



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 14:00:41 Далеко впереди "Детекторы (введение)"



Частицы



- Регистрируемые непосредственно («долгоживущие»)

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

- Заряженные:

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

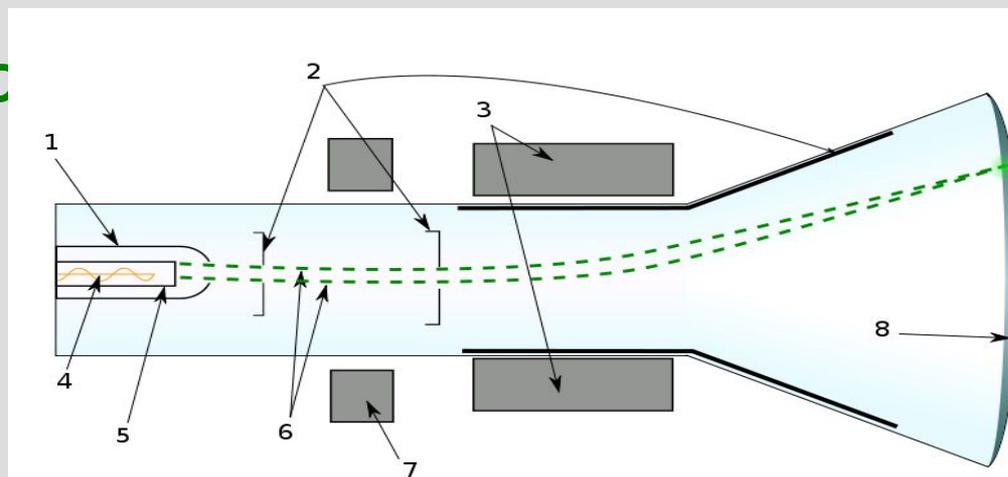
- Нейтральные: *фотоны / гамма-кванты*

- 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



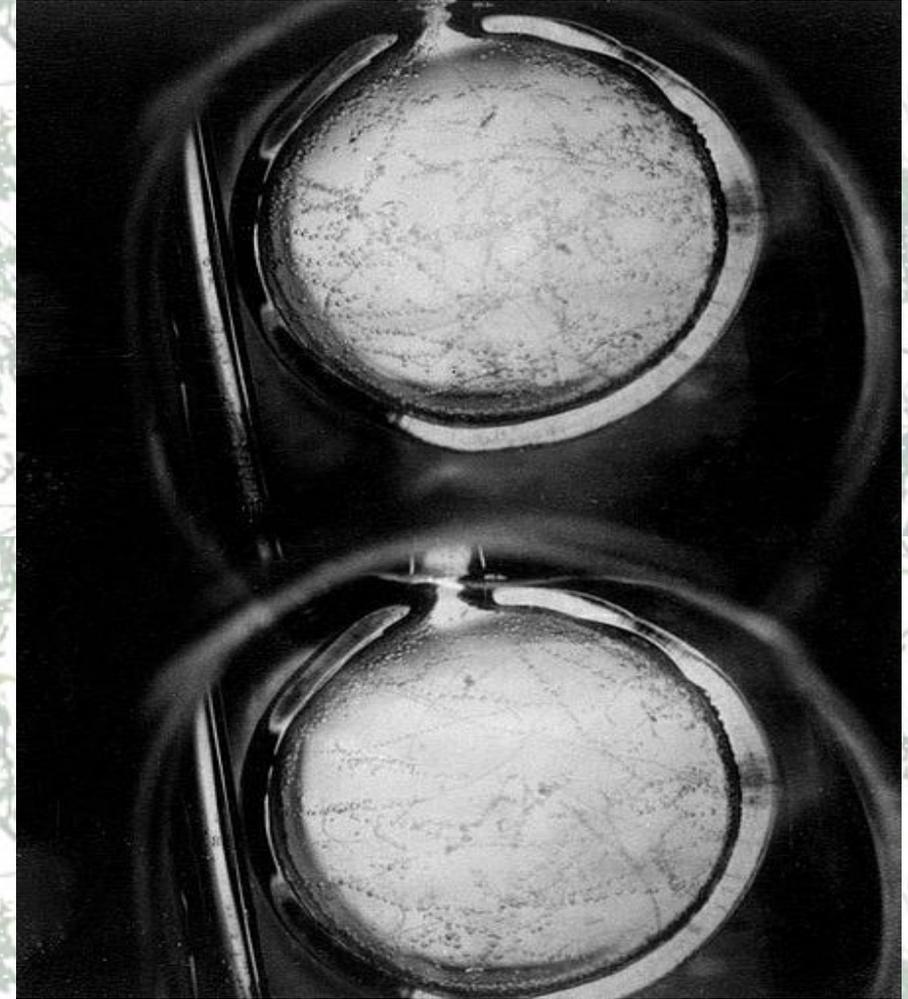
Перегретая жидкость



- 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 м³ фреона

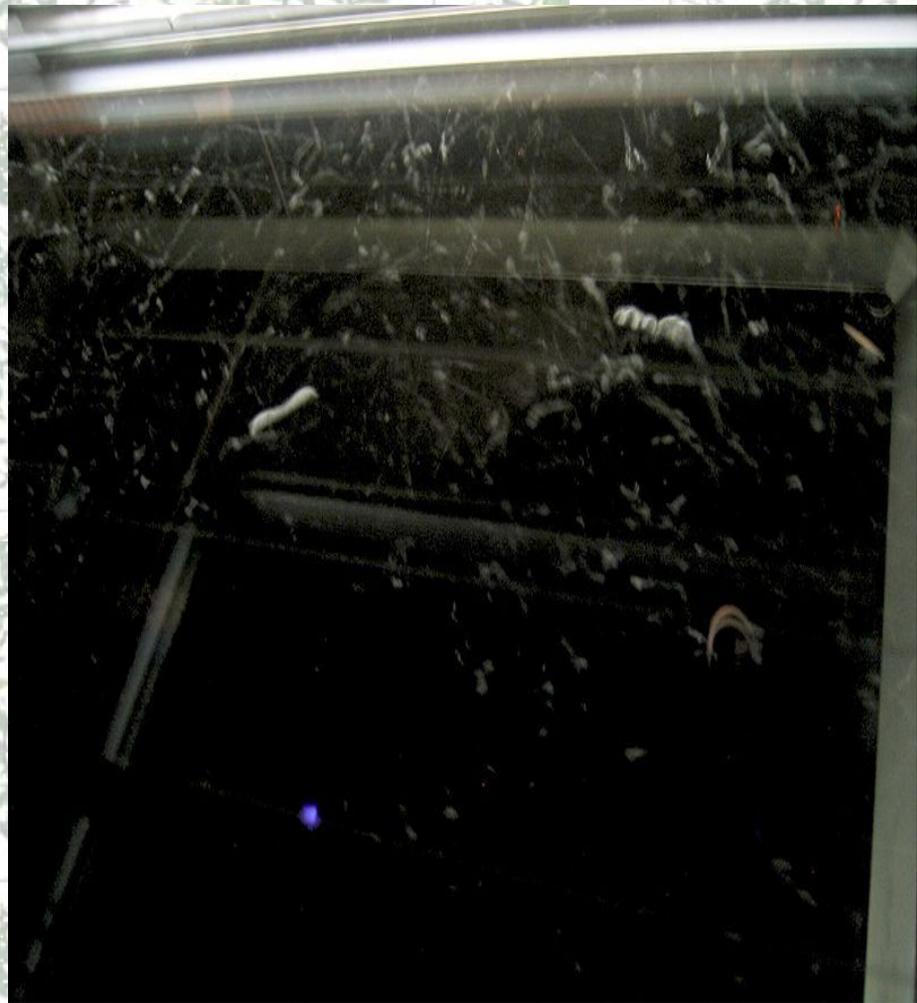


Одно из наиболее важных открытий в ЦЕРН: 1973 год

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

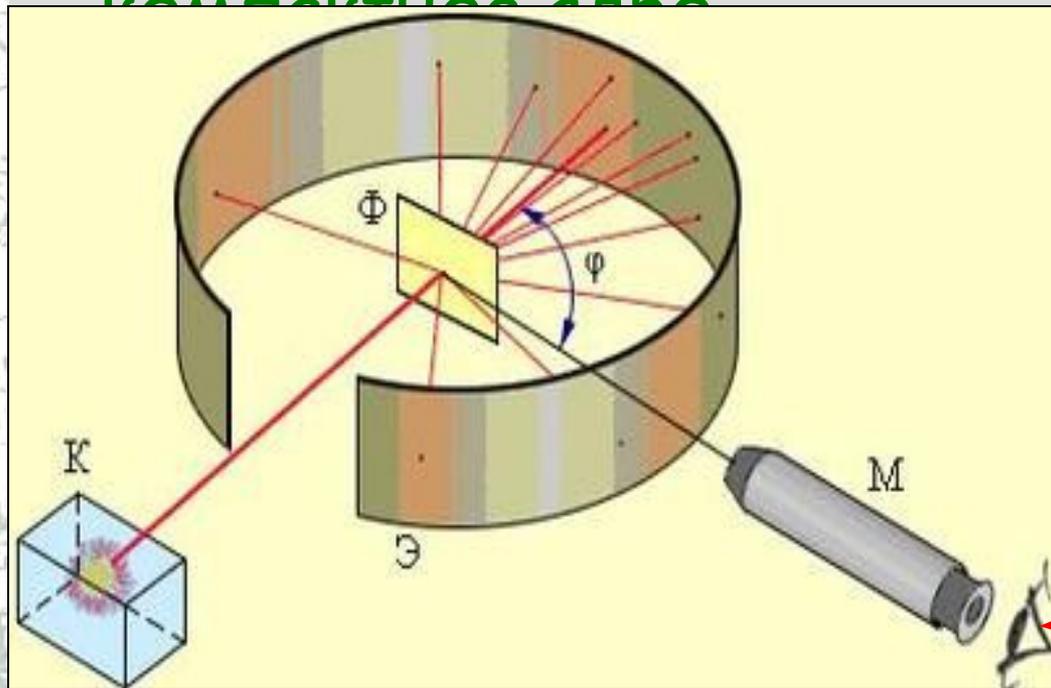
Ваня Беляев, "Детекторы (введение)"

- 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?



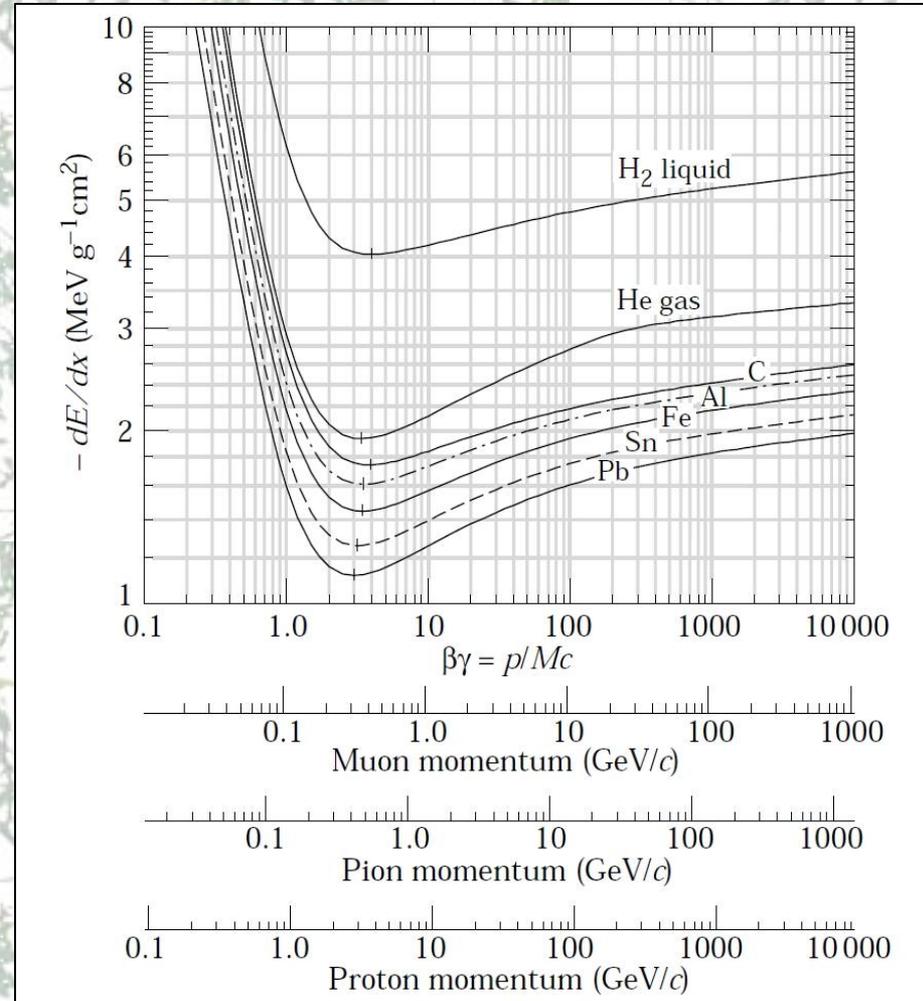
- Все заряженные частицы:
 - Ионизация вещества
 - Тормозное излучение
 - особенно e^- и e^+
 - Черенковское излучение
 - Переходное излучение

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

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

- $\beta = v/c$
- МэВ см²/Г
- Пропорционально плотности электронов в веществе

- Слабо зависит от вещества





Тормозное излучение



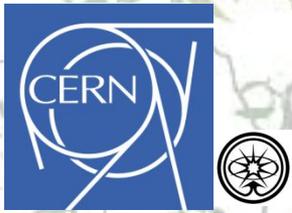
- В электрическом поле ядра быстрая заряженная частица излучает фотон

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

- 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 потери



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

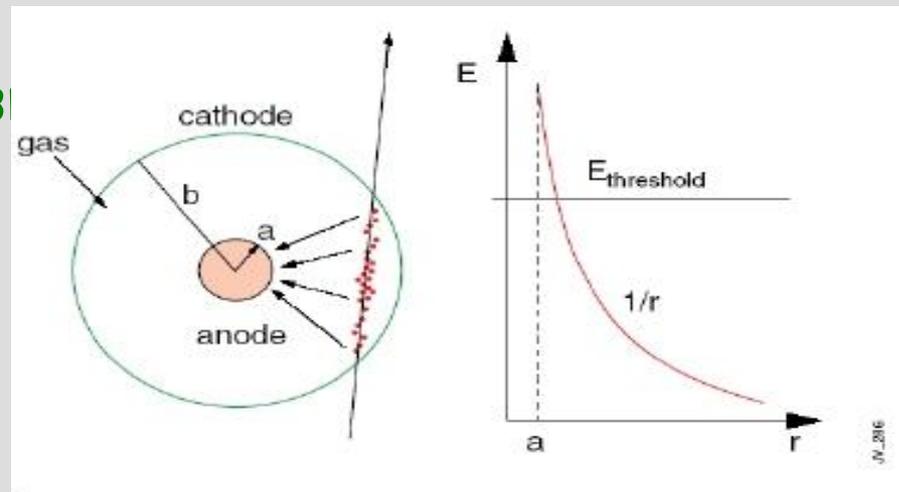


Другие подходы?



- 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

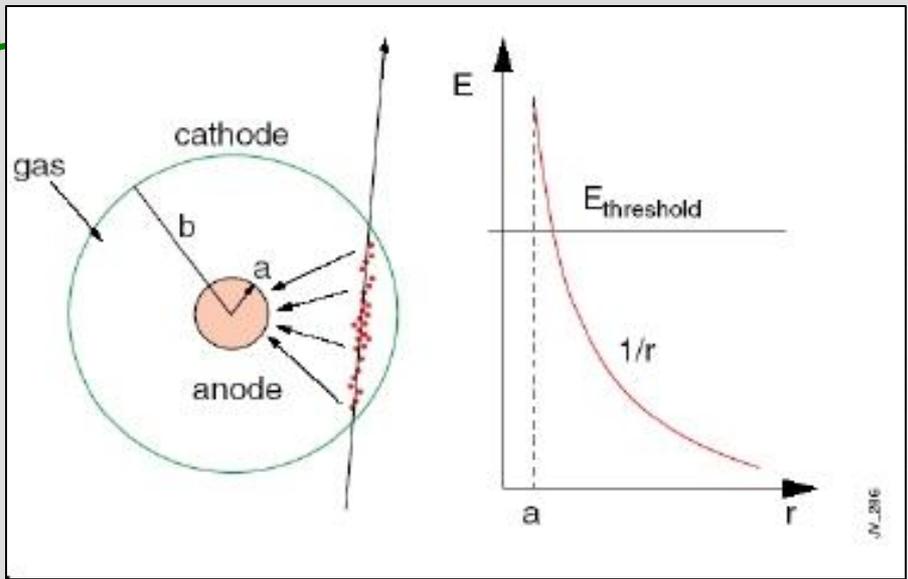


Малое усиление: (слабый) сигнал пропорционален ионизации
 Слишком большое усиление: (сигнал большой) счетчик Гейгера

4 ноября 2011

Ваня Беляев, "Детекторы (введение)"

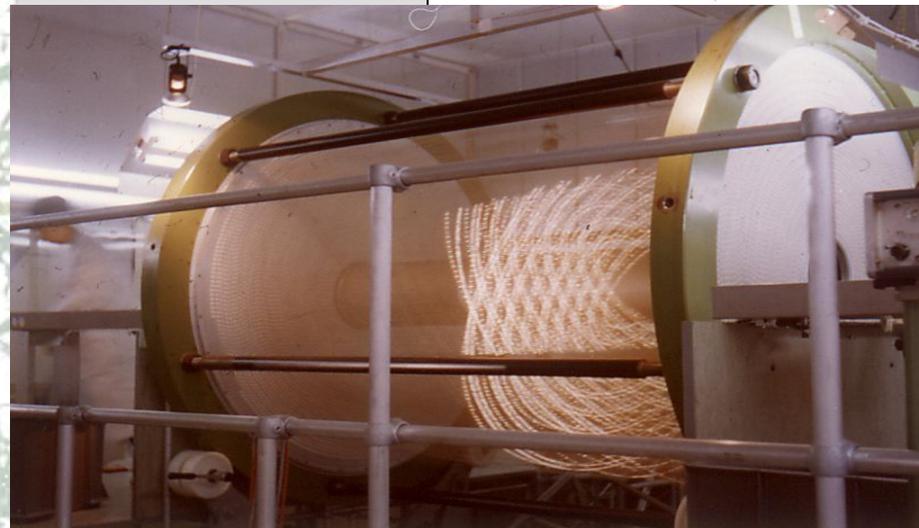
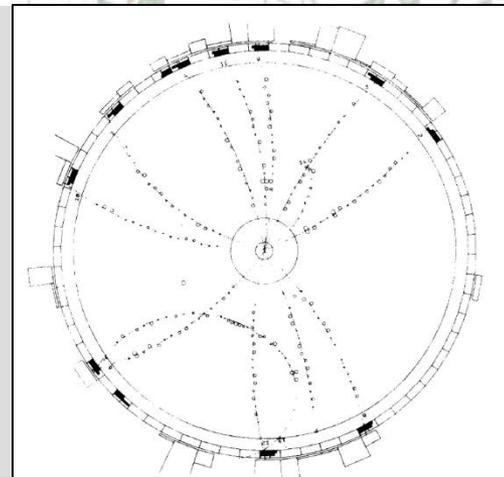
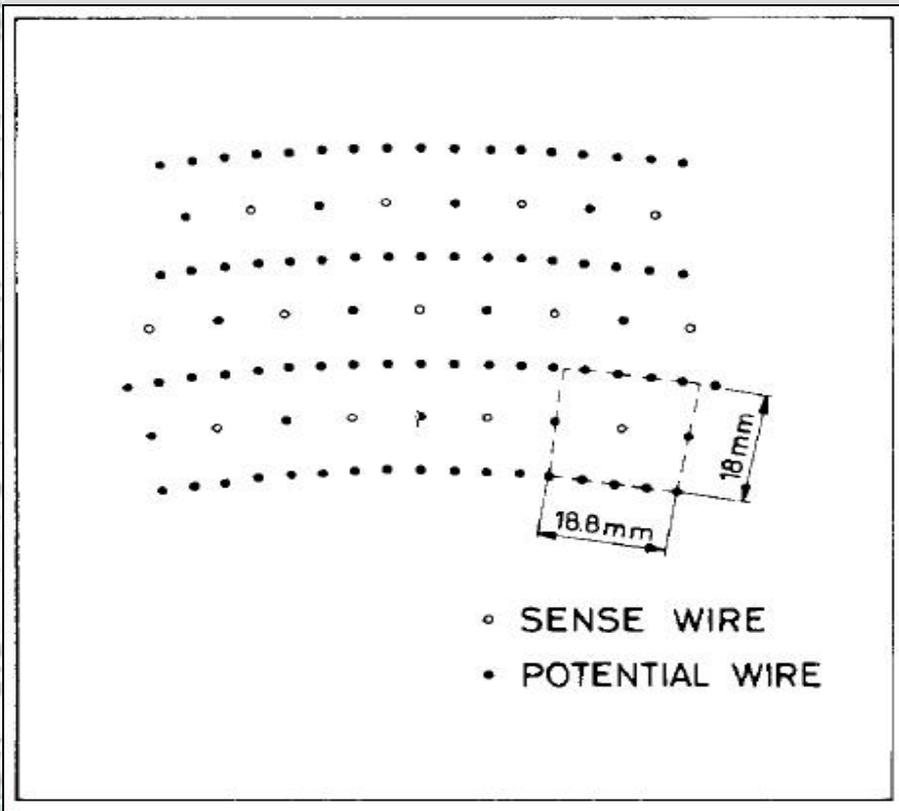
- Электроны дрейфуют к тоду
- Скорость около 50 км/с
- Измеряя время прихода сигнала можно рассчитать расстояние и узнать где проходила частица



• «Дрейфовые трубки»

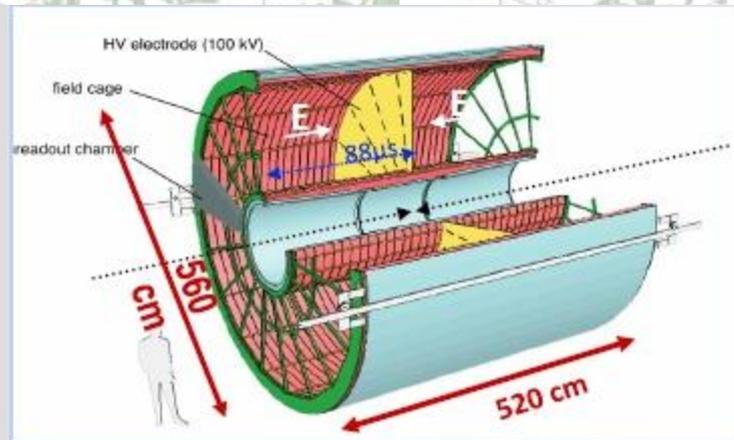
• «Соломенные трубки» , часто длинные и тонкие как соломинки для

• Дрейфовая камера

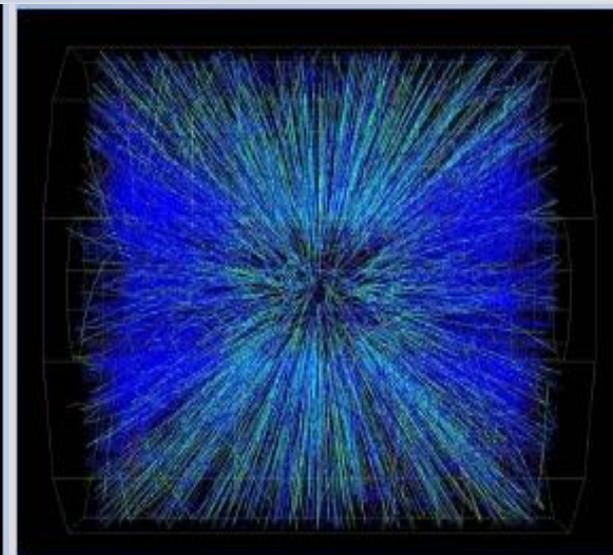
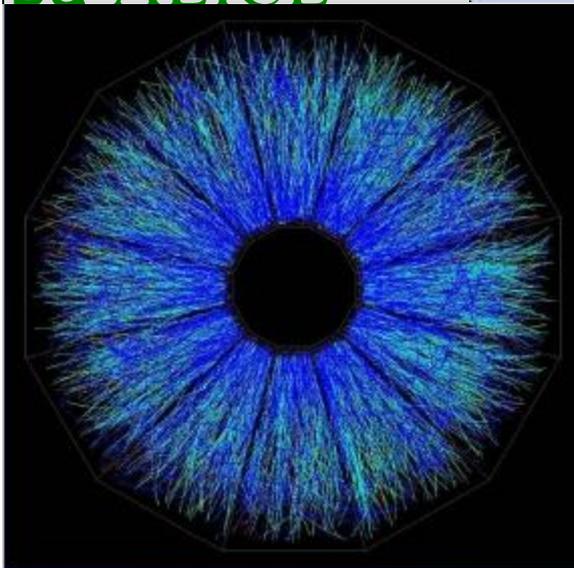
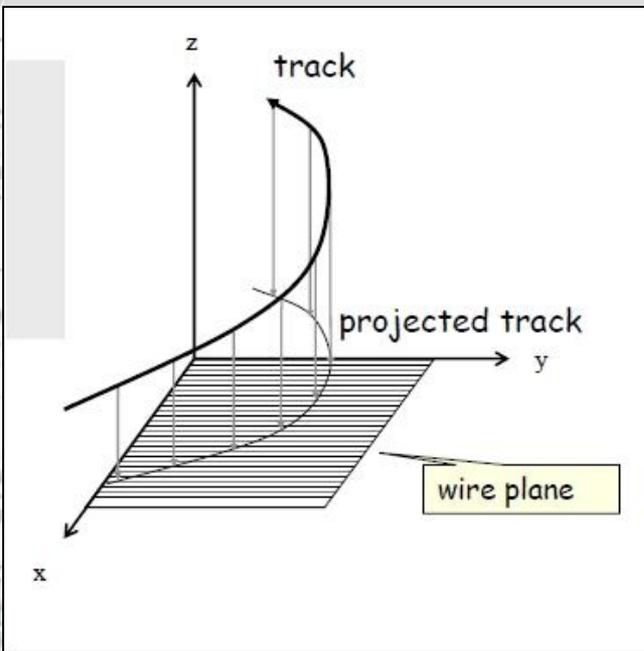




- Настоящая 3Д картинка



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 (~ 10)

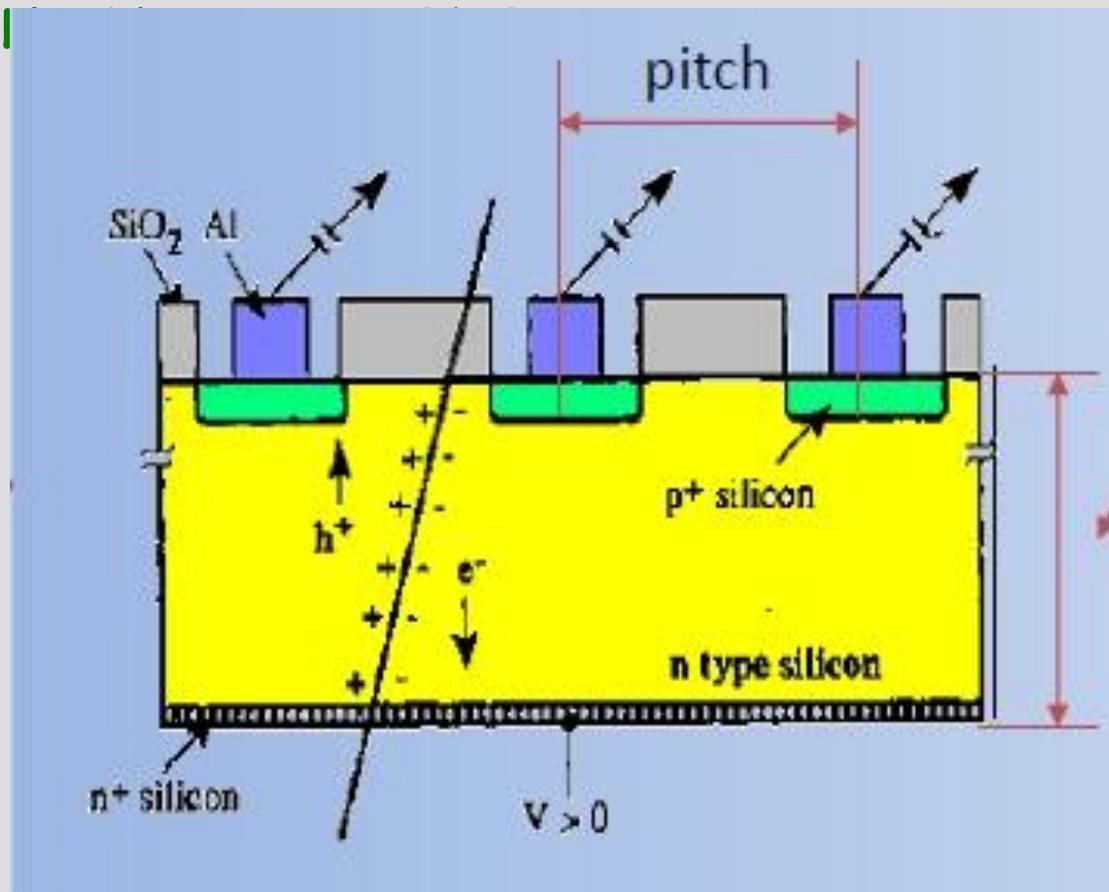
• Сердца современности

• Типичные точности

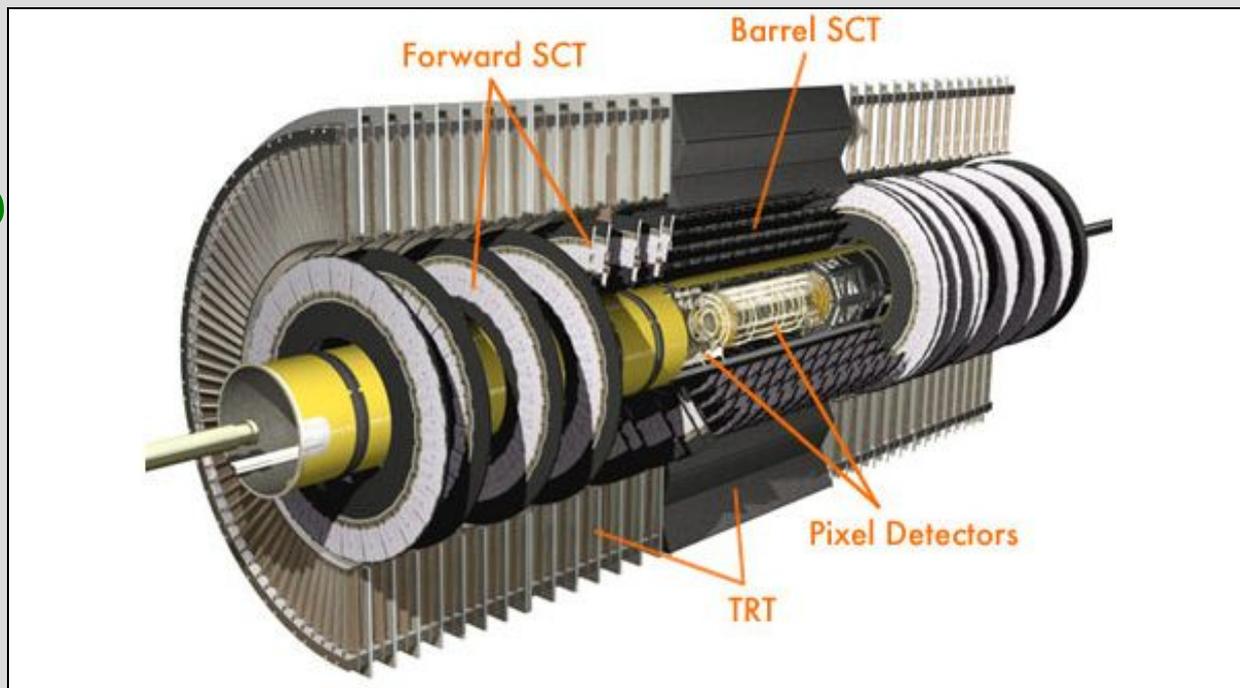
- 5-50 мкм

• Типичные геометрии

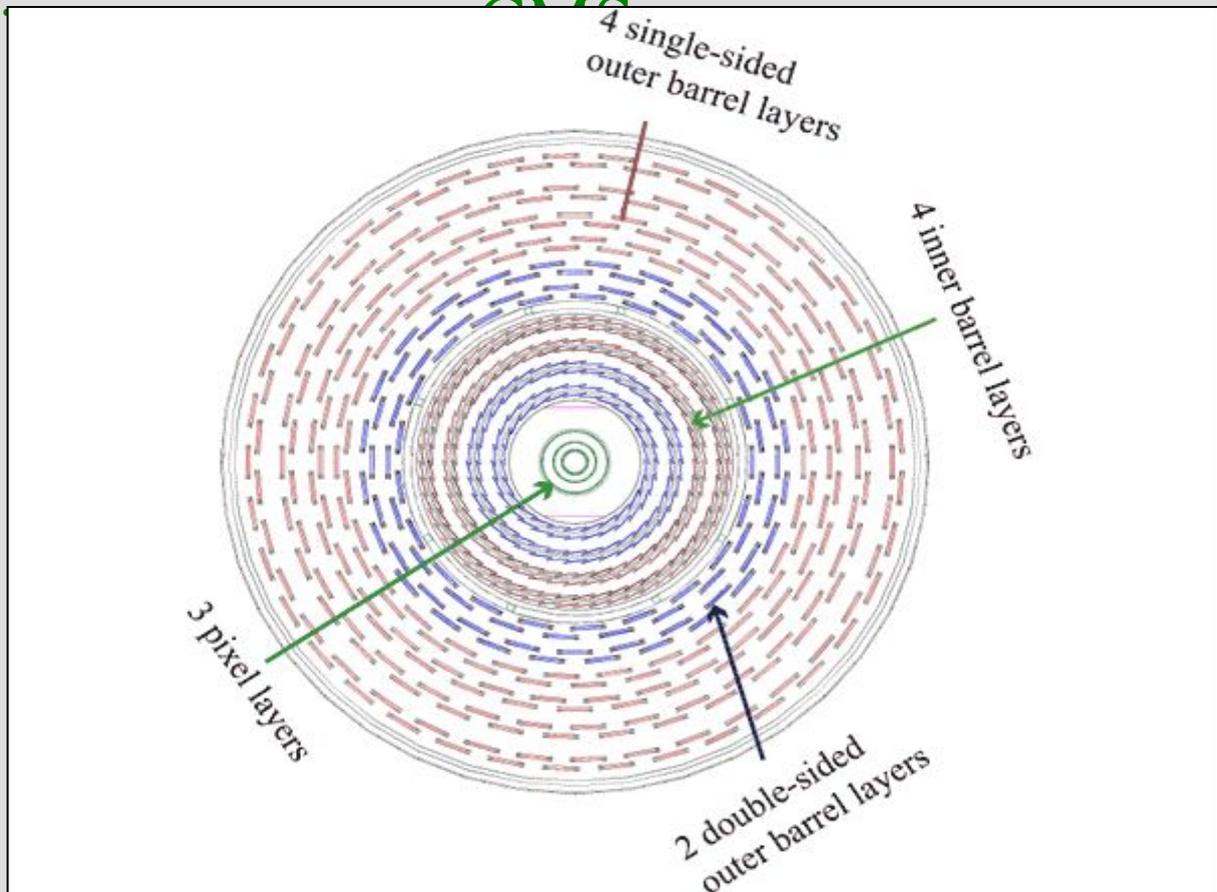
- Полоски
 - «стрипы»
- Короткие полоски
 - микрострипы
 - «стриксели»
- Прямоугольники
 - «пиксели»



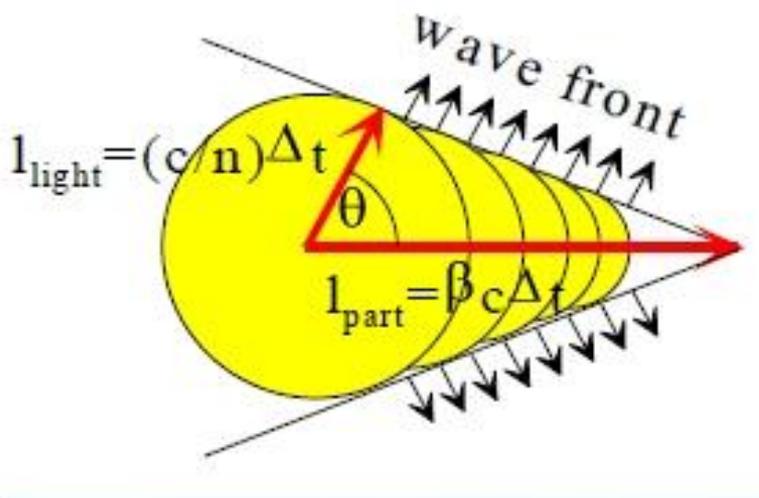
- Внутренний детектор эксперимента ATLAS
- $> 10^8$ каналов,
- $> 60\text{м}^2$ полупр



- Внутренняя часть
- 65×10^6 каналов



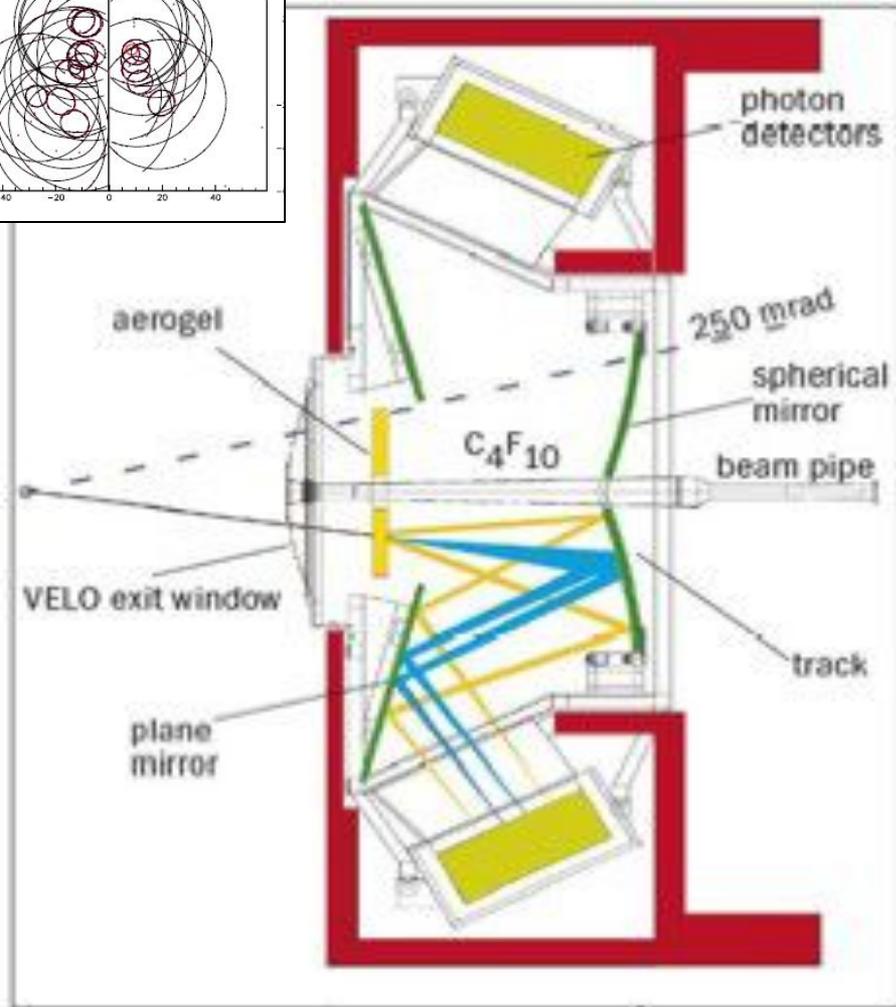
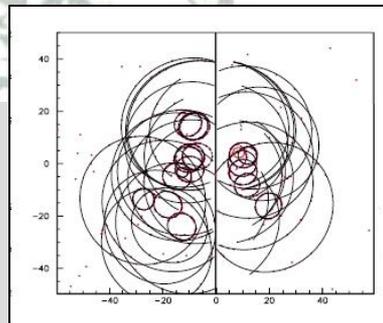
- Когда заряженная частица движется в среде со скоростью больше скорости света в среде
 - (но меньше скорости света в вакууме)
 - Косинус угла распространения света $\cos \theta = 1/(n\beta)$



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»

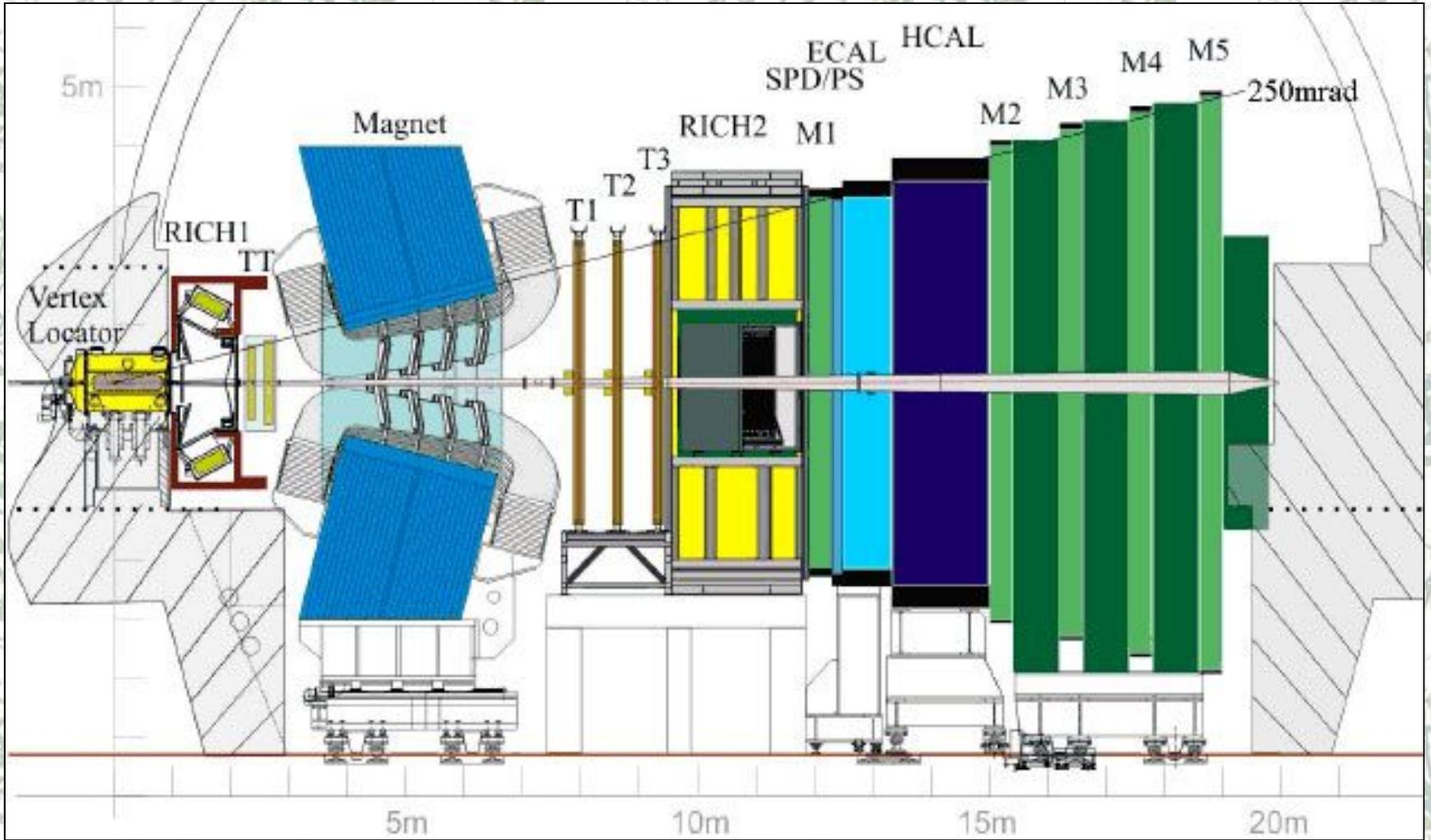


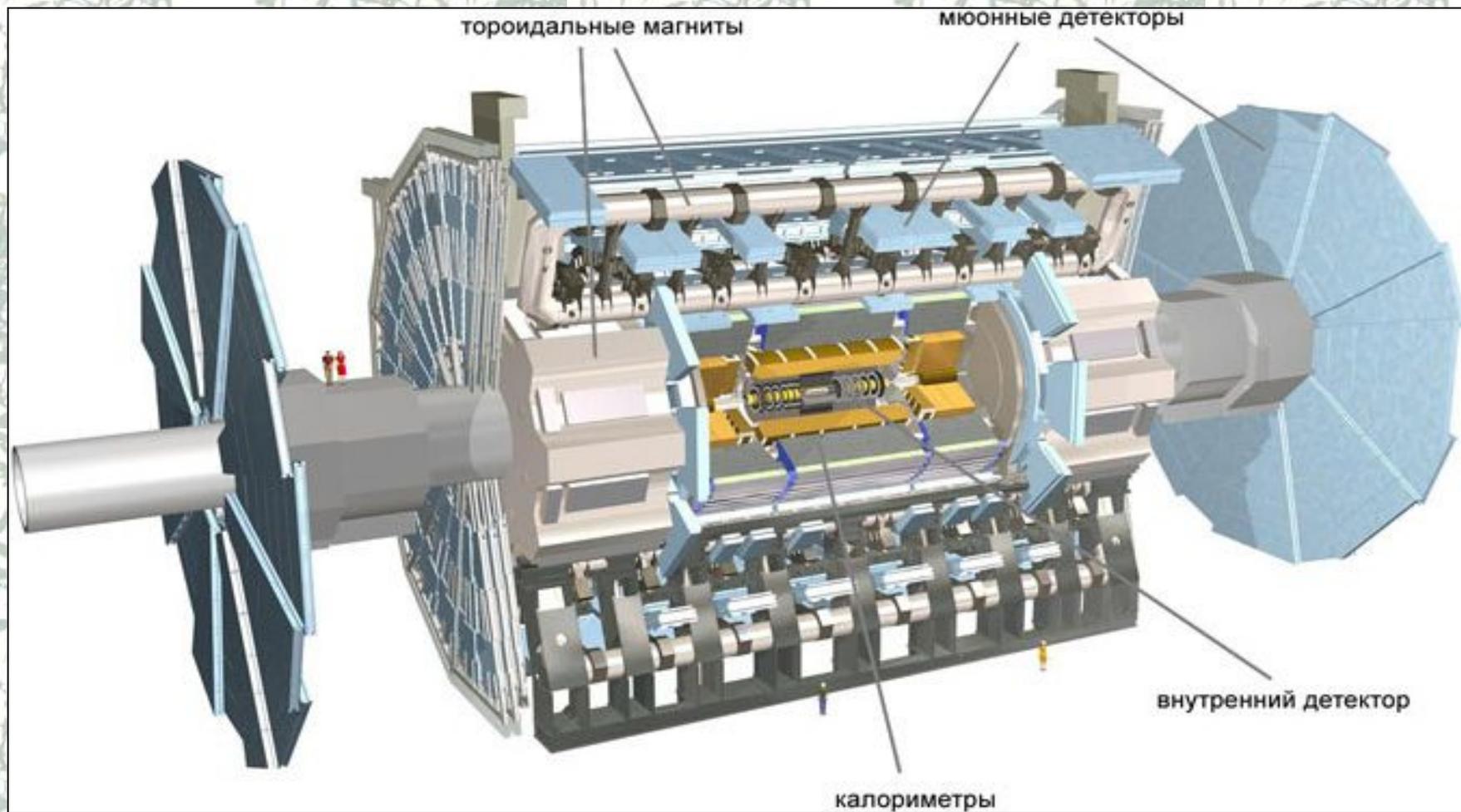
Детекторы мюонов

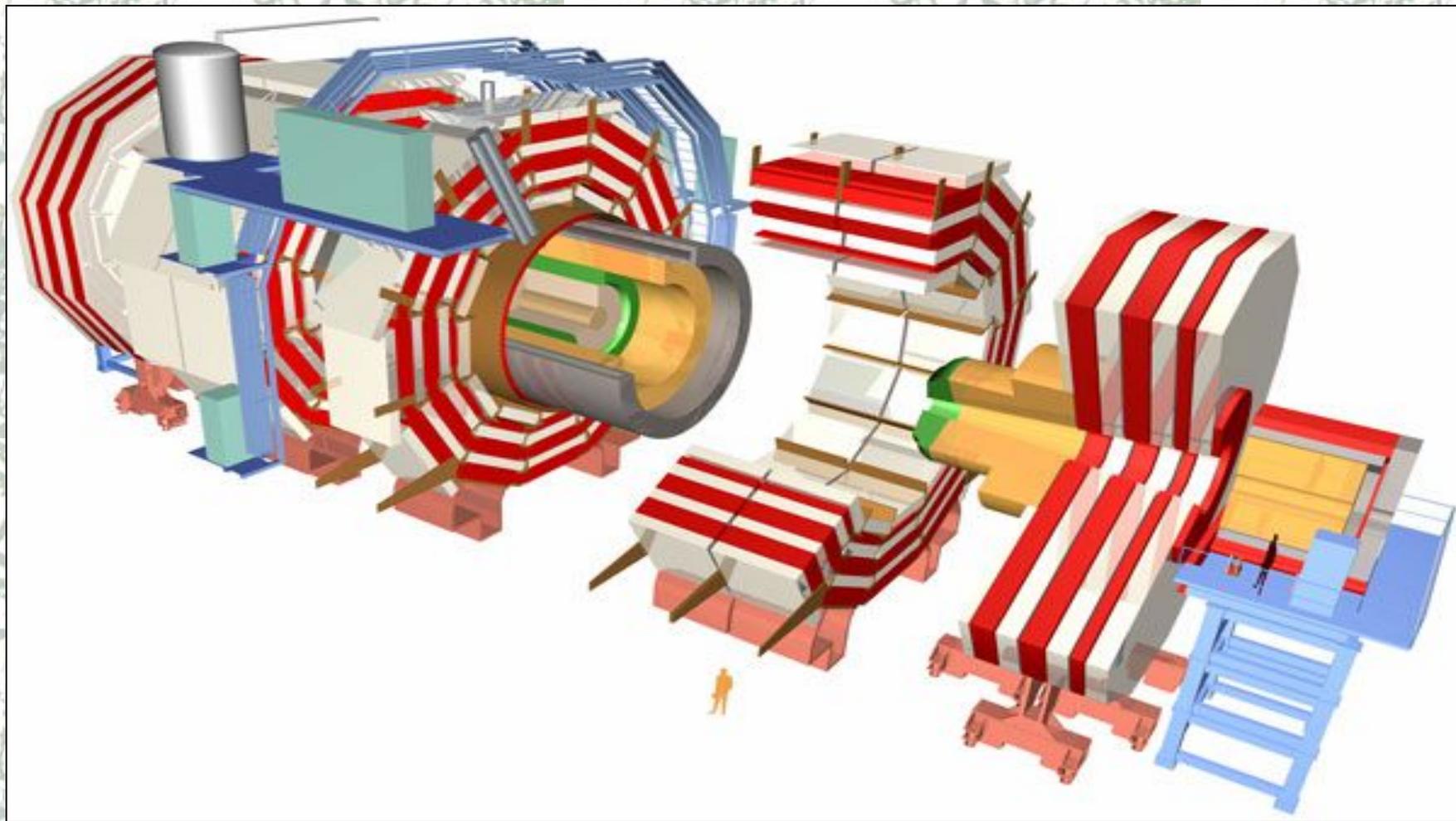


- Мюонные детекторы обычно самые далекие от точки взаимодействия. Включают много тяжёлого материала: железо, железобетон
- Часто самые тяжелые (по массе) элементы эксперимента
 - Часто совмещены с ярмом магнита
- Обычно самые внешние и самые видимые

• Часто только их и видно









Вместо заключения



Большое спасибо за внимание

Вопросы?

Я должен еще раз извиниться за слишком большие упрощения