



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
- Некие упрощения неизбежны
 - Ко многим утверждениям можно найти хотя бы одно исключение



Частицы

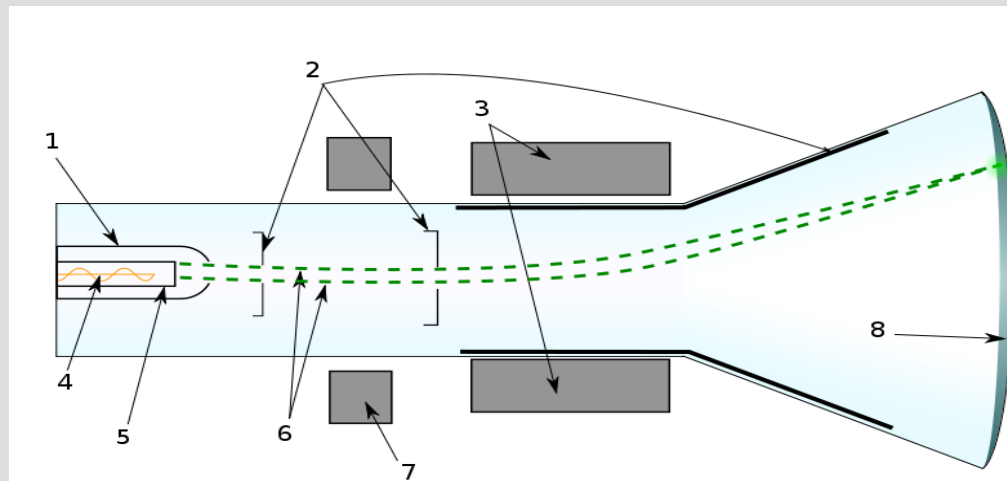


- Регистрируемые непосредственно («долгоживущие»)
 - Заряженные:
 - *Электрон, протон*
 - *мюоны, π^\pm и K^\pm -мезоны*
 - Нейтральные: *фотоны / гамма-кванты*
- Реконструируемые по их распадам («короткоживущие»)

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

Упрощение: граница между этими категориями не такая четкая

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



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



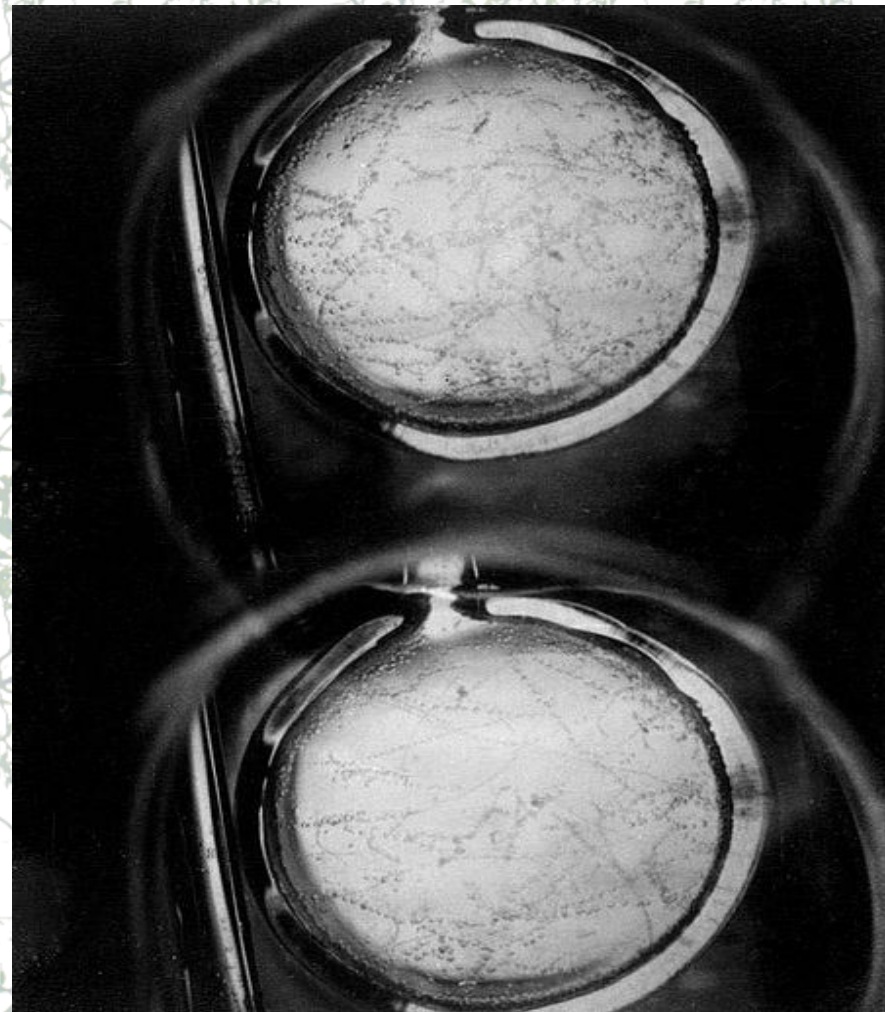
- Простой домашний опыт
 - Очень чистая вода (например много раз кипяченая)
 - Очень чистая ровная посуда с ровным гладким дном и стенками (например химическая колба)
 - Очень осторожный равномерный нагрев
- Вода не закипает!
 - Мгновенно и бурно вскипает если бросить туда что-нибудь мелкое... или просто 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 след 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 м³ фреона



Одно из наиболее важных открытий в ЦЕРН: 1973 год

- 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

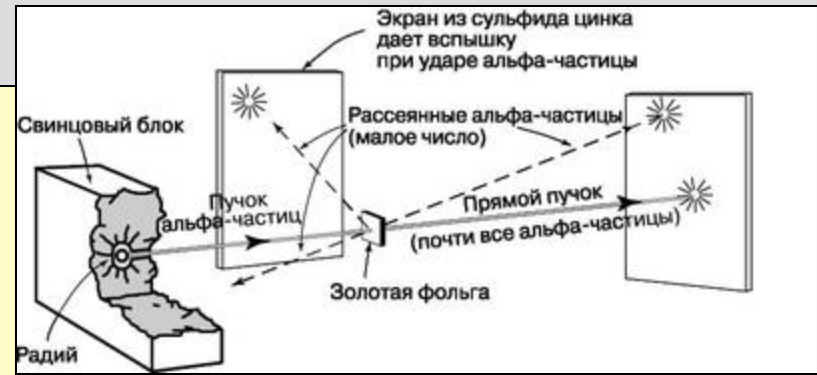
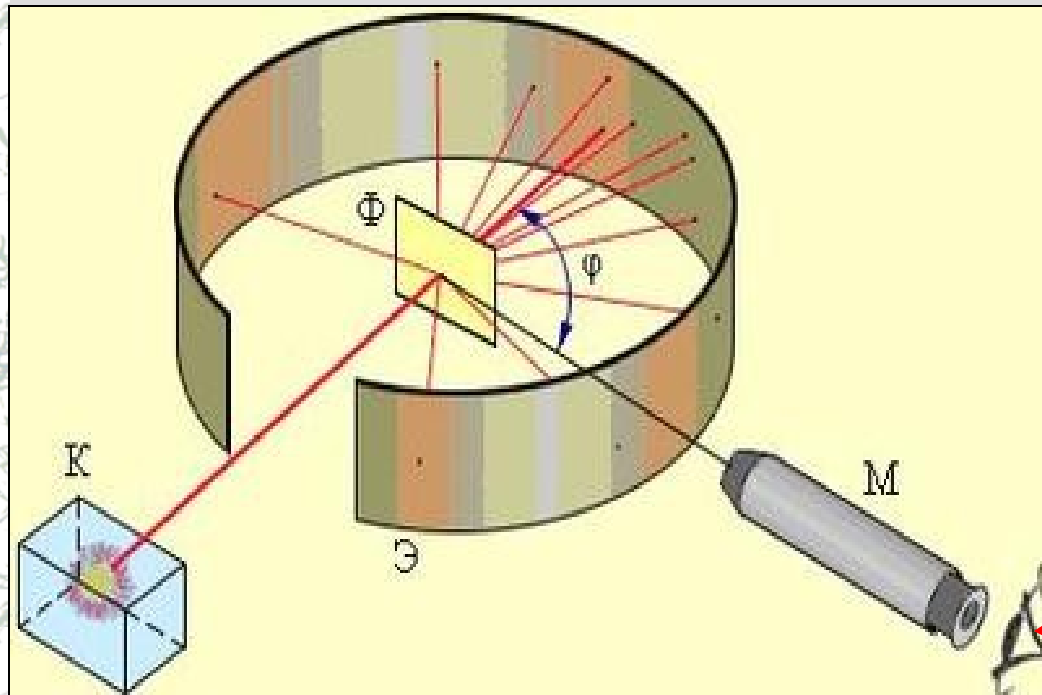


- Заряженный конденсатор на грани пробоя
 - Разряд/пробой когда проходит частица
- Используется в дозиметрах
- Изобретен Хансом Гейгером в 1908 году



(Опыт Резерфорда)

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



Гейгер



Как происходит взаимодействие частиц с веществом?

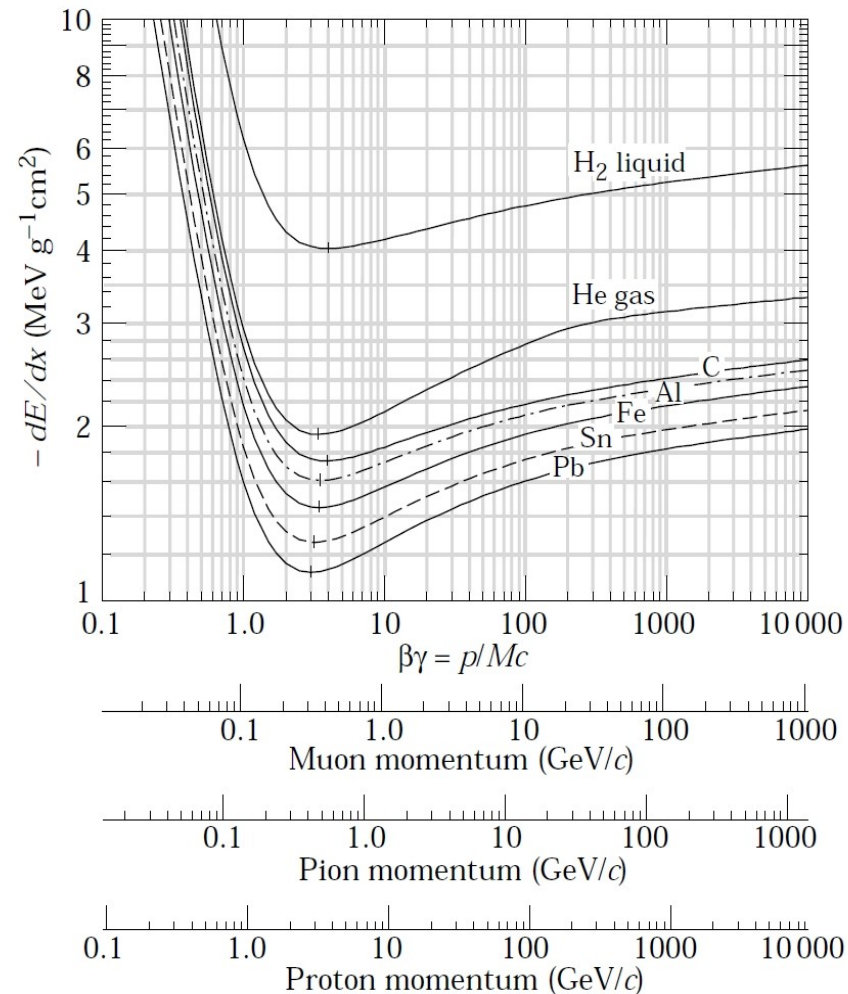


- Все заряженные частицы:
 - Ионизация вещества
 - Тормозное излучение
 - особенно e^- и e^+
 - Черенковское излучение
 - Переходное излучение
- Адроны: неупругие ядерные процессы,

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

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

- $\beta = v/c$
- МэВ см²/Г
- Пропорционально плотности электронов в веществе
- Слабо зависит от вещества
 - «2 МэВа на грамм»
 - 4 для водорода





- В электрическом поле ядра быстрая заряженная частица излучает фотоны

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

- 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 доминируют 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
 - $E > E_{\text{крит}}$

- 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!
- 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

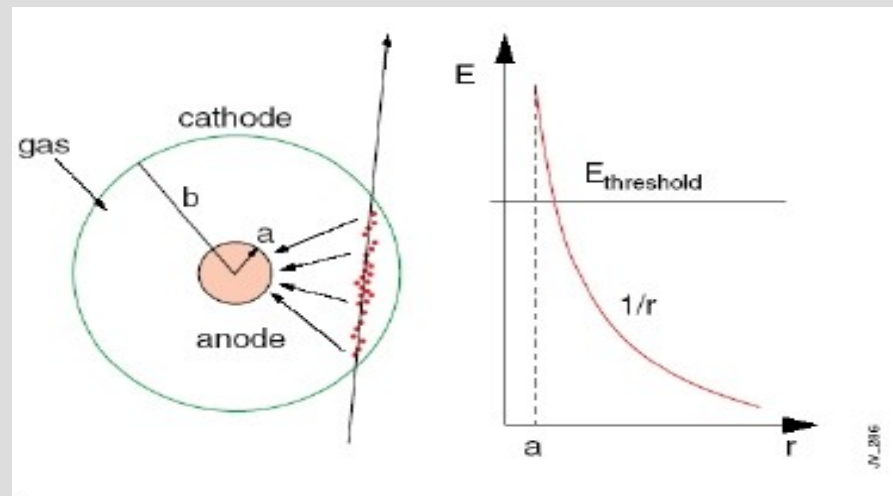


Другие подходы?



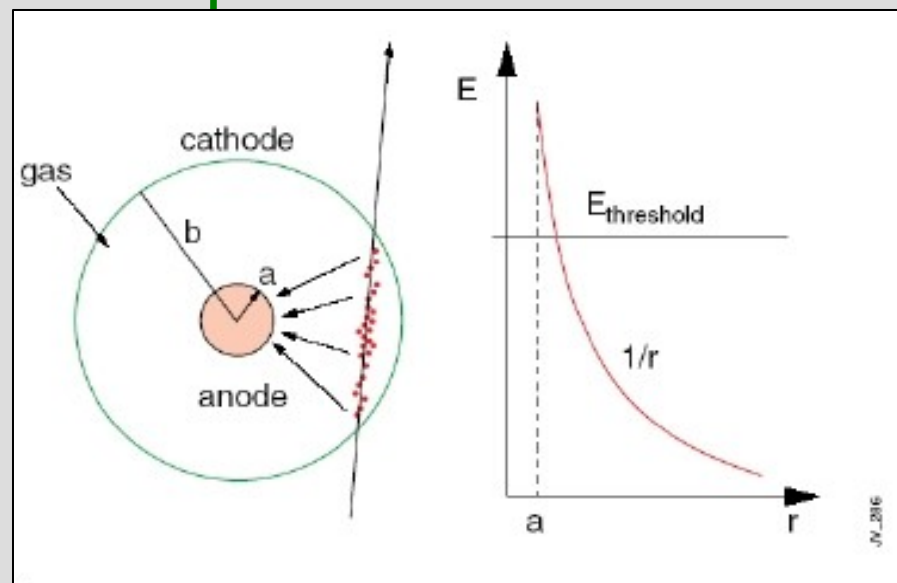
- Со временем (развитием электроники, увеличения чувствительности аппаратуры и уменьшения всевозможных шумов) необходимость использования принципа неустойчивого равновесия для детектирования частиц стала уменьшаться.

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

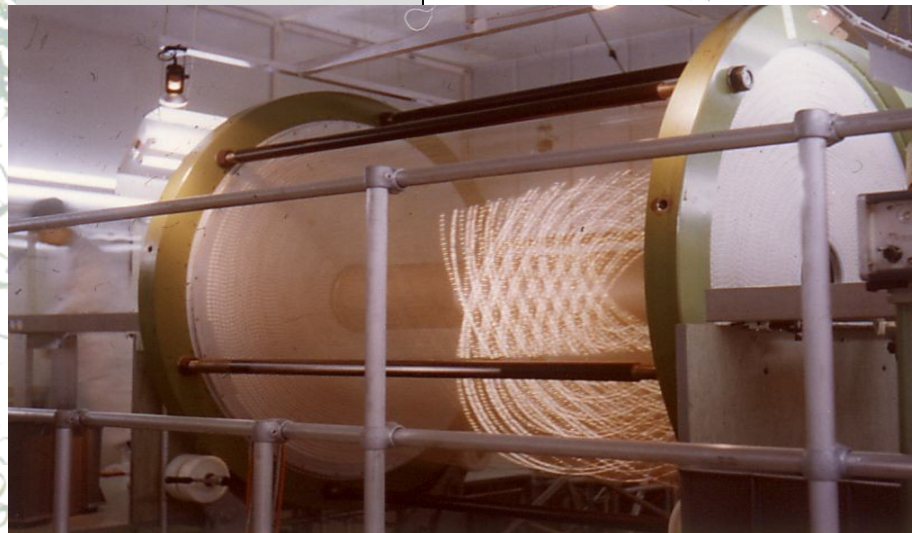
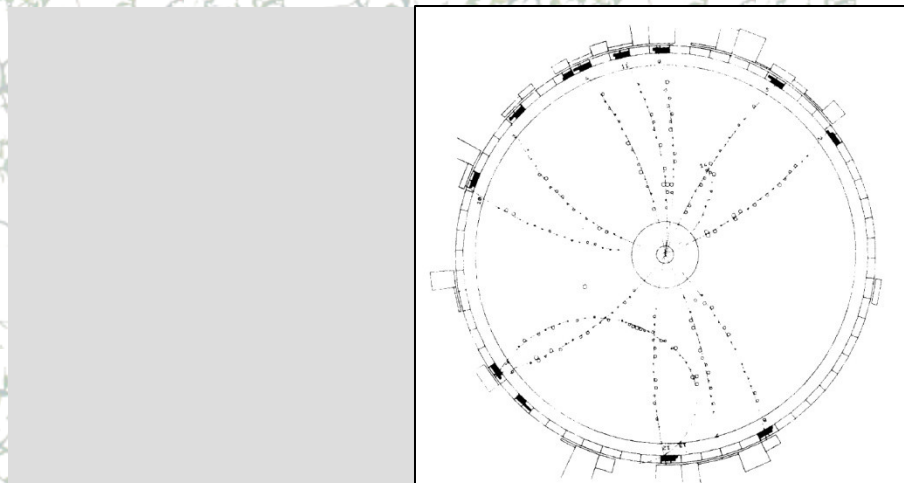
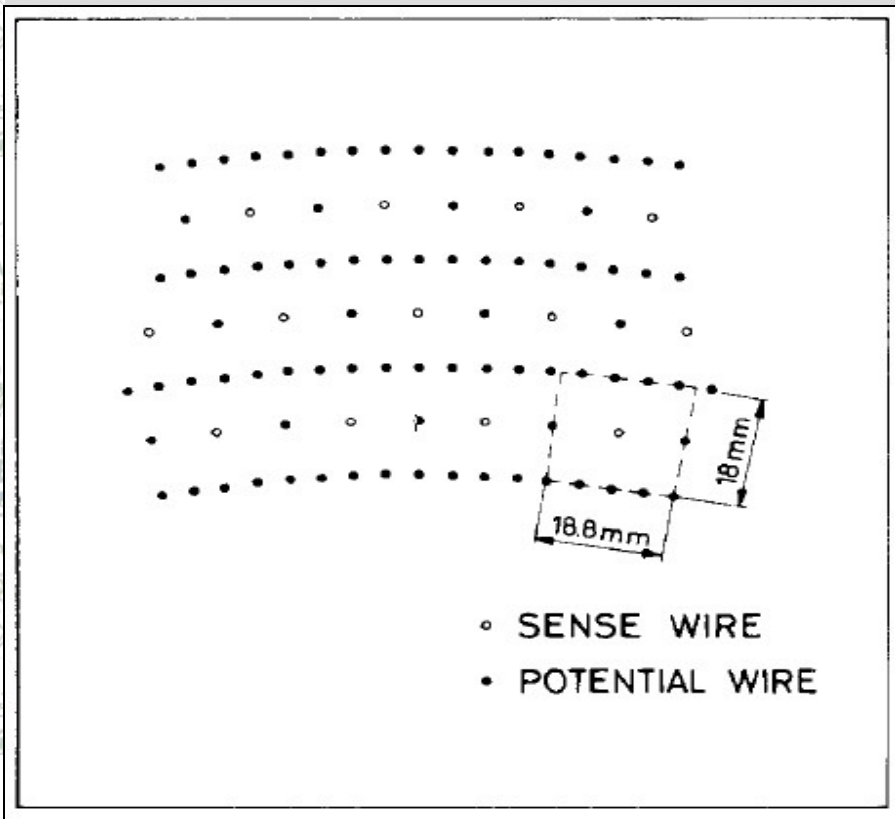


Малое усиление: (слабый) сигнал пропорционален ионизации
 Слишком большое усиление: (сигнал большой) счетчик Гейгера

- Электроны дрейфуют к тонкой проволоочке
 - 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 коктейлей:
 - LHCb: десятки тысяч трубок длиной около 3 метров и толщиной 5 мм

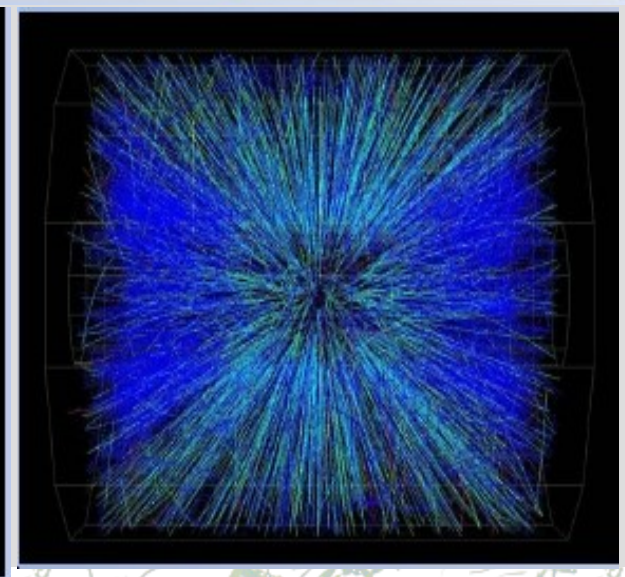
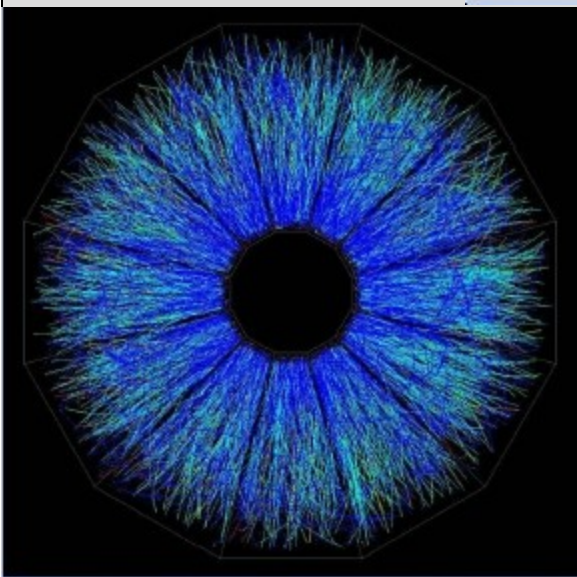
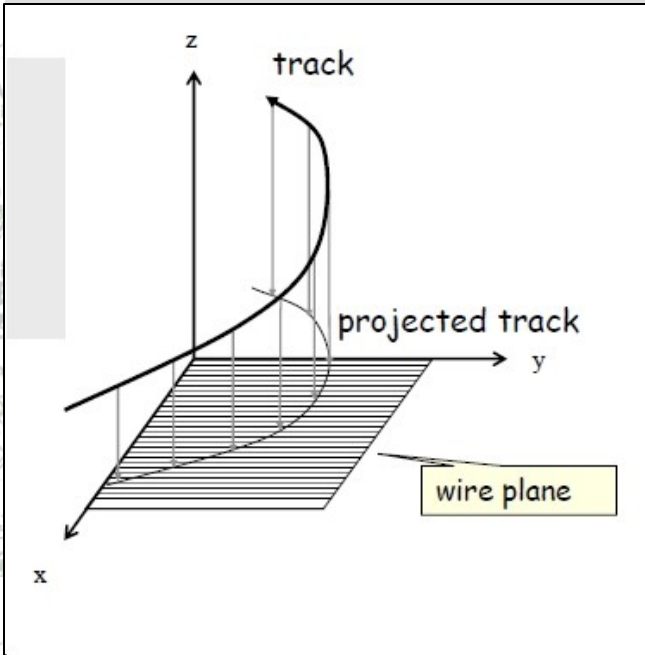
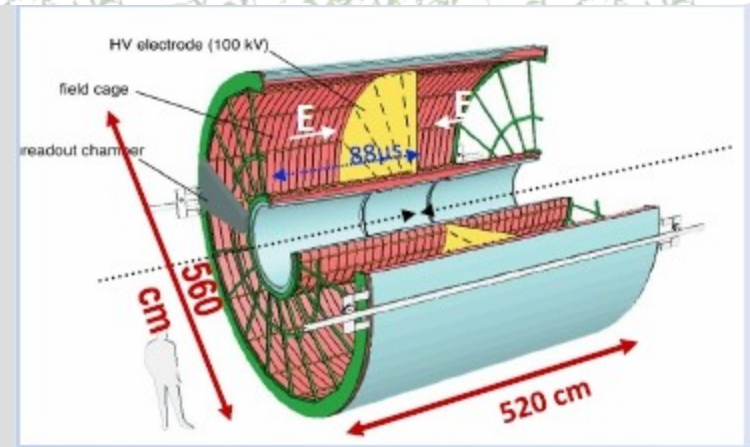


• Дрейфовая камера



Время-проекционная камера

- Настоящая 3Д картинка
- Сердце детектора ALICE





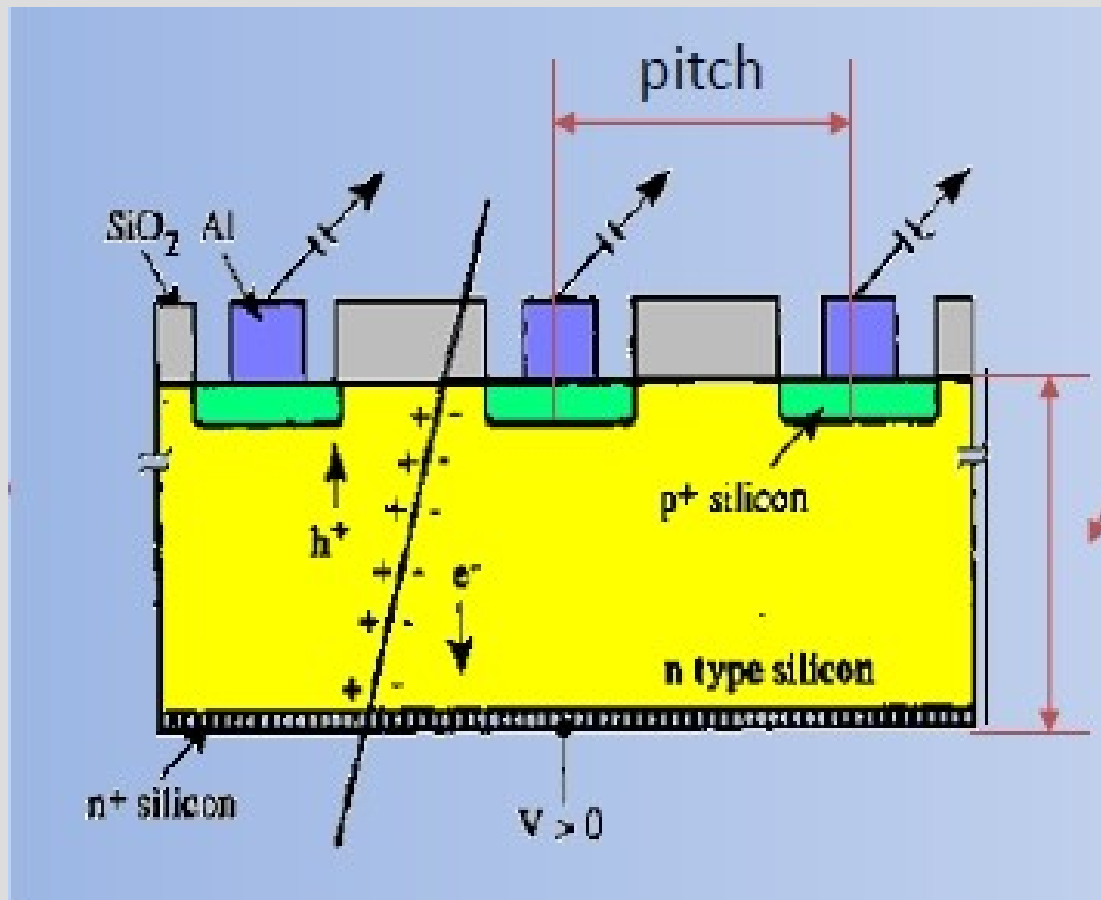
Твердотельные детекторы



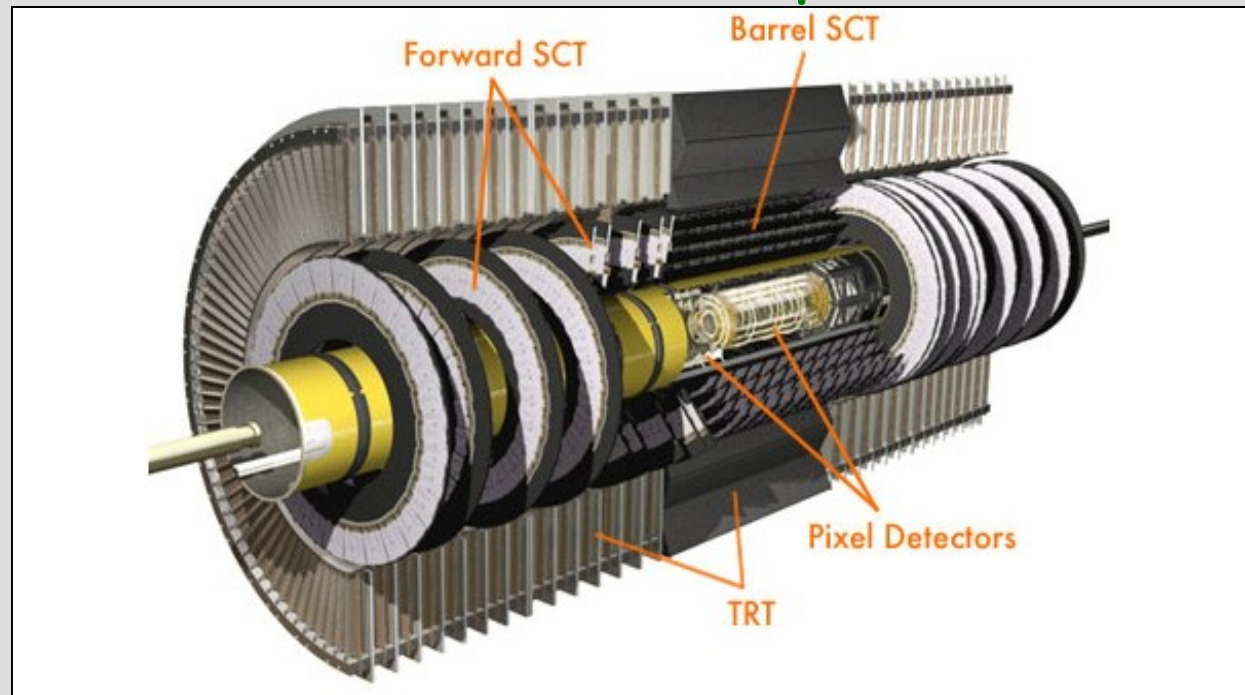
- Ионизация в газах: 300 ионов на см
 - Пропорциональна плотности!
- В твердых телах начальная ионизация заметно больше (10^3)
 - «Начальный» сигнал заметно больше
 - более компактный детектор
 - Еще больше сигнал в полупроводниках (~ 10)
 - «Электрон + Дырка» вместо «Электрон + Ион»
- Нет газового усиления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

Сердца современных детекторов

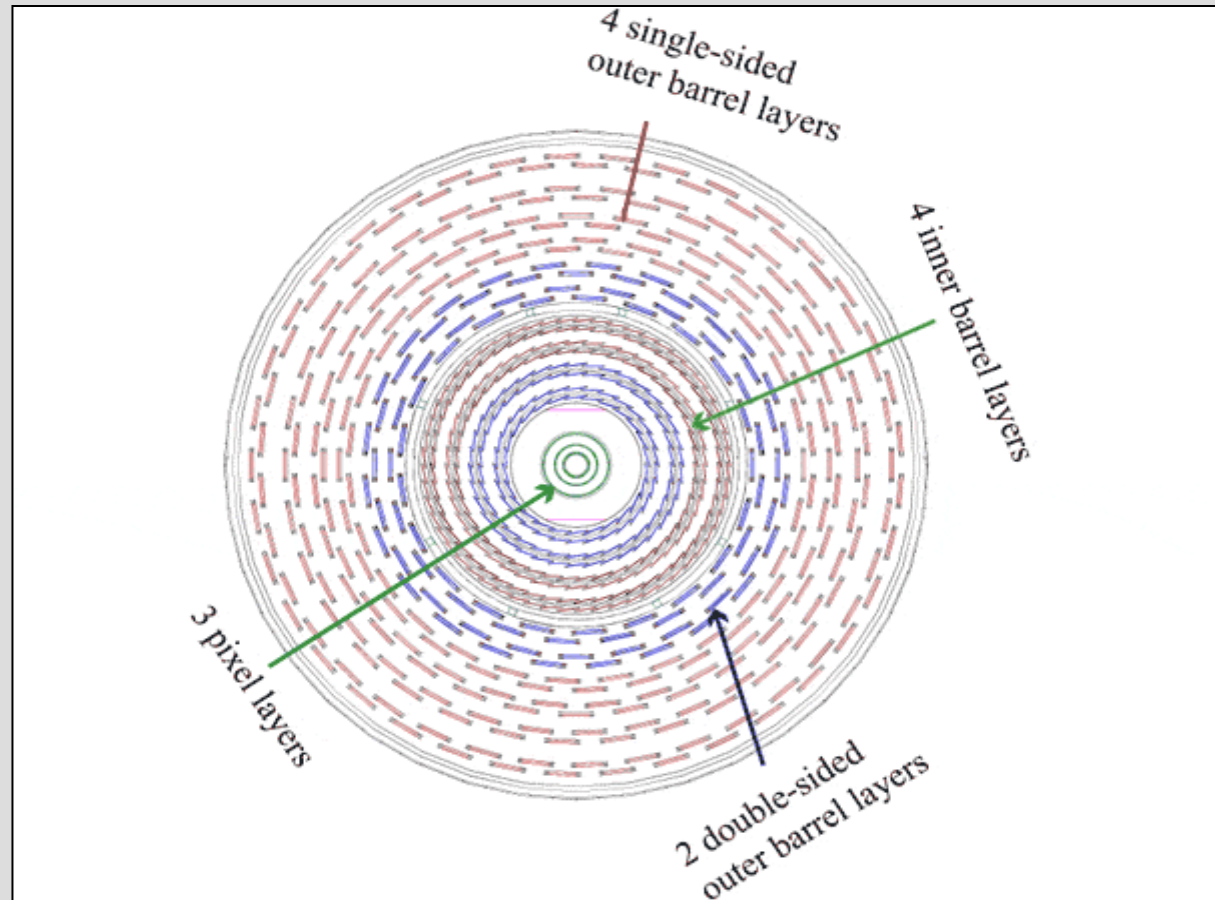
- Типичные точности
 - 5-50 мкм
- Типичные геометрии
 - Полоски
 - «стрипы»
 - Короткие полоски
 - микрострипы
 - «стриксели»
 - Прямоугольники
 - «пиксели»
- Много (десятков) миллионов каналов считывания, самые современные технологии



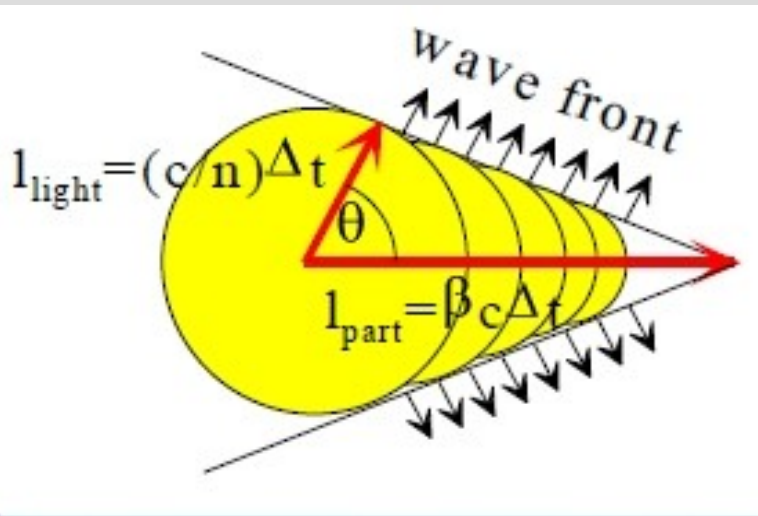
- Внутренний детектор эксперимента ATLAS
- $> 10^8$ каналов,
- $> 60\text{м}^2$ полупроводниковых детекторов



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



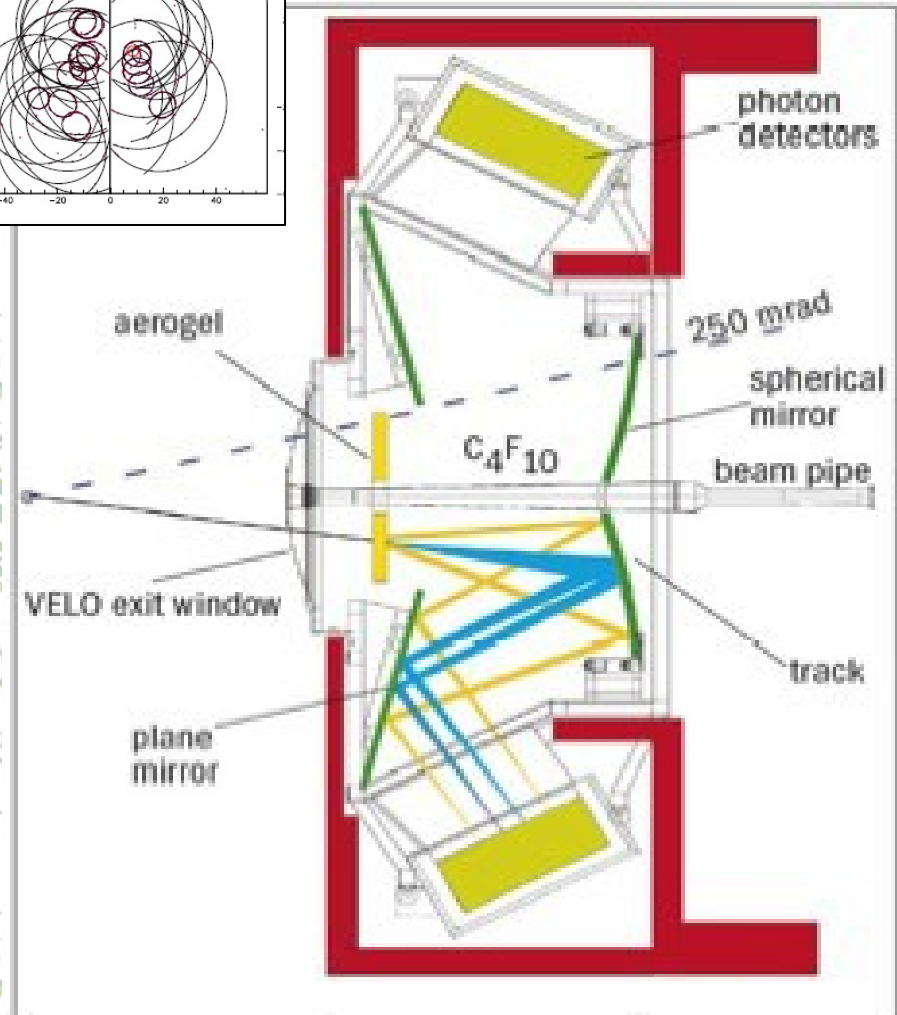
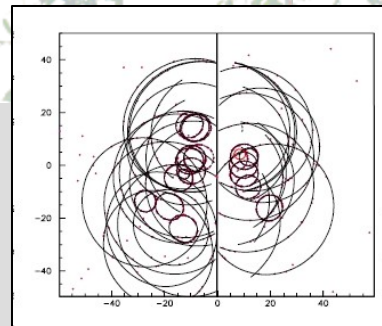
- Когда заряженная частица движется в среде со скоростью больше скорости света в среде
 - (но меньше скорости света в вакууме)
 - Конус черенковского света $\cos \theta = 1/(n\beta)$
 - Зная раствор конуса - *измеряем скорость*



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



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





А как же мюоны?



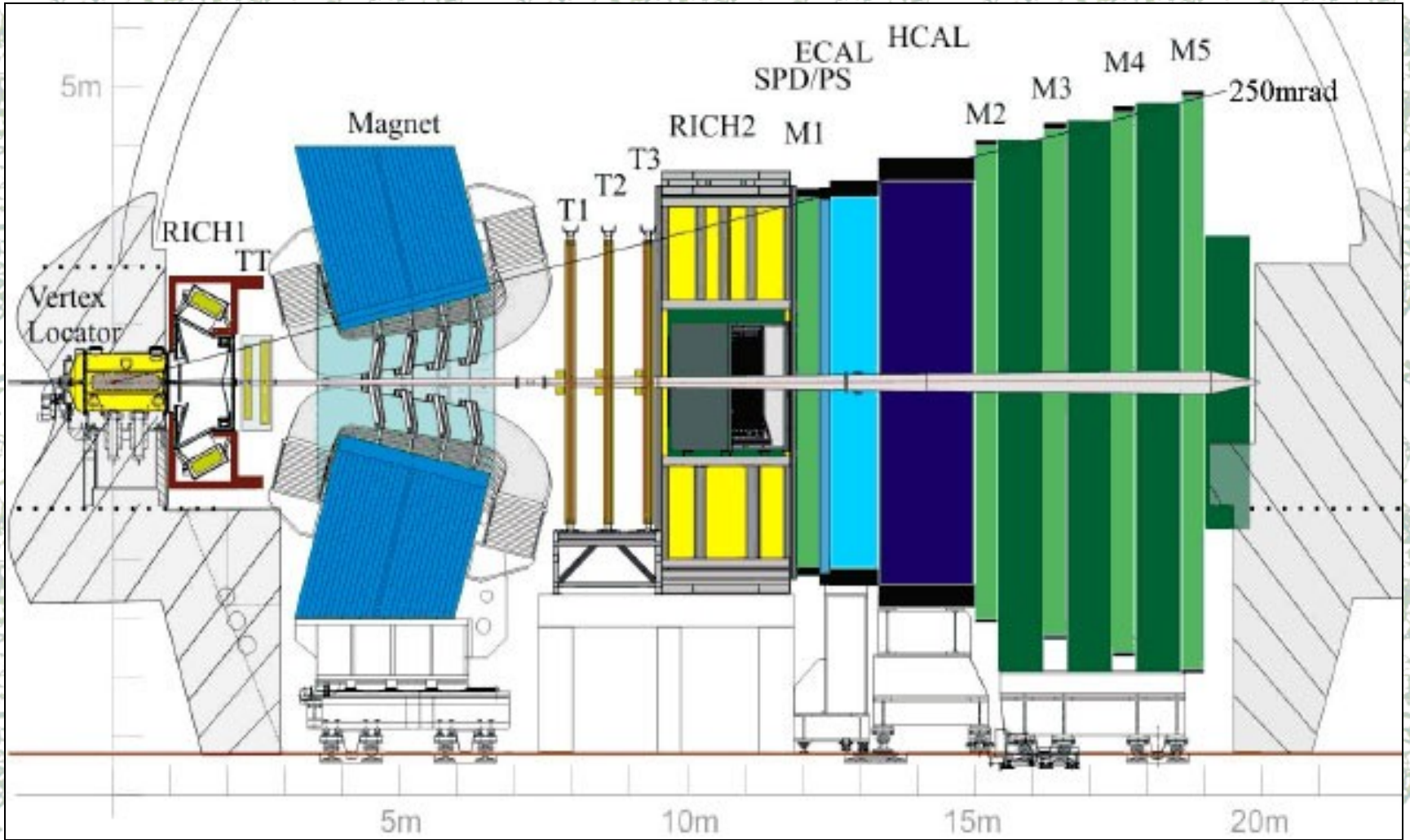
- Мюоны не участвуют в ядерных взаимодействиях
 - Нет адронных ливней
- Для мюонов не слишком больших энергий (меньше десятков ГэВ) тормозное излучение не приводит к большим потерям энергии
 - Нет электромагнитных ливней
- Теряют энергию главным образом только за счет ионизации вещества!
 - Большая проникающая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

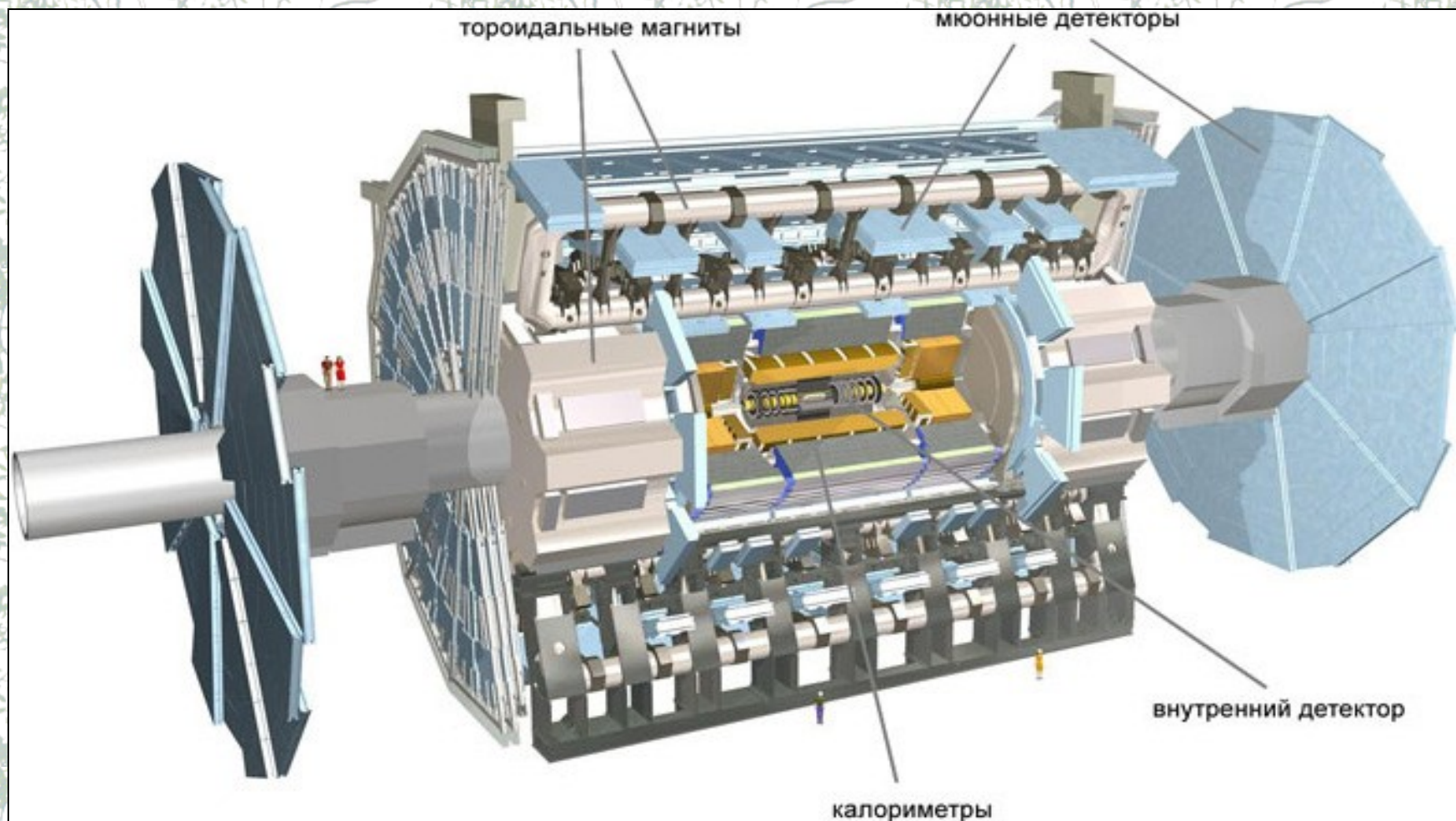


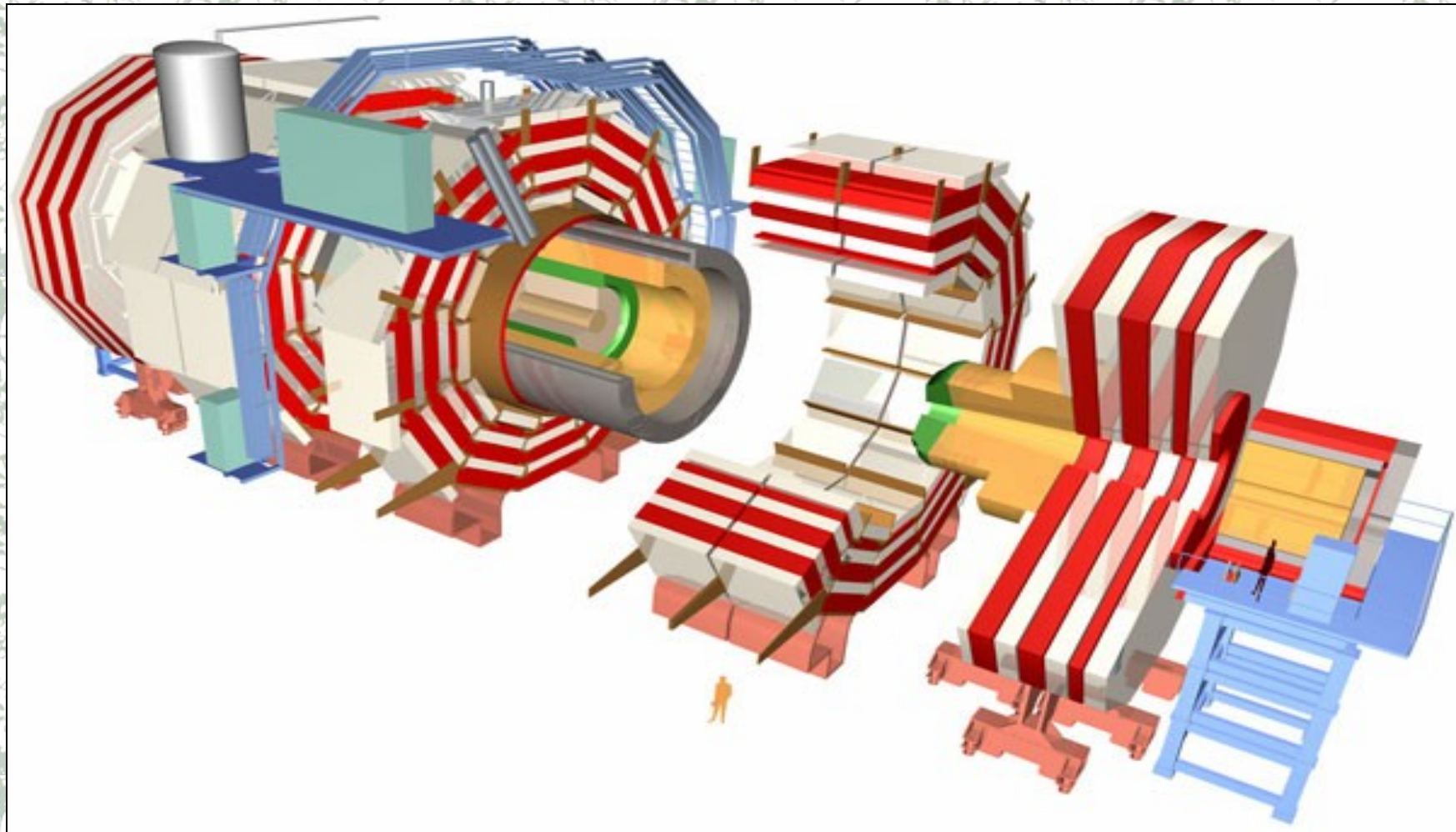
Детекторы мюонов



- Мюонные детекторы обычно самые 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