



Разработка оптических модулей внешнего детектора Гипер-Камиоканде

Н. Шварев, Г. Ерофеев, А. Измайлов, Ю. Куденко, О. Минеев,
Я. Строке, С. Федотов, А. Хотянцев

Институт ядерных исследований РАН

РНФ №24-12-00271



Эксперимент Гипер-Камиоканде

Основные задачи Гипер-Камиоканде:

1. Поиск различия между осцилляциями нейтрино и антинейтрино (нарушение CP симметрии).
2. Регистрация распада протона.
3. Наблюдение за космическими источниками нейтрино.

Внутренний детектор: около 20000 50 см ФЭУ + 800 кластеров из 19 8-см ФЭУ.

Внешний детектор: Выделено 3600 каналов.

Мало для такого объёма: необходимо увеличить эффективность регистрации внешнего детектора.

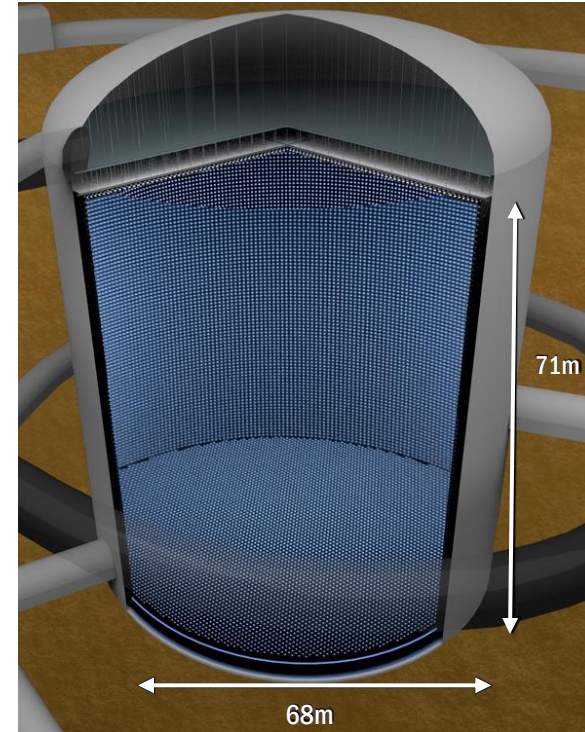
Решение: использовать оптические модули.



50-см B&L ФЭУ



Кластер ФЭУ



Размер 71x68 метров.

Объём мишени: 258000 тонн чистой воды.

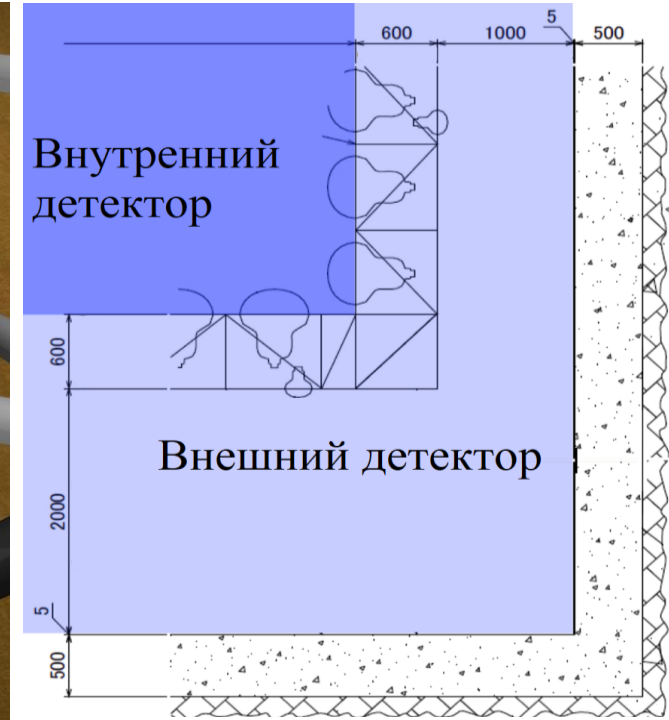
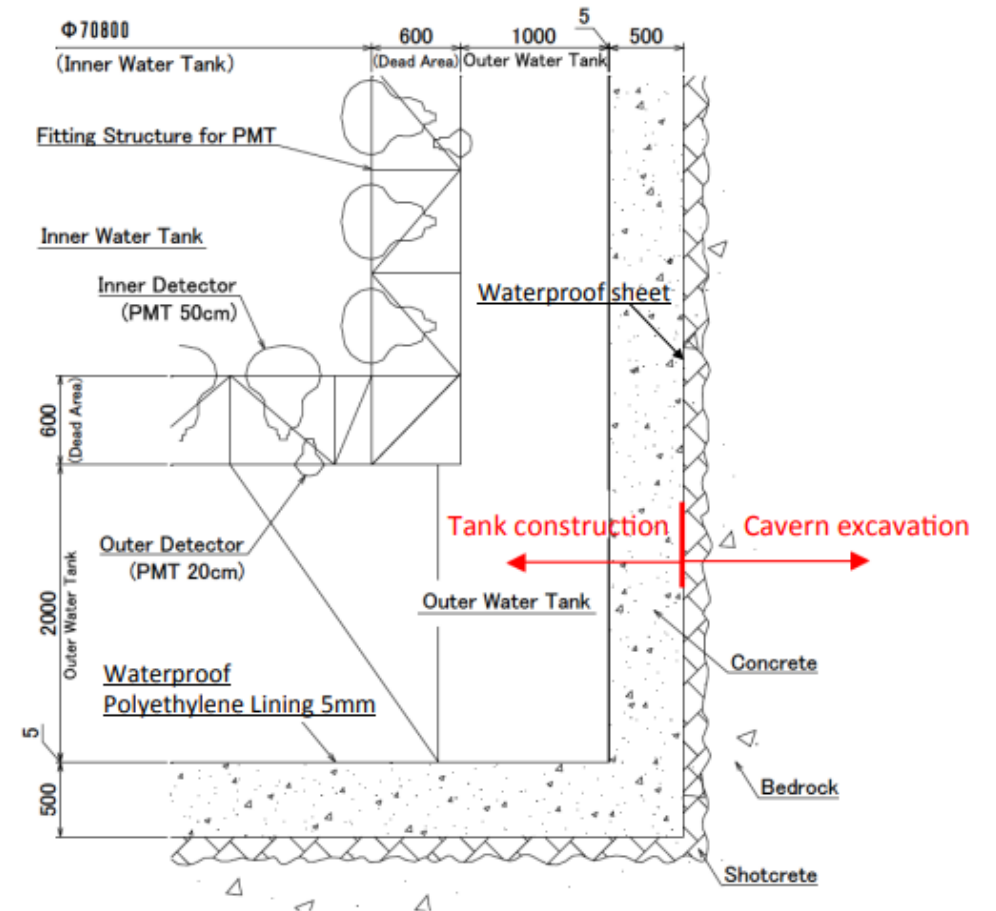


Схема расположения внутреннего и внешнего детекторов.



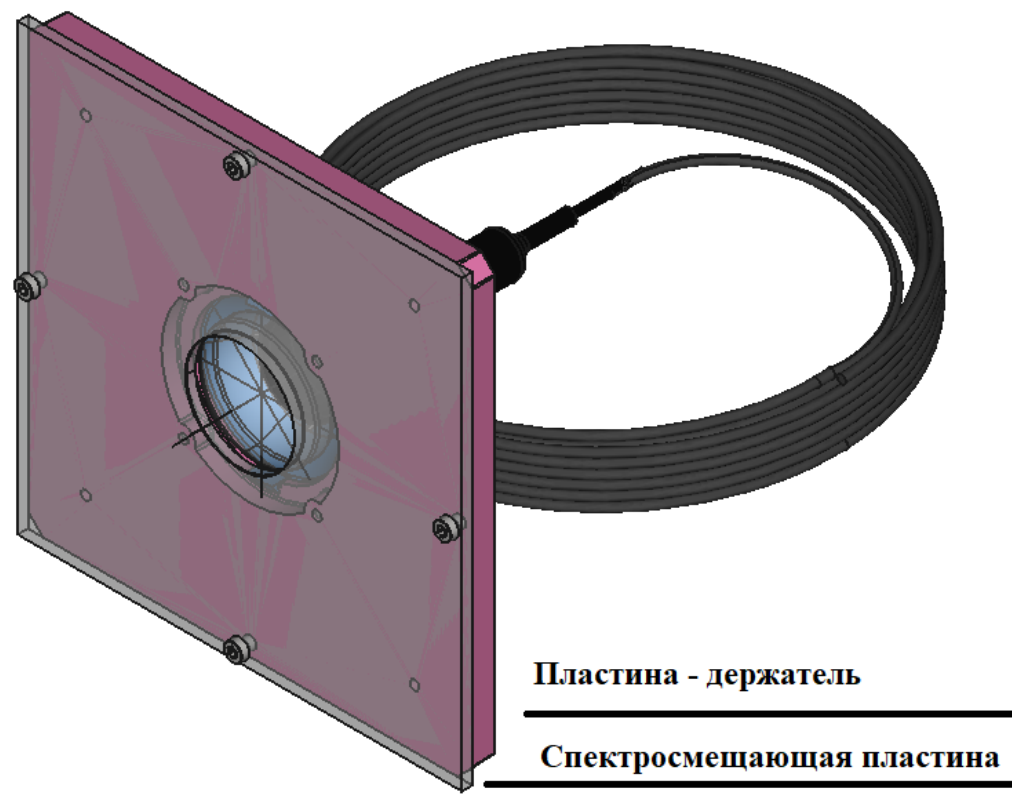
Внешний детектор Гипер-Камиоканде

- Толщина просматриваемой области 1-2 м.
- Количество оптических модулей: 3600
- Используется для определения и вычитания внешнего фона (космические мюоны).
- Определяет, произошло ли событие полностью во внутреннем детекторе.

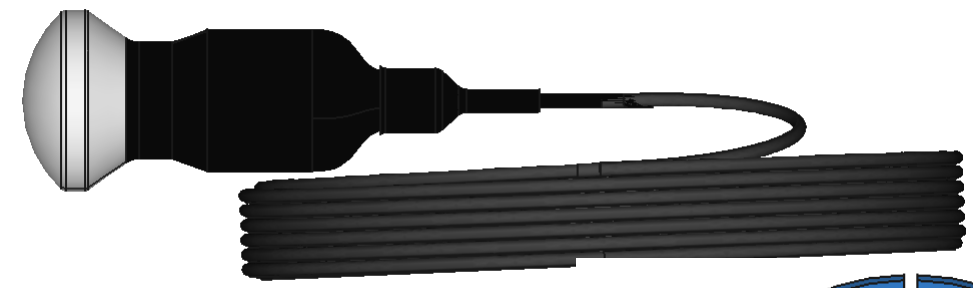




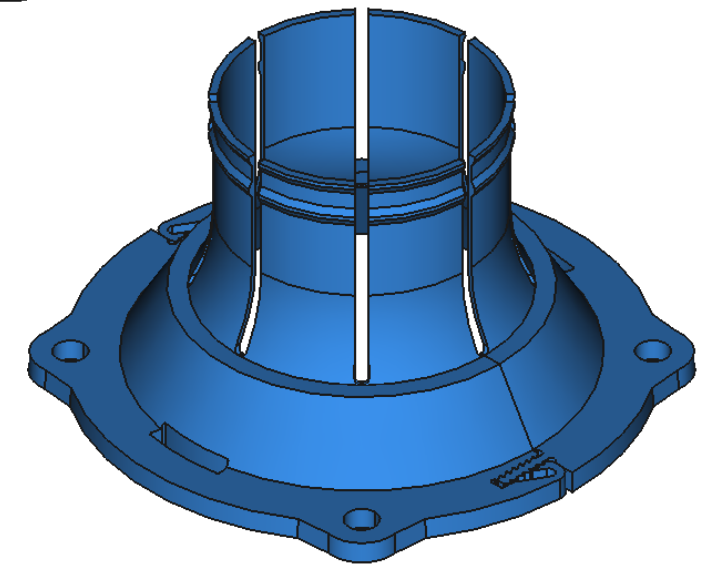
Оптический модуль внешнего детектора.



Пластина - держатель
Спектросмещающая пластина



ФЭУ Hamamatsu R14374 с кабелем

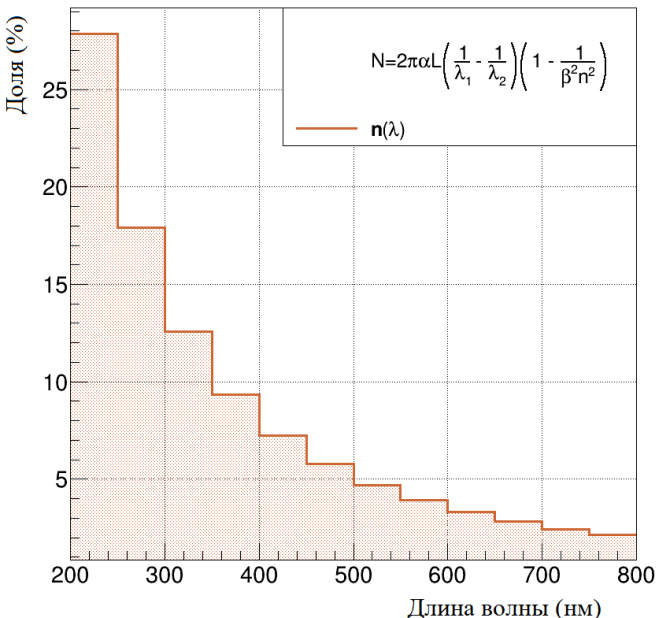


Держатель ФЭУ

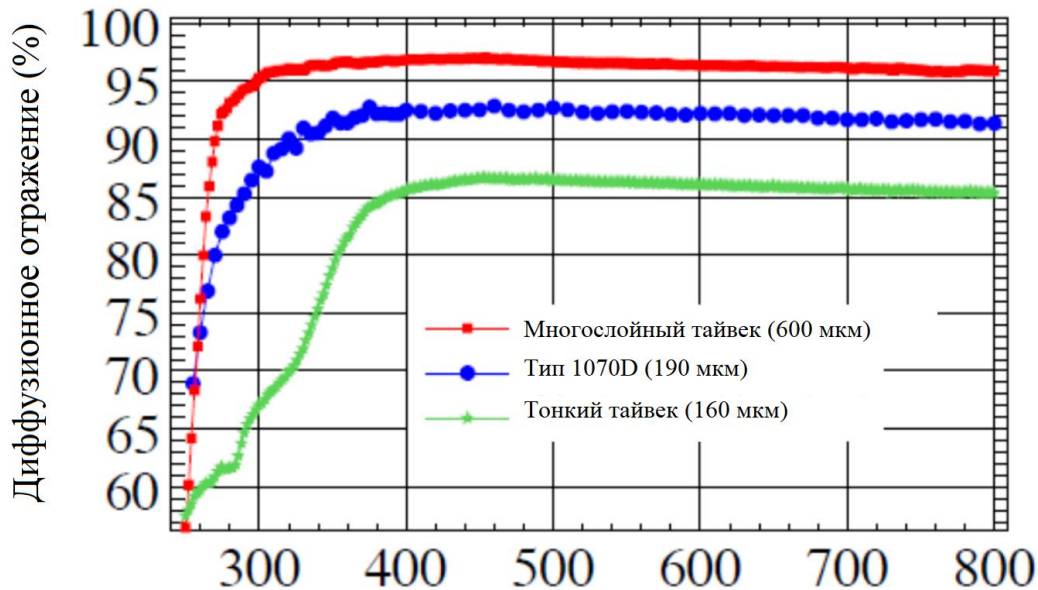


Регистрируемое черенковское излучение

Спектр черенковского излучения (шаг 50 нм)



Спектр излучения заряженной релятивистской частицы в воде.



Из-за отражения от тайвека (облицовочный материал стенки детектора) спектр достигающих модуля фотонов смещается в видимую область.

При выборе спектросмещающей добавки необходимо учитывать, что большинство фотонов, достигающих оптического модуля, будут иметь длину волны от 260 нм.

| Активное вещество | Пик поглощения (нм) | Пик излучения (нм) |
|-------------------|---------------------|--------------------|
| РОРОР | 356 | 407 |
| РРО | 303 | 355 |
| ВВQ | 382 | 477 |
| Bis-MSB | 347 | 423 |

Характеристики спектросмещающих добавок.



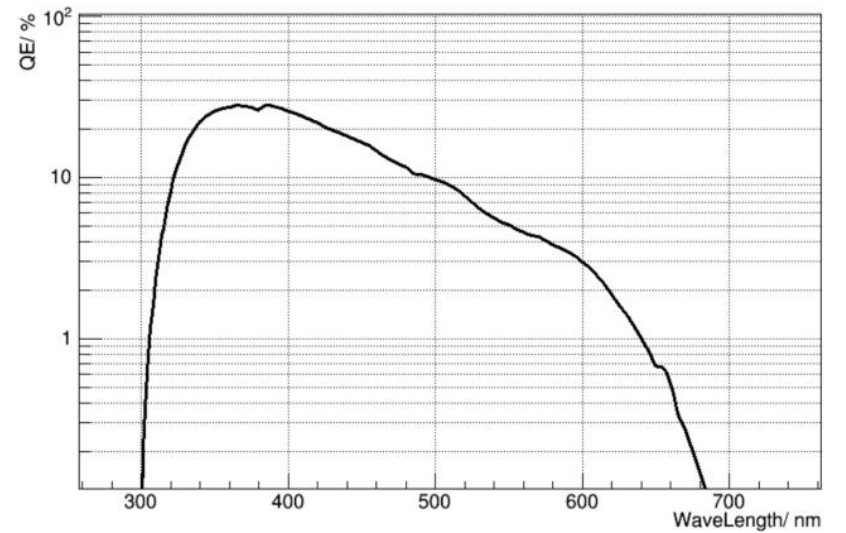
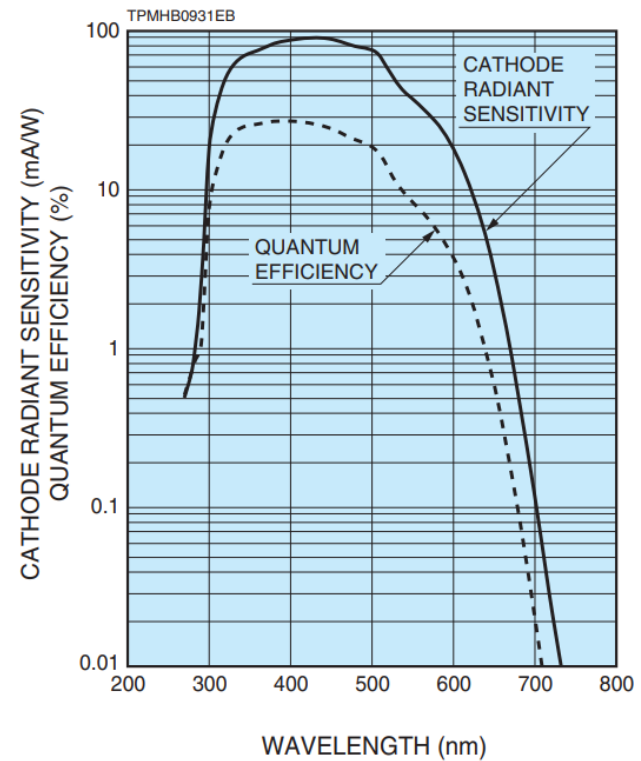
Предлагаемые ФЭУ

Предлагаемые к использованию варианты ФЭУ:

Hamamatsu R14374
NNVT 2031

Необходимо:

1. Подобрать ФЭУ с максимально возможной чувствительностью в области регистрируемого сигнала.
2. Определить особенности посадки ФЭУ в пластину.



Графики квантовой эффективности катода ФЭУ Hamamatsu R14374 (слева) и NNVT 2031 (справа).



Исследование вариантов ФЭУ

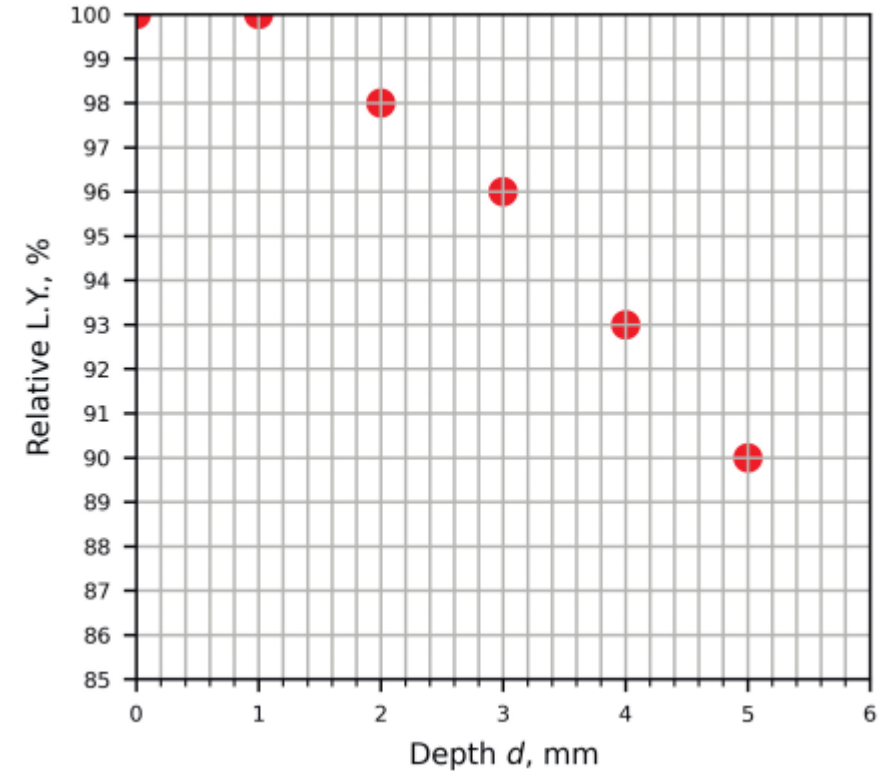
ФЭУ исследовались в *PMT/WLS Plate Optical Modules for Cherenkov Detectors*
October 2025 Physics of Atomic Nuclei
88(3):482-488
DOI:10.1134/S1063778825600745

Ключевые результаты:

1. Катод ФЭУ обладает радиальной чувствительностью
2. Зазор между пластиной и ФЭУ должен отсутствовать или составлять 1 мм.



Вставленный в центральное отверстие пластины ФЭУ



Зависимость световыхода ФЭУ (Relative L.Y.) от величины зазора (Depth)



Спектросмещающая пластина

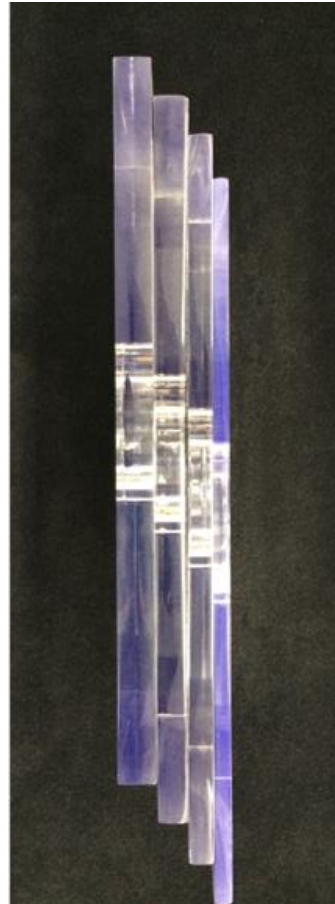
Пластины изготавливаются из полиметилметакрилата (оргстекло)

Выполняемая пластиной задача:

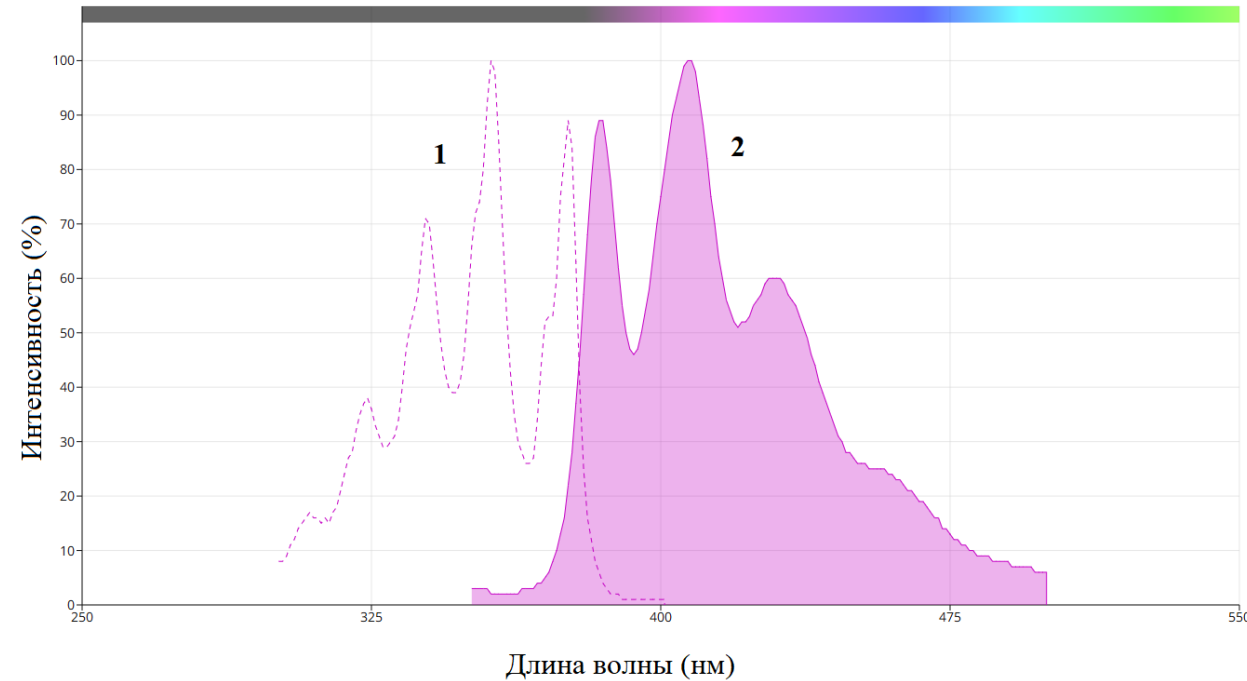
- Увеличение площади светосбора.
- Переизлучение ультрафиолета в видимую область, которая совпадает со спектральной чувствительностью ФЭУ.

Необходимо:

1. Подобрать спектросмещающее вещество для пластины.
2. Подобрать концентрацию спектросмещающего вещества.
3. Определить необходимость наличия сразу нескольких компонент в добавках.



Пластины толщинами 6, 10, 13, 16 мм



Спектр поглощения (1) и спектр излучения (2) добавки ROROR.



Покрытие периметра пластины

В задачи отражателя входит возвращение в пластину светового излучения, которое было направлено в сторону от ФЭУ. В качестве образцов были выбраны следующие материалы: тайвек (диффузный отражатель), алюминизированный майлар (зеркальный отражатель) и полимерная многослойная плёнка ЗМ DF2000МА (зеркальный отражатель)

Тестировались следующие конфигурации с пластиной ROPOR 200:

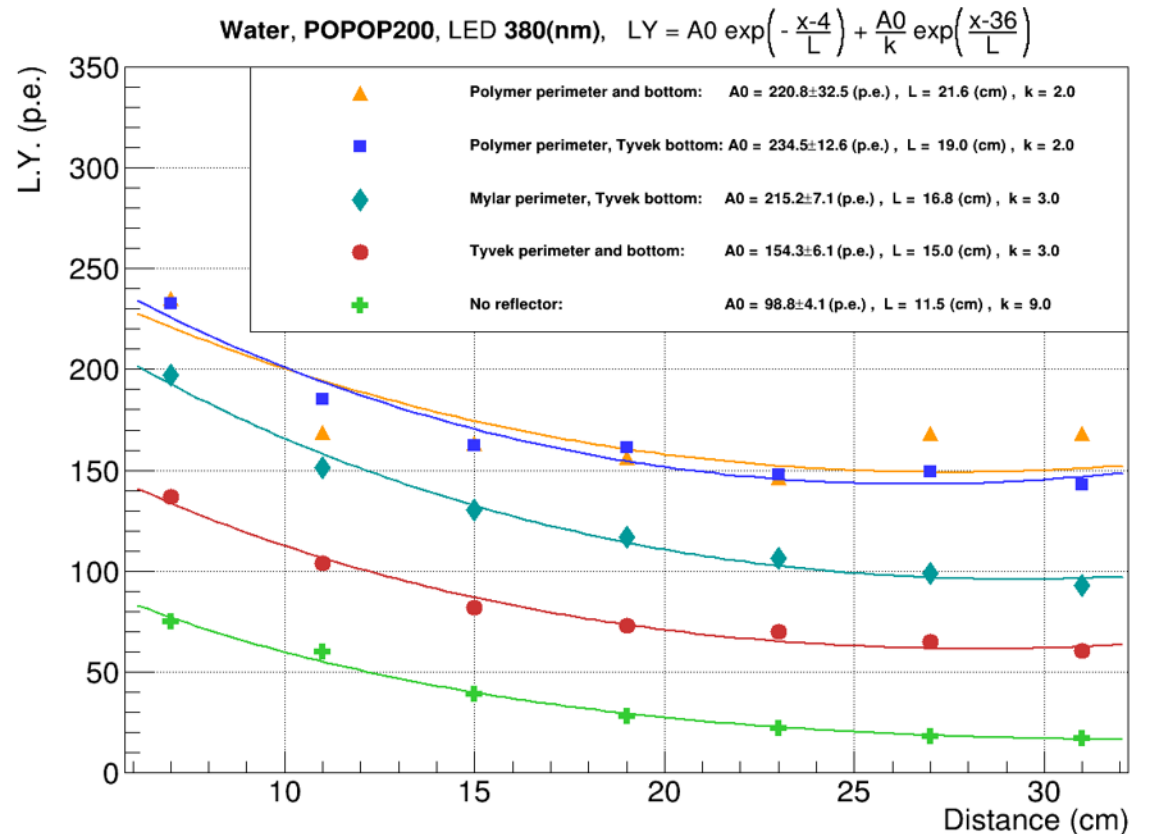
А. Пластина без отражателя.

Б. Тайвек, наклеенный по периметру и на нижнюю плоскость пластины.

В. Майлар, наклеенный по периметру пластины и с тайвеком в нижней плоскости пластины.

Г. Полимерная пленка, наклеенная по периметру пластины и с тайвеком в нижней плоскости.

Д. Полимерная плёнка по периметру и в нижней плоскости пластины.



Результаты тестирования.



Тестирование с использованием светодиодов и ФЭУ

Светодиод менял положение 4 раза. Расстояние от центра пластины: 12 см.

Статистика: 6000 событий. Каждая пластина тестировалась дважды.

Тестируемые образцы: по три пластины РОРОР 50/РРО 3000 и РОРОР 50, две пластины РОРОР 800, по одной пластине РОРОР 100, РОРОР 200, РОРОР400.

| Длина волны светодиода | 265 нм. | 315 нм. | 380 нм. | 405 нм. |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| РОРОР 50/РРО 3000 | 100% | 100% | 100% | 100% |
| РОРОР 50 | 13% | 133% | 124% | 118% |
| РОРОР 100 | 33% | 130% | 105% | 142% |
| РОРОР 200 | 46% | 124% | 100% | 160% |
| РОРОР 400 | 84% | 154% | 117% | 230% |
| РОРОР 800 | 100% | 153% | 124% | 261% |

Результат вычислялся как среднее по всем циклам измерения.

Результат нормирован на значение световыхода двухкомпонентной пластины.

Позиции светодиода.

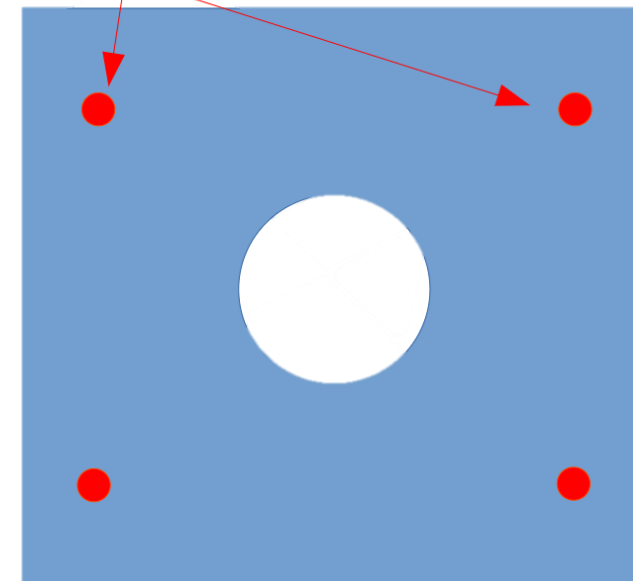


Схема расположения светодиодов.



Тест на Infant-K

Infant-K является водным черенковским детектором. Регистрируемое излучение: отражённое от тайвека черенковское излучение, порождённое космическими мюонами. События отбираются при помощи двух пластин-триггеров.

Параметры Infant-K:
Нержавеющая сталь.
Объём 110 литров.
Размеры: 68x33x58 см³

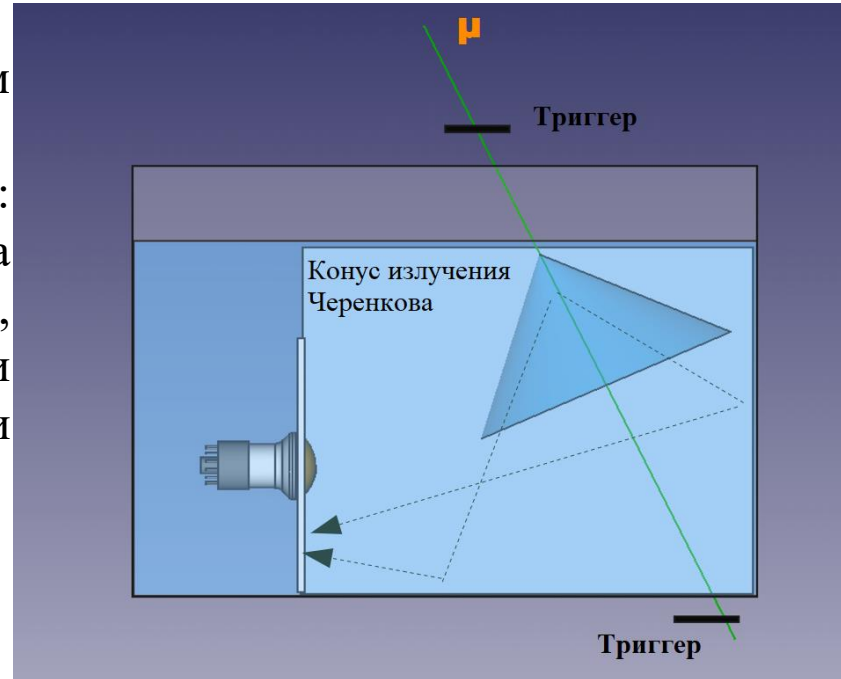
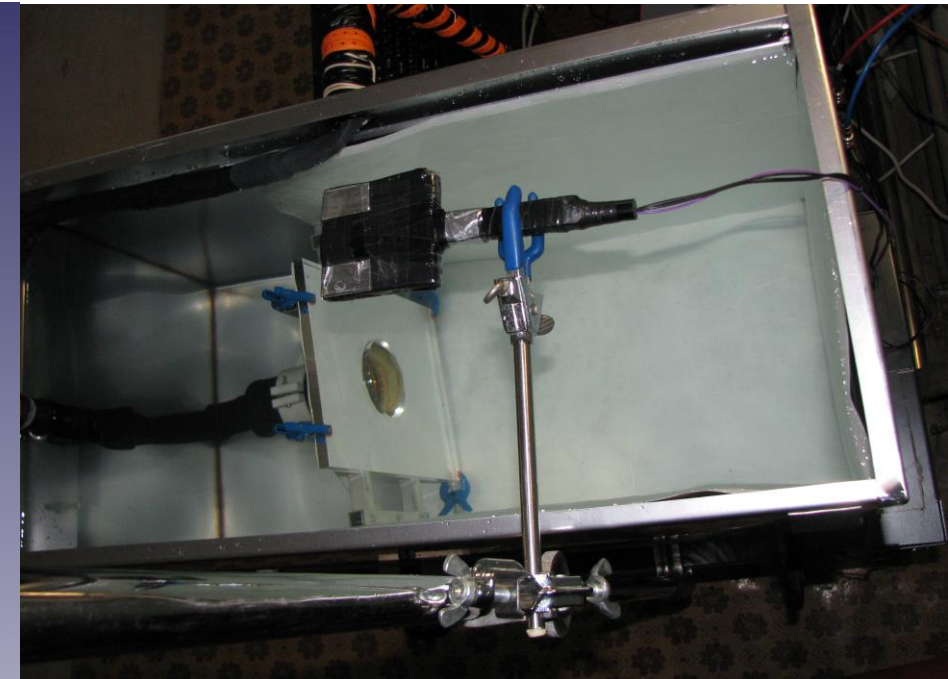


Схема отбора событий



Детектор Infant-K. Вид сверху



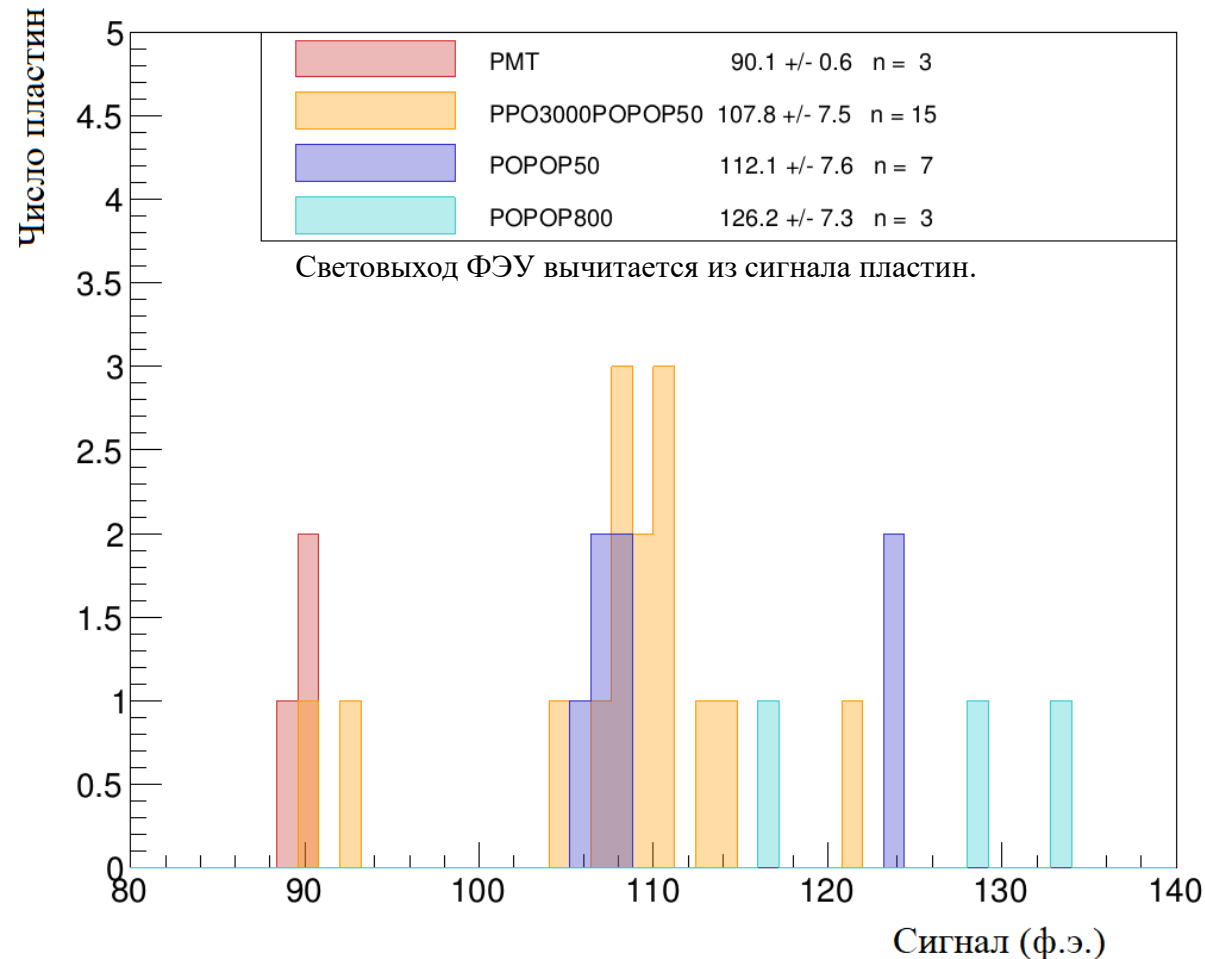
Результаты тестирования на установке Infant-K

Были протестированы следующие образцы:

- РОРОР 50/РРО 3000: 15 пластин с добавкой РОРОР 50 мг/л и РРО 3000 мг/л.
- РОРОР 50: 7 пластин с добавкой РОРОР 50 мг/л .
- РОРОР 800: 3 пластины с добавкой РОРОР 800 мг/л.
- Время экспозиции: по 2 дня на пластину.

Результат: средний световыход по пластинам:

РОРОР 50/РРО 3000 : 108 р.е.
РОРОР 50 : 112 р.е.
РОРОР 800 : 126 р.е.





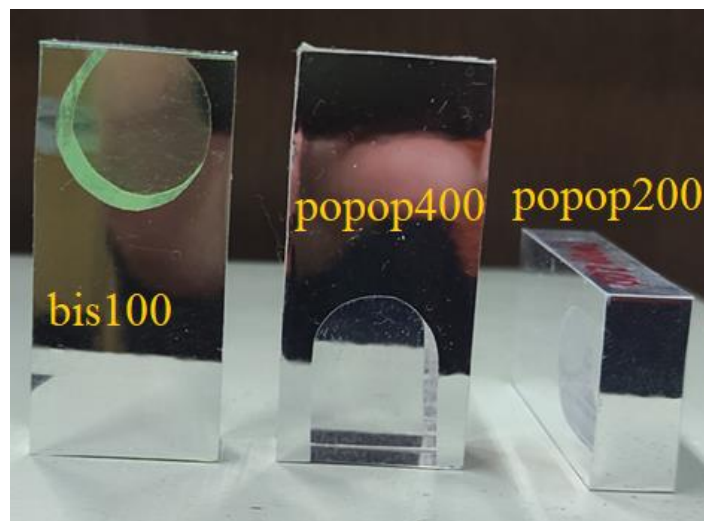
Тестирование с использованием светодиодов и спектрометра

- Измерялись образцы пластин, длиной 3 см. Применяемое оборудование: светодиод, с пиком излучения 380 нм. Спектрометр ThorLabs CC S200.

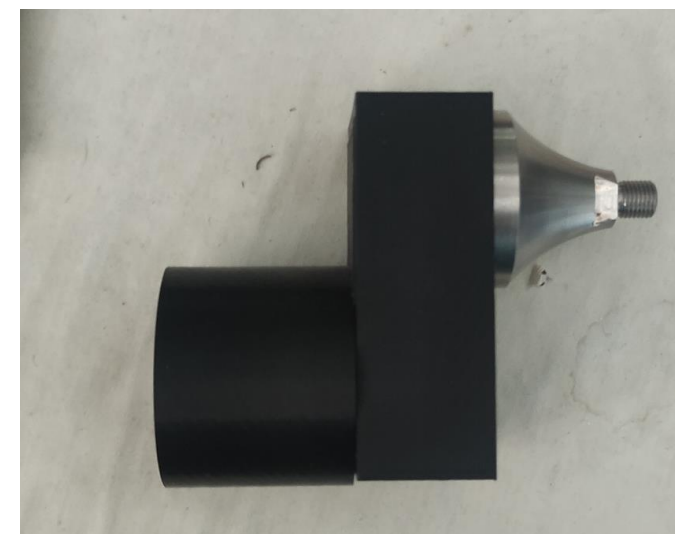
| | R14374 |
|------------------------|-------------|
| BBQ 100 | 68,9% |
| BIS 100 | 94,9% |
| EJ 286 | 67,7% |
| POPOP 200 | 92,8% |
| POPOP 400 | 100% |
| POPOP 800/PRO 500 | 94,7% |
| POPOP 50/PRO 3000 | 67,9% |
| POPOP 100/PRO 10000 | 66,6% |

Время экспозиции: 52 с. Количество измерений каждого образца: 10 раз.
Вычислялись средние значения.

Итоговый спектр перемножался с квантовой эффективностью ФЭУ
Hamamatsu R14374



Пример образцов.



Шаблон для установки
образца.

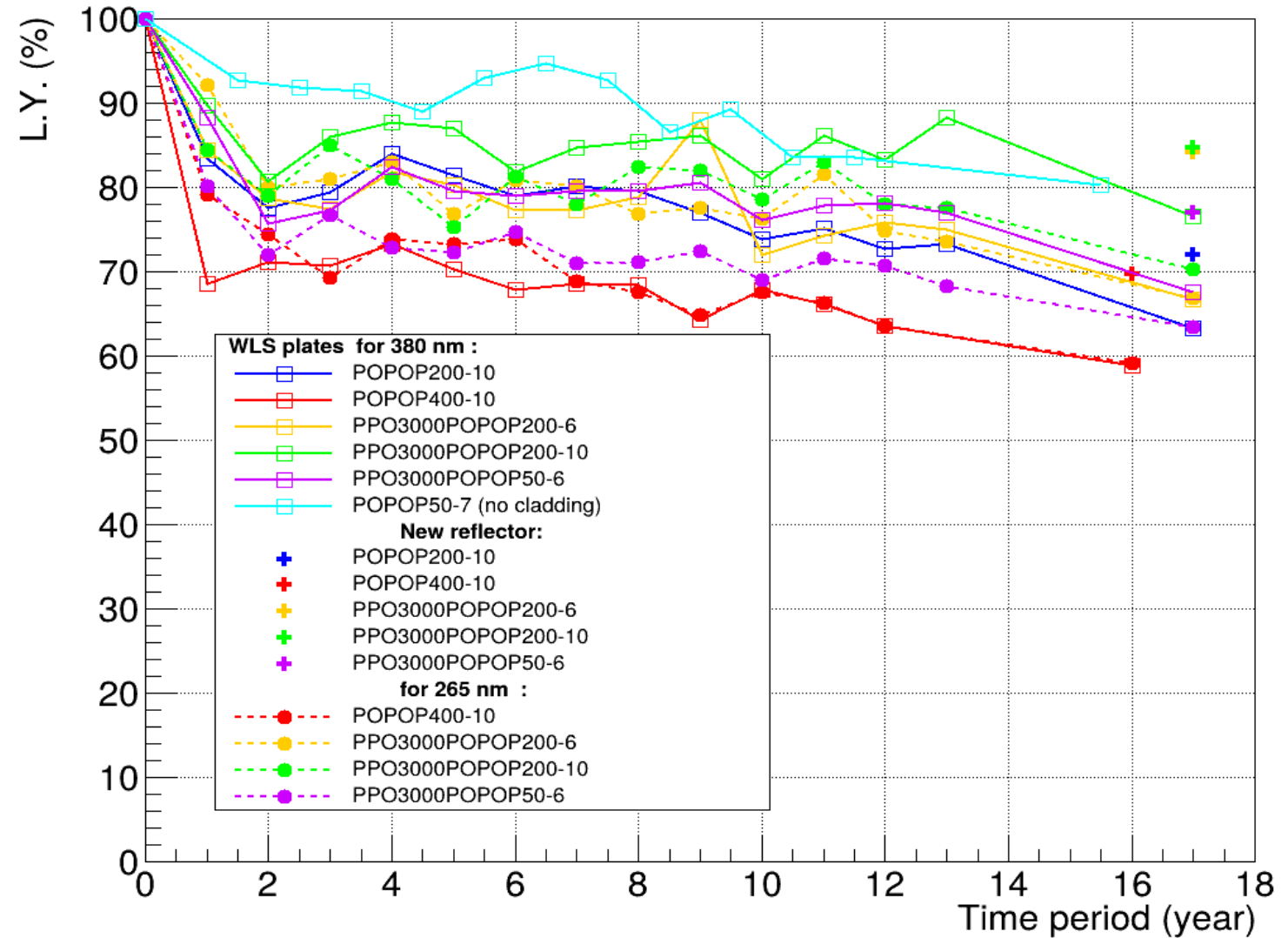


Ускоренное старение пластин

Для проверки на долговечность пластины с светоотражающим материалом помещались в контейнер с водой и нагревались в печи до +59 °С. (ускоренное в 24 раза старение)

Каждые две недели образцы измерялись с помощью светодиодов и ФЭУ. В качестве опорного значения световыхода брался световыход пластины, не подвергавшейся ускоренному устареванию.

В последней точке (17 лет) после измерения светоотражающий материал был заменён на новый, и пластины были протестированы ещё раз.





Ускоренное старение пластин

В течении первых четырёх недель было обнаружено резкое падение световыхода, связанное с нарушением оптического контакта светоотражающего материала и пластины из-за нагрева.

| Оразец | РОРОР200 10 мм | РОРОР400 10 мм | РОРОР200/ РРОЗ000 6 мм | РОРОР200/ РРОЗ000 10 мм | РОРОР50/ РРОЗ000 6 мм | РОРОР50 7 мм (без отражателя) | Среднее значение |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------|
| С учётом первых 3-х точек | 1.65 | 1.69 | 0.94 | 0.90 | 1.36 | 1.27 | 1.33 |
| Без учёта первых 3-х точек | 0.95 | 1.24 | 0.8 | 1.27 | 0.54 | 0.85 | 0.78 |

В таблице показан результат расчёта среднегодового падения световыхода пластин в %. Нижняя строка исключает из расчётов температурный шок отражателя в первый месяц нагрева.

Согласно результатам, отсутствует явная зависимость скорости деградации от толщины образцов или наличия двухкомпонентной добавки в образце.



Исследование темнового шума оптического модуля

Внешний детектор выполняет функции вето-системы, поэтому для достижения максимальной степени подавления фоновых событий необходимо знать характеристики темнового шума и мёртвое время оптического модуля.

Тестирование проводилось в контролируемых температурных условиях при +13°C и пороге дискриминатора 0.25-0.3 ф.э. Тестировалась платина РОРОР 50 с отражателем по периметру и с ФЭУ Hamamatsu R14374.

| Модуль | ФЭУ | Пластина без спектросмещающей добавки | РОРОР 800 | РОРОР 400 | РОРОР 200 | РОРОР 50 | РОРОР 50/ПРО3000 |
|------------------|----------|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|------------------|
| Темновой шум, Гц | ~ 200 | ~ 240 | ~ 800 | ~ 490 | ~ 390 | ~ 300 | ~ 680 |



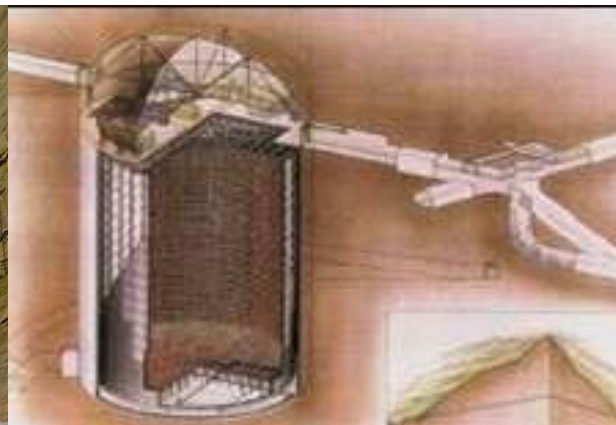
Заключение.

- Результаты измерений спектросмещающих показали, что наиболее подходящей спектросмещающей добавкой является РОРОР.
- Применение полимерного отражателя 3M DF2000MA в торцах пластины позволяет увеличить световыход более чем в 2 раза.
- Падение световыхода в зависимости от времени эксплуатации при пересчёте на температуру 13 °С составляет около 1%.
- Измерения показали что пластины могут являться источником темнового шума на уровне 400 Гц.

Backup

Эксперимент T2K (Tokai to Kamioka).

Элементы эксперимента:

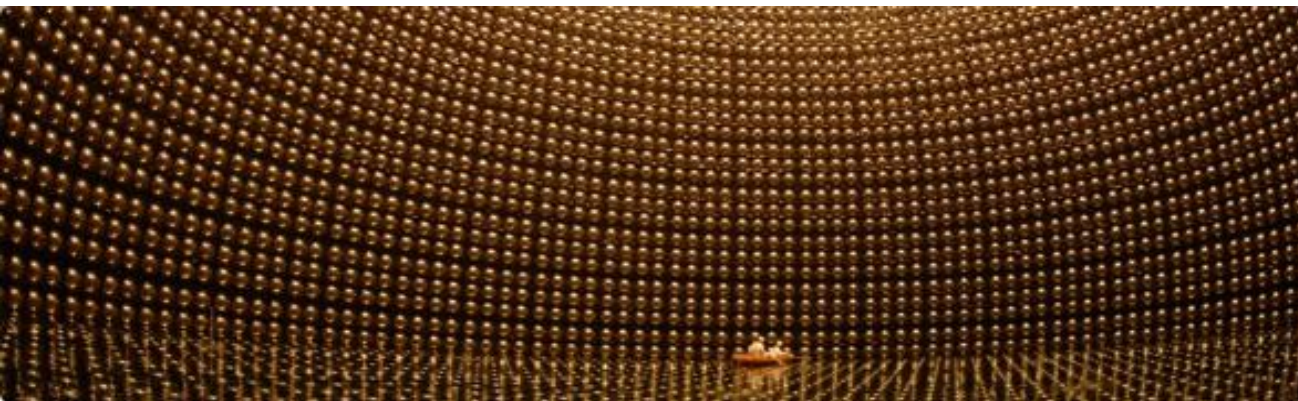


Источник нейтрино в J-PARC
(*Japan Proton Accelerator
Research Complex*)

Ближний детектор ND-280
Измеряет поток, содержание
типов нейтрино и
энергетический спектр
нейтринного пучка и помогает
изучать взаимодействия
нейтрино с ядром.

Дальний детектор
Super-Kamiokande.

Super-Kamiokande.

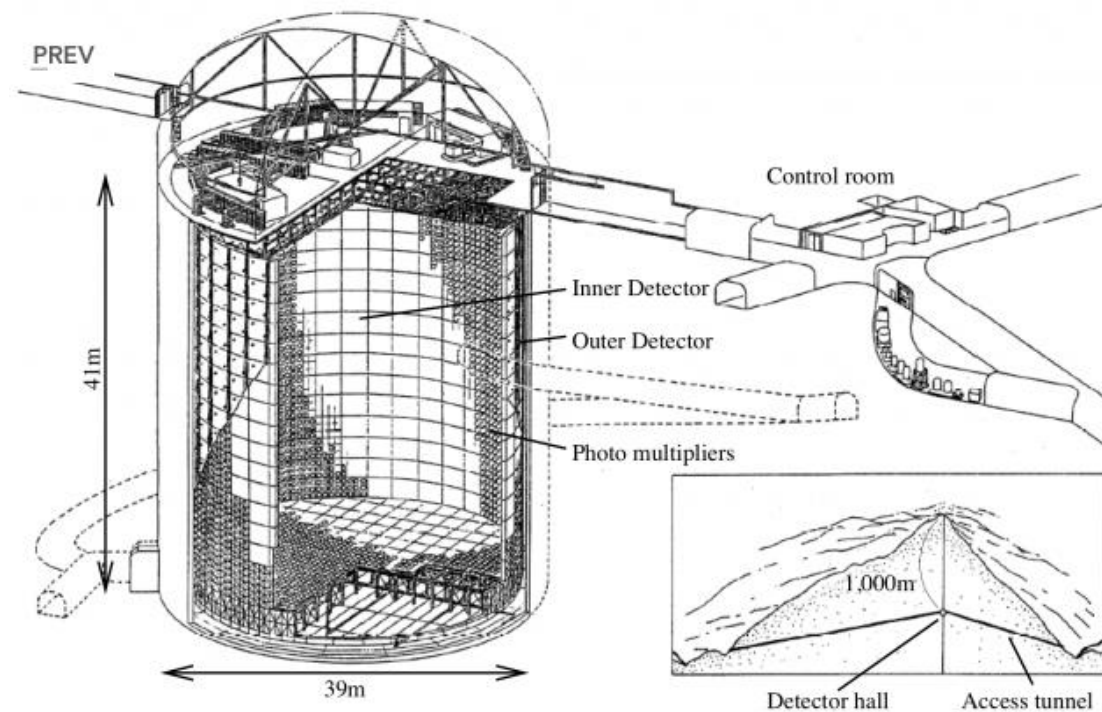


Супер-Камиоканде является дальним детектором эксперимента Т2К.

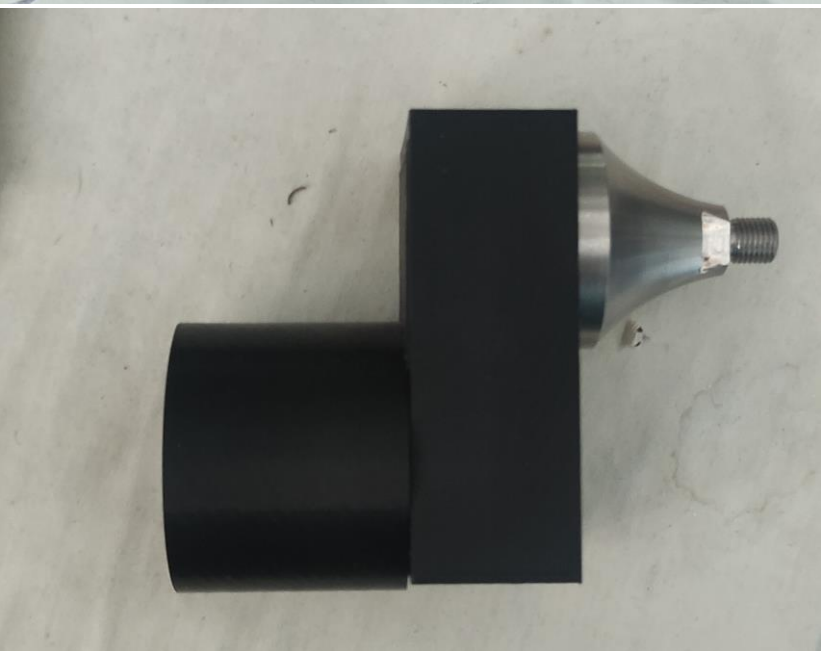
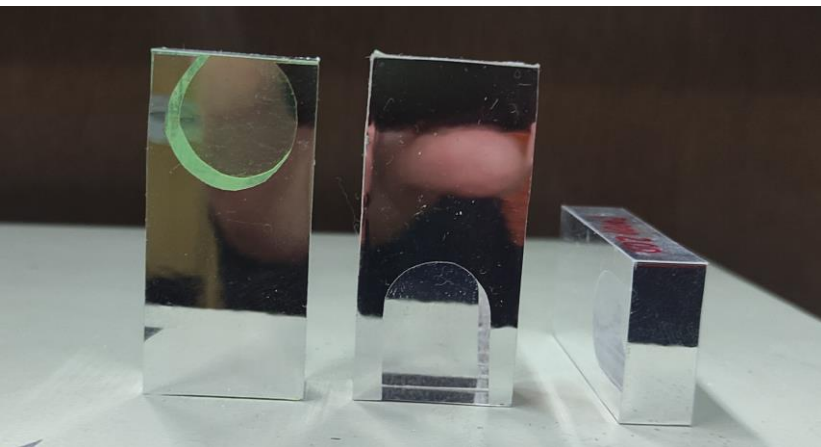
Размер 41x39 метров.

Объём мишени: 50000 тонн чистой воды.

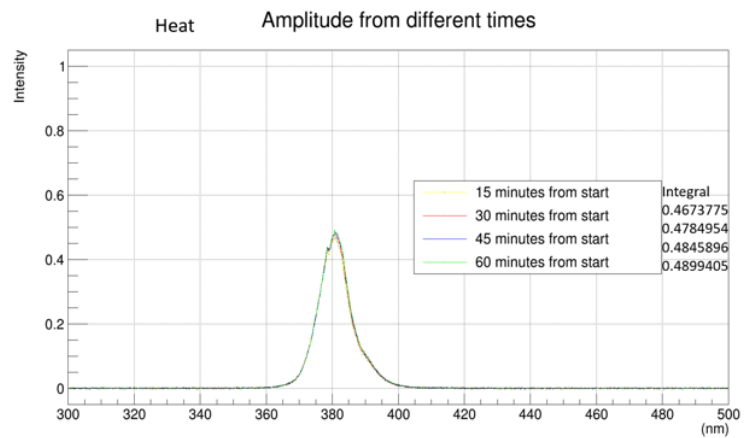
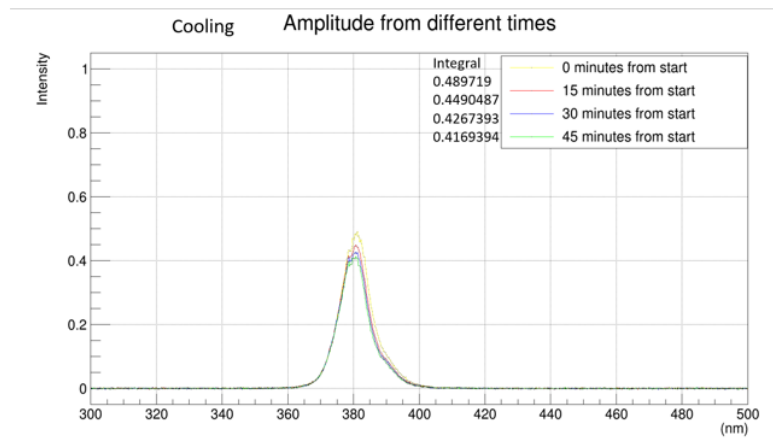
Количество ФЭУ: 11 146



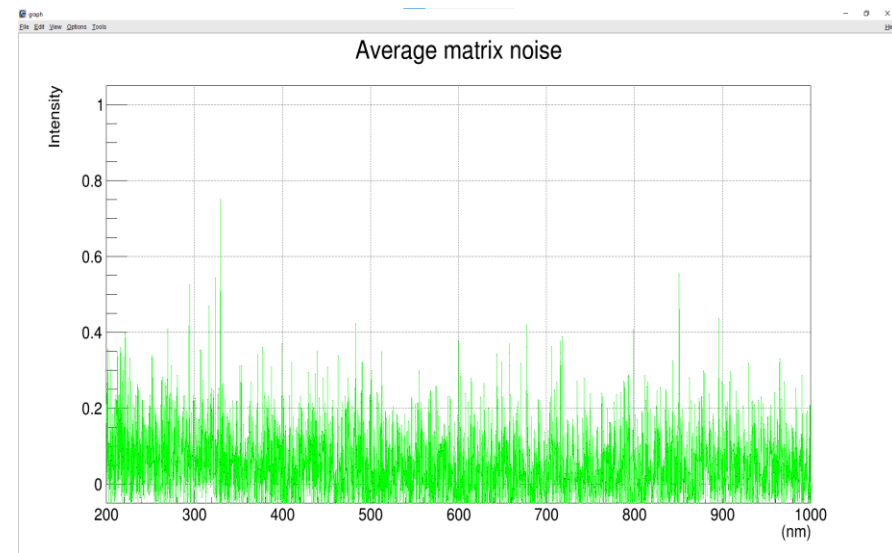
Оптическое исследование



Спектр источника 380 нм. в зависимости от времени работы



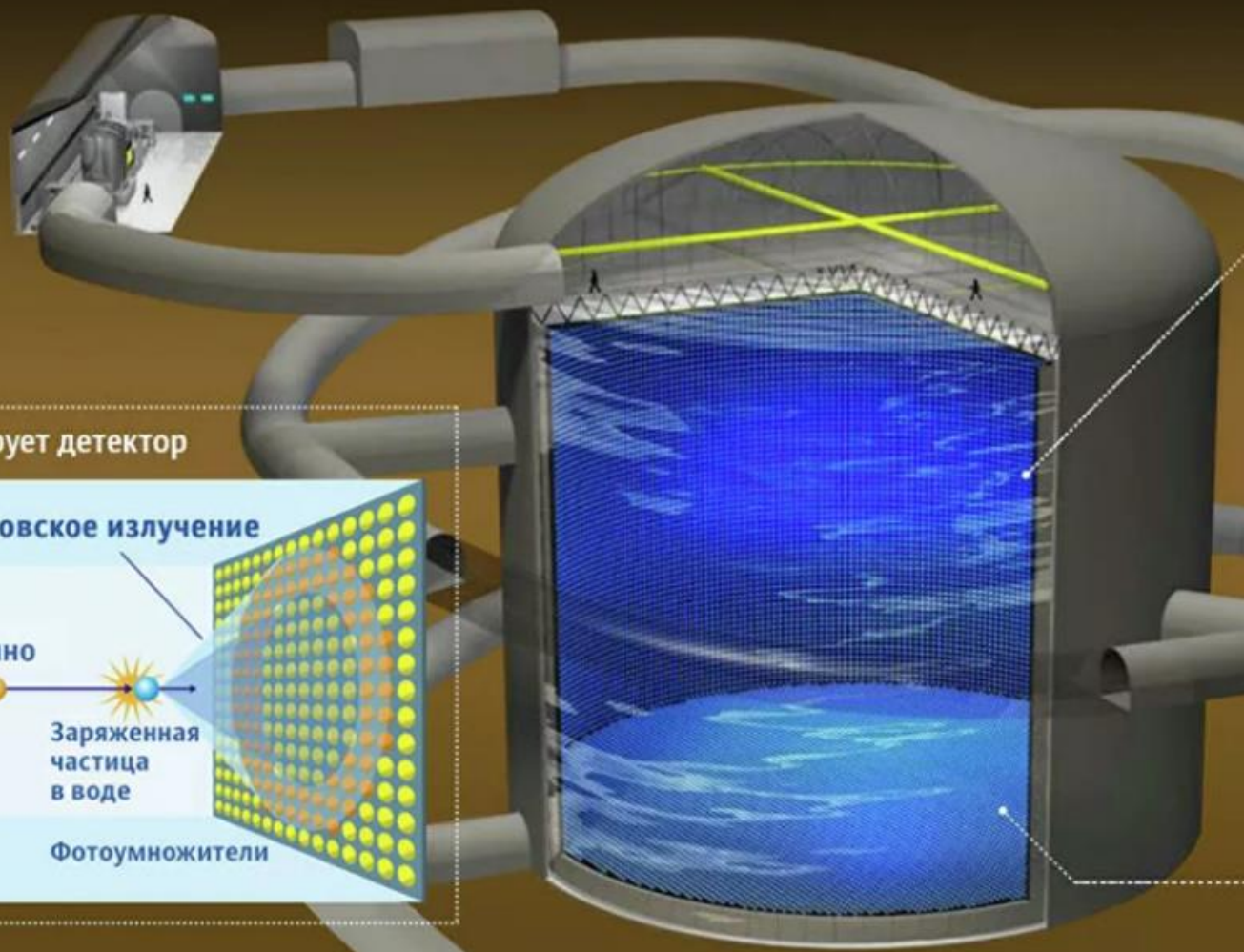
Спектрометр ThorLabs CC S200



Принцип регистрации в водном Черенковском детекторе

Гипер-Камиоканде

Проект по изучению осцилляций нейтрино и распада протона



Что фиксирует детектор

Черенковское излучение

Нейтрино

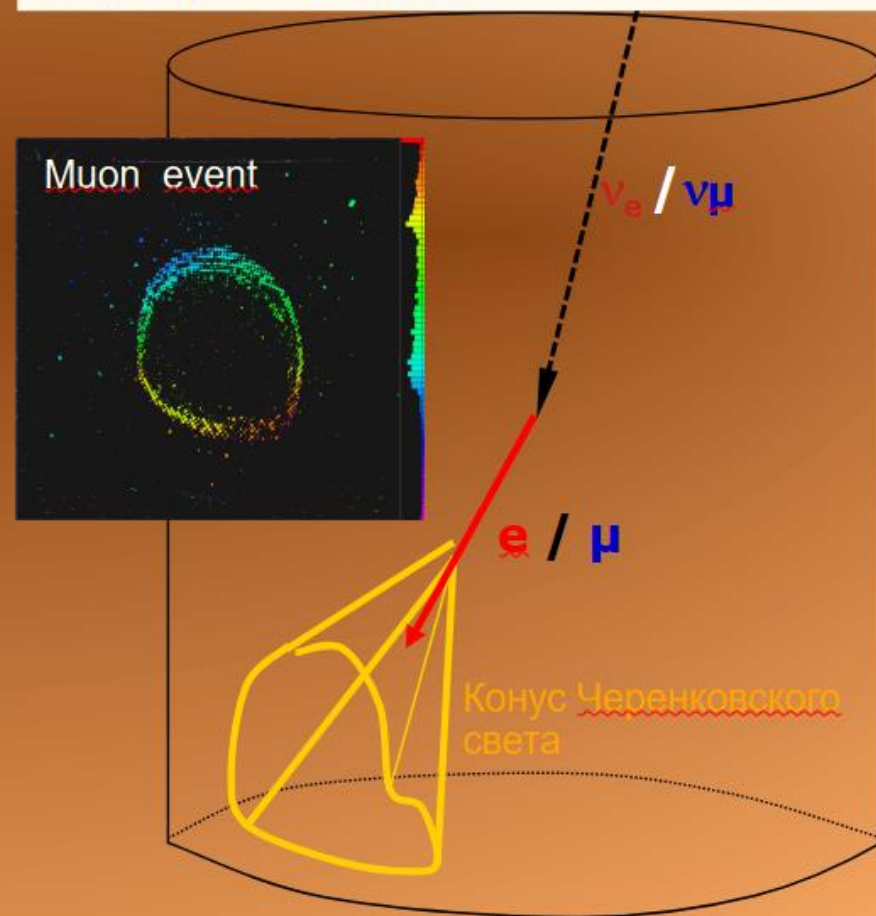


Заряженная частица в воде

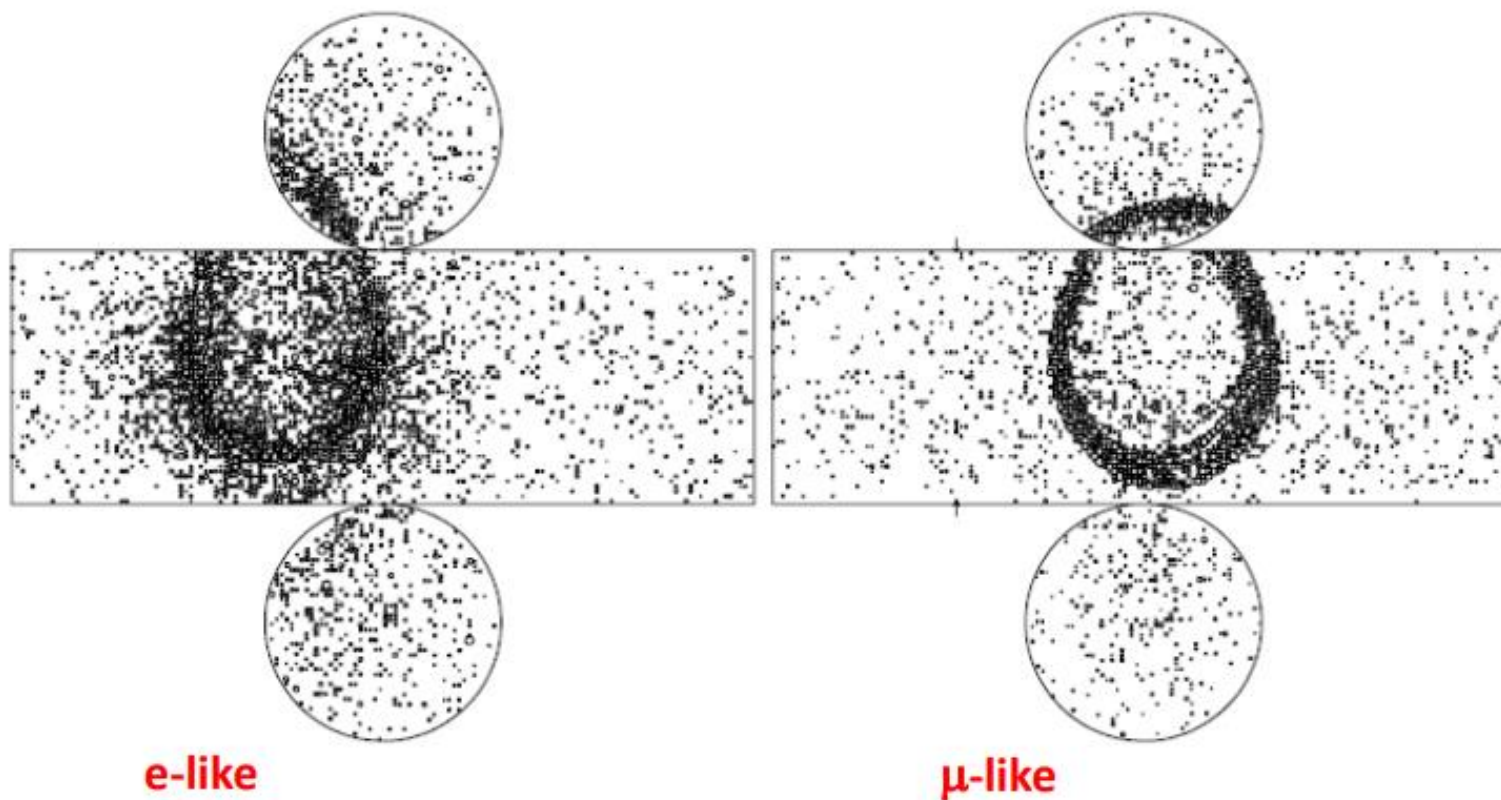
Фотоумножители

Нейтринное взаимодействие в воде или распад протона рождают заряженные частицы, которые излучают Черенковский свет под определенным углом ($\sim 42^\circ$).

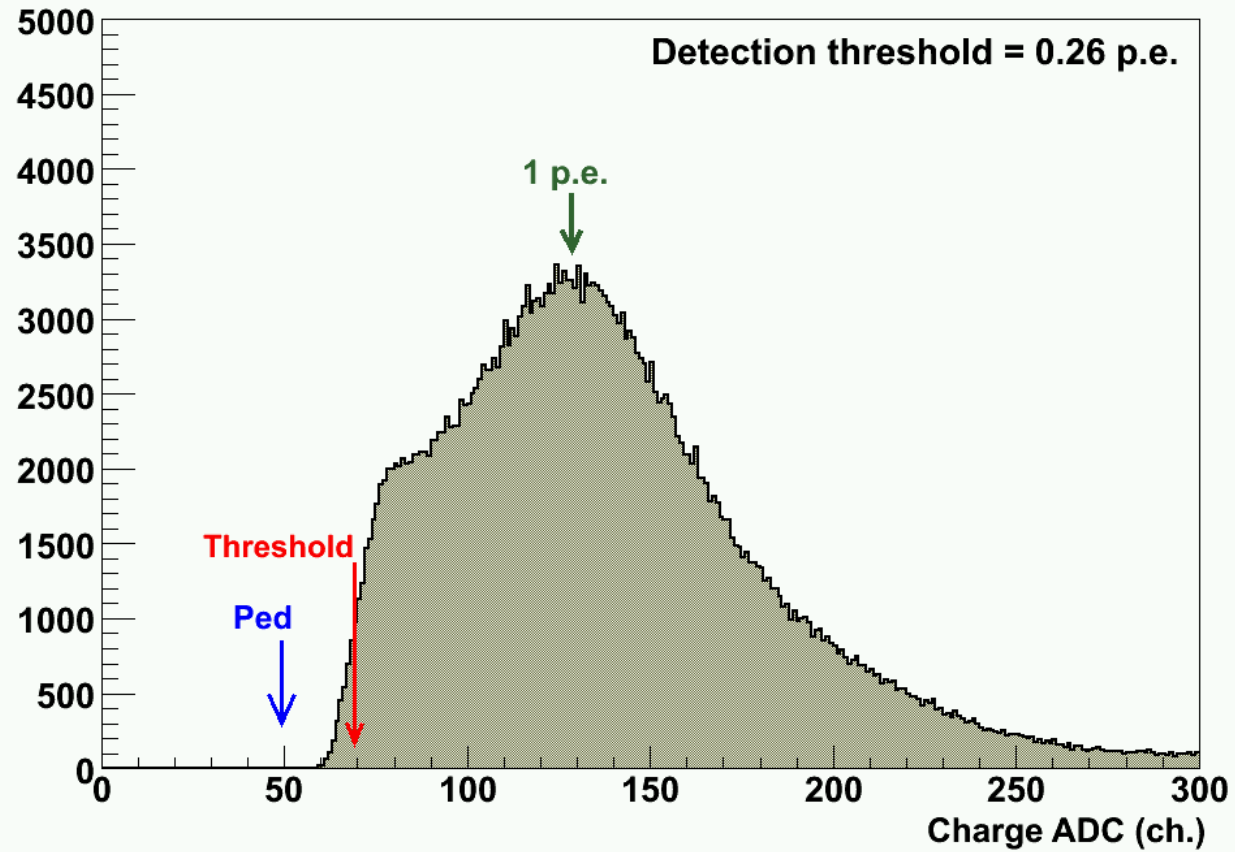
Этот свет регистрируется фотоэлектронными умножителями большого размера, окружающими со всех сторон объем воды.



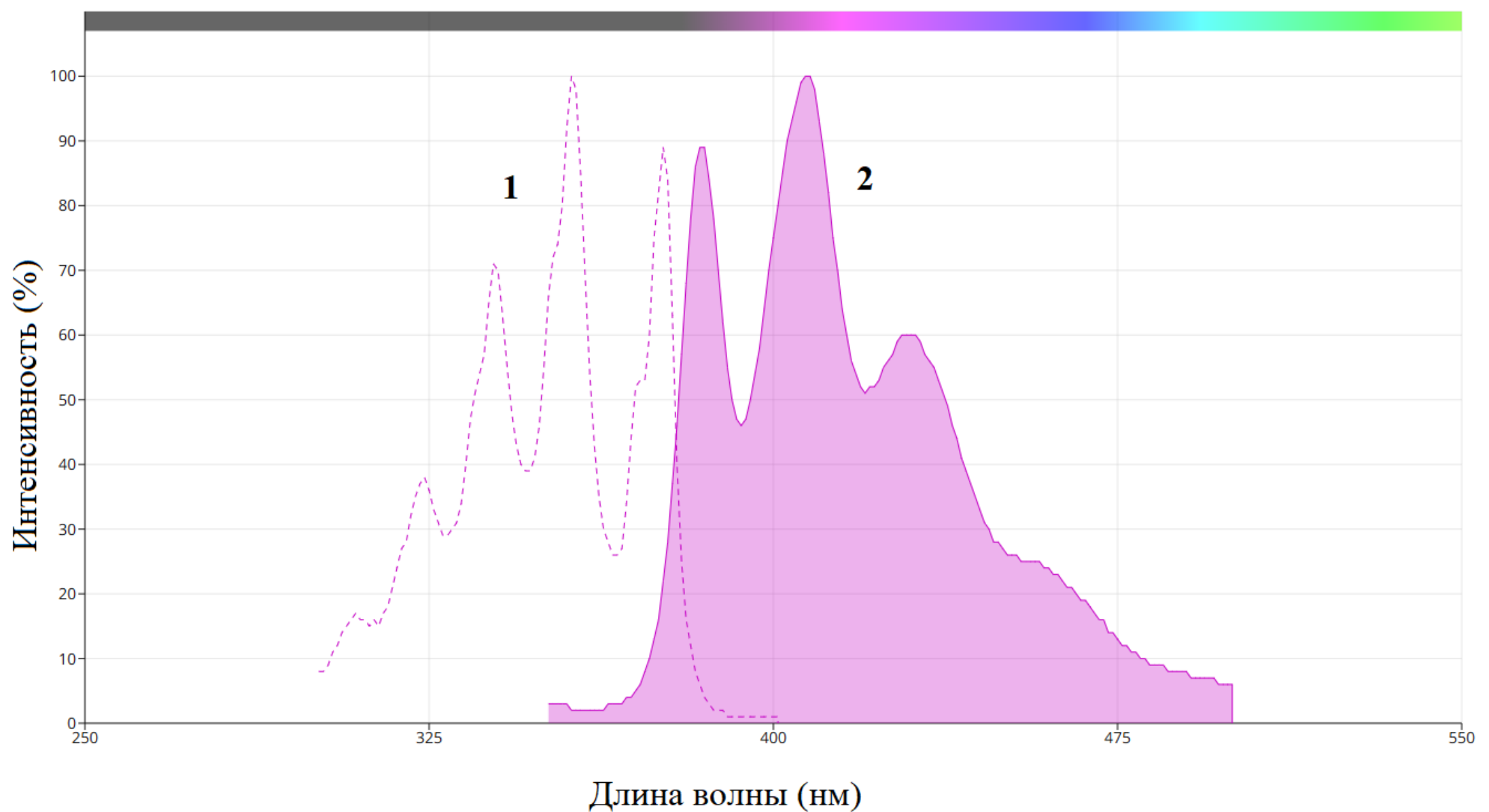
Форма Черенковского конуса



Spectrum of single photoelectrons in bare PMT



Detection threshold is measured as a middle point at the spectrum slice.



AAT Bioquest, Inc. (2025, March 31). *Quest Graph™ Spectrum [POPOP]*. AAT Bioquest. <https://www.aatbio.com/fluorescence-excitation-emission-spectrum-graph-viewer/popop>



Нейтрино

- ν_e (электронное)
- ν_μ (мюонное)
- ν_τ (тау)
- Нулевой заряд. Наличие осцилляций указывает на наличие массы.

Иерархия масс не определена: возможны прямая ($m_1 < m_2 < m_3$) и обратная иерархии массовых состояний.

Измерение CP нарушения: одна из гипотез объяснения барионной асимметрии основана на CP нарушении в нейтринном секторе.

Взаимодействие с веществом: слабое и гравитационное взаимодействия.

Слабое взаимодействие:

Заряженный ток через W^+ и W^- бозоны.

Нейтральный ток через Z^0 бозон.

Сечение взаимодействия нейтрино с веществом очень мало и в зависимости от энергии нейтрино лежит в пределах от 10^{-34} до 10^{-43} см².

Следовательно, для набора статистики необходим детектор большой массы и интенсивные пучки частиц.