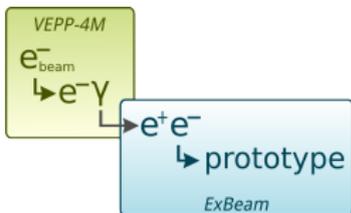


# Выведенные пучки электронов и гамма-квантов на ВЭПП-4М

---



**В.С. Бобровников**

Совещание по ВЭПП-4  
20 мая 2015

✉ [V.S.Bobrovnikov@inp.nsk.su](mailto:V.S.Bobrovnikov@inp.nsk.su)

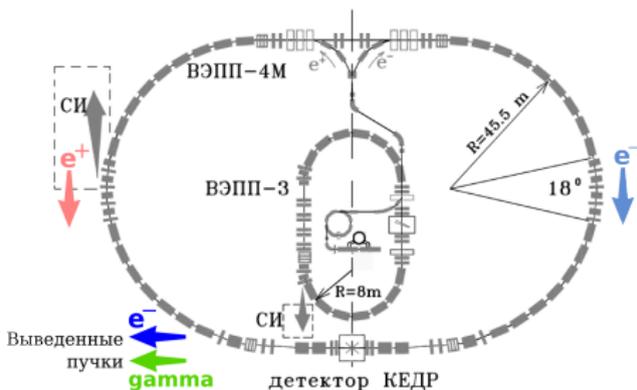
- Стоимость современных детекторов для физики высоких энергий очень высока и поэтому создание таких сложных систем разбивается на несколько этапов:
  - детальная проработка конструкции исходя из условий физической программы;
  - изготовление прототипа (или прототипов) и их испытание в реальных условиях, что позволяет определить соответствие данного образца требуемым критериям;
  - собственно создание систем детектора.
- Наиболее распространенной практикой в мировой экспериментальной физике является испытание прототипов детекторов на пучках частиц в специальных ускорительных центрах, в том числе на пучках электронов и гамма-квантов.
- В настоящий момент в России не существует подобных установок (электроны и гамма-кванты), а в существующих в мире пучковых ускорительных центрах время работы на выведенных пучках расписано на несколько лет вперед и для наших исследовательских групп труднодоступно.

## Комплекс ВЭПП-4М

Энергия пучка  $1 \div 5$  ГэВ

Число банчей:  $2 \times 2$

Светимость:  $(1 \div 80) \times 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$



## Задачи и цели установки (август 2008)

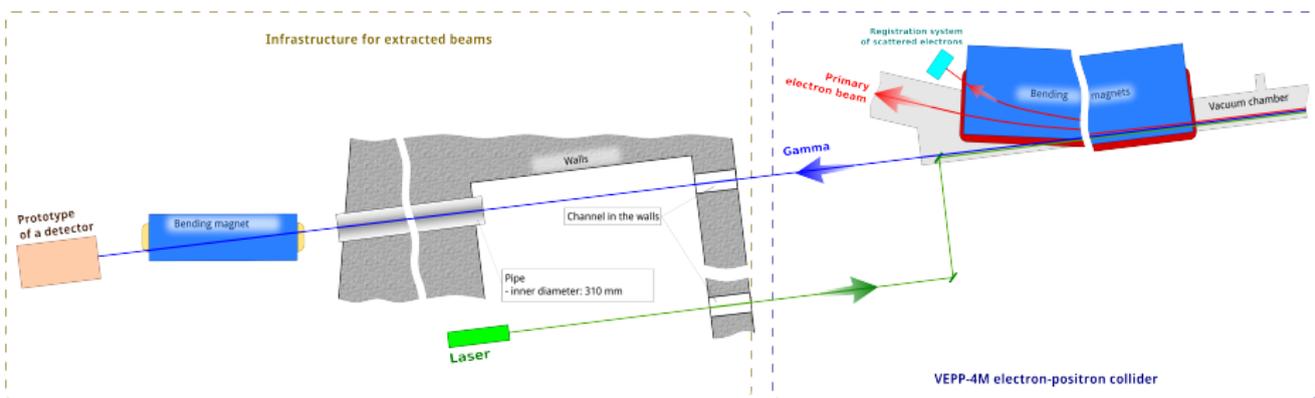
- Тестирование (разработка) новых типов детекторов элементарных частиц для научных и прикладных исследований.
- Первые эксперименты на пучке выведенных электронов это работы с прототипами детектора черенковских колец на основе фокусирующего аэрогеля (ФАРИЧ), который планируется использовать в качестве системы идентификации в детекторе PANDA (Германия) и в детекторе для ScTau-фабрики, строительство которой планируется в ИЯФ СО РАН. Пучок электронов с низкой энергией 100 МэВ планируется использовать для тестирования прототипа калориметра для эксперимента Comet (Япония)
- Пучок меченых гамма-квантов планируется использовать для тестирования прототипа калориметра детектора для ScTau-фабрики.

## Проектные параметры выведенных пучков

	$e^-$	$\gamma$
Энергия [ГэВ]	$0.1 \div 3.0$ (5)	$0.05 \div 1.5$
$\sigma_E/E$ [%]	$0.5 \div 1.5$	$\simeq 0.5$
Интенсивность [Гц]	$10 \div 100$	$\simeq 1000$

## Выведенный пучок гамма-квантов

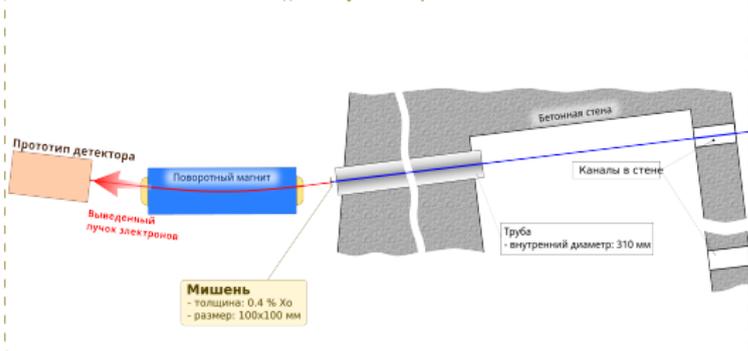
- Для формирования пучка гамма-квантов будет использоваться импульсный лазер. Пучок лазерного излучения вводится внутрь вакуумной камеры коллайдера ВЭПП-4, где он взаимодействует с пучком электронов в месте встречи пучков внутри универсального магнитного детектора КЕДР.
- Лазерные фотоны взаимодействуют с электронами пучка посредством комптоновского рассеяния. В результате чего в узком конусе направленном вдоль пучка электронов, формируется пучок гамма-квантов. Измерение энергии гамма-кванта производится с помощью уникальной системы регистрации рассеянных электронов (СРРЭ) с точностью около 0.5%.



## Выведенный пучок электронов

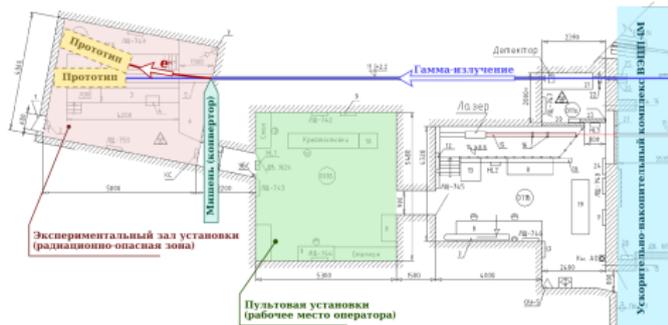
- Методика формирования пучка выведенных электронов заключается в следующем. В гало электронного пучка коллайдера ВЭПП-4 вводится подвижный пробник в котором образуются тормозные гамма-кванты, обратная конверсия в электроны (процесс рождения электрон-позитронной пары в мишени) осуществляется непосредственно в экспериментальном зале установки.
- Для обеспечения разделения электронов и позитронов, а также выделения электронов по энергии применяется дипольный магнит с требуемыми параметрами. Импульс электронов измеряется по их отклонению в известном магнитном поле, для этого используется координатная система позволяющая с нужной точностью измерять положение отдельных электронов в заданных точках.

Установка "Выведенные пучки электронов и гамма-квантов"



## Расположение помещений и научного оборудования

- Установка занимает два смежных помещения:
  - экспериментальный зал в котором расположено научное оборудование и происходит работа с выведенными пучками на прототипах детекторов;
  - пультавая – расположены стойки с электроникой для контроля и управления работой установки.



- Оборудование для работы с электронным пучком:

### Координатная система:

- дрейфовые камеры (ДК)
  - $\delta_x = 300$  мкм
  - $\chi = 0.21$  %
  - измеряется одна координата

- детекторы на основе газовых электронных умножителей (GEM)
  - $\delta_x = 70$  мкм,  $\delta_y = 200$  мкм
  - $\chi = 0.75$  %
  - измеряются две координаты

### Система измерения энергии:

- NaI - калориметр
- BGO - калориметр

### Триггерная система:

- счетчики на воздушном светосборе
  - $\chi = 1.21$  %
  - активная область  $15 \times 30$  мм<sup>2</sup> ( $10 \times 10$  мм<sup>2</sup>  $20 \times 40$  мм<sup>2</sup>)
- классические счетчики со световодами
  - $\chi = 5.68$  %
  - активная область  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup>

### Площадка для прототипа детектора:

- возможность 2D перемещения отн. оси пучка
  - диапазон хода 300 мм
  - максимальный перемещаемый вес 100 кг
  - точность перемещения 500 мкм

### Подвижный пробник:

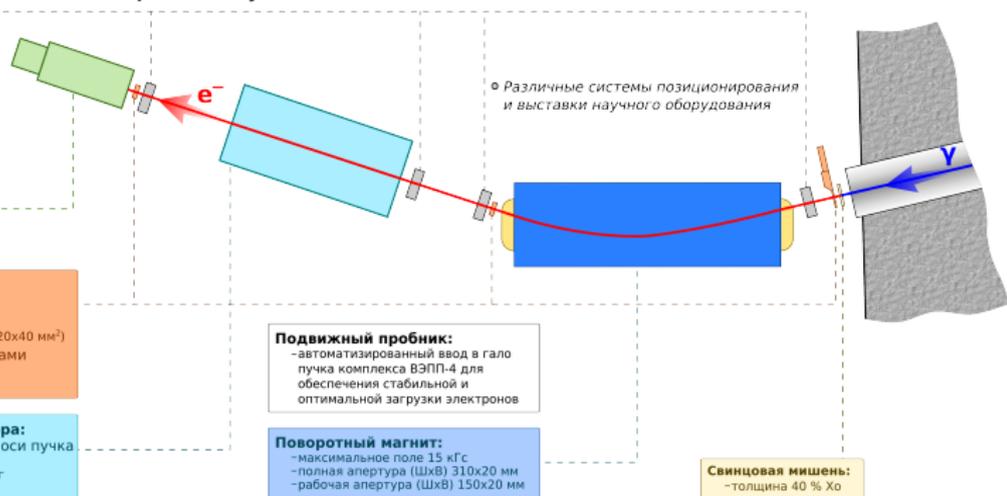
- автоматизированный ввод в гало пучка комплекса ВЭПП-4 для обеспечения стабильной и оптимальной загрузки электронов

### Поворотный магнит:

- максимальное поле 15 кГс
- полная апертура (ШХВ)  $310 \times 20$  мм
- рабочая апертура (ШХВ)  $150 \times 20$  мм

### Свинцовая мишень:

- толщина 40 %  $X_0$

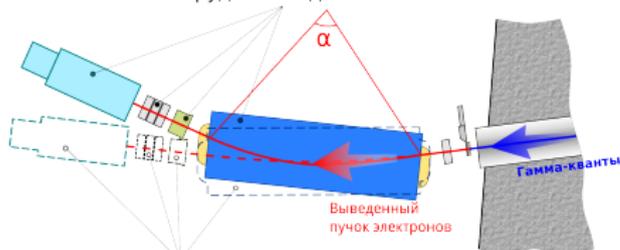


Различные системы позиционирования и выставки научного оборудования

## Два режима работы: hardLine и softLine

Режим	Угол поворота $\alpha$ [град]	$E_{e-}$ [ГэВ]	$B$ [кГц]
hardLine	13.8	1.0÷3.0	5.0÷15.0 (max)
softLine	33.2	0.06÷1.0	0.7÷12.2

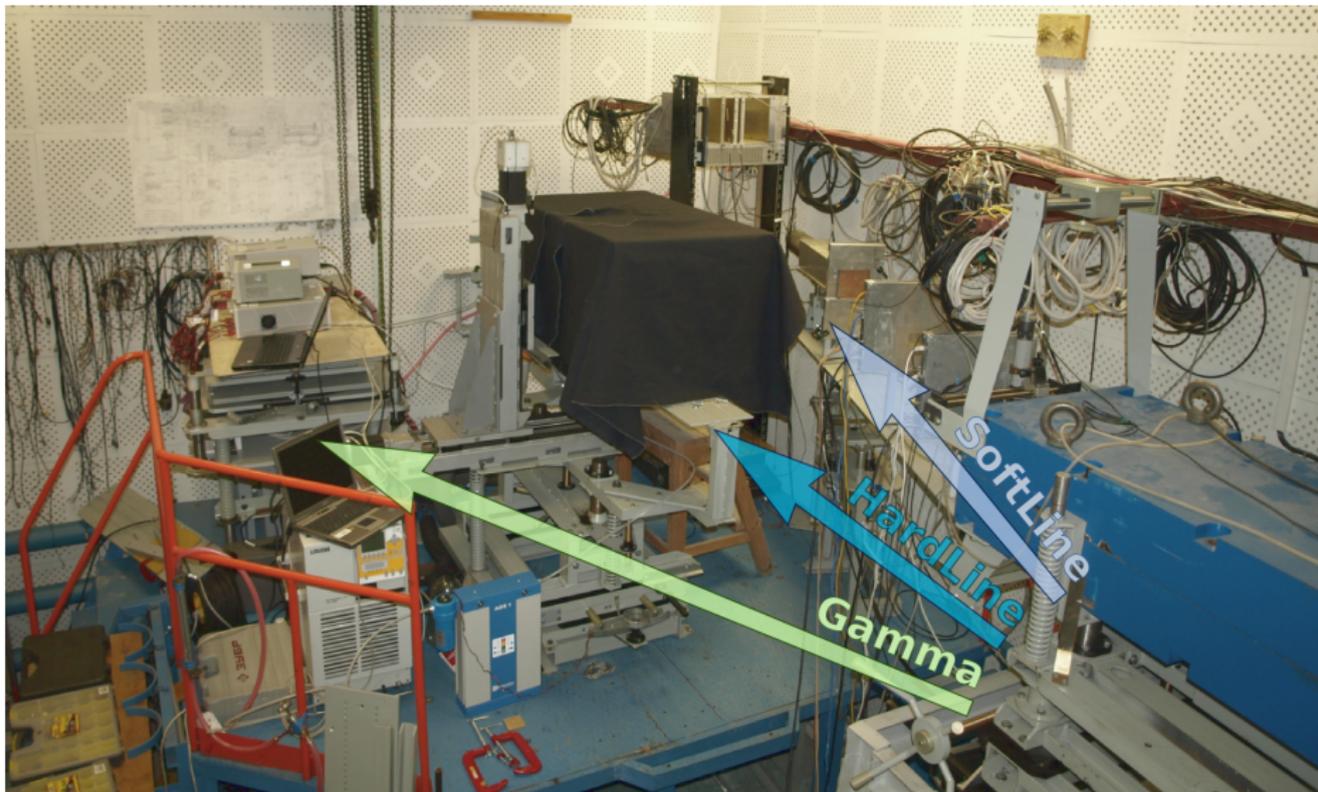
Расположение оборудования для "softLine"



Расположение оборудования для "hardLine"

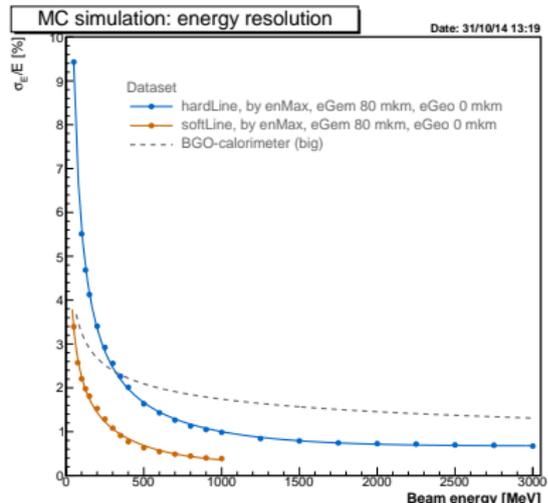
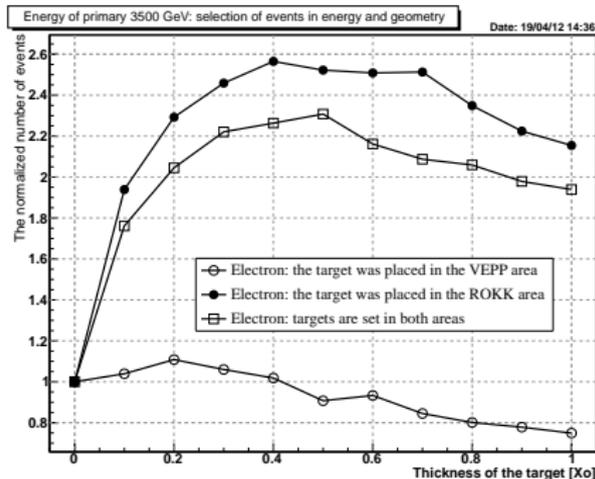


## Общий вид экспериментального зала (май 2015)



## Моделирование

- На основе Geant-4 написан пакет для моделирования:
  - полная физика получения выведенного электронного пучка;
  - гибкое описание геометрии всей инфраструктуры;
  - заложена неоднородность магнитного поля поворотного магнита (на основе экспериментальных данных).
- Выбор оптимальной толщины и места расположения свинцовой мишени
- Энергетическое разрешение электронного пучка



## Калибровка шкалы и разрешения calorиметров

- Калибровка по краю тормозного излучения проводилась в 3 точках по энергии ВЭПП-4М: 1.85 ГэВ, 3.0 ГэВ и 4.0 ГэВ.
- Край комптоновских гамма-квантов определяется как:

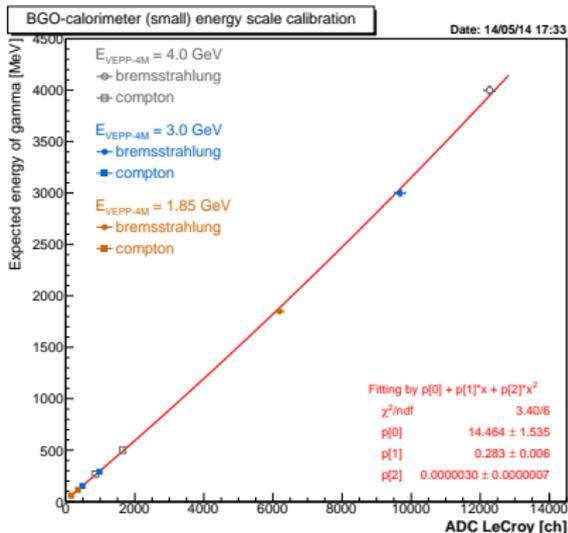
$$w_{max} = E_{beam} \frac{x}{1+x},$$

где:  $E_{beam}$  – энергия пучка электронов в ВЭПП-4М  
 $x = 4w_0 E_{beam} / m_e^2$ ,  $w_0$  – энергия фотонов лазера  
 (1.165 эВ и 2.33 эВ для 1 и 2 гармоник соответственно)

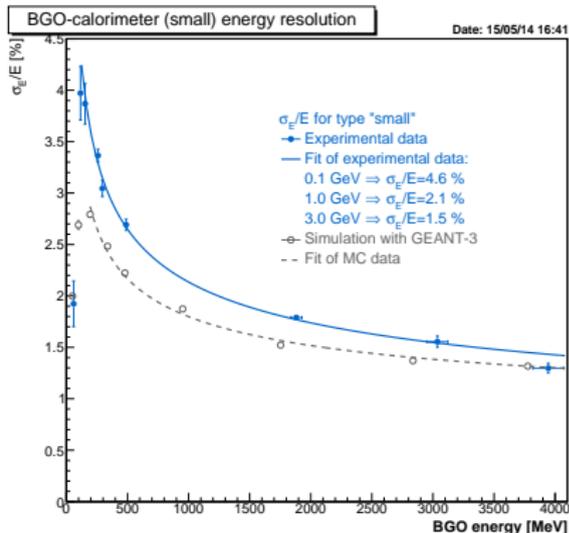
⇒ Получаем следующий набор точек:

$E_{vepp}$ [ГэВ]	Край спектра [МэВ]	
	1 гарм.	2 гарм.
1.85	59	115
3.0	152	290
4.0	267	500

### ● Калибровка энергетической шкалы

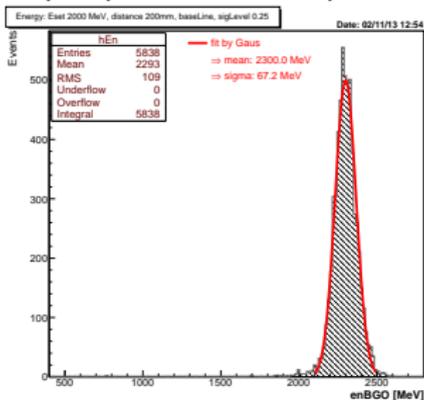


### ● Калибровка энергетического разрешения

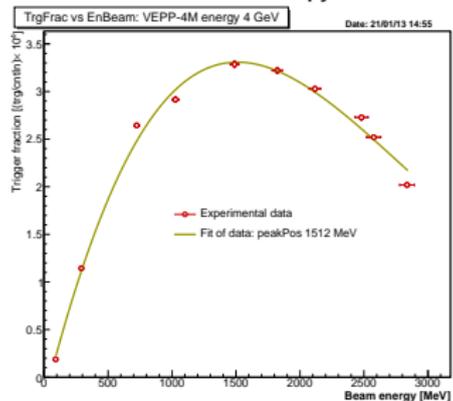


## Экспериментальные данные

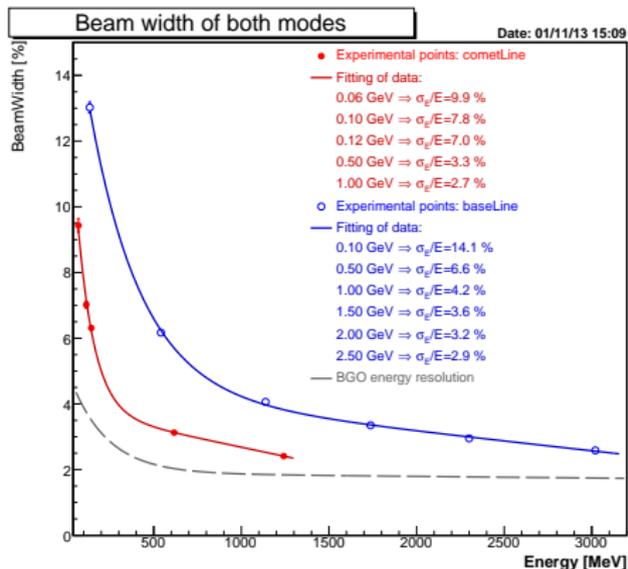
- Пример энергетического спектра с калориметра



- Зависимость полезной загрузки от энергии



- Полученный энергетический разброс при фиксированной площади триггера

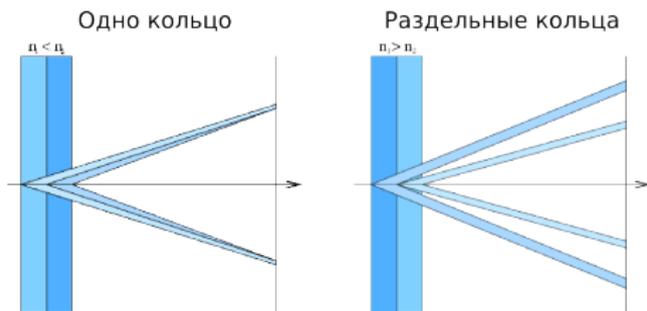


- Средняя нагрузка полезных событий составила около 50 Гц при полной загрузке  $\approx 110$  Гц
- Среднее время жизни пучка на ВЭПП-4 равнялось  $\approx 3 - 4$  часам

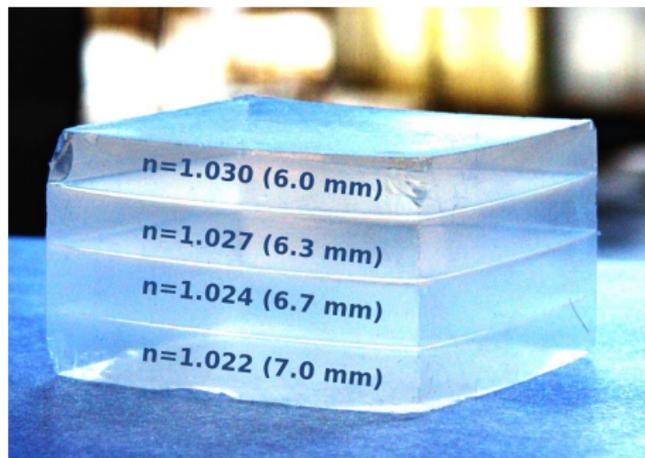


## Метод ФАРИЧ (FARICH – Focusing Aerogel RICH)

- Принцип фокусировки



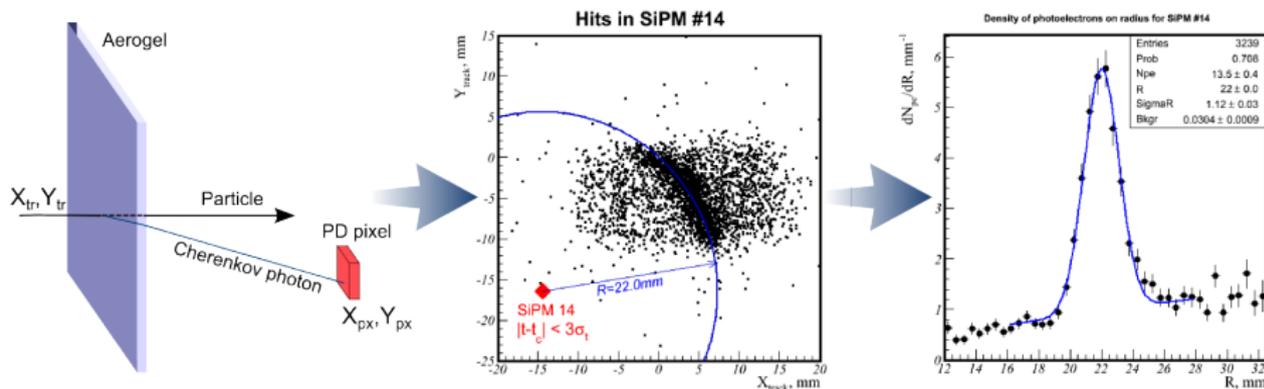
- Первый в мире 4-х слойный аэрогель



Повышение точности измерения черенковского угла по сравнению с одним слоем достигается за счет уменьшения вклада толщины в ошибку.

- Многослойные аэрогели производятся Институтом катализа СО РАН совместно с ИЯФ СО РАН с 2004 г.
- В 2012 г. получены опытные образцы с непрерывным градиентом показателя преломления.

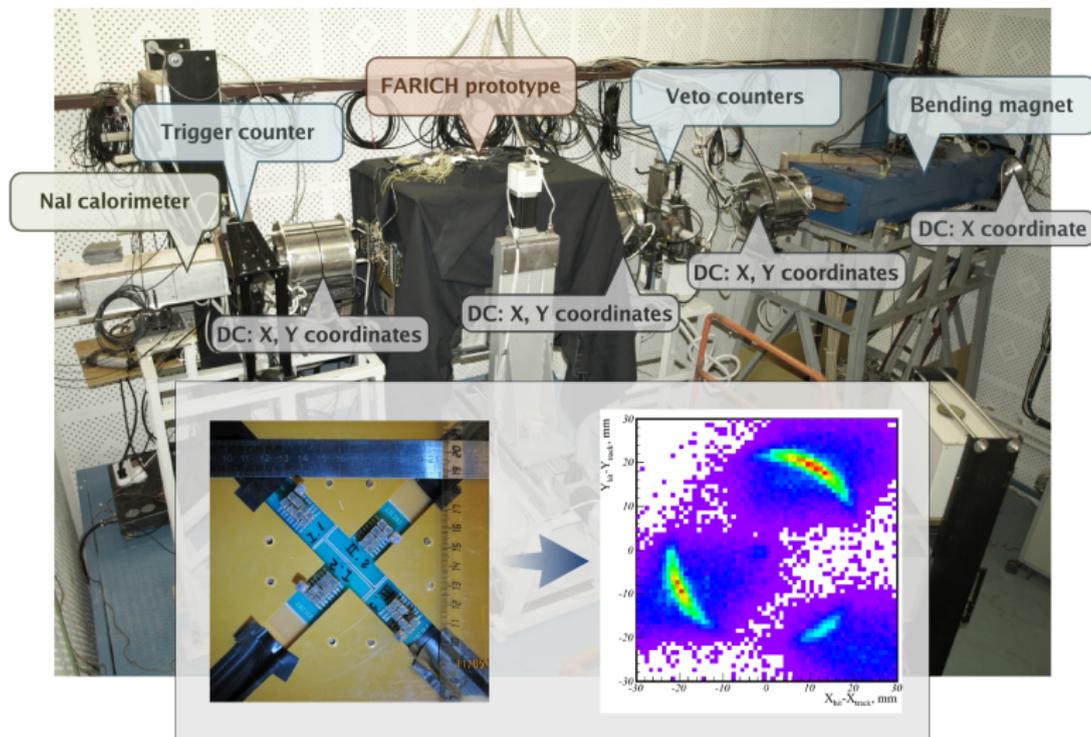
## Метод ФАРИЧ: подход к измерению параметров аэрогеля



- Использование трековой системы и одного фотонного сенсора при достаточной статистике достаточно для измерения распределения черенковских фотонов по  $R_{ch}$
- Много сенсоров позволяет улучшить точность измерения и выставить трековую систему относительно фотодетектора

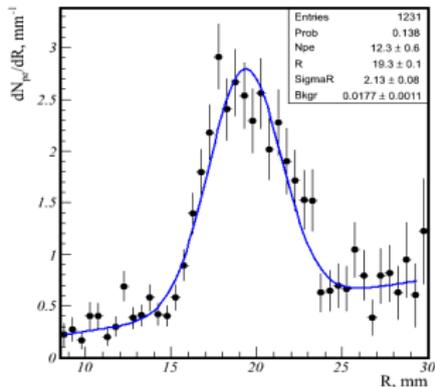
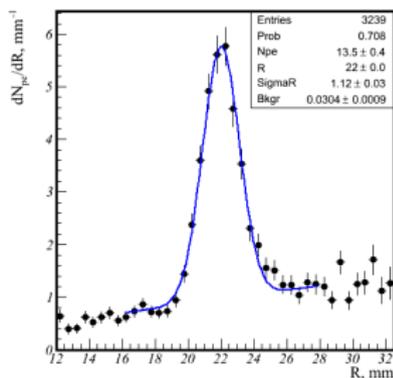
## Прототип ФАРИЧ #1 (сезон 2011)

- Черенковское излучение регистрировалось 32 кремниевыми фотоумножителями MRS APD с пикселем  $2.1 \times 2.1 \text{ мм}^2$

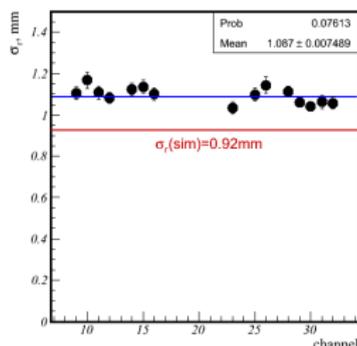


## Прототип ФАРИЧ #1: результаты

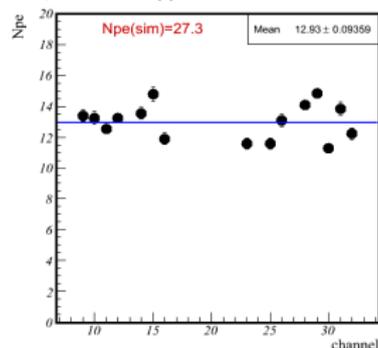
- Эффект фокусировки на 4-слойном ( $\sigma_r = 1.1$  мм, слева) аэрогеле по сравнению с однослойным ( $\sigma_r = 2.1$  мм, справа) блоком аэрогеля



- $\sigma_r$  от номера канала,  $\langle \sigma_r \rangle = 1.1$  мм примерно соответствует моделированию

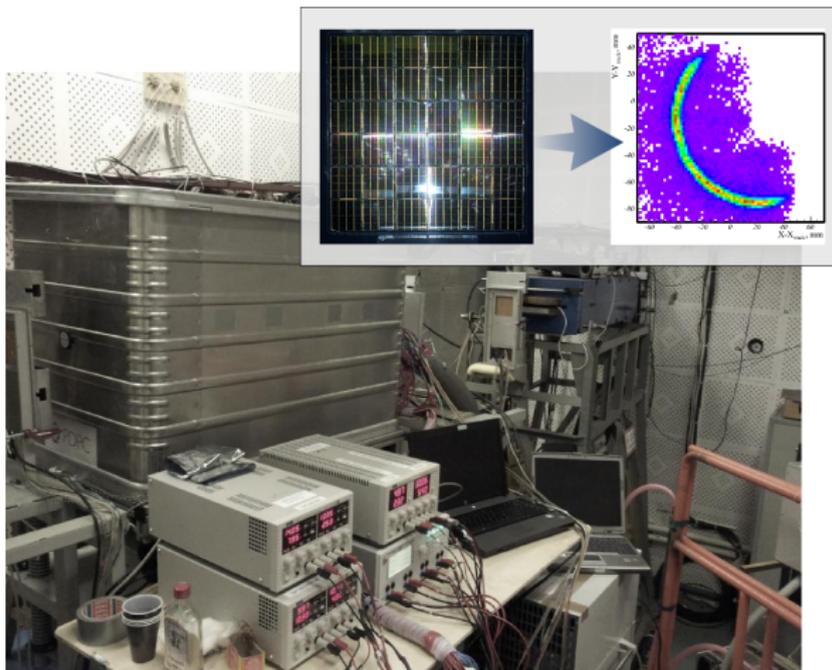


- $N_{p.e.}$  от номера канала,  $\langle N_{p.e.} \rangle = 13$  в 2 раза меньше, чем ожидалось



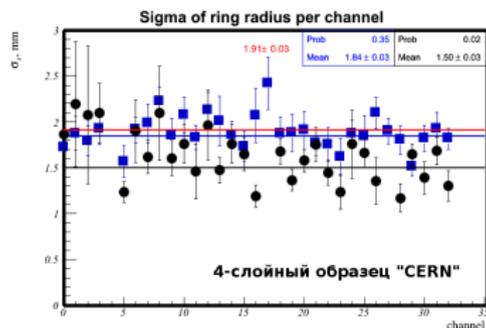
## Прототип РДРС–ФАРИЧ (сезон 2013)

- Матрица сенсоров DPC 48×48 пикселей (20×20 см<sup>2</sup>)
- Только 17 из 36 DPC тайлов работали из-за поломки. Достаточно для измерений.
- Каждый пиксель маскировался в размер 1×1 мм<sup>2</sup>, выключением части микроячеек DPC.

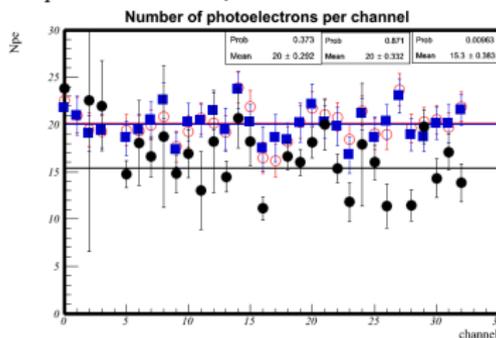


# Прототип RDCS-ФАРИЧ: результаты

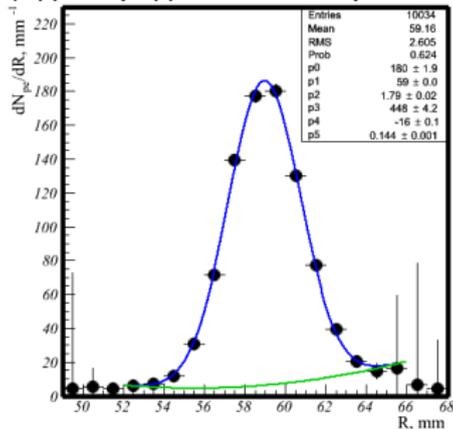
- $\sigma_r$  от номера канала



- $N_{p.e.}$  от номера канала



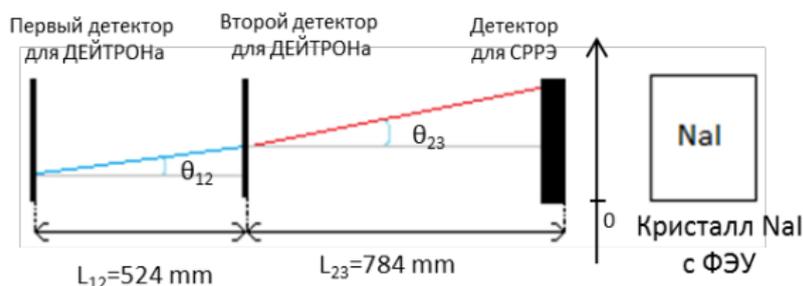
- $\sigma_r$  для градиентного аэрогеля



- Испытаны 14 образцов аэрогеля в разных положениях
- Впервые в мире измерено  $\sigma_r$  для градиентного аэрогеля ( $\sigma_r = 1.8$  мм)
- Набрано 7 миллионов событий.

## Оценка толщины детекторов на основе ГЭУ (ДЕЙТРОН)

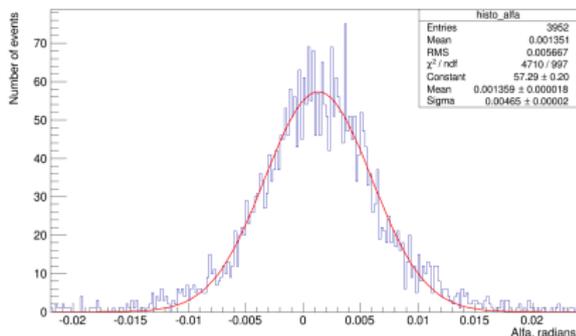
- Особенность этих детекторов в том, что они содержат очень малое количество материала – считывающая структура сделана на тонкой пленке, толщина меди на всех ГЭУ сделана минимальной 1–2 мкм
- Оценка толщины детектора  $X/X_0 \simeq 1.5 \times 10^{-3}$ , но точно неизвестна толщина меди в ГЭУ, поэтому  $X/X_0$  нужно измерить
- Измерялось распределение угла многократного рассеяния во втором детекторе



✓ Угол рассеяния  $\alpha = \theta_{23} - \theta_{12}$

## Оценка толщины детекторов на основе ГЭУ: результаты

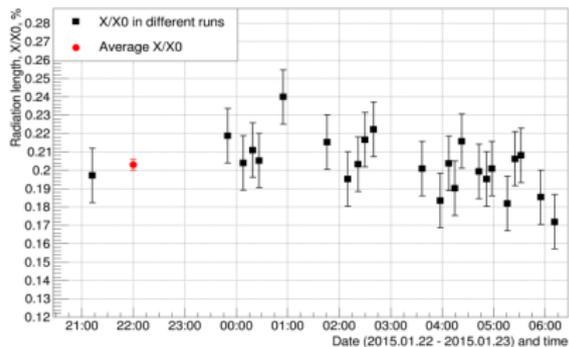
- Пример распределение угла многократного рассеяния  $\sqrt{\theta^2}$



$$f_{\alpha} \sqrt{\theta^2} = \frac{13.6}{\rho c \beta} z \sqrt{\frac{X}{X_0}} \left[ 1 + 0.038 \ln \left( \frac{X}{X_0} \right) \right]$$

- Полученные значения  $X/X_0$  в различных заходах и средняя величина  $\langle X/X_0 \rangle$

Radiation length of second thin detector,  $X/X_0$



$$\langle X/X_0 \rangle = 0.203 \pm 0.003 \% \text{ (оценка } 0.15 \% \text{)}$$

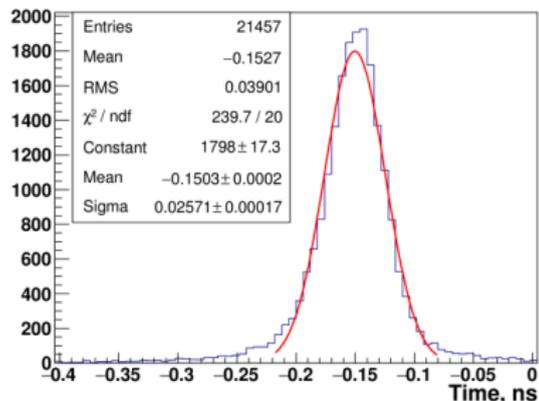


## Испытание микроканальных пластин

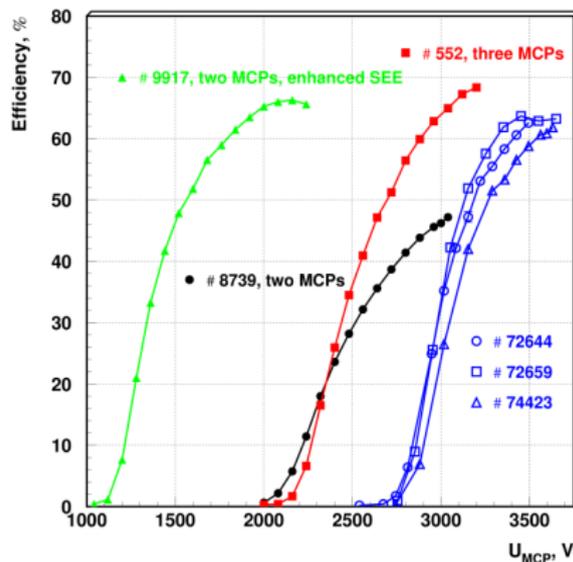
- Измерения временного разрешения и эффективности регистрации релятивистской заряженной частицы с помощью микроканальных пластин (МКП)
  - изучение возможности повышения временного разрешения торцевого электромагнитного калориметра детектора CMS с помощью применения МКП для регистрации заряженной составляющей ливня
  - увеличение временного разрешения важно для экспериментов на HL-LHC ⇔ так называемая фаза 2 после модернизации LHC в начале 2020-х годов
- Испытано 15 образцов различной конструкции, это как обычные ФЭУ с МКП, так и специально изготовленные для этой темы приборы
- В 2015 г. количество смен составило 12 (с учётом настройки), возможен набор статистики в параллель с другими экспериментами на пучке

## Испытание микроканальных пластин: результаты

- Получено временное разрешение на один электрон лучше 30 пс



- Эффективность лучших образцов близка к 70 %



### ● 2015 г:

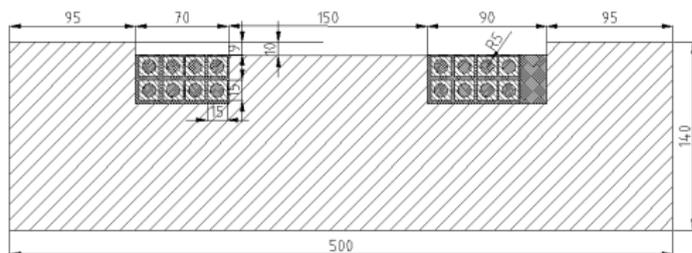
- Повторить измерение  $X/X_0$  для GEM (не измерялась энергия и эффективность тестового детектора была низкой)
- Измерить пространственное разрешение GEM (ДЕЙТРОН)
- Измерение характеристик детекторов на основе ГЭУ для выведенного пучка (будут изготовлены к концу 2015)
- Набор статистики с модернизированным прототипом PDPC–ФАРИЧ (оперативная замена образцов аэрогеля, установка зеркала)
- *Проведение тестовых заходов для выведенного пучка меченных гамма–квантов (измерение продольной неоднородности кристаллов BGO)*

### ● 2016–2017 гг.:

- Продолжение серии измерений аэрогелей с прототипом PDPC–ФАРИЧ
- Испытания фотодетекторов на основе КФЭУ MPPC и МаФЭУ H12700
- В случае если проект по увеличению временного разрешения для экспериментов на HL–LHC будет успешно развиваться, то ближайшие лет семь необходимо будет периодически проводить испытания микроканальных пластин на выведенном пучке электронов

**Backup**

# Поворотный магнит



Внутренний диаметр приваренной трубки 8 мм  
Внешний диаметр приваренной трубки 10 мм

Параметры магнита	
Длина:	1600 мм
Ширина:	500 мм
Высота:	280 мм
Вся апертура (Ш×В):	310×20 мм
Рабочая апертура (Ш×В):	150×20 мм
Максимальное поле:	15 кГс

- Калибровка магнитного поля с помощью датчика ЯМР (точность  $\pm 0.5$  Гс)

