



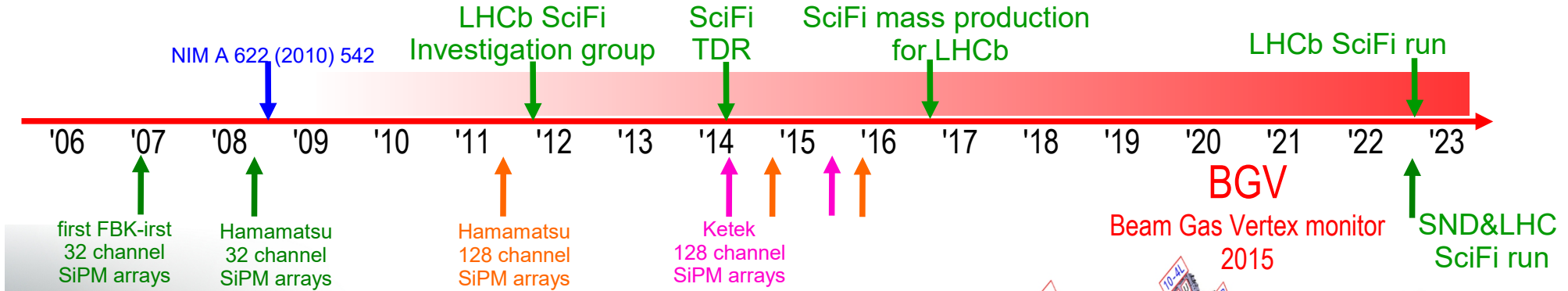
Новые трековые детекторы на основе сцинтилляционных волокон (SciFi) и их применение в физике высоких энергий, астрофизике и медицине.

Александр Малинин НИЦ КИ, МИФИ



ЛНФ ОИЯИ, 14th июня 2023 г.

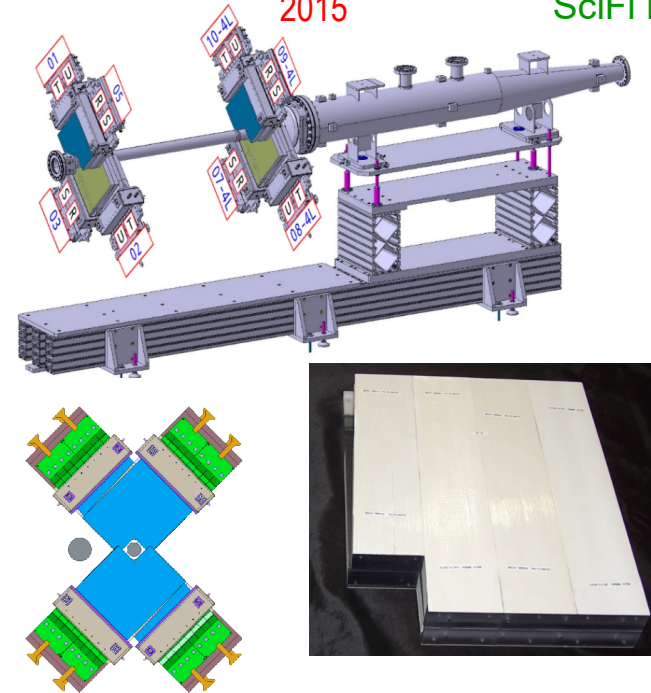
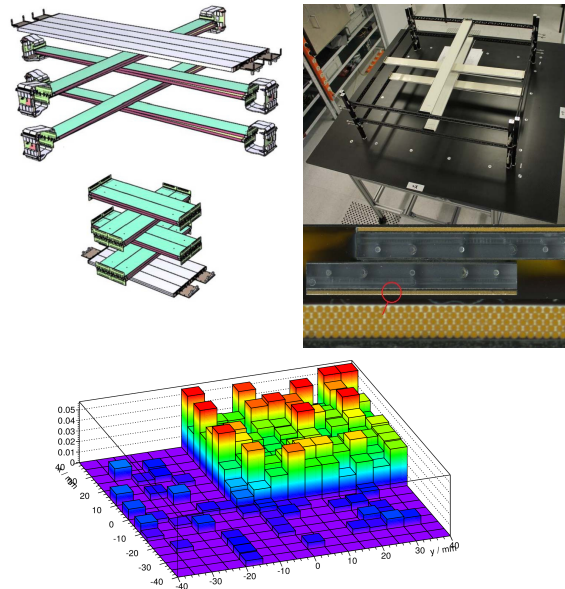
LHCb SciFi 2.5m long mats!



PERDaix 2010



Muon tomograph, RWTH 2013



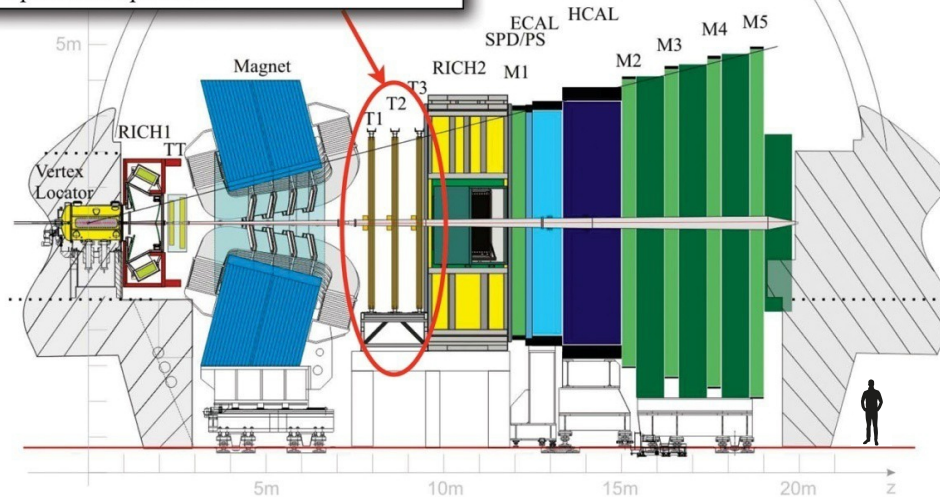
Replacement of the downstream tracker

Requirements:

- 40MHz readout
- resolution $< 100\mu\text{m}$
- high efficiency; low noise
- minimize budget material in acceptance
- operations up to 50fb^{-1}

LS2

LHCb tracker upgrade



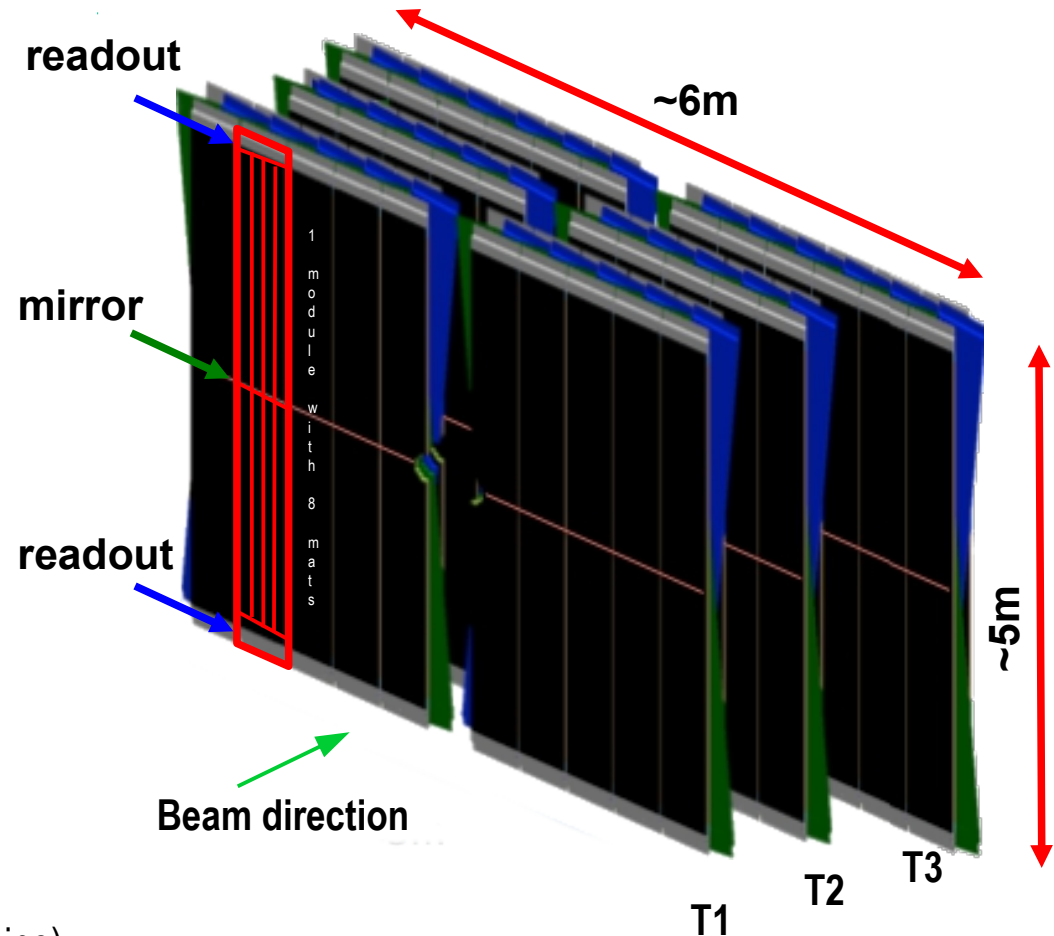
- Goal: 50fb^{-1} integrated luminosity
 - increase the statistics significantly (rare decays)
 - limited by 1 MHz hardware trigger, and
 - limited by detector occupancy
- Major upgrade during LS2 in 2020
 - new VELO
 - replace TT with new silicon micro-strip detector
 - replace IT (silicon) & OT (straws) with SciFi tracker (scintillating fibres, SiPM array sensors), to achieve
 - 40 MHz detector readout → full software trigger!
 - RICH: new photon detectors
 - Calorimeter: remove SPD/PS, new readout
 - Muon System: remove M1, new readout.

- Layout :

- 12 layers arranged in 3 tracking stations
- each station with 4 planes of scintillating fibre modules (two planes tilted by $\pm 5^\circ$ stereo angle)
- T1+T2: 10 modules per layer, T3: 12 modules
- in total: 128 modules, 1024 fibre mats + spares
- 340 m² sensitive area
- readout boxes with light injection system for calibration

- Requirements :

- single hit efficiency $\sim 99\%$
- material budget per layer $\sim 1\% X_0$
- single point resolution $< 100 \mu\text{m}$ in bending plane
- 40 MHz readout
- radiation hardness (up to 35 kGy for fibres near beam pipe)



Tracking with four 10 x 10 cm SciFi XY detectors and 12 bit ASIC (VATA64HDR14) readout

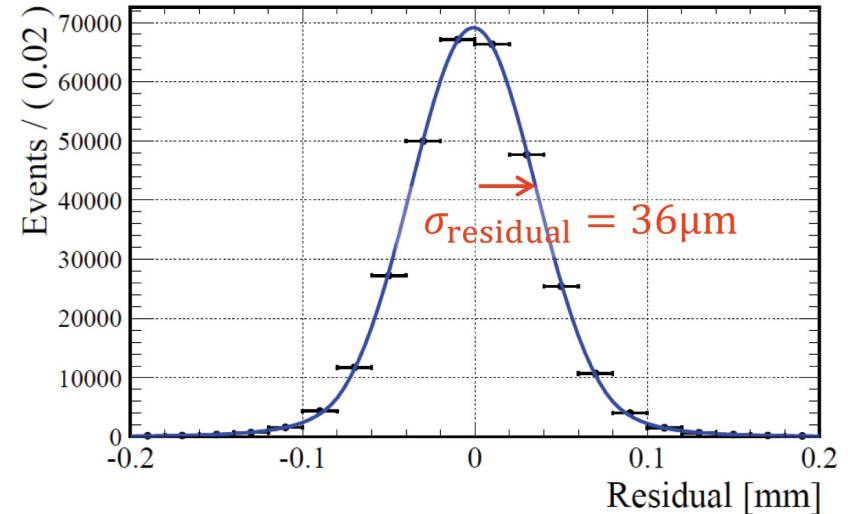
Hit resolution σ_{hit}

- At the DUT: $\sigma_{\text{Residual}}^2 = \sigma_{\text{hit}}^2 + \sigma_{\text{track}}^2$
- σ_{hit} same for all layers:

$$\sigma_{\text{hit}} = 32\mu\text{m} \Rightarrow \sigma_{\text{track}} = 16\mu\text{m}$$

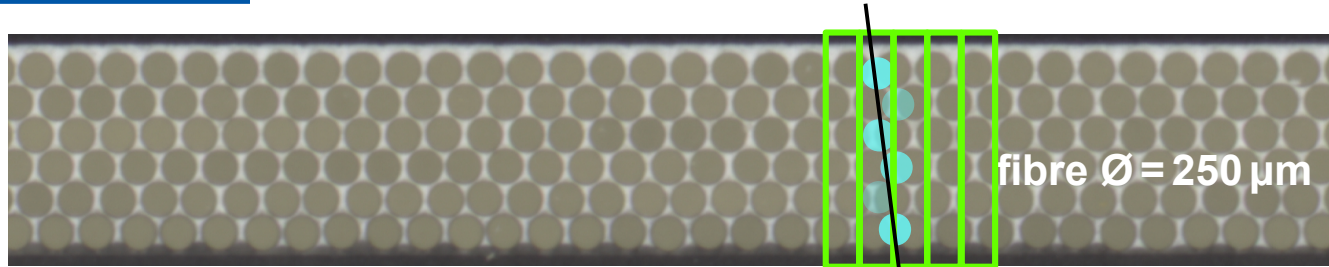
Hit detection efficiency ϵ_{hit}

- At the best hit resolution: $\epsilon_{\text{hit}} = 99.6\%$
- Track finding efficiency $\sim 98.6\%$
- Reduce the number of tracks with multiple scattering: cut on track χ^2
- Reject events with high energy delta electrons
- At SPS: $\epsilon_{\text{track}} = 50\%$ used tracks

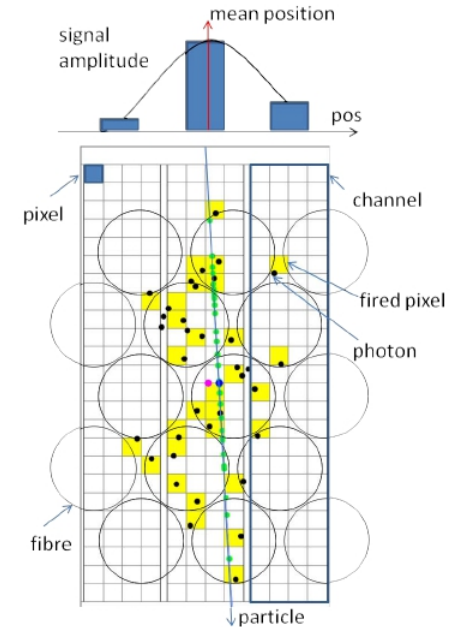
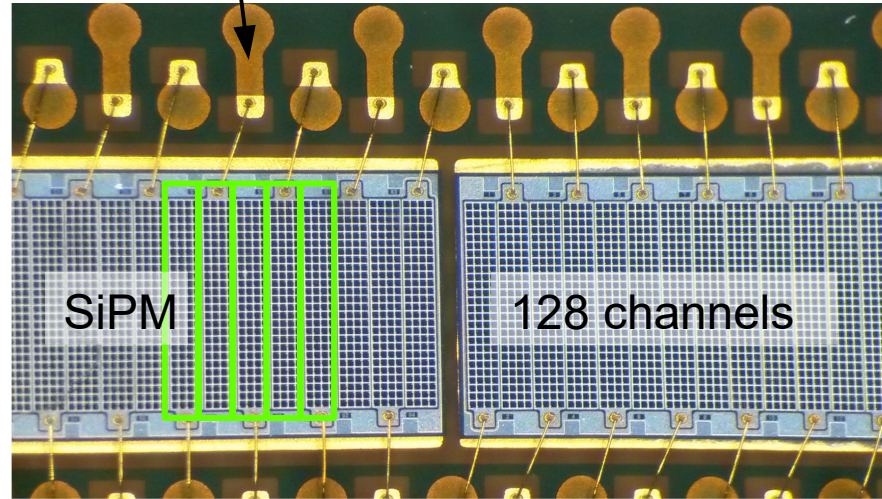
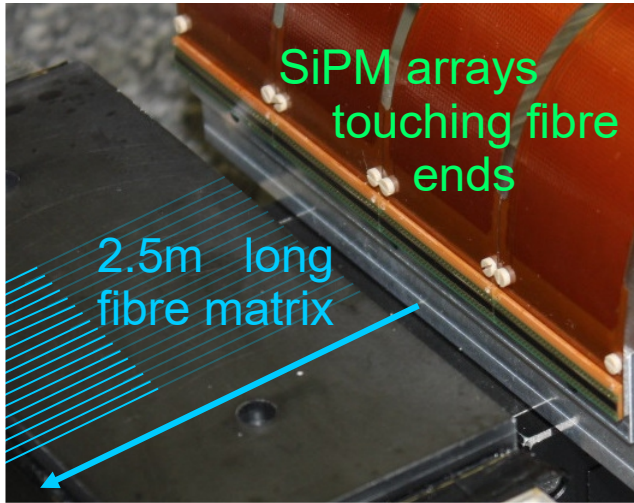


O. Girard – BTTB6, Zürich, 2018

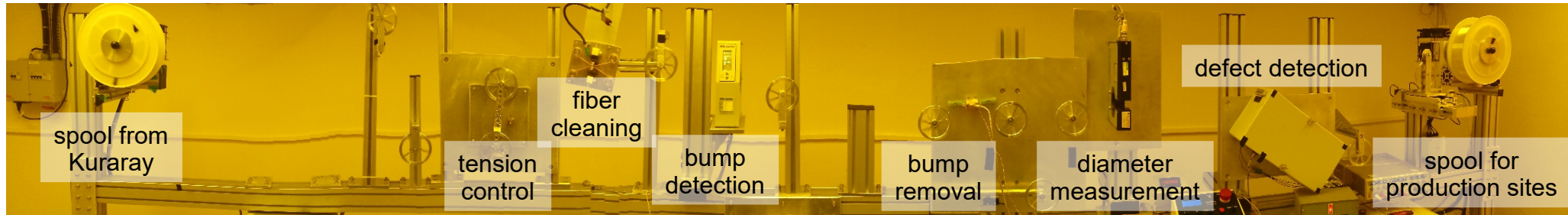
SciFi Principle



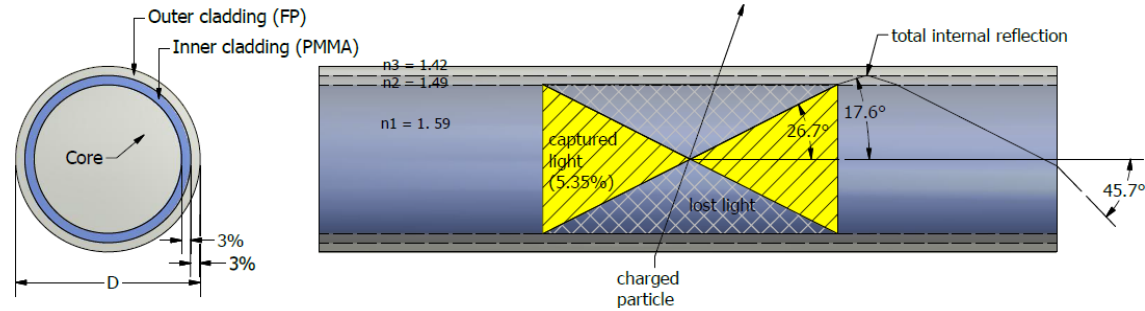
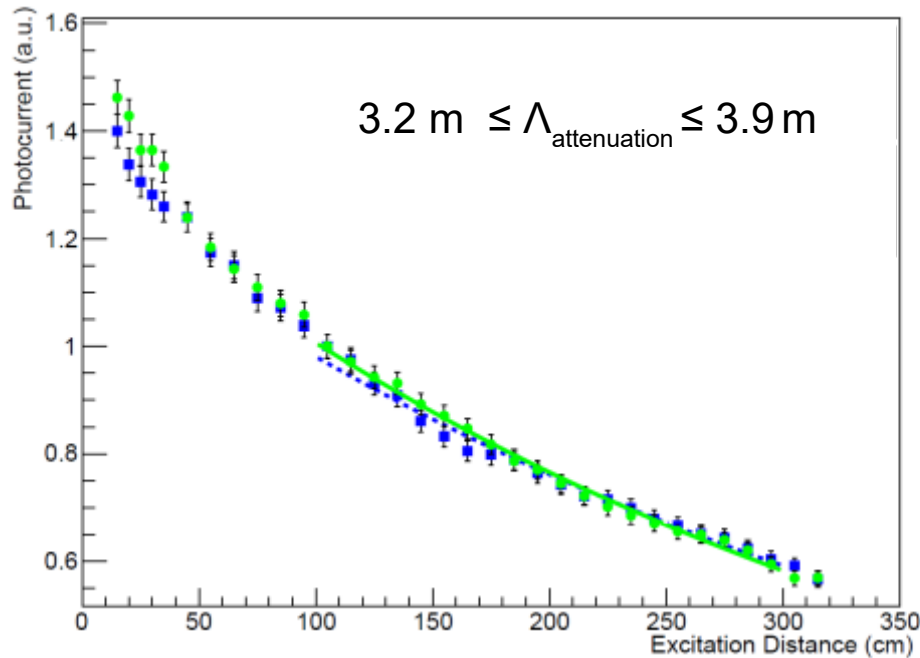
Six-layer fibre mat
1.4 mm thick



- Staggered layers of 250 μm thin, double-clad scintillating fibres, to form a 6-layered hexagonal packed mat
- Read out by the SiPM arrays covering one fibre mat end face
- Signal is shared between the adjacent SiPM array channels allowing for a resolution better than $\text{pitch} / \sqrt{12}$
- Mirror opposite to readout end increases the light yield by $\geq 65\%$ for the hits close to the mirror.

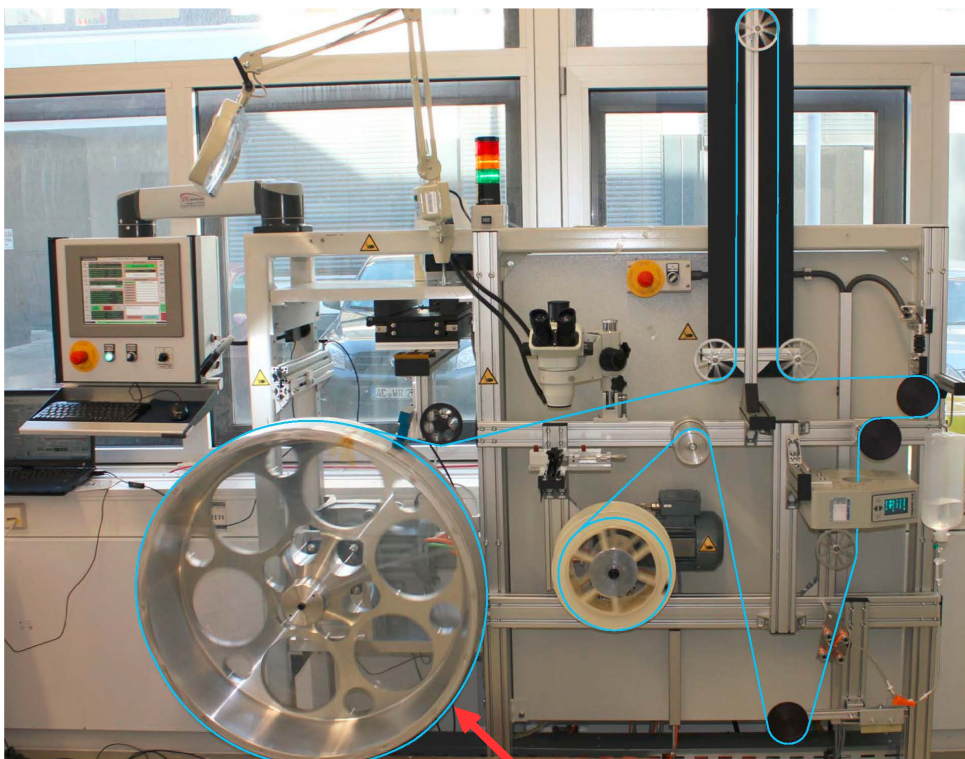


SCSF-78 (2015 fibres)

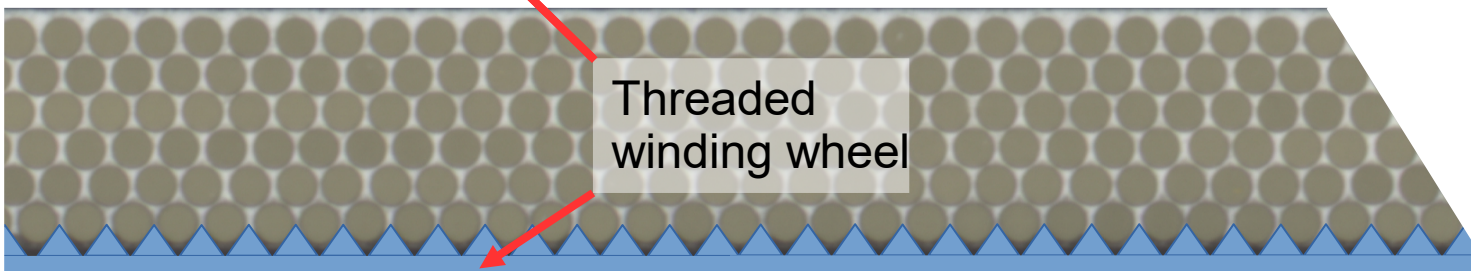
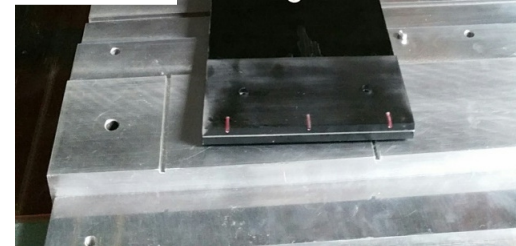
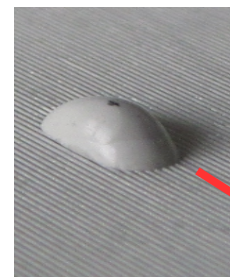


- 250 μm thin multi-clad Kuraray SCSF-78MJ ($\lambda_{\text{fibre}} = 460 \text{ nm}$)
- more than 10,000 km needed!
- fibre QA at CERN \rightarrow shipment to four mat production sites
 - bump detection and removal
 - diameter, light yield, integrity, and attenuation length measurements

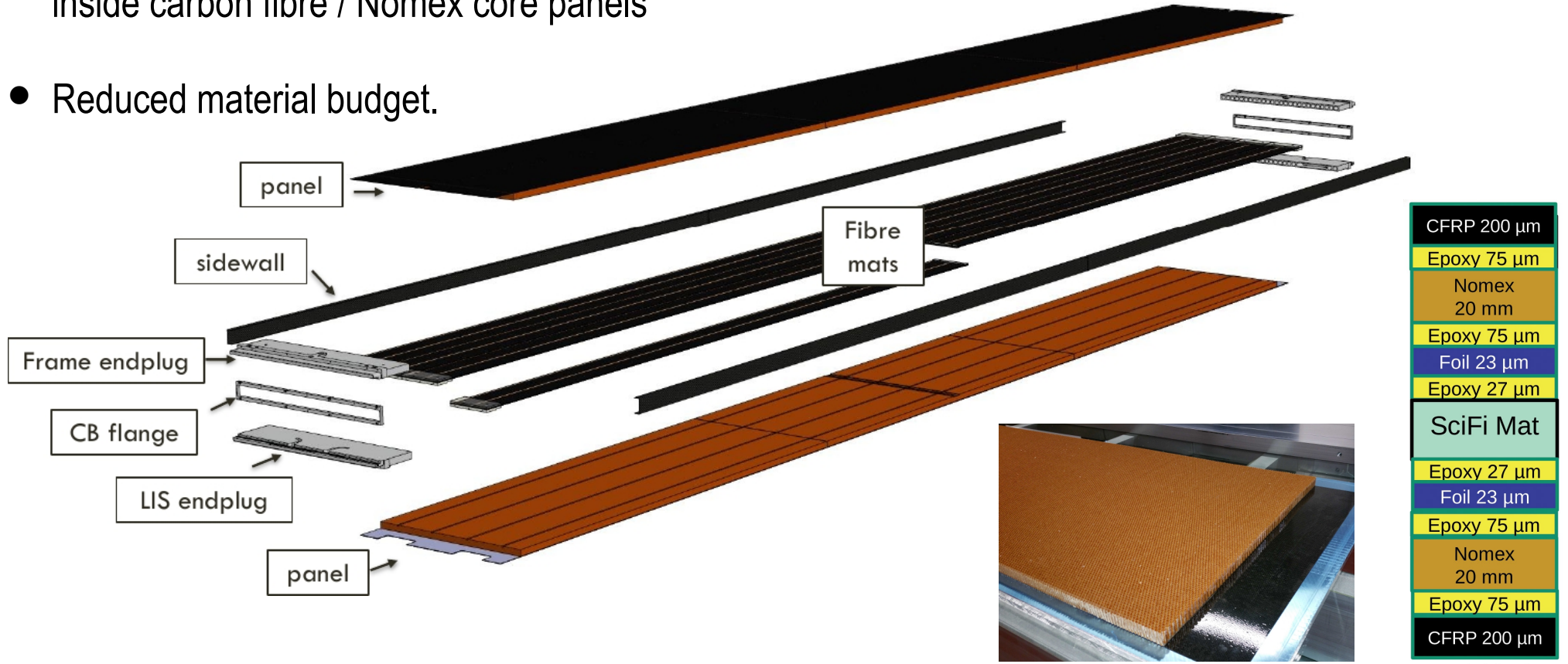




- 8 km of fibre per mat (242.4 cm long, 13.65 cm wide mat)
- Kapton lamination foil for mechanical stability and light-tightness
- Detailed QA at production sites: geometry and light yield
- Glue alignment pins inherit precision of the wheel to mats.



- 2x4 mats aligned on precision vacuum table, sandwiched inside carbon fibre / Nomex core panels
- Reduced material budget.

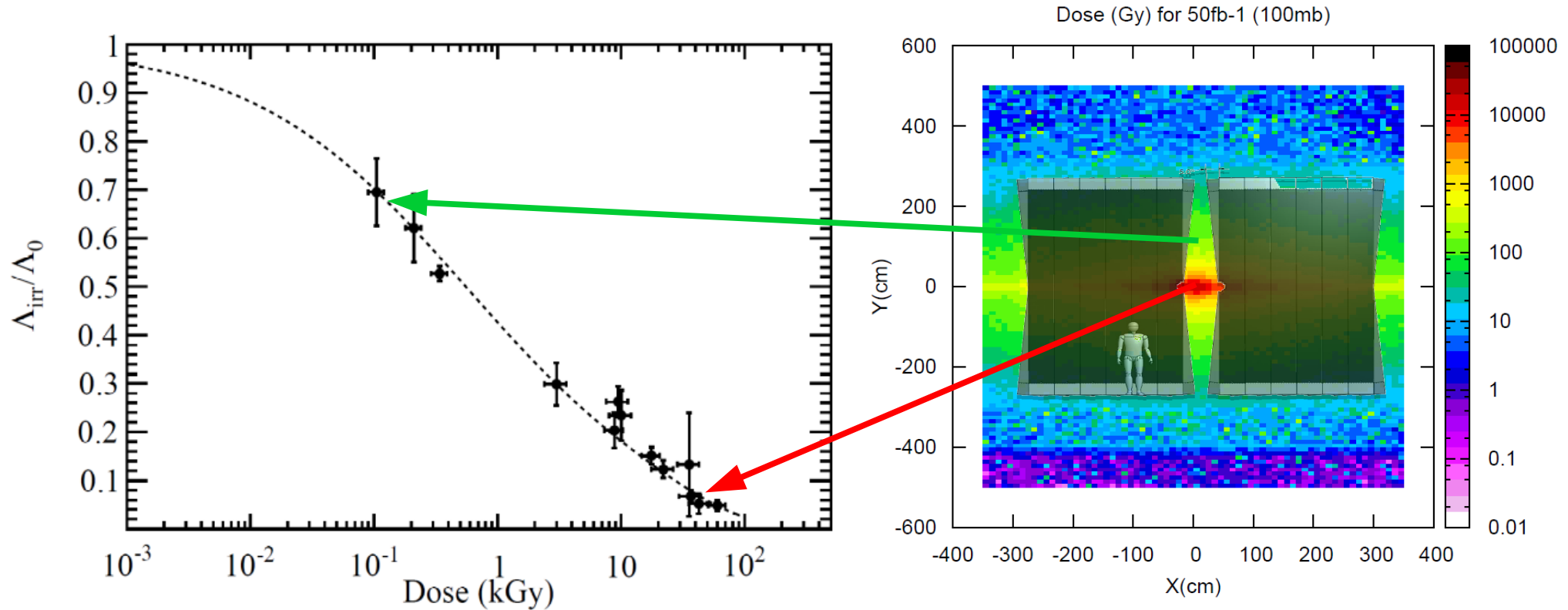


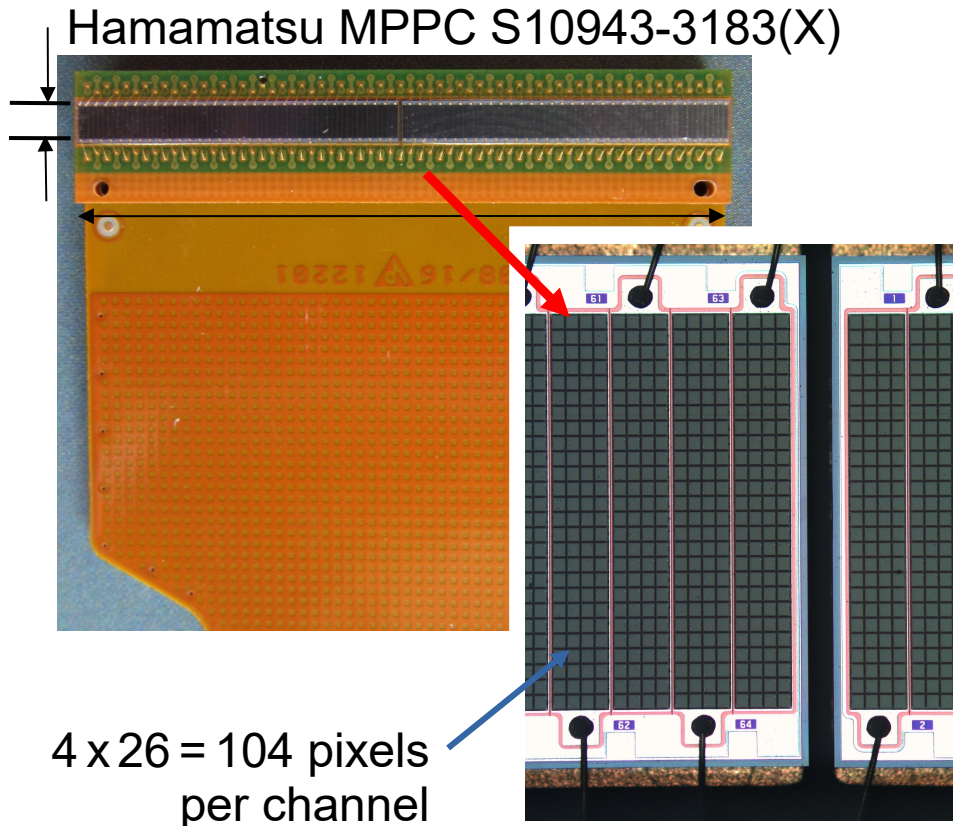
CFRP 200 μ m
Epoxy 75 μ m
Nomex 20 mm
Epoxy 75 μ m
Foil 23 μ m
Epoxy 27 μ m
SciFi Mat
Epoxy 27 μ m
Foil 23 μ m
Epoxy 75 μ m
Nomex 20 mm
Epoxy 75 μ m
CFRP 200 μ m

material budget

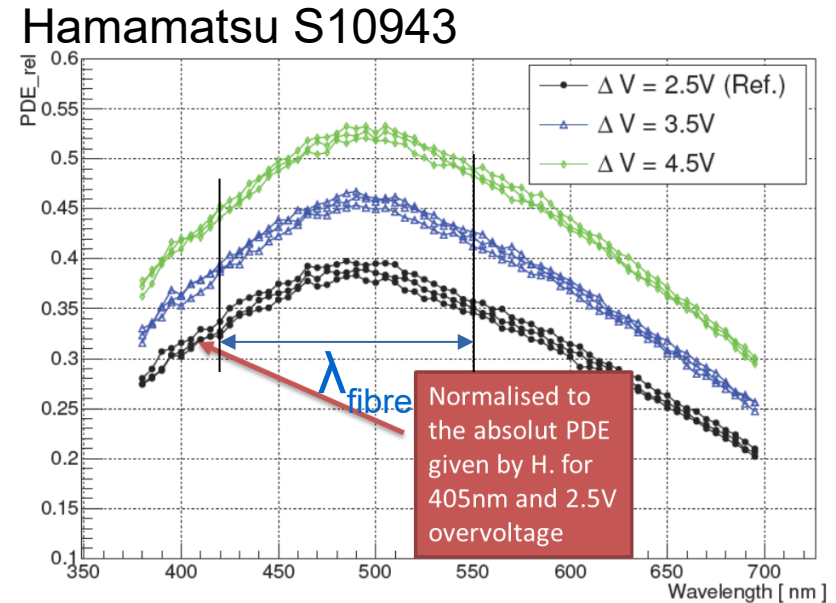
1.1% X0

- Light yield decreases with radiation dose (35 kGy near beam pipe over full lifetime, 60 Gy at SiPMs)
- Expected signal reduction of 40% near the beam pipe.





- 128 (2x64) channel SiPM arrays
- 250 μm channel pitch (= fibre diameter)
- high photon detection efficiency $\sim 45\%$
- low crosstalk probability $< 10\%$
- neutron fluence $1 \cdot 10^{12} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ (1 MeV)
 - cooling needed to reduce noise
- small distance between fibres and silicon.

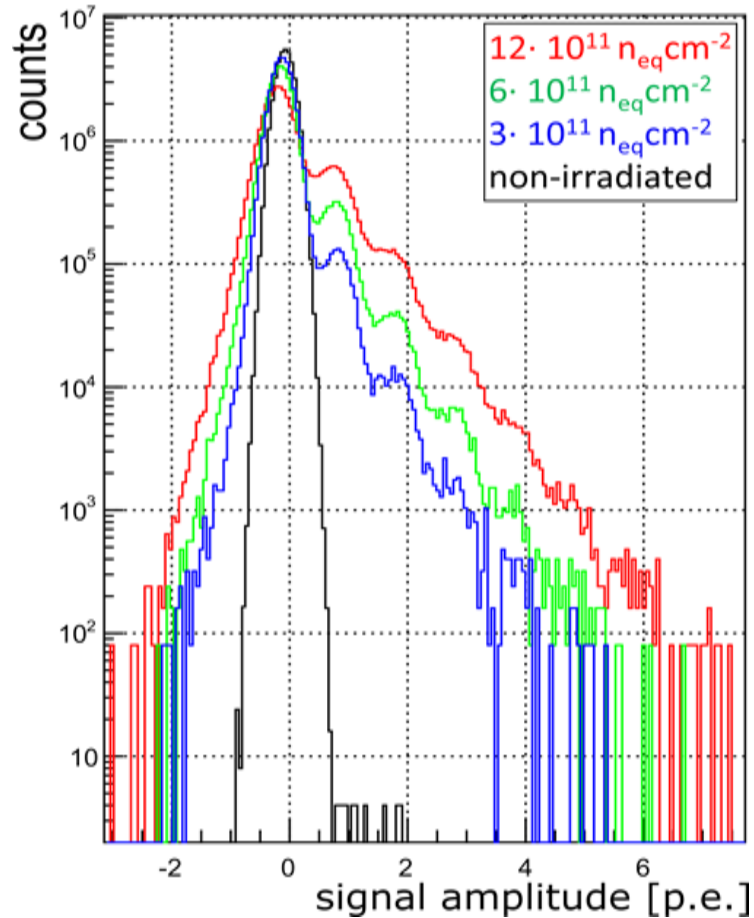


SiPM arrays Hamamatsu S10943

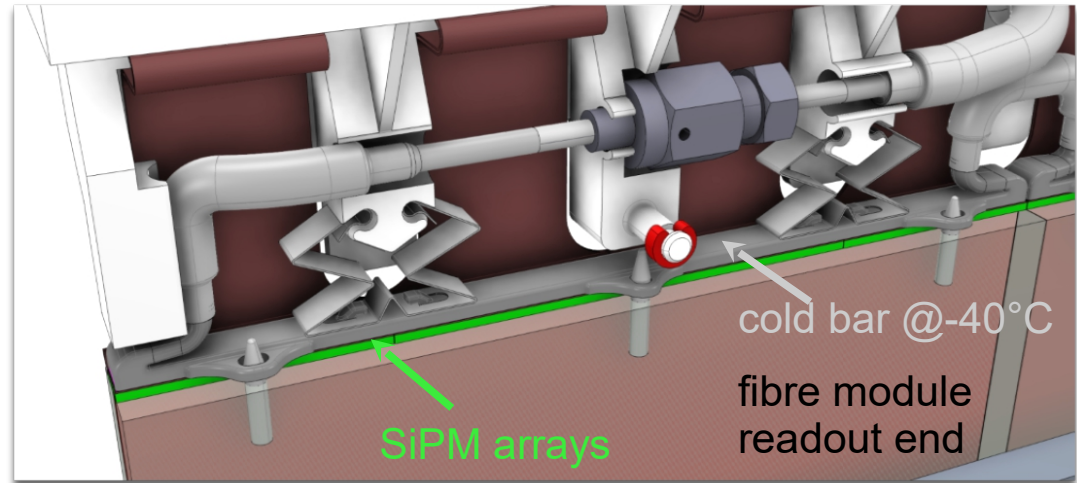


Each SiPM array has 128 channels (consists of two silicon chips). The SiPM is working at 3.8×10^6 amplification, which gives 0.6 pC signal per photoelectron, if a single pixel was hit. For all 104 pixels of a single channel fired the maximum output signal is 63 pC.

DCR spectrum from random trigger

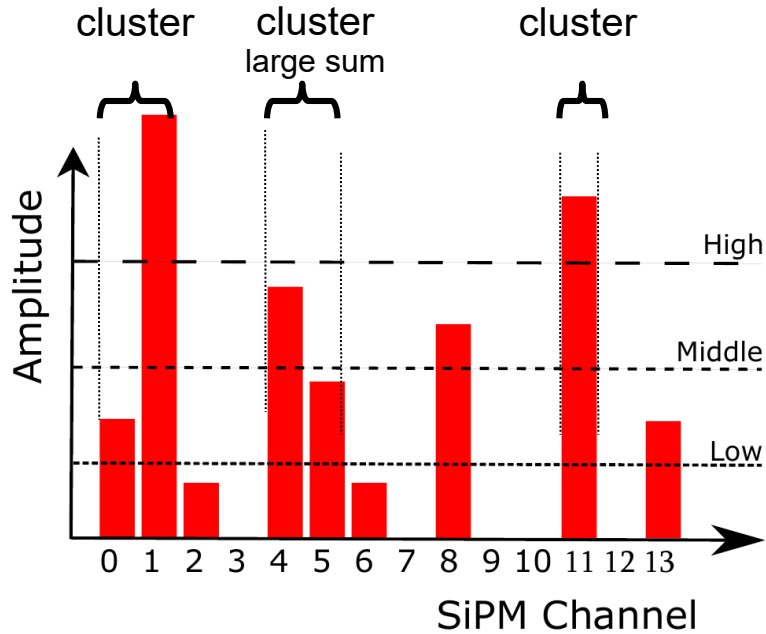


Inside the FE cold box



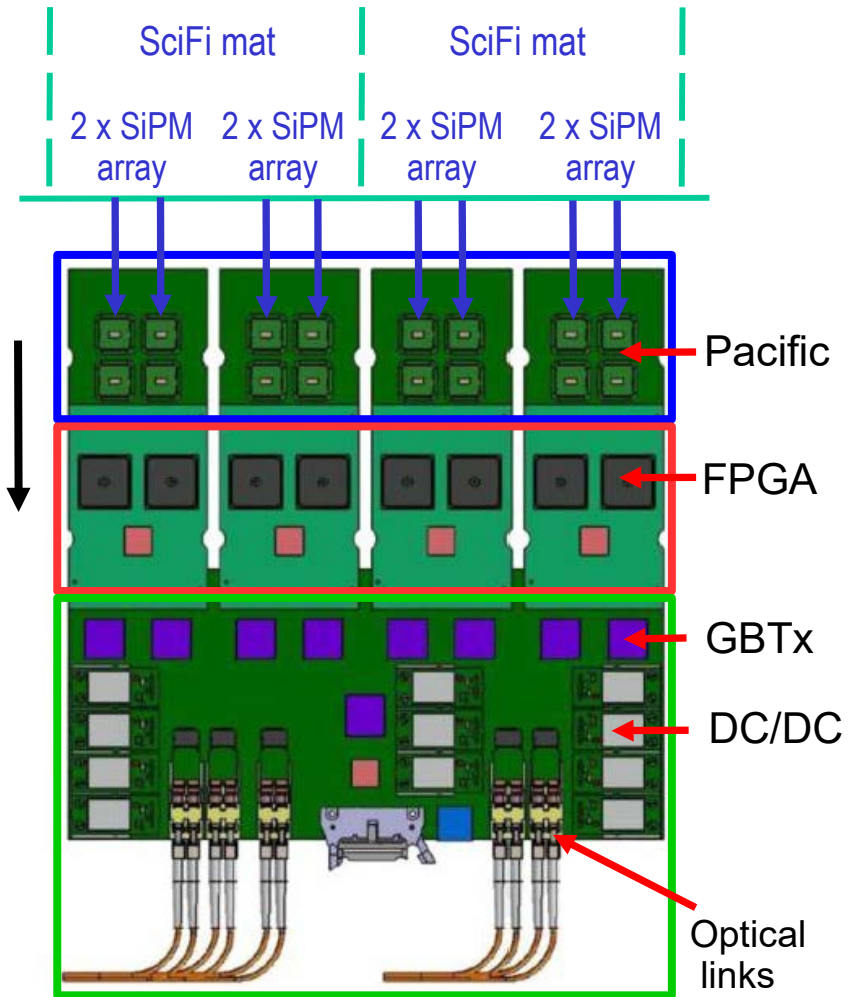
- SiPM dark count rate increases with radiation dose (60 Gy at the end of LHC Run 3)
- DCR reduction by factor 2 for every $\sim 10^\circ\text{C}$ cooling
- Single phase Novek (649) cooling for SiPM arrays down to -40°C .

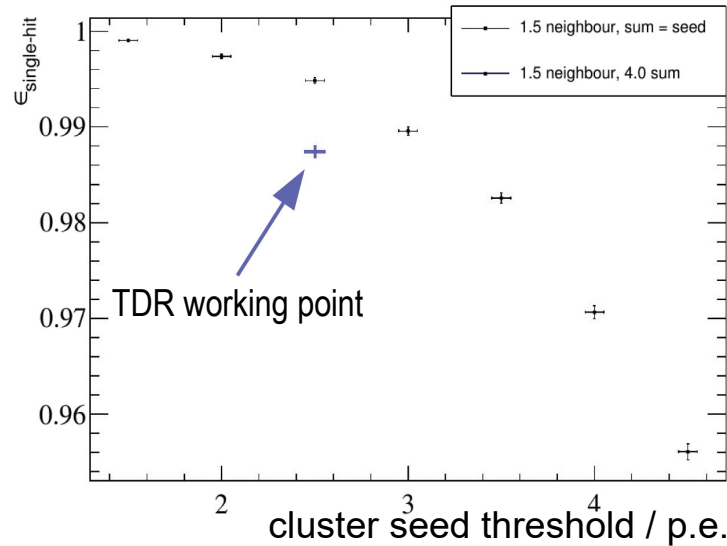
- **PACIFIC**: custom-made ASIC
 - 64 channels, 3 threshold discriminator
 - noise suppression



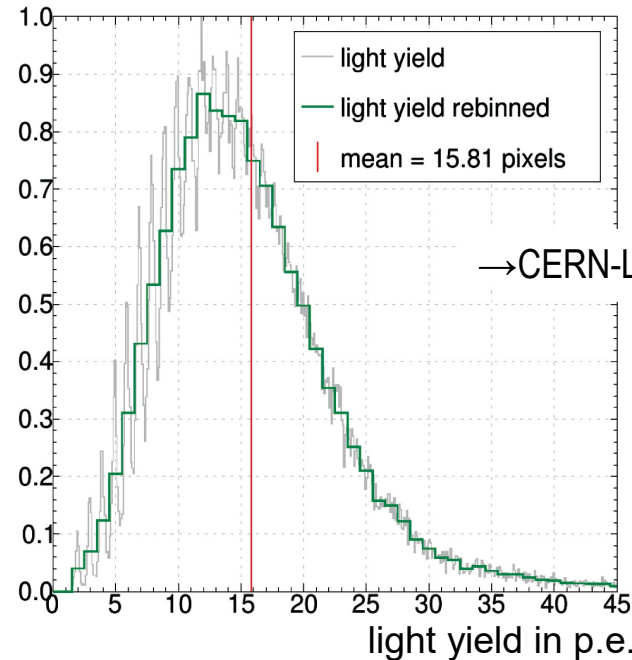
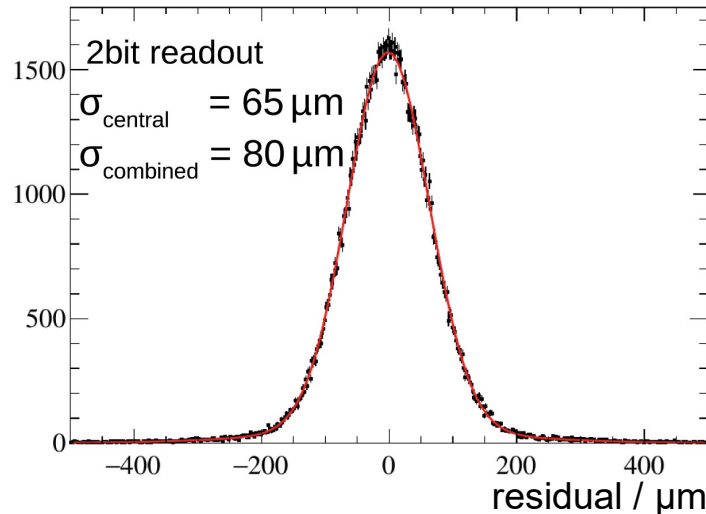
- **Clusterisation board**: cluster building and zero suppression
- **Master board**: transfers the data and distribute the signals, fast control, timing, clock, light injection pulse, and slow control.

7.7 GB/s per mat!

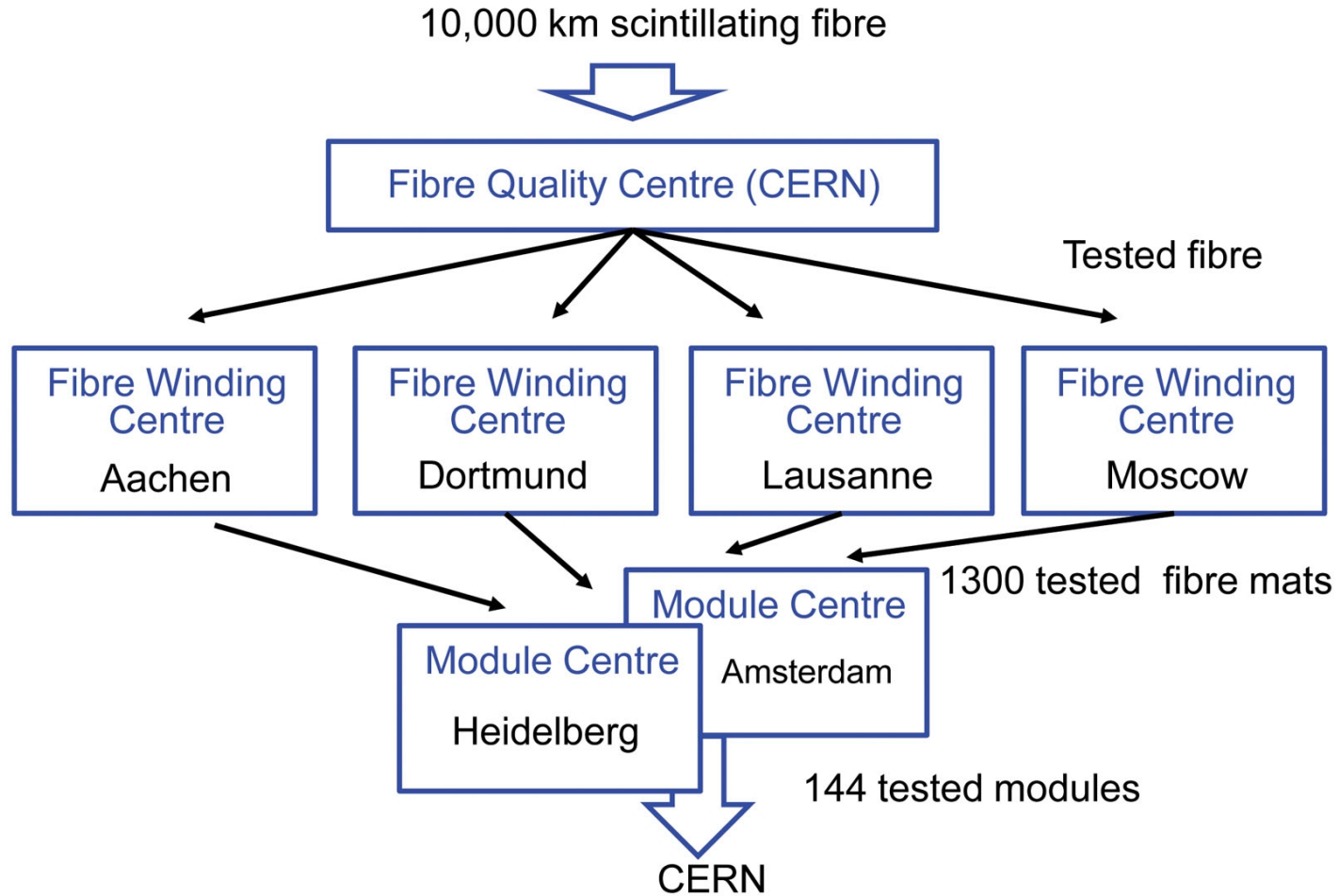




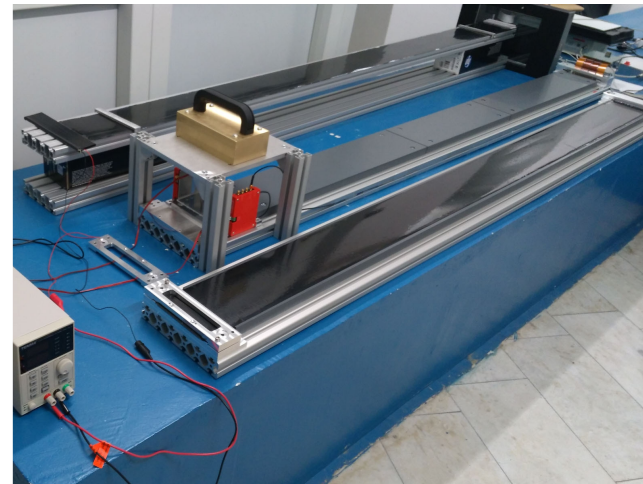
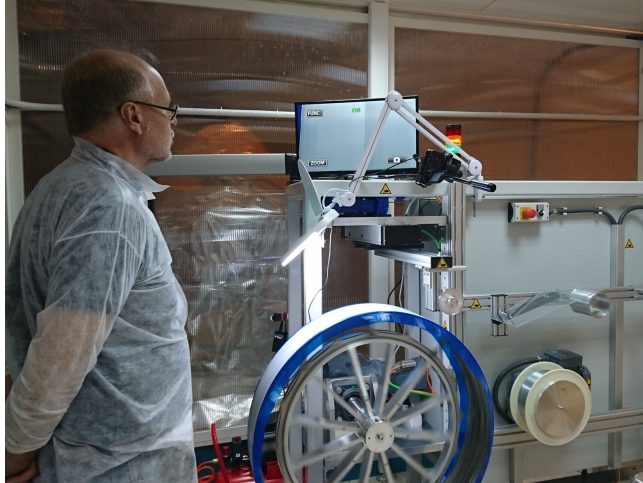
- Measured at SPS180 GeV p/π^+ secondary beam:
 - Light yield: 16 p.e.
 - Hit efficiency: 99%
 - Spatial resolution: 80 μm
- } near the mirror



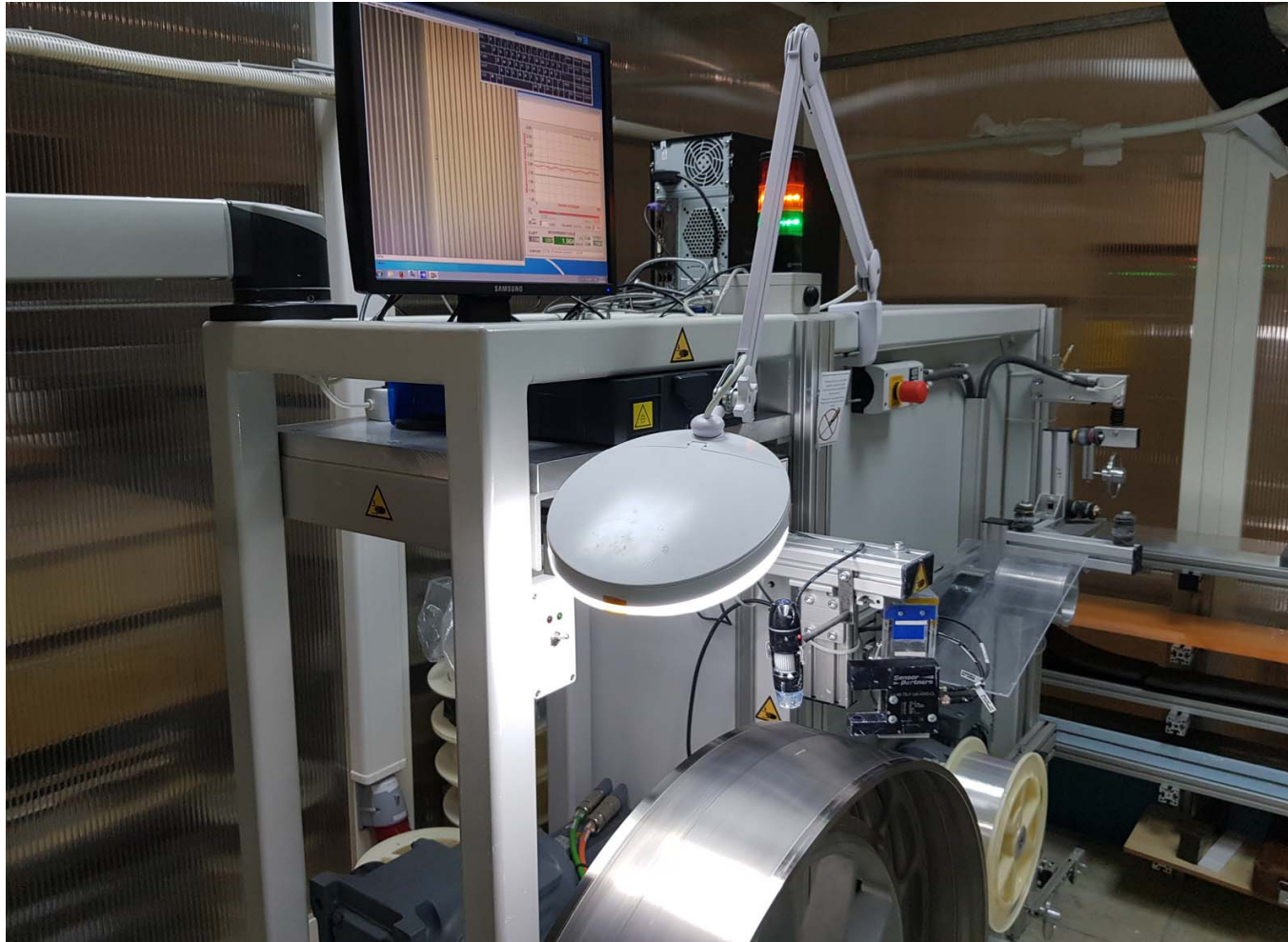
→ CERN-LHCb-PUB-2015-025



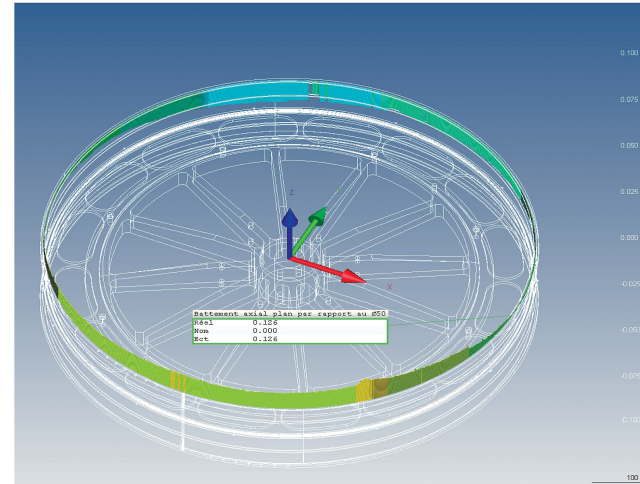




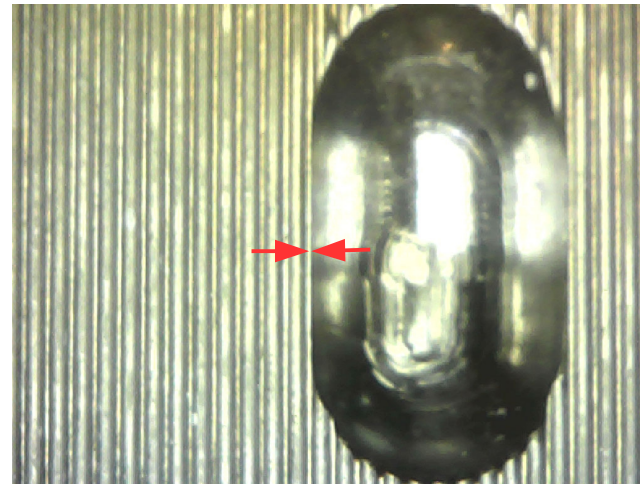
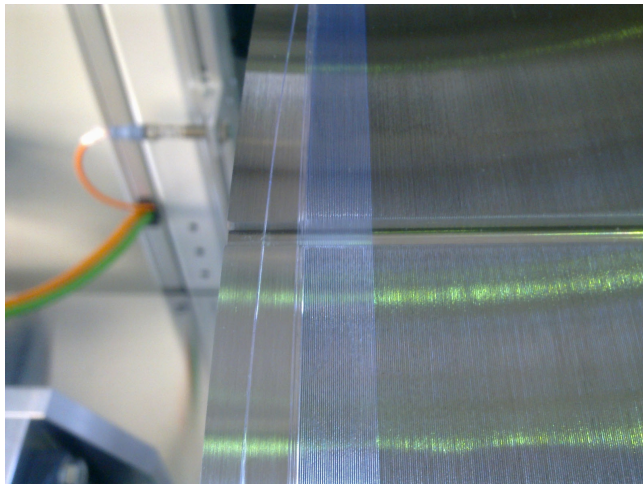
SciFi winding machine at NRC KI



Winding wheel made at NRC KI



Maximum wheel deviation from an ideal shape is less than 70 μm .

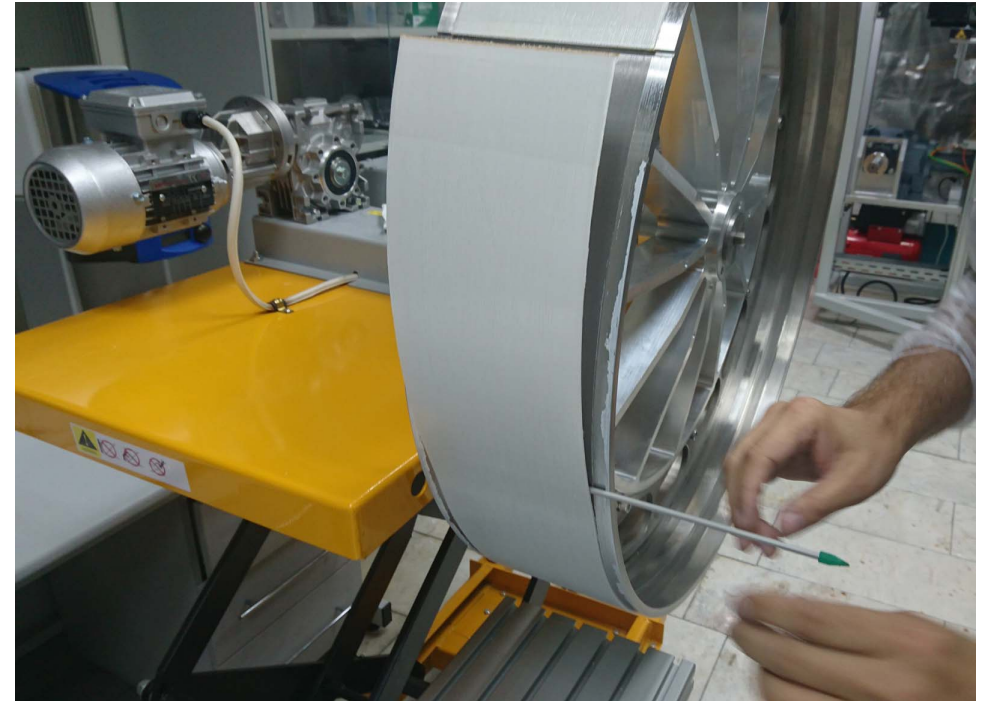


Wheel's pin hole alignment with respect to the thread is better than 20 μm .

SciFi mat after the binder polymerisation is removed from the winding wheel:

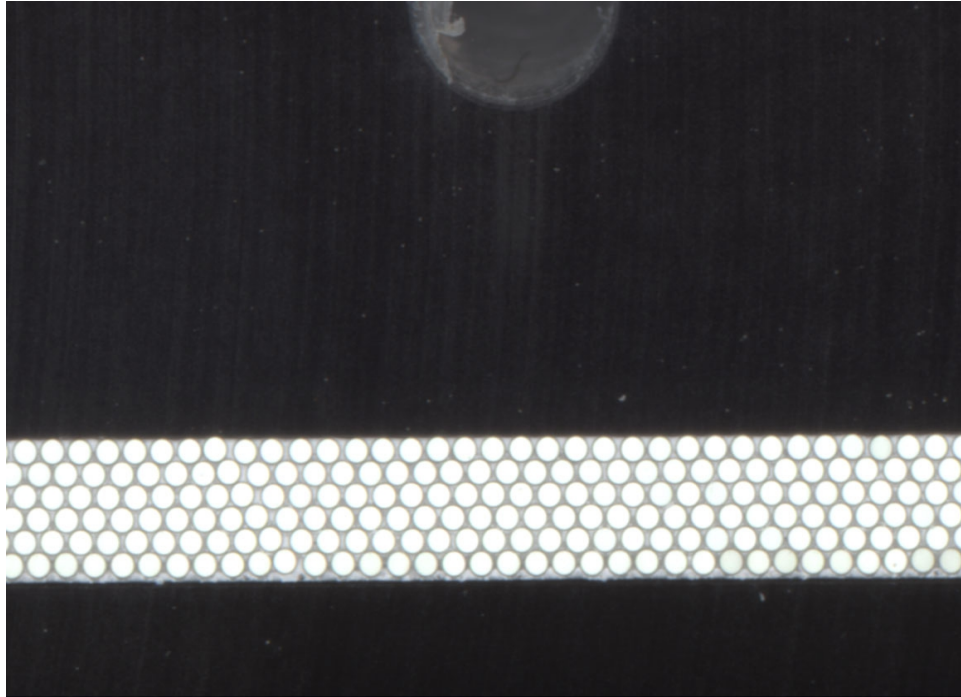


Mat cutting with a hot knife.



Removal from the wheel.

Then the polycarbonate end-pieces glued at the mat ends and cut through to the right size;

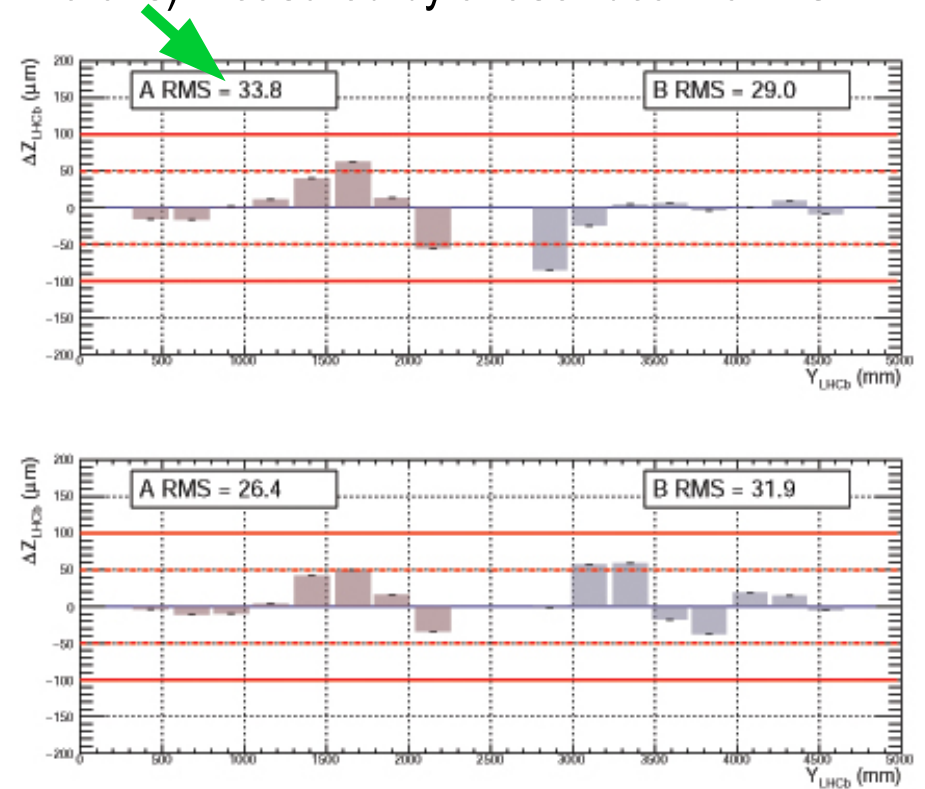


the optical scan is performed on a test bench;

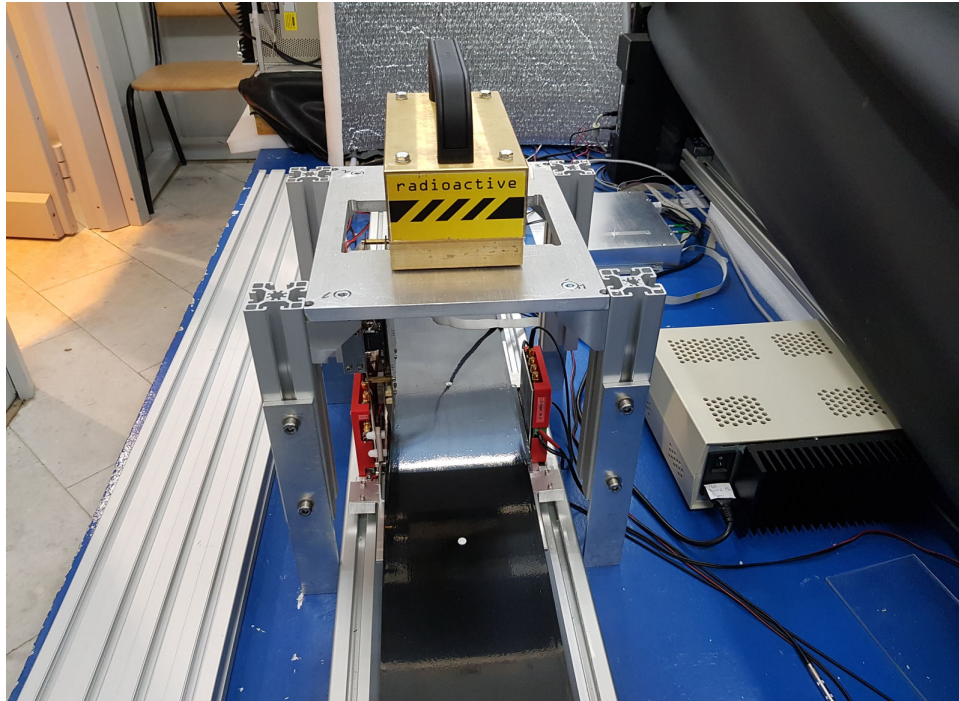


after the tests mirror is mounted on one end.

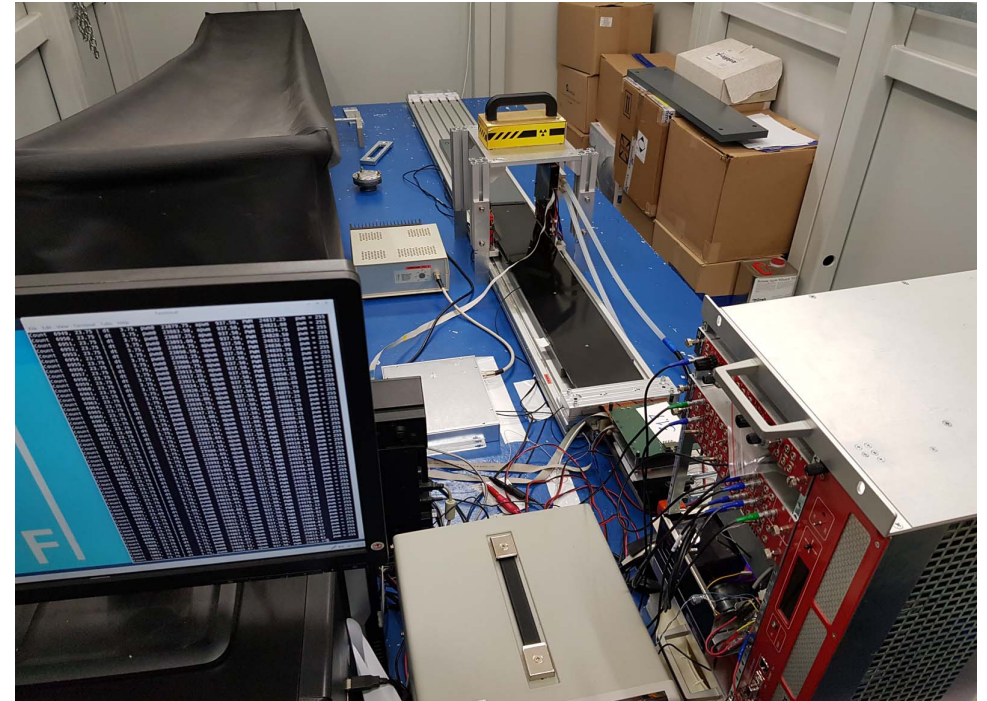
NRC KI SciFi alignment pins position accuracy (in microns) measured by a laser beam at DU.



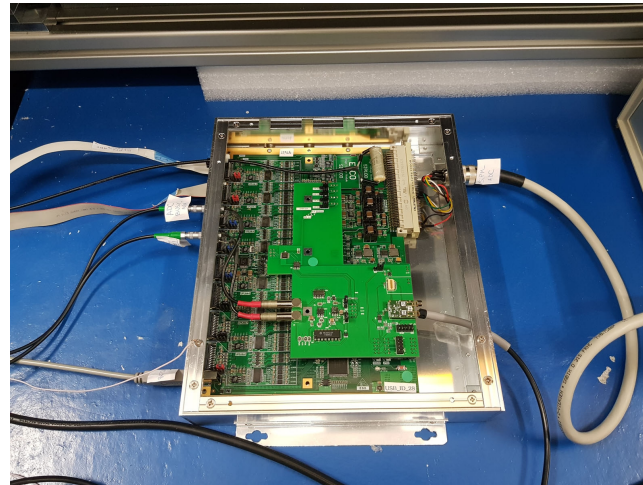
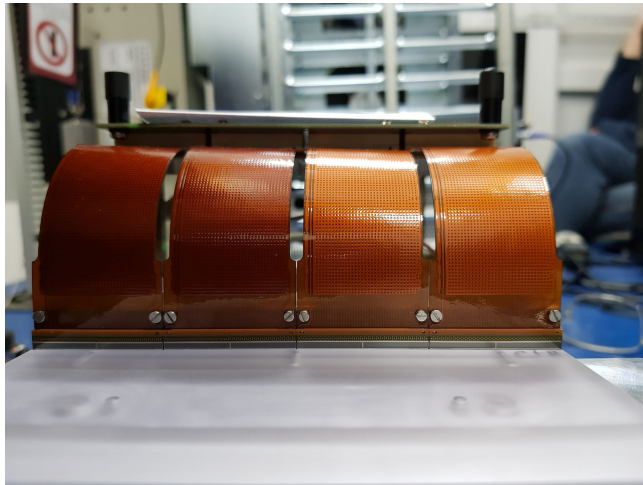
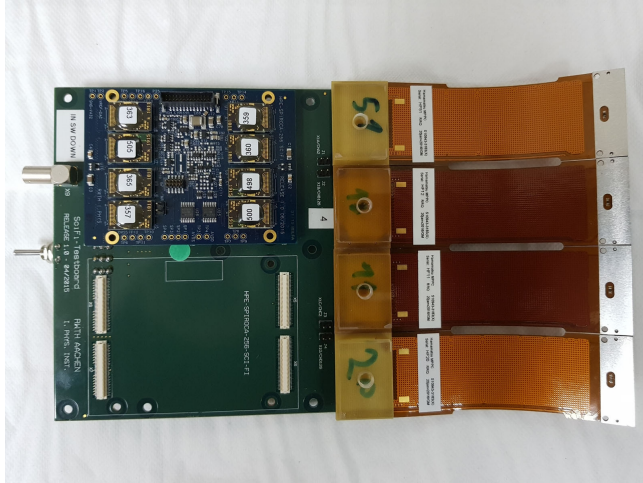
Measurements with ^{90}Sr radioactive source:

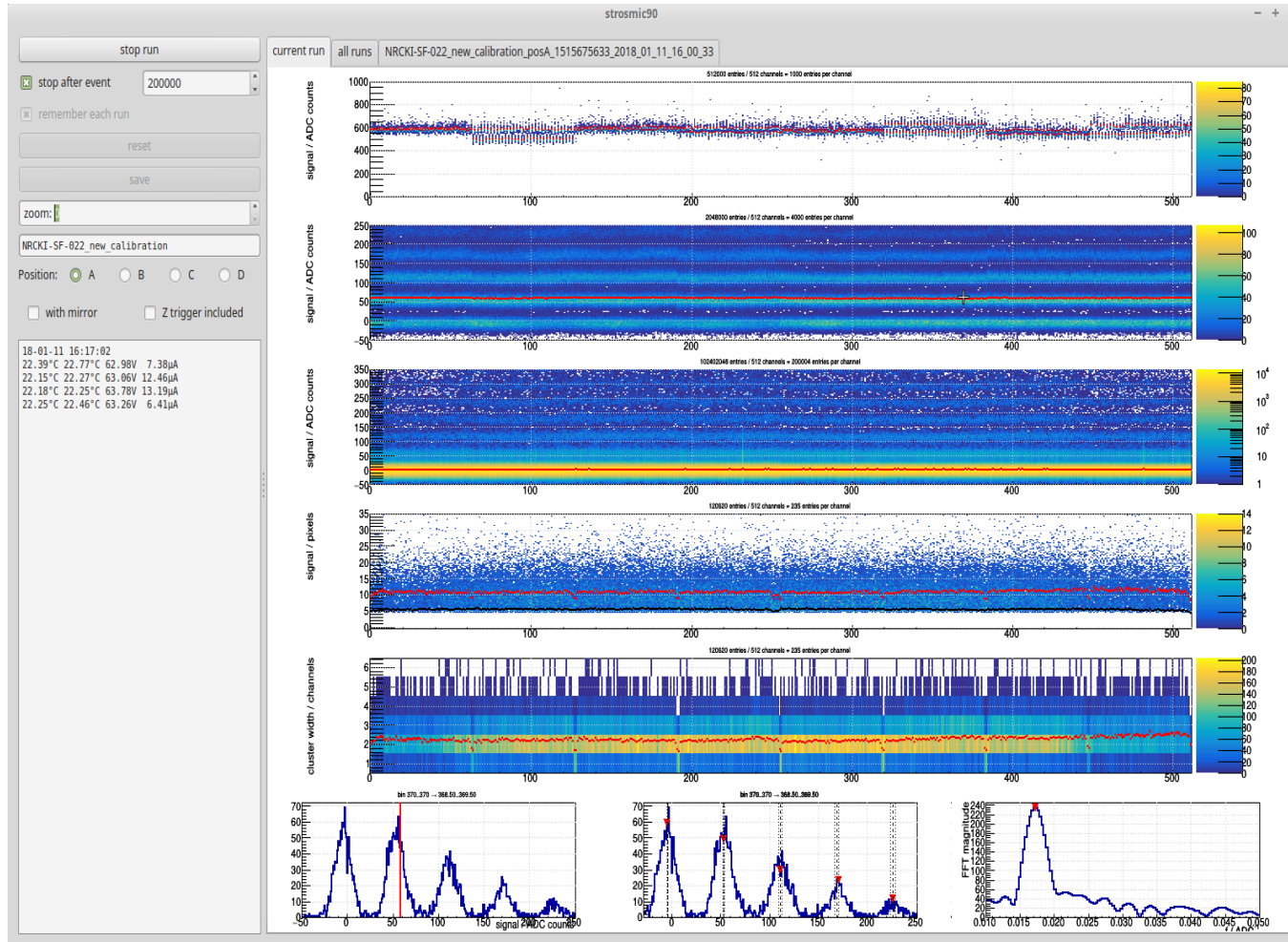


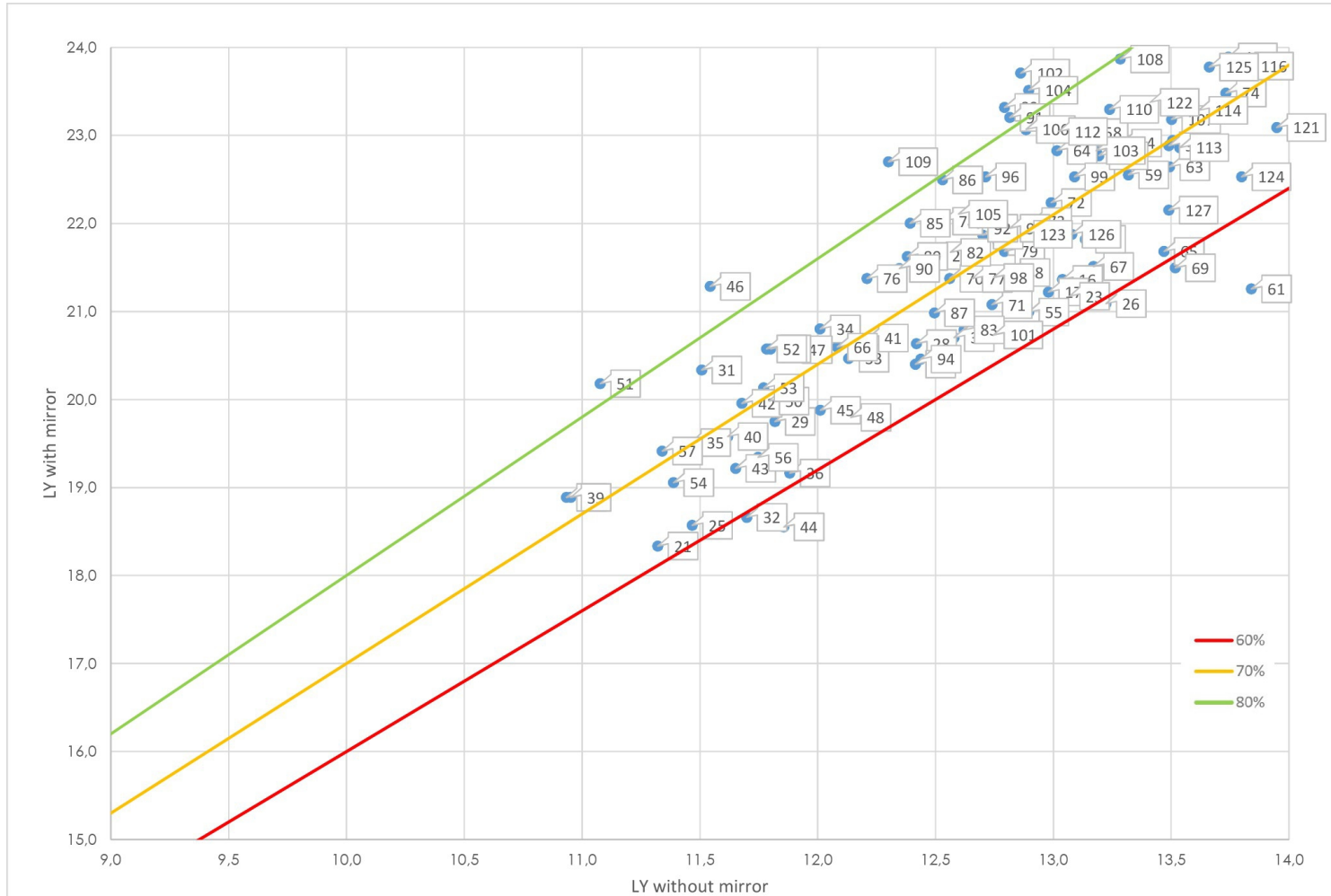
View from mirror end of the mat.



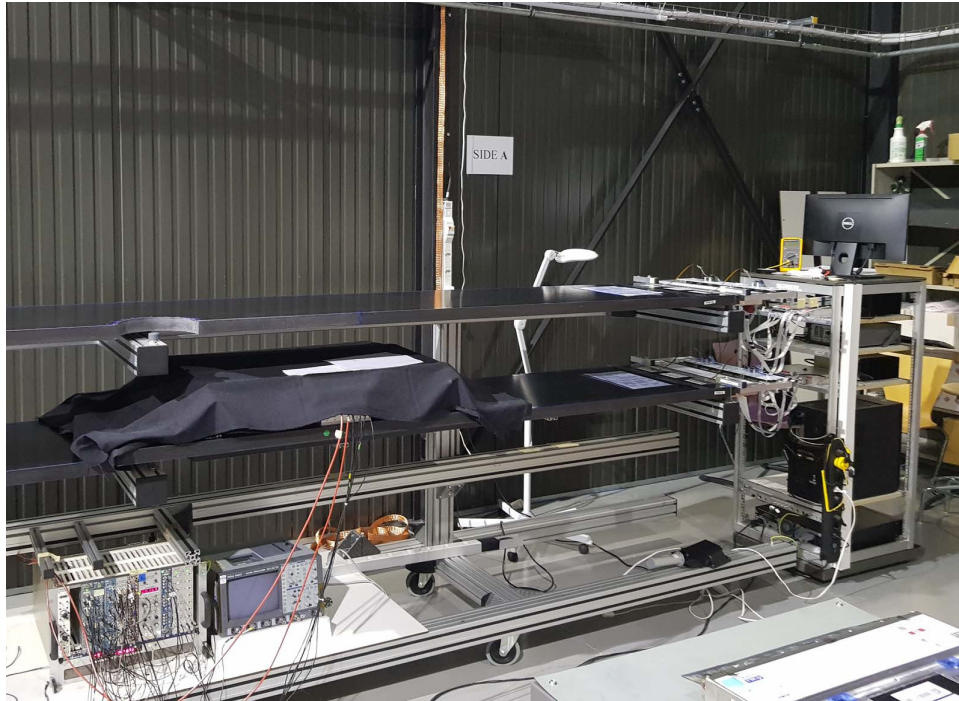
View from the readout side of the mat.



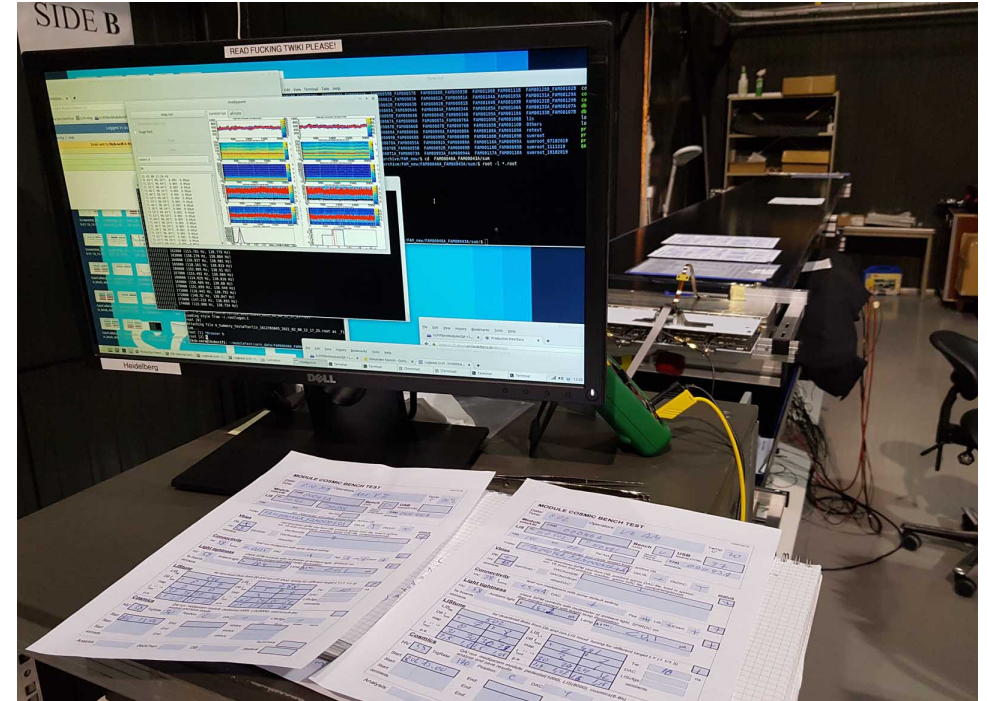




Measurements with cosmic muons:



View from the test setup side.

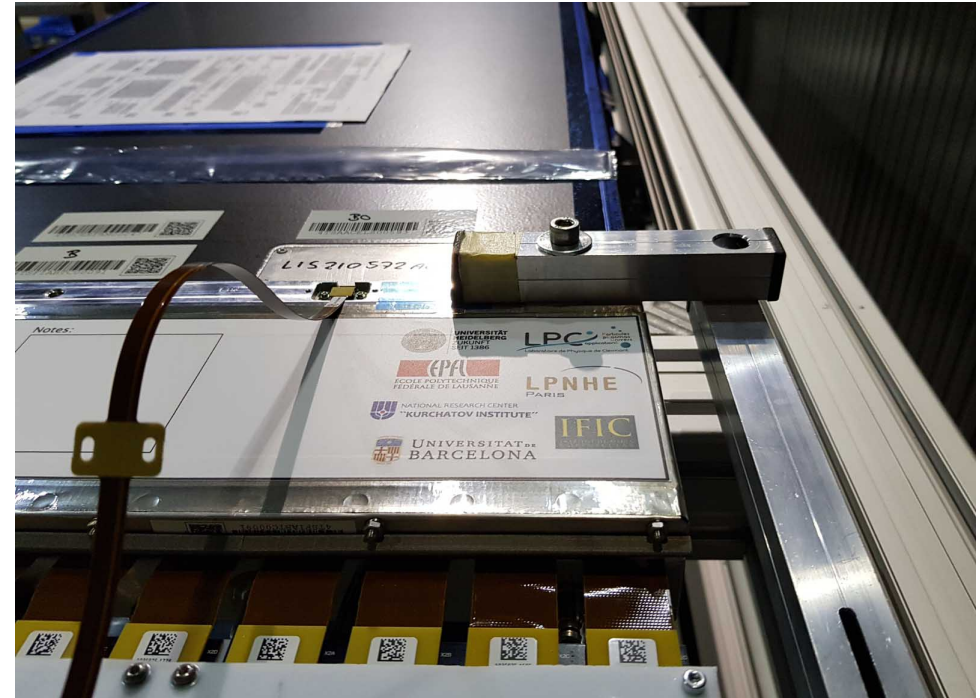


View from the readout side of the modules.

Measurements with cosmic muons:



View from the readout side.



The module cold box with the signal connectors.

First the modules were assembled in tracker planes at the ground surface:

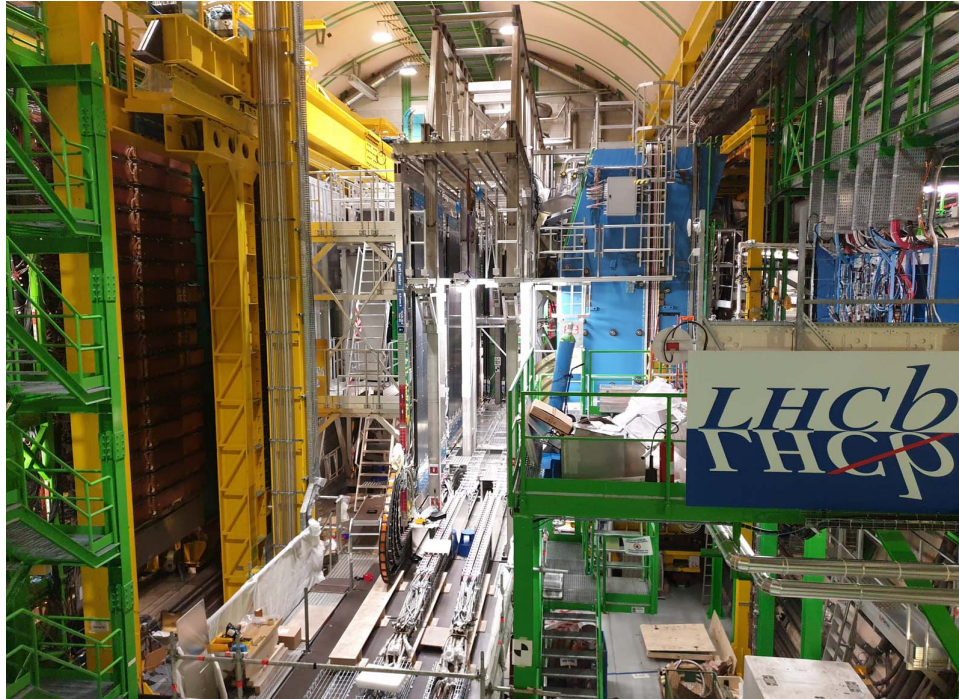


Assembly scaffoldings in the surface building.



SciFi tracker plane before moving down to LHCb.

Then the SciFi tracker planes were installed in the LHCb experiment:

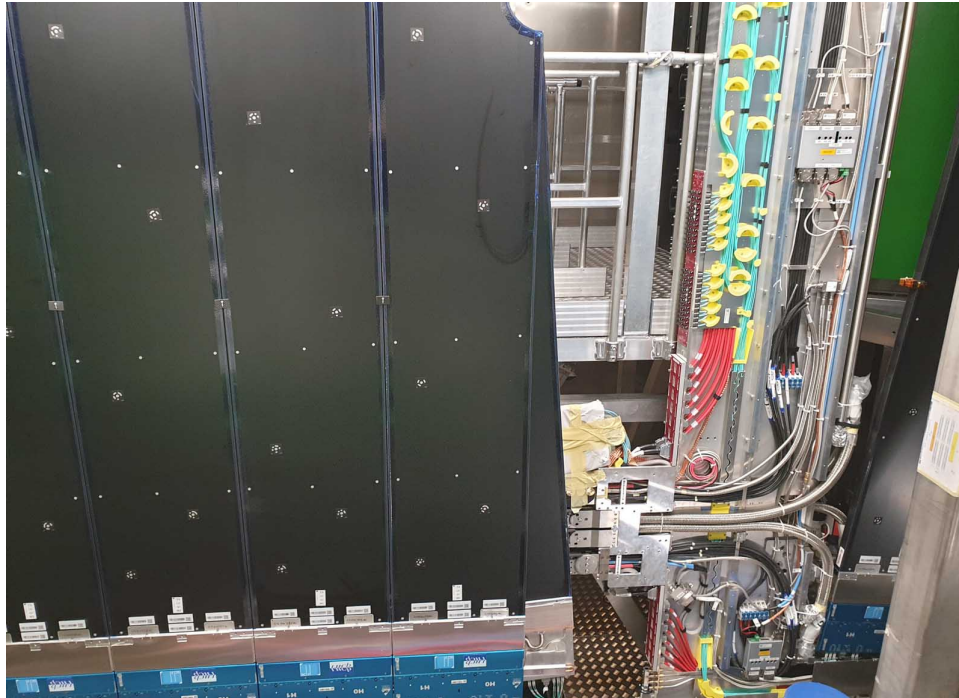


View of the LHCb experiment from the side.



SciFi tracker plane 100 m underground.

Then the SciFi tracker planes were installed in the LHCb experiment:



The first SciFi tracker plane being installed.



Work on the SciFi tracker installation.

Then the SciFi tracker planes were installed in the LHCb experiment:



The first SciFi tracker plane is installed.



Connecting services and labelling.

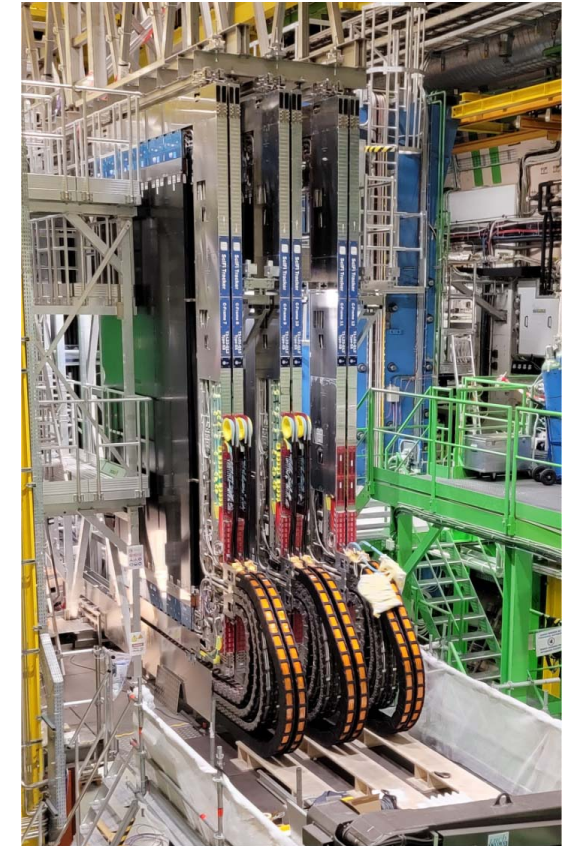
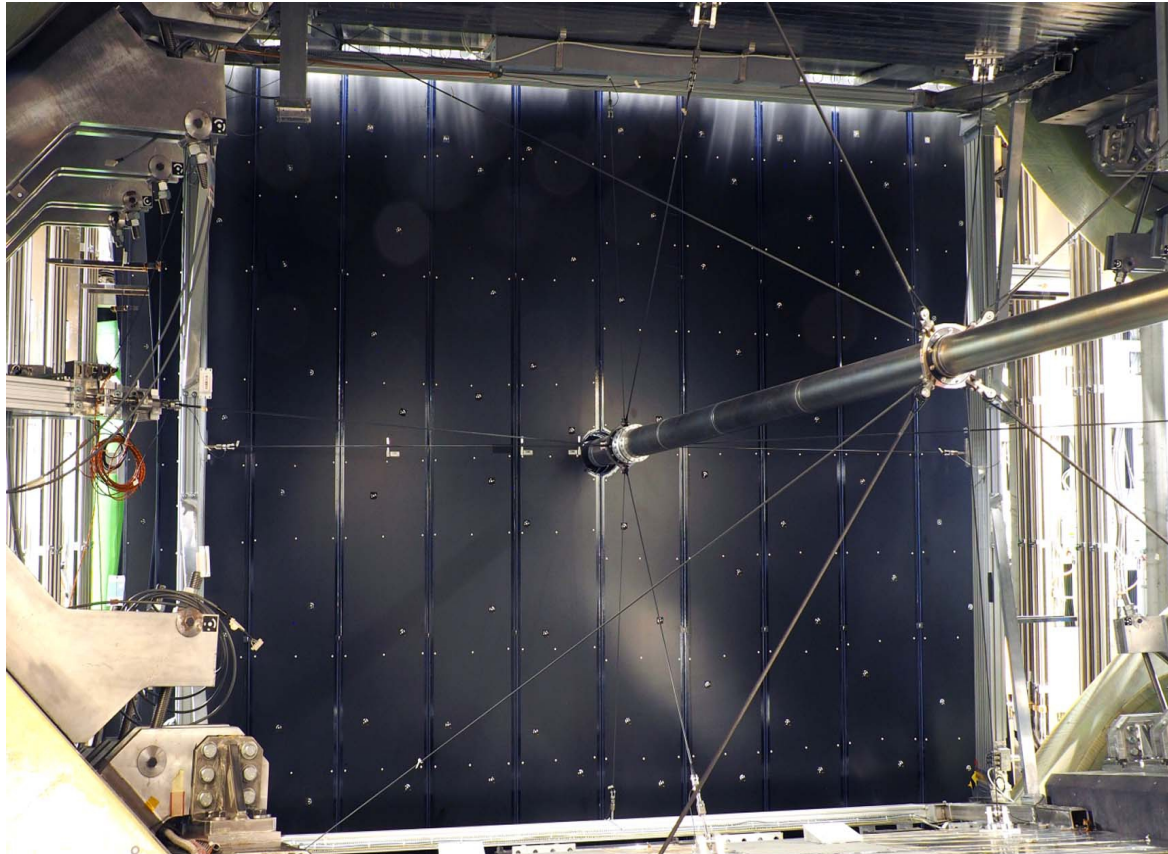
Then the SciFi tracker planes were installed in the LHCb experiment:



The SciFi tracker is installed.

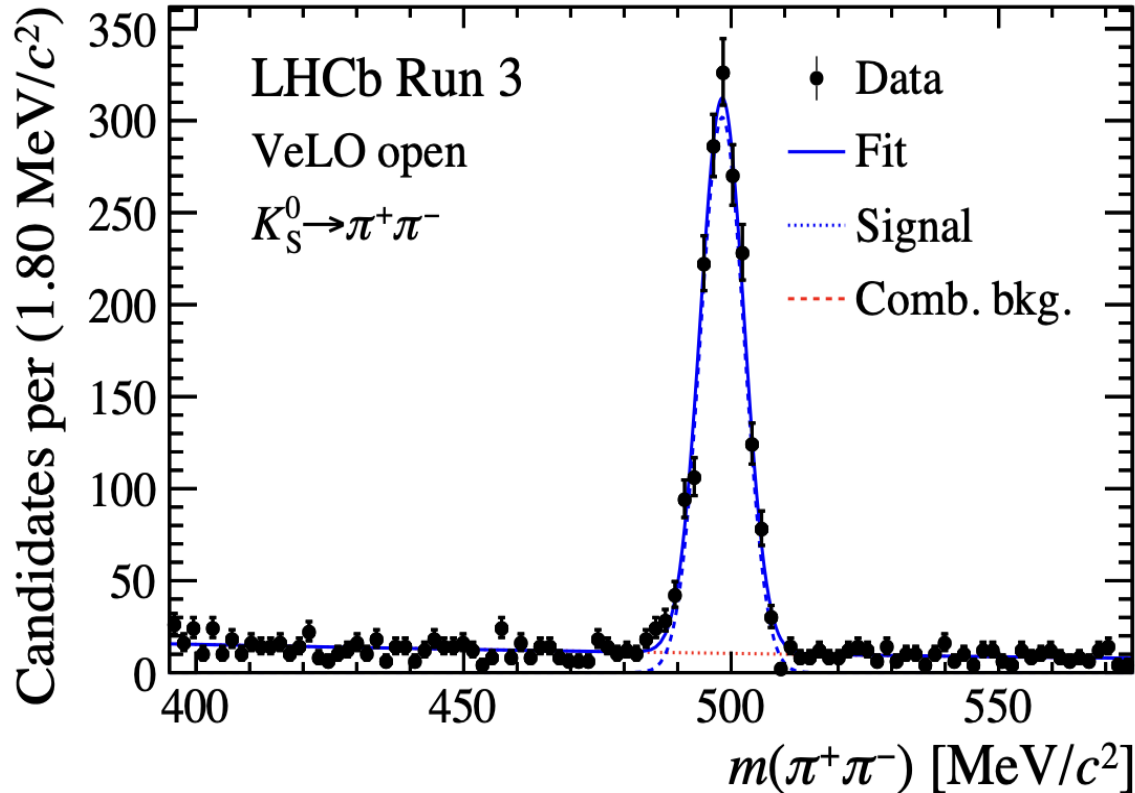


View on the beam pipe, the planes are moved apart.

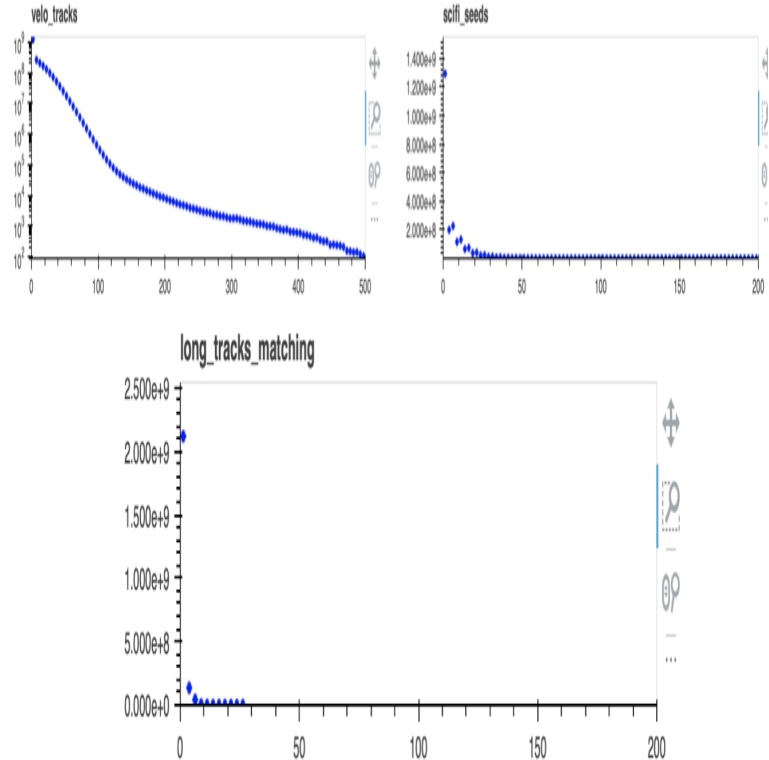


View from the beam pipe and magnet. SciFi tracker is closed.

View from the experiment's side.



K_S^0 invariant mass distribution with the long SciFi tracks.



Screenshot from SciFi event display.

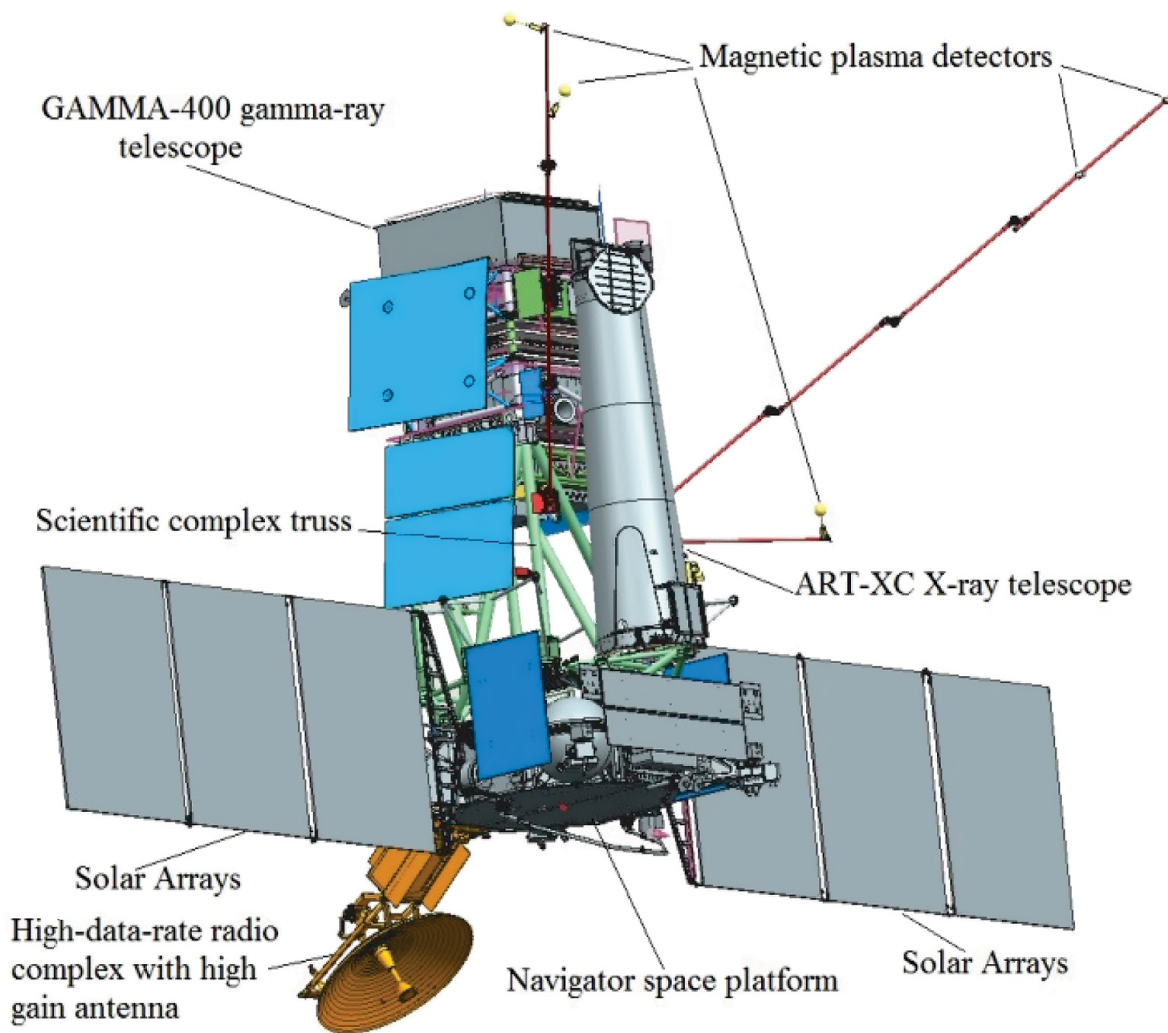
- Large area (340 m²) high resolution (<70 μm) scintillating fibre tracker read out with 128 channel SiPM arrays.
- 5 m long fibre modules with ≥18p.e./MIP light yield and 99% efficiency!
- Production has started in 2016 at 4 production centres (one in Russia).
- Installation started in 2019, finished in 2021, working in LHCb 2022 run.
- Close collaboration of 18 institutes in 9 countries.





АКЦ ФИАН

Космический гамма-телескоп ГАММА-400



14-06-2023

А. Малинин – Новые трековые детекторы SciFi



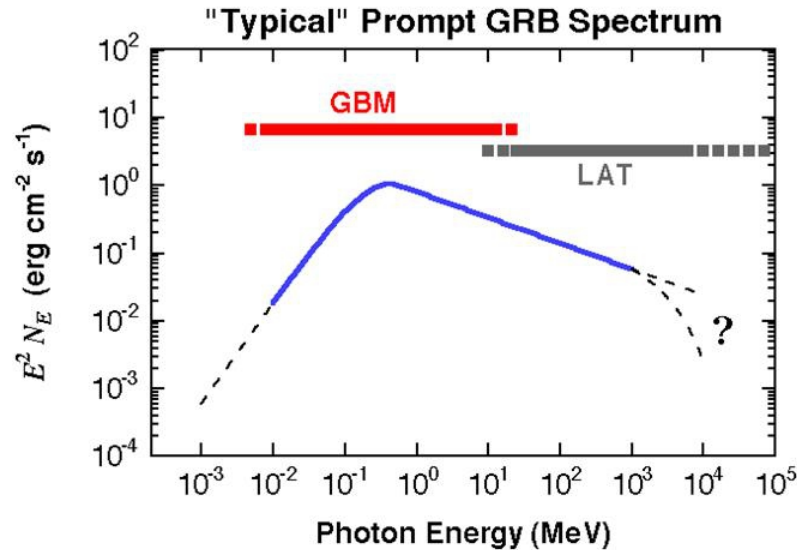
38



Космический гамма-телескоп ГАММА-400



- Поиски не прямых сигналов (гамма-линий) от аннигиляции частиц тёмной материи.
- Поиски эффектов квантовой гравитации (QG) в кривых блеска гамма-всплесков (GRB).



- Улучшить пространственное, энергетическое и временное разрешение телескопа ГАММА-400.



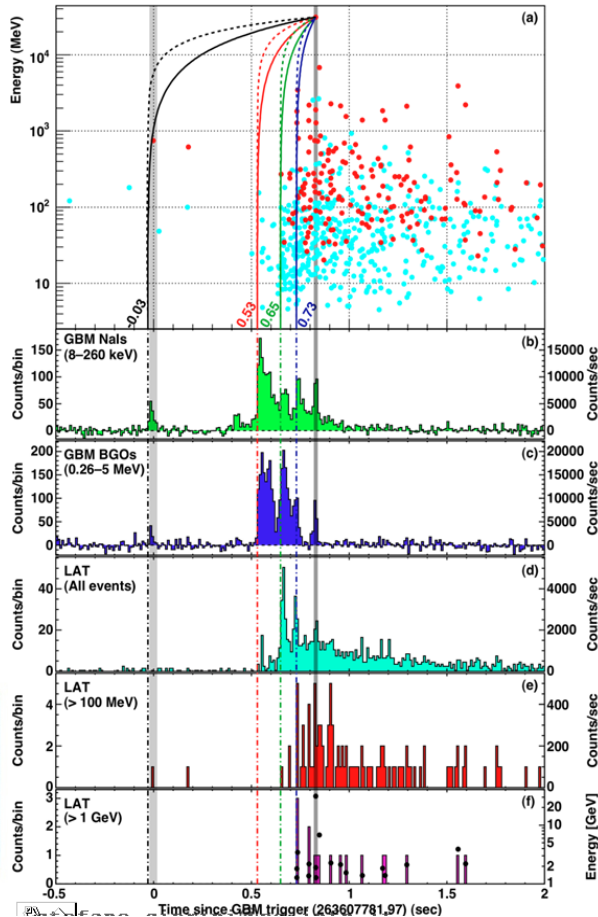


АКЦ ФИАН

Космический гамма-телескоп ГАММА-400



Мотивация: поиски эффектов квантовой гравитации (QG)



Наблюдение GRB 090510 телескопом **Fermi-LAT** измерения запаздывания в энергетических бинах.

- Красное смещение $z = 0.9$ (расстояние $L = 5.381$ Gyr)
- Регистрация фотона с $E = 31$ ГэВ через 851 мсек после триггера.

$$M_{QG} > 1.2 M_{Planck}$$

$$M_{Planck} \approx 1,2209 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ}/c^2$$

- Запаздывания на источнике? Линейный рост с L_{GRB} ?

Table 2 | Limits on Lorentz Invariance Violation

#	$t_{start} - T_0$ (ms)	Limit on $ \Delta t $ (ms)	Reasoning for choice of t_{start} or limit on Δt or $ \Delta t/\Delta E $	E_i^\dagger (MeV)	Valid for s_n^*	Lower limit on $M_{QG,1}/M_{Planck}$
(a) [*]	-30	< 859	start of any < 1 MeV emission	0.1	1	> 1.19
(b) [*]	530	< 299	start of main < 1 MeV emission	0.1	1	> 3.42
(c) [*]	648	< 181	start of main > 0.1 MeV emission	100	1	> 5.63
(d) [*]	730	< 99	start of > 1 GeV emission	1000	1	> 10.0
(e) [*]	—	< 10	association with < 1 MeV spike	0.1	± 1	> 102
(f) [*]	—	< 19	If 0.75 GeV ⁺ γ -ray from 1 st spike	0.1	-1	> 1.33
(g) [*]	$ \Delta t/\Delta E < 30 \text{ ms/GeV}$	—	lag analysis of > 1 GeV spikes	—	± 1	> 1.22



14-06-2023

А. Малинин – Новые трековые детекторы SciFi

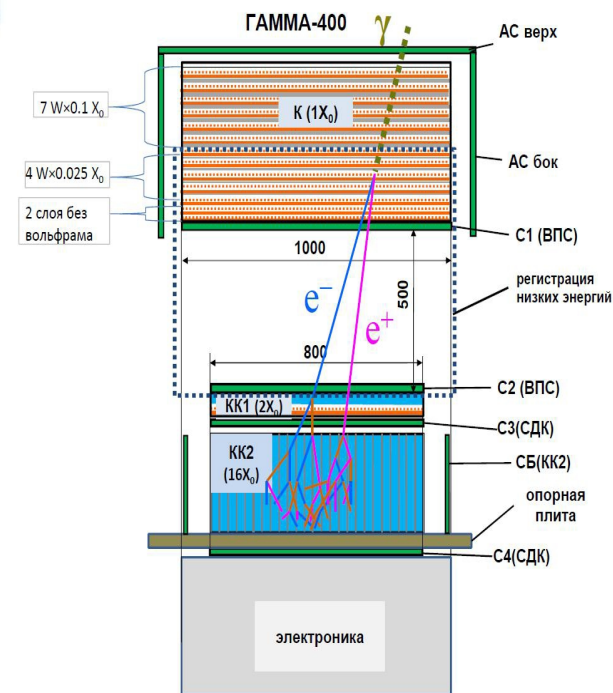
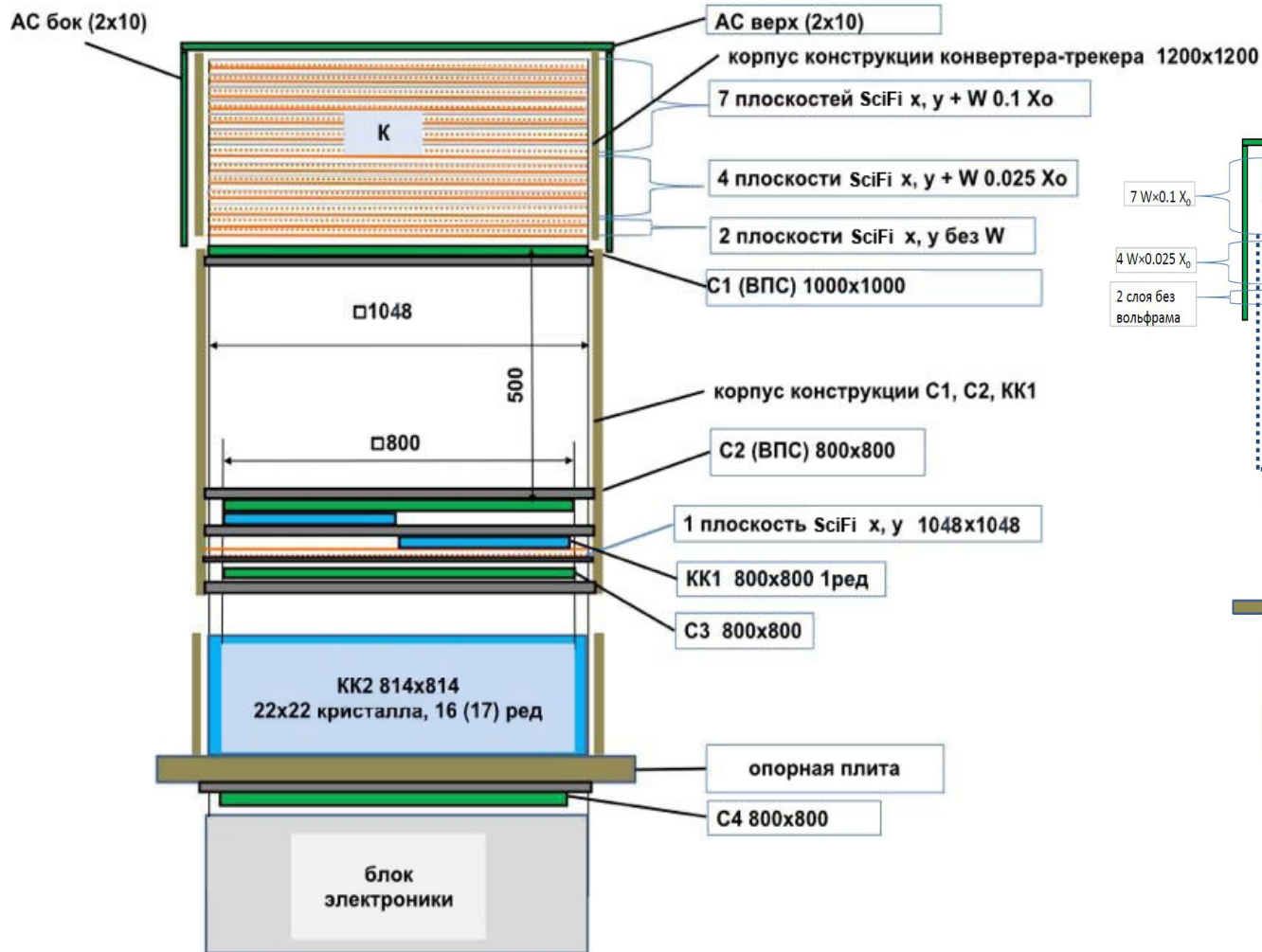


40



АКЦ ФИАН

Космический гамма-телескоп ГАММА-400



14-06-2023

А. Малинин – Новые трековые детекторы SciFi



41

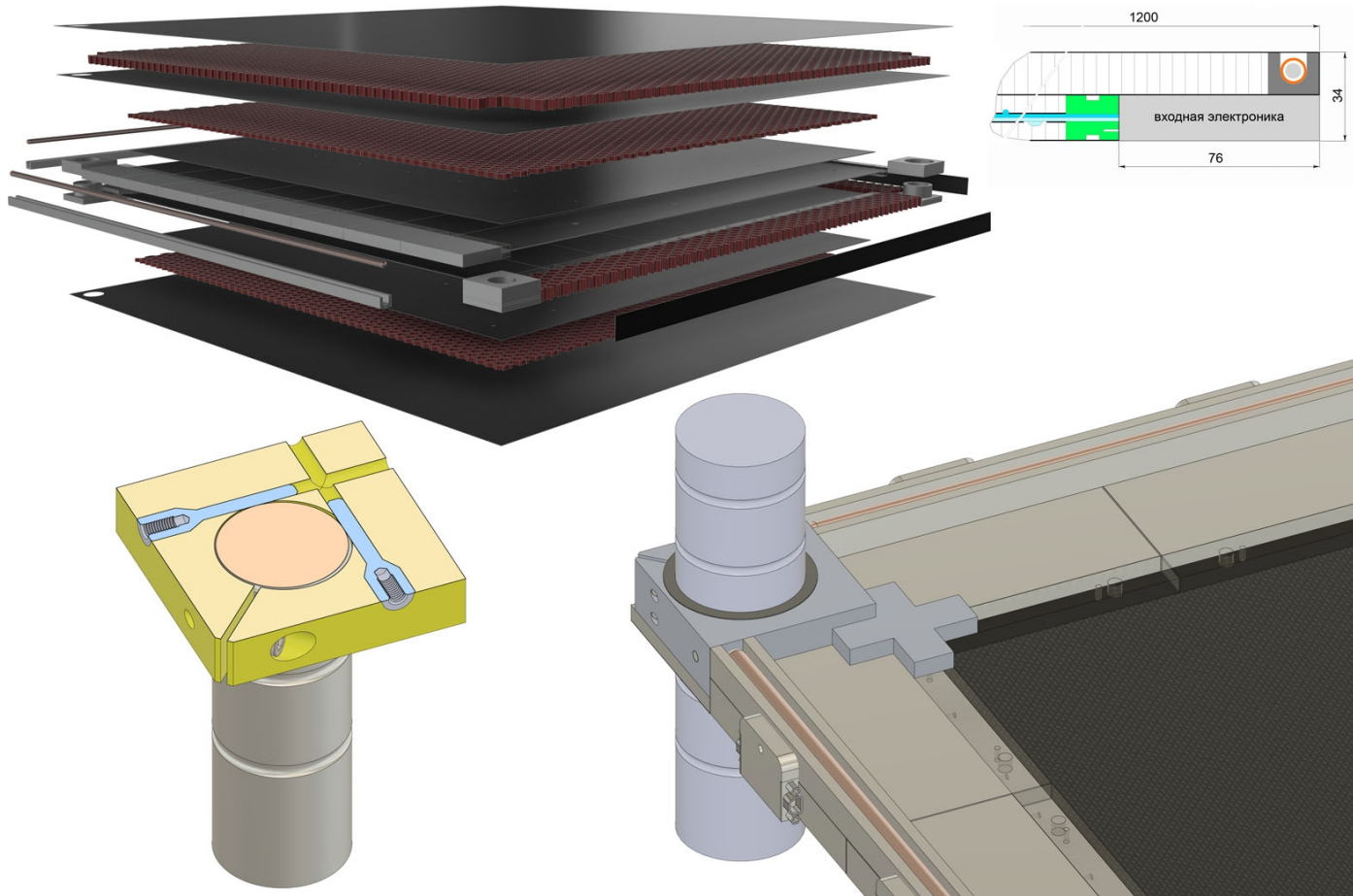


АКЦ ФИАН

Космический гамма-телескоп ГАММА-400



Конструкция SciFi-модуля конвертера-трекера:



14-06-2023

А. Малинин – Новые трековые детекторы SciFi



42

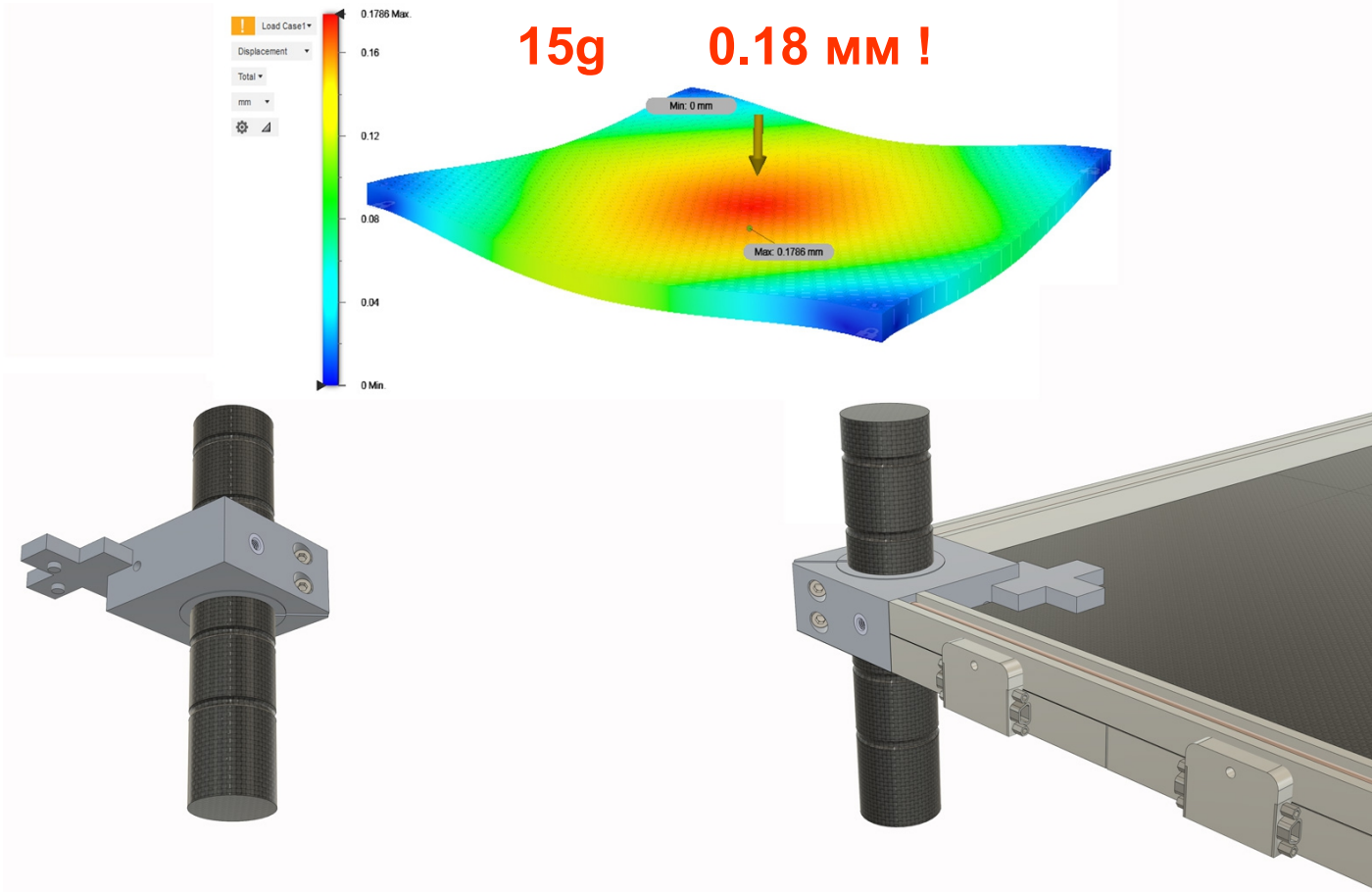


АКЦ ФИАН

Космический гамма-телескоп ГАММА-400



Конструкция SciFi-модуля конвертера-трекера:



14-06-2023

А. Малинин – Новые трековые детекторы SciFi



43



АКЦ ФИАН

Космический гамма-телескоп ГАММА-400



	Space-based gamma-ray telescopes						Ground-based facility
	Medium energy			High-energy			
	e- ASTROGAM	AMEGO	Fermi- LAT	GAMMA- 400	HERD	AMS- 100	CTA
Country	Europe	USA	USA/ Europe	Russia	China/ Europe	Europe + USA	
Energy range for gamma rays	0.3 MeV– 3 GeV	0.2 MeV– 10 GeV	50 MeV– 1 TeV	20 MeV– 1 TeV	0.5 GeV– 10 TeV	1 GeV– 10 TeV	> 50 GeV
Observation mode	Scanning	Scanning	Scanning	Point-source	Scanning	Scanning	Scanning
Orbit	Circular, ~550 km	Circular, ~550 km	Circular, ~550 km	Highly elliptical, 500– 300 000 km	Circular, ~400 km	L2	-
Angular resolution	0.1° (E _γ = 1 GeV)	1° (E _γ = 1 GeV)	0.1° (E _γ = 100 GeV)	~0.01° (E _γ = 100 GeV)	0.1° (E _γ = 100 GeV)	~0.01° (E _γ = 100 GeV)	0.1° (E _γ = 100 GeV)
Energy resolution	20% (E _γ = 1 MeV)	10% (E _γ = 1 GeV)	10% (E _γ = 100 GeV)	~2% (E _γ = 100 GeV)	1-2% (E _γ = 100 GeV)	1-2% (E _γ = 100 GeV)	15% (E _γ = 100 GeV)



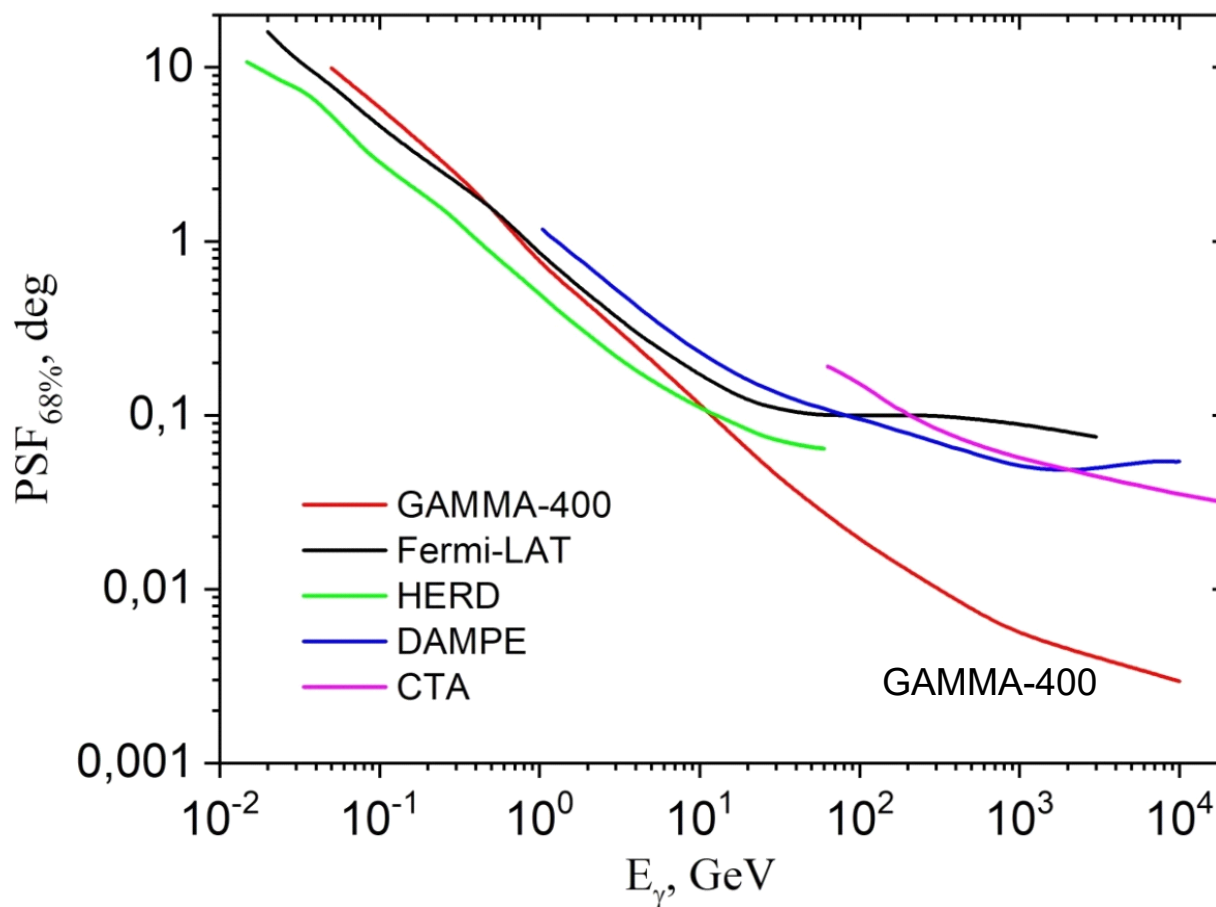


АКЦ ФИАН

Космический гамма-телескоп ГАММА-400



Угловое разрешение орбитальных γ -телескопов как функция энергии:



14-06-2023

А. Малинин – Новые трековые детекторы SciFi



45



АКЦ ФИАН

Summary 2

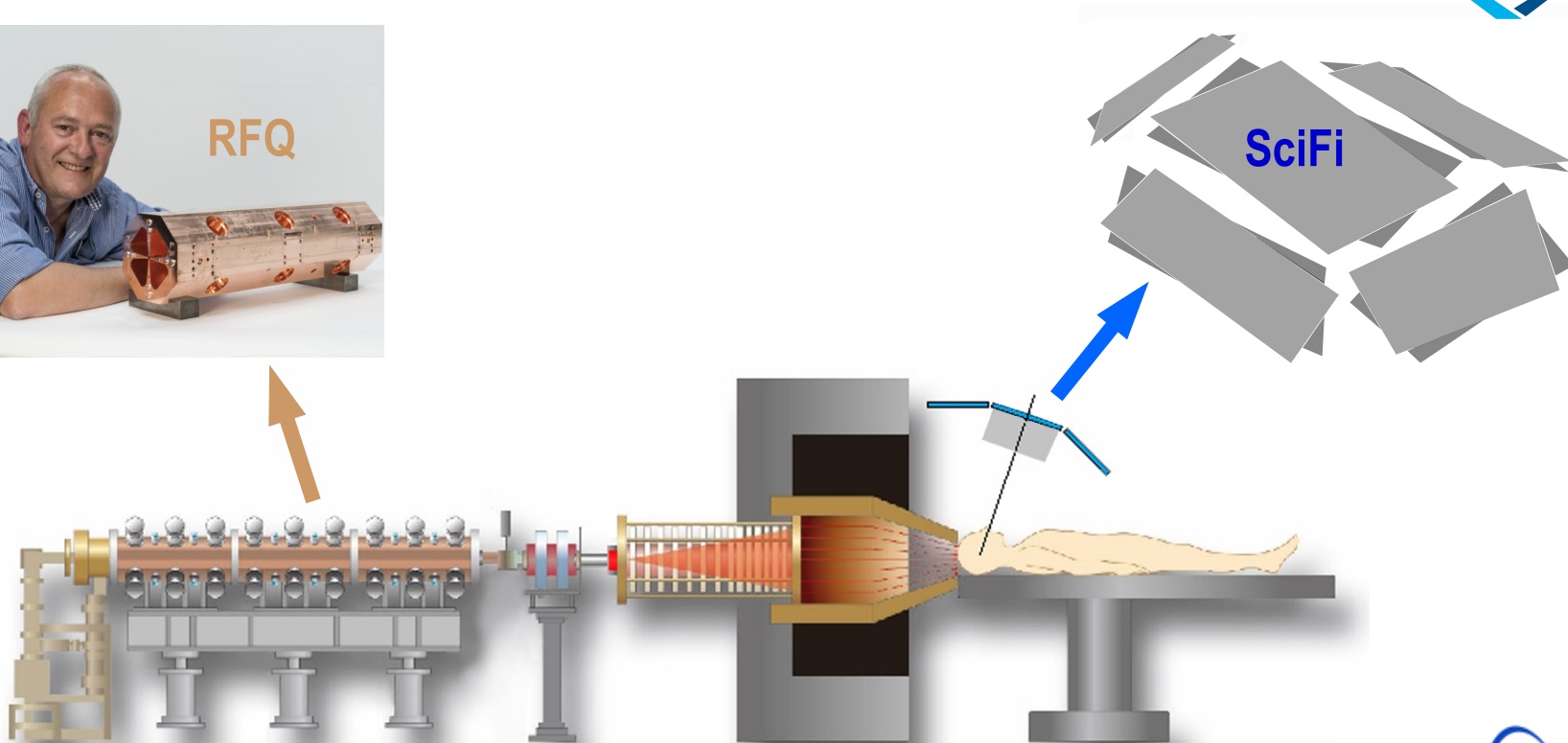


- После Fermi-LAT миссия GAMMA-400 значительно улучшит прямые данные о потоках низкоэнергетического и высокоэнергетического гамма-излучения, а также электронов + позитронов.
- Благодаря применению детекторов SciFi удалось добиться рекордных углового и энергетического разрешения, при высоком временном разрешении и большом поле зрения.
- Выбранная схема телескопа позволяет вести непрерывные, многолетние, коаксиальные гамма- и рентгеновские наблюдения.
- Запуск космической обсерватории ГАММА-400 запланирован на ~2030 год.





Однофотонный томограф для БНЗТ





Однофотонный томограф для БНЗТ

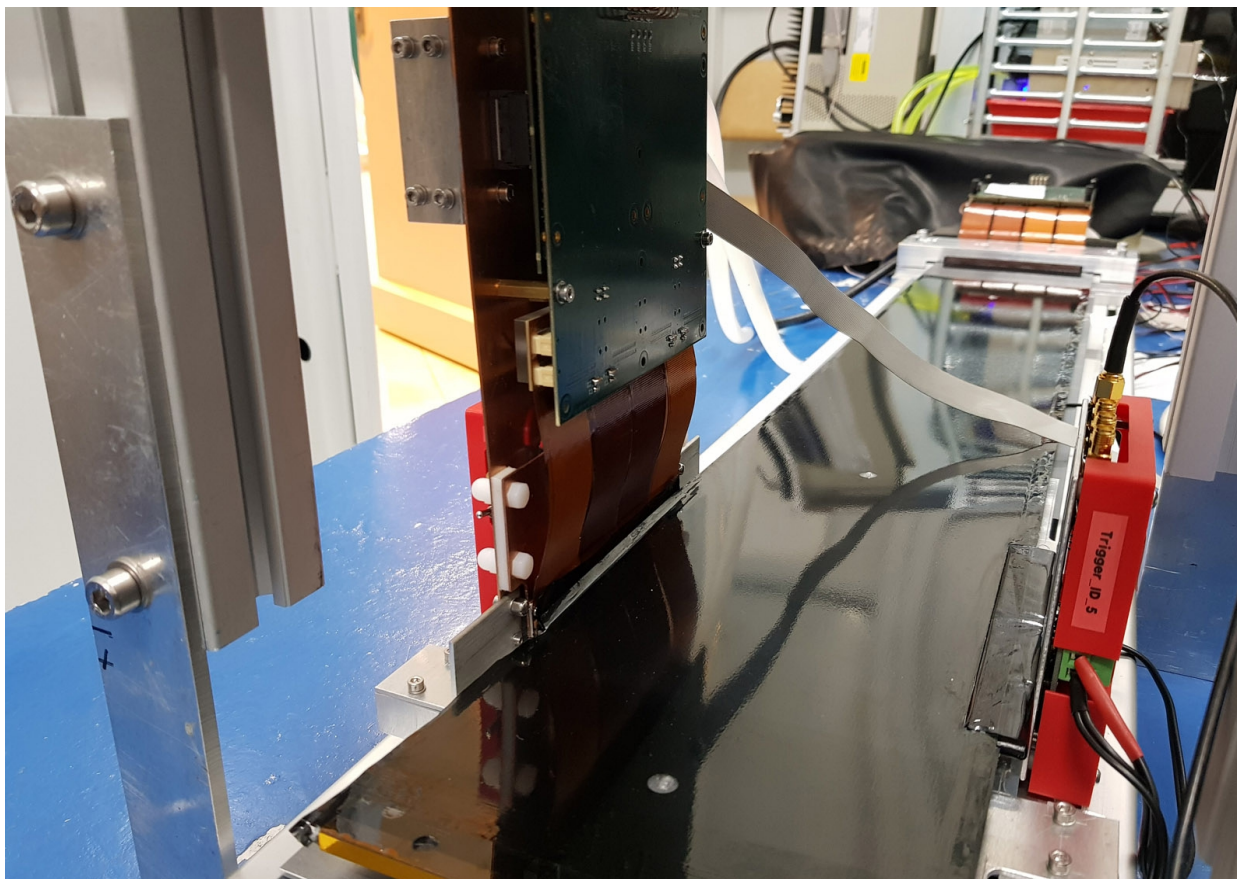


Изготовление прототипа XY-детектора SciFi для томографии.





Однофотонный томограф для БНЗТ



Измерения на прототипе XY-детектора SciFi с источником ^{90}Sr





Однофотонный томограф для БНЗТ



Измерения на прототипе XY-детектора SciFi с γ -квантами.



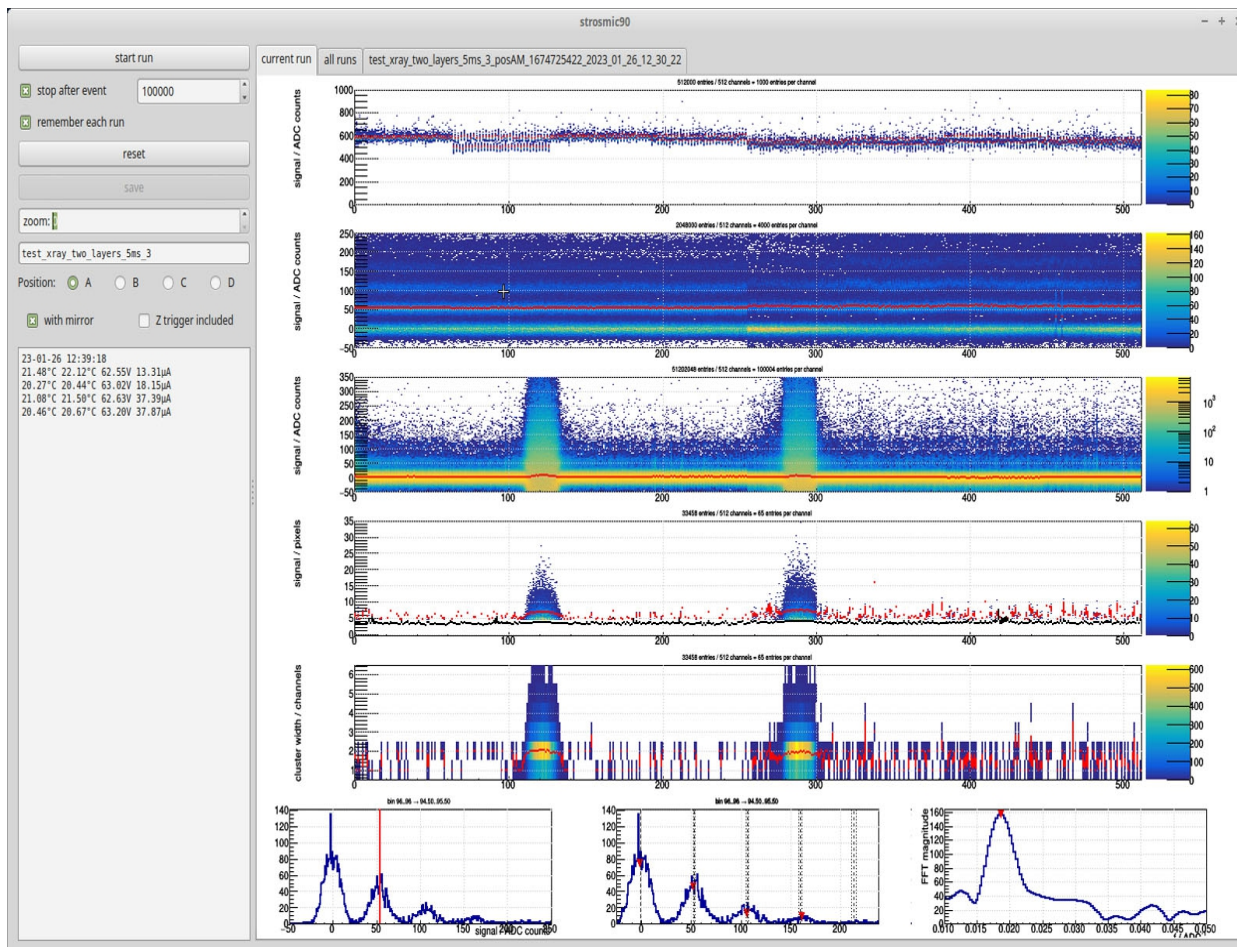
14-06-2023

А. Малинин – Новые трековые детекторы SciFi

50



Однофотонный томограф для БНЗТ



Измерения на прототипе XY-детектора SciFi с γ -квантами.





Однофотонный томограф для БНЗТ



Исследовательский реактор ИР-8 в НИЦ КИ, канал 7А:



14-06-2023

А. Малинин – Новые трековые детекторы SciFi

52



Summary 3



- 1) Использование компактного сильноточного ускорителя протонов RFQ непрерывного действия и тонкой литиевой мишени обеспечивает значительно большие интенсивности (и потоки) тепловых нейтронов для целей БНЗТ, что является одним из основных требований данного метода лечения рака.
- 2) Ускоритель RFQ является российским изобретением и может быть, в настоящее время, построен из полностью российских компонентов и материалов (бескислородная вакуумная медь высокой чистоты для ускоряющих элементов RFQ производится на заводе «Кристалл», Владикавказ, мощные источники СВЧ производятся компанией «Триада-ТВ», Новосибирск).
- 3) Тонкая литиевая мишень с регенерацией обеспечивает точечный, долгоживущий источник нейтронов с одновременной минимизацией фонового потока гамма-квантов.





Summary 3 (continued)



- 4) Для контроля, визуализации и управления процессом БНЗТ будут использованы отечественные детектирующие системы, для чего планируются исследования двухкоординатного детектора SciFi, (на основе сцинтиллирующих оптоволоконных сборок), в том числе измерения на гамма-квантах, рождающихся при захвате теплового нейтрона. Целью работ является создание гамма-камеры однофотонного томографа, способного работать в присутствии значительных фонов тепловых нейтронов и обладающего рекордным пространственным разрешением.
- 5) Задел в области применения клеточных сенсбилизаторов и методик селективного введения препаратов бора-10 в опухоль, а также использование методик управления кровотоком в поражённой области, обеспечит дополнительный фактор роста эффективности применения БНЗТ терапии.





Спасибо за внимание!

