

КРАТКАЯ АННОТАЦИЯ ПРОЕКТА  
НОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И  
ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Тема 04-2-1126-2015/2023

Аннотация

Успех научного эксперимента ключевым образом зависит от используемой аппаратуры. Прогресс в понимании физической картины мира, который произошел за последнее столетие, в большой степени был обеспечен технологическими достижениями, позволившими создавать все более совершенные экспериментальные установки и улучшать методы обработки полученных данных. Научно-методические исследования по созданию новых типов детекторов являются необходимым условием дальнейшего развития экспериментальной физики атомного ядра и элементарных частиц.

Полупроводниковые детекторы давно зарекомендовали себя как регистрирующие элементы, которые позволяют создавать калориметрические и координатные подсистемы физических установок с хорошим быстродействием, высоким пространственным и энергетическим разрешением.

Развитие полупроводниковых детекторов во многом определяется технологическими достижениями промышленности. Для нужд физики высоких энергий непосредственно в лабораториях практически нигде самостоятельно не выращиваются полупроводниковые кристаллы, не производятся микросхемы считывания и т.д., поскольку все это оборудование гораздо проще, дешевле и качественнее изготавливается на предприятиях электронной индустрии. В большинстве центров физики высоких энергий основной акцент перенесен с собственно производства на формулировку требований к детекторам, проектирование и иногда сборку опытных или мелкосерийных образцов из промышленно изготовленных элементов. Важнейшее место в цикле разработки новых детекторов занимает изучение их характеристик, которое обеспечивает обратную связь с изготовителем чувствительных элементов.

# "NEW SEMICONDUCTOR DETECTORS FOR FUNDAMENTAL AND APPLIED RESEARCH."

Topic 04-2-1126-2015/2023

## Summary

The success of the scientific experiment depends in a key way on the equipment used. Progress in understanding the physical picture of the world that has taken place over the past century has been largely driven by technological advances that have led to the development of increasingly advanced experimental facilities and improved processing methods. Scientific and methodological studies to create new types of detectors are a necessary condition for further development of experimental physics of atomic nucleus and elementary particles.

Semiconductor detectors have long established themselves as recording elements that allow the creation of calorimetric and coordinate subsystems of physical installations with good speed, high spatial and energy resolution.

The development of semiconductor detectors is largely determined by technological advances in industry. For the needs of high-energy physics, silicon crystals are not grown directly in laboratories almost anywhere on their own, read chips are not produced, etc., as all this equipment is much simpler, cheaper and better manufactured in enterprises of the electronic industry. In most high energy physics centers, the main focus is shifted from the production itself to the formulation of detector requirements, the design and sometimes the assembly of experimental or small-scale samples from industrially manufactured elements. A critical part of the development cycle of new detectors is the study of their characteristics, which provides feedback to the sensor manufacturer.

The development of semiconductor detectors is largely determined by technological advances in industry. For the needs of high-energy physics, directly in laboratories practically no semiconductor crystals are grown independently, reading ASIC are not produced, etc., since all this equipment is much simpler, cheaper, and better manufactured at electronic enterprises. In most centers of high-energy physics, the main emphasis has been shifted from production itself to the formulation of requirements for detectors, the design and sometimes assembly of prototypes or small-scale samples from industrially manufactured elements. The most important place in the development cycle of new detectors is occupied by the study of their characteristics, which provides feedback to the manufacturer of sensitive elements.

НОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И  
ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Продление проекта на период 2021-2023 гг.

Novel Semiconductor Detectors for Fundamental and Applied Research

Project extension for the period 2021-2023

Шифр темы: 04-2-1126-2015/2023

ОИЯИ ЛЯП: А.Л.Гонгадзе, М.И.Госткин, А.С.Жемчугов, В.Г.Кручонок,  
Д.А.Кожевников, Н.К.Кузнецов, А.В.Лапкин, А.Лейва, Д.Д.Расторгуев, В.А.Рожков,  
Т.О.Руденко, П.И.Смолянский, Е.А.Черепанова, С.Шакур, Г.А.Шелков.

ОИЯИ ЛЯР: А.Т.Исатов, С.В. Митрофанов, Ю.Г.Тетерев.

ОИЯИ ЛНФ: А.Ахмедов, Ю.Н.Копач, С.Ю.Тележников.

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА - Г.А.Шелков.

ЗАМЕСТИТЕЛЬ РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА - В.А.Рожков

ДАТА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЕКТА В НОО \_\_\_\_\_

ДАТА НТС ЛАБОРАТОРИИ 21/04/2020. НОМЕР ДОКУМЕНТА \_\_\_\_\_

ДАТА НАЧАЛА ПРОЕКТА - 2015 год

Дата представления физического обоснования на семинаре ЛЯП: 14/04/2020

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

**Новые полупроводниковые детекторы для фундаментальных и  
прикладных исследований**

Продление проекта на период 2021-2023 гг.

**Novel Semiconductor Detectors for Fundamental and Applied Research**

Project extension for the period 2021-2023

Г.А.Шелков

Шифр темы: 04-2-1126-2015/2023

УТВЕРЖДЕН ДИРЕКТОРОМ ОИЯИ	ПОДПИСЬ	ДАТА
СОГЛАСОВАНО		
ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ОИЯИ	ПОДПИСЬ	ДАТА
ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ	ПОДПИСЬ	ДАТА
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР	ПОДПИСЬ	ДАТА
НАЧАЛЬНИК НОО	ПОДПИСЬ	ДАТА
ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ	ПОДПИСЬ	ДАТА
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ	ПОДПИСЬ	ДАТА
РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА	ПОДПИСЬ	ДАТА
ЗАМ. РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА	ПОДПИСЬ	ДАТА
ОДОБРЕН		
ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ	ПОДПИСЬ	ДАТА

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления  
проекта: Новые полупроводниковые детекторы для фундаментальных и  
прикладных исследований**

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость узлов установки. Потребности в ресурсах (тыс.\$)	Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов			
			1 год	2 год	3 год	
Основные узлы и оборудование	Микросхемы ТРХ4, создание прототипов детекторов, НИР и НИОКР	180	60	60	60	
	Развитие стенда Калан2 и вычислительная инфраструктура	110	40	40	30	
	Микрофокусная рентгеновская трубка, и оборудование для микрофокусного КТ	200	120	40	40	
	Измерительное оборудование	40	10	20	10	
Мате- риалы	Сенсоры из полупроводников	60	20	20	20	
Необхо- димые ресурсы	Нормо- час	Ресурсы ОП ЛЯП	10	700	700	700
	Тыс. \$	Участие в test- beams, рабочих совещаниях и конференциях	90	30	30	30
Источники финансирования	Бюджетные средства	Затраты из бюджета, в том числе инвалютные средства	680	280	210	190
	Внебюджетные средства	Вклады коллаборантов. Вклады спонсоров. Средства по договорам. Другие источники финансирования и т.				

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

Г.А.Шелков

## Оглавление.

Краткая аннотация проекта.....	5
Введение.....	6
Результаты выполнения проекта и планы.....	7
Стенд для измерения эффективности сбора заряде.....	7
Стенд «Зондовая станция».....	8
Стенд для работы с рентгеновскими трубками.....	8
Система измерения фоновой обстановки в шахте установки АТЛАС.....	9
Исследования с микротомографом MARS.....	10
Сотрудничество с Medipix в создании микросхемы Timerix-4.....	11
Список публикаций и патентов авторов за 2018 – 2020 годы.....	13
Защита диссертаций и дипломов магистров .....	14
Планы на 2021-2023 годы.....	15
Список участников проекта.....	16
Краткий ССВУ – анализ.....	16
Требуемые ресурсы .....	17

## Краткая аннотация проекта.

Успех научного эксперимента ключевым образом зависит от используемой аппаратуры. Прогресс в понимании физической картины мира, который произошел за последнее столетие, в большой степени был обеспечен технологическими достижениями, позволившими создавать все более совершенные экспериментальные установки и улучшать методы обработки полученных данных. Научно-методические исследования по созданию новых типов детекторов являются необходимым условием дальнейшего развития экспериментальной как физики атомного ядра и элементарных частиц, так и возможных прикладных проектов.

Полупроводниковые приборы в наше время находят все большее применение при решении как фундаментальных проблем, так и в производстве аппаратуры, использующейся в технике и медицине.

Рассматриваемый проект ставит своей целью развитие данного направления. За время выполнения проекта с 2015 года в ЛЯП ОИЯИ была создана современная база для исследования параметров полупроводниковых материалов и детекторов на их основе. За 2017-2020 гг в получен ряд интересных результатов: а) при исследовании радиационной стойкости полупроводниковых сенсорных материалов; б) при разработке и исследованию компактных электромагнитных калориметров для будущих коллайдеров в рамках коллаборации FCAL; в) создана и успешно работает система регистрации и контроля радиационной обстановки в шахте установки АТЛАС в ЦЕРН; г) завершается разработка и получены первые образцы уникальной микросхемы Timerix4 в составе международной коллаборации Medipix. Это дает право авторам из ОИЯИ вести собственные разработки современных детекторов и систем, детектирующих рентгеновское изображения. Результаты зафиксированы в 7 публикациях, двух патентах, двух кандидатских диссертациях молодых сотрудников и двух дипломах магистров.

Основные задачи проекта в 2021-2023гг:

1. Продолжение совместно с группой ТГУ исследований по созданию и испытанию на пучках частиц ОИЯИ новых радиационно стойких полупроводниковых материалов.
2. Участие в создании и испытании полномасштабного прототипа модуля FCAL включая электронику считывания.
3. Разработка и создание действующих прототипов пиксельных детекторов на базе чипа Timerix4.
4. Завершение работ по созданию прототипа «головного» КТ и работы по созданию энергочувствительного микро-томографа с пространственным разрешением лучше 10 микрон.
5. Совместно со специалистами Факультета биологической и медицинской физики МФТИ создание группы для поведения совместных медико-биологических исследований с использованием микротомографа ОИЯИ MARS.

## Введение.

Цель проекта – комплексное исследование свойств полупроводников с точки зрения использования их в приборах регистрации частиц и гамма-излучения и создание новых вариантов полупроводниковых детекторов и устройств с их использованием как для нужд физики частиц, так и для прикладных целей.

Развитие полупроводниковых детекторов во многом определяется технологическими достижениями промышленности. Для нужд физики высоких энергий непосредственно в лабораториях практически нигде самостоятельно не выращиваются полупроводниковые кристаллы, не производятся микросхемы считывания и т.д., поскольку все это оборудование гораздо проще, дешевле и качественнее изготавливается на предприятиях электронной индустрии. В большинстве центров физики высоких энергий основной акцент перенесен с собственно производства на формулировку требований к детекторам, проектирование и иногда сборку опытных или мелкосерийных образцов из промышленно изготовленных элементов. Важнейшее место в цикле разработки новых детекторов занимает изучение их характеристик, которое обеспечивает обратную связь с изготовителем чувствительных элементов.

Физика частиц, в своем развитии, неуклонно движется в направлении исследований, требующих все более интенсивных пучков частиц. Поэтому первые две задачи проекта – продолжение поиска, совместно со специалистами в создании новых радиационно стойких модификаций полупроводников материалов и создание на их основе детекторов (работы в составе научно методической коллаборации FCAL) весьма актуальны.

В настоящее время идёт бурное развитие и использование систем цифровой диагностики. На смену фотопленке и другим носителям изображения все больше приходят цифровые системы. Успех в создании систем цифровой диагностики в значительной степени определяется прогрессом в развитии твердотельных координатных детекторов (сенсоров) прямого преобразования энергии частиц в электрический сигнал, пригодных для регистрации рентгеновских лучей и гамма-излучения.

Рентгеновская компьютерная томография сейчас применяется во многих областях науки о материалах, науки о жизни, науке о Земле, исследовании исторического наследия и других, поэтому большие усилия прикладываются для развития методов и оборудования для подобных исследований.

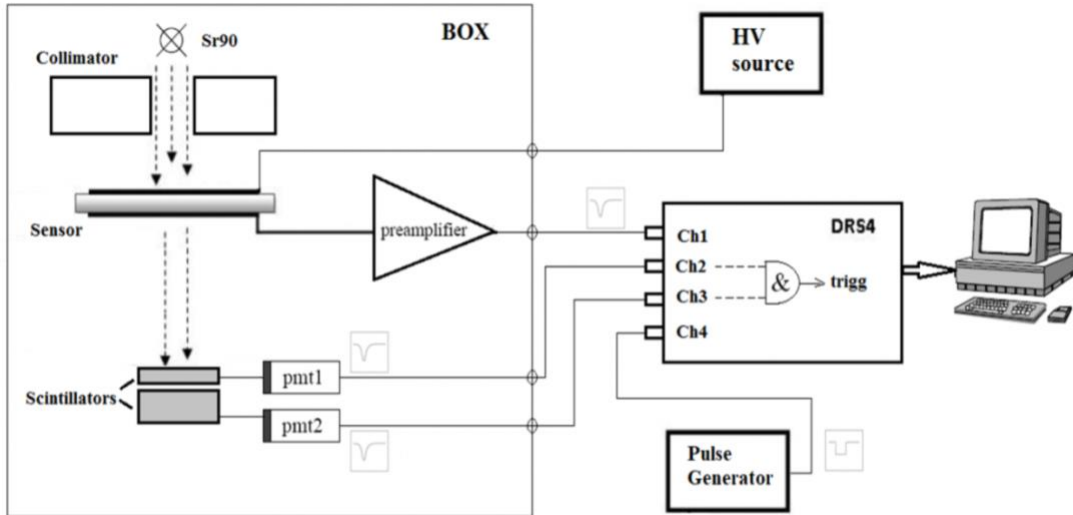
Следующей амбициозной задачей проекта становится переход от создания небольших методических стендов к действующим лабораторным прототипам полномасштабных компьютерных энерго-чувствительных томографов с использованием современных пиксельных микросхем линейки Medipix/Timepix.



## Результаты выполнения проекта и планы.

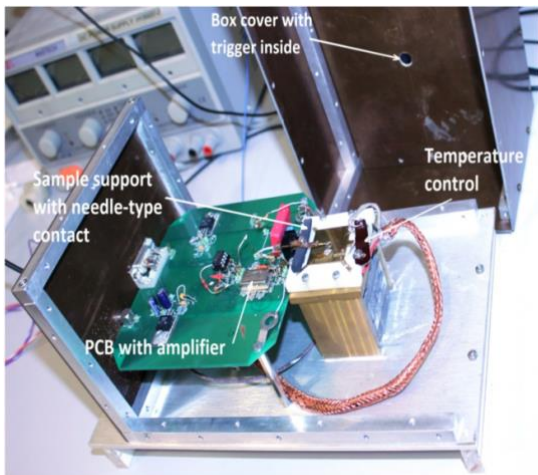
За время исполнения проекта в ЛЯП ОИЯИ было создано несколько стандов, позволяющих проводить детальные исследования как свойств собственно полупроводников и полупроводниковых детекторов, так и приборов с использованием этих детекторов.

Стенд для измерения эффективности сбора заряде (Charge Collection Efficiency-CCE) в материале сенсора детектора.

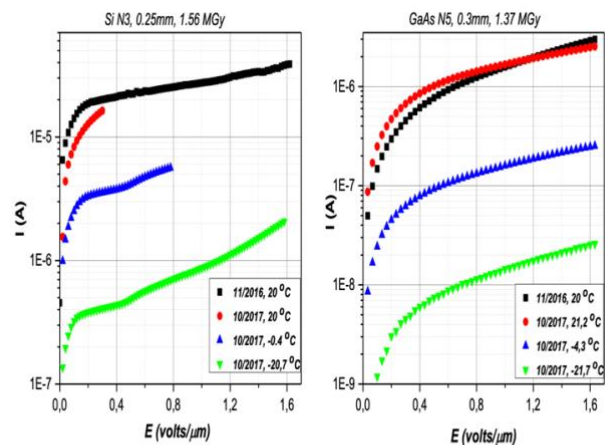


*Block diagram of CCE measurement setup.*

На данном стенде можно измерять CCE и вольт-амперные (I-V) характеристики полупроводника в температурном диапазоне  $\pm 50$ °C

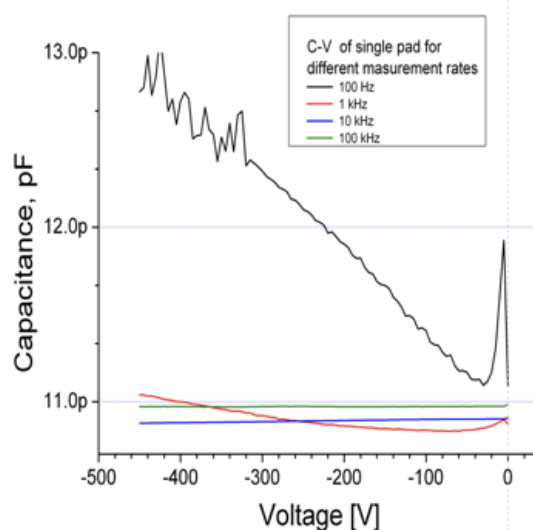
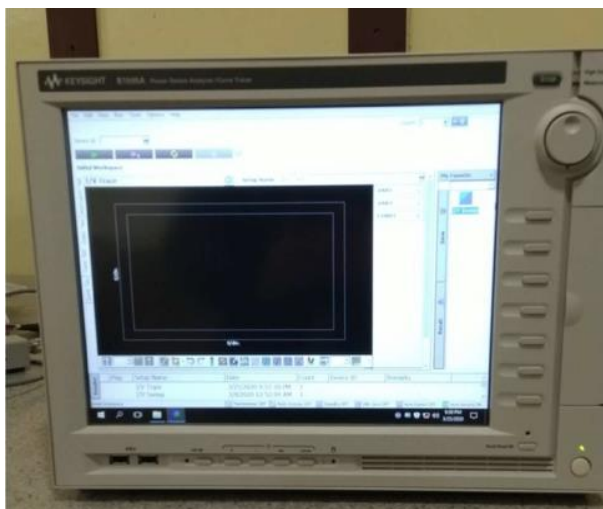


*A photography of the setup for CCE and I-V measurements.*



*I-V characteristics measured at different sensors temperatures: Si\_N3 (type1) after irradiation dose of 1.56 MGy (left) and GaAs:Cr N5 after irradiation dose of 1.37 MGy (right).*

Стенд «Зондовая станция» оснащен многофункциональным измерителем характериографом Keysight B1505A, позволяющим производить высокоточные измерения вольт-амперных и вольт-емкостных характеристик полупроводников до напряжения 3 кВ.



Стенд для работы с рентгеновскими трубками.

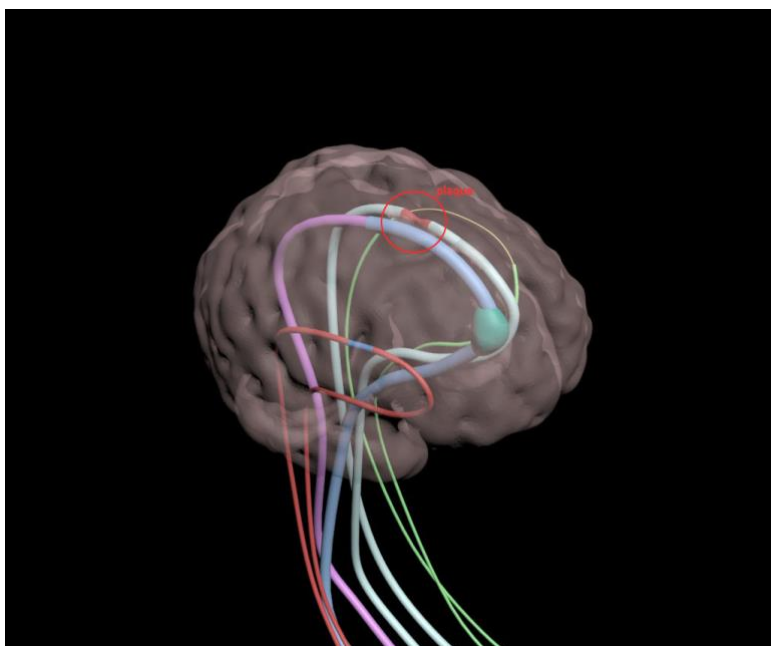
Для проведения мультиэнергетического томографического сканирования различных объектов с большим геометрическим увеличением был приобретен большой защитный шкаф КАЛАН в котором установлены все основные элементы компьютерного томографа с вращающимся образцом.



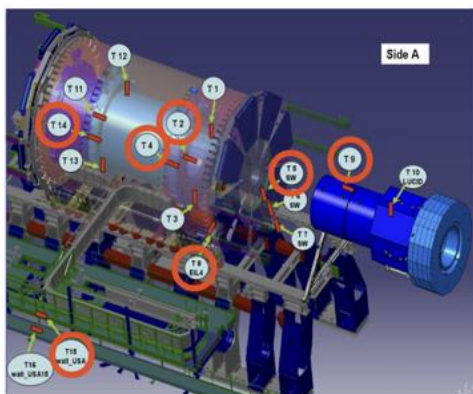
В качестве моторизованных трансляторов и их контроллеров были использована продукция фирмы STANDA. Возможность программирования этих устройств позволяет сконфигурировать установку под конкретный исследуемый образец с

минимальными затратами.

Кроме того, для проведения сравнения на близких к реальным образцам, был заказан фантом человеческой головы с различными диаметрами сосудов: Red - 2mm, Blue – 5mm, Purple - 4mm, Green - 1.5 mm, Gold color - 0.5 mm



Система GaAsPix измерения радиационной обстановки в шахте установки АТЛАС. Эта система создана совместно с коллегами по коллаборации Medipix и стабильно работает с 2017 года Показано, что: а) распределение относительного уровня радиационной загрузки в шахте стабильно во времени. б) Сравняя соотношение скоростей счета в детекторах разной толщины удалось оценить соотношение нейтральной и заряженной компонент в разных точках шахты. в) По уровню наведенной нейтронами фона активности в материале GaAs сенсоров детекторов можно оценить распределение интегрального потока нейтронов в местах расположения детекторов.



**Table 1.** The positions of ATLAS-GaAsPix devices in the ATLAS detector cavern.

Detector ID	Sensor thickness, $\mu\text{m}$	X, m	Y, m	Z, m
GPX1	500	-5.98	0	7.22
GPX2	1000	-5.80	0	7.22
GPX3	1000	-16.69	-0.06	5.07
GPX4	500	0	-0.28	-6.74
GPX5	500	0	1.57	-12.86
GPX6	1000/500	-1.12	-0.21	3.53
GPX7	1000/500	0.65	-1.45	7.8
GPX8	1000/1000	0	1.57	15.09
GPX9	1000/500	-3.46	-0.92	2.84
GPX10	1000/500	-3.46	-0.92	-2.84

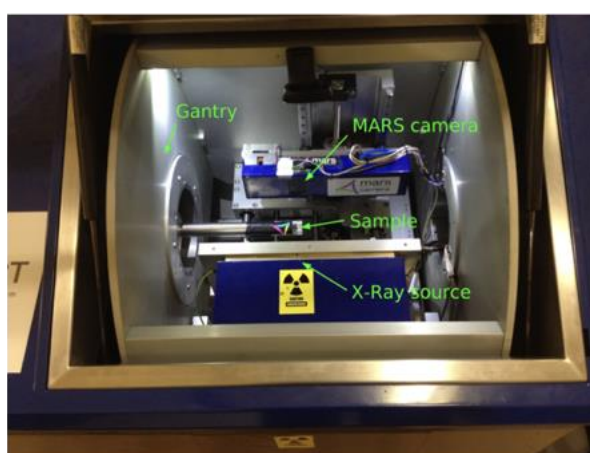
**Table 2.** Detector (GPXi) count rate normalized to count rate of GPX7 detector layer with corresponding thickness.

Detector #	$N_{tot}(GPXi)/N_{tot}(GPX7)$
1	$0.032 \pm 0.001$
2	$0.031 \pm 0.002$
3	$0.029 \pm 0.002$
7-1	1
7-2	1
8-1	$0.08 \pm 0.01$
8-2	$0.08 \pm 0.01$
9-1	$0.499 \pm 0.007$
9-2	$0.522 \pm 0.008$
10-1	$0.57 \pm 0.01$
10-2	$0.584 \pm 0.006$

**Table 3.** The ratio between charge and neutral components of background from comparison of count rates relation at thin (500 $\mu$ m) to thick (1000 $\mu$ m) GaAs detectors located in the same point in ATLAS cavern. The ratio between GPX8-1 and GPX8-2 sensors with equal thickness (1000 $\mu$ m) is taken for self-assessment.

Detector #	$N_{tot}(1000\mu m)/N_{tot}(500\mu m)$	$N_{Charged}$	$N_{Neutral}$
1	$1.62 \pm 0.04$	$0.26 \pm 0.03$	$0.74 \pm 0.03$
2			
7-1	$1.7 \pm 0.1$	$0.17 \pm 0.09$	$0.83 \pm 0.09$
7-2			
9-1	$1.7 \pm 0.1$	$0.18 \pm 0.08$	$0.82 \pm 0.08$
9-2			
10-1	$1.676 \pm 0.008$	$0.194 \pm 0.006$	$0.806 \pm 0.006$
10-2			
8-1	$0.96 \pm 0.08$	-	-
8-2			

## Исследования с микротомографом MARS

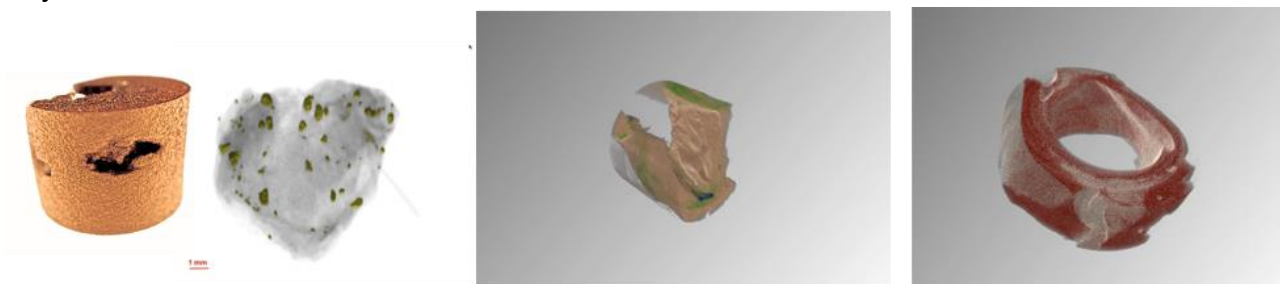


Микротомограф MARS в течение 2019 года был существенно модернизирован: заменен ПК управления, установлен новый сервер реконструкции, обновлено ПО до версии 19.04. Микротомограф был оснащен камерой MARS v5 Medipix3RX CZT 2 мм 110 мкм. Поле зрения камеры составило 14 мм x 42 мм (было 14 мм x 14 мм).

После ремонта этой камеры (замена переходных плат чип-ПЛИС) был проведен весь цикл настроек детектора: DAC сканы, bias voltage сканы, эквализация, энергетическая калибровка.

Приобретено ПО MARS Vision с 3D монитором Z-Space. Данное программное обеспечение вместе с ПО MARS MD позволяет визуализировать в 3D результаты мультиэнергетической реконструкции.

Совместно с медиками из С.Петербурга и геофизиками было проведено измерения и результаты представлялись на международных конференциях и опубликованы в статьях.



Примеры результатов сканирования образцов в микротомографе MARS. Справа налево. 1 – Образец нефтяного керна. 2 - руда с включениями магнетита. 3



- Часть артерии человека с атеросклеротическими изменениями. 4 – часть здоровой артерии свиньи.

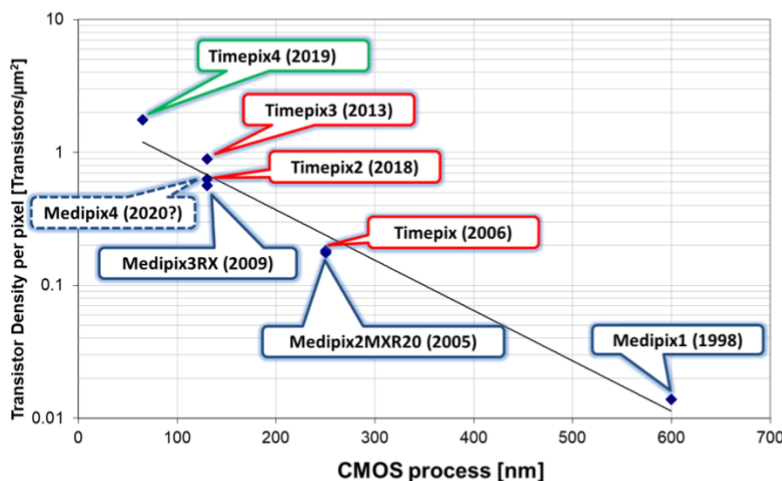
В настоящий момент достигнута договоренность о создании совместной группы в МФТИ на Факультете молекулярной и биологической физики для более эффективного использования, имеющегося у обеих групп оборудования.

### Сотрудничество с коллаборацией Medipix в создании микросхемы нового поколения Timepix-4.

Как правило, рентгеновская томография выявляет форму и границы компонентов, составляющих тот или иной объект и позволяет измерить коэффициент поглощения рентгеновского излучения этих компонентов. Однако для полной характеристики объекта требуется идентифицировать вещества, его составляющие. В большинстве случаев используются источники полихроматического рентгеновского детектора в паре с интегрирующим детектором, регистрирующим интенсивность прошедшего излучения. Такие детекторы обладают рядом недостатков: теряется информация о спектре излучения, шум интегрируется вместе с сигналом, вклад фотона в сигнал зависит от его энергии.



## Medipix4 Collaboration (from 2016)



- CEA, Paris, France
- CERN, Geneva, Switzerland,
- DESY-Hamburg, Germany
- Diamond Light Source, Oxfordshire, England, UK
- IEAP, Czech Technical University, Prague, Czech Republic
- JINR, Dubna, Russian Federation
- NIKHEF, Amsterdam, The Netherlands
- University of California, Berkeley, USA
- University of Houston, USA
- University of Maastricht, The Netherlands
- University of Canterbury, New Zealand
- University of Oxford, England, UK
- University of Geneva, Switzerland
- IFAE, Barcelona, Spain
- University of Glasgow, UK

**Timepix4:** A 4-side tillable large single threshold particle tracking detector chip with improved energy and time resolution and with high-rate imaging capabilities

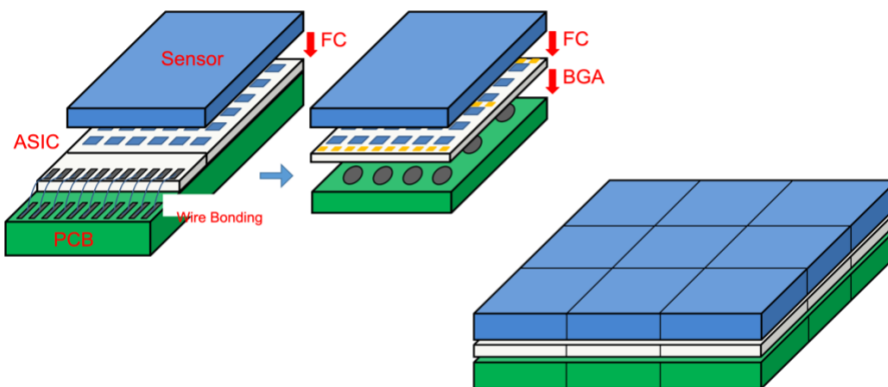
**15 members**

Гибридные пиксельные детекторы со счетом одиночных фотонов и дискриминацией по энергии, какими являются детекторы на основе микросхем Medipix, лишены данных недостатков и делают возможным проведение мультиэнергетической томографии, которая, в свою очередь, позволяет определить не только пространственное распределение рентгеновской плотности в исследуемом образце, но и пространственное распределение некоторых химических элементов.

## Timepix3 → Timepix4

		Timepix3 (2013)	Timepix4 (2019)	
<b>Technology</b>		130nm – 8 metal	65nm – 10 metal	
<b>Pixel Size</b>		55 x 55 $\mu\text{m}$	55 x 55 $\mu\text{m}$	
<b>Pixel arrangement</b>		3-side buttable 256 x 256	4-side buttable 512 x 448 <b>3.5x</b>	
<b>Sensitive area</b>		1.98 $\text{cm}^2$	<b>6.94 <math>\text{cm}^2</math></b>	
<b>Readout Modes</b>	Data driven (Tracking)	TOT and TOA		
		Event Packet	48-bit	64-bit
	Frame based (Imaging)	Max rate	0.43x10 <sup>6</sup> hits/mm <sup>2</sup> /s	<b>3.58x10<sup>6</sup> hits/mm<sup>2</sup>/s</b> <b>33%</b>
		Max Pix rate	1.3 KHz/pixel	<b>10.8 KHz/pixel</b> <b>8x</b>
Mode		PC (10-bit) and iTOT (14-bit)	CRW: PC (8 or 16-bit)	
Frame		Zero-suppressed (with pixel addr)	Full Frame (without pixel addr)	
Max count rate		~0.82 x 10 <sup>9</sup> hits/mm <sup>2</sup> /s	~5 x 10 <sup>9</sup> hits/mm <sup>2</sup> /s <b>5x</b>	
<b>TOT energy resolution</b>		< 2KeV	<b>&lt; 1Kev</b> <b>2x</b>	
<b>TOA binning resolution</b>		1.56ns	<b>195ps</b> <b>8x</b>	
<b>TOA dynamic range</b>		409.6 $\mu\text{s}$ (14-bits @ 40MHz)	<b>1.6384 ms</b> (16-bits @ 40MHz) <b>4x</b>	
<b>Readout bandwidth</b>		≤5.12Gb (8x SLVS@640 Mbps)	<b>≤163.84 Gbps</b> (16x @10.24 Gbps) <b>32x</b>	
<b>Target global minimum threshold</b>		<500 e <sup>-</sup>	<500 e <sup>-</sup>	

### 4-side buttable pixel arrangement



- Target to build **large area detectors** by combining smaller modules
- The through-silicon vias (TSVs) is the key technology for this paradigm shift

За время сотрудничества с коллаборацией Medipix авторы проекта получили серию интересных результатов, зафиксированных в семи публикаций, двух патентах и двух кандидатских диссертациях и ставят своей целью дальнейшее развитие этих исследований. Крайне существенно, что авторы стали полноправными участниками разработки и создания уникальной по набору параметров микросхемы Timepix4. Это дает право авторам вести собственные разработки современных детекторов и детектирующих рентгеновское изображения систем.

## Список публикаций авторов за 2018 – 2020 годы.

1. H. Abramowicz, A. Abusleme, K. Afanaciev, G. Chelkov, et.al. Measurement of shower development and its Molière radius with a four-plane LumiCal test set-up, //Eur. Phys. J. C (2018) 78:135
2. G.Chelkov, B.Bergmann, S.Kotov, P. Smolyanskiy, U.Kruchonak, D.Kozhevnikov, Y.Mora Sierra, I.Stekl, A Zhemchugov. Properties of GaAs:Cr-based Timepix detectors, // Journal of Instrumentation. Vol. 13, no. 02. T02005. (2018)
3. Savelyeva, E. N., Burikova, T. V., Masagutov, R. K., & Kozhevnikov, D. A. Compacting processes and their effect on reservoir properties of the Pashian horizon in Kitayamskoye field (Russian), // *Oil Industry Journal*, 2018(04), 26-28
4. Kozhevnikov D., Smolyanskiy P. Stack of Timepix-based detectors with Si, GaAs:Cr and CdTe sensors with optimized thickness for spectral CT, // 20<sup>th</sup> International Workshop on Radiation Imaging Detector, June 24-28, 2018, Sundsvall, Sweden
5. Kozhevnikov D., Smolyanskiy P. Equalization of Medipix family detector energy thresholds using X-ray tube spectrum high energy cut-off, // Journal of Instrumentation. 2019. T. 14. №. 01. C. T01006.
6. F. Dachs, J. Alozy, N. Belyaev, B.L. Bergmann, M. van Beuzekom, T.R.V. Billoud, P. Burian, P. Broulim, M. Campbell, G. Chelkov, M. Cherry, S. Doronin, K. Filippov, P. Fusco, F. Gargano, B. van der Heijden, E.H.M. Heijne, S. Konovalov, X.L. Cudie, F. Loparco et al. Transition radiation measurements with a Si and a GaAs pixel sensor on a Timepix3 chip, // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 958. 2019
7. M.Krmar, Y.Teterev, A.Belov, S.Mitrofanov, S.Abou El-Azm, M.Gostkin, V.Kobets, U.Kruchonak, A.Nozdrin, S.Porokhovoy, M.Demichev. Beam energy measurement on LINAC200 accelerator and energy calibration of scintillation detectors by electrons in range from 1 MeV to 25 MeV. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 935. 2019
8. Abramowicz, H. et al. FCAL Collaboration Performance and Molière radius measurements using a compact prototype of LumiCal in an electron test beam. Eur. Phys. J. C 79 (2019) 579

## Патенты

1. Абдельшакур С., Демичев М.А., Жемчугов А.С., Кожевников Д.А., Котов С.А., Кручонок В.Г., Смолянский П.И., Шелков Г.А.  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ПИКСЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР ЗАРЯЖЕННЫХ СИЛЬНО ИОНИЗИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ (МНОГОЗАРЯДОВЫХ ИОНОВ),  
Патент (RU) 2659717, от 03.06.2018, ОИЯИ.
2. Жемчугов А.С., Кожевников Д.А., Котов С.А., Кручонок В.Г., Лейва Ф.А., Смолянский П.И., Шелков Г.А.  
ПЛАНАРНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДЕТЕКТОР,  
Патент (RU) 2672039, от 08.11.2018, ОИЯИ.

## **Защиты диссертаций**

1. П.И.Смолянский кфмн (01-04-01) 2018 (*руководитель А.С.Жемчугов*)  
«Изучение пиксельных арсенид-галлиевых детекторов на основе микросхемы Timerix»
2. Д.А.Кожевников кфмн (01-04-01) 2019 (*руководитель Г.А.Шелков*)  
«Развитие метода мультэнергетической рентгеновской томографии с применением детекторов на основе микросхем семейства Medipix»

## **Дипломы Магистров**

1. Е.А.Черепанова (МФТИ) 2019 (*руководитель Г.А.Шелков*)  
«Анализ структуры радиационного фона в подземном зале установки ATLAS на основе данных с детекторов системы ATLAS-GaAsPix»
2. В. Андрияшен (МФТИ) 2019 (*руководитель А.С.Жемчугов*) «Разработка метода мультэнергетической итеративной томографической реконструкции»



## Планы на 2021-2023 годы.

1. Создание радиационно-стойких полупроводниковых материалов для детекторов частиц.
  - а. Продолжить совместно с физиками Томска поиск радиационно стойких модификаций GaAs , включая измерение их радиационной стойкости на пучках нейтронов и электронов в ОИЯИ;
2. Создание полномасштабного прототипа модуля компактного радиационно стойкого электромагнитного калориметра совместно с коллаборацией FCAL.
3. Создание пиксельных детекторов и систем с их использованием.
  - а. Разработка детекторов, электроники на основе FPGA и ПО для Timepix4.
  - б. Создание прототипов и нового программного обеспечения для “головного” томографа и томографа с высоким разрешением ( ~ 10 микрон).
  - в. Организация совместной работы:
    - i. с биофизиками МФТИ на микротомографе MARS.
    - ii. с генетиками ЛЯП на миротомографе высокого разрешения.

	1-st year			2-nd year			3-d year		
Rud.hardness									
New semiconductor material samples		■			■			■	
Test cycle at reactor and Linac-200		■		■		■		■	
Data analyses	■	■	■	■	■	■	■	■	■
FCAL R&D									
RO system design and test	■	■	■	■	■	■			
Sector module R&D and design		■	■	■	■	■	■		
Beam test			■			■			■
Timepix R&D									
FEE part design and test samples	■	■	■	■	■				
Detector R&D		■	■	■	■	■			
Detector sample construction&test							■	■	■
Full scale “head” CT prototype									
R&D and design	■	■	■						
Construction & test			■	■	■	■	■	■	■
High space resolution CT									
R&D and design									
Construction & test									
Research with MIPT biomedics on a MARS CT			■	■	■	■	■	■	■

## Plans for the years 2021-2023.

1. The creation of radiation-resistant semiconductor materials for particle detectors.
  - a. To continue, together with Tomsk physicists, the search for radiation-resistant modifications of GaAs, including the measurement at neutron and electron beams at JINR;
2. Creation of a full-scale prototype of a module of a compact radiation-resistant electromagnetic calorimeter in the frame of the FCAL collaboration.
3. Creation of pixel detectors and systems using them.
  - a. Development of detectors, FPGA-based electronics and software for Timepix4.
  - b. Creation of prototypes and new software for the “head” tomograph and tomograph with high resolution (~ 10 microns).
  - c. Organization of joint work:
    - i. with MIPT biophysicists on a MARS microtomograph.
    - ii. with DLNP genetics on a high-resolution microtomograph.

	1-st year			2-nd year			3-d year		
Radiation resistant semiconductors									
New semiconductor material samples		■			■			■	
Test cycle at reactor and Linac-200		■		■		■		■	
Data analyses	■	■	■	■	■	■	■	■	■
FCAL R&D									
RO system design and test	■	■	■	■	■	■			
Sector module R&D and design		■	■	■	■	■	■		
Beam test			■			■			■
Timepix4 R&D									
FPGA-based electronics and software	■	■	■	■	■				
Detector R&D		■	■	■	■	■			
Detector sample construction & test						■	■	■	■
Full scale “head” CT prototype									
R&D and design	■	■	■						
Construction & test			■	■	■	■	■	■	■
High space resolution CT									
R&D and design			■	■	■				
Construction & test					■	■	■	■	■
Research with MIPT Bio on the MARS CT			■	■	■	■	■	■	■

## Список участников проекта.

Среди исполнителей проекта от ЛЯП с долей участия свыше 20% четыре кандидата физ. мат. наук с большим опытом создания детекторов частиц, включая пиксельные полупроводниковые детекторы. Имеется опыт создания программ моделирования работы п/п детекторов и работы с рентгеновскими томографами, включая их калибровку и создания для них программного обеспечения. В коллективе есть молодые сотрудники.

#	ФИО	Лаборатория	Задачи	FTE
1	Шелков Г.А.	ЛЯП	Руководитель проекта	0,8
2	Ахмедов А.А.	ЛНФ	Тесты на пучках ИБР-2	0,1
3	Гонгадзе А.	ЛЯП	Исследование детекторов	0,1
4	Госткин М.И.	ЛЯП	Зам.Руководителя FCAL группы	0,6
5	Жемчугов А.С.	ЛЯП	Руководитель FCAL группы	0,1
6	Исатов А.Т.	ЛЯР	Тесты на пучках ЛЯР	0,2
7	Кручонок В.Г.	ЛЯП	Радиационные тесты. Электроника	0,6
8	Кожевников Д.А.	ЛЯП	КТ, ПО, MARS	0,2
9	Копач Ю.Н.	ЛНФ	Тесты на пучках ИБР-2	0,1
10	Кузнецов Н.К.	ЛЯП	Инженер	0,5
11	Лапкин А.В.	ЛЯП	FPGA электроника для Tomerix4	1
12	Лейва А.	ЛЯП	Компьютерное моделирование	0,8
13	Митрофанов С.В.	ЛЯР	Тесты на пучках ЛЯР	0,2
14	Пороховой С.И.	ЛЯП	Детекторы, тесты на пучках	0,1
14	Расторгуев Д.Д.	ЛЯП	Детекторы, моделирование	1
15	Рожков В.А.	ЛЯП	Зам.руководителя проекта	1
16	Руденко Т.О.	ЛЯП	Инженер электроника	0,2
17	Смолянский П.И.	ЛЯП	Руководитель группы детекторов	0,8
18	Тележников С.Ю.	ЛНФ	Тесты на пучках ИБР-2	0,1
19	Тетерев Ю.Г.	ЛЯР	Тесты на пучках ЛЯР	0,2
20	Черепанова Е.А.	ЛЯП	MARS, GaAsPix, обработка данных	0,8
21	Шакур А	ЛЯП	Радиационные тесты. Измерения в ЛЯР	0,8
			Сумма ЛЯП	9,4
			Сумма	10,3

### Краткий ССВУ – анализ.

Сильные стороны проекта. У авторов есть значительный опыт и наработки, позволяющие выполнить задачи проекта. ОИЯИ обладает ускорителями и реактором, позволяющие проводить необходимые тесты. ОИЯИ обладает необходимой инфраструктурой и значительной частью необходимого оборудования. Авторы имеют давние и продуктивные связи с коллегами, включая коллег смежных специальностей, как в Российской Федерации, так и за рубежом.

Слабые стороны проекта. Необходимость привлечения к совместным НИР и НИОКР разработкам специалистов дефицитных IT специальностей.

## **Требуемые ресурсы.**

Для выполнения указанной программы в 2021-2023 потребуется следующие ресурсы ОИЯИ:

1. 180 К\$ - Покупка микросхем ТРХ4, создание прототипов детекторов, заключение договоров с организациями на проведение НИР и НИОКР разработок.
2. 110 К\$ - создание действующего прототипа «головного» КТ, вычислительная инфраструктура
3. 200 К\$ - Микрофокусная рентгеновская трубка, и прототип микрофокусного КТ
4. 40 К\$ - Измерительное оборудование
5. 60 К\$ - сенсоры из полупроводника
6. 90 К\$ - Участие в test beams, рабочих совещаниях и конференциях.

**Смета затрат по проекту: Новые полупроводниковые детекторы для фундаментальных и прикладных исследований**

NN пп	Наименование статей затрат	Полная стоимость	1 год	2 год	3 год
1.	Ускоритель, реактор	-	-	-	-
2.	ЭВМ	-	-	-	-
3.	Компьютерная связь тыс. долл.	10	3	3	4
4.	Конструкторское бюро				
5.	ООЭП ЛЯП (нормочасы)	2100	700	700	700
6.	Материалы (тыс. долл.)	90	30	30	30
7.	Оборудование (тыс. долл.)	380	150	120	110
9.	Оплата НИР, выполняемых по договорам (тыс. долл.)	110	40	40	30
10.	Командировочные расходы, (тыс. долл.)				
	а) в страны нерублевой зоны	81	27	27	27
	б) в города стран рублевой зоны	9	3	3	3
	в) по протоколам				
	Итого по прямым расходам:	680	253	223	204

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР-ЭКОНОМИСТ ЛАБОРАТОРИИ