

# **НОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Тема 04-2-1126-2015/2020**

**ОТЧЕТ О ВЫПОЛНЕНИИ ТЕМЫ И  
ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО ПРОДЛЕНИЮ**

**Г.А. Шелков**

# НОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ОТЧЕТ О ВЫПОЛНЕНИИ ТЕМЫ в 2017-2020гг.

Руководитель темы: Г.А. Шелков

Заместитель: А.С. Жемчугов

В теме 3 проекта и одна активность:

1. Новые полупроводниковые детекторы для фундаментальных и прикладных исследований.  
(Руководитель проекта: Г.А.Шелков, А.С.Жемчугов)
2. Развитие техники эксперимента и прикладные исследования на монохроматических пучках позитронов - PAs. [Семинар 21.03.2020](#).  
(Руководители проекта: А.Г.Кобец, П. Хородек, Научный руководитель И.Н.Мешков)
3. GDN&SPACECHARM (Руководители проекта: Ю.А.Усов, А.Ковлик.) [Продлен до 2020 года](#)
4. Создание установки для проведения измерений с тестовыми пучками электронов в ЛЯП (Линак-200). Руководители [активности](#): В.В.Кобец, М.И.Госткин, Г.Д.Ширков

ПТП ОИЯИ 2020 год

# Новые полупроводниковые детекторы для фундаментальных и прикладных исследований

(Руководители проекта: Г.А.Шелков, А.С.Жемчугов)

## Авторы проекта

### ОИЯИ ЛЯП:

В.В.Андрияшен, А.Л.Гонгадзе, М.И.Госткин, А.В.Гуськов,  
А.С.Жемчугов, Д.А.Кожевников, Н.К.Кузнецов, В.Г.Кручонок,  
А.В.Лапкин, А. Лейва, А.А.Ноздрин, С.Ю.Пороховой, Д.Д.Расторгуев,  
В.А.Рожков, П.И.Смолянский, Е.А.Черепанова, С.Шакур, Г.А.Шелков

ОИЯИ ЛЯР: С.В. Митрофанов

ОИЯИ ЛФВЭ: А.В. Аверьянов, С.В. Герценбергер, А.М. Короткова,  
Д.О. Кривенков, Ю. Лукстиньш

ПТП ОИЯИ 2020 год

# Исучаемая проблема и основная цель исследований

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

Развитие инфраструктуры для исследований свойств полупроводниковых детекторов, включая тесты на пучках частиц для использования группами ОИЯИ и институтов стран-участниц.

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).



# Ожидаемые результаты по завершению этапов темы или проекта

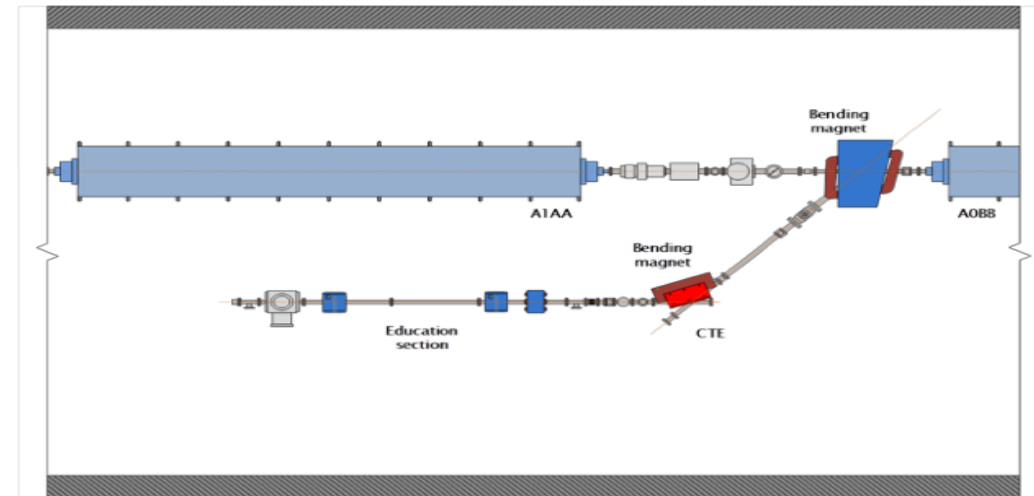
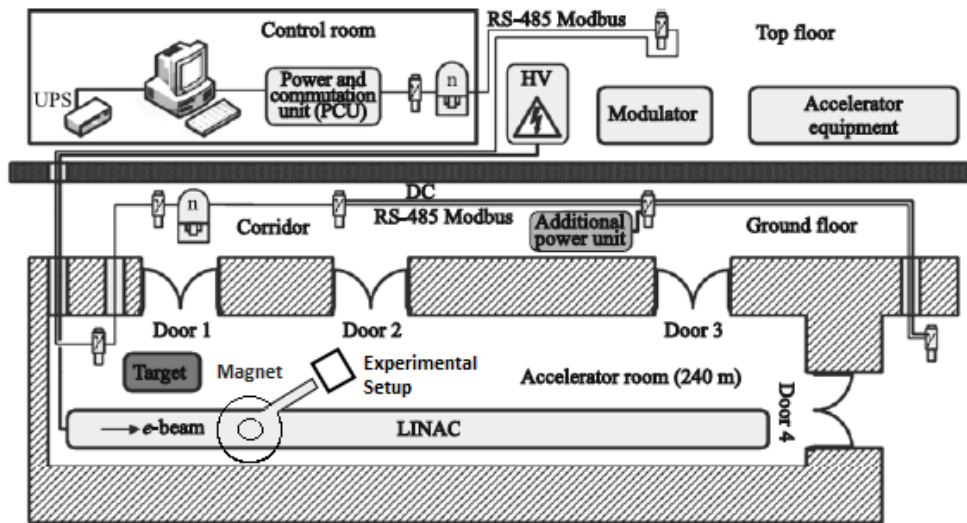
1. Исследование радиационной стойкости GaAs:Fe.
2. Участие в создании модулей калориметра FCAL для будущих коллайдеров.
3. Измерение отклика пиксельных детекторов Timerix и развитие методов идентификации частиц.
4. Усовершенствование существующих стендов по измерению характеристик полупроводниковых детекторов.
5. Создание микротомографа с детектором большой площади и большим геометрическим увеличением.
6. Разработка полнофункционального блока электроники считывания для микросхем Timerix и подготовка к созданию детекторов на базе микросхемы MediPix4.
7. Разработка ПО для моделирования пиксельных детекторов MediPix.
8. Проведение сканирования биоматериала в рамках программы совместных исследований с медиками.
9. Проведение сканирования руд и минерального сырья в рамках программы совместных исследований с геофизиками.
10. Реализация метода СПЕКТ с помощью детекторов MediPix.
11. Ввод в эксплуатацию первой очереди линейного ускорителя электронов.

ПТП ОИЯИ 2020 год

# Отчет о выполнении проекта в 2017-2020 гг.

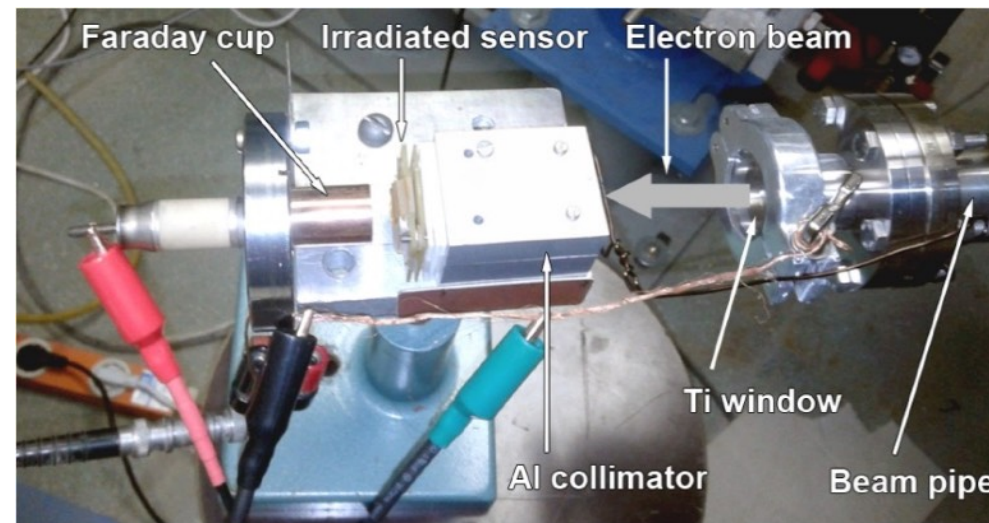
## 1. Исследование радиационной стойкости GaAs:Fe.

**Radiation hardness of GaAs:Cr and Si was investigated on LINAC-200**

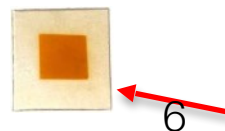
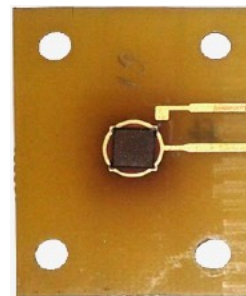


800 MeV electron linear accelerator (LINAC-800) is under construction at JINR. 20 MeV beam channel was used for sensors irradiation. Beam parameters:

- bunch current up to 10 mA,
- duration 2  $\mu$ s,
- frequency from 1 to 10 Hz.

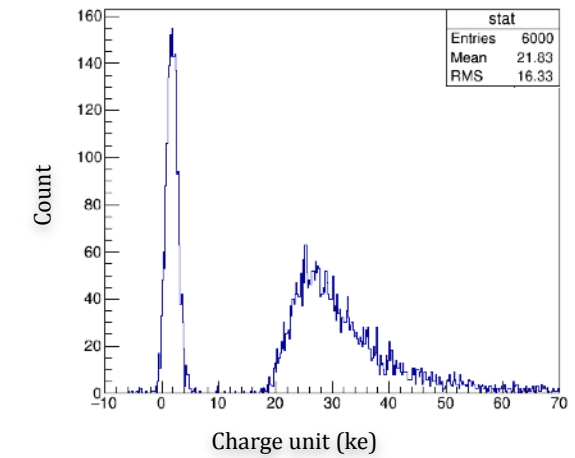
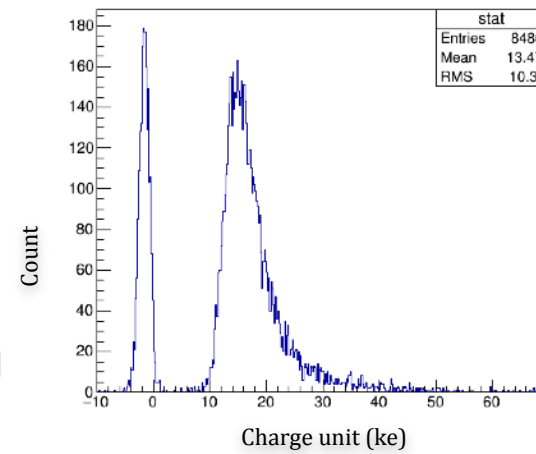
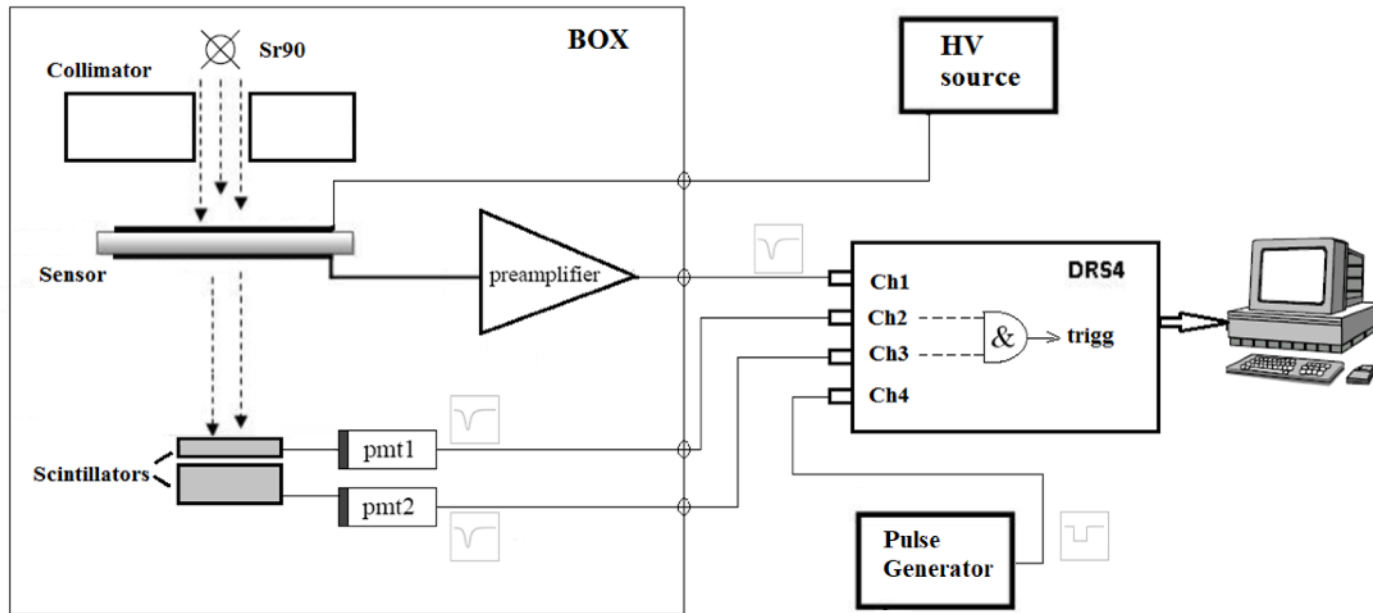


Electron beam is shaped by the collimator 5x5 mm passes through the **5x5 mm sensor**, radiochromic film and finally reaches the copper Faraday cup. Measured beam charge is converted to absorbed dose using GEANT 4 simulation.



Uniformity of beam distribution was controlled by **radiochromic film**

# Setup for CCE and I-V measurement



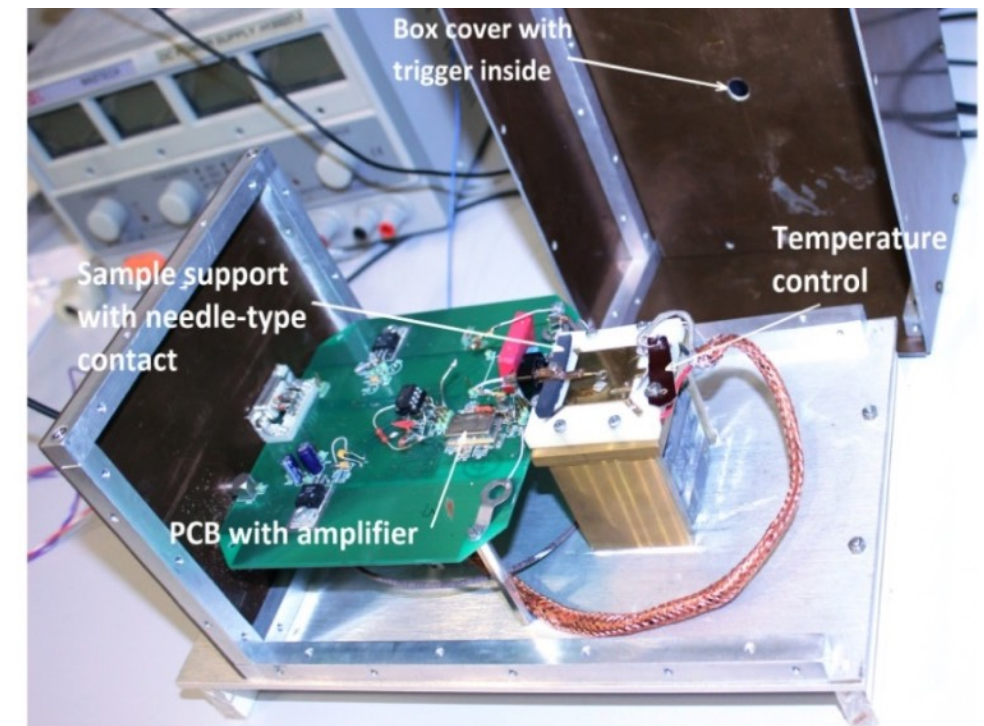
MIP spectra: **Si**,  $U_{\text{bias}} = 100 \text{ V}$     **GaAs:Cr**,  $U_{\text{bias}} = -200 \text{ V}$

The peak near zero corresponds to the pedestal distribution.

Electrons from  $\text{Sr}^{90}$  source are well collimated and triggered by 2 scintillators. It allows to get the signal only from electrons passed through the sensor with energy from 1 to 2.2 MeV and collect spectra close to **MIP** (minimum ionizing particle). **Pedestal** was collected separately, trigger started from the generator under the same conditions. The width of pedestal determines the resolution of the sensor+amplifier setup.

For the direct comparison with GaAs:Cr, two n-type silicon pad sensors were studied:

Dose collection scheme:  $\sim 10$  steps by 50 or 200 kGy



Sensor type	Size (mm <sup>3</sup> )	Sensitive area (mm <sup>2</sup> )	Donor concentration (cm <sup>-3</sup> )
GaAs:Cr	5x5x0.3	5x5	$\sim 10^{17}$
Si (1) (RIMST)	5x5x0.25	3.6x3.6	$(0.8-1.6) \times 10^{11}$
Si (2) (HPK)	5x5x0.4	3.5x3.5	$(1.3-3.5) \times 10^{11}$

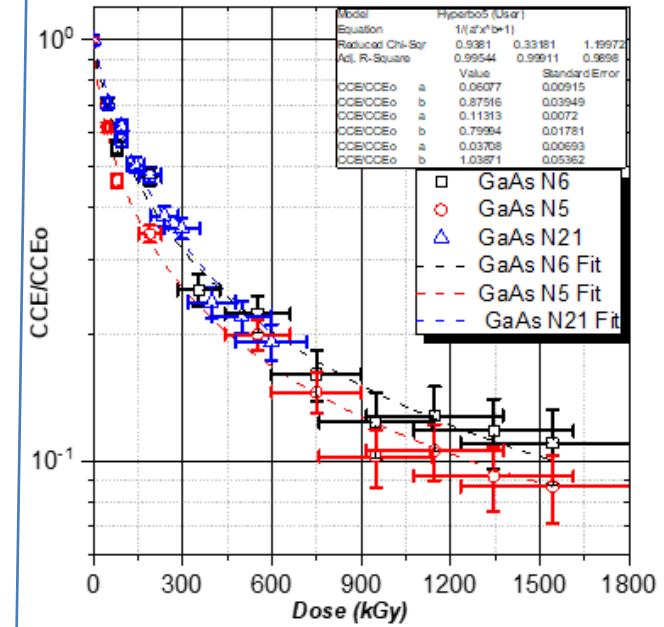
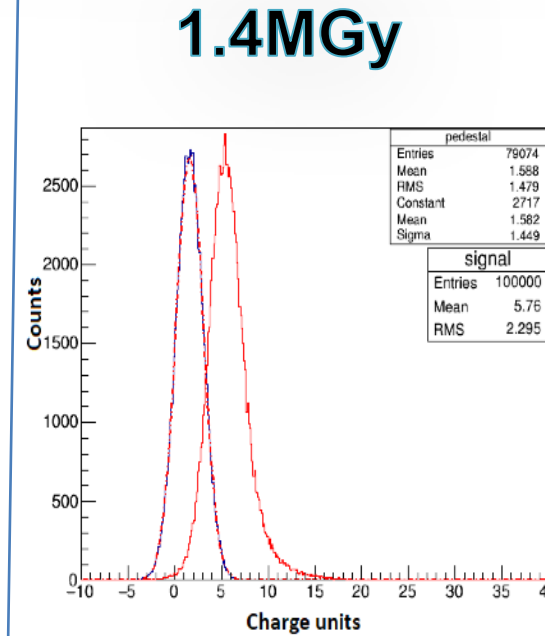
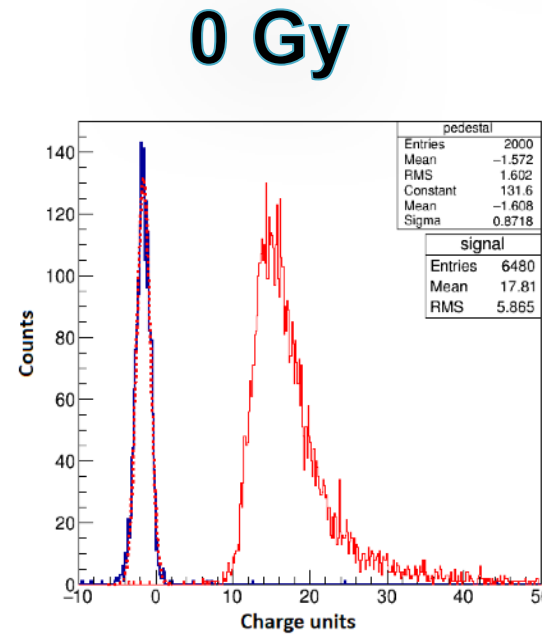
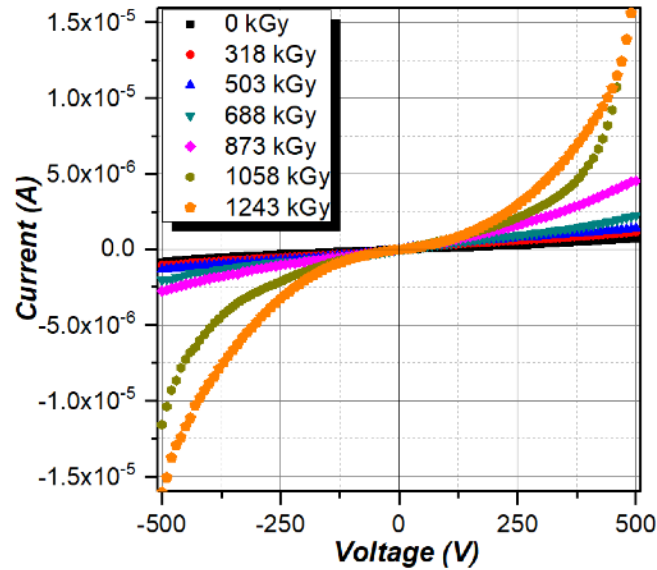


# I-V and CCE after irradiation

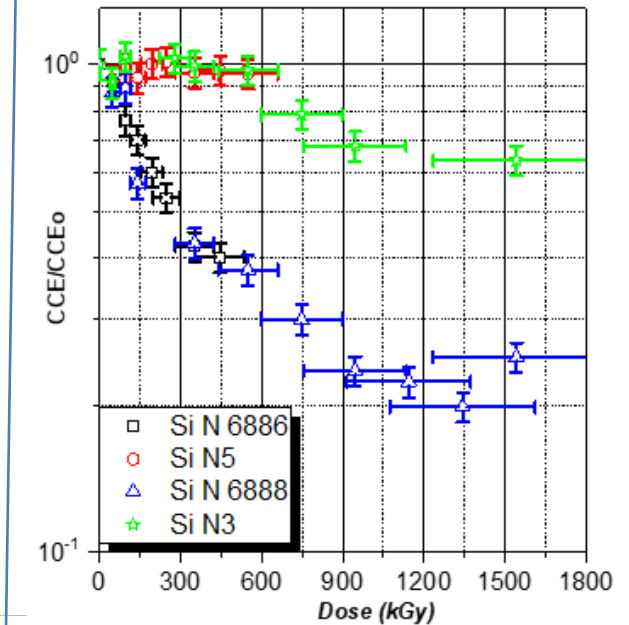
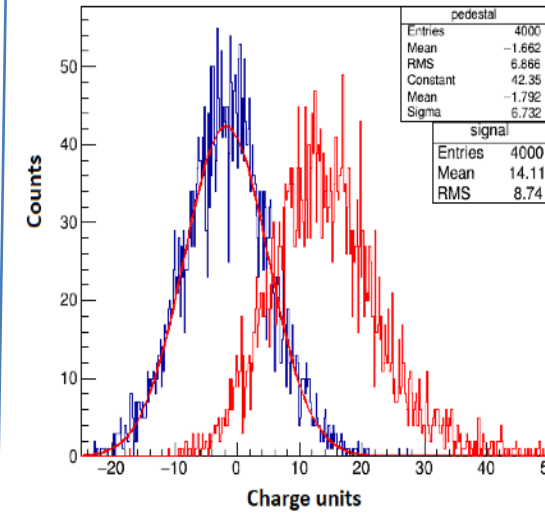
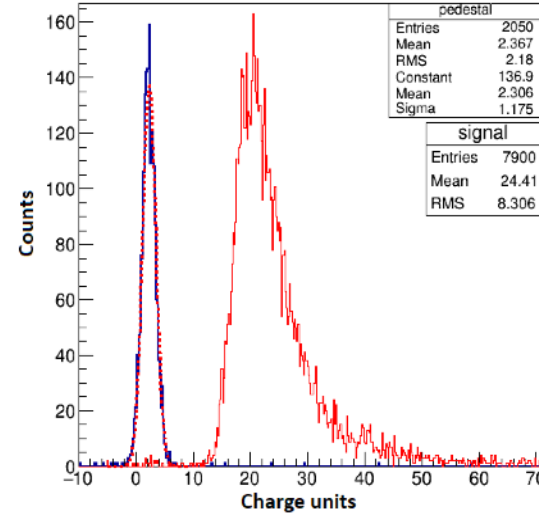
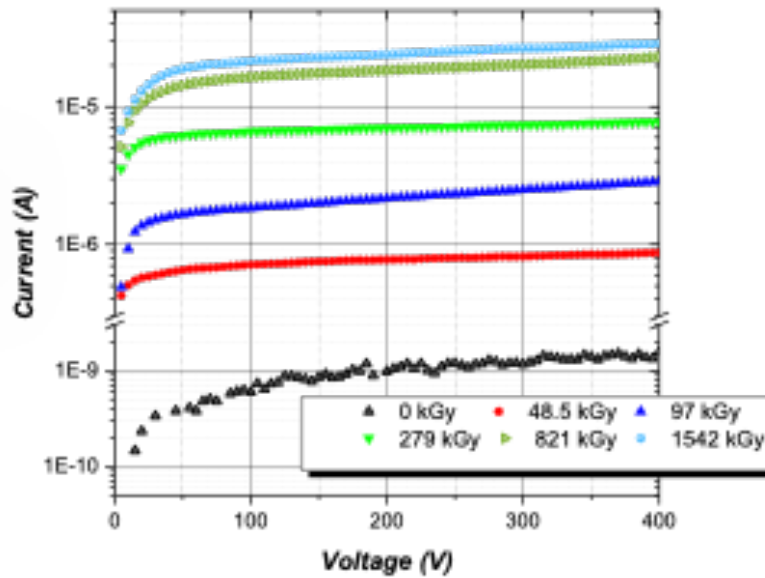
## I-V

## Charge collection (CCE)

GaAs:Cr



Si



Si - dark current increases almost four orders of magnitude!  
 GaAs:Cr - dark current increases several times.

Si - CCE remains above 80% of initial, noise strongly increases.  
 GaAs:Cr - CCE drops 10 times, noise doesn't rise.

# Conclusions

- ❑ Irradiation of the high-resistive and barrier GaAs:Cr sensors and the normal and two n-type Si sensors by 21 MeV electron beam of was performed at the LINAC accelerator. Radiation damage in the sensors was studied.
- ❑ After dose of 1.5 MGy :
  - in GaAs:Cr sensors signal CCE drops to ~10% of initial, when in Si above 80%
  - dark current grows 3-7 times in GaAs:Cr and 4 orders of magnitude in Si.
  - In Si full depletion voltage is rising with irradiation, more strong for tick HPK sensors.
- ❑ At room temperature, the signal-to-noise ratio in GaAs: Cr sensors is higher than that for Si sensors after a dose of 1.5 MGy, and vice versa when cooled to -20 °C.

## RADIATION HARDNESS OF GaAs:Cr AND Si SENSORS

### IRRADIATED BY ELECTRON BEAM

**U.Kruchonak<sup>a,1</sup>, S. Abou El-Azm<sup>a</sup>, K. Afanaciev<sup>b</sup>, G. Chelkov<sup>a</sup>, M. Demichev<sup>a</sup>, M. Gostkin<sup>a</sup>,  
A. Guskov<sup>a</sup>, E. Firu<sup>c</sup>, V. Kobets<sup>a</sup>, A. Leyva<sup>a,d</sup>, A. Nozdrin<sup>a</sup>, S. Porokhovoy<sup>a</sup>, A.  
Sheremetyeva<sup>a</sup>, P. Smolyanskiy<sup>a</sup>, A. Torres<sup>e</sup>, A. Tyazhev<sup>f</sup>, O. Tolbanov<sup>f</sup>, N. Zamyatin<sup>a</sup>, A.  
Zarubin<sup>f</sup> and A. Zhemchugov<sup>a</sup>**

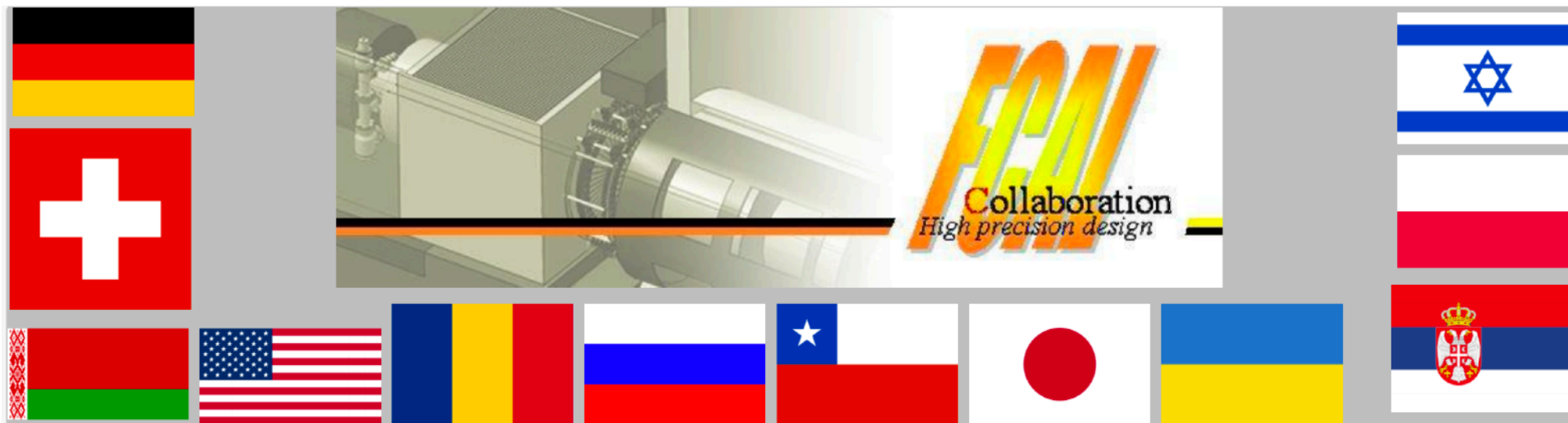
<sup>a</sup> JINR, Dubna, Russia, <sup>b</sup> INP, Minsk, Belarus, <sup>c</sup> ISS, Bucharest, Romania, <sup>d</sup> CEADEN, Havana, Cuba  
<sup>e</sup> InSTEC, Havana, Cuba, <sup>f</sup> TSU, Tomsk, Russia

<sup>1</sup> Corresponding author *E-mail*: [Uladzimir.Kruchonak@cern.ch](mailto:Uladzimir.Kruchonak@cern.ch)

Submitted to NIMA-D

## Отчет о выполнении проекта в 2017-2020гг.

### 2. Участие в создании модулей калориметра FCAL для будущих коллайдеров.



#### 54 members from 14 institutes :

*AGH University of science & technology, Krakow, Poland*

*CERN, Geneva, Switzerland*

*DESY, Germany*

*IFJ PAN, PL-31342, Krakow, Poland*

*ISS, Bucharest, Romania*

*JINR, Dubna, Russia*

*National Research Tomsk State University NI TSU, TSU / Russia*

*NC PHEP, Belarusian State University, Minsk, Belarus*

*Pontificia Universidad Catolica de Chile, Santiago, Chile*

*Taras Shevchenko National University of Kiyv, Ukraine*

*Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel*

*Tohoku University, Sendai, Japan*

*University of California, Santa Cruz, USA*

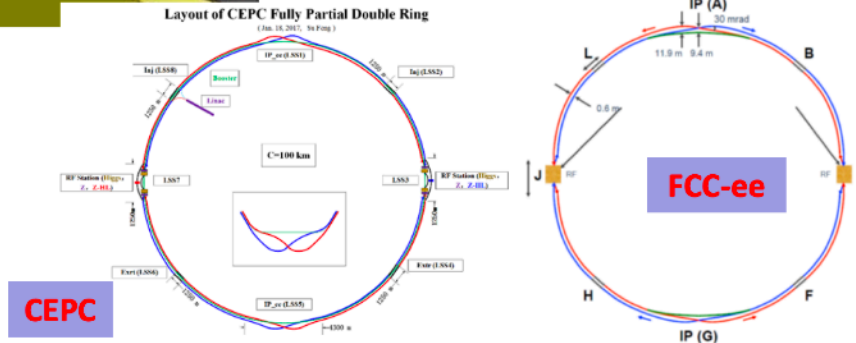
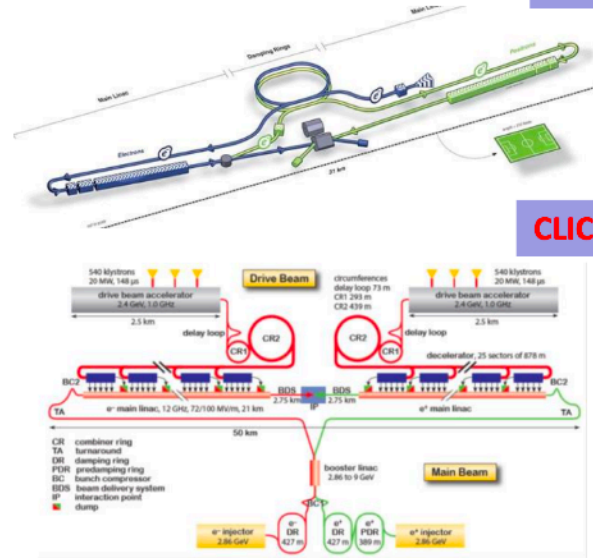
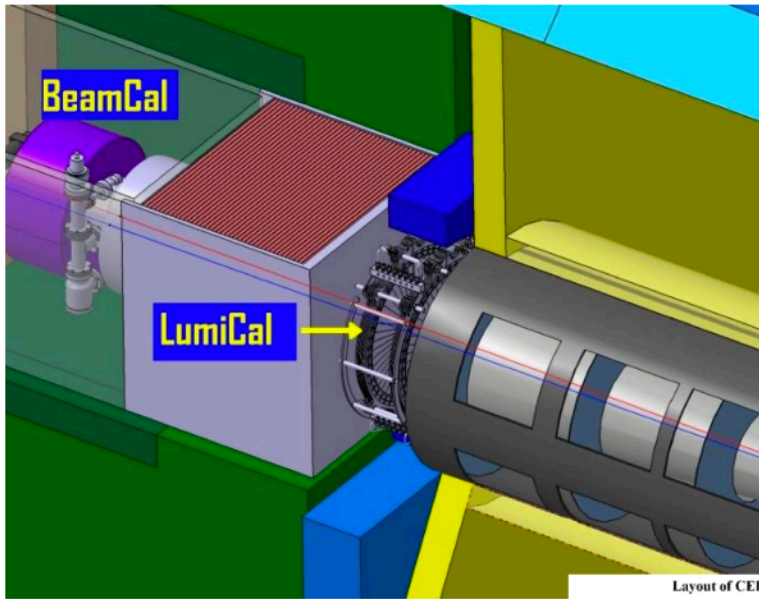
*Vinca Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Serbia*

We are grateful to the support of the BMBF-JINR program for detector R&D.

FCAL is supported by national funding agencies and programs of the European Community.



# R&D for special calorimeters in the very forward region of future detectors at an e+e- collider.



- compact,
- precise shower position measurement
- read out very fast
- radiation hardness

## LumiCal and BeamCal in future e+e- accelerators

### LumiCal provide:

- precise determination of the integrated luminosity by measuring the rate of Bhabha events at low angles.

### BeamCal:

- device for fast, bunch-by-bunch crossing luminosity using beamstrahlung. Radiation hardness is an issue.

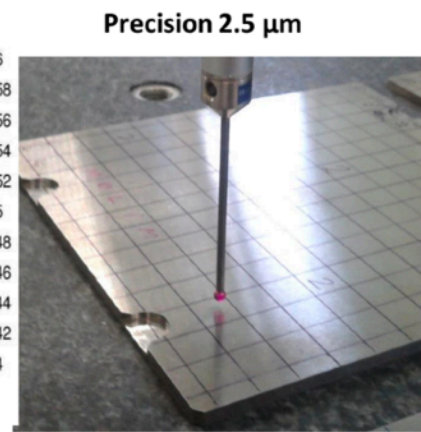
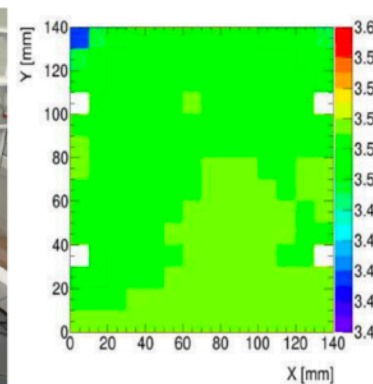
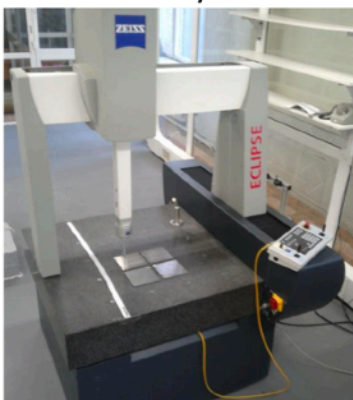
### LumiCal and BeamCal:

- improving the hermeticity of the detector by providing electron and photon identification down to polar angles of a few mrad.
- to extend calorimetric coverage to small polar angles. Important for physics analysis.

## LumiCal and BeamCal – electromagnetic sampling calorimeters

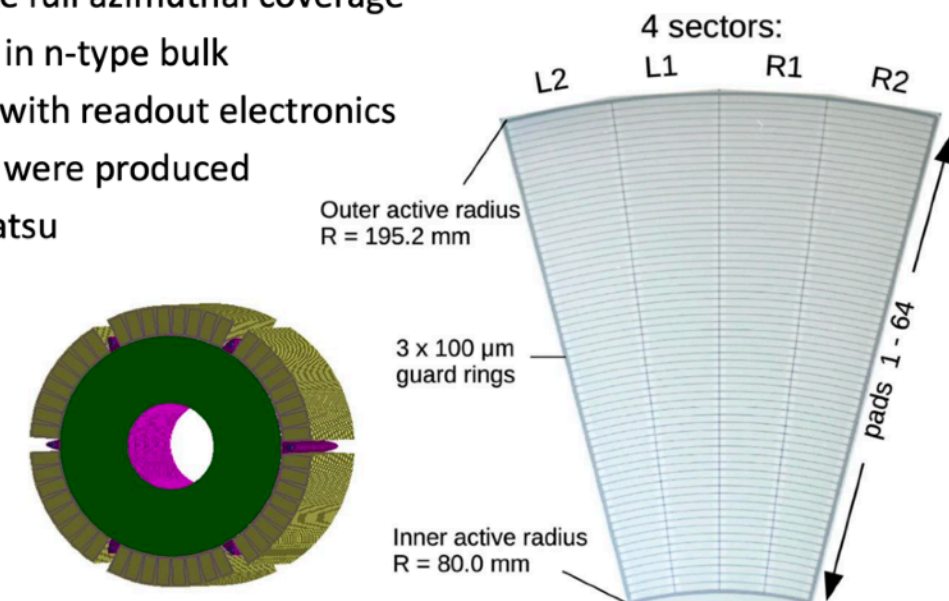
- The technology of a Semiconductor-Tungsten sandwich calorimeter is under investigation:  
Sensors for the LumiCal - Si; for the BeamCal GaAs or sapphire.
- layers of 140x140x3.5 mm (1 X<sub>0</sub>) thick tungsten plates with 1 mm gap for silicon sensors (30 for ILC, 40 for CLIC)
- Good flatness ~30 μm were achieved

Zeiss 3D coordinate measurement system



## LumiCal sensor

- Silicon sensor, 320 μm thickness
- 64 radial pads, pitch 1.8 mm
- 4 azimuthal sectors in one tile, each 7.5 degrees
- 12 tiles make full azimuthal coverage
- p+ implants in n-type bulk
- DC coupled with readout electronics
- 40 modules were produced by Hamamatsu





# LumiCal and BeamCal in future e+e- accelerators

## LumiCal provide:

- precise determination of the integrated luminosity by measuring the rate of Bhabha events at low angles.

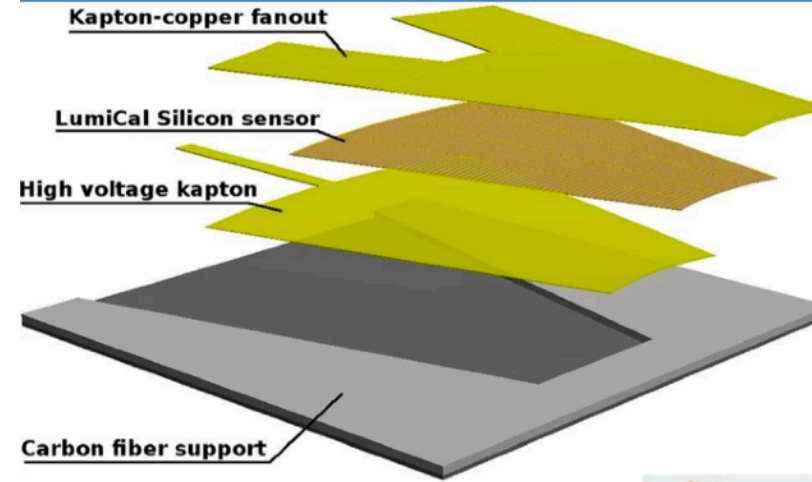
## BeamCal:

- device for fast, bunch-by-bunch crossing luminosity using beamstrahlung. Radiation hardness is an issue.

## LumiCal and BeamCal:

- improving the hermeticity of the detector by providing electron and photon identification down to polar angles of a few mrad.
- to extend calorimetric coverage to small polar angles. Important for physics analysis.

# Detector plane assembly



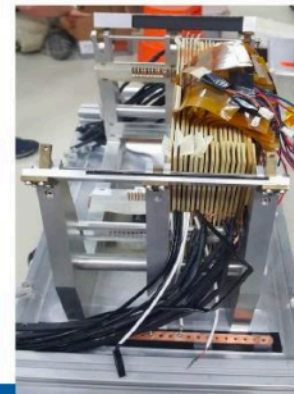
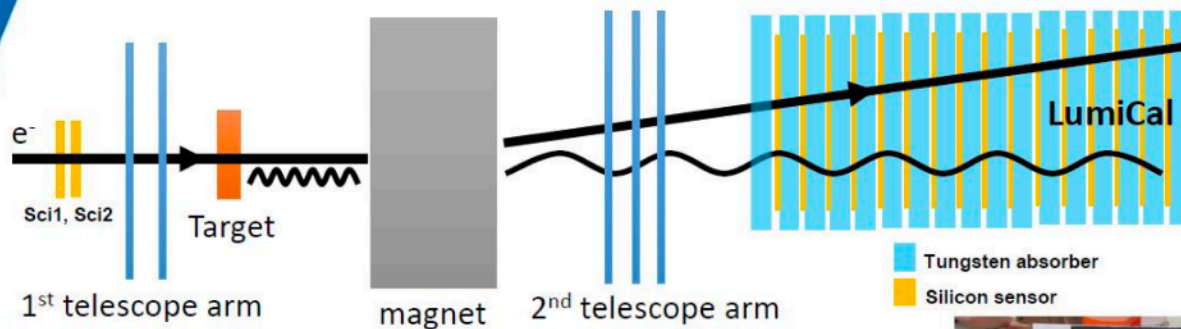
total thickness 650 μm



## Experimental set-up

## LumiCal test at DESY in 2019

- ❑ Test beam at DESY with 1 – 6 GeV electron beam
- ❑ ALPIDE telescope – 2 arms, 1<sup>st</sup> arm consists of 2 layers and 2<sup>nd</sup> arm consists of 3 layers;
- ❑ Target of tungsten with 90μm thickness;
- ❑ Lumical calorimeter consists of 16 Si sensors with one absorber layer placed in front of each active sensor layer;



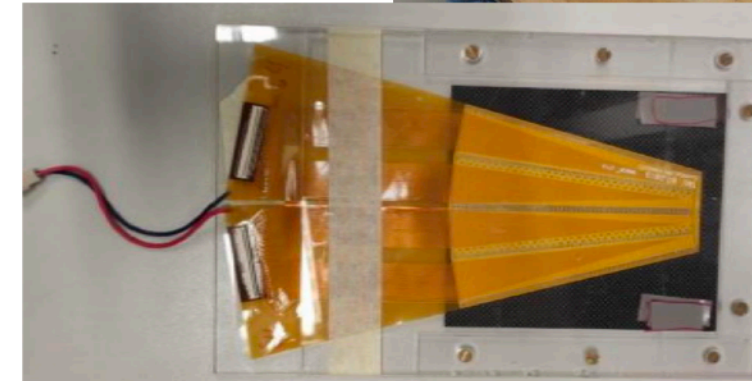
## Experimental set-up

The ALPIDE chip measures 15x30 mm and includes a matrix of 512x1024 pixel cells

LumiCal plane consist of 256 pads, during the test beam only 128pads were read-out using an APV-25 board

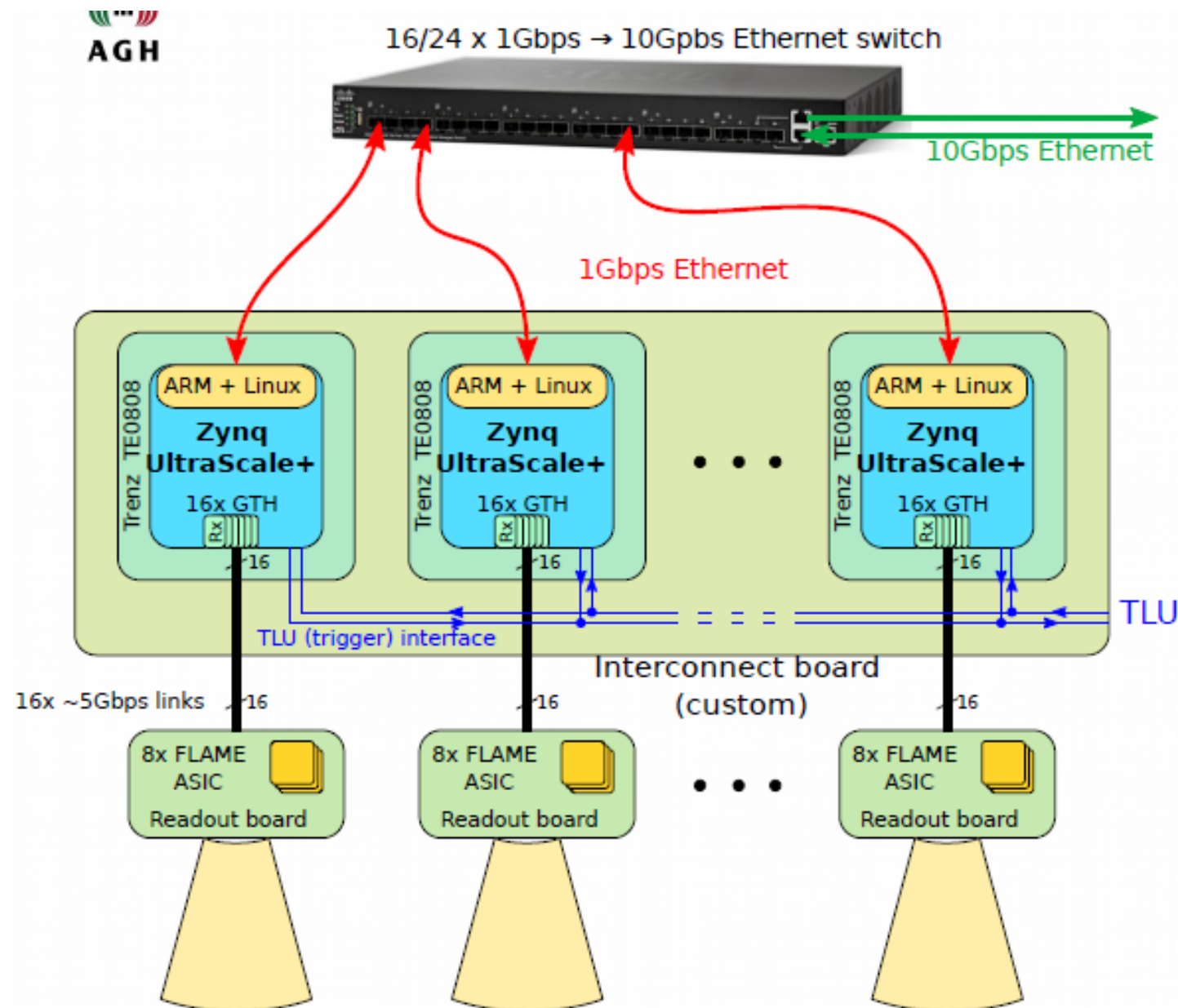
3 million events acquired in LumiCal

Work is ongoing on analysing November 2019 test beam data





# FCAL общая схема readout электроники



Каждый сенсор FCAL присоединен к плате оцифровки readout board

Данные с каждой платы оцифровки обрабатываются одной плато Trenz с ПЛИС

Обработанные данные отправляются на сервер по 10G Ethernet

Основная часть прошивки ПЛИС на платах Trenz - модуль DSP (разработан А.В. Лапкиным)

## 3. Измерение отклика пиксельных детекторов Timerix и развитие методов идентификации частиц.

### **Analysis of the Radiation Field in ATLAS Cavern Using 2017-2018 Data from the ATLAS-GaAsPix Network**

---

I. Boyko,<sup>a</sup> M. Campbell,<sup>b</sup> E. Cherepanova,<sup>a</sup> G. Chelkov,<sup>a,c,d</sup> D. Dedovich,<sup>a</sup> B. Di Girolamo,<sup>b</sup>  
A. Gongadze,<sup>a</sup> J. Janecek,<sup>e</sup> D. Kharchenko,<sup>a</sup> U. Kruchonak,<sup>a</sup> M. Nessi,<sup>b</sup> L. Pontecorvo,<sup>b</sup> S.  
Pospisil,<sup>e</sup> Y. Mora Sierra,<sup>e</sup> P. Smolyanskiy,<sup>a</sup> M. Suk,<sup>e</sup> I. Stekl,<sup>e</sup> O. Tolbanov,<sup>c</sup> A. Tyazhev,<sup>c</sup> A.  
Zarubin,<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*Joint Institute for Nuclear Research,  
Dubna, Russia*

<sup>b</sup>*CERN,  
Geneva, Switzerland*

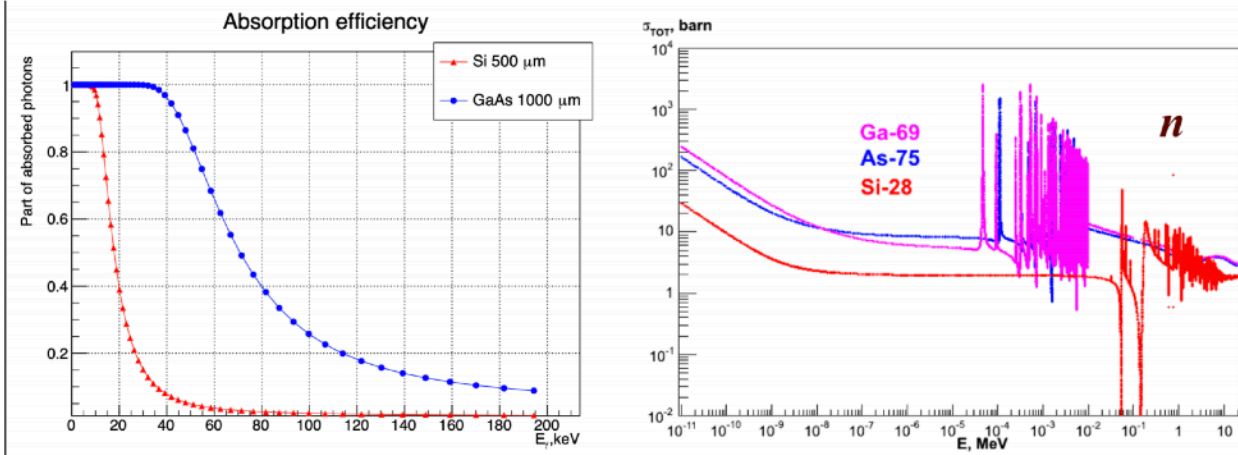
<sup>c</sup>*Tomsk State University, Tomsk, Russia*

<sup>d</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology,  
Dolgoprudny, Russia*

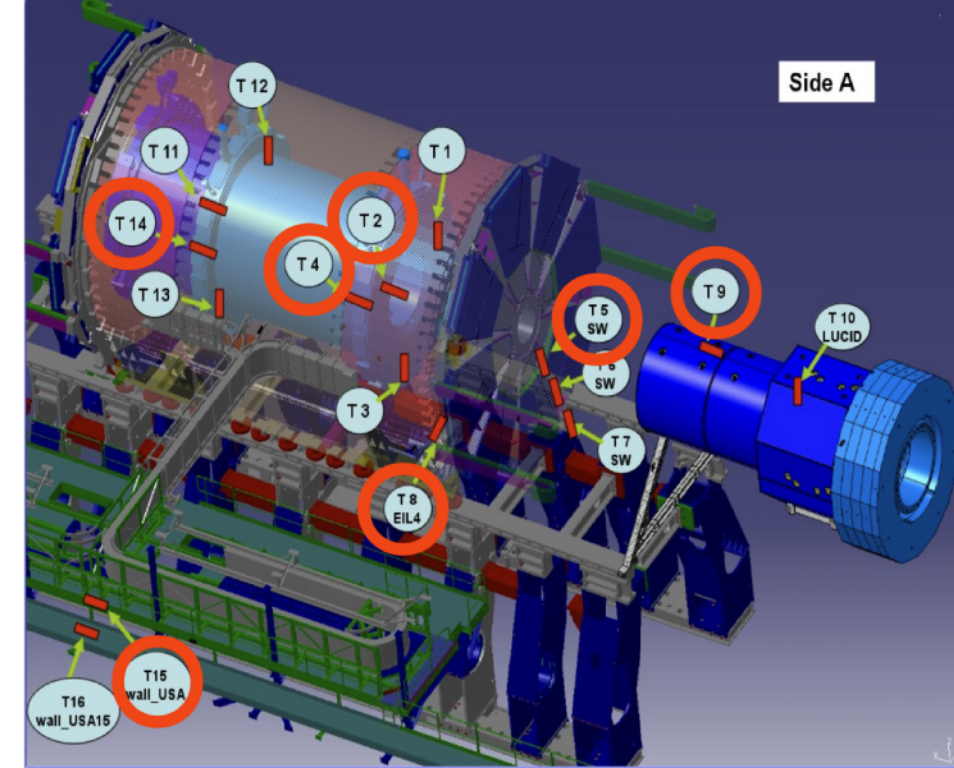
<sup>e</sup>*Institute of Experimental and Applied Physics, Czech Technical University in Prague,  
Prague, Czech Republic*

E-mail: [chelkov@jinr.ru](mailto:chelkov@jinr.ru)

Текст направлен на согласование  
главным соавторам в Прагу 29.01.2020

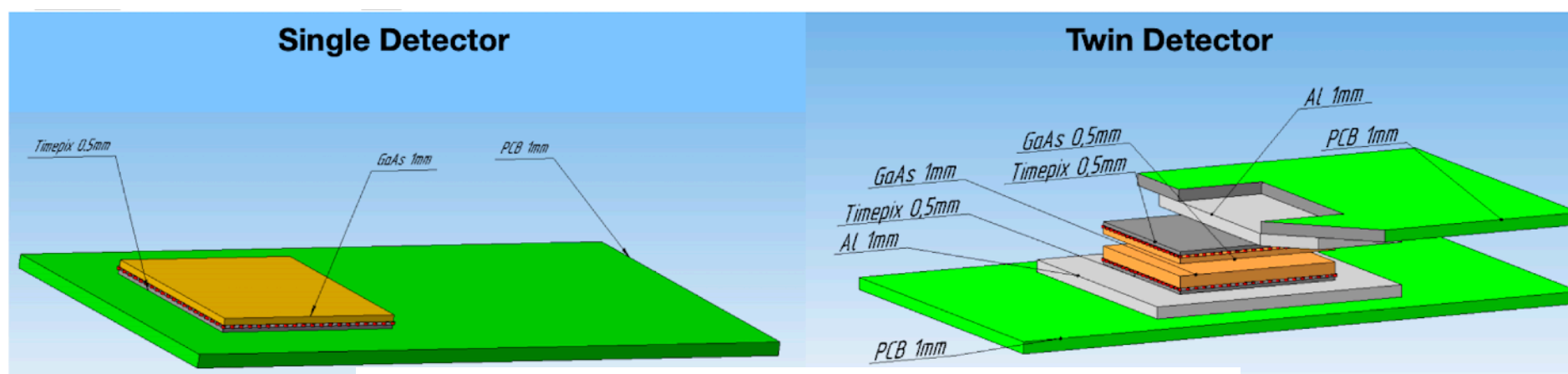
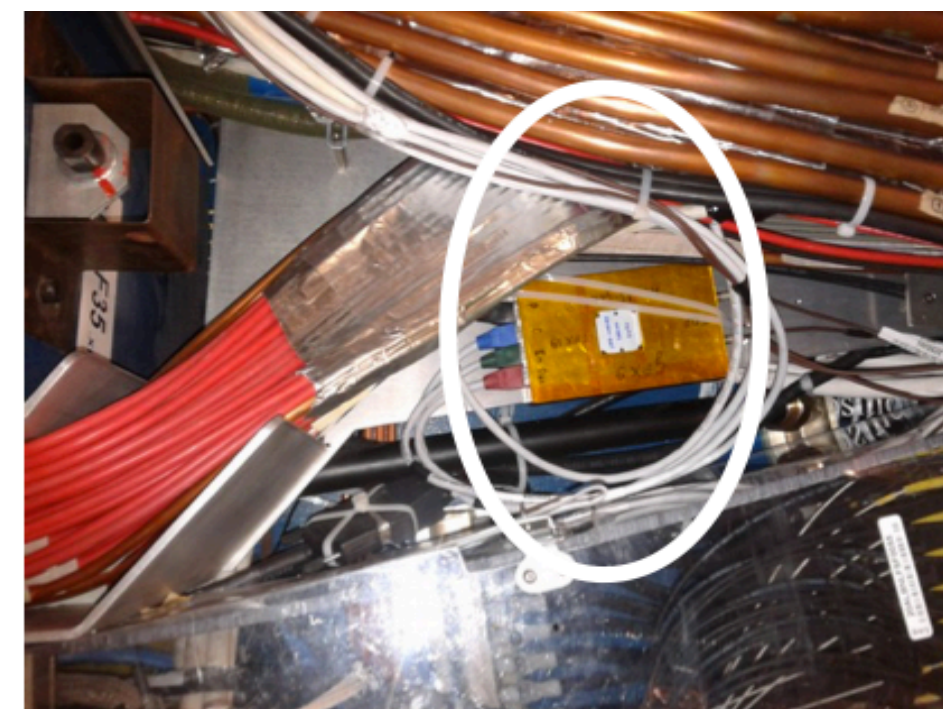


**Figure 1.** Detection efficiency of 500um Si and 1000um GaAs detectors of  $\gamma$  (left) and neutron (right) cross section of  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{69}\text{Ga}$  and  $^{75}\text{As}$  dependence on energy  $\gamma$  and neutrons



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

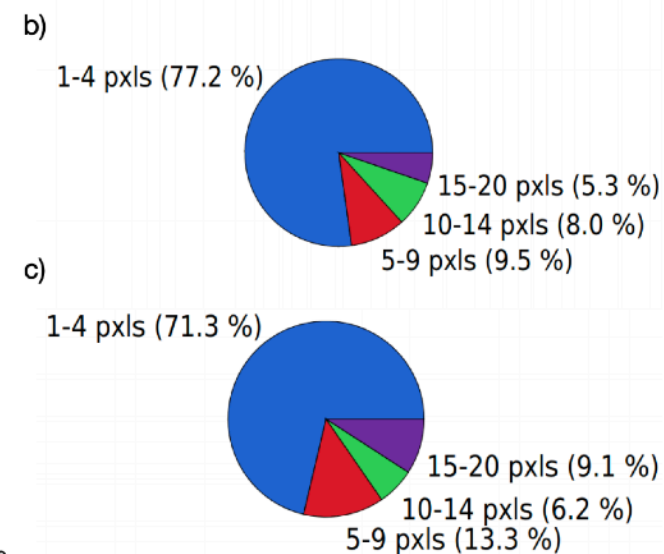
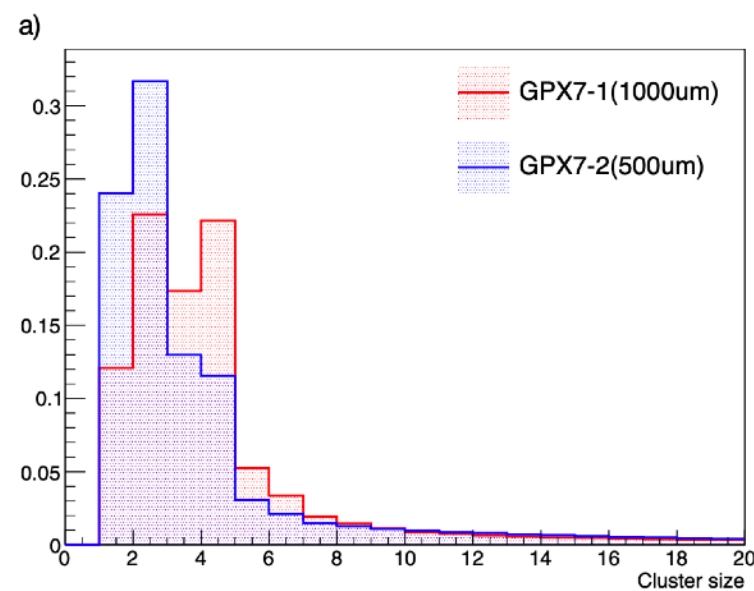
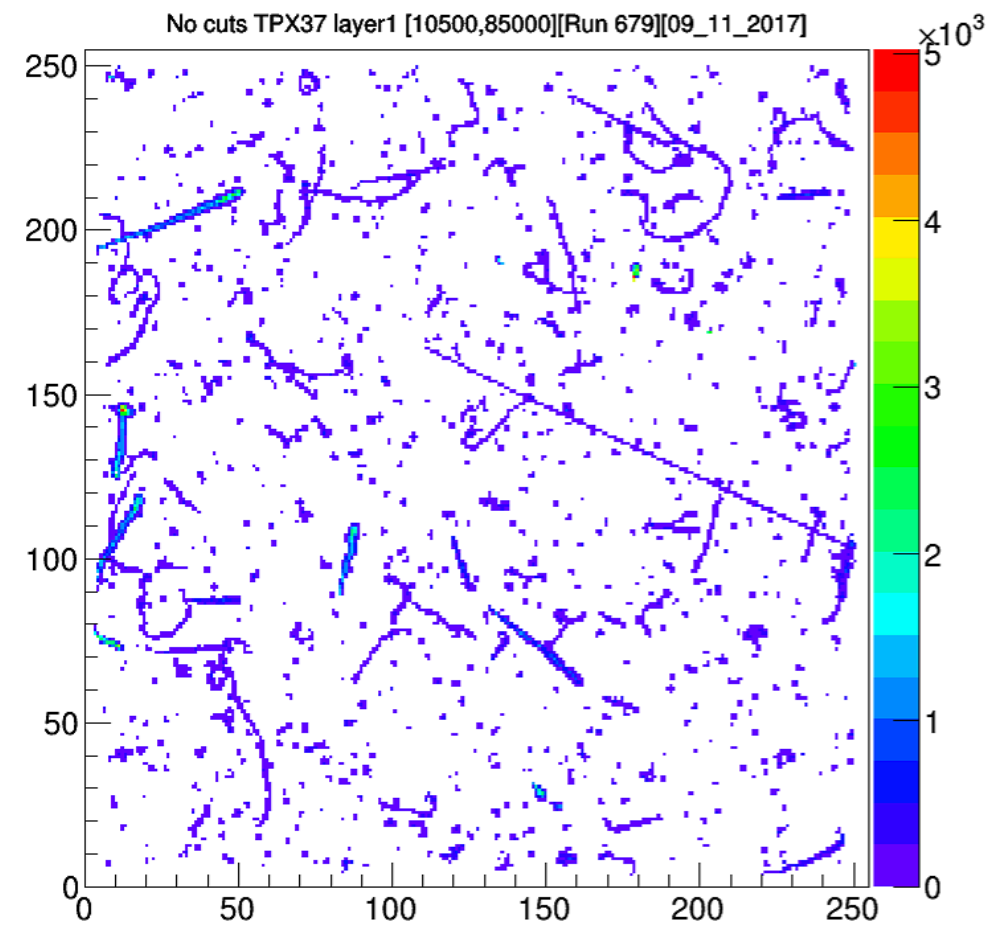
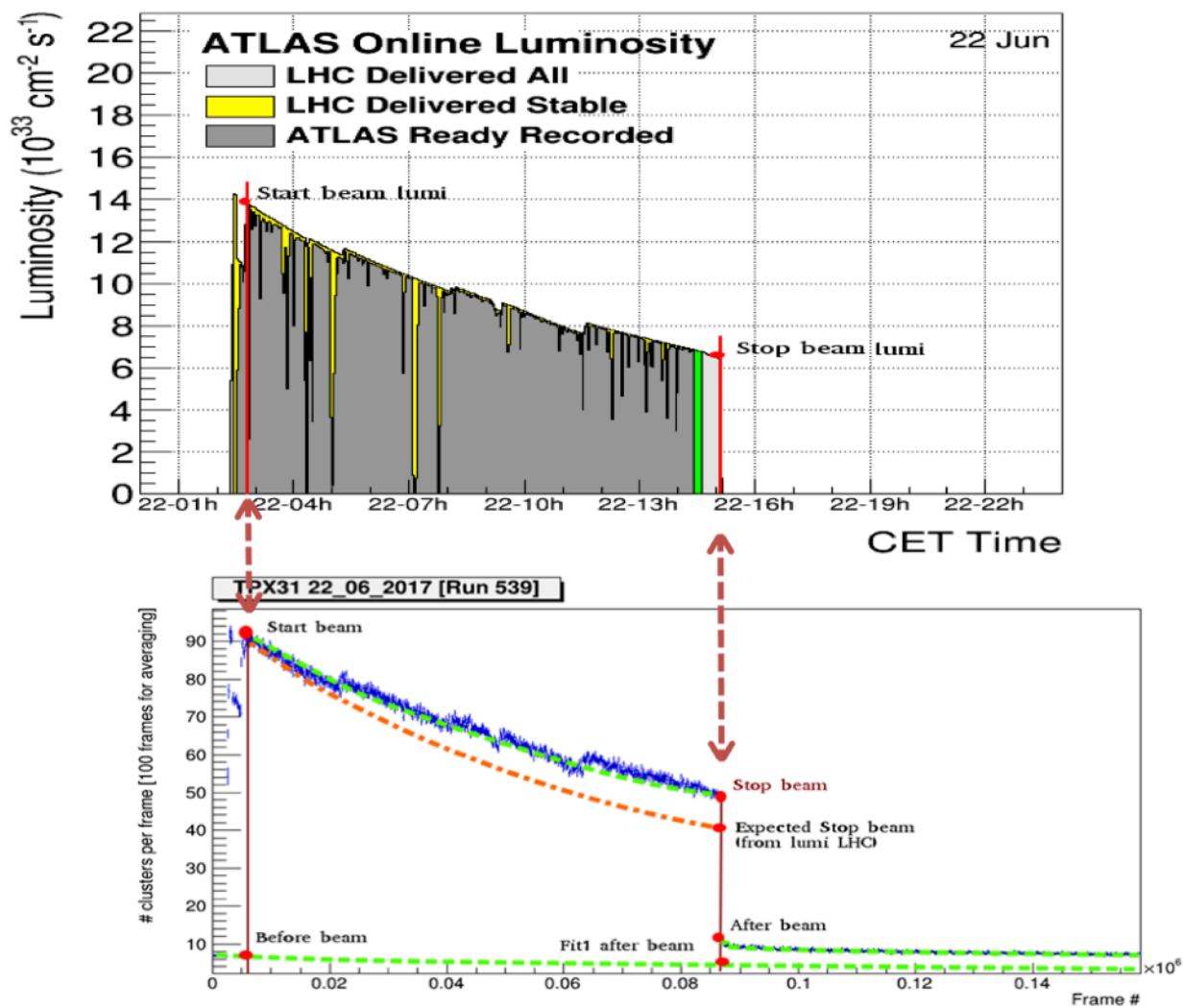
Detector ID	Sensor thickness, $\mu\text{m}$	X, m	Y, m	Z, m
GPX1	500	-5.98	0	7.22
GPX2	1000	-5.80	0	7.22
GPX3	1000	-16.69	-0.06	5.07
GPX4	500	0	-0.28	-6.74
GPX5	500	0	1.57	-12.86
GPX6	1000/500	-1.12	-0.21	3.53
GPX7	1000/500	0.65	-1.45	7.8
GPX8	1000/1000	0	1.57	15.09
GPX9	1000/500	-3.46	-0.92	2.84
GPX10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



The sketch of single and twin detector assemblies



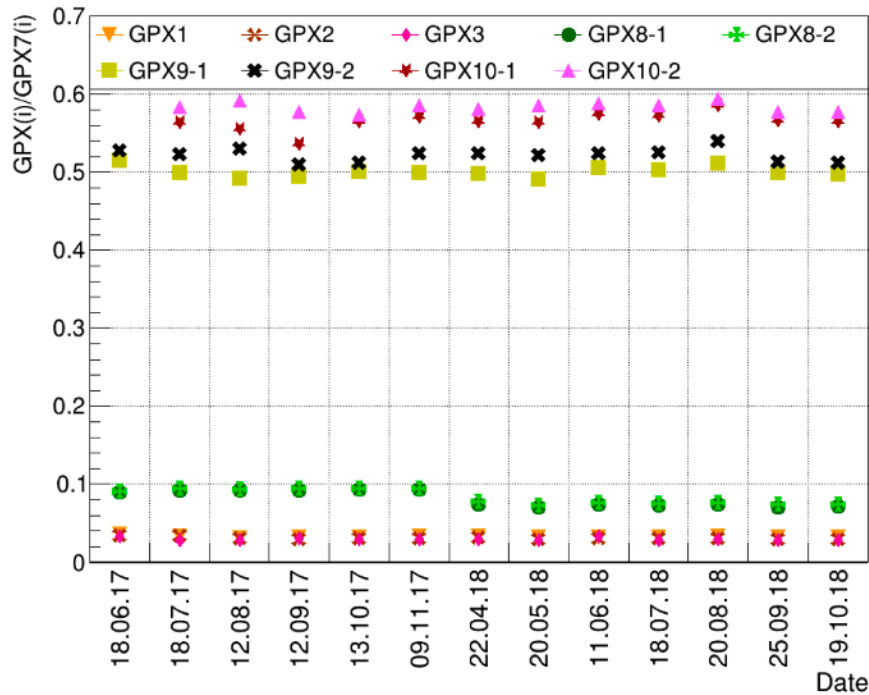
# Структура получаемых данных от детекторов.



**Figure 6.** Cluster size distribution for background events of GPX7 that have been detected 20.08.2018: a - distribution for 500 $\mu\text{m}$  and 1000 $\mu\text{m}$  sensor thicknesses; b - fraction of cluster sizes in 500 $\mu\text{m}$  sensor, c - fraction of cluster sizes in 1000 $\mu\text{m}$  sensor

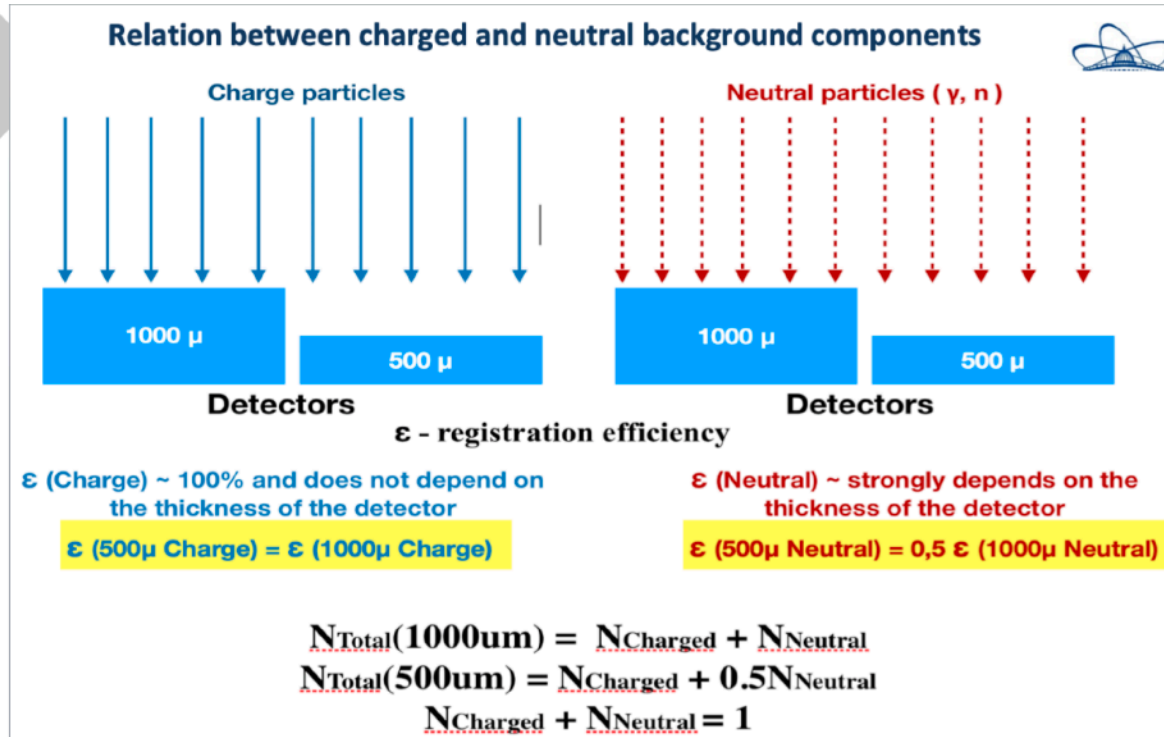
# Мониторирование распределения фона в шахте ATLAS..

**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	$0.584 \pm 0.006$

## Оценка соотношения заряженной/нейтральной компонент фона.



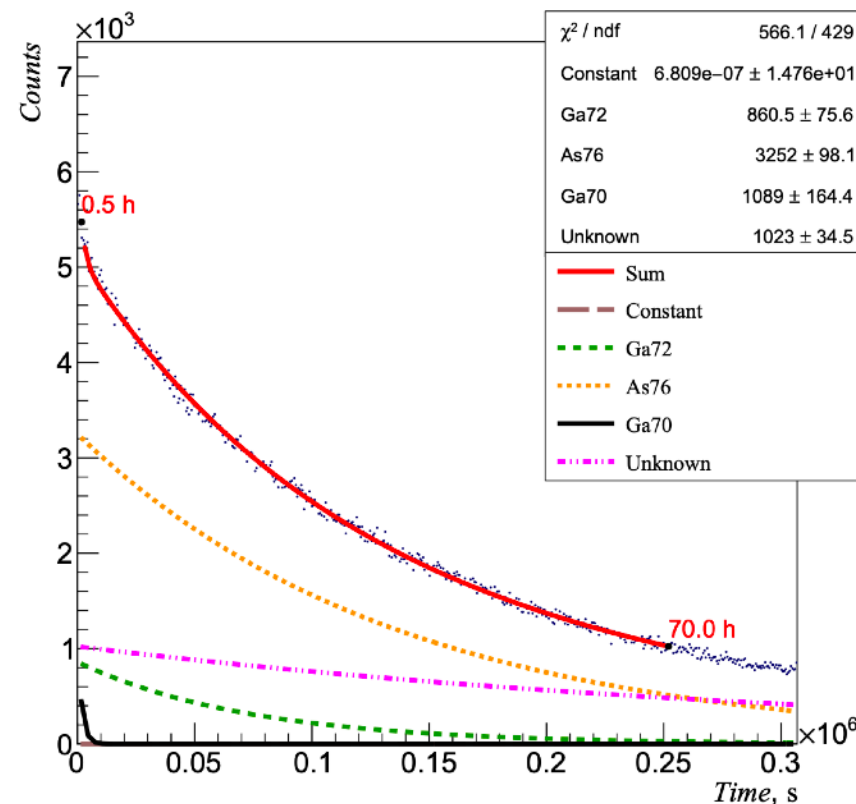
**Figure 10.** The method of estimation the ration between charge and neutral components of background from comparison of count rates relation at thin (500μm) to thick (1000μm) GaAs detectors located in the same point in ATLAS cavern.

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

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

## Оценка распределения интегрального нейтронного фона.

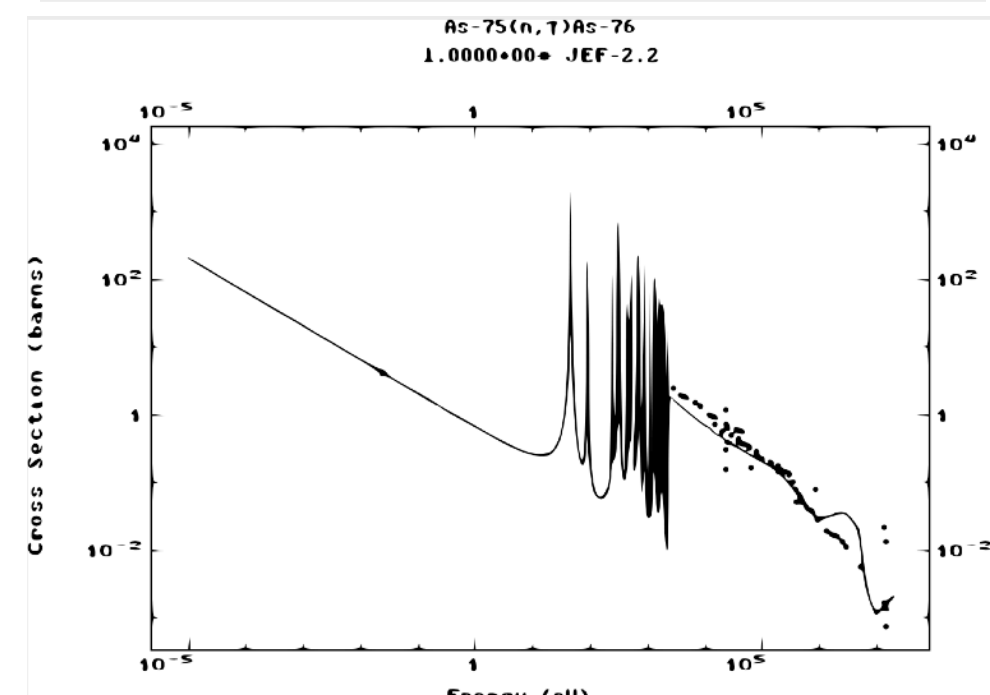
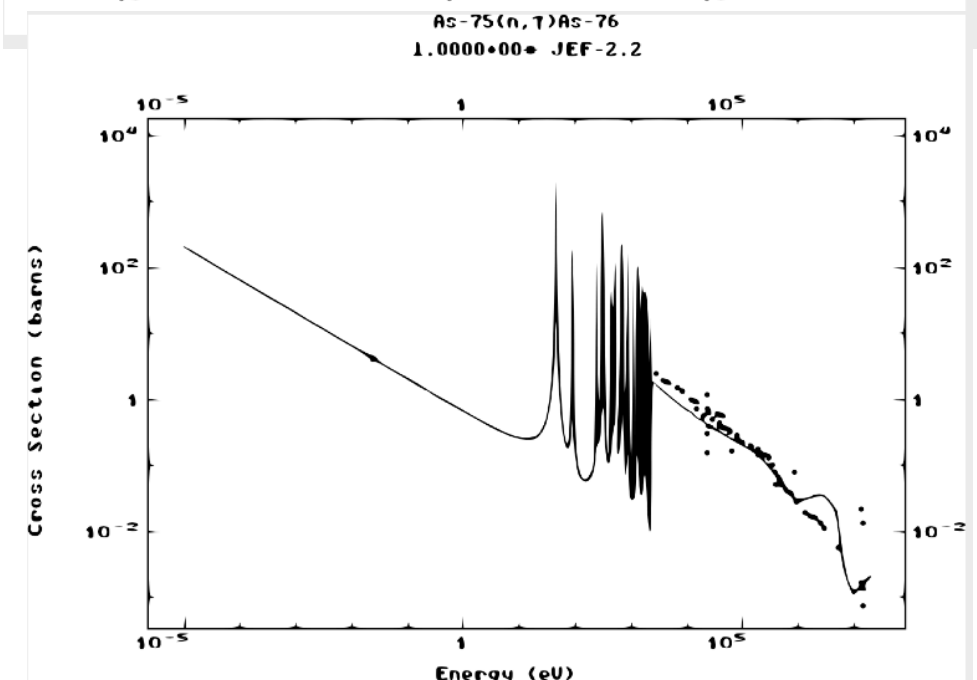
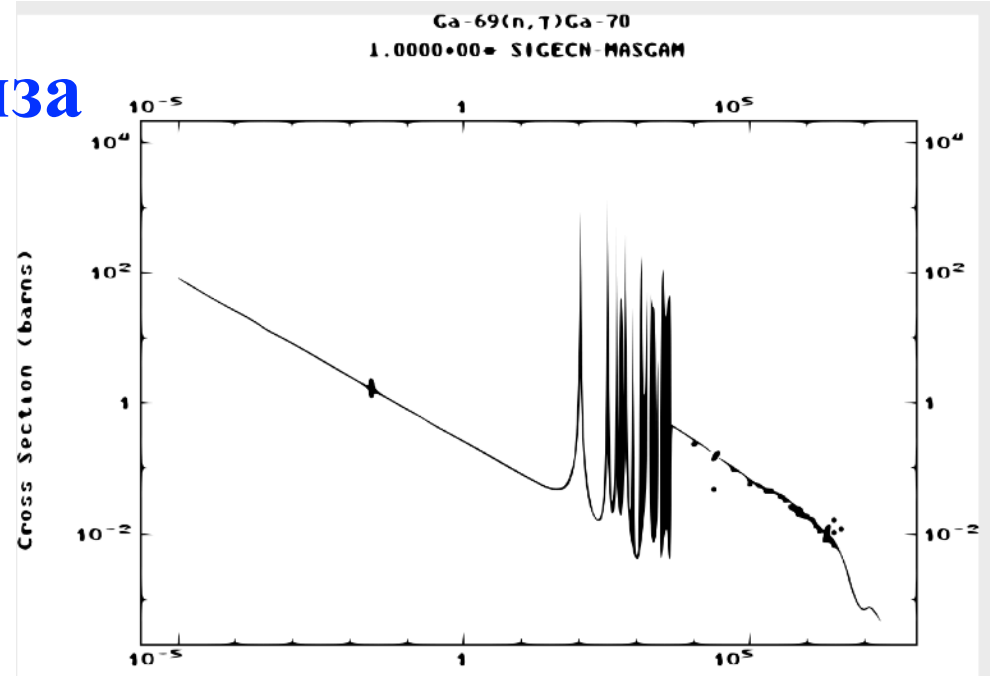
$$f(t) = (P_0 + P_1 \exp(-\lambda_{Ga72}t) + P_2 \exp(-\lambda_{As76}t) + P_3 \exp(-\lambda_{Ga70}t) + P_4 \exp(-\lambda_4t)$$



**Figure 11.** Fit with fixed 4 exponents (GPX8-1. 20.08.18 - 23.08.18). Three known isotopes:  $^{76}\text{As}$ ,  $^{72}\text{Ga}$ ,  $^{70}\text{Ga}$ . The last exponent with  $T_{1/2} = 65$  h corresponds to unknown isotope.

# Результаты “активационного” анализа

RunNo	GPX	Const(p0)	Ga72(p1)	As76(p3)	Ga70(p5)	Long(p7)	p1+p3+p5+p7	Error
LHC 30.06.17- 03.07.17	1	5.84%	21.28%	0.00%	37.43%	35.46%	94.16%	1.98%
	2	0.00%	38.22%	6.91%	43.28%	11.59%	100.00%	1.75%
	7-1	0.00%	31.50%	19.02%	39.61%	9.87%	100.00%	1.10%
	7-2	0.00%	30.35%	21.05%	39.57%	9.02%	100.00%	1.43%
	8-1	0.00%	25.80%	33.60%	32.25%	8.35%	100.00%	0.38%
	8-2	0.00%	25.83%	31.17%	34.90%	8.10%	100.00%	1.78%
	9-1	0.00%	35.54%	20.21%	35.81%	8.45%	100.00%	1.62%
	9-2	0.00%	32.55%	24.72%	35.23%	7.50%	100.00%	2.10%
LHC 20.08.18- 23.08.18	1	0.00%	31.06%	1.09%	28.51%	39.34%	100.00%	3.12%
	2	0.00%	28.31%	26.13%	28.62%	16.94%	100.00%	2.28%
	7-1	0.00%	22.20%	33.62%	26.10%	18.08%	100.00%	2.78%
	7-2	4.01%	10.70%	62.04%	21.86%	1.04%	95.99%	3.29%
	8-1	0.00%	13.72%	52.54%	17.50%	16.23%	100.00%	3.35%
	8-2	0.00%	12.87%	52.37%	19.12%	15.64%	100.00%	3.35%
	9-2	0.00%	27.74%	27.50%	17.32%	27.44%	100.00%	5.62%
LHC 26.09.18- 29.09.18	1	8.29%	33.28%	0.00%	25.29%	33.14%	91.71%	2.88%
	2	0.00%	33.51%	16.51%	31.94%	18.04%	100.00%	2.48%
	5	0.00%	22.79%	29.86%	28.12%	19.24%	100.00%	3.17%
	7-1	0.00%	24.53%	24.39%	33.74%	17.35%	100.00%	2.90%
	7-2	0.00%	25.39%	26.68%	30.11%	17.81%	100.00%	4.01%
	8-1	0.00%	15.94%	43.88%	24.86%	15.32%	100.00%	3.56%
	8-2	0.00%	15.64%	42.73%	26.21%	15.42%	100.00%	3.58%
Thermal n Reactor	8-1	5.22%	0.00%	51.94%	10.51%	32.32%	94.78%	2.18%
	8-2	1.55%	0.00%	57.21%	6.22%	35.02%	98.45%	2.23%
Fast n Reactor	8-1	0.00%	18.90%	60.77%	19.84%	0.49%	100.00%	0.64%
	8-2	0.03%	19.44%	62.41%	17.96%	0.16%	99.97%	0.60%





## 4 Conclusions

The array of ten GaAsPix detectors was produced, calibrated, installed in ATLAS detector cavern and accumulated data during 2017-2018 years. An initial analysis of the data allowed to draw the following conclusions.

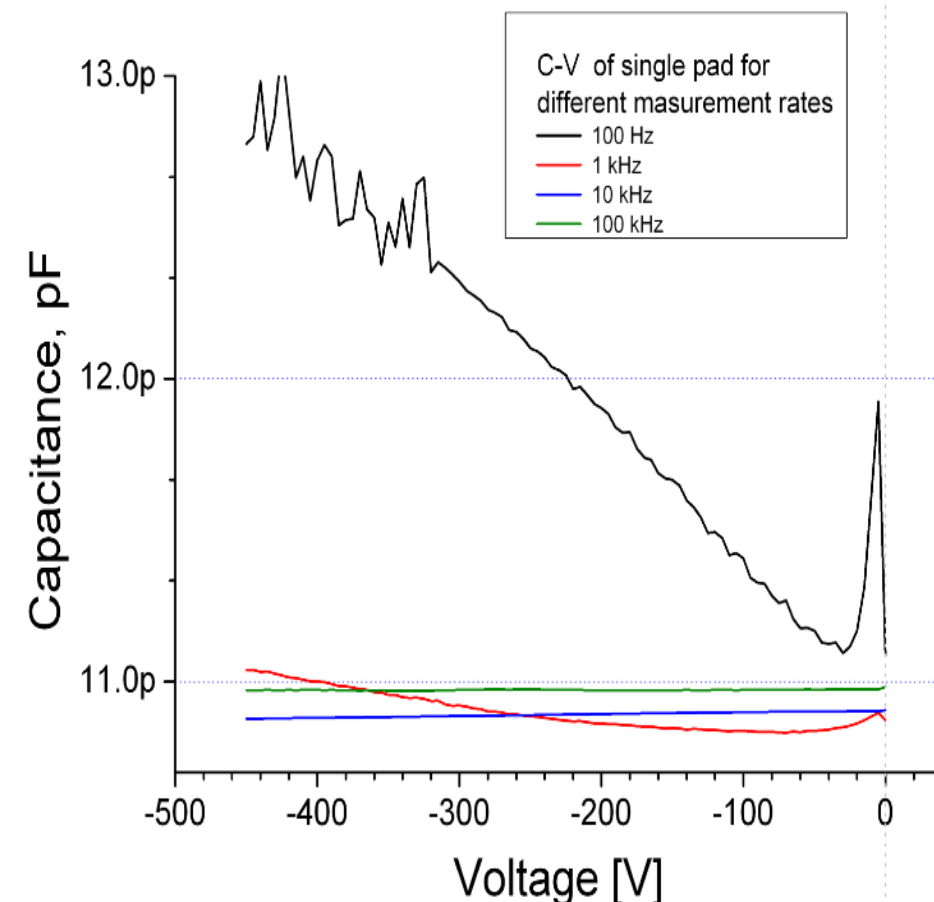
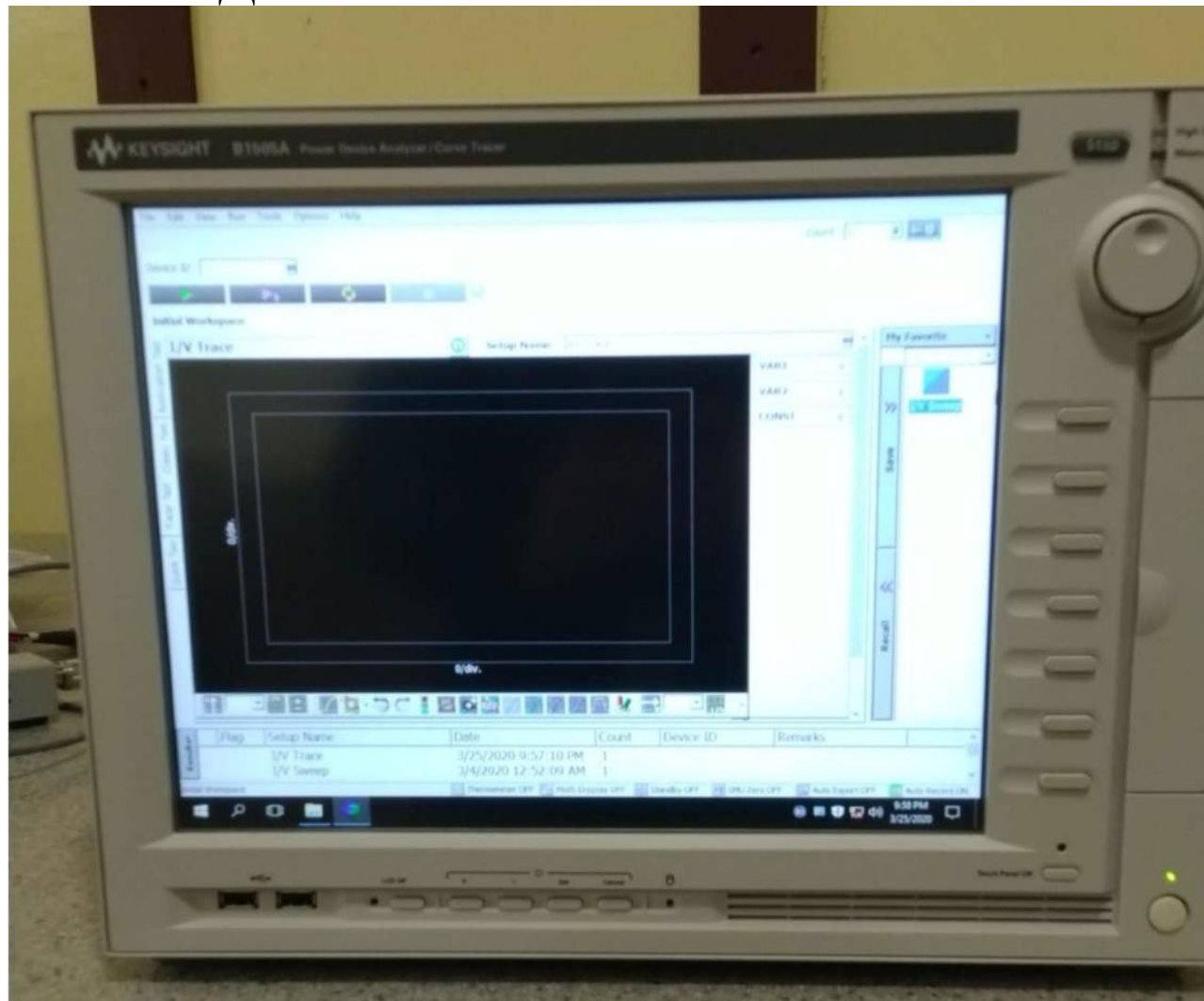
- Detectors work stably during 2017-2018.
- GaAsPix array allows to monitor the changing of background level in different points around ATLAS detector.
- Comparison of data from different thickness ( $500\mu\text{m}$  and  $1000\mu\text{m}$ ) detectors allow to estimate the contributions of the charged and neutral components approximately (0.2/0.8) to the total background level. This conclusion is valid under the assumption that the energy of gamma rays in the neutral component of the background in the ATLAS cavern exceeds 60 keV.
- The data about induced by background neutrons in the ATLAS cavern of activity in GaAs detector's sensors showed that it is the main source of a background in GaAsPix detectors right after end of cycle of LHC luminosity. This results could be used for estimation of relative integral dose of neutrons.
- The opportunity of identification four different isotopes each of one has different energy dependence of n-gamma cross section could be a tool for rough neutron energy spectrum reconstruction.



# Отчет о выполнении проекта в 2017-2020гг.

4. Усовершенствование существующих стендов по измерению характеристик полупроводниковых детекторов.

Стенд «Зондовая станция» оснащен многофункциональным измерителем характериографом Keysight B1505A, позволяющим производить высокоточные измерения ВАХ и ВФХ до 3 кВ.







# Отчет о выполнении проекта в 2017-2020гг.

5. Создание микротомографа с детектором большой площади большой площади и большим геометрическим увеличением.

Для проведения мультиэнергетического томографического сканирования различных объектов с большим геометрическим увеличением в НЭОВП ЛЯП был создан микротомограф Калан-2 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.

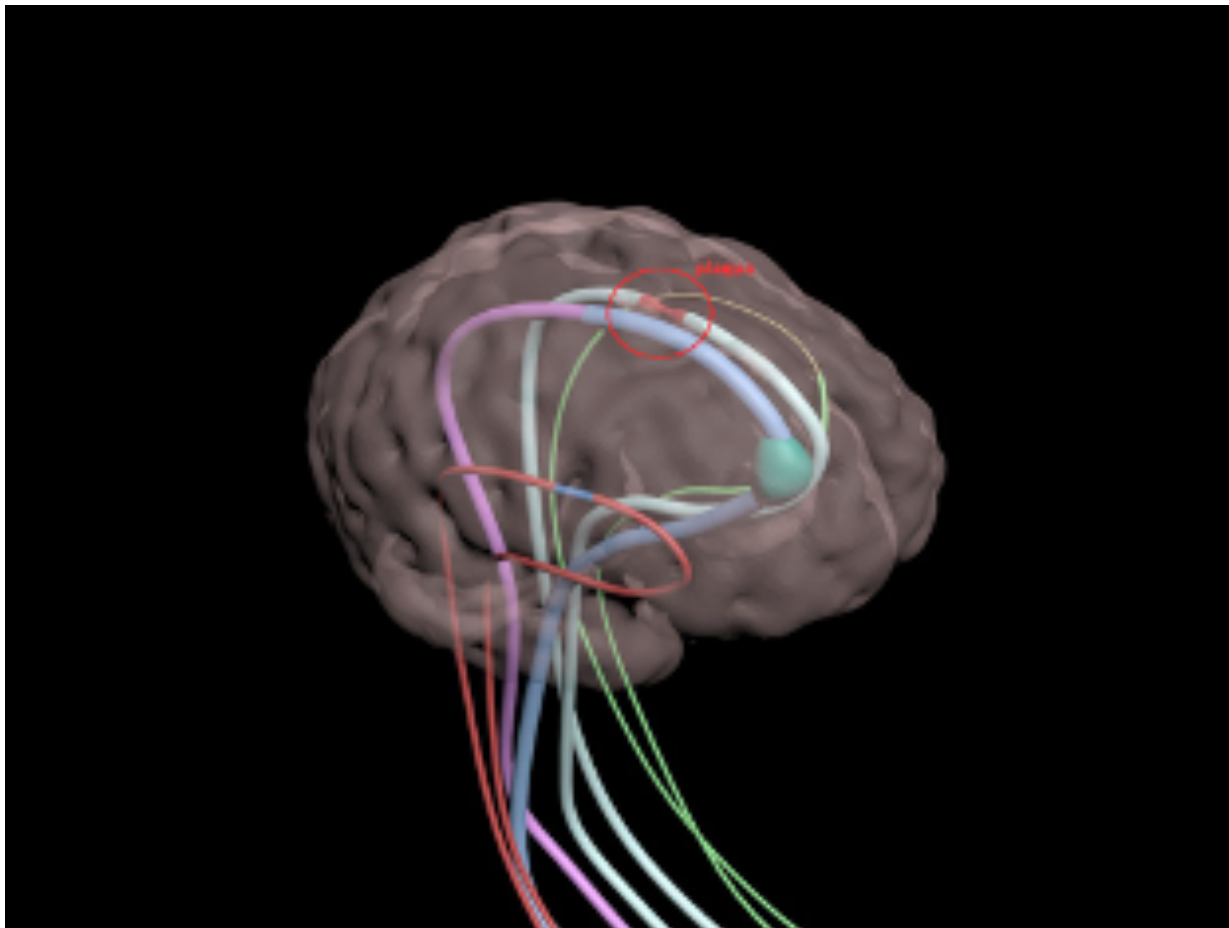
В качестве детектирующей системы для микротомографа Калан-4 в Праге была приобретена рентгенографическая камера Widedix MPX3 1x15 с сенсорами из CdTe толщиной 1 мм. Поле зрения такой камеры составляет 14 мм x 210 мм, а шаг пикселя 55 мкм. Микросхемы Medipix3RX, установленные в этой камере, позволяют определять энергию зарегистрированного  $\gamma$ -кванта и получать «цветные» рентгеновские изображения.

Стандартная система охлаждения была заменена на чиллер фирмы Huber, что позволило установить нижний порог детектора на значении 4 кэВ при стабилизированной температуре 16 градусов. Таким образом, энергетическое разрешение (сигма) детектора составило 1.3 кэВ на энергии 23.17 кэВ.

Для сравнения результатов КТ, получаемых с помощью камер с Medipix и камер, общепринятых на текущий момент в медицине, был заказан детектор со следующими характеристиками: размер пикселя (50x50) мкм<sup>2</sup>; рабочая область (24x30)см<sup>2</sup>. Энергетический диапазон (10-300) кВ. Пространственное разрешение < 8 пар линий / мм.

Для проведения сравнения на объектах 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



Для “цветной” КТ принципиально важно обеспечить постоянство счета фотонов во всех 65536 пикселях при одном заданном энергетическом пороге. В силу технологических особенностей производства, микросхемы Medipix3RX и сенсоры из CdTe HE могут обеспечить выполнение данного требования.

Для устранения данного недостатка была предложена и реализована процедура калибровки порогов детектора с использованием края спектра рентгеновской трубки (*D. Kozhevnikov and P. Smolyanskiy. Equalization of Medipix family detector energy thresholds using X-ray tube spectrum high energy cut-off. JINST14 T01006, 2019*).

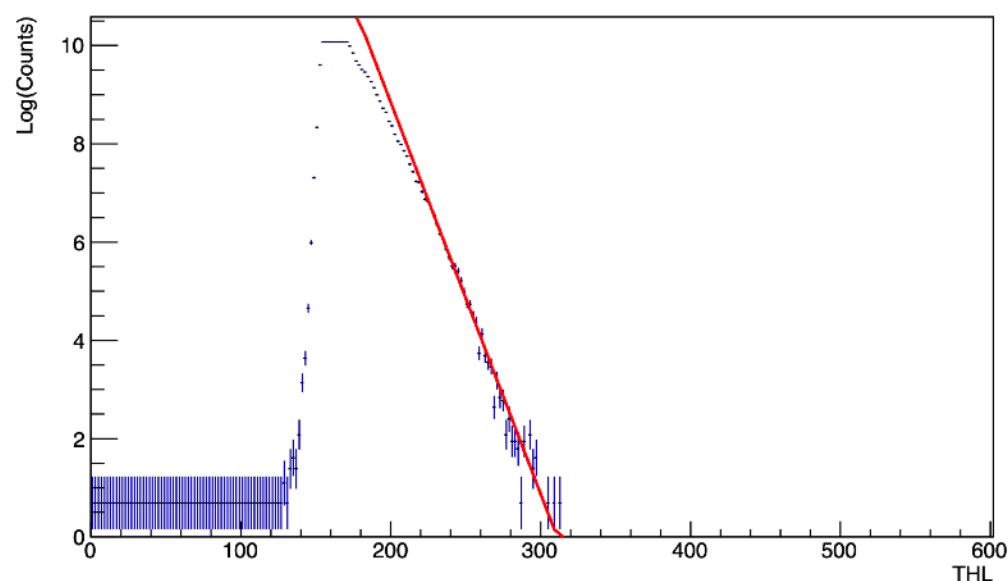


Рисунок 3.4 — Зависимость логарифма числа отсчетов от глобально заданного порога в пикселе с координатами (90,120) (синий). Участок зависимости в области края спектра аппроксимирован линейной функцией (красный).

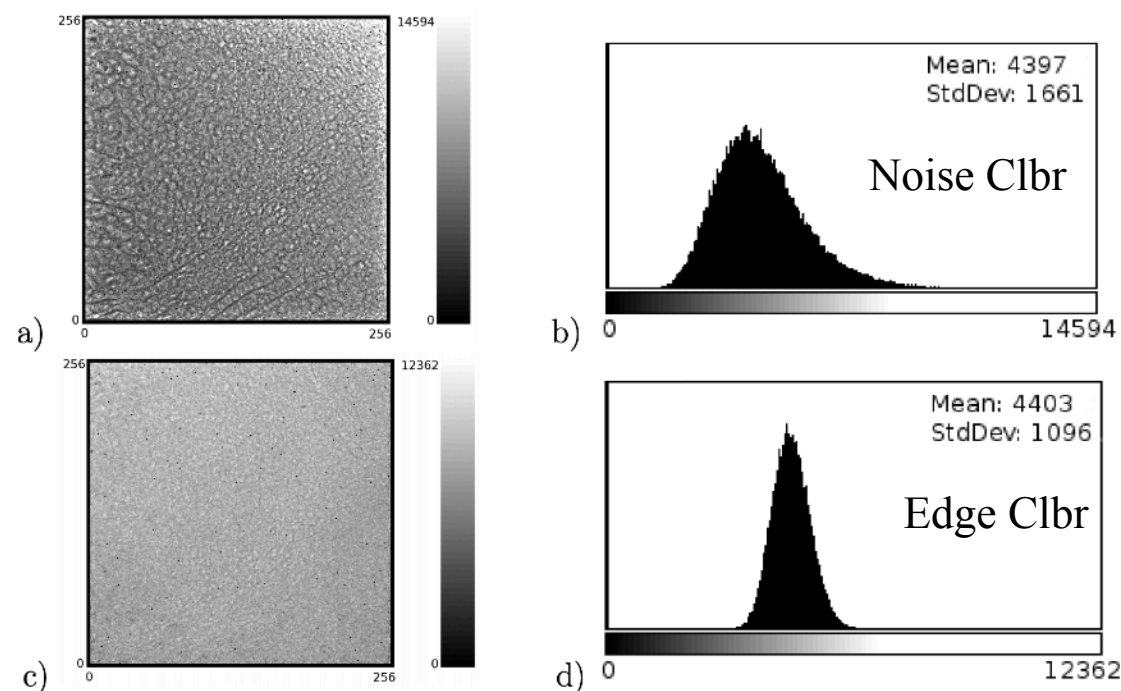


Рисунок 3.7 — Изображения получены при засветке детектора характеристическим излучением от фольги из тантала (слева) и соответствующие распределения пикселей по числу отсчетов в них (справа).

# «Идеальный» детектор для регистрации рентгеновских лучей.

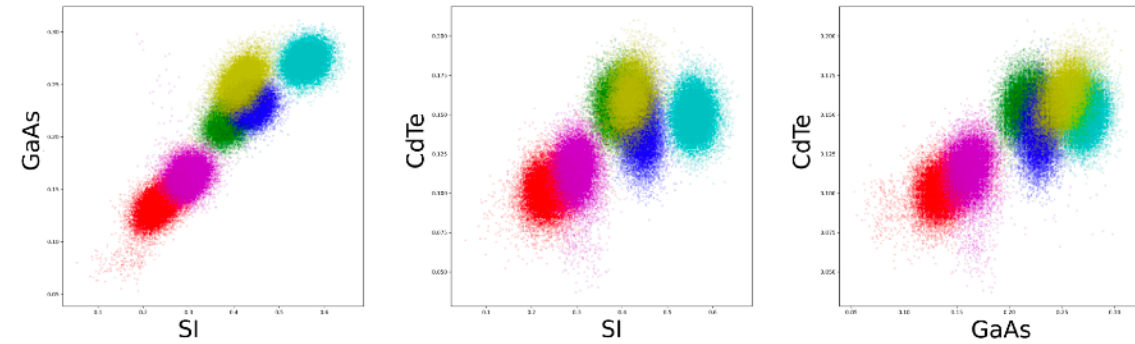
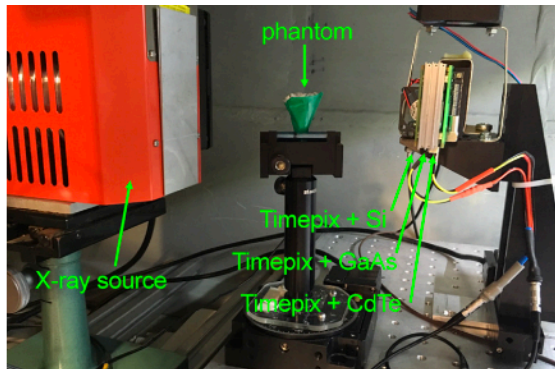
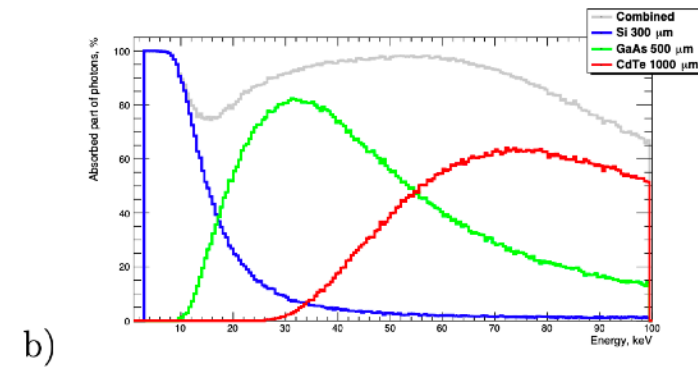
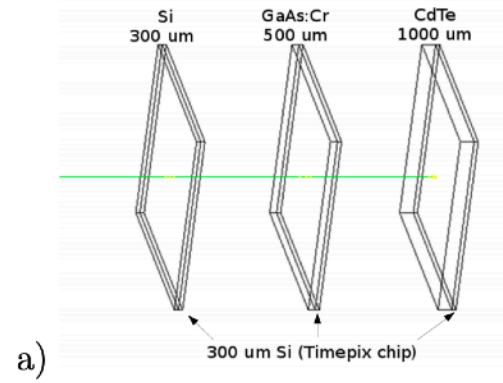
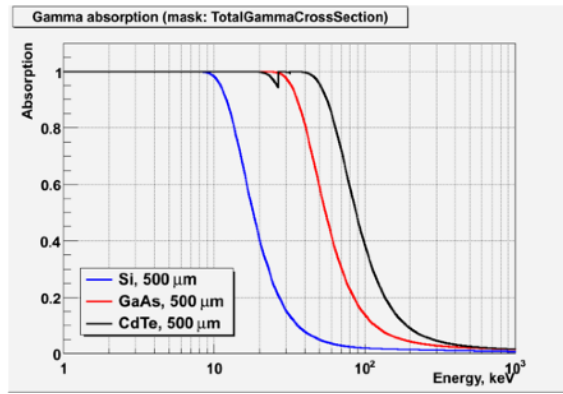


Рисунок 6.6 — Set-up for spectral CT (left image) with stack of three Timepix detectors based on Si, GaAs:Cr and CdTe sensors (right image).

Рисунок 6.9 — Двухмерное распределение реконструированного ЛКО различных веществ. Три графика соответствуют трем парам слоев детектора, оси - отдельным слоям.

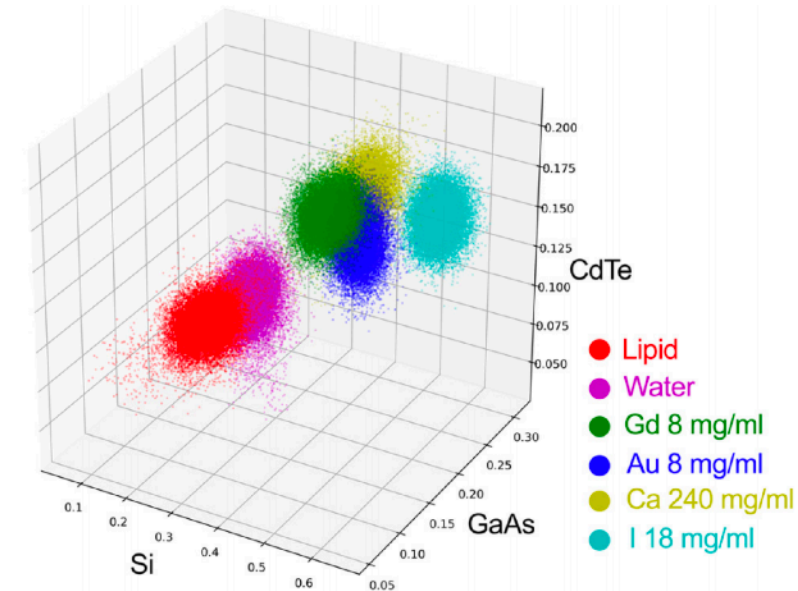


Рисунок 6.8 — Трехмерное распределение реконструированного ЛКО различных веществ. Три оси соответствуют трем слоям детектора.

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

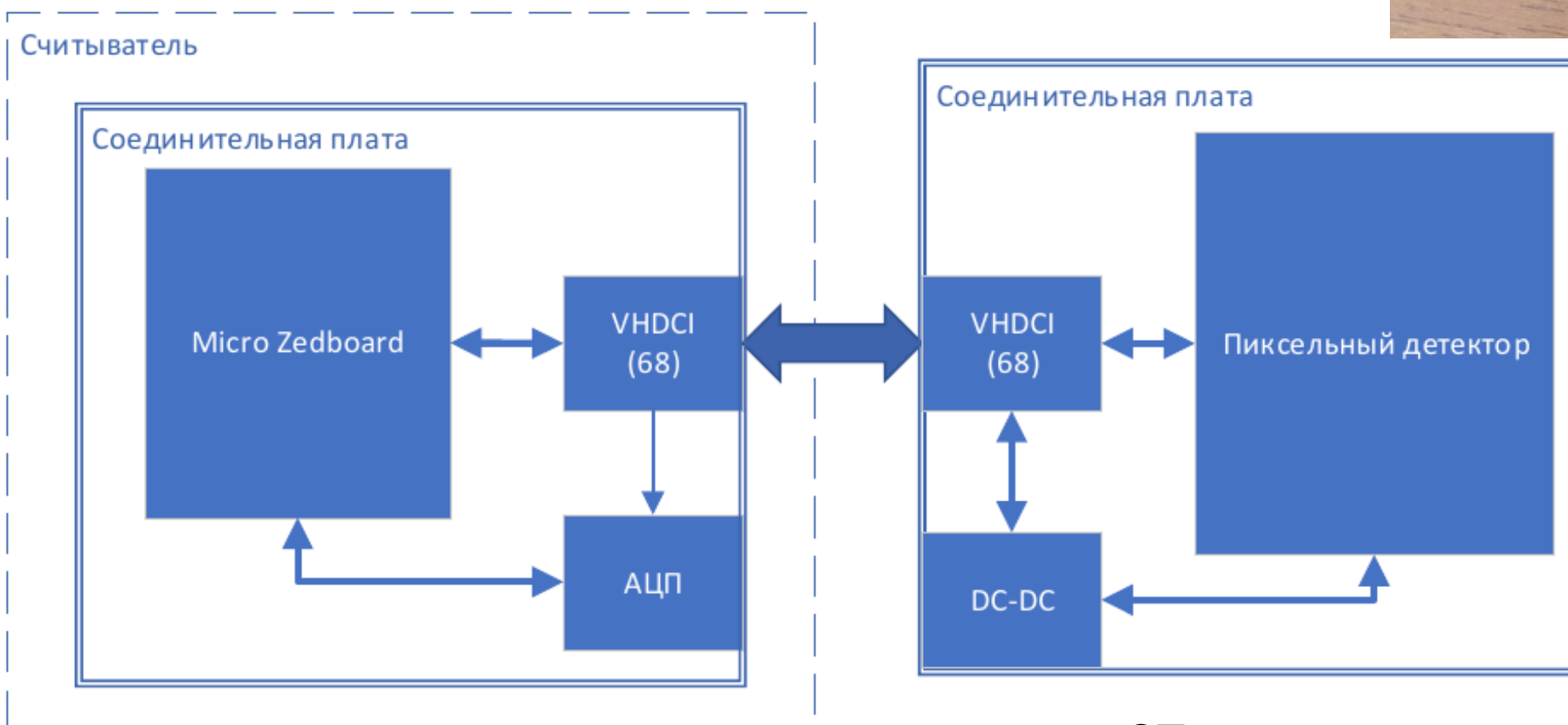
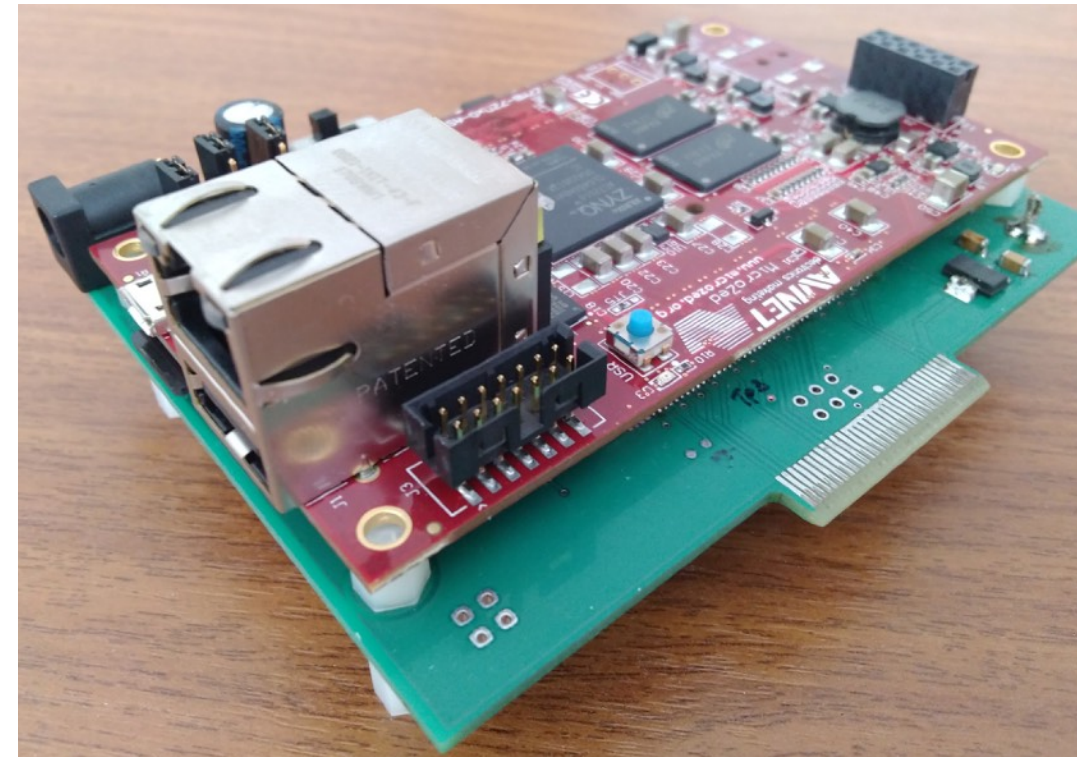


# Отчет о выполнении проекта в 2017-2020гг.

## 6. Разработка полнофункционального блока электроники считывания для микросхем Тimerix и подготовка к созданию детекторов на базе микросхемы Тimerix4.

Были разработаны прототипы блока управления чипа Тrx на основе различных FPGA и интерфейсов передачи данных.

Одним решением стало использование SoC Xilinx семейства Zynq-7000 с передачей данных по стандартному протоколу Ethernet/USB3 под управлением ОС Linux на базе платы MicroZed™.



# Основные характеристики блока электроники Трх

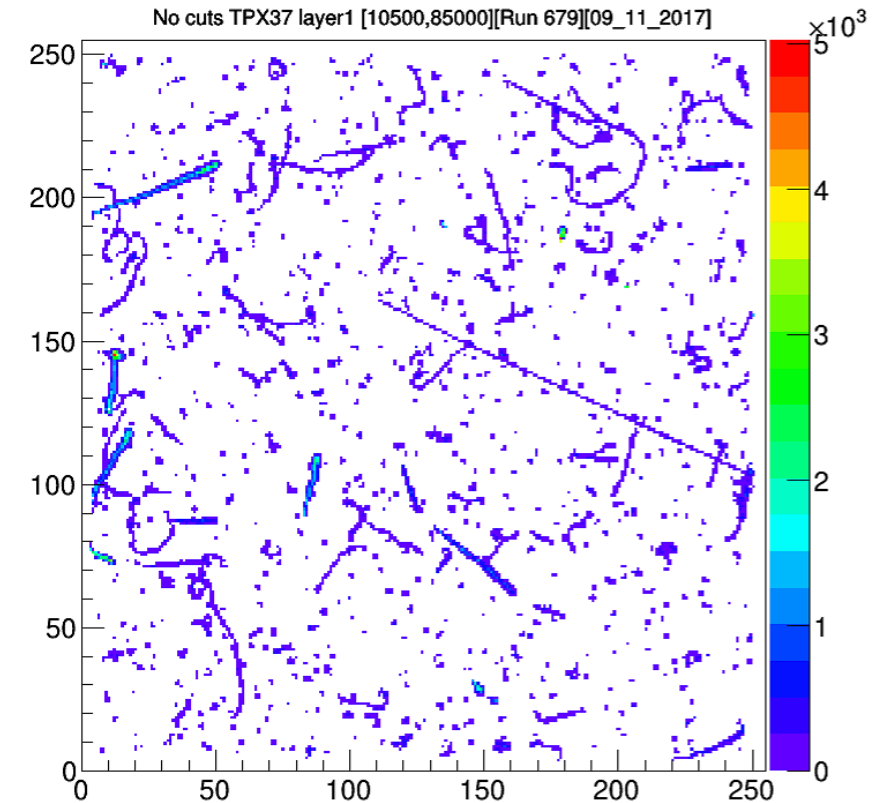
1. Настройка регистров микросхемы;
2. Настройка или маскирования порога и задание режима работы для каждого пикселя детектора;
3. Управление частотой тактирования детектора в режиме накопления в диапазоне от 2 до 100 МГц;
4. Управление временем накопления в диапазоне от 1 мкс до 100 с;
5. Максимальная частота кадров составляет 100 кадров/с.



## Подготовка к разработке электроники для микросхемы Timerix4

Другим прототипом стало построение блока управления для самого современного на сегодня чипа Trx3 семейства Medirix.

В основе блока использована FPGA фирмы Intel Cyclone V GT с драйвером высокоскоростной шины PCIe 4x 2.0 на кабель. Это позволило достичь скорости передачи данных в 1.3 ГБайт/с.



Ожидаемая скорость шины передачи данных микросхемы Timerix4 оценивается в 160 Гбит/с или 20 ГБайт/с в связи с чем был разработан алгоритм кластеризации (объединения пикселей, имеющих общую границу, в кластер) в ПЛИС.

В данный момент выполняется работа по составлению технического задания для разработки прототипа электроники микросхемы Timerix4

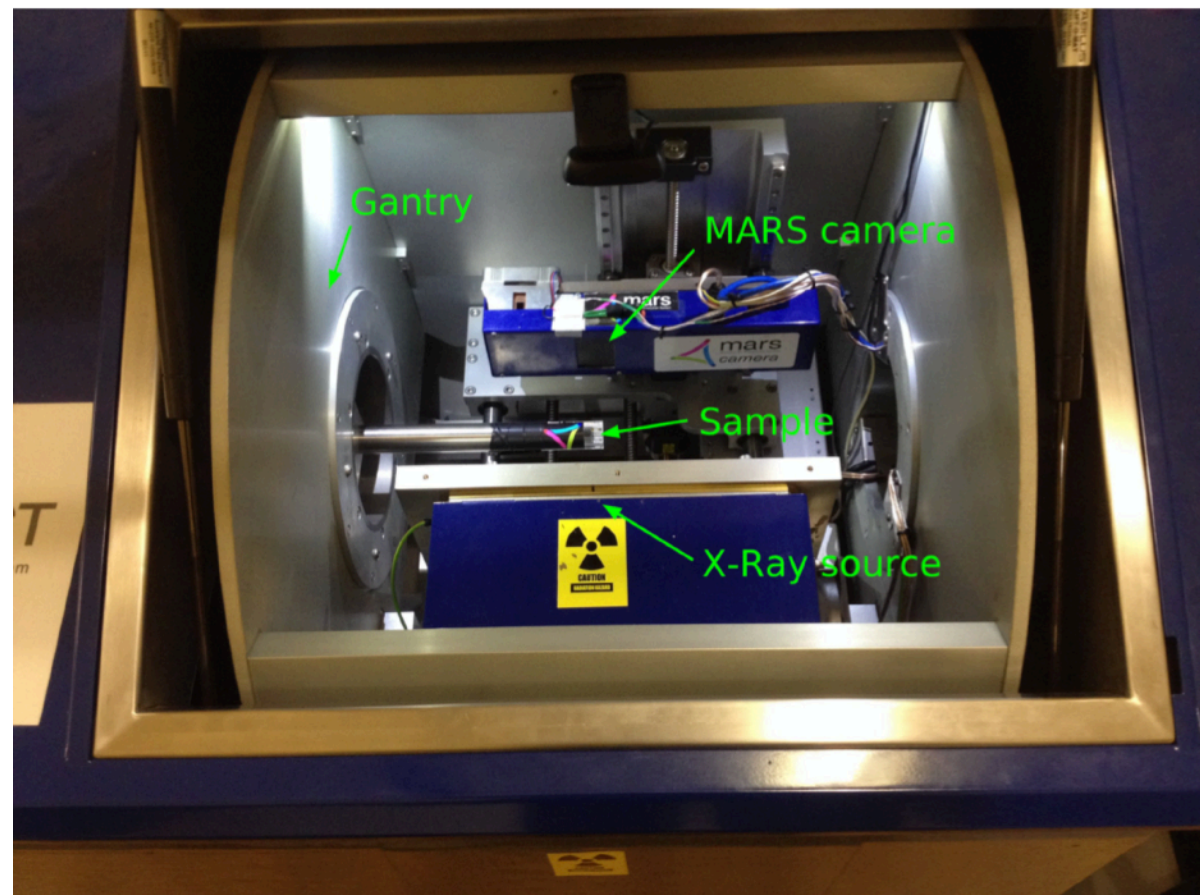
**В существующих сегодня аналогичных системах такой опции нет.**

Работа направлена на конференцию IWORID-2020.

## Отчет о выполнении проекта в 2017-2020гг.

8. Проведение сканирования биоматериала в рамках программы совместных исследований с медиками.

9. Проведение сканирования руд и минерального сырья в рамках программы совместных исследований с геофизиками.





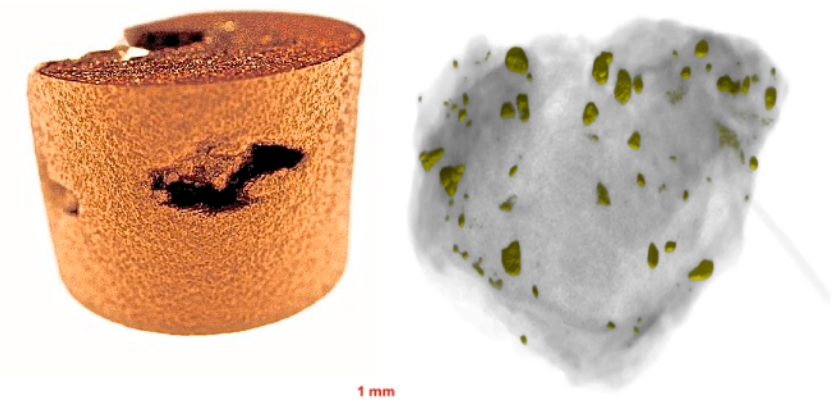
Микротомограф MARS в течении 2019 года был существенно модернизирован: заменен ПК управления, установлен новый сервер реконструкции, обновлено ПО до версии 19.04. Микротомограф был оснащен камерой MARS v5 Medipix3RX CZT 2 мм 110 мкм. Поле зрения камеры составило 14 мм x 42 мм (было 14 мм x 14 мм).

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 проведены измерения и результаты представлялись на международных конференциях и опубликованы в статьях.

**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.**

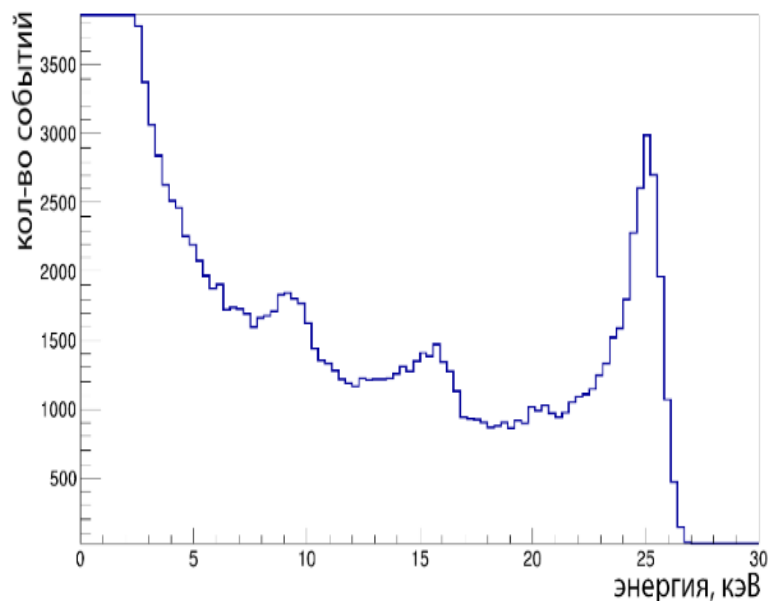


### 7. Разработка ПО для моделирования пиксельных детекторов MediPix.

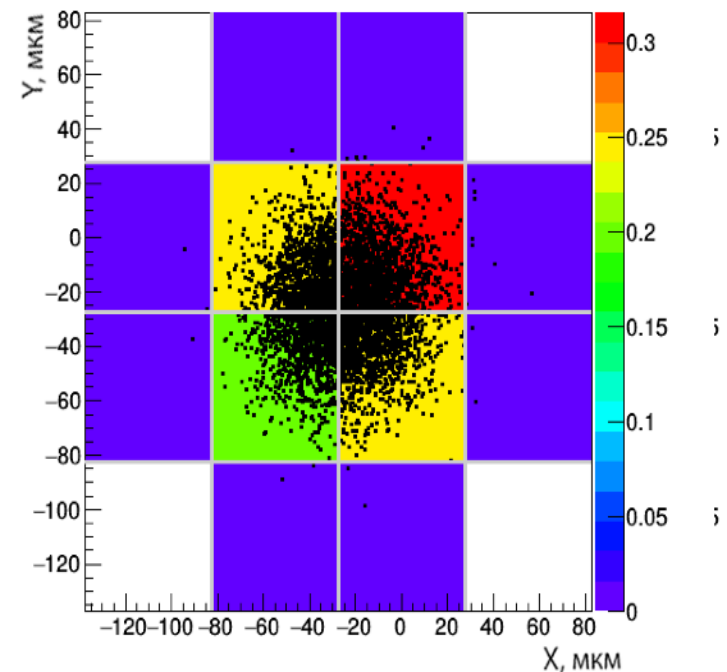
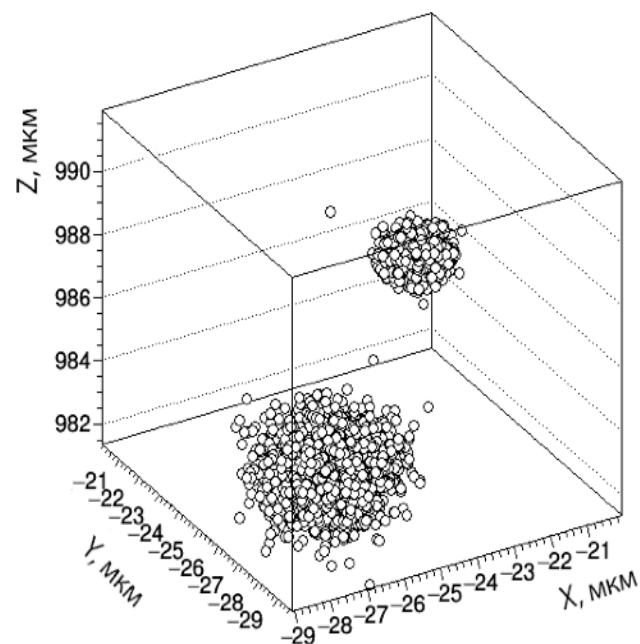
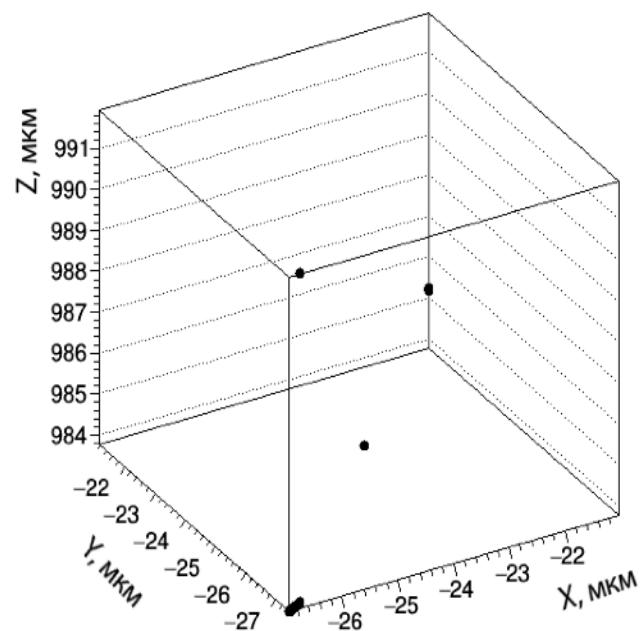
Характеристики детектора на основе микросхемы семейства MediPix с чувствительным объемом из полупроводника, такие как эффективность регистрации частиц, пространственное и энергетическое разрешения, зависят от многих параметров: материал полупроводника, приложенное к нему напряжение, размер пикселя, характеристики предусилителя, тип и энергия регистрируемой частицы.

Моделирование позволяет сократить расходы и время на подбор оптимального материала сенсора, его толщины и типа микросхемы, в зависимости от задачи и требований к характеристикам детектора.

Было создано ПО для моделирования пиксельных детекторов на основе Geant4, Root. Учитываются следующие физические процессы: фотоэффект, комптоновское рассеяние, флюоресценция, эффект Оже. На основе информации об энерговыделении строится начальное распределение заряда и реализуется их проецирование на пиксельную плоскость с учетом весового потенциала, диффузии во время дрейфа, рекомбинации. На основе распределения зарядов на пиксельной плоскости вычисляется и оцифровывается сигнал с учетом шума усилителя, разброса коэффициента усиления и порога дискриминатора от пикселя к пикселю.



На рисунке показан результат моделирования спектра моноэнергетического излучения с энергией фотонов 25 кэВ, зарегистрированного в пиксельной GaAs детекторе. Кроме пика, соответствующего энергии излучения, виден пик флюоресценции с энергией около 10 кэВ и пик одиночного вылета вблизи 15 кэВ, а также фон, обусловленный эффектом распределения заряда на соседние пиксели.



На рисунке слева – направо: а) координаты энерговыделения в чувствительном объеме детектора; б) образовавшиеся в результате ионизации облака носителей заряда; с) носители заряда в плоскости пикселей детектора (цвет обозначает долю заряда, собранного пикселем).



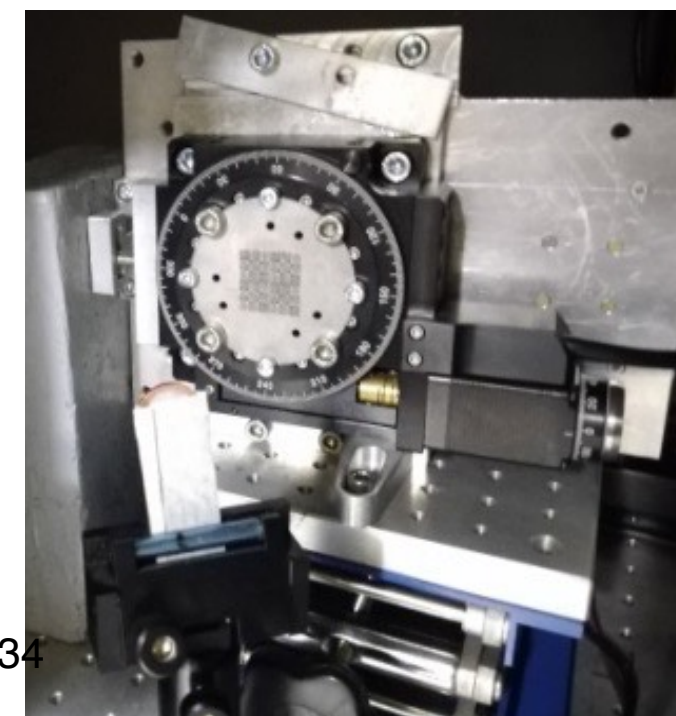
## Отчет о выполнении проекта в 2017-2020гг.

### 10. Реализация метода регистрации распределенных источников гамма излучения с помощью детекторов MediPix.

Для проведения доклинических исследований на лабораторных животных необходимо высокое пространственное разрешение и высокая эффективность регистрации гамма-квантов, которые способны обеспечить гамма-камеры с использованием мультипинхольных коллиматоров.

Для получения изображения распределенных гамма источников, в поле зрения 30 мм x 30 мм были изготовлены вольфрамовые коллиматоры толщиной 0.5 мм, и радиусом отверстий 170 мкм. Такая “наборная” конструкция позволяет менять толщину коллиматора, в зависимости от энергии гамма-квантов.

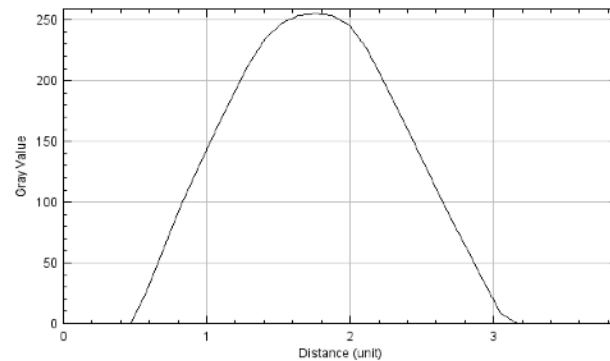
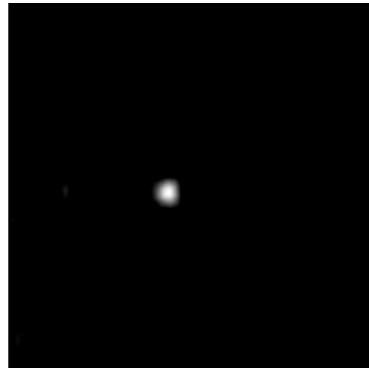
Была выполнена сборка опытной установки с детектором на основе микросхемы считывания TimePix.



Исследования выполнены при поддержке гранта  
РФФИ №18-52-34005

# Были получены первые результаты:

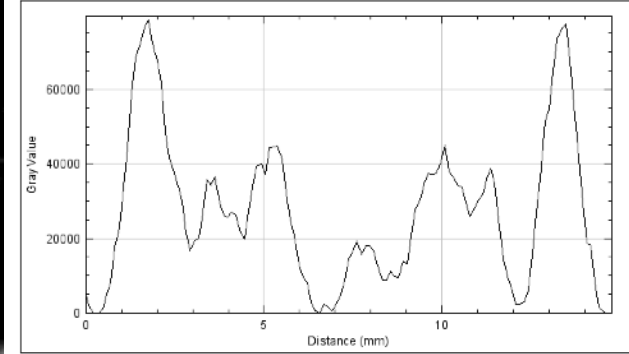
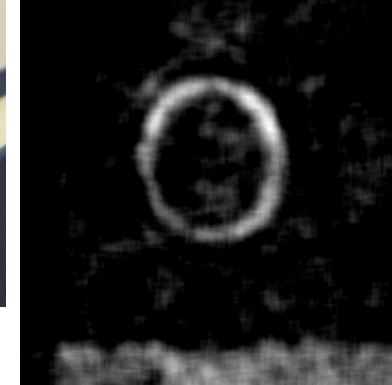
1) восстановления изображений для точечного источника  $^{241}\text{Am}$ .



Диаметр источника ~ 2 mm

FWHM = 1,6 mm

2) восстановление изображения медного кольца

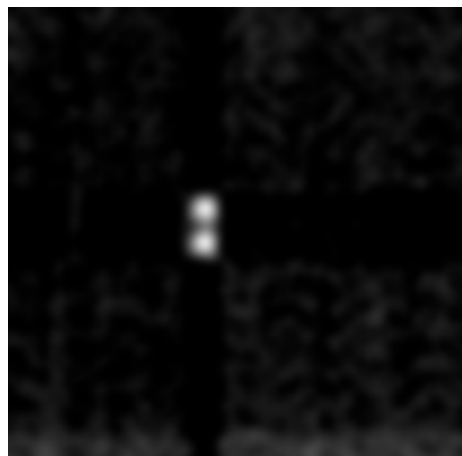


Внешний диаметр = 11,9 мм  
внутренний диаметр = 10,2 мм

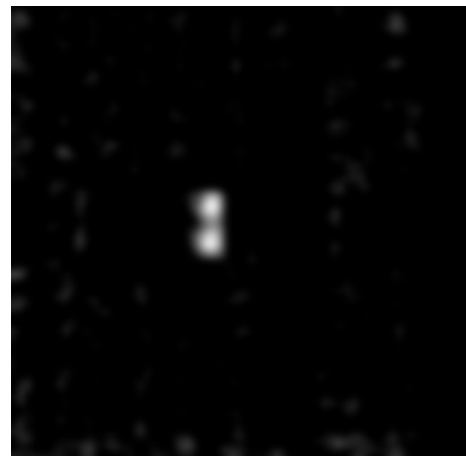
Размер кольца = 11,6 мм

3) проведено Монте-Карло моделирование для гамма-источников наиболее часто используемых в ядерной медицине

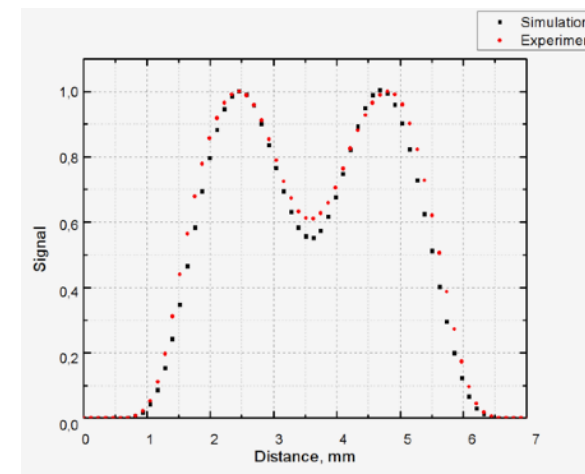
4) сравнение результатов моделирования с экспериментом было произведено на источнике  $^{241}\text{Am}$



моделирование

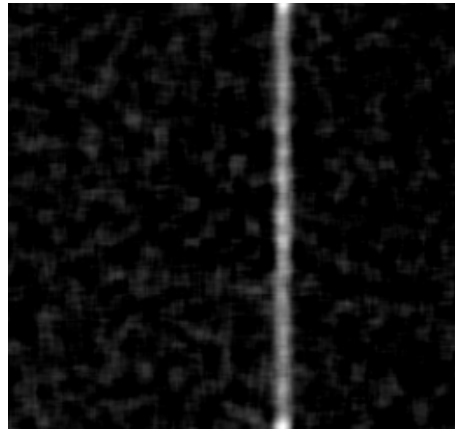


эксперимент

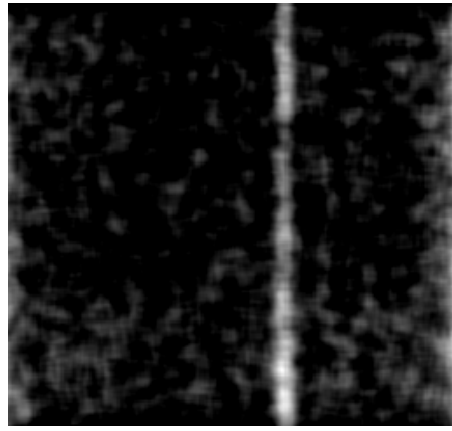


Расстояние между источниками = 2.5 мм (диаметр источника ~ 2 мм)

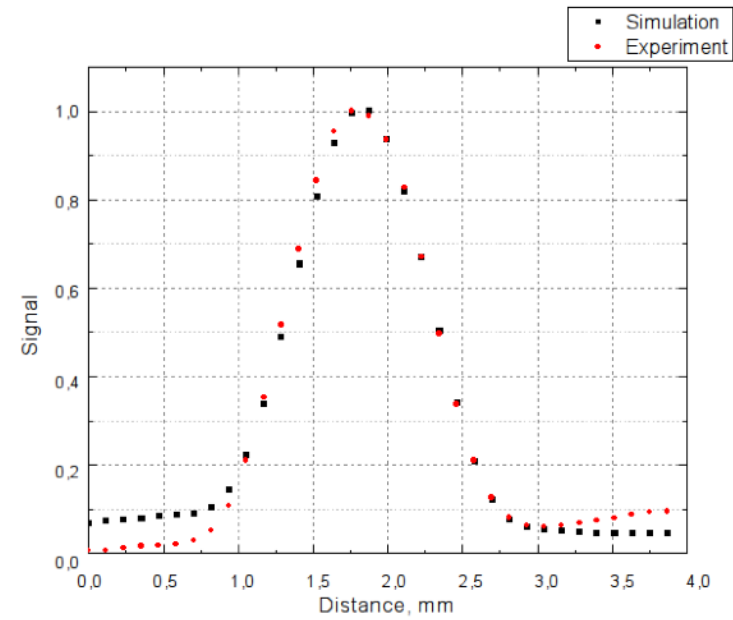
5) Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментом для капилляра  
наполненного  $^{99m}\text{Tc}$



моделирование



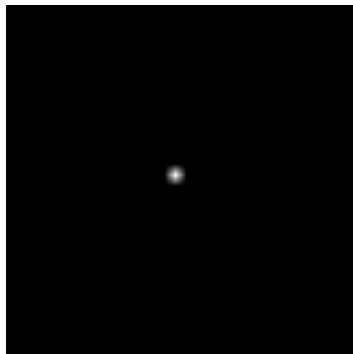
эксперимент



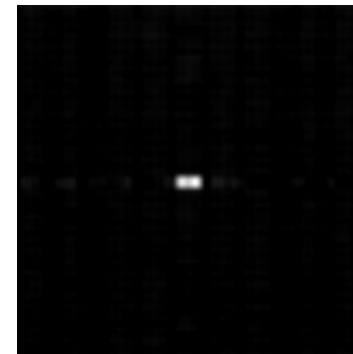
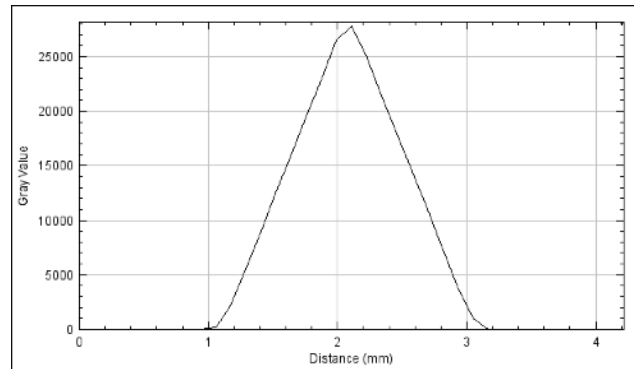
Внутренний диаметр = 1 мм  
Внешний диаметр = 1.5 мм

FWHM (exp) = 0,98 mm  
FWHM (sim) = 0,97 mm

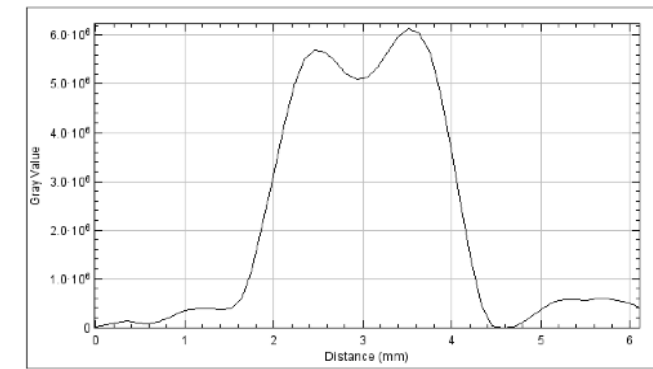
6) Достигнуто пространственное разрешение 1 мм. Для поля зрения 30 мм x 30 мм.



FWHM = 0,95 mm



Пространственное разрешение ~ 0,95 mm





## Отчет о выполнении проекта в 2017-2020гг.

11. Ввод в эксплуатацию первой очереди линейного ускорителя электронов.



Получен стабильный пучок электронов с энергией до 200 МэВ.

# Публикации 2018-2020

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 2018-2020

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 мультиэнергетической рентгеновской томографии с применением детекторов на основе микросхем семейства Medipix»

## Дипломы Магистров

1. Е.А.Черепанова (МФТИ) 2019 *(руководитель Г.А.Шелков)*

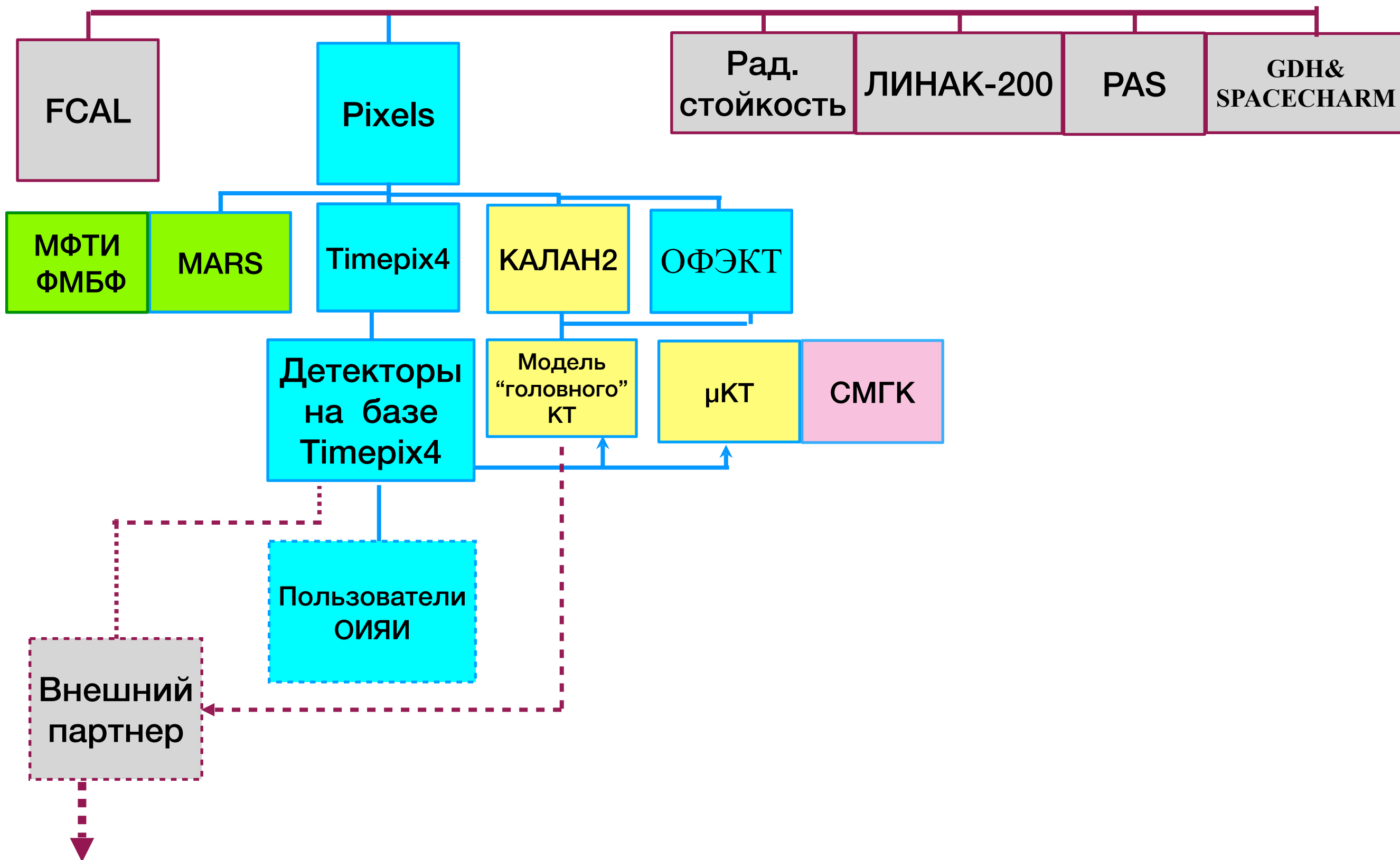
«Анализ структуры радиационного фона в подземном зале установки ATLAS на основе данных с детекторов системы ATLAS-GaAsPix»

2. В. Андрияшен (МФТИ) 2019 *(руководитель А.С.Жемчугов)* «Разработка метода мультиэнергетической итеративной томографической реконструкции»



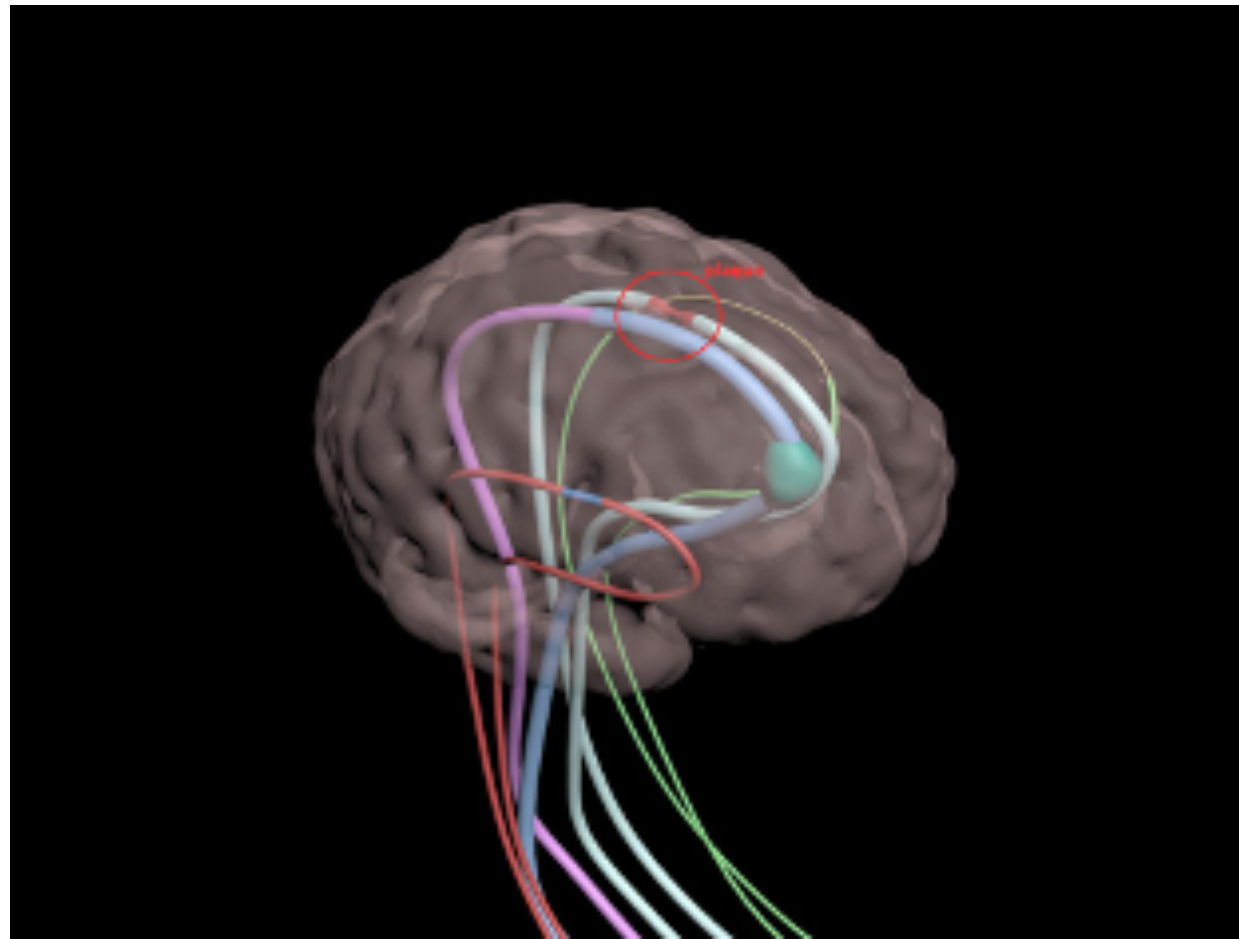
# План на 2021-2023

Новые полупроводниковые детекторы для фундаментальных и прикладных исследований.



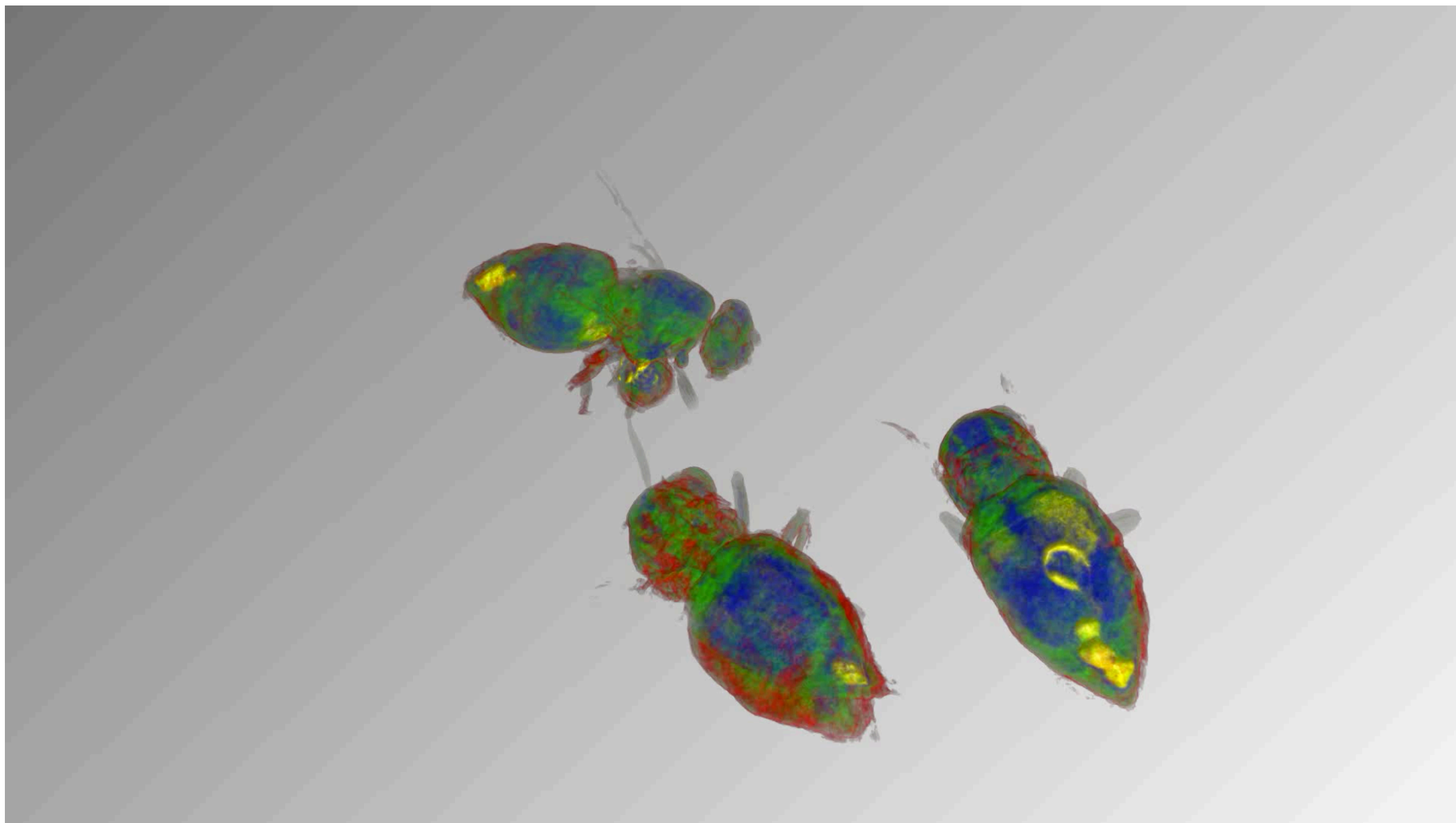
## Подготовка с созданию лабораторного прототипа «головного» КТ

Для проведения сравнения на образцах близких к реальным заказан фантом человеческой головы с различными диаметрами сосудов внутри



Red - 2mm, Blue – 5mm, Purple - 4mm, Green - 1.5 mm, Gold color - 0.5 mm

## О планах сознания КТ с разрешением лучше 10 $\mu$





# Micro-Computed Tomography as a Platform for Exploring *Drosophila* Development

Todd A. Schoborg\*<sup>1</sup>, Samantha L. Smith<sup>1</sup>, Lauren N. Smith<sup>1</sup>,  
H. Douglas Morris<sup>2</sup> and Nasser M. Rusan\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Cell Biology and Physiology Center, National Heart, Lung and Blood Institute, National Institutes of Health, Bethesda MD 20892

<sup>2</sup> Mouse Imaging Facility, National Institute of Neurological Disorders and Stroke, National Institutes of Health, Bethesda MD 20892

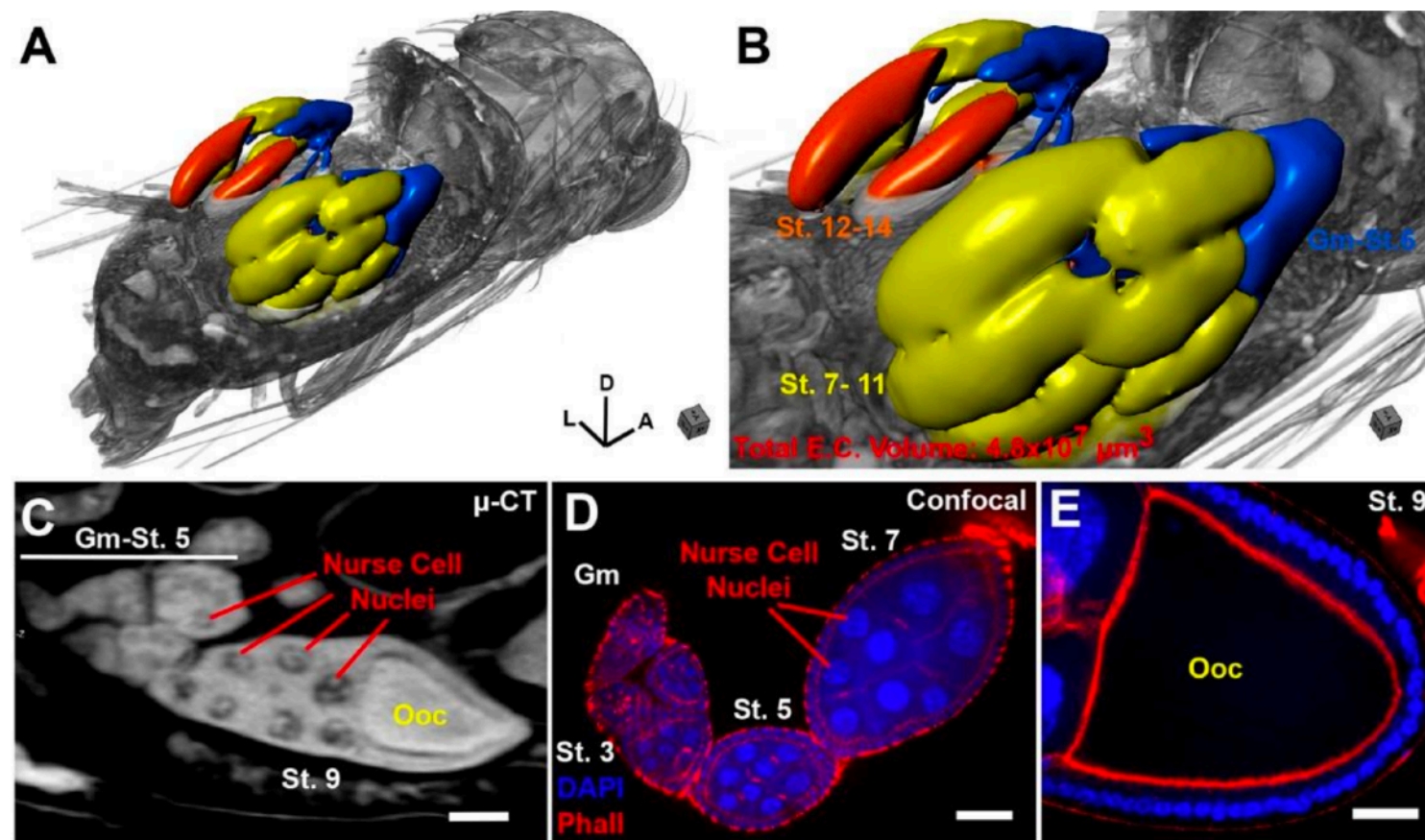
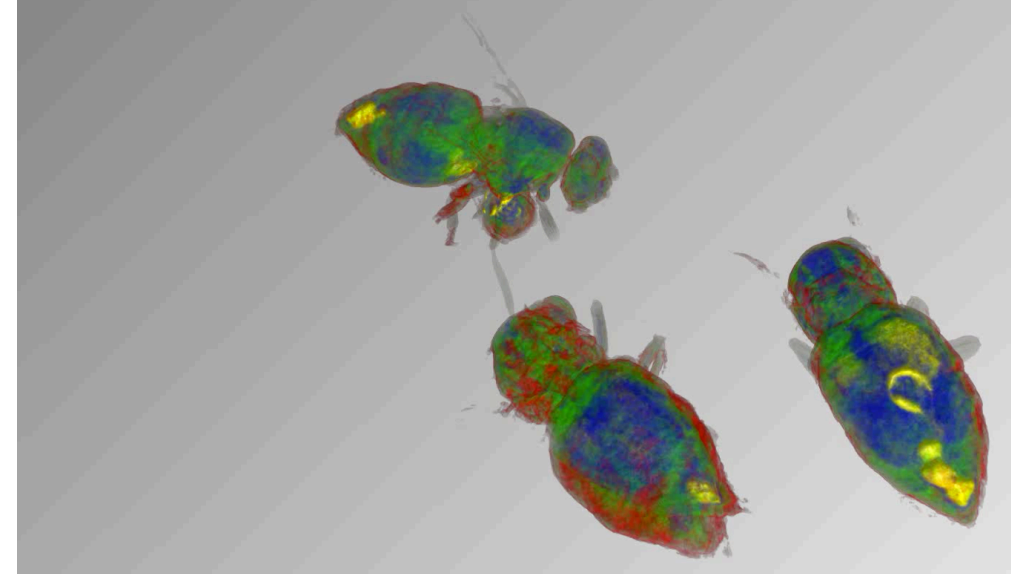


Figure 5.  $\mu$ -CT of adult *Drosophila melanogaster* highlighting the female reproductive

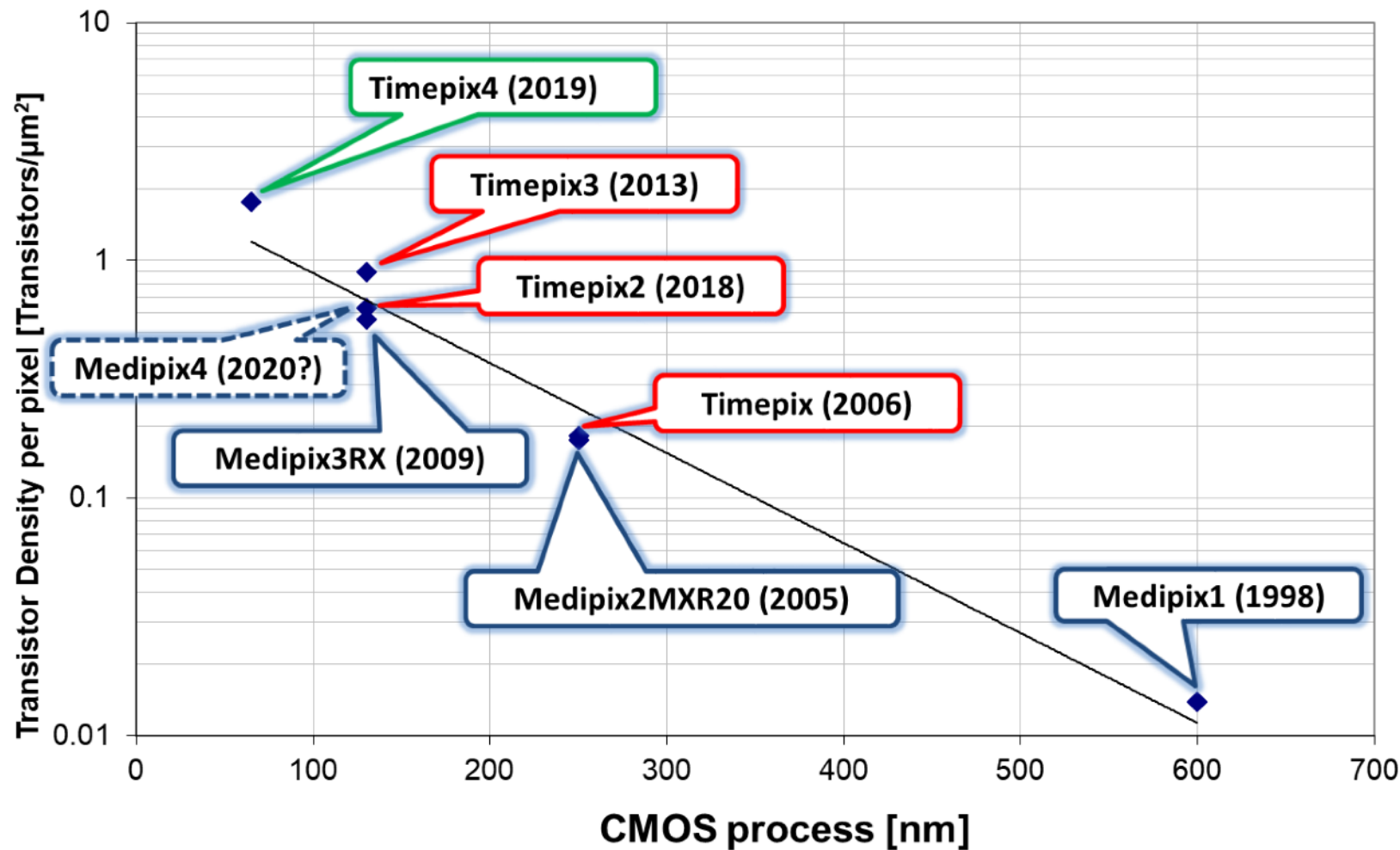
The design of the Timepix4 chip:  
a 230 kpixel and 4-side buttable chip with  
200 ps on-pixel time bin resolution and  
15-bits of TOT energy resolution

X. Llopart

On behalf of the Medipix4 Collaboration

18<sup>th</sup> November 2019

# 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

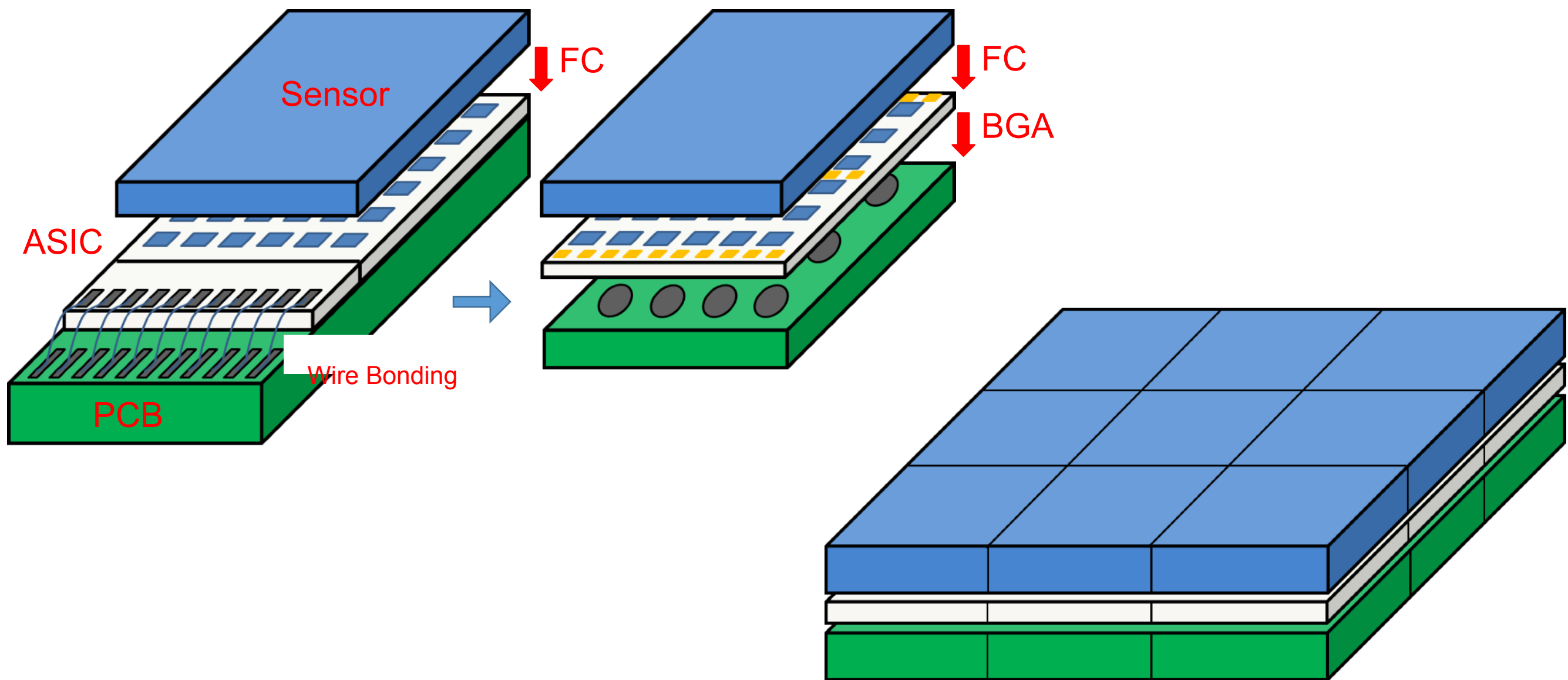
**15 members**



# 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)	Mode	TOT and TOA	
		Event Packet	48-bit	64-bit
		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>
Frame based (Imaging)	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>TOT energy resolution</b>			< 2KeV	< 1Kev <b>5x</b>
<b>TOA binning resolution</b>			1.56ns	<b>195ps</b> <b>2x</b>
<b>TOA dynamic range</b>			409.6 $\mu\text{s}$ (14-bits @ 40MHz)	<b>1.6384 ms</b> (16-bits @ 40MHz) <b>8x</b>
<b>Readout bandwidth</b>			≤5.12Gb (8x SLVS@640 Mbps)	<b>≤163.84 Gbps</b> (16x @10.24 Gbps) <b>4x</b>
<b>Target global minimum threshold</b>			<500 e <sup>-</sup>	<500 e <sup>-</sup> <b>32x</b>

# 4-side butttable 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

# Timepix4 applications

- Data-Driven applications:
  - HEP:
    - Very high rate pixel telescope
    - Sensor studies (high speed)
    - Beam gas interaction (PS SPS/LHC?)
    - AeGIS/ASACUSA
    - ATLAS background rad monitor and TRD detector
    - MOEDAL
    - GEMPIX / large area TPC
    - Test vehicle for next gen LHCb-VELO with tens of ps time resolution
  - Time-of-flight mass spectrometry
  - Neutron time-of-flight imaging
  - Radiation monitors
  - Electron microscopy
  - X-ray and powder diffraction
  - Compton camera for medical diagnostics
  - Sub-pixel resolution imaging
  - Gamma and neutron imaging for nuclear industry and Homeland Security
- Frame-based imaging applications:
  - X-ray imaging in synchrotrons with extreme high rates  $> 10^9$  particles/mm<sup>2</sup>/s
- 20th Anniversary Symposium on Medipix and Timepix
  - <https://indico.cern.ch/event/782801/>



# План на 2021-2023 гг.

**FCAL**

Создание полномасштабного прототипа модуля FCAL;  
Участие в разработке адекватной электроники;  
Проведение испытаний на пучке в DESY.

**Pixels**

**Разработка детекторов, электроники и ПО для Tiberix4;**  
Создание прототипов ПО для “головного” КТ и  $\mu$ КТ;  
Организация совместной работы с:  
- биофизиками МФТИ на микротомографе MARS;  
- генетиками ЛЯП на  $\mu$ КТ;  
Разработка и создание системы ОФЭКТ/КТ.

**Рад.  
СТОЙКОСТЬ**

Совместно с физиками Томска создание радиационно стойкий образцов GaAs сенсоров;  
Измерение рад. стойкости этих образцов на пучках нейтронов и электронов в ОИЯИ;

**ЛИНАК 200**

Ввод в эксплуатацию линейного ускорителя электронов ЛИНАК-200

НОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И  
ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Тема 04-2-1126-2015/2023

ОИЯИ ЛЯП: А.Л.Гонгадзе-0,1; М.И.Госткин-0,6; А.С.Жемчугов-0,1; В.Г.Кручонок-0,6;  
Д.А.Кожевников-0,2; Н.К.Кузнецов-0,5; А.В.Лапкин-1; А.Лейва-0,8; Д.Д.Расторгуев-1;  
В.А.Рожков-1; Т.О.Руденко-0,2; П.И.Смолянский-0,8; Е.А.Черепанова-0,8;  
С.Шакур-0,8; Г.А.Шелков-0,8. ( $\Sigma = 9,3$  FTE)  
ОИЯИ ЛЯР: А.Т.Исатов-0,2; С.В. Митрофанов-0,2; Ю.Г.Тетерев-0,2.  
ОИЯИ ЛНФ: А.Ахмедов-0,1, Ю.Н.Копач-0,1, С.Ю.Тележников-0,1ю

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА - Г.А.Шелков.

ЗАМЕСТИТЕЛЬ РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА - В.А.Рожков

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

ДАТА НТС ЛАБОРАТОРИИ \_\_\_\_\_ НОМЕР ДОКУМЕНТА \_\_\_\_\_

ДАТА НАЧАЛА ПРОЕКТА - 2015 год