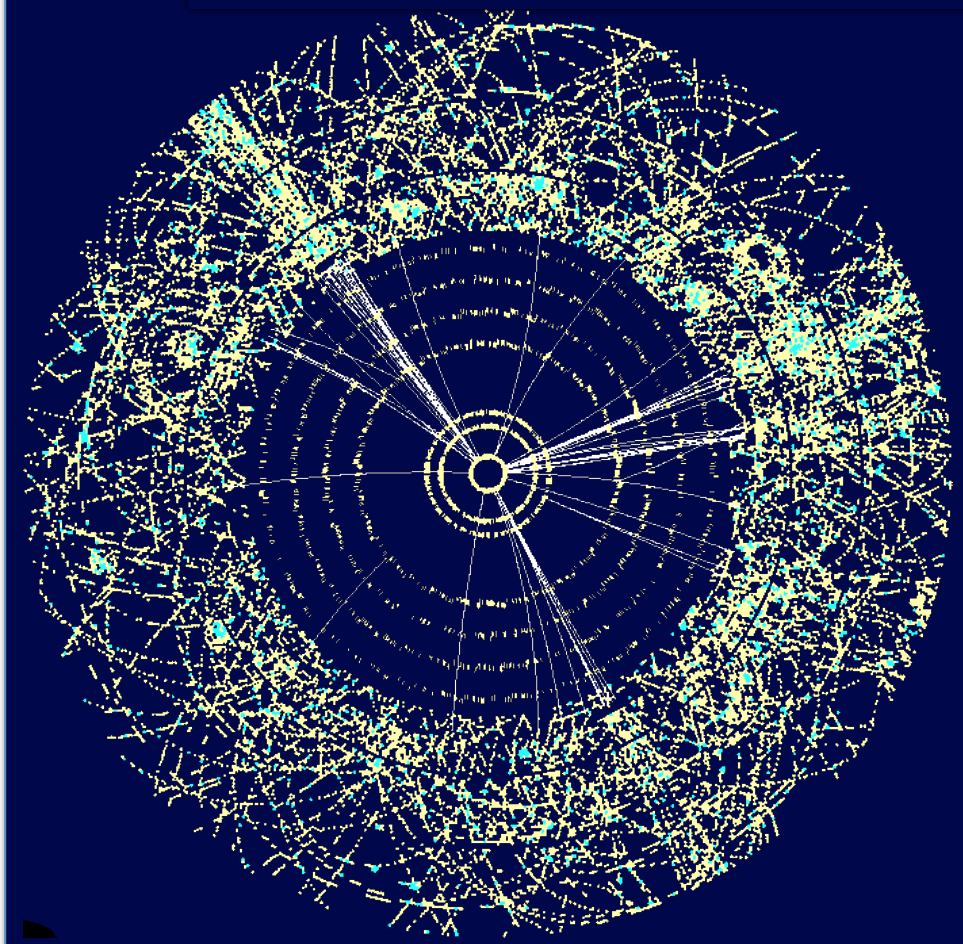
Лабораторная работа 1: вводная лекция.

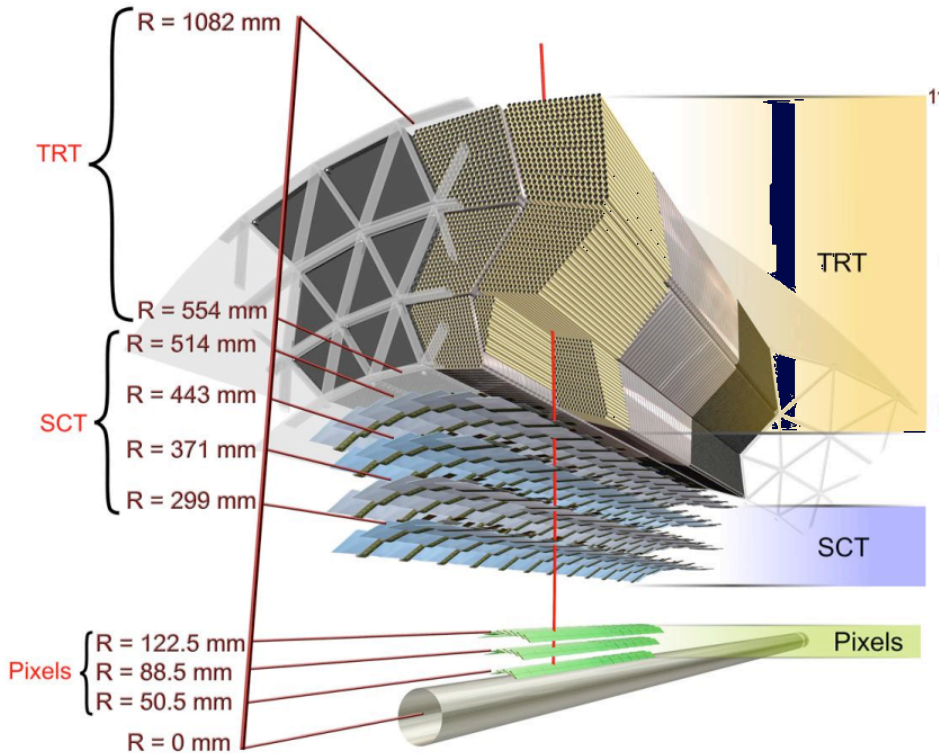


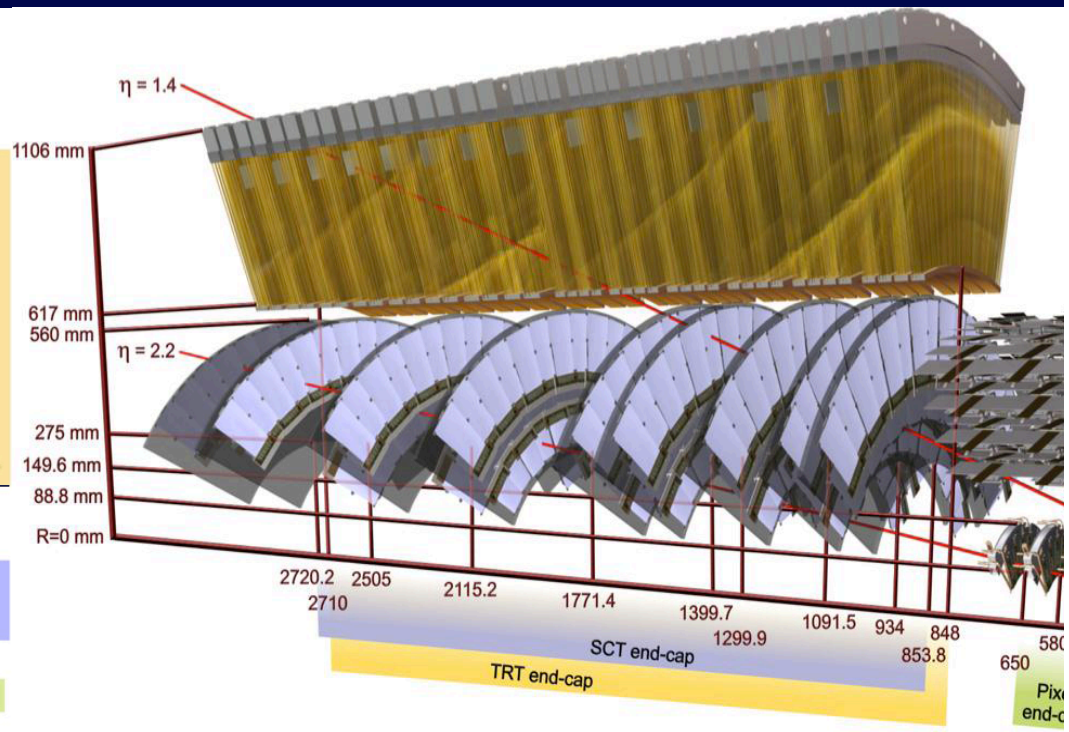
TRT: Трековый Детектор Переходного Излучения.

Базовые принципы работы TRT.

- *Устройство TRT.*
  - *Устройство тонкостенноий пропорциональной камеры*
  - *Устройство End-Cap TRT*
  - *Устройство Barrel TRT*
- *Ионизация, переходное излучение.*
- *Процессы в пропорциональной камере:*
  - *Дрейф электронов*
  - *Диффузия*
  - *Газовое усиление*
  - *Дрейф ионов*
- *Токовый сигнал с трубки.*
- *Устройство электрических соединений в прототипе TRT.*
- *Наддетекторная (Front-end) электроника и процессинг сигналов.*
- *Шумы электроники, пороги дискриминации, физические характеристики.*

TRT (Трековый Детектор Переходного Излучения)





Центральная (Barrel) часть Внутреннего Детектора ATLAS эксперимента

Торцевая (End-Cap) часть Внутреннего Детектора ATLAS эксперимента.

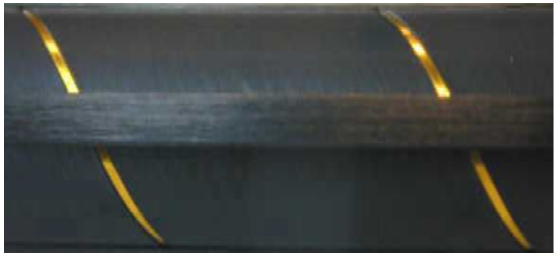
Комбинированный Трековый Детектор Переходного Излучения (Transition Radiation Tracker – TRT), являетсся частью внутреннего детектора ATLAS и предназначен для измерения импульсов частиц и идентификации электронов, используя явление переходного излучения.

Barrel - 52544 straws
End-Caps - 319488 straws
Общее число каналов электроники - 424576

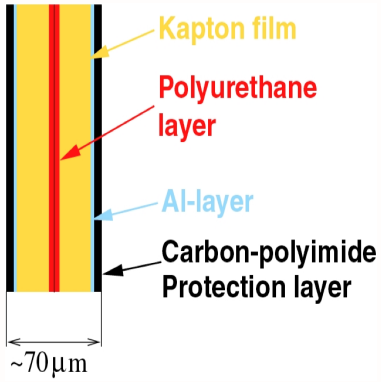
Основной детектирующий элемент TRT:

Тонкостенная цилиндрическая пропорциональная камера.

Обладает уникальной радиационой стойкостью
Диаметр катода - 4 мм
Диаметр анода - 30 мкм



Технология разработана в МИФИ



Торцевая часть (End-Cap) TRT.

Straws расположены в радиальном направлении по отношению к пучку частиц.

Радиаторы переходного излучения сделаны из полипропиленовой пленки толщиной 15 мкм.

Многослойная гибкая плата изготовленая из полиимидной пленки (Kapton)

Кольца End-Cap TRT во время и после сборки

Устроийство End-Cap колец.

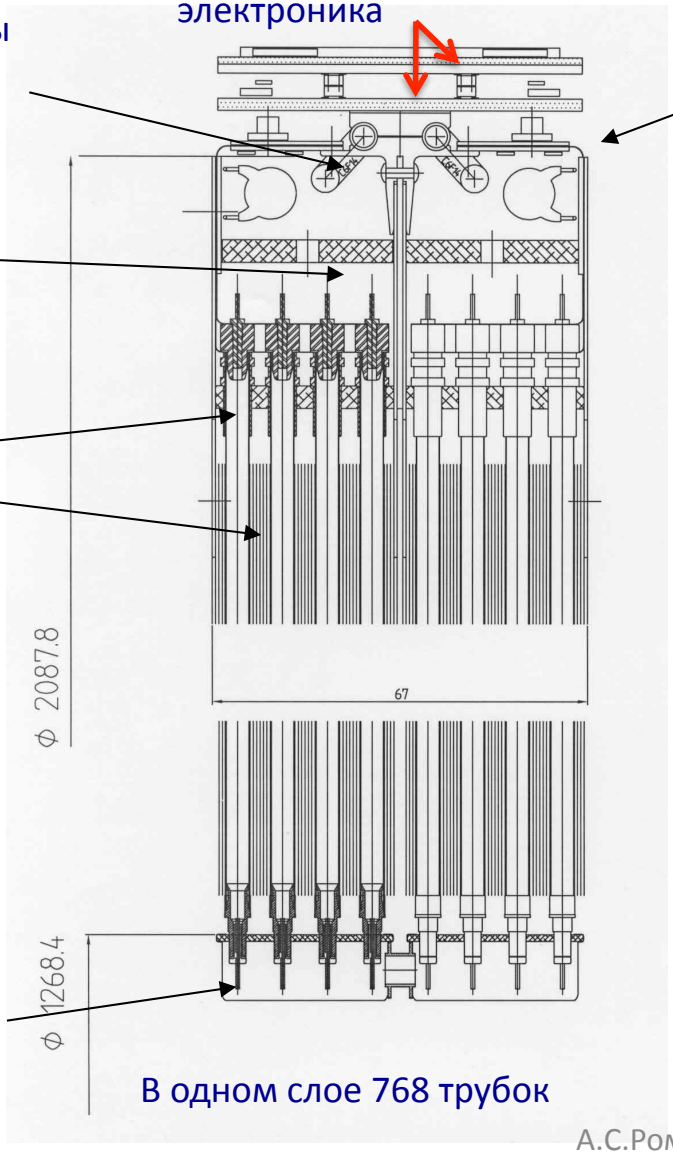
Front-end электроника

Трубы системы охлаждения

Многослойная гибкая Kapton плата

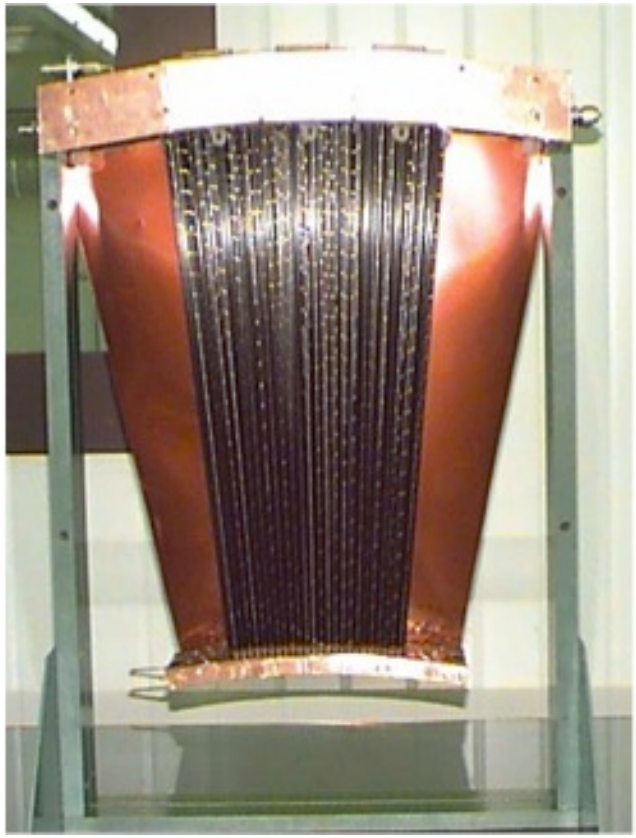
Внешний газовый коллектор

Straws и радиаторы переходного излучения



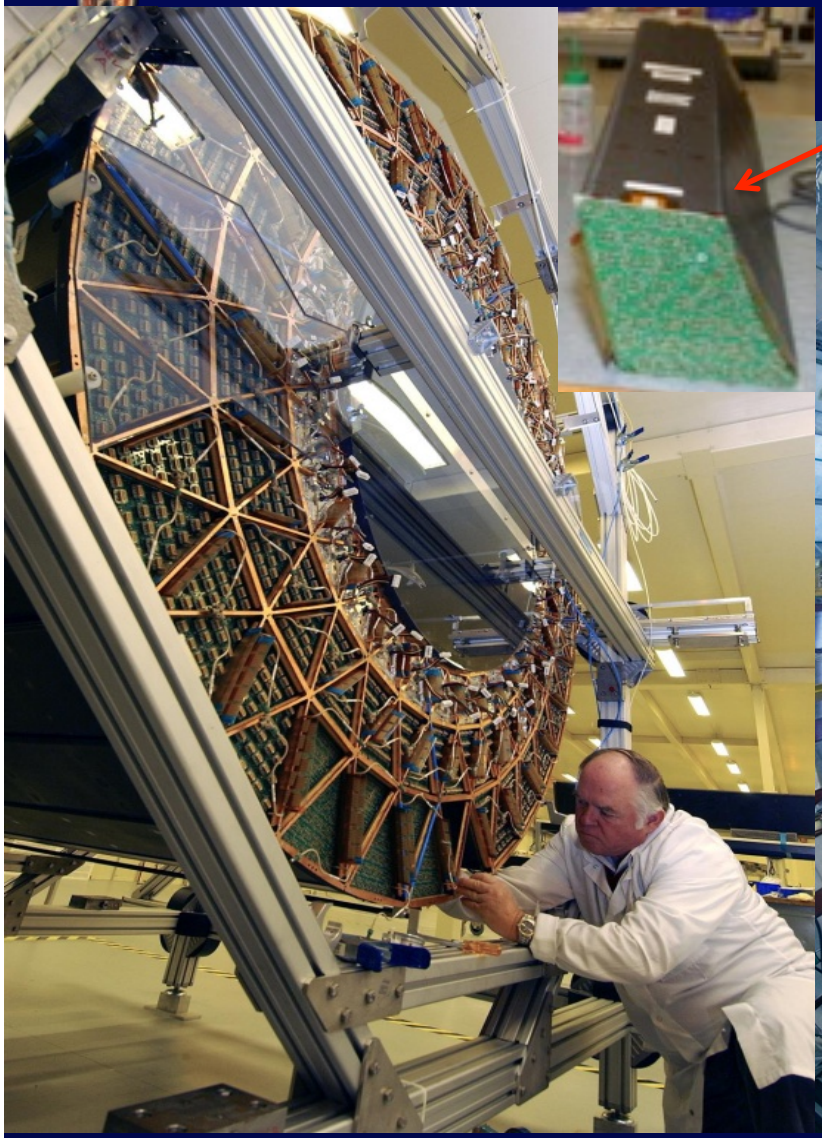
Внутренний газовый коллектор

В одном слое 768 трубок



Прототип для испытаний электроники на пучке частиц представляющий 1/32 часть полного End-Cap колеса.

Центральная часть (Barrel) TRT.

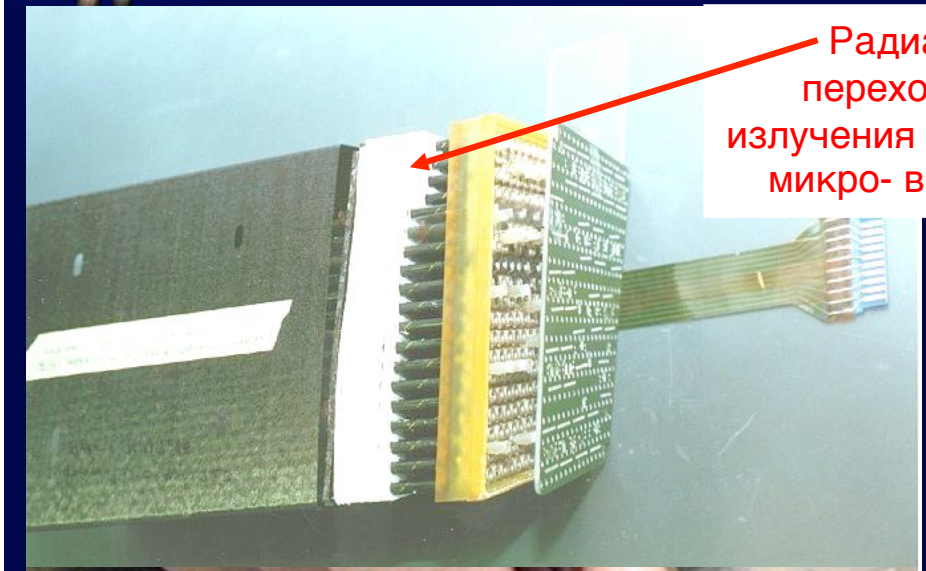


Модуль центральной части TRT

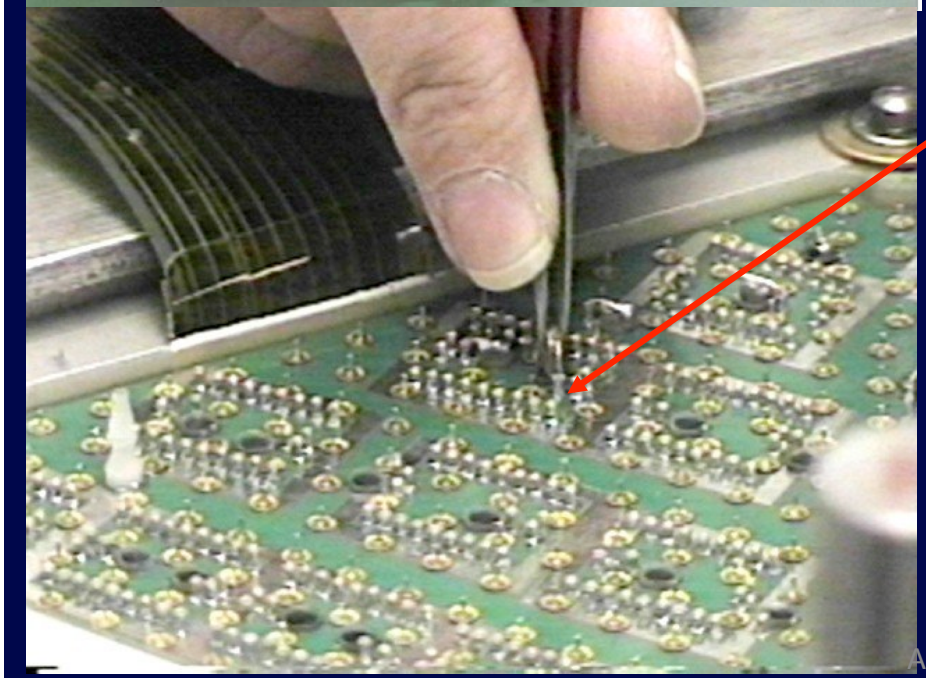
Центральная TRT (Barrel) во время сборки

Центральная часть TRT во время тестирования после установки в ATLAS эксперимент.

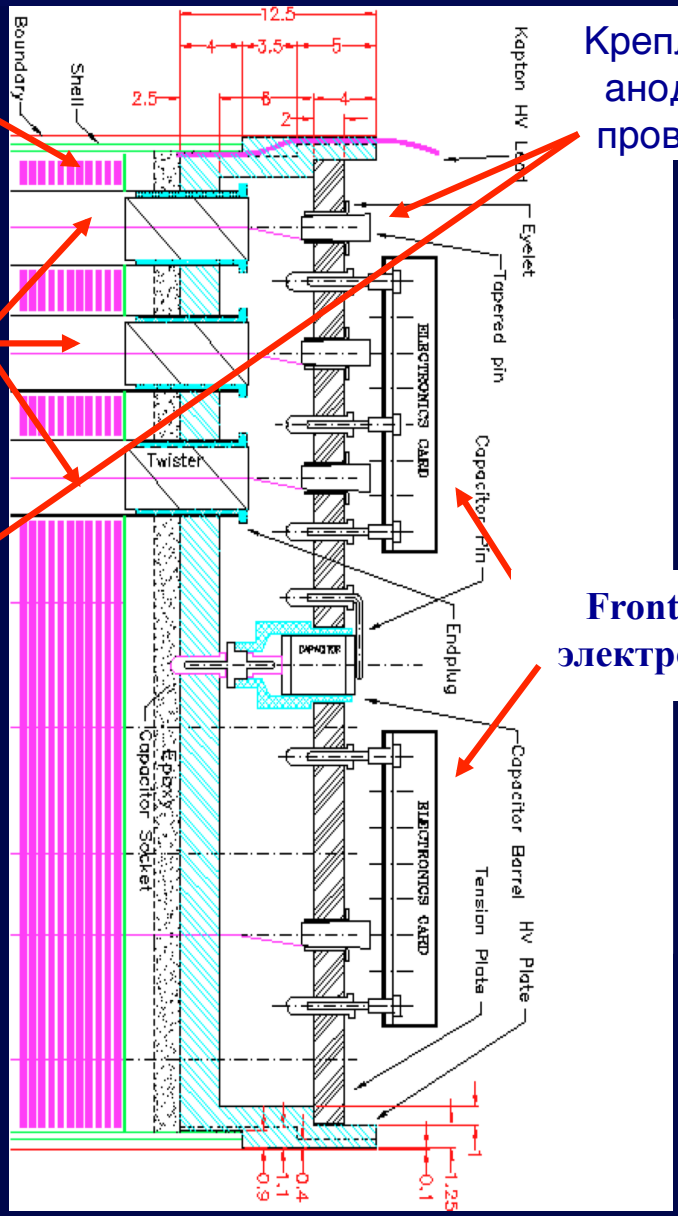
Устройство центральной (Barrel) части TRT.



Радиатор переходного излучения на основе микро- волокон.



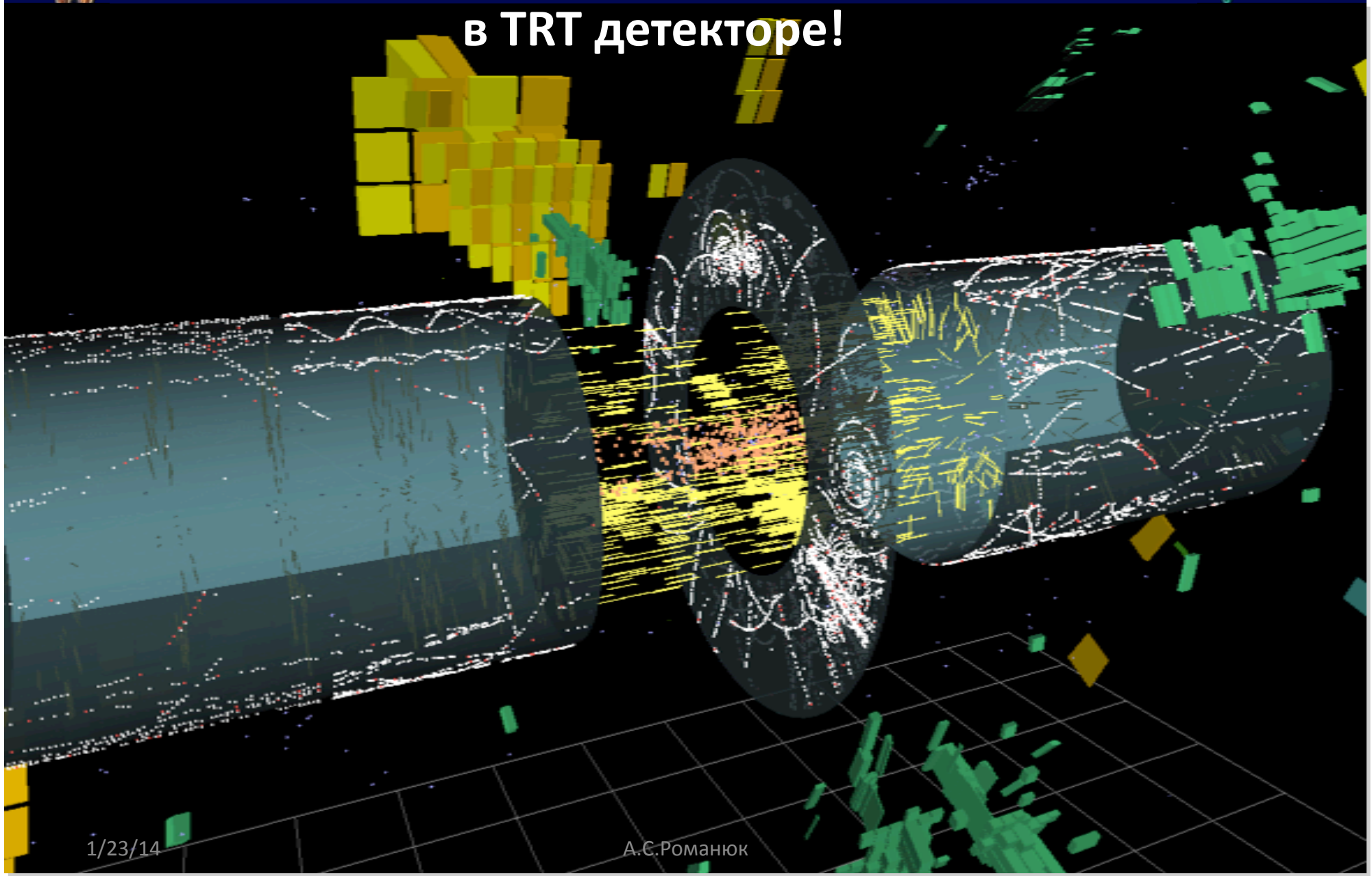
Straws



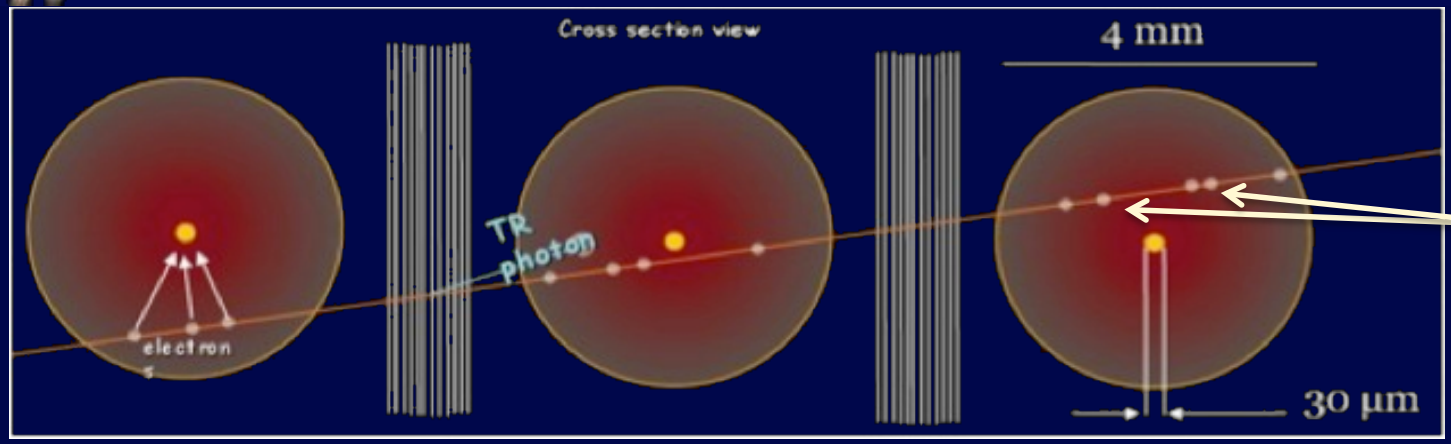
Крепление анодных проволок

Front-end электроника

Так реальное физическое событие выглядит в TRT детекторе!



Ионизация на следе заряженных частиц.



Первичные кластеры ионизации

Потери энергии

Число первичных столкновений

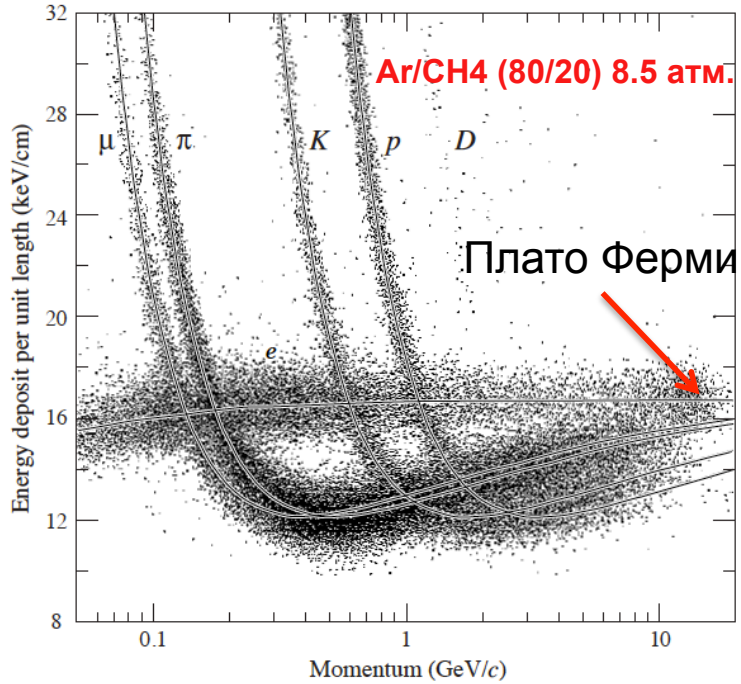
Число электон - ионных пар

Gas	Density, $mg\,cm^{-3}$	E_x eV	E_I eV	W_I eV	$dE/dx\|_{min}$ $keV\,cm^{-1}$	N_P cm^{-1}	N_T cm^{-1}
He	0.179	19.8	24.6	41.3	0.32	3.5	8
Ne	0.839	16.7	21.6	37	1.45	13	40
Ar	1.66	11.6	15.7	26	2.53	25	97
Xe	5.495	8.4	12.1	22	6.87	41	312
CH_4	0.667	8.8	12.6	30	1.61	28	54
C_2H_6	1.26	8.2	11.5	26	2.91	48	112
iC_4H_{10}	2.49	6.5	10.6	26	5.67	90	220
CO_2	1.84	7.0	13.8	34	3.35	35	100
CF_4	3.78	10.0	16.0	54	6.38	63	120

Очень важно знать!

В среднем, в одном столкновении теряется ~100 эВ энерии и образуется ~4 свободных электрона.

Ионизация и пробеги δ - электонов в Ar-смесях.



Потери на плато ионизации в этом газе
17 кэВ/см (немного меньше чем ожидалось бы из таблицы!)

Зависимость удельной ионизации от импульса частицы

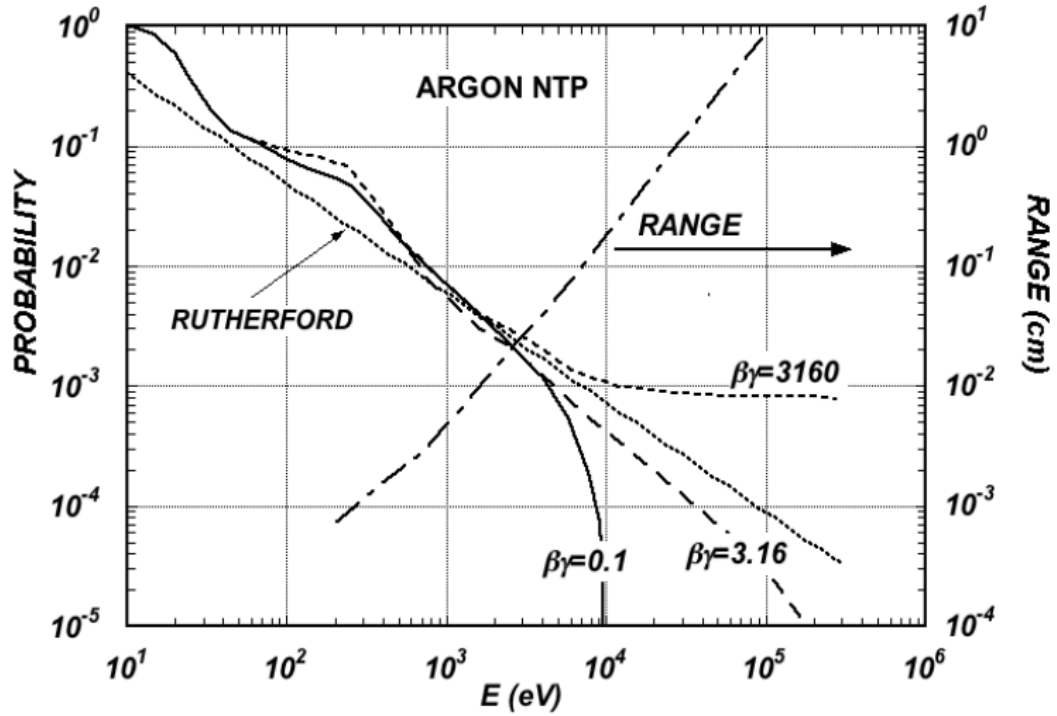


Figure 32.3: Probability of single collisions in which released electrons have an energy E or larger (left scale) and practical range of electrons in Ar/CH_4 (P10) at NTP (dot-dashed curve, right scale) [60].

Вероятность образования δ−электрона с энергией E и его пробег.

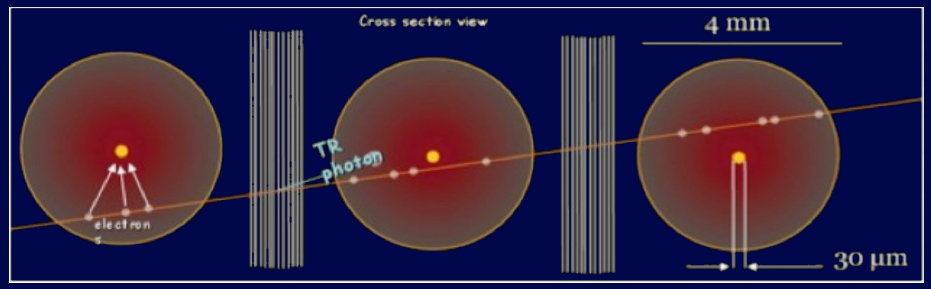
Вероятноть выбить электон с энергией больше 1 кэВ ~ $6*10^{-3}$.

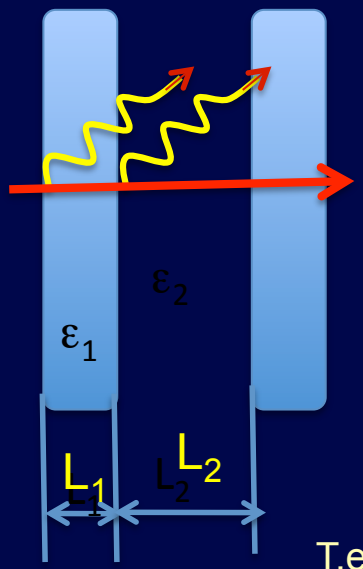
Пробег электрона с энергией 1 кэВ в данном газе ~ 50 мкм а для 10кэВ пробег ~ 2 мм

Переходное излучение (ПИ).

Переходное излучение возникает когда заряженная частица пересекает границу сред с различными диэлектрическими проницаемостями.

В ретнгеновской области вероятность излучения фотона на границе ~ α (1/137)





Требования к радиатору:

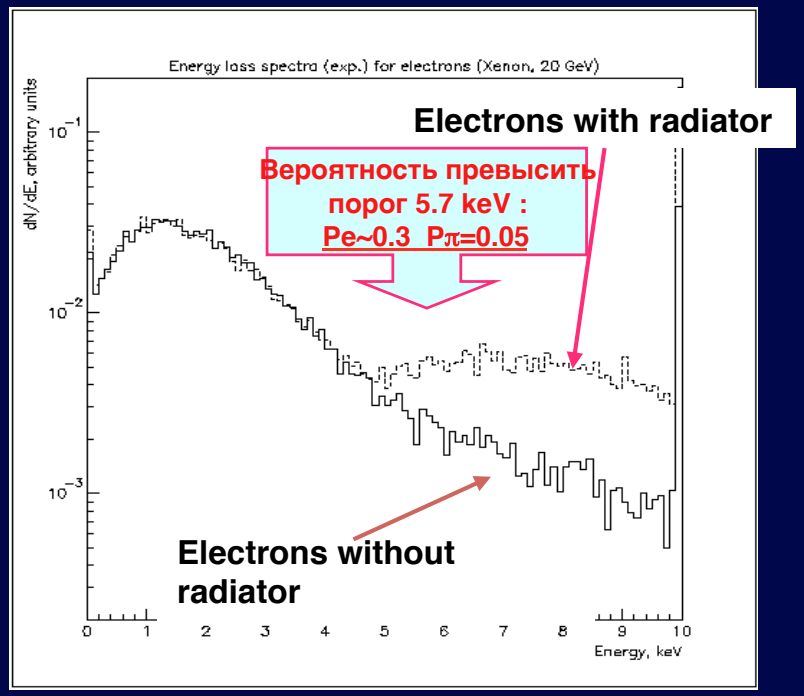
- Максимальное отношение $\varepsilon_1/\varepsilon_2$
- Минимальный заряд атомов среды (поглощение).
- L_1 и L_2 сравнимы с зонами формирования излучения.

Важно поминть!

Угол вылета фотонов ПИ ~ $1/\gamma$
Т.е. практически все поглощенные в детекторе фотоны находятся на треке частицы.

Для поглощения ПИ используются Xe-смеси!

Выбор порога для регистрации ПИ.

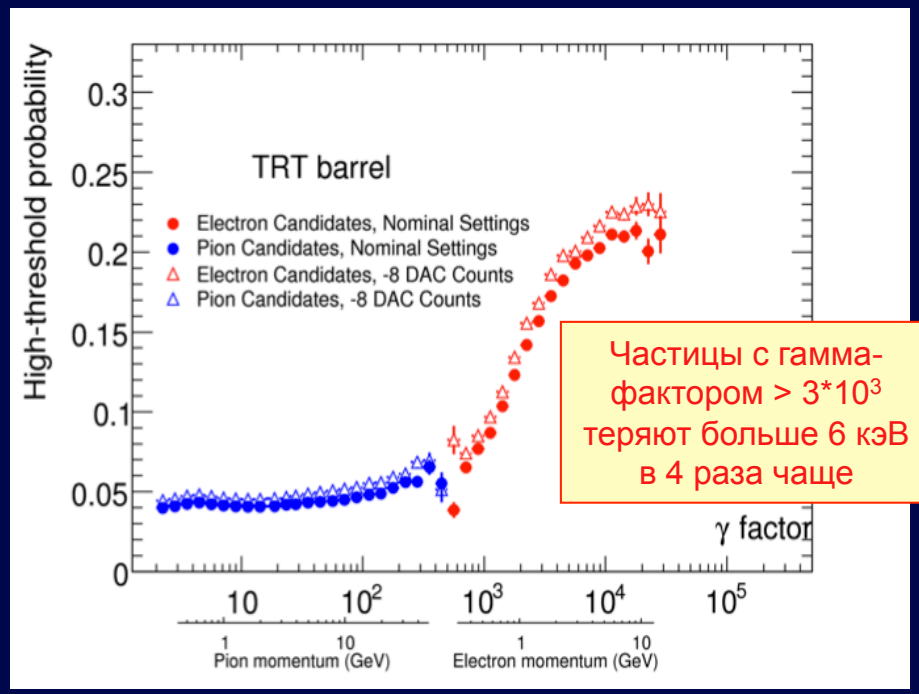


Дифференциальный спектр потерь в трубке для электронов без радиатора и с радиатором ПИ.

Переходное излучение.

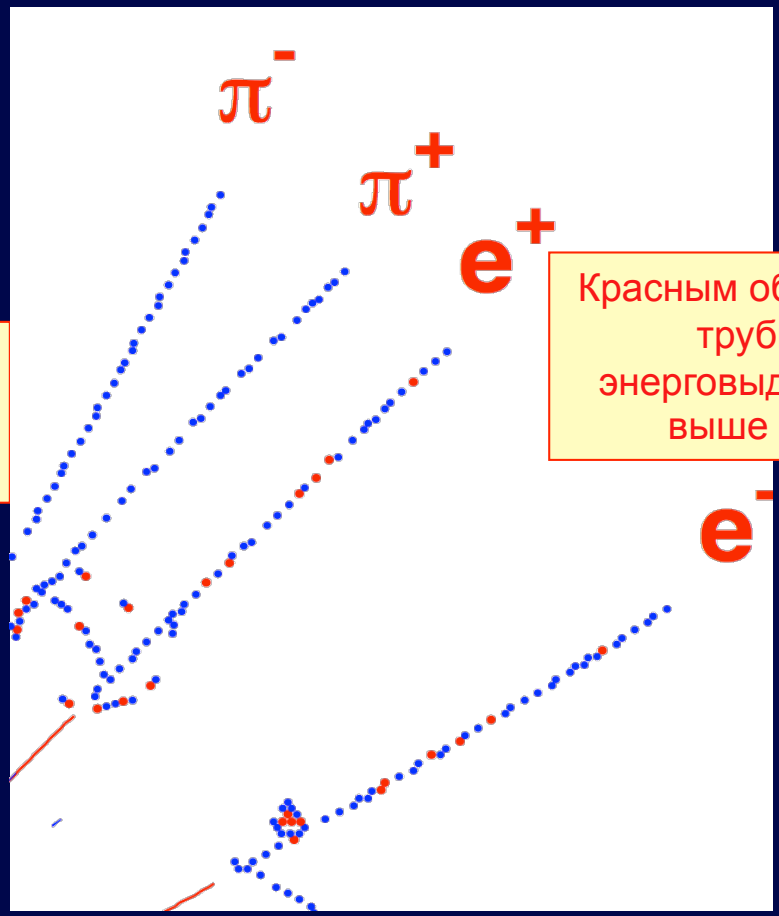
В рентгеновской области выход ПИ имеет пороговый характер.

Это свойство используется для идентификации частиц.



Частицы с гамма-фактором > $3*10^3$ теряют больше 6 кэВ в 4 раза чаще

Зависимость вероятности потерь энергии больше 6 кэВ в трубке от гамма фактора частицы.

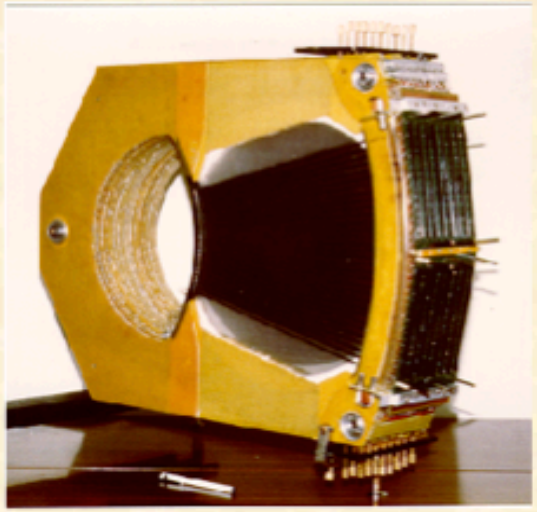


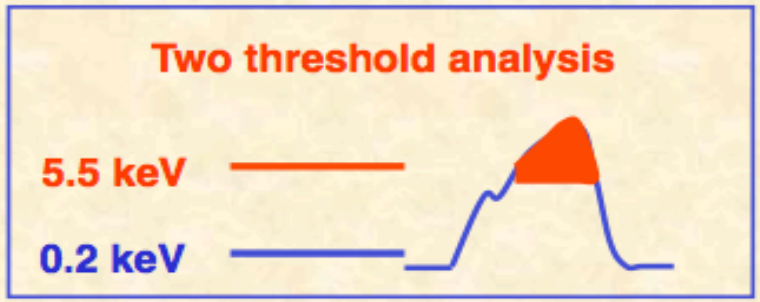
Красным обозначены трубки с энерговыделением выше 6 кэВ

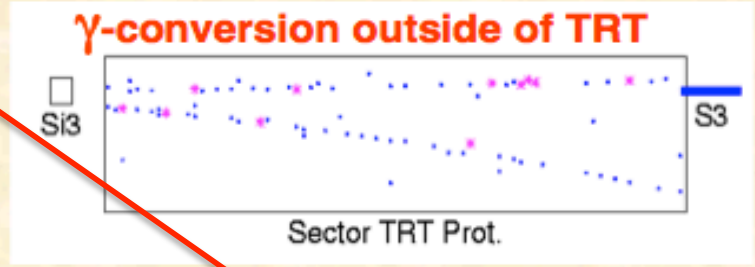
Переходное излучение.

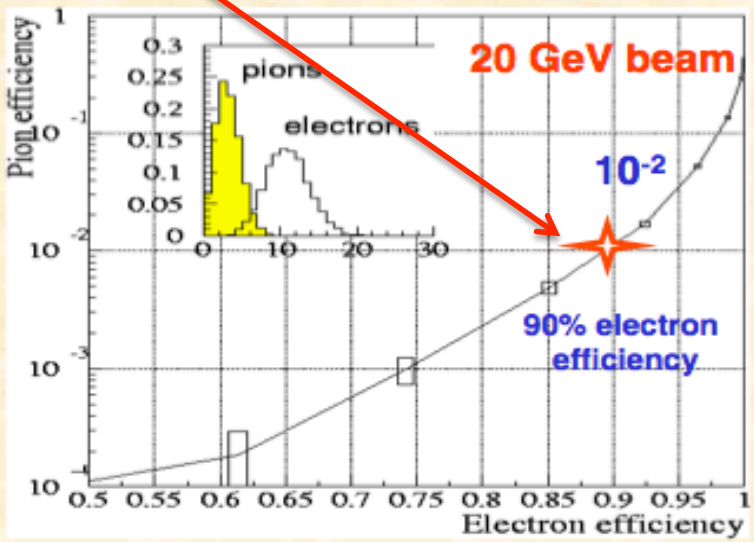
Распределение числа хитов выше порога ПИ на треке TRT носит практически пуассоновский характер.

Как правило, степень подавления частиц с малым гамма-фактором (уровень режекции) определяют для 90% вероятности регистрации электронов.





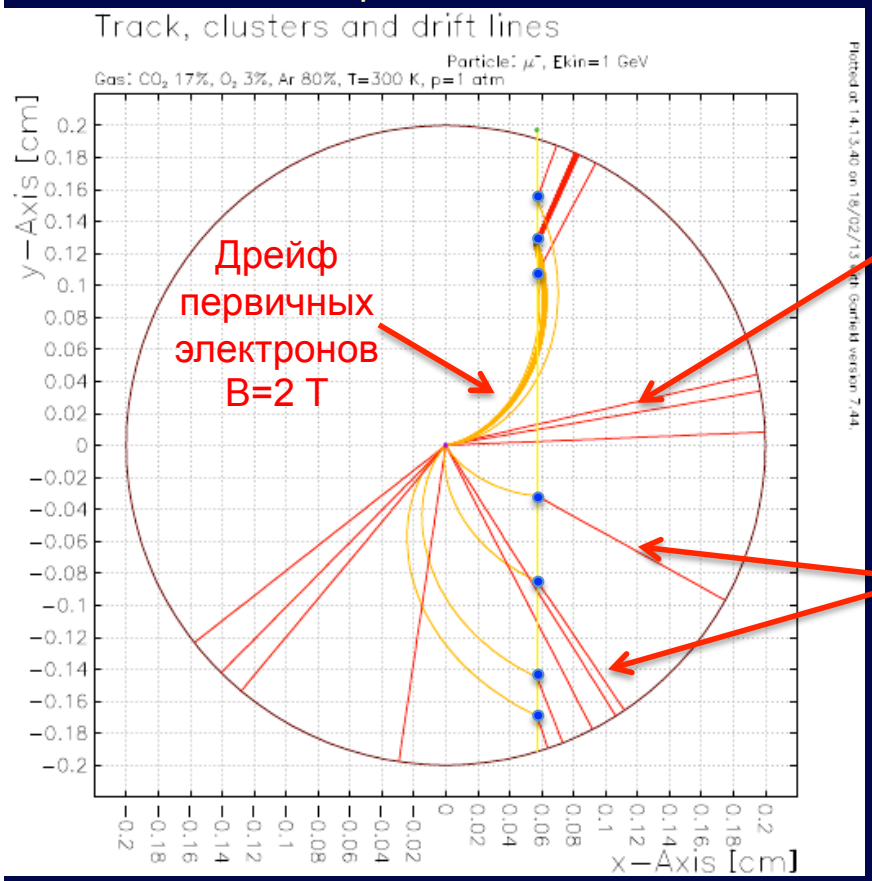




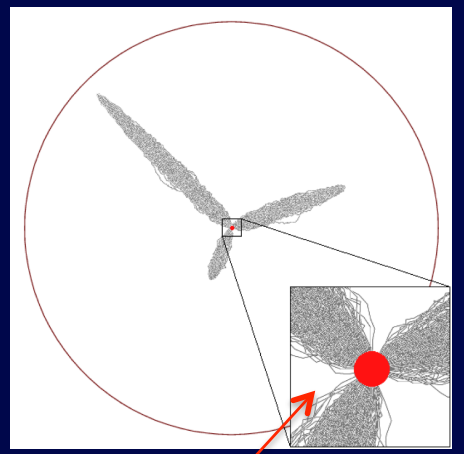
Процессы в пропорциональной камере после прохождения частицы.

Кластеры ионизации в среднем содержат несколько электронов, поэтому для увеличения сигнала используется явление размножения электронов в сильных электрических полях.

- Дрейф электронов
- Диффузия
- Газовое усиление
- Дрейф ионов



Диффузионное уширение электронного облака

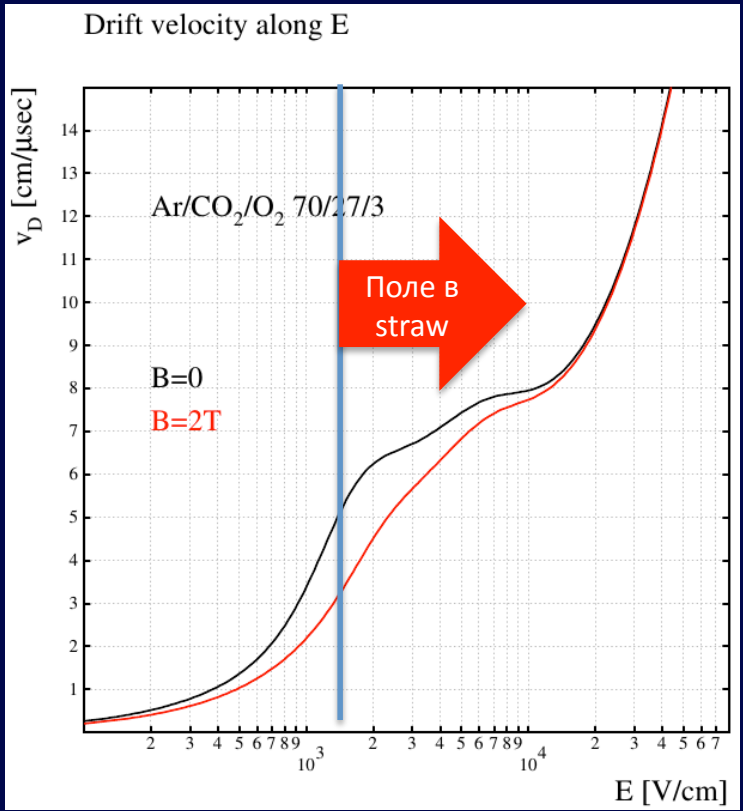


Фокусировка электронов электрическим полем вблизи анода

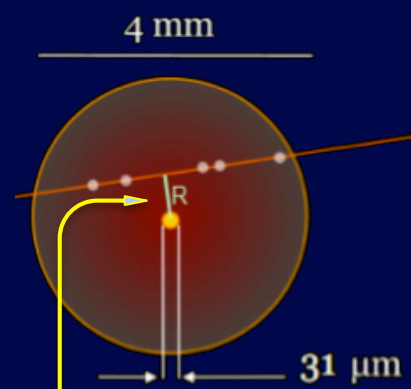
Развитие лавины вблизи анода

Важно помнить!
Размер лавины сравним с диаметром анода.

Дрейф электронов.



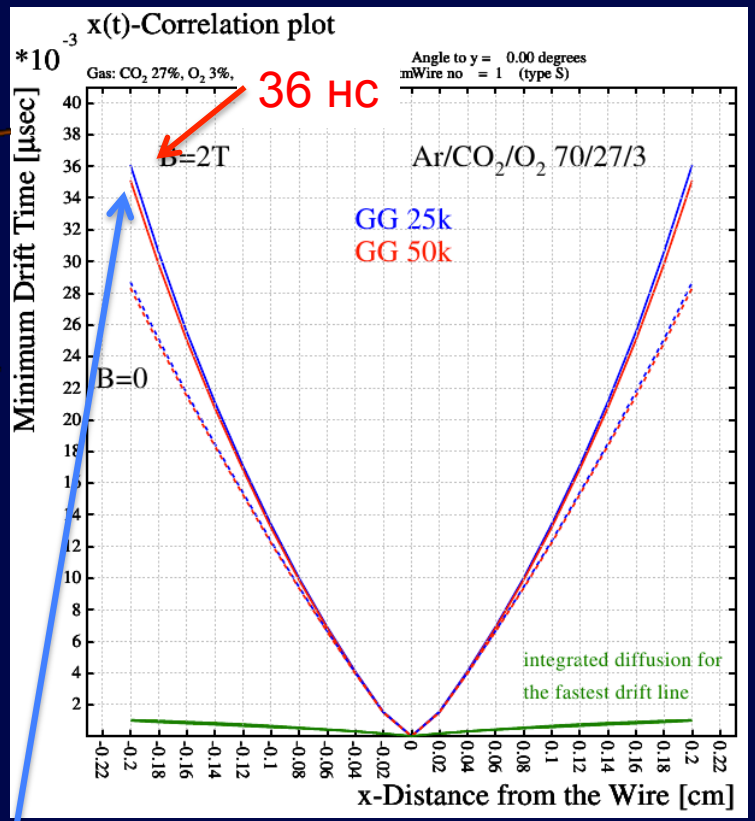
Скорость дрейфа электронов как функция электрического поля. Без магнитного поля и в случае магнитного поля перпендикулярного электрическому.



R - это то что мы хотим знать для определения трека частицы!

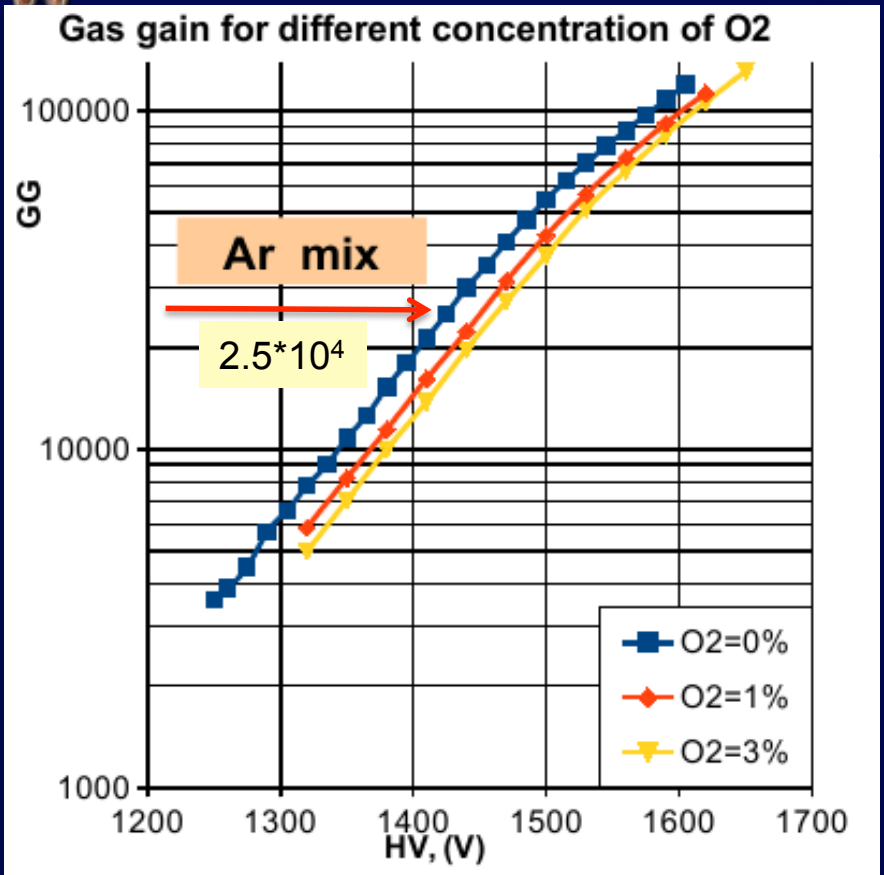
Расстояние между bunches в LHC 25 нс.

Полное время собирания должно быть минимальным!

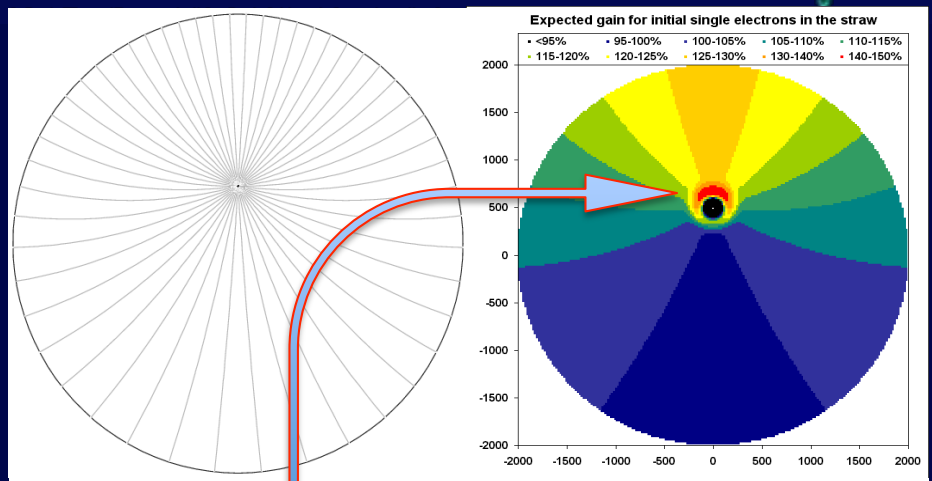


Время, которое требуется электрону чтобы достичь анода как функкция радиуса начального положения элекрона.

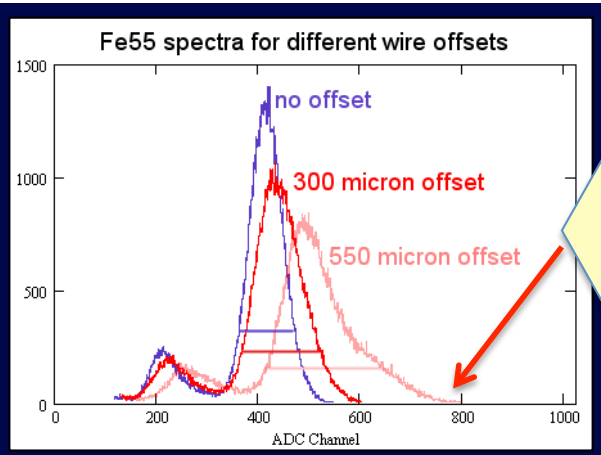
Газовое усиление.



Зависимость коэффициента газового усиления от напряжения на анодной проволоке для разных газов.



Смещение проволоки на 400 мкм приводит к образованию «горячей области» около проволоки где коэффициент усиления в 1.5 и более раз больше чем в случае ее центрального положения.



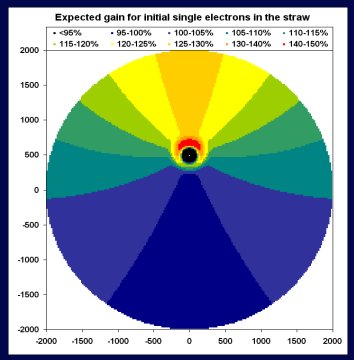
Локально высокая напряженность электрического поля приводит к возникновению сигналов с большой амплитудой

Рабочее газовое усиление в TRT $2.5*10^4$ достигается при 1430 В в газовой смеси Ar/CO2 (70/30), при 1470 В в газовой смеси Ar/CO2/O2 (70/27/3) и при 1530 В в газовой смеси Xe/CO2/O2 (70/27/3).

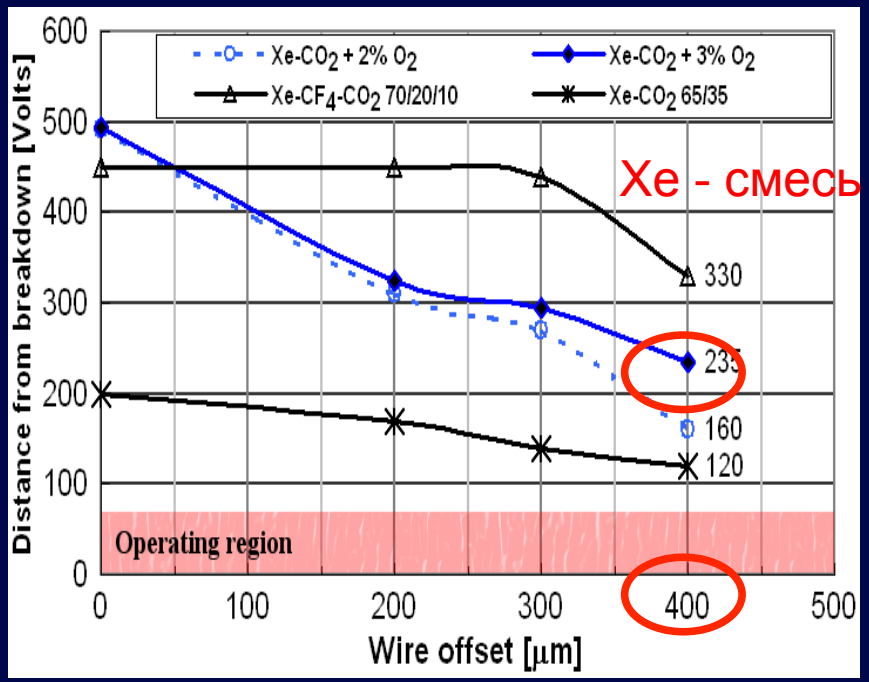
Выбор газового усиления.

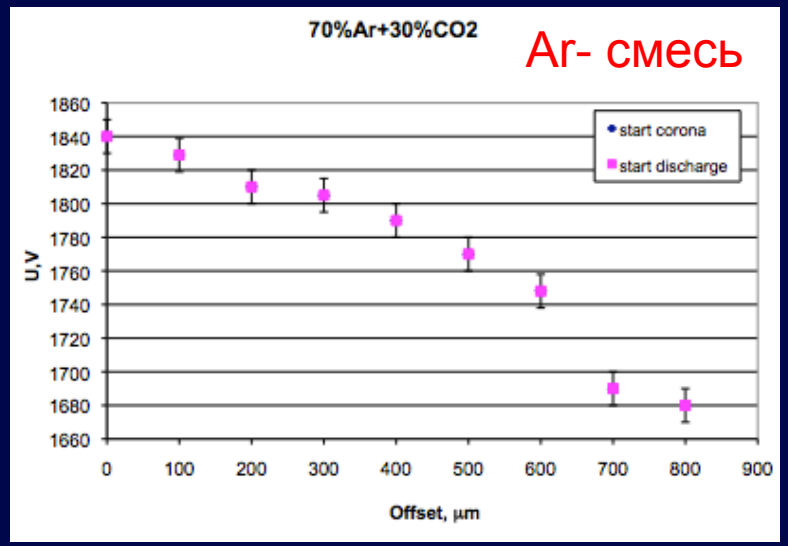
Чаще всего, основным критерием выбора газового усиления является стабильноть ее работы.

Стабильность критическим образом зависит от газовой смеси, устройства камеры, отклонений параметров камеры от идеальных, условий работы детектора (сорт частиц, интенсивность облучения ...) и т.д.



При выборе напряжения всегда оставляют запас по напряжению, который гарантирует стабильную работу камеры.

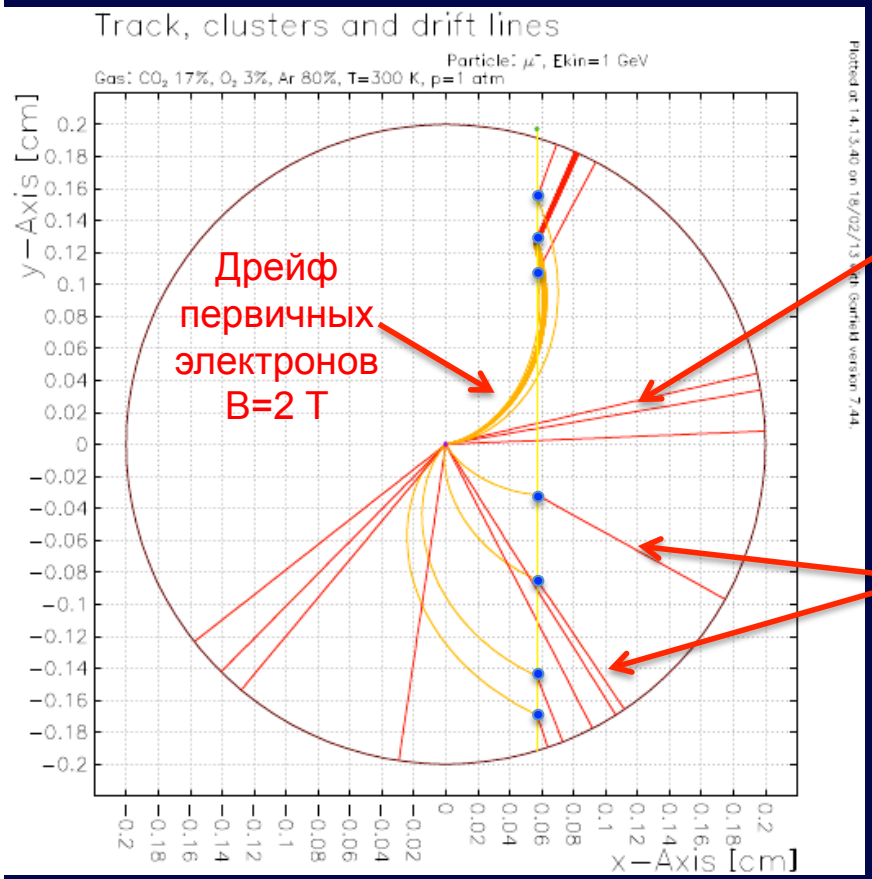




Отклонение нити от центрального положения приводит с существенному снижению пробойного напряжения.

Что происходит с ионами?

Подвижность ионов на несколько порядков меньше подвижности электронов.
Однако около анода их скорость велика.



Подвижность ионов в газах

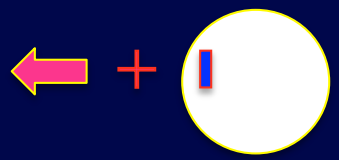
Gas	Ion	Mobility μ ($cm^2\ V^{-1}\ s^{-1}$)
He	He^+	10.4
Ne	Ne^+	4.7
Ar	Ar^+	1.54
Ar/CH_4	CH_4^+	1.87
Ar/CO_2	CO_2^+	1.72
CH_4	CH_4^+	2.26
CO_2	CO_2^+	1.09

$E_a = V/r_a*\ln(r_c/r_a) = 1470V/0.0015*4.9$
$=200$ kV/cm

Для Ar $v=1.54*2*10^5$ **$=3*10^5$ см/сек**

NB: Скорость дрейфа электронов в трубке
$5*10^6$ см/сек

Ионы должны отойти от поверхности проволоки чтобы потек ток в цепи!

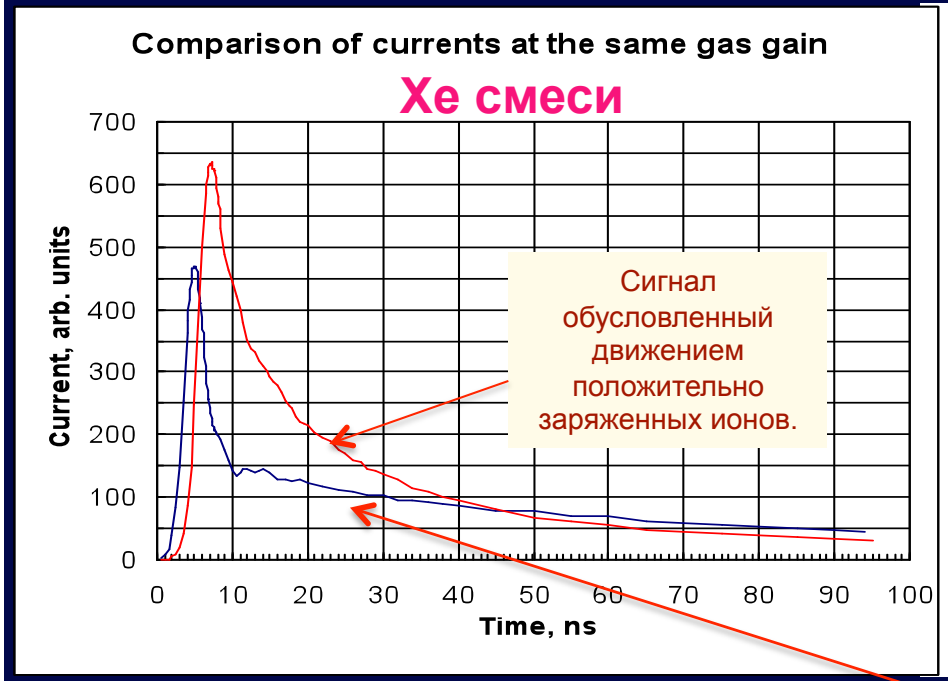


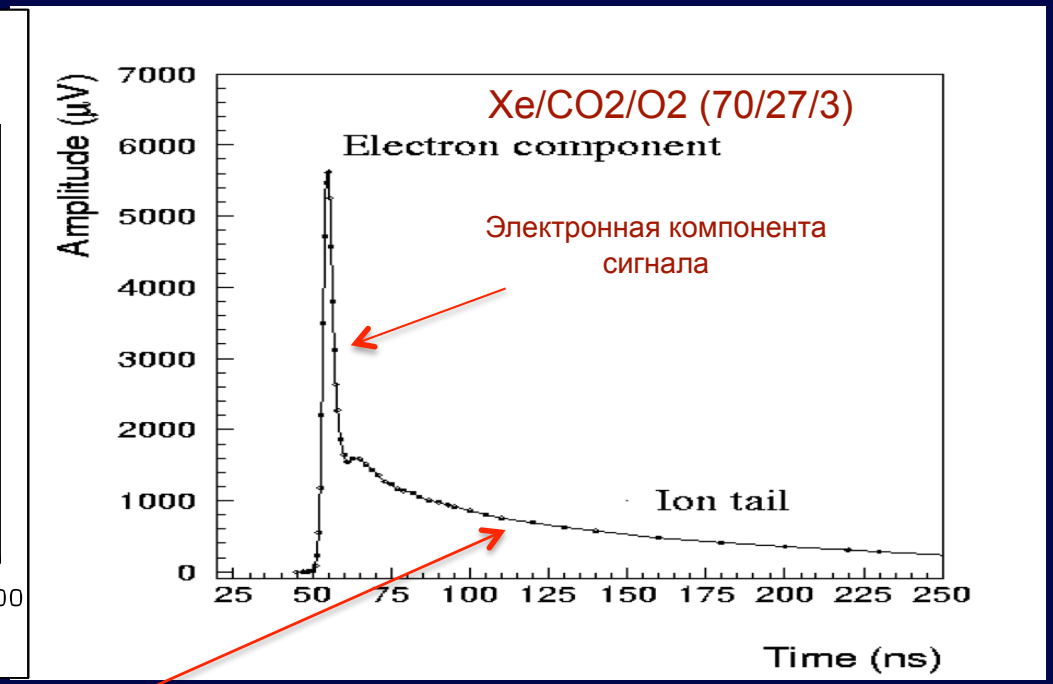
Сигнал в цилиндрической пропорциональной камере создается в основном ионами на длине нескольких радиусов от анода.

Токовый сигнал с трубки.

Как правило, вид сигнала определяется движением ионов вблизи проволоки, но в некоторых смесях можно увидеть и электронную компоненту.

Сигнал в цилиндрической пропорциональной камере от точечной ионизации.





Компонента сигнала, связанная с движением положительных и отрицательных ионов.

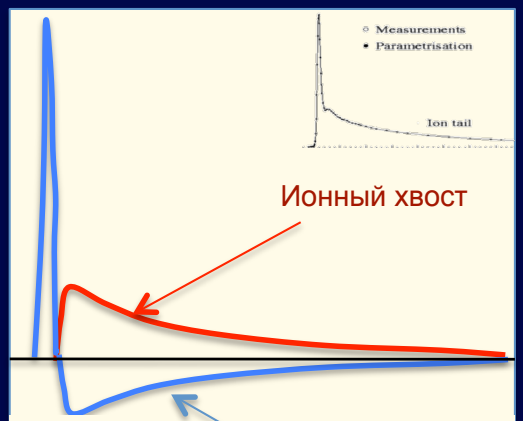
При работе в условиях БАК частота следования сигналов достигает 20 МГц, т.е. среднее расстояние между сигналами ~ 50 нс.

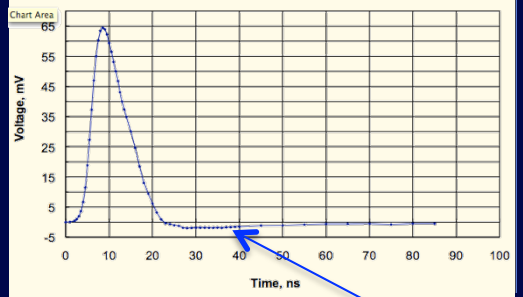
Специальные электронные средства используются для подавления ионного хвоста: компенсация полюса нулем и восстановление базовой линии.

Как результат, только малая часть заряда используется для формирования сигнала: ~5% в случае Xe-смеси и ~15% в случае Ar-смеси.

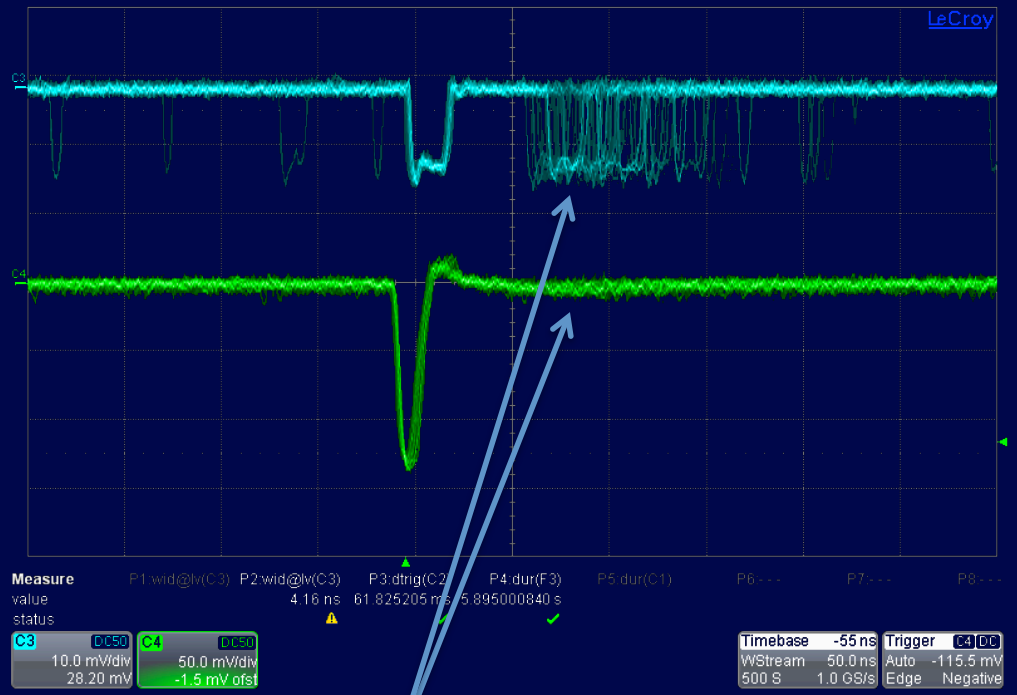
Идея компенсации полюса нулем.

Быстрая компонента дифференцируется, а времена спада обратного выброса (RC цепи) подбираются так, чтобы компенсироватъ ионный хвост.





После формиравания, сигнал должен обязательно иметь обратный выброс.



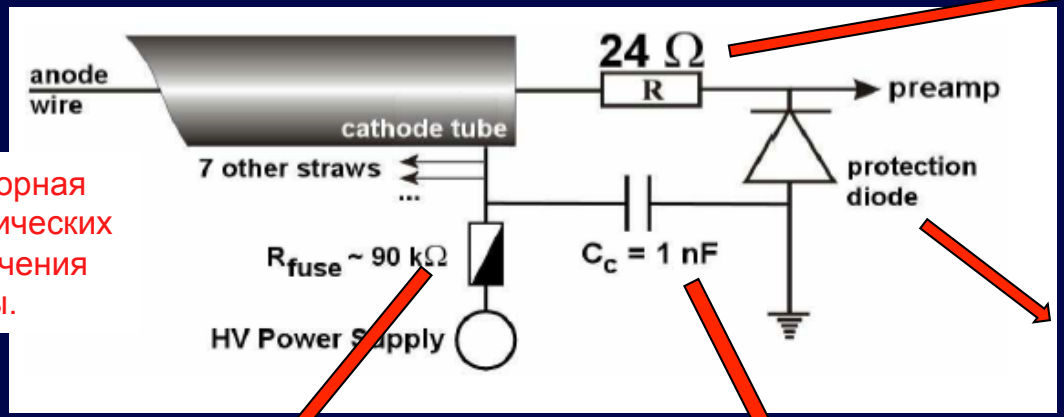
Недокомпенсированный сигнал может привеси к вторичным срабатываниям дискриминатора, что опасно при больших загрузках.

Схема включения камеры.

Крайне важный момент!!!

Каждый компонент имеет критическое значение для стабильной работы детектора.
Любой отказ может иметь катострофические последствия в условиях отсутствия доступа.

Над-детекторная часть электрических цепей включения камеры.

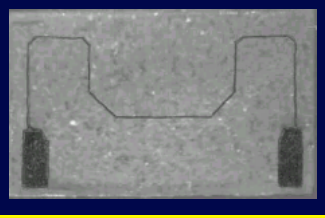


Специальные мини - сопротивления (2.5 мм) способные противостоять возможным разрядам в камере при напряжении 2000 В.

Специальные быстрые мини - диоды способные выдержать кратковременный ток 150 А при разрядах в камере 2000 В.

Специально разработанные сопротивления – предохранители, которые выдерэивают разряды в трубке и могут быть пережжены в случае непрерывных пробоев.

Специальные высоковольтне конденсаторы с низкой индуктивностью способные выдержать 4000 В и многократные разряды.



*Сопротовление-предохранитель: уникальное устройство разработанное в **МИФИ**: LiNbO3 подложка с тонкой (15 нм) Ti полоской шириной 14 мкм.*

Реализция электрических цепей в конструкции колес TRT.

Протоип части колеса.

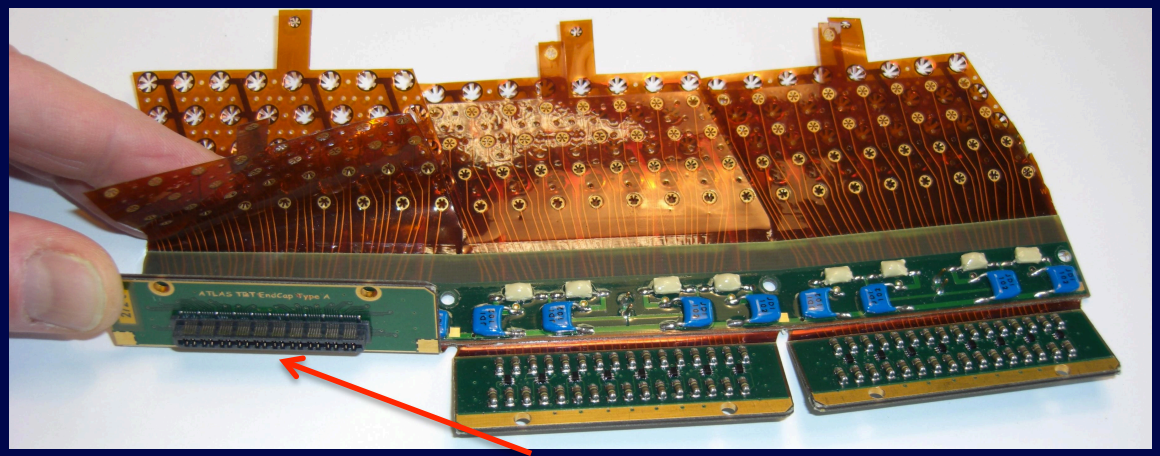
Компоненты электрических цепей.

Предохранители/развязывающие сопротивления. Обеспечивают развязку каналов по высокому напряжению.

ВВ конденсаторы: обеспечивают максимальный ток через усилитель.

Ограничивающие сопротивления: уменьшают максимальный ток через ограничивающие диоды.

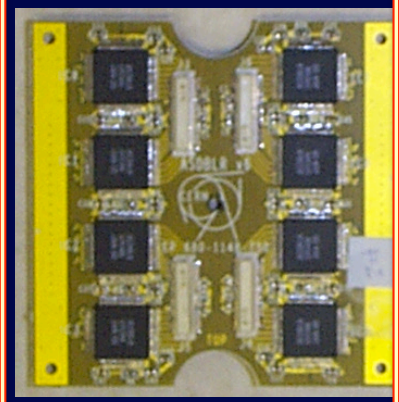
Ограничивающие диоды: забирают большую часть тока при разряде камеры.

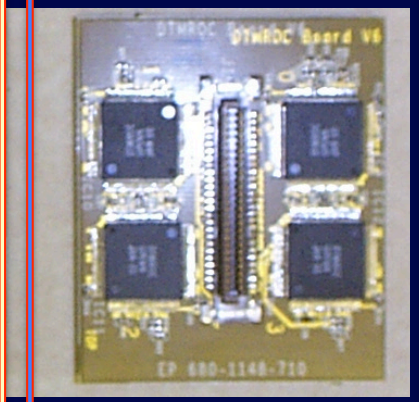


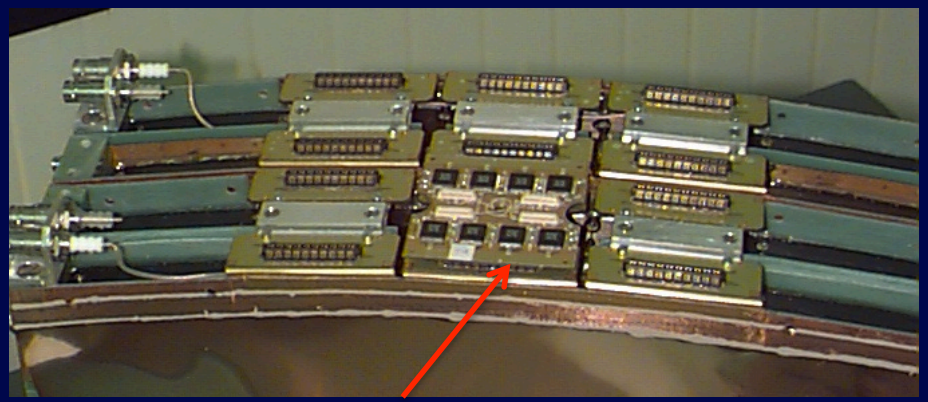
Часть конструкции колеса с разъемом для соединения с электроникой.

- **1 HV** конденсатор на 8 трубок.
- **8 трубок** соединены с одним **ASDBLR** чипом (8 каналов)
- **2 ASDBLR** чипа считываются одним **DTMROC** чипом

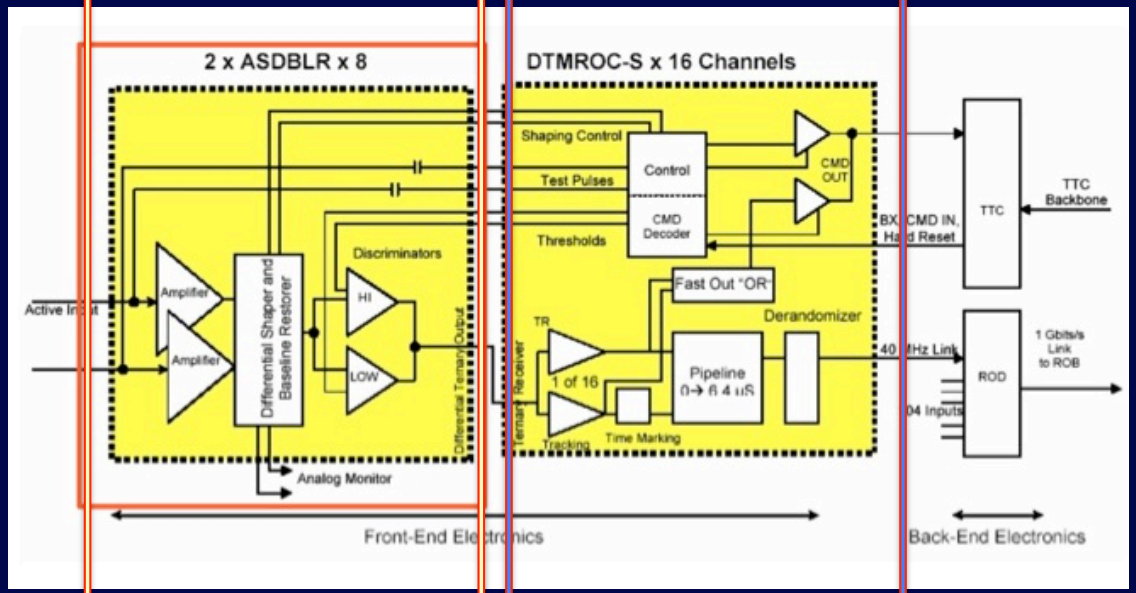
Над-детекторная (Front-End) электроника.







Плата ASDBLR установленная на детектор



ASDBLR усиливает, формирует, востанавливает 0 линию и дискриминирует сигнал с трубки.Содержит 8 каналов.

DTMROC оцифровывает (со временем 3.125 нс), задерживает и дерандемизирует информацию с 16 каналов.

Плата ASDBLR
(8 чипов = >64 канала)

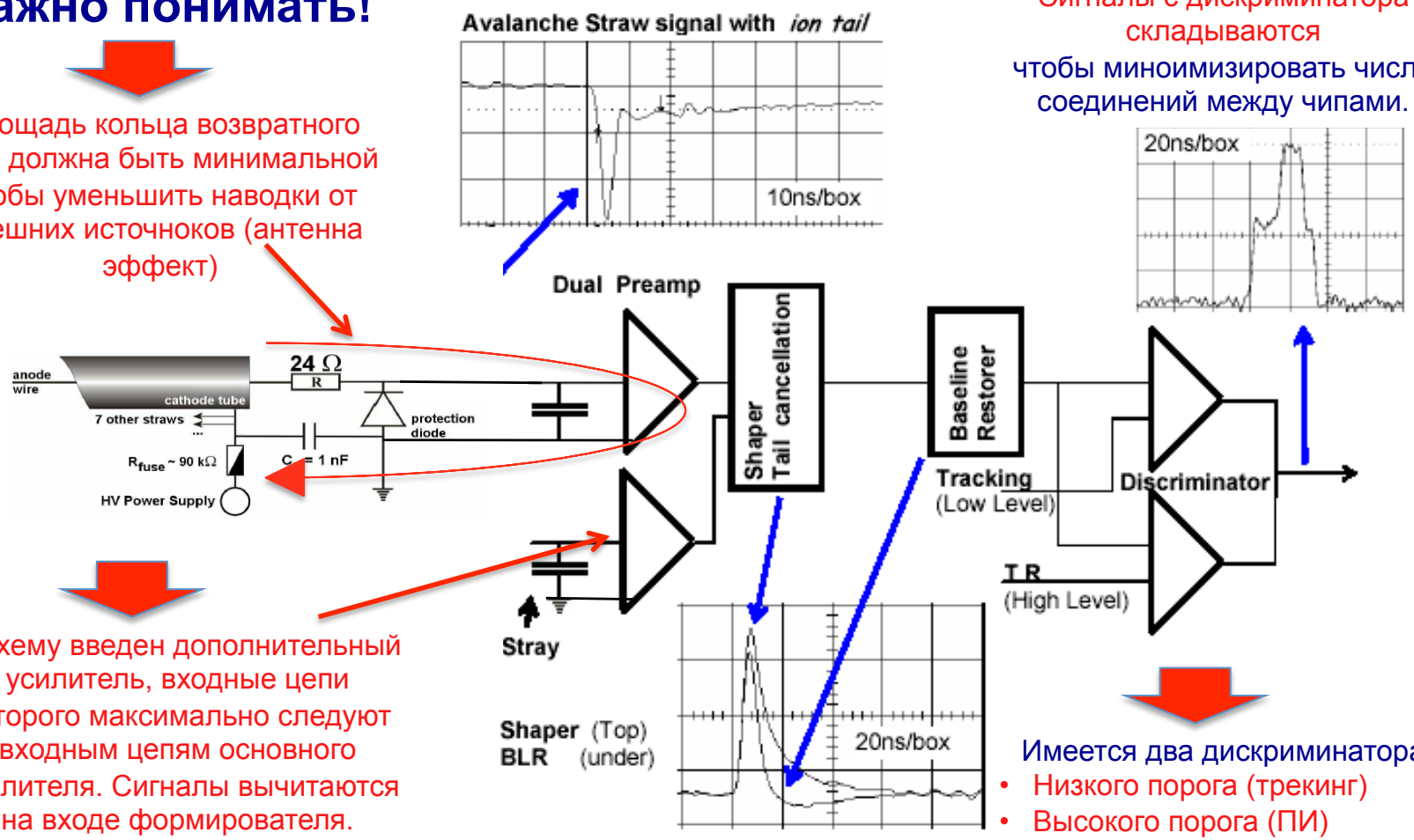
Плата DTMROC
(4 чипа = >8 ASDBLR => 64 канала)

Принципиальное устройство аналоговой части электроники и процессинг сигнала.

Важно понимать!

Площадь кольца возвратного тока должна быть минимальной чтобы уменьшить наводки от внешних источноков (антенна эффект)

Сигналы с дискриминатора складываются чтобы миноимизировать число соединений между чипами.



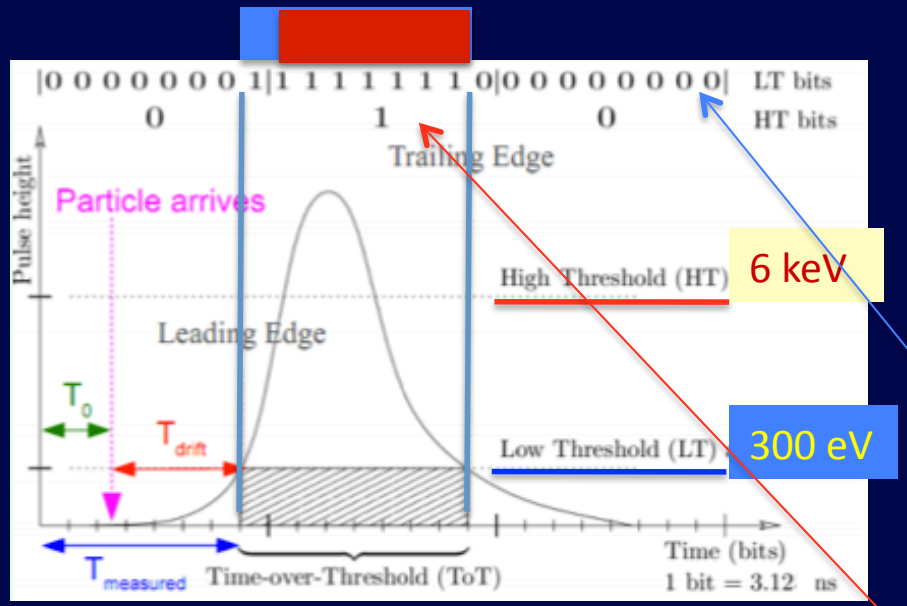
В схему введен дополнительный усилитель, входные цепи которого максимально следуют входным цепям основного усилителя. Сигналы вычитаются на входе формирователя.

Имеется два дискриминатора
- Низкого порога (трекинг)
- Высокого порога (ПИ)

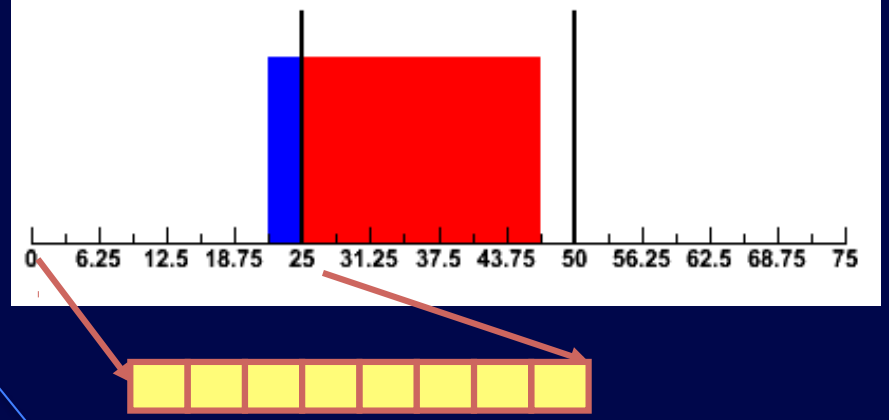
Сигнал в цилиндрической пропорциональной камере создается в основном ионами на длине нескольких радиусов от анода.

Как оцифровывается сигнал в TRT.

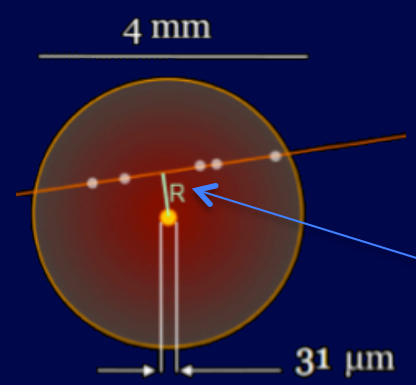
Сигнал в трубке и метод отображения цифровой информации



Метод отображения информации в программе TRTViewer.

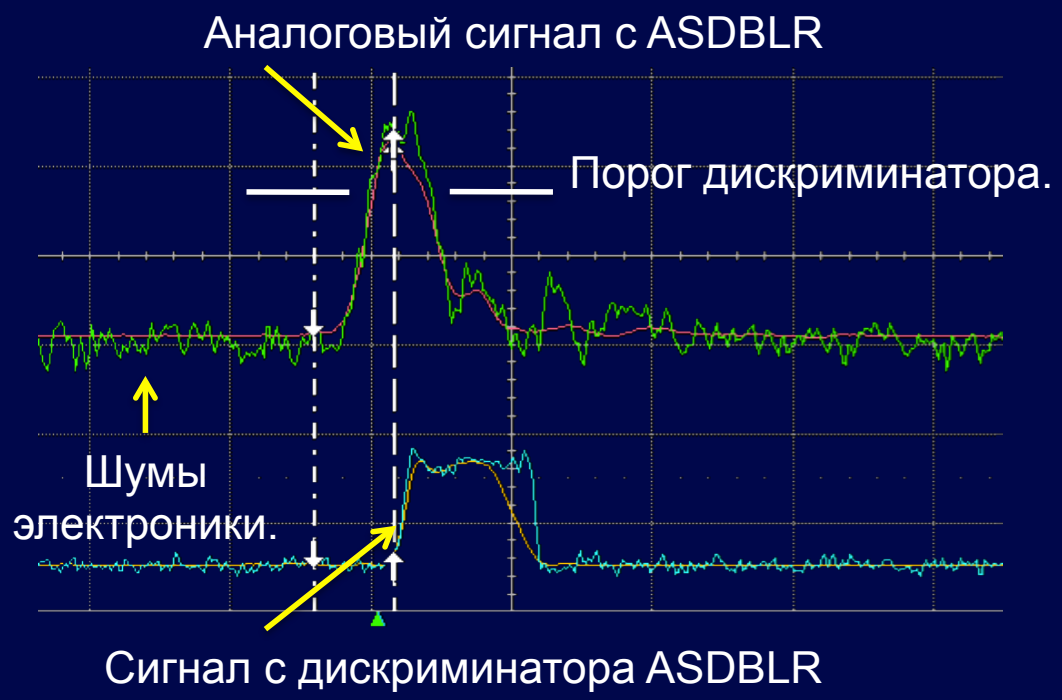


1. Побитовое состояние дискриминатора нижнего уровня выводится каждые 25 нс для 3х интервалов между столкновениями пучков (всего 75 нс).
2. Информация о состоянии высокого порога ассоциируется только с интервалом 25 нс.

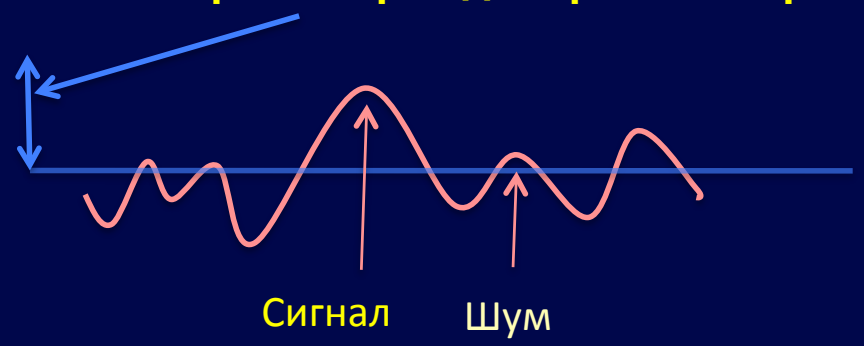


Для наиболее точного определения R низкий порог должен быть минимальным (чтобы регистрировать первые кластеры)

Шумы электроники и минимальный порог.



Шумы TRT $\sigma \sim 3000$ эл.
Как выбрать порог дискриминатора?



Источники шумов.

1. Тепловой шум электронных компонентов.
2. Внутренняя наводка.
3. Внешняя наводка.

Основные состовляющие теплового шума:

1. Шумы первого каскада усиления.
2. Шумы последовательного (24 Ом) и параллельного (90 кОм) сопротивления + входная емкость.
3. Выражается в виде эквивалентного числа электронов и имеет линейную зависимость от входной емкости – С.

Шумы = a+b*C

Шумы связанные с наводкой.

Полностью определяются

дизайном электронных плат и детектора, земляными соединениями и интенсивостью внутренних и внешних источников.

Базовый принцип дизайна:

минимальные петли (антенны как излучающие так и принимающие) , хорошие локальные земляные соединения, минимальное количество внешних точек заземления (идеально одна!)

Шумы электроники и минимальный порог.

Выбор порога.

1. Чем **ниже** порог тем выше чувствительность к первому кластеру.
2. Чем **выше** порог тем меньше шумовых срабатываний

Порог выбирается на основе требований к частоте срабатывания от шумов. Она не должна влиять на качество получаемой информации.

1. При максимальной загрузке БАК вероятность иметь сигнал в окне 75 нс от частиц ~50%.
2. Эта величина сильно флюктуирует.
3. Для TRT принято 2% шумовых срабатываний (несущественно увеличивает общую загрузку).
4. Шумовые сигналы могут быть подавлены, наложив ограничения на ширину сигналов (от частиц сигналы шире).
5. 2% соответствуют скорости счета: $0.02/\ 75*10^{-9}$ $сек^{-1}$ = 250000 1/сек или **250 кГц**.

Порог в энергетической шкале.

1. Как правило, порог выбирается из соображений: > **4 σ шума** или > 12000 эл.
2. Порог в энергетической шкале зависит от коэффициента газового усиления и части полного заряда, который остается после формирования сигнала (ионный хвост убивается). Для Ar-смеси эта величина 15% а для некоторых Xe-смесей она может быть 5%.

Ar- смесь:

Порог в эВ = 4*Шумы*W*/GG*Qs =
$3000*4*27эВ/2.5*10^4*0.15$ = **86 эВ**

Xe- смес:ь

Порог в эВ = 4*Шумы*W*/GG*Qs =
$3000*4*24эВ/2.5*10^4*0.05$ = **230 эВ**

W - Средняя энергия ионообразования (средняя энергия, которую тратит частица на создание одноий электрон-ионной пары.

GG – Коэффициент газового усиления.

Qs - Часть полного заряда, которая остается после формирования сигнала.

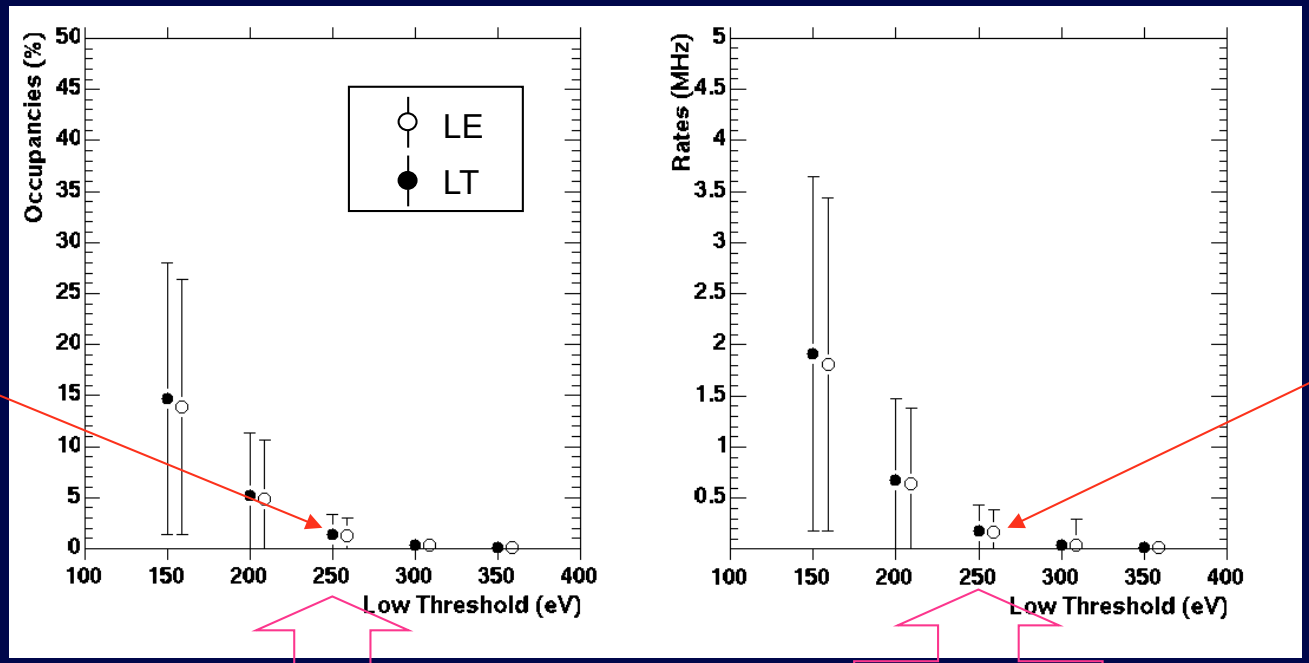
Порог и загрузка реального детектора.

Загрузка (%) в окне 75 нс

Скорость счета (МГц)

Вероятность срабатывания

1.3 ± 1.7 %



Скорость счета

169 ± 221 кГц

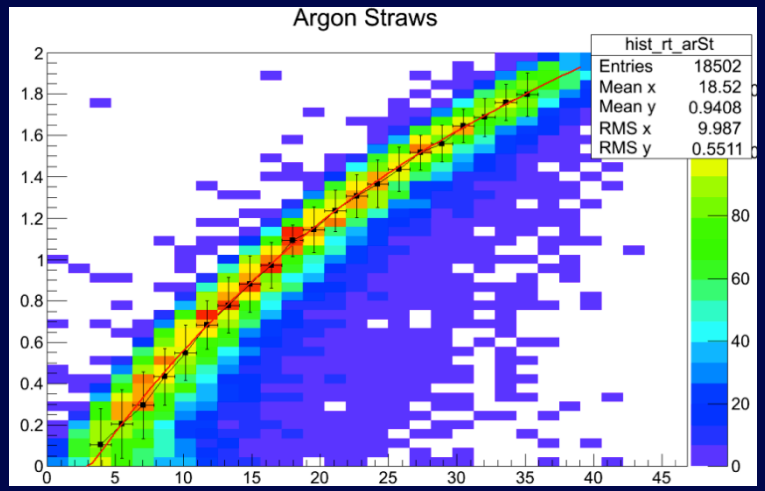
250 eV

250 eV

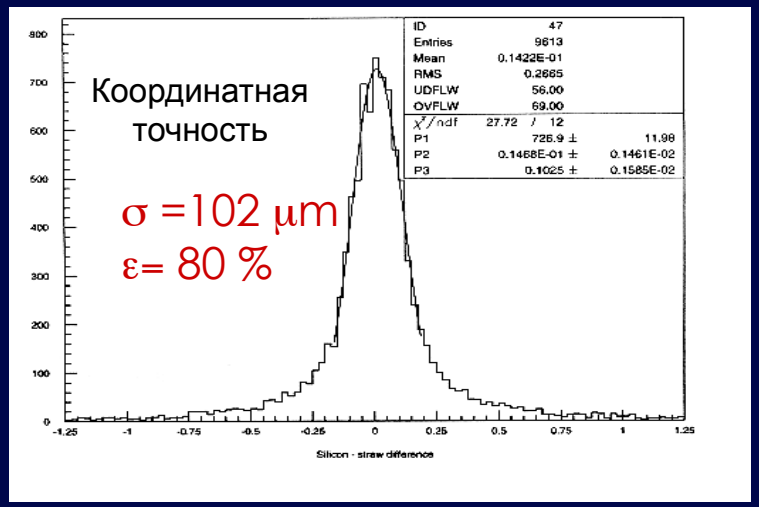
Порог 250 эВ это 10 первичных электронов. В среднем, один кластер содержит 4 первичных электрона ➡ нужен интеграл заряда нескольких кластеров чтобы превысить порог!

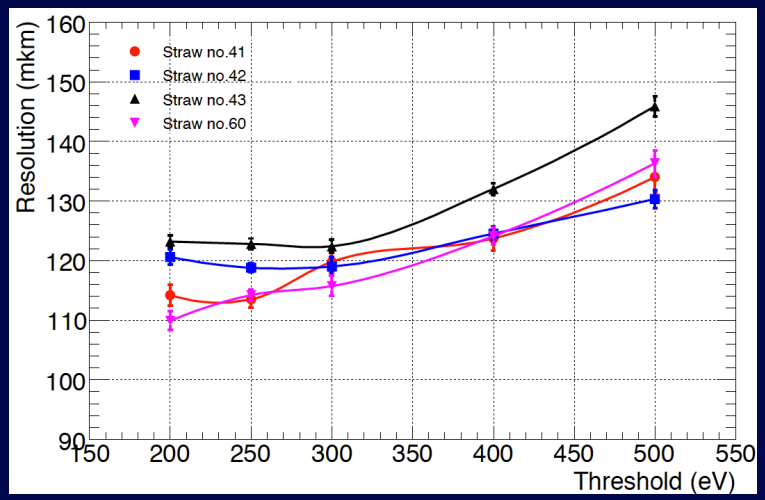
Измерение координаты.

Корреляция радиус-время прихода сигнала (R-T) в трубке.

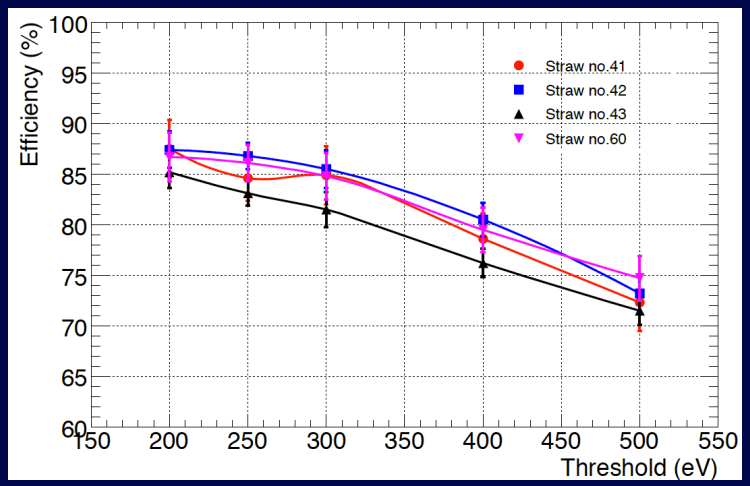


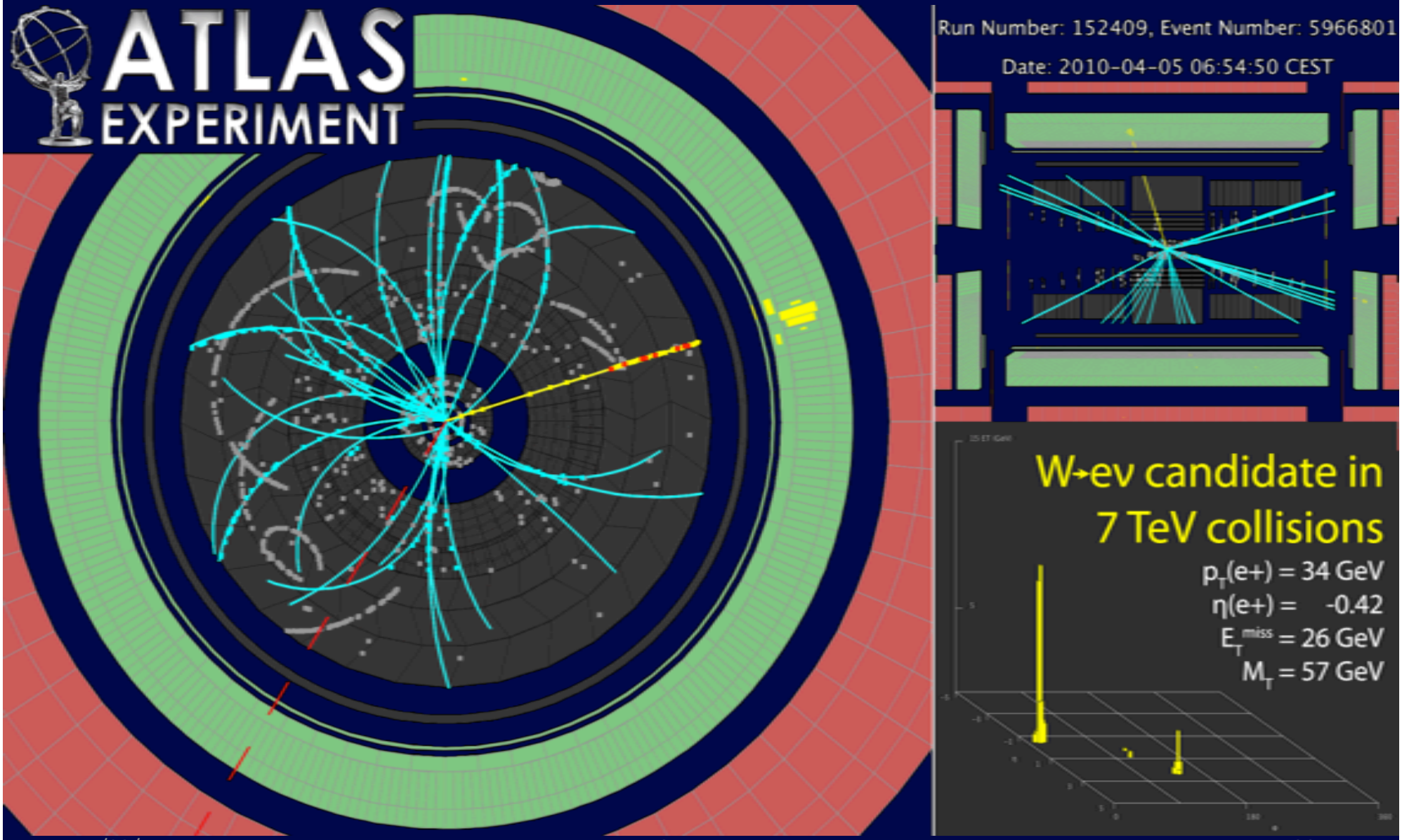
Разность измеренный радиус - реалный радиус.





Зависимость пространственного разрешения трубки от порога.



Завоисимость эффективности прецизионного измерения координаты (±2.5σ) от порога.

Теперь вы знаете основные принципы работы детектора.
Осталось применить свои знания на практике!