



Развитие техники и методики эксперимента в физике высоких энергий

В.Волков, А.Воронин, А.Демьянов, А.Ершов,
Д.Карманов, В.Клюхин, А.Лефлат, О.Лукина,
М.Меркин

Просмотрово-измерительный комплекс

В начале 1980-х годов в ряде институтов страны, таких как ИФВЭ, ИТЭФ, ОИЯИ, в зарубежных научных центрах Европы и США были разработаны и успешно функционировали сравнительно мощные системы анализа данных с трековых установок (пузырьковых, искровых, стримерных камер, гибридных спектрометров), использующих фильм-съём информации.

В НИИЯФ МГУ в сотрудничестве с ИФВЭ и МРТИ АН СССР в 1981–1985 годов был разработан и создан универсальный измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) на основе отечественной вычислительной техники и аппаратно-программных средств.

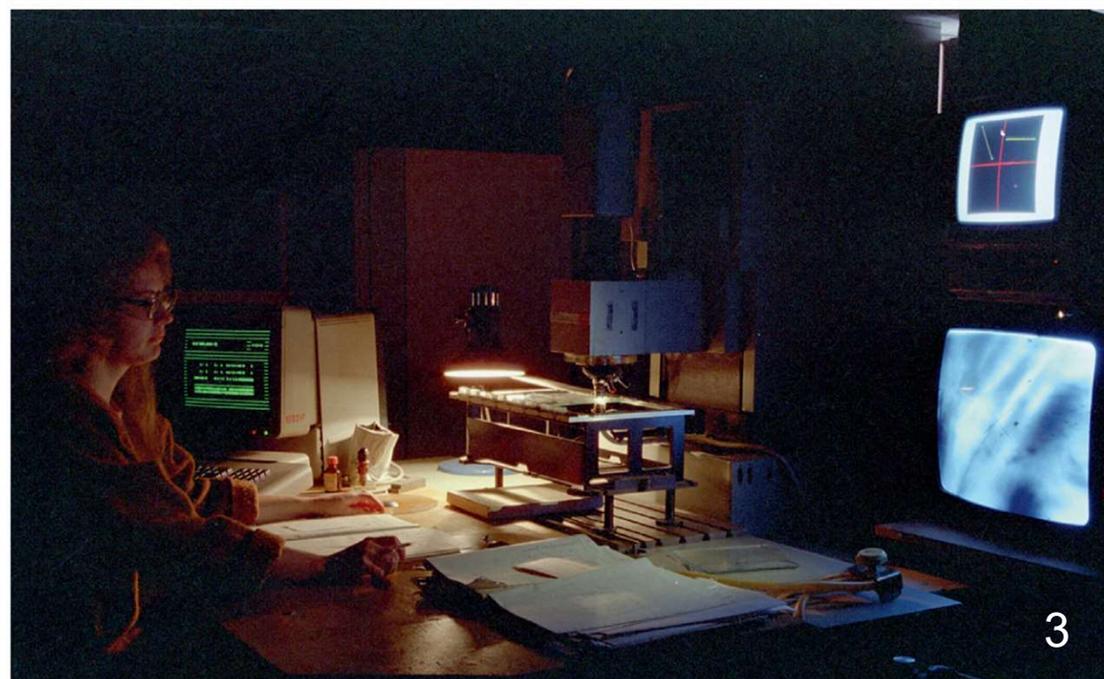
Здесь нельзя не отметить огромный вклад П. Ф. Ермолова, который возглавил масштабные работы по созданию крупного автоматизированного измерительного комплекса для анализа информации с больших пузырьковых камер и гибридных спектрометров. Тем самым была заложена основа для превращения НИИЯФ МГУ в один из лидирующих центров физики высоких энергий.

Полученные в этих работах систематические и наиболее точные результаты по изучению мягких адронных процессов, сечению образования резонансов, проявлению кварковых эффектов в динамике взаимодействий являются уникальными и составляют основу для построения современных кварк-глюонных моделей множественного рождения частиц с малыми поперечными импульсами.

Просмотрово-измерительный комплекс



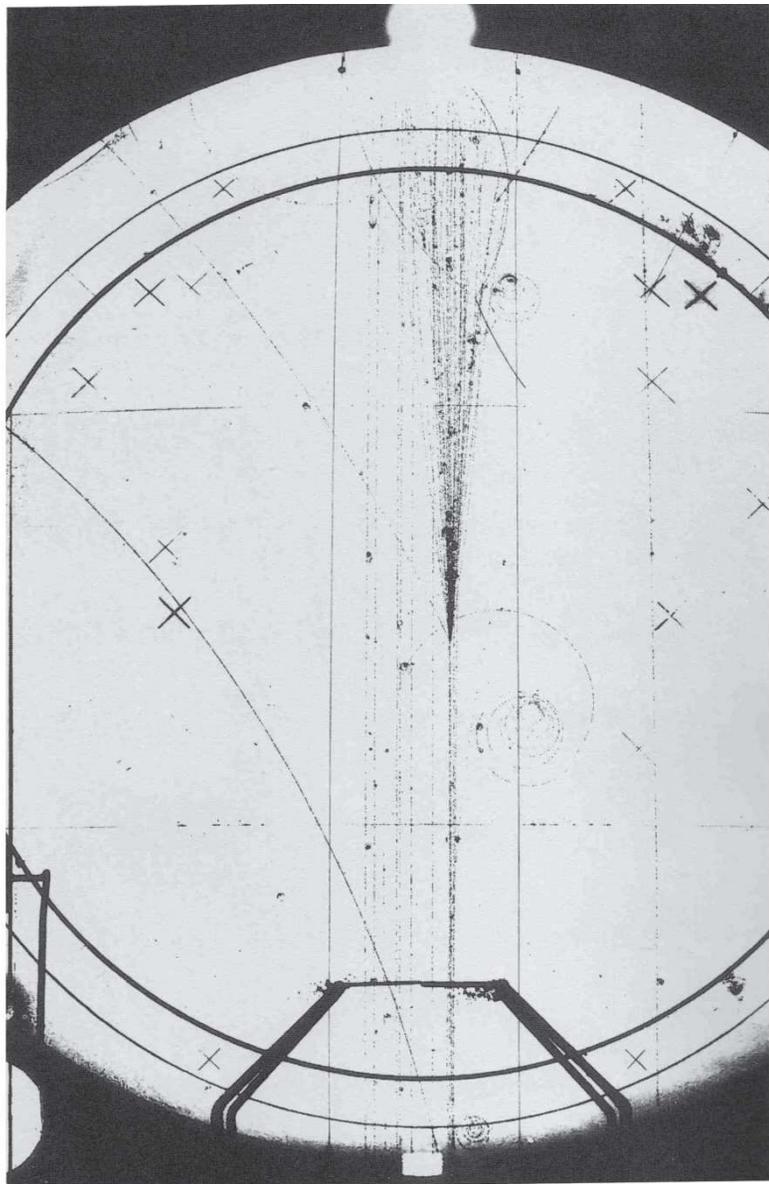
Один из просмотровых столов, ПИК НИИЯФ МГУ. Сейчас используется в специальном ядерном практикуме.



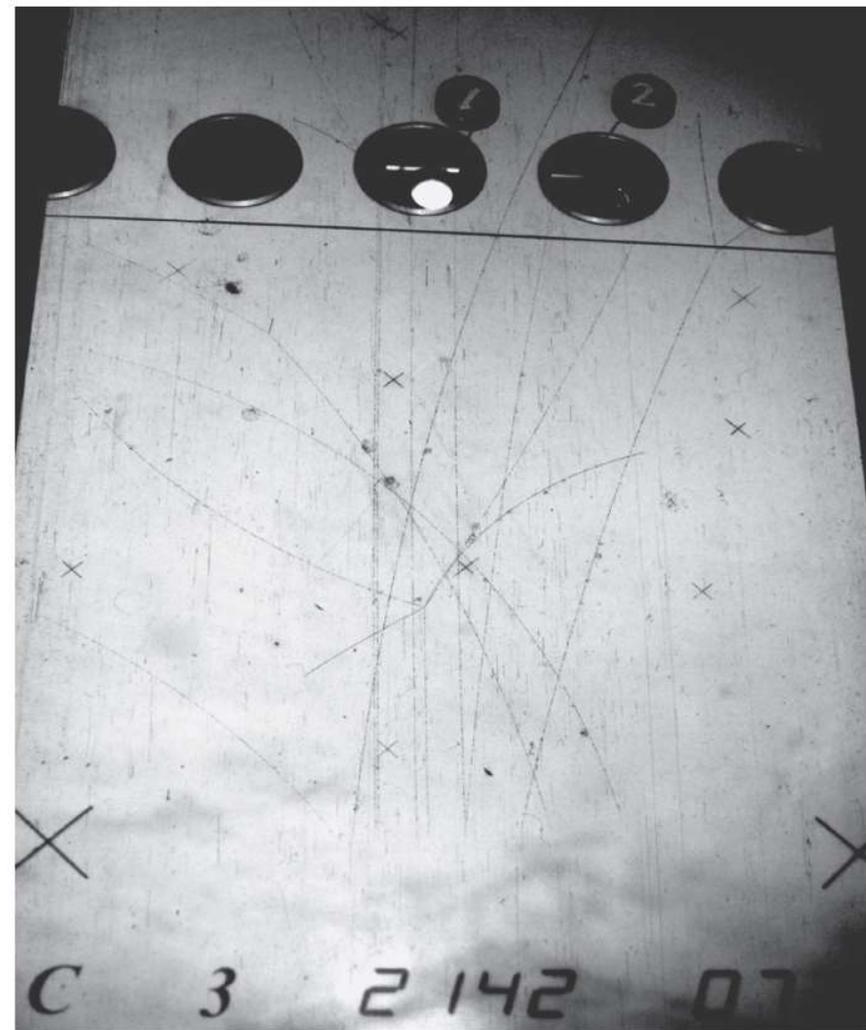
Просмотрово-измерительный комплекс

- Исследование взаимодействий протонов, каонов, пионов с протонами в интервале импульсов 250–350 ГэВ/с в экспериментах NA-22, NA-23, выполненных на европейском гибридном спектрометре (ЕГС).
- Исследование взаимодействий антипротонов и протонов с импульсом 32 ГэВ/с в совместных с ИФВЭ экспериментах на камере Mirabelle.
- Изучение взаимодействий антипротонов, антидейтонов, дейтонов с протонами и дейтонами в области импульсов 12–22 ГэВ/с на данных, водородных камер ОИЯИ и CERN.
- Исследование взаимодействий нейтрино и антинейтрино в области энергий 3–30 ГэВ в совместных с ИФВЭ экспериментах на большой пропан-фреоновой пузырьковой камере «Скат».
- Изучение ядро-ядерных взаимодействий, зарегистрированных с помощью двухметровой пропановой камеры при энергиях синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ.
- Анализ мюонных спектров широких атмосферных ливней, регистрируемых искровыми камерами магнитного спектрометра НИИЯФ МГУ.

Просмотрово-измерительный комплекс



Уникальное событие К⁺р-взаимодействия при 250 ГэВ / с, зарегистрированное в эксперименте NA-22, где 10 заряженных частиц родились в узком интервале по псевдобыстроте.

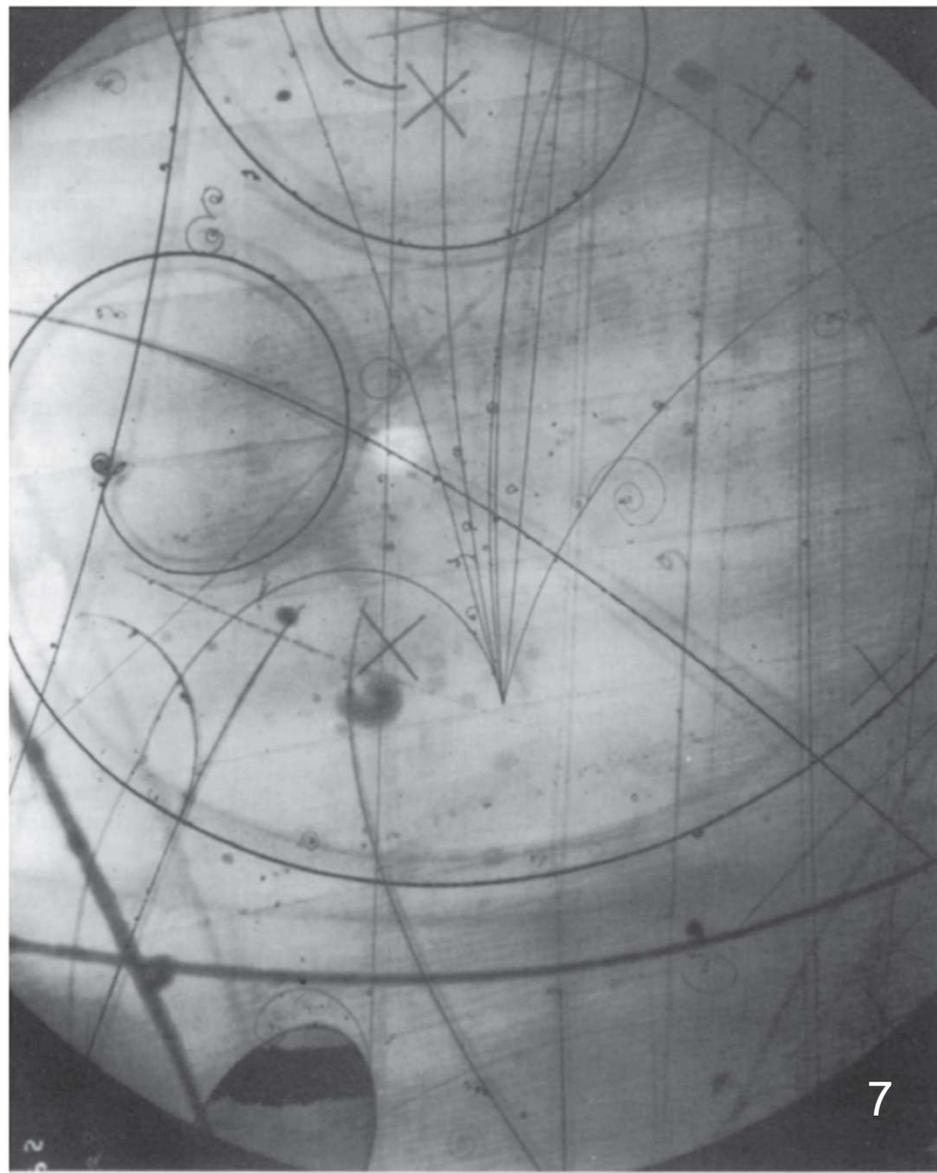


К⁺р-взаимодействие в пузырьковой камере RCBC CERN (RCBC — быстро циклирующая пузырьковая камера установки EHS). 5

Просмотрово-измерительный комплекс

- Эксперимент E632 - измерения пленок с 15-футовой пузырьковой камеры FNAL, заполненной неон-водородной смесью.
- Обработка материалов для банка данных по фотоядерным реакциям при энергиях до 100 МэВ.
- Исследование адрон-ядерных взаимодействий при энергии 10 ГэВ, проводимых на ускорителе ЛВЭ ОИЯИ с помощью магнитно-сцинтилляционного спектрометра НИИЯФ МГУ.
- Изучение образования очарованных частиц в нейтрино-нуклонных взаимодействиях с помощью установки, включающей большие блоки ядерных фотоэмульсий и магнитный спектрометр со стримерной камерой (совместный эксперимент МИФИ — ФИАН — ИТЭФ — НИИЯФ МГУ).
- Исследование образования очарованных частиц и редких процессов в адрон-протонных взаимодействиях при энергии 60–70 ГэВ с помощью спектрометра с вершинным детектором, включающим быстроциклирующую пузырьковую камеру и многоканальные системы электронных детекторов (совместный эксперимент НИИЯФ МГУ — ИФВЭ — ОИЯИ — ИФВЭ ТГУ — ИФВЭ Каз. ССР — эксперимент СВД-1)

Просмотрово-измерительный комплекс



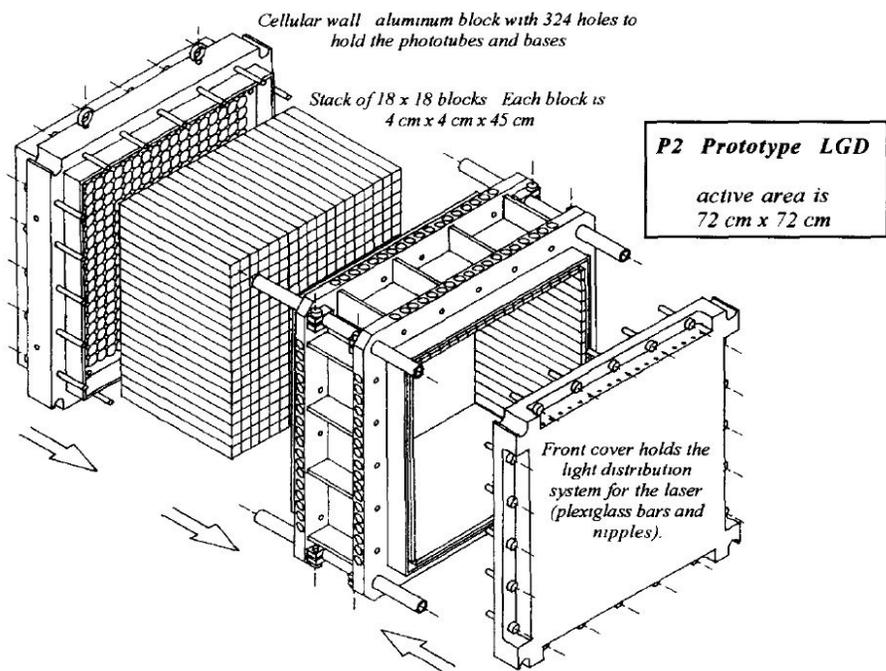
Фотография взаимодействия нейтрино с неон-водородной смесью в 15-футовой пузырьковой камере в эксперименте E632.

Эксперимент E-852 на ускорителе AGS BNL

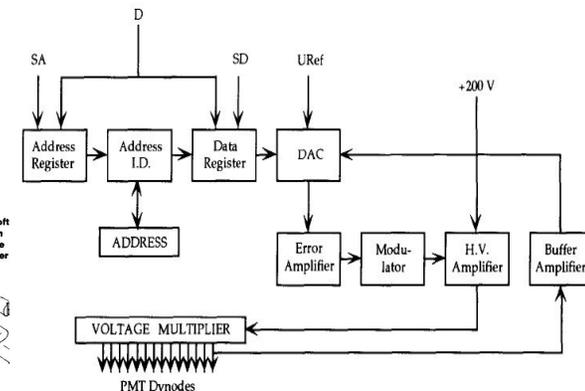
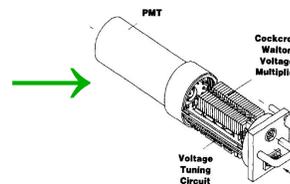
“Поиск мезонов с необычными квантовыми числами”

Для эксперимента E852 спектрометр MPS (MultiParticle Spectrometer) на AGS BNL дополнен 3045 - канальным γ -детектором LGD (Lead Gls Detector). Вклад НИИЯФ МГУ:

- разработка конструкции, изготовление и тестирование двух прототипов LGD: P1 (25 каналов) и P2 (324 канала); разработка конструкции полномасштабного детектора;
- разработка и изготовление системы высоковольтного питания ФЭУ.



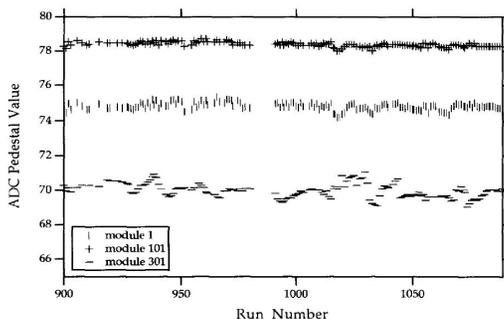
ФЭУ с источником высоковольтного питания и схема его устройства



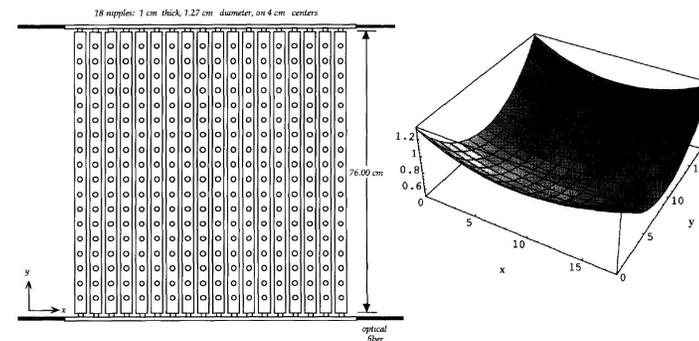
В последней версии (слева) вся логическая часть электроники заключена в одну микросхему



Вариации величины пьедесталов ADC в отдельных каналах в течение 2-х недель экспозиции



Система световодов для разводки лазерных вспышек при калибровке и вариации яркости от канала к каналу.



Эксперимент E-852 на ускорителе AGS BNL

“Поиск мезонов с необычными квантовыми числами”

The E852 Apparatus
Not to scale
The target to LGD distance is 5 meters

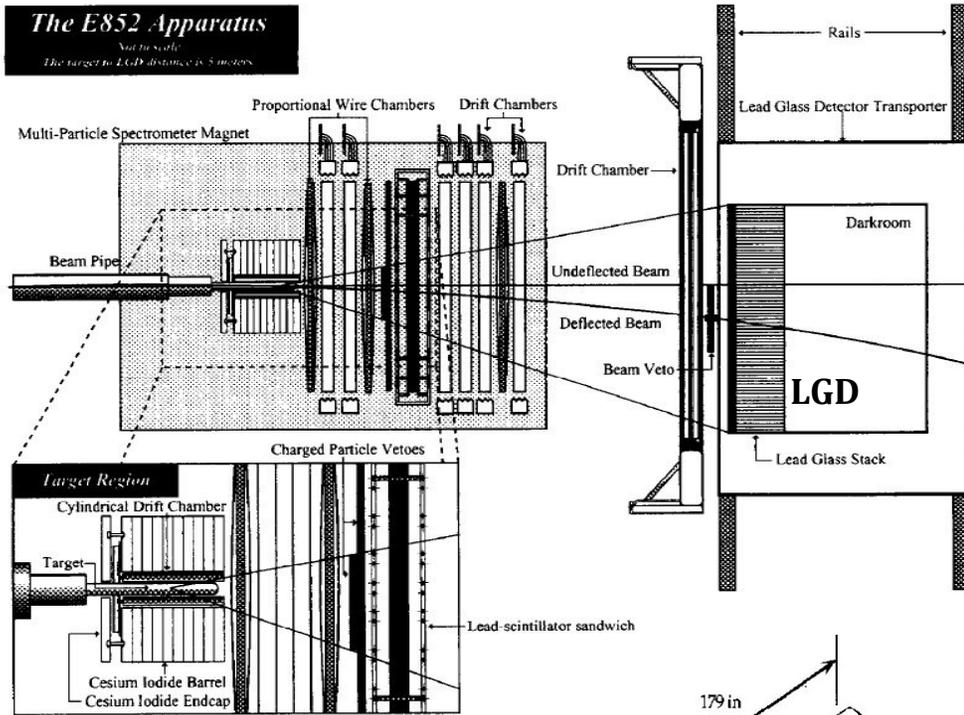
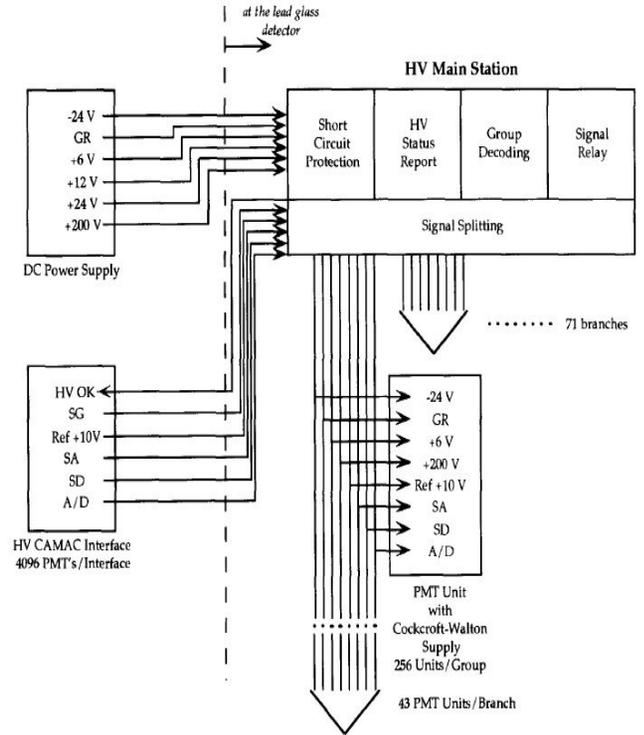
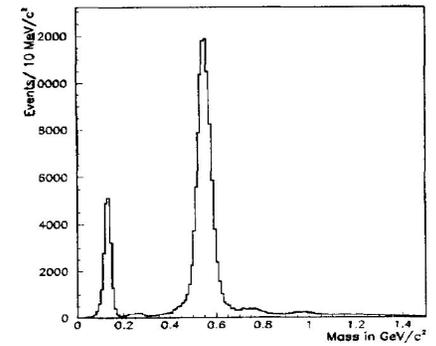
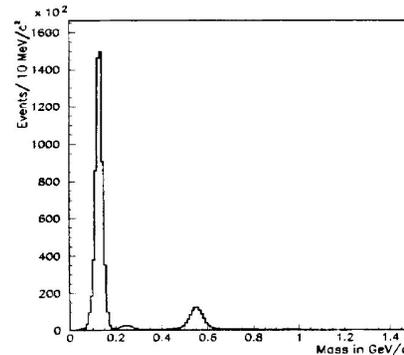
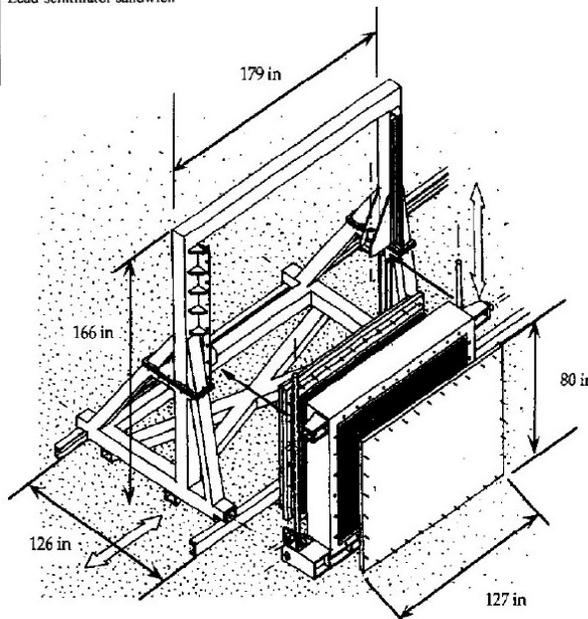


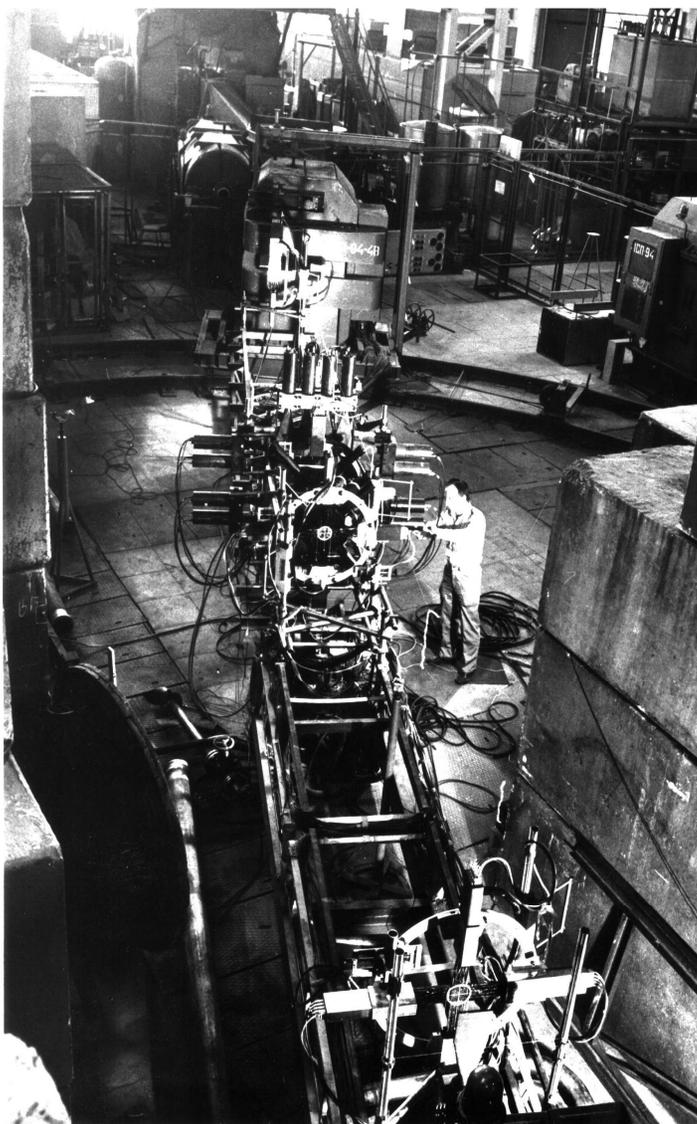
Схема
высоковольтного
питания ФЭУ
всех 3045
каналов LGD



Распределение эффективных масс двухфотонных событий $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ и $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ без ограничения и ограничением на уровне триггера на массу π^0

LGD размещён на подвижной раме и может перемещаться в плоскостях X и Y

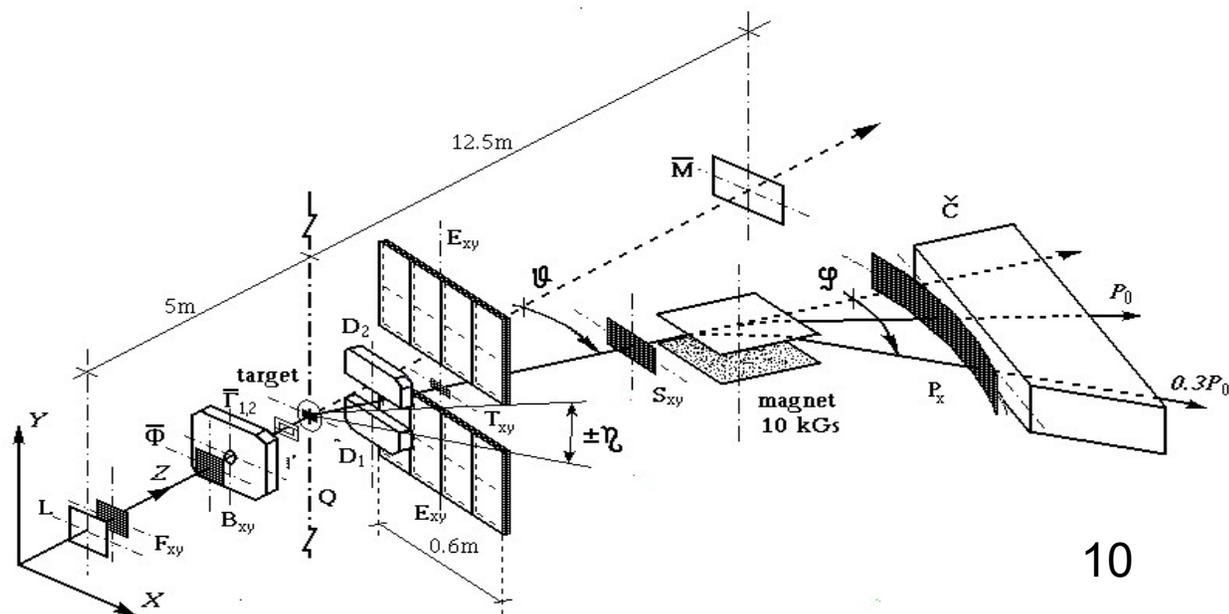


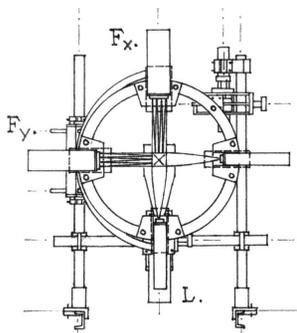


ОИЯИ Р1-87-591 (Дубна, 1987)
ОИЯИ № 13-85-850 (Дубна, 1995)
ЖТФ т.58, вып.12, с.2344-2353 (1988)

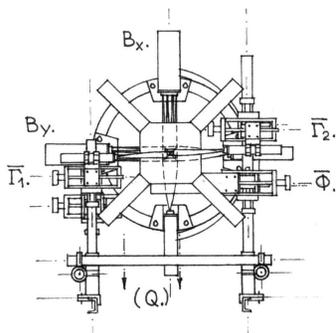
Основные функциональные элементы спектрометра:

- сцинтиляционная годоскопическая система с координатным разрешением ~ 1 мм, которая прослеживает траектории первичной (секции F , B) и вторичной лидирующей частицы (секции T , S , P);
- комплекс сцинтиляционных и твердых черенковских детекторов для мониторинга пучка (L , M) и формирования его "профиля" на мишени посредством антисовпадений ($\bar{\Phi}$, $\bar{\Gamma}_{1,2}$);
- устройство автоматической постановки мишеней (Q);
- триггерный комплекс, сочетающий твердые черенковские детекторы (D_1 , D_2) и детекторы типа сэндвича сцинтиллятор-свинец-сцинтиллятор (E_{XY}), которые перекрывают один и тот же телесный угол и позволяют отбирать на уровне триггера события с заданной кинематикой — т.е. с определенными углами вылета η частиц сопровождения относительно траектории лидирующей частицы;
- анализирующий магнит на тележке, перемещающейся по круговому рельсовому пути вокруг мишени;
- широкоапертурный газовый (пороговый) черенковский счетчик (\check{C}), замыкающий установку и предназначенный для идентификации лидирующей частицы.

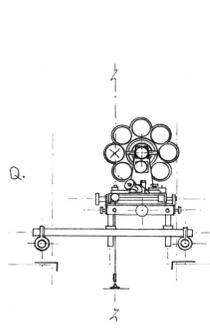




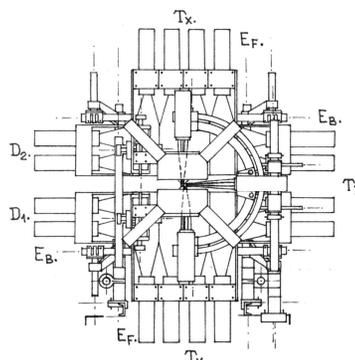
секция F
годоскопа



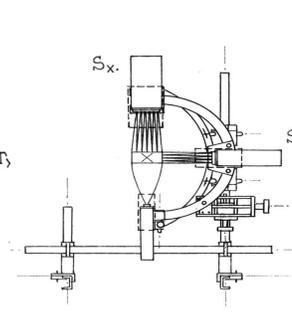
система
формирования
пучка



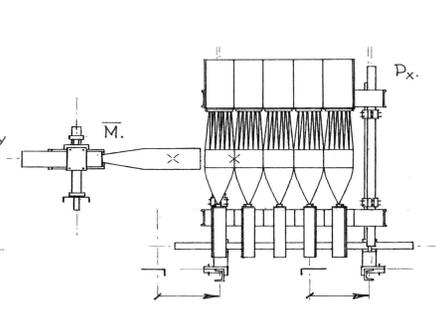
мишень



триггерный
комплекс



секция S
годоскопа



секция P
годоскопа

Особенности спектрометра:

- Набор тонких пластмассовых сцинтилляторов просматривается с обоих торцов двумя группами ФЭУ через систему световодов, конфигурация которых обеспечивает кодировку координаты на архитектурном уровне по совпадению сигналов ФЭУ. Для n каналов требуется $N=2\sqrt{n}$ ФЭУ.
- Конструктивно ФЭУ годоскопического модуля объединены в два блока, туда же помещены преобразователи напряжения с цифровым управлением от ЭВМ, позволяющим индивидуально для каждого ФЭУ устанавливать заданное напряжение с интервалом 10 В.
- В некоторых сеансах для вывода пучка на установку использовался эффект каналирования протонов и ядер в изогнутом монокристалле кремния.

11

TARGET EMPT * МОНИТОР 20034 * TRIGGER 20034

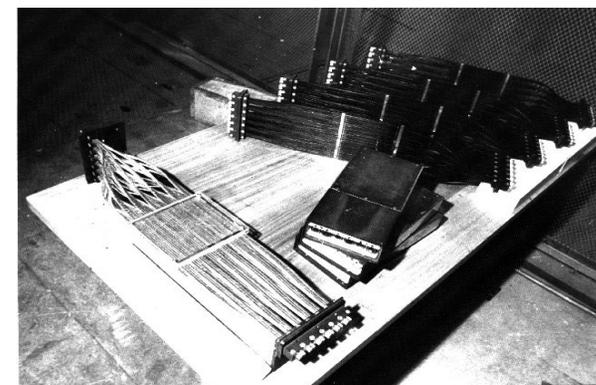
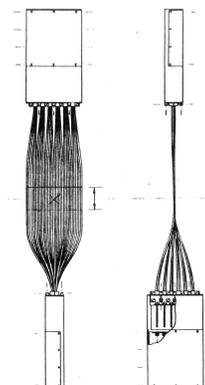
ПРОФИЛЬ ПУЧКА В ПЛОСКОСТИ В .

ВХУ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
16:
15:
14:
13:
12:
11:
10:
9:
8:
7:
6:
5:
4:
3:
2:
1:

TARGET EMPT * МОНИТОР 15026 * TRIGGER 9024

ПРОФИЛЬ ПУЧКА В ПЛОСКОСТИ В .

ВХУ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
16:
15:
14:
13:
12:
11:
10:
9:
8:
7:
6:
5:
4:
3:
2:
1:



Профиль “естественного” и “сформированного” пучка на мишени: данные ON-LINE обработки.

Сборки годоскопических датчиков для 36-канальных Модулей (стопкой сложены блоки, из них торчат ФЭУ)

Ионизационный калориметр

Цитата из Википедии:

Ионизационный калориметр изобрели в 1954 году в СССР **Наум Леонидович Григоров**, **Владимир Сергеевич Мурзин** и **Илья Давидович Рапопорт**, ИК предназначался для исследования космических лучей.

Первый действующий калориметр создали в 1957 году на Памире также для исследования космического излучения.

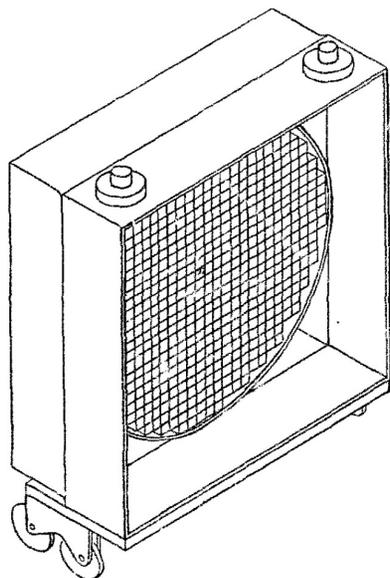
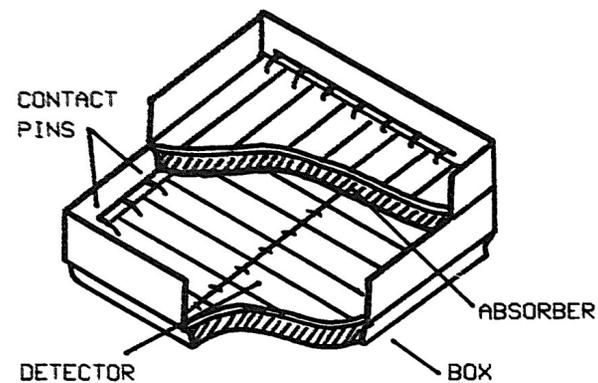
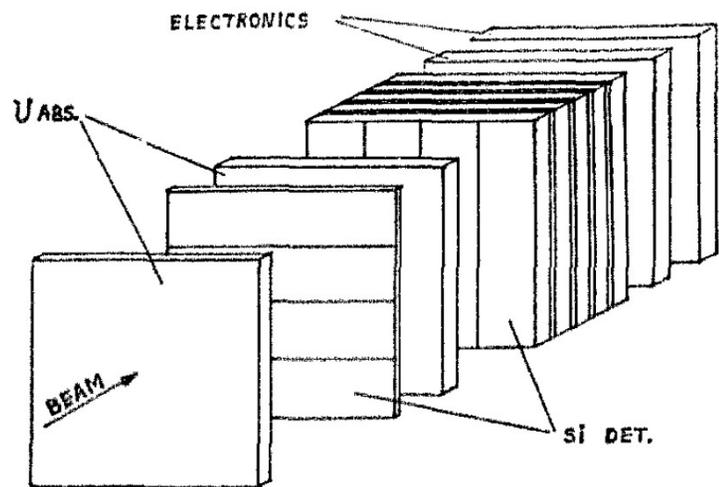
Ионизационные калориметры 1950-х — 1960-х гг. имели размеры порядка нескольких квадратных метров в сечении, массу в несколько десятков тонн и работали с частицами энергией от 100 ГэВ до 10 ТэВ. Самый большой из них вступил в строй в 1964 году, он имел массу 70 тонн и размещался на горе Арагац в Армении.

Впоследствии ионизационные калориметры стали применяться и на ускорителях для измерения энергии вторичных частиц, возникших при столкновениях разогнанных до околосветовых скоростей ядер.

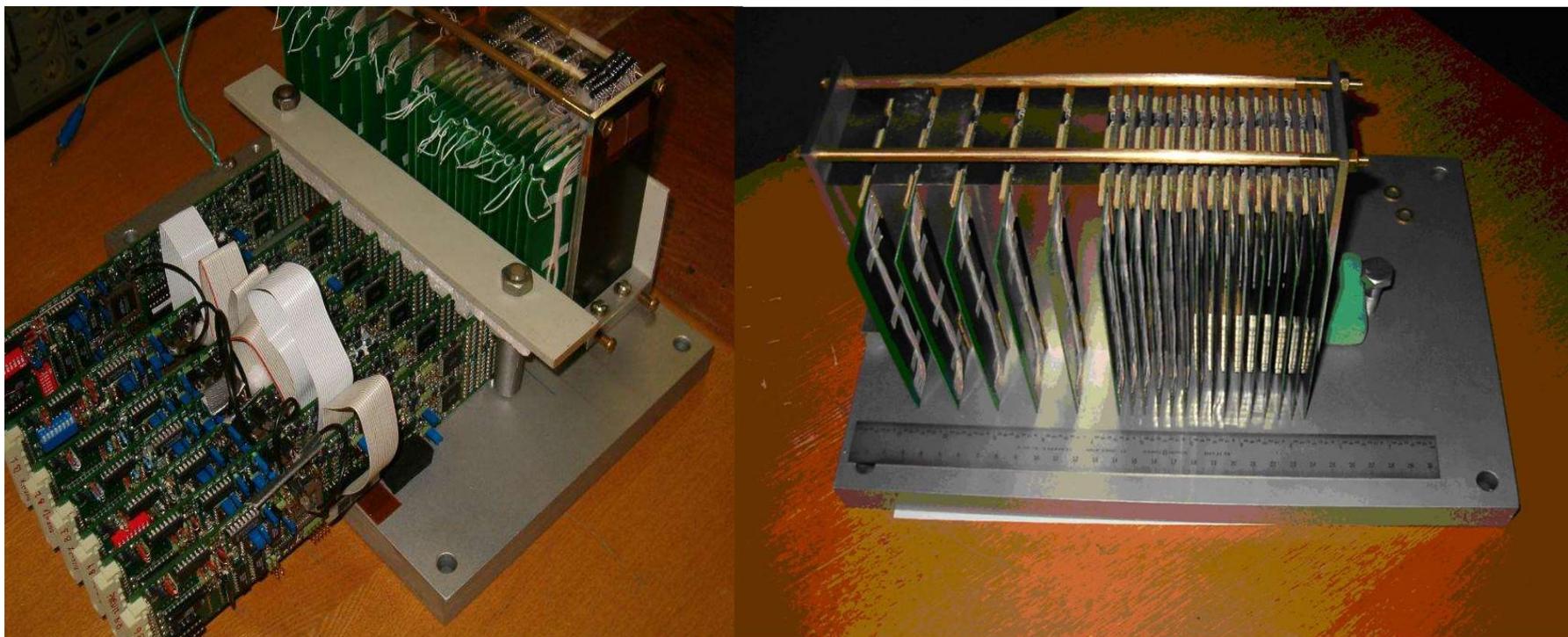
1959 г. Научная станция по изучению космических лучей "Арагац" в Армении на высоте 3200 м. В.С.Мурзин проверяет работу одного из первых в мире ионизационных калориметров.



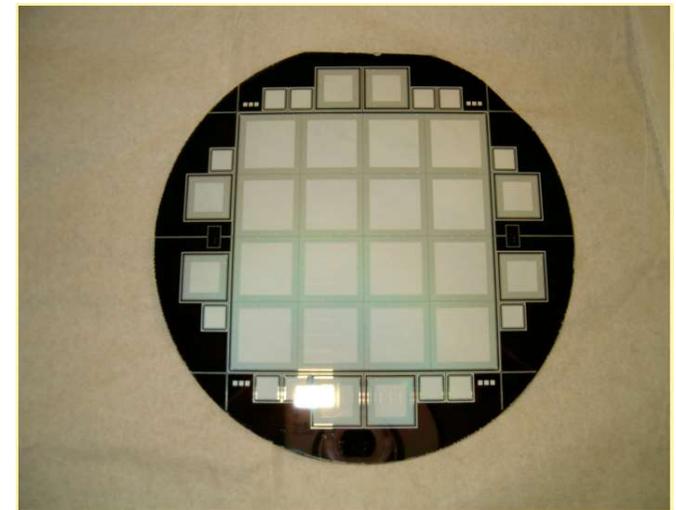
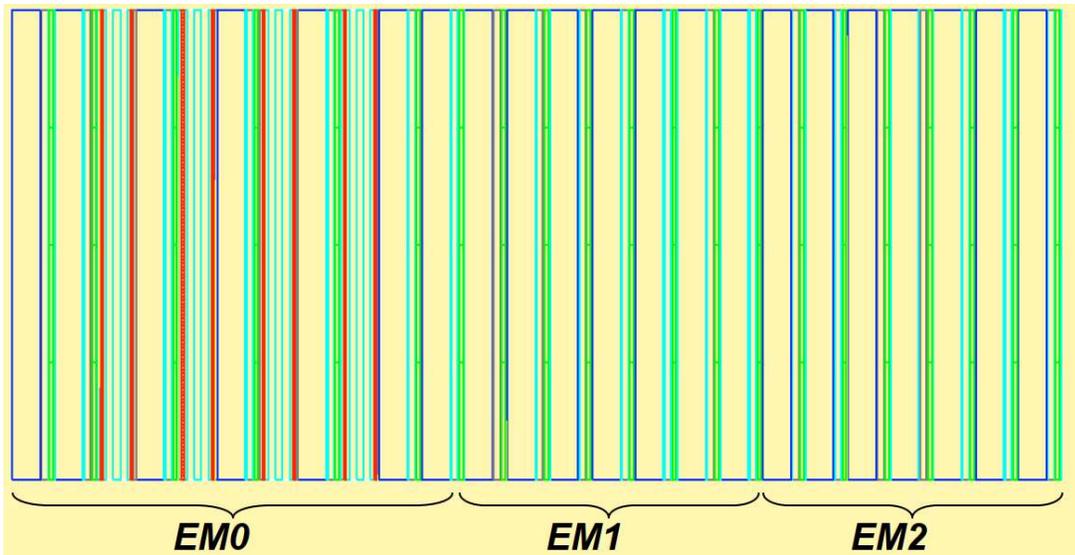
УНК: Прототип Si-W ЭМ калориметра, 1991



Прототип переднего калориметра PHENIX



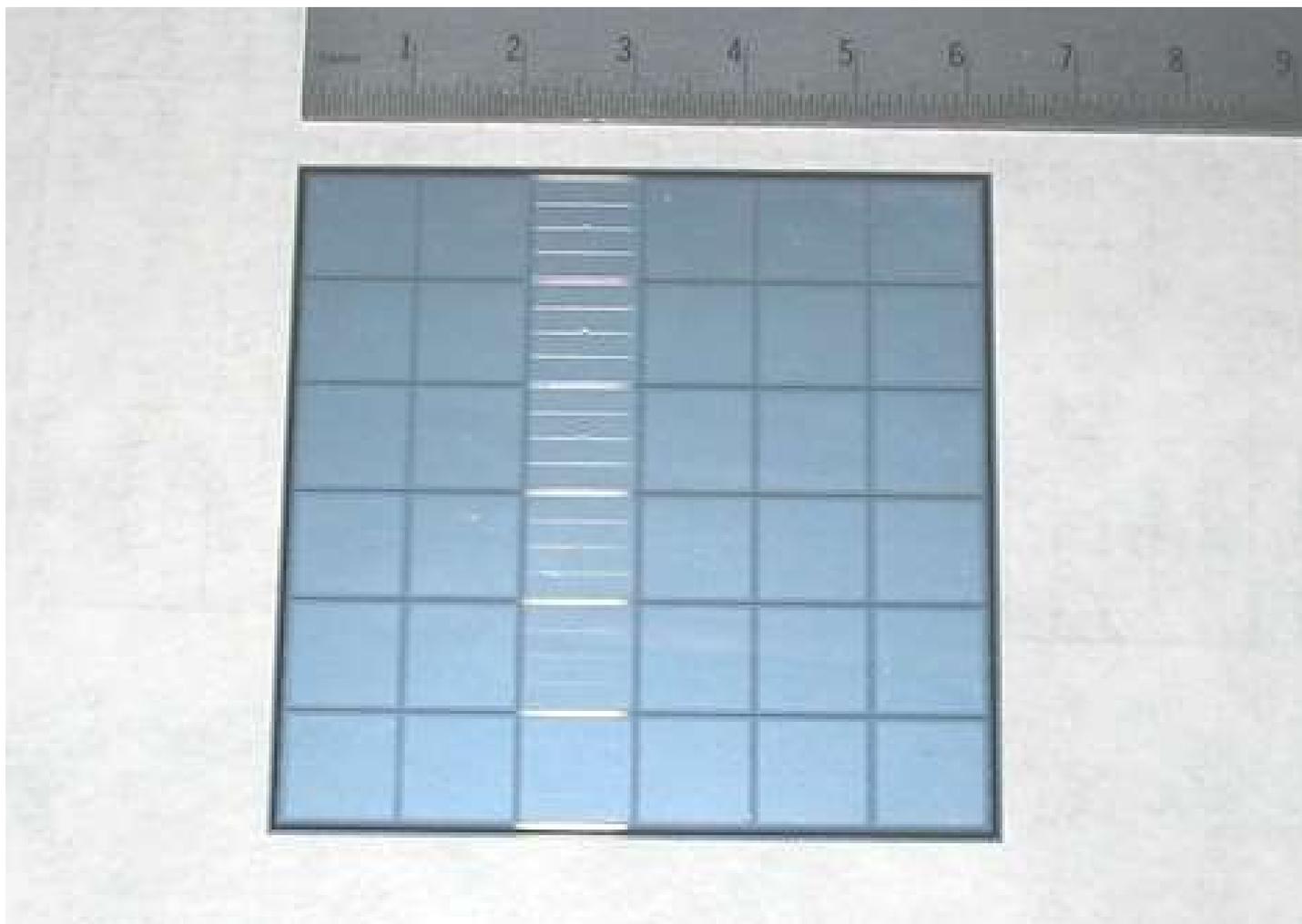
Передний калориметр эксперимента PHENIX



Башня :

- W пластины 4 мм толщиной, $\sim 21 X_0$;
- 3 x 7 = 21 слой кремниевых падовых 4x4 детекторов, 500 μ толщиной
- площадь пада 15x15 мм²
- 8 слоев кремниевых стриповых детекторов толщиной 300 μ , шаг стрипов 0.5 mm
- 4 горизонтальных стриповых слоя + 4 вертикальных

Детекторы ЕСАЛ для ИС



First test with a complete detector slab



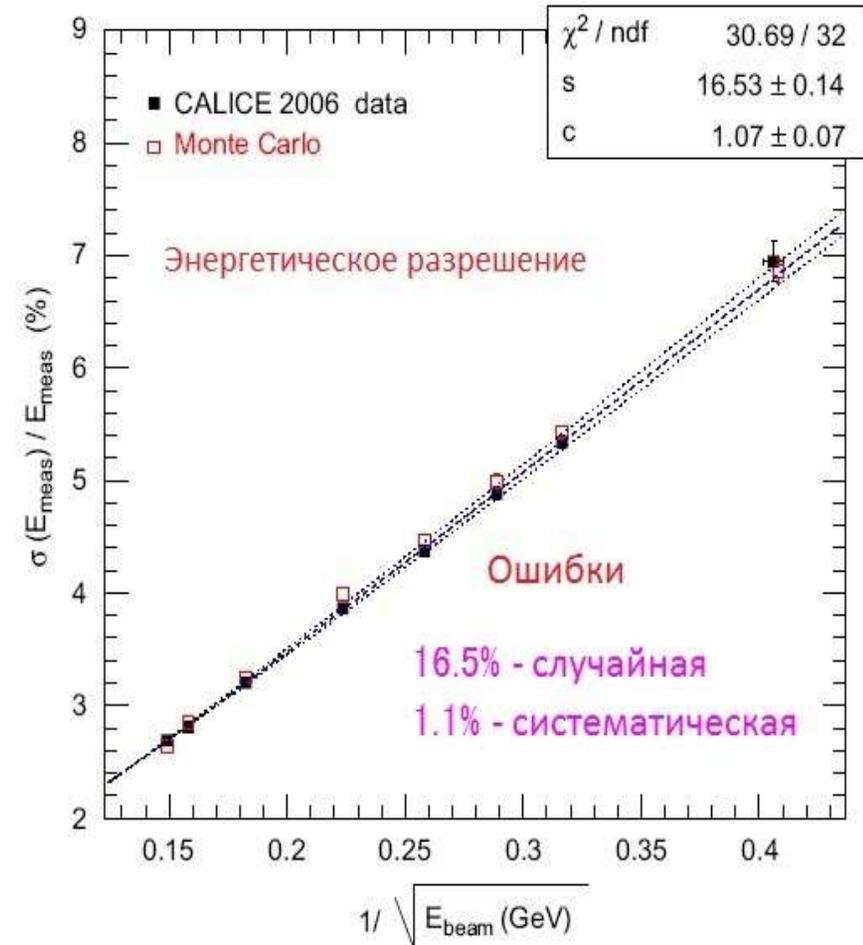
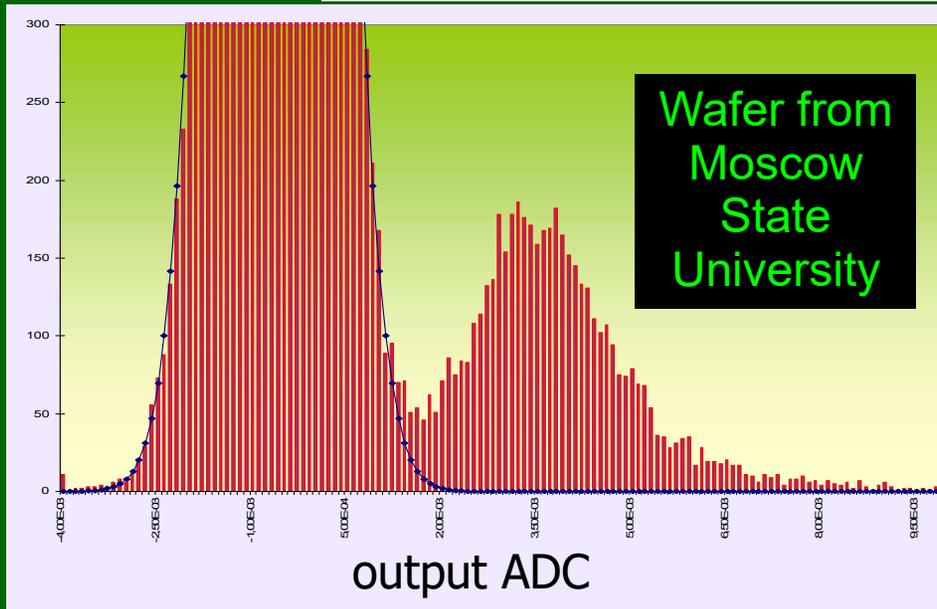
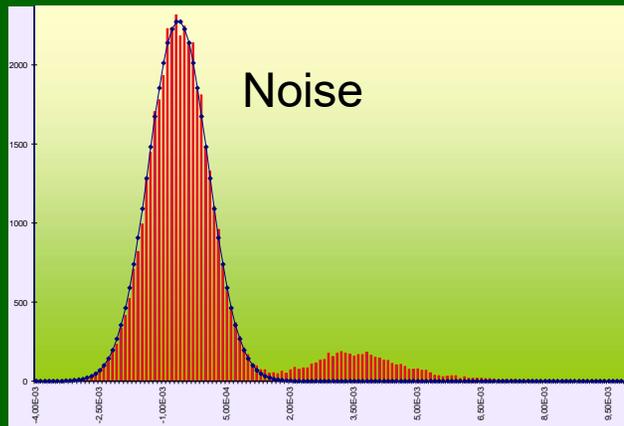
Si wafer - glue - PCB - VFE – DAQ (Single Slab DAQ)
and ground with Al. EMC shield

“external” calibration

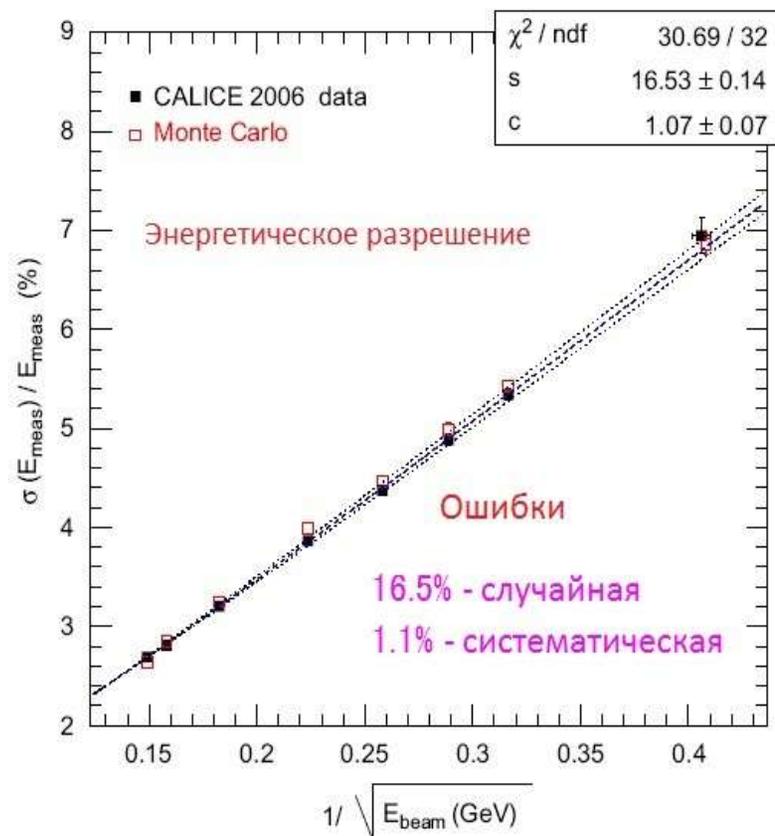
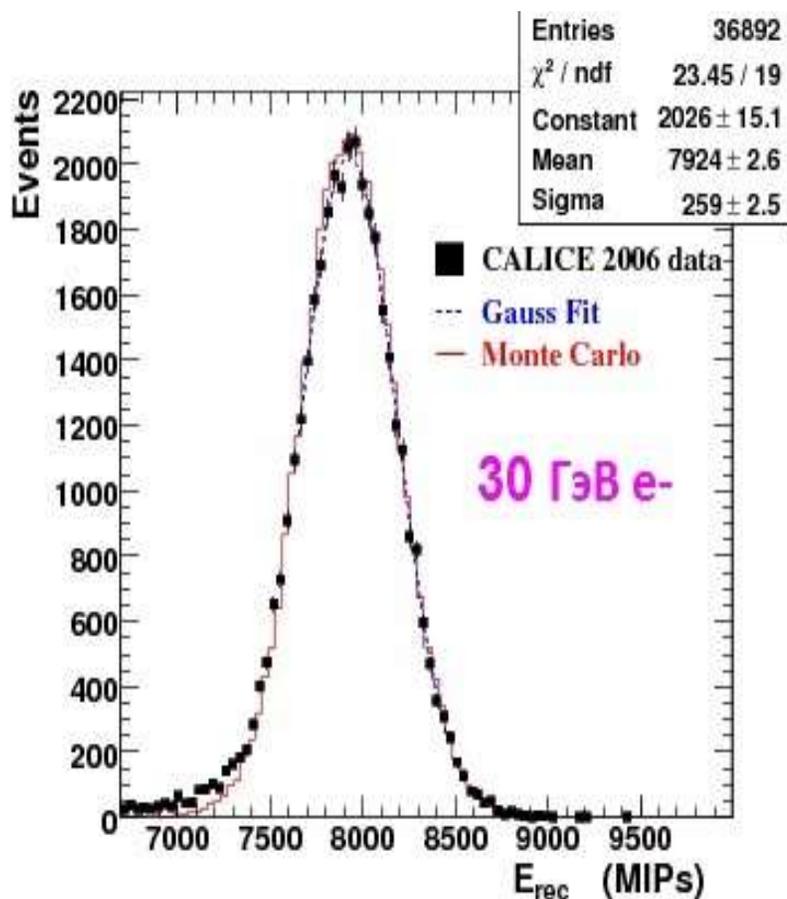
Beam test

Sr⁹⁰ source → trigger → read 6 channels
Only ONE
with signal

$$\frac{MIP}{Noise} \approx 7.5$$



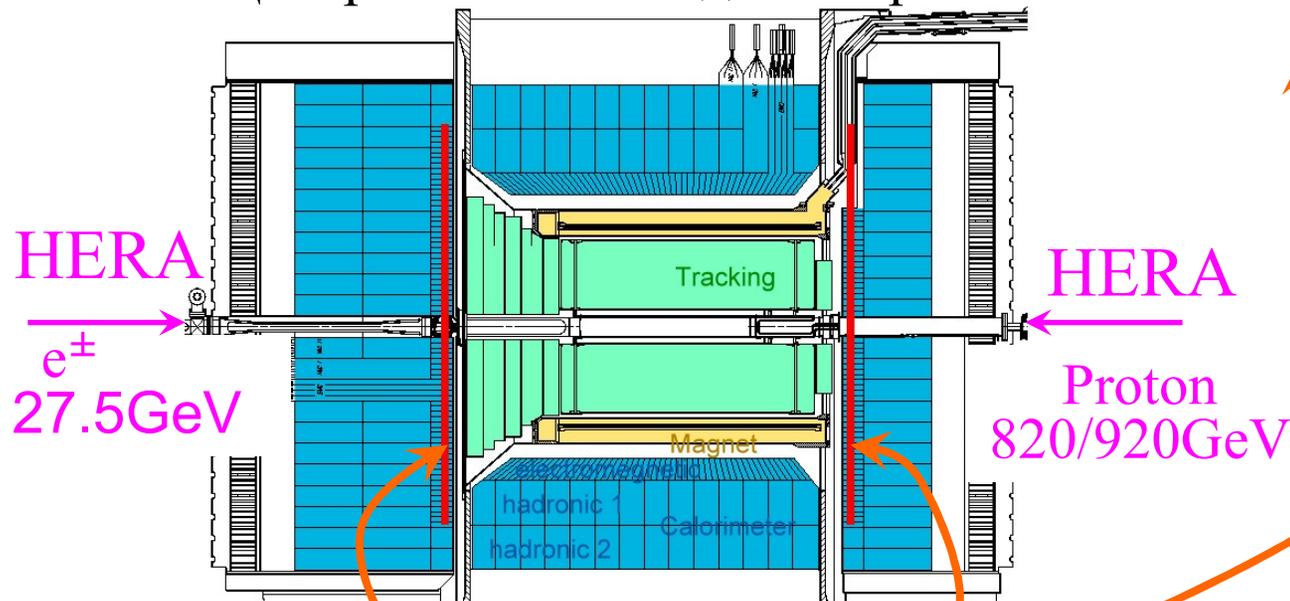
Восстановленная энергия и разрешение калориметра



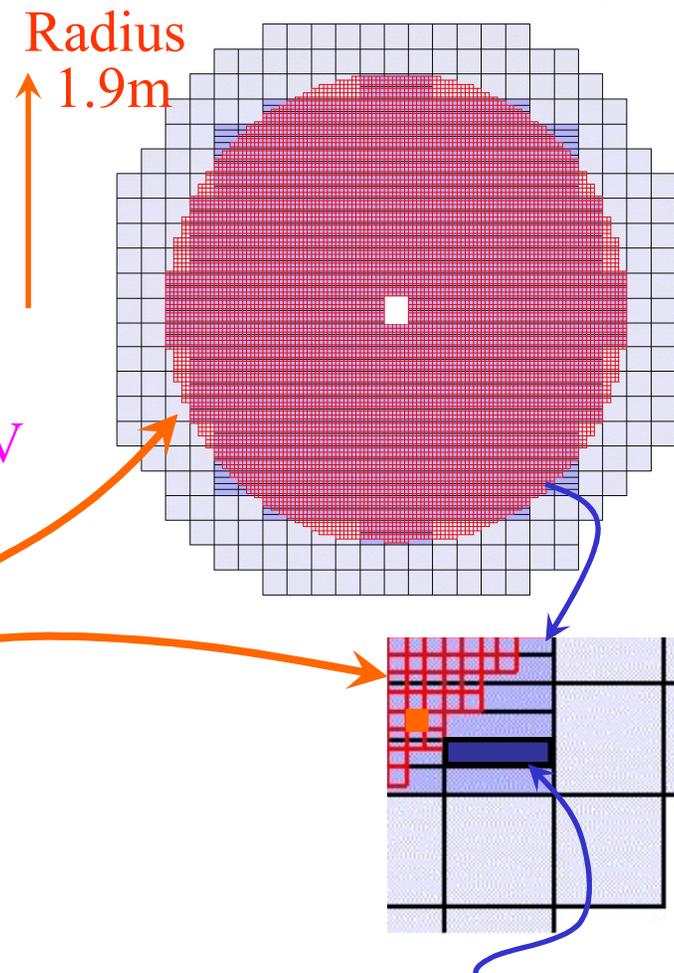
Кремниевый адрон-электронный сепаратор установки ZEUS



Центральная часть детектора ZEUS



Front side of the FCAL



HES

e^\pm, γ : GeV до 100 GeV

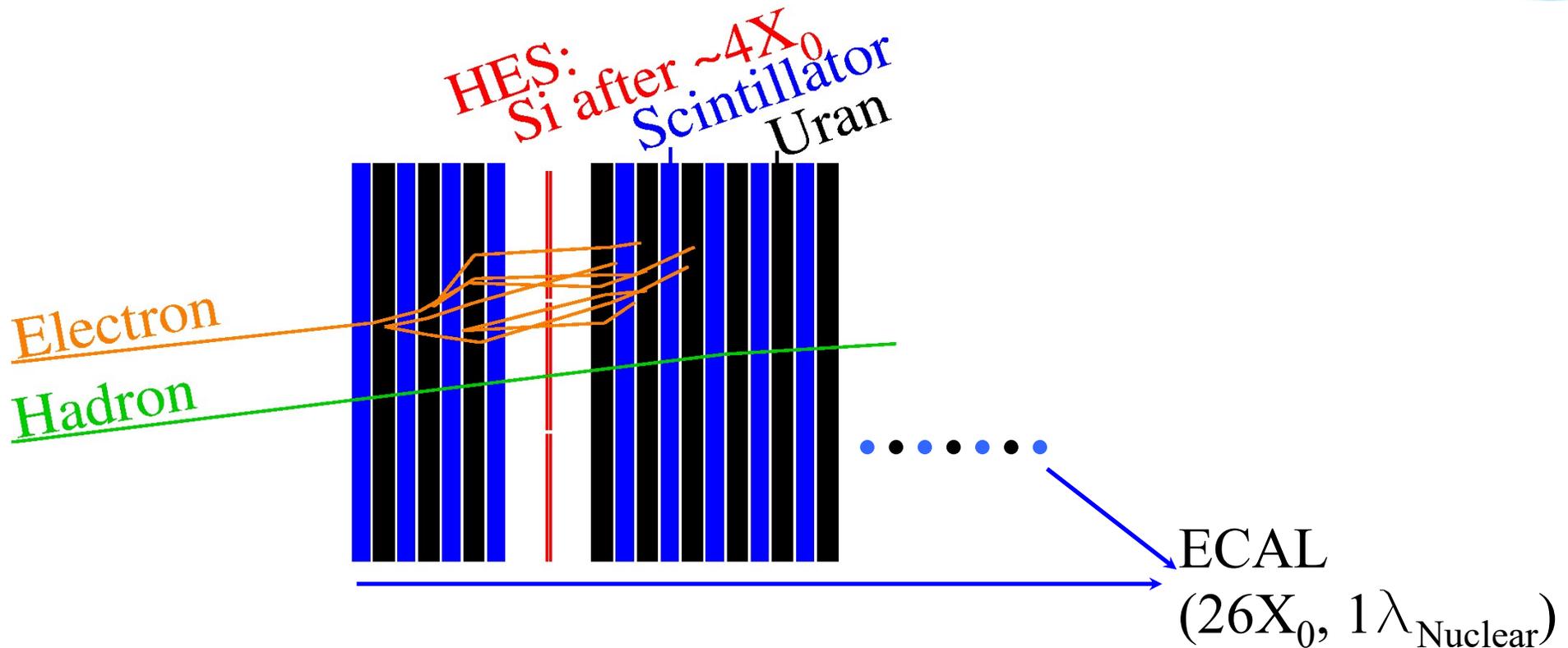
Хорошее разделение e^\pm, γ и адронов

Детектор находится в максимуме ливня

Плоскость внутри калориметра

Ячейка ECAL $5 \times 20 \text{ cm}^2$
Ячейка HES $3 \times 3.4 \text{ cm}^2$

Принцип работы HES



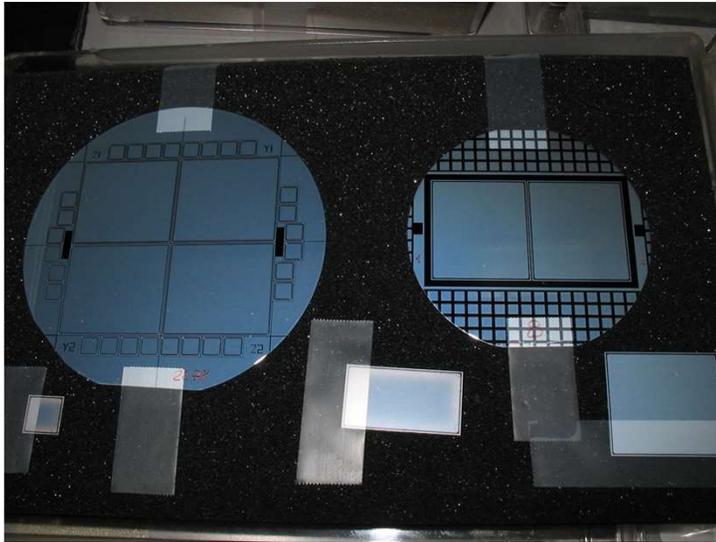
Использование: e^\pm, γ дают более ранний и узкий ливень

Strategy: Измерение энерговыделения в заданном месте

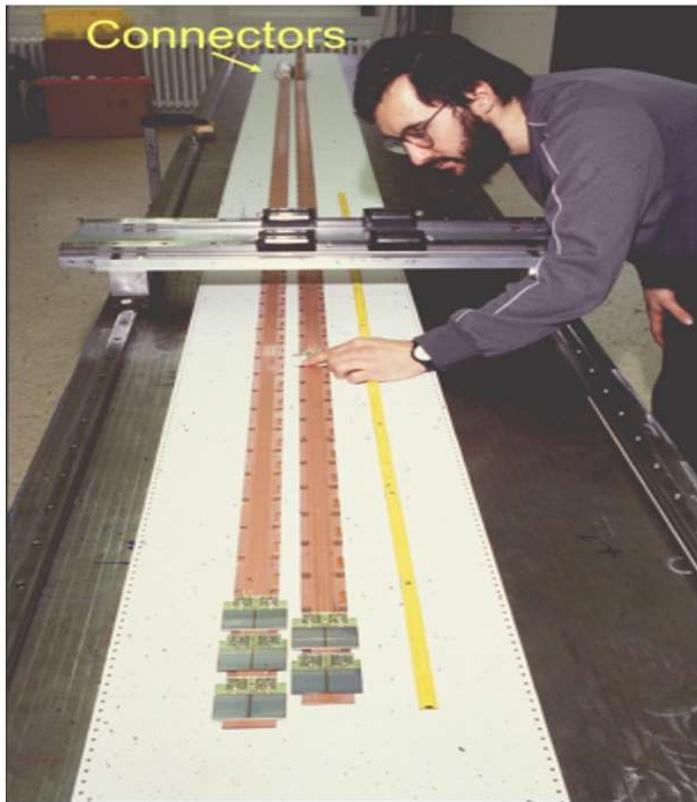
Детектор: Плоскость на $3-5 X_0$ (максимум ливня)

сегментация позволяет разделить : e^\pm, γ в jets

Кремниевый адрон-электронный сепаратор (HES) установки ZEUS

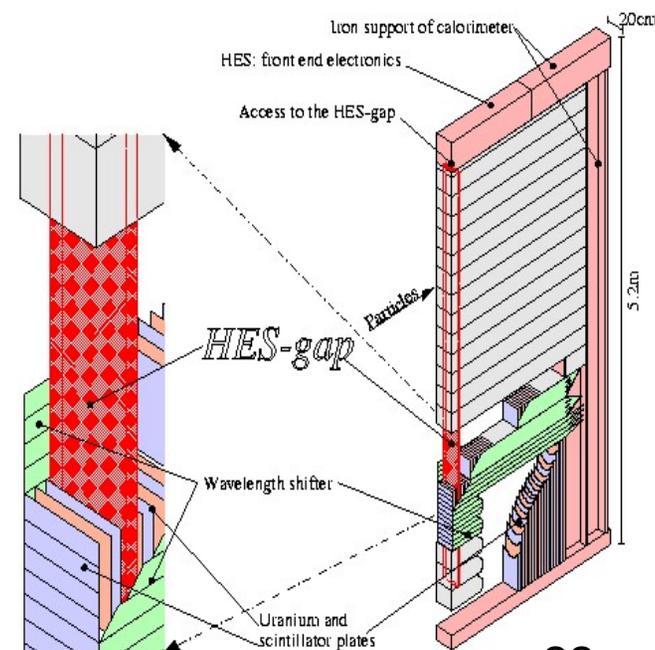
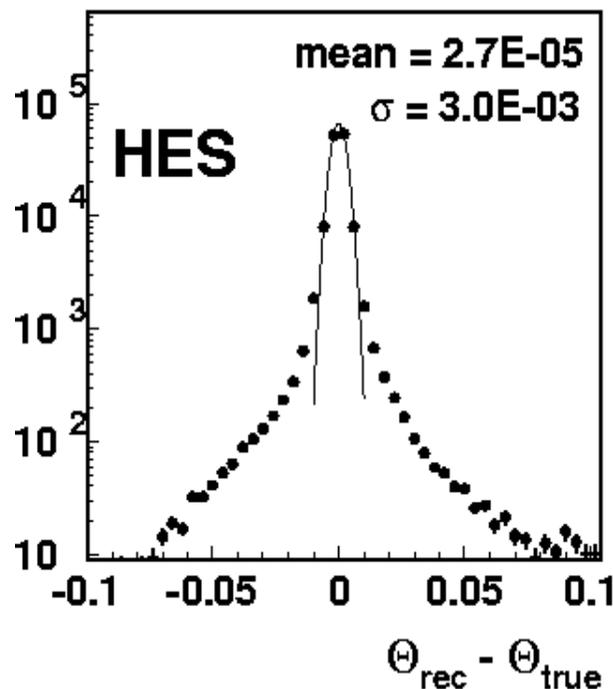
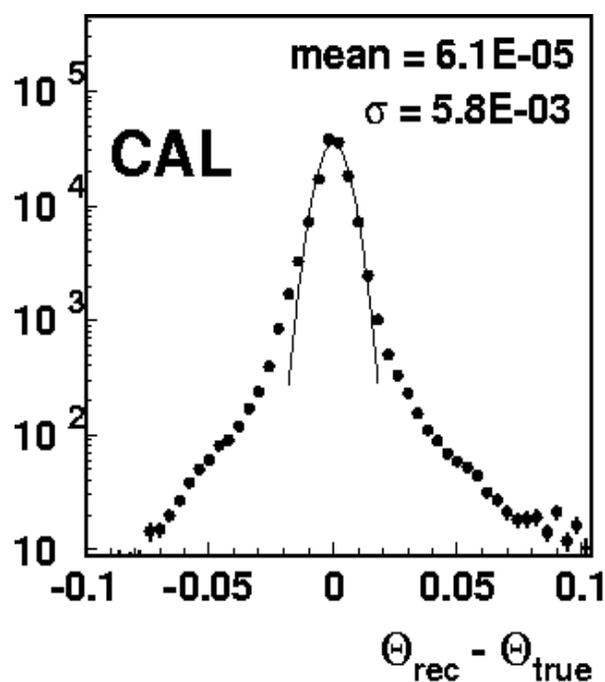


Изготовлено
10000 штук!!!!



Кремниевый адрон-электронный сепаратор установки ZEUS

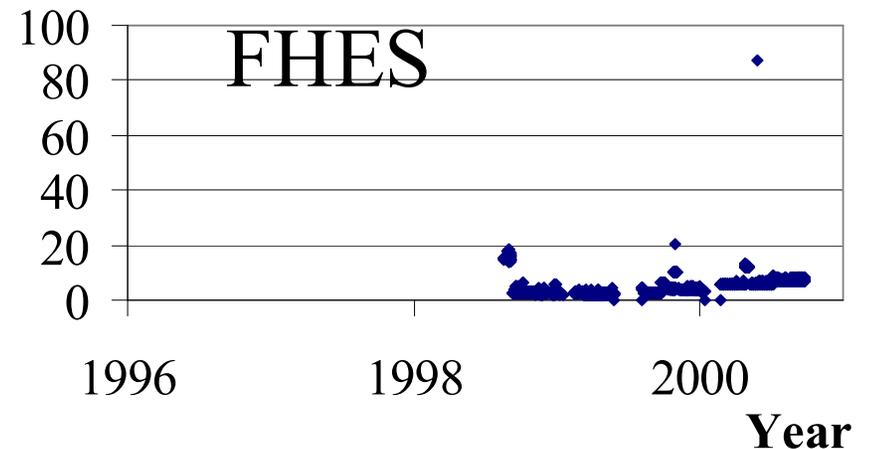
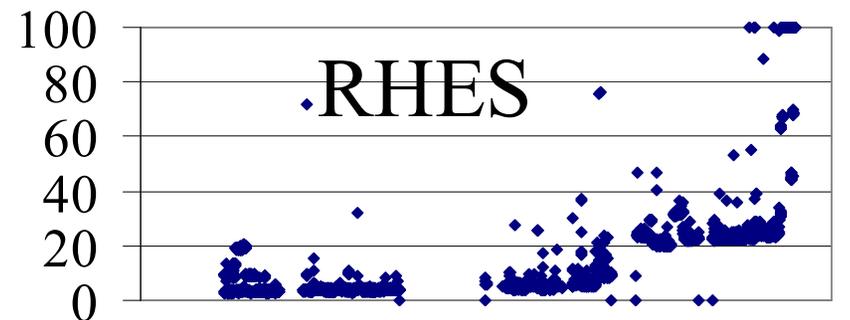
- До LHC — крупнейший кремниевый детектор — 20 м² кремния в области максимума электромагнитного каскада в передней и задней частей калориметра
- HES vs CAL - лучшая сегментация; улучшение углового разрешения рассеянных электронов в 2 раза



Running Performance



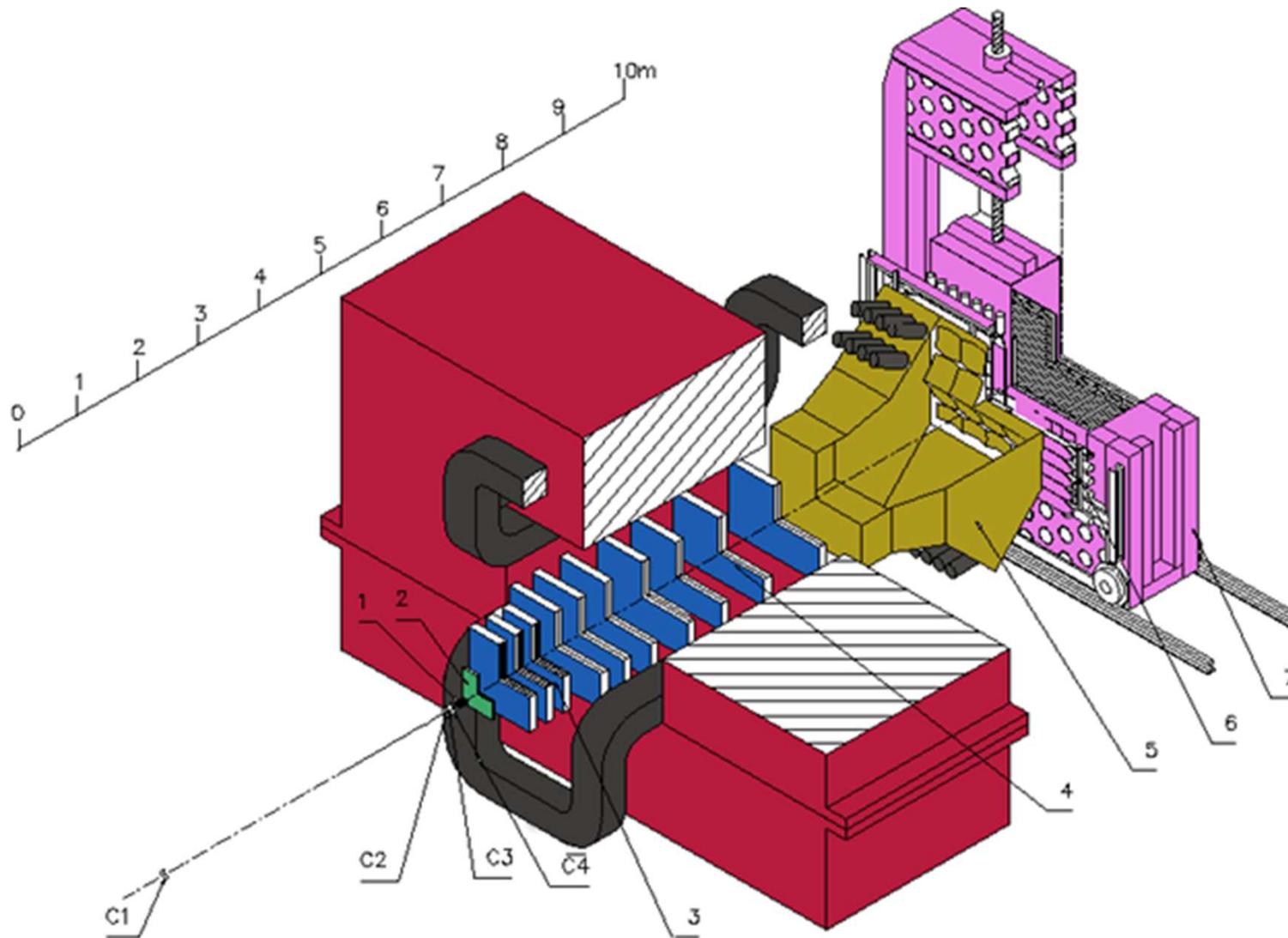
	Installation	Bad channels
RHES	1992-1994	3 - 6 %
FHES	1996-1998	2 - 3 %



Source for failures:

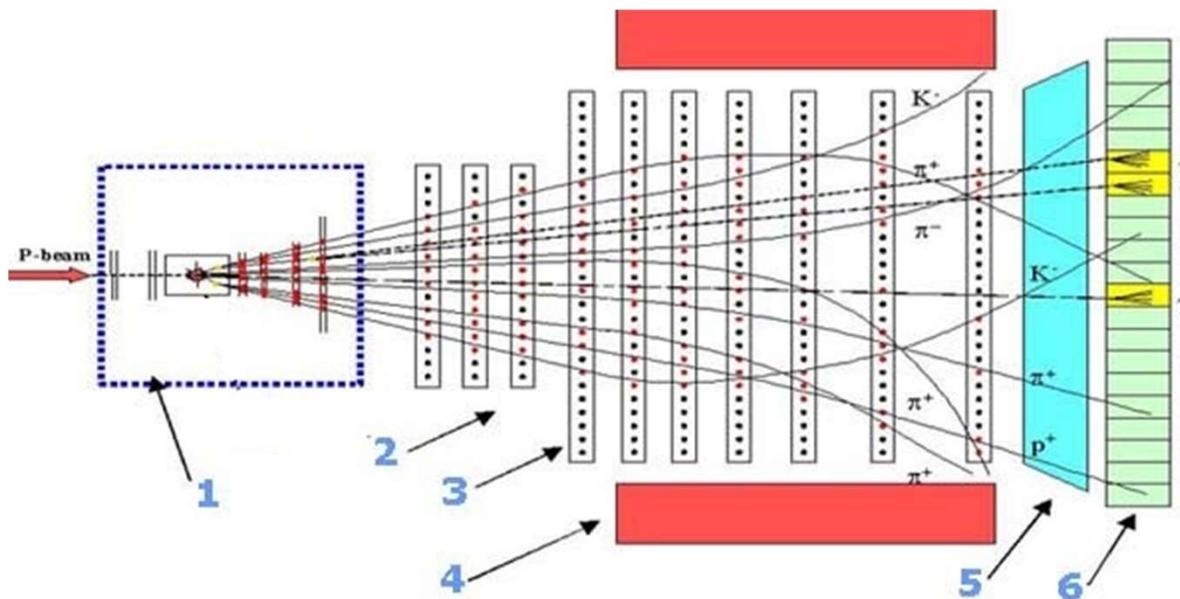
- Mainly connectors
- 100 channels/month single electronic cards
 - ↳ Continuously repaired
- Water leak 1999-2000

Спектрометр с вершинным детектором СВД-2

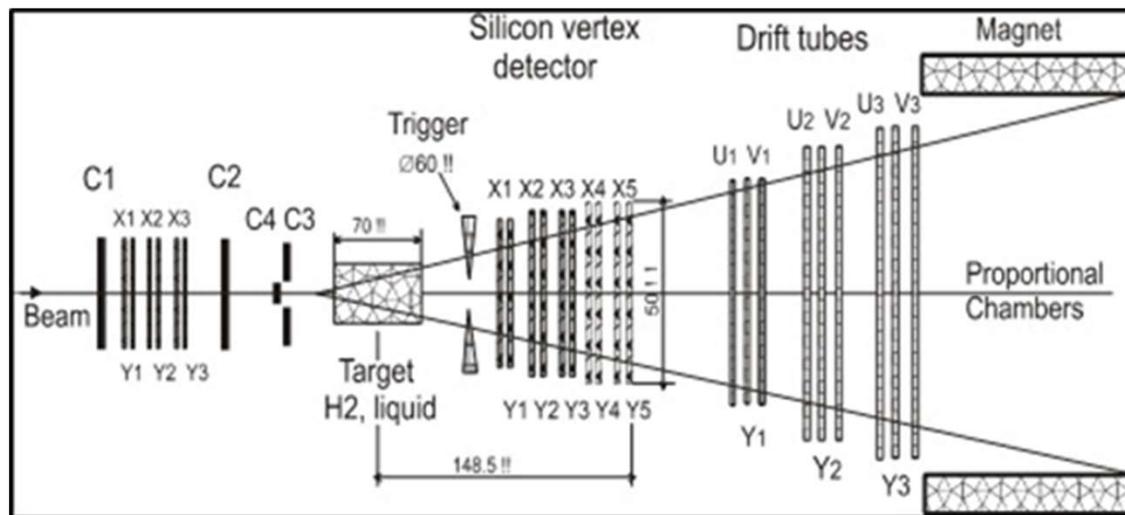


C1,C2 – пучковый сцинтиляционный и Si-гомоскоп; C3,C4 – мишенная станция и вершинный Si-детектор; 1,2,3 – трековый детектор на минидрейфовых трубках; 4 – пропорциональные камеры магнитного спектрометра; 5 – пороговый черенковский счетчик; 6 – сцинтиляционный гомоскоп; 7 – детектор гамма-квантов

Спектрометр с вершинным детектором СВД-2



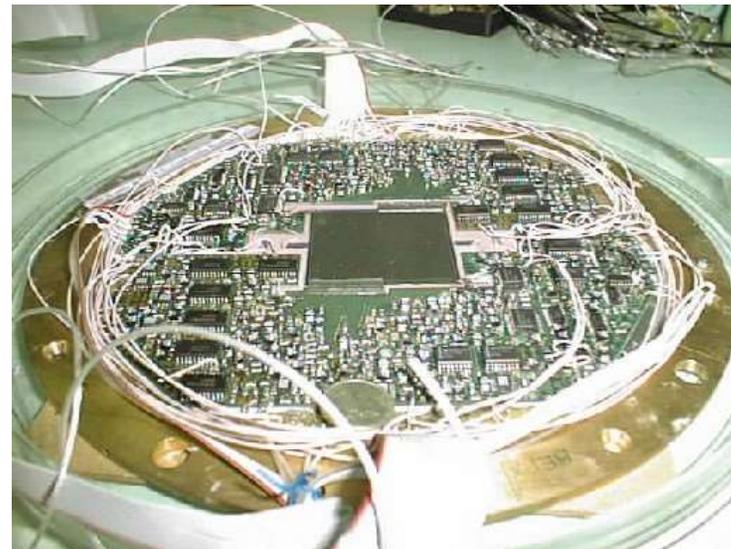
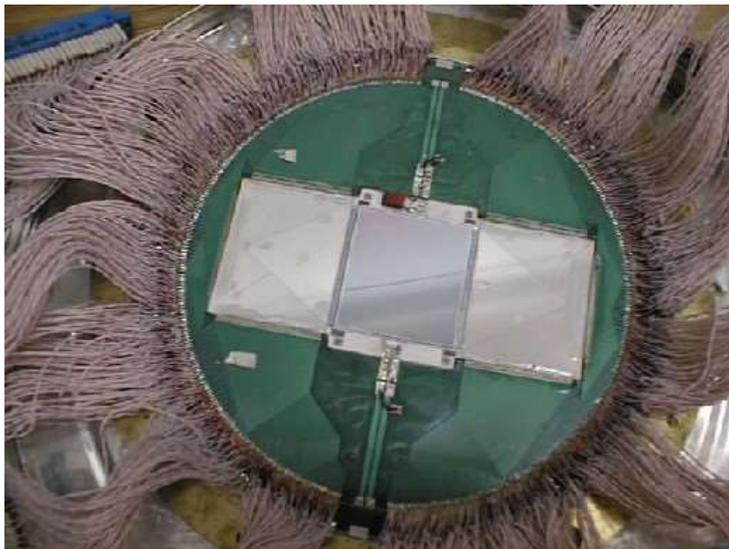
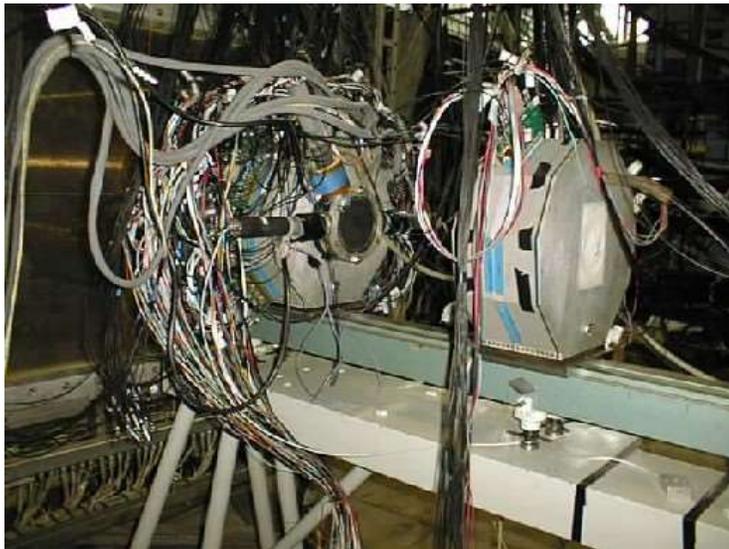
- триггер 1-го и 2-го уровней (1)
- вершинный детектор(1);
- система из 9 плоскостей дрейфовых трубок (всего 2300 каналов) (2);
- широкоапертурный магнитный спектрометр на основе 17 больших пропорциональных камер(3);
- магнит(4);
- широкоапертурный газовый пороговый черенковский счетчик для разделения пионов и каонов(5);
- годоскопический детектор гамма-квантов на 1500 каналов(6).



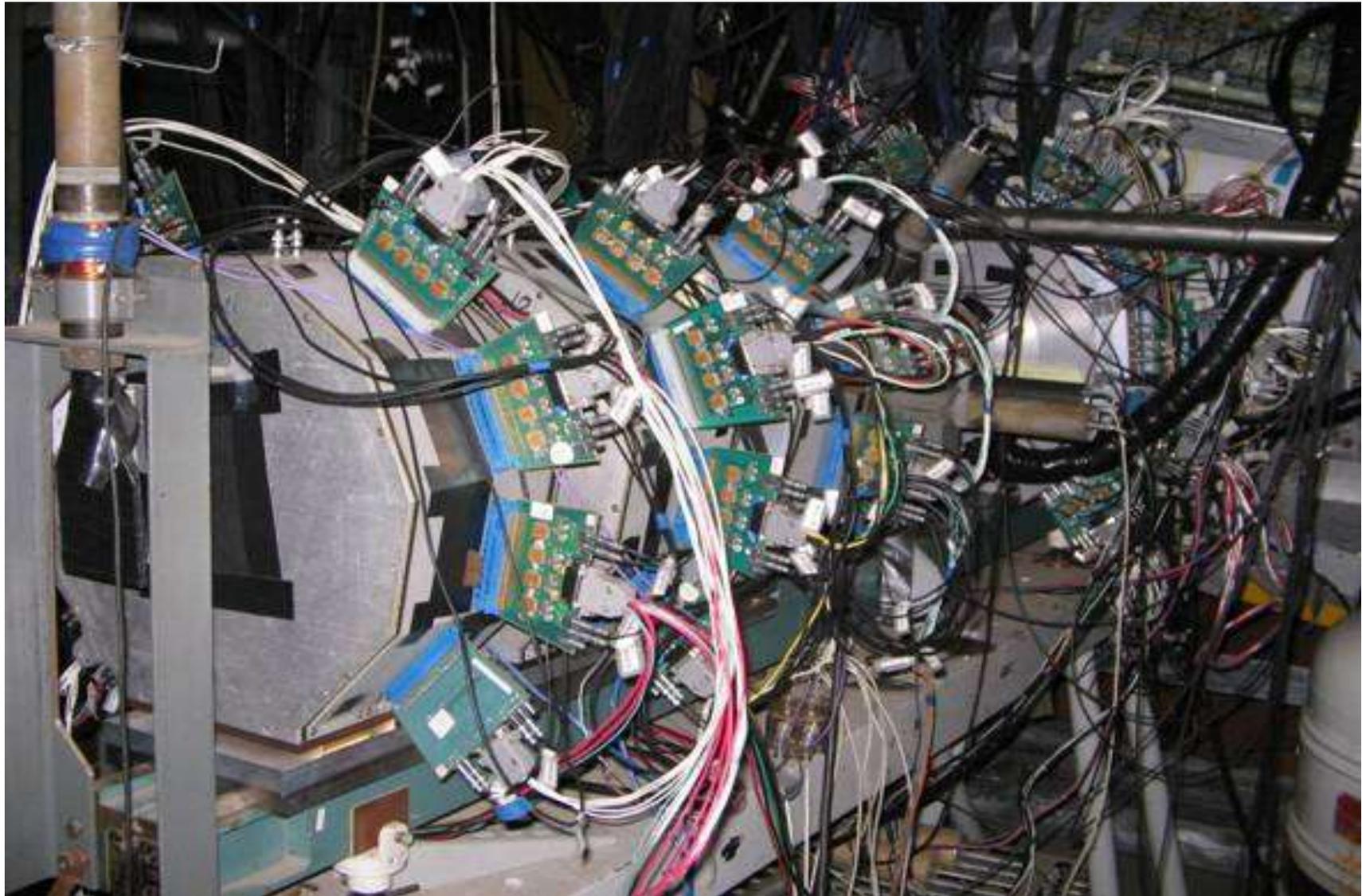
Модернизированная установка СВД с жидководородной мишенью

- 10 плоскостей вершинного детектора;
- 9 плоскостей дрейфовых трубок;
- полупроводниковый годоскоп;
- детектор гамма-квантов.

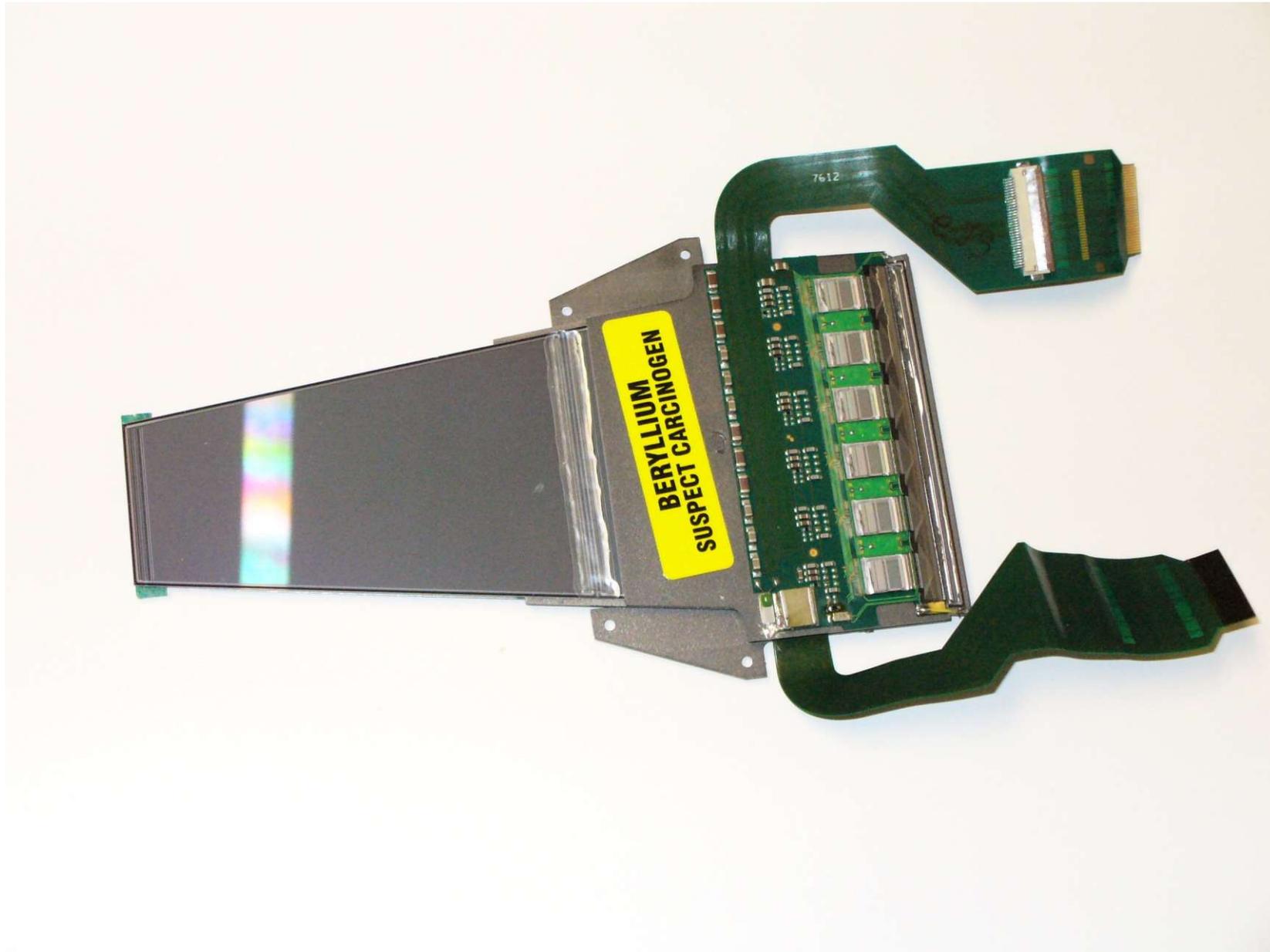
Спектрометр с вершинным детектором СВД-2



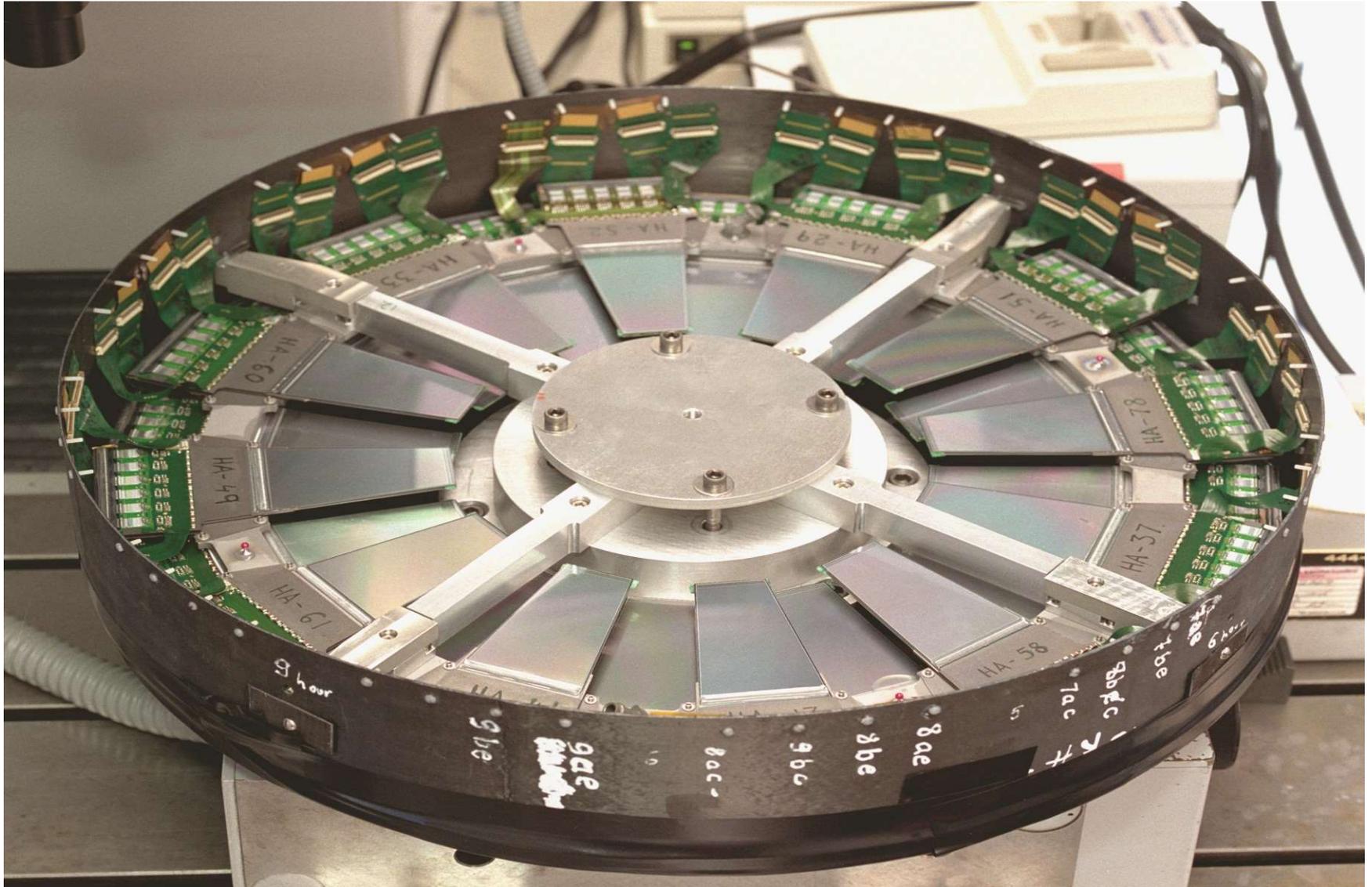
Спектрометр с вершинным детектором СВД-2



Двухсторонний модуль – эксперимент D0



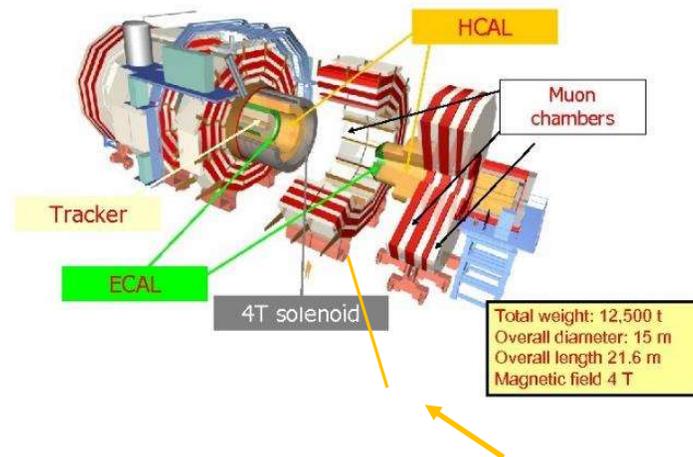
1/4 вклада НИИЯФ в D0 эксперимент



HCAL (Hadron Calorimeters) – адронные калориметры

На этапе создания установки CMS научная группа НИИЯФ МГУ принимала непосредственное участие в создании, тестировании и вводе в эксплуатацию HF (Hadron Forward) – переднего калориметра

Принцип работы HF-калориметра состоит в генерации черенковского свечения в кварцевых волокнах, пронизывающих железный абсорбер



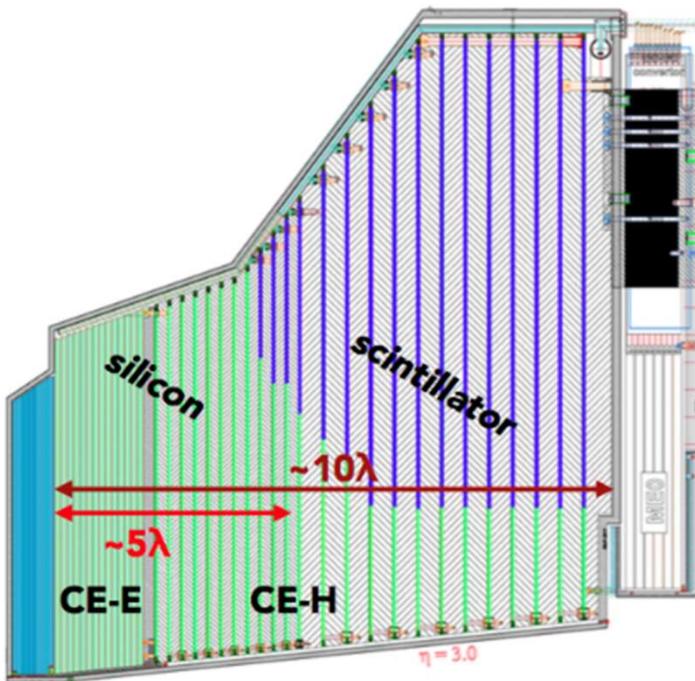
Специфика работы переднего калориметра – предельно жесткие радиационные условия

Методические исследования в ходе создания переднего (HF) калориметра при непосредственном участии группы НИИЯФ МГУ:

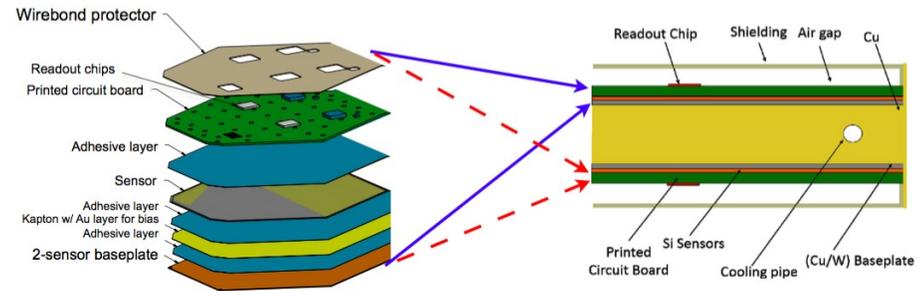
- исследования радиационной стойкости кварцевых волокон;
- исследования активации и радиационной коррозии материала абсорбера;
- тестирование и первичная калибровка калориметра с помощью радиоактивных источников;
- разработка методики настройки электроники калориметра и ее тестирование.



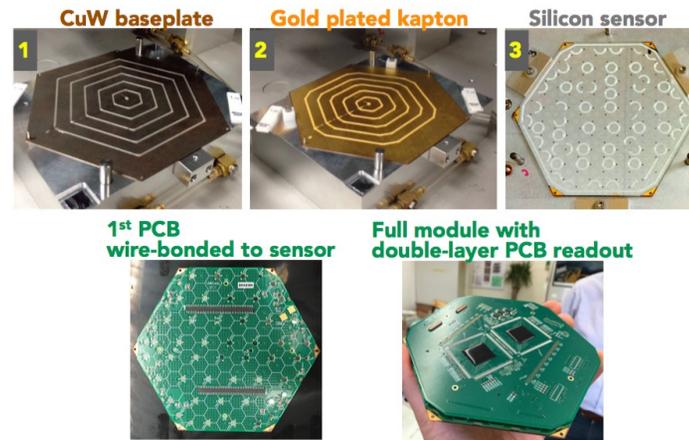
Дальнейшие планы рабочей группы НИИЯФ МГУ по участию в поддержке и развитии калориметрической части установки CMS включают, помимо продолжения работ по калибровке и обслуживанию существующих калориметров, участие в работах по созданию на втором этапе модернизации (Upgrade Phase II) **мелкоячеистого (HGCal) адронного калориметра**. В частности, сотрудники НИИЯФ выполняют **разработку систем питания калориметра и участвуют в тестировании элементов калориметра и, в перспективе, в создании калибровочной базы данных.**



Концепция конструкции мелкоячеистого (HGCal) калориметра



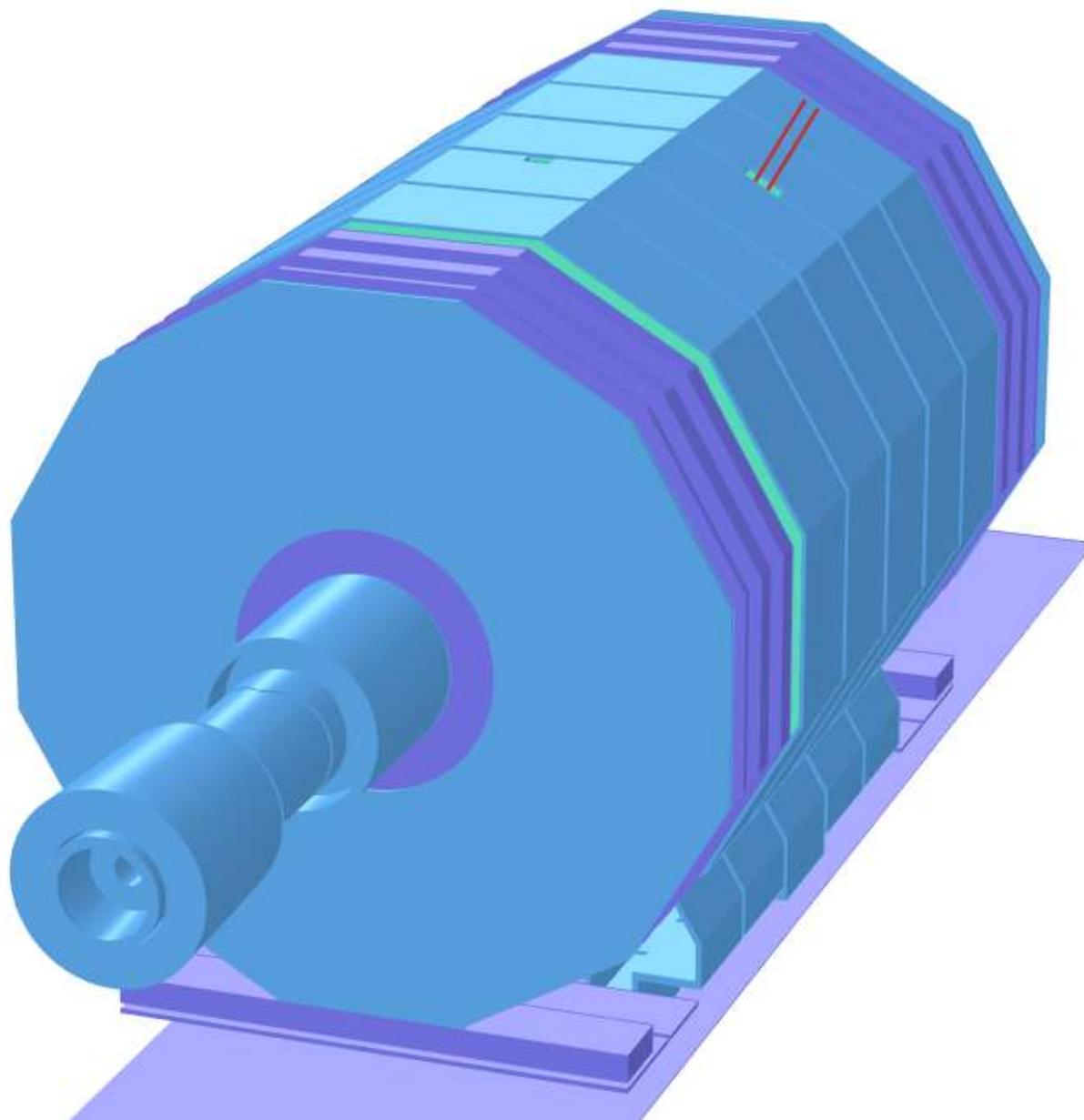
Конструкция модуля мелкоячеистого (HGCal) калориметра



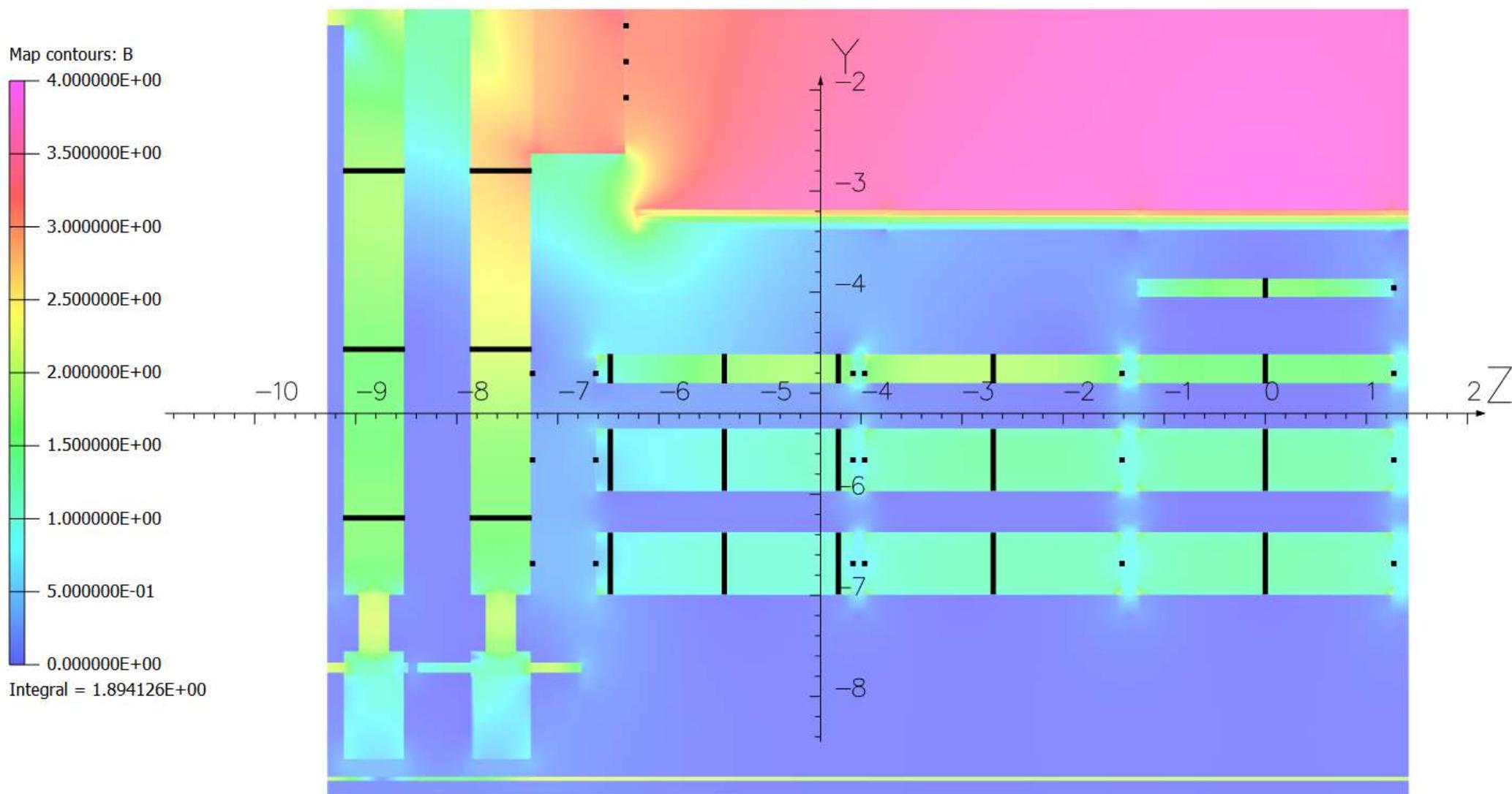
Сборка модуля мелкоячеистого (HGCal) калориметра



Трёхмерная модель магнита CMS



Распределение плотности магнитного потока в вертикальной плоскости в области расположения потоковых катушек и В-сенсоров





Сравнение результатов расчёта и измерений



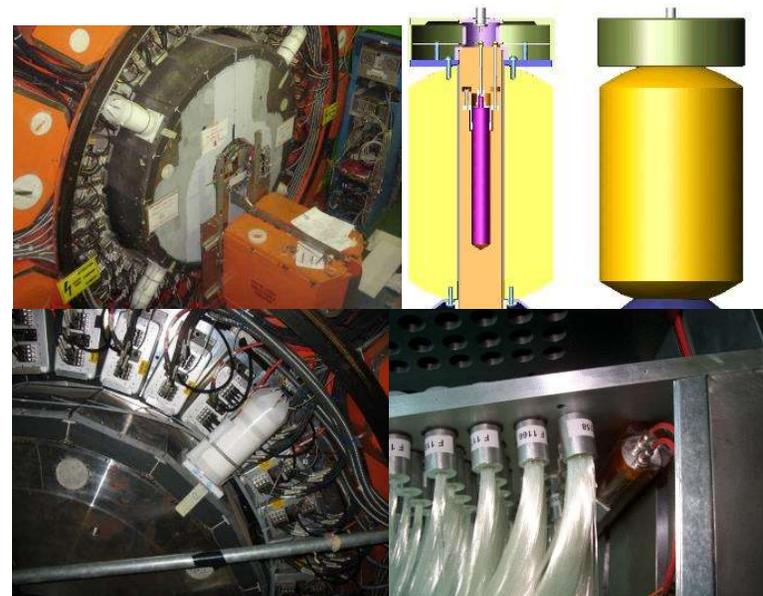
- Усреднённая статистическая ошибка семи измерений, выполненных **ПОТОКОВЫМИ КАТУШКАМИ** составляет **$0.59\% \pm 0.32\%$** . Систематическая ошибка составляет **3.6%** связана с учётом толщины **ПОТОКОВЫХ КАТУШЕК**.
- Различие между расчётными и измеренными значениями **ПЛОТНОСТИ МАГНИТНОГО ПОТОКА** при токе магнита **$18,164$ кА** составляет **$4,1\% \pm 7,0\%$** в блоках колец ярма магнита и **$-0,6\% \pm 2,7\%$** в секторах торцевых дисков.
- Разница между расчётной и измеренной **ПЛОТНОСТЬЮ МАГНИТНОГО ПОТОКА** в местах размещения **ТРЕХМЕРНЫХ ДАТЧИКОВ Холла** составляет **$3\% \pm 7\%$** .
- Погрешность измерений, выполненных с помощью **ТРЕХМЕРНЫХ ДАТЧИКОВ Холла**, составляет в среднем **$\pm (0.02 \pm 0.01)$ мТ**.

BRIL (Beam Radiation, Instrumentation & Luminosity) – подпроект
контроля пучков ускорителя и радиационных условий

С момента запуска коллайдера по настоящее время научная группа НИИЯФ МГУ осуществляет поддержку и модернизацию системы HF RADMON мониторинга радиационных условий в области передних калориметров

Задачи системы состоят в:

- контроле потоков нейтронов и доз ионизирующих излучений,
- контроле эффективности радиационной защиты,
- дополнительном контроле светимости



В состав системы HF RADMON входят: нейтронные мониторы на основе борированных пропорциональных газовых счетчиков, расположенные внутри и вне радиационной защиты в области ФЭУ и электроники переднего калориметра и ионизационные камеры для контроля доз ионизирующих излучений, установленные в области выхода кварцевых волокон переднего калориметра

Система мониторинга нейтронных полей в коллайдерных экспериментах, ПТЭ, № 2, 2017



Эксперимент CMS (Compact Muon Solenoid) на LHC (Большом Адронном Коллайдере)

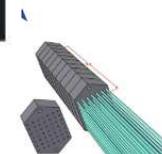
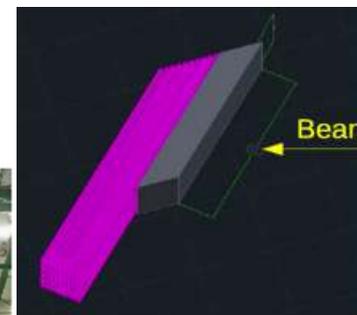


Дальнейшие **планы** работы научной группы НИИЯФ МГУ в рамках подпроекта BRIL включают, помимо поддержки системы HF RADMON в 3-м сеансе работы коллайдера, непосредственное участие в ходе подготовки к 4-му сеансу (т.н. Upgrade Phase II) в следующих исследованиях:

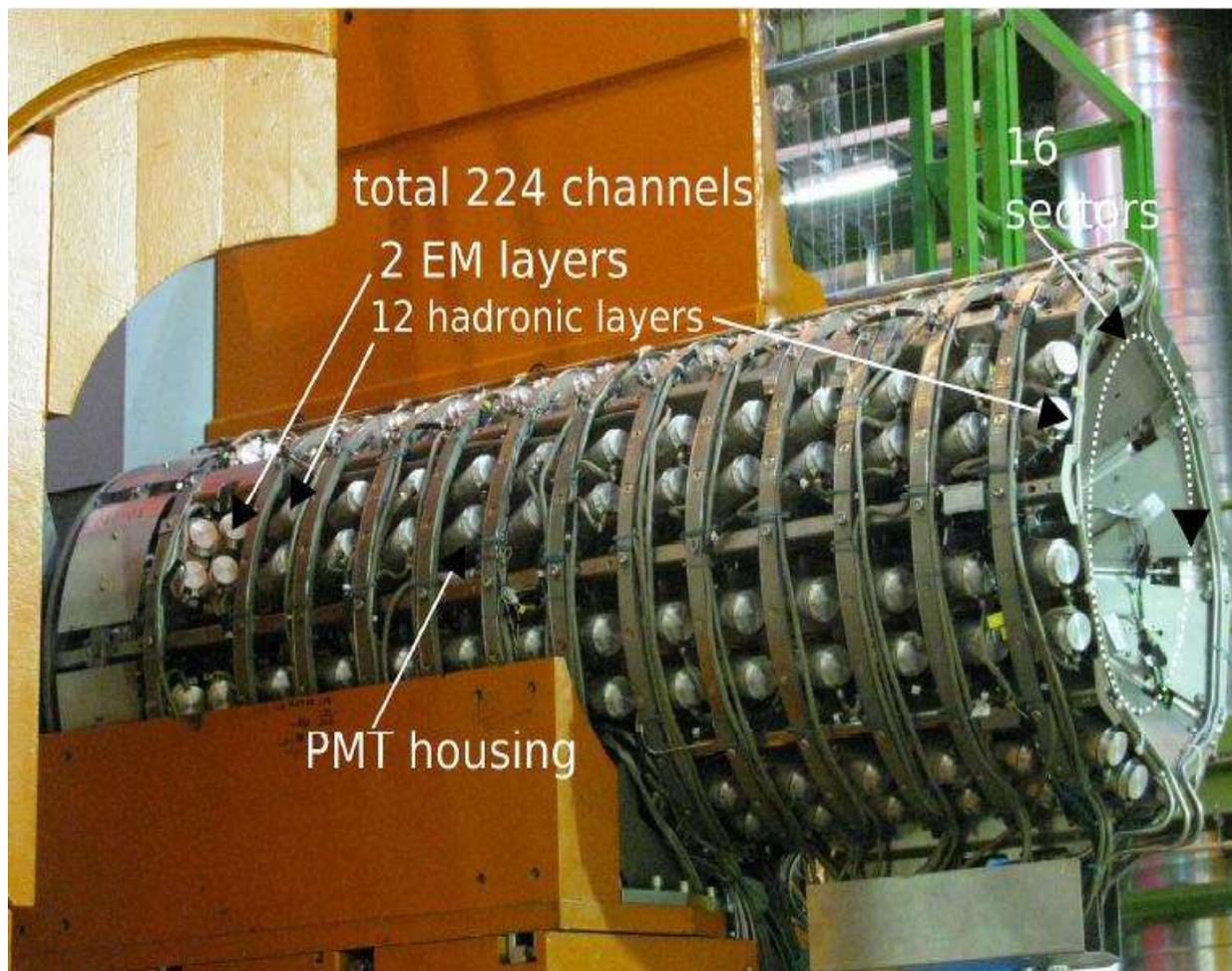
расширение и модернизация **системы нейтронных мониторов** для измерений в области других субдетекторов установки CMS (в том числе для различных областей спектра)

участие в создании системы **нейтронных мониторов** на основе твердотельных датчиков с кремниевыми фотоумножителями, предназначенной **для спектральных измерений**

участие в разработке и создании **QFL (Quartz Fiber Luminometr)** – быстрого **люминометра** нового типа, предназначенного для контроля временной структуры пучка в условиях большой светимости



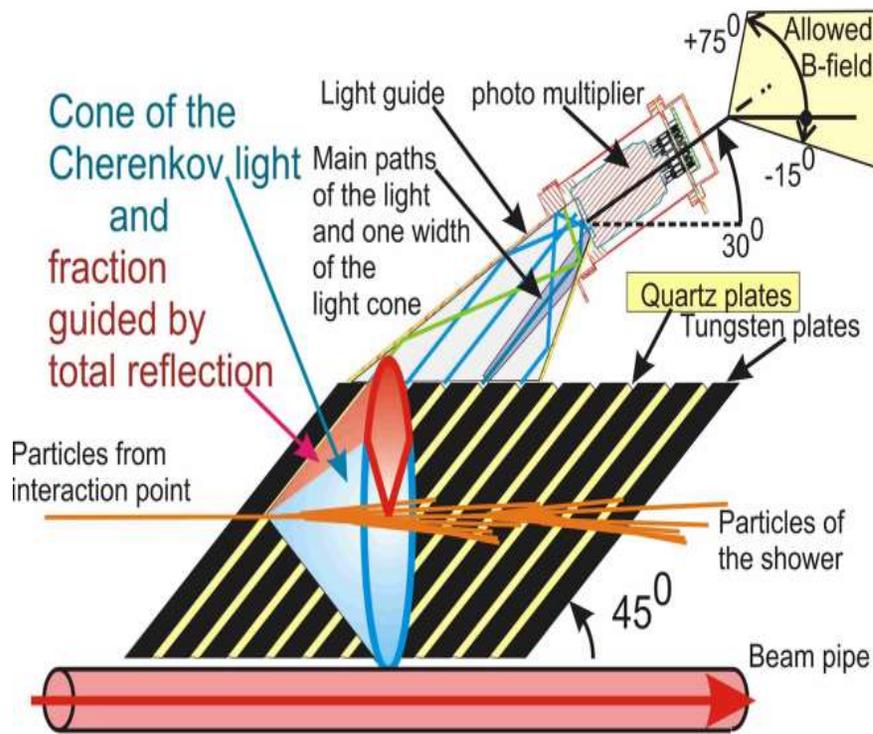
Форвард-калориметр **CASTOR** (**C**entauro **A**nd **S**Trange **O**bject **R**esearch)



Передний кварц-вольфрамовый калориметр представляет собой цилиндр, образованный восемью секторами (октантами) с внутренним радиусом 3.7 см и внешним радиусом 14 см. Полный сектор в длину соответствует десяти длинам адронного взаимодействия. Состоящий из двух полусфер, окружающих ось пучка, калориметр размещен на расстоянии 14.4 м относительно точки взаимодействия со стороны отрицательных значений координат и перекрывает интервал псевдобыстрот от 5.2 до 6.6.

Отличные энергетическое и пространственное разрешения, линейность, высокая радиационная стойкость, быстроедействие и компактные размеры делают его незаменимыми для использования в передней области в экспериментальной установке CMS.

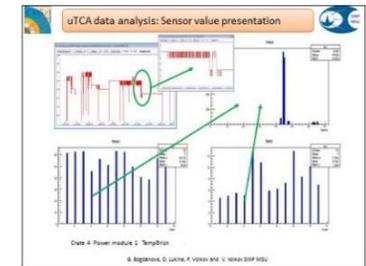
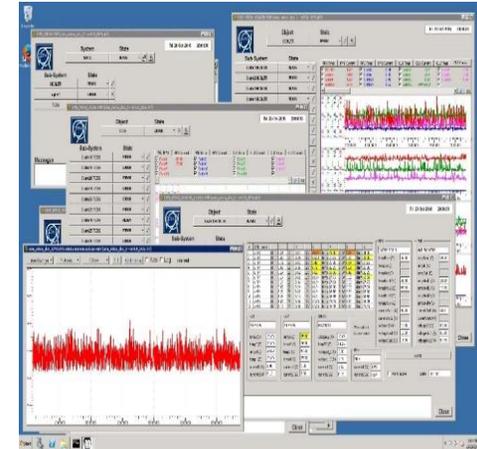
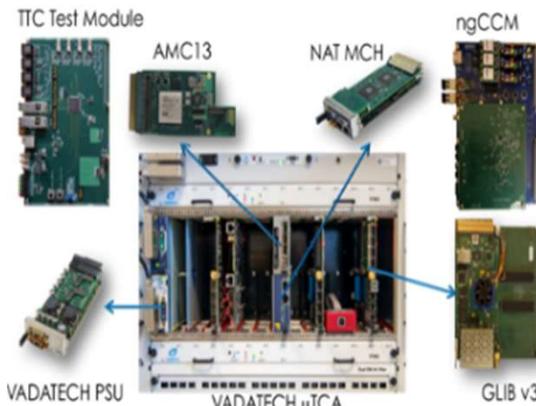
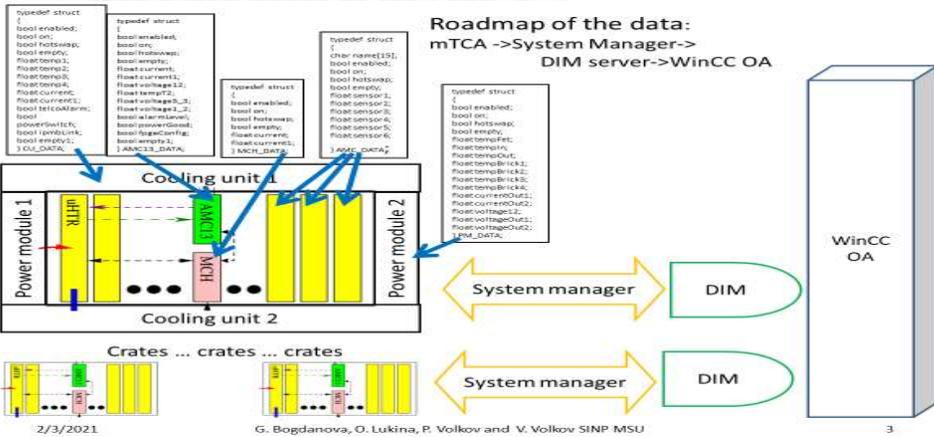
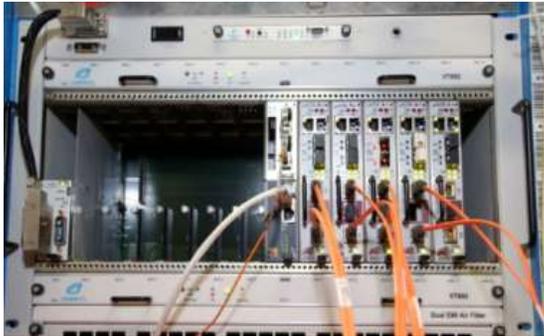
Форвард-калориметр **CASTOR** (**C**entauro **A**nd **S**Trange **O**bject **R**esearch)

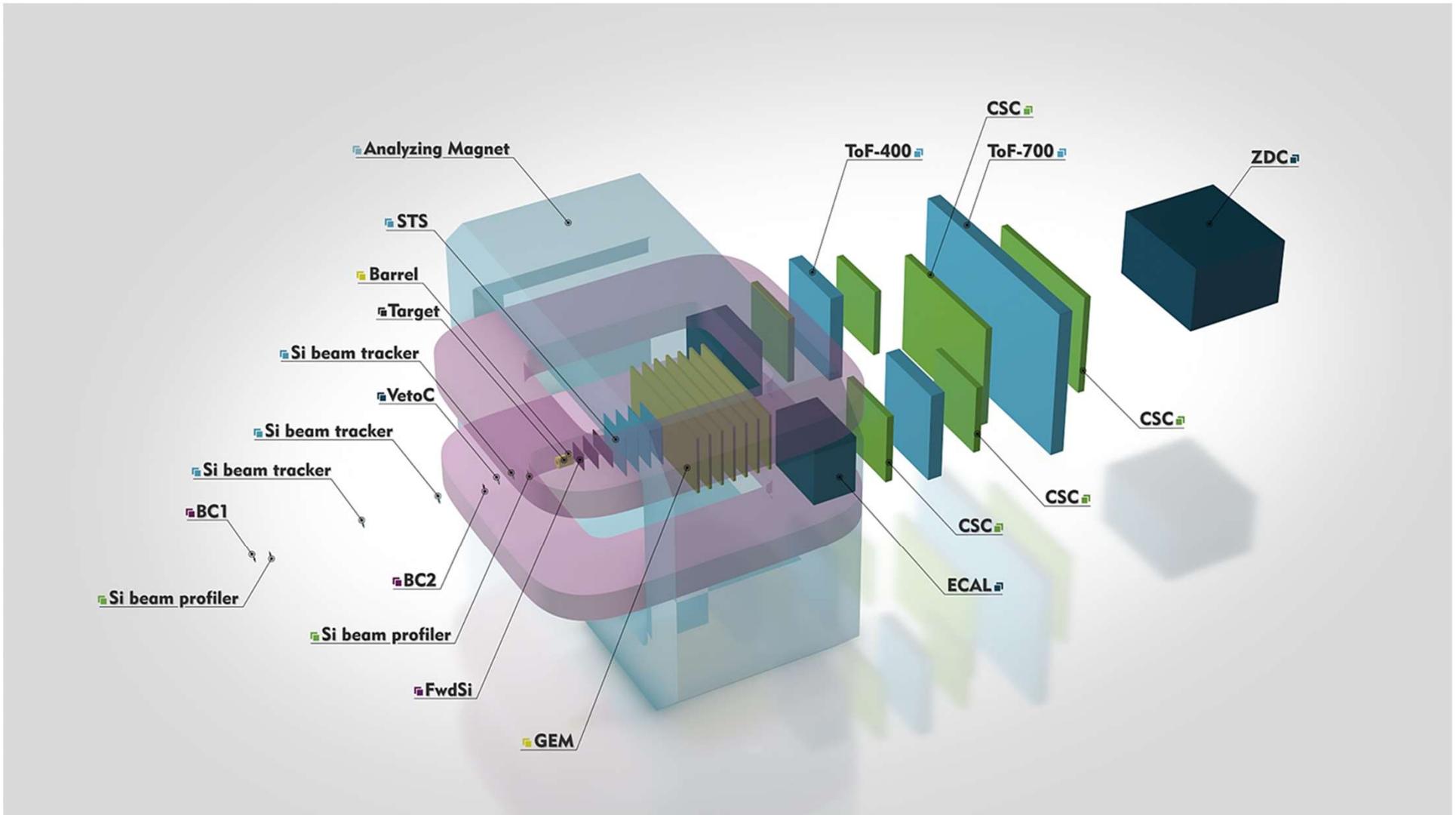


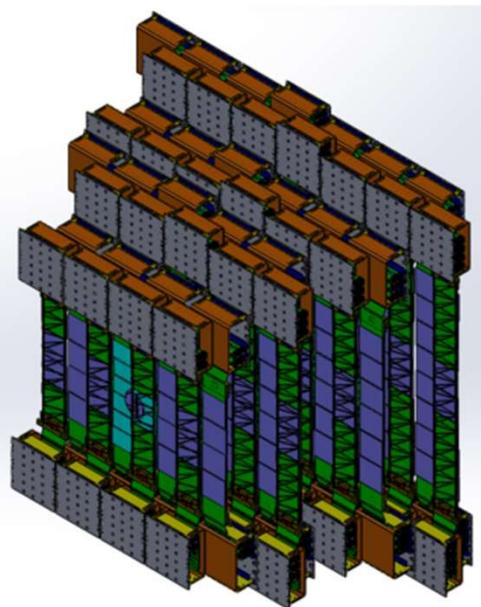
Калориметр имеет азимутальную сегментацию - 16 симметричных сегментов вокруг оси пучка, а также 2 продольных сегмента для электромагнитной (EM) и 12 для адронной (HAD) частей. В качестве поглотителя используются вольфрамовые (W) пластины, а кварцевые (Q) пластины как активная среда. Калориметр и системы считывания разработаны таким образом, чтобы позволить наблюдать развитие ливня по мере прохождения через калориметр. При прохождении заряженной частицы через кварцевый наполнитель образуется черенковское излучение. С целью увеличения выхода сигнала – черенковского излучения – W/Q – пластины наклонены под углом 45° к оси пучка. Конструкция калориметра предполагает 224 канала (16 x 14), свет от каждого канала собирается и фокусируется в соответствующем фотоумножителе (PMT). Для успешной эксплуатации важное значение имеет высокое качество делителей для фотодетекторов. Разработка и изготовление делителей выполнены в НИИЯФ МГУ.

Мониторирование электроники стандарта mTCA в составе субдетекторов CMS

Разработка комплекса управления и контроля измерительной аппаратуры для узлов установки CMS на основе нового стандарта электроники с микроархитектурой для телекоммуникационных вычислений







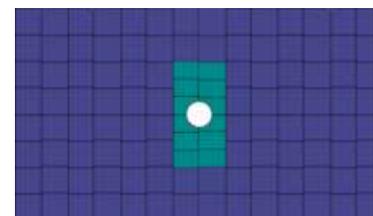
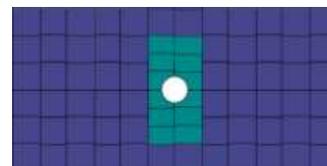
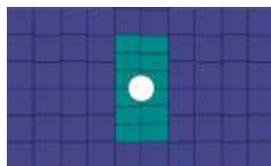
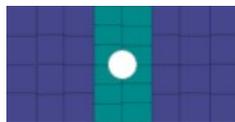
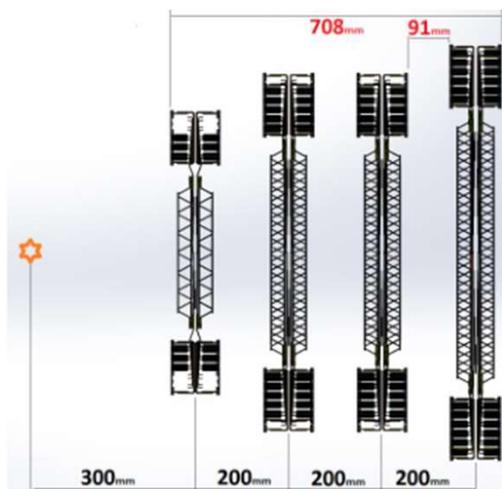
Четыре станции на базе двухсторонних микростриповых кремниевых детекторов

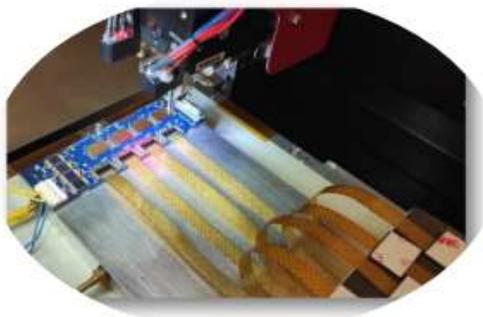
Число модулей: 292

Модуль – 2048 каналов считывания

Общее число каналов: ~ 600 000

Потребляемая мощность: ~15 кВт



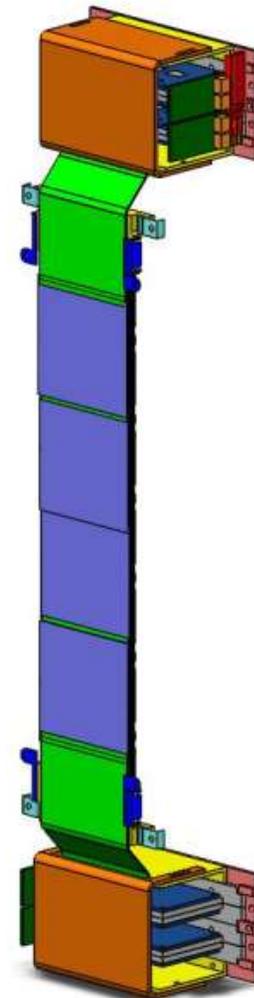
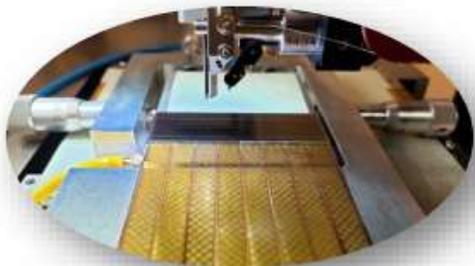


Si-sensor

1024 * 58 μ

Stack of low-mass micro-cables

2x Front-end Boards

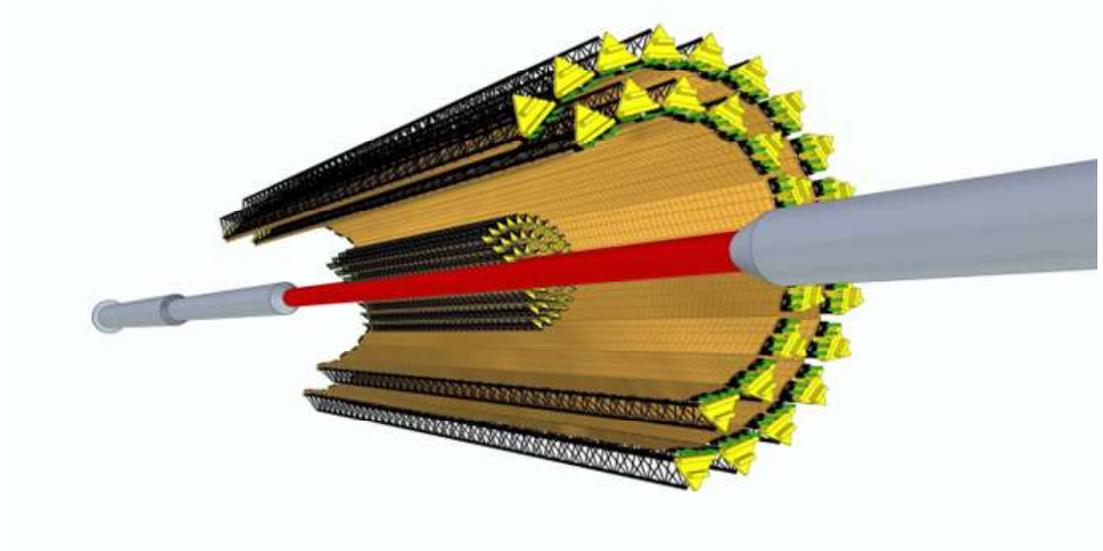
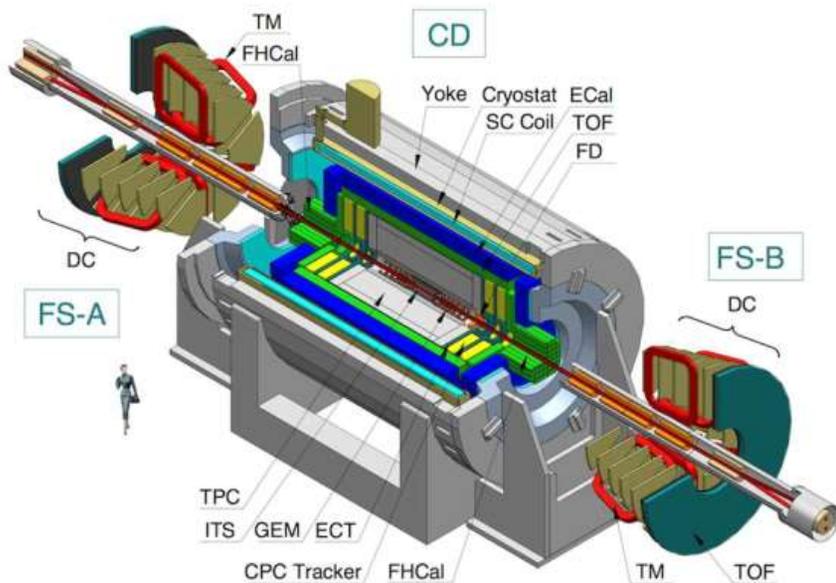


STS ladder

Структура MPD-ITS:

3-х слойный внутренний баррель + 2х-слойный внешний баррель.

ITS дополнит TPC в части определения импульса частиц и восстановления вершин распада для гиперонов (Λ , Ξ , Ω) и D-мезонов.



Некоторые требования к MPD-ITS:

- Быстрые пиксельные КМОП-сенсоры с высокой степенью детализации и низким уровнем шума.
- Пространственное разрешение регистрации координат трека на уровне $\sim 5 - 10$ мкм.
- Минимум материала

О чем не удалось рассказать:

- Организация промышленного производства кремниевых детекторов в России
- ATLAS - LHC
- LHCb - LHC
- CLAS12 - T. Jefferson Lab
- NA64 - CERN
- RD2 – CERN
- CBM – FAIR, Дармштадт
- Исследования по повышению радиационной стойкости Si детекторов
- Разработка специализированных микросхем съема сигнала с детекторов
- Участие в космофизических экспериментах: ATIC, PAMELA, НУКЛОН

Спасибо за внимание!