



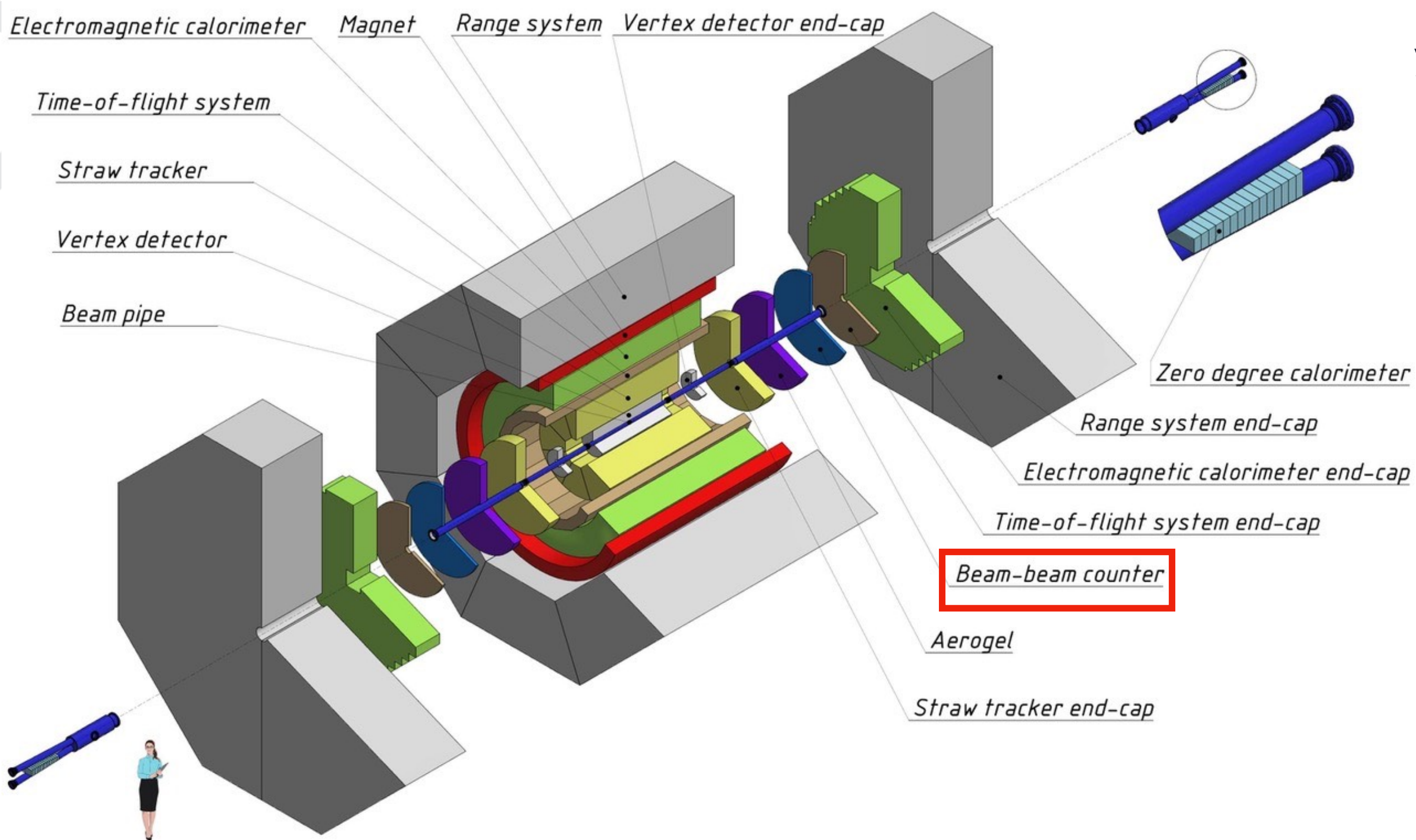
Характеризация пластин сцинтилляционного детектора ВВС для эксперимента SPD с помощью космического излучения

Студентка: Тертышная К.А.
Научный руководитель: Тетерин П.Е.

Москва, 2026



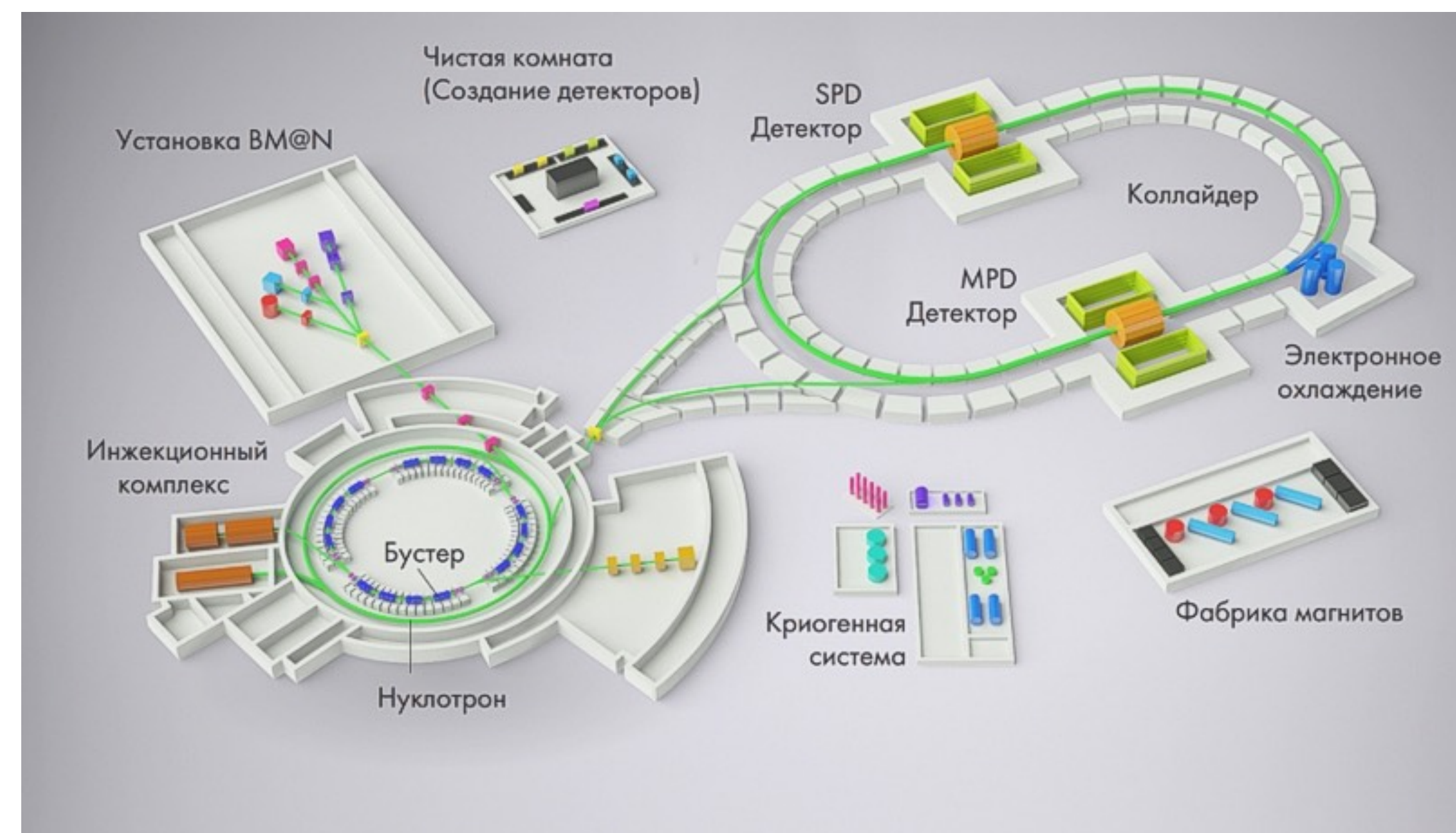
Коллайдер NICA и эксперимент SPD



Детекторная система SPD

Spin Physics Detector - это универсальная установка для исследования спиновой структуры нуклонов и других спиновых явлений.

- Установка будет использовать поляризованные пучки;
- Энергия частиц до 27ГэВ в системе центра масс, частота соударений до 4МГц.

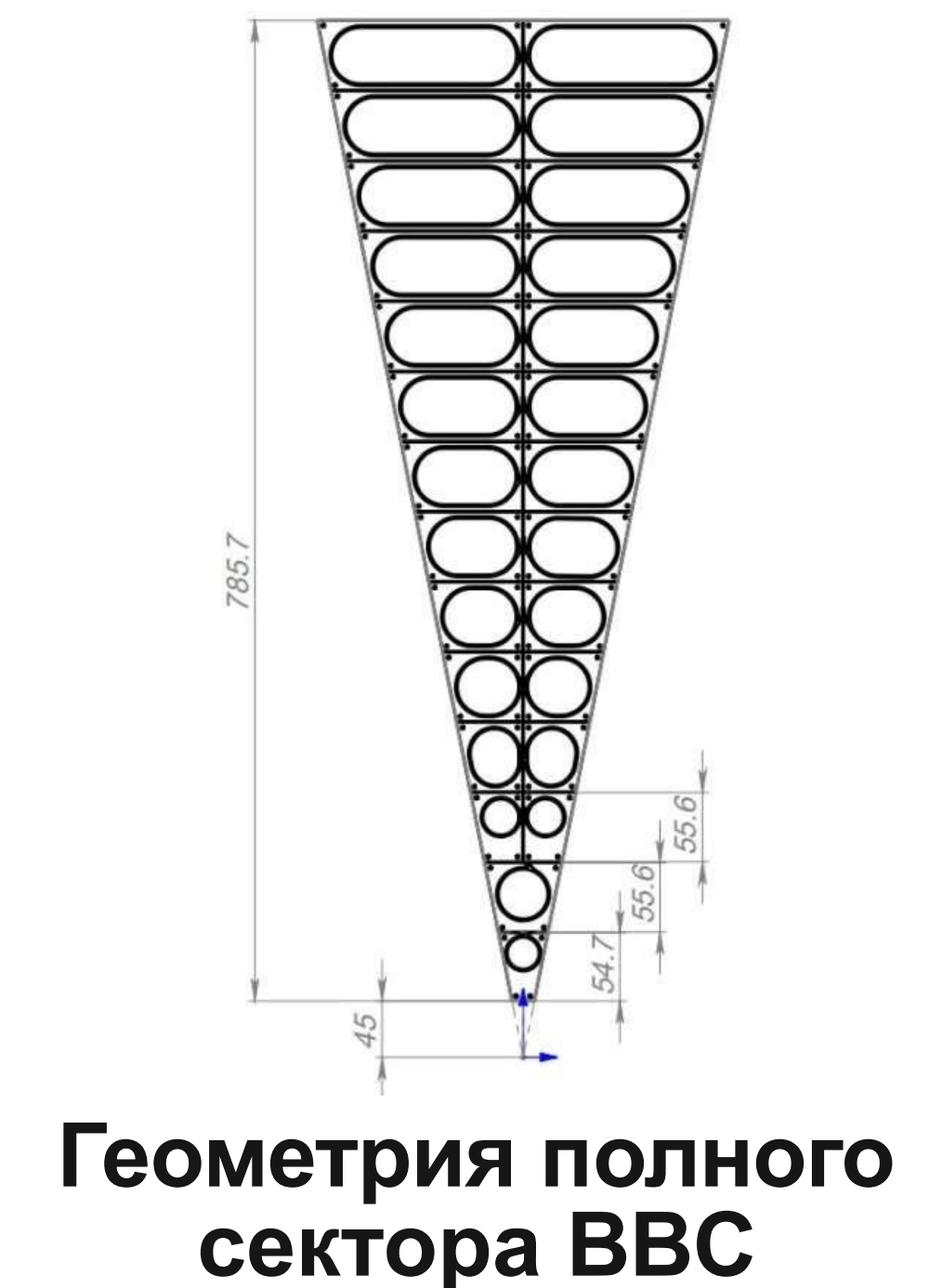
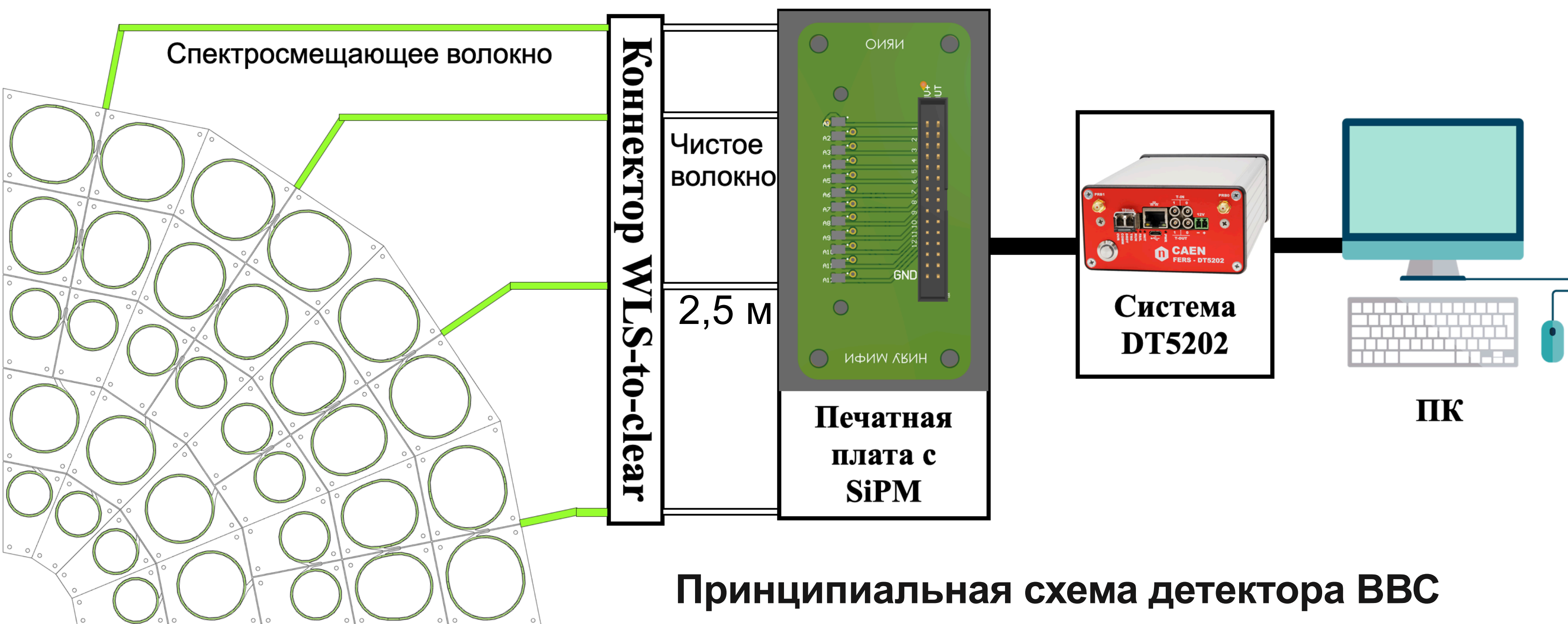


Ускорительный комплекс NICA

Счётчик пучков (BBC)

Beam-Beam Counter - сцинтилляционный детектор с секторной структурой, предназначенный для мониторинга столкновений пучков и локальной поляриметрии.

- Одно колесо BBC: 16 секторов; сектор: 24 трапециевидных сцинтилляторов - тайлов;
- Внутри каждого тайла в три витка уложено и вклеено спектросмещающее оптоволокно (WLS);
- Оптический тракт: WLS → чистое волокно → кремниевые фотоумножители (SiPM);
- Сигнал с SiPM считывается системой предварительной обработки данных CAEN DT5202.



Цель:

Исследовать качество светосбора и зависящих от него характеристик в прототипах детектора ВВС.

Задачи:

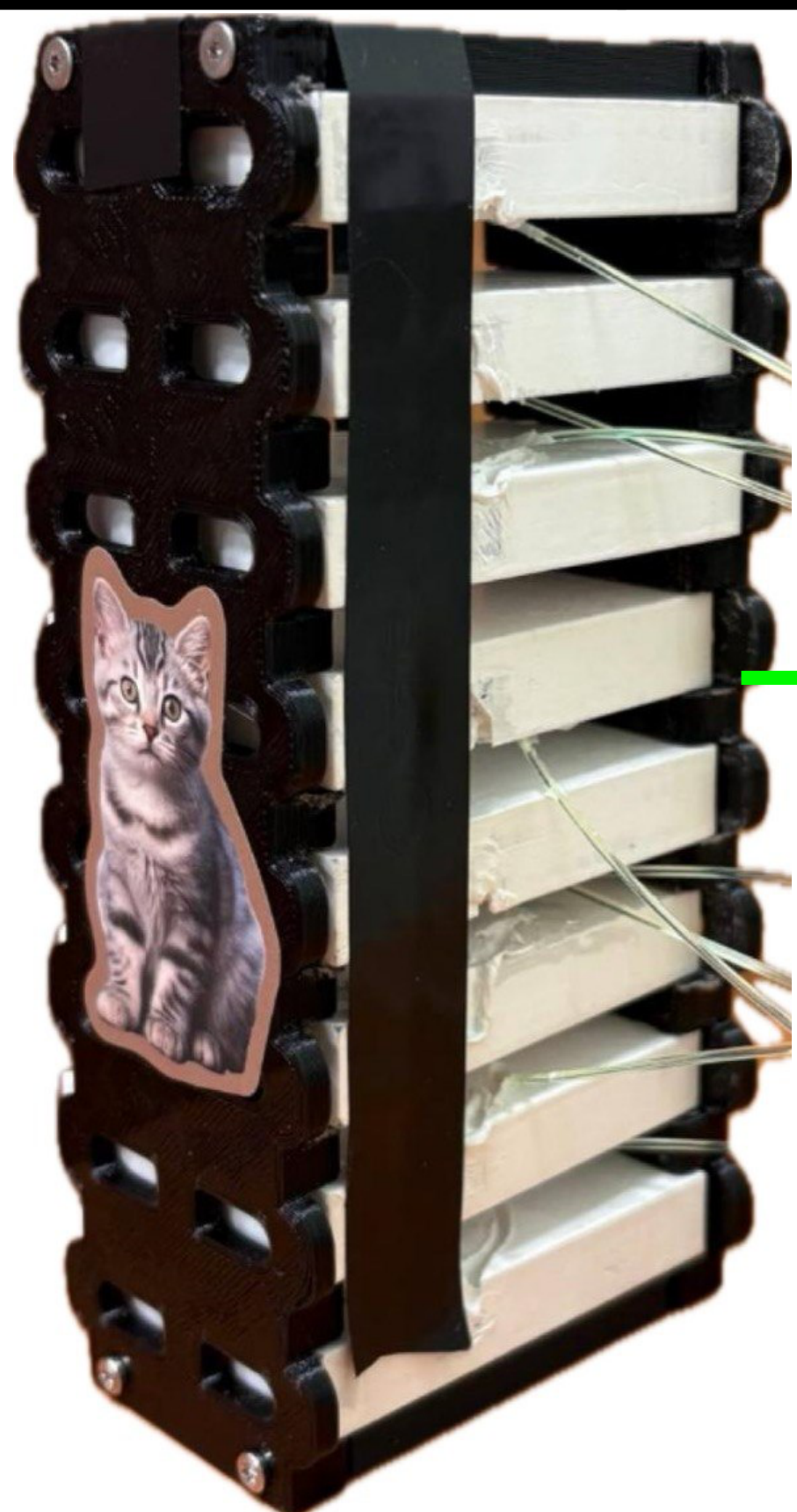
1. Оценить разброс величины отклика тайлов при регистрации космических мюонов;
2. Оценить эффективность тайлов по регистрации заряженных релятивистских частиц;
3. Получить отклик тайлов детектора ВВС в режиме Time over Threshold;
4. Оценить влияние оптических соединений на светосбор;
5. Исследовать работу прототипов секторов ВВС в режиме телескопа

Экспериментальная установка

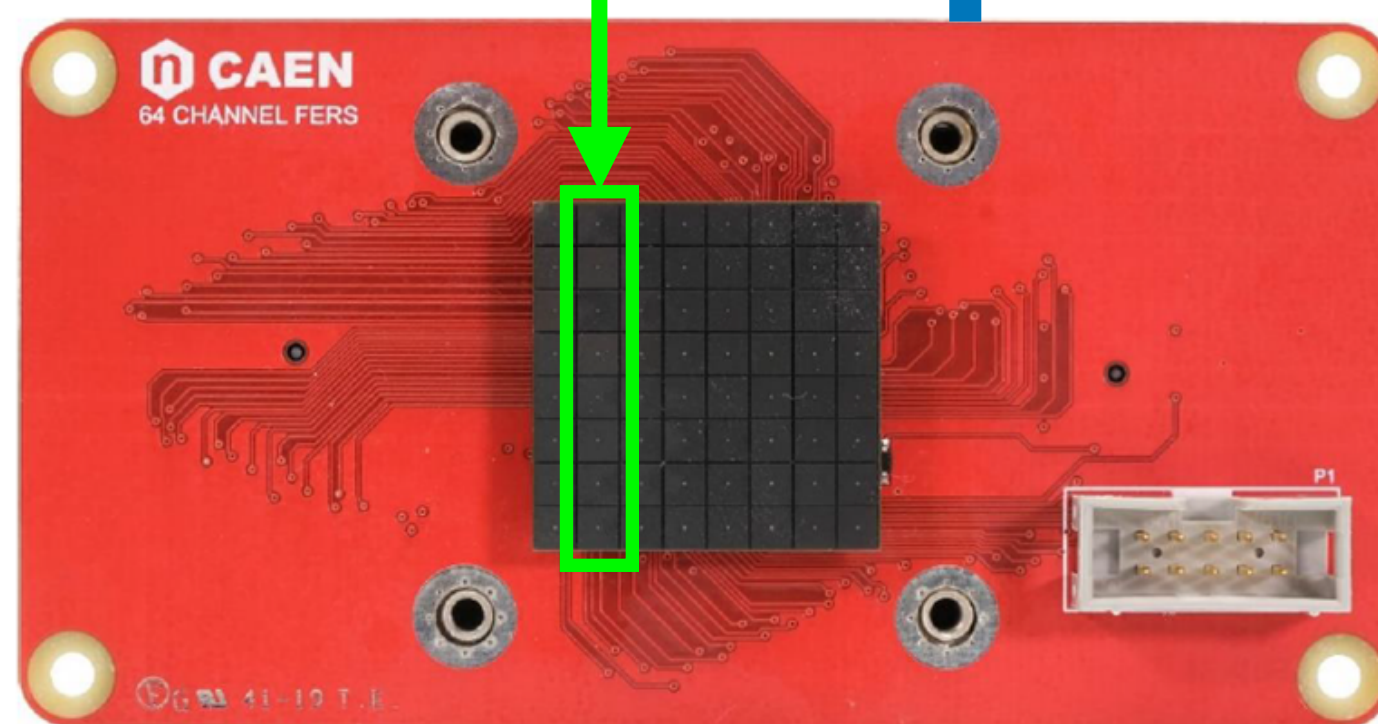
Задача: Оценить величину отклика тайла, её разброс и эффективность телескопа

- Телескоп состоит из 8-ми одинаковых тайлов;
- Спектросмещающее волокно: SG BCF-92;
- Фотоприёмник: матрица SiPM Hamamatsu S13361-3050AE-08;
- Система питания и считывания SiPM: CAEN DT5202;
- $V_{bias} = 54 \text{ В}$;
- Триггер: совпадение сигналов с триггерного тайла и двух ФЭУ;
- Отполированные WLS вклеены в коннектор для матрицы

Триггерный тайл SiPM



WLS

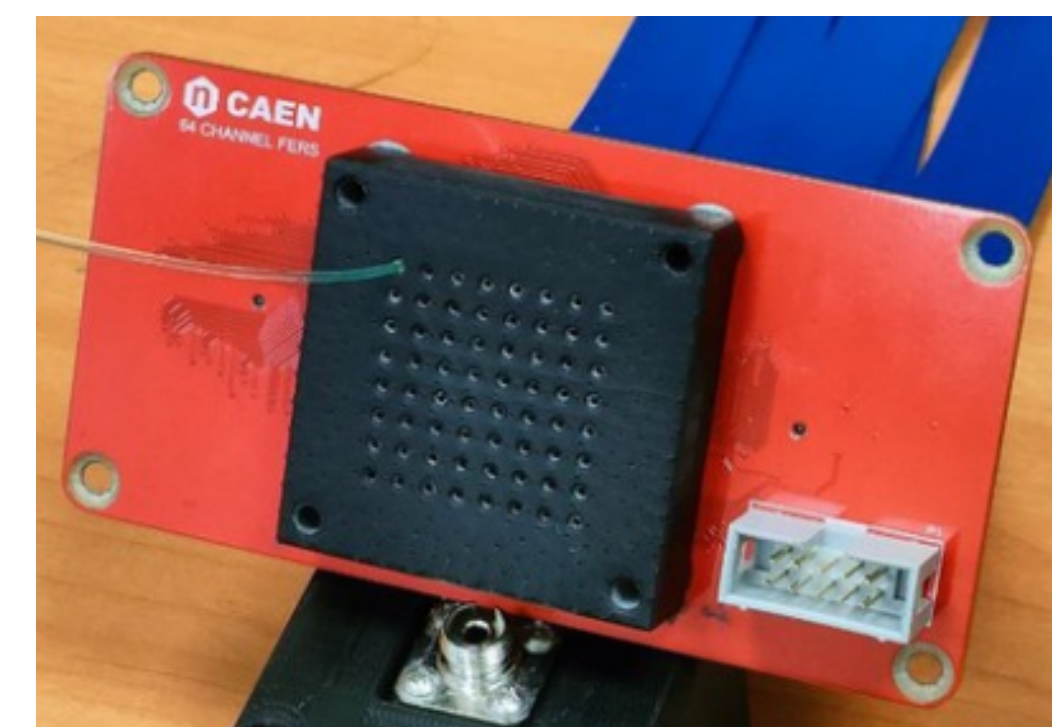


Матрица SiPM Hamamatsu
S13361-3050AE-08

Шлейф



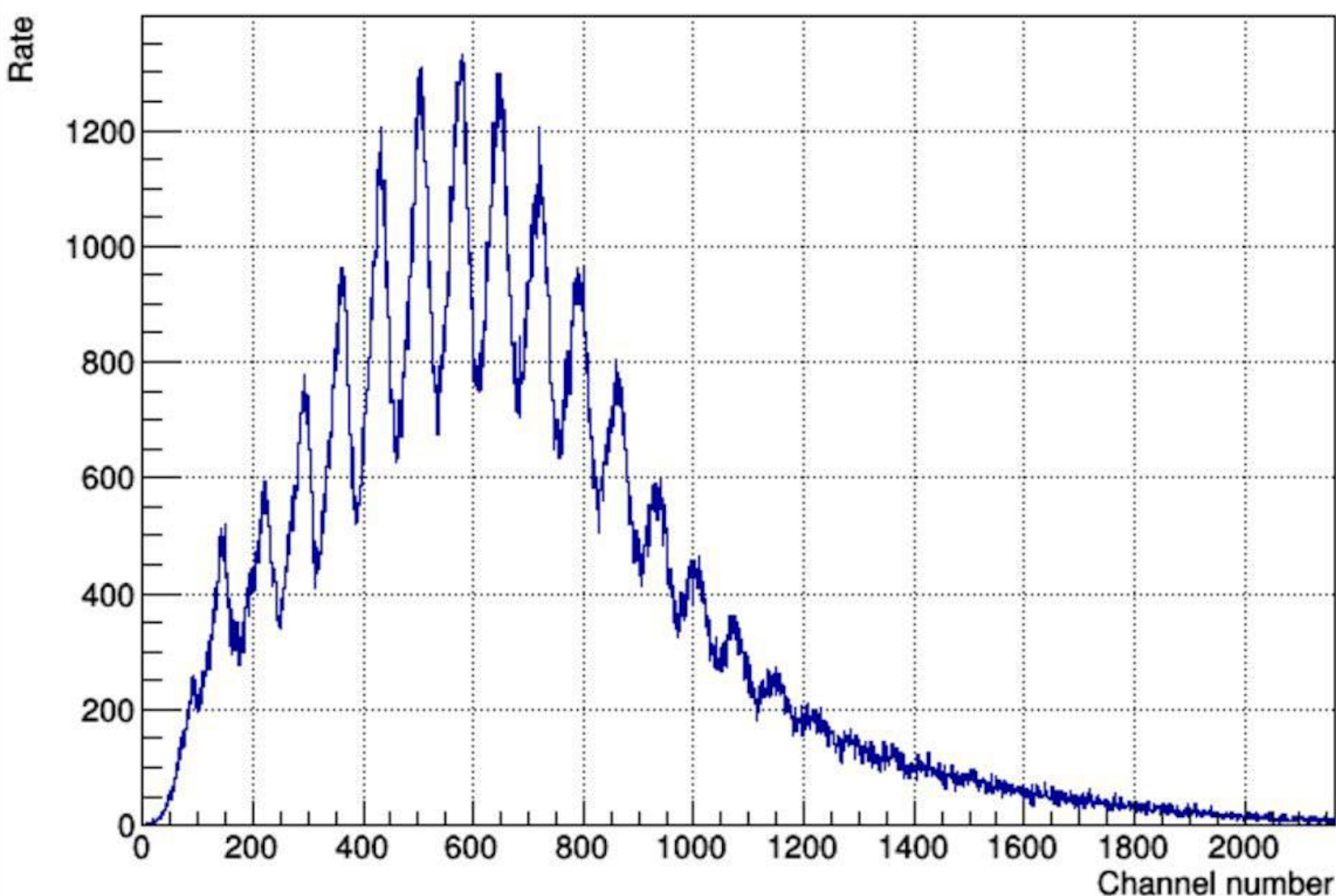
DT5202



Коннектор для
матрицы Hamamatsu

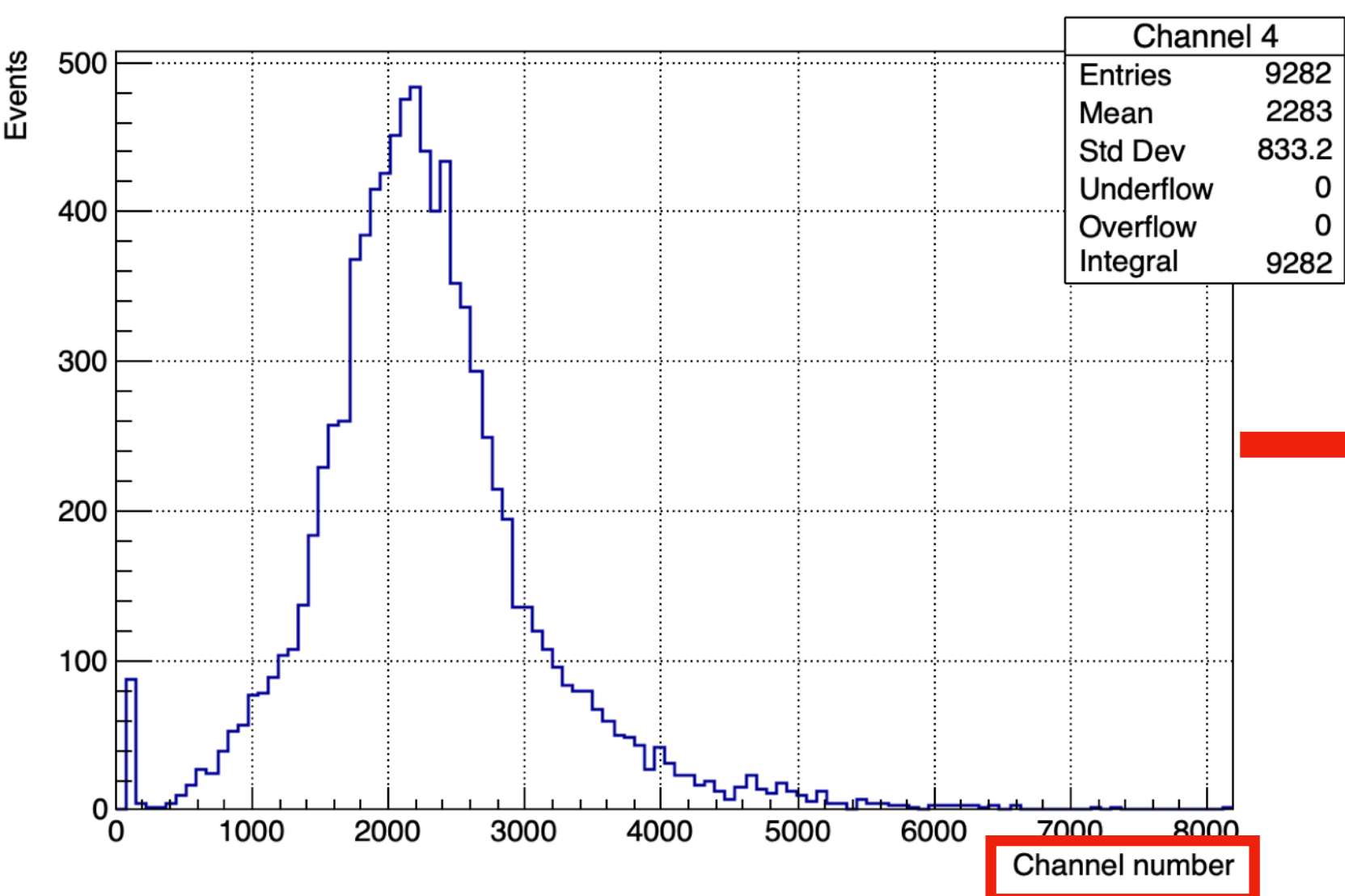
ФЭУ Сцинтиллятор ФЭУ

Оценка разброса отклика

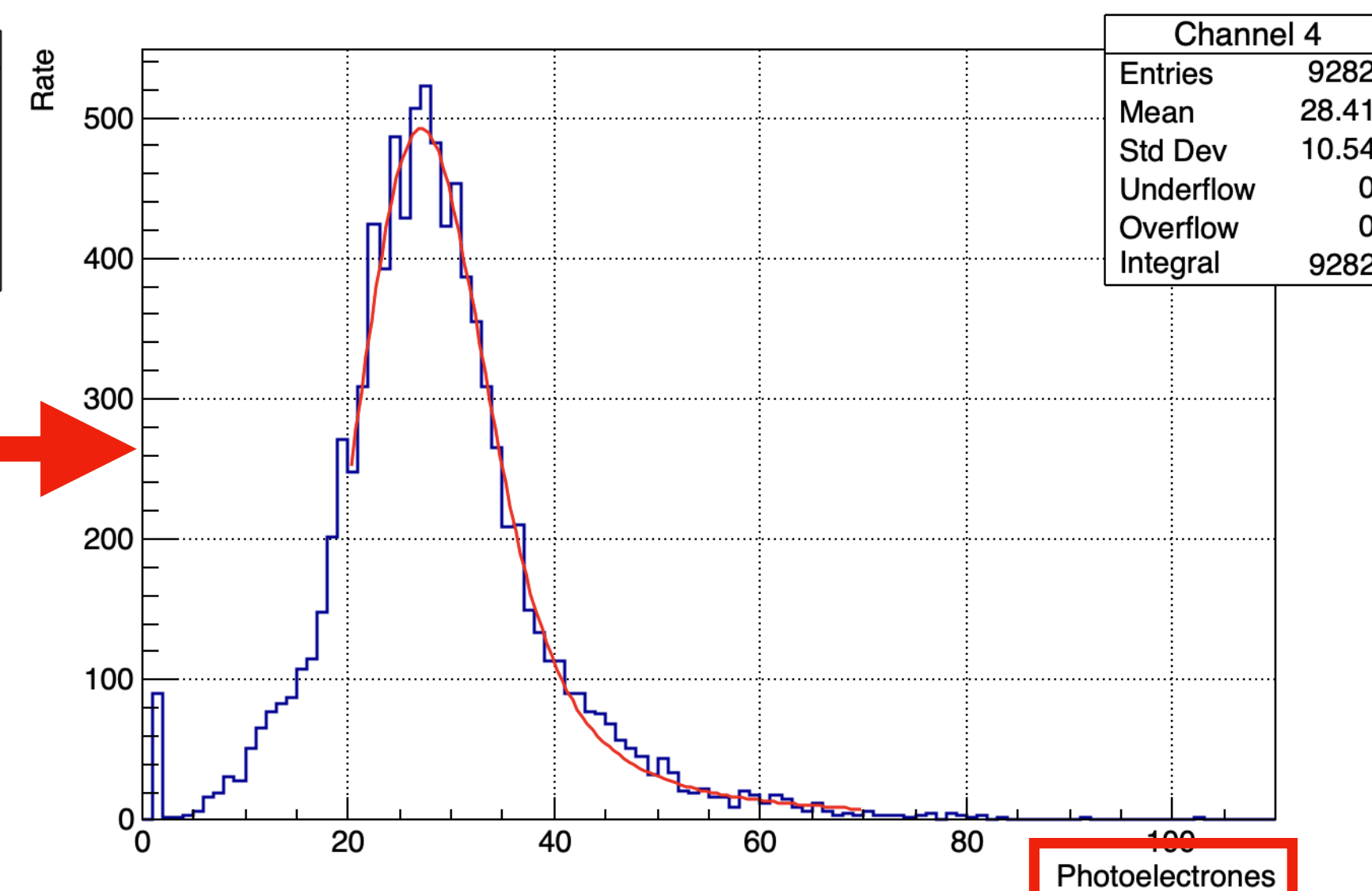


Одноэлектронный спектр сигналов SiPM

- Расстояние между соседними пиками одноэлектронного спектра SiPM соответствует одному фотоэлектрону в единицах канала кодировщика;
- Выполнена калибровка шкалы кодировщика в фотоэлектроны;
- Спектры энергетических потерь мюонов аппроксимированы сверткой функций Ландау и Гаусса;
- MPV - наиболее вероятное значение;
- После завершения эксперимента обнаружено смещение волокна 4-го тайла ближе к SiPM по сравнению с остальными



Спектр энергетических потерь мюонов



Откалиброванный спектр энергетических потерь мюонов с аппроксимацией свёрткой функций Ландау и Гаусса

Тайл	MPV, фэ
1	27
2	35
3	34
4	39
5	30
6	30
7	30
8	30

<MPV> (без 4-го тайла): (31 ± 3) фэ⁶

Оценка эффективности регистрации

- Оценка эффективности проведена относительно верхнего и нижнего тайла

Эффективность регистрации частиц рассчитана по формуле:

$$\varepsilon = \frac{N_{>5phe}}{N_{all}} \times 100 \%$$

$N_{>5phe}$ - количество событий, превышающих 5 фэ (шум);
 N_{all} - количество событий в референсных тайлах.

Тайл	$\varepsilon, \%$
2	99
3	98
4	98
5	98
6	99
7	100

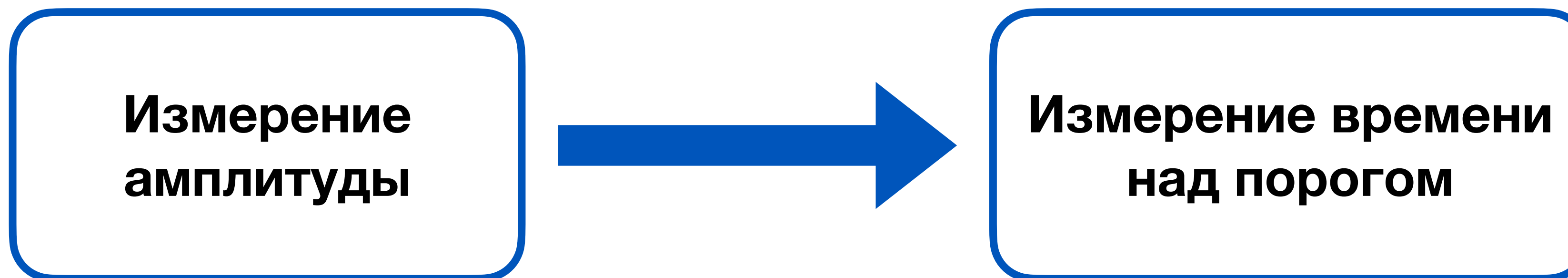
$$\langle \varepsilon \rangle = (99^{+1}_{-3})\%$$



Триггерные тайлы

Режим «время над порогом»

Задача: Получить отклик тайлов детектора ВВС в режиме Time over Threshold (ToT)



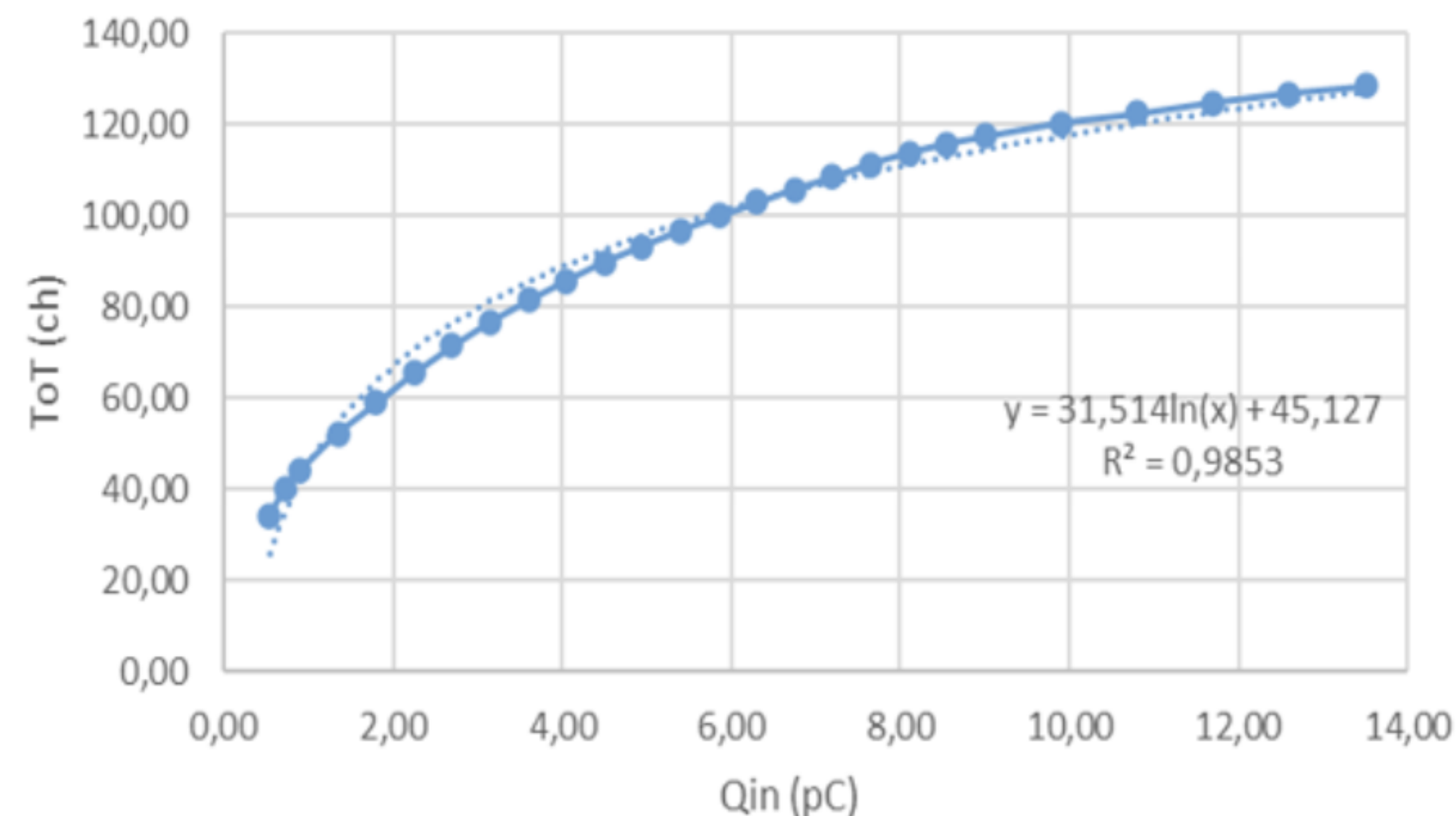
Режим работы детекторов

- $V_{\text{раб}} = V_{\text{пробой}} + 7 \text{ В};$
- Спектросмещающие волокна не вклеены в коннектор для матрицы

Цена канала ВЦП: 0,5нс

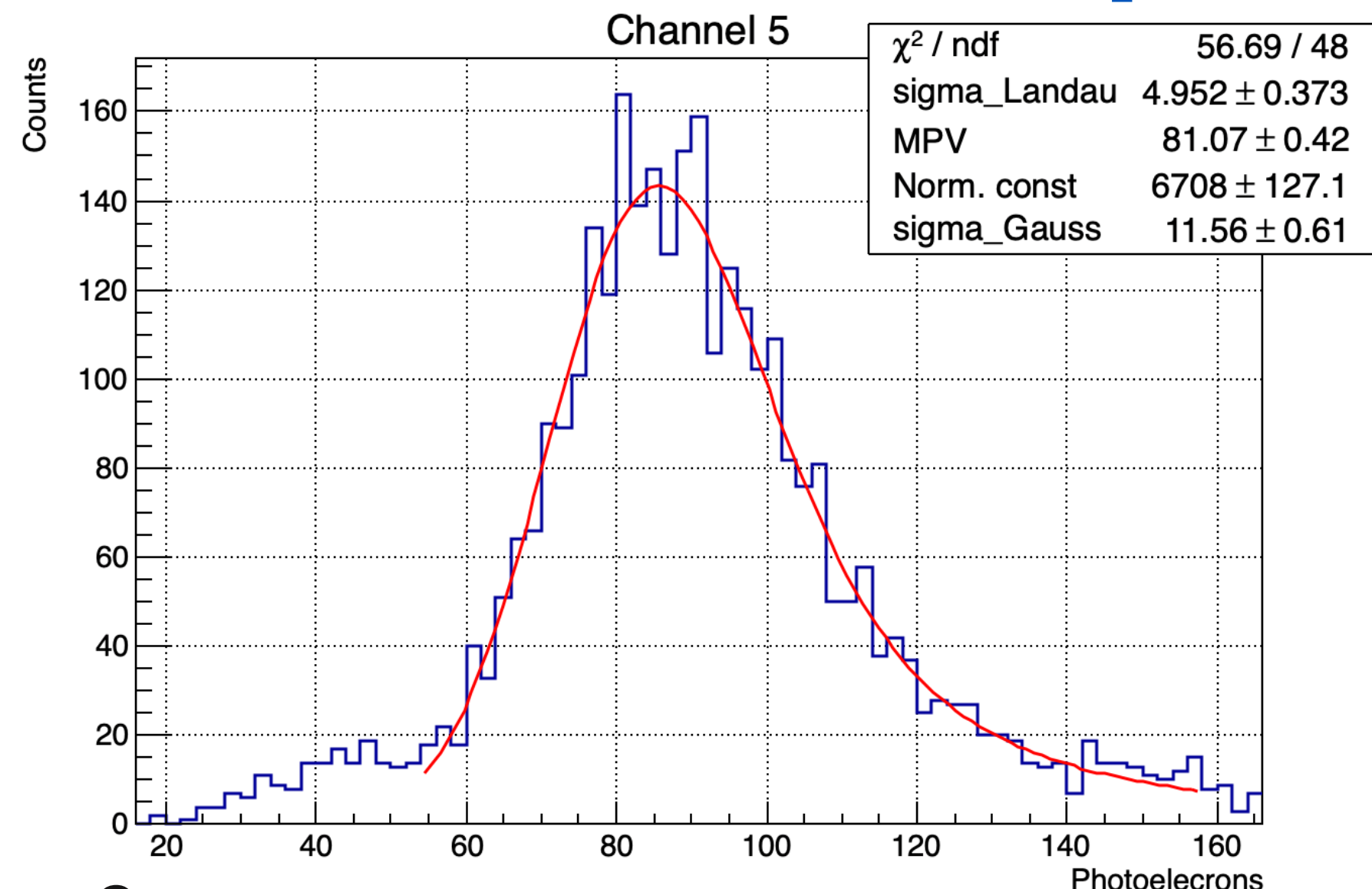
Из руководства DT5202:

ToT vs Qin

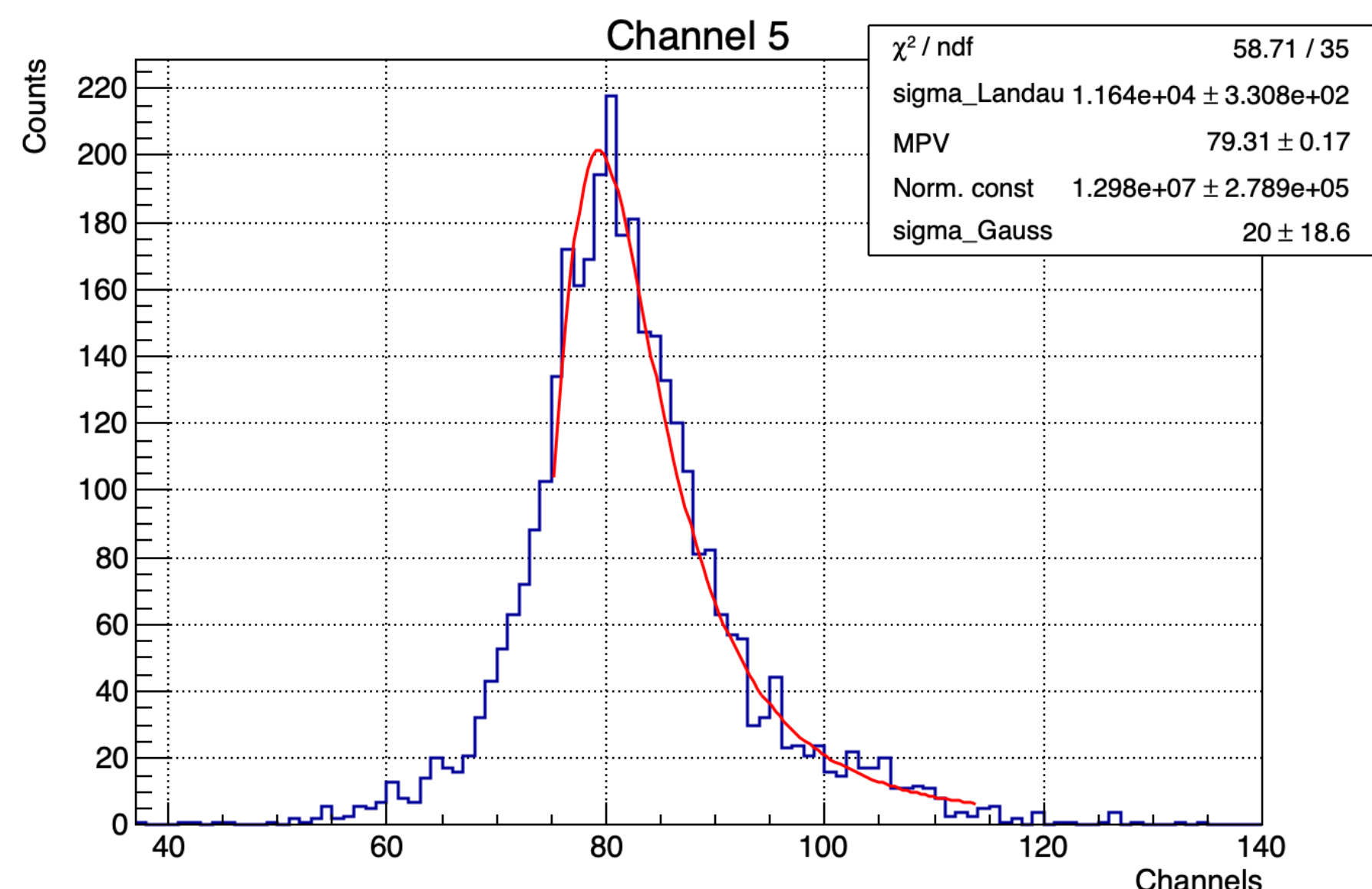


$$\text{ToT} = 0,0409 Q_{in}^3 + 19,749 Q_{in}^2 - 1,4547 Q_{in} + 26,873$$

Отклик детектора в режиме ToT



Спектр энергетических потерь мюонов в амплитудном режиме



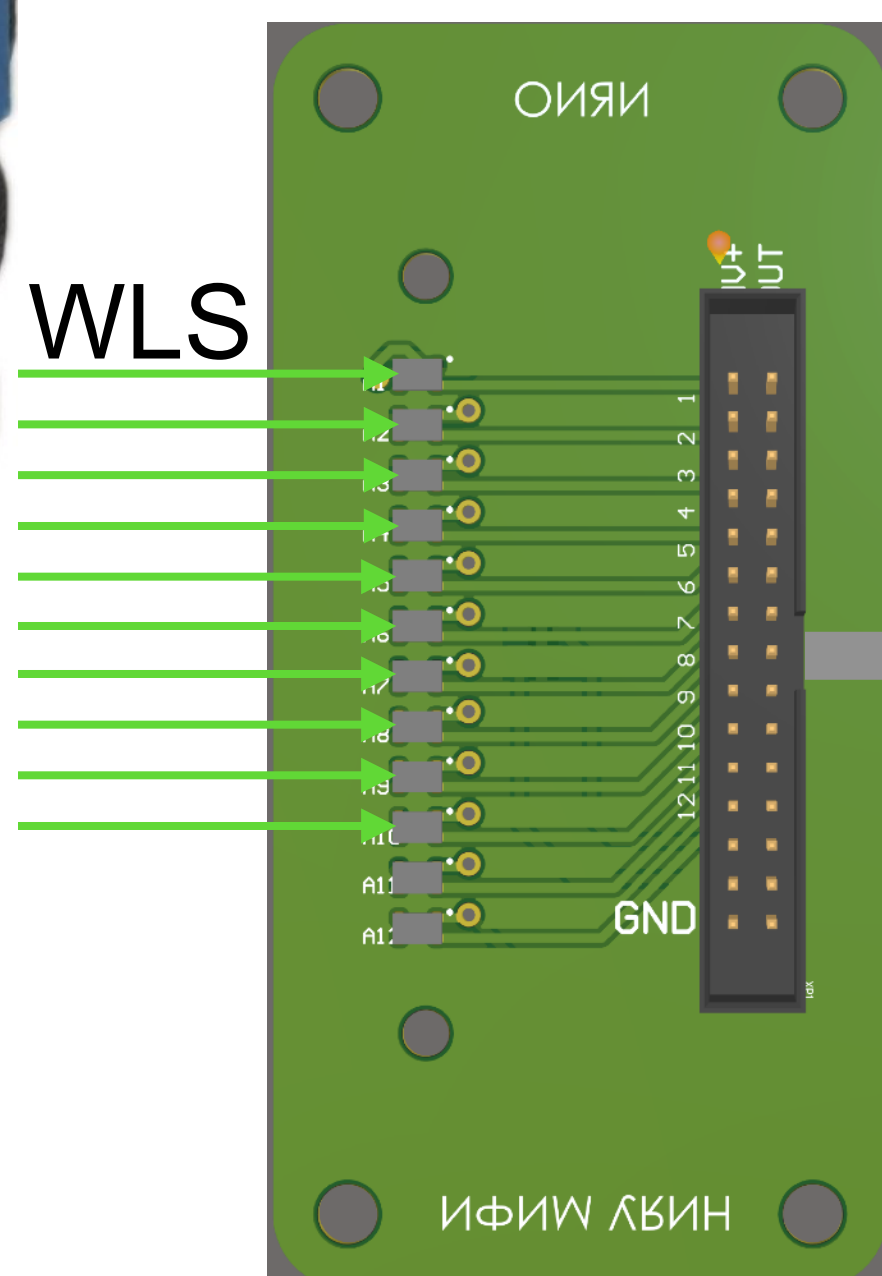
Спектр энергетических потерь мюонов в режиме ToT

- Оптическая связь ячеек SiPM: 10% - учтена при обработке;
- Порог ToT: 5 фэ;
- Landauss модифицирован с учётом нелинейности ToT;
- Измеренное MPV в ToT сопоставлено MPV в амплитудном режиме

Тайл	MPV, каналы ToT	Фотоэлектроны
1	73	54
2	76	67
3	77	67
4	77	73
5	77	57
6	77	57
7	75	59
8	77	57

Экспериментальная установка

Задача: Оценить влияние оптических соединений на светосбор



Плата
фотоприемников
для VBS

- SiPM: Onsemi ($1 \times 1 \text{ мм}^2$) и Hamamatsu ($1,3 \times 1,3 \text{ мм}^2$);
- Волокно вклеено в коннектор по методике VBS;
- Перенапряжение:
 - $V_{ov} = 5\text{В}$ для Onsemi
 - $V_{ov} = 8\text{В}$ для Hamamatsu
- Триггер: совпадение сигналов от крайних тайлов;

Шлейф



DT5202

- **WLS в 10-ом канале заменено на твердое спектросмещающее волокно с добавкой OSL8**

Сравнение отклика тайлов для разных SiPM

SiPM Onsemi

SiPM Hamamatsu

Тайл	MPV, фэ
1	33
2	31
3	34
4	31
5	37
6	35
7	31
8	33
9	30
10 (OSL8)	49

Тайл	MPV, фэ
1	39
2	40
3	44
4	42
5	49
6	46
7	43
8	49
9	40
10 (OSL8)	77

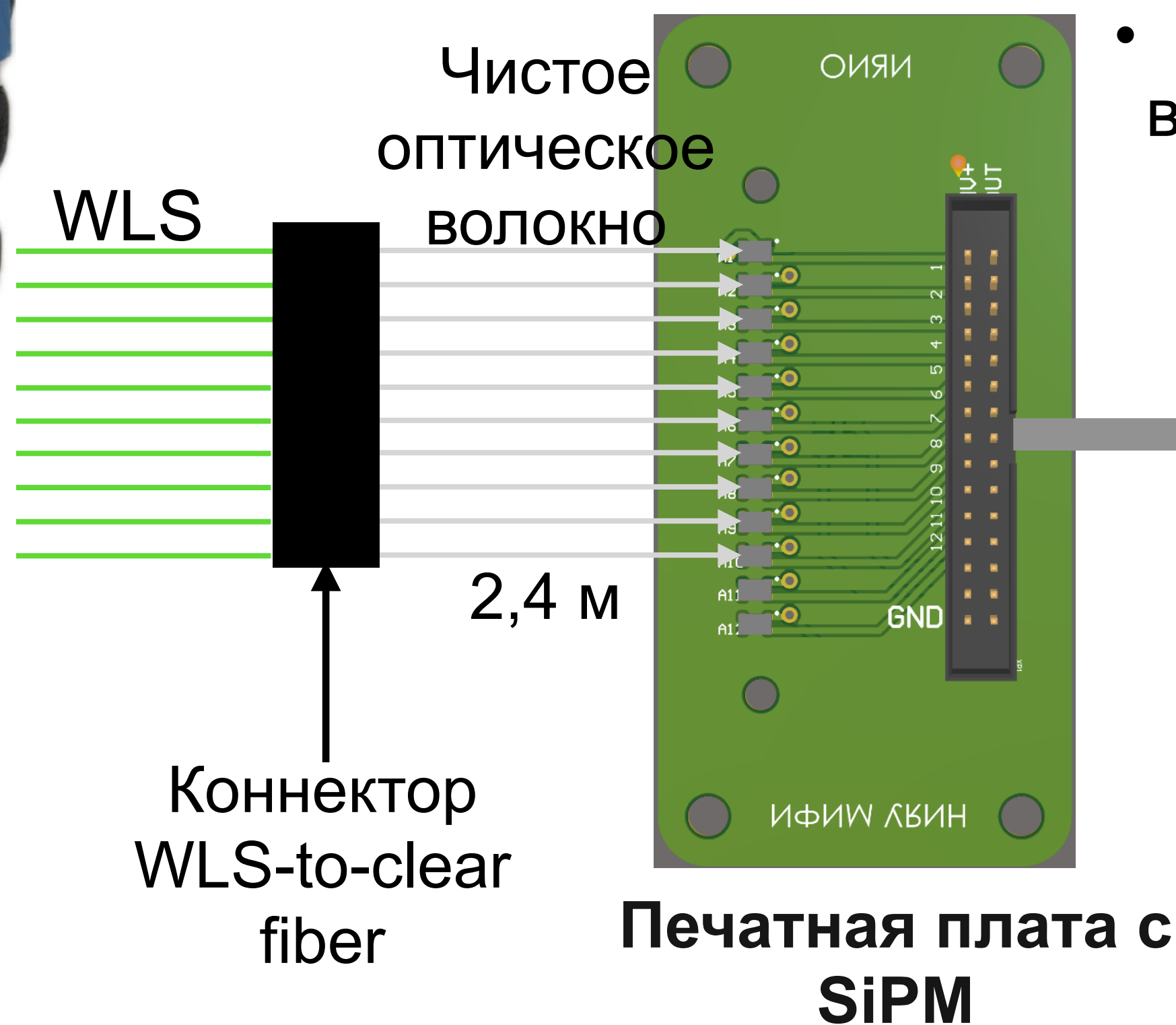
**<MPV> (без 10-го тайла):
(33±3) фэ**

**<MPV> (без 10-го тайла):
(43±4) фэ**

- Получены спектры энергетических потерь для двух вариантов печатных плат;
- Среднее значение наиболее вероятных энергетических потерь мюонов при измерениях с SiPM Hamamatsu на 23% превышает значение, полученное с SiPM Onsemi;
- Отклик тайла со спектросмещающим волокном OSL8 на 49% превышает средний MPV тайлов с волокном SG BCF92 при измерениях с SiPM Onsemi и на 44% при измерениях на SiPM Hamamatsu

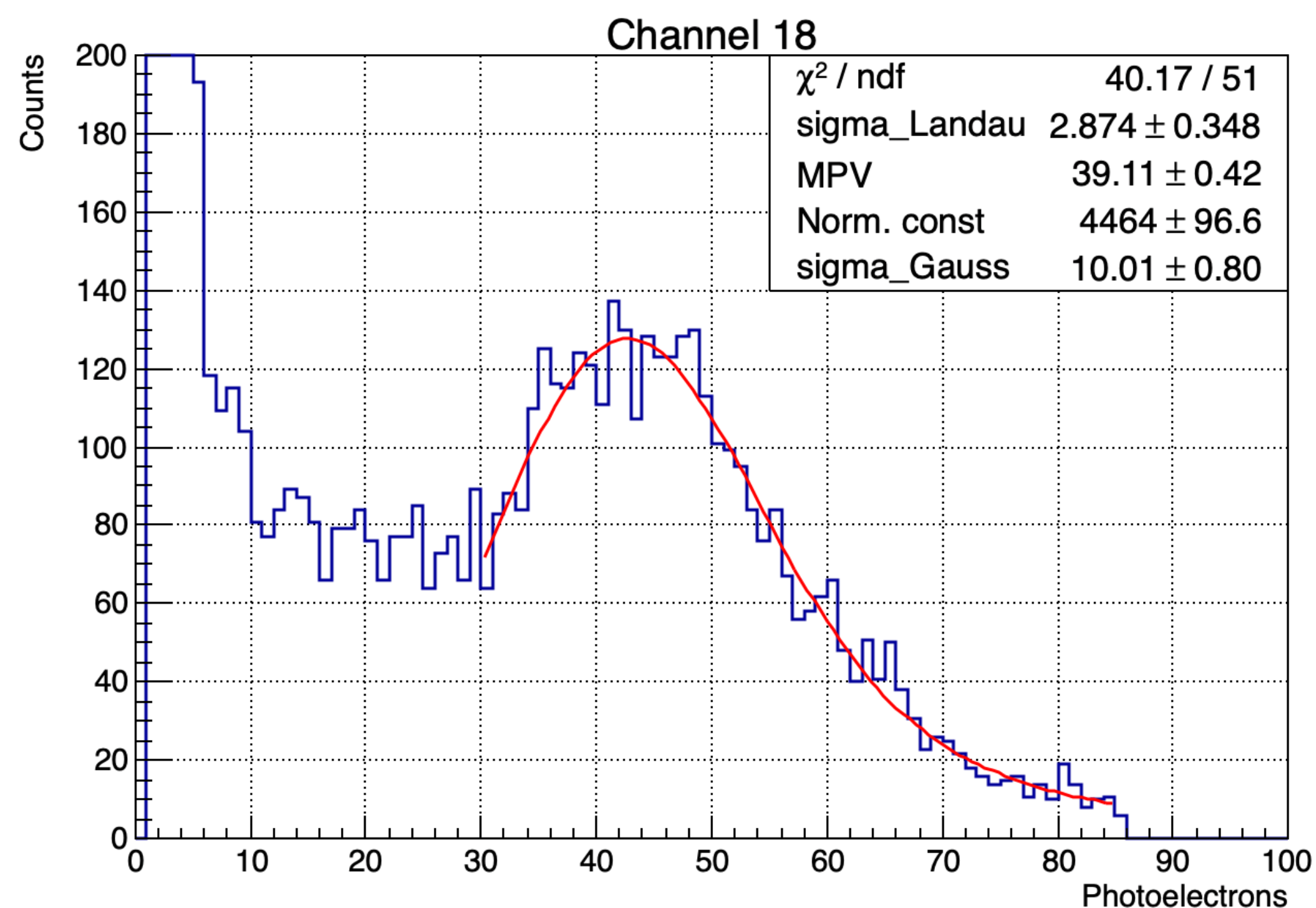
Экспериментальная установка

Задача: Оценить влияние оптических соединений на светосбор



- Детектор ВВС предусмотрено использовать дополнительный тракт передачи фотонов - чистое оптическое волокно;
- Чистое волокно: SG BCF длиной 2,4 м;
- Торцы чистых волокон заполированы по методике ВВС;
- Стык спектросмещающего и чистого оптических волокон промазан оптической смазкой Pate-7





Спектр энергетических потерь мюонов

SiPM Onsemi

Тайл	MPV, фэ
1	20
2	14
3	12
4	13
5	15
6	19
7	20
8	19
9	14
10 (OSL8)	34

<MPV> (без 10-го тайла):

16 ± 3

Использование чистого оптического волокна привело к снижению наиболее вероятного отклика тайлов на **51%**!

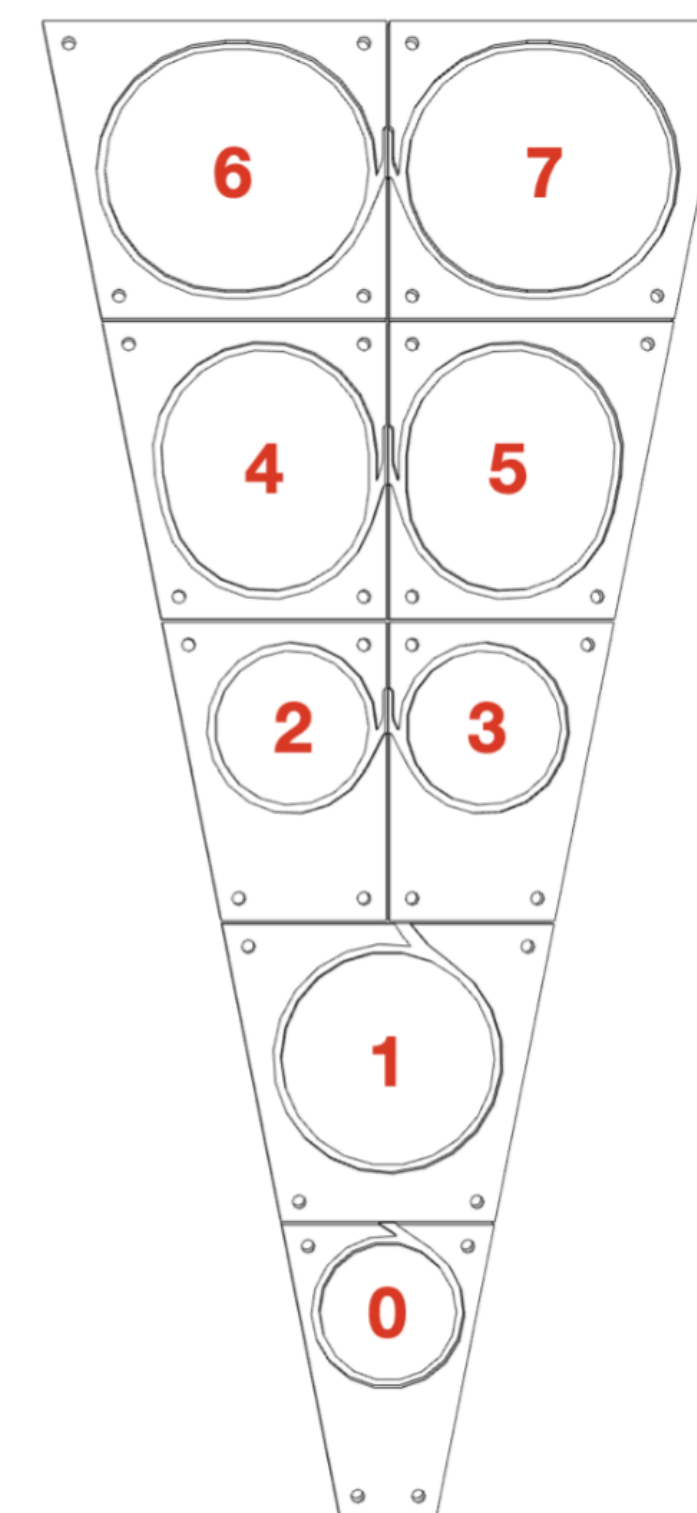
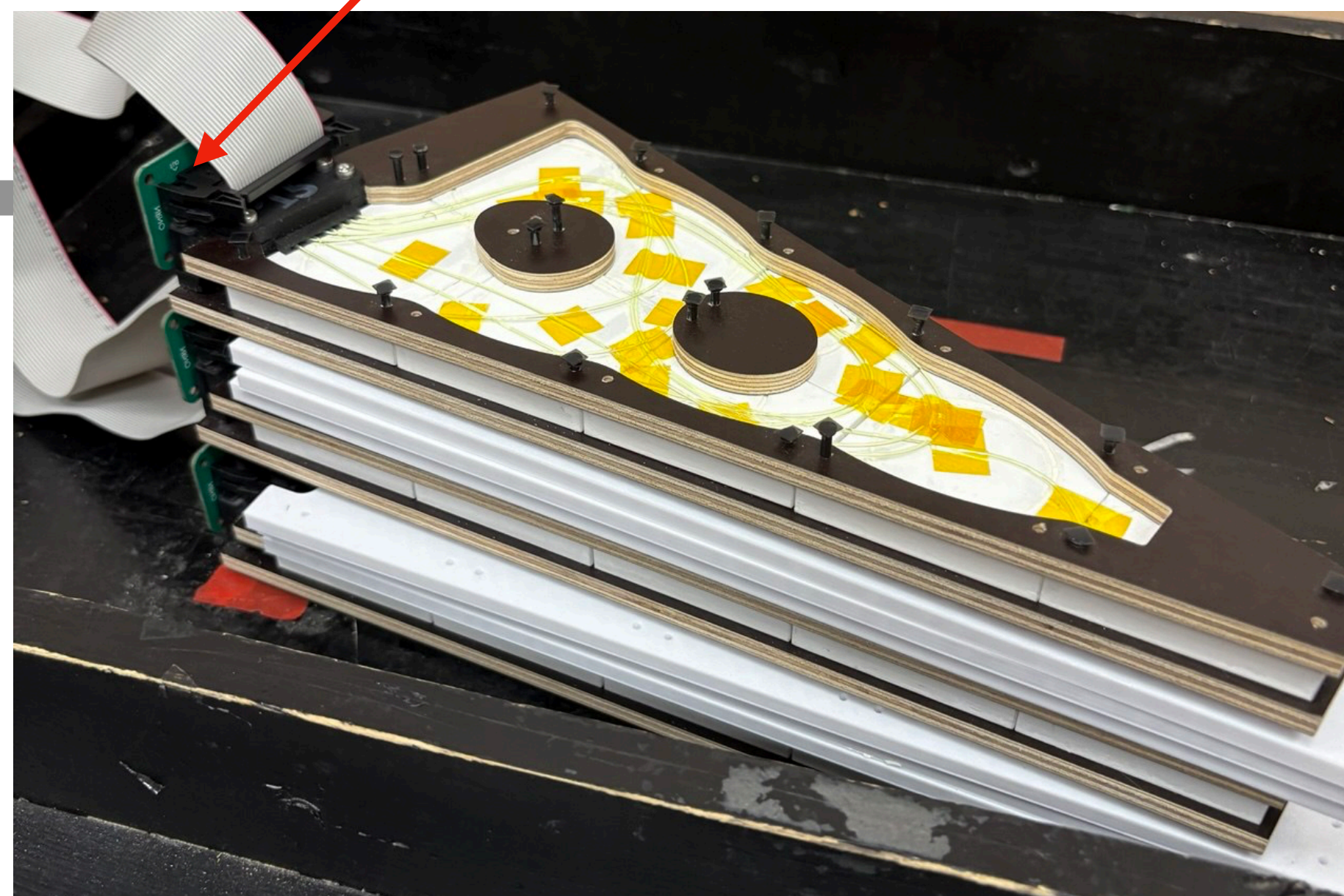
Экспериментальная установка

Задача: Исследовать работу прототипов секторов ВВС в режиме телескопа

- Телескоп состоит из 3-ёх усеченных секторов ВВС;
- Расстояние между секторами составляет 1,8 см;
- Спектросмещающие волокна заполированы по методике ВВС;
- Фотоприемник: SiPM Hamamatsu



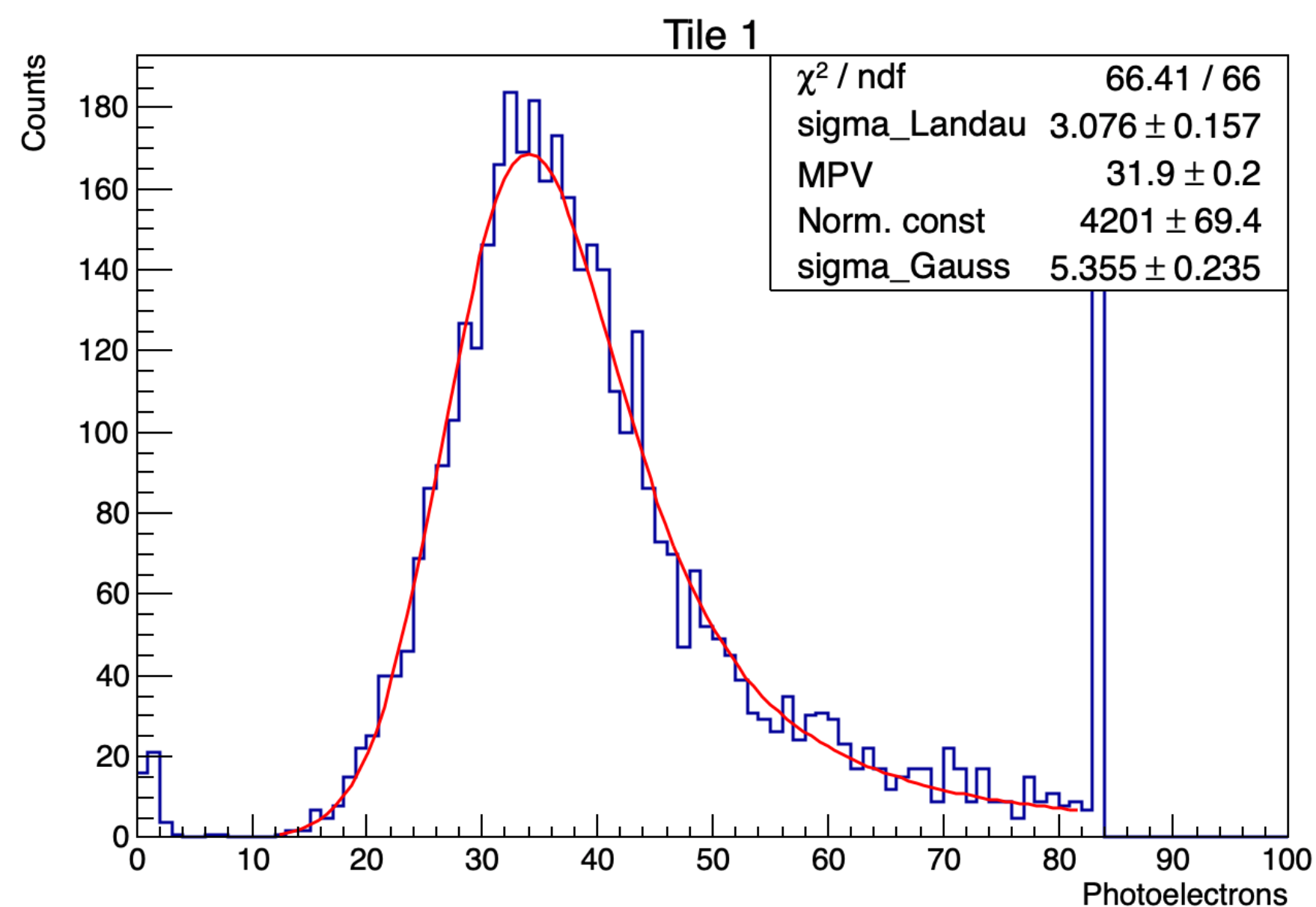
Печатная плата с SiPM
Hamamatsu



Модель усеченного
сектора с
нумерацией тайлов

Отклик тайлов сектора ВВС

- При обработке данных учитывались только события, зарегистрированные в соответствующих тайлах всех трёх секторов;
- Для всех тайлов наиболее вероятный отклик превышает уровень шумов и составляет более 30 фотоэлектронов



Спектр энергетических потерь мюонов для первого тайла сектора

Результаты для второго (центрального сектора)

Тайл	MPV, фэ
0	34
1	32
2	32
3	30
4	35
5	34
6	34
7	33

1. Для каждого из тайлов телескопа получена величина наиболее вероятного отклика и определён разброс этой величины при регистрации космических мюонов. Средний наиболее вероятный отклик тайлов составил 31 фэ, разброс составил 8 фэ.
2. Средняя эффективность телескопа по регистрации мюонов составила $(99^{+1}_{-3})\%$.
3. Получены распределения сигналов детектора при регистрации мюонов в режиме Time-over-Threshold. Функция аппроксимации была модифицирована с поправкой на нелинейность шкалы ToT. Для восьми каналов DT5202 в режиме ToT проведена калибровка одного канала кодировщика в фотоэлектроны.
4. При использовании SiPM Hamamatsu средний отклик при регистрации мюонов на 23% больше по сравнению с SiPM Onsemi. Добавление тракта передачи фотонов в виде чистых оптических волокон привело к уменьшению отклика на 51% для измерений с SiPM Onsemi.
5. Исследован отклик тайлов прототипа сектора ВВС в режиме телескопа. Для каждого тайла наиболее вероятное значение отклика детектора при регистрации мюонов превышает 30 фэ.

Спасибо за внимание



Back up



Параметры волокна OSL8

- Диаметр волокна 1 мм;
- Люминофор OSL8, пик высвечивания 501 нм, пик поглощения 401 нм;
- Цвет излучения зеленый, смещение спектра из синего в зеленый;
- Длина затухания излучения не менее 2.0 метра;
- Минимальный диаметр сгиба - 30 мм при толщине водокна 1 мм;
- Отражающая оболочка ПММА или фторполимер.

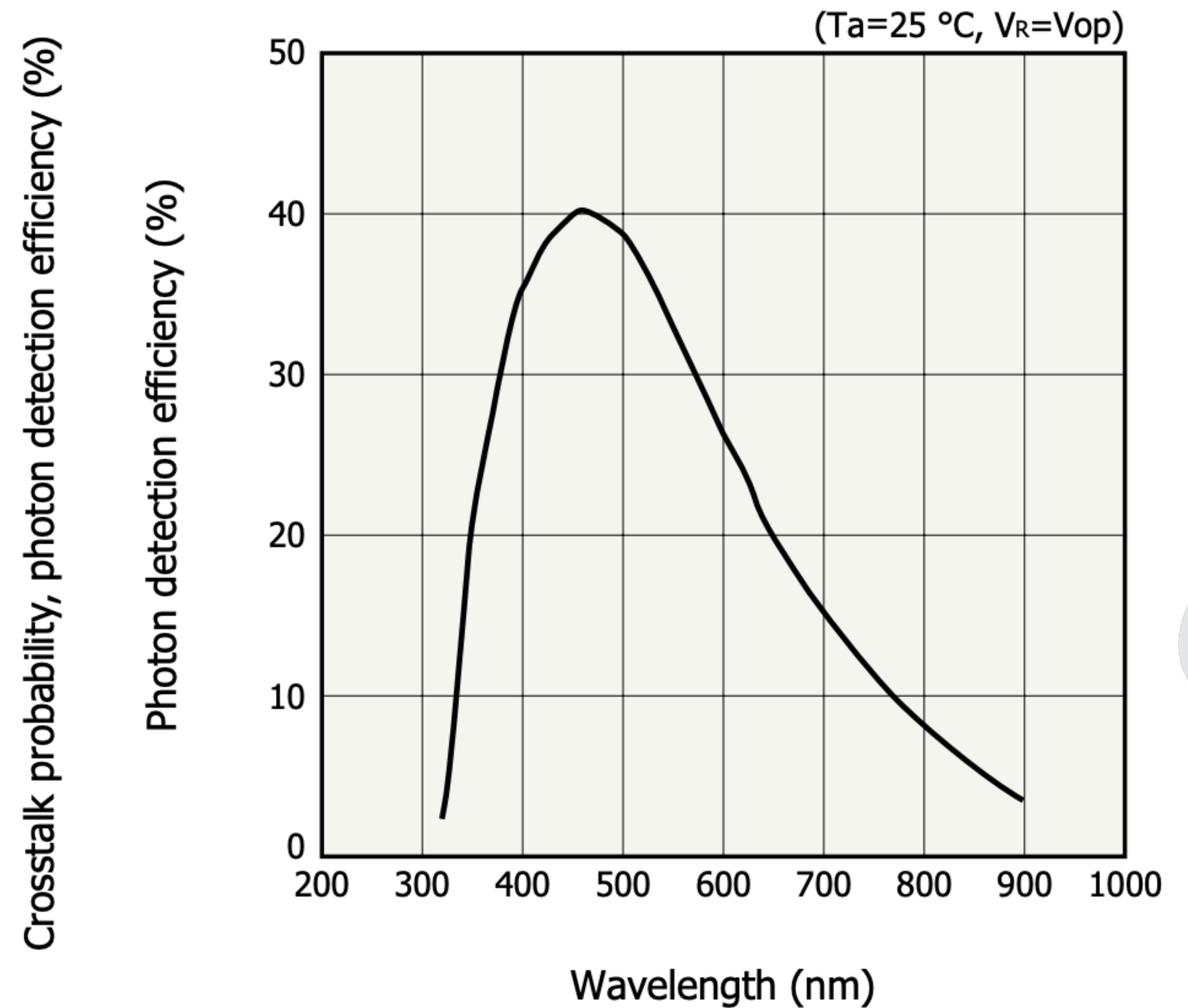
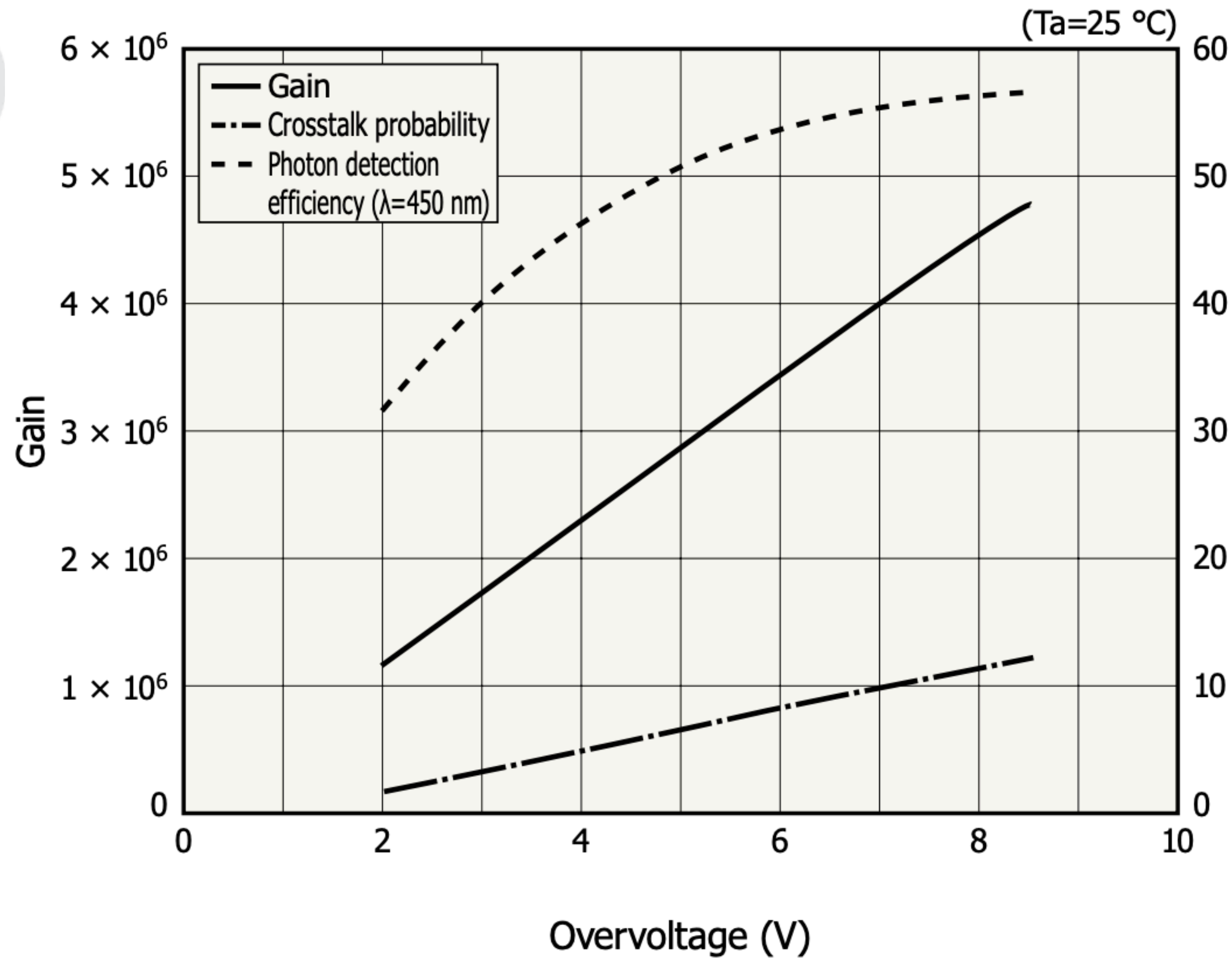
Характеристики сцинтиллятора

Состав сцинтиллятора:

- polystyrene Styrolution 124N — 98,0 - 98,5%;
- p-Terphenyl (CAS 92-94-4) — 1,5 - 2,0%;
- POPOP (CAS 1806-34-4) — 0,01-0,04%.

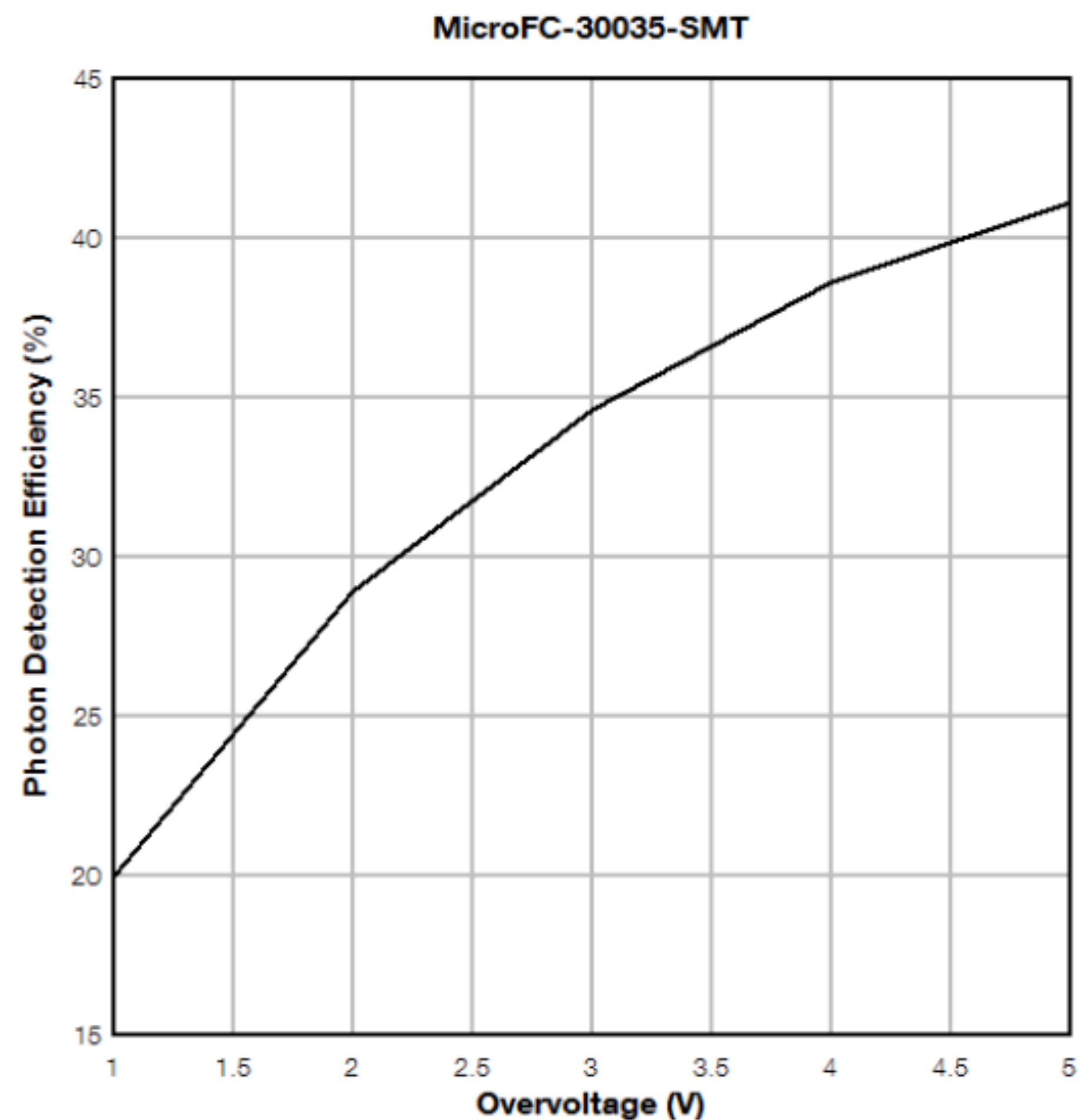
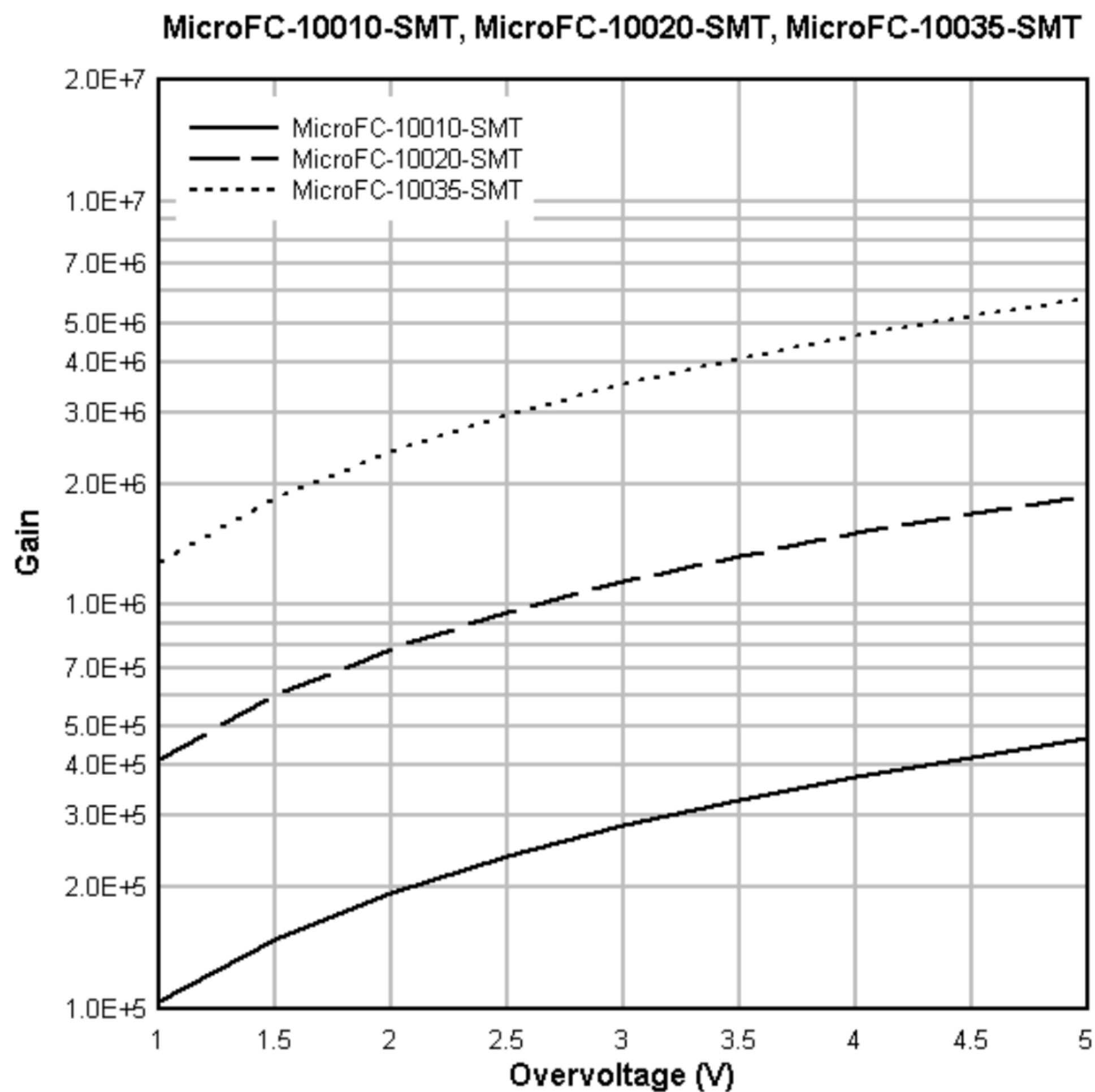
Световыход, % антрацена	Время затухания, нс	Длина волны макс. излучения, нм	Длина ослабления света, см	Основные применения
60 - 70	2,5	430	>200	α, β, γ , быстрые нейтроны

SiPM Hamamatsu S13361-3050AE-08



SiPM Onsemi microfc 10035

Параметры SiPM Onsemi microfc 10035:



Для microfc 10035 пик в 31%

SiPM Hamamatsu S14160-1315PS

