

Проект
**“Новые полупроводниковые детекторы для
фундаментальных и прикладных исследований”**

НТС ЛЯП 30 Марта 2023

Г.А.Шелков - ОИЯИ (г.Дубна)
chelkov@jinr.ru

Статус

Одобрена

Новые полупроводниковые детекторы для фундаментальных и прикладных исследований

Руководитель темы: Шелков Г.А.

Заместитель: Рожков В.А.

Участвующие страны и международные организации:

Беларусь, Великобритания, Вьетнам, Германия, Египет, Израиль, Италия, Канада, Куба, Новая Зеландия, Польша, Россия, Румыния, США, Украина, Хорватия, ЦЕРН, Чехия, Швейцария, ЮАР, Япония.

Изучаемая проблема и основная цель исследований:

Проведение научно-методических исследований гибридных матричных детекторов высокого разрешения для физики высоких энергий и атомного ядра, а также полупроводниковых детекторов с повышенной радиационной стойкостью.

Развитие научного сотрудничества с исследовательскими институтами для изучения возможности применения разработанных детекторов в других областях науки и техники (в первую очередь в области здравоохранения и горной промышленности).

Развитие инфраструктуры для исследования свойств полупроводниковых детекторов, включая тесты на пучках частиц для использования группами ОИЯИ и институтов государств-членов.

Ожидаемые результаты по завершении этапов темы или проектов:

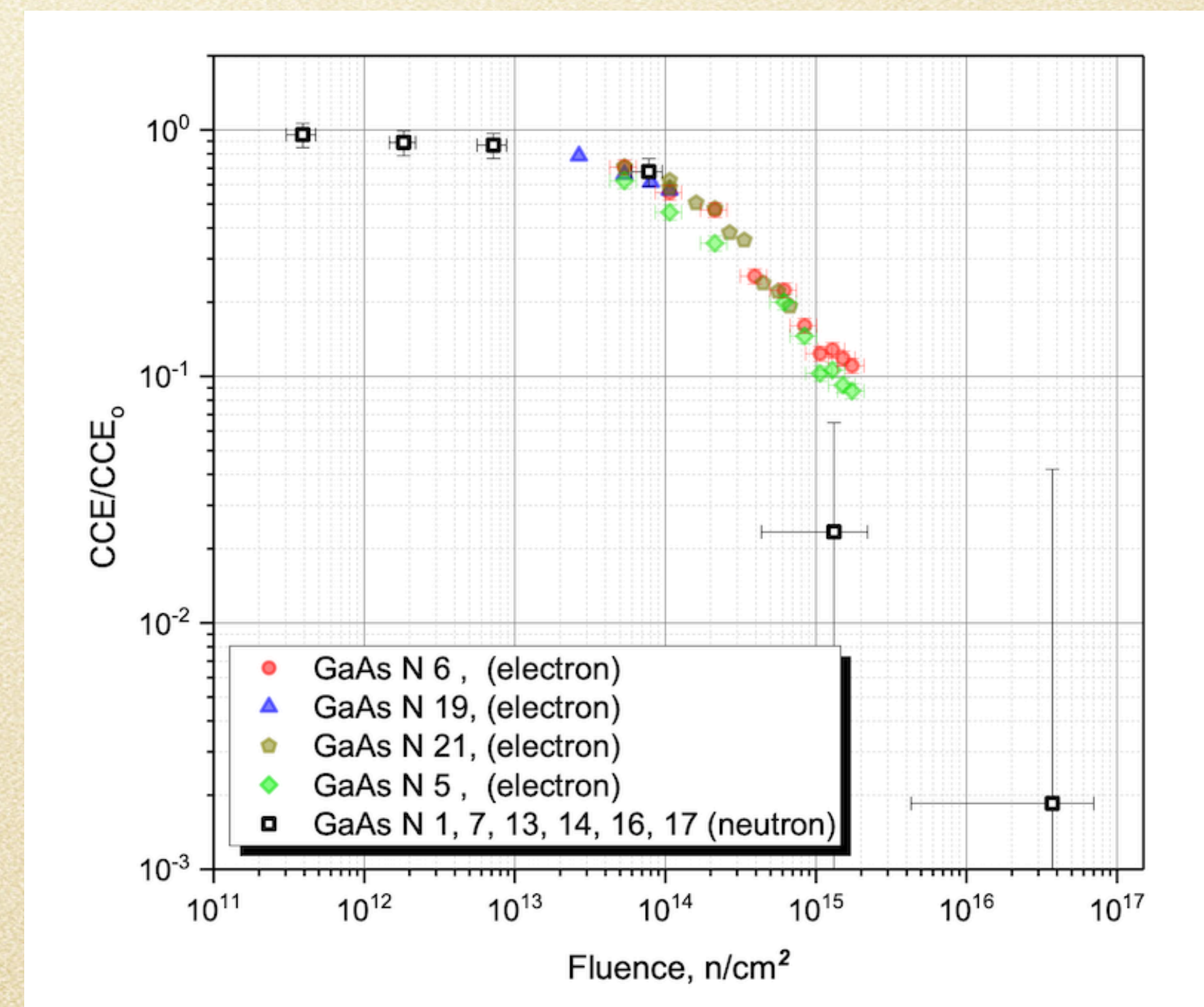
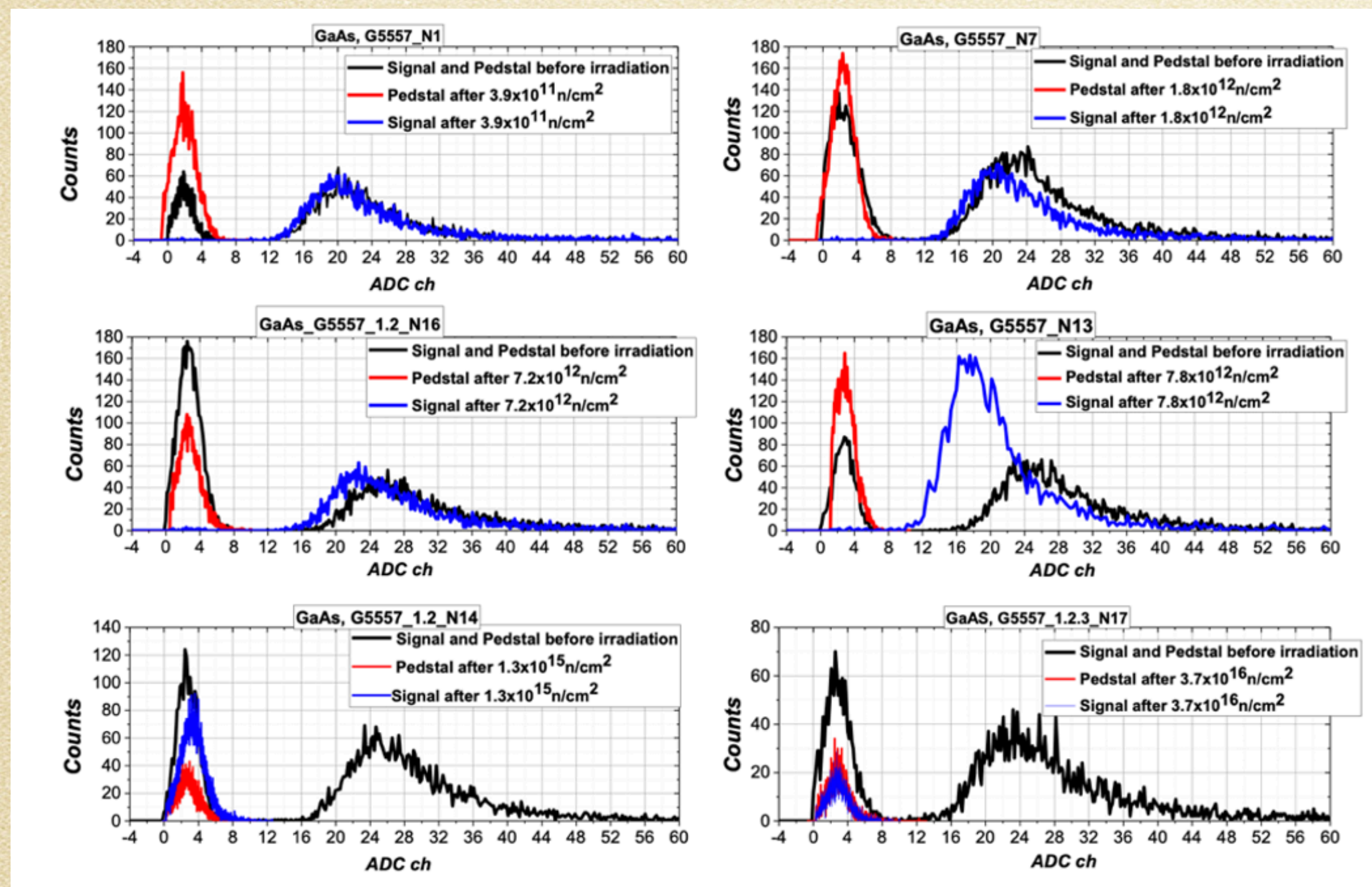
1. Создание пиксельных детекторов и рентгеновских томографов с их использованием.
2. Создание полномасштабного прототипа модуля компактного радиационно-стойкого электромагнитного калориметра совместно с коллаборацией FCAL.

Ожидаемые результаты по этапам темы или проектам в текущем году:

1. Разработка прототипа и программного обеспечения для "головного" томографа.
2. Разработка прототипов детекторов, электроники на основе FPGA и ПО для Timerix4.
3. Организация совместной работы с биофизиками МФТИ и МГУ на микротомографе MARS.

Главной целью работ по теме 1126 открытой в 2015 было освоение и методические исследования нового класса физических приборов - гибридных пиксельных полупроводниковых детекторов, работающих в режиме счета отдельных частиц. Эти устройства впервые появились на рубеже 2000-х гг. и отличаются от других пиксельных детекторов возможностью обработки и оцифровки сигнала непосредственно в пикселе, что позволяет, помимо координатной информации, получить данные об энергии каждой частицы, попадающей в отдельный пиксель.

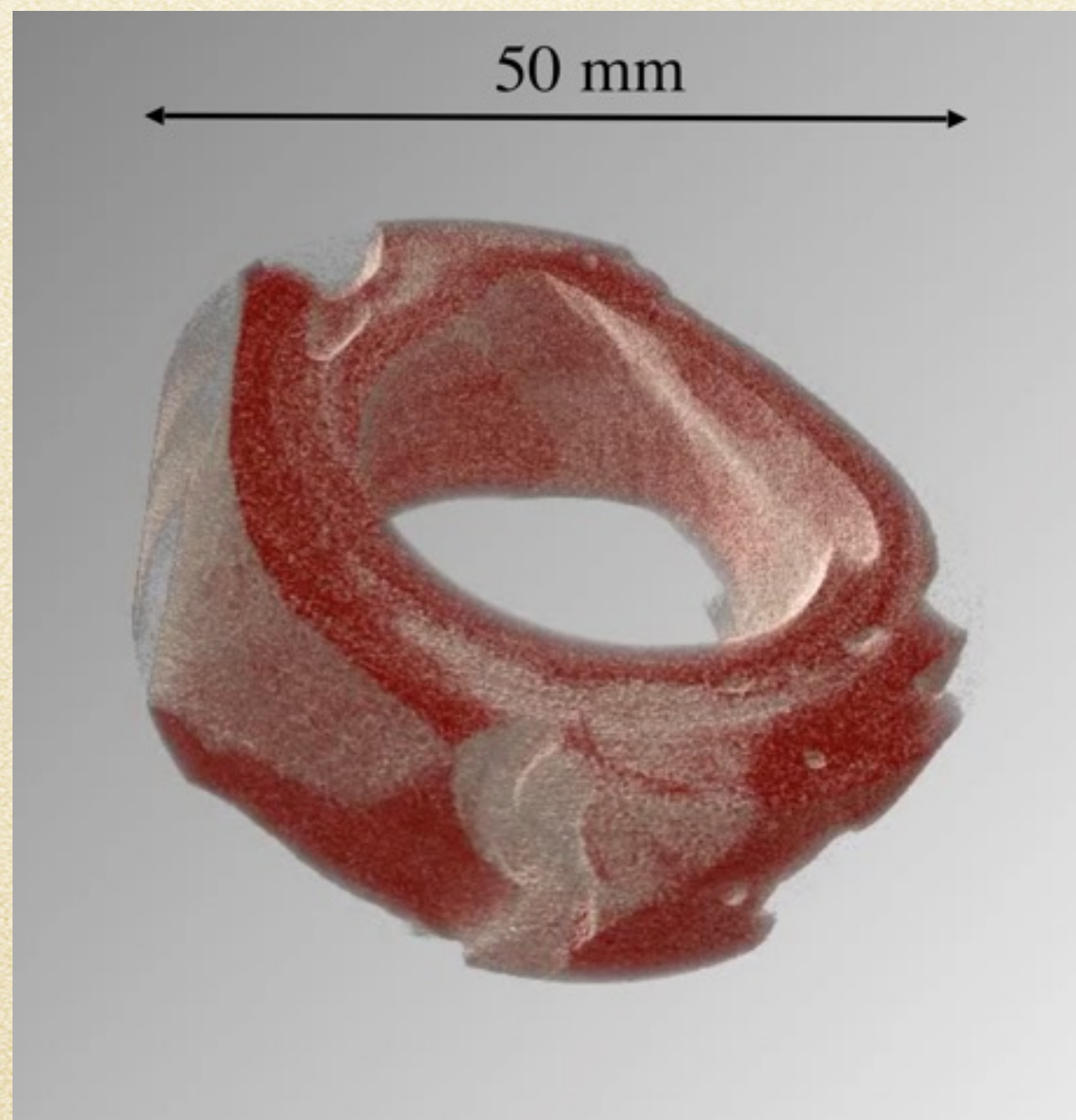
Проведены измерения радиационной стойкости новых модификаций GaAs на пучках нейтронов (флюенс от $4 \cdot 10^{11}$ до $4 \cdot 10^{16}$) и электронов в ОИЯИ совместно с физиками ТГУ Томск;



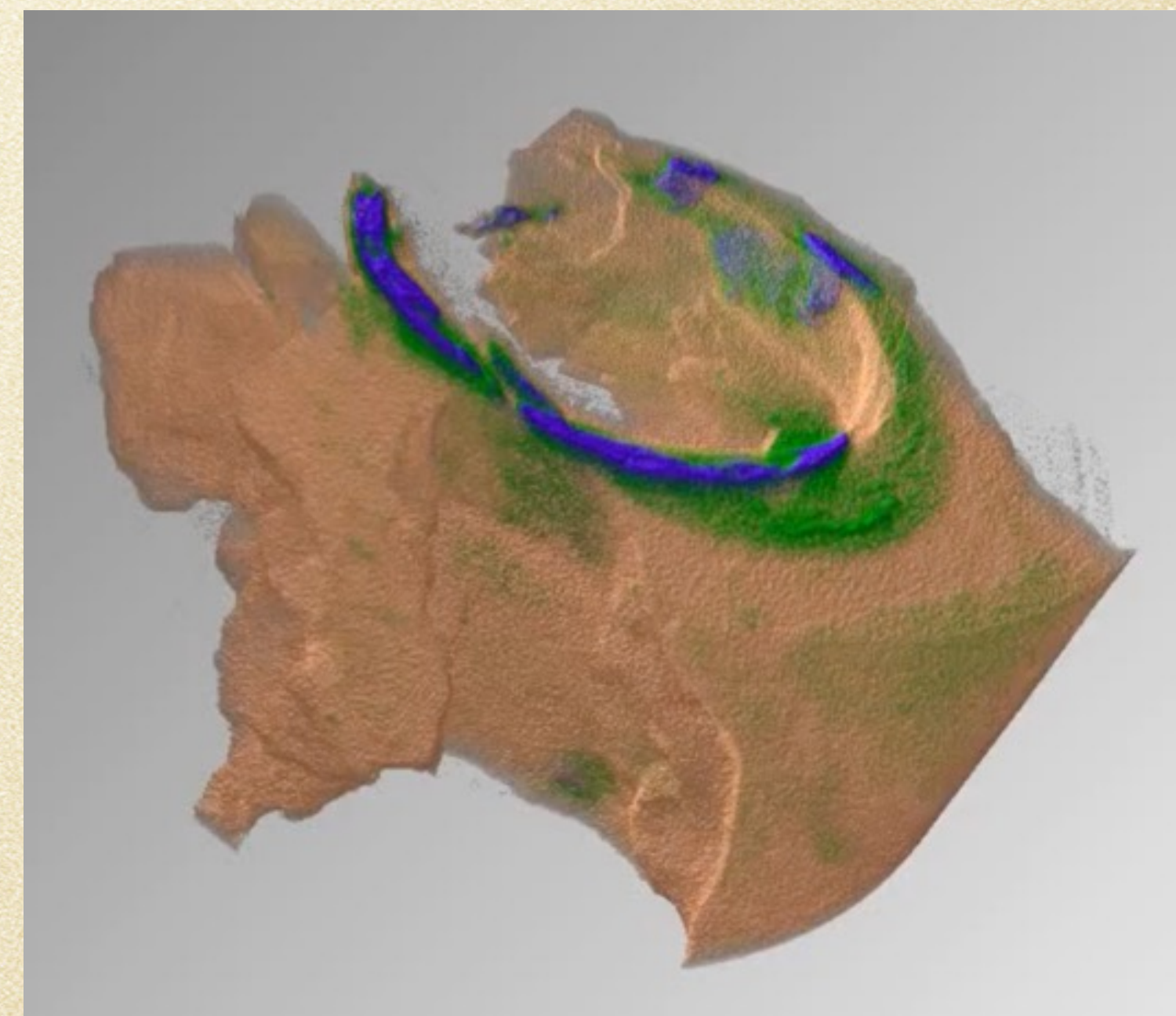
На купленном μ Томографе MARS (MARS Bioimaging Ltd), в котором используются гибридные пиксельные энергочувствительные полупроводниковые детекторы Medipix3RX, в сотрудничестве с врачами Центра сосудистой хирургии им.Т.Топпера СПб, были просканированы биологические образцы по программе исследования механизма возникновения аневризма аорты.



Микротомограф MARS



Томограмма здоровой аорты.
(свиньи)



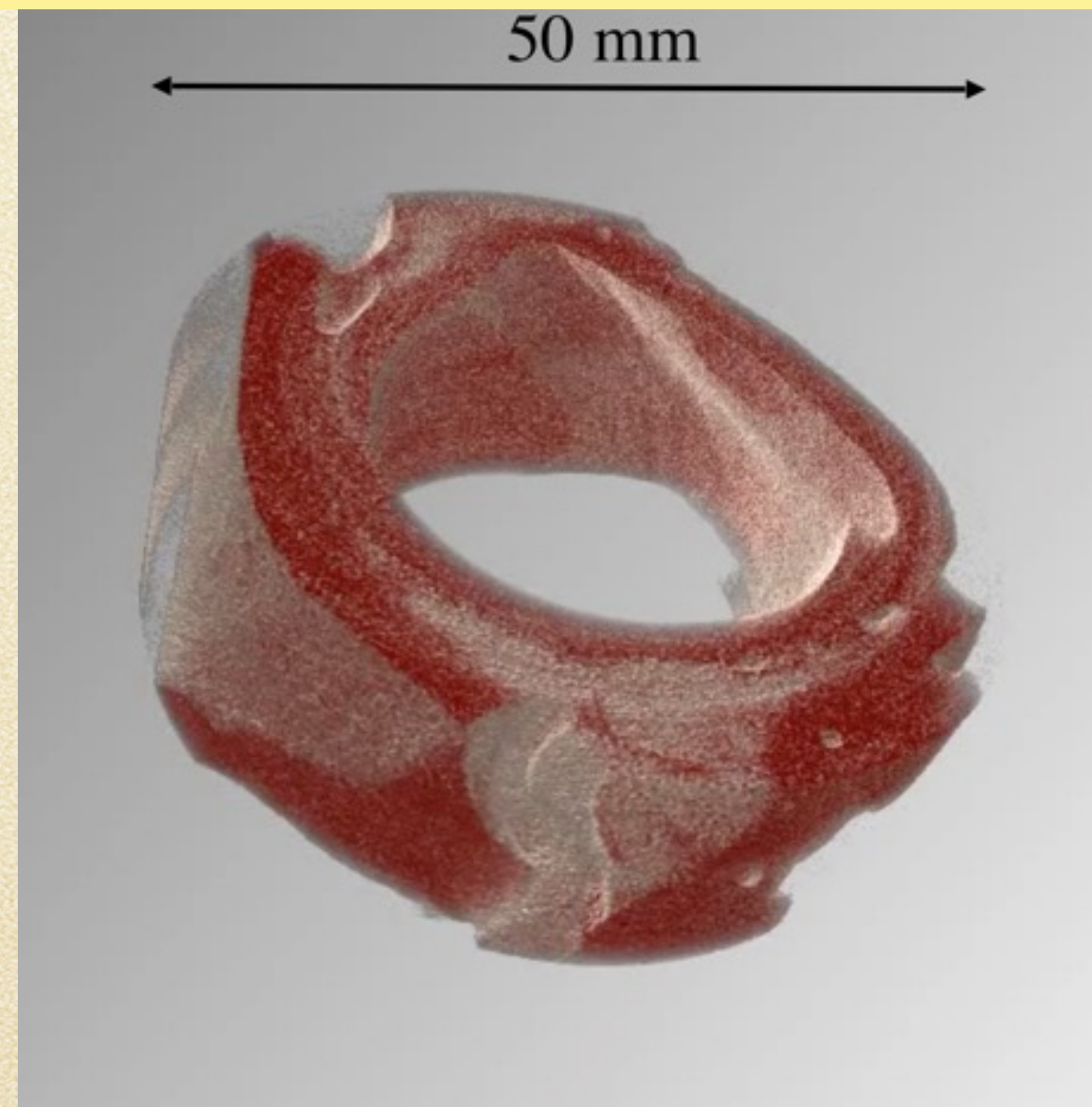
Томограмма аневризма аорты
(человека)

На купленном μ Томографе MARS (MARS Bioimaging Ltd), в котором используются гибридные пиксельные энергочувствительные полупроводниковые детекторы Medipix3RX, в сотрудничестве с врачами Центра сосудистой хирургии им.Т.Топпера СПб, были просканированы биологические образцы по программе исследования механизма возникновения аневризма аорты.

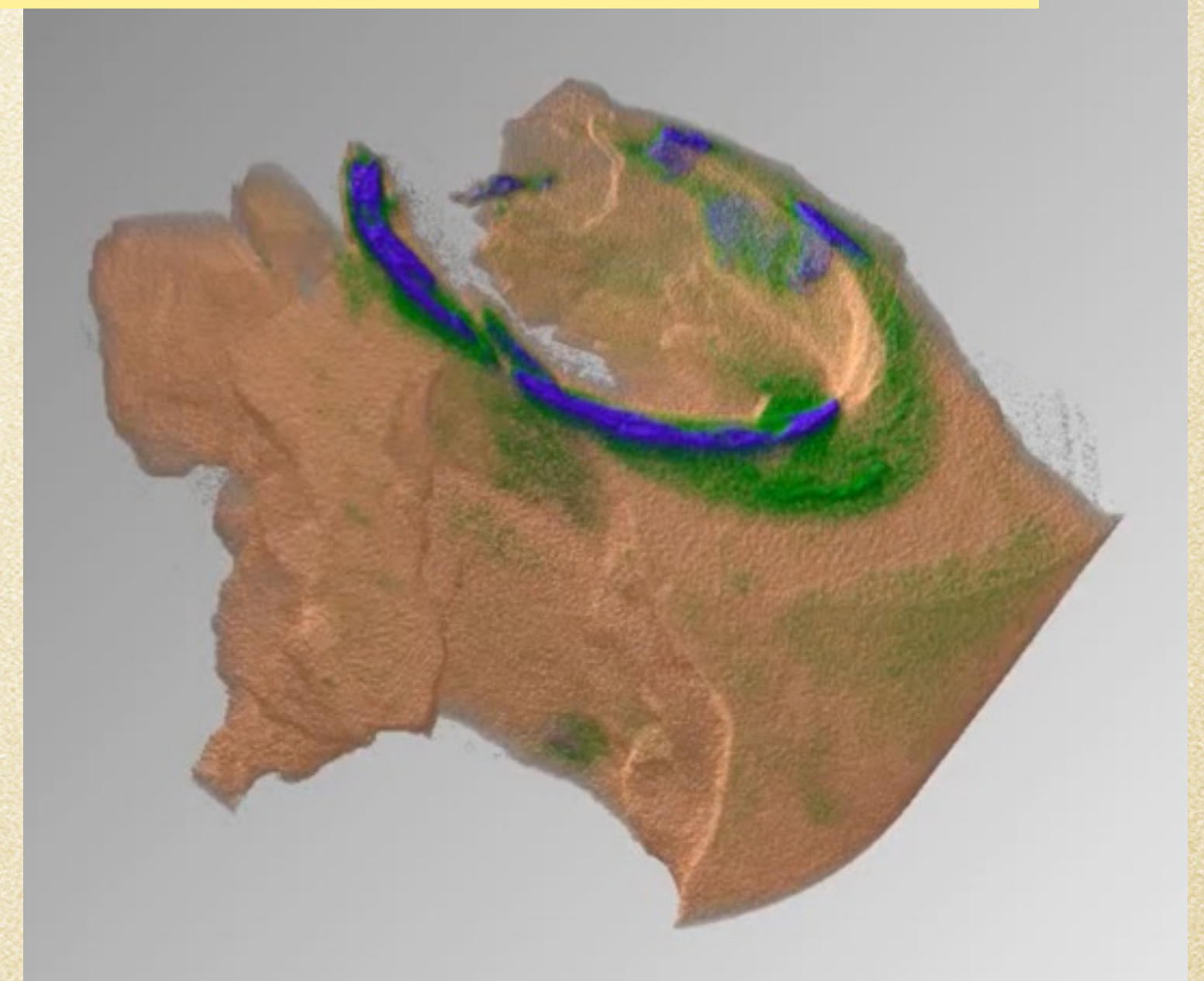
Результаты этой работы стали существенной частью докторской диссертации сосудистого хирурга Светликова А.В. - Руководителя Центра сосудистой хирургии им.Т.Топпера и были опубликованы в ведущем медицинском журнале.



Микротомограф MARS



Томограмма здоровой аорты.
(свиньи)



Томограмма аневризма аорты
(человека)

Было проведено изучение радиационного фона вокруг детектора АТЛАС в ЦЕРН;

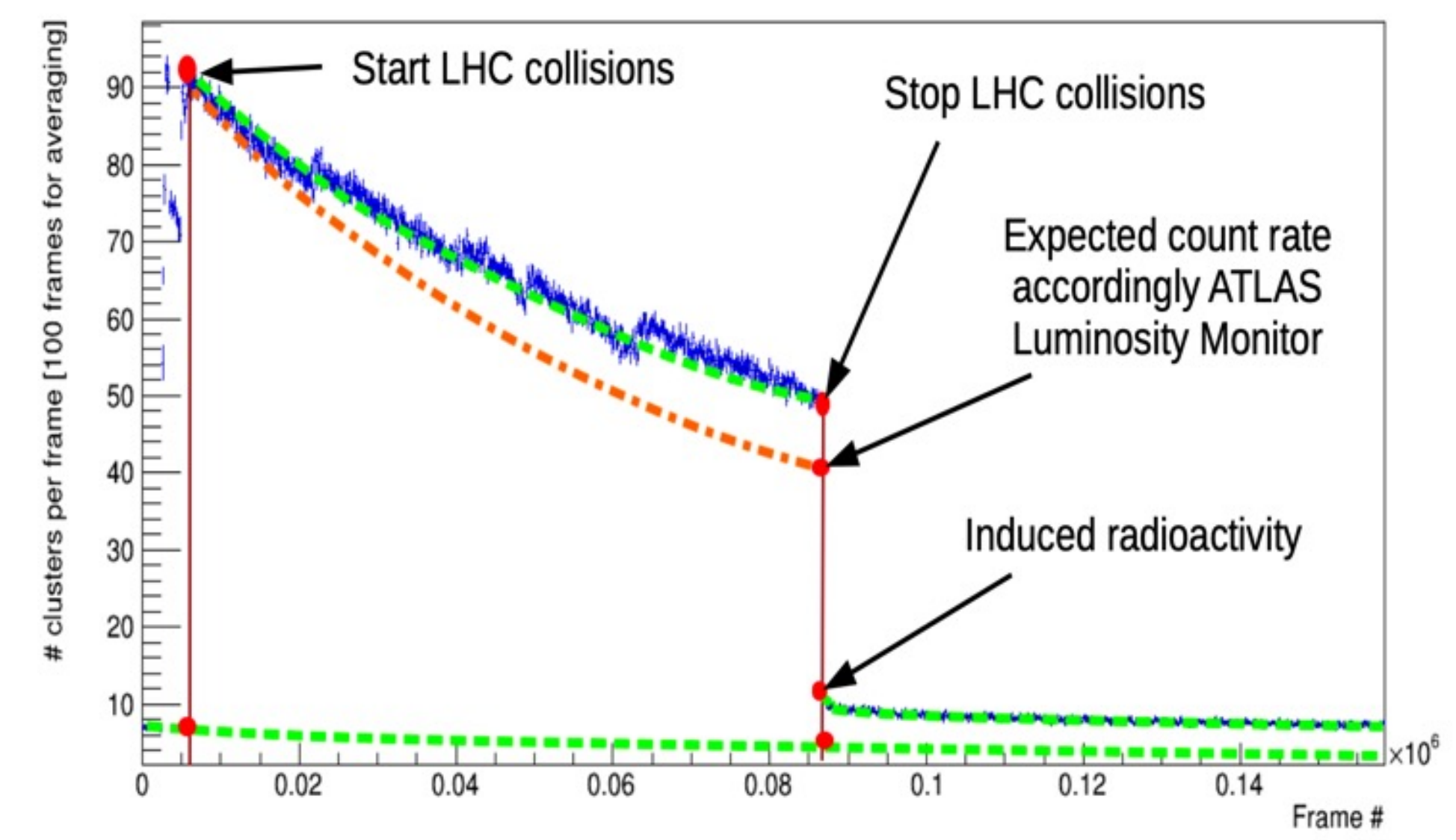
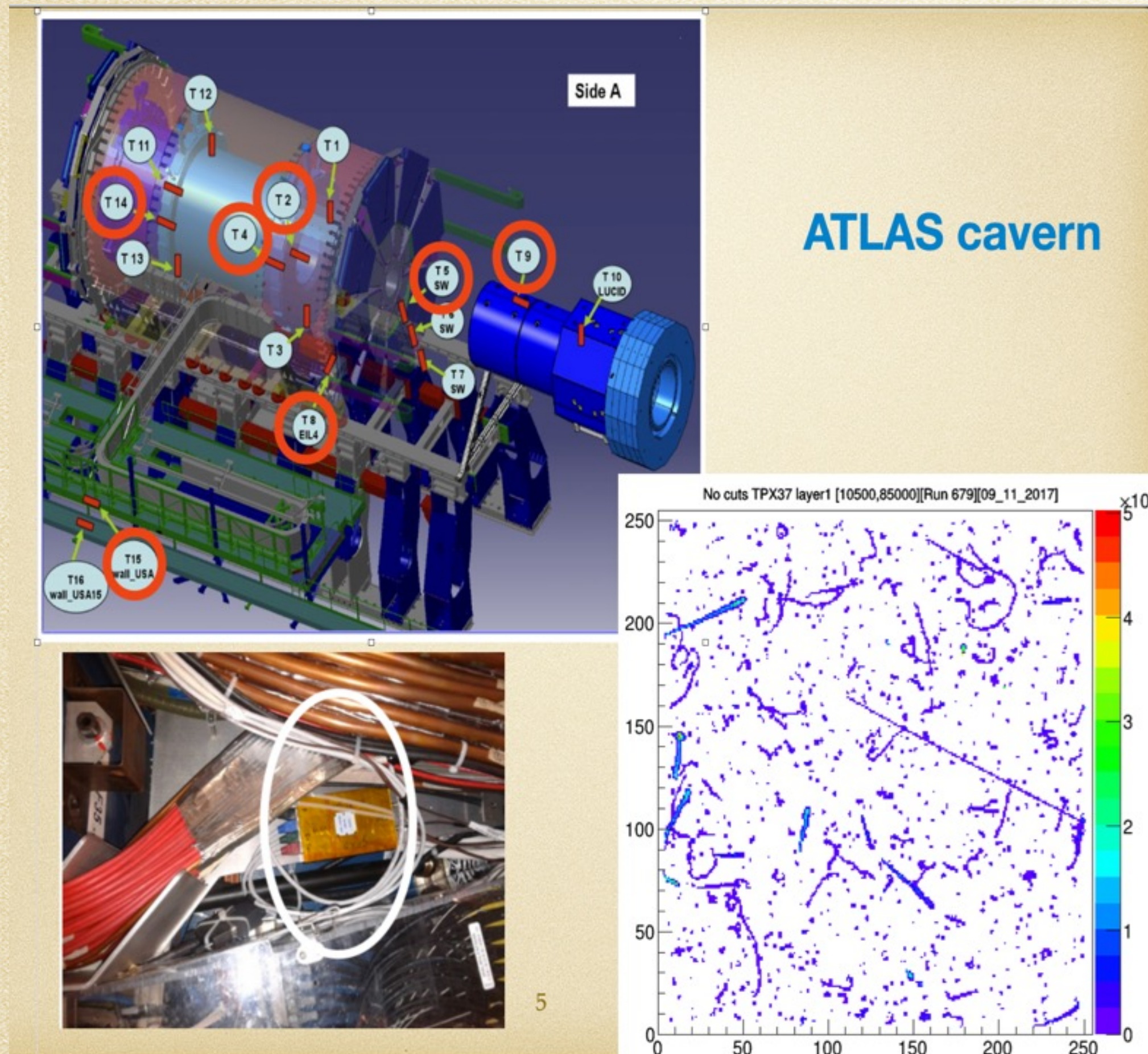
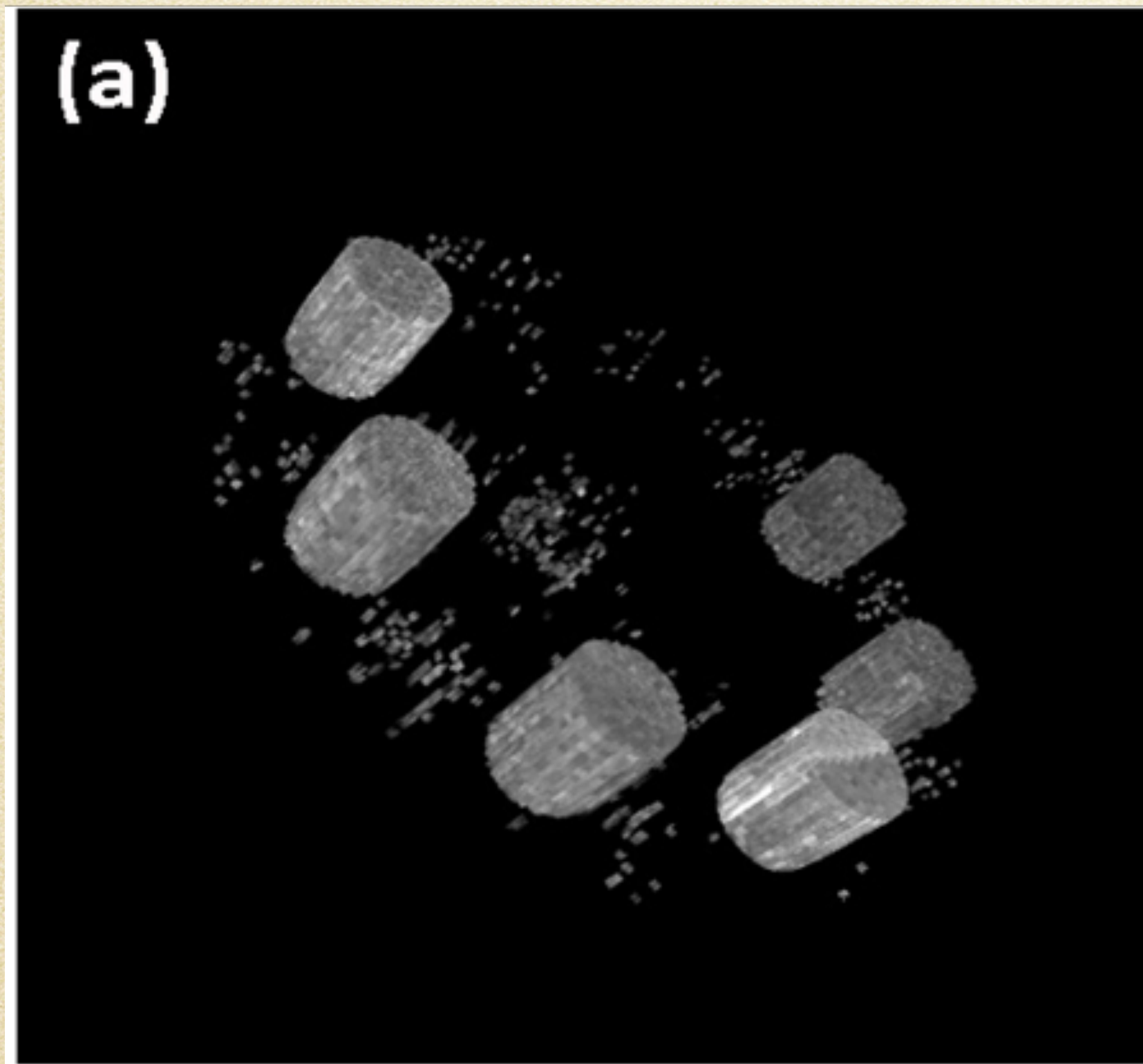


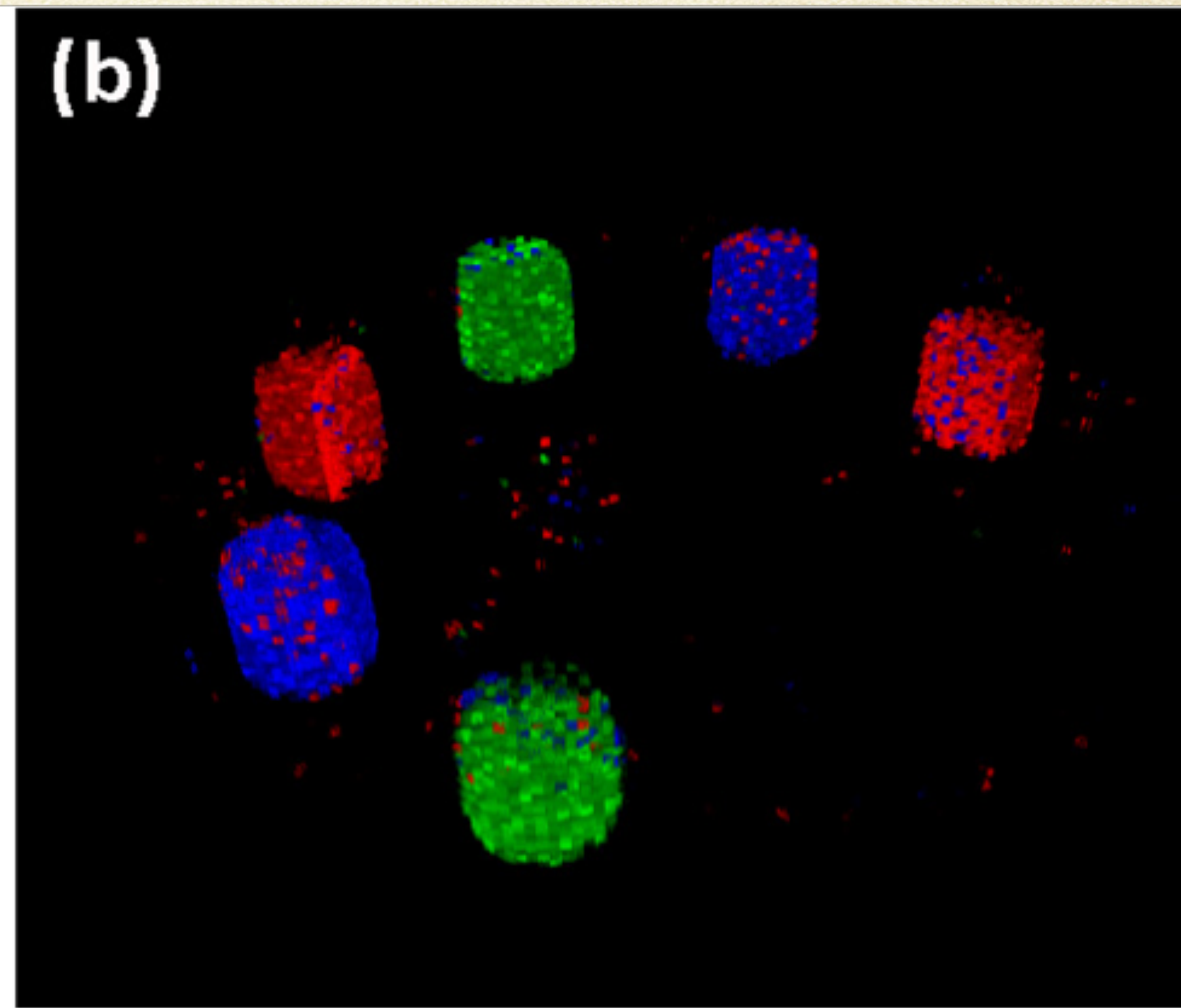
Figure 6: The cluster (event) rate of the GPX1 detector (blue markers) in collisions-on and collisions-off periods. The orange line is the expected cluster rate calculated in accordance with luminosity level at the ATLAS luminosity monitor. The green lines are fitted curves on the experimental data.

Ведется исследование методов идентификации веществ на рентгенограммах, используя информацию об энергии зарегистрированных фотонов.

Совместно с химиками МГУ ведутся работы по созданию новых типов контрастных веществ на основе лантаноидов. (Грант РФФ 22-15-00065)



Классическая 3D реконструкция фантома с образцами La, Nd и Gd



Те же данные, обработанные с учетом энергетической информации: La - красный; Nd - синий и Gd - зелёный.

Основная цель проекта с момента его утверждения - **научиться производить готовые комплекты (детектор+пакет программ) собственными силами.** Только это позволит производить детекторы **специализированные** для возникающих применений (медицина, биология, геология), которые будут отличаться от существующих аппаратов возможностью проводить анализ данных с использованием информации об энергии гамма квантов. **Ключевой элемент в конструкции таких детекторов - пиксельная микросхема.**

В стартовом варианте расчет был сделан на присоединение к международной коллаборации Titerix4. В 2023 году она вышла на уровне массового производства (и распределения его между участниками) таких чипов. Теоретически у нас есть законные права на использование этих чипов в любых своих разработках.

В данный момент участники этого проекта от ОИЯИ, работают с новым детектором в CERN.

Но отправлять эту электронику в ОИЯИ сейчас нет возможности.

В такой ситуации наиболее разумным видится вариант разработки и создания специальной пиксельной **именной микросхемы ОИЯИ (JIMed)** своими силами. Это позволит сохранить и развить накопленный в ОИЯИ десятилетний опыт и реализовать его в виде гибридного пиксельного полупроводникового энергочувствительного детектора и пакета программ, обеспечивающих его работу и реконструкцию данных.

Возникнет возможность создавать рентгенологическую аппаратуру **специализированную** для различных применений (медицина, биология, геология), которые будут отличаться от существующих аппаратов возможностью проводить анализ данных с использованием информации об энергии гамма квантов.

В истории ОИЯИ есть заметный положительный опыт разработки и мелкосерийного производства “собственных” микросхем, которые создавались в сотрудничестве разных групп ОИЯИ с разработчиком микросхем Солиным А.В. из ИЯП БГУ (Минск)

Название	Эксперимент	Кол-во	Год	Назначение и характеристики
Tetrode-BT, Tetrode-JFET	CMS ECAL, CERN	10000	1997	Одноканальный ЗЧУ р-п-р и р-JFET транзисторами
	TESLA, DESY			
	Астрофизическая обсерватория РАН, Н. Архыз			
	"ИСТРА", ИФВЭ			
Yustas		2000	1997	Одноканальный ЗЧУ для дозиметрических приборов
Katod-16-JFET Anod	Катодные стриповые камеры CMS, ЦЕРН	8000	1997-2001	8 каналов: ЗЧУ-Формирователь-BLR-Дискриминатор-LVDS
Anode-2m	Пропорциональные и дрейфовые камеры установки «ИСТРА-М», ИФВЭ, Протвино	4000	2003	8 каналов: ЗЧУ-Формирователь-BLR-Дискриминатор-LVDS
AS01T	Электромагнитный калориметр "Tower", ИФВЭ, Протвино	5000	2004	Одноканальный ЗЧУ-Формирователь-50-омный буфер, для детекторов емкостью до 2000 пФ
AS01PDA	GaAs детектором, ИФВЭ и ТГУ TESLA THCAL DESY	5000	2004	Одноканальный ЗЧУ-Формирователь-50-омный буфер, для детекторов емкостью до 200 пФ
ОКА-1	Пропорциональные и дрейфовые камеры установки «ОКА», ИФВЭ, Протвино	5000	2006	8 каналов: ЗЧУ-Формирователь-BLR-Дискриминатор-LVDS
MIC32, MIC1024	Кремниевые пиксельные детекторы установки СВД-2, ИФВЭ, Протвино	2000	2012	ИС MIC32: канала ИС MIC1024: 1024 канала ЗЧУ-Формирователь-ADC
AST-1-1	Straw детекторы NA64, CERN и тестовой зоны проекта NICA	10000	2004	8 каналов: Дифф. ЗЧУ-Форм.-BLR-Дискр.-Одновибратор-LVDS
AST-1-2	Методическая работа со straw, Micro-Pattern Gaseous Detectors (MPGDs) детекторами, ОИЯИ, НИИ ЯП БГУ	1000	2015	8 каналов: Дифференциальный ЗЧУ-Формирователь-Дифференциальный 50-омный буфер
ОКА-2BC	Пропорциональные и дрейфовые камеры установки «ОКА», ИФВЭ, Протвино	16000	2017	8 каналов: ЗЧУ-Формирователь-BLR-Дискриминатор-Одновибратор-LVDS
Ampl-8.10, Ampl-8.11 Ampl-8.52	Мюонные системы экспериментов PANDA (FAIR), SPD (ОИЯИ)	2000	2021	Ampl-8.10, Ampl-8.11: 8-канальные усилители тока на каскаде Раша. Ampl-8.52: 8-канальный усилитель тока в виде каскада Раша-Формирователь
Всего разработано больше 20 различных микросхем и произведено более 70000 штук.				

2.4 Участвующие лаборатории ОИЯИ

ЛРБ - Бугай А.Н., Чижов А.В.

ЛНФ - Ахмедов Г.С., Бериков Д, Копач Ю.Н.

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

Обеспечение кадрами

2.4 Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
Институт кристаллографии РАН	РФ	Москва	<u>Асадчиков В.Е.</u>	
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ».	РФ	СПб	<u>Потрахов Н.Н.</u>	Соглашение о сотрудничестве
МГУ	РФ	Москва	<u>Медведев О.С.</u> <u>Шашурин Д.А.</u> <u>Суслова Е.А.</u>	Грант РФФ 22-15-00065
Акционерное общество "Дизайн центр " <u>Кристал</u> "	РФ	Москва	Адамов Д.Ю.	Соглашение о сотрудничестве
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Северо-Западный окружной научно-клинический центр им. Л. Г. Соколова ФМБА»	РФ	СПб	<u>Светликов А.В.</u> Гуревич В.С.	Соглашение о сотрудничестве
Общество с ограниченной ответственностью «БРС»	РФ	Москва	Бедный И.В.	Соглашение о сотрудничестве
Институт ядерных проблем БГУ (НИИ ЯП БГУ)	Беларусь	Минск	<u>Солин А.В.</u> ;	Соглашение о сотрудничестве
Национальный исследовательский Томский государственный университет	РФ	Томск	<u>Толбанов О.П.</u>	Соглашение о сотрудничестве
Институт физики полупроводников СО РАН	РФ	Новосибирск	Сидоров Г. Ю.	Соглашение о сотрудничестве
National Center for Radiation Research and Technology, Egyptian Atomic Energy Authority	Egypt	Cairo	<u>O.I.H Sallam</u>	
Department of Reactor Physics, Nuclear Research Center, Egyptian Atomic Energy Authority	Egypt	Cairo	Dr. <u>A.M.A Hassan</u>	

Обеспечение кадрами

№№ п/п	Категория работников	ФИО	Подразделение	Должность	Сумма FTE
1.	научные работники	Шелков Г.А.	ЛЯП НЭОВП	ВНС	1
		Рожков В.А.		МНС	1
		Гонгадзе А.		Нач. Сектора	0,2
		Терещенко В.В.		Нач. Сектора	0,3
		<u>Абдельшакур Э.</u>		СНС	1
		<u>Кручонок В.Г.</u>		СНС	0,6
		Сотенский Р.		МНС	1
2.	Инженеры	Лапкин <u>А.В.</u>	ЛЯП НЭОВП	инженер	1
		<u>Каурцев Н.Н.</u>		инженер	0,6
		Малинин С.А		инженер	1
3.	специалисты				
4.	рабочие				
	Итого:				7,7

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления
Проекта**

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)	150	30	30	30	30	30
	Материалы	100	20	20	20	20	20
	Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	600	100	150	200	100	50
	Пуско-наладочные работы						
	Услуги научно- исследовательских организаций	80	15	15	20	20	10
	Приобретение программного обеспечения						
	Проектирование/строительство						
	Сервисные расходы (планируются в случае прямой принадлежности к проекту)						
Необходимые ресурсы	Нормо-час	Ресурсы					
		– сумма FTE,					
		– ускорителя/установки,					
		– реактора,.....					
Источники финансирования	Бюджетные средства	Бюджет ОИЯИ (<i>статьи бюджета</i>)	930				
	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования	Грант РНФ	7 млн руб.	7 млн руб.		

2.4 Результаты сопутствующей деятельности

Список защищенных диссертаций к.ф.м.н. - 3

Смолянский П.И. - 2017; Кожевников Д.А. - 2019; Кручонок В. - 2021

Дипломы Магистров -19 :

2019 - МФТИ - Андрияшен В. (Украина); Черепанова Е.А.

Египт. Almansora Univ. - Rahma Abo-Zaid, Mohamed Mitwall
Beni Sufe Univ. - Ahmed Refaat.

2020 - МФТИ - Расторгуев Д.Д. БГУ - Будянский А.

Египт. Alexandria Univ. - Mohamed Hammam
Zagzeg Univ. - Rfrriman Reda.
Cairo Univ. - Reem Ahmed.

2021 - **Египт.** Nuclear Research Center. - Wall Abdelrehim.

Alexandria Univ. Cancer Center - Alla Elsadieq

2022 - МИРЭА - Ромашихин М.

Египт. Beni Sufe Univ. - Hayam Elzine.

2023 - МИФИ - Чыонг Бао Фи (Вьетнам); МУД - Логинов А.; Каримова М.

Египт. Seny Univ. - Tareq Hammam. Facility of Girls - Marina Shalpi.

2.4.2 Полученные гранты. РФФ 2022; 22-15-00072. (3 года по 7 млн.руб/год)

Стипендии ОМУС - Лапкин А.В. (2020 и 2022), Рожков В.А. (2019,2021,2023)

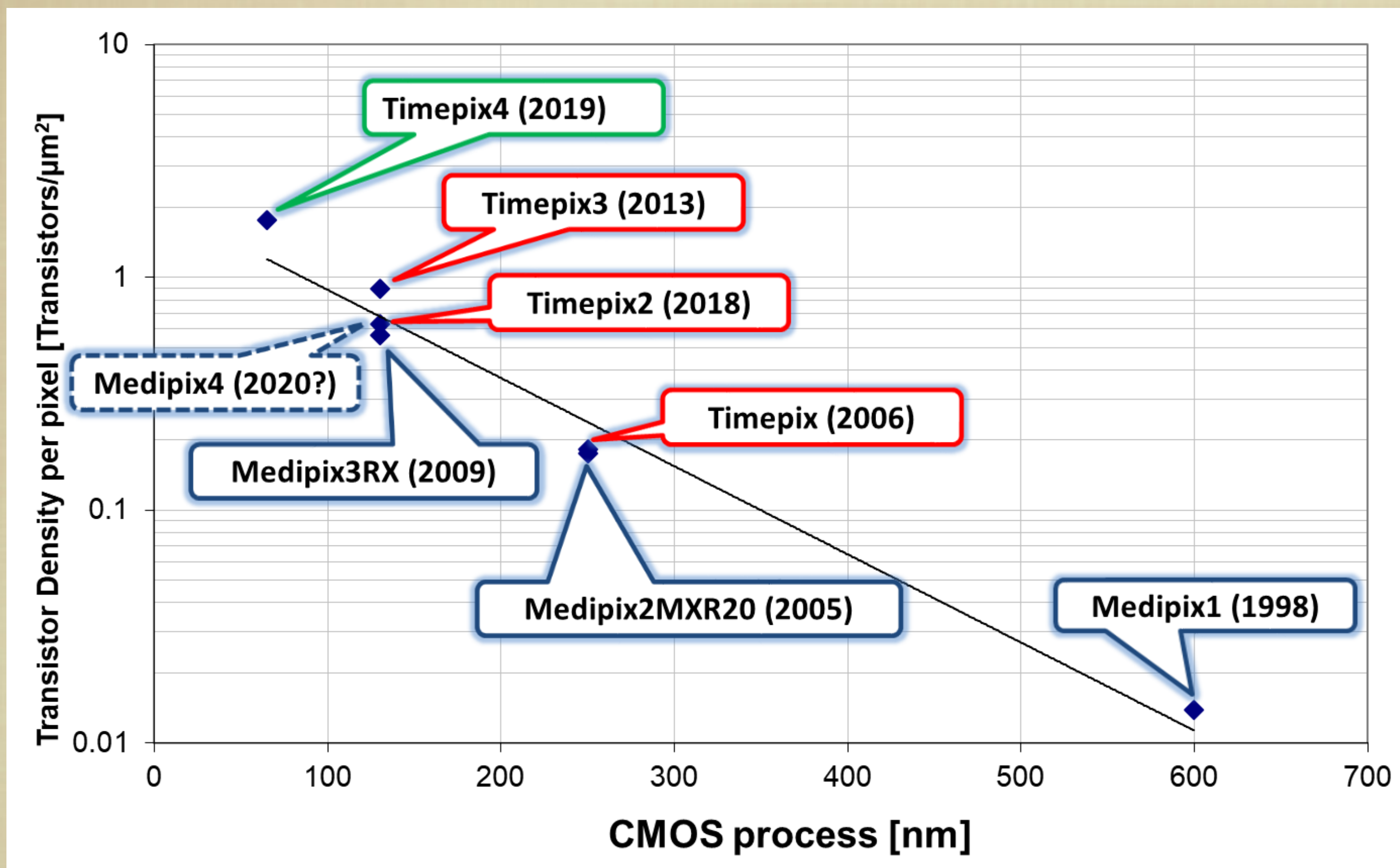
2.4.4 Получено три патента . Патенты (RU) 2659717, 2018; 2672039, 2018; 2751458, 2020.

Публикации за 2020-2022гг.

Year	Title	Authors	DOI	Reference
2022	New Composite Contrast Agents Based on Ln and Graphene Matrix for Multi-Energy Computed Tomography	E.Syslova, A.Kozlov, D.Shahurin, V.Rozhkov, R.Sotenskii, S.Maximov, S.Savilov, O.Medvedev, G.Chelkov	10.3390/nano12234110	Nanomaterials 2022,12(23),4110 (Q1)
2022	Development of La-graphen composit contrasting agents for photon-counting compudet tomography.	E.Syslova, D.Shahurin, A.Kozlov, S.Maximov, V.Rozhkov, R.Sotenskii, S.Savilov, J.Medvedev, G.Chelkov	10.1142/S1793604722500291	Functional Materials Letters. Vol.15 No.07n08. (Q3)
2021	Measurement of the radiation environment of the ATLAS cavern in 2017–2018 with ATLAS-GaAsPix detectors	I. Boyko, P. Burian, M. Campbell, G. Chelkov, E. Cherepanova, B. Di Girolamo, A. Gongadze, J. Janecek, D. Kharchenko, U. Kruchonak, A. Lapkin, Y. Mora Sierra ⁵ , M. Nessi, L. Pontecorvo, S. Pospisil, D. Rastorguev, V. Rozhkov, P. Smolyanskiy, M. Suk, I. Stekl, O. Tolbanov, A. Tyazhev and A. Zarubin	10.1088/1748-0221/16/01/P01031	JINST Vol.16 P01031 (Q2)
2021	Timepix pixel detector data pre-processing for SPECT	V. Rozhkov, A. Zhemchugov, A. Leyva, P. Smolyansky.		Journal of Physics: Conference Series
2020	Transition radiation measurements with a Si and a GaAs pixel sensor on a Timepix3 chip	F. Dachs a b, J. Alozy a, N. Belyaev c, B.L. Bergmann d, M. van Beuzekom e, T.R.V. Billoud, P. Burian, P. Broulim, M. Campbell, G. Chelkov ... S. Pospisil ... A. Romaniouk ... P. Smolyanskiy ...	10.1016/j.nima.2019.03.092	NIMA Vol.958, 162037 (Q2)
2020	Visualization of radiotracers for SPECT imaging using a Timepix detector with a coded aperture	V. Rozhkov, G. Chelkov, I. Hernandez, O. Ivanov, D. Kozhevnikov, A. Leyva, d, A. Perera, D. Rastorguev, e, P. Smolyanskiy, L. Torres and A. Zhemchugov	10.1088/1748-0221/15/06/p06028	JINST Vol.15 P06028 (Q2)
2016	Experimental X-ray microtomograph MARS as the future new tool for the evaluation of infrarenal aneurysms rupture risk	A.Svetlikov, A.Zhemchugov, D.Kozhevnikov, G.Shelkov, V.Gurevich, G Khubulava	10.1007/s00270-016-1405-3	CardioVascular and Interventional Radiology (Q2)
2020-2021	За этот период участниками проекта было сделано свыше 20 докладов/сообщений на различных конференциях и школах			

Спасибо за внимание!

Результат 20-летней работы коллаборации Medipix (данные 2019года)



- 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
- INFN Italy

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