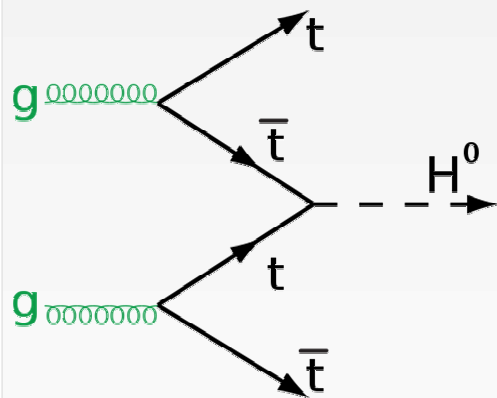


# Введение в системы сбора данных (2)

Соловьянов.О

На основе лекций для CERN Summer Student School  
2010 - Niko Neufeld

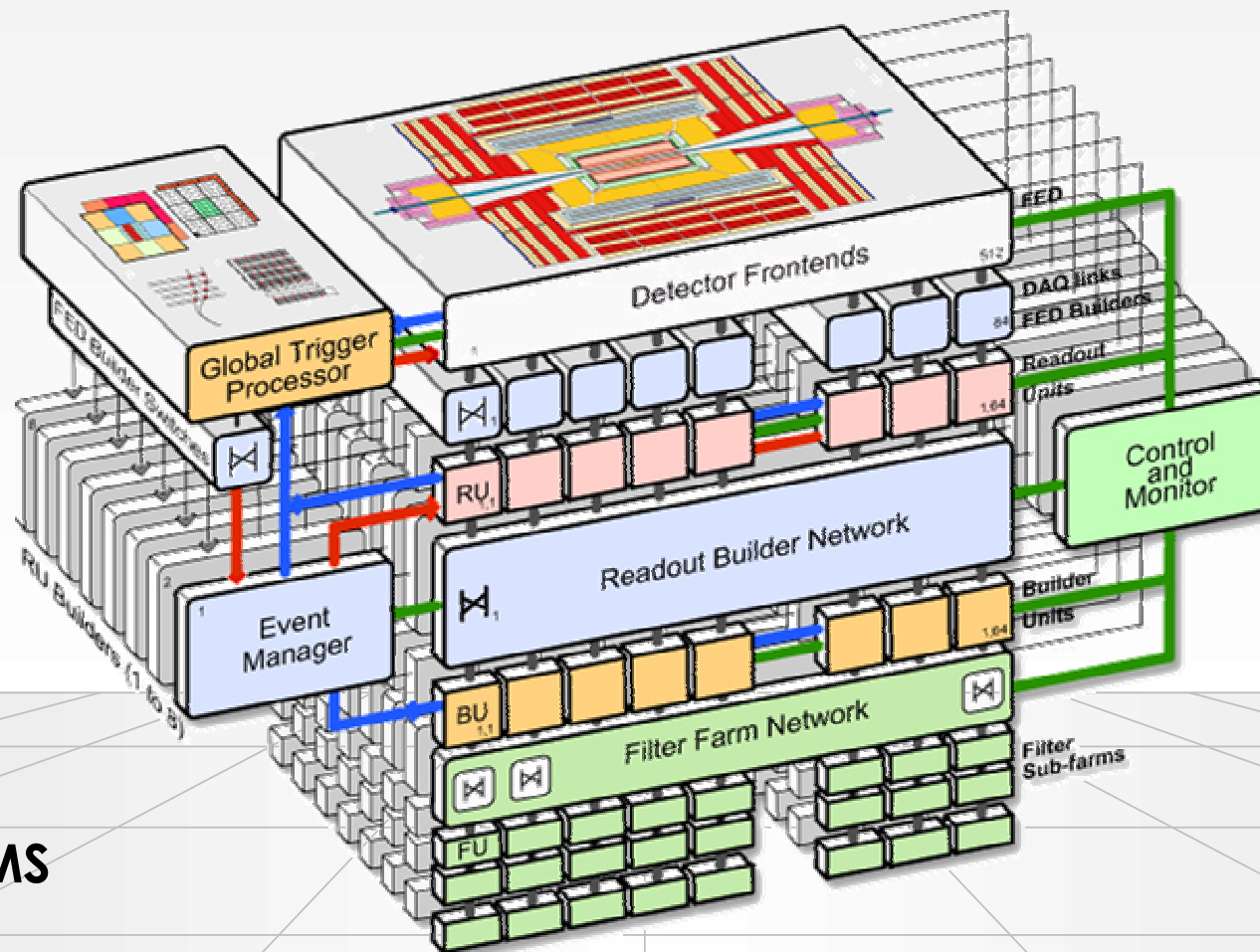
# Физика, детекторы, электроника, триггер и системы сбора данных



**Редкий процесс,  
требуется множество  
столкновений**



# Архитектура ССД



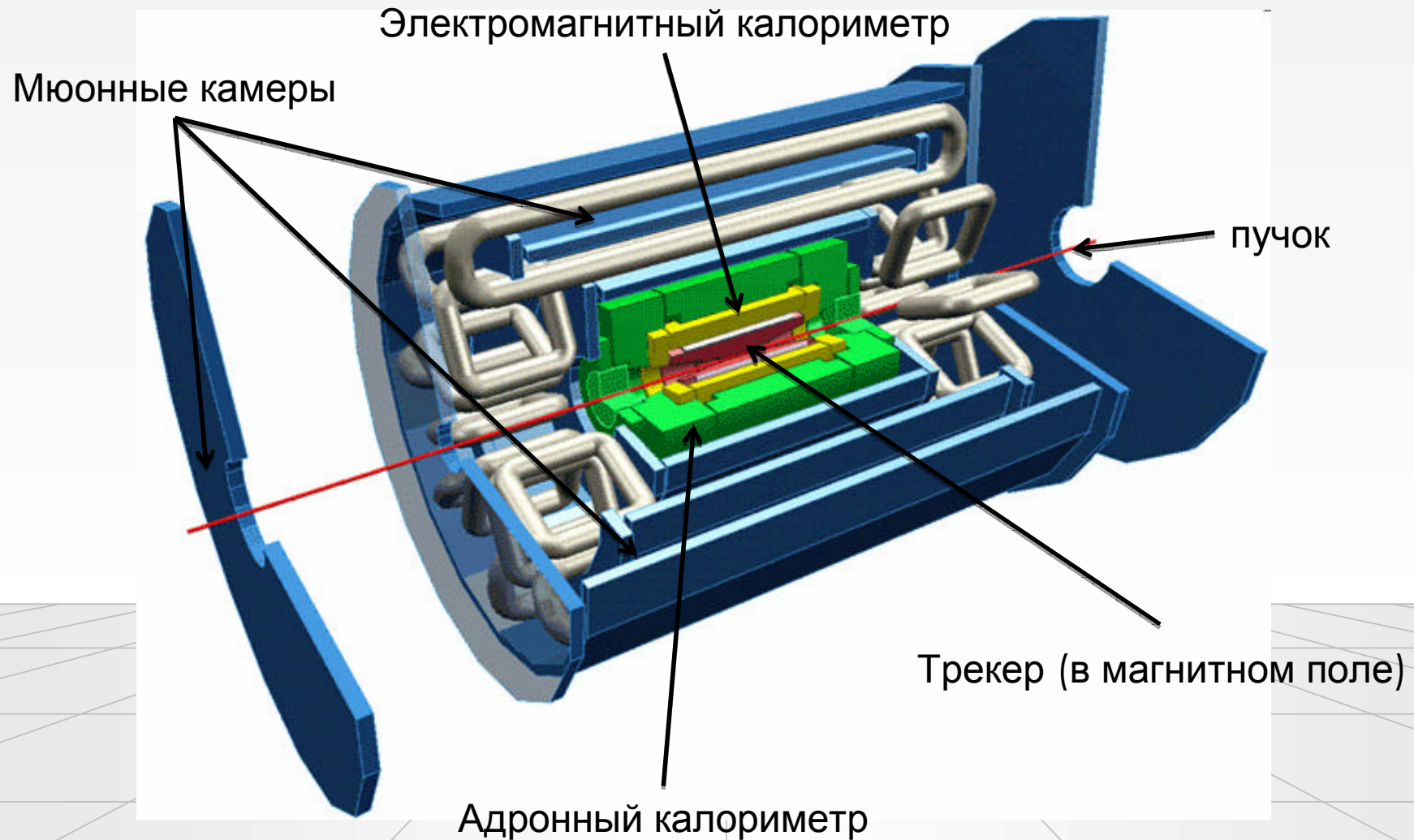
LHC CMS

# Электроника: предисловие

- Почему нас интересует электроника?
  - Как физиков?
  - Как компьютерщиков?
- Чтение данных
  - формирование, усиление
  - оцифровка, передача, шумы
- Временная синхронизация
- Инфраструктура
  - Питание, охлаждение, радиация

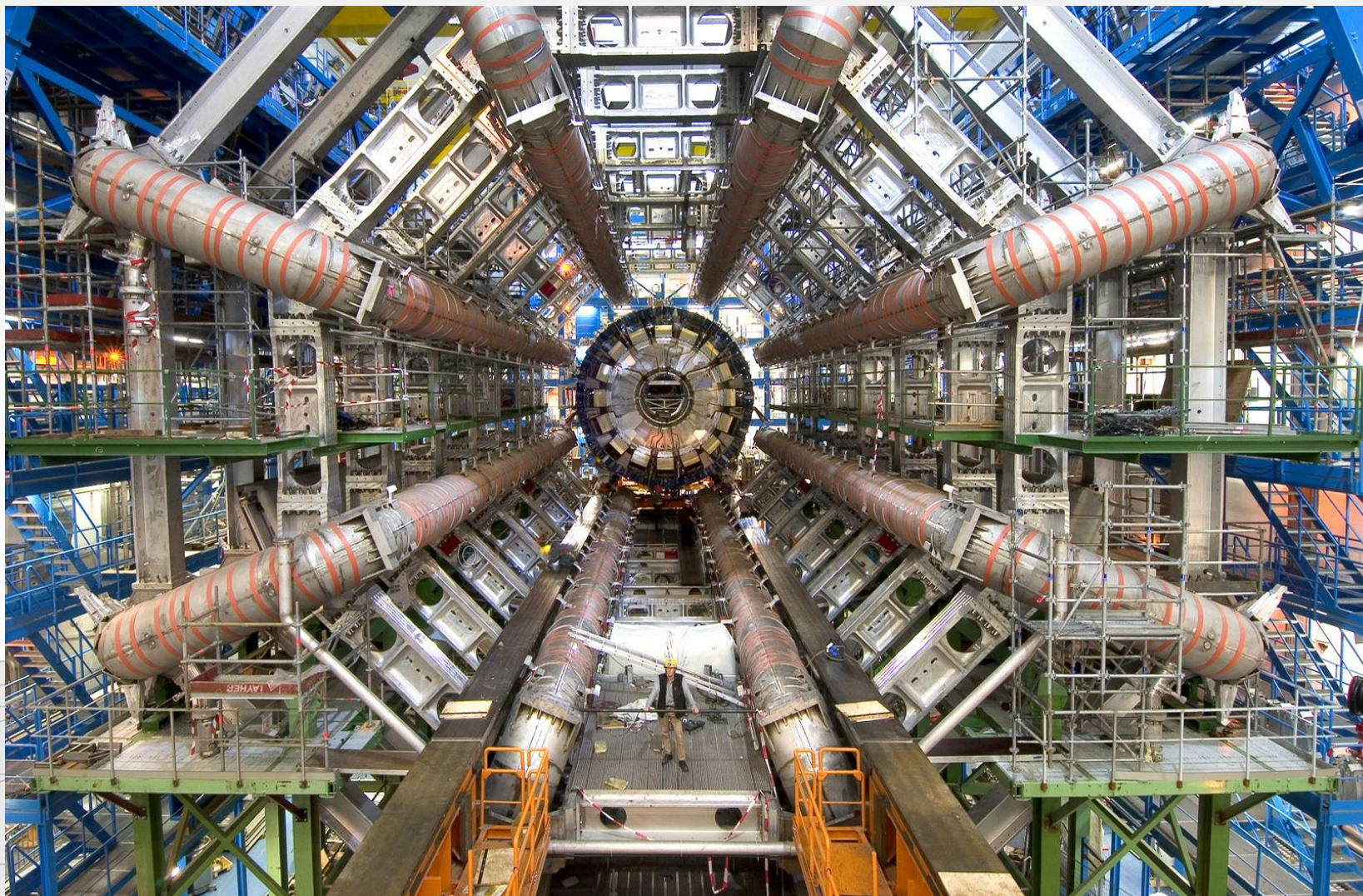
# Детекторы частиц (очень кратко)

# Детектор ATLAS





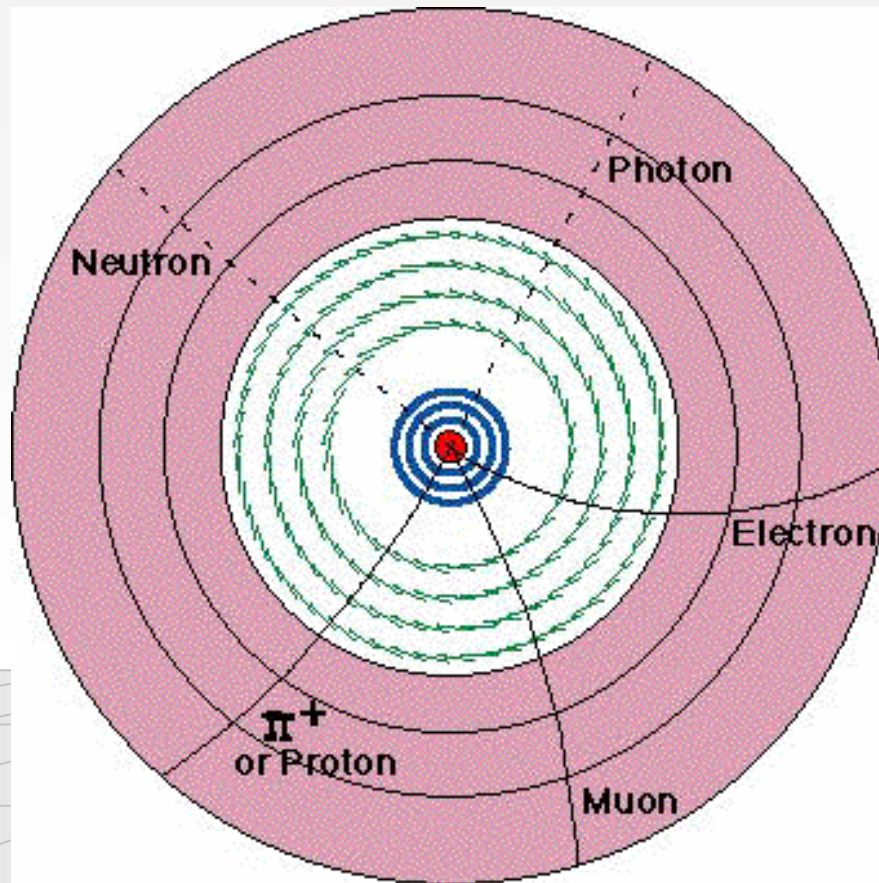
# Детектор АТЛАС



Общий вид центральной части детектора АТЛАС



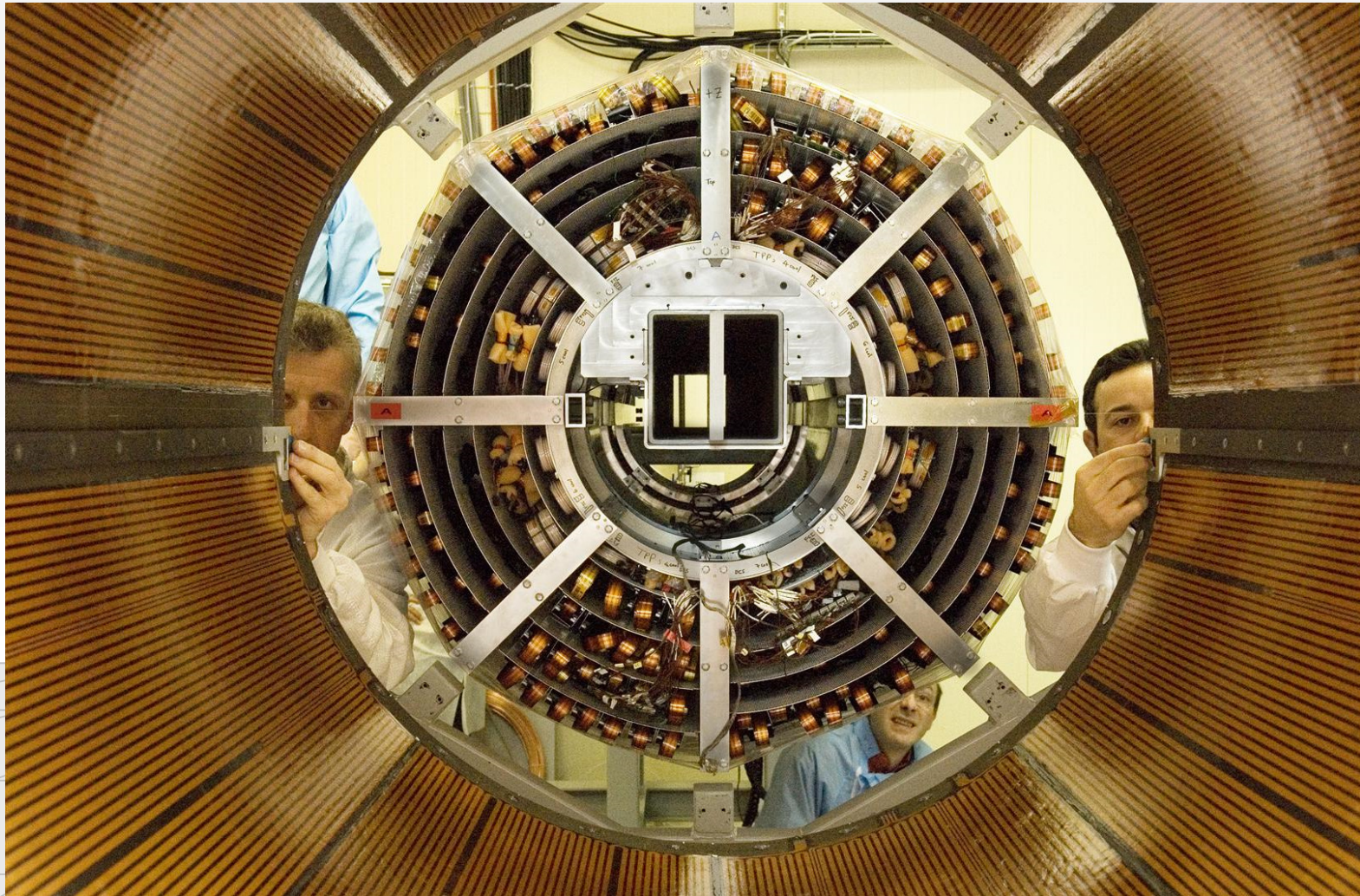
# Трековая система



- Разделяет треки по заряду и импульсу
- Измерение трека по слоям
  - внутренние: кремниевые пиксели и полосы → положение сработавшего элемента определяет точку в пространстве
  - внешние: дрейфовые камеры из трубок → для определения положения требуется еще и время срабатывания



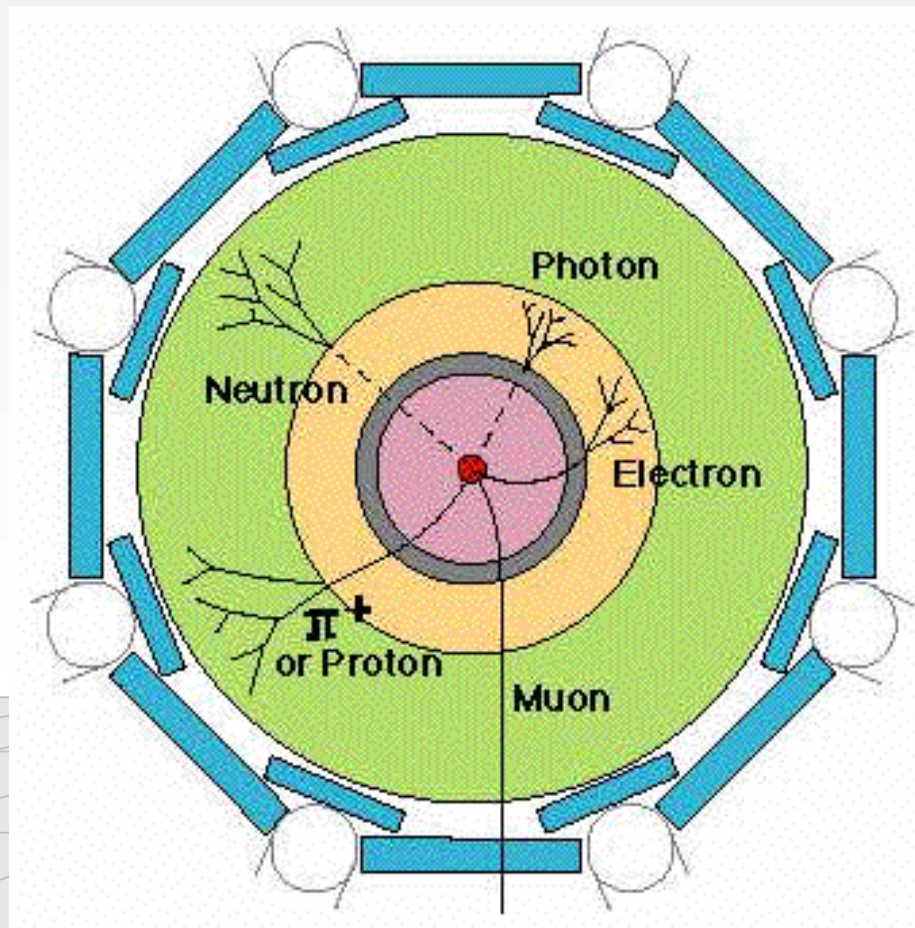
# Трековая система



Установка внутренних трековых детекторов АТЛАС

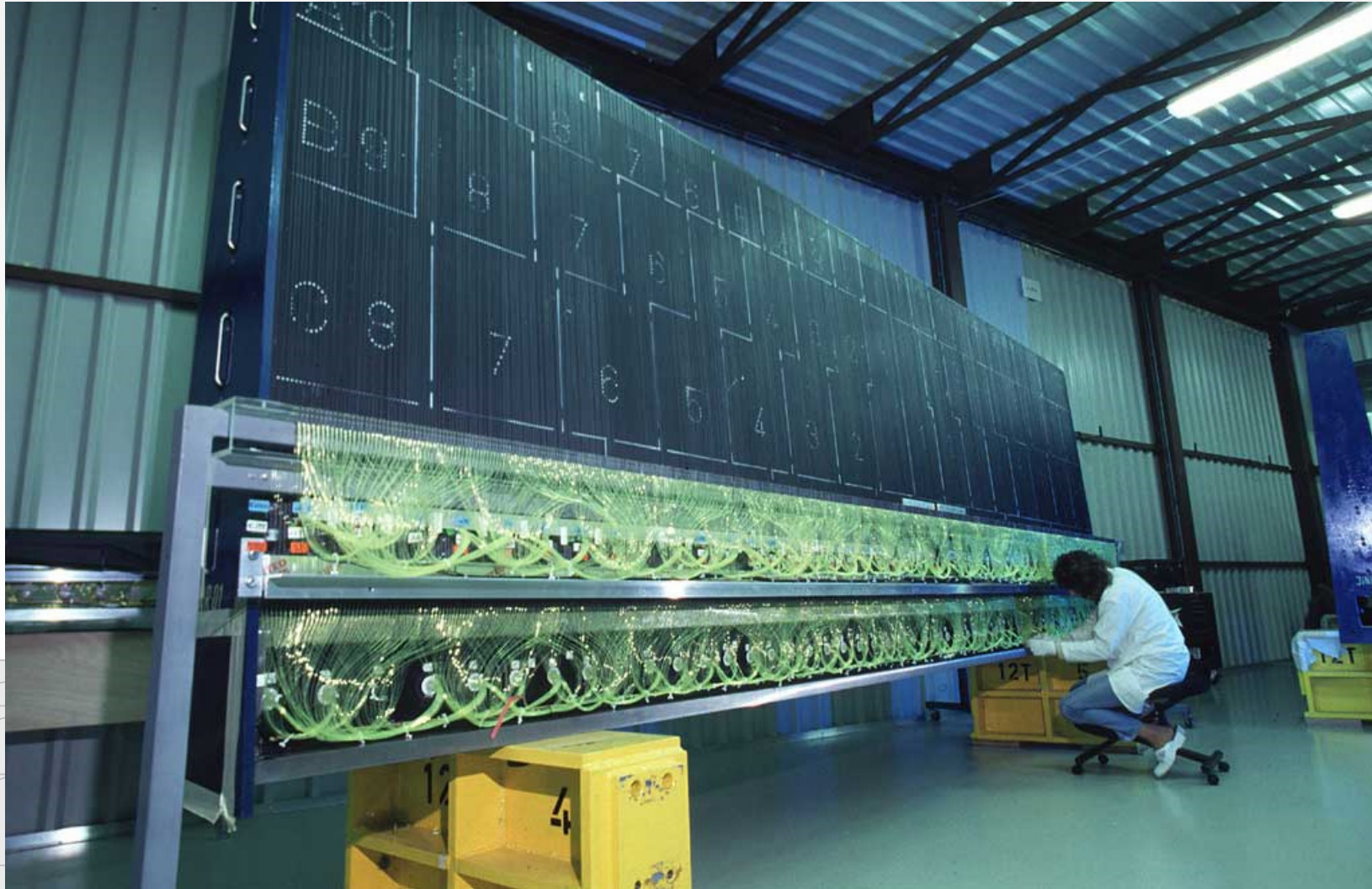


# Калориметрия



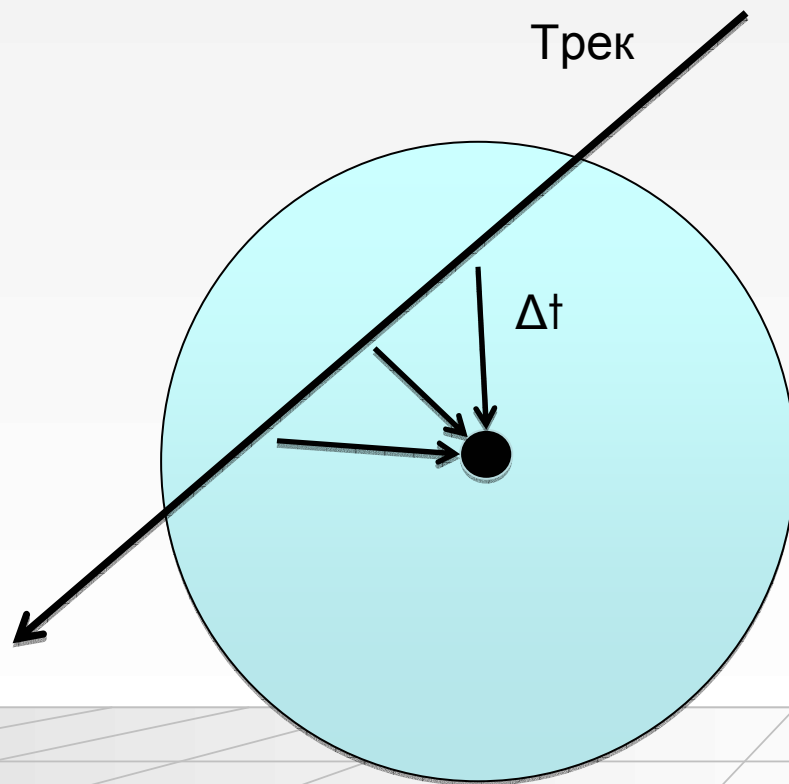
- Частицы порождают в калориметре ливни
  - электромагнитный калориметр (желтый): поглощает и измеряет энергию электронов, фотонов
  - адронный калориметр (зеленый): поглощает и измеряет энергию адронов, включая протоны, нейтроны,  $\pi$  и  $K$  мезоны, ...
- Измеряется амплитуда сигнала
- Позиционная информация определяется разбиением (сегментацией) калориметра

# Калориметрия



Сборка модуля адронного калориметра АТЛАС.

# Мюонная система

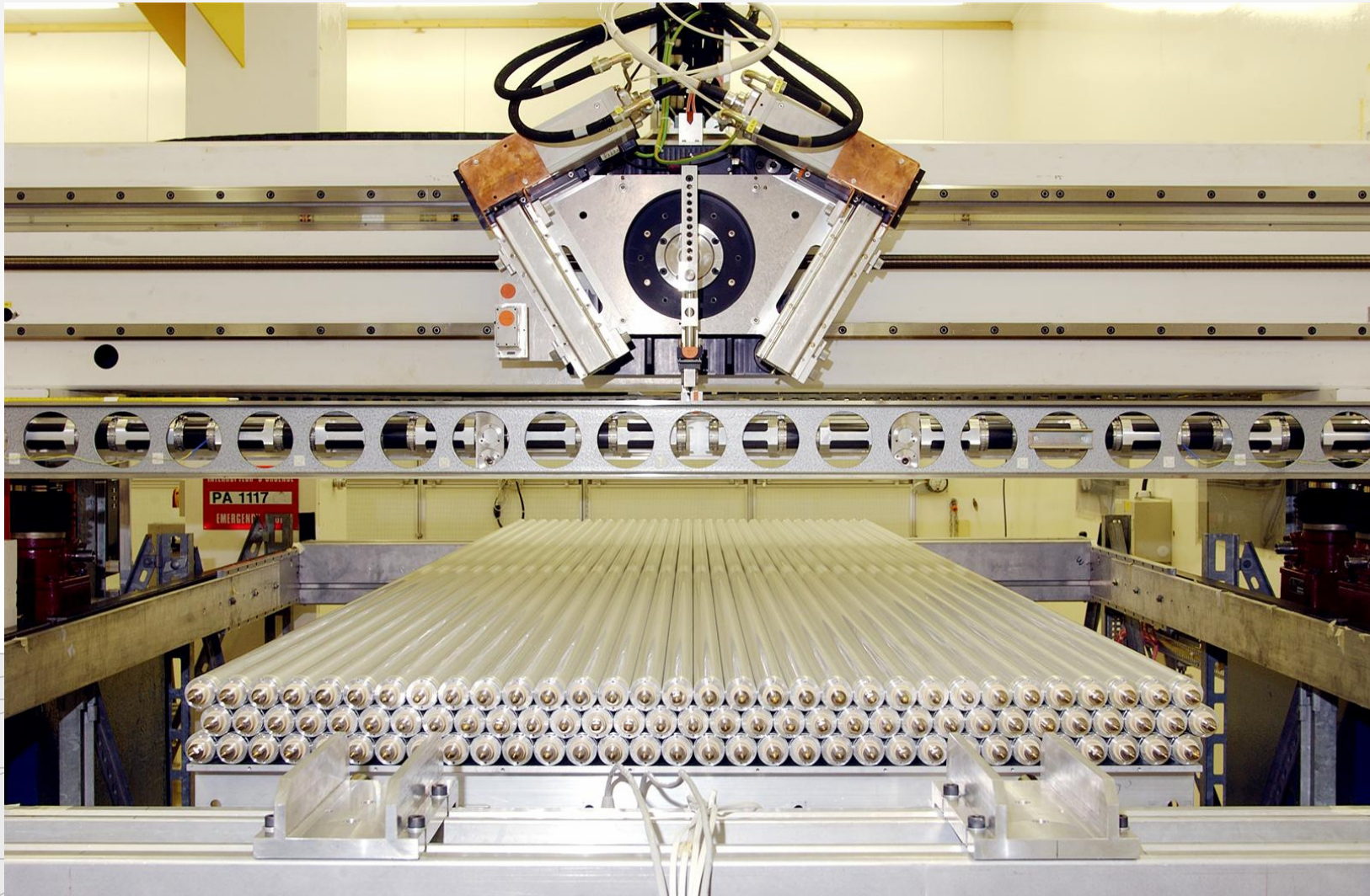


Мюонные камеры АТЛАС имеют радиус 3 см и длину от 1 до 6 м.

- Электроны формирующиеся вдоль трека дрейфуют к центральной проволочке.
- Первый электрон, достигнувший область сильного поля рождает лавину, которая используется для временной отметки.
- Поскольку запуск лавины задерживается на время распространения заряда от трека до центрального электрода, время появления ливня может быть использовано для определения радиального положения (относительно некоего времени  $t=0$ , например времени пересечения пучков)



# Мюонная система



# Типы измерений

- Кремниевые детекторы определяют положение с  $\sim 10 \mu\text{m}$  точностью по  $g\phi$  (через сегментацию), а время с 25 ns точностью, для разделения событий от разных столкновений
- Электромагнитный калориметр измеряет энергию через ионизацию жидкого Ar, и положение в пространстве через сегментацию на ячейки.
- Адронный калориметр измеряет энергию с помощью plastic сцинтилляционных пластин, положение через сегментацию.
- Мюонная система измеряет сигнал в ионизационной трубке, положение через сегментацию и время регистрации сигнала

**Хотя детекторы кажутся разными, но все они следуют одним и тем же целям:**

- Датчики должны определить
  1. Присутствие(прохождение) частицы
  2. Величину сигнала
  3. Время прихода сигнала
- Некоторые измерения зависят от чувствительности, или уровня срабатывания, например в кремниевом треkere, порог срабатывания от прохождения частицы
- Другие стараются измерить величину с очень хорошей точностью (т.н. разрешением), калориметр – величину поглощенной энергии; мюонные камеры – время прохождения, для получения точных координат

**Их всех объединяет то, что они чувствительны к:**

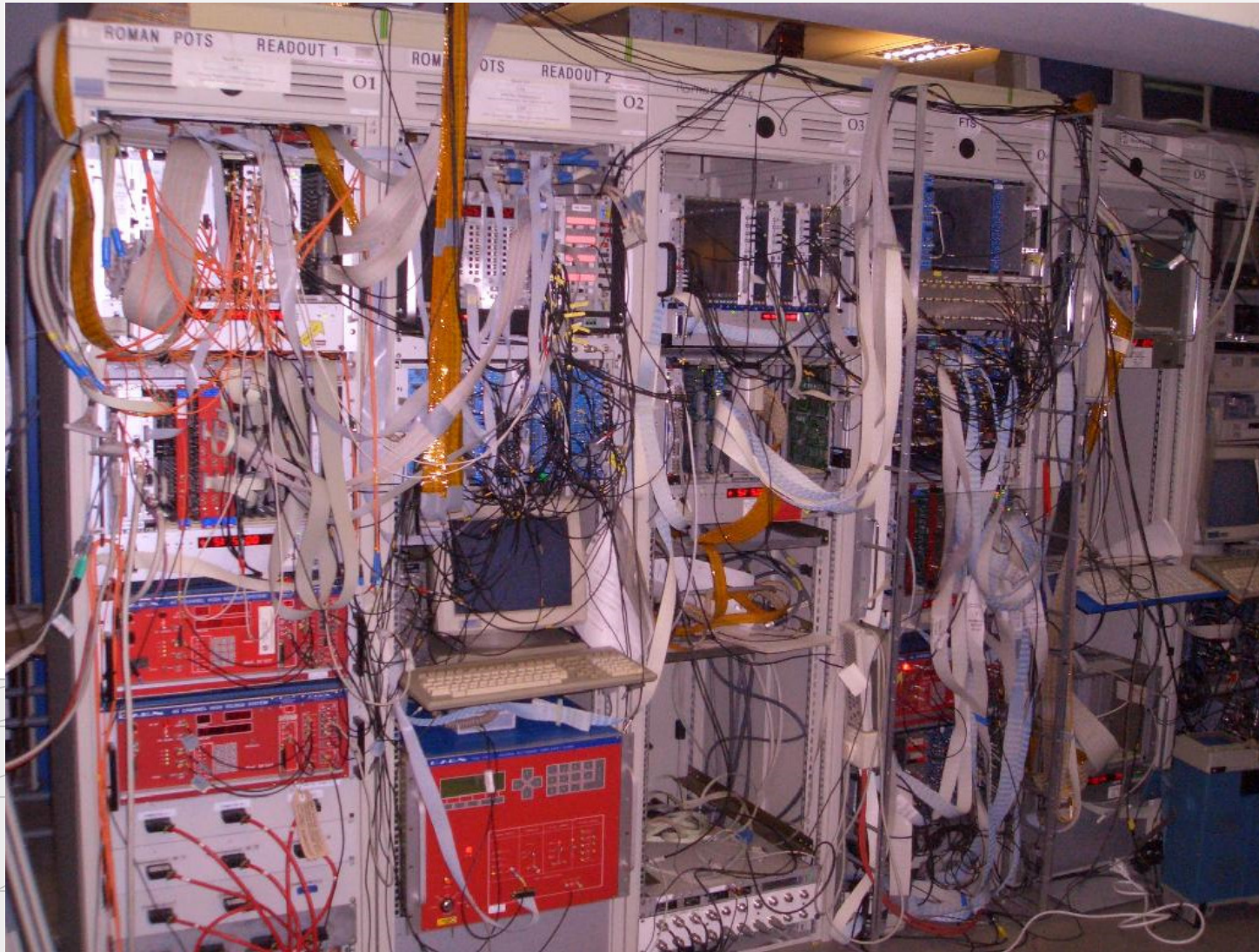
1. Величине сигнала
2. Флуктуациям

# Регистрирующая электроника

## Front-End Electronics (FEE)



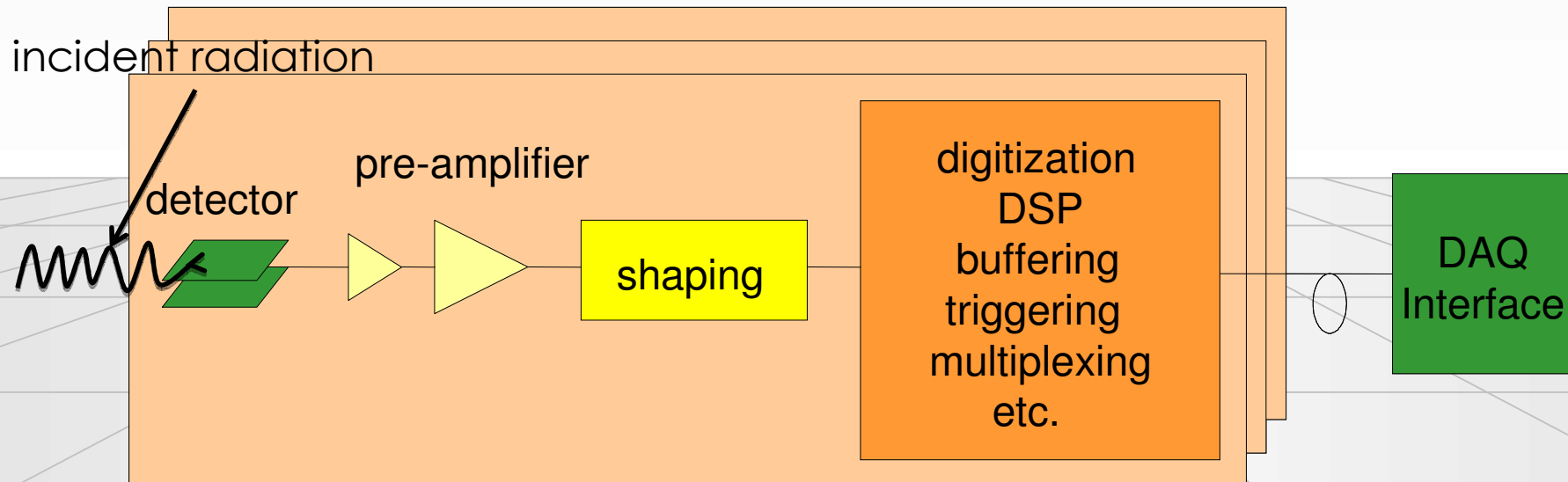
# Регистрирующая электроника



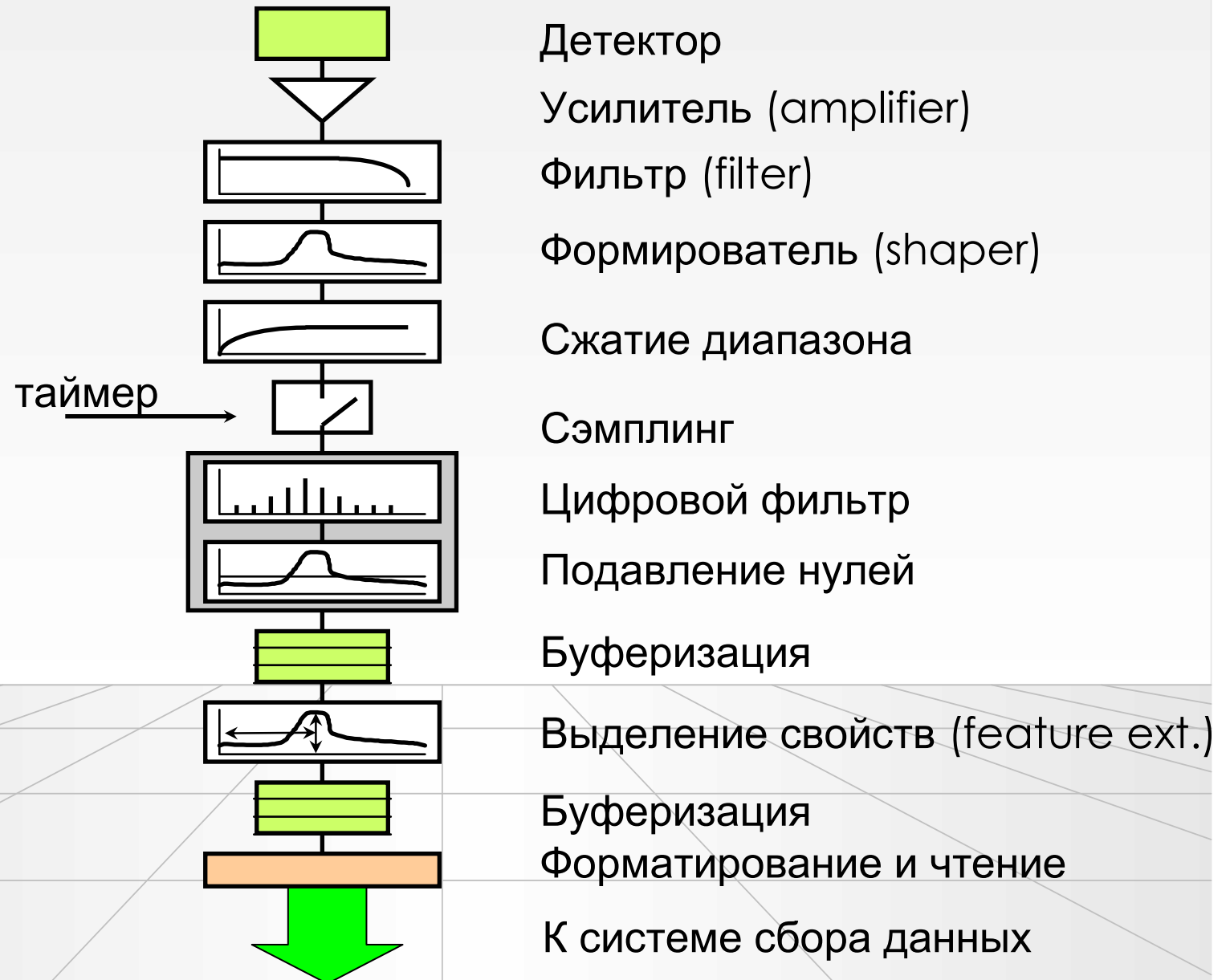


# Регистрирующая электроника

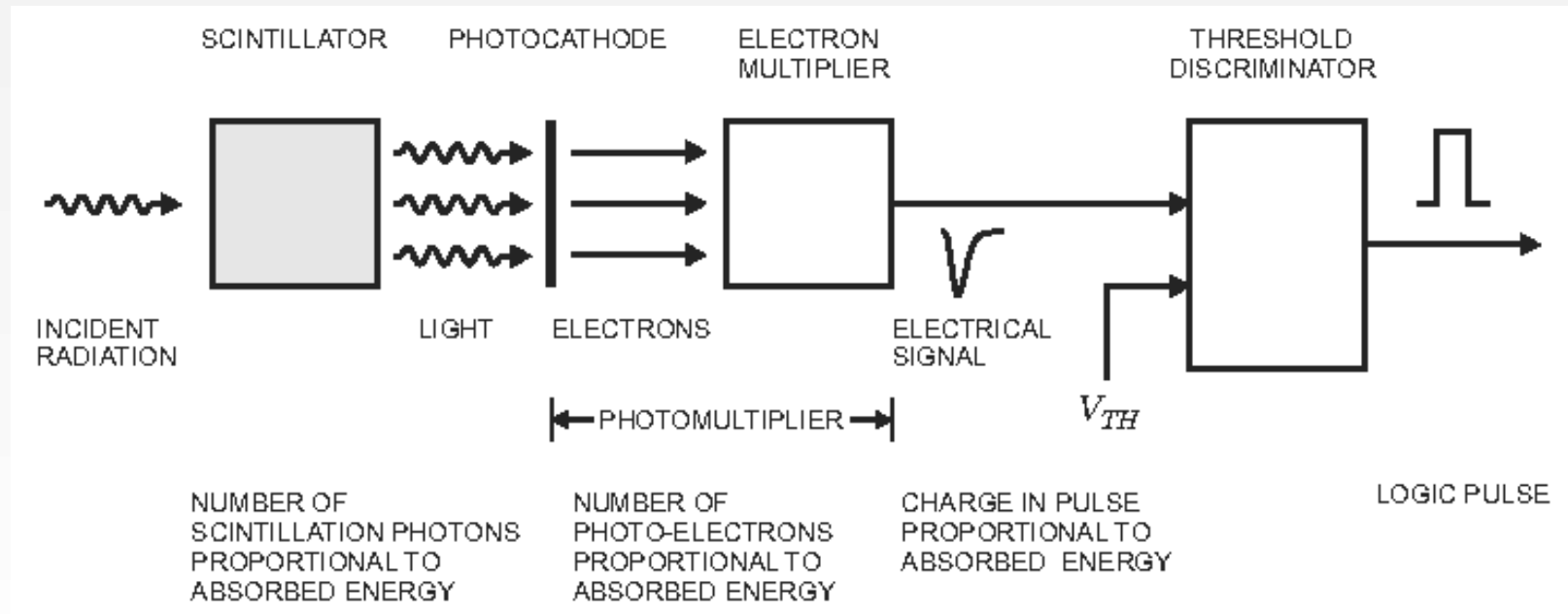
- Регистрирующая (font-end) электроника подсоединена непосредственно к детектору частиц (чувствительному элементу)
- Ее задача:
  - Получить электрический сигнал с детектора (обычно короткий, малоточный импульс)
  - Оптимизировать выходной сигнал по следующим критериям:
    - Минимальный детектируемый сигнал
    - Измерение энергии (величина заряда)
    - Частота срабатываний
    - Время прихода
    - Независимость от формы входного сигнала
  - Оцифровка сигнала и хранение для последующей передачи



# Конвейер регистрирующей электроники



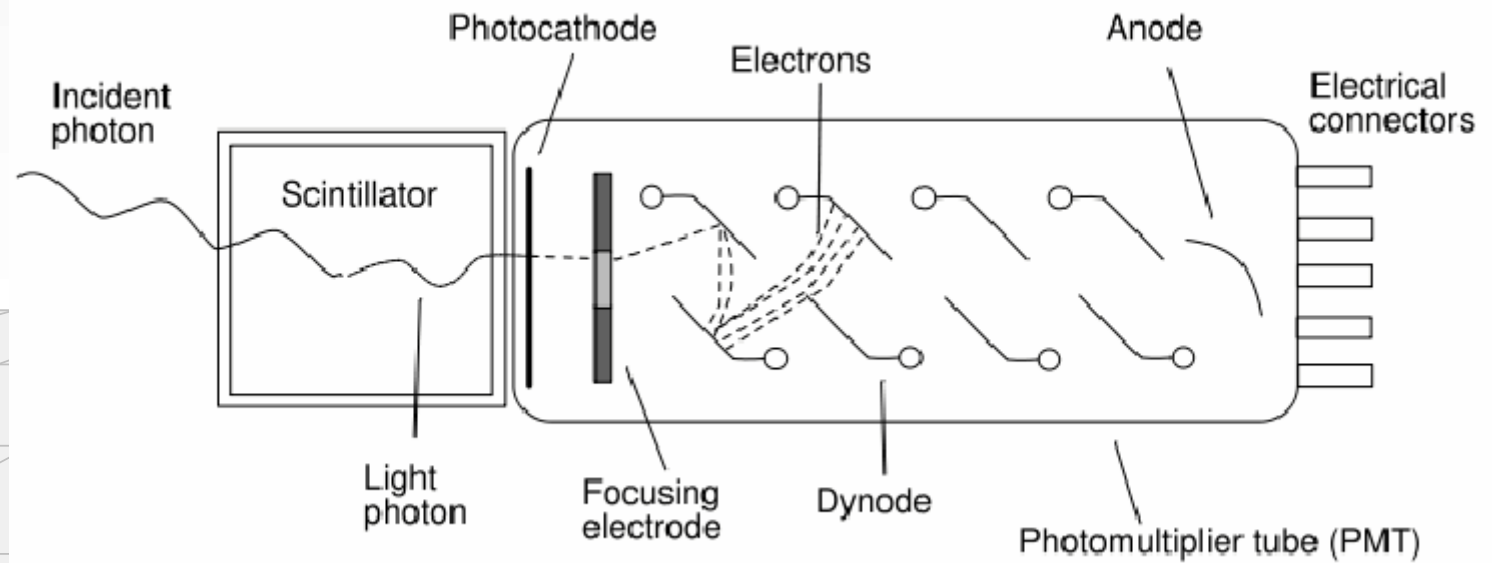
# Пример: сцинтилляционный счетчик



H. Spieler "Analog and Digital Electronics for Detectors"

- Фотоумножитель имеет высокое внутреннее усиление → нет необходимости в предусилителе
- Форма сигнала не зависит от заряда → высота сигнала пропорциональна заряду

# Пример: фотоумножитель





$$S = \frac{E_{\text{absorbed}}}{E_{\text{excitation}}}$$



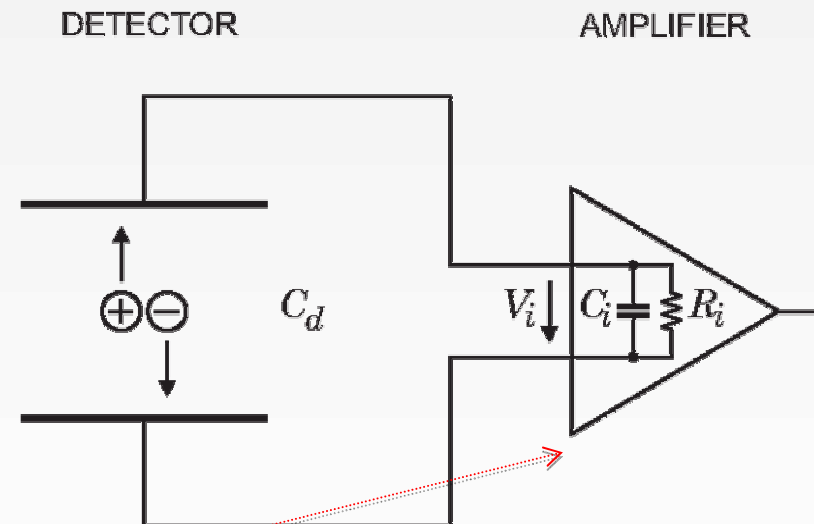
# Сигнал

- Обычно сигналом является небольшой импульс тока, разной длительности (от  $\sim 100$  ps для кремниевого детектора до  $O(10)$   $\mu$ s для неорганического сцинтиллятора)
- Существует множество различных источников сигналов. Величина сигнала зависит от поглощенного сигнала (энергии/заряда) и высвобожденной энергии

Сигнал	Физический эффект	Энергия возбуждения
Электрический импульс	Ионизация	30 eV для газов 1- 10 eV для полупроводников
Сцинтилляционный свет	Возбуждение состояний	20 – 500 eV
Температура	Возбуждение колебаний решетки	MeV

# Съем сигнала

- *Интересный сигнал – выделенная энергия* → необходимо интегрирование импульса тока
  - емкость датчика
  - интегрирующий предусилитель
  - интегрирующий аналого-цифровой преобразователь (АЦП/ADC)
- Слабый сигнал → необходимо усиление
  - С помощью **электроники**
  - Умножение сигнала (фотоумножитель)

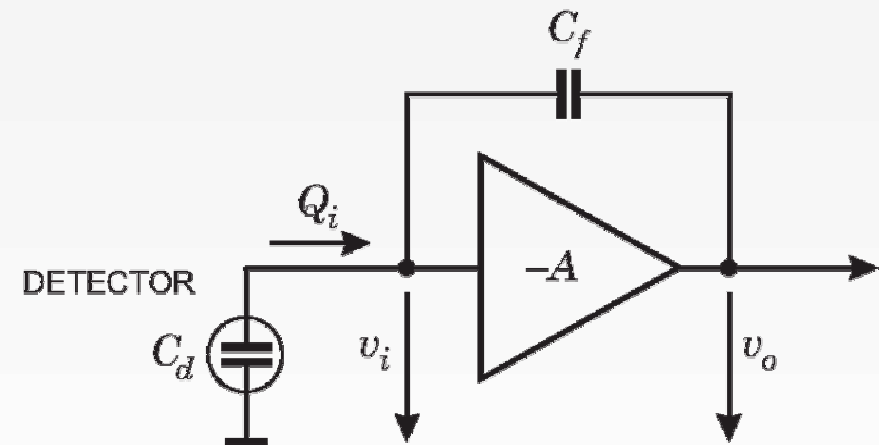


$$V_i = \frac{Q_s}{C_d + C_i}$$

Не очень хорошо: **выход зависит от емкости датчика  $C_d$**

# Зарядово-чувствительное усиление

- Усилитель с обратной связью  $-A$
- Входной сигнал (заряд) производит  $v_i$  на входе усилителя –  $A v_i$  на выходе
- Весь заряд должен накопиться на емкости обратной связи  $C_f$
- $V_{out} \sim Q_i / C_f$  – не зависит от  $C_d$ ! ☺



# Флуктуации и шум

- Существует два ограничения на точность измерения величины сигнала
  1. Флуктуации самого сигнала при поглощении в детекторе
  2. Флуктуации самой электроники (“шум”)
- Чаще всего присутствуют оба – они независимы друг от друга поэтому складываются квадратично:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E^2_{fluc} + \Delta E^2_{noise}}$$

- Шум влияет на измерения → необходимо **максимизировать отношение сигнал/шум (S/N ratio = SNR)**



# Флуктуации сигнала

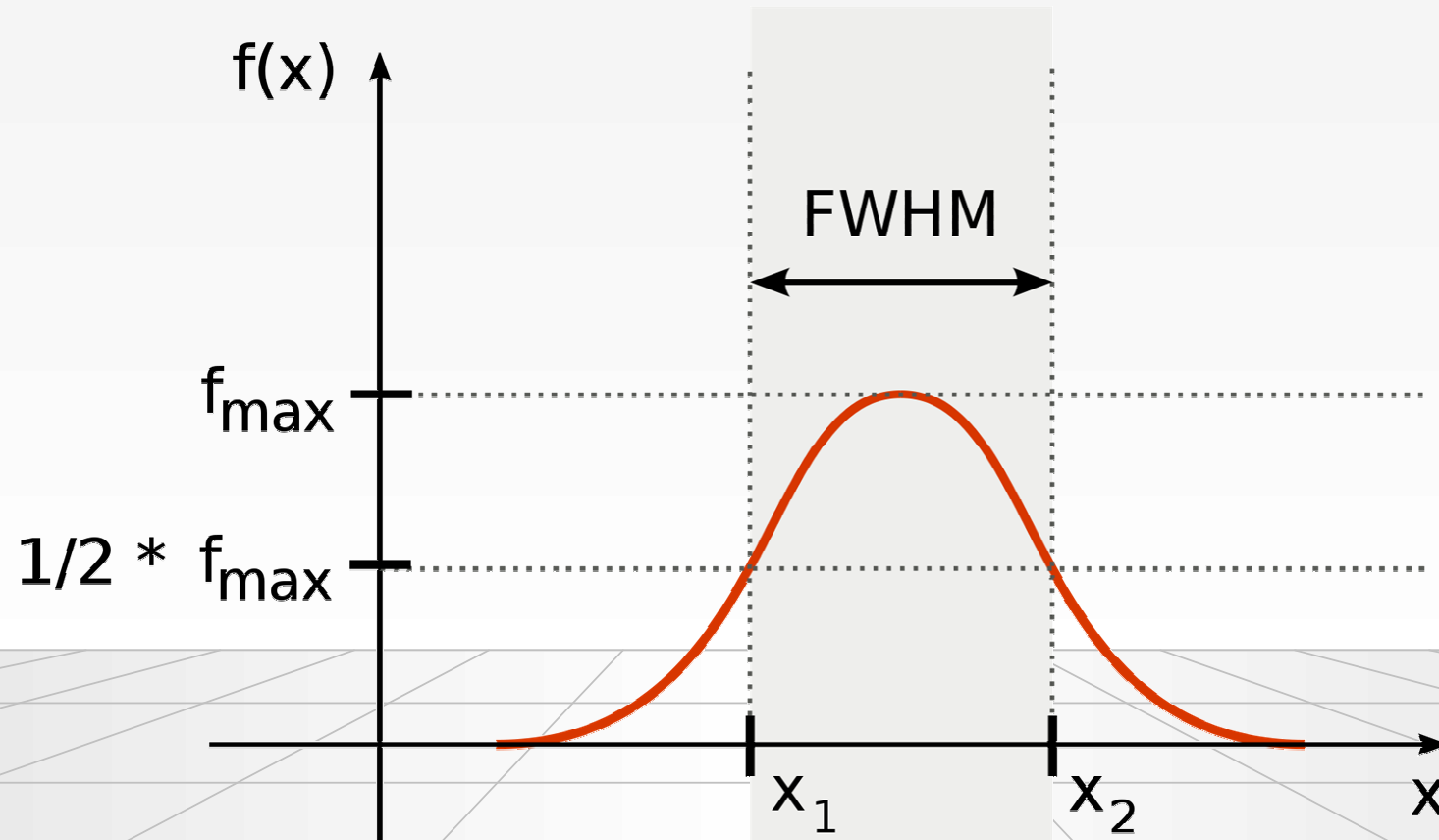
- Сигнал состоит из множества элементарных событий (например заряженная частица создает пару электрон-дырка в кремниевом детекторе)
- Число элементарных событий флуктуирует: где  $F$  это фактор Fano (0.1 для кремния).

$$\Delta N = \sqrt{FN}$$

$$\Delta E_{rms} = E_i \Delta N = \sqrt{FEE_i}$$

$$\Delta E_{FWHM} = 2.35 \times \Delta E_{rms}$$

# Ширина на полувысоте (FWHM)

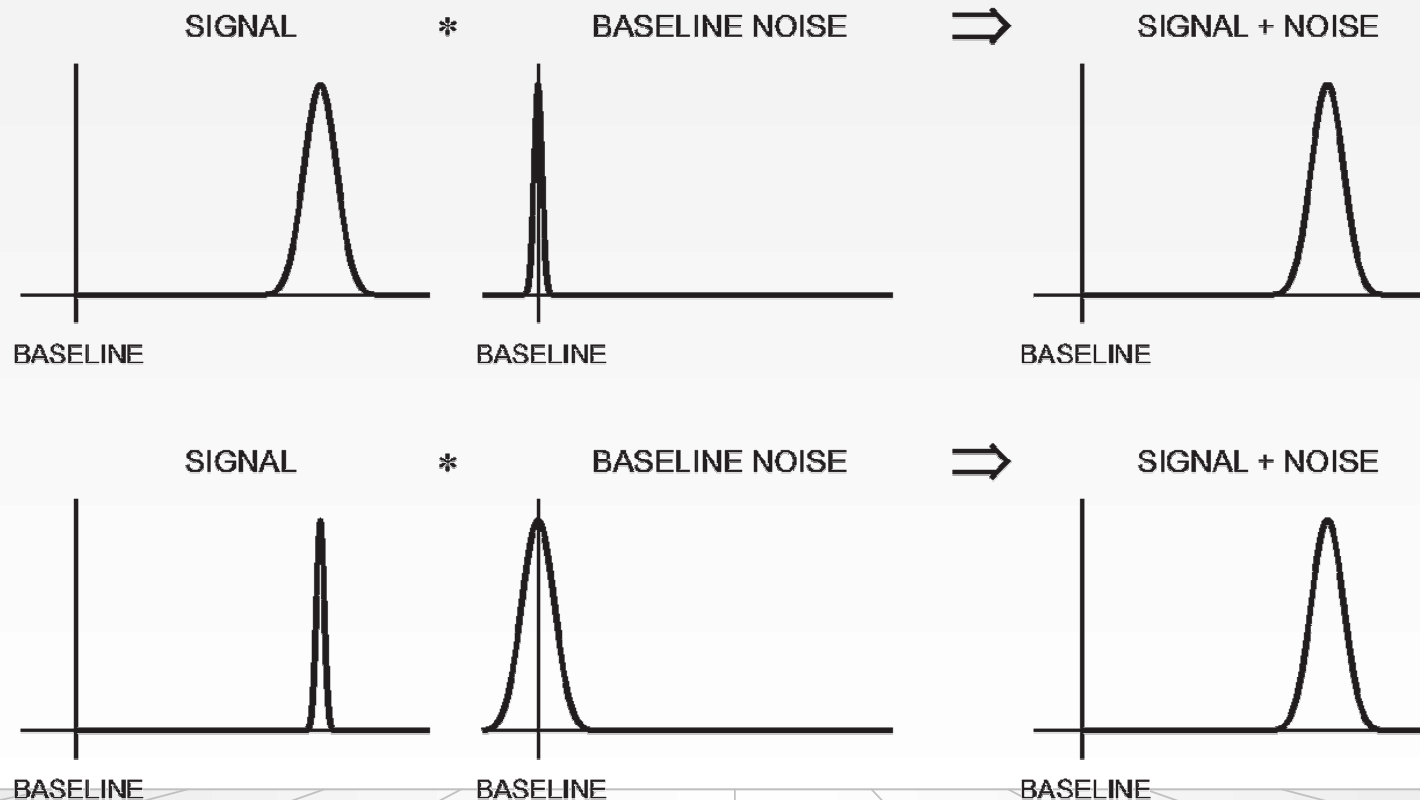


FWHM =  $2.35 \sigma$  для распределения Гаусса

# Шумы электроники

- Тепловой шум
  - Флуктуации (тепловые) скоростей носителей заряда в проводниках
  - Белый шум (во всем спектре частот)
- Дробовой шум
  - Флуктуации числа носителей заряда
  - Пропорционален суммарному среднему току

# SNR / Отношение сигнал/шум



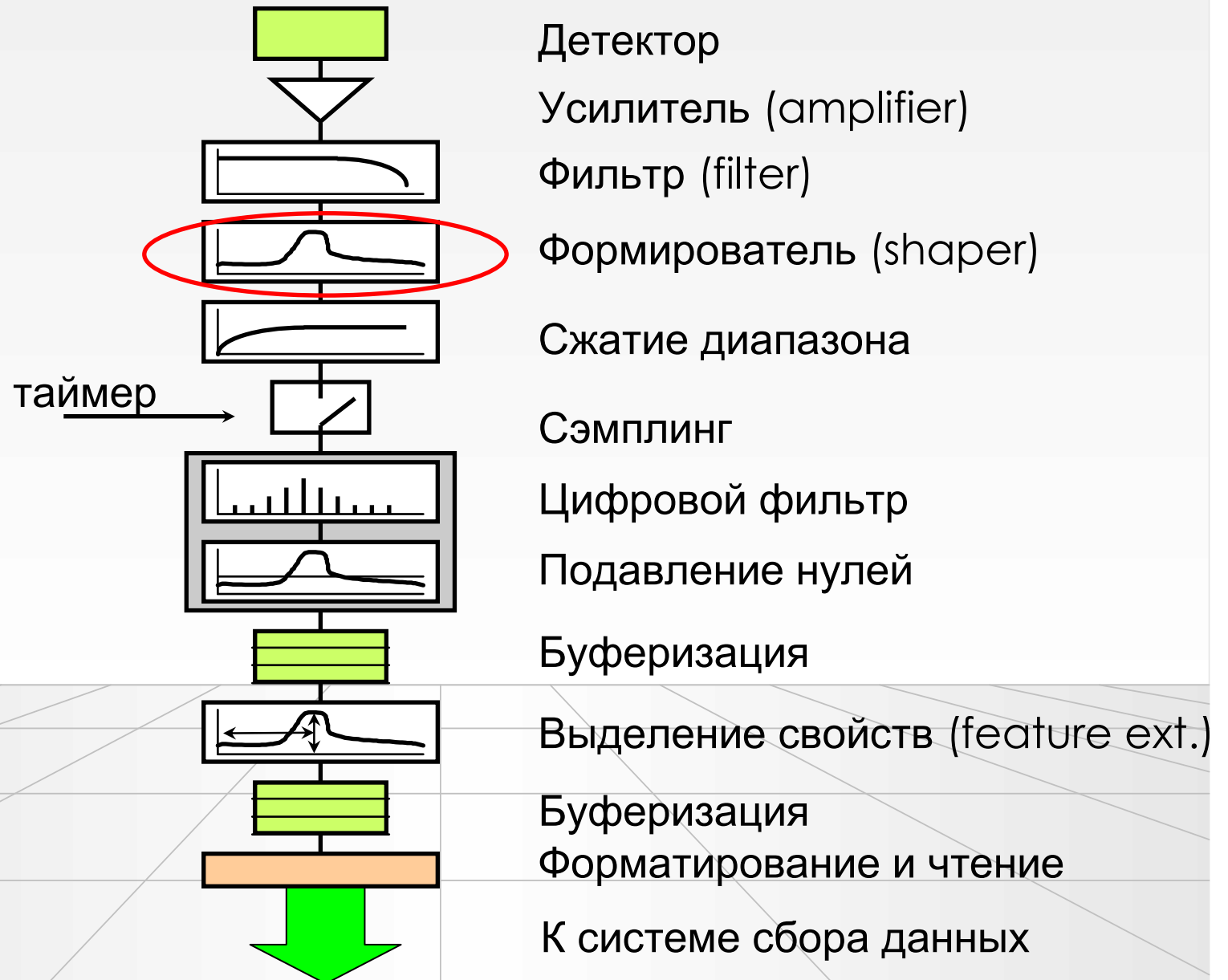
**Необходимо оптимизировать отношение сигнал/шум (SNR)**

# Полоса пропускания

- Пропускная способность усилителя ( $bandwidth=BW$ ) это диапазон частоты для которого выход составляет не менее половины от номинального
- Время нарастания (*rise-time*)  $t_r$  сигнала это время, за которое сигнал нарастает от 10% до 90% своего пикового значения
- Для линейной RC цепочки (усилитель):  
$$BW * t_r = 0.35$$
- Для быстро нарастающих сигналов (малое  $t_r$ ) необходима широкая полоса пропускания, но это увеличивает шум → необходимо формирование более «плоского» сигнала



# Конвейер регистрирующей электроники

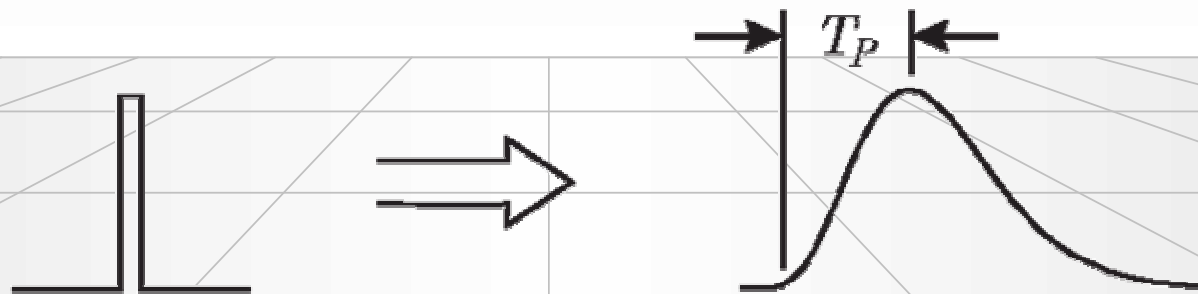


# Формирование сигнала (shaping)

- Быстро нарастающий сигнал “расширяется” – сглаживается вокруг пика
- Требуется меньшей полосы пропускания, и, соответственно, меньше шум

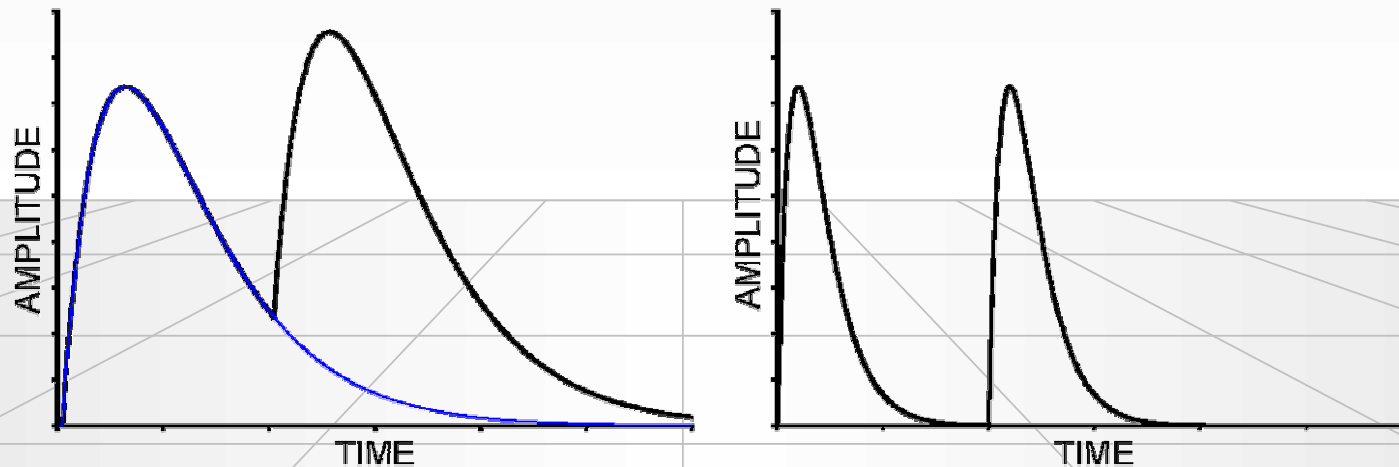
SENSOR PULSE

SHAPER OUTPUT



# Формирование сигнала

- Широкие импульсы уменьшают время между последовательными сигналами
- Необходимо ограничивать эффект нагромождения (“pile-up”) → импульсы не должны быть «слишком» широкими
- Обычно достигается компромисс между шириной и временем нарастания, путем обрезания хвоста сигнала



# Аналоговый/Цифровой/Двоичный

После усиления и формирования сигналы должны быть оцифрованы для дальнейшей обработки и транспортировки системой сбора данных (компьютерами)

1. Аналоговое чтение: аналоговая буферизация ; оцифровка после передачи с детектора

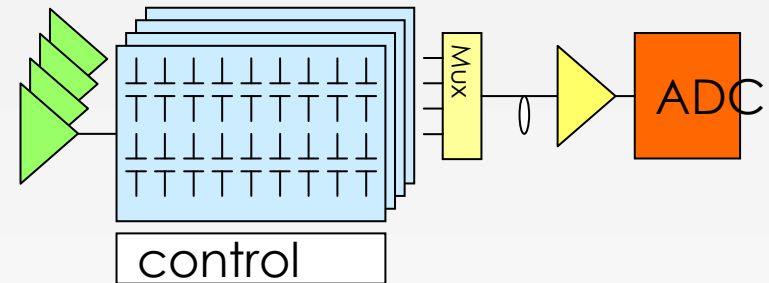
2. Цифровое чтение с аналоговым буфером

3. Цифровое чтение с цифровым буфером

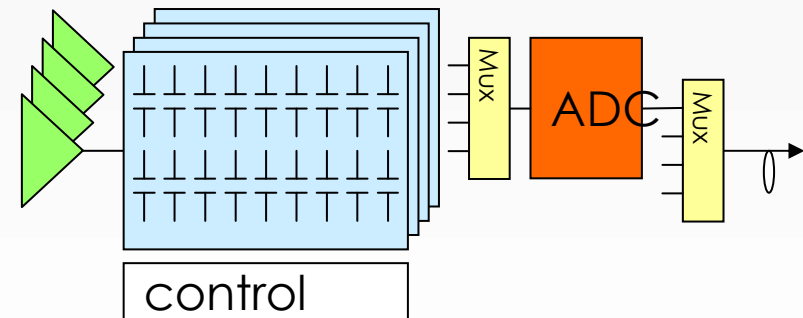
- *Двоичный*: дискриминатор сразу за формирователем

- Двоичный трекинг

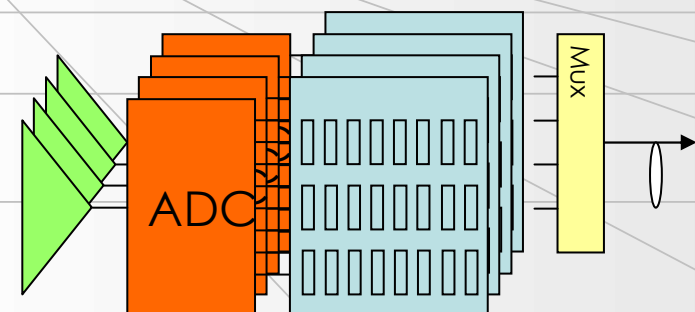
1) Analog memory



2) Analog memory

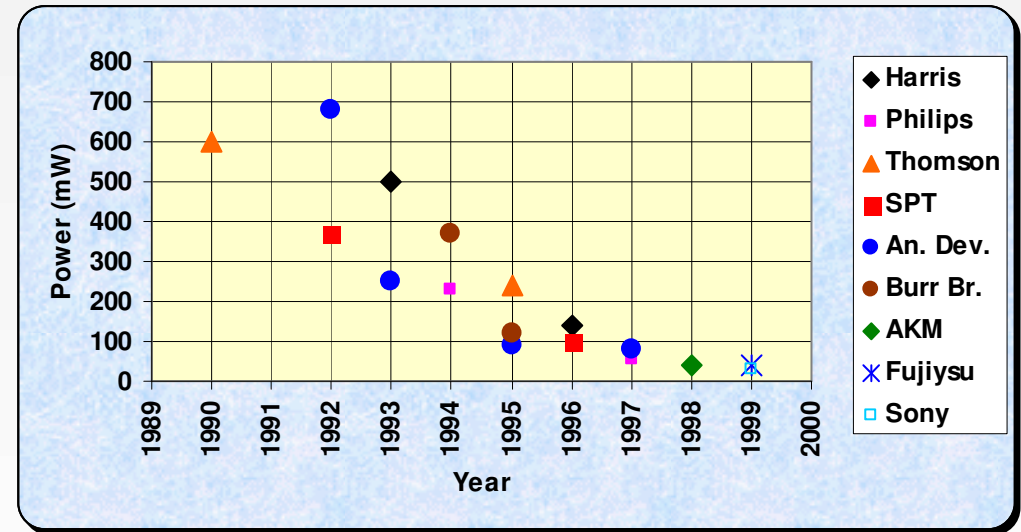


3) Digital memory



# Аналого-цифровое преобразование

- Тенденция к возможно более ранней оцифровке сигнала
  - Тоже происходит и в обычной электронике
- «Цена» ADC определяет выбор архитектуры
  - Сильно зависит от скорости и разрешения
- Входные частоты должны быть не более половины частоты измерения.
- ADC с высоким разрешением требуется стабильная (low jitter) тактовая частота



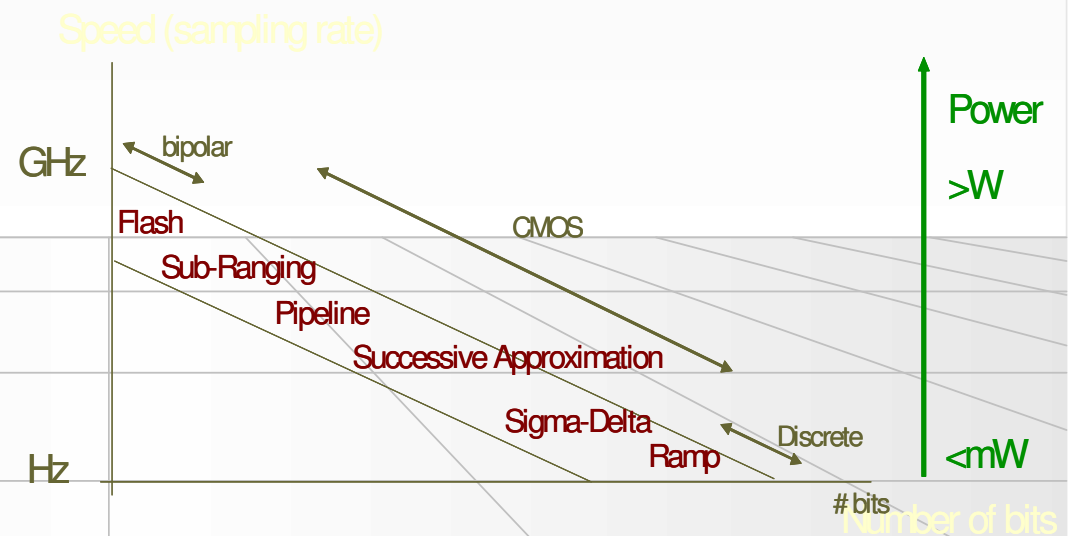
уменьшение потребления канала АЦП



# Важное замечание

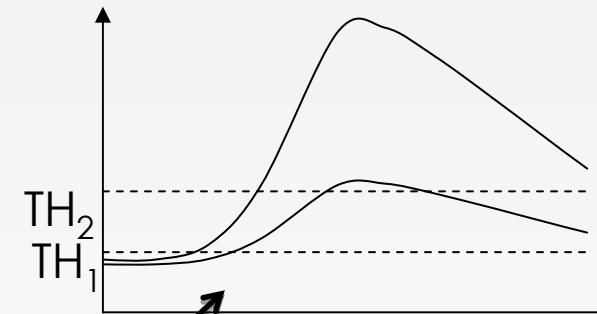
- Решение для детекторной электроники:
  1. быстро
  2. дешево
  3. с малым потреблением
- *Выберете любые два* 😊

- Цена:
  - Потребление питания
  - Площадь кремниевой пластины
  - Радиационная стойкость

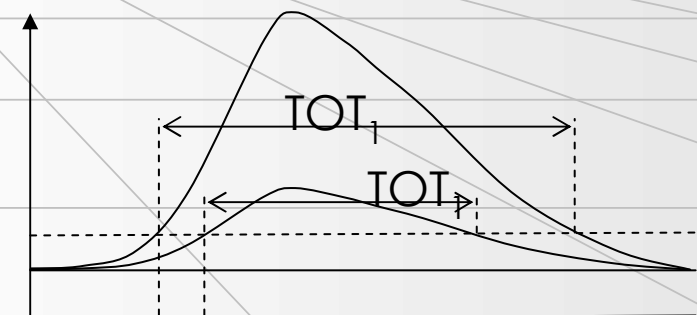
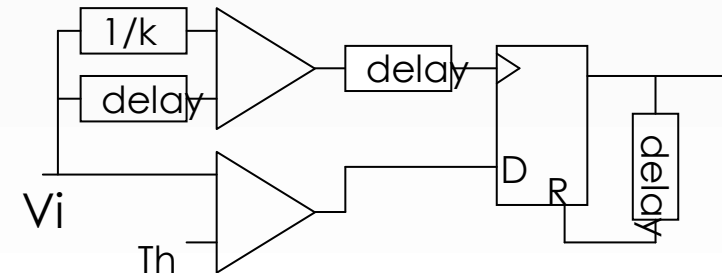


# Измерение времени (ВЦП/TDC)

- Измерения времени важны во многих физических экспериментах
  - Разделение индивидуальных столкновений (events)
  - Времена дрейфа
    - Положение в дрейфовой трубке ( двоичные детекторы с ограниченным временным разрешением:  $\sim 1\text{ ns}$ )
    - Время-проекционная камера (TPC) (хорошее время и амплитуда)
    - Время полета (TOF) (очень высокое разрешение:  $10\text{-}100\text{ ps}$ )
- Time walk: зависимость времени от амплитуды
  - Малый порог (ограничен шумом и пьедесталом)
  - Дискриминатор со следящим порогом (CFD)
    - Хорошо работает, но требует точных аналоговых задержек (кабельных) которые нелегко сделать внутри микросхемы.
  - Амплитудная компенсация
    - Отдельное измерение амплитуды (дорого!)
    - Измерение времени с двумя порогами: 2 канала ВЦП
    - Время-пороговый преобразователь (TOT): 1 канал измеряет время начала сигнала и его ширину
- TOT может быть использован в качестве простейшего АЦП:
  - например ATLAS Pixel



Constant fraction discriminator



$$T = T_r - f(\text{TOT})$$

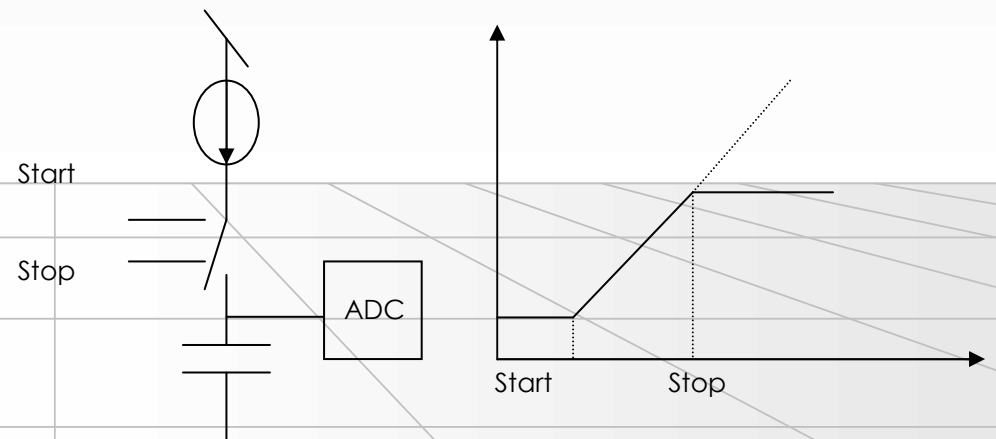
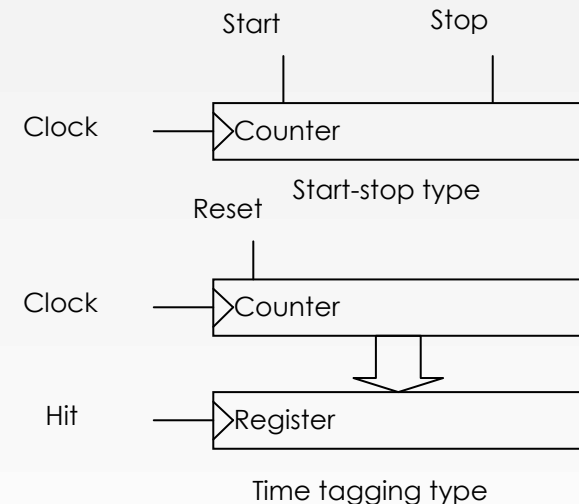
# Время цифровое преобразование

- Счетчик

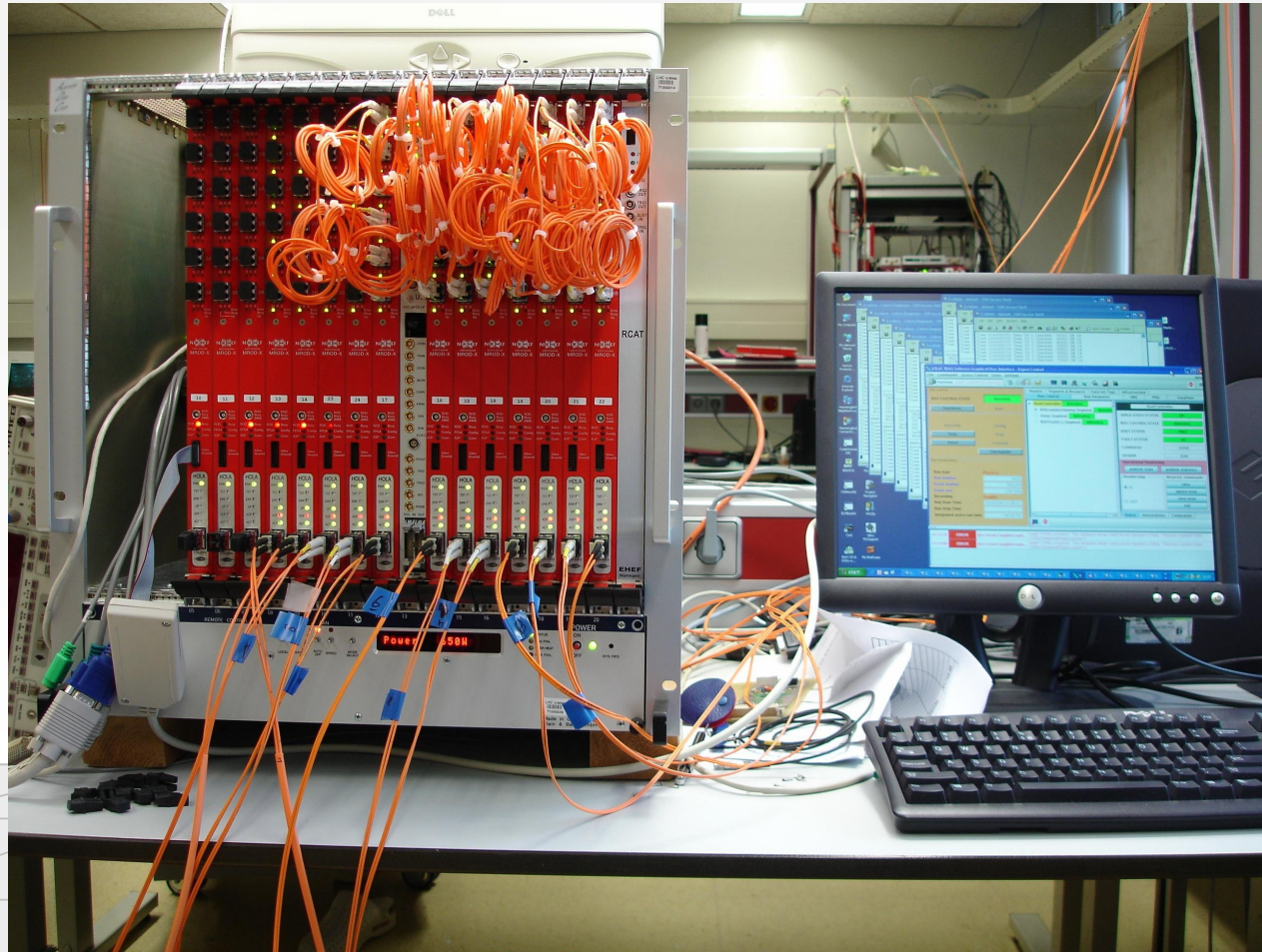
- Широкий динамический диапазон
- Хорошие и дешевые источники тактовой частоты – кварц.ген.
- Синхронизирован с системными часами - подходит для временных отметок
- Ограниченное разрешение:  $\sim 1\text{ns}$

- Интегрирование заряда (старт – стоп)

- Ограниченный динамический диапазон
- Высокое разрешение:  $\sim 1\text{-}100\text{ ps}$
- Необходима чувствительная аналоговая цепь с АЦП.
- Подвержен зависимости от температуры, необходима частая калибровка на месте
- Может быть объединен со счетчиком для расширения диапазона



# Вычитывание/Readout



**ATLAS MDT ROD test**

# После усиления/формирования/преобразования

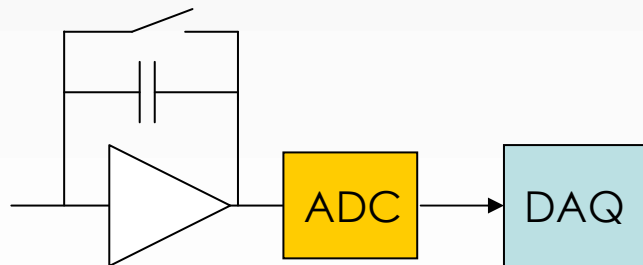
Как обычно ☺ все зависит от множества факторов:

- Число и плотность каналов
- Частота взаимодействий и загрузка каналов
- *Триггер*: уровни, задержки, частота
- Доступные технологии и стоимость
- Что хочется/можно сделать специализированной (или сделанной по заказу) электроникой и что можно сделать обычными компьютерами (вычислительные фермы)
- Уровни радиации
- Потребление питания и соответствующее охлаждение
- Оцифровка на детекторе

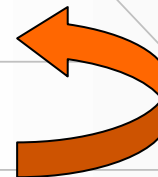


# Чтение: обычный интегратор

- Простой (одно измерение на канал)
- Медленные (и высокоточные) эксперименты
- Большие «мертвые времена»
- Ядерная физика
- Не очень применим для физики высоких энергий (ФВЭ)

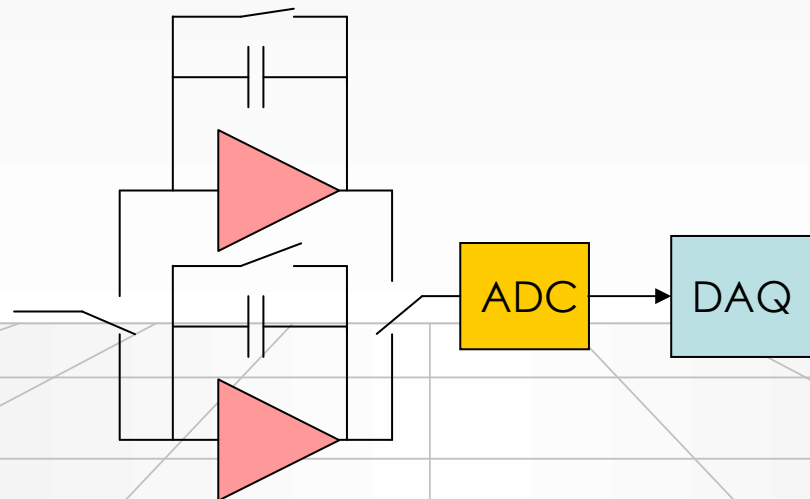


1. Собрать заряд
2. Конвертировать в ADC
3. Послать в ССД



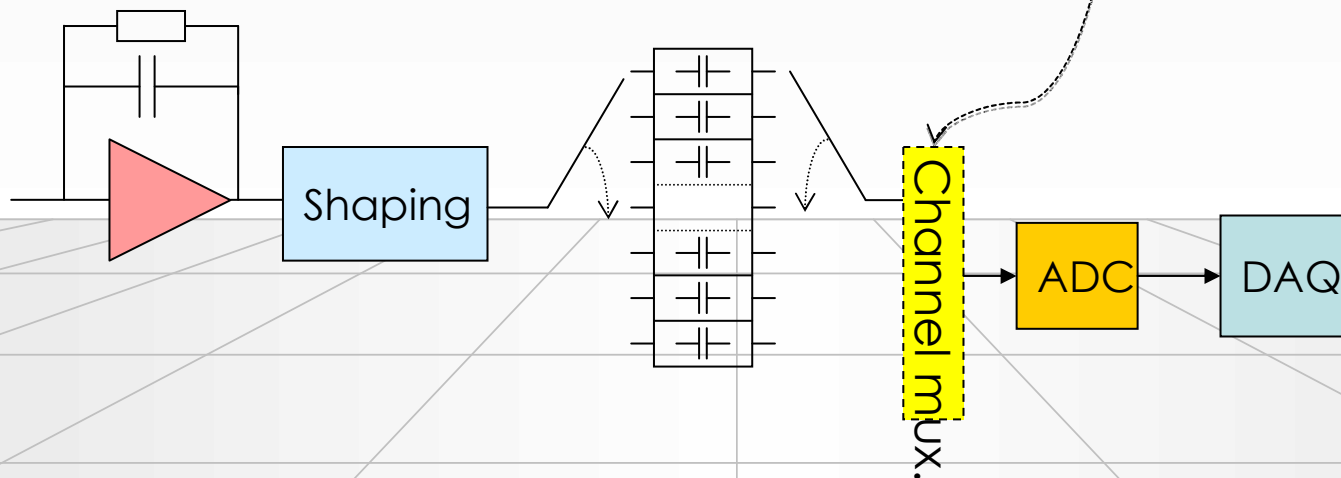
# Чтение: двойная буферизация

- Использование второго интегратора пока занят первый
- Существенно уменьшает «мертвое время»
- Все еще для низкой частоты



# Чтение: буфер на множество событий

- Подходит для экспериментов с периодической структурой «сбросов» событий и большим временем между «сбросами» (например на У70 или на SPS)
- Заполняет буфер событий во время сброса (быстро)
- Вычитывание буфера между сбросами (медленно)
- ADC может переключаться между каналами
- Возможна цифровая буферизация (в памяти)



# Аналоговая буферизация

- Широко используется при отсутствии ADC с необходимой скоростью или при большом потреблении питания
- Большой массив накопительных конденсаторов с ключами чтения/записи (управляемыми в цифровом виде) (SCA)
- Для однородности
  - В виде напряжения
  - В виде заряда с интегратором для чтения
- Примеры:
  - Сэмплирующие осциллографы
  - HEP: CMS трекер, ATLAS LAr калориметр, LHCb трекер, etc.

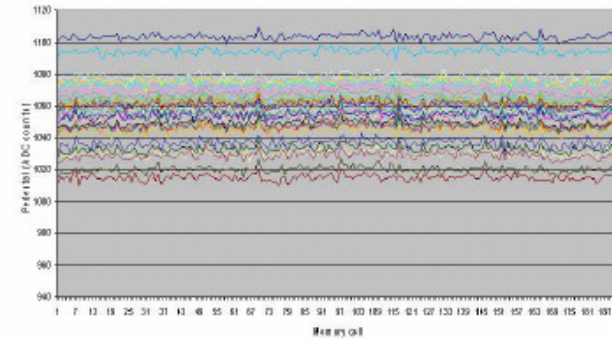


Fig. 9 Pedestals for each memory cell in the analog memory. All 32 channels plotted for each of the 192 columns. This plot is of a packaged PACE3 device. 1 ADC count = 0.435mV.

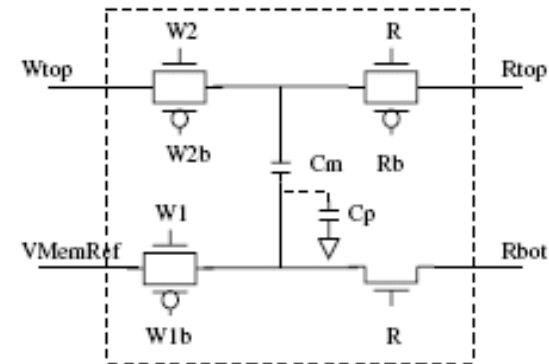
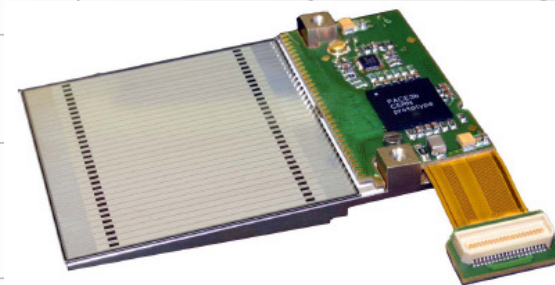


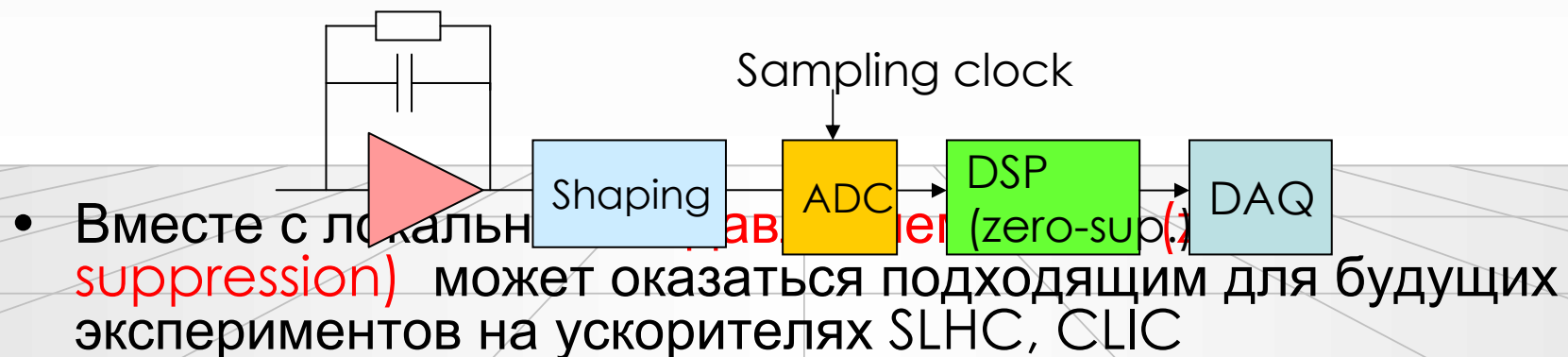
Fig. 5 The analog memory cell of PACE3





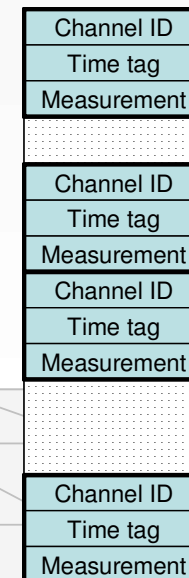
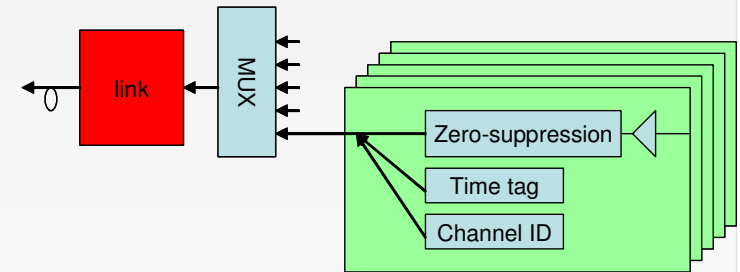
# Непрерывная оцифровка

- Необходима в экспериментах с большой частотой событий и загрузкой
- Формирователи вместо мультиплексных интеграторов
- Позволяет вести цифровую обработку сигнала в ее традиционном виде (непрерывный поток данных)
- Выходная частота может оказаться слишком большой относительно того что может «переварить» система сбора



# «Подавление нулей»

- Зачем тратить пропускную способность системы посылая незначащие данные ?
- Можно **«подавить нули»** и посылать только «интересные» данные
  - Посылая вместе с данными номер канала и/или временную метку
  - Нельзя терять важную информацию, поэтому это должно осуществляться с большой осторожностью, с учетом пьедесталов, шумов и т.д.
  - Бессмысленно при загрузках более ~10%
- Альтернатива: сжатие данных
  - Кодирование Хаффмана и т.п.
- Бесплатный сыр бывает только в мышеловке
  - Частота данных постоянно изменяется и ее нужно уложить в существующую пропускную способность системы сбора
  - События становятся асинхронными
  - Сложное управление буферизацией (переполнения)
  - До того как эксперимент будет построен и запущен трудно дать надежные оценки необходимых требований к скорости (фоны, новая физика, etc.)



# Синхронное чтение

- Все каналы делают одновременно одно и то же
- Синхронизированы с общими часами (bunch crossing clock)
- Частота данных в каждом канале идентична и зависит только от частоты *триггера*
- Буфера (*разравниватели/derandomizers*) одинаковой глубины и их заполнение зависит только от *триггера*
- ☹ куча пропускной способности расходуется зря
- ☺ Нет проблем если загрузка детекторов или шум больше нежели ожидалось

