

Проект

Развитие методики регистрации частиц в будущих экспериментах с участием ОИЯИ

Артиков А.М., Атанов Н.В., Атанова О.С., Афанасьев К.Г., Баранов В.Ю.,
Бойков А.В., Васильев И.И., Грицай К.И., Гусейнов Н.А., Давыдов Ю.И.,
Зимин И.Ю., Кисеева В.И., Крылов В.А., Кравчук Н.П., Кульчицкий Ю.А.,
Кучинский Н.А., Малышев В.Л., Плотникова Е.М., Симоненко А.В., Суслов И.А.,
Терешко П.В., Тропина А.И., Хомутов Н.В., Чохели Д.

Кузьмин Е.С., Москаленко В.Д., Рогозин В.А., Шалюгин А.Н.

Булавин М.В., Еник Т.Л., Колесников А.О., Мовчан С.А.

НТС ЛЯП
25 апреля 2024

Содержание

- Мотивация
- Опыт работы
- Планы работ
- Ресурсы

Мотивация

1. Общие сведения о проекте

1.1. Шифр темы / КИП (для продлеваемых проектов) – *шифр темы включает дату открытия, дата окончания не указывается, т. к. она определяется сроками завершения проектов в теме.*

1.2. Шифр проекта / подпроекта КИП (для продлеваемых проектов и подпроектов)

1.3. Лаборатория: Лаборатория ядерных проблем

1.4. Научное направление: Физика элементарных частиц и физика тяжелых ионов высоких энергий

1.5. Наименование проекта: Развитие методики регистрации частиц в будущих экспериментах с участием ОИЯИ

1.6. Руководитель проекта: Давыдов Ю.И.

1.7. Заместитель руководителя проекта: Кульчицкий Ю.А.

Аннотация

Рассматриваемый проект нацелен на развитие новых детекторов и новых подходов для регистрации и идентификации частиц. В рамках проекта предлагается объединить усилия в разных направлениях с целью эффективного использования человеческих и материальных ресурсов.

Проект предусматривает развитие методики создания и исследования перспективных детекторов. Будут проведены работы по разработке новых газовых детекторов и исследованию их параметров, по созданию и исследованию прототипов калориметров как с использованием органических сцинтилляторов, так и с кристаллами.

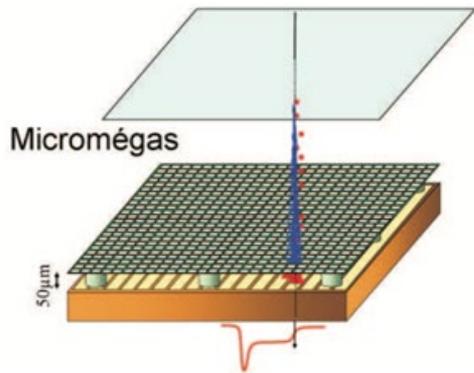
Одна из задач проекта – Монте Карло моделирование электромагнитных калориметров различной конфигурации с целью оптимизации их параметров. Эта задача представляет интерес для различных экспериментов, планируемых в ближайшие годы.

Работы, планируемые в рамках проекта, будут представлять интерес экспериментам, в которых уже участвует или планирует участвовать ОИЯИ - будущим коллайдерным экспериментам, а также экспериментам Mu2e-II, Comet и другим.

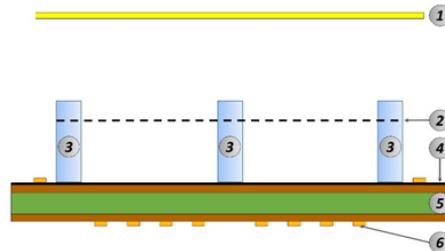
Газовые детекторы с резистивными элементами

Проводятся исследовательские работы по созданию и тестированию различных типов газовых детекторов с резистивными элементами и покрытиями на основе алмазоподобного углерода (DLC):

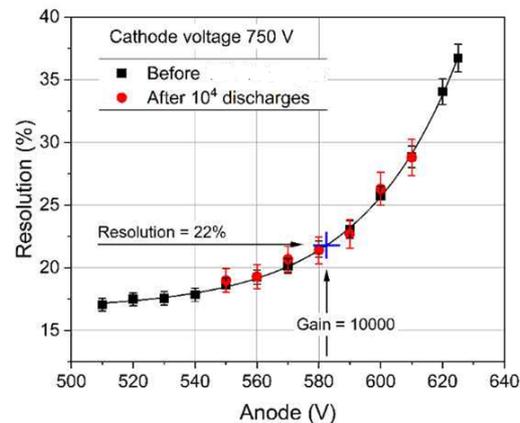
- Разработаны, изготовлены и испытаны образцы тонкостенных дрейфовых трубок (строу) с резистивным катодом и внешним стриповым считыванием
- Разработаны и испытаны прототипы микроструктурного газового детектора Micromegas и GEM колодезного типа с резистивным анодным прорывом и продемонстрирована их высокая устойчивость к пробоям



- Устойчивый к пробоям газовый детектор с усилением $\sim 10^4$
- Резистивное покрытие - алмазоподобный углерод (DLC)
- Широкий диапазон поверхностных сопротивлений (от 100кОм до ГОм на квадрат)

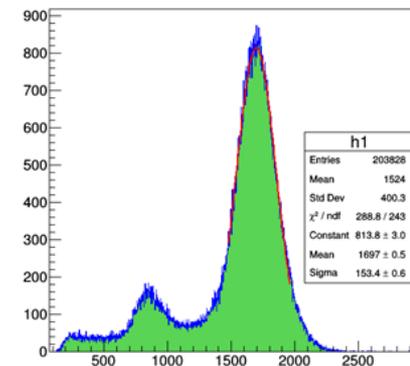


- (1) Cathode
- (2) Mesh
- (3) Supporting Pillars
- (4) Resistive DLC Layer
- (5) Anode PCB
- (6) ReadOut Strips



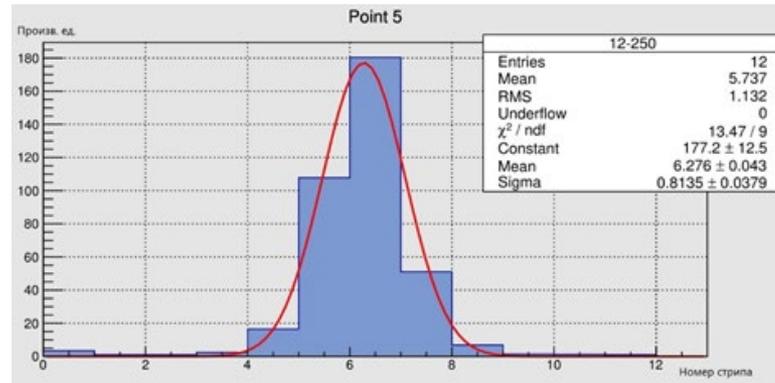
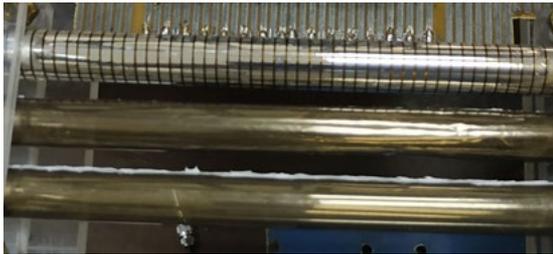
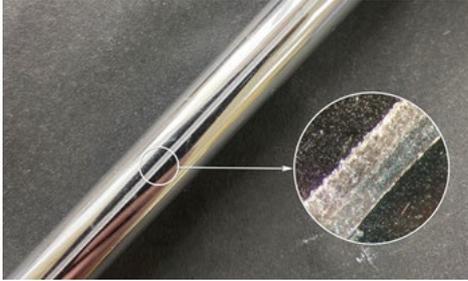
Спектр от ^{55}Fe

micro_prot1_580_750.txt



Строу детекторы с катодным считыванием

Тонкостенные строу трубки изготовлены по технологии ультразвуковой сварки из лавсановой пленки
Резистивное покрытие DLC наносилось на лавсановую пленку методом вакуумного катодно-дугового осаждения, сопротивление около 10 МоМ/квadrat
Стрипы размещены снаружи трубки. Ширина стрипов – 1.87 мм, шаг – 4.44 мм



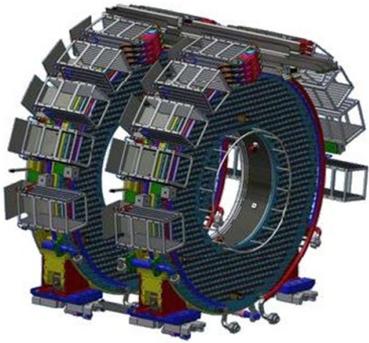
Распределение заряда по стрипам

Планируются методические работы по дальнейшему исследованию новых микроструктурных газовых детекторов с резистивными покрытиями (micromegas, thwell), разработка новых тонкостенных строу-детекторов и строу-детекторов с катодным считыванием информации

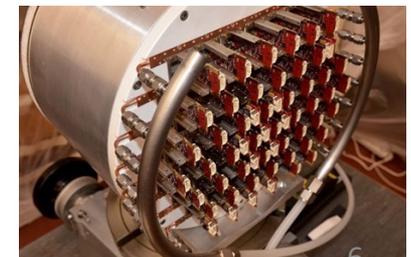
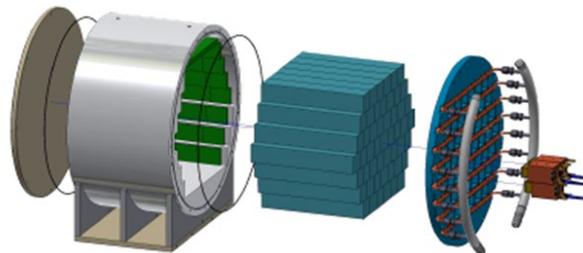
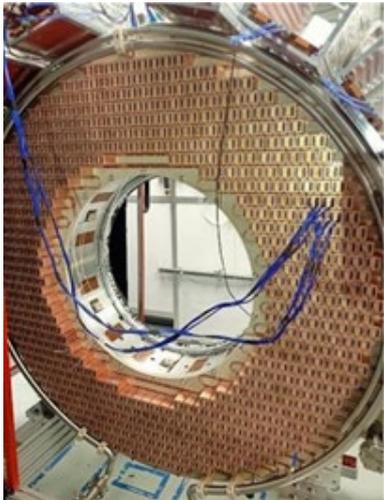
Использование таких детекторов возможно во многих экспериментах, в том числе и в будущих экспериментах на коллайдерах

Электромагнитный калориметр Mu2e

Группа ОИЯИ совместно с группами из LNF (Фраскати, Италия) и Caltech (Пасадена, США) играла ведущую роль в разработке и исследовании на этапе подготовки к финальной сборке калориметра:



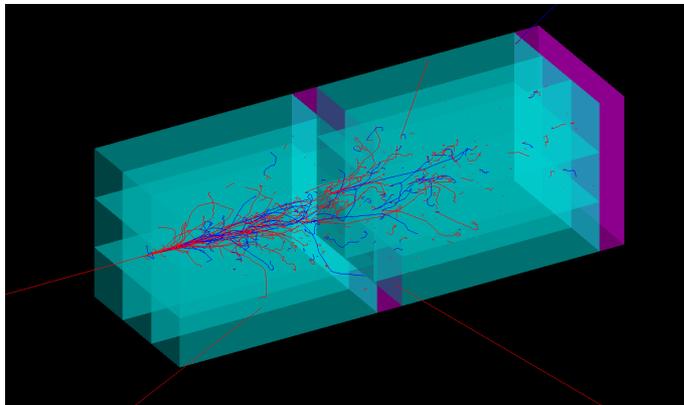
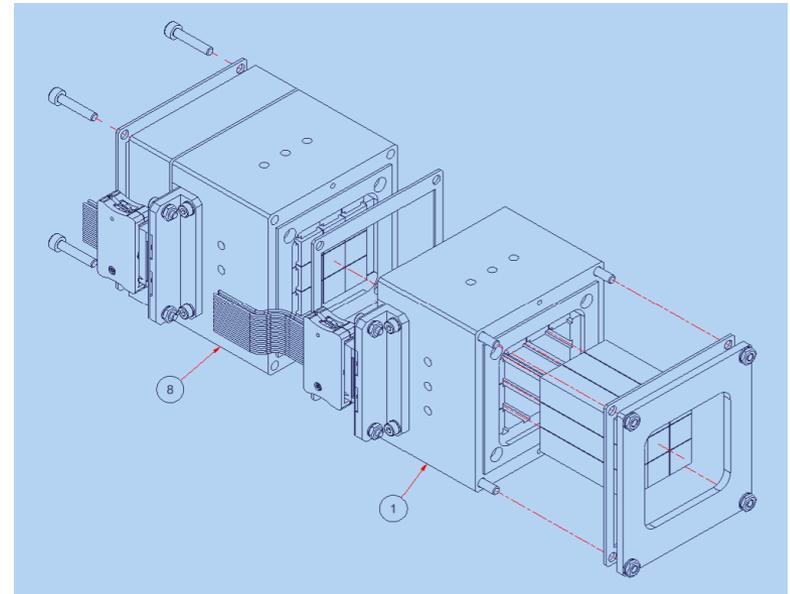
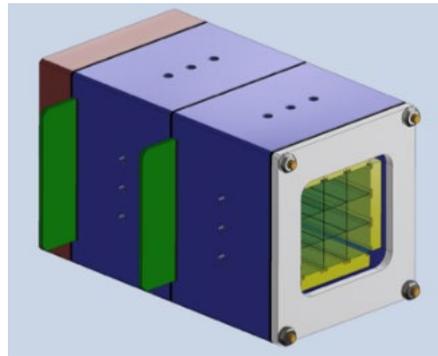
- Проведены стендовые исследования индивидуальных кристаллов LYSO, BaF₂, CsI
- Сборки из 3x3 кристаллов CsI (30x30x200 мм и 34x34x200 мм) исследованы на пучках электронов в Фраскати и в Ереване
- Сборка 5x5 из кристаллов LYSO (30x30x120 мм) была исследована на электронном пучке в Фраскати и в фотонном пучке в Майнце
- Модуль 0, содержащий 51 кристалл CsI, 102 SiPM и 102 канала фронт-энд электроники, протестирован на пучке в Фраскати
- Участие в разработке фронт-энд электроники, создание стенда и контроль качества всех каналов в Дубне



Перспективы использования кристаллов в калориметрии

Одним из направлений является создание калориметров с высокой степенью гранулярности в поперечном и продольном направлениях
Crilin (Crystal Calorimeter with Longitudinal Information) калориметр с продольной сегментацией развивается для применения в будущем мюонном коллайдере

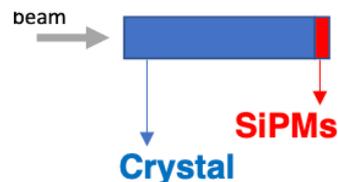
В прототипах
используются
кристаллы PbF_2 и
 PbWO_4 -UF размерами
 $1 \times 1 \times 4 \text{ см}^3$



S.Ceravolo et al. JINST 17 P09033 (2022)
C.Cantone et al. Front. Phys. 11:1223183 (2023)

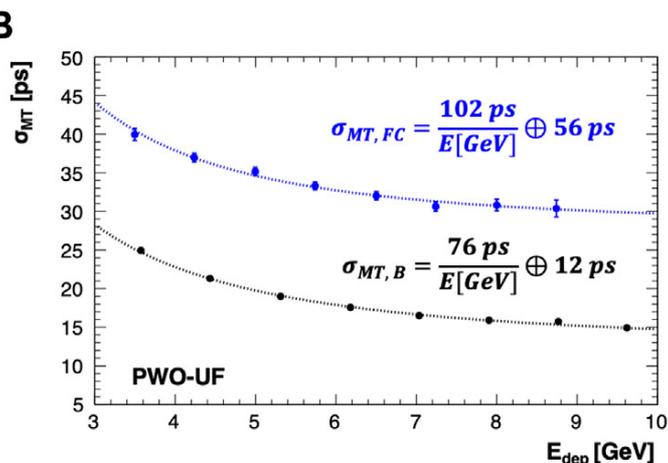
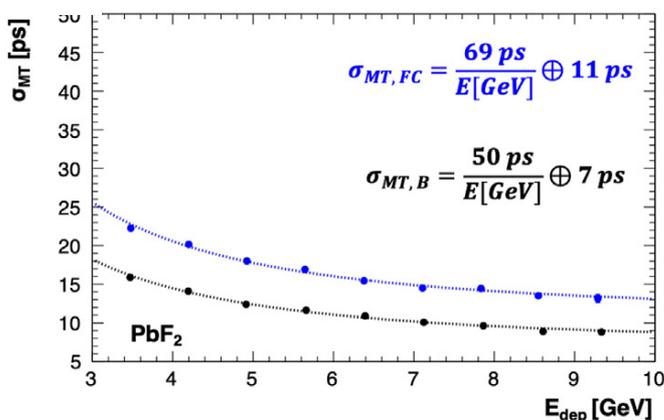
Перспективы использования кристаллов в калориметрии (2)

“Front” mode



- Исследования на пучке электронов 120 ГэВ/с
- PbF_2 а $\sigma_{\text{MT}} < 25 \text{ ps}$ при $E_{\text{dep}} > 3 \text{ GeV}$
- $\text{PbWO}_4\text{-UF}$ а $\sigma_{\text{MT}} < 45 \text{ ps}$ при $E_{\text{dep}} > 3 \text{ GeV}$

“Back” mode

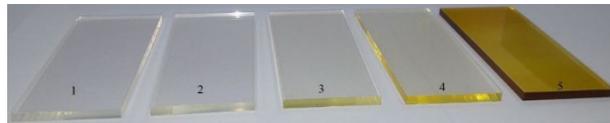
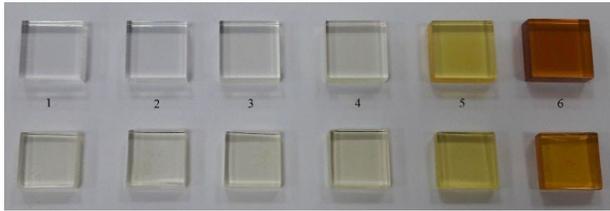


C.Cantone et al. Front. Phys. 11:1223183 (2023)

Мы планируем проведение исследования прототипов продольно сегментированных электромагнитных калориметров с использованием кристаллов LYSO и других, разработку, моделирование и изготовление схемы малошумящего радиационно-стойкого предусилителя на дискретных GaN (GaAs) элементах для SiPM

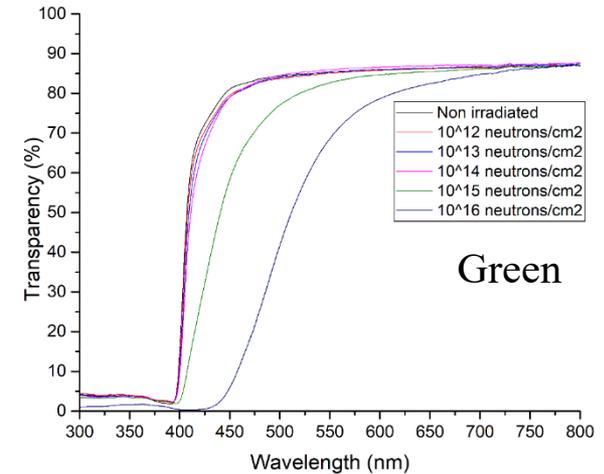
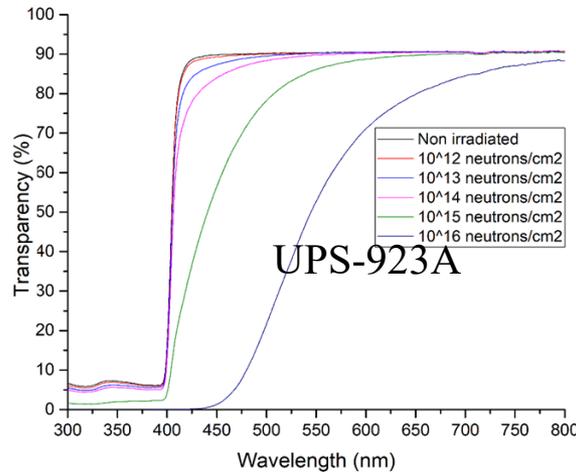
Эти исследования могут быть интересны экспериментам, планируемыми на Линак-200, будущим коллайдерным экспериментам.

Радиационные исследования сцинтилляторов

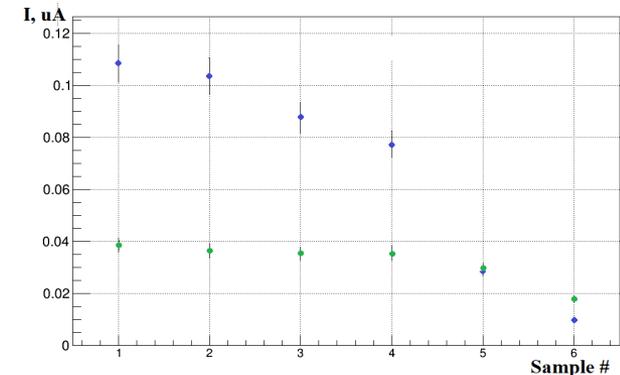
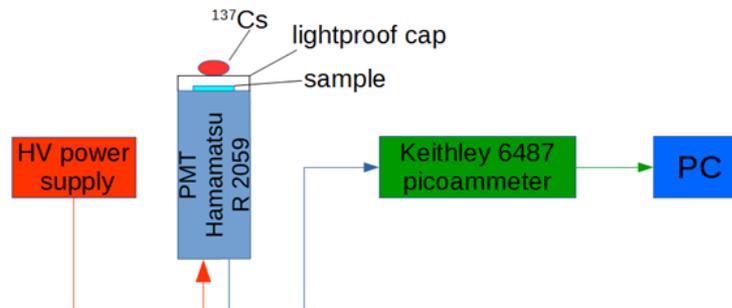


- Проведены исследования радиационной стойкости неорганических сцинтилляторов
- Образцы сцинтилляторов облучались нейтронами на ИБР-2М

UPS-923A: polystyrene, 2% PTP, 0.03% POPOP
 Green: polystyrene, single fluor dopant 3HF (3-hydroxyflavone)

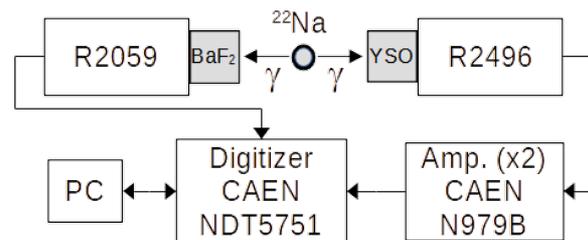


Sample #	Fluence, n/cm ²
1	Non-irradiated
2	~10 ¹²
3	~10 ¹³
4	~10 ¹⁴
5	~10 ¹⁵
6	~10 ¹⁶



Радиационные исследования кристаллов BaF₂

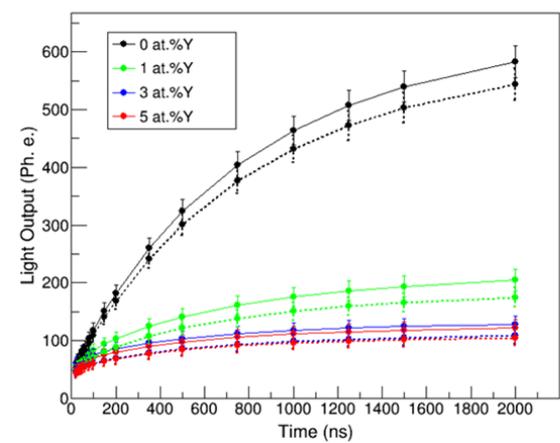
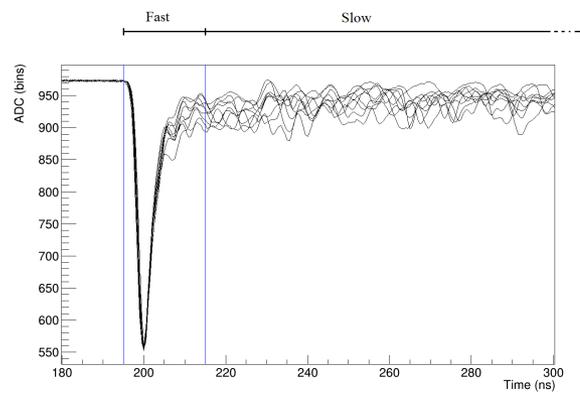
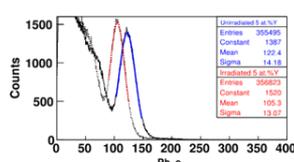
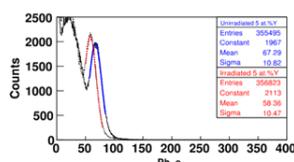
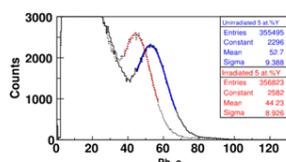
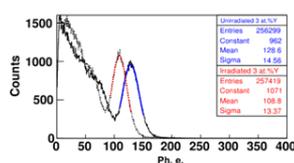
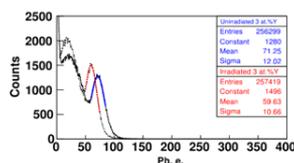
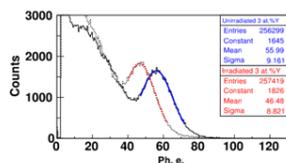
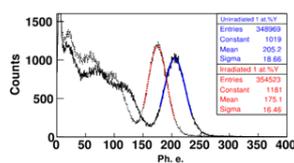
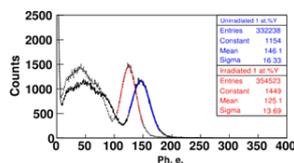
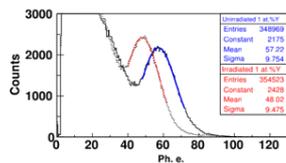
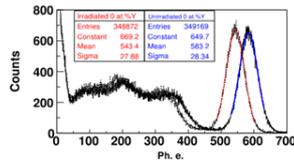
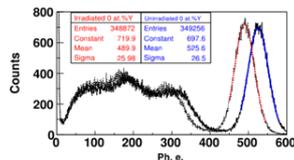
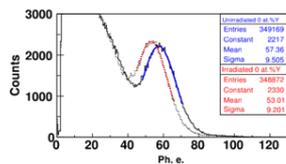
Кристаллы (1x1x1 см³, SICCAS) BaF₂ чистый и легированные иттрием (1 at.%Y, 3at.%Y and 5at.%Y) облучались на ИБР-2М



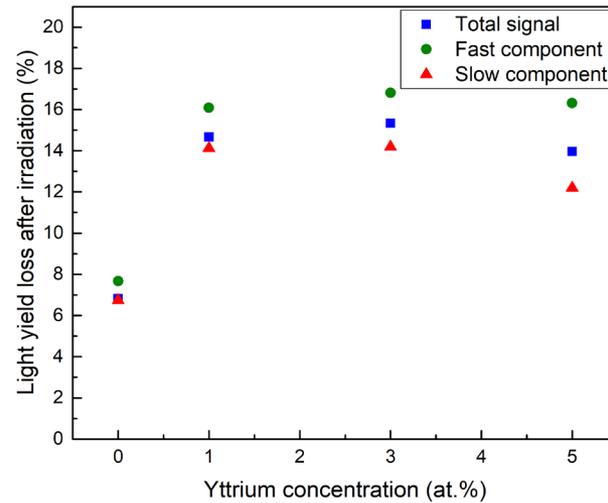
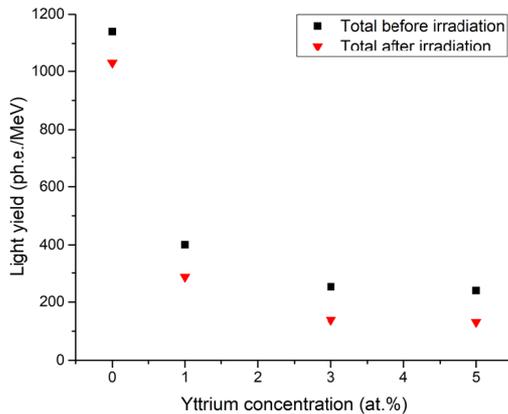
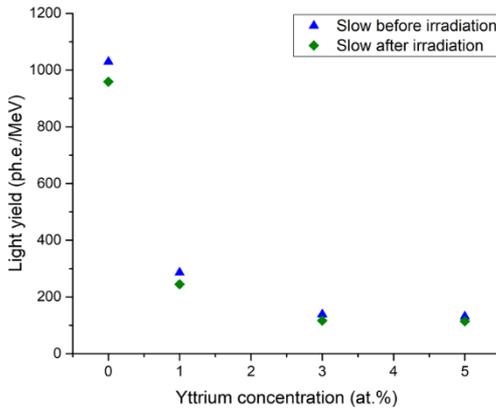
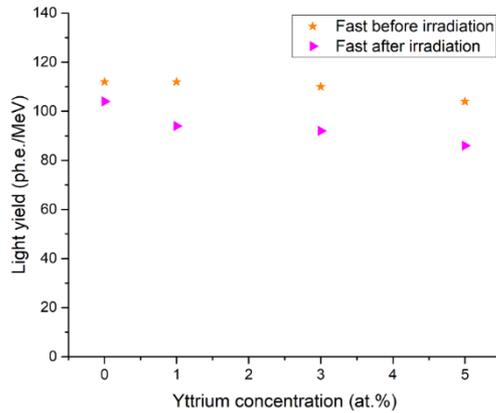
быстр.

медл.

полный



Радиационные исследования кристаллов BaF_2 (2)



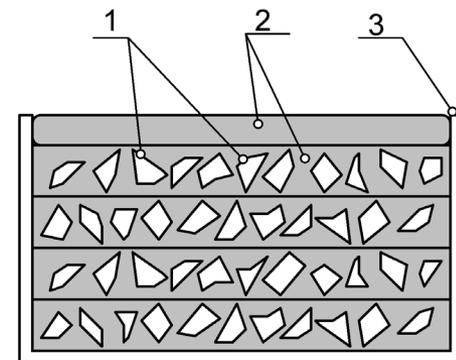
- После облучения потеря световыхода наименьшая у чистого BaF_2
- Потеря световыхода у образцов, легированных иттрием, почти в 2 раза выше, чем у чистого BaF_2
- Во всех легированных иттрием образцах после облучения потери световыхода быстрой компоненты на 2-3% выше, чем у медленной. Это требует дальнейших исследований.

Мы планируем продолжение радиационных исследований кристаллов BaF_2 как чистых, так и легированных иттрием, а также кристаллов LYSO. Облучение образцов - на ускорителе Линак-200 и гамма источниками

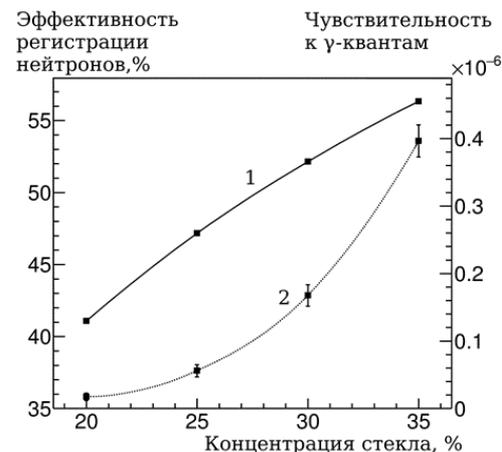
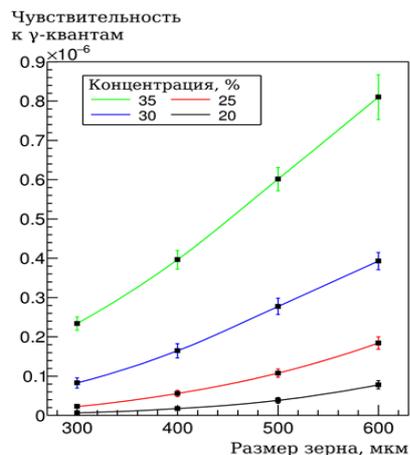
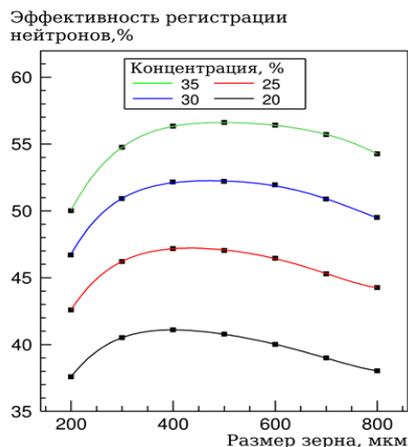
Гетерогенные сцинтилляторы на основе литиевого стекла

Целью данных исследований являлась разработка гетерогенного сцинтиллятора для регистрации тепловых нейтронов на основе литиевого стекла с выбором оптимальной структуры, позволяющей минимизировать гамма-чувствительность детектора при сохранении высокой эффективности к нейтронам.

- Фрагменты гетерогенного сцинтиллятора имели форму кубиков из литиевого стекла NE 912.
- Расчеты проводились для кубиков с размерами граней от 200 до 800 мкм с шагом 100 мкм.
- Рассмотрены концентрации литиевого стекла от 20 до 35% по отношению к общему объему гетерогенного сцинтиллятора.
- Оптические компаунды – силикон, акрил, эпоксидная смола



Моделирование отклика гетерогенных сцинтилляторов:

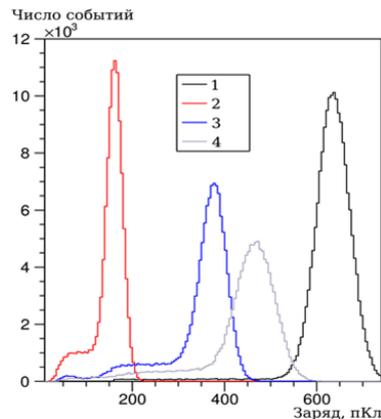


Гетерогенные сцинтилляторы: результаты измерений

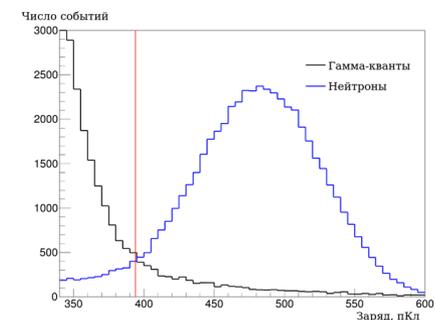
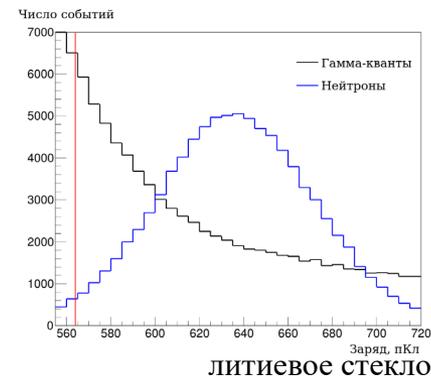
- Эффективность регистрации нейтронов гетерогенными сцинтилляторами зависит от концентрации стекла и составляет около 50-55%
- Гамма чувствительность гетерогенных сцинтилляторов подавлена примерно на 2 порядка по сравнению с литиевым стеклом
- Композитная структура является лучшим методом для нейтрон/гамма-дискриминации по сравнению с методами электронной селекции сигналов

гамма-чувствительность литиевого стекла $(1,42 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$

	Эпоксидная смола	Силиконовый компаунд	Акриловая смола
25%	$(9,25 \pm 0,13) \cdot 10^{-6}$	$(1,35 \pm 0,11) \cdot 10^{-6}$	$(0,53 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$
30%	$(13,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$	$(2,65 \pm 0,08) \cdot 10^{-6}$	$(6,04 \pm 0,08) \cdot 10^{-6}$
35%	$(22,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$	$(4,90 \pm 0,13) \cdot 10^{-6}$	$(13,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$



1 - стекло; 2 - акрил; 3 - эпоксидная смола; 4 - силикон; 30%



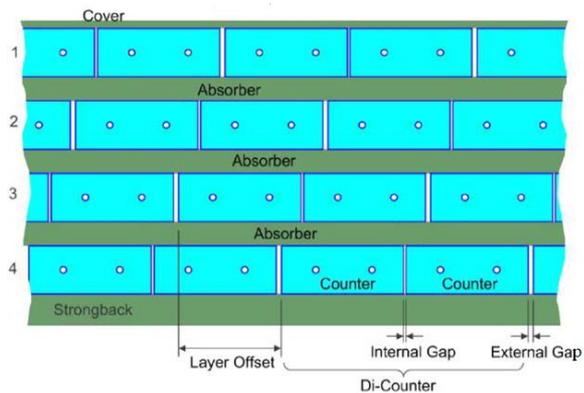
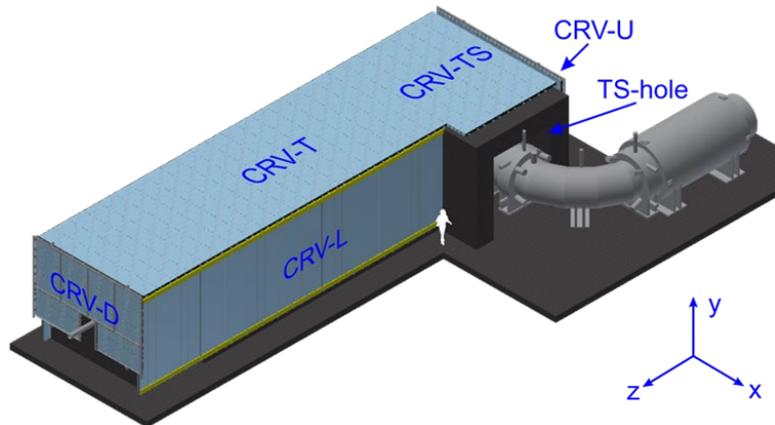
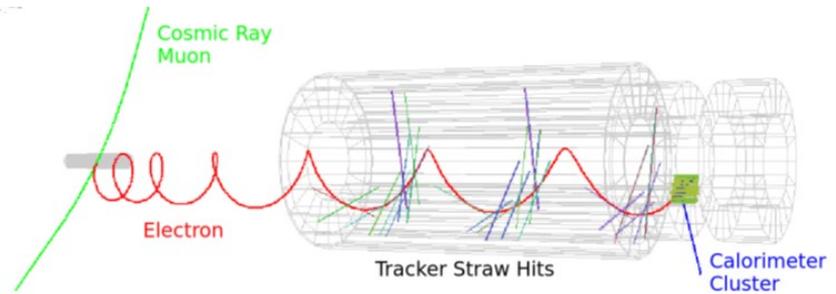
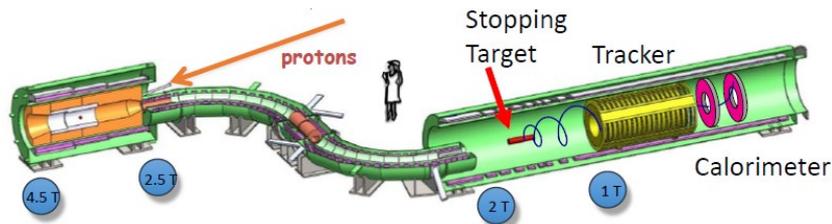
гетерогенный, 35%, силикон

В дальнейших исследованиях при создании композитов будут использоваться гранулированные нейтронные сцинтилляторы производства РФ, созданные на основе кристаллов сульфида цинка, фтористого лития и оксида бора.

Цель работ – создание новых сцинтилляционных материалов с высокой конверсионной эффективностью нейтронов, низкой гамма чувствительностью и высокой прозрачностью.

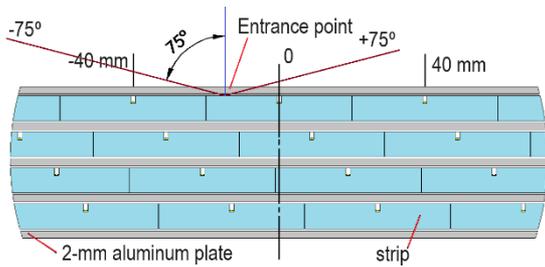
Система CRV эксперимента Mu2e

Группы ОИЯИ и Университета Вирджинии (Шарлотсвилле) играли ведущую роль в разработке CRV и подготовке к их массовому производству



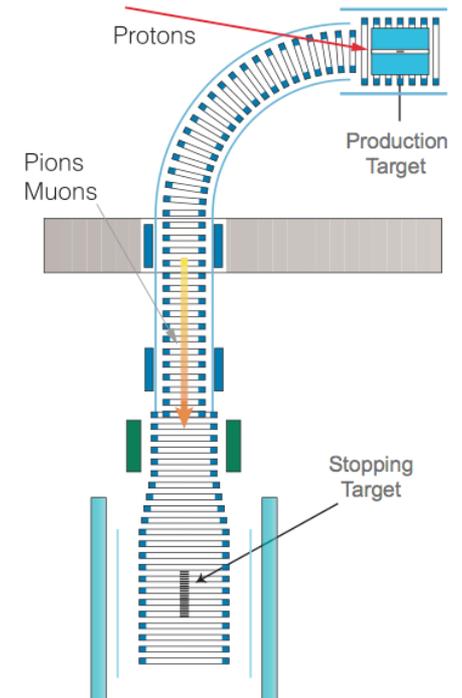
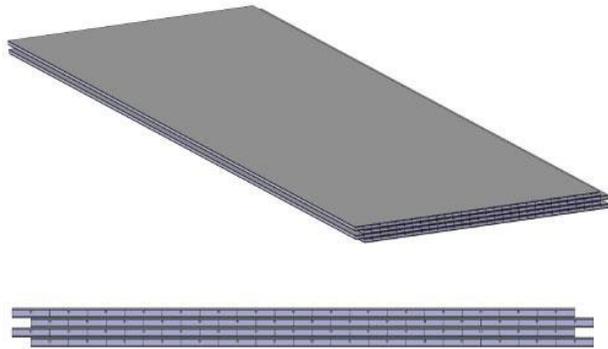
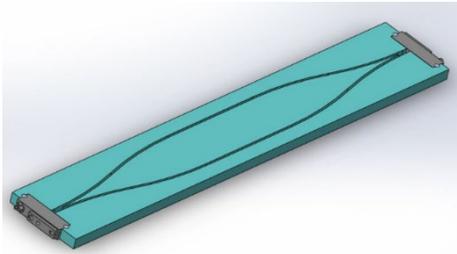
- Моделирование работы системы CRV
- Разработка конструкции CRV с учетом требования высокой эффективности регистрации, необходимости перекрытия большой площади с минимальными зазорами, высоким уровнем радиационной нагрузки
- Изготовление прототипов и их исследования на пучке в Фермилаб
- Разработка технологии создания модулей CRV на всех этапах от сборки до тестирования, создание стенда для тестирования CRV на космике
- Построение модулей CRV в 2018-19 годах

Система CRV для эксперимента Comet

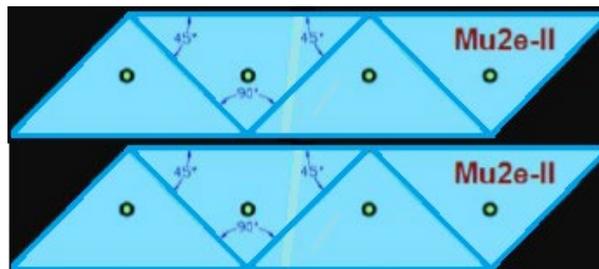
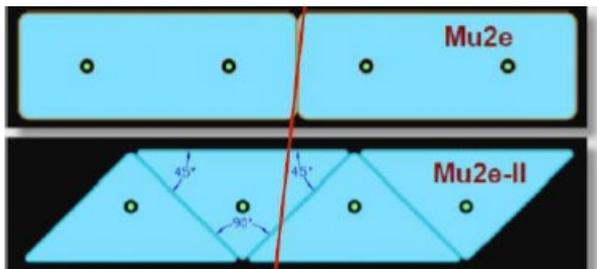
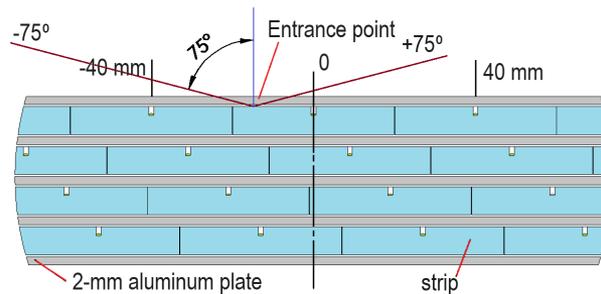
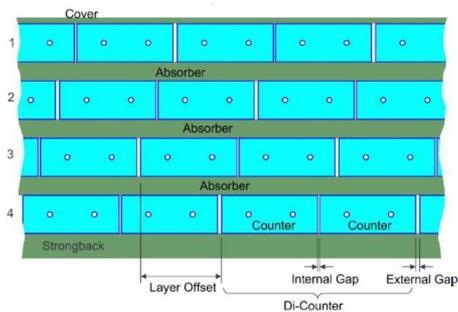
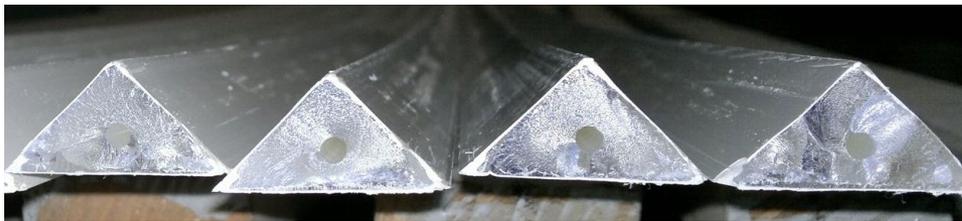


Проведено моделирование и изготовлен первый модуль системы CRV для эксперимента Comet

- Стрипы $7 \times 40\text{ mm}^2$, WLS волокна – в канавках
- 15 стрипов в слое
- 4 слоя в модуле



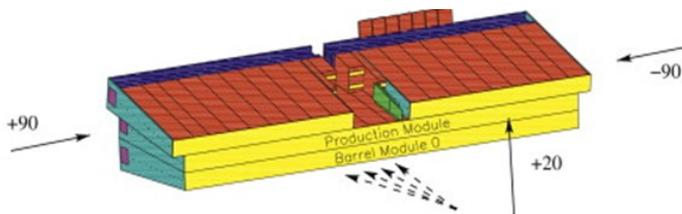
Прототип CRV со сцинтилляторами треугольного сечения



Планируется проведение R&D со стрипами с треугольным сечением:

- Моделирование эффективности модуля, состоящего из 4-х слоев треугольных стрипов, сравнение с модулями, составленными из сцинтилляционных стрипов прямоугольного сечения
- Создание прототипа из 4-х слоев и исследование его свойств

Исследование профилей адронных струй

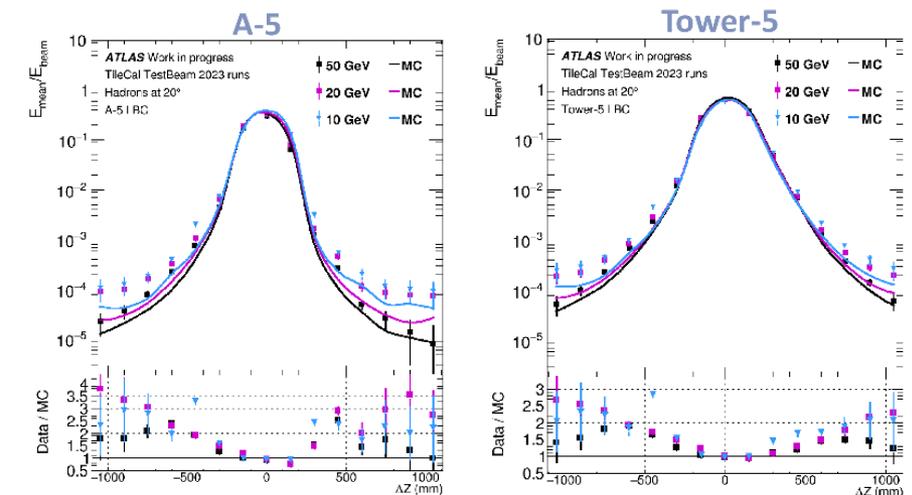
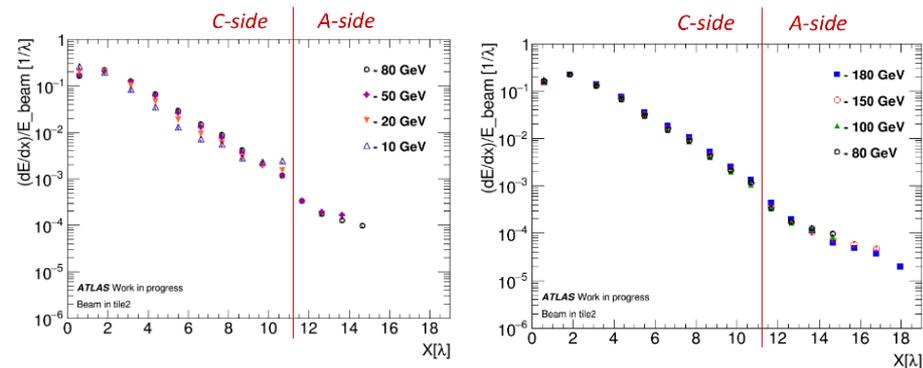


Исследование проводилось с помощью адронного калориметра ECAL и TileCal

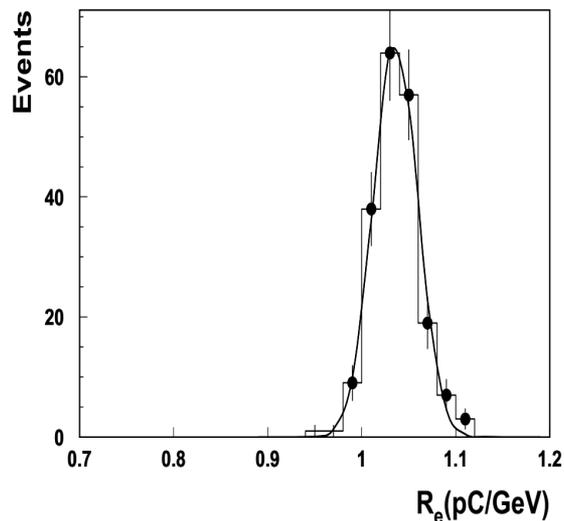
Целью исследования было изучение профиля продольного и поперечной формы развития адронного ливня с использованием пучков адронов, падающих под углом 90 градусов и 20 градусов, сравнение с моделями Geant4 и их валидация

Продольный профиль адронного ливня

Поперечный профиль адронного ливня при 20 град.

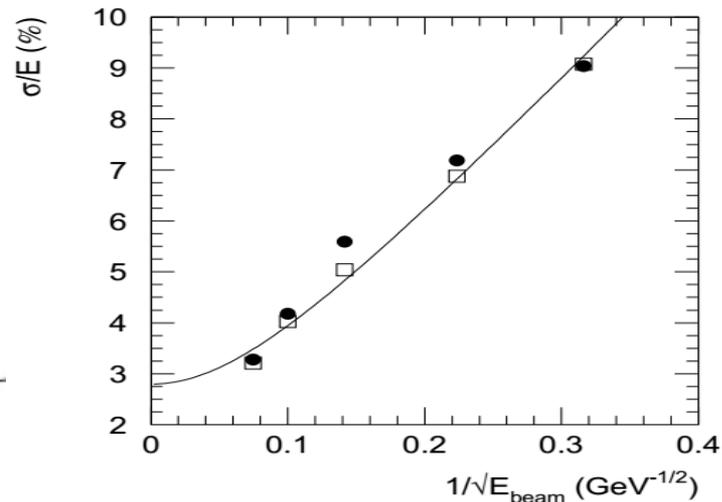
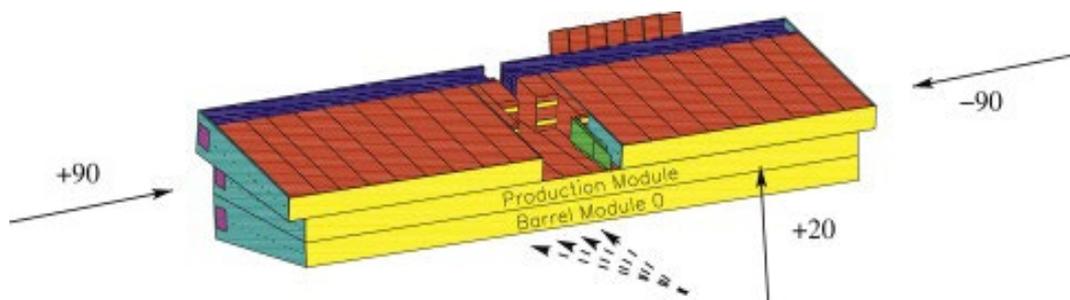


Электромагнитная калибровка ATLAS TileCal



Электромагнитные калибровочные константы для электронов при 20°

- С целью установления электромагнитной шкалы и понимания работы TileCal калориметра по отношению к электронам модули были облучены электронными пучками с энергиями от 10 до 180 ГэВ.
- Полученные константы электромагнитной калибровки были включены базу данных калибровок TileCal

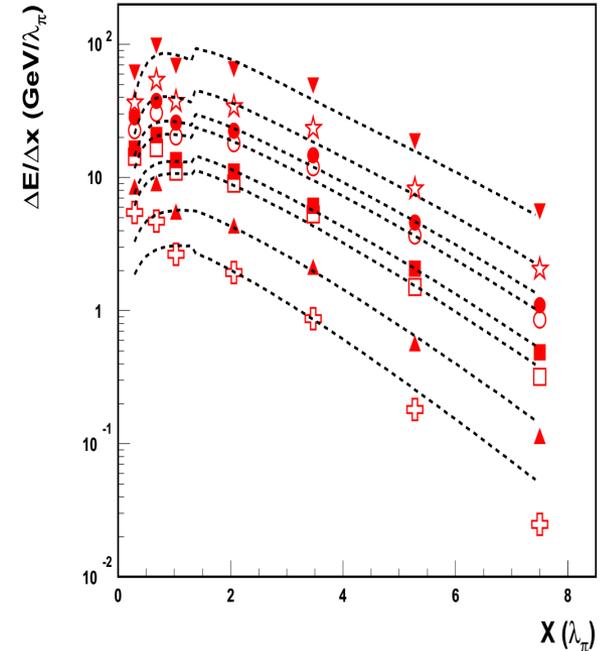


Энергетическое разрешение электронов при 20°

Описание развития адронного ливня

- Исследованы поперечные и продольные профили адронных ливней, зарегистрированных прототипом тайл-калориметра и комбинированного калориметра ATLAS.
- С помощью сканирования пионного пучка вблизи энергии 100 ГэВ получена подробная картина поведения поперечного ливня.
- Восстановлены основные плотности радиальной энергии для четырех сегментов по глубине и для всего калориметра.
- Разработана трехмерная параметризация адронного ливня.

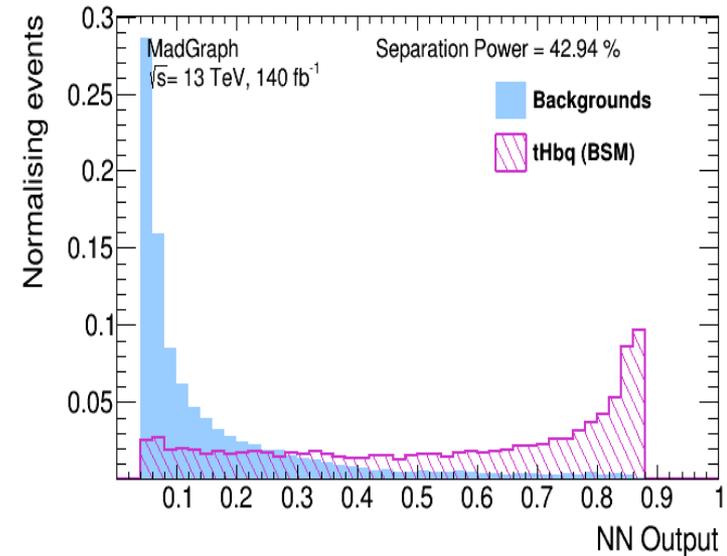
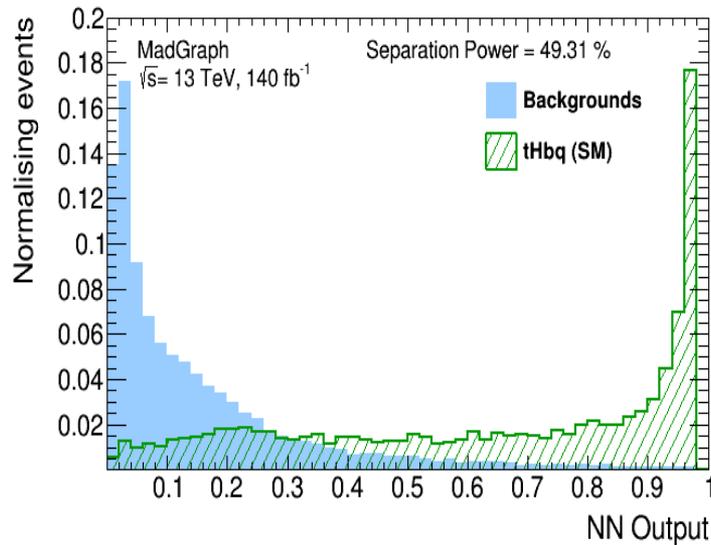
$$\frac{dE(x)}{dx} = N \left\{ \frac{wX_o}{a} \left(\frac{x}{X_o} \right)^a e^{-b\frac{x}{X_o}} {}_1F_1 \left(1, a+1, \left(b - \frac{X_o}{\lambda_I} \right) \frac{x}{X_o} \right) + \frac{(1-w)\lambda_I}{a} \left(\frac{x}{\lambda_I} \right)^a e^{-d\frac{x}{\lambda_I}} {}_1F_1 \left(1, a+1, -(1-d)\frac{x}{\lambda_I} \right) \right\}$$



Продольные профили адронных ливней для комбинированного калориметра ATLAS с энергией пионов от 20 до 300 ГэВ

Использование нейронных сетей

- Эволюционный алгоритм был применён для оптимизации гиперпараметров искусственной нейронной сети, предназначенной для отделения сигнала $pp \rightarrow t\bar{H}$ от фоновых событий.
- Оптимизация проводилась отдельно для сигнала Стандартной модели и сигнала модели BSM



Separation power

$$S = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=0}^{nbins} \frac{(s_i - b_i)^2}{s_i + b_i} \right) \times 100$$

Данный метод планируется использовать для разделения необходимых процессов в ускорительных экспериментах: ATLAS, CEPS,

Что будет сделано в рамках проекта

- 1) Разработаны и исследованы микроструктурные газовые детекторы типа Micromegas и колодезного типа (WEM) с резистивным анодным покрытием. Разработаны новые тонкостенные строу-детекторы а также строу-детекторы с катодным считыванием информации.
- 2) Промоделированы, созданы и протестированы прототипы секционированного электромагнитного калориметра с использованием кристаллов LYSO и других типов.
- 3) Получены новые данные по радиационной стойкости кристаллов, используемых в электромагнитных калориметрах. Разработаны схемы, промоделированы и изготовлены малошумящие радиационно-стойкие предусилители на дискретных GaN (GaAs) элементах для SiPM и исследованы на радиационную стойкость. Эти исследования представляют интерес для экспериментов, выполняемых при высоких интенсивностях, включая эксперименты на HL-LHC, Mu2e-II и другие.
- 4) Проведено моделирование, созданы и исследованы прототипы мюонной системы на основе сцинтилляторов треугольного сечения и сравнены их параметры с параметрами аналогичных систем со сцинтилляторами прямоугольного сечения. Работы представляют интерес в первую очередь для Mu2e-II и Comet, а также других экспериментов, использующих мюонные вето системы.
- 5) Проведена оптимизация и создана система «сцинтиллятор + SiPM + фронт энд электроника» с максимально возможным быстродействием и минимальным временным разрешением.

Что будет сделано в рамках проекта (2)

- 6) Разработаны новые гетерогенные детекторы для регистрации тепловых нейтронов с подавленной на 2-3 порядка чувствительностью к гамма квантам.
- 7) Разработан дизайн конструкций, созданы прототипы модулей электромагнитных калориметров, проведены их исследования на космике и в пучках ускорителей.
- 8) Проведено исследование результатов тестовых испытаний в сравнении с предсказаниями Монте Карло моделей для прототипов и полномасштабных модулей электромагнитных калориметров.
- 9) Исследованы свойства электромагнитных и адронных калориметров в зависимости от энергии и угла падения частиц на прототипы калориметров.
- 10) Исследованы свойства полномасштабных электромагнитных и адронных калориметров в зависимости от энергии и псевдобыстроты частиц при полном моделировании протон-протонных, протон-дейтронных, дейтрон-дейтронных протон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий с целью разработки и реализации эффективных методов реконструкции отклика калориметра на частицы и струи.
- 11) Проведен анализ моделированных данных с целью определения величин мертвой материи в конструкции электромагнитных и адронных калориметров и их влияния на энергетическое разрешение и линейность отклика калориметров для экспериментов на будущих ускорителях.
- 12) Разработано программно-математическое обеспечение для Монте-Карло моделирования и анализа экспериментальных данных для прототипов и полномасштабных модулей электромагнитных калориметров для планируемых экспериментов на будущих ускорителях.

Необходимые ресурсы

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам					
			1 год	2 год	3 год	4 год	5 год	
	Международное сотрудничество (МНТС)	100	20	20	20	20	20	
	Материалы	300	80	70	60	45	45	
	Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)							
	Пуско-наладочные работы							
	Услуги научно-исследовательских организаций							
	Приобретение программного обеспечения							
	Проектирование/строительство							
	Сервисные расходы (планируются в случае прямой принадлежности к проекту)							
Необходимые ресурсы	Нормо-час	Ресурсы						
		- сумма FTE,						
		- ускорителя/установки,	750	150	150	200	150	100
		- реактора,.....	1500	300	300	300	300	300
Источники финансирования	Бюджетные средства	Бюджет ОИЯИ (статьи бюджета)	400	100	90	80	65	65
	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования						

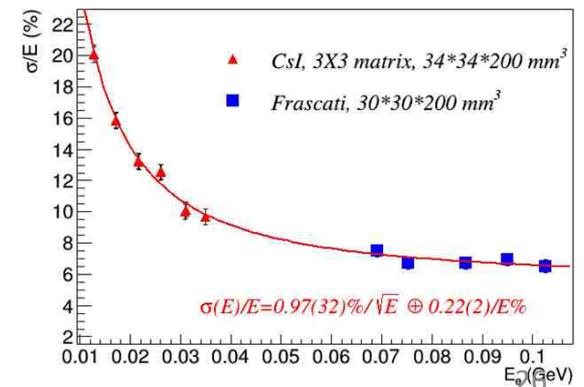
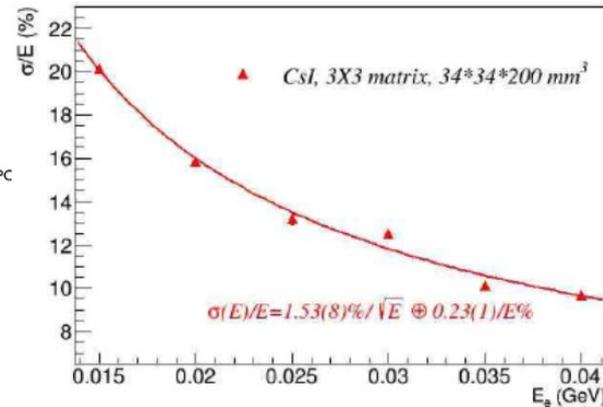
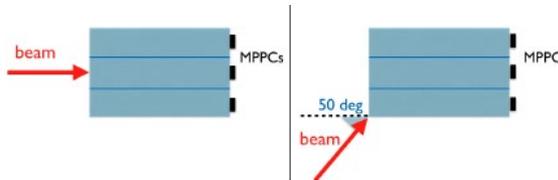
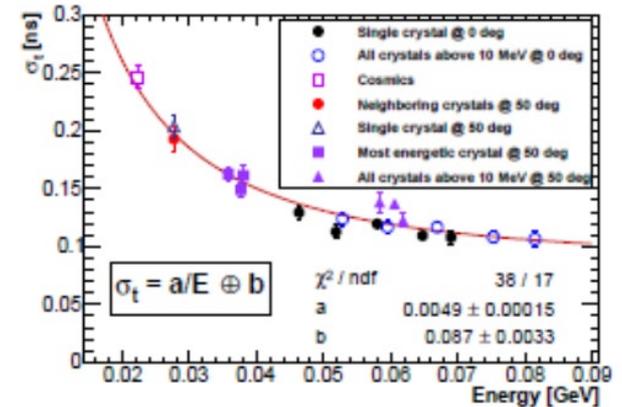
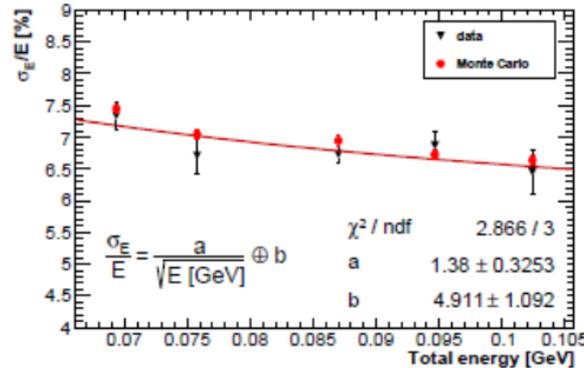
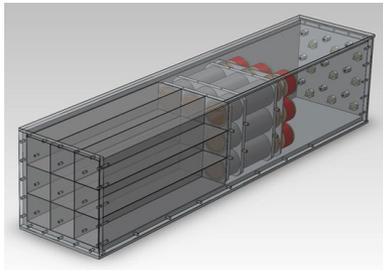
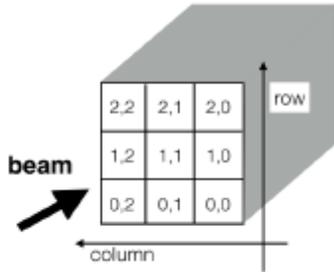
Кадровые ресурсы

№№ п/п	Категория работников	Ф.И.О	Подра зделен ие	Должность	Сумма FTE
1.	научные работники	Давыдов Ю.И.	ЛЯП	начальник отдела	0.7
2.		Артиков А.М.	ЛЯП	начальник сектора	0.8
3.		Атанов Н.В.	ЛЯП	научный сотрудник	0.7
4.		Атанова О.С.	ЛЯП	младший научный сотрудник	0.7
5.		Афанасьев К.Г.	ЛЯП	научный сотрудник	0.8
6.		Баранов В.Ю.	ЛЯП	научный сотрудник	0.8
7.		Бойков А.В.	ЛЯП	младший научный сотрудник	0.5
8.		Васильев И.И.	ЛЯП	научный сотрудник	0.7
9.		Гришай К.И.	ЛЯП	научный сотрудник	0.3
10.		Гусейнов Н.А.	ЛЯП	старший научный сотрудник	0.7
11.		Зимин И.Ю.	ЛЯП	научный сотрудник	0.8
12.		Кисеева В.И.	ЛЯП	младший научный сотрудник	0.7
13.		Крылов В.А.	ЛЯП	научный сотрудник	0.3
14.		Кравчук Н.П.	ЛЯП	старший научный сотрудник	0.8
15.		Кульчицкий Ю.А.	ЛЯП	начальник сектора	0.5
16.		Кучинский Н.А.	ЛЯП	старший научный сотрудник	0.7
17.		Мальшев В.Л.	ЛЯП	научный сотрудник	0.7
18.		Плотникова Е.М.	ЛЯП	научный сотрудник	0.5
19.		Симоненко А.В.	ЛЯП	старший научный сотрудник	0.8
20.		Суслов И.А.	ЛЯП	старший научный сотрудник	0.5
21.		Терешко П.В.	ЛЯП	научный сотрудник	0.5
22.		Тропина А.И.	ЛЯП	младший научный сотрудник	0.3
23.		Хомутов Н.В.	ЛЯП	научный сотрудник	0.6
24.		Чохели Д.	ЛЯП	старший научный сотрудник	0.4
25.		Булавин М.В.	ЛНФ	начальник сектора	0.1
26.		Еник Т.Л.	ЛФВЭ	начальник группы	0.1
27.		Колесников А.О.	ЛФВЭ	начальник службы	0.1
28.		Мовчан С.А.	ЛФВЭ	начальник сектора	0.1
29.	инженеры	Кузьмин Е.С.	ЛЯП	старший инженер	1.0
30.		Москаленко В.Д.	ЛЯП	инженер	1.0
31.		Рогозин В.А.	ЛЯП	инженер	1.0
32.		Шалюгин А.Н.	ЛЯП	старший инженер	0.8
	специалисты				
	рабочие				
	Итого:				19

Дополнение

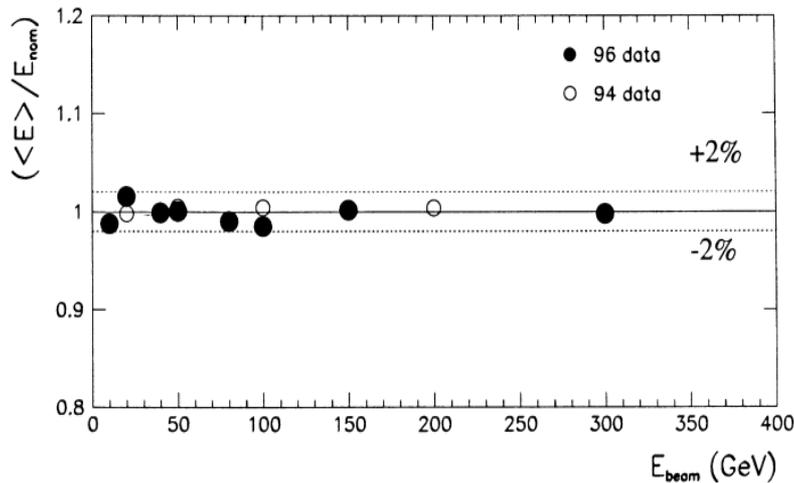
Исследование матрицы 3x3 в LNF, Frascati и в Ереване

- Матрица составлена из 9 кристаллов CsI (ИСМА) размерами 30x30x200 мм
- Съём сигналов – с помощью 12x12 мм MPPC Hamamatsu /ФЭУ-85
- Сигналы оцифровывались блоком V1720 (CAEN) / ADC 2249W
- Матрица облучалась электронами в диапазоне 15-75 МэВ и 80-120 МэВ
- Пучок падал на матрицу нормально или под углом 50 градусов

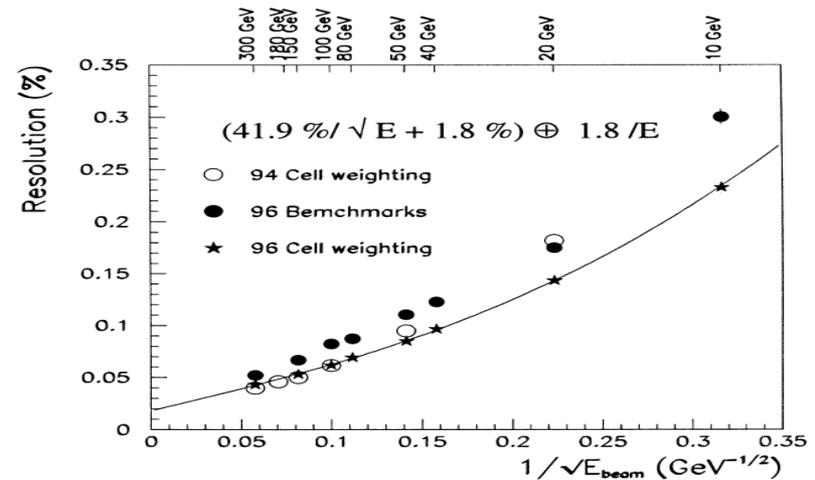


Совместные исследования калориметров АТЛАС

На SPS проведены совместные испытания прототипов электромагнитного жидкоаргонового калориметра и адронного сцинтилляционного калориметра. Получено энергетическое разрешение пионов в диапазоне энергий от 10 до 300 ГэВ при угле падения около 12° . В процессе исследований были изучены профили и утечка ливней, угловое разрешение адронных ливней.



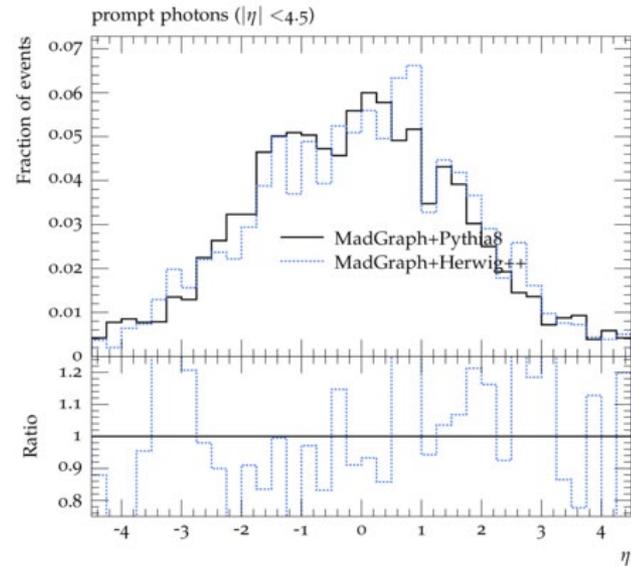
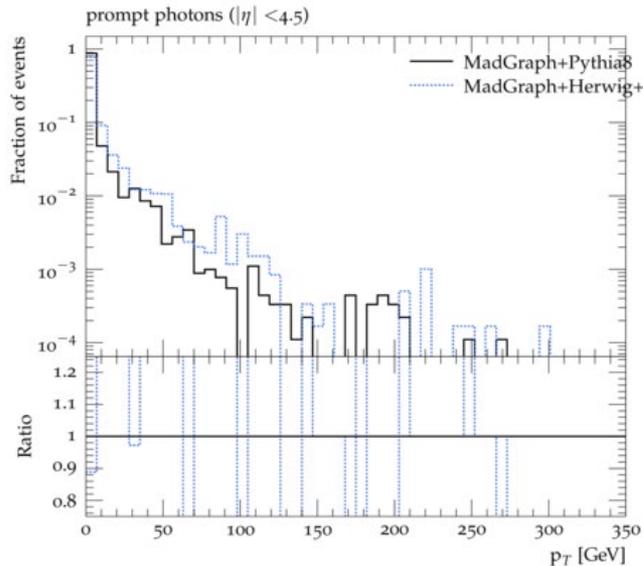
Линейность отклика как функция энергии



Энергетическое разрешение пионов получено методом взвешивания ячеек. Результаты сравниваются с полученными при использовании эталонного метода.

Применение Монте-Карло методов моделирования

Работа с различными Монте-Карло генераторами (Pythia8, MadGraph, Herwig) и соответствующими программными пакетами (Delvis, Rivet, Geant4,) позволяет пройти весь путь от моделирования событий взаимодействий до реконструирование объектов в детекторе



Планируется имплементация пакета генератора в программное окружение (Athena, Merlin, SPDRoot) ускорительных экспериментов (ATLAS, CEPС, STCF) и дальнейшее применение моделирования процессов с учётом специфики установки

Методы исследований свойств калориметров

- Прецизионный беспараметрический метод измерения энергии в калориметрическом комплексе, позволивший достичь рекордной энергетической линейности
- Метод измерения нескомпенсированности электромагнитного калориметра, позволивший измерить величину нескомпенсированности для жидко-аргонного электромагнитного калориметра АТЛАС
- Метод трехмерной параметризации адронного ливня, позволивший измерить радиальную плотность энергии адронного ливня в зависимости от его продольной координаты
- Метод описания продольной плотности адронного ливня в комбинированном калориметре
- Экспериментальное исследование линейности, энергетического разрешения, нескомпенсированности и утечки адронного ливня за пределы адронного и комбинированного калориметров в пучках электронов и пионов
- Разработан метод и на его основе проведена электромагнитная калибровка модулей адронного калориметра в пучках электронов
- Разработана модификация метода локальной адронной калибровки комбинированных калориметров, позволившая получить рекордное энергетическое разрешение и линейность для созданного калориметрического комплекса
- Разработан и применен при анализе экспериментальных данных нейросетевой метод расчета энергетических потерь в мертвом веществе калориметрического комплекса, что позволило достичь проектного разрешения калориметрического комплекса.

Что планируется выполнить в рамках проекта

- Разработка программно-математического обеспечения для Монте-Карло моделирования и анализа экспериментальных данных для прототипов и полномасштабных модулей электромагнитных калориметров
- Проведение анализа результатов тестовых испытаний в сравнении с предсказаниями Монте-Карло моделей для прототипов и полномасштабных модулей электромагнитных калориметров
- Разработка конструкции, создание и исследование прототипов модулей электромагнитных калориметров на космике и пучках ускорителей
- Моделирование, создание и исследование прототипов сегментированных электромагнитных калориметров с использованием неорганических сцинтилляторов, фронт-энд электроники для них
- Исследование радиационной стойкости фронт-энд электроники, сцинтилляторов, включая кристаллы BaF2 чистые и легированные иттрием, LYSO и другие, используемые в электромагнитных калориметрах
- Проведение моделирования, создание и исследование прототипа мюонной системы на основе сцинтилляторов треугольного сечения и сравнение их параметров с аналогичными системами со сцинтилляторами прямоугольного сечения
- Разработка новых тонкостенных строу-детекторов и строу-детекторов с катодным считыванием информации, микроструктурного газового детектора Micromegas и GEM колодезного типа с резистивным анодным покрытием
- Разработка, создание и исследование новых гетерогенных детекторов на основе кристаллов сульфида цинка, фтористого лития и оксида бора для регистрации тепловых нейтронов с высокой конверсионной эффективностью нейтронов, низкой гамма чувствительностью и высокой прозрачностью