электрон
 - Тормозное излучение при энергиях > 500 ГэВ
 - Минимально ионизирующая частица
 - Почти не взаимодействует

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**)

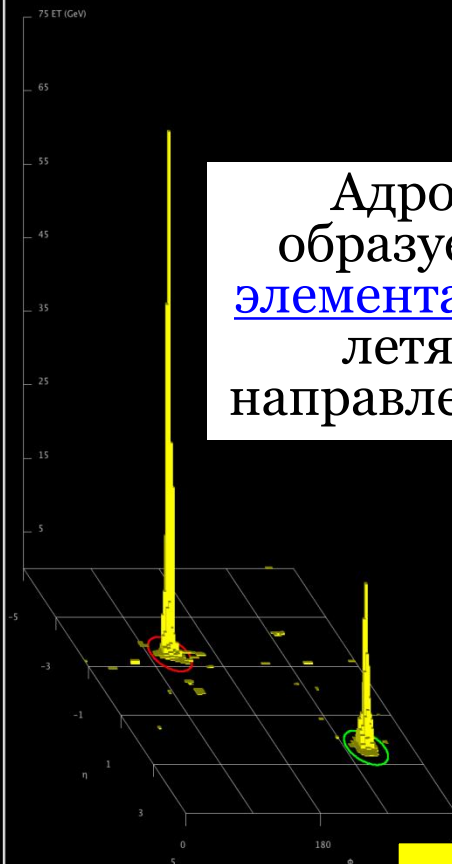
- Физика довольно сложна
- Внутри ливня появляются также фотоны и электроны, рождая электромагнитные ливни
- Размножение пока энергия частиц в ливне достаточно большая $> \text{ГэВ}$



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

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

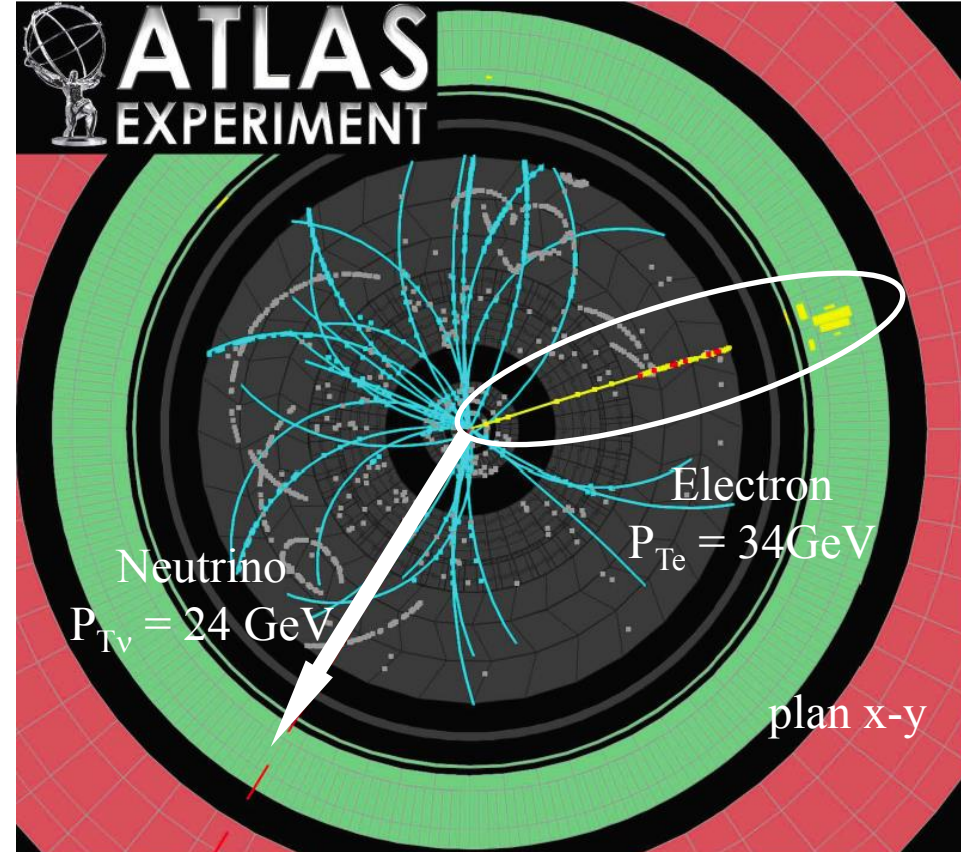
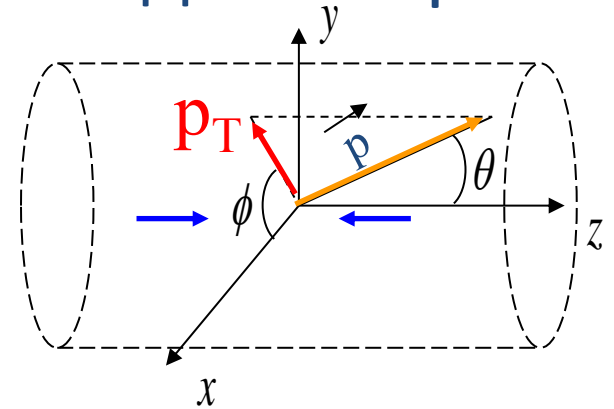
Недостающая энергия

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

– Это может быть нейтрино...

Или новая частица!

...но об этом в других лекциях...



ПРИНЦИПЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Первые детекторы

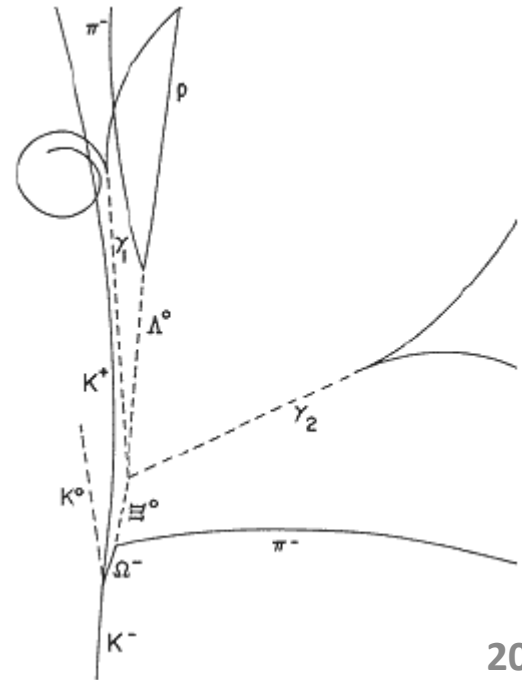
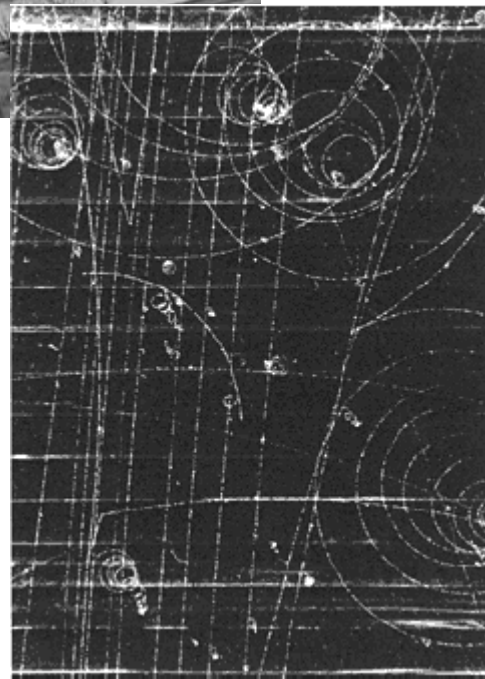
- «Типичные» энергии очень малы по сравнению с макроскопическими размерами детекторов
- Надо использовать физические эффекты чувствительные к малым возмущениям
- Системы в состоянии неустойчивого равновесия
 - переохлажденный пар **туманной камере Вильсона** (Нобелевская Премия 1927)
 - Образование капелек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

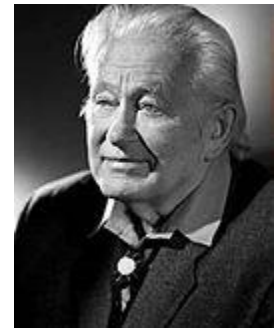
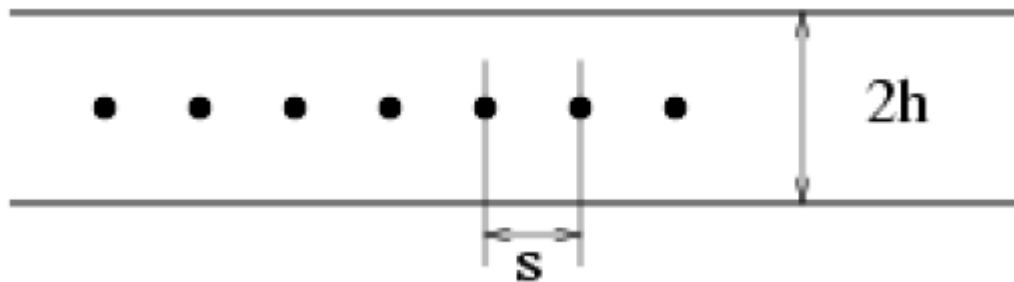


К современным детекторам

- 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

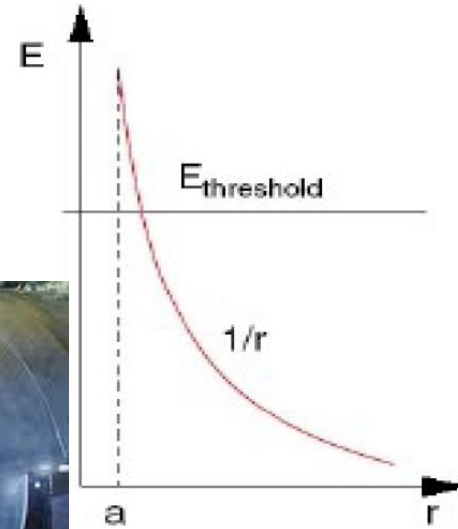
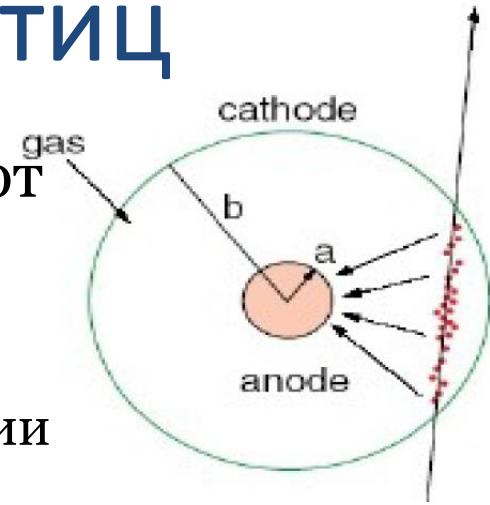


Измерение траектории частиц

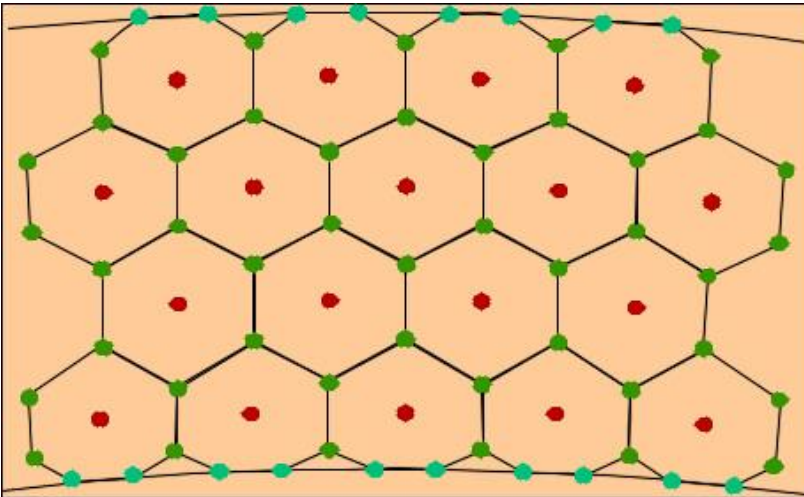
Частица ионизирует газ, электроны дрейфуют к тонкой проволоочке под напряжением

- 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



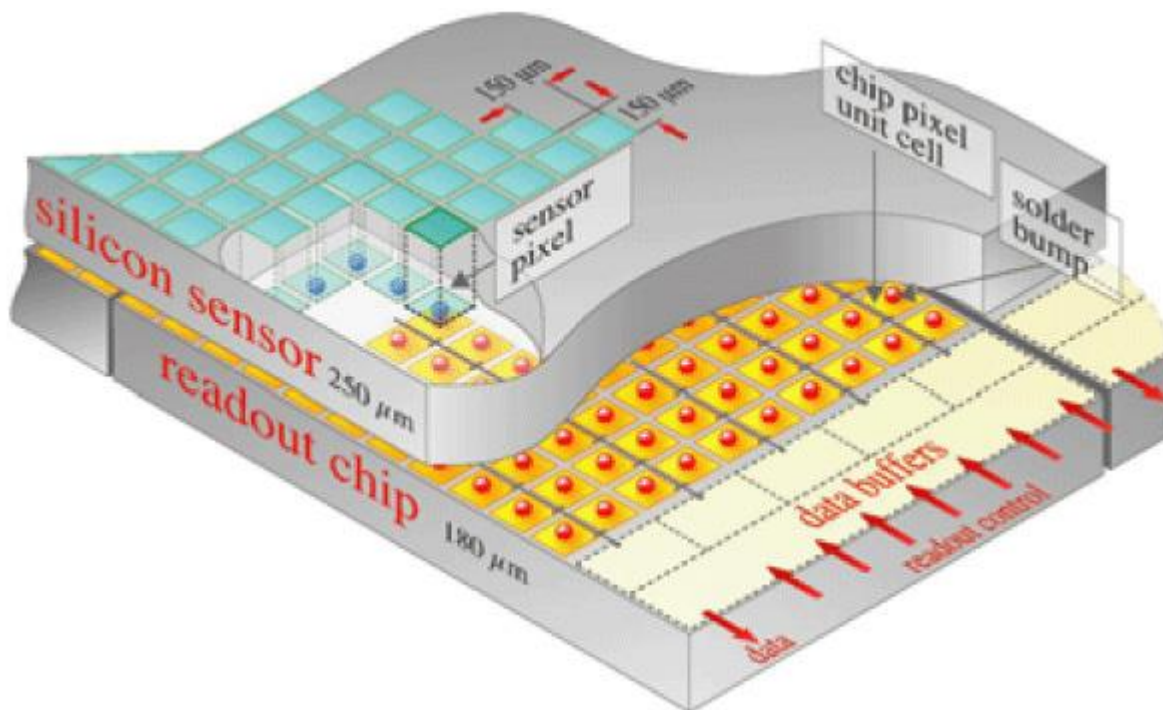
● сенсор ● под напряжением

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



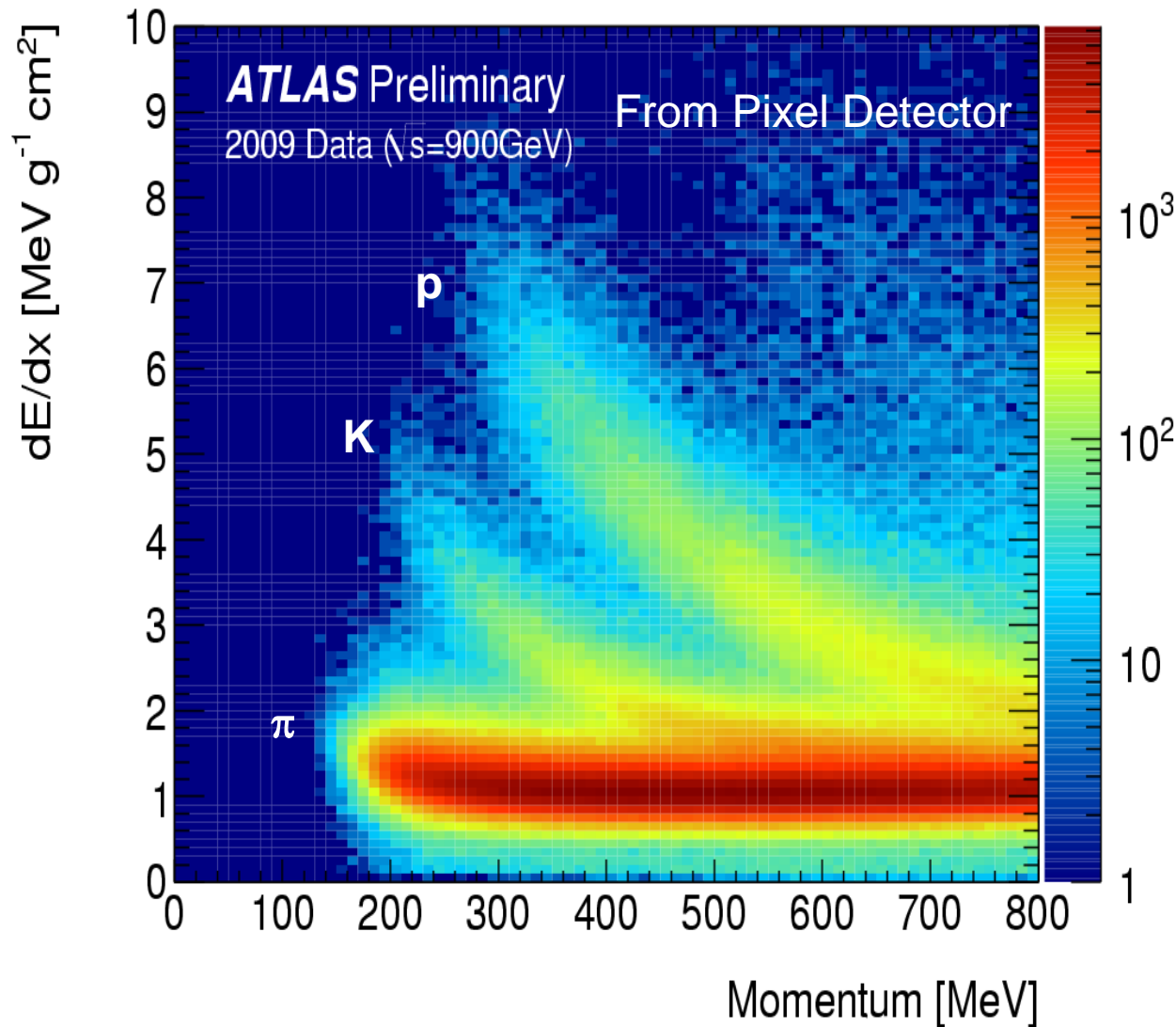
Точности: 5-50 μm

Геометрия:

- Полоски «стрипы»
- Прямоугольники «пиксели»

Много (десятков)
миллионов каналов
считывания

Идентификация заряженных частиц



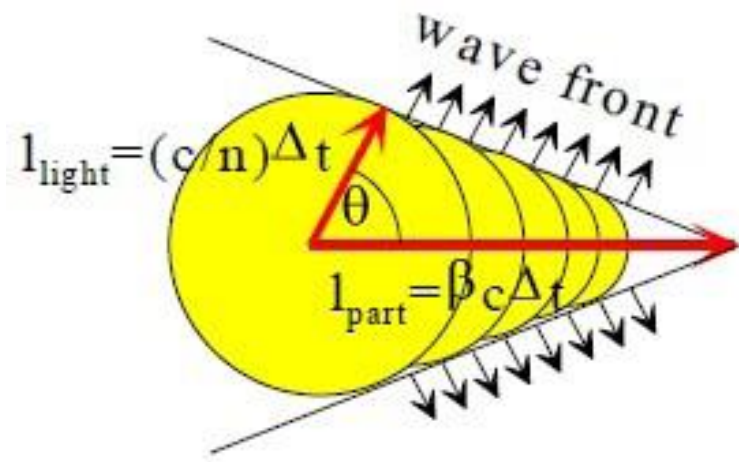
Ионизационные
потери как
функция импульса
зависят от
массы частицы

Это позволяет
идентифицировать
частицы

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

Детекторы Черенковского излучения

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



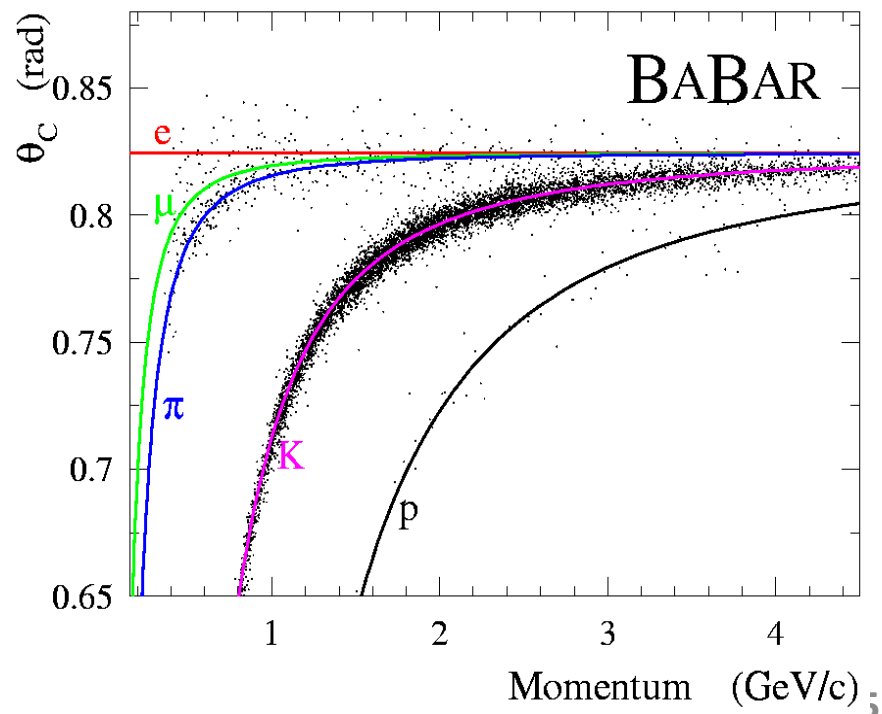
- Конус черенковского света

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

n индекс рефракции

$\beta = v/c$

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



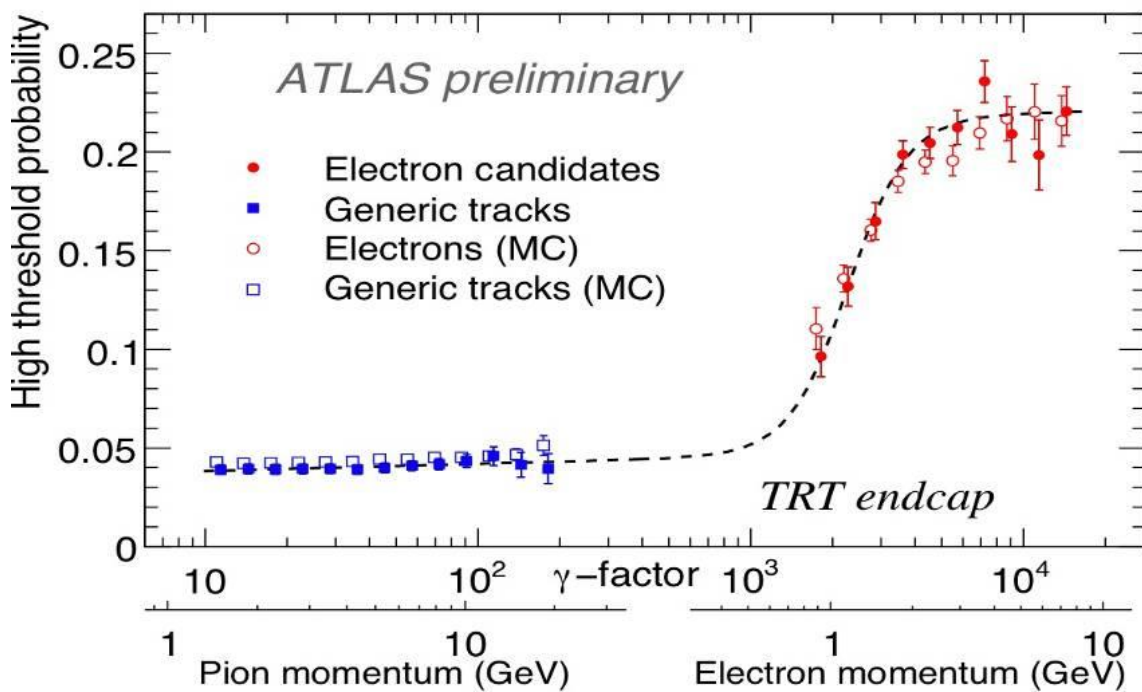
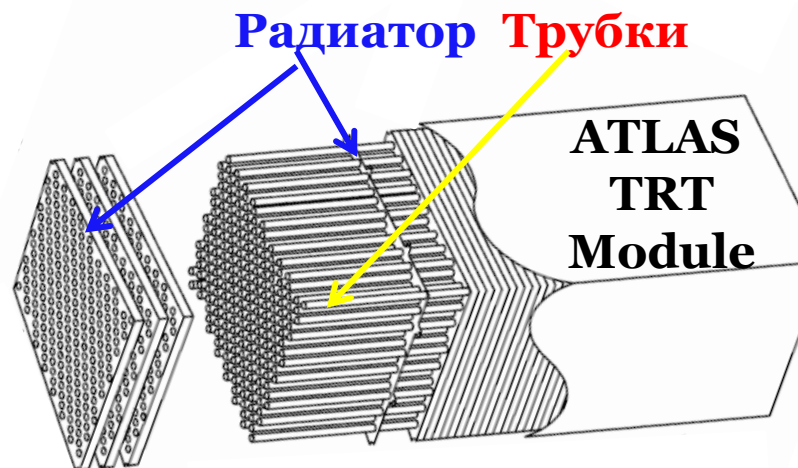
Детекторы переходного излучения

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

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.

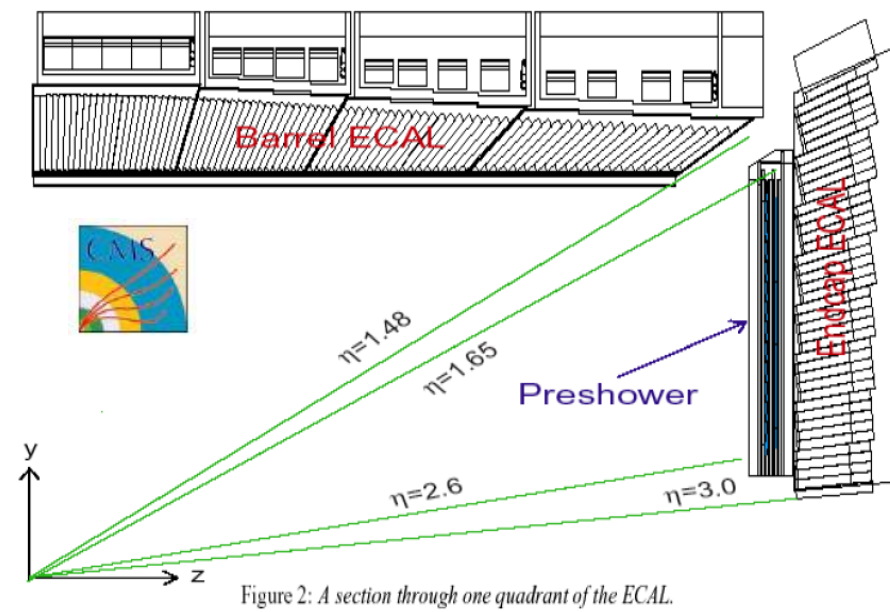
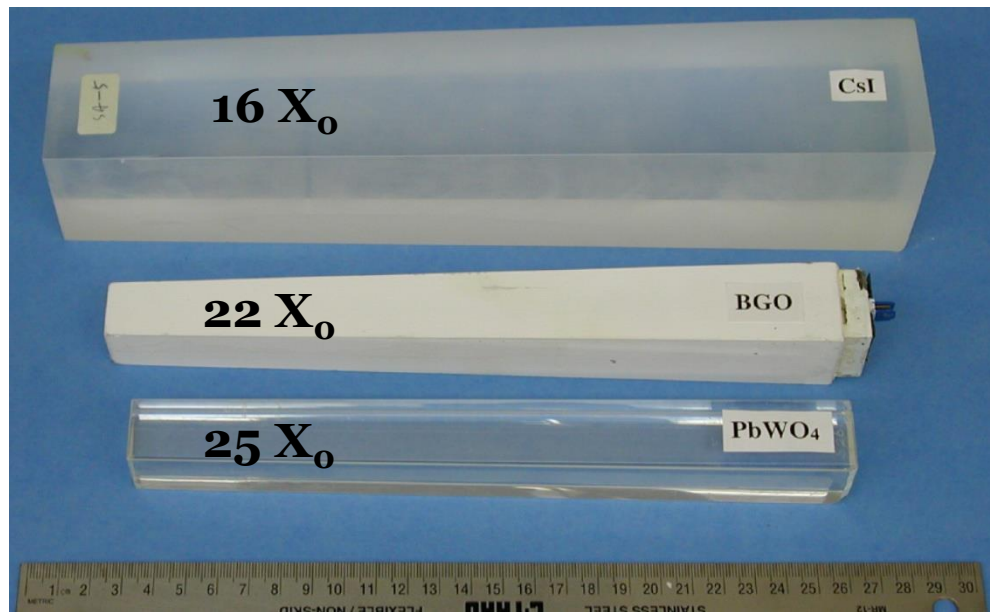


Figure 2: A section through one quadrant of the ECAL.

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

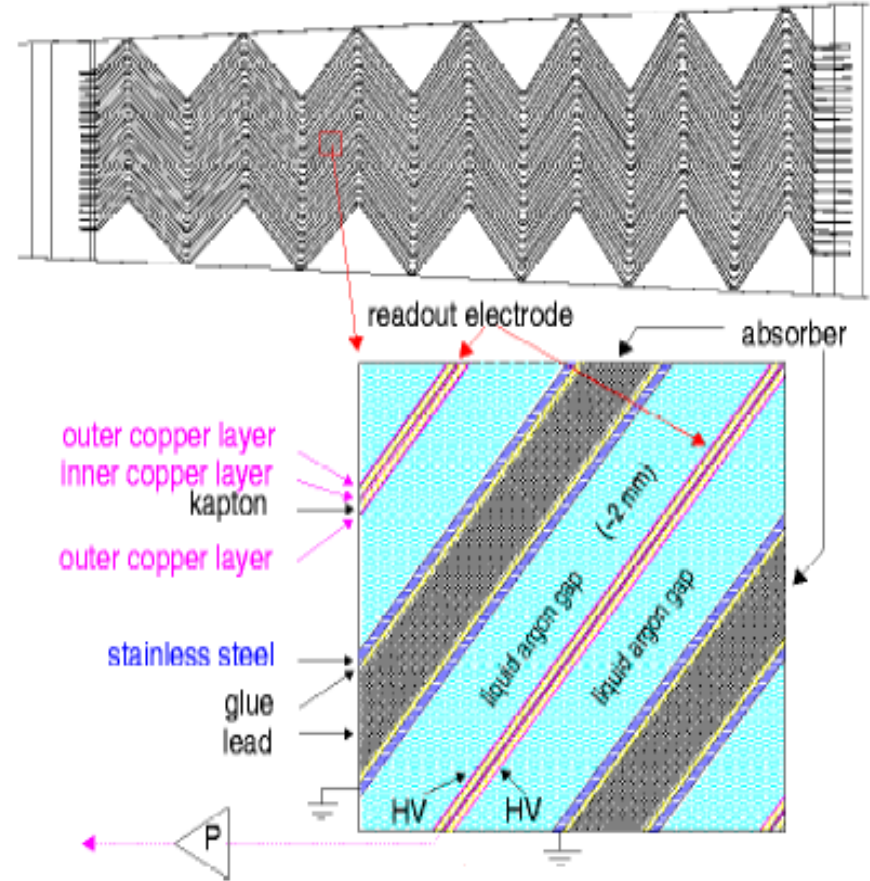
Детектор: пластиковый
сцинтиллятор или
инертная жидкость (Ar, Kr)

- 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

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

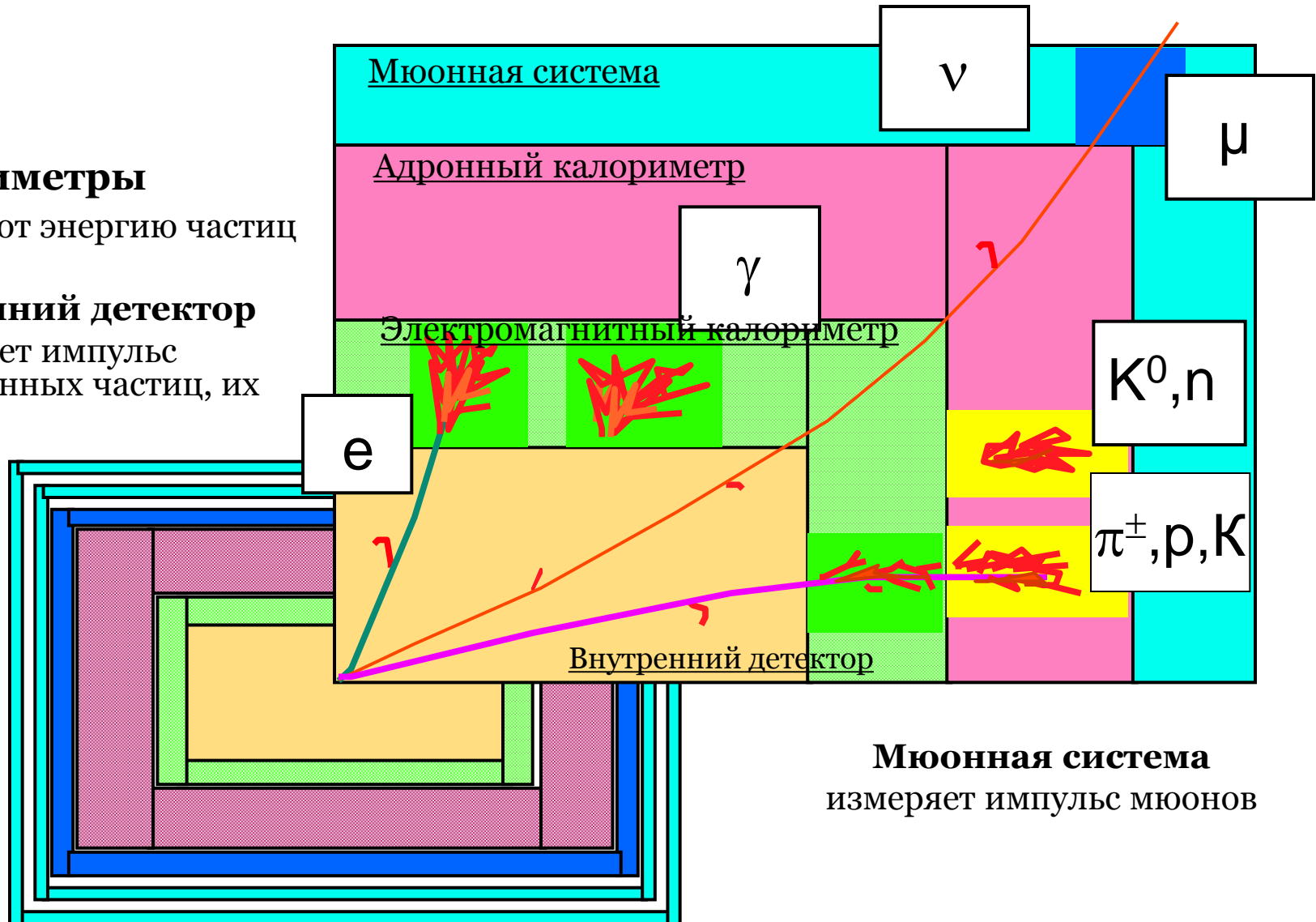
Современные детекторы

Калориметры

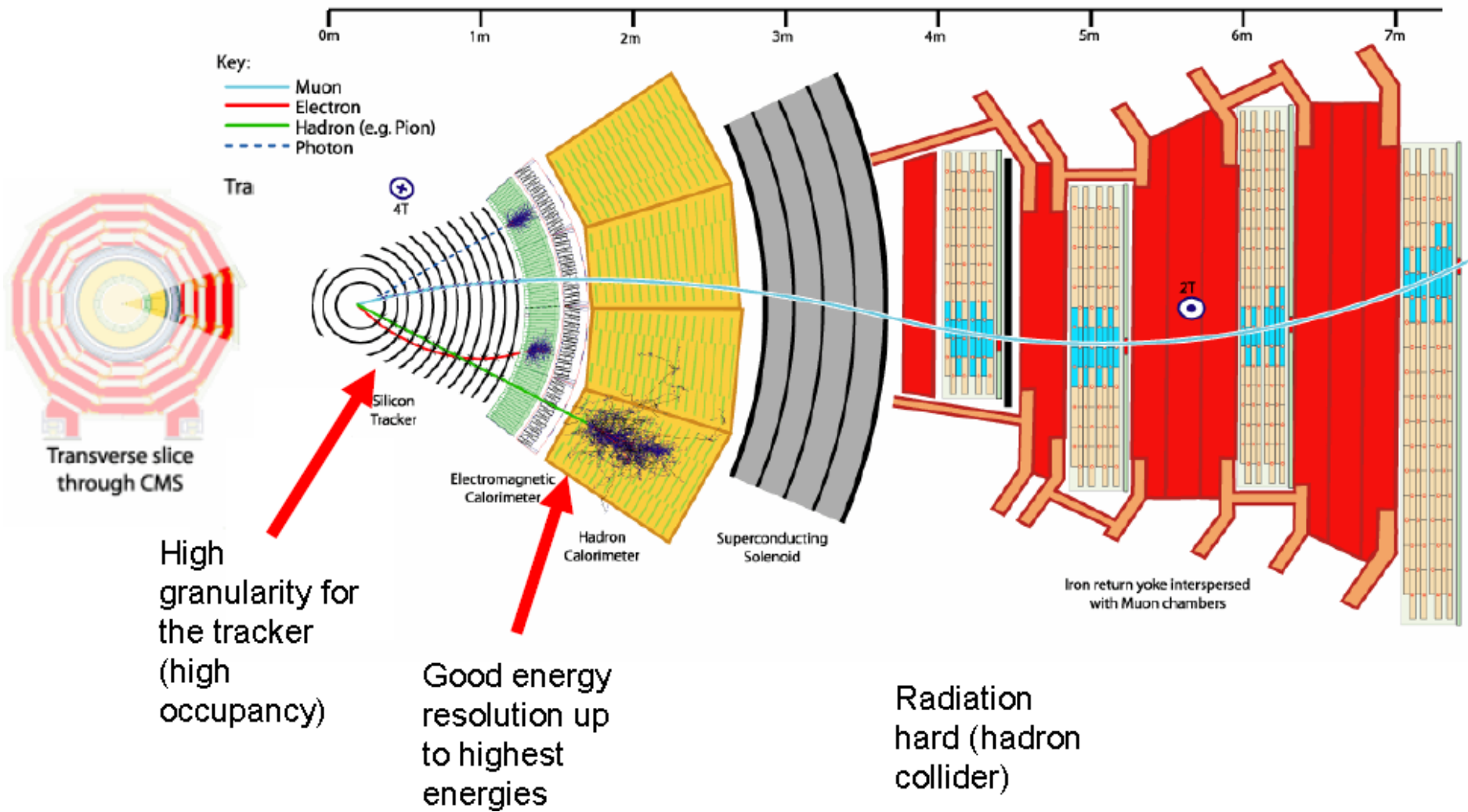
- измеряют энергию частиц

Внутренний детектор

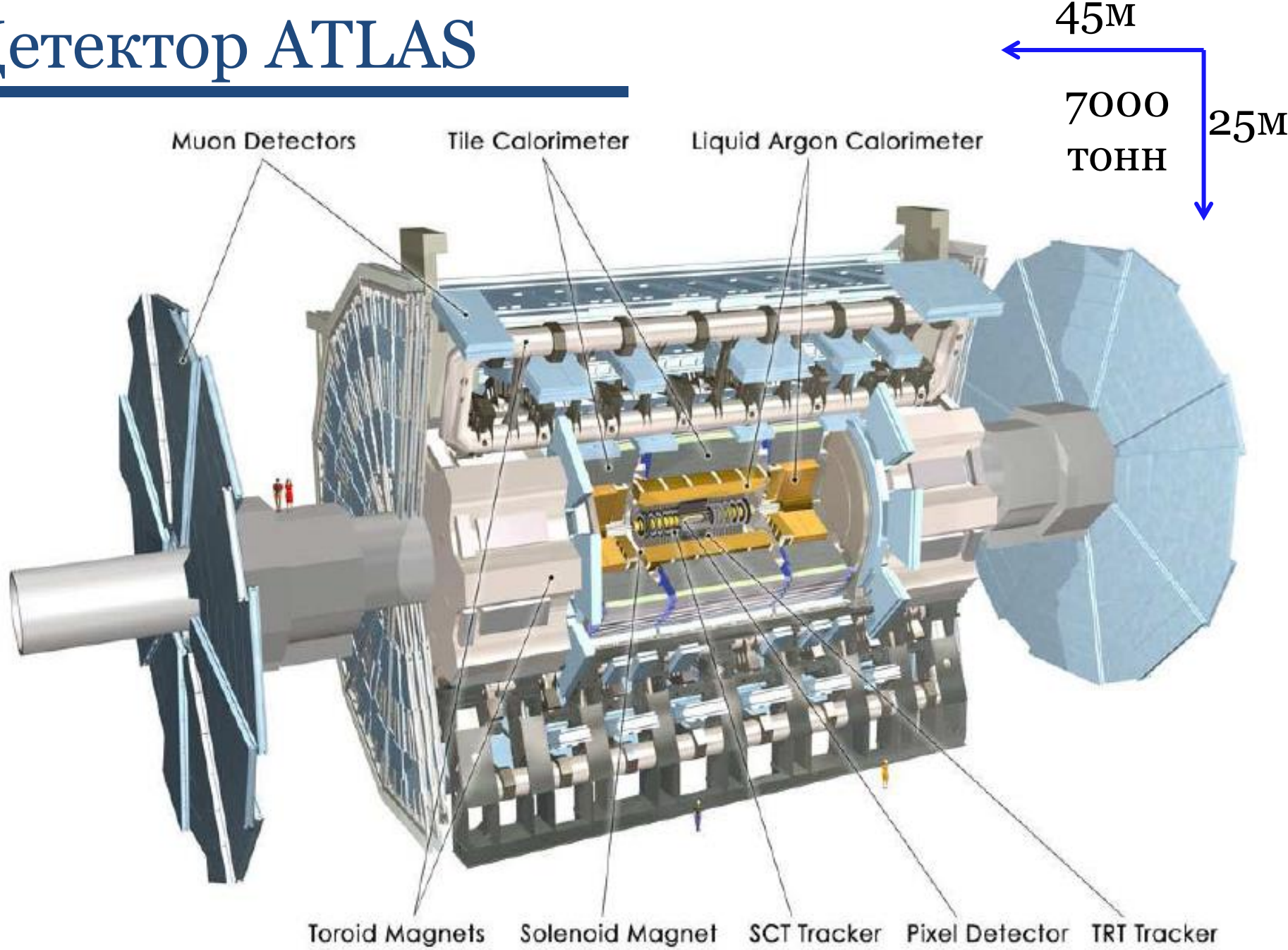
- измеряет импульс заряженных частиц, их заряд



Детектор CMS

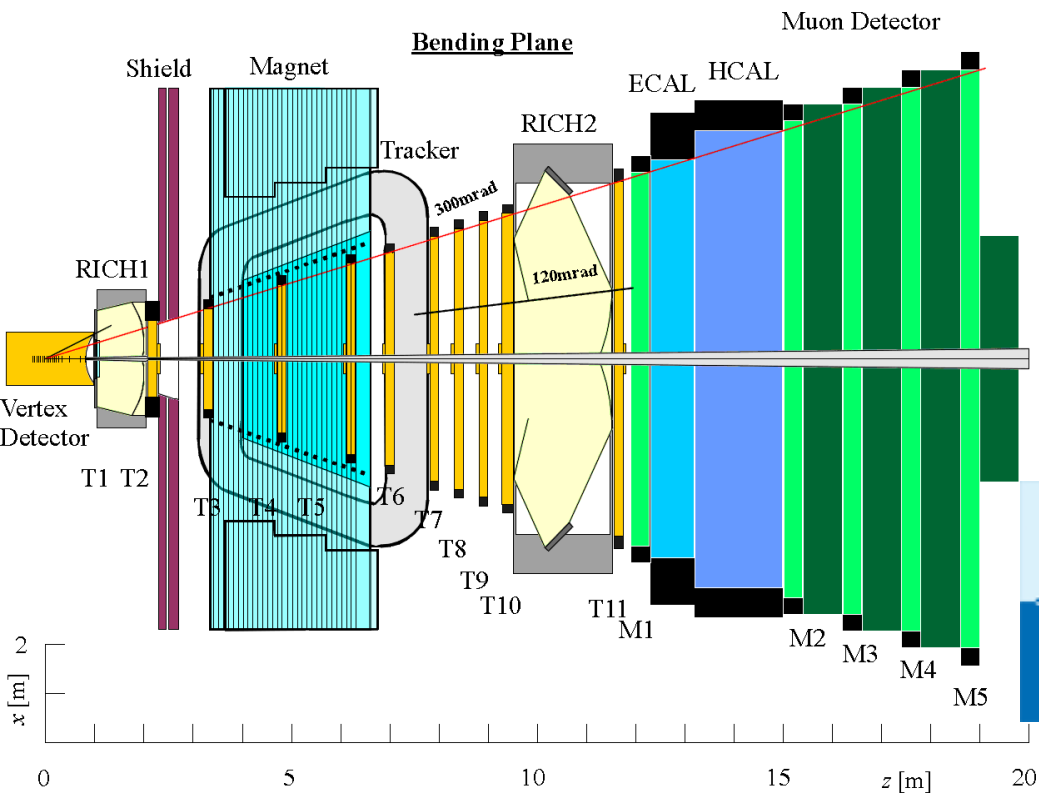
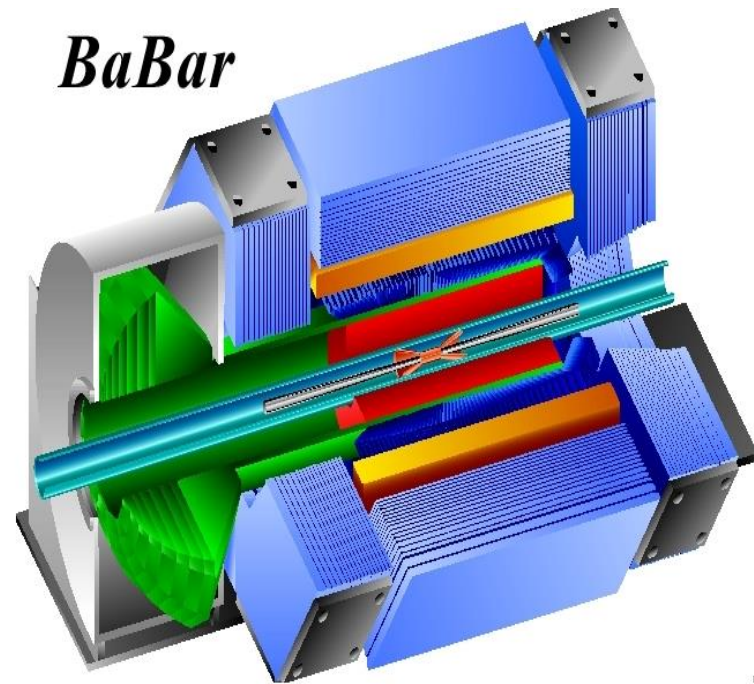


Детектор ATLAS



Асимметричные детекторы

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



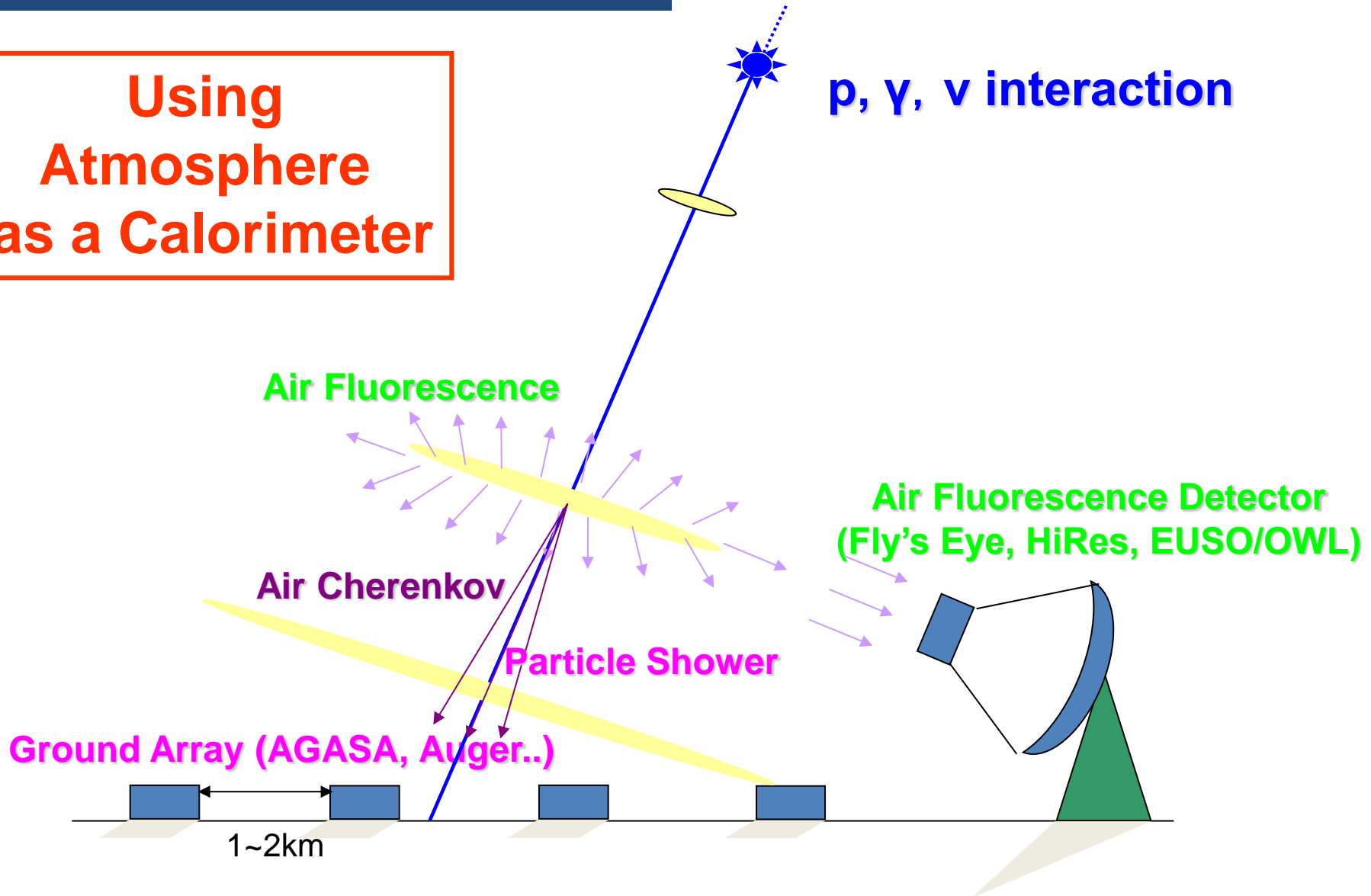
8-99
8488A1

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
 - Детекторы для линейного ускорителя
 - Другие эксперименты

Cosmic Ray Air Shower Detection

Using
Atmosphere
as a Calorimeter

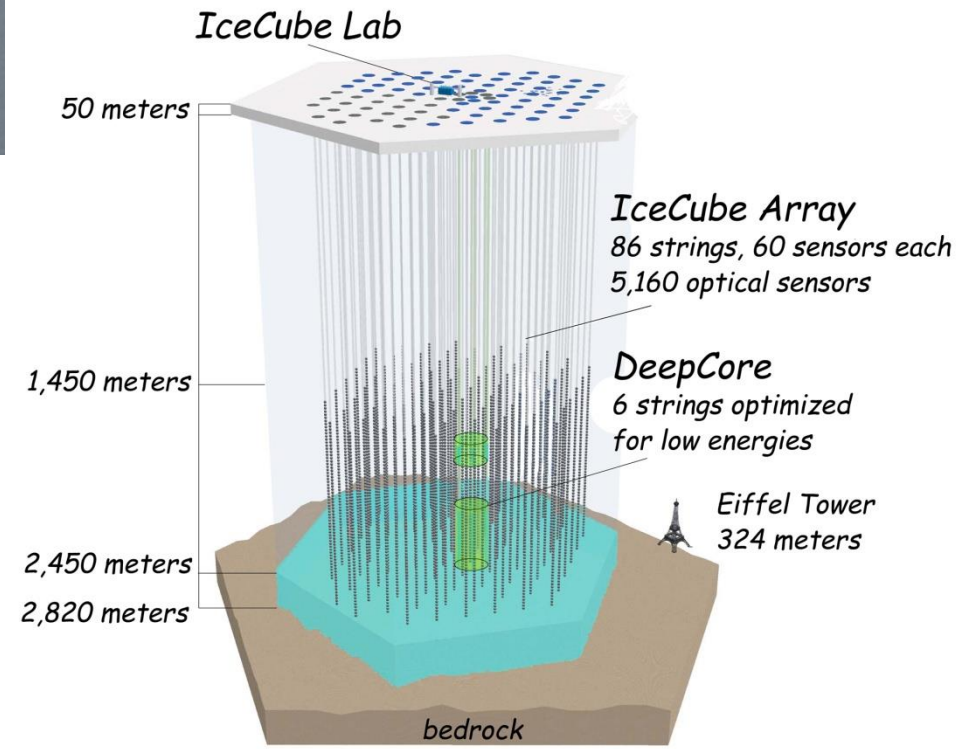
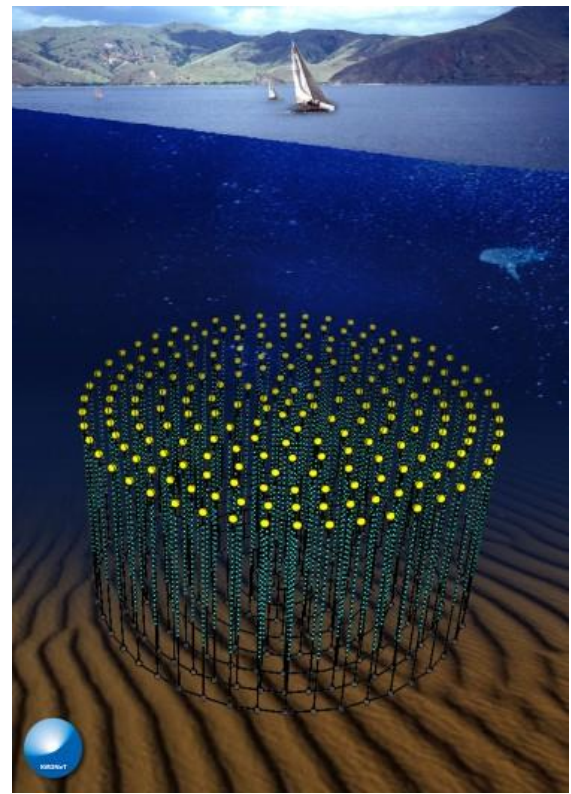


From Katsushi Arisaka, Calor 2002

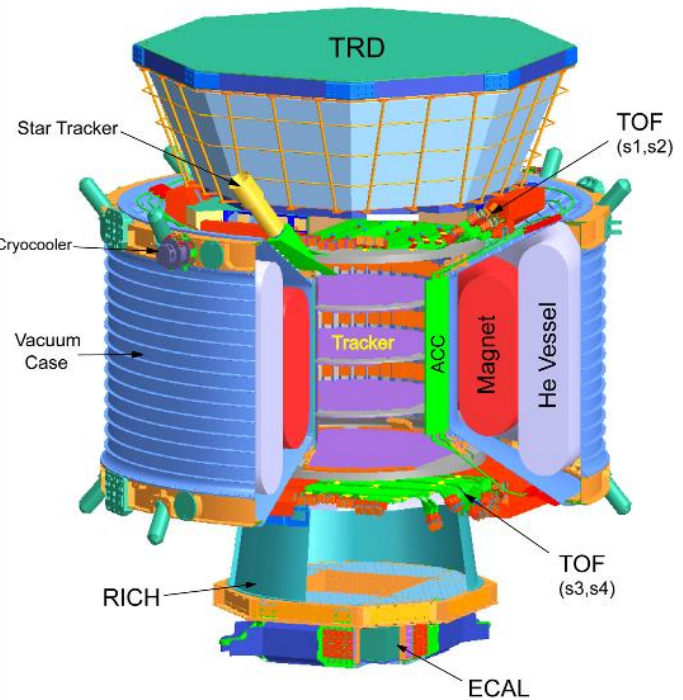
IceCube at the South Pole



Antares Neutrino Observatory



AMS 02 (Alpha Magnetic Spectrometer)



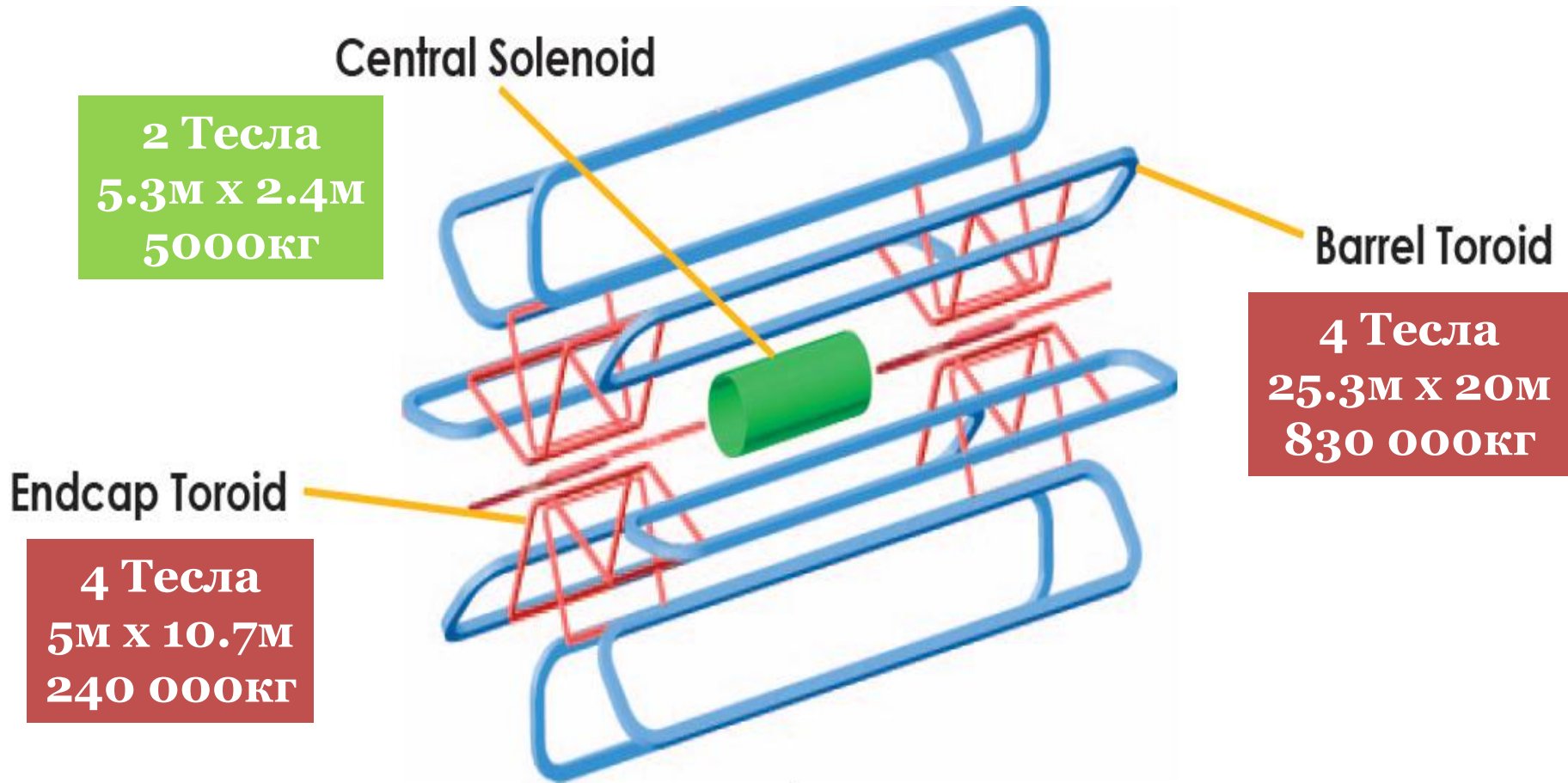
AMS on ISS for 3 years



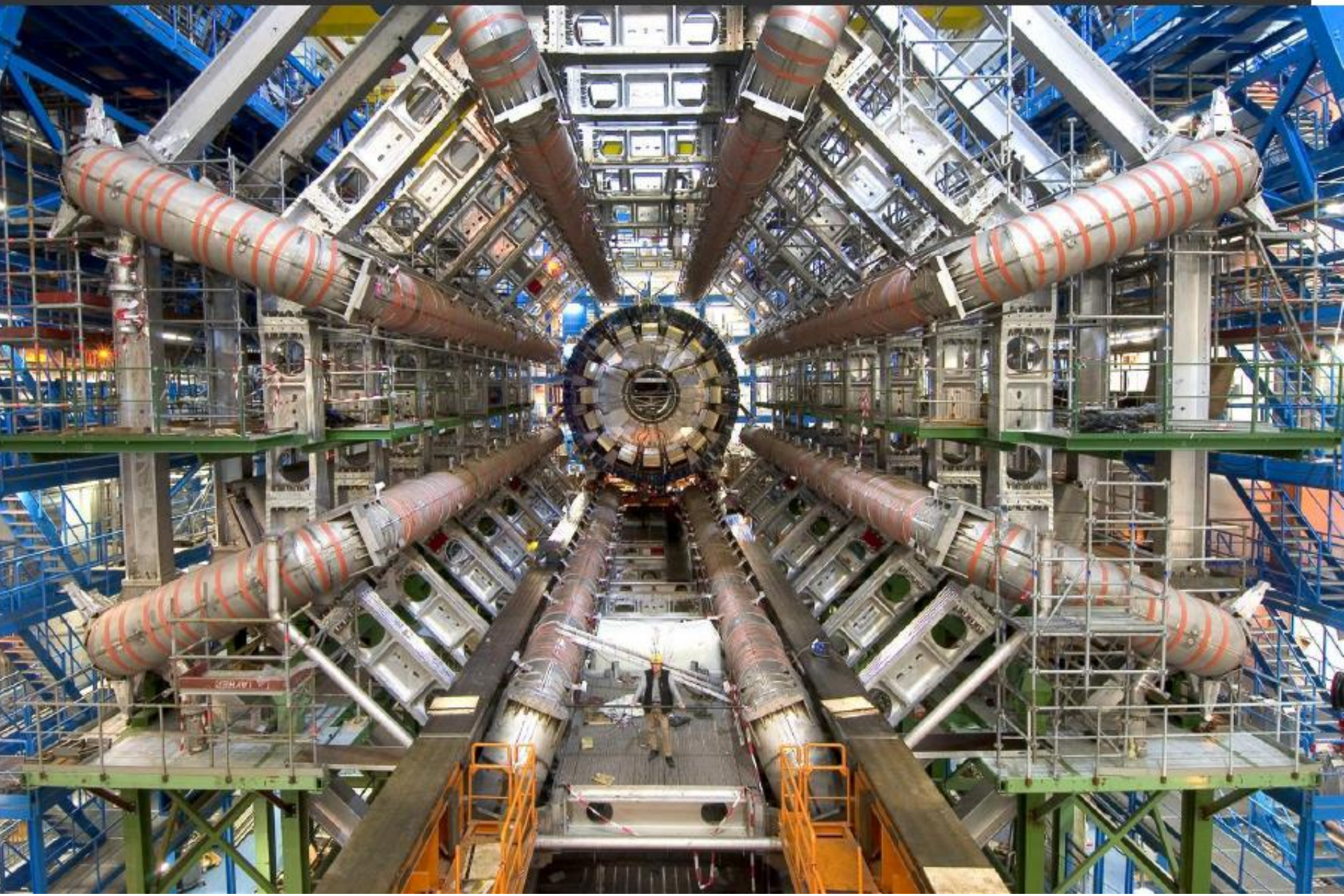
СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРОЗРАЧКИ

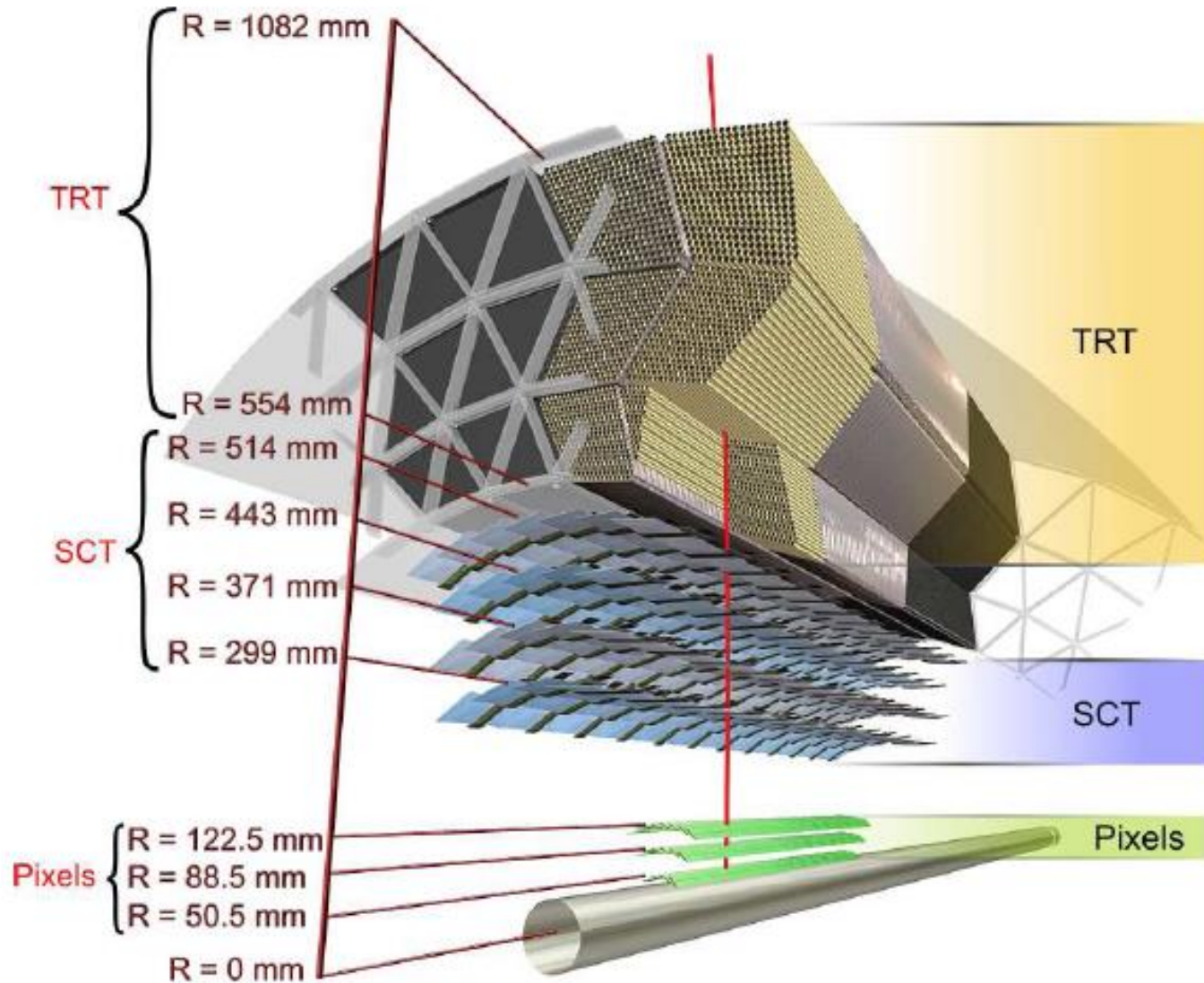
Магнитное поле



Магнит – самая видимая часть детектора



Внутренний детектор



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

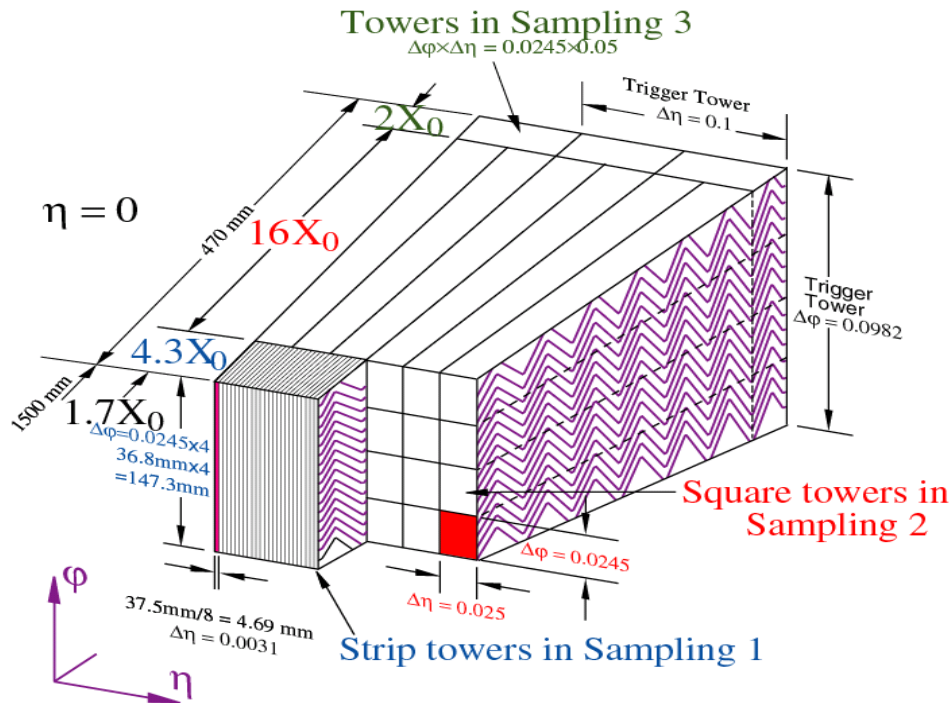
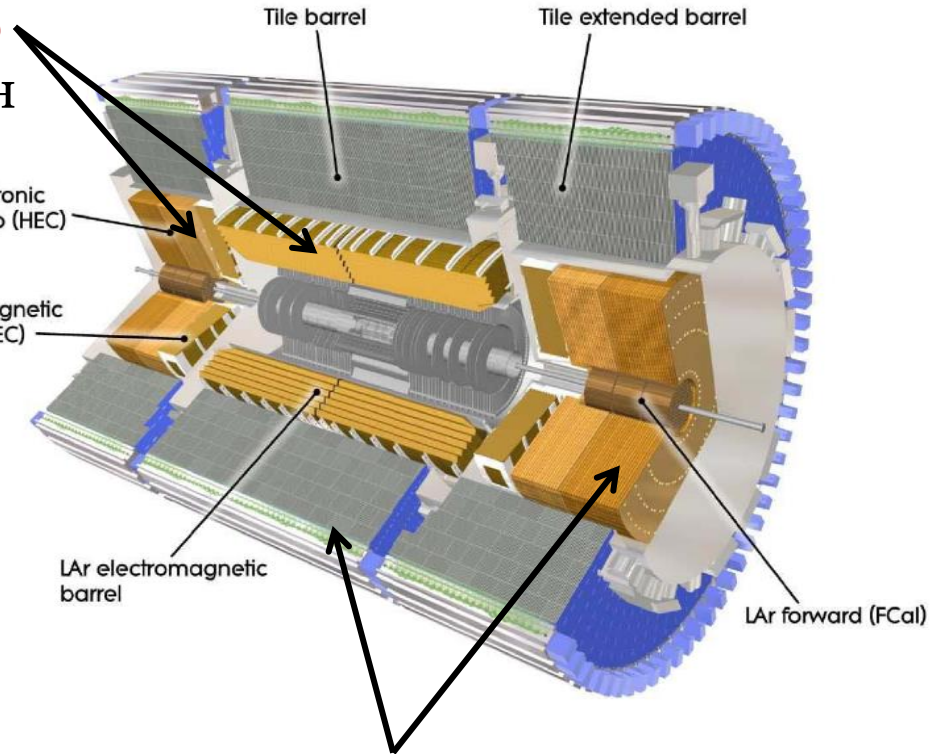
Стрипы (SCT)
Кремний
6.2 М каналов
4 точки измерения
 $\sigma \sim 16 \text{ mm}$

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

Калориметры ATLAS

Электро-магнитный Калориметр

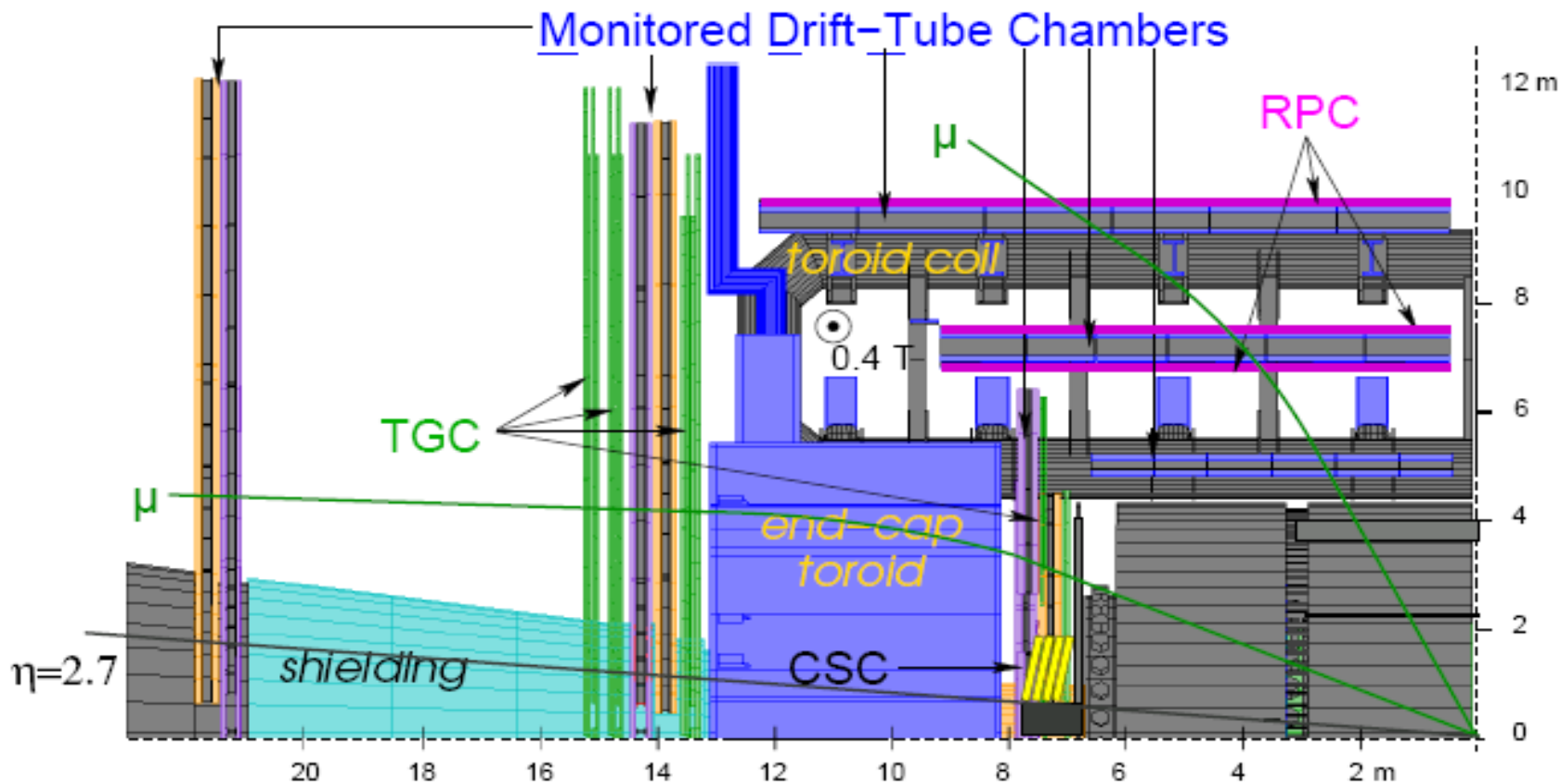
- «Акордеон» Свинец/Жидкий Аргон
- ~180 000 каналов
- Работает при -183°C
- 3 слоя разного размера
 - направление частиц
 - идентификация
- $\sigma_E/E = 10\%/\sqrt{E} \oplus 24.5\%/E \oplus 0.7\%$



Адронный Калориметр

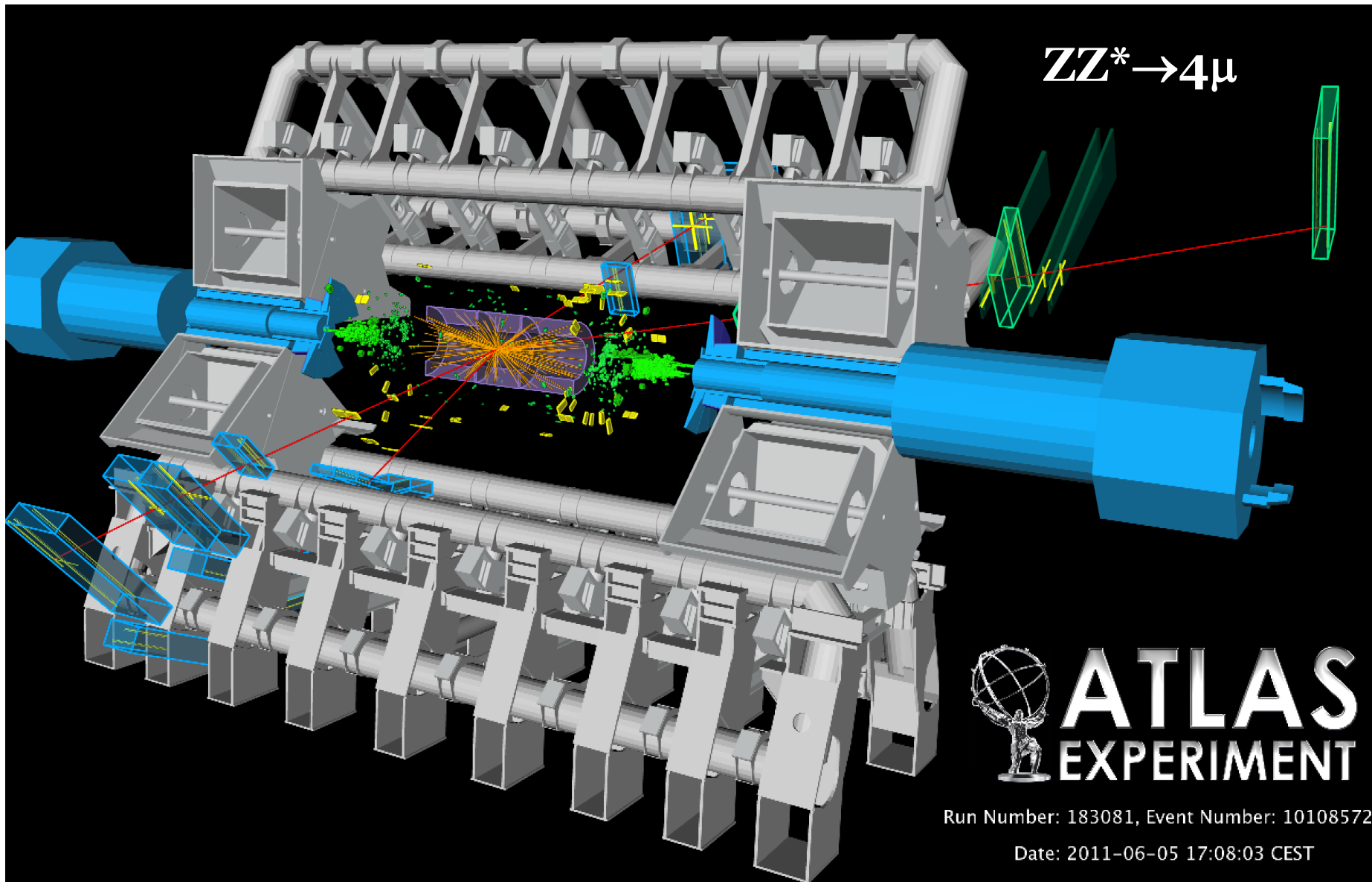
- 500к пластин из пластикового сцинтиллятора и сталь в центре
- Жидкий Аргон / Медь
- 3-4 слоя

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 |



$ZZ^* \rightarrow 4\mu$

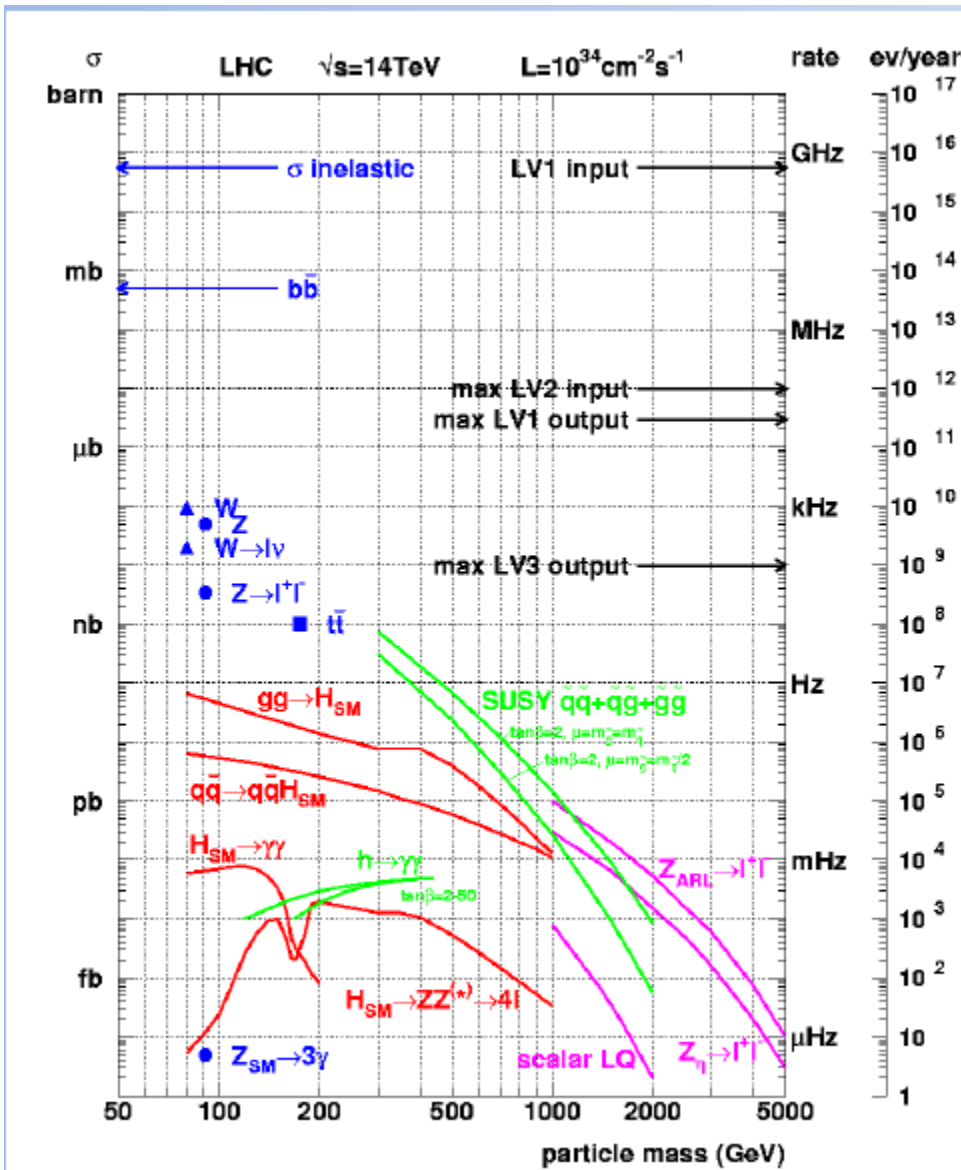


ATLAS
EXPERIMENT

Run Number: 183081, Event Number: 10108572

Date: 2011-06-05 17:08:03 CEST

Сечение рассеяния на БАК

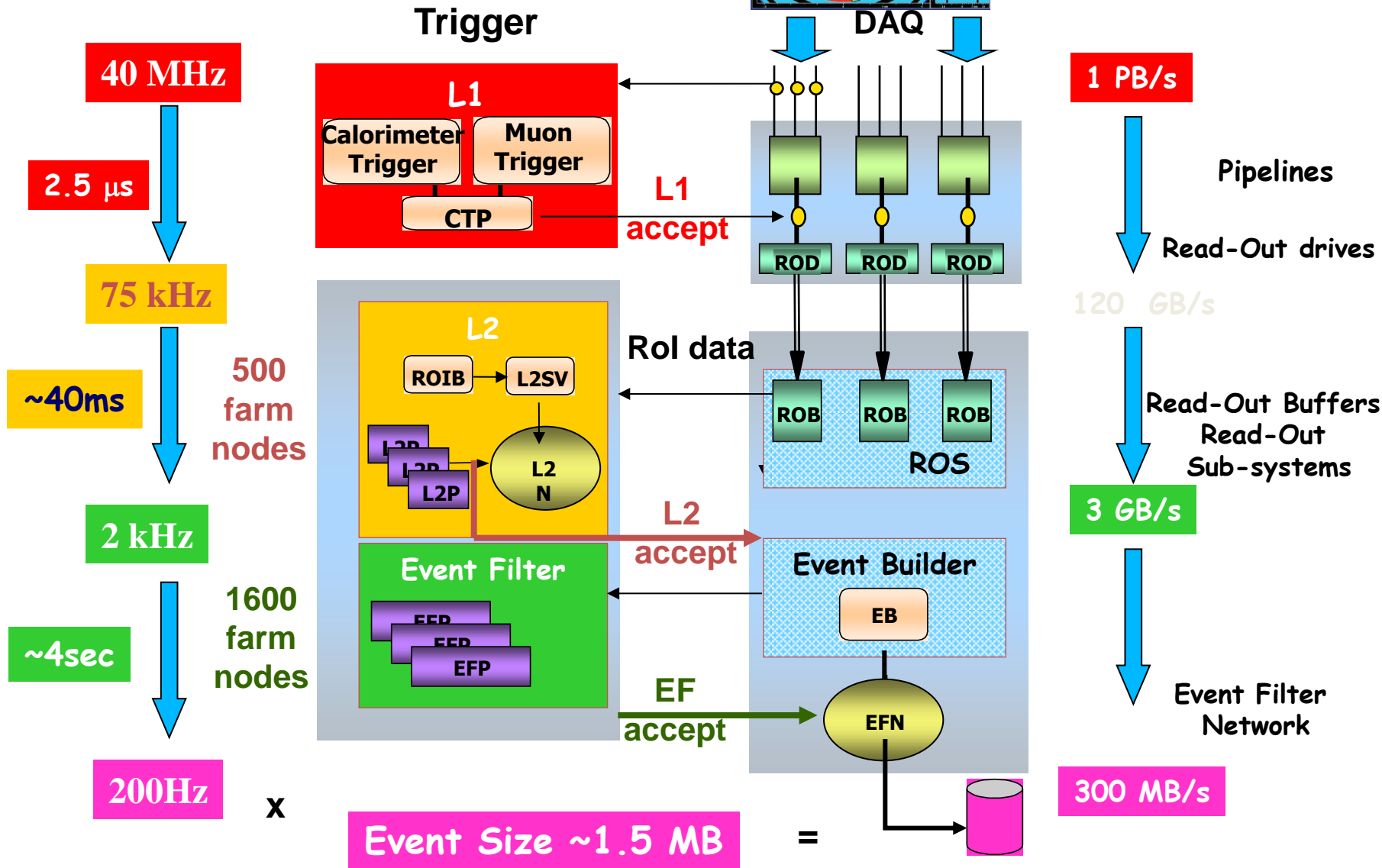
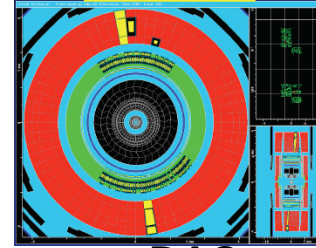


«Хорошо изученные процессы»,
нет необходимости регистрировать все события...

Физика LEP - большого электрон-позитронного коллайдера

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

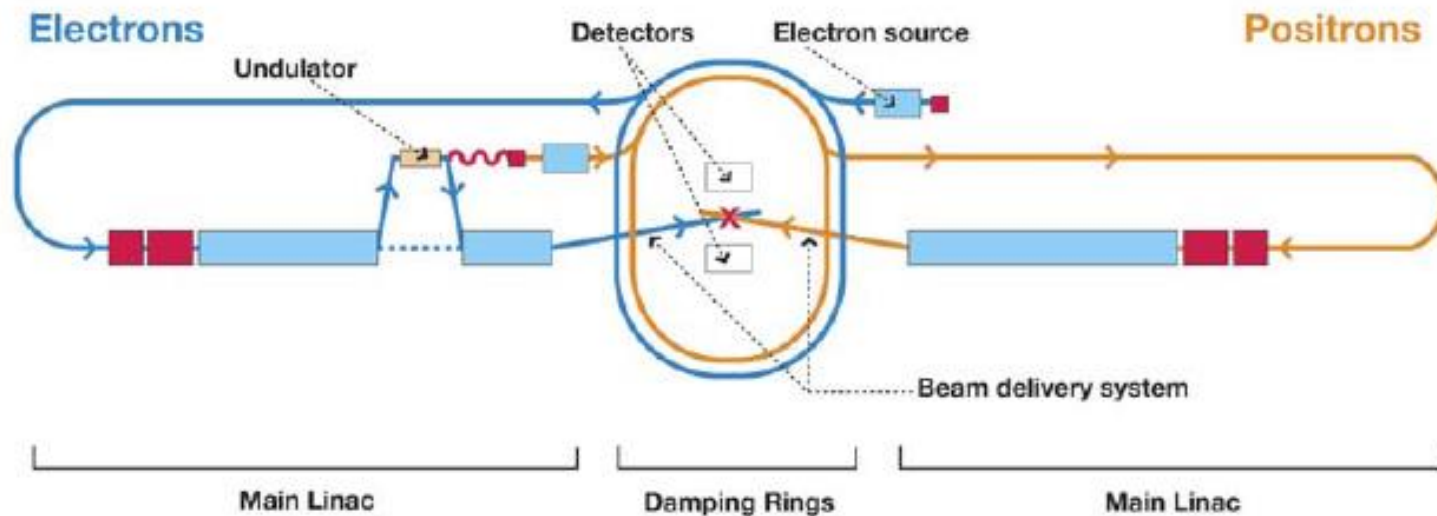
Сбор данных



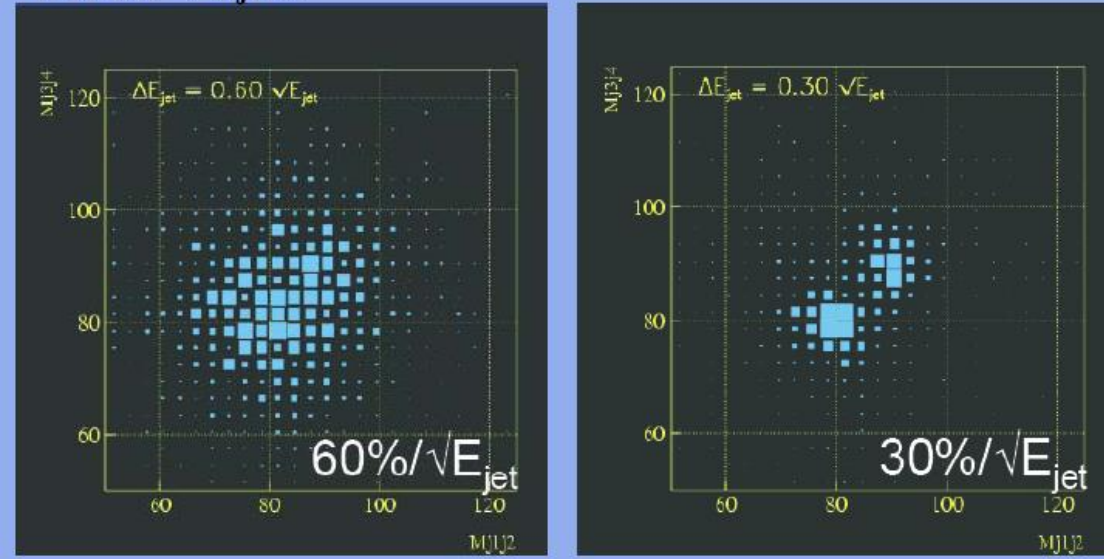
Международный линейный ускоритель



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

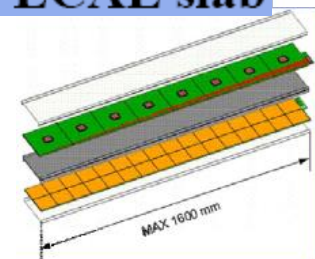


Будущие эксперименты

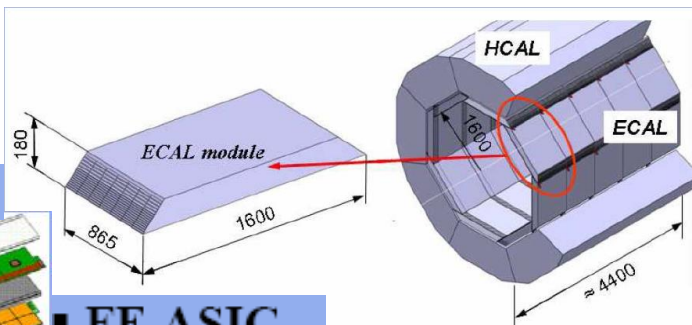
Электромагнитный калориметр

- W/Si

ECAL slab



- FE ASIC
- PCB board
- Si pads



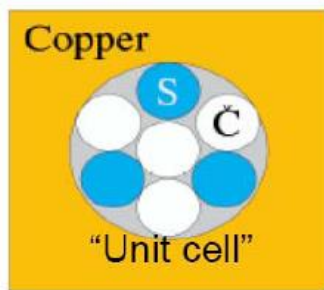
- Электроника в детекторе
- 5x5мм² сегментация
- 0.6-1.2X₀ сегмент. глубины (23X₀)

- W+сцинт. стрипы

- DREAM:

сцинтиллятор+

Черенков волокна

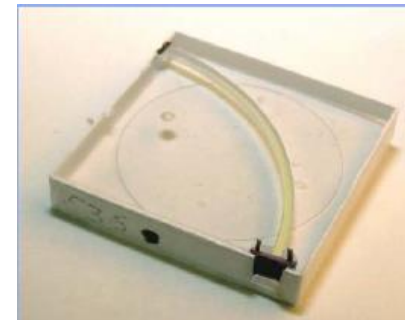


Адронный калориметр

- Аналоговые сцинт тайлы

-3x3см²

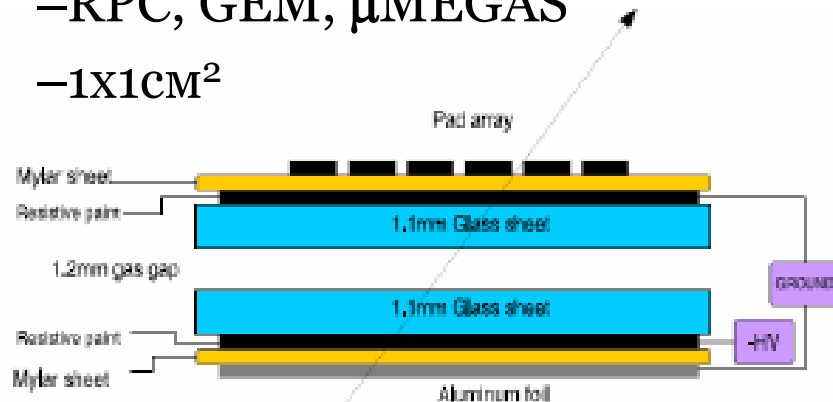
-Кремневый ФЭУ



- Газовый цифровой

-RPC, GEM, μMEGAS

-1x1см²

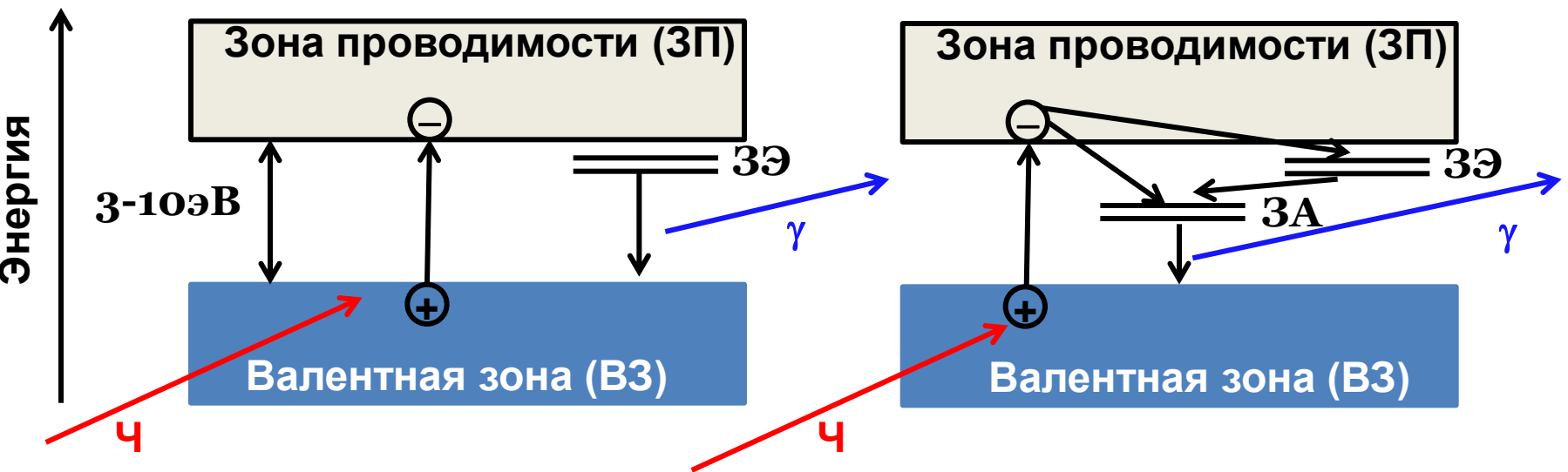


Сцинтилляторы

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

Зонные уровни

Зонные уровни с примесями



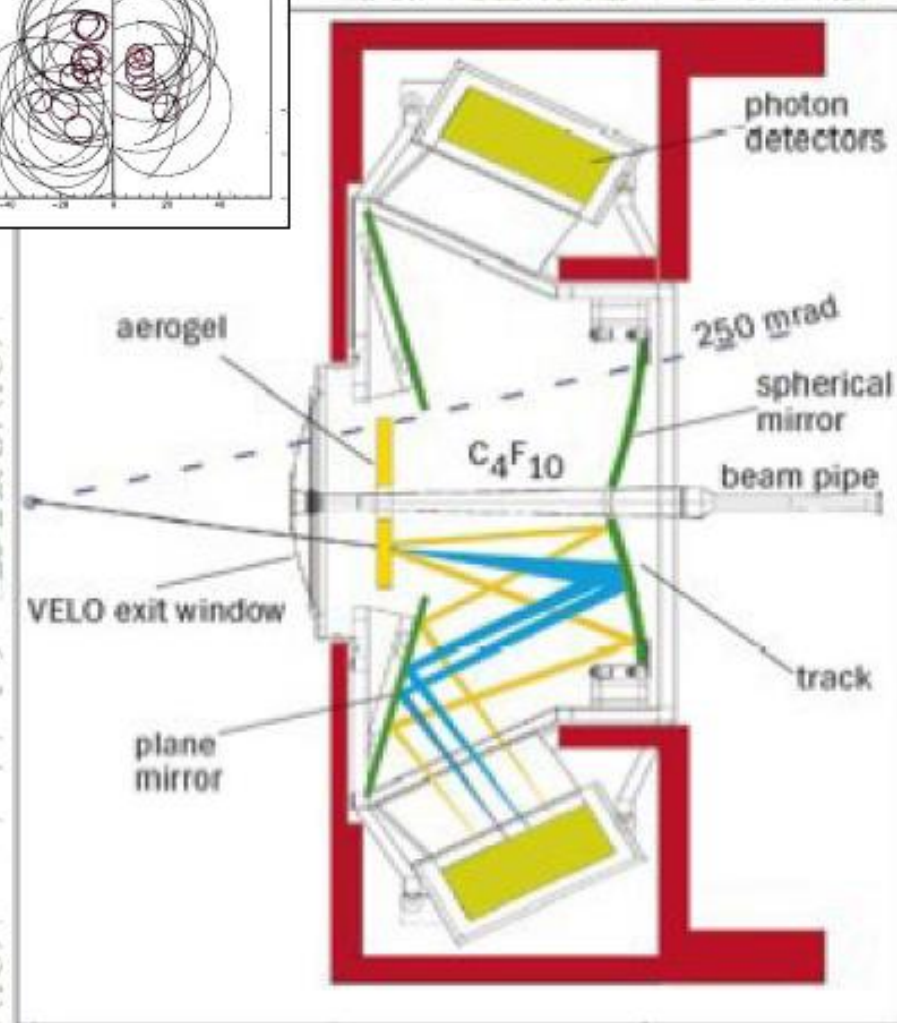
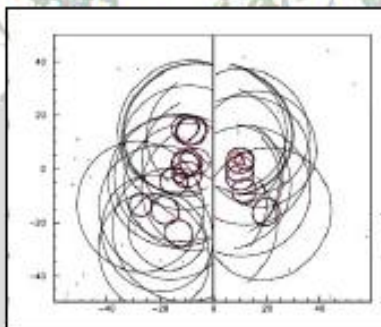
Входящая частица (Ч) выбивает электрон в зону проводимости.

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)

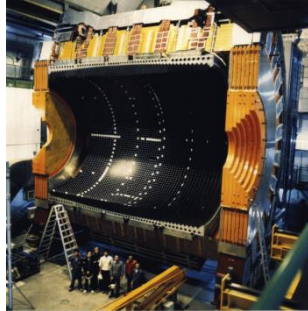
$$\frac{\sigma}{E} \propto \frac{\sqrt{F}}{\sqrt{N_{eh}}}, \quad F \ll 1 \text{ (фактор Фано)}, \quad N_{eh} \approx 10^5$$

- ✗ Оптимальны для низких энергий
- ✗ Очень дорогие

Черенков (PbO)

- ✗ Низкий световыход (1/10⁴ 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

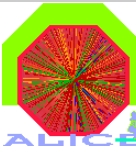


$$3.2\% / \sqrt{E} \oplus 0.42\% \oplus 0.09/E$$

Сцинтилляторы

- Очень популярны!
- ✓ Высокий световыход
- ✓ Высокая плотность
- ✗ Не однородность кристаллов
- ✗ Цена
- ✓ Свойства «на заказ»

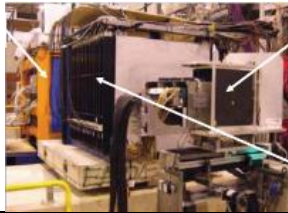
$$2-3\% / \sqrt{E} \oplus 0.5-1.4\% \oplus 0.0-0.2/E$$



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

