



Лаборатория космических лучей  
предельно высоких энергий НИИЯФ МГУ



Работы по теме: “Многоканальный фотодетектор для баллонных и космических экспериментов по регистрации космических лучей предельно высоких энергий”, декабрь 2023 - март 2024

Трофимов Д.А.

# Флуоресцентный телескоп EUSO-SPB2

Характеристики флуоресцентного телескопа

- Высота над уровнем моря: 33 км
- Углы обзора:  $37.4^\circ \times 11.4^\circ$
- Апертура (диаметр?): 1 м
- Временное разрешение: 1 мкс
- Число модулей / каналов регистрации: 3 / 6 912

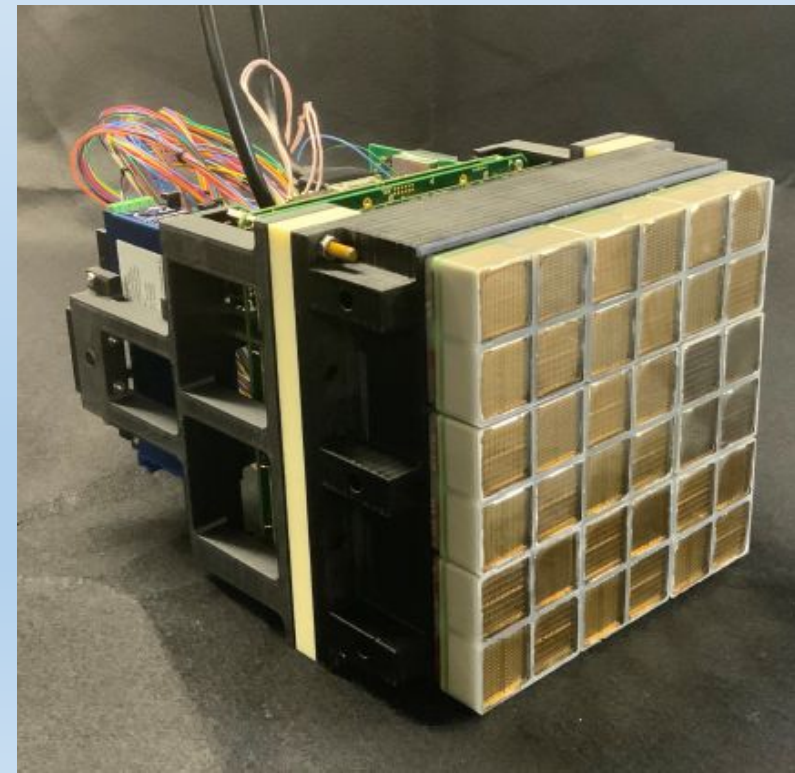
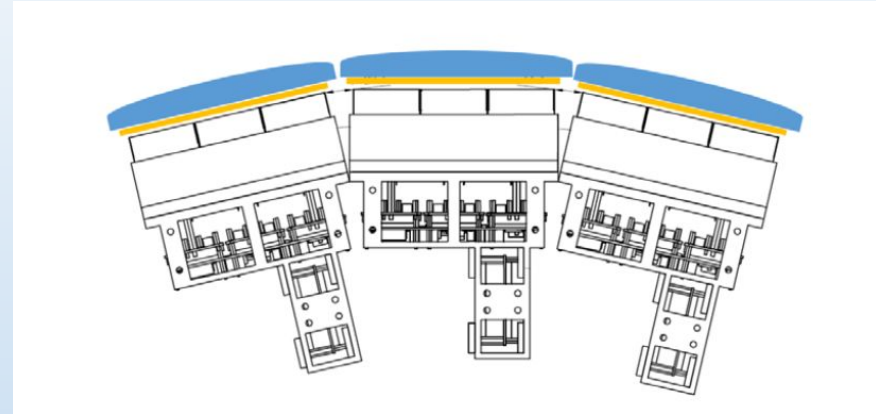
На фото: **модуль фотоприемника**

Состоит из 9 ЕС (элементарных ячеек)

1 ЕС = 4 MAPMT, 1 MAPMT = 64 канала регистрации.

Каждая ЕС содержит микросхему SPACIROC, основа которой - дискриминатор однофотоэлектронных импульсов.

1 модуль - 2304 канала регистрации



# Работы в декабре 2023 - марте 2024:

- Исследование эффекта наложения импульсов для фотоприемника EUSO-SPB2, обработка калибровочных измерений фотоприемников EUSO-SPB2 (по эффективностям детектирования при разной засветке)
- Аппроксимация кривой зависимости мертвого времени от порога.
- Исследование зависимости эффективности детектирования фотоприемника от длины волны падающего света.
- Написание 2 статей по калибровке:
  - 1) “Characterization and absolute calibration of multi-anode photomultiplier tubes (MAPMTs) for the JEM-EUSO space and balloon program: I. Methods and generic features”,
  - 2) “II. Application to the EUSO-SPB2 photodetection modules”

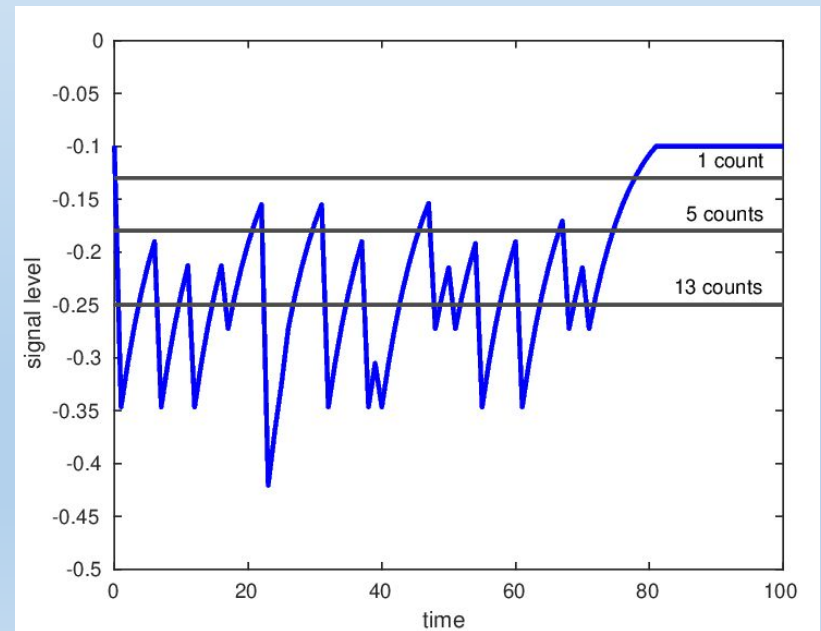
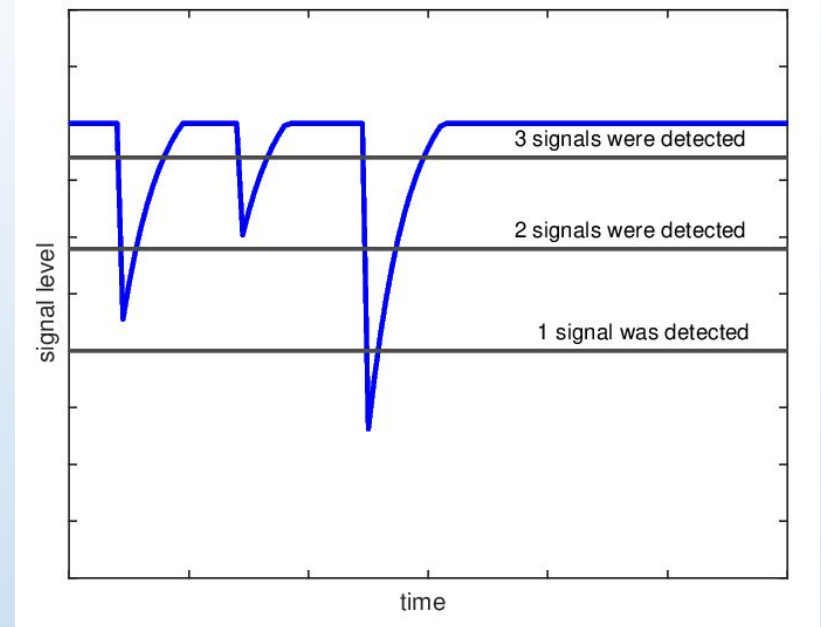
# Изучение эффекта наложения импульсов (Pile-up)

При высокой интенсивности света наложение импульсов происходит, когда временной интервал между последовательными фотоэлектронами (ф.э.) меньше временного разрешения ASIC (несколько нс). Таким образом, количество задетектированных ф.э.  $C$  (отсчетов) в конечном итоге уменьшается по мере увеличения числа фотонов  $N$ .

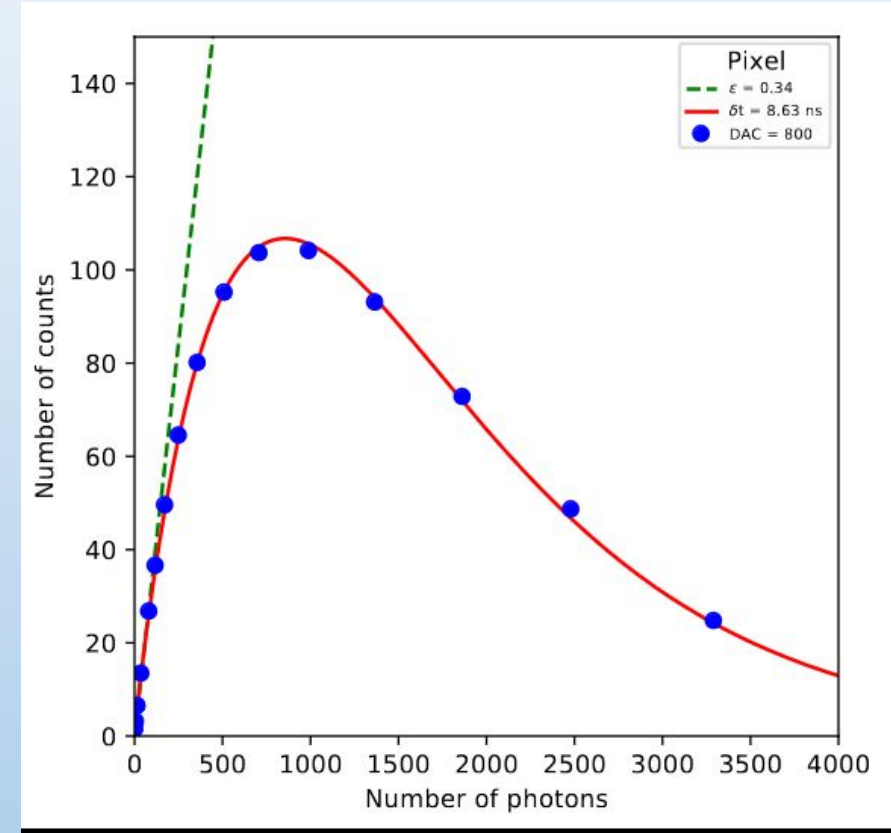
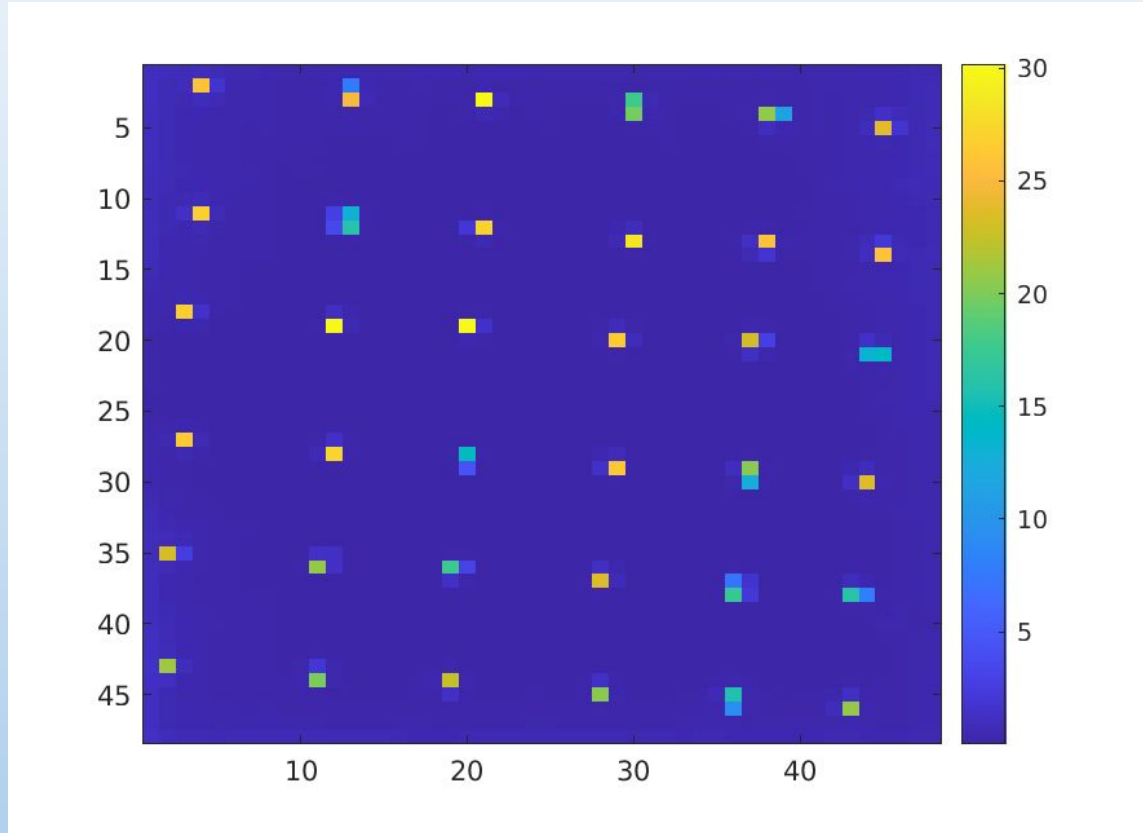
Ожидаемое число ф.э.:

$$C = \varepsilon N \times \exp(-\varepsilon N \delta t),$$

где  $N$  - число фотонов на пиксель в единицу времени,  $\varepsilon$  - эффективность детектирования и  $\delta t$  - временное разрешение фотоприемника (или мертвое время).

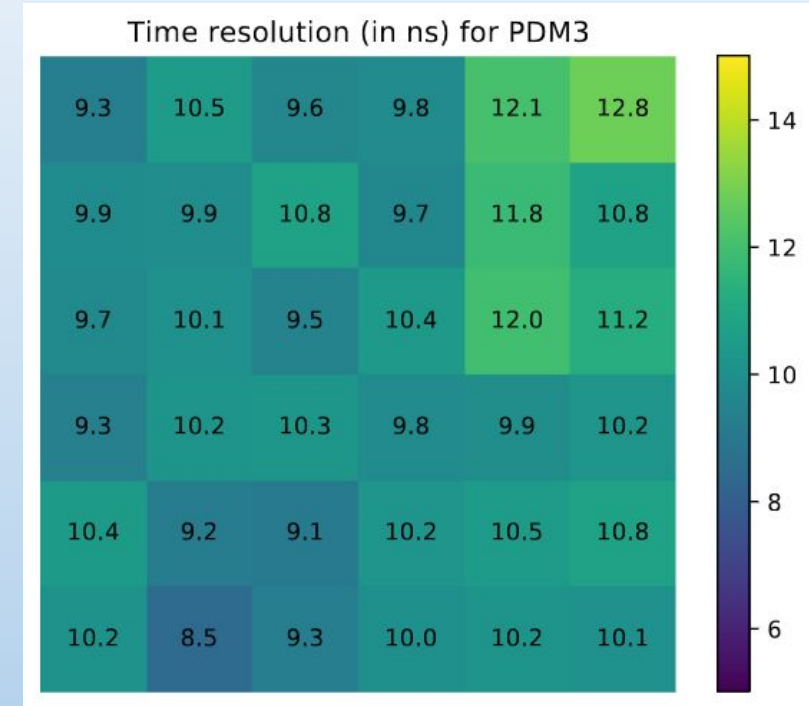
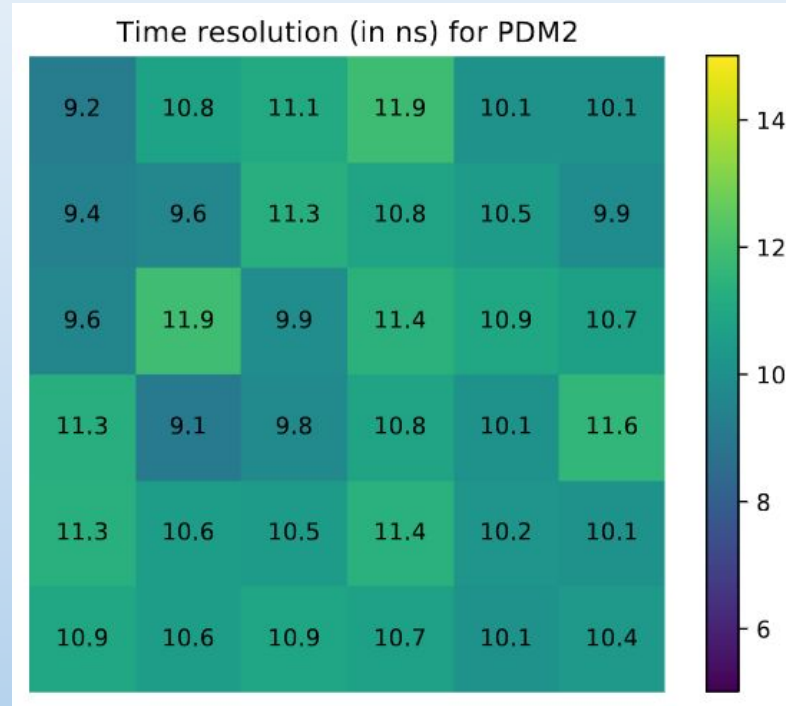
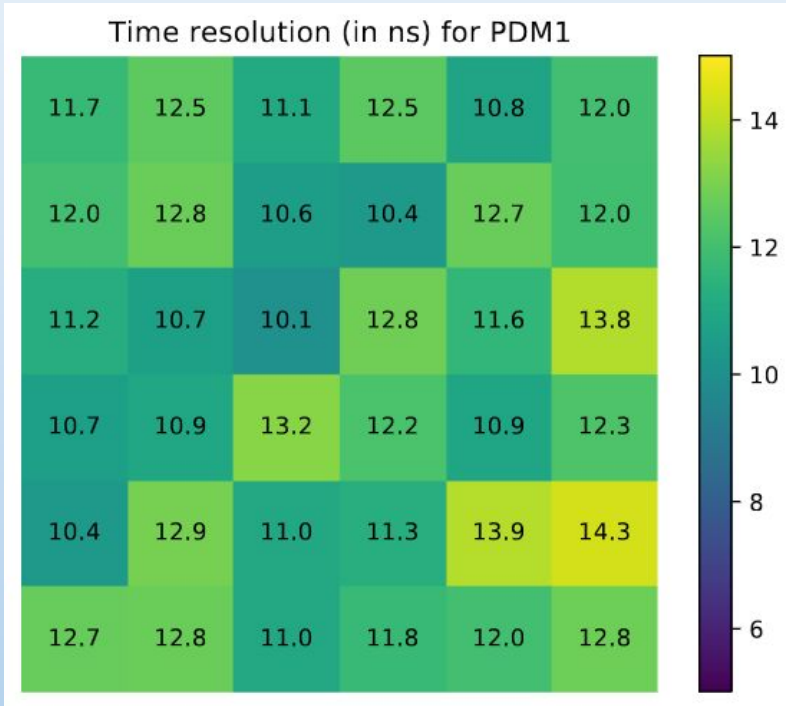


# Калибровки: эффект наложения импульсов в фотодетекторе EUSO-SPB2



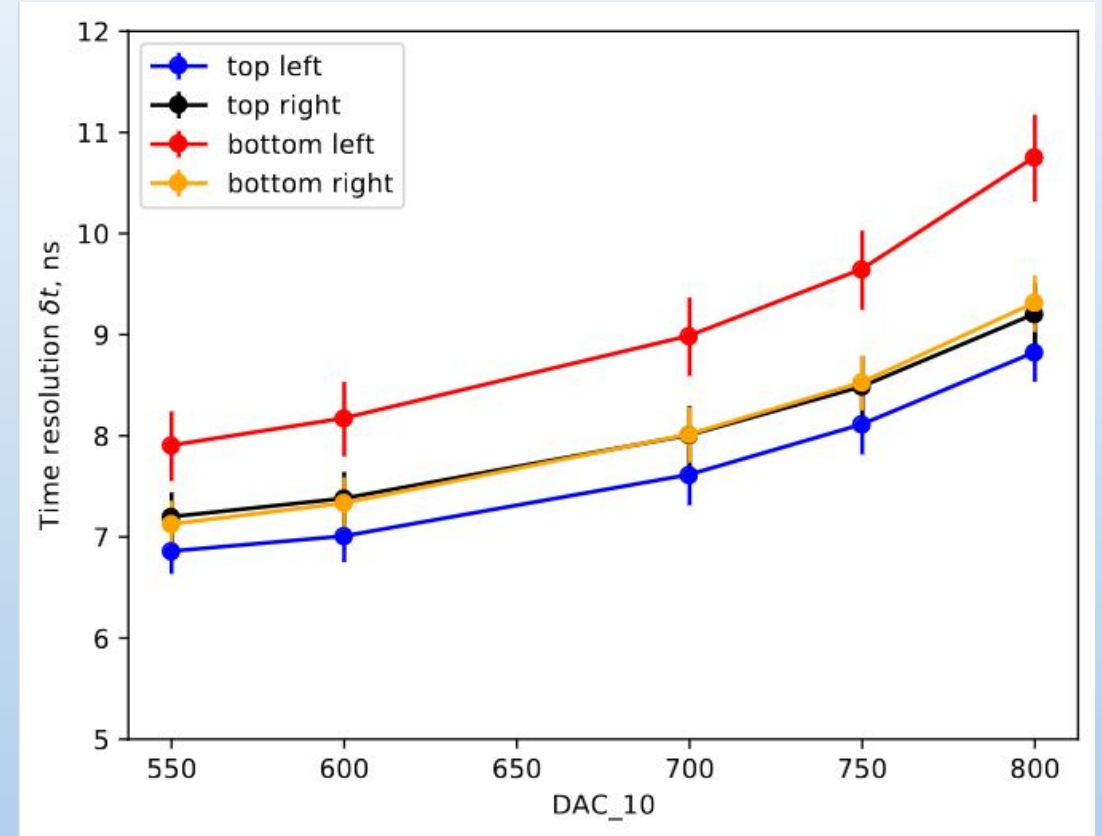
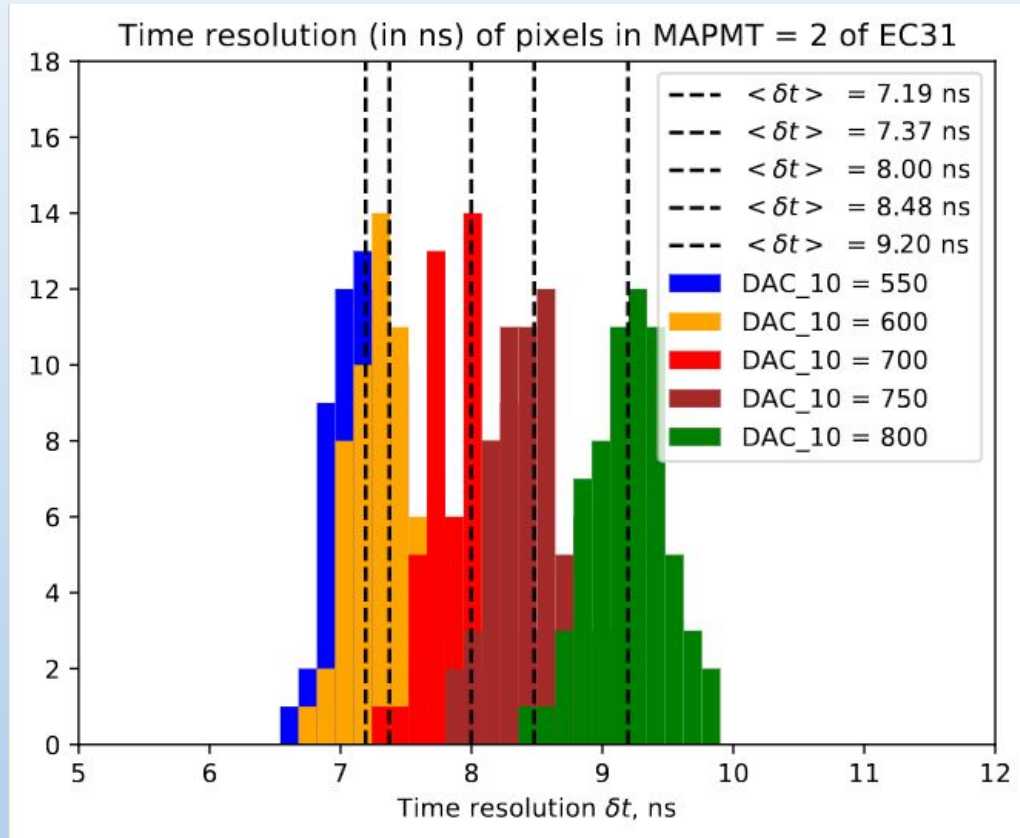
Мертвое время было рассчитано для всех 108 МАФЭУ флуоресцентного телескопа EUSO-SPB2. Измерения не могли быть проведены в режиме полной засветки из-за просадки высокого напряжения при высокой засветке всего фотоприемника (исправить)

# Временное разрешение фотодетекторов EUSO-SPB2



Распределение мертвого времени по МАФЭУ (3 модуля)

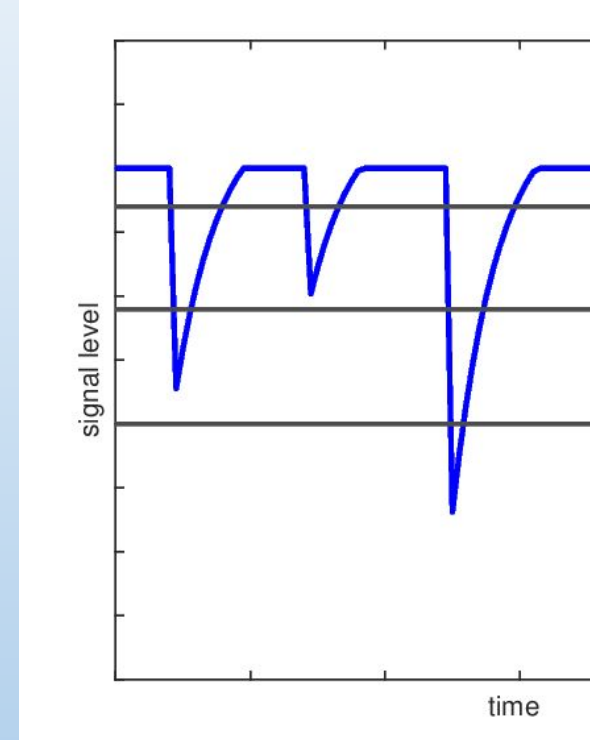
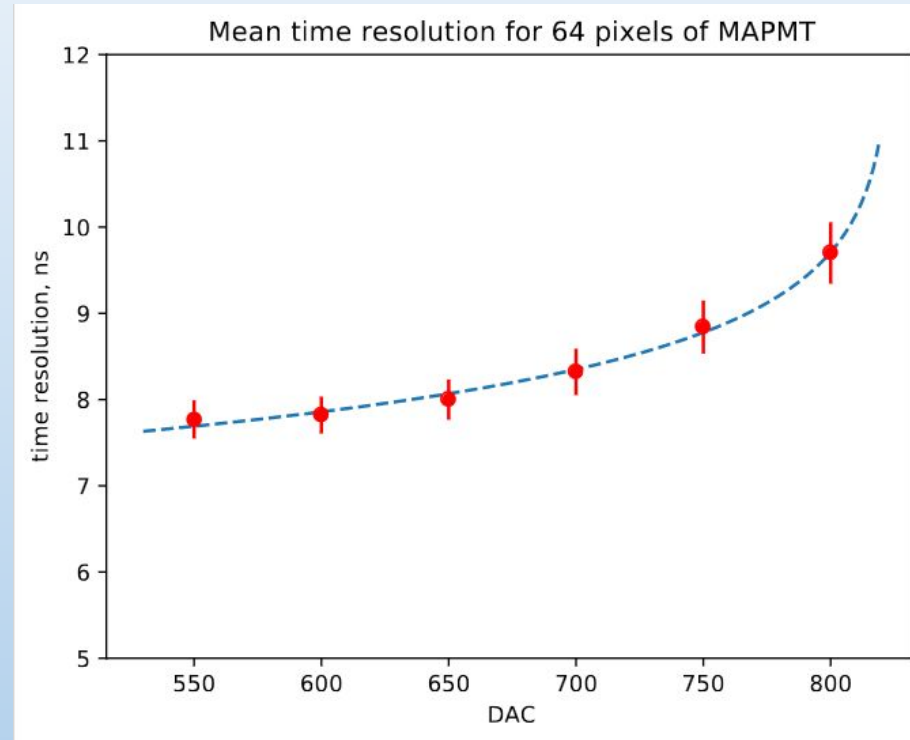
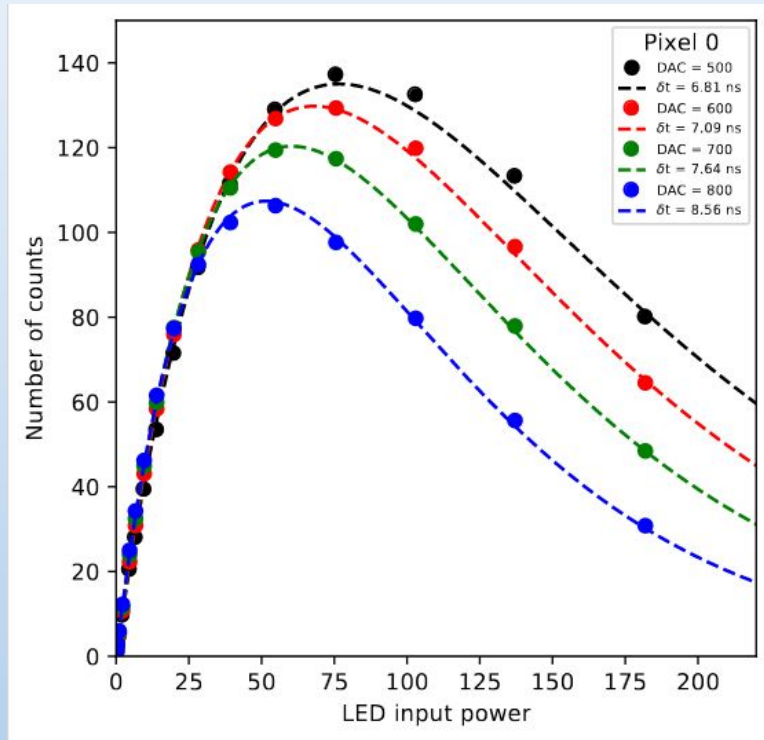
# Временное разрешение



Слева: диаграмма временного разрешения для всех пикселей одного МАФЭУ.

Справа: зависимость среднего времени от порога

# Зависимость временного разрешения от времени

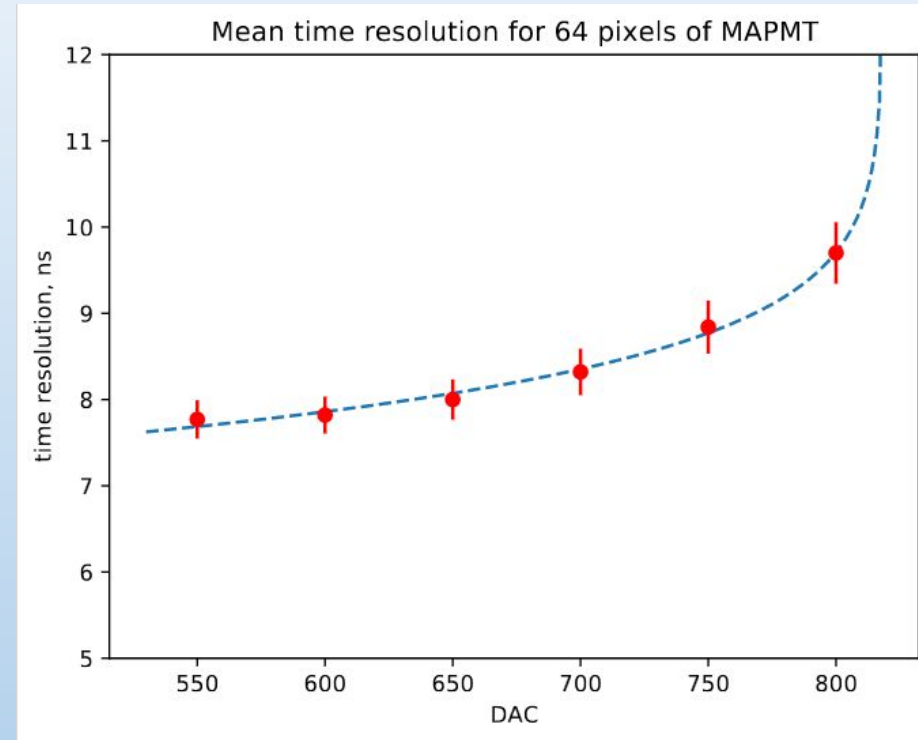
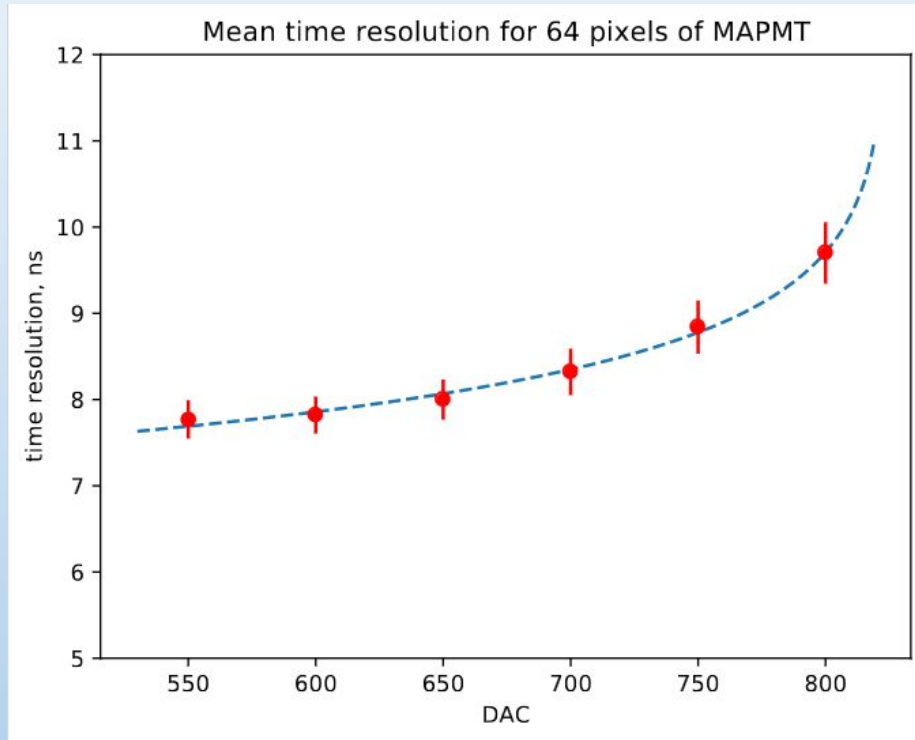


Слева: pile-up кривые для 4 разных порогов для 1 пикселя.

В центре: зависимость среднего временного разрешения от порога для 1 МАФЭУ. Функция аппроксимации  $t(x) = -a \ln(-x + x_0) + b$  при модели экспоненциально затухающего импульса (справа).

Проблема: не известна форма импульса и ее невозможно измерить

# Зависимость временного разрешения от времени

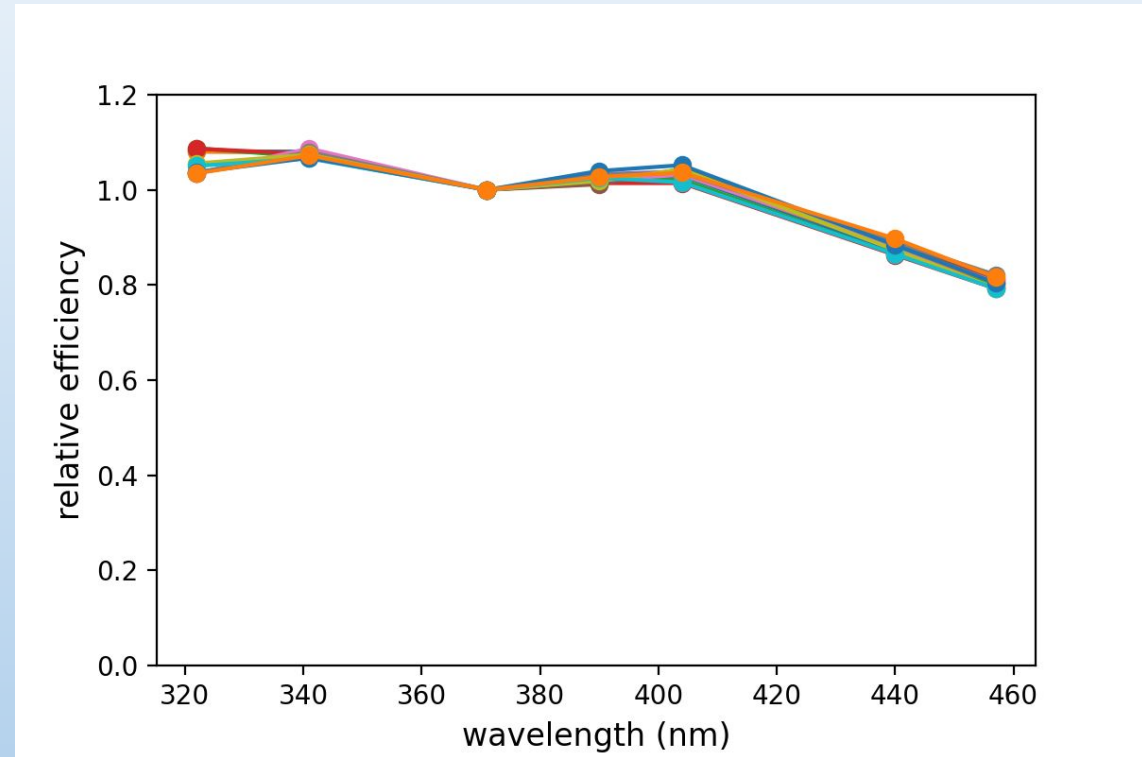
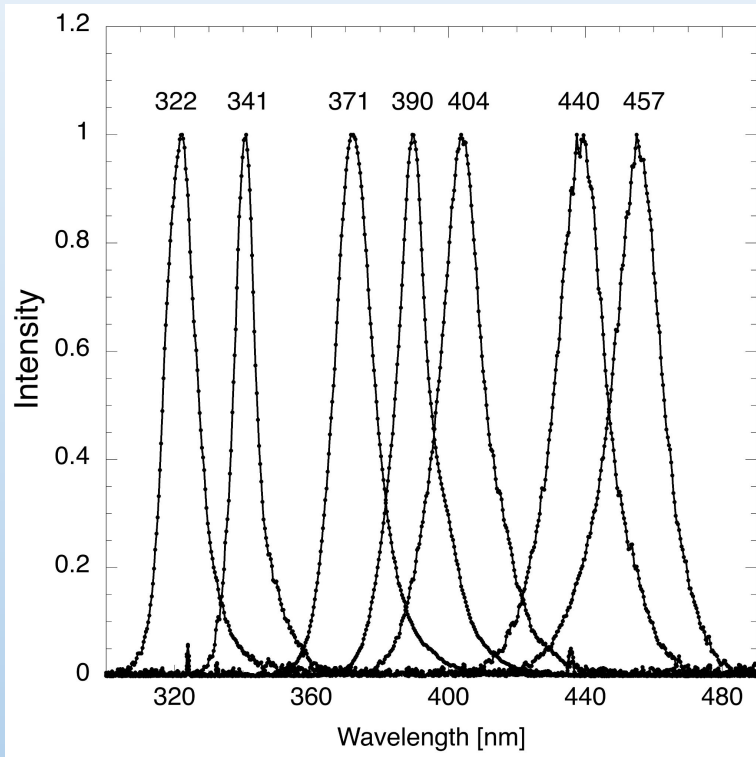


*Слева:* зависимость среднего временного разрешения от порога для 1 МАФЭУ (аппроксимация по модели экспоненциально затухающего импульса).

*Справа:* те же данные при модели гауссоподобного импульса.

*Проблема* (обеих аппроксимаций): пик импульса лежит в области далеких отрицательных значений DAC10 ( $\sim -24000$ ).

# Зависимость эффективности пикселей МАФЭУ от длины волны детектируемого света



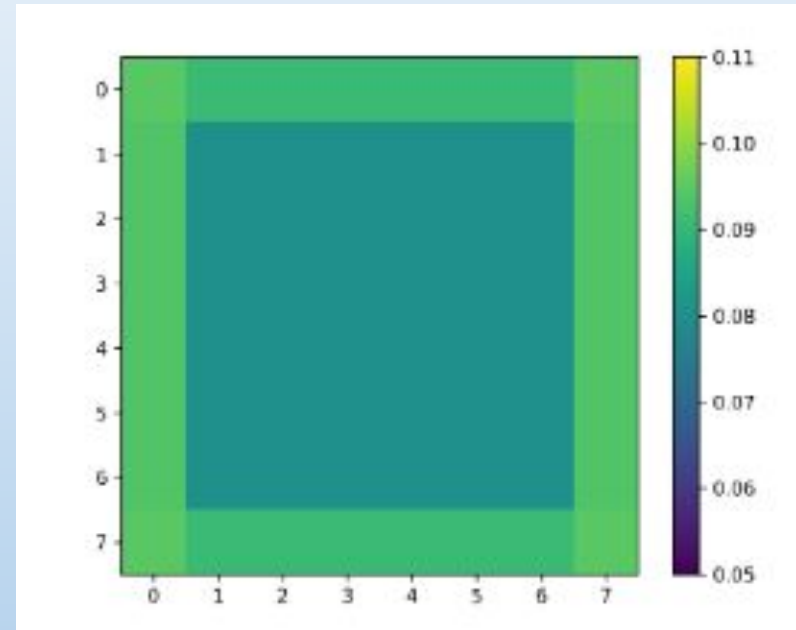
*Слева:* спектры светодиодов, освещающих фотоприемную поверхность.

*Справа:* зависимость эффективности 12-ти МАФЭУ от длины волны света (по вертикальной оси - медианная эффективность 36-и центральных пикселей МАФЭУ, деленная на эффективность при длине волны 371 нм).

# Средние размеры фотоприемника

pixel type	linear sizes (mm <sup>2</sup> )	pixel area (mm <sup>2</sup> )
corner	not rectangular	9.47
V-border	3.31 × 2.83	9.37
H-border	3.21 × 2.83	9.08
internal	2.83 × 2.83	8.02

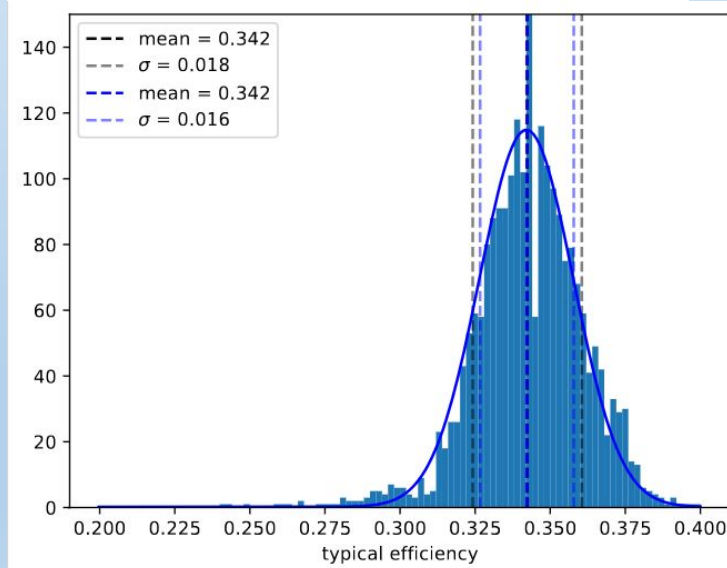
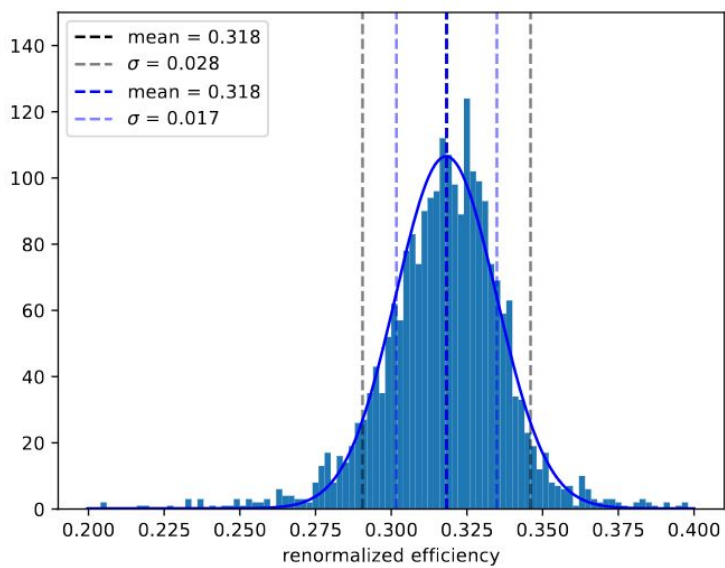
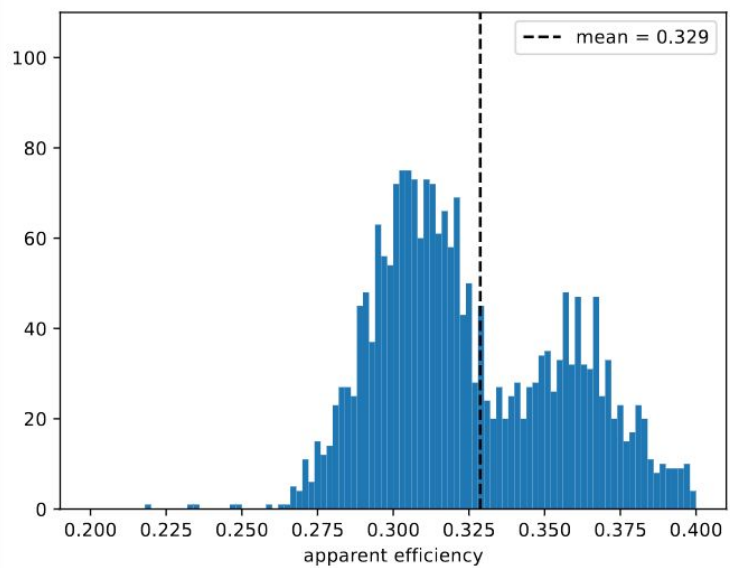
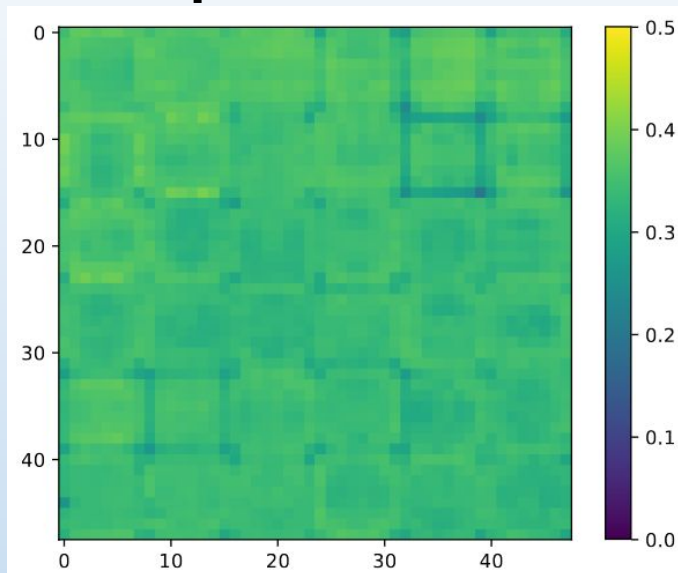
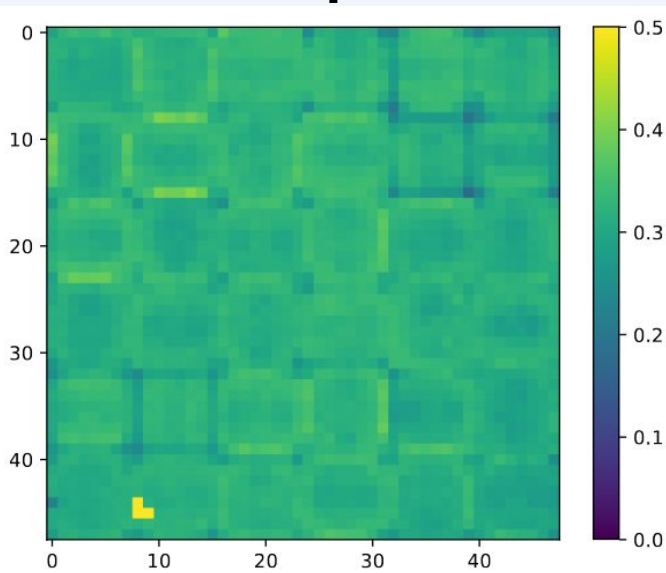
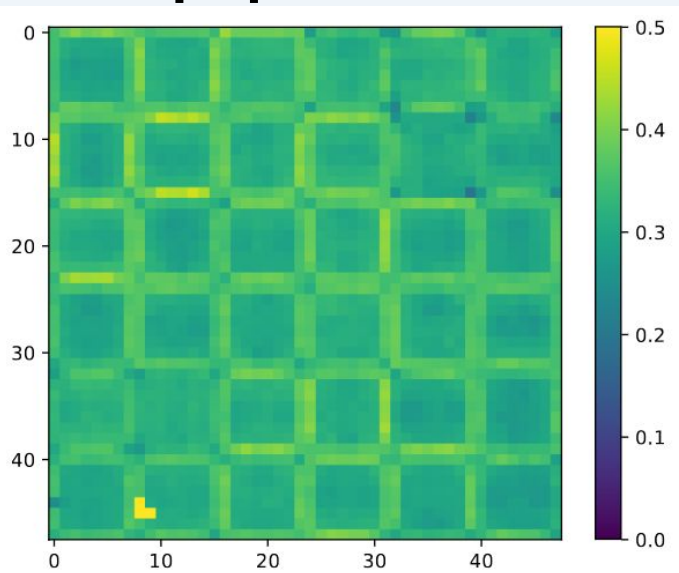
average distances	PDM 1 (mm)	PDM 2 (mm)	PDM 3 (mm)
between MAPMTs	4.0	4.1	3.9
between ECs	4.5	4.5	4.4



Были получены средние площади пикселей, а также расстояния между МАФЭУ (см. таблицы).

Справа: “карта” стандартных площадей 1 МАФЭУ (в см<sup>2</sup>)

# Эффективности детектирования фотоприемников



Методы расчета эффективности (пример для PDM1): 1) при полной засветке, 2) при полной засветке и с ренормализацией пикселей по площадям, 3) с помощью сканирования, усреднение по 4 ярчайшим точкам внутри пикселя

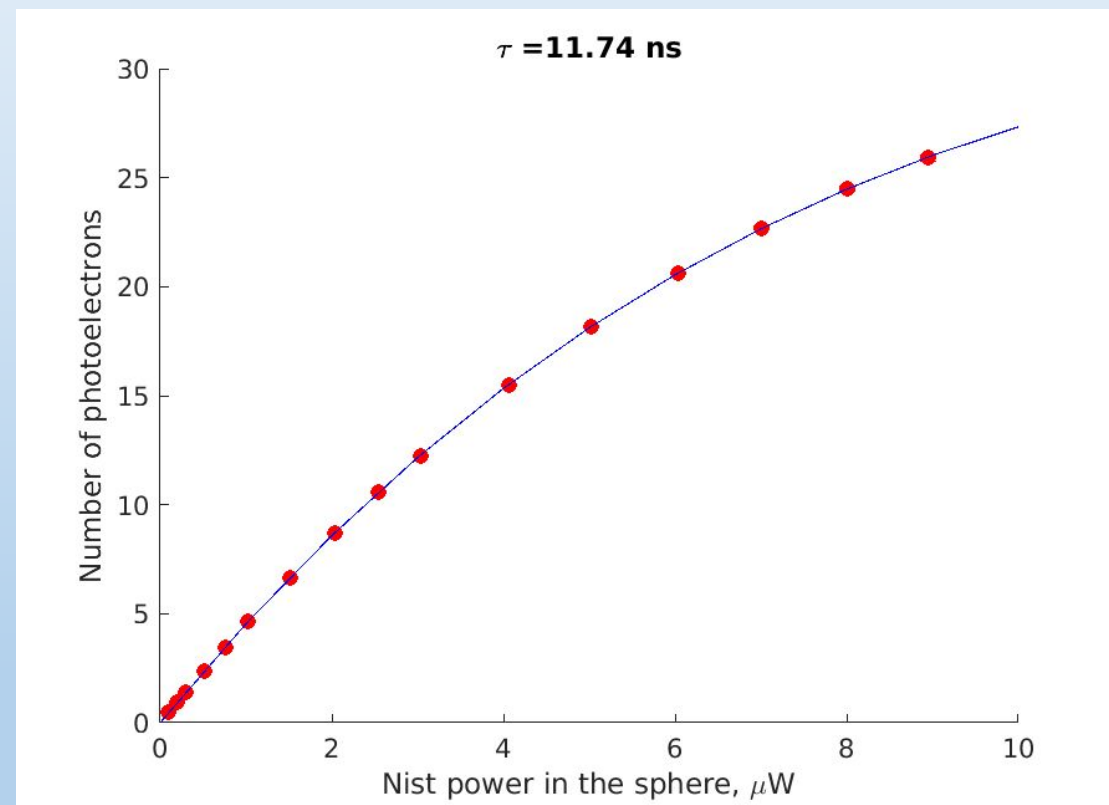
Спасибо за внимание

# Калибровки – исследование эффекта наложения импульсов

Цель исследования эффекта наложения импульсов это определение функции отклика фотодетектора в зависимости от входного потока

Экспериментальные измерения калибровочных кривых аппроксимируются функцией вида:

$$N_{p.e.} = k \times N_{ph} \times \exp(-k \times N_{ph} \tau)$$



# Исследование эффекта наложения импульсов для нескольких элементарных ячеек фотоприемника EUSO-SPB2.

На рис. справа – гистограммы распределения мертвого времени по МАФЭУ.

Из распределения видно, что мертвое время внутри одного МАФЭУ находится в пределах 1 нс, следовательно можно восстановить кривую фотоэлектронов от числа фотонов, зная эффективности всех пикселей и мертвое время одного пикселя в МАФЭУ

