

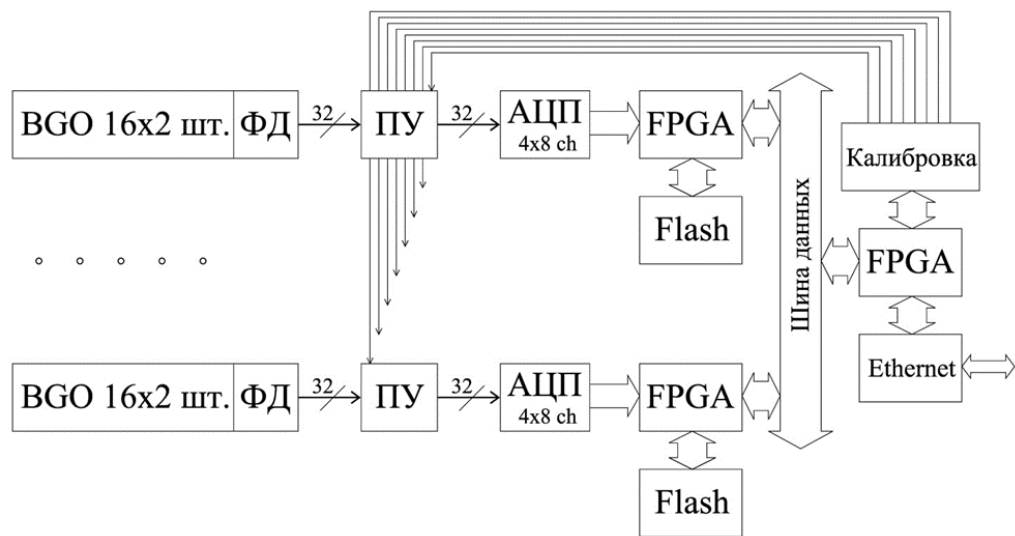
Возможное направление развития электроники детекторов (взгляд с третьего этажа главного здания)

*А. О. Горковенко, Д. Н. Григорьев, А. Н. Козырев,
В. Г. Петроченко, А. А. Рубан, Ю. В. Юдин*

(на основании опыта удачных проектов)

Детектор для импульсной рентгенографии

16384 калориметрических канала + сотни контрольных



- BGO – время высвечивания 300 нс
- ПУ – ЗЧУ + восстановление формы токового сигнала + небольшое сглаживание 100 нс.
Для увеличения динамического диапазона 4 переключаемых Кус с временем установления < 1 мкс.
- Непрерывная оцифровка АЦП – 50 МГц 14 бит (12 эффективных бит)
- Кольцевой буфер ~80 мкс

Детектор для импульсной рентгенографии

- Обработка сигнала – полностью цифровая, в компьютере
 - улучшение соотношения сигнал/шум более 2 раз
 - увеличение динамического диапазона за счет восстановления зашкаленных сигналов (с точностью 1,5% при зашкале до 3 раз)
 - высокая степень контроля за коэффициентами передачи сигналов и другими влияющими на энергетическое разрешение эффектами
- Предельное энергетическое разрешение – 0,5%
- При пороге регистрации 5σ диапазон регистрируемых сигналов ~35000 (динамический диапазон ~17,5 бит)
 - По этим параметрам соответствует калориметру детектора CMS

Детектор для импульсной рентгенографии

- Высокая способность к измерению наложенных сигналов (см. далее)
- Помехоустойчивость: сброс на мишень электронного пучка с током 2 кА длительностью 100 нс и фронтами <10 нс не увеличивает шумы (в начале работ наводки были порядка сигналов)
- Надежность: детектор собран в 2018 году, сдан в эксплуатацию в 2019 году, за все это время пришлось заменить только несколько плат (в основном пайки), последний раз более 3 лет назад.

Детектор для импульсной рентгенографии

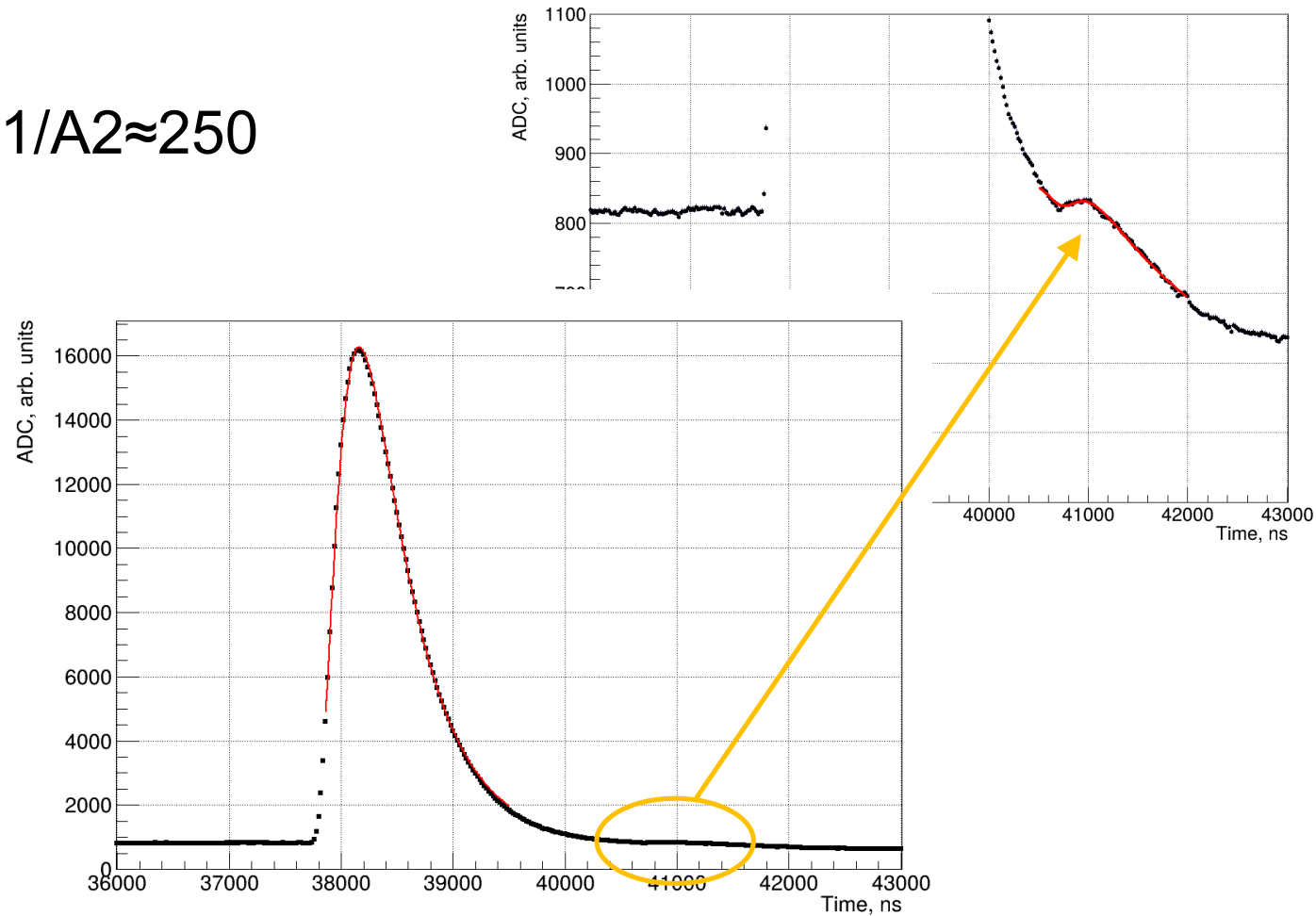
- На основании положительного опыта предлагается

ФИЛОСОВСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ:

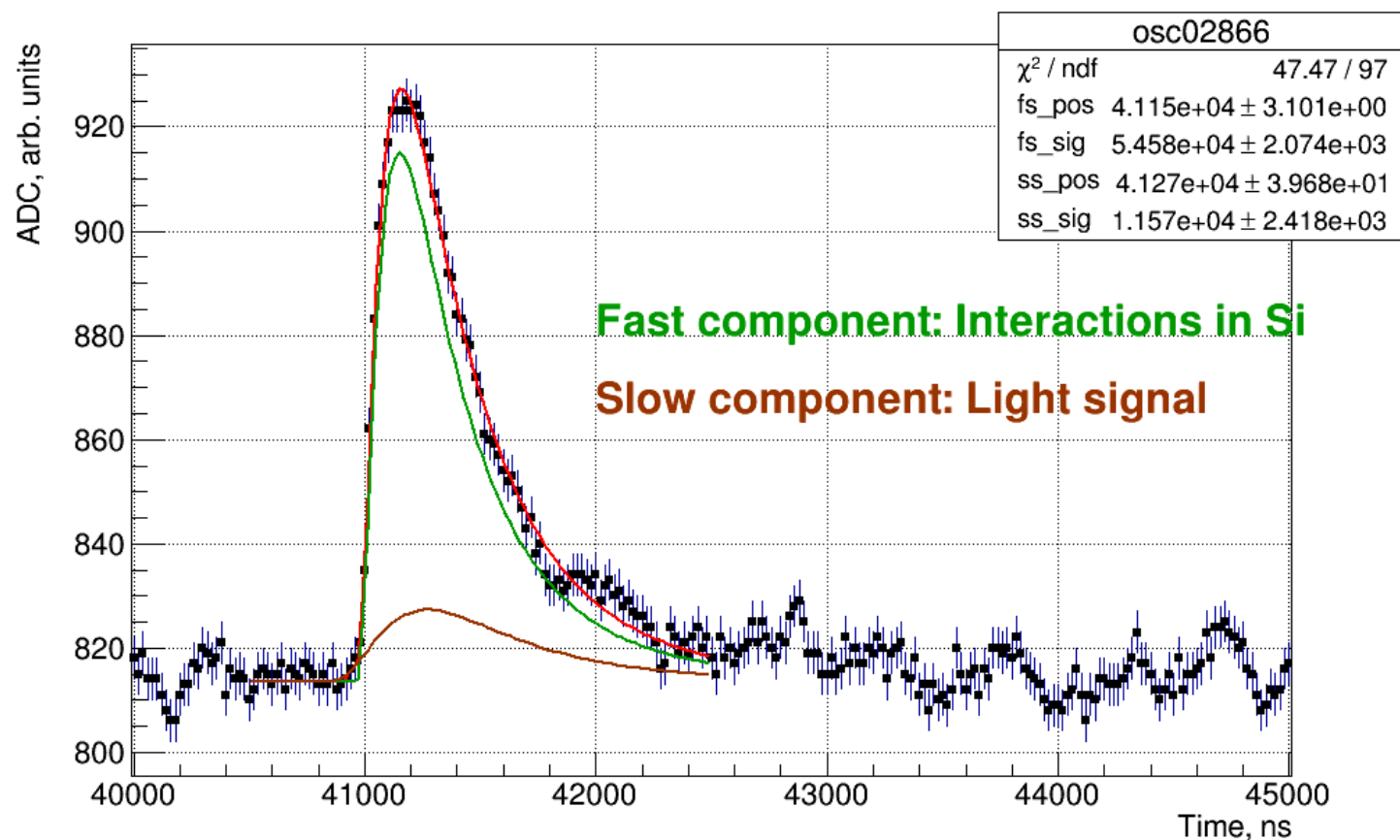
- Непрерывная оцифровка сигналов с запасом по частоте
- Вся тяжесть обработки переносится в вычислительные системы
- В аналоговой электронике только первичное подавление шумов (например, ЗЧУ для калориметров) и минимально возможное интегрирование, чтобы сохранить форму сигнала с регистрирующего элемента и предоставить максимальную свободу для применения математических методов

Измерение малых амплитуд сигналов на фоне больших

$A1/A2 \approx 250$



Измерение близких сигналов

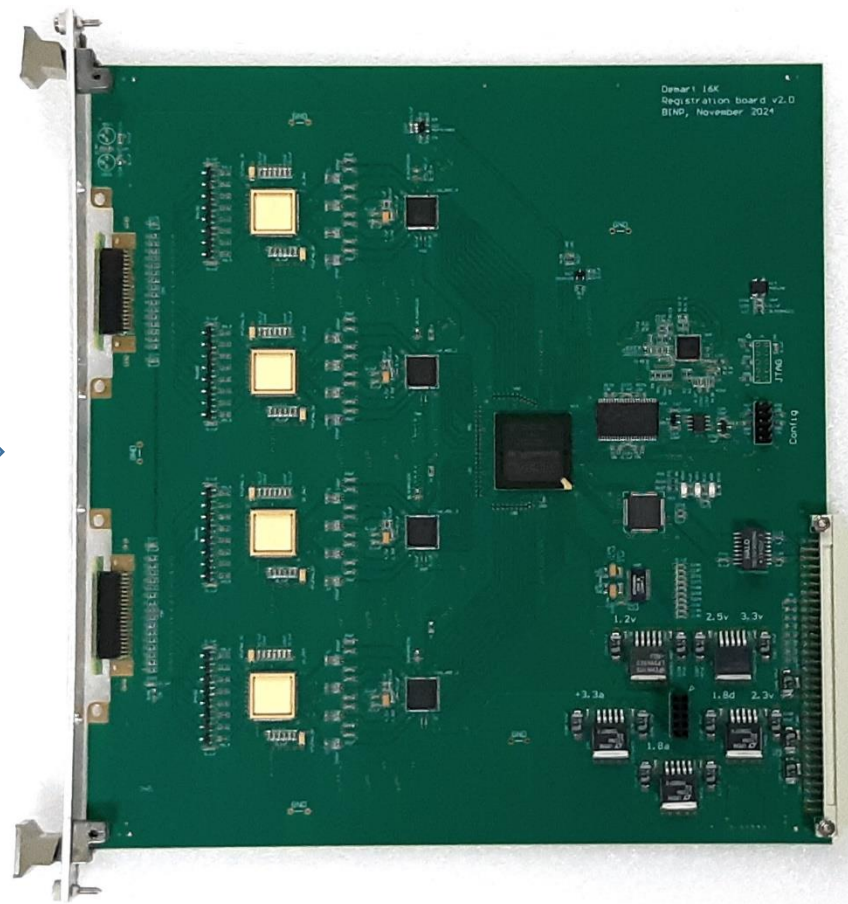
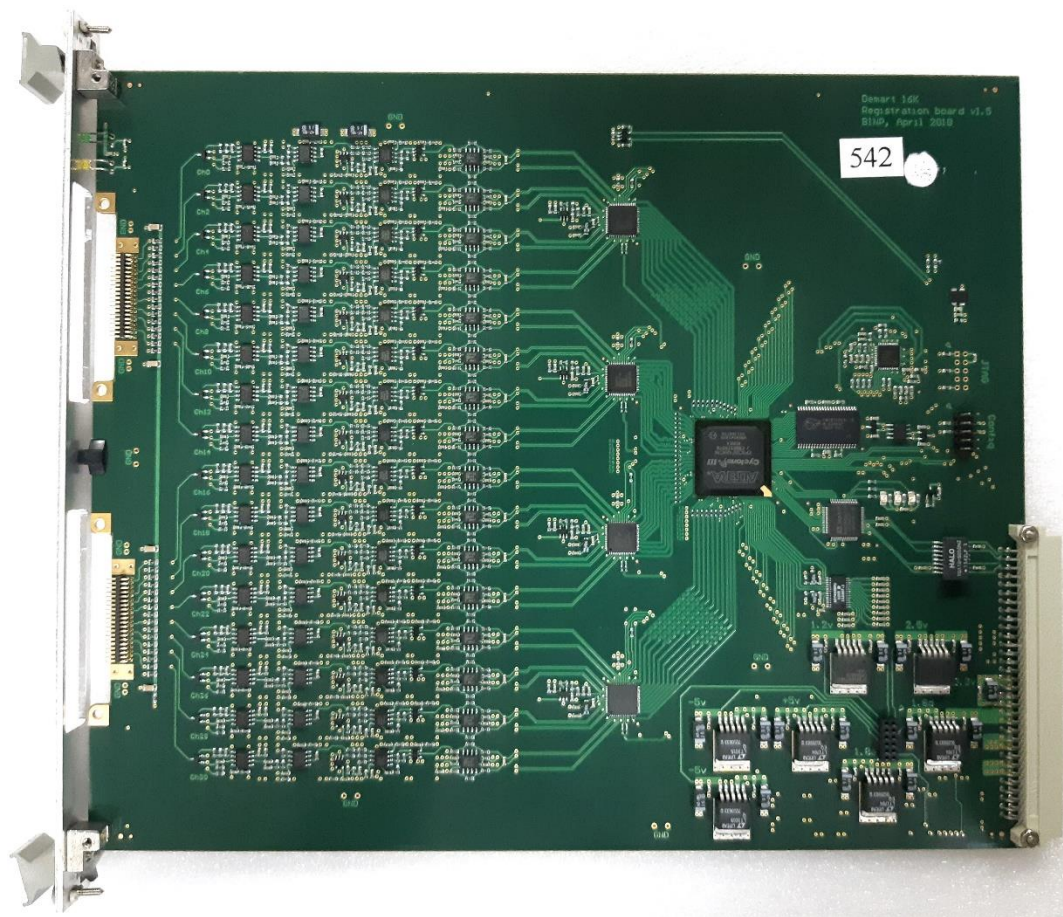


Даже небольшое изменение формы измеренного сигнала позволяет идентифицировать, что это наложение двух сигналов

Детектор для импульсной рентгенографии

- Следующий этап: производство 8 детекторов (131072 каналов)
- Разработана и запущена в производство на Микроне специализированная микросхема усилителей:
- Немного улучшилось соотношение сигнал/шум (но это не было целью, достаточно было не испортить имеющееся)
- Потребляемая мощность уменьшилась в 14 раз, количество паек порядка на 2 – **А ЭТО НАДЕЖНОСТЬ**

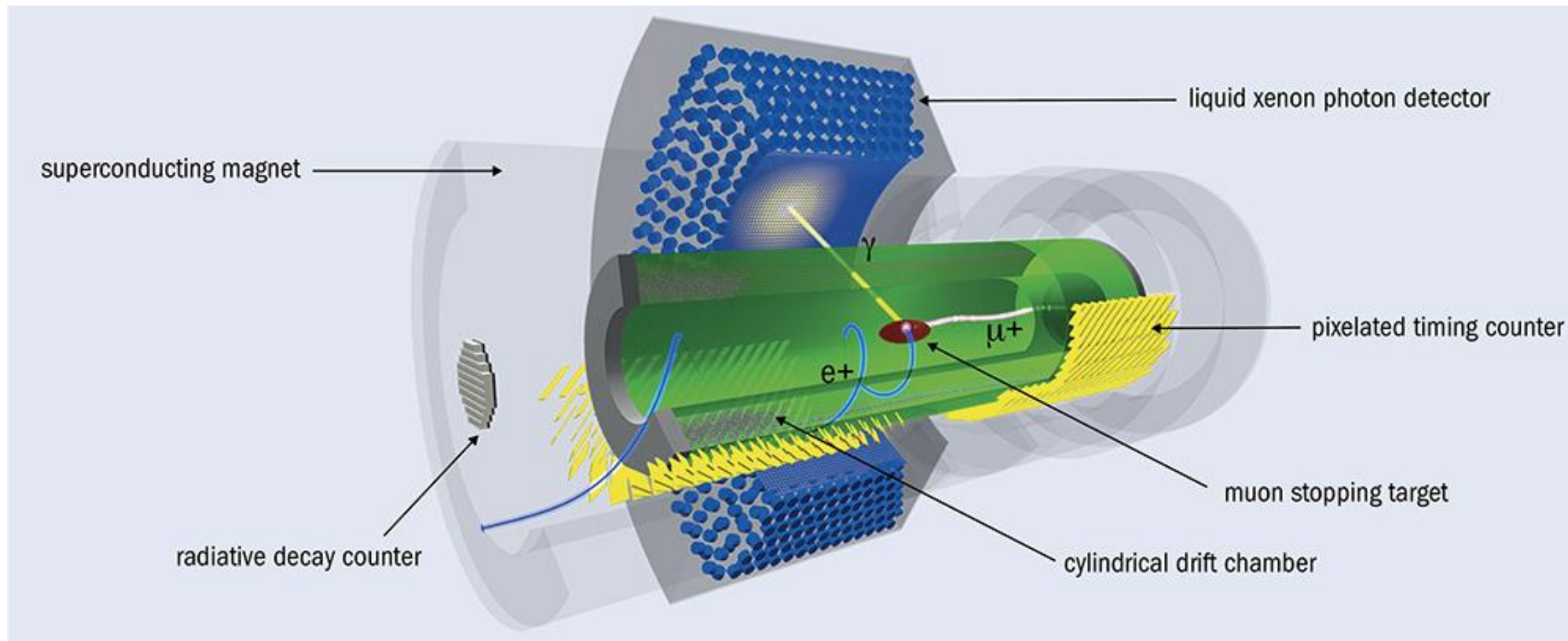
Детектор для импульсной рентгенографии



Детектор для импульсной рентгенографии: проблема дальнейшего развития...

- Для следующего поколения детекторов надо перейти на частоту оцифровки 200 МГц, минимум 150 МГц и с реализацией возникли серьезные проблемы:
 - соответствующие АЦП дороги и плохо доступны
 - для работы с ними необходимы быстрые и дорогие ПЛИС
 - и те и другие очень сложны в эксплуатации, например, даже питания микросхем надо включать в определенной последовательности с заданными интервалами между операциями

Детектор эксперимента MEG-II



Детектор эксперимента MEG-II

система	Разрешение на 53 МэВ
Калориметр на жидком ксеноне, свет регистрируется 4092 SiPM и 668 ФЭУ	Энергетическое лучше 2% Временное 65 пс
Дрейфовая камера 1728 анодных проволок	Координатное в одной ячейке лучше 120 мкм
Временные счетчики: пластик + SiPM, 512 счетчиков	Временное в одном счетчике 80-100 пс, в событии ~35 пс

Все разрешения рекордные для этой энергии

Всего 7000 каналов, аналоговые схемы для систем индивидуальные, Но вся оцифровка унифицирована на основе одной микросхемы, это облегчило разработку электроники, позволило использовать несложные ПЛИС, на которые возложены только функции компрессии и передачи данных, а также упростило ПО чтения данных
Надежность – за полгода набора данных ни одной замены.

Детектор эксперимента MEG-II

- DominoRingSampling DRS
- 1024 емкости, которые записываются по кругу с частотой 1-6 ГГц
- Входная полоса 850 МГц
- Эффективный динамический диапазон 11,5 бит
- 8+1 канала, размер кристалла 4,2x4,2 мм технология 0,25 мкм
- Потребляемая мощность 40 мВт/канал
- В оригинальной версии использовался недорогой АЦП 33 МГц 12 эффективных бит
- Сквозной аналоговый выход
- Очень удачная микросхема, используется в экспериментах по всему миру и в коммерчески доступных электронных блоках
- Недостаток – измеряемое окно ≤ 1 мкс – проблемы с временем дрейфа в газовых детекторах и задержкой триггера

Предложение по новой электронике

- ВЭПП-6: между сгустками 2,8 нс
- СКИФ: между сгустками 2,8 нс
- Новый детектор для рентгенографии: шаг измерений 5-6 нс
- Кремниевые детекторы: время дрейфа 10-20 нс
- Требования к микросхеме АналоговыхВыборокЭкспандер АВЭ (предварительные):
 - Частота записи емкостей 100-400 МГц (задается внешним генератором)
 - Количество емкостей 2к
 - Возможность вычитывать только заданную область емкостей
 - Сквозной выход (для триггера – система принципиально с общим стопом)

Предложение по новой электронике

- В детекторе для ВЭПП-6 хочется разместить аналоговую электронику непосредственно на детектирующих системах, следовательно она должна быть компактна и мало потреблять: ШИРОКОЕ применение специальных интегральных микросхем (СИС, ASIC)
- Оцифровка информации с АВЭ:
 - использовать готовую, включая ПО, от детектора для рентгенографии
 - Разработать новую с использованием АЦП с избыточной разрядностью (данное решение успешно реализовано в системе термостабилизации детектора для рентгенографии существенно упростив эксплуатацию)
 - ???

Обработка информации в измерительных платах

- Путь героев (g-2). Передавать все в компьютер без отборов и компрессии – плюс максимальная гибкость в анализе, минус – большой поток данных.
- Путь самураев (BELLE). Полная обработка данных в ПЛИС плат, передается амплитуда и время, +небольшая часть сырых данных для настройки параметров обработки данных в ПЛИС, которые периодически обновляются. Плюс - минимальный поток данных, минусы- требуется мощная ПЛИС и не очень эффективное подавление наложений, но оно и так сильно ограничено в BELLE временем высвечивания $CsI(Tl)$ 1 мкс.

Обработка информации в измерительных платах

- Путь героев (g-2). Передавать все в компьютер без отборов и компрессии – плюс максимальная гибкость в анализе, минус – большой поток данных.
- Путь ландскнехтов (MEG). Подавить в ПЛИС нули (используется более сложный алгоритм, чем просто порог), а информацию о сработавших каналах полностью передать в компьютер +небольшая часть сырых данных для настройки параметров обработки данных в ПЛИС, которые периодически обновляются.
- Путь самураев (BELLE). Полная обработка данных в ПЛИС плат, передается амплитуда и время, +небольшая часть сырых данных для настройки параметров обработки данных в ПЛИС, которые периодически обновляются. Плюс- минимальный поток данных, минусы- требуется мощная ПЛИС и не очень эффективное подавление наложений, но оно и так сильно ограничено в BELLE временем высвечивания $CsI(Tl)$ 1 мкс.

Опыт разработки микросхем

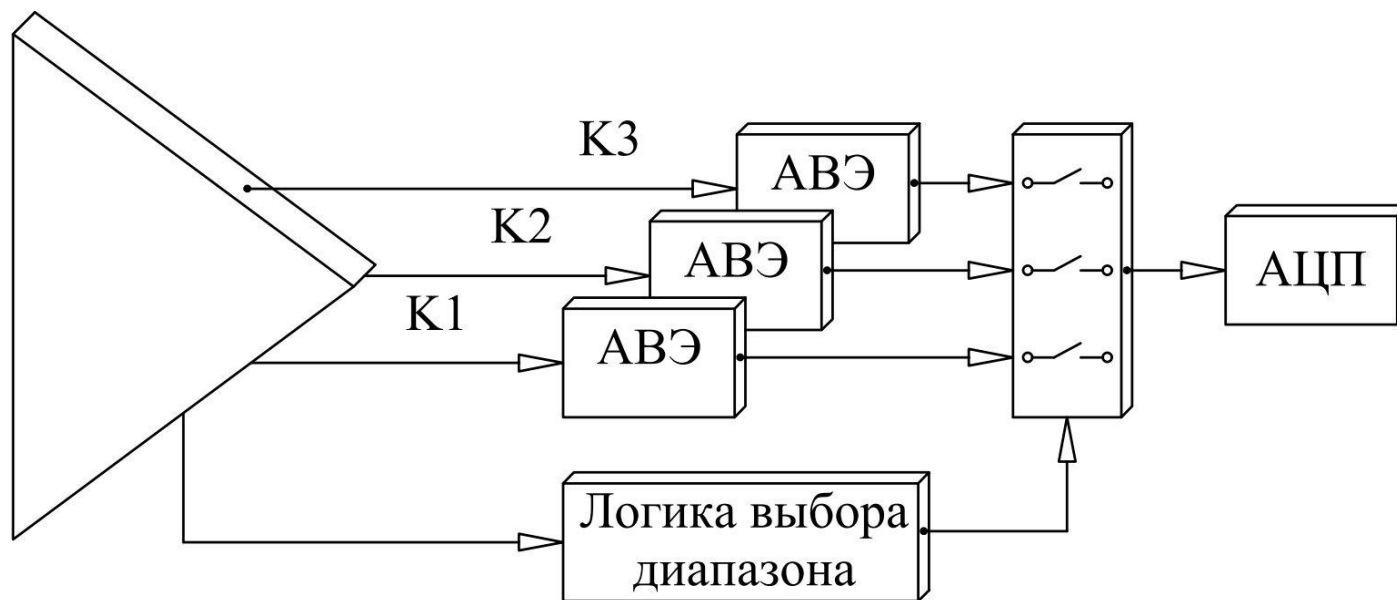
- Микрон – технология 180 нм, закладка 25 пластин диаметром 200 мм, гарантированный выход годных 22 пластины, на одной пластине разместилось около 1000 микросхем 5x3 мм (8 усилителей)
- При этом размере микросхем выход годных >90%, с увеличением размера микросхем он падает, 13x15 мм – около 50%
- MPW (разработка, на одной пластине несколько проектов и стоимость делится между Заказчиками) – 4 млн. руб.
- SPW (массовое производство) – 40 млн. руб. за разработку технологического процесса, фотошаблоны и т.д. с изготовлением одной закладки.
- Следующая закладка – 3,5 млн. руб., меньше 200 руб./за микросхему, корпусировка – примерно столько же, то есть при 8 каналах в микросхеме 50-100 руб./за канал – надо экономить время разработчиков и монтажников, количество кабелей, а не корпуса!
- Срок выполнения этапа ~1 год.
- Л.И. Шехтман: в Китае MPW немного быстрее, стоимость такая же, про SPW неизвестно, так как больших количеств не заказывалось.

Опыт разработки микросхем

- Каждый производитель использует свой набор библиотек и, например, разработанную в Китае микросхему для кремниевого детектора нельзя перенести на Микрон, придется заново разрабатывать, надо сразу решать, где будет производство.
- На одной пластине можно размещать несколько микросхем, но только если они используют одни и те же технологические процессы. Скорее всего надо будет разрабатывать пластину с запоминающими емкостями и пластину с усилителями (на нее можно ставить ключи, дискриминаторы, не сложную логику). Возможно для калориметров надо будет делать третий тип пластин, так как из-за большой емкости фотоприемников нужны большие емкости обратной связи и транзисторы с большой крутизной, то есть с большой площадью затвора, но с другой стороны, возможно их можно сделать по технологии 1 мкм, которая на порядок дешевле и доступней.

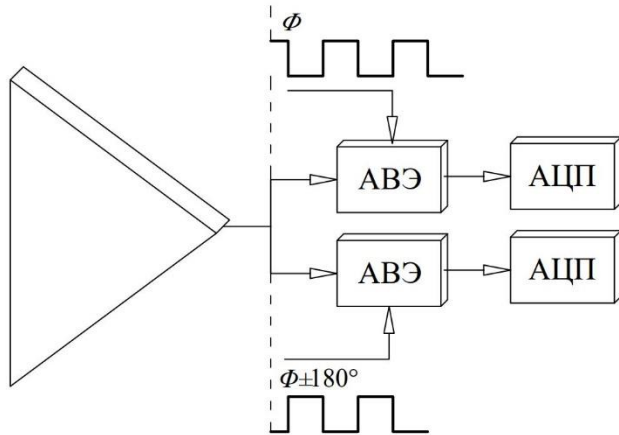
Возможные расширения параметров

- Увеличение динамического диапазона: буферный усилитель с несколькими $K_{ус}$, каждый выход на свою микросхему АВЭ, простая логика решает, сигнал с какой оцифровывать



Возможные расширения параметров

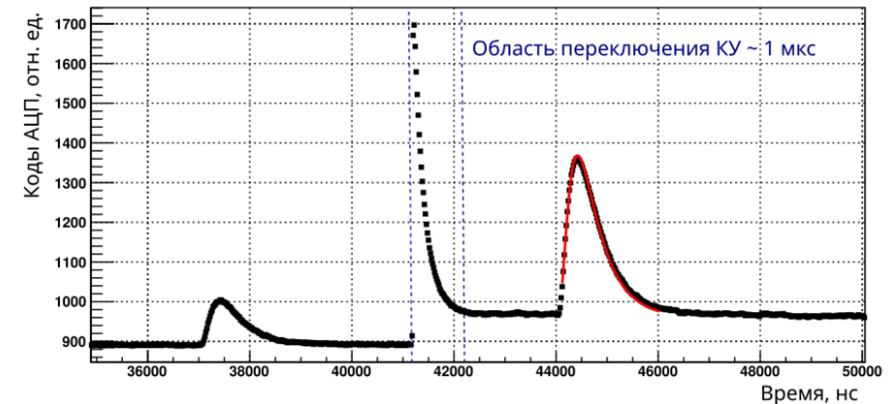
- Улучшение временного разрешения: сигнал подается на несколько АВЭ, тактовые частоты которых сдвинуты по фазе



- Увеличение окна измерений: сигнал подается на несколько АВЭ, на каждую из которых приходит свой сигнал «СТОП»

Аналоговые схемы: калориметр

- Сигналы со всех каналов подаются на АВЭ, подавление нулей после оцифровки
- Вариант 1 (предпочтительный с моей точки зрения): микросхема с большим динамическим диапазоном без ключей и логики, несколько АВЭ в каждом канале
- Вариант 2 (реализован В.М. Аульченко для детектора для рентгенографии): выбор Куs в зависимости от сигнала, тогда 1 АВЭ, но с моей точки зрения малоприменим для непрерывного потока данных из-за переходных процессов



Аналоговые схемы: ДК и т.д.

- По опыту КМД-3 для решения проблем с наводками достаточно усилить на камере сигнал в 10-20 раз. Это можно сделать на двух транзисторах и по основным параметрам СИС выигрыша не даст. Но использование СИС позволит реализовать дополнительные возможности. Эта же микросхема пойдет и для дрейфовых трубок, возможно и для ТРС тоже.
- Детекторы SiPM (пластик, АШИФ) – к СИС ДК добавить управление напряжением на SiPM, реализуемо на той же пластине, если регулировать добавочное напряжение, а не полное.
- Вопрос к физикам о загрузках и геометрии событий: в этих СИС можно реализовать выбор сработавших каналов и выдавать наружу, например, 2 сигнала при 8 входах, что кардинально уменьшит количество кабелей из детектора, причем самых неприятных, которые должны проходить через зазоры в калориметре, ухудшая разрешение.

Аналоговые схемы: кремниевые детекторы

- Лучший вариант – использовать с небольшой модификацией удачную разработку группы Л.И. Шехтмана, основной вопрос: фоновая загрузка, в ней время интегрирования 100 нс.
- Время сбора заряда 10-20 нс, то есть формально можно в разы уменьшить время интегрирования. Но с другой стороны, обеспечить необходимый уровень шумов 1000-2000 электронов при таких коротких временах нетривиальная задача...

Электроника для черенковских колец

- Нужен другой подход, каналов очень много, но срабатывает малая доля и фактически фиксированная амплитуда, 1-2 фэ. Поэтому необходимо и достаточно по одному кабелю передавать битовую маску сработавших каналов, желательно по второму кабелю передавать аналоговый сигнал с выбранного канала для оцифровки с целью контроля усиления SiPM и порогов (такой подход реализован в прототипе электроники для COMET).
- Работа с SiPM – заведомо СИС, но скорее всего придется ставить внутрь небольшие платы с ПЛИС на борту, может быть и выборочную оцифровку реализовать в них.
- В любом случае, это отдельная сложная разработка. И ее необходимость надо очень сильно обосновывать, показывая кардинальное улучшение при применении черенковских колец.

Вместо заключения

- Предложенное направление развития электроники заведомо не единственно возможное
- Скорее всего оно не самое оптимальное по параметрам
- Основное достоинство – основано на удачных примерах реализованных проектов и имеющемся опыте взаимодействия с производителями микроэлектроники
- Просьба ко всем подумать, обсуждения в частном кругу приветствуются. Степень готовности к началу реализации – можем приступить к переговорам с технологами в 1 кв. 2026 г.