



# Детекторы элементарных частиц (введение)



Ваня Беляев ( ЦЕРН/Женева и 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

1 Ноябрь 2011 г. Далеко не все "Детекторы (введение)"



# Частицы



- Регистрируемые непосредственно («долгоживущие»)

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

- Заряженные:

- *Электрон, протон*
- *мюоны,  $\pi^\pm$  и  $K^\pm$ -мезоны*

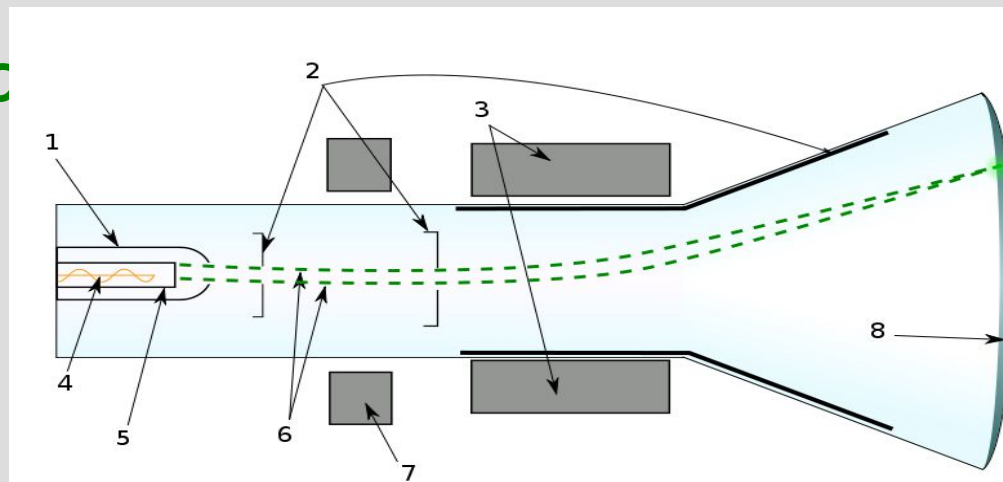
- Нейтральные: *фотоны / гамма-кванты*

- Реконструируемые по их распадам («короткоживущие»)

Примечание: граница между этими категориями не такая четкая

- Детектор (низкоэнергичных) электронов

- Экран ЭЛТ («старый осциллограф», ...



Исторически первый

- Детектор (низкоэнергичных) фотонов

- Фотоплёнка, фотопластины



# Числа и единицы измерений



- Энергия: электрон-вольты, килоэлектрон вольты, ..., Тераэлектронвольты
  - $1 \text{ эВ} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$
  - Энергия которую приобретает электрон пройдя разность потенциалов в 1 вольт
- Энергия связи электронов в атоме:
  - $O(13.6 \text{ эВ})$



# 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



# 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

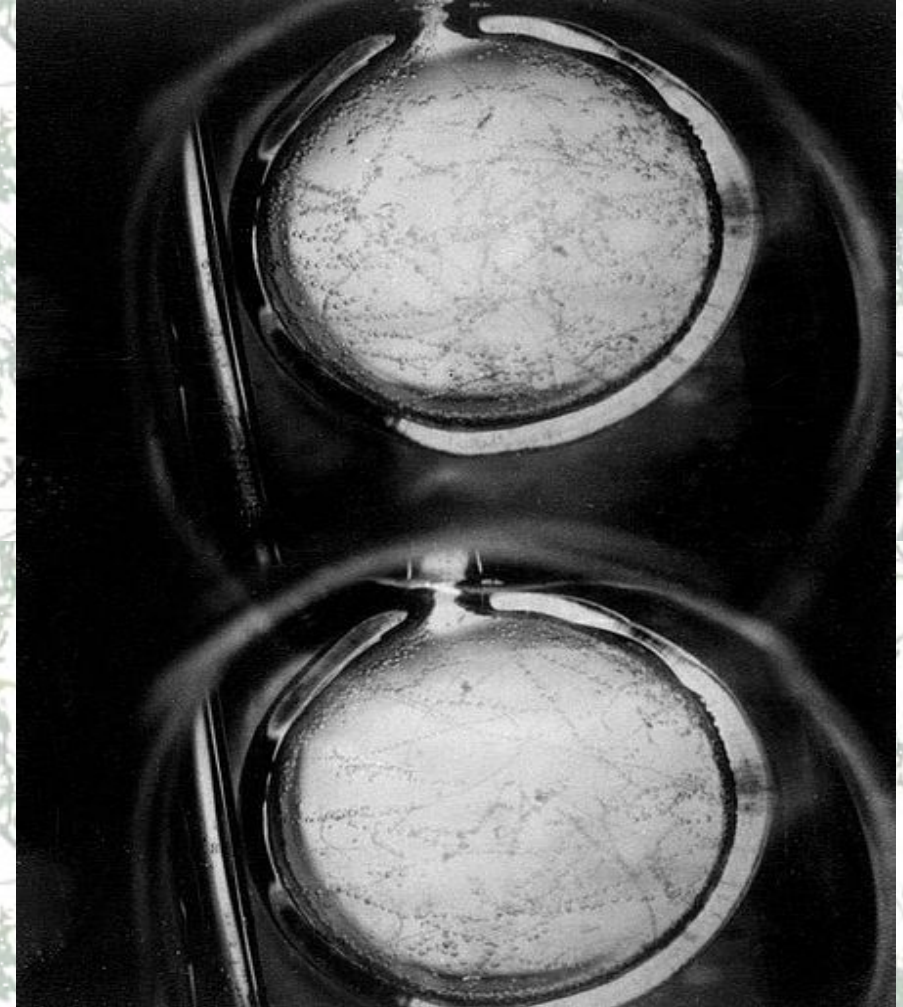


- Простой домашний опыт

- 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



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



сфотографировать

1 Ноября 2k+11

Ваня Беляев, "Детекторы (введение)"



# 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

1 Ноября 2к+11

Ваня Беляев, "Детекторы (введение)"

давление



# Gargamel



- Пузырьковая камера Гаргамель ЦЕРН

1970-1978

2×4 метра

12 м<sup>3</sup> фреона



Одно из наиболее важных открытий в ЦЕРН: 1973 год

*1 Ноября 2k+11*

*Ваня Беляев, "Детекторы (введение)"*

- Еще одна система с неустойчивым равновесием
  - Конденсация перенасыщенного пара
  - Образование капелек конденсата («тумана») вдоль движения заряженной частицы
- «туманная камера Вильсона»



• Изобретена Чарльзом

1 Ноября 2k+11

Вильсоном в начале XX

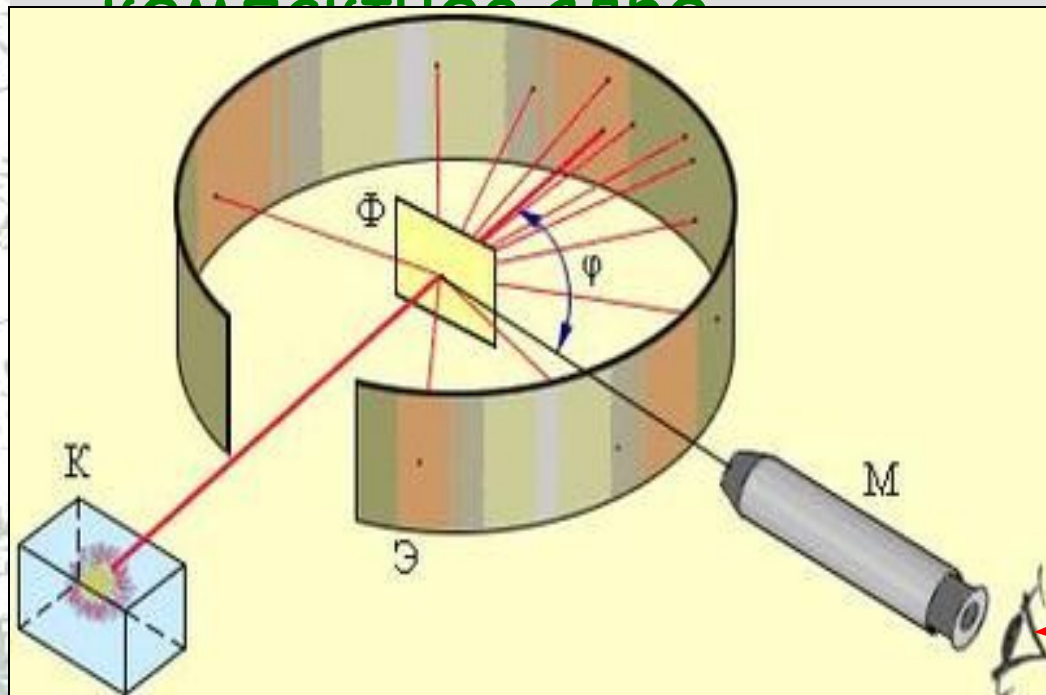
Ваня Беляев, "Детекторы (введение)"

- Заряженный конденсатор на грани пробоя
- Разряд/пробой когда проходит частица
- Используется в дозиметрах



• Изобретен Хансом Гейгером в 1908 году

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



Гейгер



# Как происходит взаимодействие частиц с веществом?



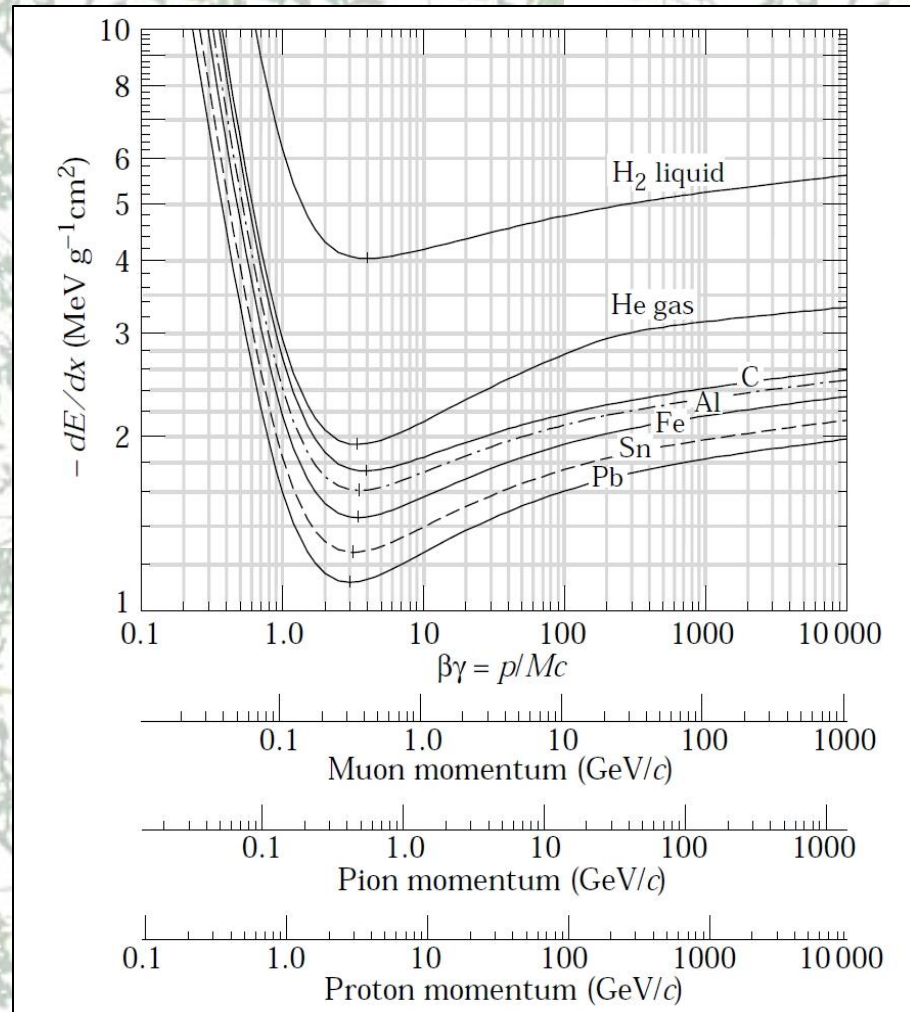
- Все заряженные частицы:
  - Ионизация вещества
  - Тормозное излучение
    - особенно  $e^-$  и  $e^+$
  - Черенковское излучение
  - Переходное излучение

- Фотоны
  - Фотоэффект
  - Комptonовское рассеяние
  - Рождение  $e^+e^-$  пар в поле ядра

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

- $\beta = v/c$
- МэВ см<sup>2</sup>/Г
- Пропорционально плотности электронов в веществе

- Слабо зависит от вещества







# Тормозное излучение



- В электрическом поле ядра быстрая заряженная частица излучает фотон

$$-\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{Z^2}{A} z^2 \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mc^2} \right)^2 E \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \propto \frac{E}{m^2}$$

- 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



# ФОТОНЫ



- Фотозффект
  - Важен когда энергия фотона сравнима с энергией связи электрона в атоме
- Комптон-эфффект
- Рождение пар в поле ядра
  - Доминирующий эффект при больших энергиях

• А что случается дальше с  $e^+$  и  $e^-$ ?  
1 Ноября 2k+11 Ваня Белаяев, "Детекторы" (введение)"



# Ливни



- Высокоэнергичные фотоны рождают (высокоэнергичные) пары
- Высокоэнергичные  $e^-$  (и  $e^+$ ) излучают (высокоэнергичные) фотоны
- ...
- ...
- Процесс размножения продолжается пока энергия достаточно велика

- По закону сохранения энергии:
  - $N \approx E_0 / E_{\text{крит}}$
- ~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  $> \text{ГэВ}$



# А что происходит с энергией выделенной в веществе?



- Сцинтилляторы - вещества в которых возбуждение снимается излучением видимого света...
  - Прозрачные (неорганические) кристаллы
  - Многие пластики, оргстекло,...
- 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!

Результаты обычно очень слабые и для детектирования

Ваня Бедяев "Детекторы (сводные)"



# 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

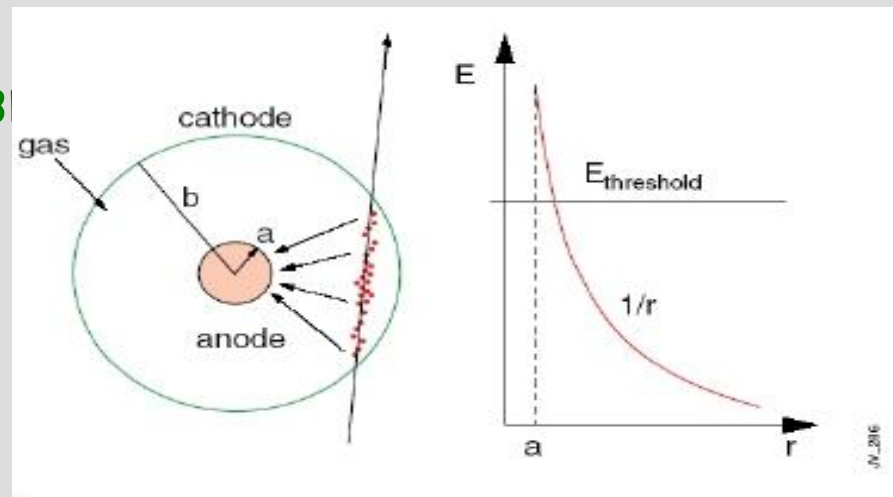


# Другие подходы?



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

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



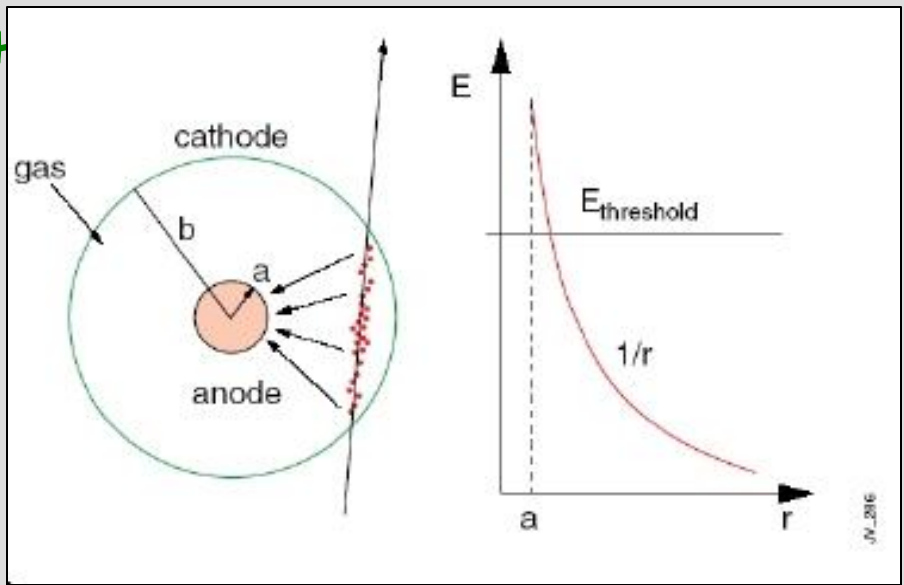
Малое усиление: (слабый) сигнал пропорционален ионизации  
 Слишком большое усиление: (сигнал большой) счетчик Гейгера

4 ноября 2011

Ваня Бельяев, "Детекторы (введение)"



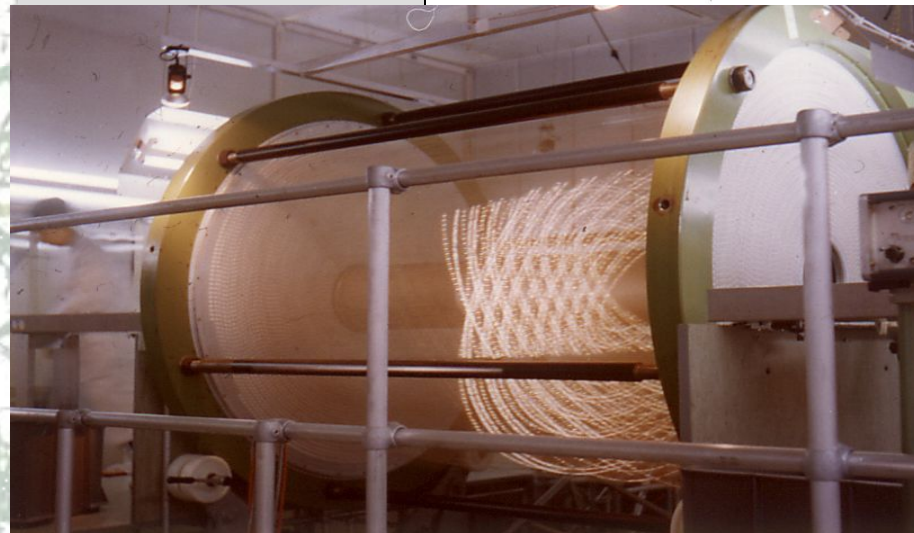
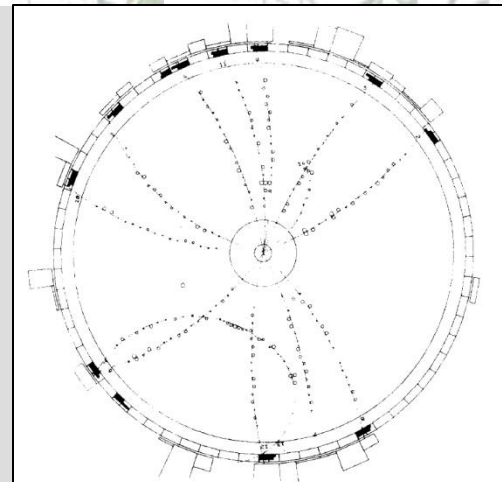
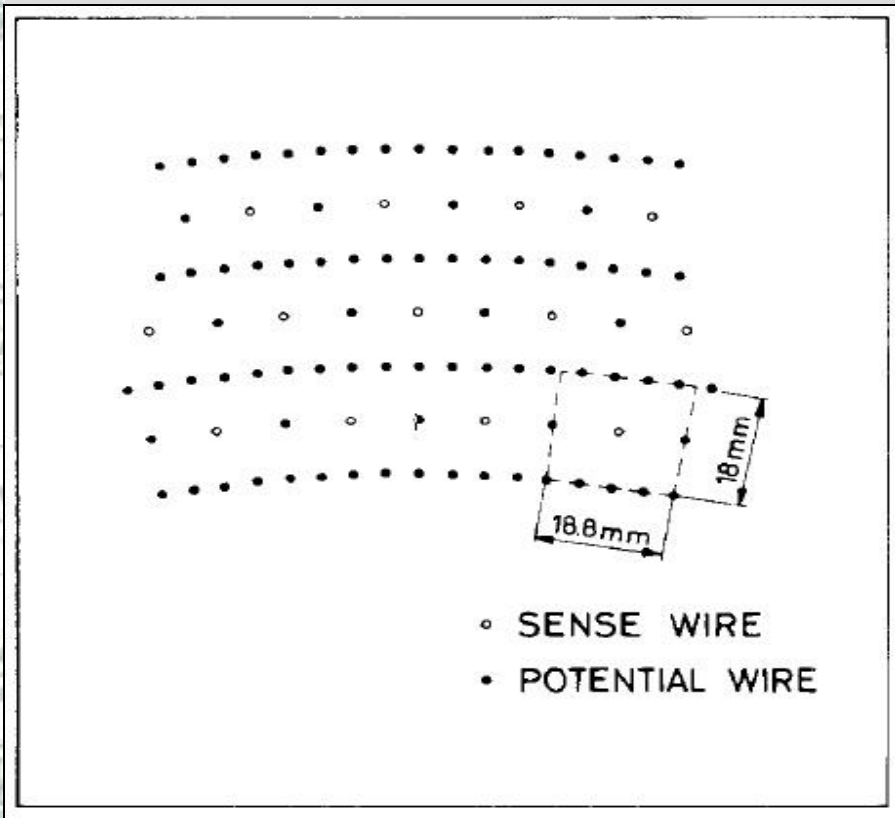
- Электроны дрейфуют к тоду
- Скорость около 50 км/с
- Измеряя время прихода сигнала можно рассчитать расстояние и узнать где проходила частица



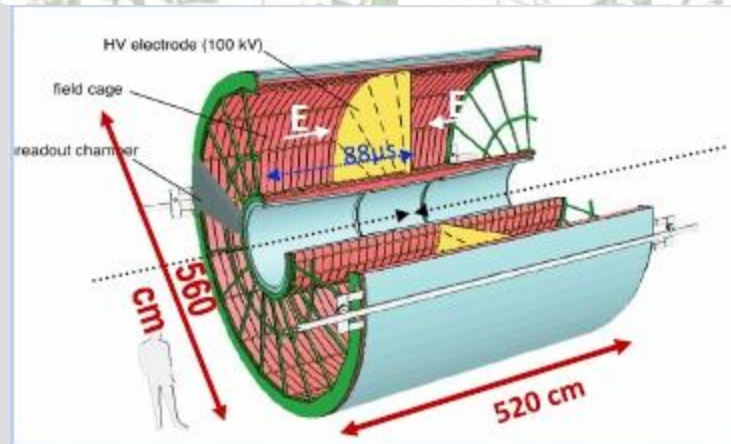
• «Дрейфовые трубки»

• «Соломенные трубки», часто длинные и тонкие как соломинки для

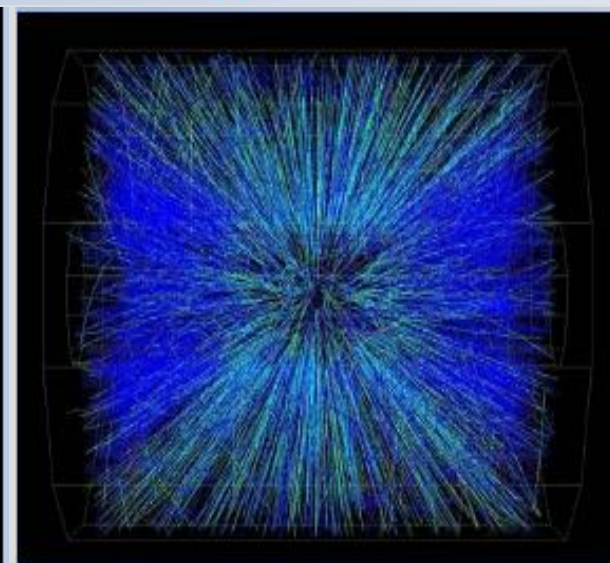
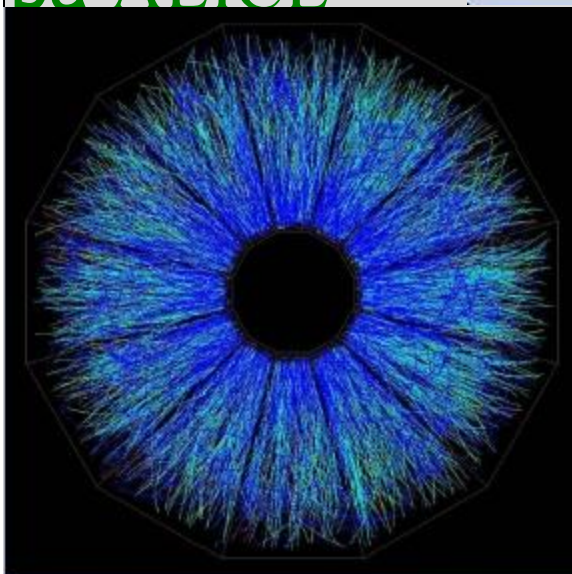
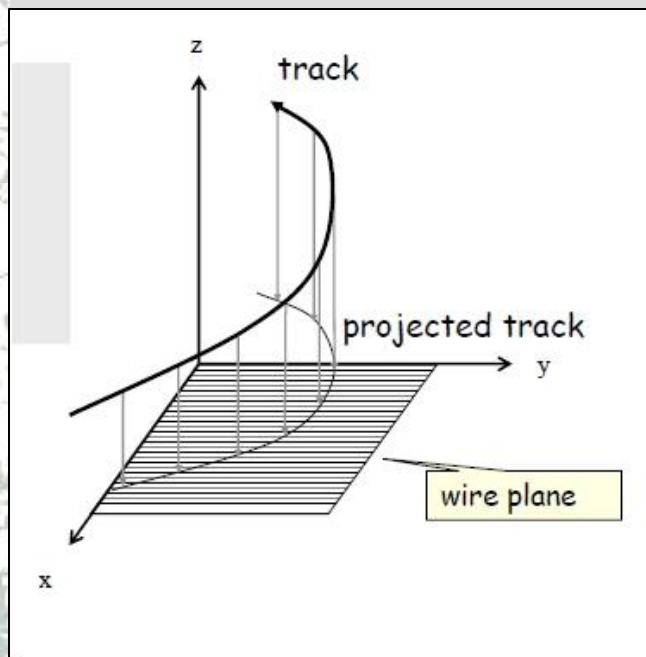
## • Дрейфовая камера



- Настоящая 3Д картинка



ра 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 ( $\sim 10$ )

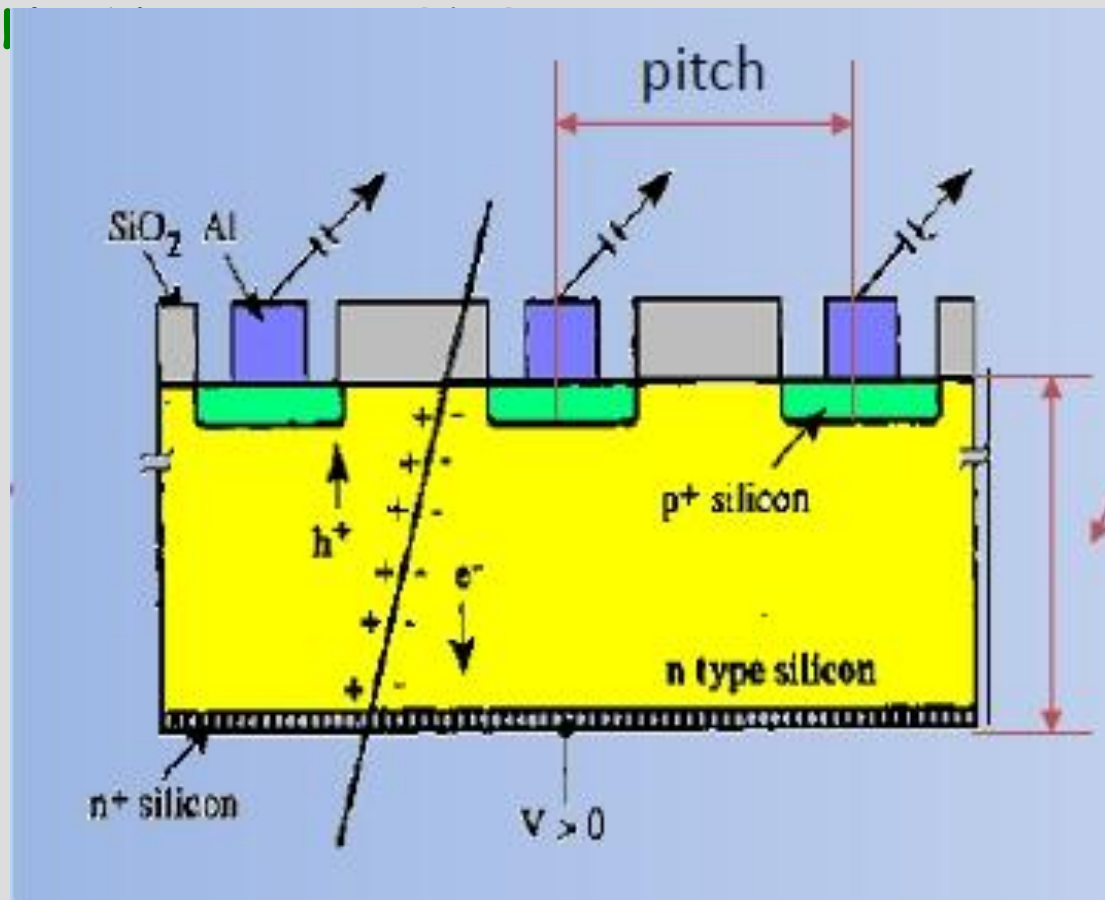
## • Сердца современности

### • Типичные точности

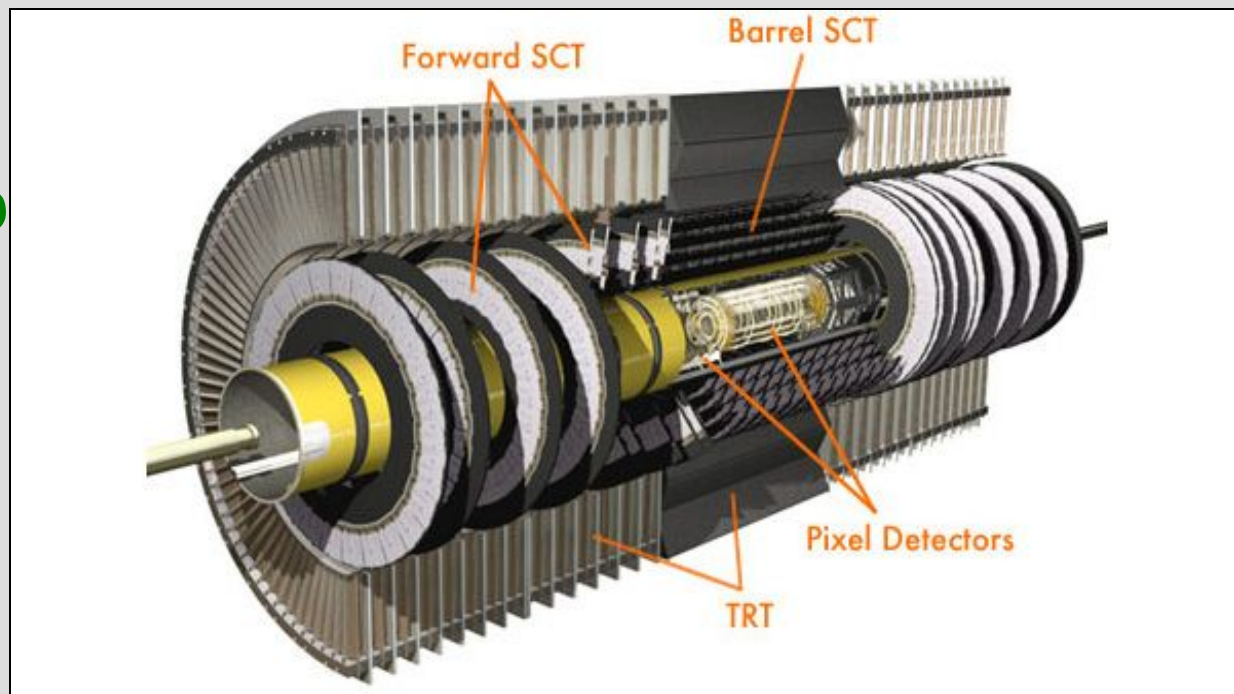
- 5-50 мкм

### • Типичные геометрии

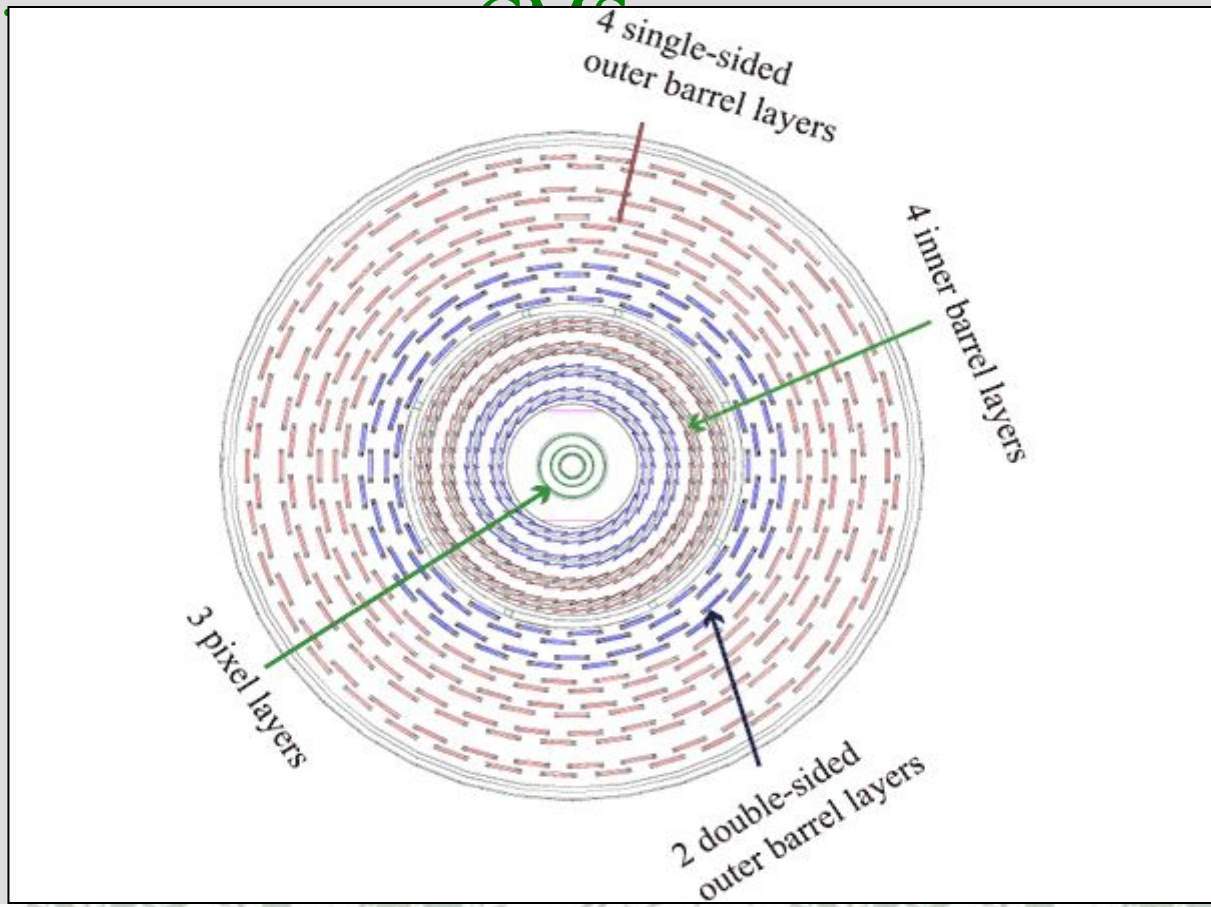
- Полоски
  - «стрипы»
- Короткие полоски
  - микрострипы
  - «стриксели»
- Прямоугольники
  - «пиксели»



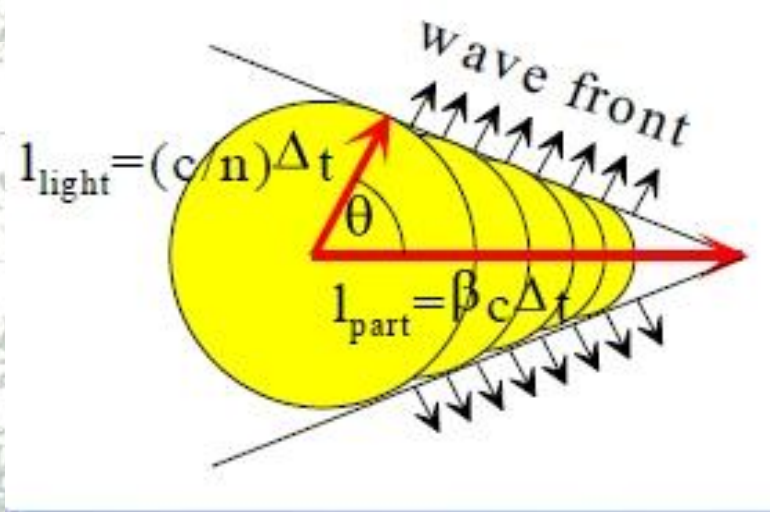
- Внутренний детектор эксперимента ATLAS
- $> 10^8$  каналов,
- $> 60\text{м}^2$  полупр



- Внутренняя часть
- $65 \times 10^6$  каналов



- Когда заряженная частица движется в среде со скоростью больше скорости света в среде
  - (но меньше скорости света в вакууме)
  - Косинус угла распространения света  $\cos \theta = 1/(n\beta)$

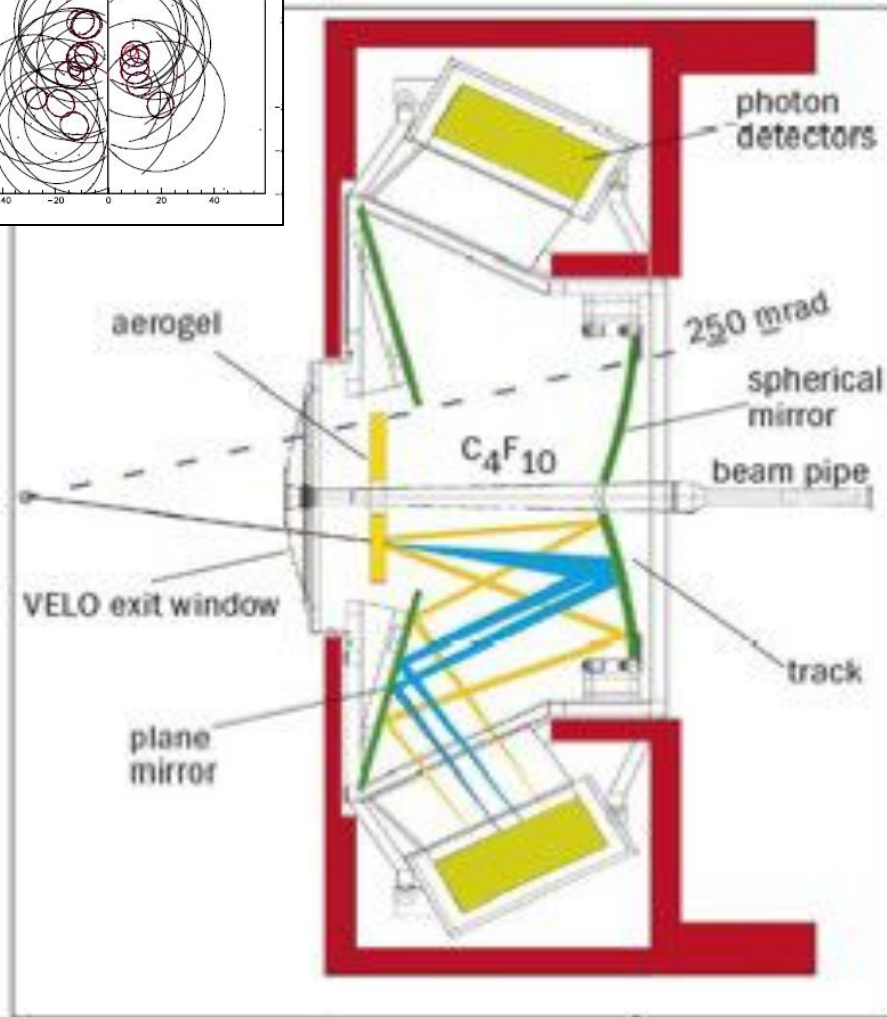
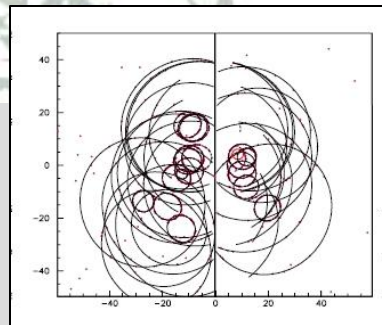


са - измеряем скорость

- Если отразить в сферическом зеркале - изображение этого конуса будет представлять собой окружность



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



• Открывает массу

1 Ноября 2k+11

ИНТЕРЕСНЫХ



# 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 МэВ на грамм»

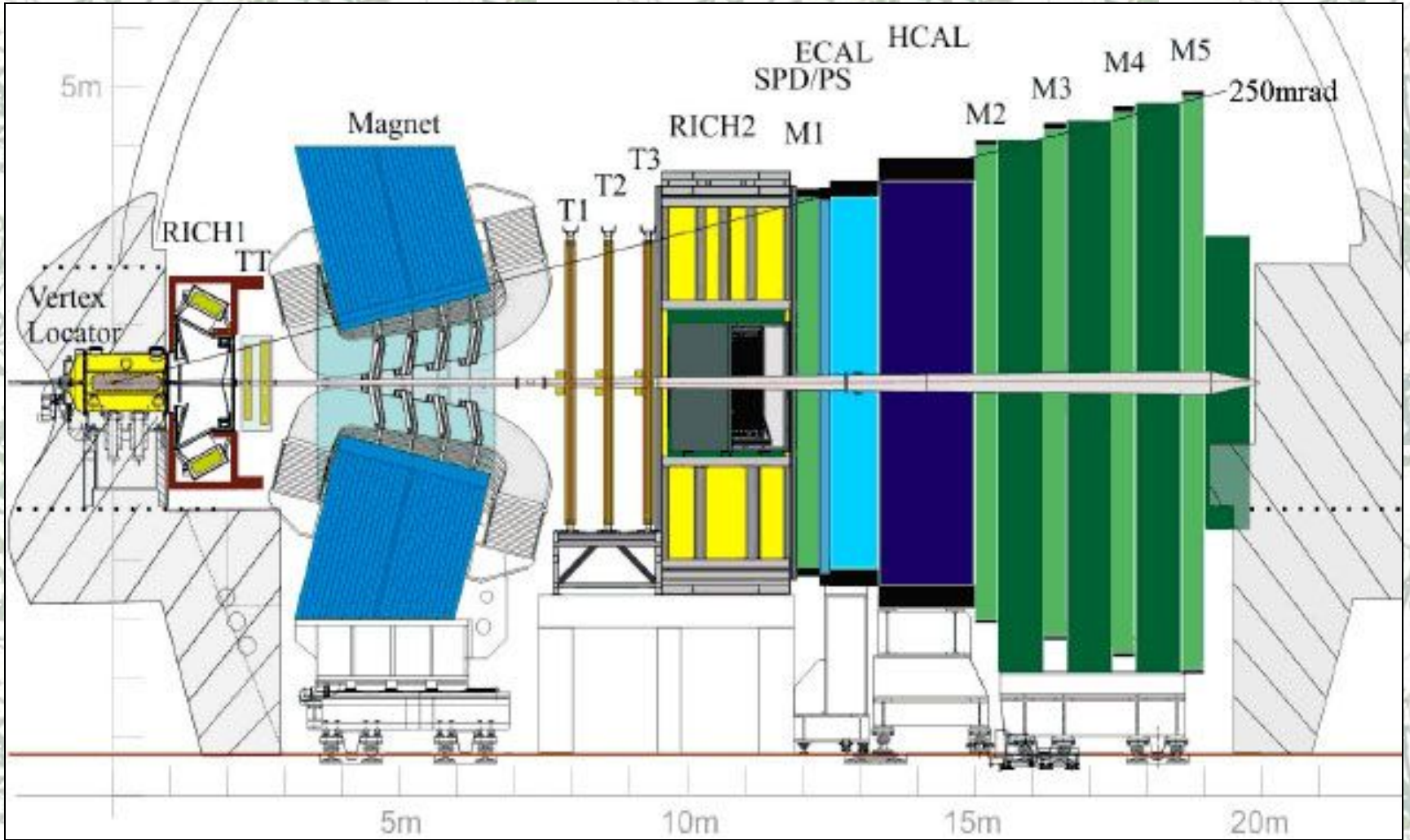


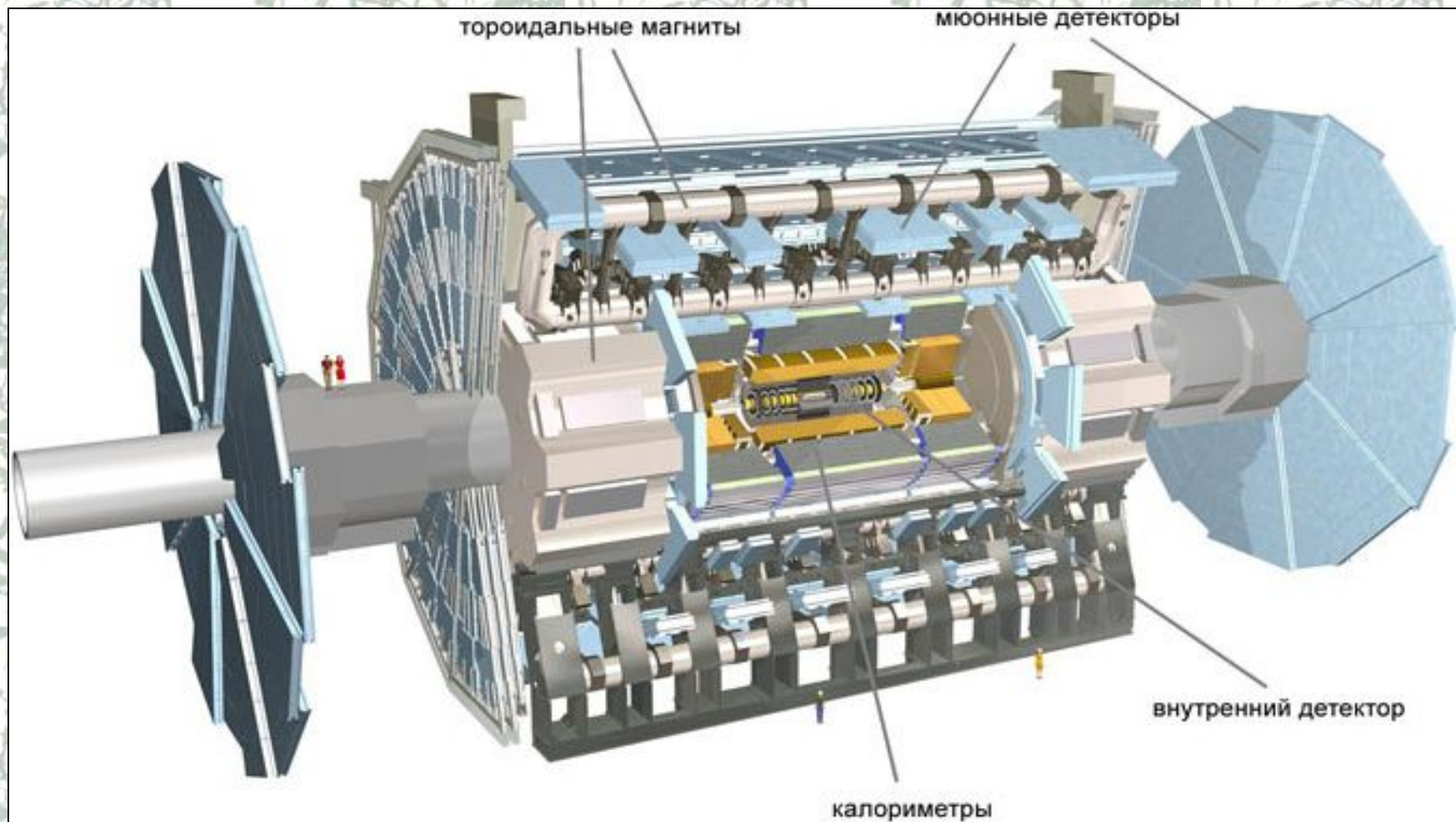
# Детекторы мюонов

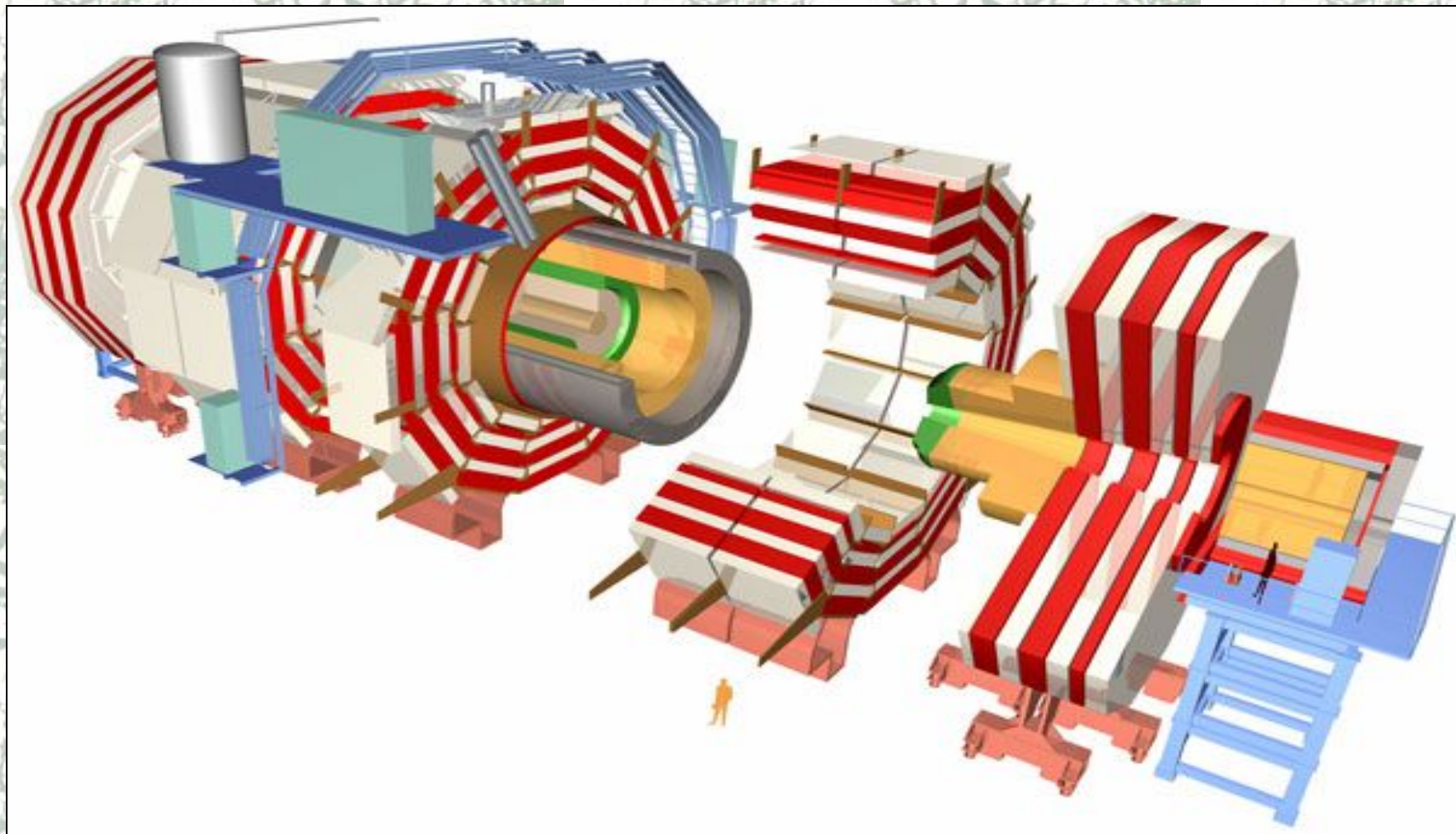


- Мюонные детекторы обычно самые далекие от точки взаимодействия. Включают много тяжёлого материала: железо, железобетон
- Часто самые тяжелые (по массе) элементы эксперимента
  - Часто совмещены с ярмом магнита
- Обычно самые внешние и самые видимые

• Часто только их и видно









# Вместо заключения



Большое спасибо за внимание

Вопросы?

Я должен еще раз извиниться за слишком большие упрощения