Детекторы элементарных частиц
(введение)

Ваня Беляев (ИТЭФ/Москва)

Детекторы частиц

- Предмет сам по себе очень сложный
  - Непростые физические эффекты
  - Сложные инженерные решения
- У нас есть всего 45 минут
  - В ведущих вузах (МФТИ/МИФИ/МГУ/НГУ) *основы* предмета изучаются в течении как минимум двух семестров
- Некие упрощения неизбежны
  - Ко многим утверждениям можно найти хотя бы одно исключение

Частицы

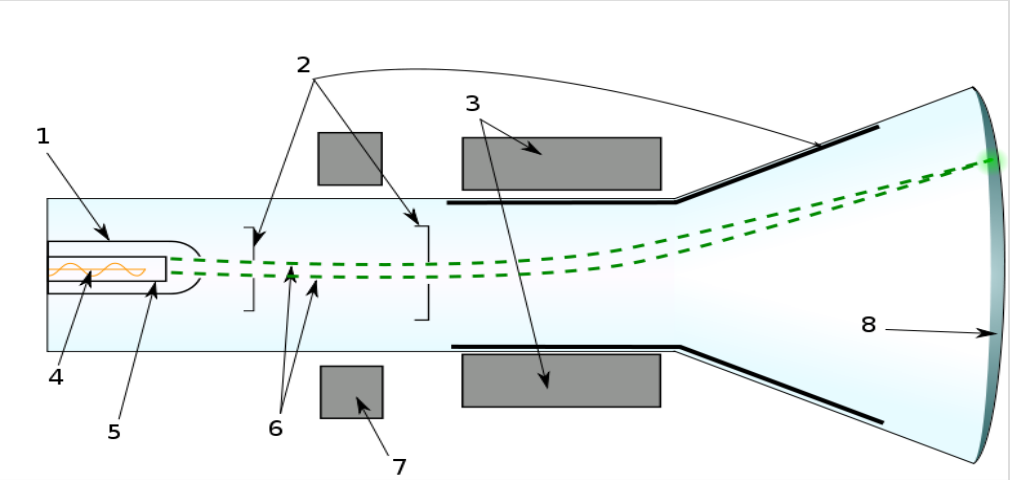
- Регистрируемые непосредственно («долгоживущие»)
  - Заряженные:
    - *Электрон, протон*
    - *мюоны, $\pi^{\pm}$ и $K^{\pm}$-мезоны*
  - Нейтральные: фотоны /гамма-кванты
- Реконструируемые по их распадам («короткоживущие»)

Частицы, живущие достаточно долго, чтобы оставлять след кторый можно наблюдать/измерять непосредственн след, («трек»)

Упрощение: граница между этими категориями не такая четкая

Детекторы частиц вокруг нас

- Детектор (низкоэнергичных) электронов
  - Экран ЭЛТ («старого») телевизора, осциллографа, …



- Детектор (низкоэнергичных) фотонов
  - Фотоплёнка, *фотопластинки* Исторически первый
  - Цифровые видео и фотокамеры: ПЗС-матрица

Числа и единицы измерений

- Энергия: электрон-вольты, килоэлектрон вольты, …, Тераэлектронвольты
  - 1 эВ = 1.6×10^{-19} Дж
  - Энергия которую приобретает электрон пройдя разность потенциалов в 1 вольт
- Энергия связи электронов в атоме:
  - O(13.6эВ)
- Энергия протона в LHC:
  - 3.5 ТэВ × 1.6×10^{-19} Дж/эВ = 5.6×10^{-7} Дж
  - 10^{11} протонов в банче: 56 кДж = 13.3ккал

Как регистрировать частицы?

- «Типичные» энергии очень малы по сравнению с макроскопическими размерами
- Надо использовать физические эффекты которые очень чувствительны к малым возмущениям
  - Основной принцип до конца 70х годов XX века
- Прогресс в развитии современной электроники позволяет усилить слабые сигналы

Неустойчивое равновесие

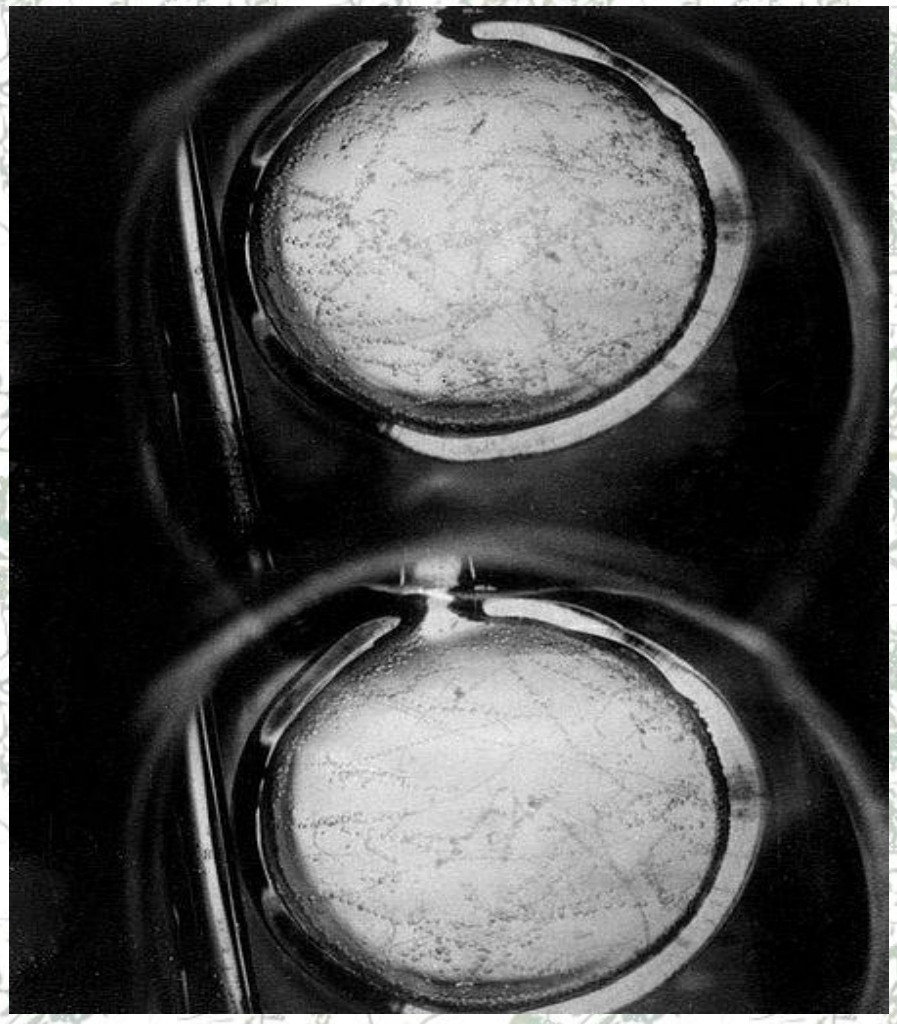
- Система, наиболее чувствительная к малым внешним равновесиям – это система в состоянии неустойчивого равновесия
  - Макроскопическая система может быть чувствительной к микроскопическим воздействиям

Перегретая жидкость

- Простой домашний опыт
  - Очень чистая вода (например много раз кипяченая)
  - Очень чистая ровная посуда с ровным гладким дном и стенками (например химическая колба)
  - Очень осторожный равномерный нагрев
- Вода не закипает!
  - Мгновенно и бурно вскипает если бросить туда что-нибудь мелкое… или просто потрясти
- Малое возмущение приводит к большим качественным изменениям в системе

Пузырьковая камера

- Перегретая жидкость: часто жидкий водород
- Когда через жидкость проходит заряженная частица (малое воздействие), жидкость вскипает вдоль ее движения, образуя слез из мельчайших пузырьков, которые можно сфотографировать



Пузырьковые камеры

- Изобретена Дональдом Глейзером (1952 год)
  - Нобелевская премия 1960 год
- Можно «глазом» видеть частицы
  - Миллионы фотографий…
- Разные жидкости: водород, дейтерий, пропан, ксенон, …
- В реальности не нагревают, а изменяют давление..
- «Золотой век»
- «Гаргамель»

Gargamel

- Пузырьковая камера Гаргамель. ЦЕРН

1970-1978

2×4 метра

12 м^3 фреона

Одно из наиболее важных открытий в ЦЕРН: 1973 год

Переохлажденный пар

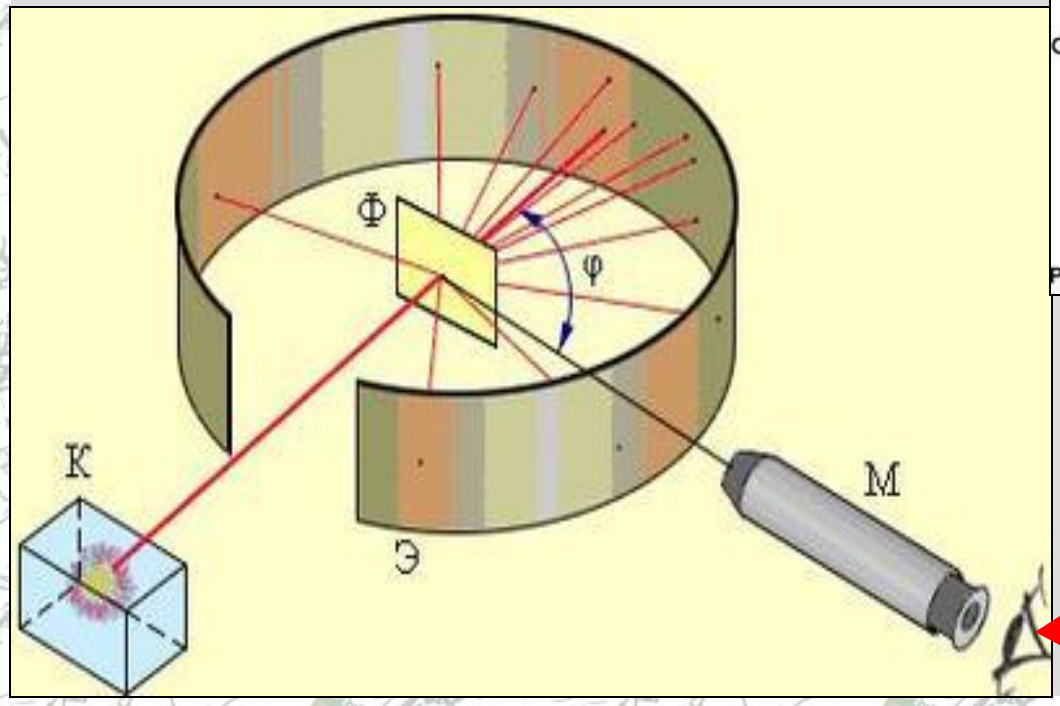
- Еще одна система с неустойчивым равновесием
  - Конденсация перенасыщенного пара
  - Образование капелек конденсата («тумана») вдоль движения заряженной частицы
- «туманная камера Вильсона»
  - Изобретена Чарльзом Вильсоном в начале XX века

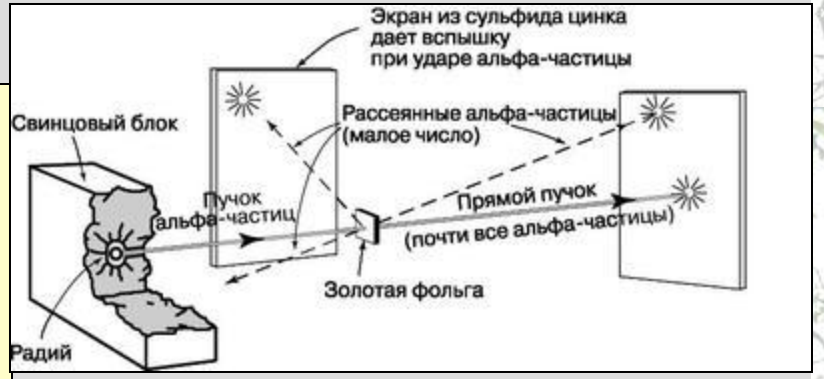
Счетчик Гейгера

- Заряженный конденсатор на грани пробоя
  - Разряд/пробой когда проходит частица
- Используется в дозиметрах
- Изобретен Гансом Гейгером в 1908 году

(Опыт Резерфорда)

- Знаменитый опыт Резерфорда, который показал что атом имеет тяжелое и очень компактное ядро





Гейгер

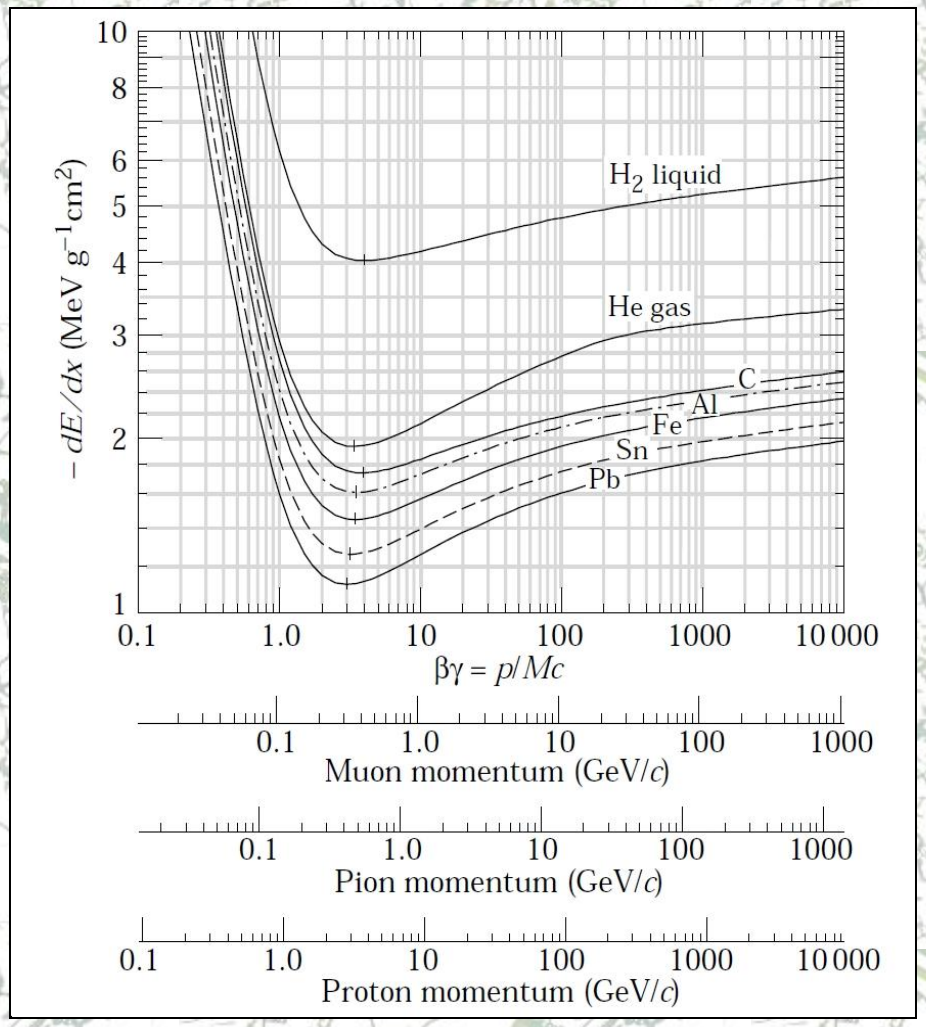
Как происходит взаимодействие частиц с веществом?

- Все заряженные частицы:
  - Ионизация вещества
  - Тормозное излучение
    - особенно e^- и e^+
  - Черенковское излучение
  - Переходное излучение
- Адроны: неупругие ядерные процессы,
- Фотоны
  - Фотоэффект
  - Комптоновское рассеяние
  - Рождение e^+e^- пар в поле ядра

Ионизационные потери

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] .$$

- $\beta = v/c$
- МэВ см^2/г
- Пропорционально плотности электронов в веществе
- *Слабо* зависит от вещества
  - «2 МэВа на грамм»
  - 4 для водорода



Тормозное излучение

- В электрическом поле ядра быстрая заряженная частица излучает фотоны

$$-\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{Z^2}{A} z^2 \left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{e^2}{mc^2} \right)^2 E \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \propto \frac{E}{m^2}$$

- Эффект очень важен для e^- и e^+

(не очень важен для других частиц)

  - Растет линейно с энергией
  - Есть «критическая энергия» (5-10 МэВ), при больших энергиях эффект доминирует при меньших доминирует ионизационные потери

Фотоны

- Фотоэффект
  - Важен когда энергия фотона сравнима с энергией связи электрона в атоме
- Комптон-эффект
- Рождение пар в поле ядра
  - Доминирующий эффект при больших энергиях
- А что случается дальше с e^+ и e^- ?
  - Предыдущий слайд (и снова этот…)
  - Размножение частиц
    - Ливень

Ливни

- Высокоэнергичные фотоны рождают (высокоэнергичные) пары
- Высокоэнергичные e^- (и e^+) излучают (высокоэнергичные) фотоны
- …
- …
- Процесс размножения продолжается пока энергия достаточно велика
  - $E > E_{крит}$

- По закону сохранения энергии:
  - $N \approx E_0/E_{крит}$
- ~тысячи частиц при начальной энергии E_0 больше чем 1 ГэВ

Адронные ливни

- Похожим образом при больших энергиях взаимодействуют с ядрами адроны с выделением ядерных осколков и других адронов
  - Физика довольно сложна
  - Внутри ливня появляются также фотоны и электроны, рождая электромагнитные ливни
  - Размножение пока энергия частиц в ливне достаточно большая > ГэВ

А что происходит с энергией выделенной в веществе?

- Сцинтилляторы – вещества в которых возбуждение снимается излучением видимого света…
  - Прозрачные (неорганические) кристаллы
  - Многие пластики, огрстекло,…
- Количество света *пропорционально энергии* выделенной в куске сцинтиллятора
  - В случае ливней при *очень большом куске* вещества – пропорционально энергии частицы
    - «калориметр»
    - Возможность измерить энергию ливневой частицы!
- Вспышки обычно очень слабые и для детектирования требуют использования фотоумножителей

Что мы регистрировали в пузырьковой камере?

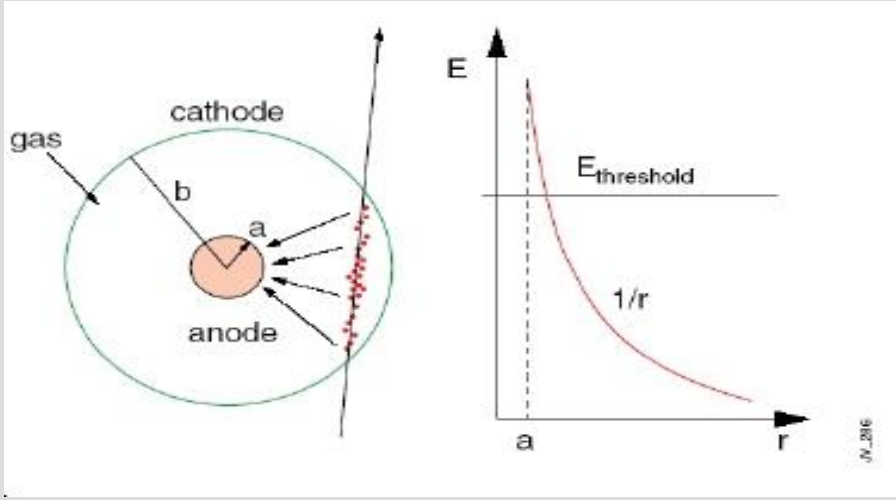
- Трек частицы вызван ионизационными потерями.
- Именно ионизационные потери в среде, ведущие к образованию пар электрон-ион, служат «спусковыми крючками» для выхода системы из состояния неустойчивого равновесия

Другие подходы?

- Со временем (развитием электроники, увеличения чувствительности аппаратуры и уменьшения всевозможных шумов) необходимость использования принципа неустойчивого равновесия для детектирования частиц стала уменьшаться.

Газовое усиление

- Электроны дрейфуют к тонкой проволочке
- Электрическое поле вблизи проволочки очень большое
  - Размножение
  - «Газовое усиление»
- Усиление сигнала зависит от многих параметров: напряжения, диаметра проволочки, газовой смеси

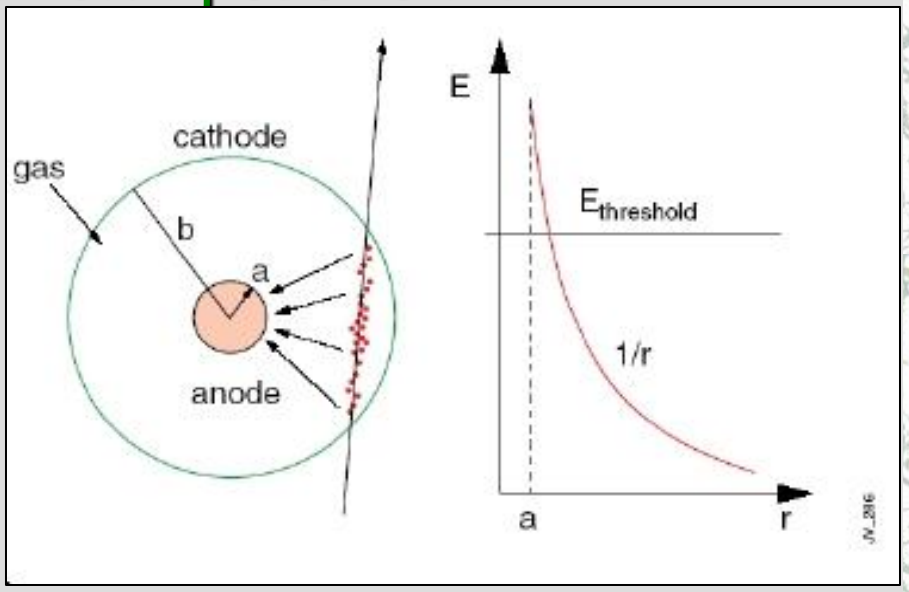


Малое усиление: (слабый) сигнал пропорционален ионизации

Слишком большое усиление: (сигнал большой) счетчик Гейгера

Время дрейфа

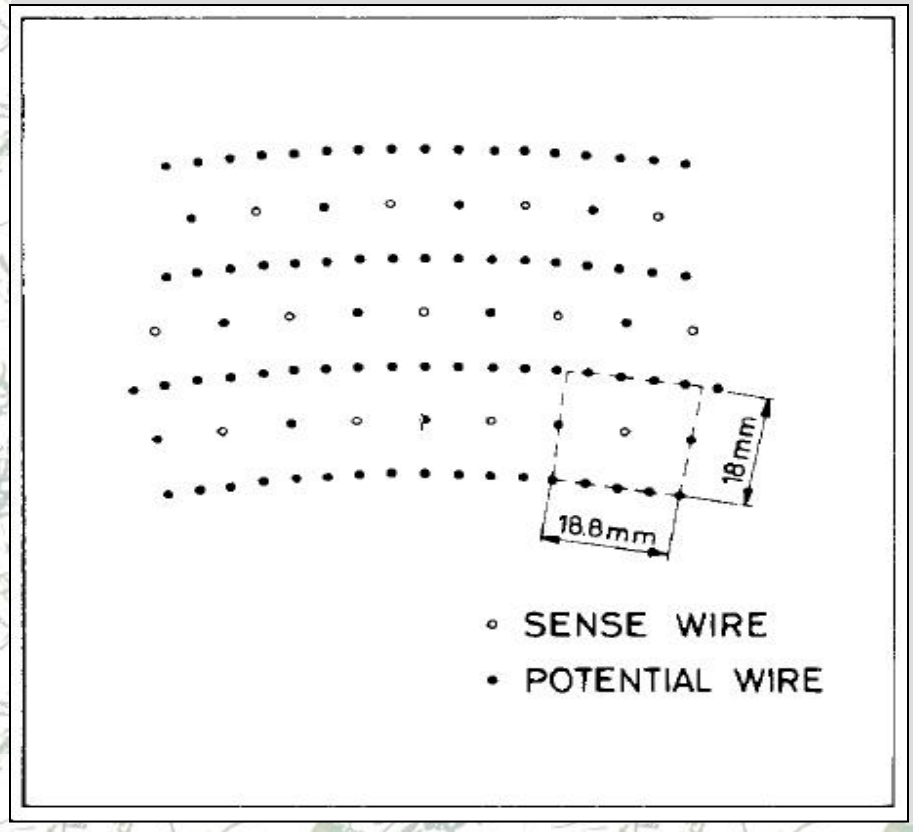
- Электроны дрейфуют к тонкой проволочке
  - Скорость около 50км/с
- Измеряя время прихода сигнала можно рассчитать расстояние и узнать где проходила частица

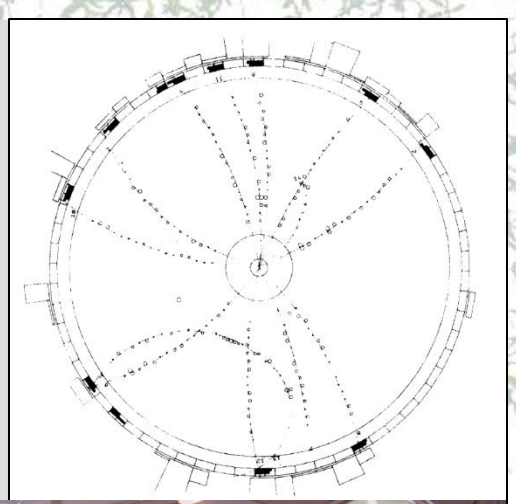


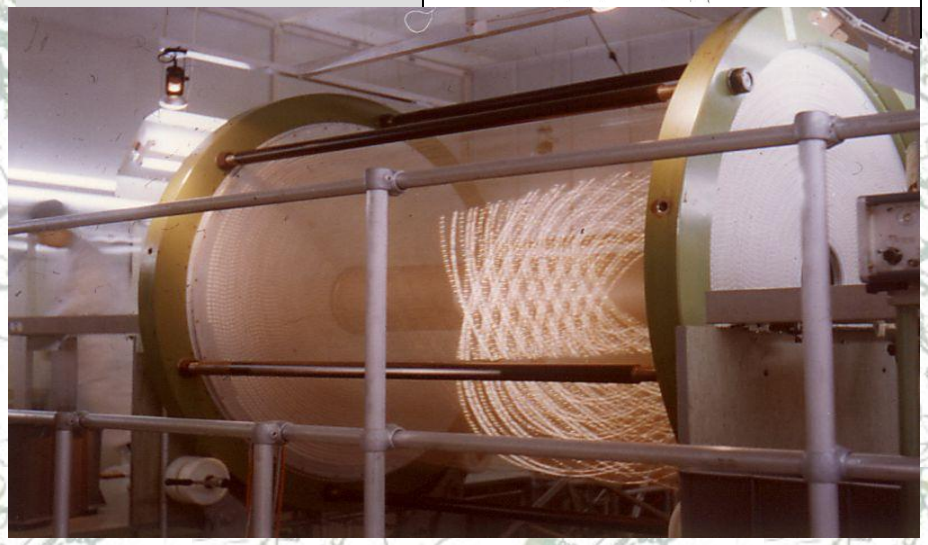
- «Дрейфовые трубки»
- «Соломенные трубки» , часто длинные и тонкие как соломинки для коктейлей:
  - LHCb: десятки тысяч трубок длиной около 3 метров и толщиной 5мм

А нужны ли трубки?

- Дрейфовая камера

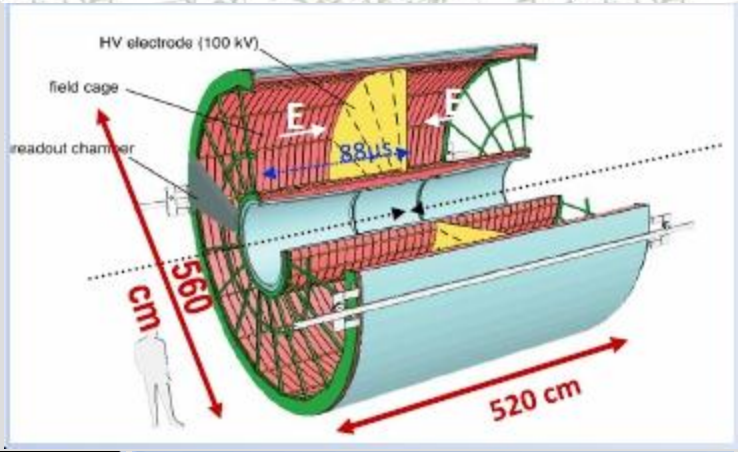


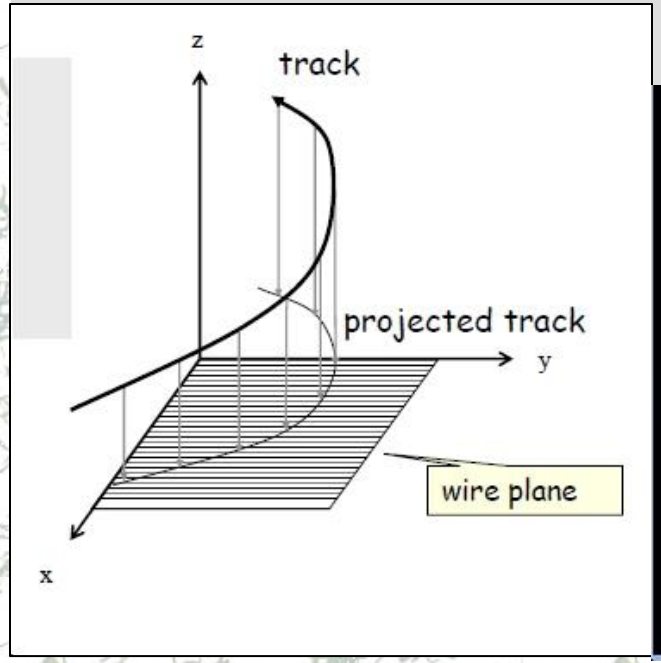


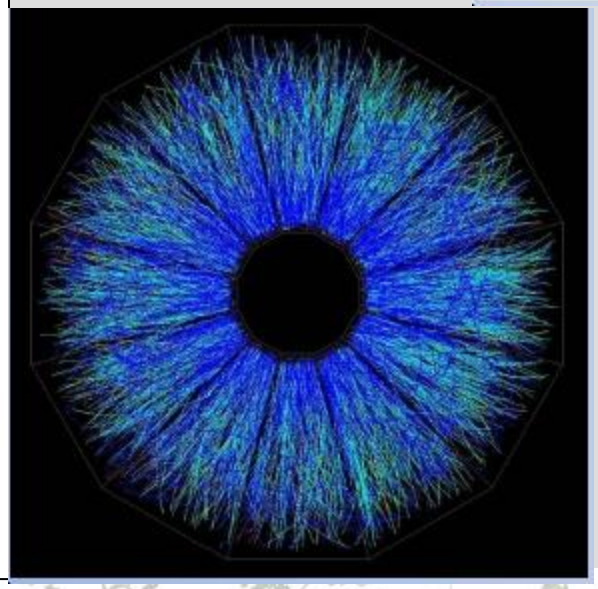


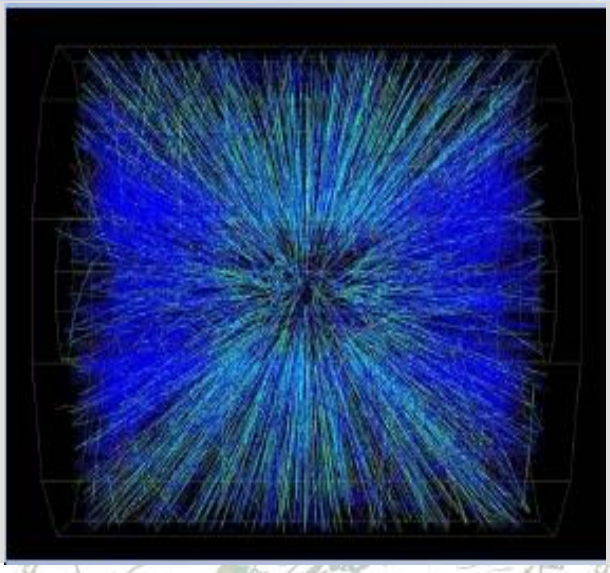
Время-проекционная камера

- Настоящая 3Д картинка
- Сердце детектора ALICE









Твердотельные детекторы

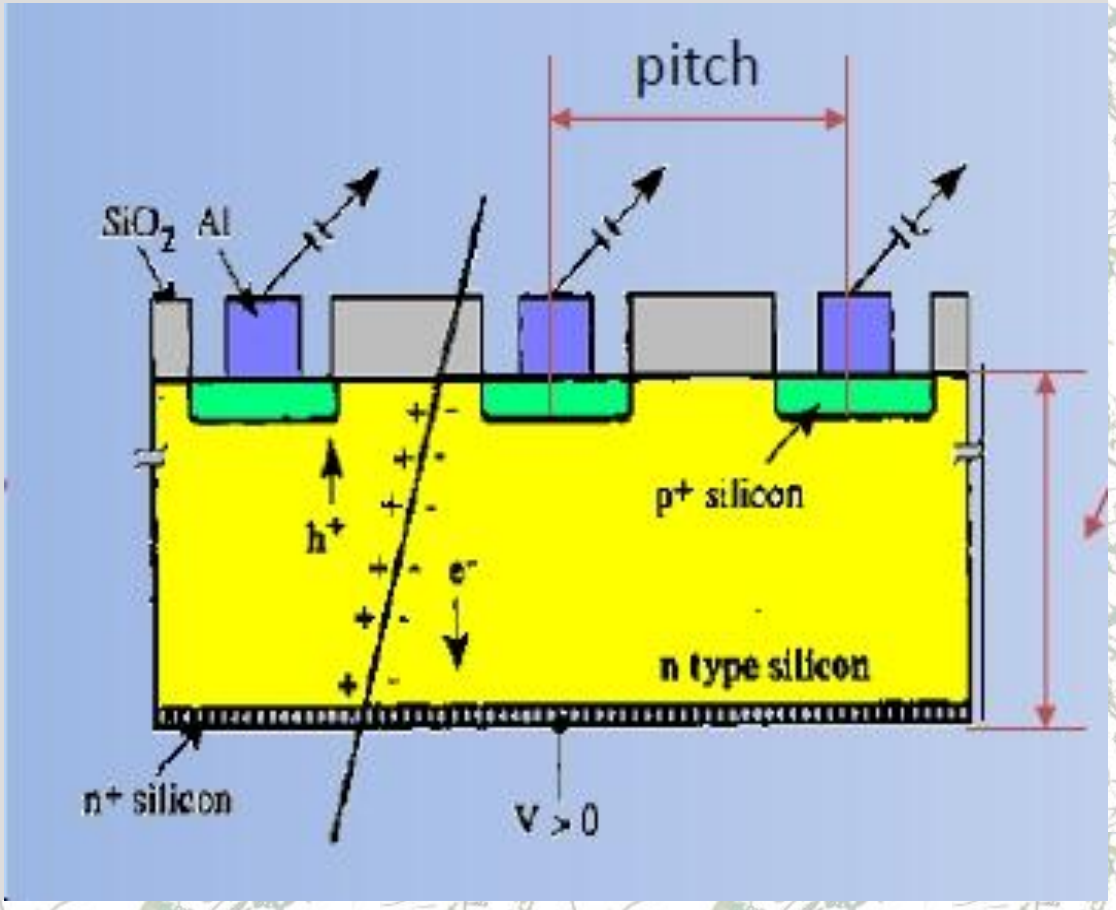
- Ионизация в газах: 300 ионов на см
  - Пропорциональна плотности!
- В твердых телах начальная ионизация заметно больше (10^3)
  - «Начальный» сигнал заметно больше
    - более компактный детектор
  - Еще больше сигнал в полупроводниках (~10)
    - «Электрон + Дырка» вместо «Электрон + Ион»
- Нет газового усиления ☹
  - Нужна чувствительная и малошумящая электроника

Полупроводниковые детекторы

- Сердца современных детекторов

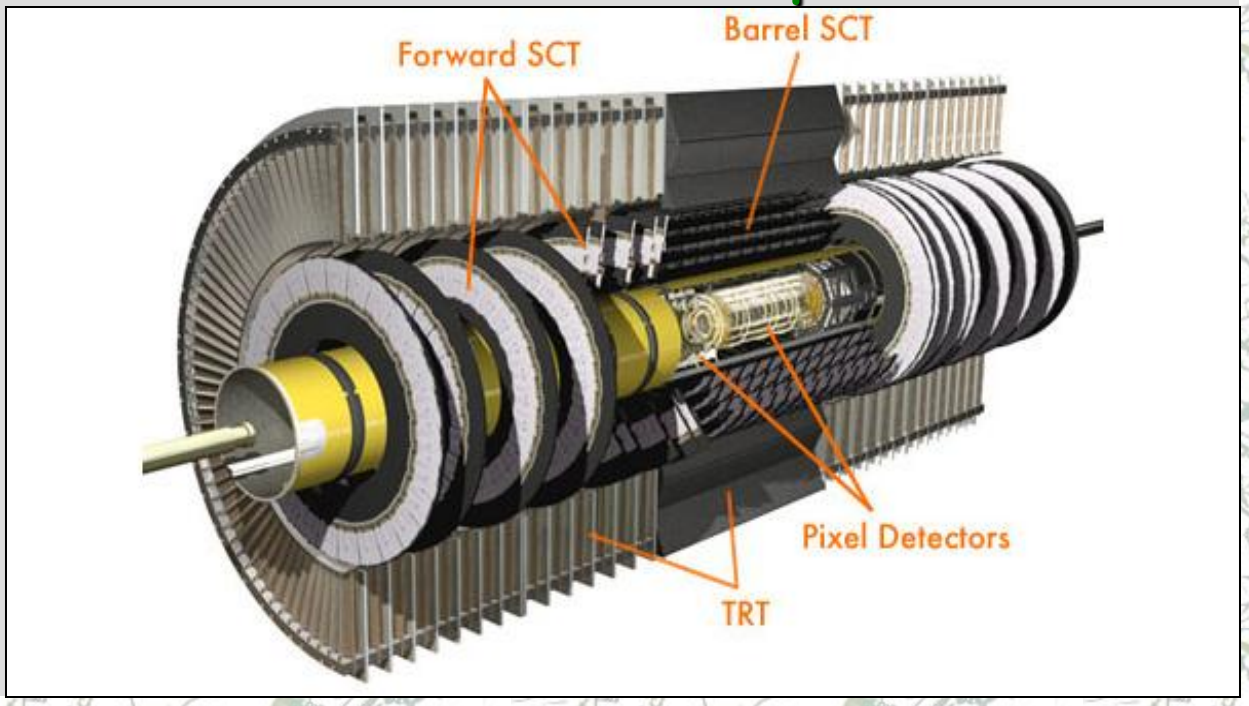
- Типичные точности
  - 5-50 мкм
- Типичные геометрии
  - Полоски
    - «стрипы»
  - Короткие полоски
    - микрострипы
    - «стриксели»
  - Прямоугольники
    - «пиксели»

- Много (десятков) миллионов каналов считывания, самые современные технологии



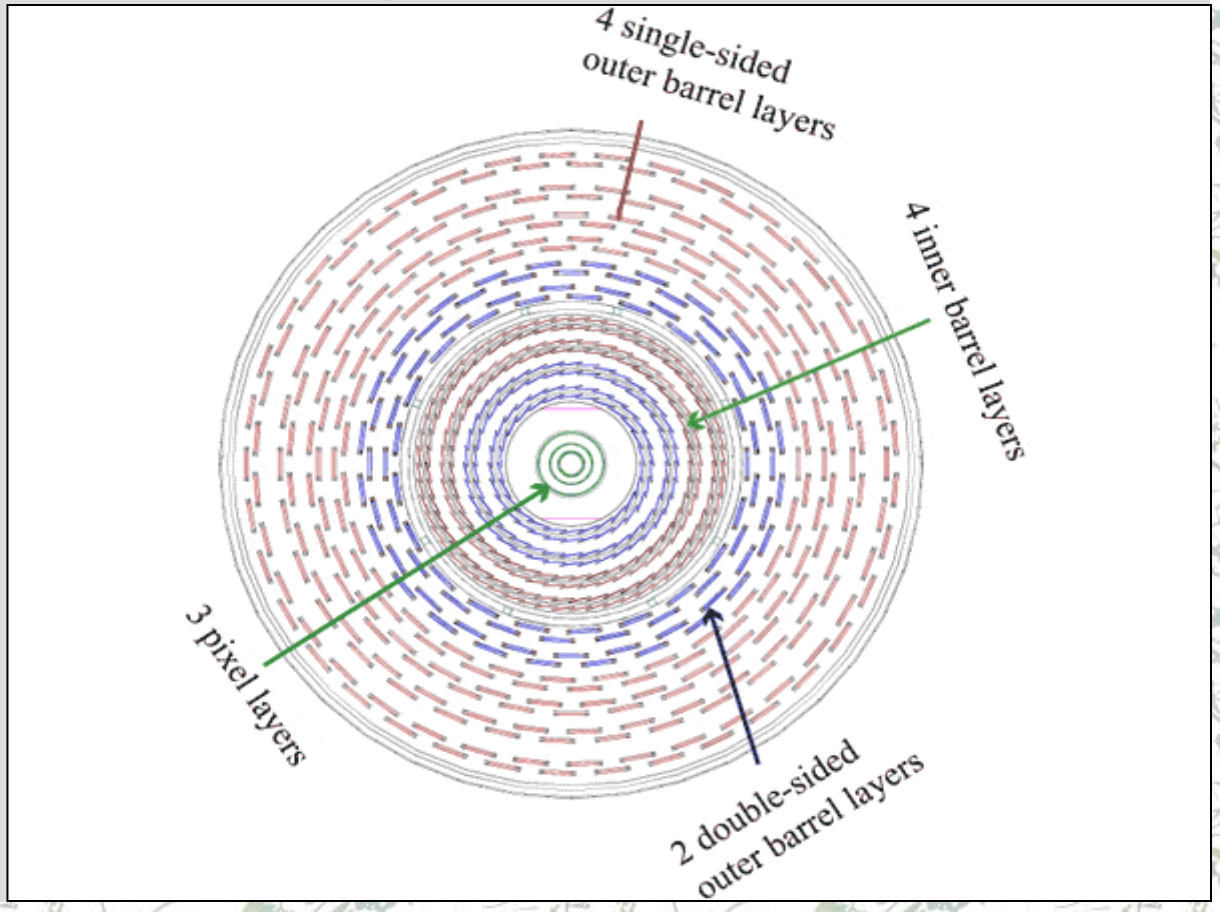
Иногда сердце очень большое

- Внутренний детектор эксперимента ATLAS
- > 10^8 каналов,
- > 60м^2 полупроводниковых детекторов



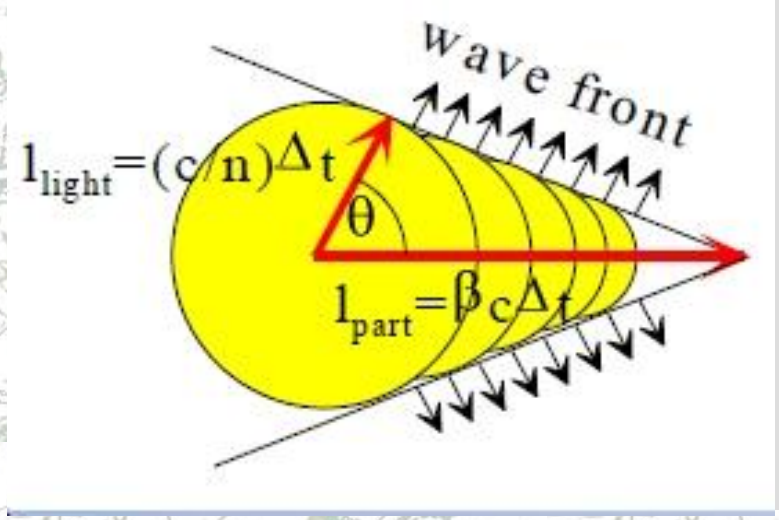
Большое сердце-II

- Внутренняя часть детектора CMS
- 65×10^6 каналов



Черенковское излучение

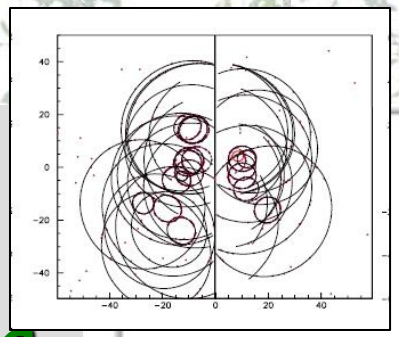
- Когда заряженная частица движется в среде со скоростью больше скорости света в среде
  - (но меньше скорости света в вакууме)
  - Конус черенковского света $\cos\theta = 1/(n\beta)$
  - Зная раствор конуса – *измеряем скорость*

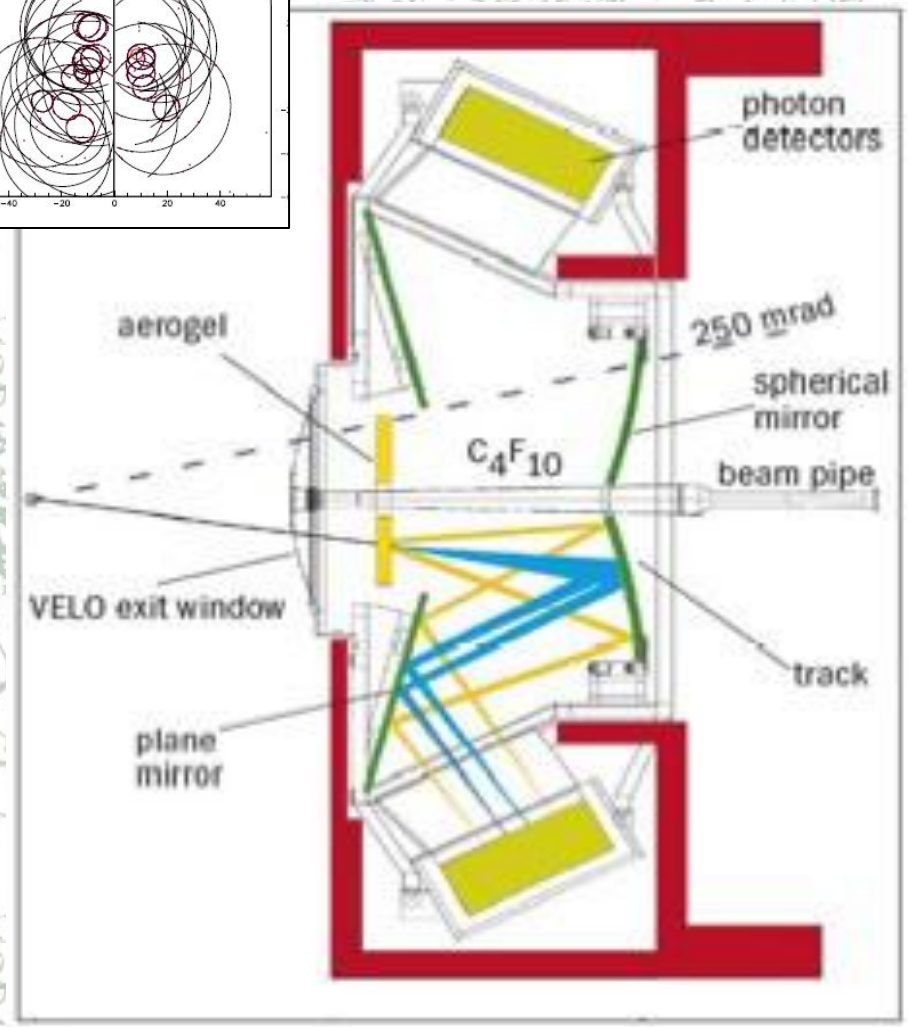


- Если отразить в сферическом зеркале – изображение этого конуса будет представлять собой окружность
- Радиус связан с углом θ
- Измеряем скорость
- Зная импульс частицы, измеряем массу

Детектор черенковских колец

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





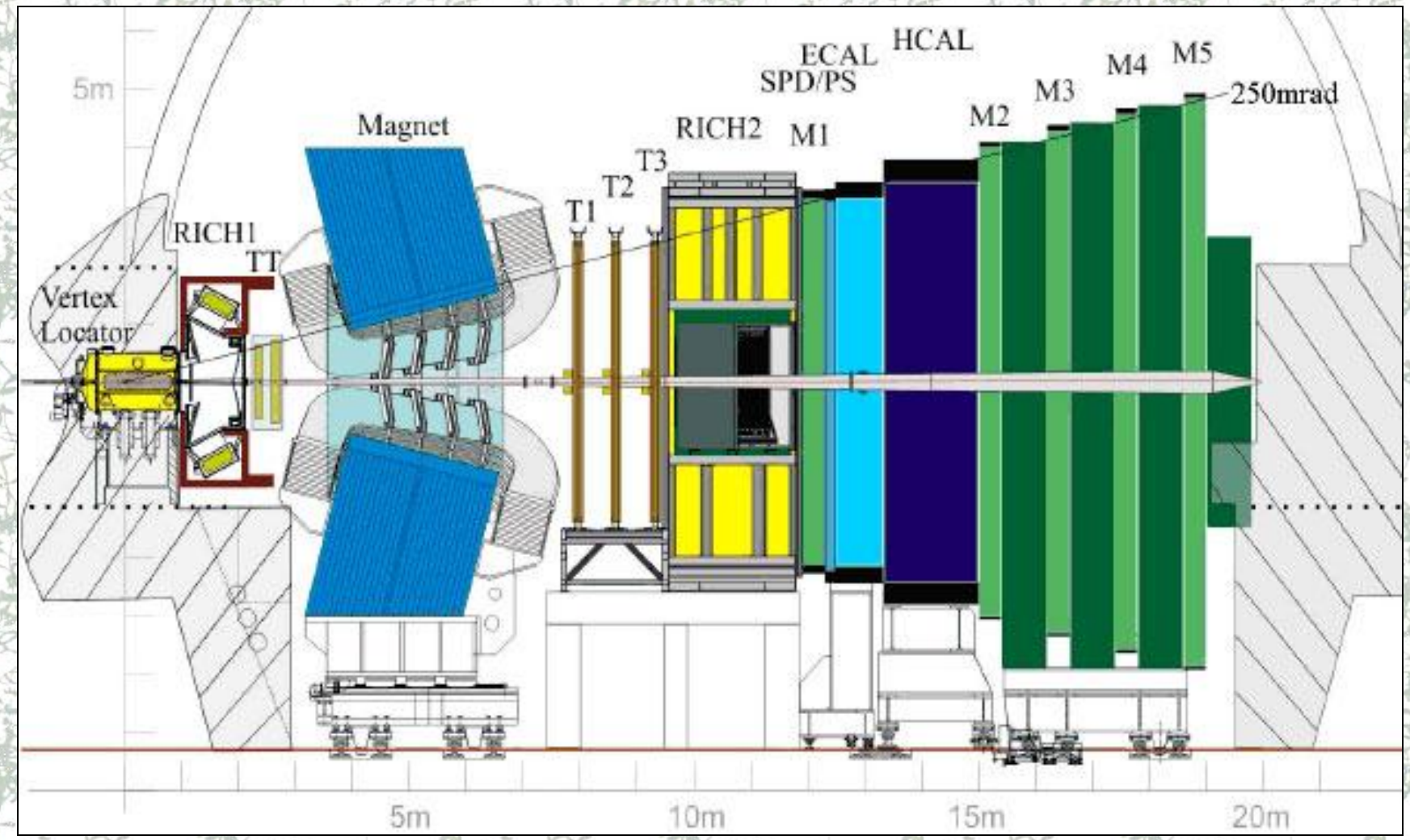
А как же мюоны?

- Мюоны не участвуют в ядерных взаимодействиях
  - Нет адронных ливней
- Для мюонов не слишком больших энергий (меньше десятков ГэВ) тормозное излучение не приводит к большим потерям энергии
  - Нет электромагнитных ливней
- Теряют энергию главным образом только за счет ионизации вещества!
  - Большая проникающая способность
    - «2 МэВа на грамм»
    - Плотность железа ~8г/см^3
    - Потеря энергии: 16 МэВ на сантиметр толщины железа
    - 16 ГэВ мюон спокойно пройдет через несколько метров железа

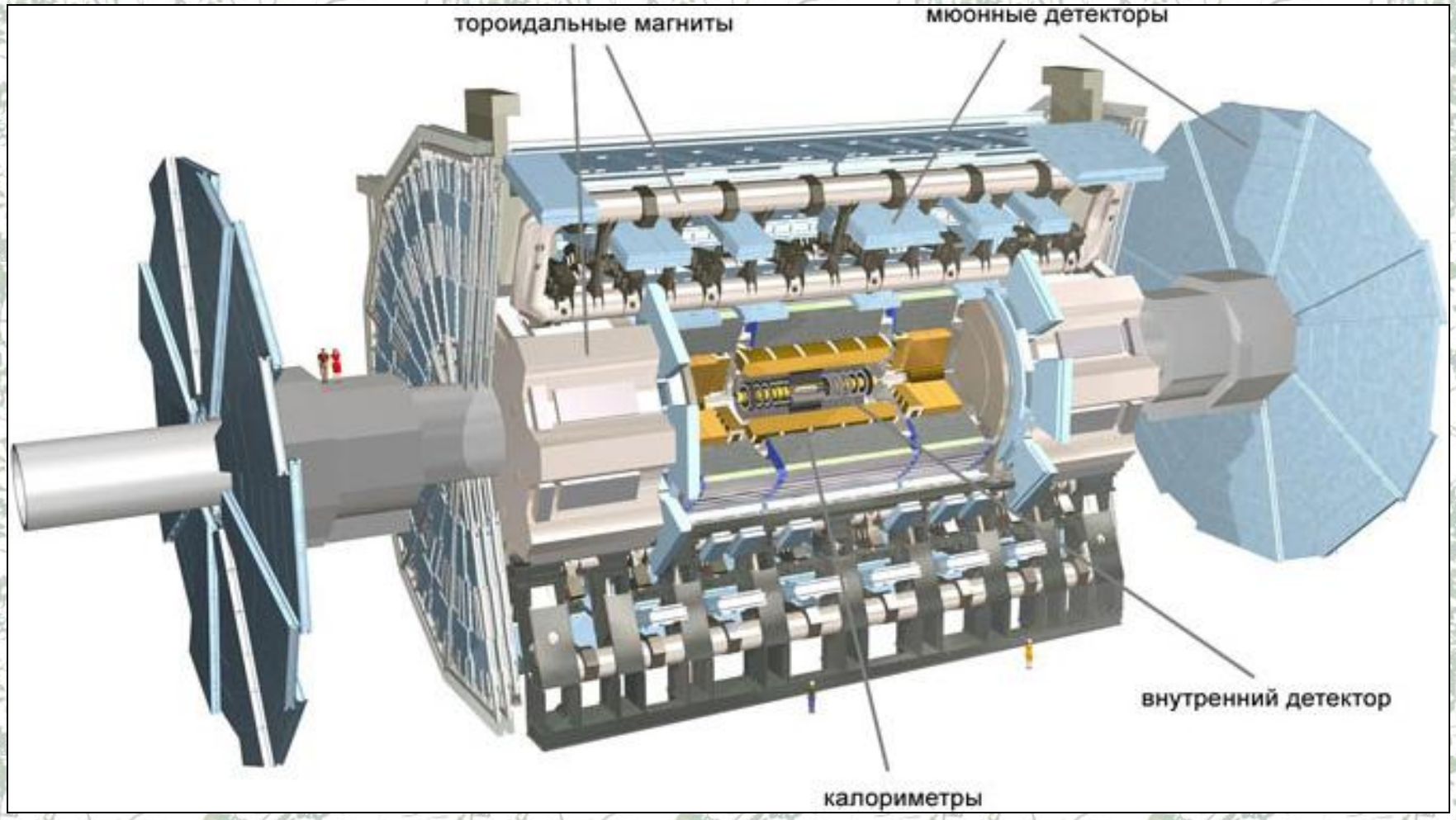
Детекторы мюонов

- Мюонные детекторы обычно самые делекие от точки взаимодействия. Включают много тяжёлого материала: железо, железобетон
- Часто самые тяжелые (по массе) элементы эксперимента
  - Часто совмещены с ярмом магнита
- Обычно самые внешние и самые видимые
  - Часто только их и видно…

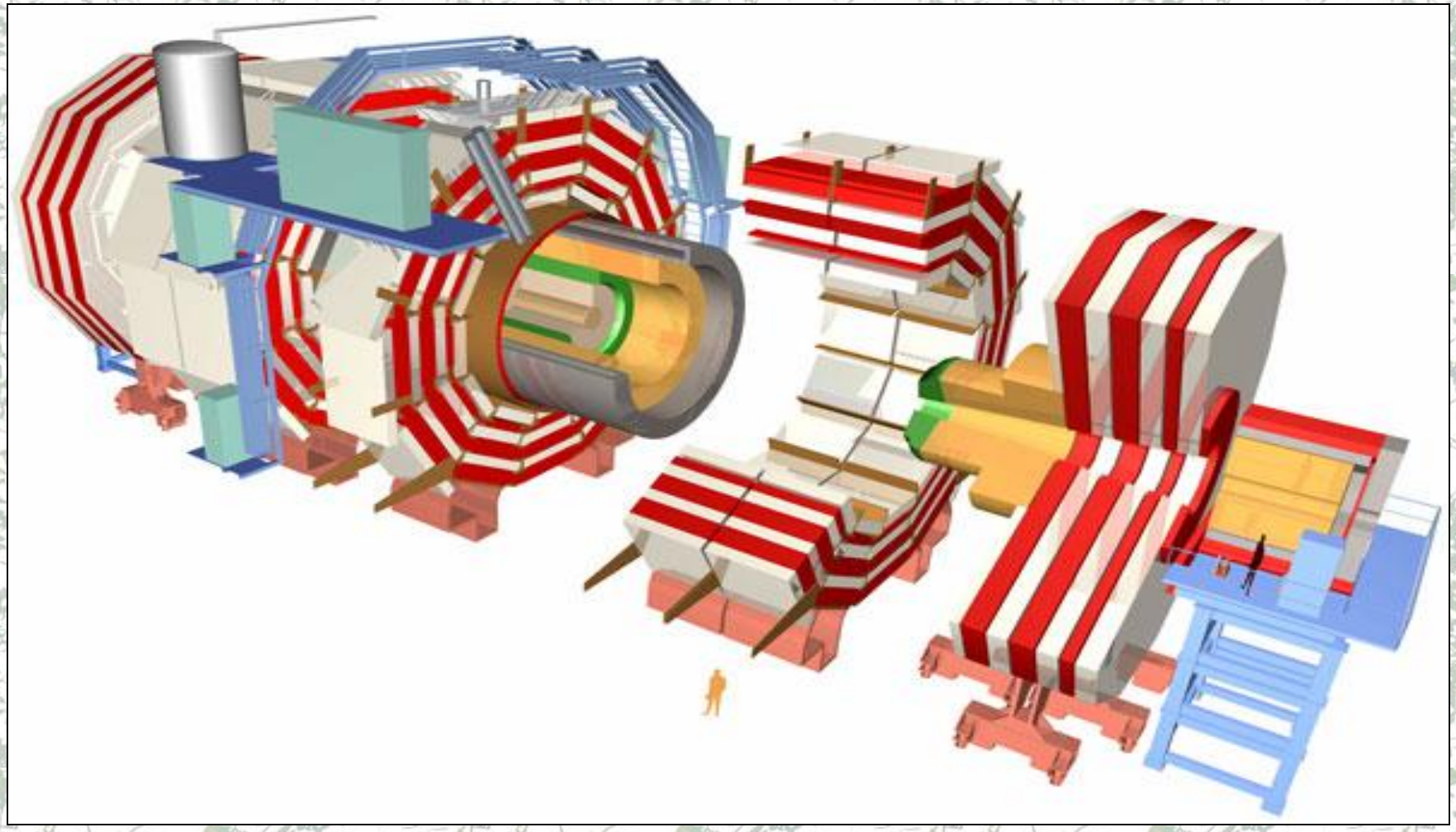
LHCb


5m
Magnet
RICH1
TT
Vertex
Locator
T1
T2
T3
RICH2
M1
SPD/PS
ECAL
HCAL
M2
M3
M4
M5
250mrad
5m
10m
15m
20m

ATLAS


тороидальные магниты
мюонные детекторы
внутренний детектор
калориметры

CMS



Вместо заключения

Большое спасибо за внимание

Вопросы?

Я должен еще раз извиниться за слишком большие упрощения