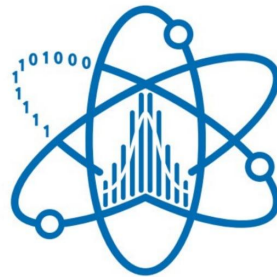


# Введение в физику частиц и анализ экспериментальных данных

## 4 лекция

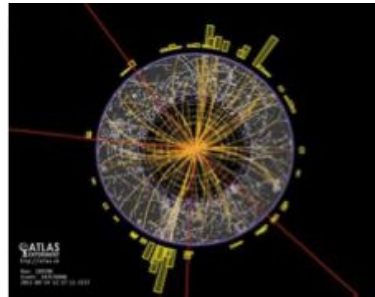
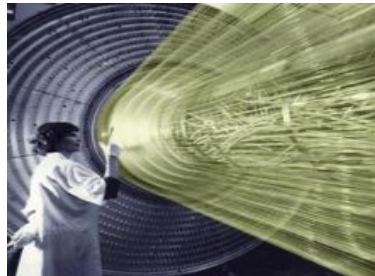
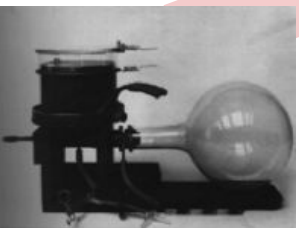
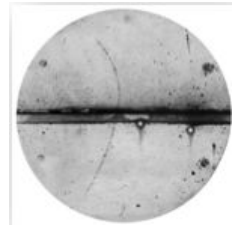
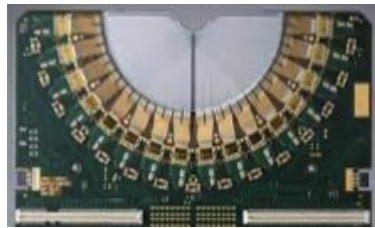
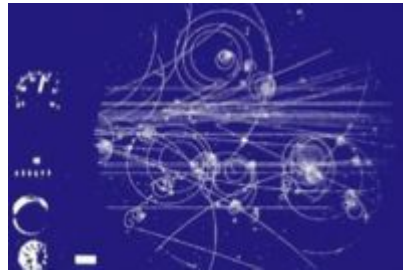
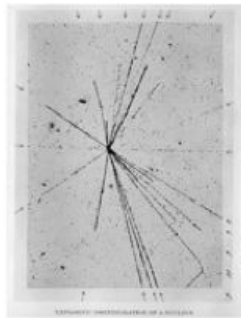
---



# План лекции

1. Введение
  - Эволюция детекторных технологий
  - Задачи эксперимента ATLAS
2. Проведение экспериментов на ATLAS
3. Основные компоненты детектора ATLAS
4. Система триггера и сбора данных (TDAQ)
5. Сигнатуры частиц

# Детектор технологии



Облачные камеры  
Счётчики Гейгера

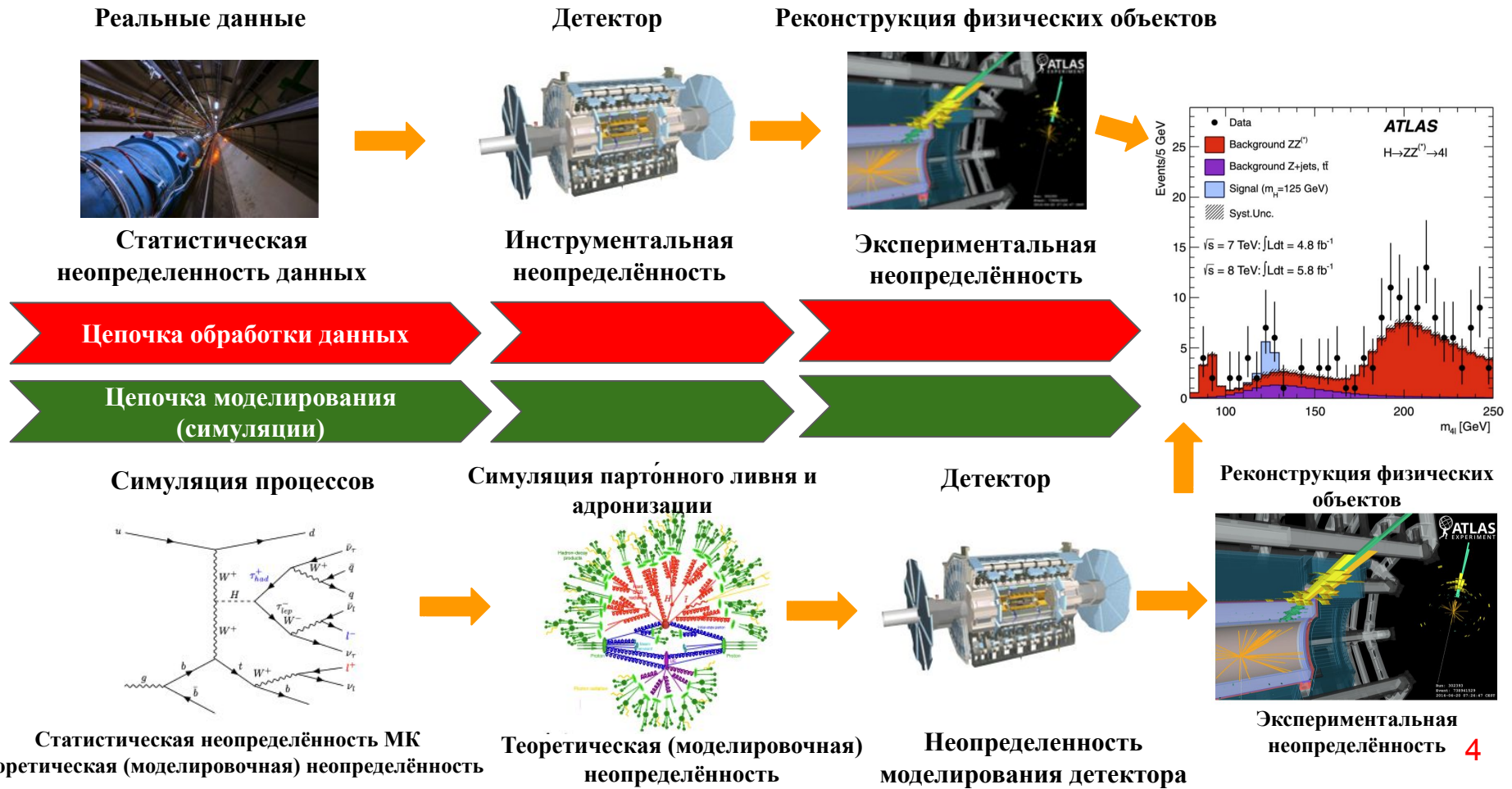
Плёнки/эмульсии

Сцинтилляционные  
счётчики

Пузырьковые камеры /  
искровые камеры /  
проволочные камеры /  
камеры временной  
проекции (TRP)

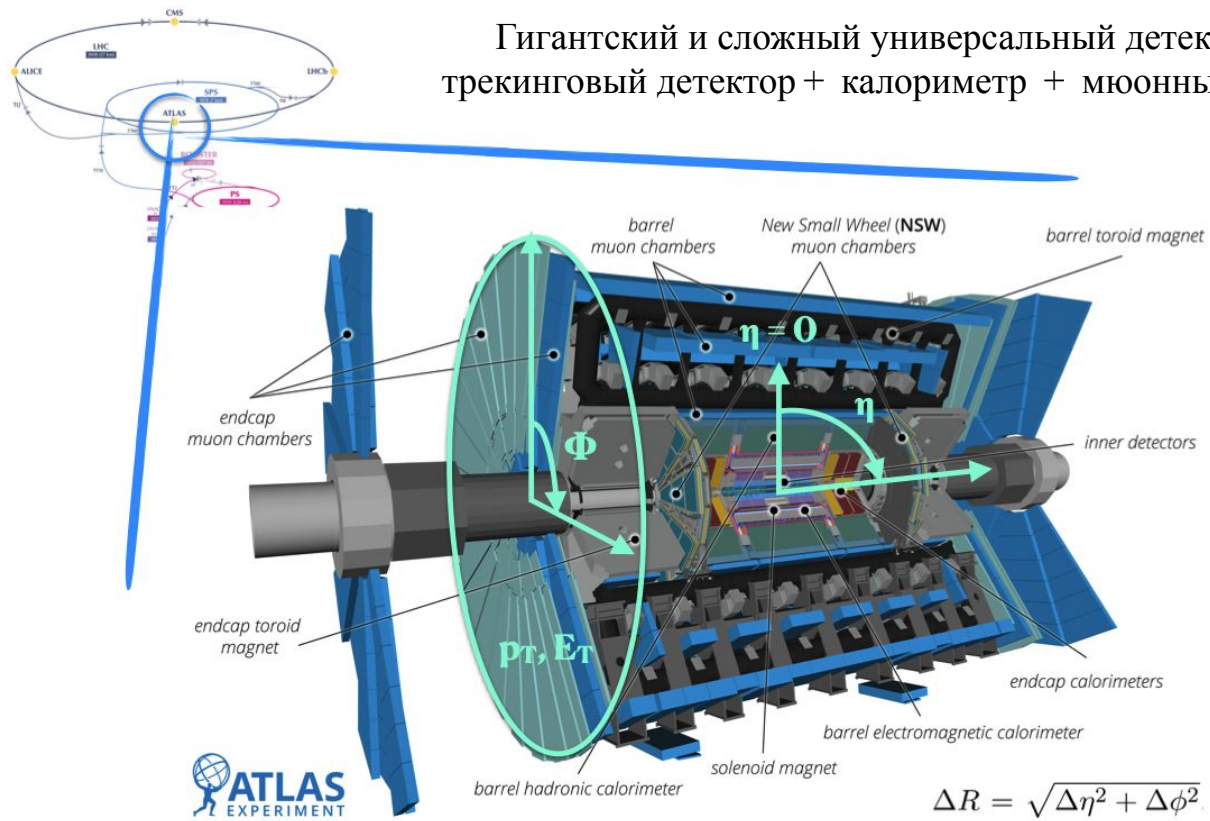
Полупроводники

# Как проводятся эксперименты (анализы)



# АТЛАС эксперимент

Гигантский и сложный универсальный детектор частиц:  
трекинг-детектор + калориметр + мюонный спектрометр



$$\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$$

# Система координат

**Правосторонняя система координат** для описания частиц, возникающих при столкновениях протонов

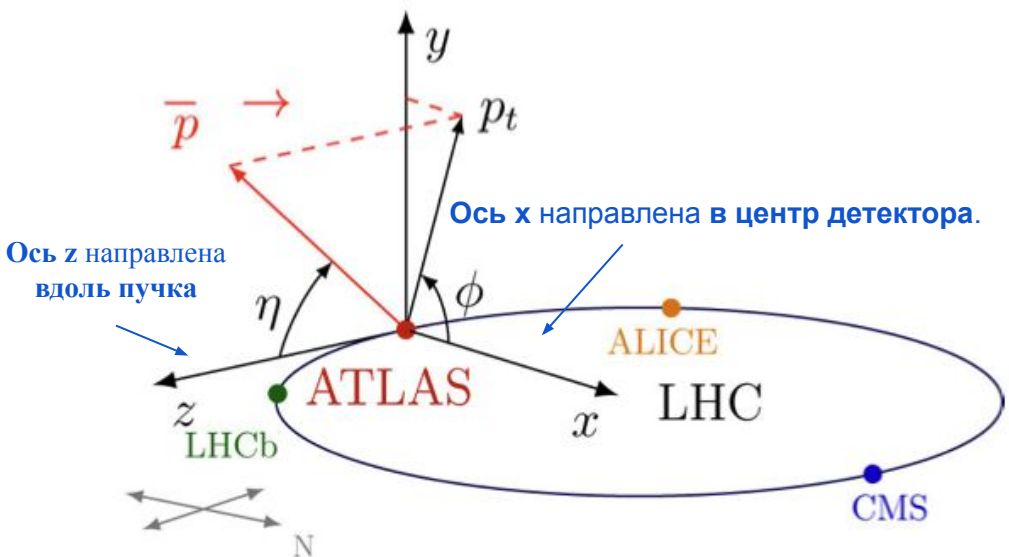
**Цилиндрическая система координат**

**Полярный угол  $\phi$**  описывает отклонение от оси пучка в плоскости **x-y** против часовой стрелки.

В этой системе определяются **поперечный импульс ( $p_T$ )** и **поперечная энергия ( $E_T$ )** объекта детектора.

$$p_T = p \sin \theta = \sqrt{p_x^2 + p_y^2},$$

$$E_T = E \sin \theta = \sqrt{m^2 + p_T^2}.$$



**Быстрота ( $y$ ):**

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z}$$

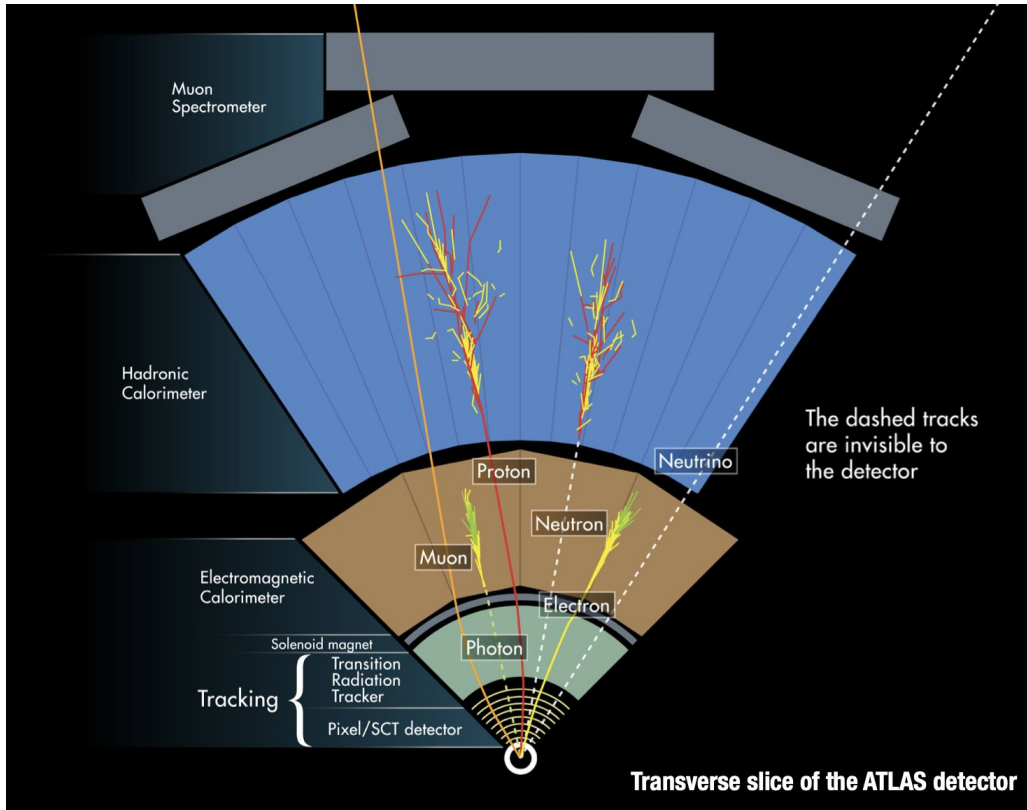
**Псевдобыстрота ( $\eta$ ):**

$$\eta = \frac{1}{2} \ln \frac{|\mathbf{p}| + p_z}{|\mathbf{p}| - p_z} = -\ln \tan(\theta/2)$$

**Метрика расстояния  $\Delta R$**

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta \eta)^2 + (\Delta \phi)^2}$$

# АТЛАС эксперимент



**Внутренний детектор (трековая система):** измеряет траектории заряженных частиц.

**Калориметры:** поглощают и измеряют энергию частиц:

- **Электромагнитный калориметр:** детектирует электроны и фотоны.
- **Адронный калориметр:** измеряет энергию адронов (например, протонов, нейтронов, пионов).

**Мюонный спектрометр:** идентифицирует и измеряет мюоны, которые являются единственными частицами, проходящими через калориметры.

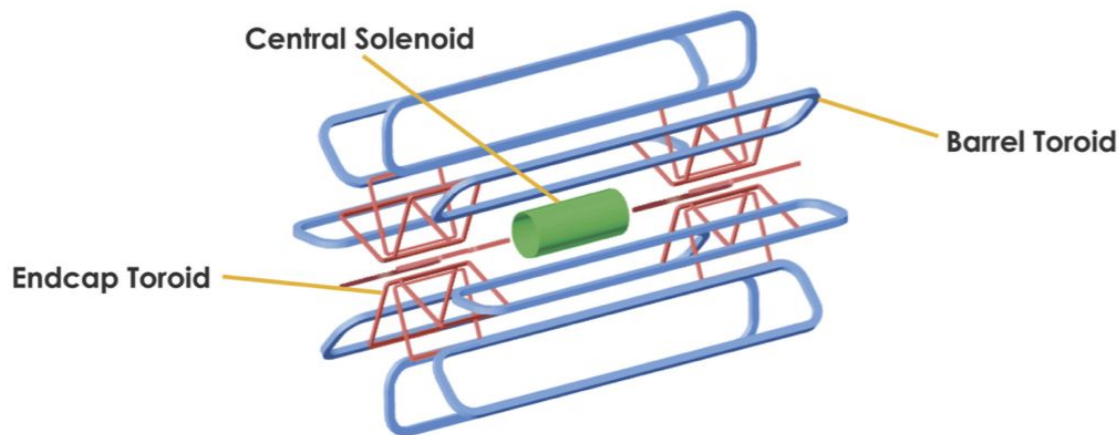
**Магниты:** создают сильные магнитные поля для отклонения траекторий заряженных частиц.

**Система триггера и сбора данных (TDAQ):** фильтрует и записывает интересные события столкновений для дальнейшего анализа.

# Магнитная система

## Четыре больших сверхпроводящих магнита

- **Соленоидный магнит** окружает **внутренний детектор** (магнитное поле величиной **2 Тл**)
  - Длина соленоида **5.8 м.**
  - **Однослойная катушка**, изготовленная из высокопрочного алюминиево-стабилизированного ниобий-титанового проводника.
- **Система тороидов** (магнитное поле для мюонного спектрометра) и состоит из трёх частей:
  - 8 магнитов в баррельной (цилиндрической) части.
  - 8 магнитов в каждом из торцевых колец (энд-капах).
  - Магнитное поле в **барреле** составляет **3.9 Тл**, а в **энд-капах** — **4.1 Тл**.



# Внутренний детектор

Расположен **ближе всего к пучку** и погружен в **осевое магнитное поле 2 Тл**

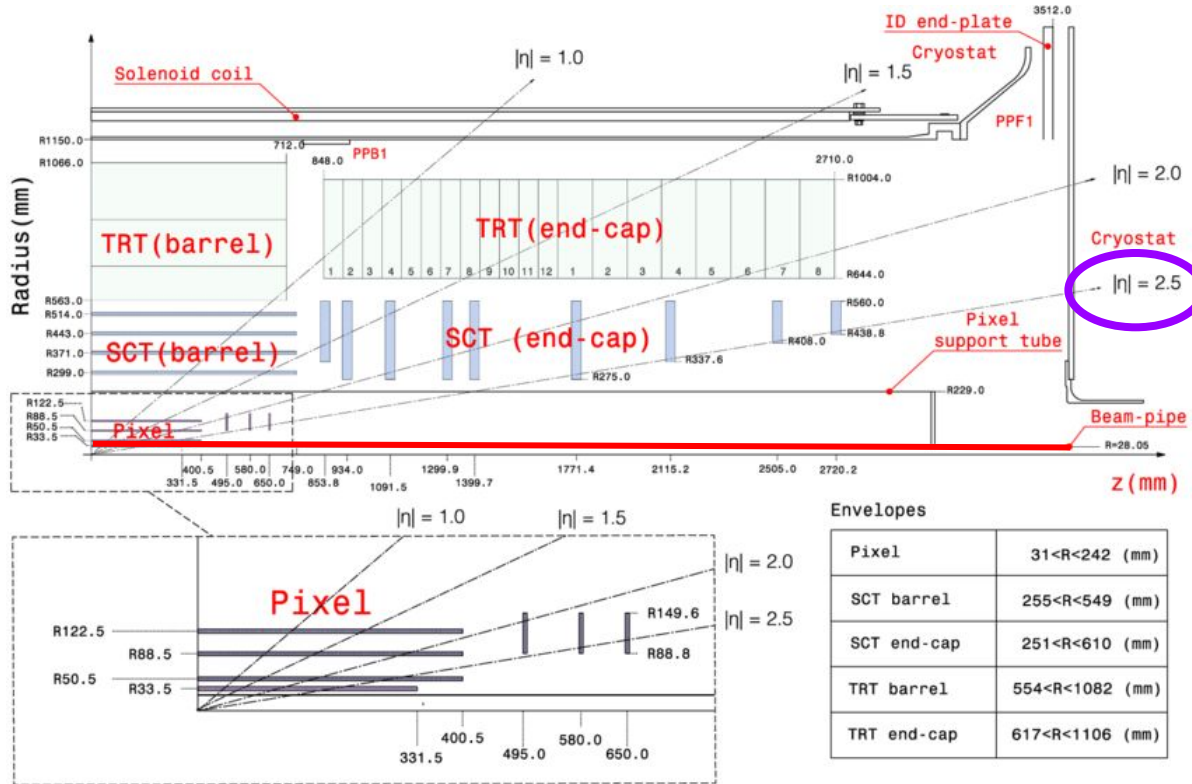
**Распознавание траекторий** заряженных частиц.

**Реконструирует импульс** частиц **до 100 МэВ**.

Реконструкции **вершин взаимодействия** в области  **$|\eta| < 2.5$**

**Три детектора:**

- 1. Пиксельный детектор (Pixel detector)
- 2. Полупроводниковый трекер (Semiconductor Tracker, SCT)
- 3. Трекер переходного излучения (Transition Radiation Tracker, TRT)



# Пиксельный детектор (Pixel detector)

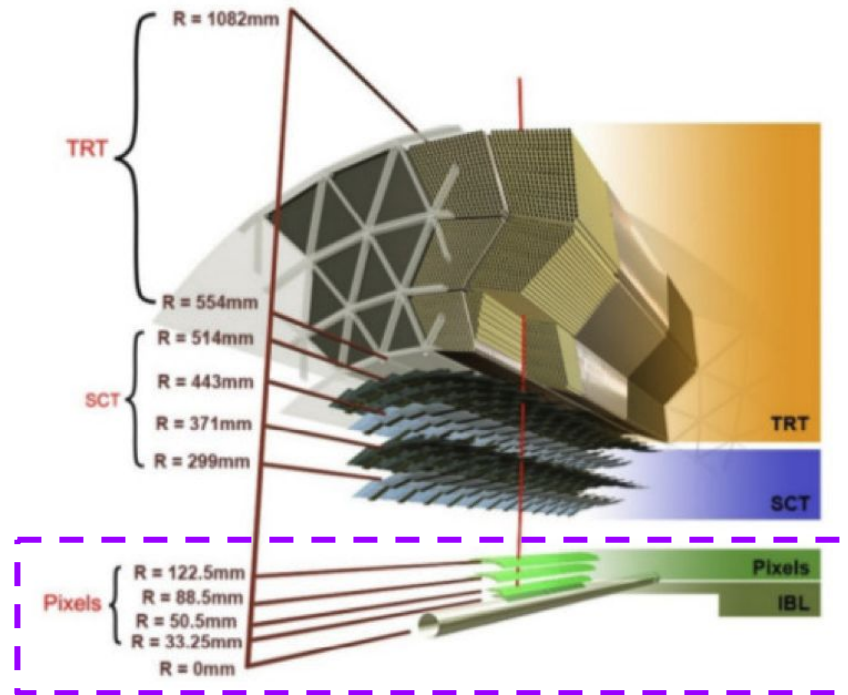
Высокоточное распознавание траекторий.

В **баррельной** области сенсоры расположены **концентрическими слоями вокруг пучка**,

В **торцевых (end-cap) областях** — в виде **дисков**, перпендикулярных направлению пучка.

- **1744 пиксельных сенсоров** толщиной **250 мкм**.
- Основные размеры пикселей:
  - а. **50×400 мкм** (90%) и **50×600 мкм** (10%).
- Изготовлены из **обогащённых кислородом n-тип пластин** с **p+ имплантированными пикселями**.

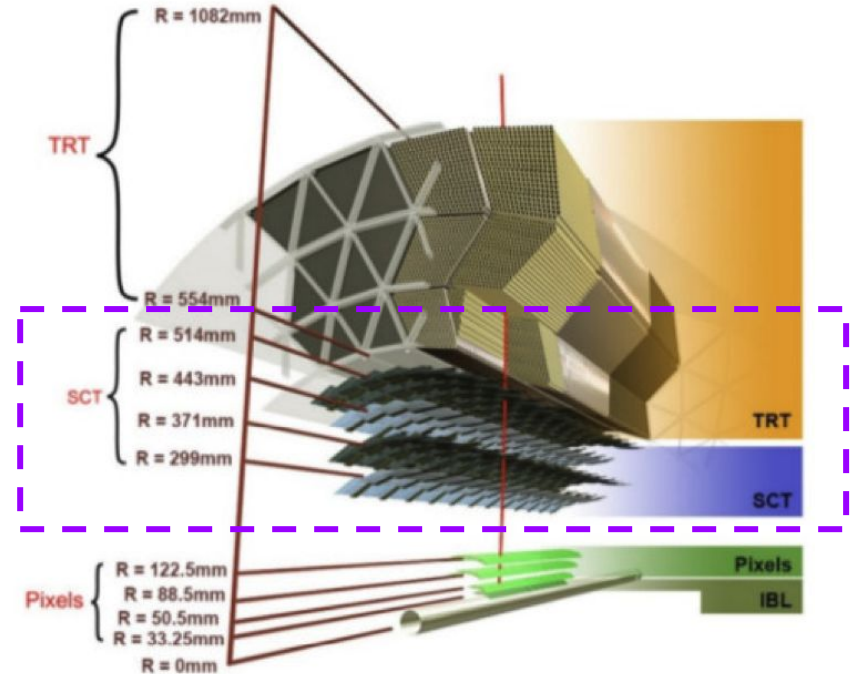
**Дополнительный слой пиксельного детектора** (Insertable B-Layer (IBL)) – был добавлен в период технического обслуживания LS1.



# Полупроводниковый трекер (SCT)

SCT состоит из **15 919** **полосовых сенсоров**, расположенных в  **$\phi$ -z сегментации**.

- **4** цилиндрических слоя в **баррельной** части.
- **9** **дисковых слоев** в каждом **энд-капе**.
- Основан на **p-in-n** **полосовой технологии**, толщина сенсора **285 мкм**.
- Рабочее напряжение: **250–350 В**.



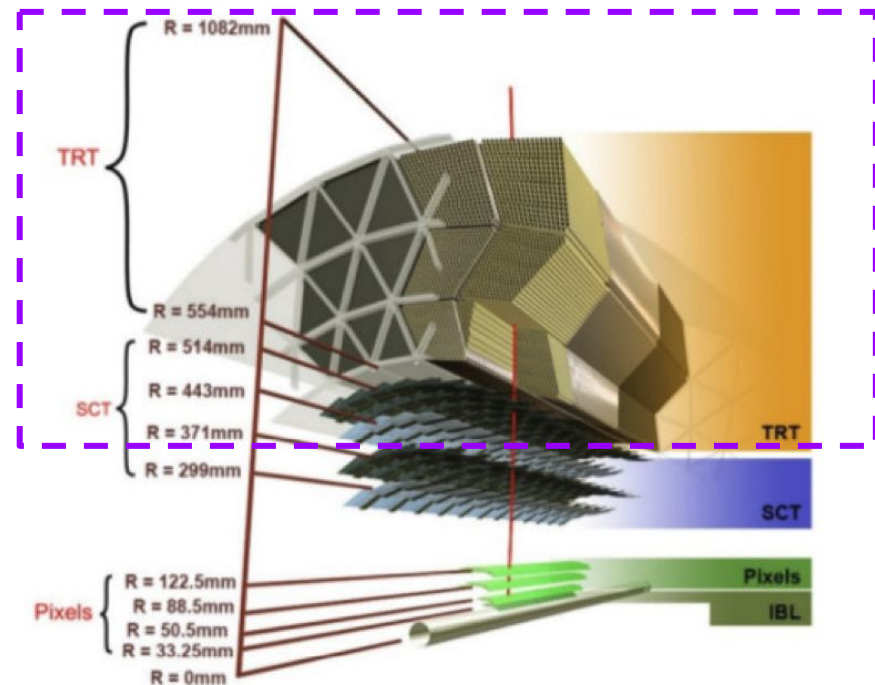
# Трекер переходного излучения (TRT)

**Внешний слой** внутреннего детектора.

- Состоит из **52 544 полиамидных дрейфовых трубок** длиной **1,5 м** и диаметром **4 мм**.
- Заполнен **газовой смесью на основе ксенона**.

**Конфигурация TRT:**

- В **баррельной области** ( $|\eta| < 1.0$ ) трубки ориентированы **вдоль оси пучка**.
- В **торцевых областях** ( $1.0 < |\eta| < 2.0$ ) трубки расположены **радиально в форме колёс**.
- В центре каждой трубки — **вольфрамовая проволока с золотым покрытием**, находящаяся на **нулевом потенциале**.



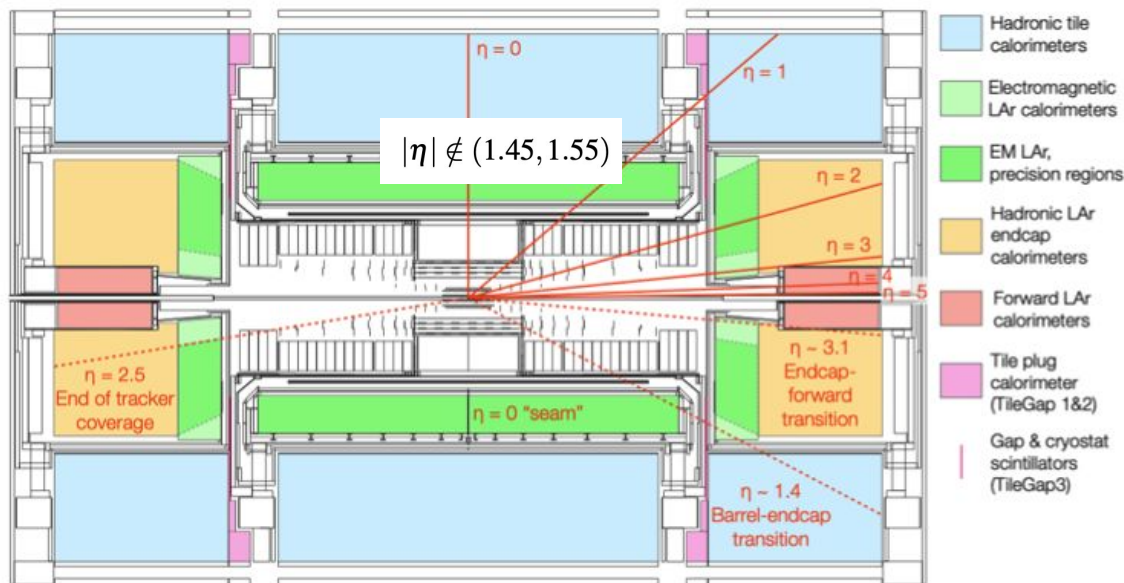
Заряженные частицы, проходя через газ, вызывают **ионизацию**, и электроны собираются на проволоке, создавая сигнал.

Между трубками находятся **материалы переходного излучения**, которые испускают **рентгеновские фотоны**.

# Калориметры

Когда частицы проходят через **калориметр**, они **взаимодействуют с его активным материалом**, порождая **каскад вторичных частиц**, известный как **ливень (shower)**.

**Симметрия по  $\phi$**  и покрывающие область  $|\eta| < 4.9$ . Они предназначены для **измерения энергии частиц**.



Два типа калориметров:

## Электромагнитный калориметр

- Заполнен **жидким аргоном (LAr)**.
- Предназначен для **измерения энергии электронов и фотонов**.

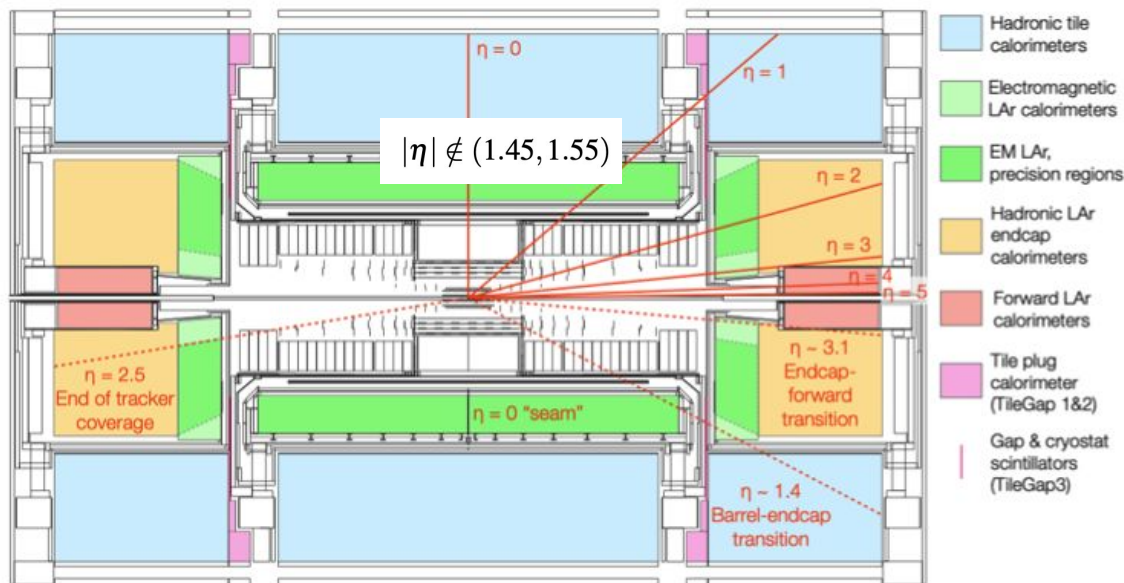
## Адронный калориметр

- Состоит из **чередующихся слоев сцинтилляционных плит и стали**.
- Используется для **измерения энергии адронов**.

# Калориметры

Когда частицы проходят через **калориметр**, они **взаимодействуют с его активным материалом**, порождая **каскад вторичных частиц**, известный как **ливень (shower)**.

**Симметрия по  $\phi$**  и покрывающие область  $|\eta| < 4.9$ . Они предназначены для **измерения энергии частиц**.



## Кинематические измерения для:

- Фотонов
- Электронов
- Джетов
- Пропущенной поперечной энергии  $E_T^{miss}$  (указывает на наличие нейтрино или других невидимых частиц).

# Электромагнитный калориметр

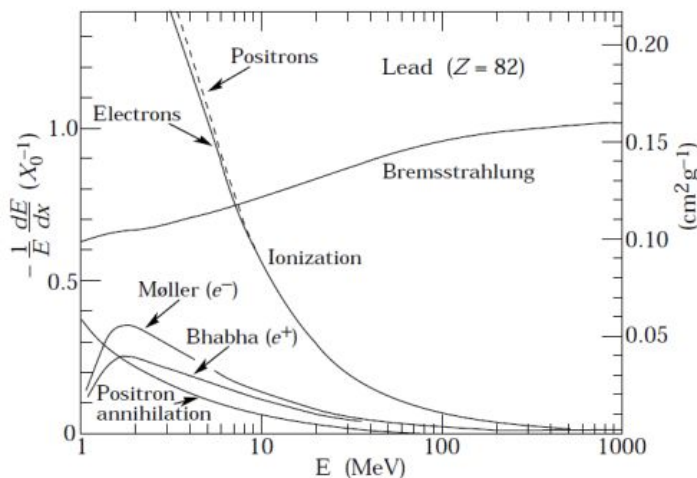
Измерение энергии **электронов и фотонов**.

**Электроны и фотоны** с энергией **более 1 ГэВ**, теряют энергию через несколько процессов:

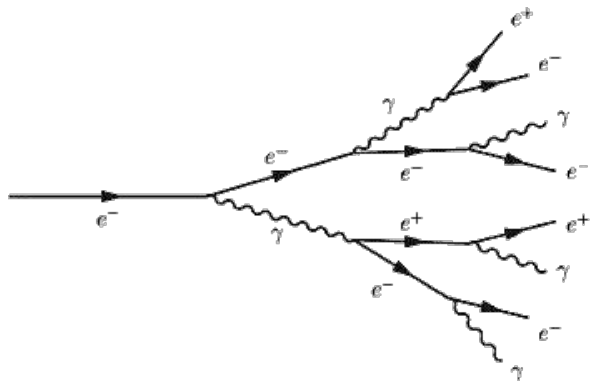
- Тормозное излучение (Bremsstrahlung)
- Образование пар (Pair Production)
- Ионизация

Эти процессы приводят к формированию **электромагнитного ливня** – каскада вторичных частиц.

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



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



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

# Принцип работы и структура

Поглотители в **форме «гармошки»** и **специальных электродов**

В качестве **поглощающего материала** используются **свинцово-стальные слои**.

В качестве **активного слоя** применяется **жидкий аргон (LAr)**.

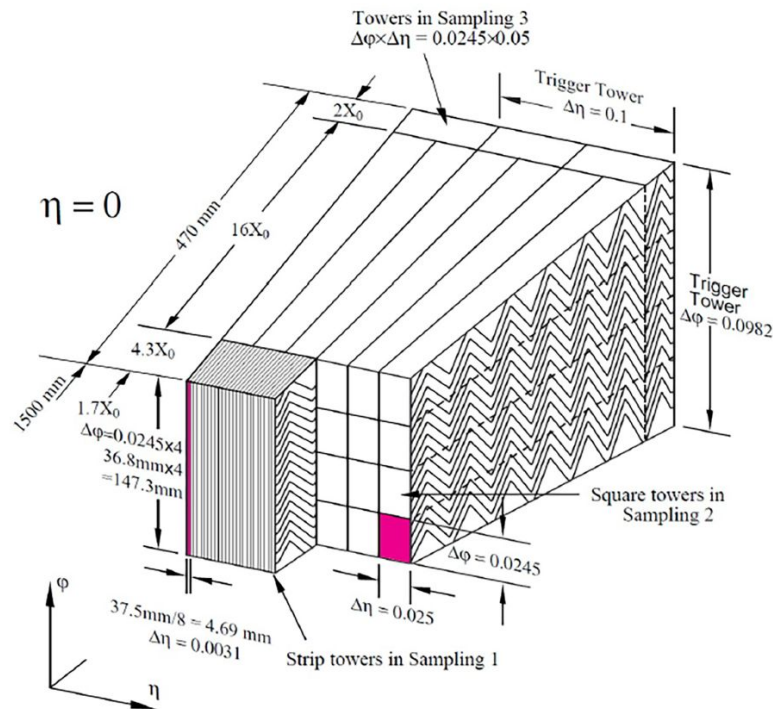
Толщина калориметра определяется **радиационной длиной  $X_0$** , что соответствует **расстоянию, на котором электрон теряет  $\approx 63\%$  своей энергии** из-за **тормозного излучения**.

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus 0.7\% \oplus \frac{0.1\%}{E}$$

**Первый член ( $\propto 1/\sqrt{E}$ )** – стохастический шум, связанный со случайными флуктуациями количества частиц в ливне и их поглощением в активном материале.

**Второй (константный) член** – ошибки калибровки и влияние неактивных материалов.

**Третий член ( $\propto 1/E$ )** – шум, вызванный эффектами **pile-up** и электронными шумами.



# Структура слоев калориметра

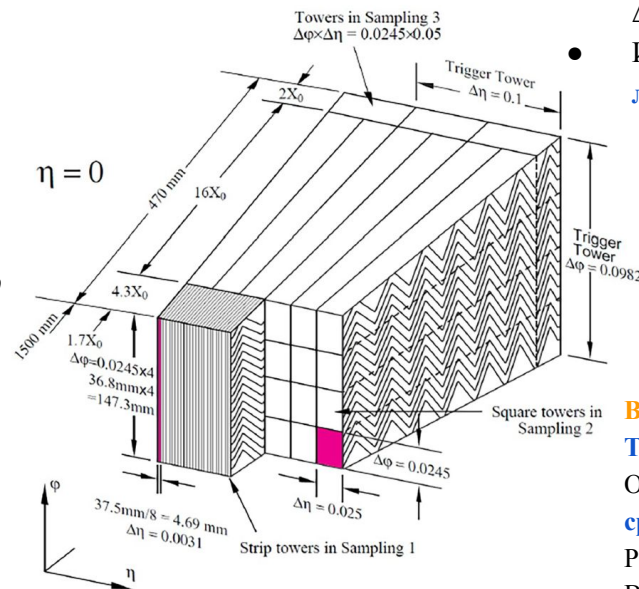
Четыре слоя, включая пре-сэмплер и три сэмплирующих слоя.

## Гранулярность и пространственное разрешение

- Слои **ближе к точке взаимодействия (IP)** имеют **более высокую** пространственную разрешающую способность для точного определения **ядра ливня**.
- Внешние слои имеют **более крупную сегментацию**, так как ливень более **рассеян**.
- При увеличении  $\eta$  толщина калориметра в  $X_0$  тоже увеличивается, чтобы компенсировать **распространение ливня и оптимизировать измерения энергии**.

## Пре-сэмплер (из жидкого аргона)

- Расположен **перед основным калориметром**.
- Компенсирует **потери энергии частиц до входа в калориметр**.



## Первый слой (6 $X_0$ )

**Очень тонкая сегментация:**  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.003 \times 0.1$ .  
Позволяет **определять направление фотонов** и различать нейтральные пионы ( $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ).

## Третий слой (2–12 $X_0$ в зависимости от $\eta$ )

- Более крупные ячейки:**  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.05 \times 0.025$ .
- Используется для **измерения хвоста ливня** и улучшения оценки энергии.

## Второй слой (24 $X_0$ ) – основной слой

**Тонкая сегментация:**  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.025 \times 0.0245$ .  
Оптимизирован для **реконструкции фотонов средних энергий**.

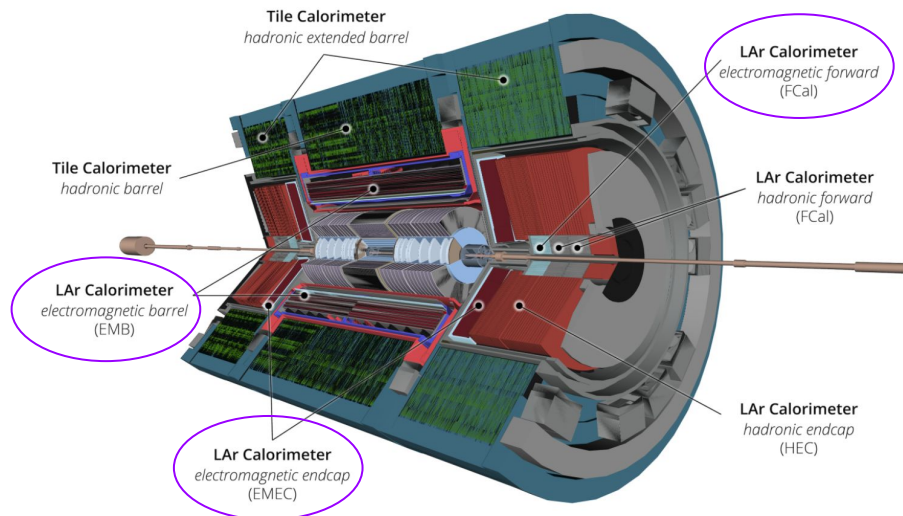
Разделяет **фотоны** от других частиц в событии.  
В области  $\eta < 0.6$  глубина ограничена **22  $X_0$** , чтобы сохранить **минимум 2  $X_0$**  для третьего слоя.

# Компоненты электромагнитного калориметра

Электромагнитный калориметр состоит из **трёх частей**:

1. **Баррельный электромагнитный калориметр (EMB)** – покрывает  $|\eta| < 1.475$ .
2. **Торцевой (end-cap) электромагнитный калориметр (ЕМЕС)** – покрывает  $1.375 < |\eta| < 3.2$ .
3. **Форвардный калориметр (FCal)** – покрывает  $3.1 < |\eta| < 4.9$ .

Совокупность **EMB, ЕМЕС и FCal** обеспечивает **широкий охват по псевдобыстроте**.

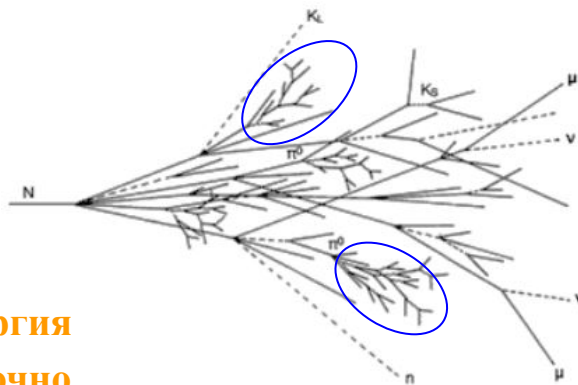


# Адронный калориметр

Адронный калориметр (HCal) измеряет энергию адронов (например, протонов, нейтронов и пионов), которые взаимодействуют в основном через сильное взаимодействие.

- Адроны создают более сложные и протяжённые ливни в калориметре.
- Эти взаимодействия приводят к образованию адронных джетов – коллимированных потоков адронов, возникающих при распаде кварков и глюонов.

Физика довольно сложна.



Размножение пока энергия  
частиц в ливне достаточно  
большая > ГэВ

Внутри ливня появляются  
также фотоны и электроны,  
рождая электромагнитные  
ливни

# Принцип работы и структура

Характеристикой **адронных ливней** является **длина взаимодействия ( $\lambda$ )**, которая показывает **среднее расстояние, пройденное адроном перед ядерным взаимодействием**.

Для **полного поглощения адронных ливней** HCal имеет **глубину 5–8  $\lambda$** .

**Протяжённость адронных ливней** (как по **длине**, так и **поперёк**) **значительно больше**, чем у **электромагнитных ливней**.

Это требует **глубокого и сильно сегментированного** калориметра для **точного измерения распределения энергии**.

## Разрешение энергии

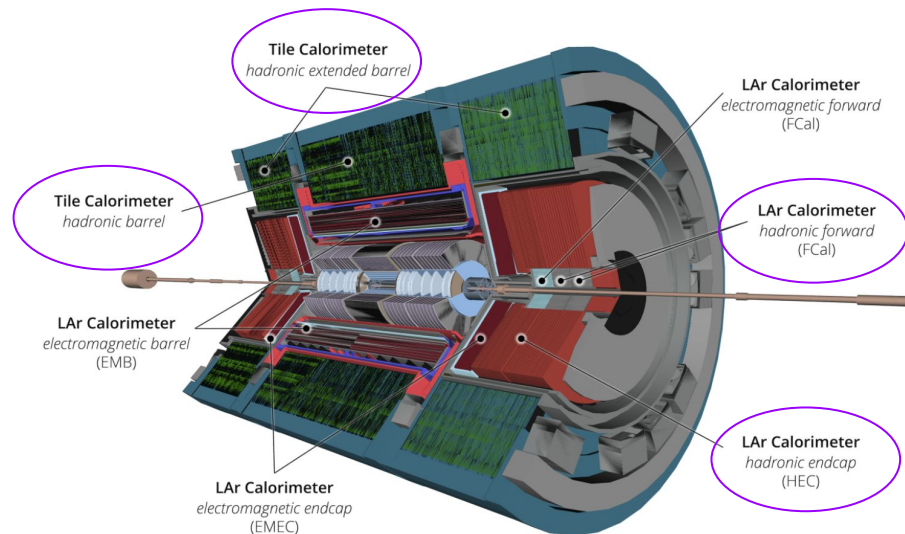
- Адронный калориметр имеет **разрешение на фактор 5-10 хуже**, чем **электромагнитный калориметр (ECal)**

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{50\%}{\sqrt{E}} \oplus 3.4\% \oplus \frac{1\%}{E}$$

# Структура адронного калориметра (HCal)

HCal состоит из **трёх основных подсистем**:

1. Tile калориметр (TileCal)
2. Адронный торцевой калориметр на жидком аргоне (LAr Hadronic End-Cap Calorimeter, HEC)
3. Форвардный калориметр на жидком аргоне (LAr Forward Calorimeter, FCal)



# Структура адронного калориметра (HCal)

**Tile калориметр:** сталь (поглотитель) + сцинтилляционные плитки (активный слой).

- Разделён на **центральный баррель** ( $|\eta| < 1.0$ ) и **два расширенных барреля** ( $0.8 < |\eta| < 1.7$ ).
- **64 азимутальных модуля**, сегментированных на **3 продольных слоя**.
- Глубина  **$7.4 \lambda$** , обеспечивает **полное поглощение адронных ливней**.

**Адронный торцевой калориметр (HEC):**  $1.5 < |\eta| < 3.2$

- **Два колеса в каждом энд-капе из медных пластин** с промежутками **жидкого аргона (LAr)**.
- Разделен на **четыре слоя**, разная гранулярность:
  - **$0.1 \times 0.1$**  для  $1.5 < |\eta| < 2.5$
  - **$0.2 \times 0.2$**  для  $2.5 < |\eta| < 3.2$
- Интегрирован с **электромагнитным торцевым калориметром**.
- Позволяет **эффективно измерять энергию адронных ливней**.

**Форвардный калориметр (FCal):**  $3.1 < |\eta| < 4.9$

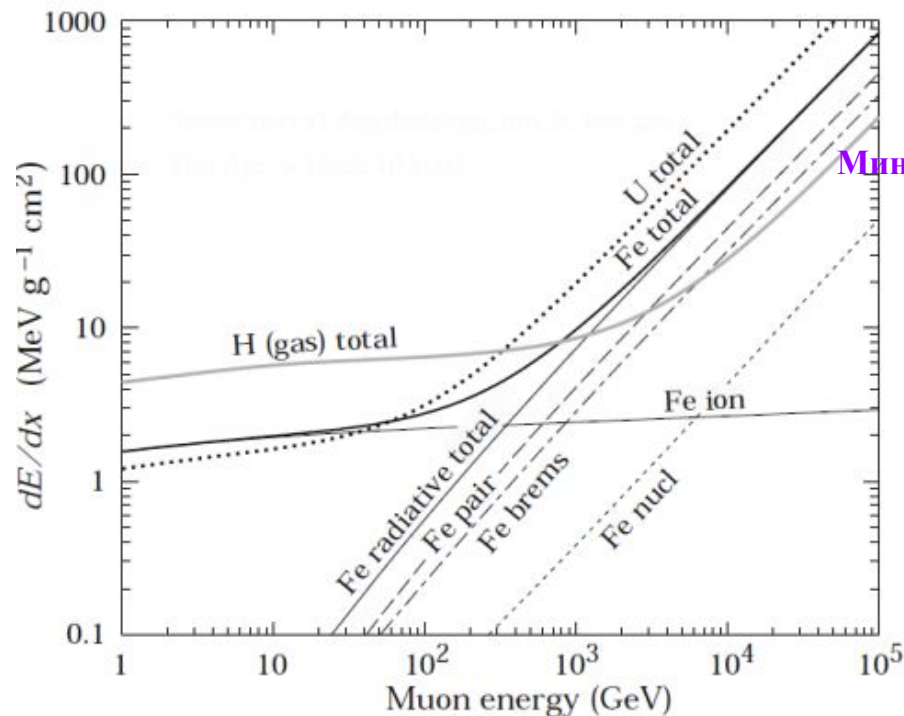
- **Три модуля в каждом энд-капе:**
  - **Медный** → электромагнитные взаимодействия.
  - **Два вольфрамовых** → адронные взаимодействия.
- **Глубина  $\approx 10 \lambda$**  → **полное поглощение адронных ливней**.
- **Концентрические стержни и трубки с LAr** → точные измерения энергии в форвардной области.

# Мюонный спектрометр

Мюон – тяжелый электрон

Почти не взаимодействует

Тормозное излучение  
при энергиях  $> 500 \text{ ГэВ}$



Минимально ионизирующая частица

Мюоны эффективно детектируются  
и измеряются в мюонном  
спектрометре (MS).

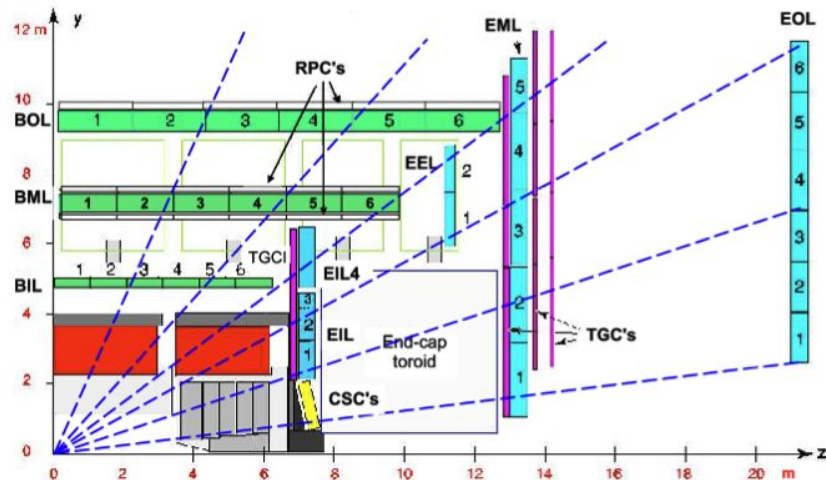
# Мюонный спектрометр

Самая внешняя часть детектора ATLAS, разработанная для **точного измерения импульса мюонов** путем **отклонения их траекторий** в магнитном поле **тороидальных магнитов**.

- **Баррельный тороид** покрывает центральную область  $|\eta| < 1.4$ .
- **Два торцевых тороида** расширяют зону покрытия до  $1.6 < |\eta| < 2.7$ .
- В **переходной области**  $1.4 < |\eta| < 1.6$  мюоны испытывают **влияние обоих магнитных полей** (баррельного и торцевых тороидов).
- **Несколько типов детекторов**, каждый из которых играет **уникальную роль в трекинге и измерении импульса**.

Мюонный спектрометр ATLAS – это самая крупная система трекинга мюонов среди детекторов LHC.

Благодаря комбинации MDT, CSC, RPC и TGC, он обеспечивает точное измерение импульса мюонов



# Мониторинговые дрейфовые трубки (MDT)

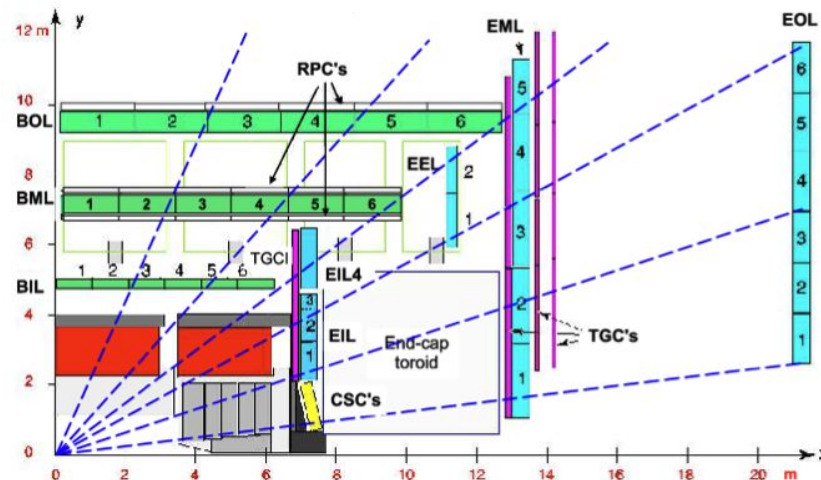
Работают в диапазоне  $|\eta| < 2.7$ .

Каждая MDT-камера содержит несколько слоёв дрейфовых трубок.

Трубки измеряют время пролёта ионизационных электронов до анодной проволоки, что позволяет точно определять трек в изгибающей плоскости.

Средняя разрешающая способность:

- 80 мкм на трубку
- 35 мкм на камеру



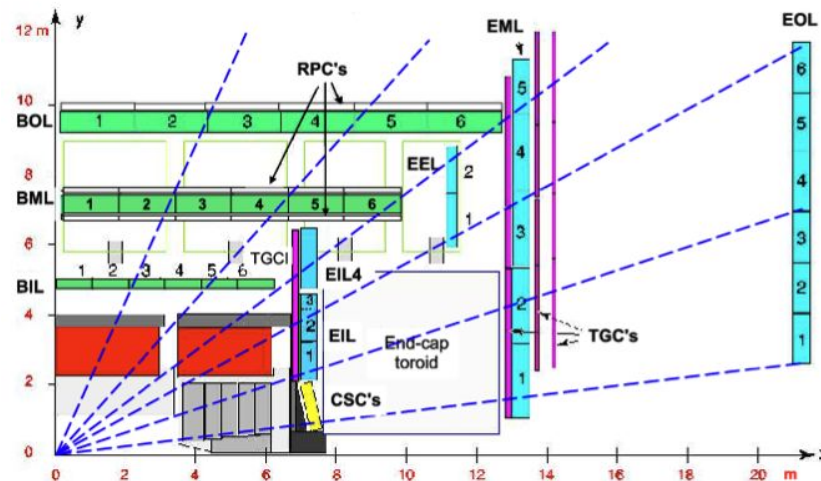
# Катодные стриповые камеры (CSC)

## Многопроводочные пропорциональные камеры

Обладают **стрип-сегментированными катодными плоскостями**

Оптимизированы для **высоких потоков частиц** и точного измерения импульса мюонов.

Разрешение: 40 мкм на камеру

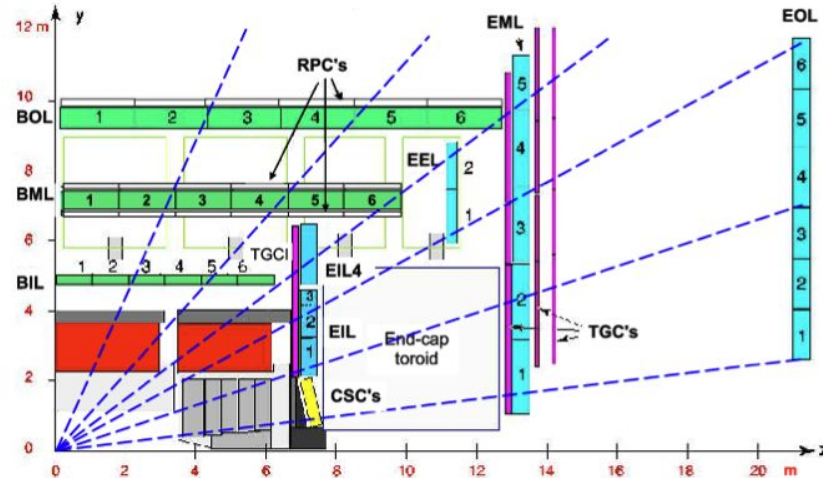


# Камеры с резистивными пластинами (RPC)

Баррельная область:  $|\eta| < 1.05$

- Генерируют **мощный сигнал** даже от **слабого тока**.
- Каждая RPC-камера имеет **две газовые полости с четырьмя плоскостями считывания**.
- Используются для **трекинга и триггера мюонов с разными порогами pT**:
  - **Две RPC-камеры** → обнаружение **мюонов с низкими pT**.
  - **Третья (внешняя) RPC-камера** → обнаружение **мюонов с высокими pT**

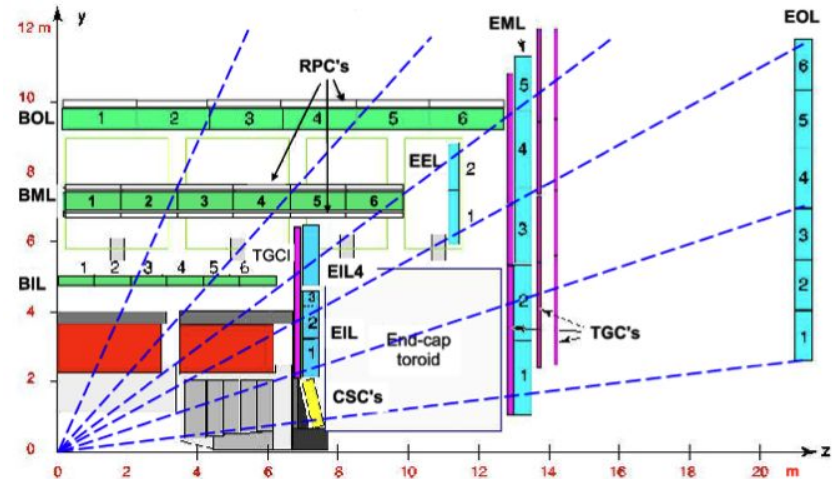
**Временное разрешение: 2 нс,**  
что делает их **ключевыми для быстрого триггера мюонов**.



# Тонкоззорные камеры (TGC)

Торцевой регион:  $1.05 < |\eta| < 2.4$

- Работают в **режиме насыщения**, обеспечивая **стабильный коэффициент усиления**.
- Генерируют **быстрые триггерные сигналы**.
- Измеряют **азимутальную координату мюонных треков**.



# Система триггера и сбора данных (TDAQ)

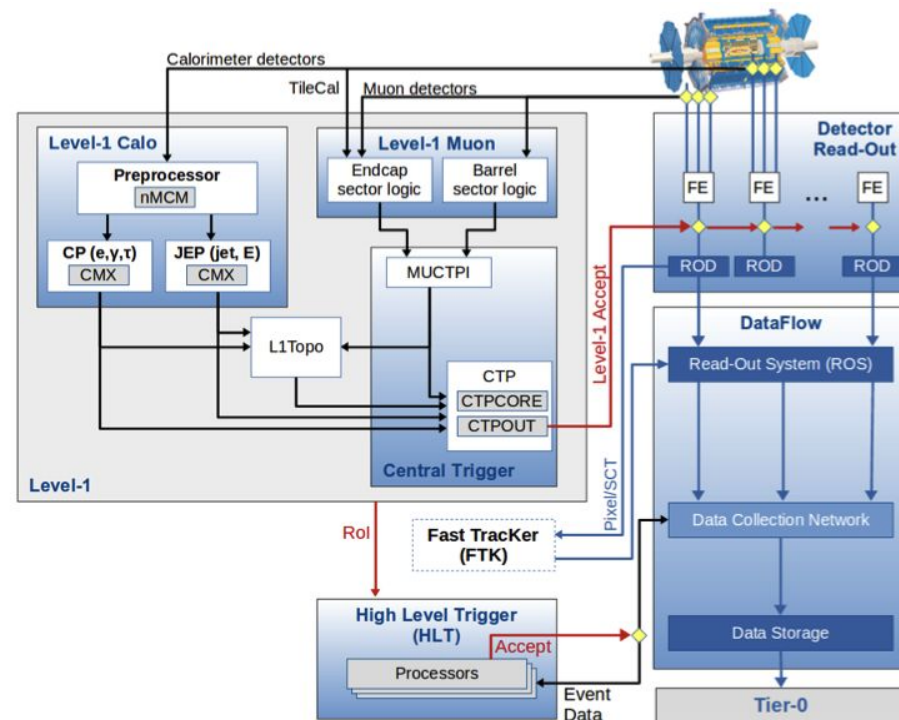
40 миллионов столкновений  $pp$  в секунду.

Однако хранение всех данных невозможно из-за огромного объёма информации:

каждое событие занимает  $\approx 1.4$  МБ.

Большинство столкновений – "мягкие" процессы, не представляющие интереса для физики LHC.

Специализированная система триггера и сбора данных (TDAQ), которая отбирает и сохраняет только наиболее важные события, значительно сокращая поток данных.



# Триггер первого уровня (Level-1, L1)

Аппаратный триггер, анализирующий упрощённые данные с калориметров и мюонных триггерных камер.

Использует **грубую (сниженной точности) информацию** о событиях.

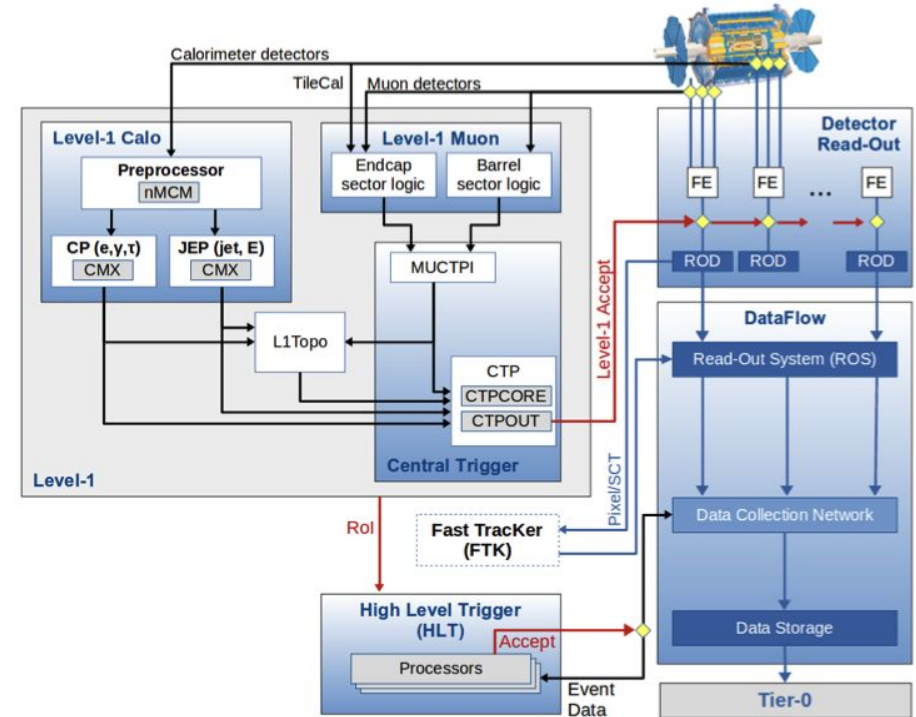
Быстро **выявляет базовые характеристики событий (скопления энергии, траектории частиц)**.

Решение о выборе событий принимается на основе **предопределённого триггерного меню**.

Снижает частоту событий **с 40 миллионов до  $\approx 100\,000$  событий в секунду**.

Данные **буферизуются во фронт-энд электронике детекторов**.

Определенные **области интереса (ROI) в координатах  $\eta, \phi$**  передаются в **триггер высокого уровня (HLT)**.



# Триггер высокого уровня (High-Level Trigger, HLT)

Получает **ROI-информацию** от **L1-триггера**.

**Полные данные с детекторов** (ID, калориметров, MS) и выполняет **глубокий программный анализ событий**.  
**Снижает поток событий до  $\approx 1000$  в секунду**.

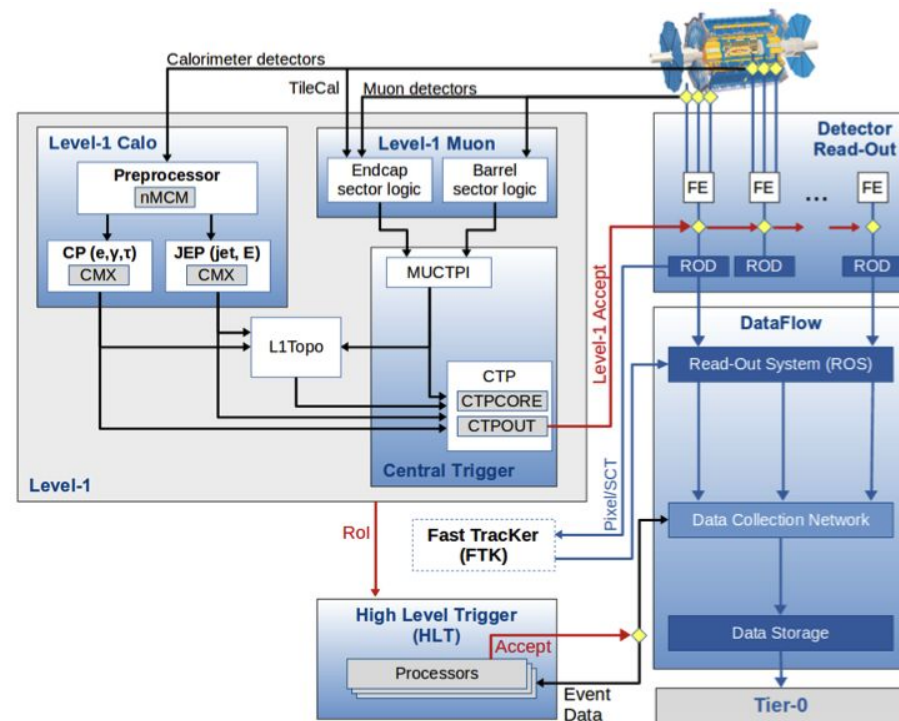
Сохранённые события передаются **на локальное хранилище** и затем отправляются в **Tier-0 центр CERN** для **оффлайн-реконструкции**.

**Выполняет сложные алгоритмы анализа**, такие как:

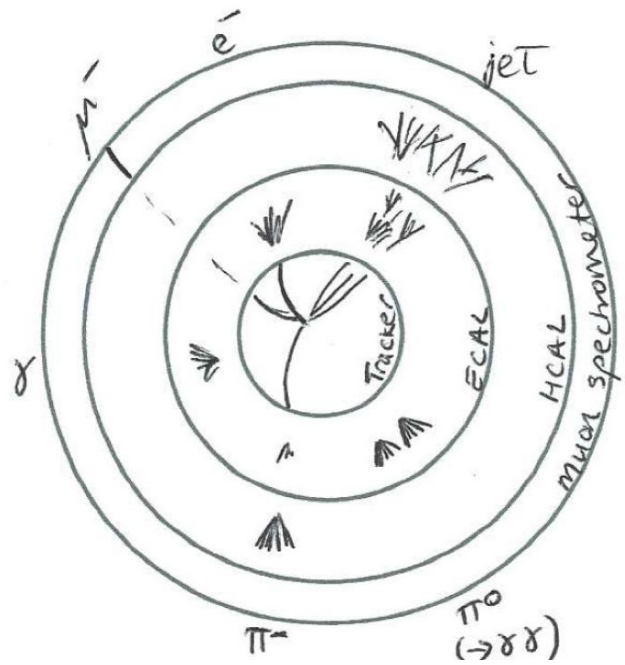
- **Реконструкция объектов** (фотонов, мюонов, джетов и др.).
- **Изучение топологии событий**.
- **Фильтрация "мусорных" столкновений**.

**HLT принимает окончательное решение:**

- **Сохранить событие** для дальнейшего анализа.
- **Удалить событие**, если оно не представляет интереса.



# Сигнатуры частиц (Particle Signatures)



| Частица                        | Характерные сигнатуры                                                                                                          |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $e^{\pm}$ (электрон, позитрон) | След в трековой системе (ID) + энергетический депозит в электромагнитном калориметре (ECal)                                    |
| $\gamma$ (фотон)               | Нет следа в ID + энергетический депозит в ECal                                                                                 |
| $\mu^{\pm}$ (мюон)             | След в ID, небольшой депозит энергии в калориметрах, проходит через весь детектор и регистрируется в мюонном спектрометре (MS) |
| $\tau^{\pm}$ (тау-лептон)      | Не регистрируется напрямую – распадается на видимые продукты                                                                   |
| $\nu$ (нейтрино)               | Не детектируется $\rightarrow$ обнаруживается через пропущенную поперечную энергию ( $E_T^{miss}$ )                            |
| Адроны                         | След в ID (если заряженные) + энергетический депозит в адронном калориметре (HCal)                                             |
| Кварки                         | Регистрируются как струи (джеты) адронов                                                                                       |



Электрон



Фотон



Мюон



Пион

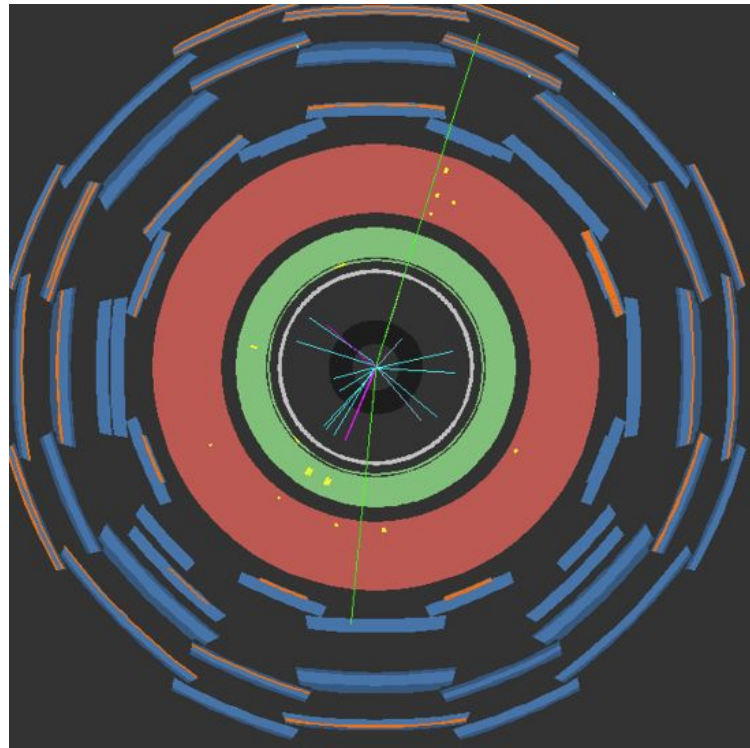
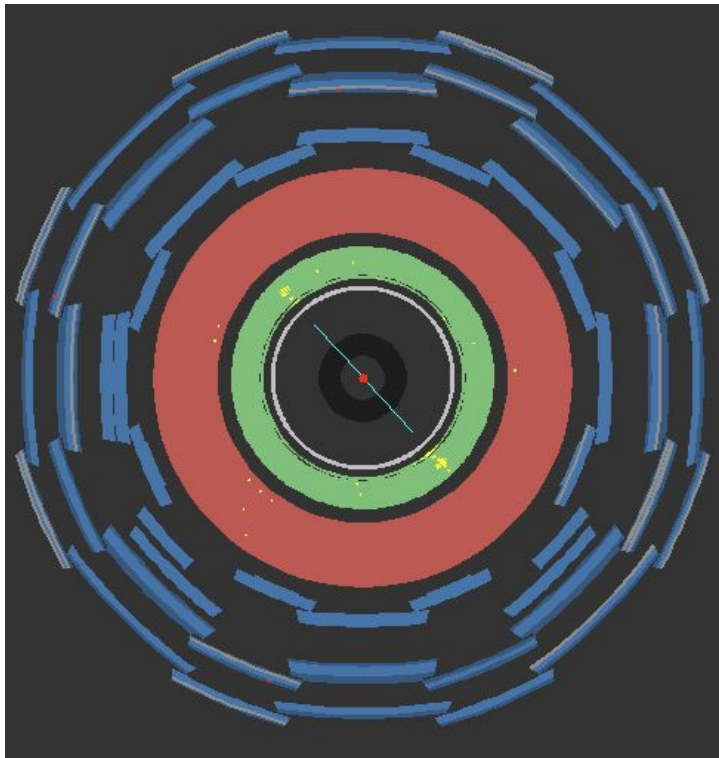


Нейтрино

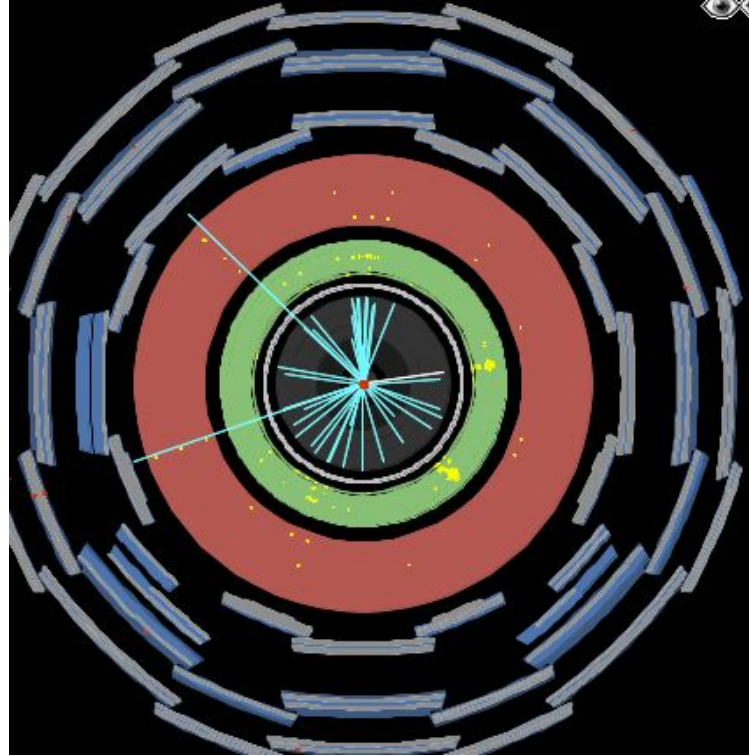
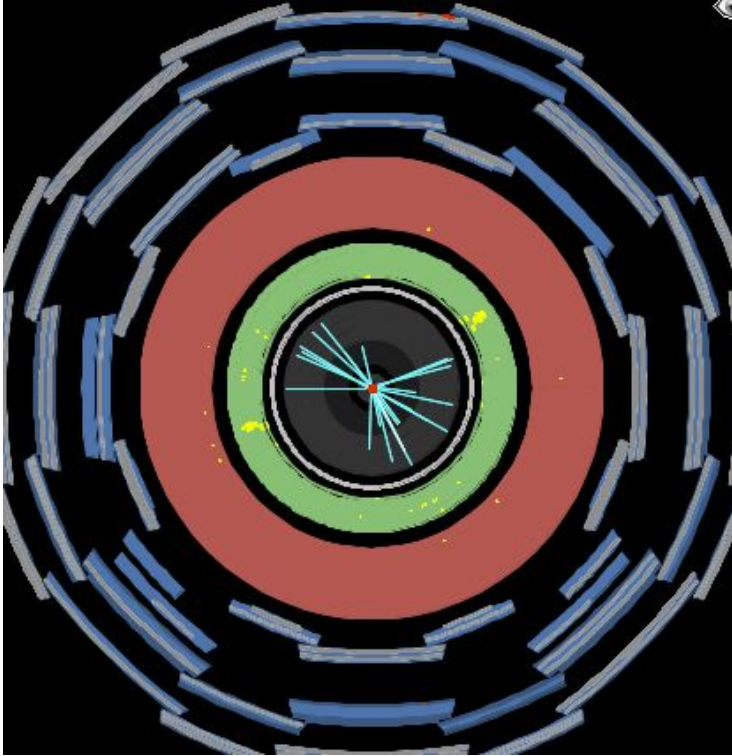


Джет

# Сигнатуры частиц (Particle Signatures)



# Сигнатуры частиц (Particle Signatures)



# Сигнатуры частиц (Particle Signatures)

