



**Эксперимент:
ускорители и детекторы**

Немного об этой лекции

- В большинстве случаев я буду рассказывать о детекторах частиц на примере универсальных экспериментальных установок на коллайдерах.
- Просто потому, что такие эксперименты более известны. Кроме того, картина событий для таких экспериментов более наглядна. Детекторы для экспериментов с неподвижной мишенью принципиально ничем, кроме геометрии не отличаются.
- «Универсальность» означает что установка предназначена для решения множества задач и, соответственно, нацелена на сбор максимально полной информации о событии.
- «Специальные» эксперименты предназначены для сверхточного измерения отдельных величин. Ради достижения этой точности приносятся в жертву все остальные характеристики. Тем не менее в большинстве случаев они используют детекторы работающие на тех же принципах.

О терминологии

Слово «детектор» в экспериментальной физике слишком многозначное. Я буду использовать термины

- «Экспериментальная установка» или «детекторный комплекс» для обозначения всей аппаратуры эксперимента целиком
- «Система» или «подсистема» для обозначения функциональной части установки. Например – «трековая система» или «система сбора данных»
- «Детектор» - для обозначения «базовых элементов» из которых построены подсистемы установки. Например, такой детектор как счетчик Гейгера может быть частью трековой системы

Цели экспериментов

- Проверить корректность *нетривиальных* теоретических предсказаний, в случае наличия нескольких конкурирующих моделей исключить неприменимые (в данных условиях)
- Определить границы применимости существующих моделей
- Уточнить параметры входящие в теоретические модели


Что для этого нужно?

1. Создать условия в которых ожидаются наибольшие отклонения от предсказаний классических теорий. Поскольку $\Delta x \sim 1/\Delta p$ объектом интереса физики частиц являются взаимодействия с большой передачей импульса
2. Получить максимально полную информацию о таких событиях

Источники высокоэнергичных частиц

- Радиоактивные распады
- Космические лучи
 - Являлись основным объектом изучения и инструментом физики частиц до ~1940 годов. Современные эксперименты по регистрации КЛ являются инструментами астрофизики и космологии, а не физики частиц
- **Ускорители заряженных частиц**

Вопрос «что именно происходит в точке столкновения» не имеет смысла



Задача экспериментаторов – собрать максимально полную информацию о начальном и конечном состоянии системы

Какую именно информацию о столкновении мы хотим получить?

- Определить импульсы частиц и их тип
 - *Формально*, этого достаточно, так как теоретики описывают взаимодействие в импульсном представлении.
- Убедится, что зарегистрированные частицы принадлежат одному событию. Например - происходят из одной точки
 - *первичной вершины*
- Во первичном взаимодействии могут рождаться частицы (Ks, B, D...), пролетающие макроскопическое расстояние (от ~ 100 мкм до см) до точки распада - *вторичной вершины*. В таком случае требуется восстановить координаты этой точки, импульс распавшейся частицы.

Как определить импульс?

- Только по кривизне траектории в магнитном поле. Других надежных способов нет. Подсистема детектора, отвечающая за регистрацию треков частиц называется *трековой системой*. Хорошая трековая система слабо взаимодействует с частицей и почти не изменяет ее импульс. «Базовыми элементами» трековой системы являются *координатные детекторы*

А энергию?

- Если частица полностью остановилась в детекторе, выделившуюся энергию можно измерить. Подсистемы, предназначенные для этого называется *Калориметрами*. В результате измерения частица погибает

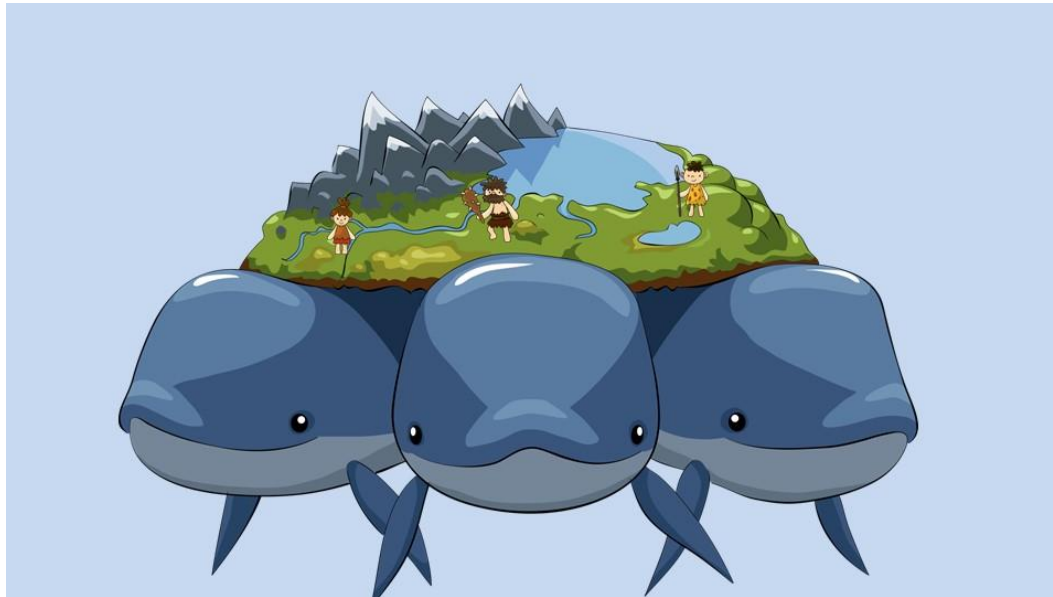
Что значит определить тип частицы?

- На сегодняшний день известно 8 долгоживущих частиц.
- Считаем, что других долгоживущих частиц нет
- Идентифицировать – значит по характеру взаимодействия с веществом или (и) за счет измерения массы отнести частицу к одному из упомянутых 8 типов

γ	M=0, Q=0	
e^{\pm}	0.511 MeV	EM
μ^{\pm}	105 MeV, $\sim 200m_e$	
π^{\pm}	139 MeV $\sim 280m_e$	EM
K^{\pm}	493 MeV $\sim 1000m_e$	Strong
p^{\pm}	938 MeV $\sim 2000m_e$	
K^0_L	497 MeV	Strong
n	939 MeV	

*Заряд, масса, характер взаимодействия –
Ключ к идентификации*

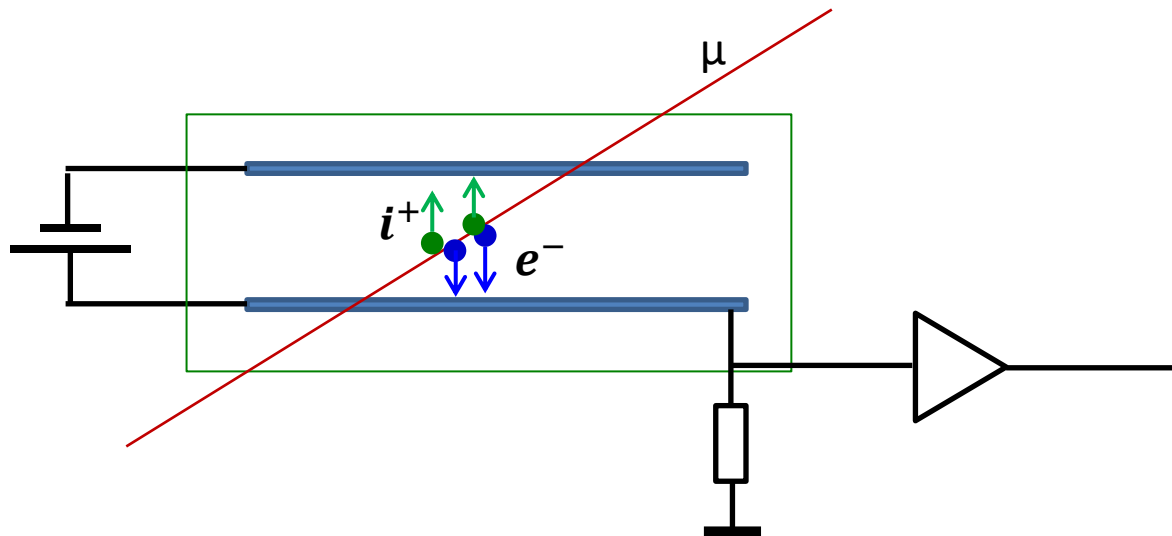
Три кита универсальных экспериментальных установок



- Трековая система
- Калориметры
- Система идентификации частиц

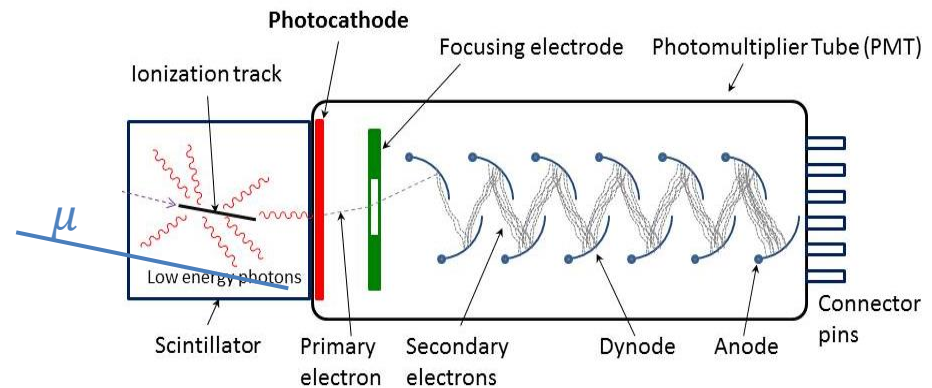
Взаимодействие частиц с веществом: Ионизация

- Заряженная частица проходя через вещество детектора вызывает ионизацию атомов. Образовавшийся заряд можно собрать и усилить. В координатных детекторах почти всегда используется этот метод.



Взаимодействие частиц с веществом

- Заряженная частица вызывает возбуждение атомов среды, которое сопровождается излучением. Это излучение можно преобразовать в электрический сигнал с помощью фотодетекторов. (ФЭУ, фотодиоды...)
- Значительные плотность и масса активного вещества
- Небольшое количество каналов при большом объеме детектора
- Быстрые сигналы
- Дешевые в поддержании детекторы



В физике частиц такой метод регистрации чаще всего используется в калориметрах и в триггерных детекторах

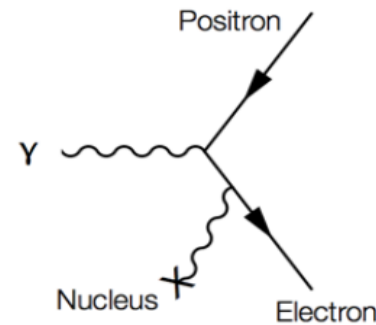
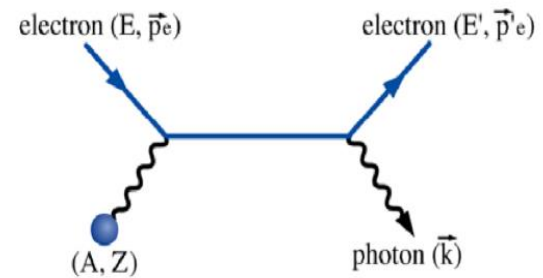
Взаимодействие электронов и фотонов с веществом

В результате неупругих взаимодействий с ядрами электроны испускают фотоны тормозного излучения

$$E = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}}$$

Энергичные фотоны в основном взаимодействуют с веществом образуя e^+e^- пары

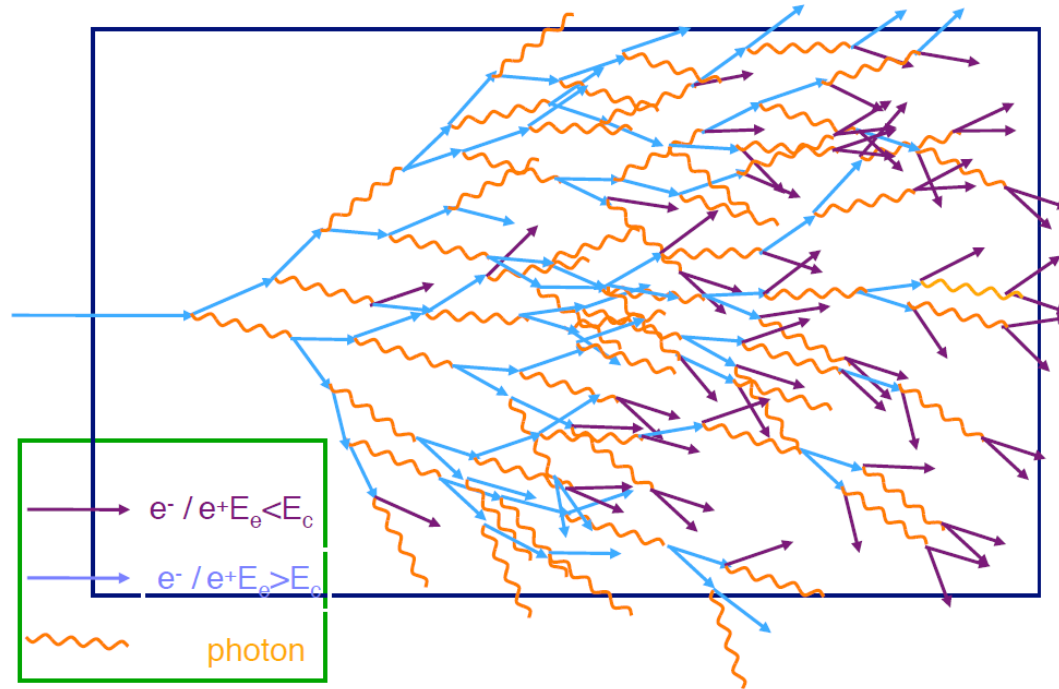
$$J = J_0 e^{-\frac{9x}{7X_0}}$$



X_0 - **радиационная длина**, характеристика среды $X_0 \sim \frac{1}{Z^2}$

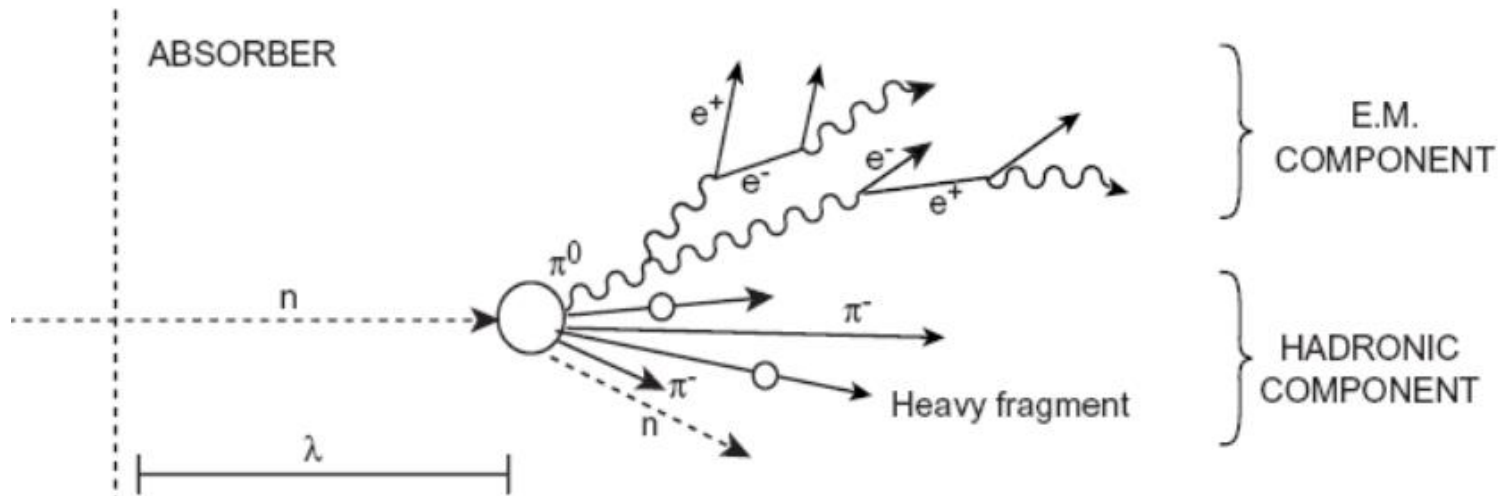
	Air	Eau	Al	LAr	Fe	Pb	PbWO ₄	LAr/Pb
Z	-	-	13	18	26	82	-	-
X_0 (cm)	30420	36	8,9	14	1,76	0.56	0.89	1.9

Электромагнитный ливень



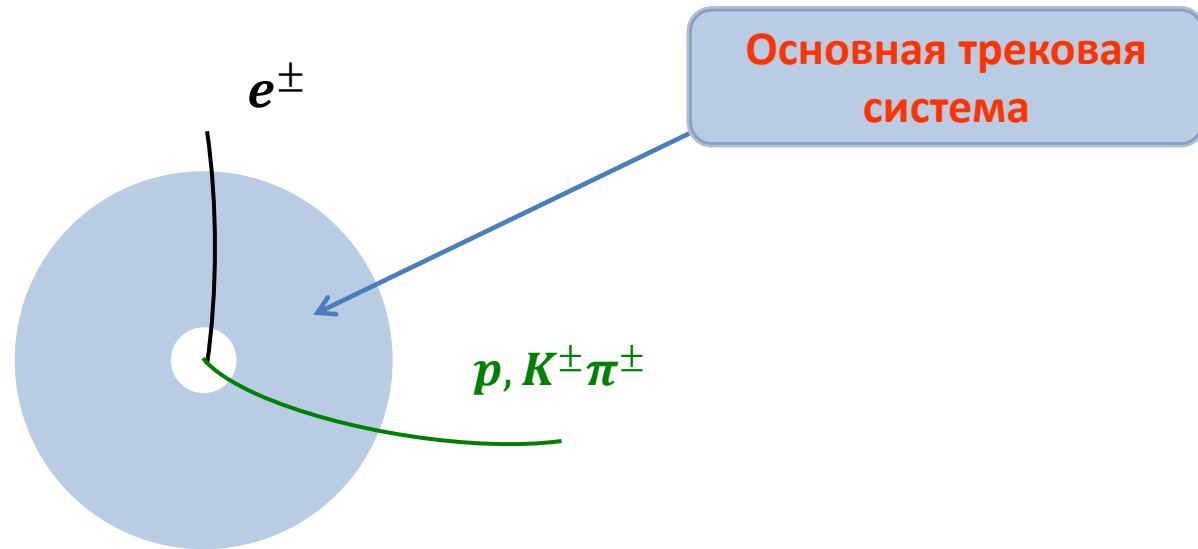
При попадании электрона или фотона в плотную среду происходит лавинообразное рождение новых фотонов и электронов. Развивается **электромагнитный ливень**. Количество частиц экспоненциально растет, а энергия частиц падает. Размер детектора, необходимый для полного поглощения энергии исходной частицы логарифмически растет с энергией. Характерная масштабная величина – радиационная длина X_0

Адронный ливень

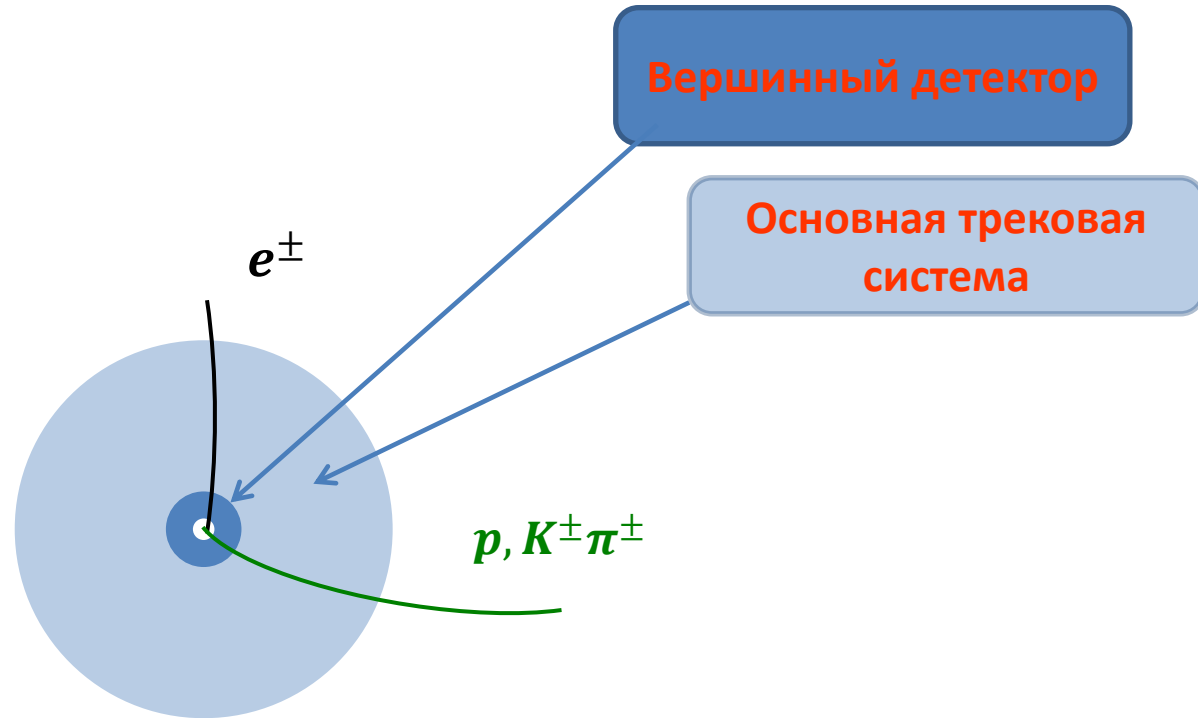


- Сильное взаимодействие адронов в веществе детектора вызывает развитие электромагнитного ливня
- Характерная масштабная величина ливня – длина ядерного взаимодействия λ
- $\lambda \gg X_0$, поэтому адронный ливень имеет гораздо большие размеры
- Флуктуации адронного ливня очень велики ввиду высокого порога ядерных реакций $\sim 2M_\pi \approx 280\text{МэВ}$ и наличия разных механизмов взаимодействия адронов с веществом детектора

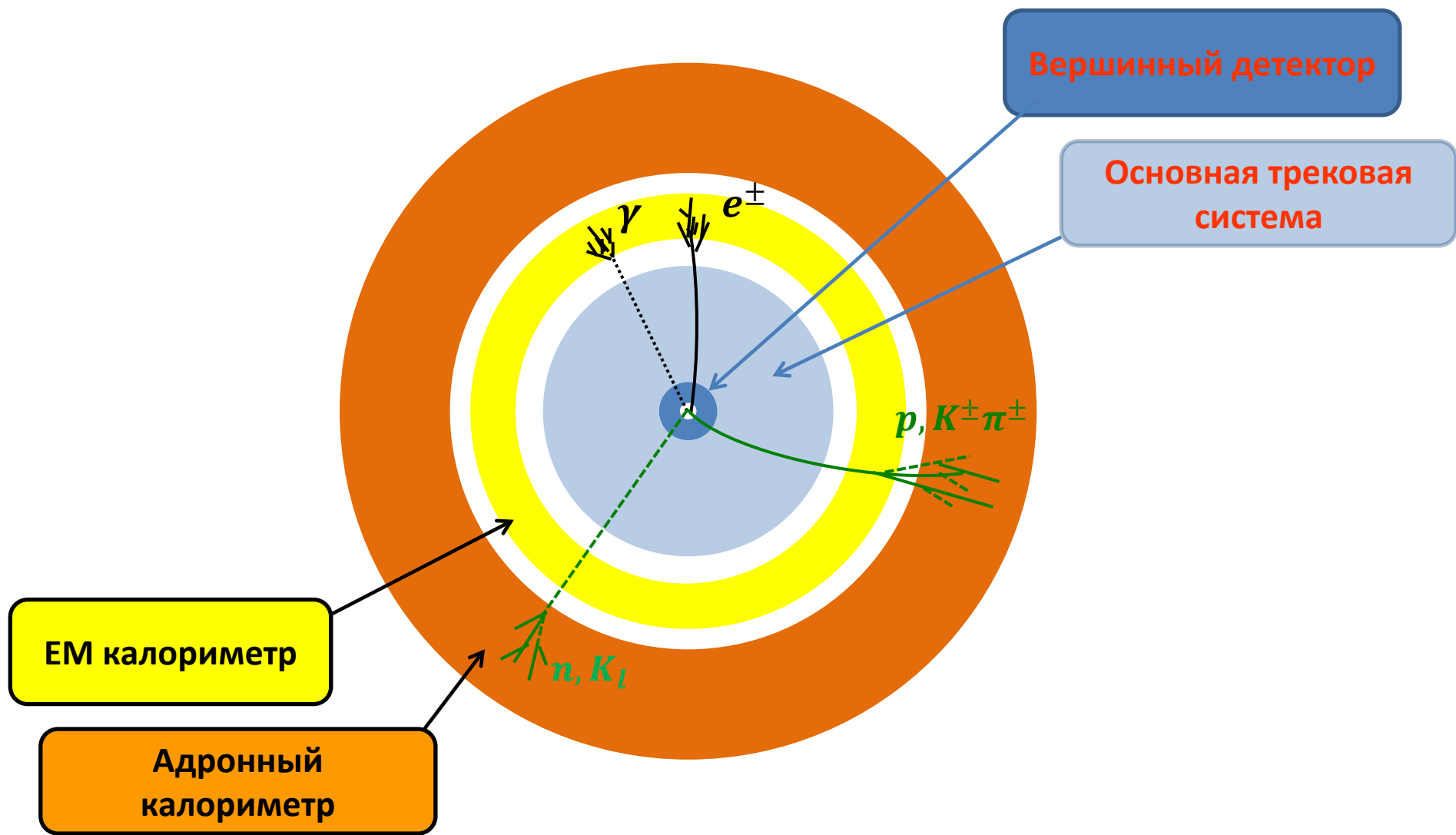
Типичная структура экспериментальной установки коллайдере



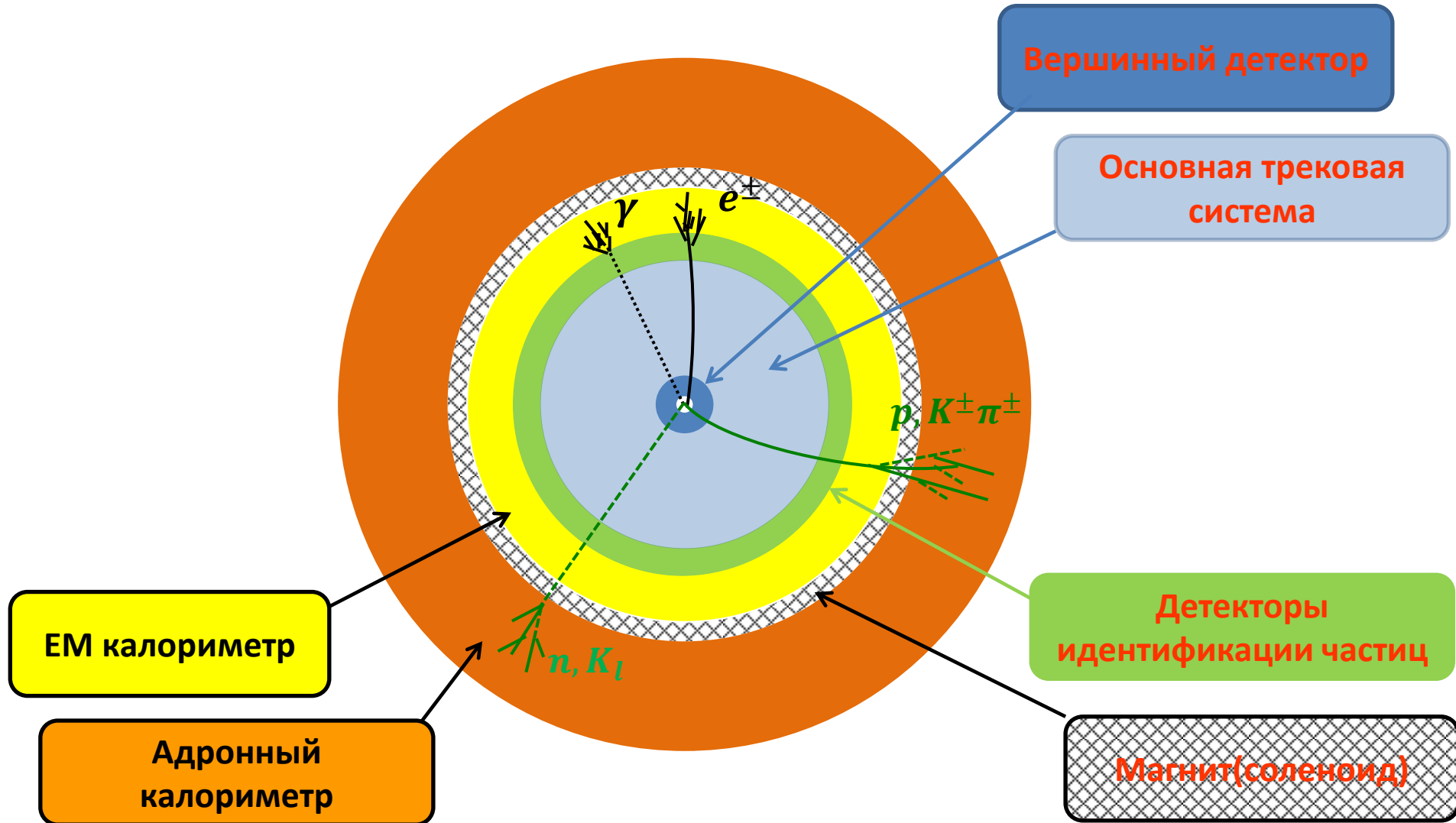
Типичная структура экспериментальной установки коллайдере



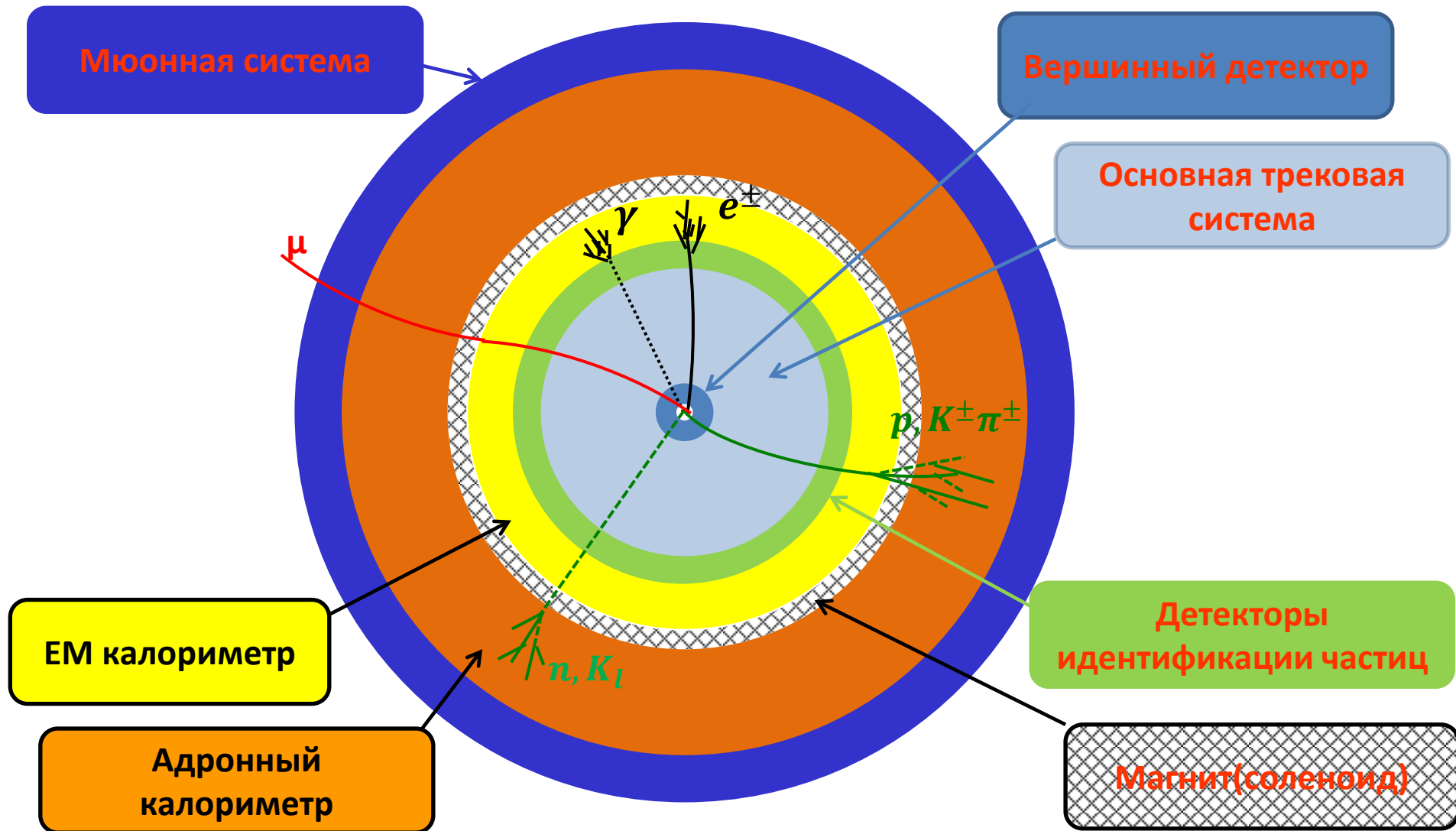
Типичная структура экспериментальной установки коллайдере



Типичная структура детектора эксперимента на коллайдере



Типичная структура детектора эксперимента на коллайдере

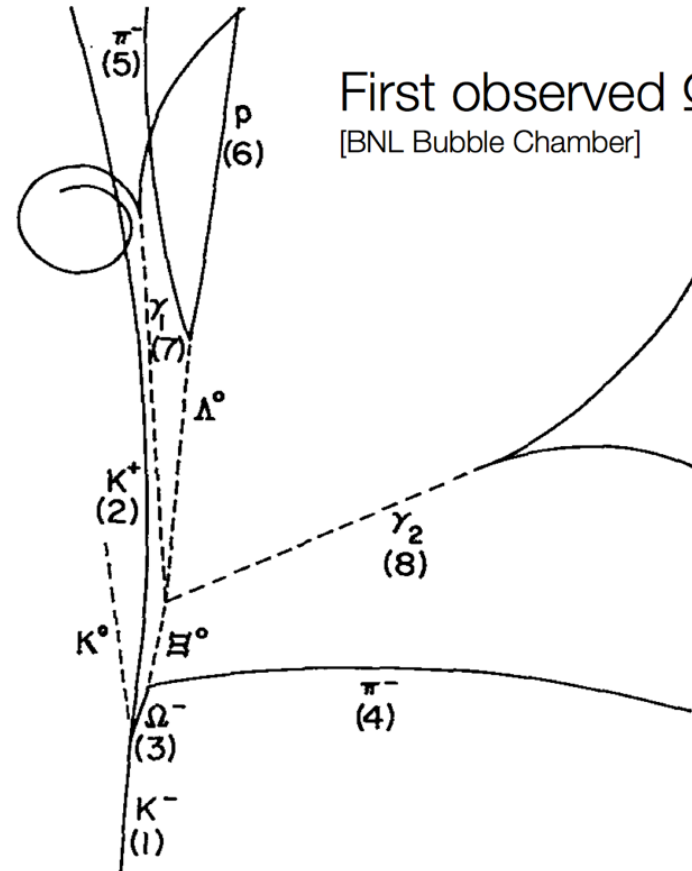


Детекторы основанные на ионизации вещества проходящей частицей

- Камера Вильсона(1912) - первый полноценный трековый детектор
- 1927 - П.Л.Капица, Д.В Скобельцын предложили помещать камеру Вильсона в сильное магнитное поле для определения знака заряда и импульса.
- 1933 – Патрик Блэкетт и Джузеппе Оккиалини поместили камеру Вильсона между двумя счетчиками, дававшими сигнал на запуск цикла регистрации при прохождении частицы
- В сочетании с возможностью оценивать скорость частицы по интенсивности ионизации ($dE/dx \sim 1/v^2$ для $\gamma \ll 1$) камера Вильсона приобрела многие черты современных экспериментальных установок (регистрация трека , определение импульса, определение массы путем независимых измерений импульса и скорости, наличие триггерной системы)

Детекторы основанные на ионизации вещества проходящей частицей

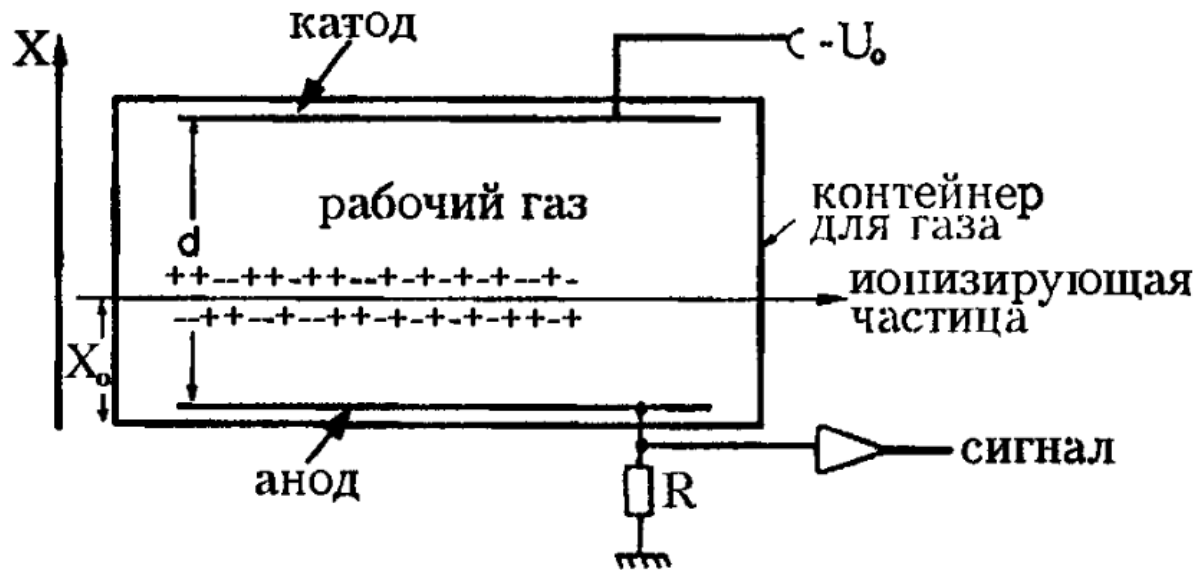
- Дальнейшим развитием трековых детекторов стали пузырьковые, искровые и стримерные камеры
- Основные характеристики этих камер – точность десятки микрон и способность «распутать» сложные события с огромным количеством треков вполне хороши и сегодня. Тем не менее эти детекторы полностью вышли из употребления
- Главные причины:
недостаточная скорость и плохая управляемость



First observed Ω^- event
[BNL Bubble Chamber]

**Нужны были быстрые детекторы ионизации с
полностью электронным считыванием**

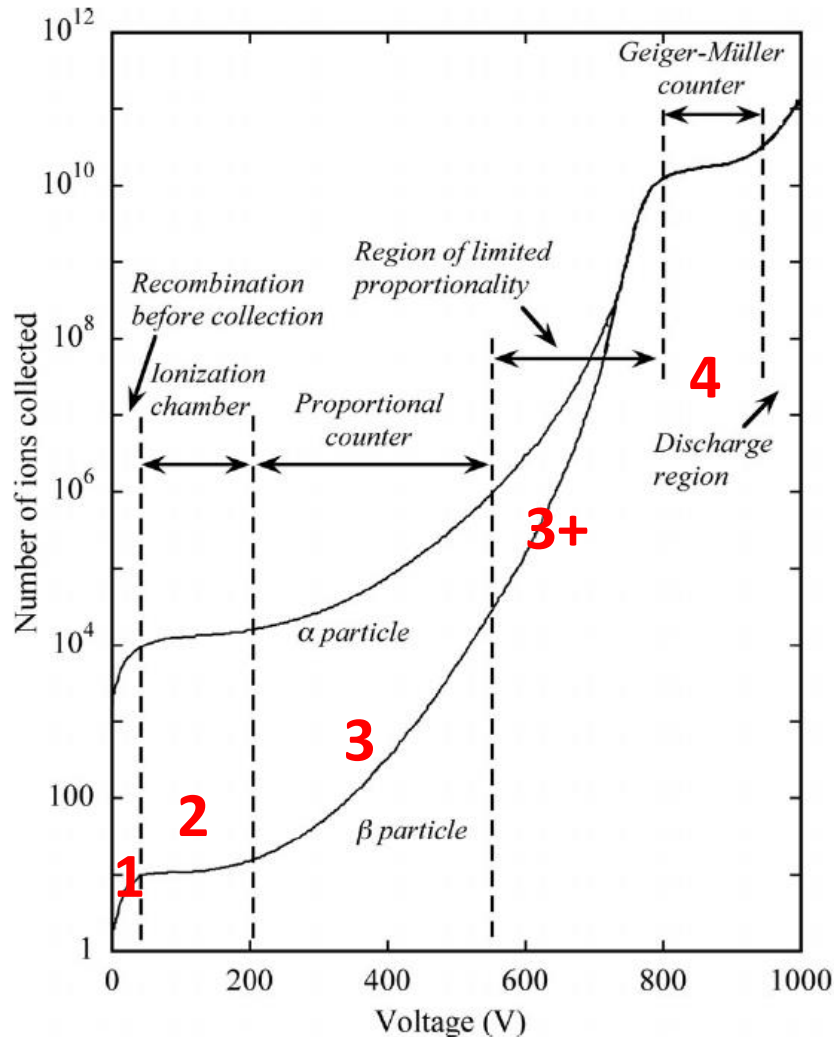
Простейший детектор ионизирующего излучения с газом в качестве рабочей среды



Амплитуда сигнала слишком мала – менее 100 электрон-ионных пар на сантиметр. Необходимо внутреннее усиление.

Попробуем поднять напряжение?

Газовые детекторы излучения при разном рабочем напряжении



1. Область рекомбинации
2. вся первичная ионизация собирается электродах
3. Напряженность поля достаточна, чтобы некоторые из дрейфующих электронов могли ионизировать молекулы среды. Развивается ЛАВИНА. Собранный заряд (много) больше первичной ионизации
4. Развивается самоподдерживающийся разряд. амплитуда определяется детектором

Плоский детектор может обеспечить необходимую амплитуду сигнала, но слишком неустойчив в работе (склонен к разрядам)

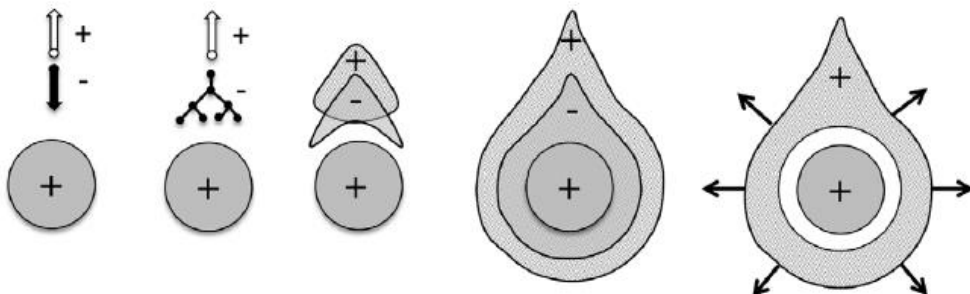
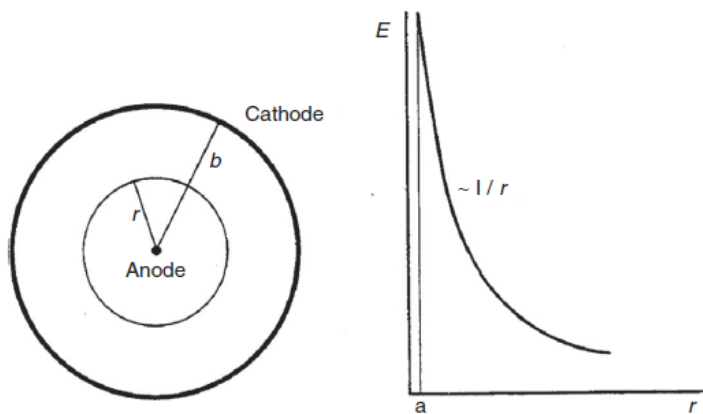
Цилиндрические проволочные счетчики(трубки)

Э.Резерфордом, Х.Гейгером, 1908г

Вблизи анода поле достаточно сильное для развития лавины. Слабое поле вдали от проволочки служит надежным «изолятором» предотвращая пробой

Усиление варьируется от 10^4 до более чем 10^8

Простой, надежный и широко используемый сегодня детектор



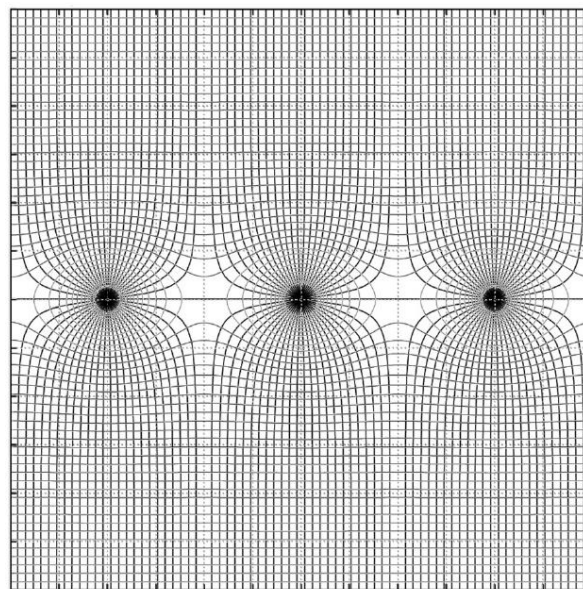
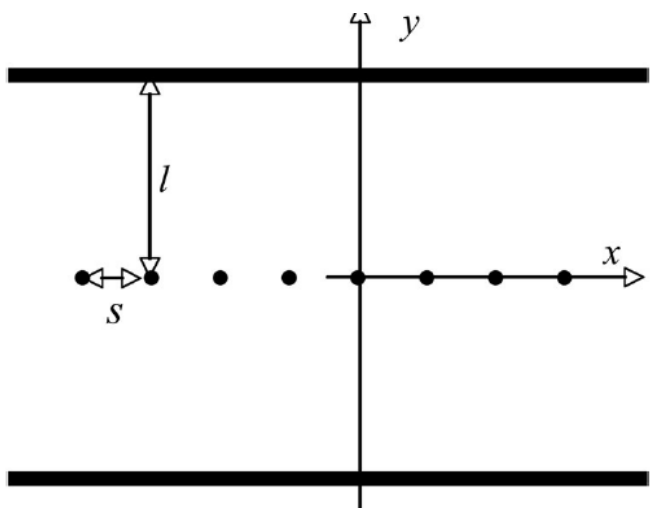
Во всех классических газовых детекторах используется аноды в виде тонких проволочек и конфигурация поля близкая к цилиндрической вблизи анодов

Многопроволочная пропорциональная камера.

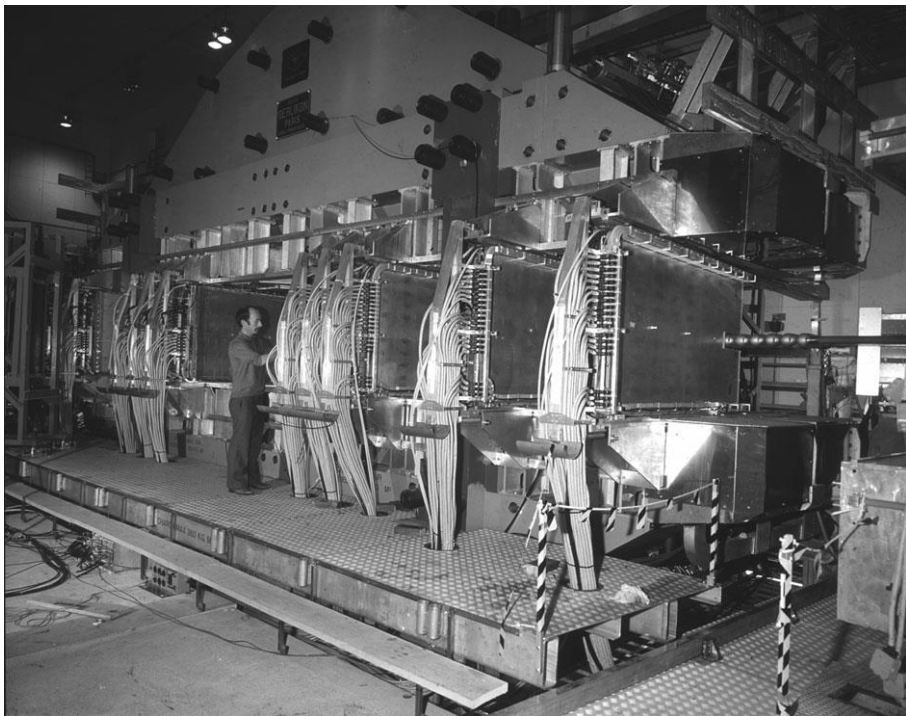
По сути – множество проволочных счетчиков в общем объеме
Конфигурация поля вблизи проволочки аналогична трубкам.
Сочетание большой площади, $\sim 1\text{mm}$ разрешения, простоты изготовления и достаточной надежности.

Детектор, начавший эпоху «полностью электронных» экспериментов
За разработку MWPC **Жорж Шарпáк(1967)** получил нобелевскую премию в 1992 г.

Вариации многопроволочных пропорциональных камер активно используются в настоящее время



Многопроводочные пропорциональные камеры



«стопка» пропорциональных камер с разной ориентацией сигнальных проводочек позволяет восстанавливать 3-х мерную картину треков.

Работоспособность камер может сохраняться при интенсивности до сотен тысяч треков в секунду на проводочку

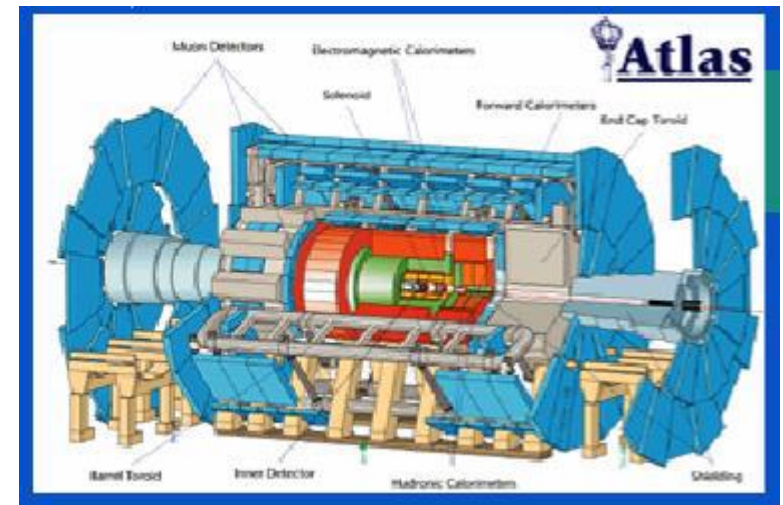
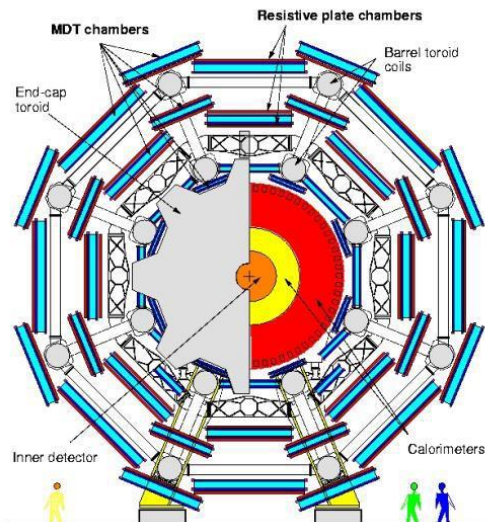
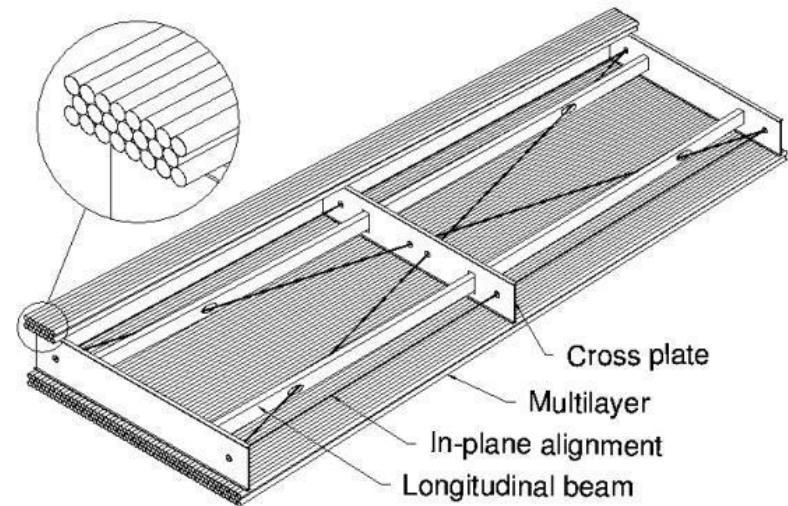
А если нужно точнее?

- Время между прохождением частицы и появлением сигнала газового детектора зависит от расстояния от трека до проволоочки. Если его измерить, можно определить координату точки трека с точностью порядка 100 микрон при размере ячейки детектора несколько см.
- Такие детекторы называются *дрейфовыми* (камерами или трубками)
- Дрейфовые камеры требуют наличия дополнительного детектора точно определяющего момент прохождения частицы

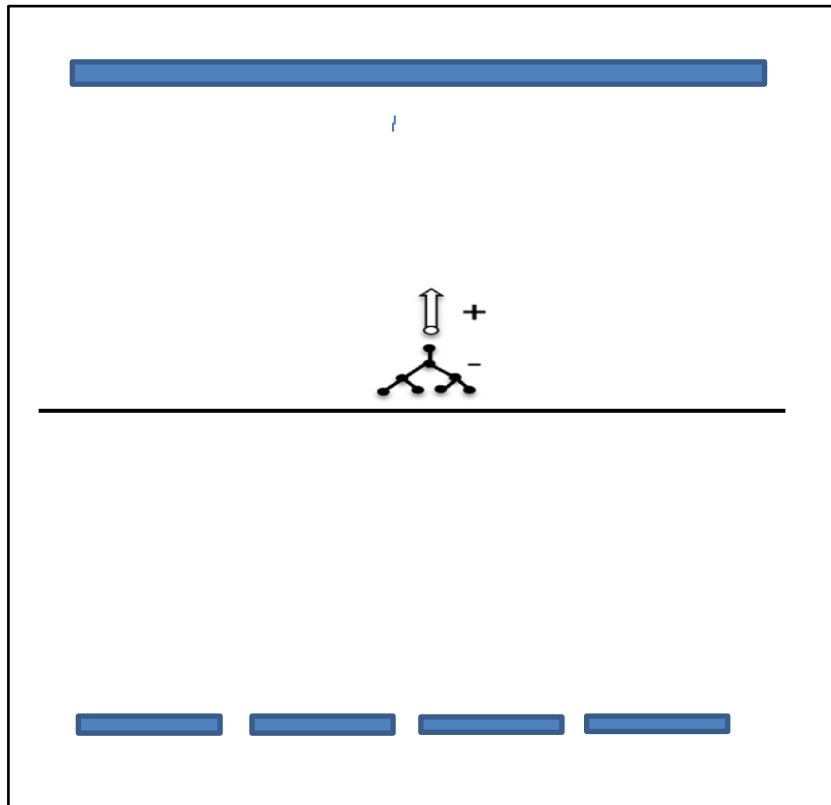


Дрейфовые трубки: реинкарнация счетчиков Гейгера

- $\frac{3}{4}$ объема установки АТЛАС на БАК занимает мюонная трековая система на основе дрейфовых трубок. Более 600 тыс. штук!!
- Достаточная точность, высочайшая надежность системы и простота массового производства – замечательное сочетание

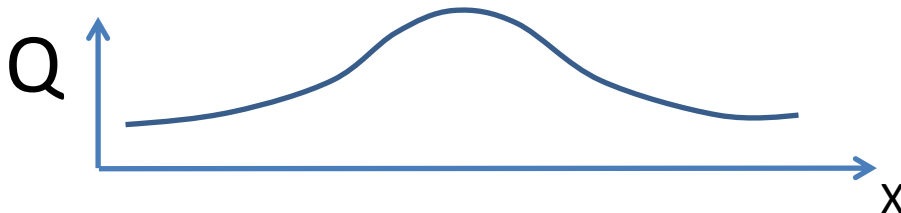


А если нужно точнее?-2



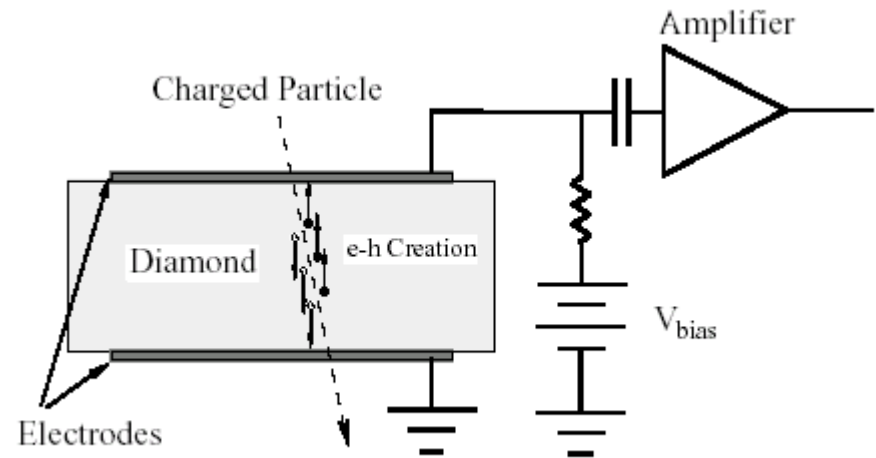
Сигнал наводится не только на анодных проволочках но и на катодной плоскости. Если ее выполнить в виде узких полосок, можно определить «центр тяжести» наведенного сигнала с точностью ~ 100 мкм

Многопроволочные камеры с сегментированным катодом – один из популярных вариантов детекторов для трековых систем сегодня



Твердотельные детекторы

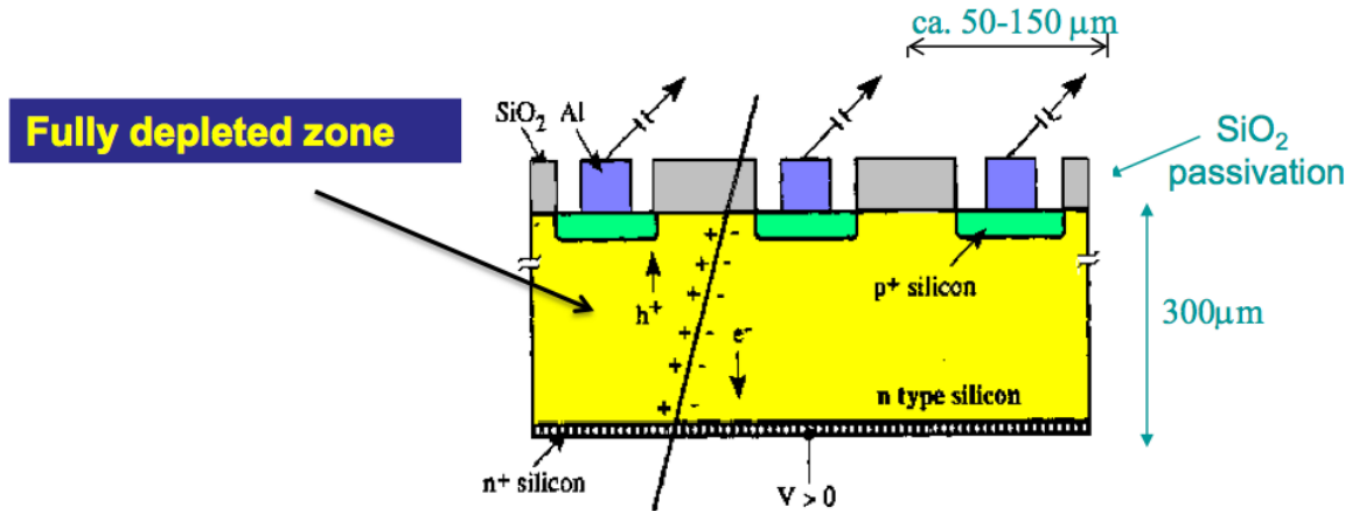
- В твердотельном детекторе на единице пути образуется заряд примерно в 10^4 раз больше чем в газовых детекторах
- **Большинство твердотельных детекторов работают без внутреннего усиления**
- В отличие от газовых детекторов скорости положительных и отрицательных зарядов близки
- **Как правило твердотельные детекторы имеют очень короткий сигнал**



Требования к материалу

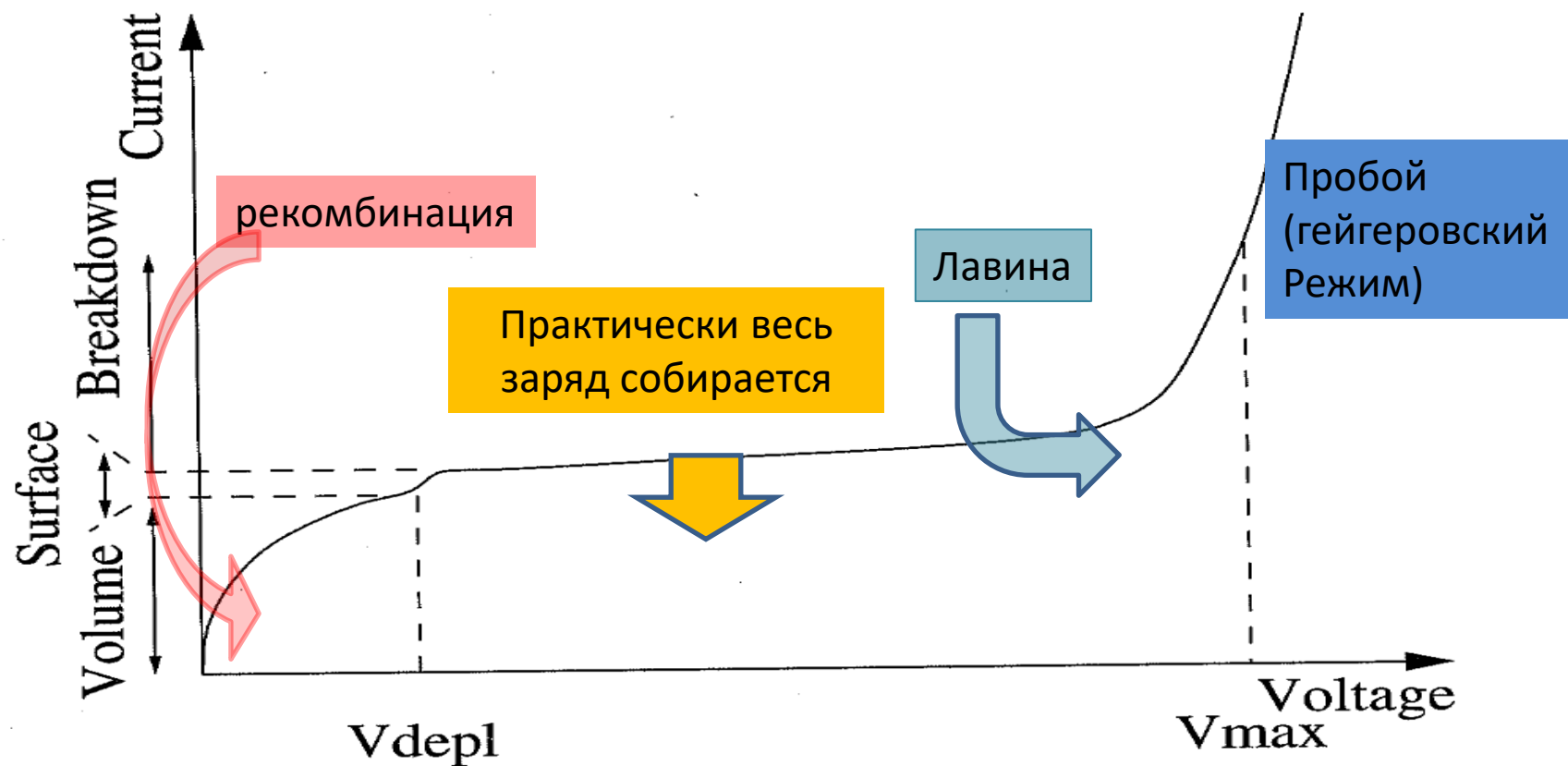
- Высокое сопротивление
- Хорошая подвижность и достаточное время жизни носителей заряда

Полупроводниковые детекторы



- Полупроводниковые детекторы частиц – по диоды, на которые в рабочем режиме подается запирающее напряжение. При этом в районе p-n перехода возникает обедненная зона – в которой нет носителей заряда и присутствует достаточно сильное электрическое поле.
- Проходящая частица создает новые свободные электроны и дырки, которые собираются на электродах формируя сигнал.
- Первичная ионизация достаточно велика (10000 пар на 100 мкм) чтобы регистрировать сигнал без внутреннего усиления.

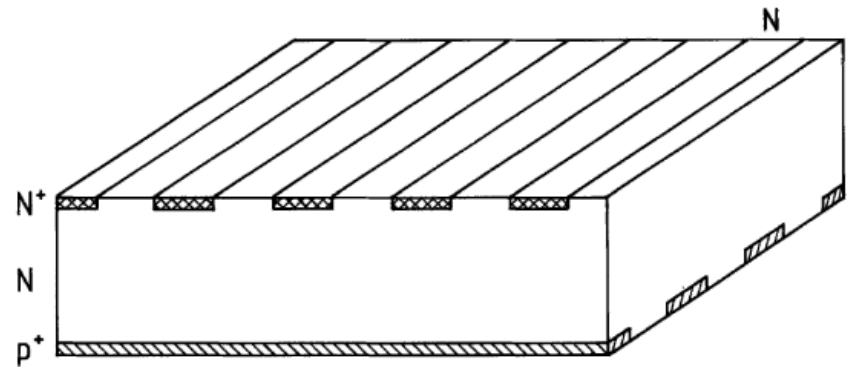
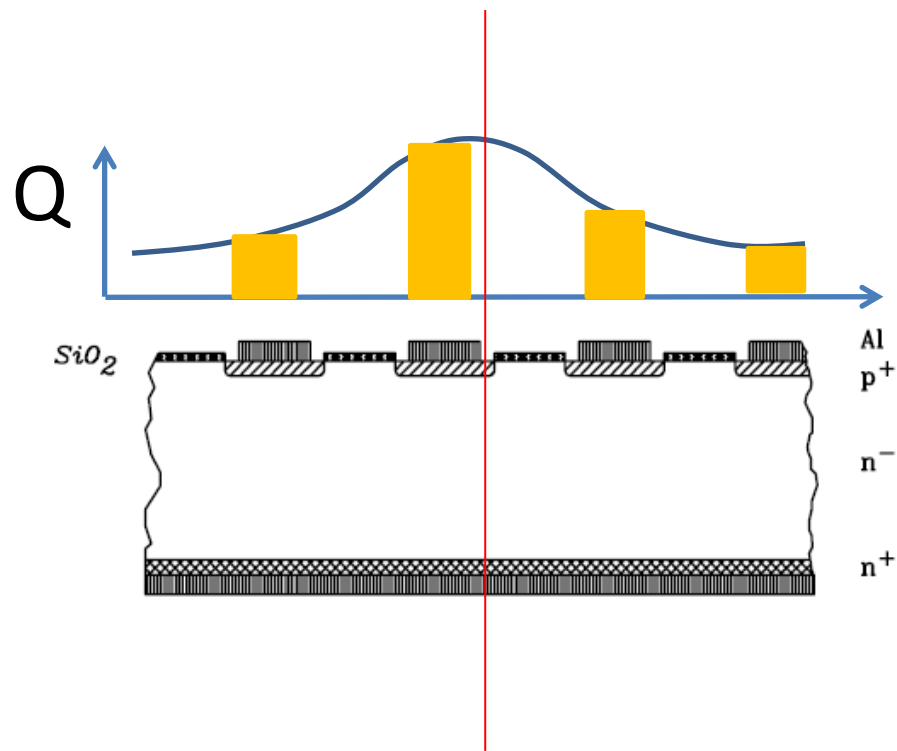
Вольт-амперная характеристика запертого р-п перехода при наличии ионизирующего излучения



Полупроводниковые детекторы могут работать как в режиме ионизационной камеры так и в режиме лавинного усиления

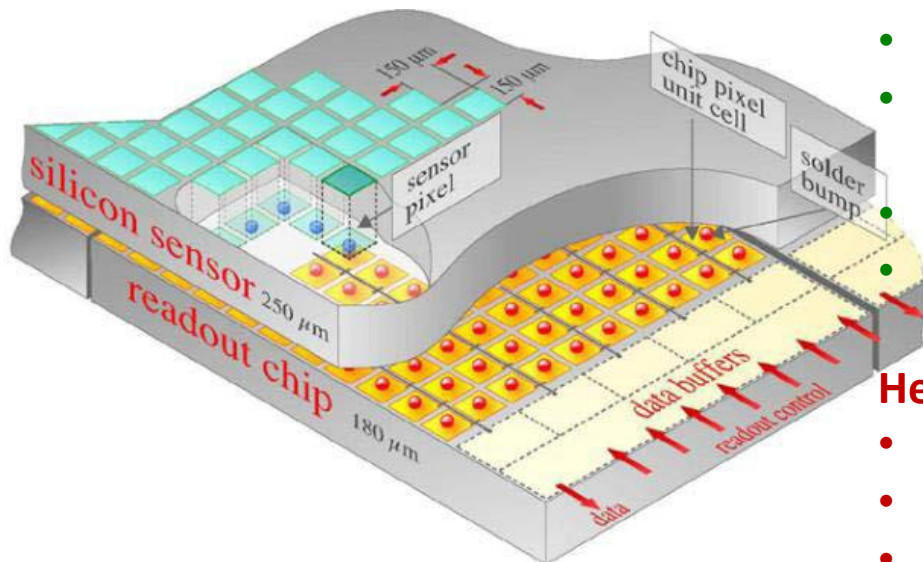
Микростриповые полупроводниковые детекторы

- Считывающие электроды имеют вид стрипов (полосок) шириной от ~десятков микрон и длиной до 10-20 см. Каждый электрод подключен к усилителю
- Точная координата трека определяется взвешиванием заряда. Разрешение может быть лучше 10 мкм



Гибридные пиксельные детекторы

При очень больших нагрузках через один стрип микроstriпового детектора может пройти сразу несколько частиц. Такое событие сложно корректно восстановить. В таком случае электроды выполняют в виде пикселей размером $\sim 20\text{-}50$ мкм в ширину и до 1 мм в длину. Усилитель и схема оцифровки для каждого канала располагаются непосредственно за ним.



Достоинства:

- Очень высокая нагрузочная способность
- Очень хорошее двухтрековое разрешение
- Высокое пространственное разрешение по обеим координатам
- Низкий шум ввиду малой емкости
- Хорошее временное разрешение

Недостатки:

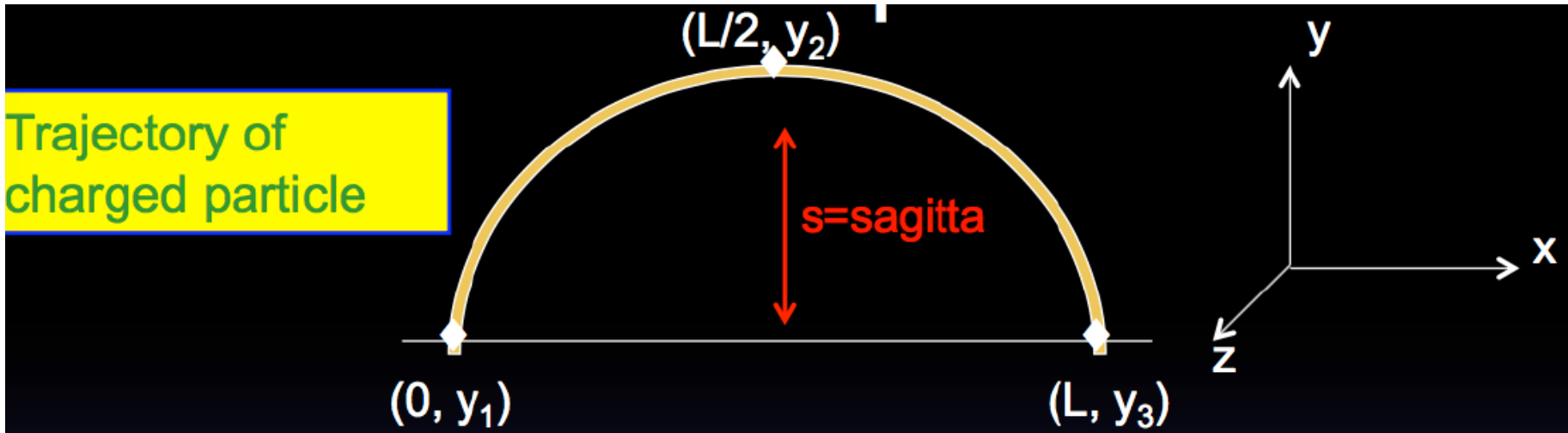
- Очень большое количество каналов
- Большое количество вещества
- Сложность изготовления
- Высокое энергопотребление

Пиксельные детекторы установки ATLAS



Трековые системы:

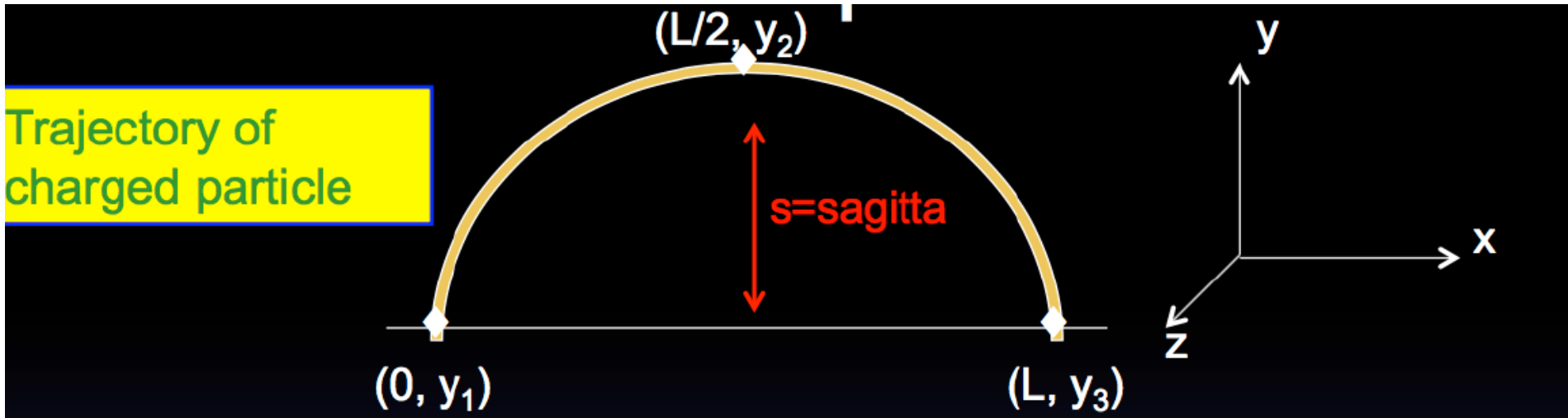
Импульсное разрешение (идеальный случай)



$$\frac{\sigma_{p_{\perp}}}{p_{\perp}} = \frac{\sigma_s}{s} = \frac{\sqrt{3/2}\sigma_y}{(0.3L^2B)/(8p_{\perp})} = \frac{8p_{\perp}\sqrt{3/2}\sigma_y}{0.3L^2B} = 32.6 \frac{p_{\perp}\sigma_y}{L^2B} \text{ (m, GeV/c, T)}$$

Трековые системы:

Разрешение (чуть более реальный случай)



$$\frac{\sigma_p}{p} = A\rho \oplus B$$

Вклад координатной точности

Вклад взаимодействия с веществом
(многократное рассеяние)

Трековые детекторы - сравнение

- Газовые и полупроводниковые детекторы составляют в настоящее время более 90% всех координатных детекторов
- Полупроводниковые детекторы имеют лучшую пространственную точность и лучшее разделение треков в сложных событиях.
- Газовые детекторы много дешевле и содержат намного меньше вещества. За счет этого могут обеспечить лучшую точность измерения импульса для наиболее медленных частиц

Калориметры

- Детекторы полного поглощения предназначенные для измерения энергии частиц.
- Как правило, в установке разделяются на независимые электромагнитные и адронные калориметры.
- В экспериментах на низких – средних энергиях адронный калориметр, как правило отсутствует

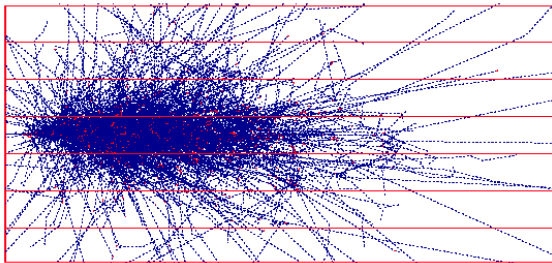
Электромагнитные калориметры

- Предназначены для измерения энергии фотонов и электронов. Другие частицы тоже оставляют часть энергии, но только фотоны и электроны – всю
- Желательно использовать материалы с малой X_0 (большим Z)
- Калориметры могут целиком состоять из активной среды (например кристаллов CsI) либо из чередующихся слоев поглотителя и активной среды (например свинец и пластиковый сцинтиллятор)
- Характеристики
 - Точность $\sigma_E/E = A/\sqrt{E} \oplus B$
 - Поперечная сегментация - определяет точность измерения угла вылета фотона
 - Продольная сегментация – позволяет определить

ЭМ калориметры

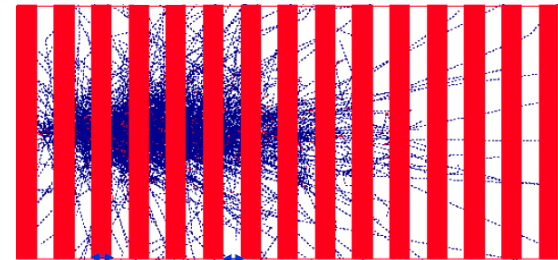
- **Гомогенные**

- Неорганические сцинтилляторы+фотодетектор
- Вся энергия выделяется в активном веществе
- Дорогие, ограничен размер кристаллов
- Отличное разрешение $\sim 2\%/\sqrt{E}$
- Отсутствует продольная сегментация



- **Гетерогенные (sampling)**

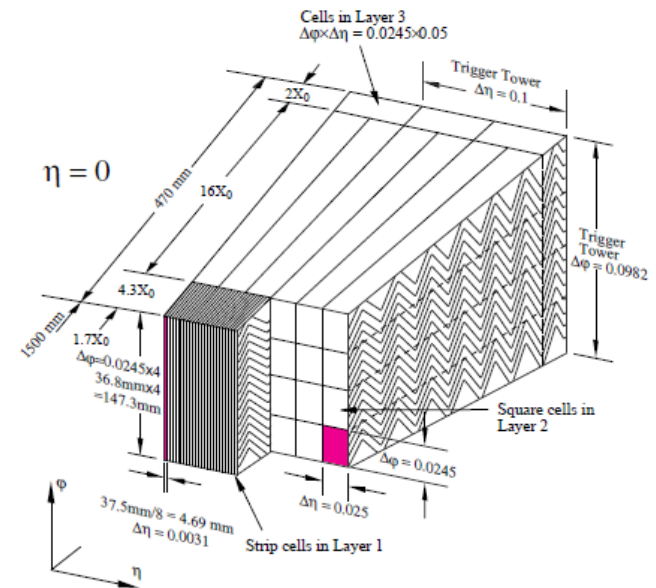
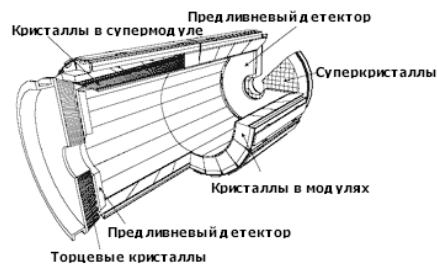
- Чередующиеся слои поглотителя (Pb) и активного вещества (типично-пластиковый сцинтиллятор)
- дешевле
- Возможна тонкая сегментация
- $6-20\% / \sqrt{E}$



Электромагнитные калориметры

Элемент гомогенного EM калориметра установки CMS :
Кристаллы $PbWO_4$ + ФЭУ

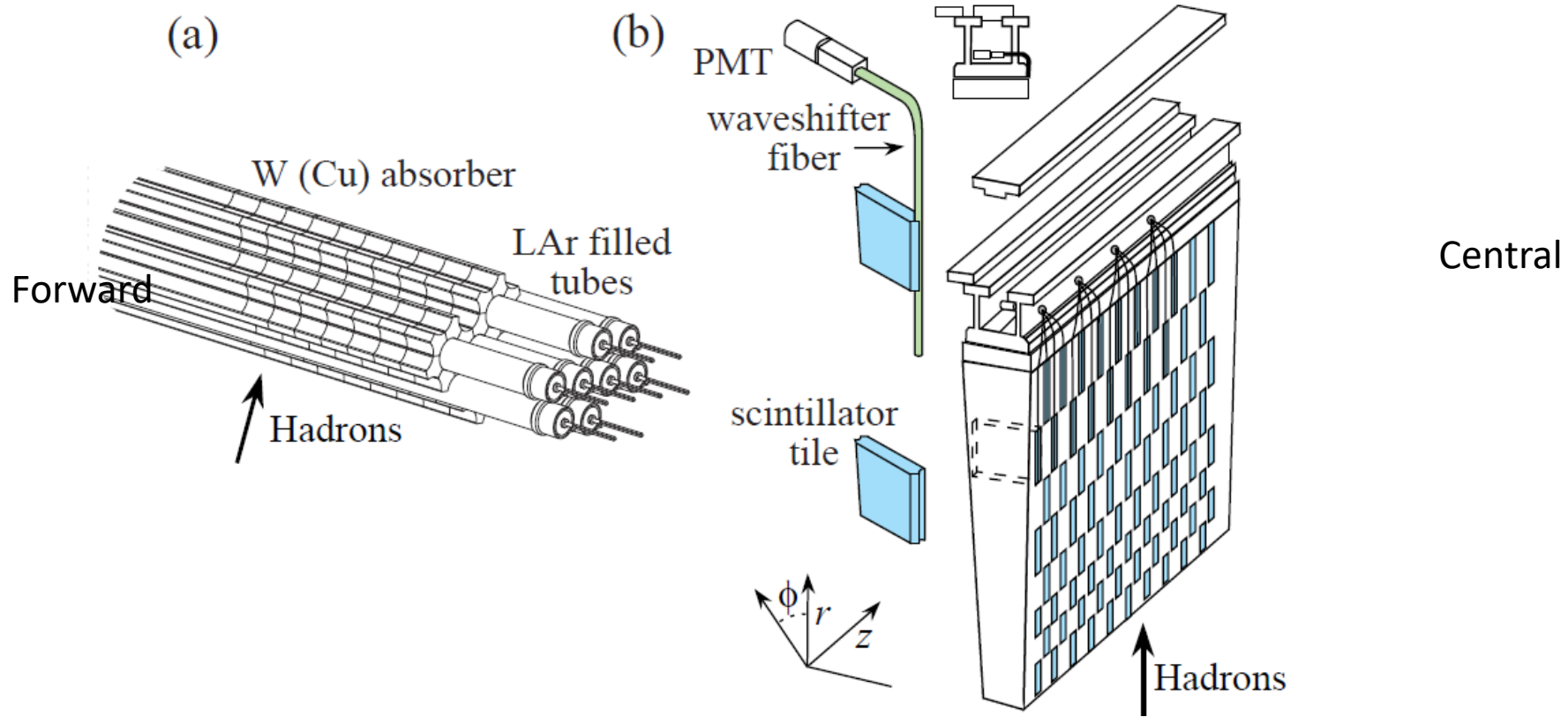
Элемент гетерогенного EM калориметра установки ATLAS :
Свинцовый поглотитель и жидкоаргонная ионизационная камера



Адронные калориметры

- Адронные калориметры похожи на гетерогенные EM калориметры, но гораздо грубее и больше
- Типичная конструкция – чередование слоев пассивного вещества (железо) и детекторов (например – сцинтилляторов)
- Адроны могут оставлять значительную часть своей энергии в EM калориметре.
- Типичная точность определения энергии адронов $50-100\%/\sqrt{E} (GeV)$

Адронные калориметры установки АТЛАС



Трековые системы и калориметры: сравнение

Трековые системы

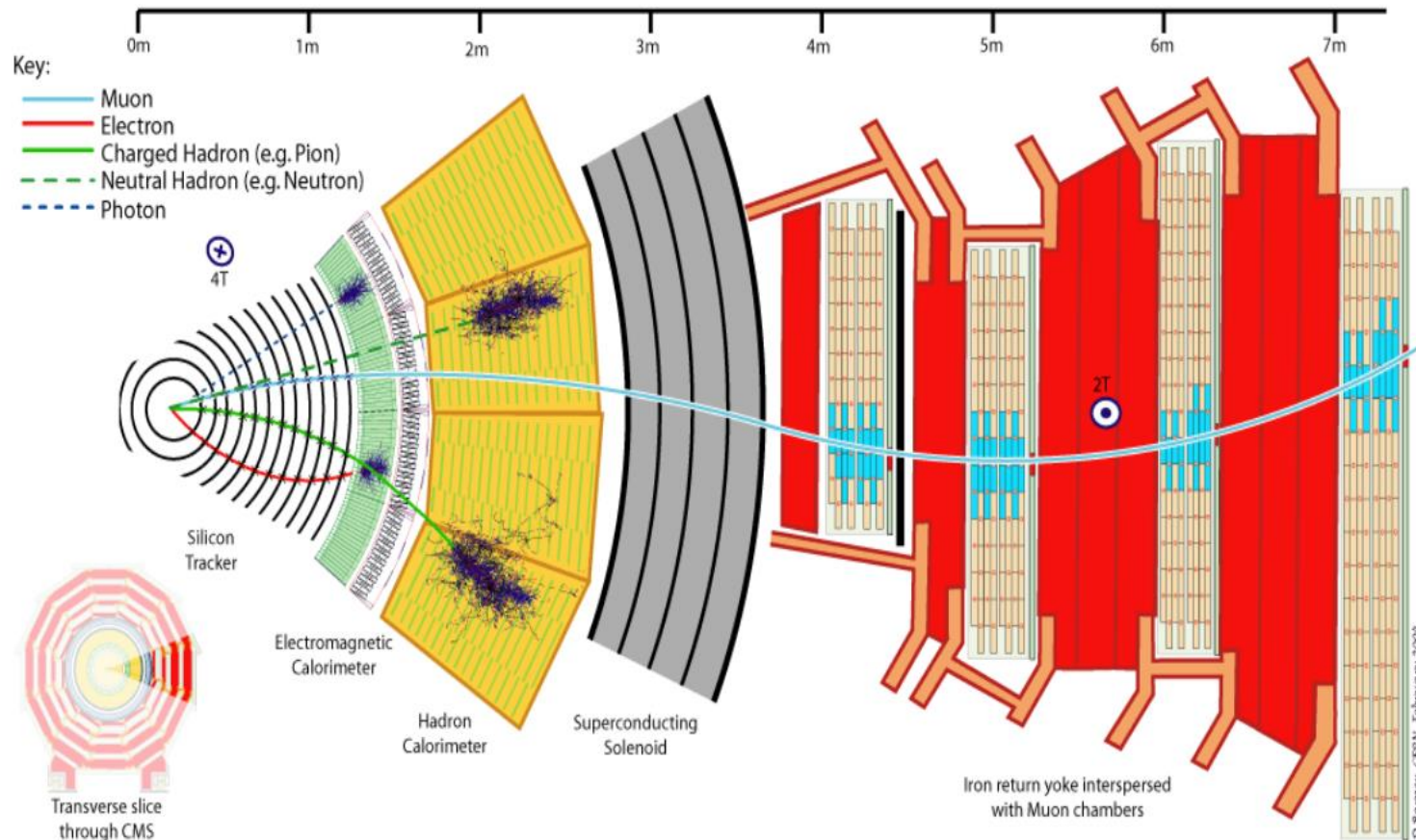
- Только заряженные частицы
- Как правило более высокая точность
- Точность падает с ростом импульса
 - $\sigma(P)/P \sim P$

Калориметры

- Все кроме мюонов
- Позволяет определить общую энергию тесной группы частиц(струи) когда разделить их трудно
- Точность улучшается с ростом энергии:
 $\sigma(E)/E \sim 1/\sqrt{E}$

Идентификация частиц

Характер взаимодействия в детекторе позволяет идентифицировать фотоны, электроны, мюоны.
Все заряженные адроны взаимодействуют одинаково



Идентификация заряженных адронов

$\pi, K, p - ???$

- По удельной ионизации в трековой системе (при известном импульсе).

$$\frac{\Delta E}{\Delta x} = -\rho \frac{2KZ}{A\beta^2} \left[\ln \frac{2mc^2\beta^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 - \frac{C}{Z} - \frac{\delta}{2} \right]$$

- С помощью прямого измерения скорости (Времяпролетные системы) Характерная точность 60 ps позволяет разделять π и K^\pm до 1-2 GeV
- По черенковского излучения в специально подобранном радиаторе или факту его наличия/отсутствия

Об идеальном детекторе

- Не бывает идеальных или самых лучших детекторов. Реальная установка – это всегда компромисс.
- Система, которой Вы занимаетесь не должна обеспечивать лучшие в мире характеристики. Она должна решать поставленные задачи.

Определение задач эксперимента

**Формулировка требований к
экспериментальной установке**

Выбор конкретной реализации

Ускорители и эксперименты

Эксперименты с
неподвижной мишенью

Эксперименты на
ускорителях встречных
пучков

Эксперименты на
протон-протонных
или протон-
антипротонных
коллайдерах

Эксперименты на
электрон-
позитронных
коллайдерах



Эксперименты адронных коллайдерах

- Максимальная доступная энергия столкновений
 - Синхротронное излучение протона мало и не ограничивает максимальную энергию пучков. Сравните: для LEP максимальная достигнутая энергия пучков 104 ГэВ, а для БАК, расположенного в том же кольце – 7000ГэВ
- Очень большое сечение взаимодействия адронов не падающее с ростом энергии => возможность наблюдать очень редкие события
- Плохо определенная энергия столкновений
 - Взаимодействующие партоны несут неопределенную часть общей энергии
- Высокий фон

Эксперименты адронных коллайдерах

- Эксперименты на адронных коллайдерах – **«ПОИСКОВЫЕ»**
- SPS
 - Открытие W и Z бозонов
- Tevatron
 - Открытие t-кварка
- LHC
 - Открытие бозона Хиггса

Эксперименты адронных коллайдерах

Требования к установке.

- Измерять импульс / энергию с приемлемой точностью вплоть до очень высоких энергий
- Сохранять работоспособность в условиях очень высоких потоков частиц
- Идентифицировать энергичные фотоны, электроны и мюоны
- С хорошей точностью определять энергию адронных «струй»

Эксперименты на электрон-позитронных коллайдерах

- Точно определенная энергия столкновений => сохранение 4-импульса чрезвычайно мощный инструмент анализа.
- Фиксированные квантовые числа системы образующейся в столкновении.
- Возможность наблюдать «меченные» распады
- Возможность исследовать квантово-связанные пары частиц
- Минимальный уровень фона
- **Эксперименты «точных измерений»**

Эксперименты на электрон-позитронных коллайдерах

- Максимально возможное импульсное разрешение, минимальное количество вещества в трековой системе
- Максимально качественная электромагнитная калориметрия
- Эффективное полное восстановление событий
- Идентификация пионов, каонов и протонов и лептонов

Эксперименты с неподвижной мишенью

- Практически все эксперименты с неподвижной мишенью используют вторичные пучки
 - Возможность использовать разные пучки (p , π , K , μ)
 - Возможность по ходу эксперимента менять мишень а также энергию и тип пучка
- Возможность использовать поляризованные мишени
- Легкий доступ к элементам установки, возможность менять конфигурацию установки в зависимости от задачи.
- Существенно меньшая стоимость. Один ускоритель обслуживает множество экспериментов
- Таких экспериментов может быть МНОГО