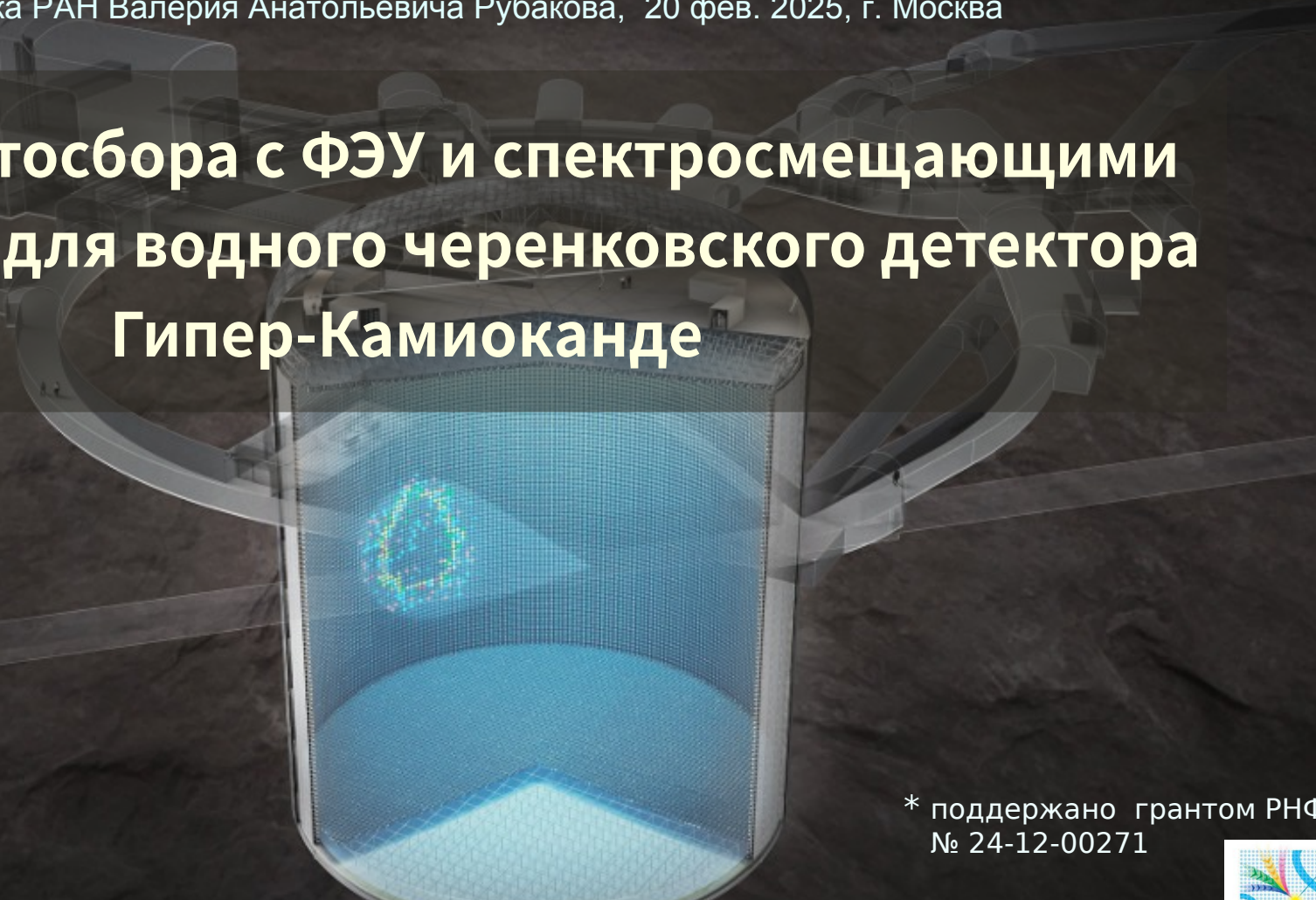
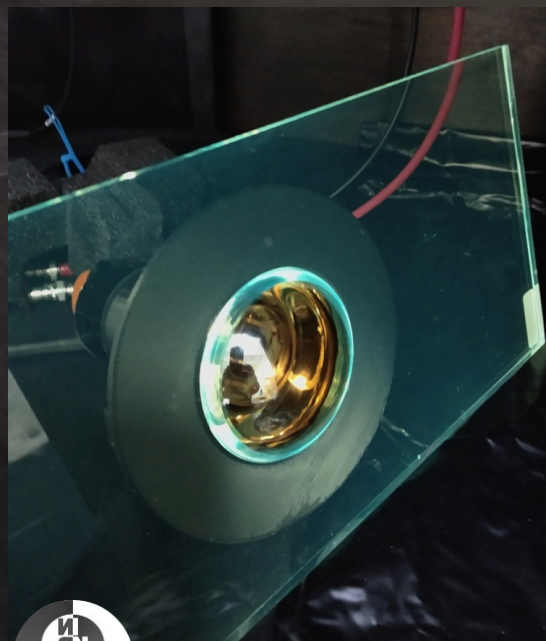
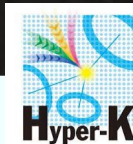


# Модули светосбора с ФЭУ и спектросмещающими пластинами для водного черенковского детектора Гипер-Камиоканде



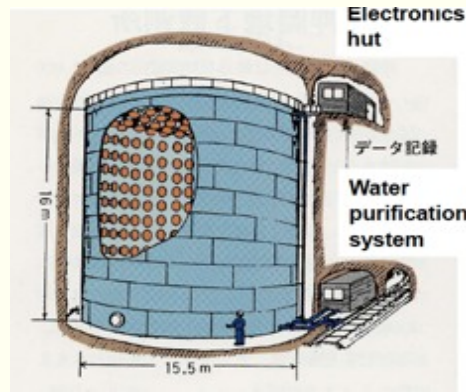
\* поддержано грантом РФФ  
№ 24-12-00271

О. Минеев, А. Измайлов, Ю. Куденко, ИЯИ РАН (Москва)



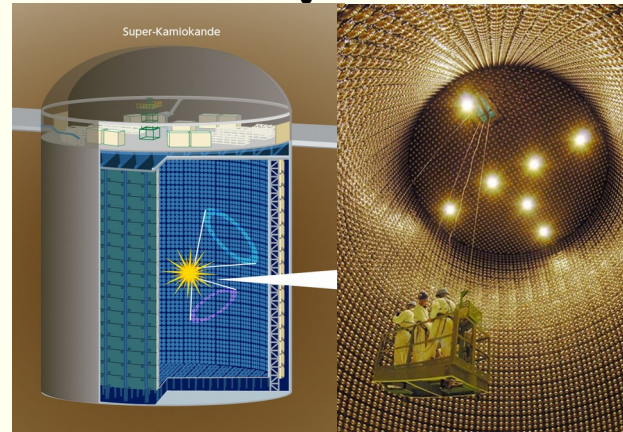
# История развития нейтринных проектов Камиоканде

KamiokaNDE-II  
(1985 - 1995)



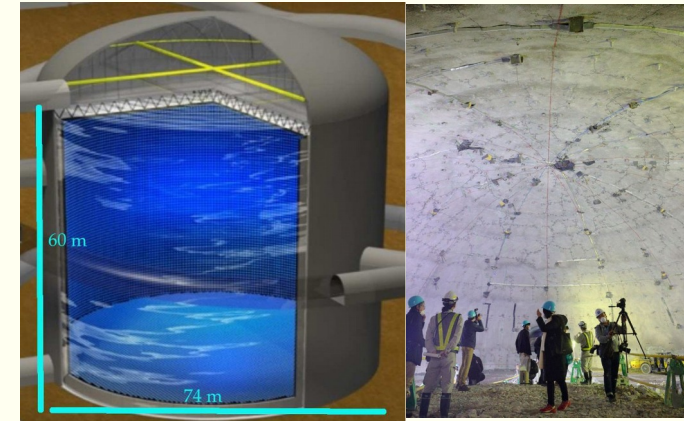
3,000 тонн

Super-Kamiokande  
(1996 - н/в)



50,000 тонн,  $\varnothing$  39 x 41 m

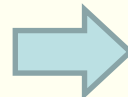
Hyper-Kamiokande  
(~ 2027 - ...)



260,000 тонн,  $\varnothing$  68 x 71 m



Нобелевская премия **2002**, М. Кошиба  
за развитие нейтринной астрофизики



Нобелевская премия **2015**, Т. Каджита  
за открытие нейтринных осцилляций

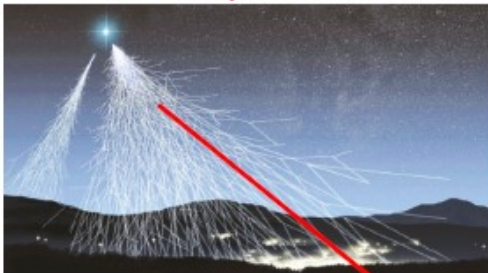


?

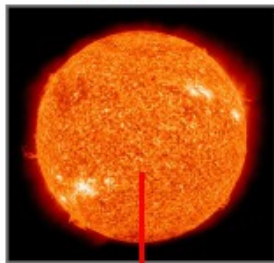
Новые открытия

# Физические исследования на водном Черенковском детекторе Гипер-К

Атмосферные  $\nu$



Солнечные  $\nu$



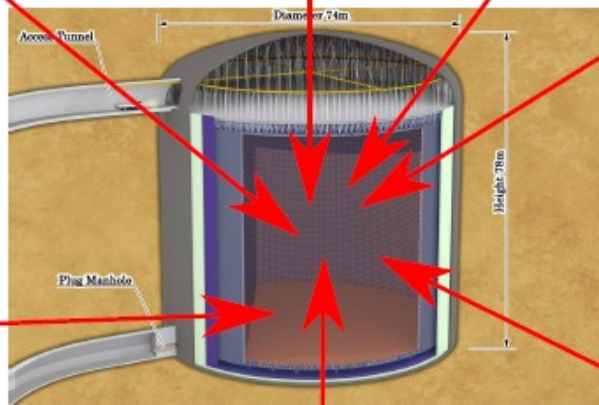
$\nu$  от сверхновых



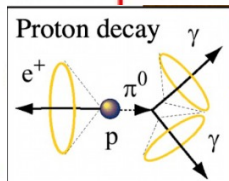
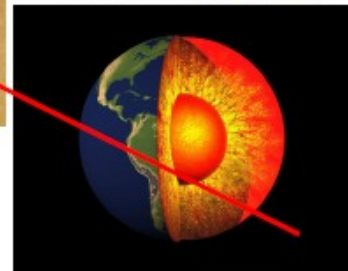
Тёмная материя



Осцилляции 600 МэВ нейтринного пучка



Геонейтринная томография: исследование ядра Земли с помощью атмосферных  $\nu$

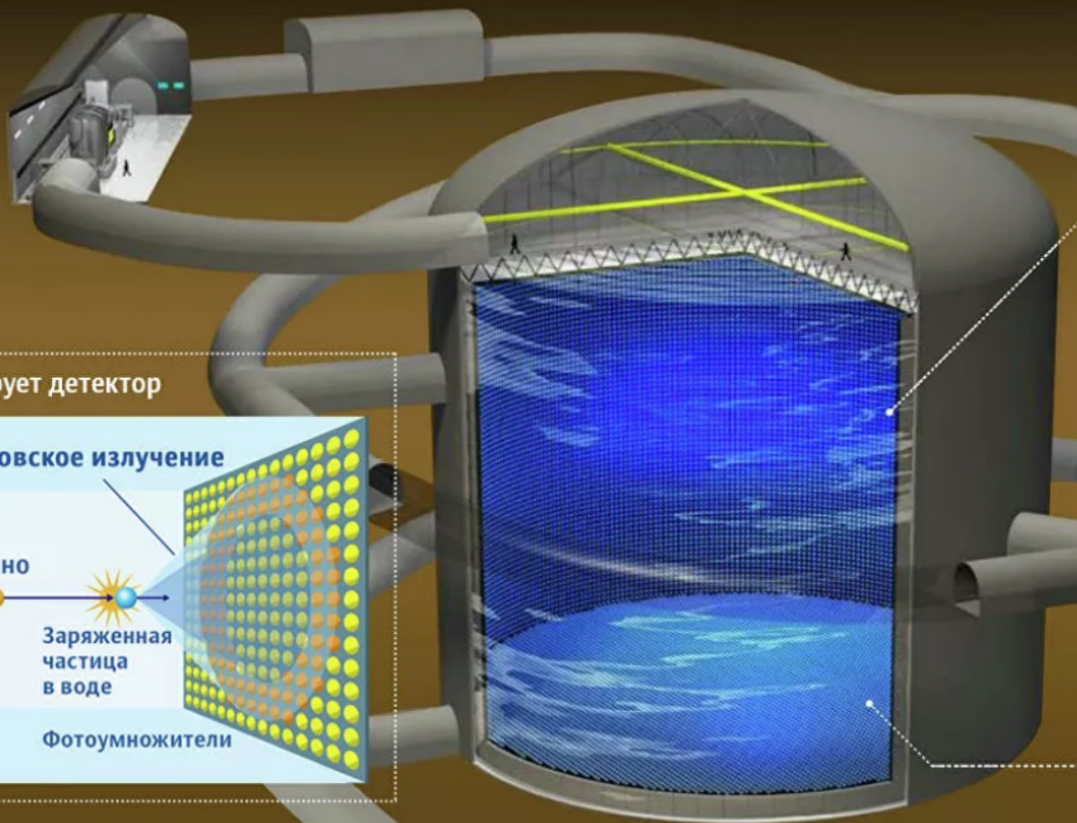


Распад протона ( $>10^{35}$ )

# Принцип регистрации в водном Черенковском детекторе

## Гипер-Камиоканде

Проект по изучению осцилляций нейтрино и распада протона



Что фиксирует детектор

Черенковское излучение

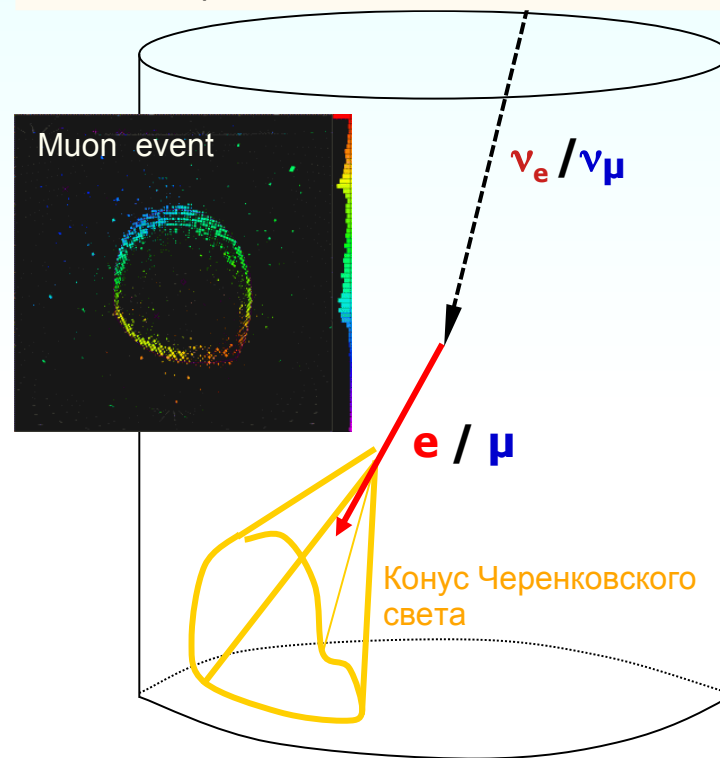
Нейтрино

Заряженная частица в воде

Фотоумножители

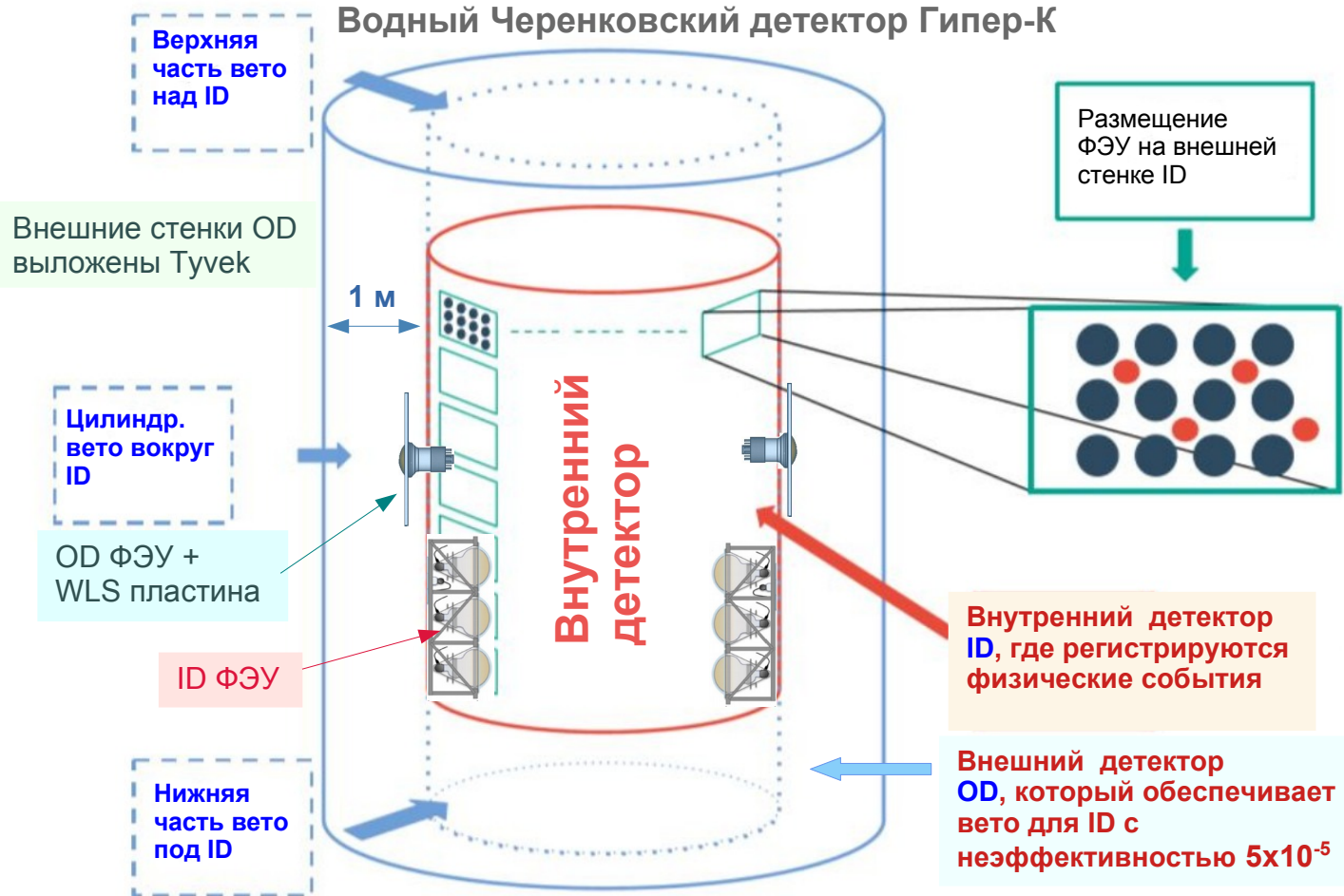
Нейтринное взаимодействие в воде или распад протона рождают заряженные частицы, которые излучают Черенковский свет под определенным углом ( $\sim 42^\circ$ ).

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



# Внешний детектор (OD) как вето для нейтринных взаимодействий во внутреннем детекторе (ID)

Водный Черенковский детектор Гипер-К

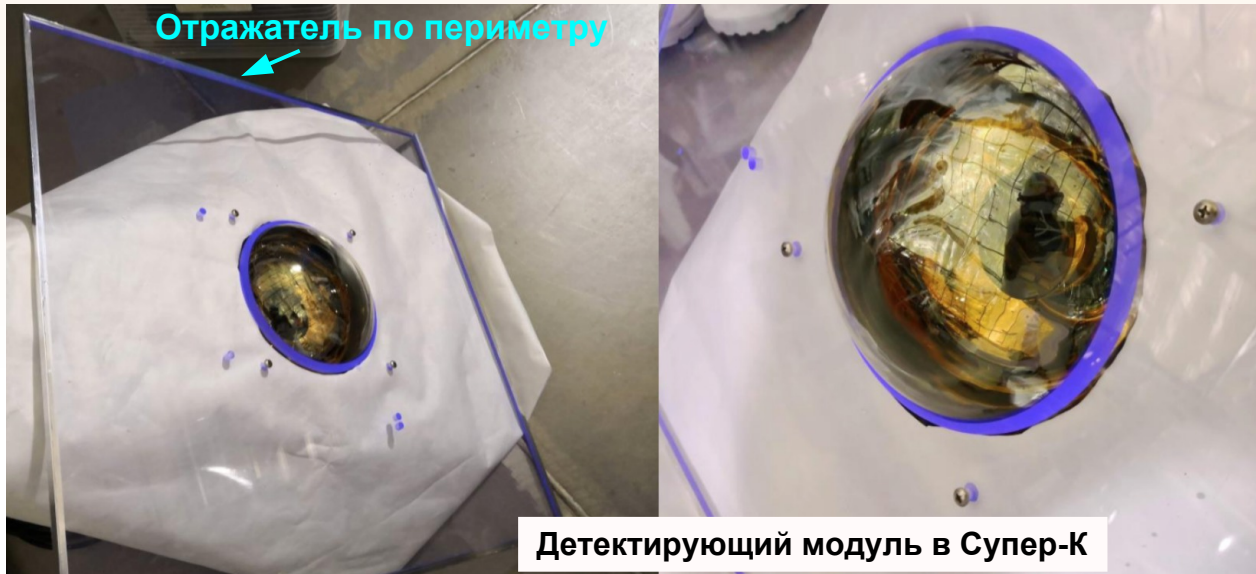


Весь объем воды в баке Гипер-К оптически разделен светоизолирующими стенками на **Внутренний Детектор (ID)** и **Внешний Детектор (OD)** вокруг ID. **Внешний Детектор** работает как вето для ID для входящих и выходящих заряженных частиц.

40,000 ФЭУ смотрят внутрь объема ID. ФЭУ OD смотрят наружу и размещены на той же ферме, что и ФЭУ ID.

Количество 3-дюймовых ФЭУ для OD составляет 3600. Этого количества недостаточно для светосбора Черенковского излучения, поэтому применяются **концентраторы света для ФЭУ на основе спектросмещающих (WLS) пластин**, которые поглощают Черенковский свет в УФ-диапазоне, переизлучают в видимый спектральный диапазон и направляют его на ФЭУ.

# WLS пластины во Внешнем детекторе (OD) Супер-К и Гипер-К



OD в Супер-К использует 20-см Hamamatsu ФЭУ в количестве 1885.

WLS пластины с размером **1.3x60x60 cm<sup>3</sup>** оптически присоединены к ФЭУ через отверстие с конусообразным сечением.

Пластины представляют собой акриловые панели с добавкой люминофора **bis-MSB** с концентрацией **50 mg/L**.

## Сравнение детектирующих модулей ФЭУ+WLS Внешнего детектора в Супер-К и Гипер-К

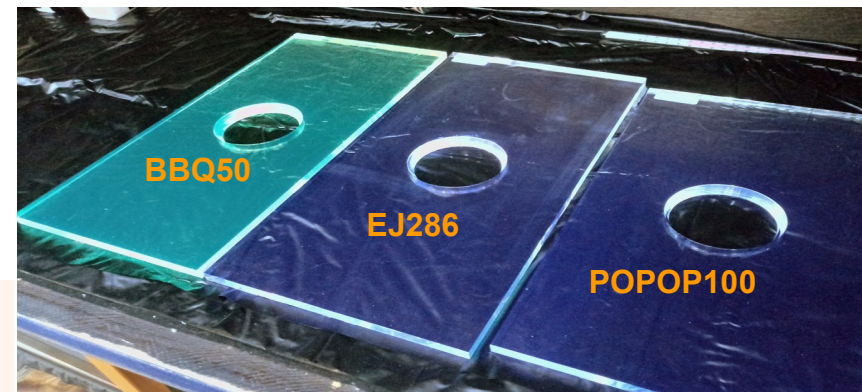
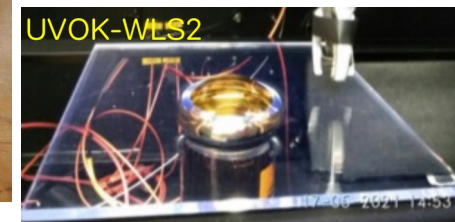
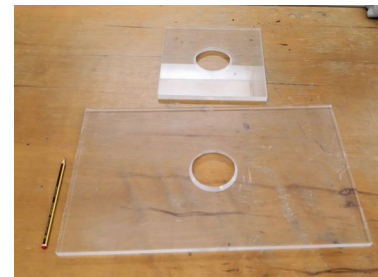
Детектор	Количество каналов	Размер ФЭУ	Размер WLS пластин	Отражатель по краю пластин	Химический состав WLS пластин
Супер-К OD	1885	8" (20 см)	1.3 x 60 x 60 см <sup>2</sup>	3M Polyester film 850 with Al layer	PMMA + 50 мг/л bis-MSB
Гипер-К OD	3600	3" (8 см)	0.7 x 30 x 30 см <sup>2</sup>	3M polymeric film DF2000MA	PMMA + 50 мг/л POPOP

# Предварительный отбор и тестирование WLS пластин

- R&D groups: University of Oxford, Rutherford Appleton Laboratory, INR RAS (Moscow)
- WLS plates from manufacturers:  
Super-K samples,  
LabLogic (UK),  
Eljen (USA) - commercial PVT based type EJ286,  
Kuraray (Japan) - Kuraray B-2 type  
V.A. Kargin Polymer Chemistry Institute (Dzerzhinsk, Russia)
- WLS fluor compositions (single and double):

BBQ50, BBQ100, bisMSB50, bisMSB100,  
POPOP100, POPOP200, POPOP400,  
POPOP50 +PPO3000 (50 mg/l POPOP + 3 g/l PPO — fluor concentrations),  
POPOP100+PPO3000 (100 mg/l POPOP + 3 g/l PPO),  
POPOP100+PPO10000 (100 mg/l POPOP + 10 g/l PPO),  
POPOP200+PPO3000 (200 mg/l POPOP + 3 g/l PPO),  
POPOP200+PPO10000 (200 mg/l POPOP +10 g/l PPO),  
POPOP800+PPO5000 (800 mg/l POPOP + 5 g/l PPO),  
bisMSB50 + PPO3000 (50 mg/l bisMSB + 3 g/l PPO),  
bisMSB200+PPO3000 (200 mg/l bisMSB + 3 g/l PPO),

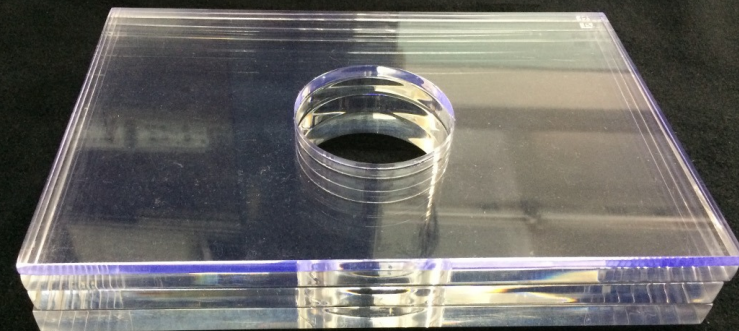
Double fluor allows to accept short UV part of Cherenkov spectrum



- WLS plate thickness: 5, 6, 10, 13, 16 mm

# WLS пластины с различной толщиной и отверстиями для ФЭУ

Thickness: 6, 10, 13, 16 mm



Tapered hole

80 mm

Cylindrical hole

78 mm

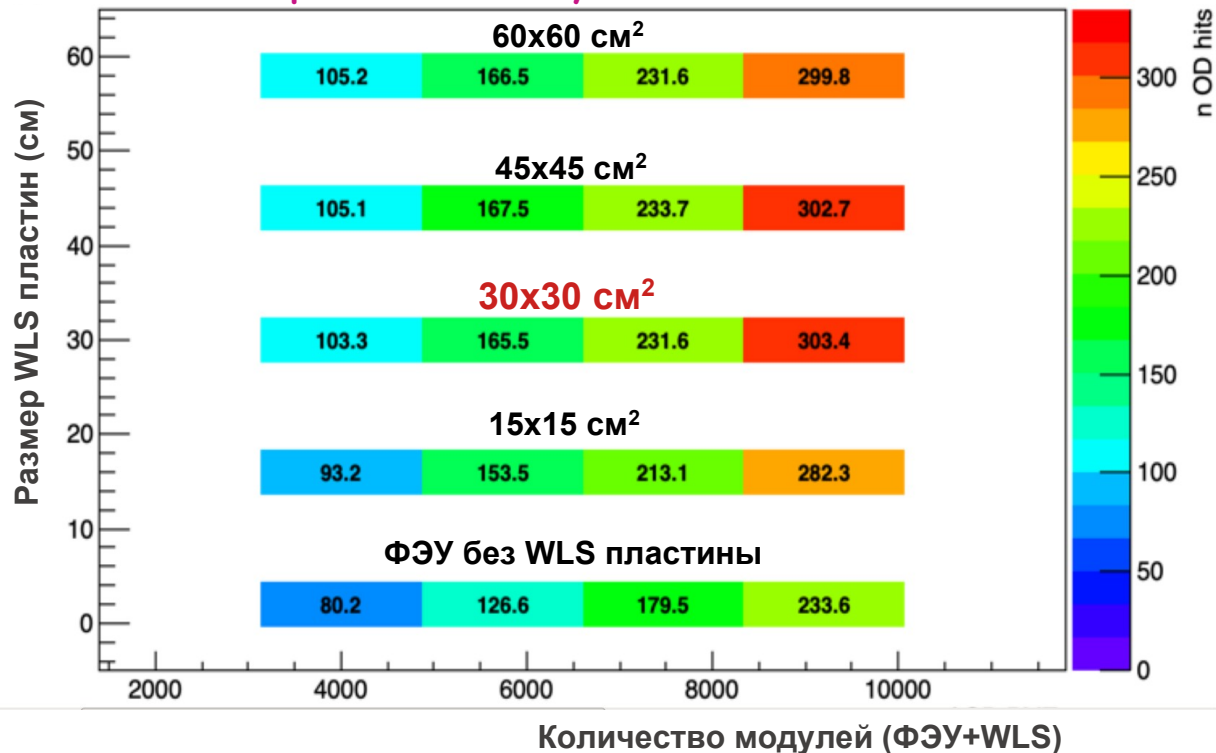
Open 45° cone hole.

77.5 mm

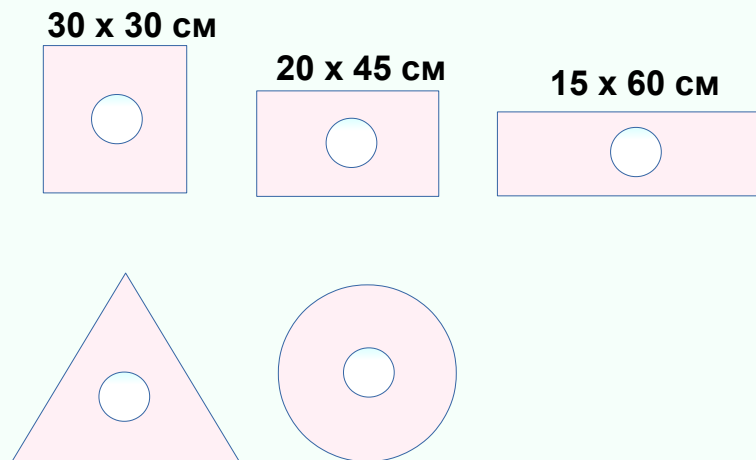


# Оптимизация размера пластин методом Монте-Карло моделирования

Количество сработавших модулей в OD от космических мюонов



Моделирование формы WLS пластин с одинаковой площадью для оптимального светосбора на ФЭУ при равномерной засветке пластины



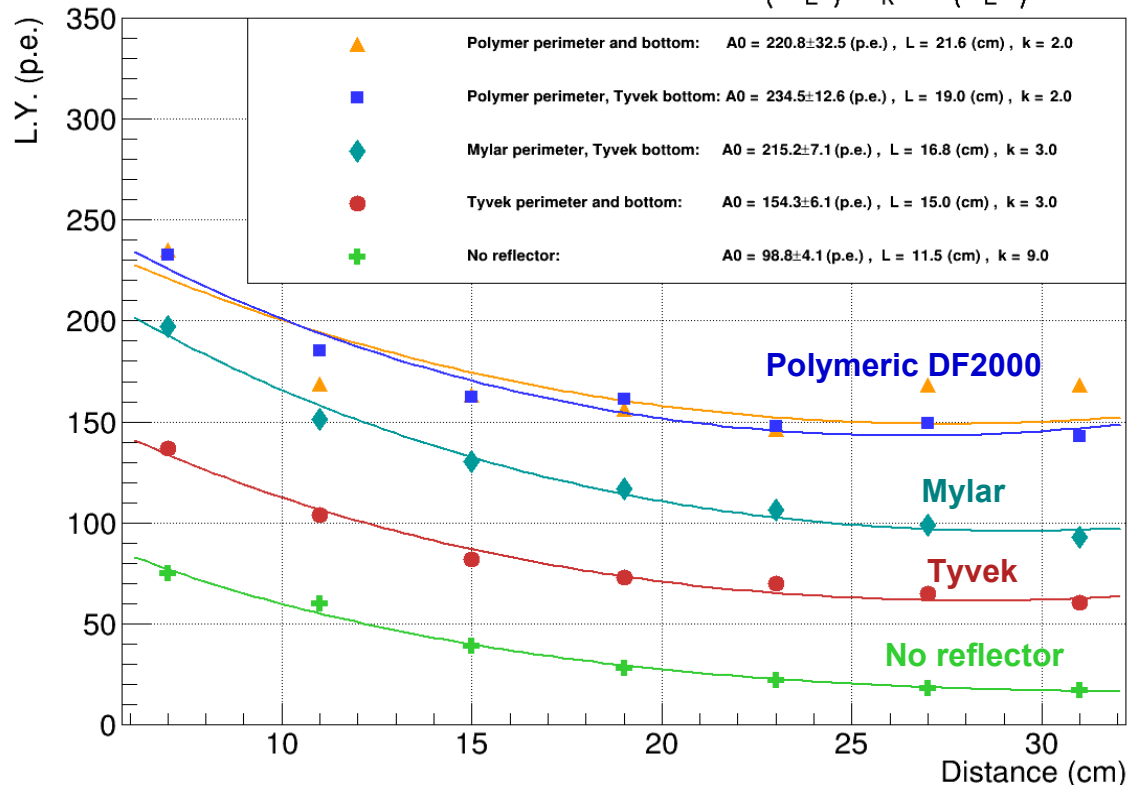
Наилучший светосбор обеспечивает **квадратная пластина**, слегка меньше показали пластины прямоугольной и треугольной формы. Круглая пластина оказалась на 40% хуже, чем другие пластины. Средний путь фотона в пластине до попадания на ФЭУ составил 49 см.

Программа симуляции отклика OD на космические мюоны показала, что увеличение размера WLS пластин более 30x30 см<sup>2</sup> не приводит к увеличению эффективности Внешнего детектора.

# Оптимизация отражателя по периметру пластины в воде

Пластина PPOP200 возбуждалась 380 нм импульсным светодиодом на дистанциях от 7 до 31 см между LED и центром ФЭУ

$$\text{Water, PPOP200, LED 380(nm), } LY = A0 \exp\left(-\frac{x-4}{L}\right) + \frac{A0}{k} \exp\left(\frac{x-36}{L}\right)$$



Отражатель под WLS пластиной не влияет на локальный светосбор в пластине.

Отражатель вокруг краев пластины (по периметру) дает сильный эффект.


## Тестируемые отражатели:

- **Tyvek** (диффузный отражатель);
- **aluminized Mylar** (зеркальный отражатель);
- **полимерная многослойная пленка 3M DF2000MA** (зеркальный отражатель).

## Основные результаты:

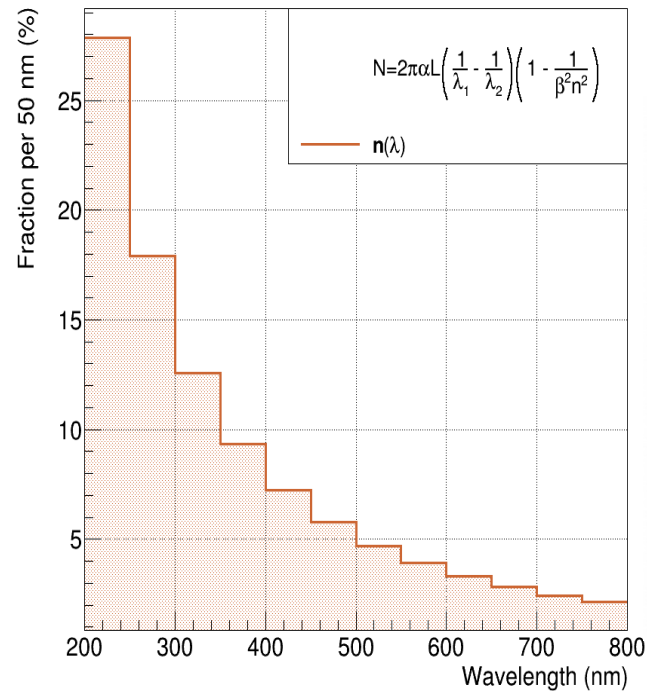
- 1) **Mylar** увеличивает сигнал почти на **30%** по сравнению с **Tyvek**.
- 2) **Полимерная пленка DF2000MA** увеличивает сигнал более чем в **2 раза** по сравнению с **Tyvek**.
- 3) **Полимерная пленка DF2000MA** улучшает светосбор пластины в воде в **4-5 раз** по сравнению с пластиной без отражателя по периметру.

# Выбор оптимальной спектросмещающей добавки (люминофора) для детектирования Черенковского света. Методом проб и ошибок.

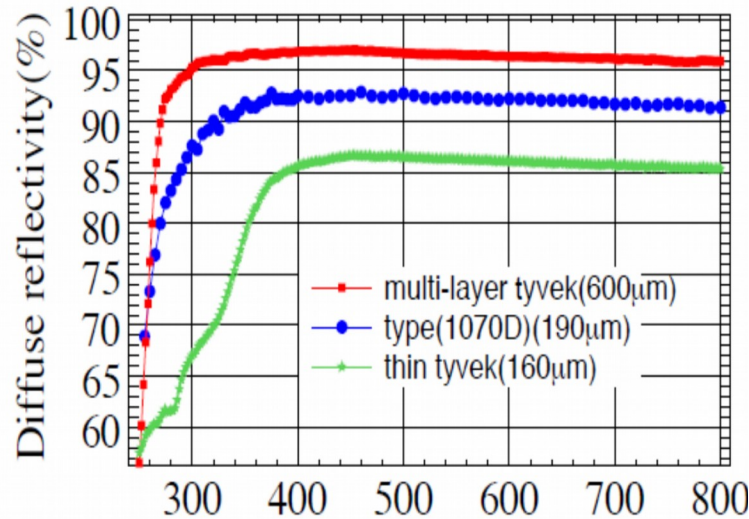
- 1-й этап:** Тестирование WLS пластин с разными добавками и концентрациями на 4 светодиодах (265-315-380-405 нм), чтобы покрыть спектральный диапазон Черенковского света.  
**Принято решение использовать пластину с двойным люминофором (PPO+POPOP) для увеличения чувствительности к короткому УФ (< 300 нм).**
- 2-й этап:** Тестирование WLS пластин с двойным люминофором, чтобы определить оптимальную концентрацию каждой из добавок.  
**Выбран состав 50 мг/л POPOP + 3000 мг/л PPO.**
- 3-й этап:** Обнаружено, что двойной люминофор PPO+POPOP значительно увеличивает темновой шум (испускание одиночных фотонов) по сравнению с только POPOP. **PPO создает проблему.** Одновременно обнаружено, что короткий УФ сильно подавлен в OD из-за потерь при отражении на Тувек, которым выложены стены OD. В среднем черенковский фотон испытывает ~2 отражения в OD чтобы достичь ФЭУ+WLS. **Нет нужды в PPO, т. к. УФ подавлен.**  
**Принято решение вернуться к только POPOP и оптимизировать концентрацию POPOP.**
- 4-й этап:** Тестирование пластин с POPOP разной концентрации. **Выбрана концентрация 800 мг/л POPOP.**
- 5-й этап:** Обнаружено, что POPOP с 800 мг/л почти в 3 раза увеличивает темновой шум.  Для эффективности OD к фону темновой шум важнее, чем световыход на отдельном модуле.  
**Принято решение использовать POPOP с 50 мг/л.**

# Спектр Черенковского света

Спектр излучения релятивистской заряженной частицы в воде

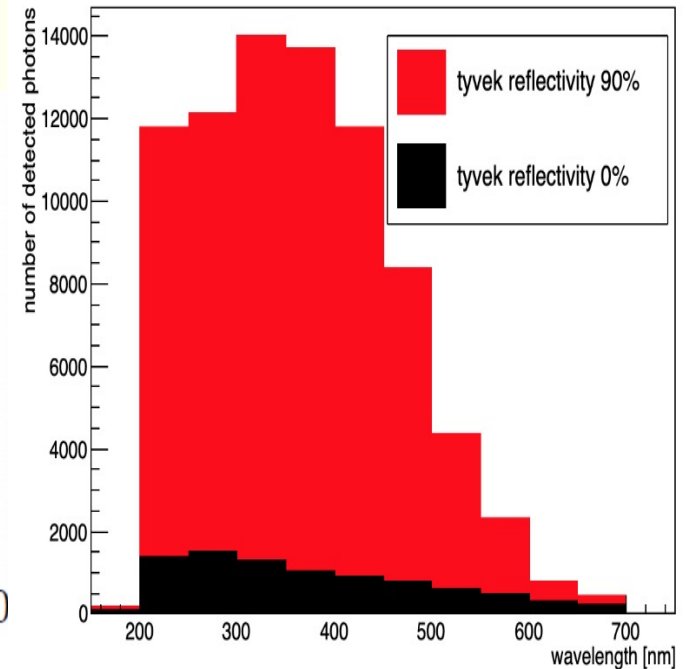


Из-за поглощения в воде и отражения на Тувек Черенковский спектр фотонов, достигших ФЭУ, смещается в длинноволновую область.

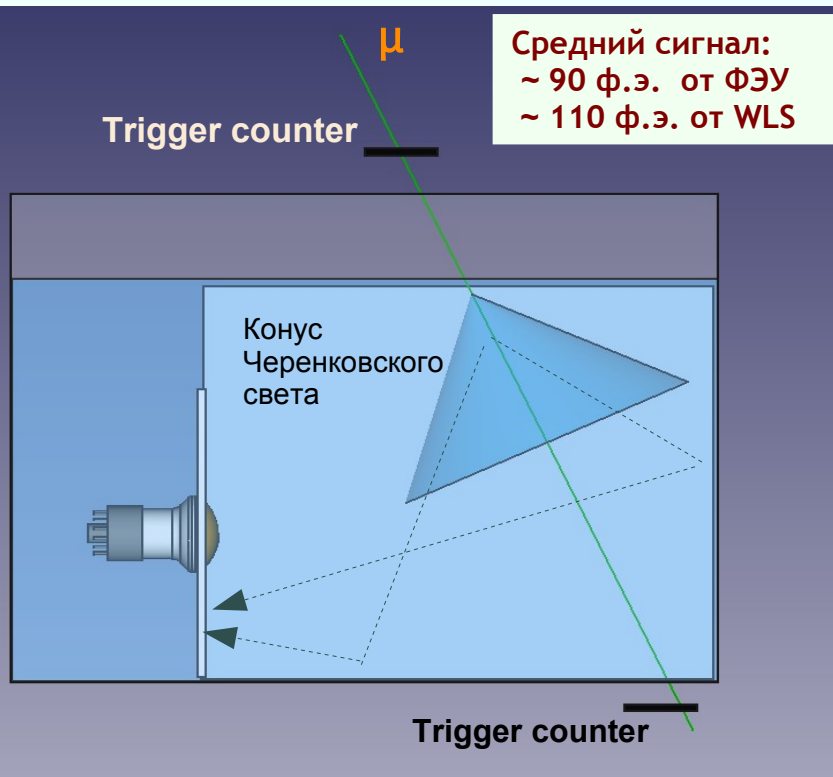


Эффективность отражения Тувек vs. длины волны

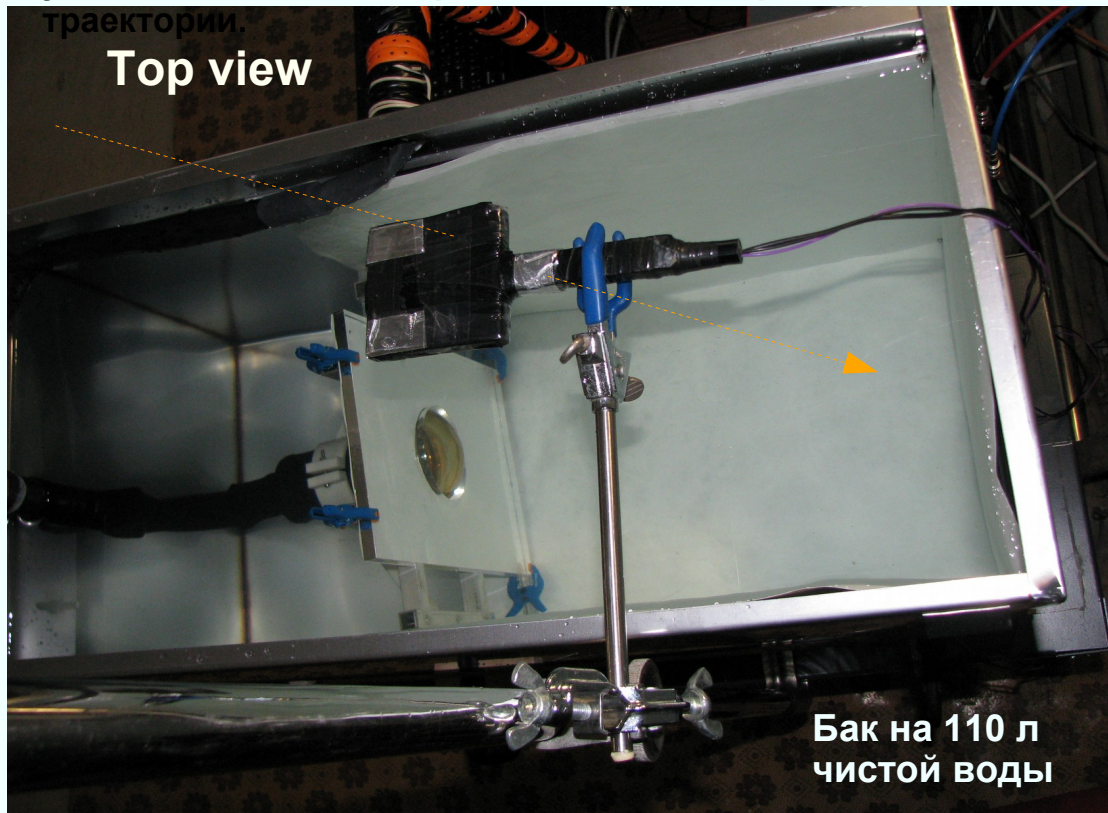
Спектр Черенковских фотонов, которые достигнут ФЭУ (Монте-Карло моделирование)



# Измерения WLS пластин в водном Черенковском детекторе Infant-K



Триггерные счетчики для космических мюонов установлены таким образом, чтобы отбирать наклонные траектории.



Конус Черенковского света отражается от стенок бака, выложенных Тувек, и захватывается модулем ФЭУ+WLS. Такая конфигурация отражает условия светосбора в ОД и имитирует спектр Черенковского света, который попадает на модуль в ОД.

# Относительный световыход WLS пластин с размером 0.7x300x300 см<sup>3</sup> при возбуждении светодиодом от 265 до 405 нм и на отраженном Черенковском свете

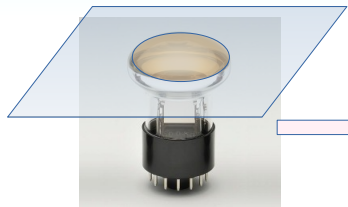
Световыход нормализован на показатели референсной пластины РОРОР50-РРО3000.

Длина волны от LED →	265 нм	315 нм	380 нм	405 нм	Черенковский свет
РОРОР 50 — РРО 3000	100%	100%	100%	100%	100%
РОРОР 50	13%	133%	124%	118%	103.7%
РОРОР 100	33%	130%	105%	142%	--
РОРОР 200	46%	124%	100%	160%	--
РОРОР 400	84%	154%	117%	230%	--
✓ РОРОР 800	100%	153%	124%	261%	116.7%

Высокая концентрация РОРОР на уровне 800 мг/л делает WLS пластину чувствительной к короткому УФ, достигая в этой области спектра эффективности пластины с двойным люминофором. РОРОР800 показывает преимущество над РОРОР50 во всем спектральном диапазоне, в то время как концентрации между 50 и 800 не демонстрируют явного преимущества над 50 мг/л.

# Измерение темнового шума

Термостат на  $+13^\circ$



HV= +1250 V

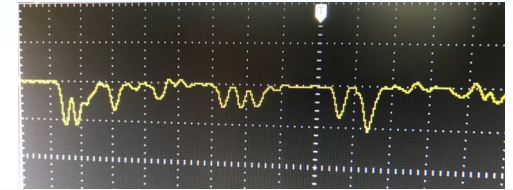
Amplifier  
Gain = 20

Discriminator

THR~ 0.3 p.e.

Frequency  
Meter

Charge  
ADC

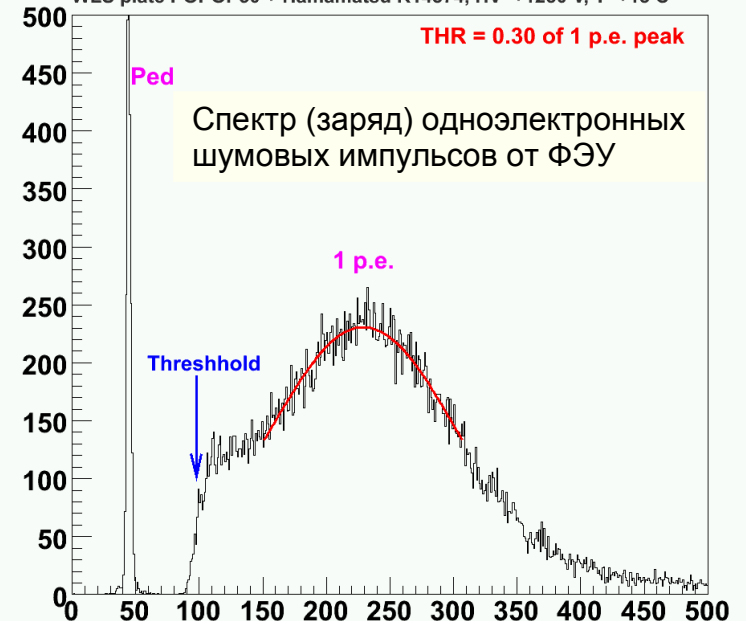


ФЭУ Hamamatsu R14374 с WLS пластиной находятся в климатической камере под температурой  $+13^\circ\text{C}$ , что соответствует температуре воды в OD Hyper-K.

Порог регистрации шумовых импульсов от ФЭУ установлен на уровне 0.3 от средней величины одноэлектронного импульса, что позволяет считать практически все шумовые сигналы ФЭУ, пропуская наводки и наведенные шумы.

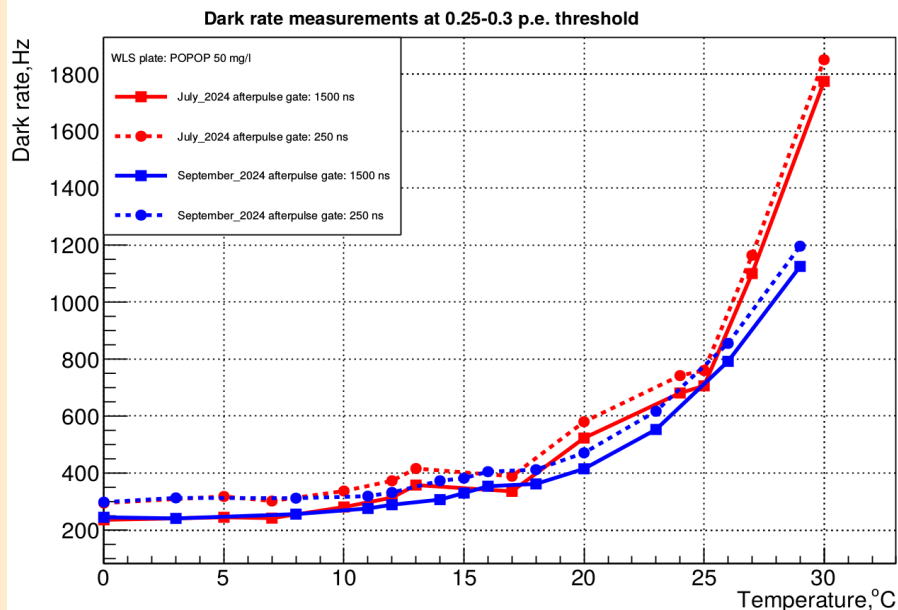
Темновой шум измеряется после 1-3 дней нахождения ФЭУ в светоизолированном пространстве. За это время происходит высвечивание как ФЭУ, так и WLS пластины, снимается наведенное возбуждение от окружающего света.

WLS plate POPOP50 + Hamamatsu R14374, HV=+1250 V, T=+13 C



# Темновой шум для WLS пластин с разной концентрацией люминофора

WLS пластины	Только ФЭУ	Чистый акрил без люминофора	POPOP 50	POPOP 200	POPOP 400	POPOP 800	POPOP 50 + PPO 3000
Темновой шум при +13°C, Гц	~ 200	~ 250	~ 340	~ 390	~ 490	~ 900	~ 670



Зависимость темнового шума ФЭУ Hamamatsu R14374 и WLS пластины POPOP-50 от температуры в диапазоне от 0 до +30°C.

Измерения проводились в июле (красный) и сентябре (синий) с мертвым временем 250 и 1500 нс для подавления afterpulses.

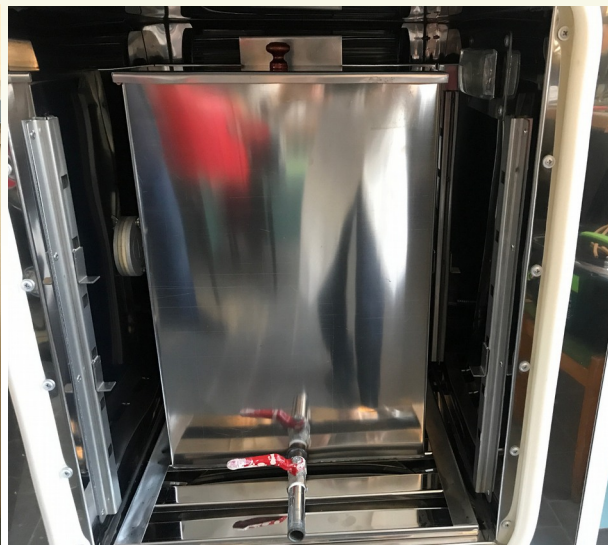
WLS пластины, которые показывают высокую чувствительность к УФ в области <300 нм, одновременно генерируют избыточный темновой шум. А также показывают чувствительность к окружающему низкоэнергетичному радиационному фону.

Выбор сделан в пользу WLS пластины POPOP50





# Ускоренное старение WLS пластин в воде



**Полу-эмпирическое правило для ускоренного старения при повышении температуры:**  
Все химические процессы ускоряются в 2 раза при увеличении температуры на **10°С**.

Температура воды  $t$  в Гипер-К: **+13°С**.

Нагрев до **+59°С** ускоряет старение в **24 раза** по сравнению с Гипер-К

**2 недели в горячей воде соответствуют 1 году функционирования WLS пластин в Гипер-К.**

6 WLS пластин разного типа нагревались в воде при **+59°С** в течении 4 месяцев, что соответствует ~ 17 годам в Гипер-К.

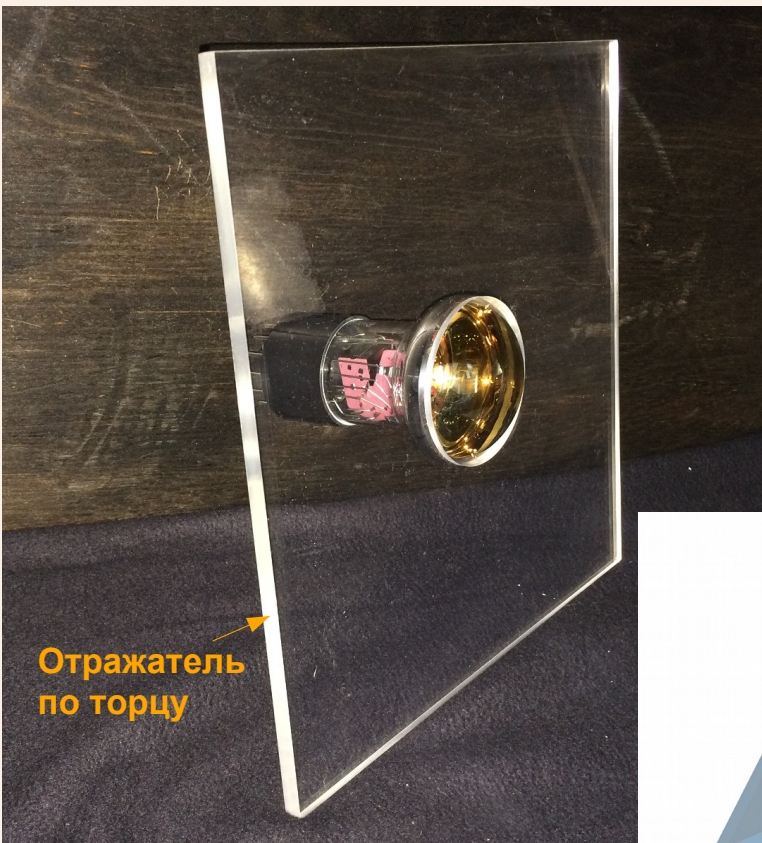
Раз в 2 недели пластины извлекались из воды и после остывания измерялся их световыход. Полученные данные аппроксимировались и усреднялись.

**Основной результат:** ожидается уменьшение световыхода ~ **0.8-1.3 % в год**.

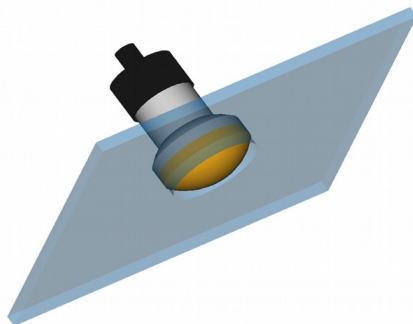
Уменьшение световыхода предположительно связано с оптической деградацией акрила, деградация люминофора не зафиксирована.

# Конечная конструкция WLS пластины

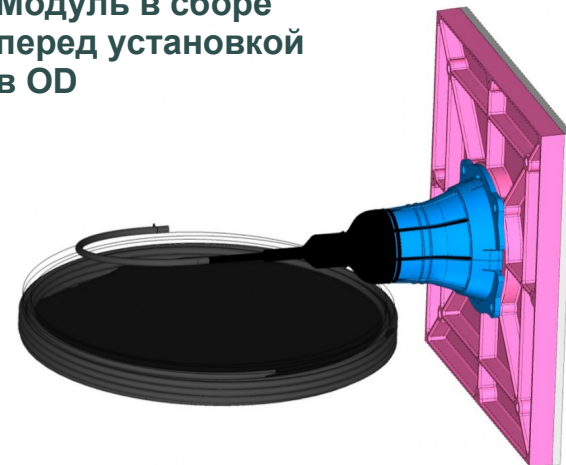
Программа тестирования и моделирование позволили выработать оптимальное решение для WLS пластины



- Размер : 7 x 300 x 300 мм<sup>3</sup>
- Отверстие для ФЭУ :  $\varnothing$  78 мм, цилиндрическое сечение
- Отражатель по торцу : Полимерная зеркальная пленка 3M DF2000MA
- Материал : PMMA оптического качества (акрил)
- Люминофор : РОРОР 50 мг/л



Модуль в сборе перед установкой в OD



Эффективность регистрации одного фотона WLS пластиной в воде: ~ 3% для 380 нм.

Увеличение светосбора ~ 2 раза по сравнению с одиночным ФЭУ

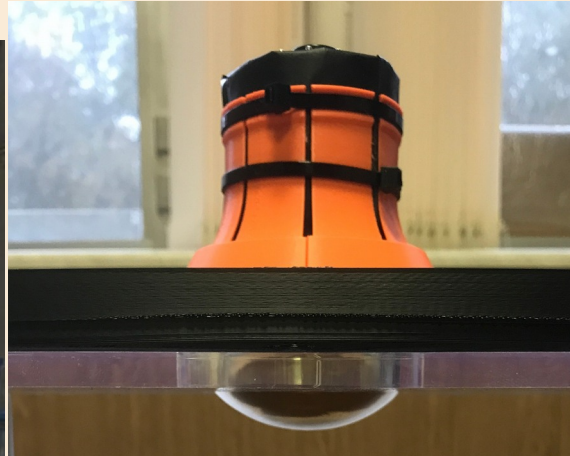
Ожидаемый темновой шум в OD ~ 350 Гц.

Ожидаемое старение по световыходу: ~ 1% в год

## Механическое соединение ФЭУ с WLS пластиной



Установка модулей ФЭУ+WLS в OD Super-Kamiokande.  
Картина в Нурег-К будет примерно такая же.



WLS пластина прикручивается 4 саморезами к пластиковой основе. ФЭУ зажимается в лепестковый зажим, который прикручивается болтами к основе. Механическая часть находится в стадии доработки.

