

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## Детекторы фотонов нейтринных телескопов

Б.К. Лубсандоржиев

Нейтринные телескопы своим грандиозным успехом, свидетелями которого мы являемся сегодня, обязаны в первую очередь детекторам фотонов. Детекторы фотонов — это "рабочие лошадки" нейтринных телескопов. В настоящей статье делается краткий обзор детекторов фотонов, используемых в нейтринных телескопах, описываются различные подходы в разработках детекторов фотонов для таких приложений, обсуждаются перспективы разработок новых детекторов фотонов для нейтринных телескопов следующего поколения.

**Ключевые слова:** нейтрино, нейтринные телескопы, детекторы фотонов, фотоумножители

PACS numbers: 29.40. – n, 85.60.На, 95.55. – n

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.04.039602>

## Содержание

1. Введение (446).
  2. Детекторы фотонов для глубоководных экспериментов в нейтринной физике (446).
  3. Детекторы фотонов нейтринных телескопов первого поколения (447).
    - 3.1. Детекторы фотонов нейтринного телескопа HT-200.
    - 3.2. Детекторы фотонов нейтринного телескопа AMANDA.
    - 3.3. Детекторы фотонов нейтринного телескопа ANTARES.
  4. Детекторы фотонов нейтринных телескопов второго поколения (450).
    - 4.1. Детекторы фотонов нейтринных телескопов ICESUBE и Baikal-GVD.
    - 4.2. Детекторы фотонов нейтринного телескопа KM3NeT.
  5. Детекторы фотонов нейтринных телескопов следующего поколения (451).
  6. Перспективы развития детекторов фотонов нейтринных телескопов (452).
  7. Заключение (453).
- Список литературы (453).

## 1. Введение

Фотоумножители играют основополагающую роль в нейтринных телескопах. Во всех существующих и планирующихся нейтринных телескопах высокоэнергичные нейтрино регистрируются по черенковскому излучению в воде или во льду, вызванному продуктами взаимодействия нейтрино с веществом — релятивистскими заряженными лептонами и высокоэнергичными электромагнитными или адронными ливнями.

**Б.К. Лубсандоржиев**

Институт ядерных исследований РАН,  
просп. 60-летия Октября 7а, 117312 Москва, Российская Федерация  
E-mail: lubsand@rambler.ru

Статья поступила 21 апреля 2023 г.

Регистрация черенковского излучения производится с помощью высокочувствительных быстродействующих детекторов фотонов, занимающих особое место в такого рода экспериментах. Изобретение Л.А. Кубецким в Советском Союзе первого в мире вакуумного фотоэлектронного умножителя (фотоумножителя) [1] дало мощный толчок развитию физического эксперимента вообще. То же самое можно сказать и о кремниевом фотоумножителе, изобретённом также в СССР в 1980-е годы З.Я. Садыговым и В.М. Головиным с коллегами [2]. Детекторы фотонов занимают особое место в истории успеха нейтринных телескопов.

Почти 50 лет назад в самом начале обсуждений проблемы глубоководного детектирования нейтрино и создания крупномасштабных нейтринных телескопов огромное внимание было уделено развитию именно детекторов фотонов.

## 2. Детекторы фотонов для глубоководных экспериментов в нейтринной физике

В ходе активных обсуждений проектов первых глубоководных нейтринных экспериментов в 1970–1980-х гг. были сформулированы требования к детекторам фотонов для таких экспериментов [3–5]. Здесь перечислим только основные из них с краткими комментариями:

1. Высокая чувствительность к черенковскому свету в воде и во льду, что означало необходимость использования бищелочного фотокатода — в то время наиболее чувствительного в синей области спектра.

2. Большая чувствительная площадь в большом телесном угле, желательно  $\sim 2\pi$ , что привело к появлению детекторов фотонов с большим полусферическим фотокатодом.

3. Как можно более высокое временное разрешение или как можно меньший уровень разброса времён пролёта фотоэлектронов. Определяется распределением времён пролёта фотоэлектронов при однофотоэлектронной

засветке фотокатода детектора фотонов. Это опять же говорит в пользу полусферических детекторов фотонов.

4. Как можно лучшее однофотоэлектронное разрешение. Определяется зарядовым распределением однофотоэлектронных импульсов. Характеризуется полной шириной на половине высоты (ПШПВ или на английском FWHM — Full Width at Half Maximum) этого распределения. В то время считалось, что при достаточно хорошем разделении пиков от одного, двух и т.д. фотоэлектронов возможно достичь эффективного подавления скорости счёта фоновых импульсов, обусловленных в основном распадами  $K^{40}$  в океанской воде.

5. Низкий уровень собственного темного тока фотодетектора, что вновь приводит к бищелочному фотокатоду.

6. Быстрый отклик фотодетектора — длительность выходного импульса фотодетектора на уровне  $\sim 10$  нс или меньше. Считалось, что это позволит разделять одиночные мюоны от групп мюонов.

7. Нечувствительность к магнитному полю Земли.

Конечно, все перечисленные требования соответствовали уровню знаний того времени о водной среде, фоновых условиях, свойствах самих детекторов фотонов и т.д., и с высоты сегодняшнего времени выглядят во многом наивными, напоминая общие олимпийские принципы: *Citius, Altius, Fortius*. На языке детекторов фотонов это могло бы означать, что детекторы должны быть более быстродействующими, более чувствительными и более "умными" — с английского "smart". Последнее понятие было введено С. Фликтом и означает достаточно хорошее однофотоэлектронное разрешение, позволяющее чётко разделять в зарядовом спектре выходных импульсов фотодетектора пики, обусловленные одним, двумя, тремя и так далее фотоэлектронами с фотокатода детектора. Удивительно, что, несмотря на несколько наивное звучание, данные требования остаются актуальными и сегодня.

В самом начале разработки глубоководных нейтринных телескопов в 1970-е годы начались активные обсуждения возможных конструкций фотоэлектронных умножителей (детекторов). (Какие только идеи не выдвигались!) Надо отметить, что обсуждались самые разнообразные конструкции [6]. Но уже тогда все предлагавшиеся конструкции разделились на два основных направления. Первое направление концентрировалось на разработке оптического модуля на базе одного крупногабаритного фотоумножителя (один оптический модуль — один фотоумножитель), второй же подход заключался в использовании в одном оптическом модуле большого количества фотоумножителей малого размера. С фотодетекторами малого размера была связана и предлагавшаяся в то время оригинальная идея оптического модуля "Rogscipine", в котором на небольшой фотодетектор с высокой чувствительностью собирался свет с большой площади с помощью оптических световодов. Кстати, именно в рамках такой идеи начиналась разработка З.Я. Садыговым в ИЯИ РАН кремниевого фотоумножителя.

Кремниевые фотоумножители получили бурное развитие за последние 20–25 лет. Далее в статье будет показано, как кремниевые фотоумножители снова обсуждаются в связи с нейтринными телескопами.

Интересно, что большинство идей, обсуждавшихся в то время, получили своё развитие в нейтринных теле-

скопах уже в наше время. Это будет обсуждаться ниже в разделе 3 данной статьи.

На тот момент верх взял первый подход — один оптический модуль на базе одного крупногабаритного фотодетектора. Данный подход в свою очередь разделился на две ветви. Первая из них — это классические фотоумножители, в которых используется диодная система для умножения фотоэлектронов. Сегодня такие фотоумножители стали называть "динодные ФЭУ" ("Dynode PMT").

Альтернативный же подход заключался в использовании других методов умножения фотоэлектронов — микроканальных пластин, полупроводниковых диодов с внутренним усилением и без усиления, работающих на прострел диодов и т.д.

### 3. Детекторы фотонов нейтринных телескопов первого поколения

#### 3.1. Детекторы фотонов нейтринного телескопа НТ-200

На первых стадиях развития нейтринных телескопов в фотоумножителях использовалась жалюзийная диодная система, ярким примером служит фотоумножитель R2018 [7] с фотокатодом размером 40 см, разработанный для первых подводных экспериментов DUMAND (Deep Underwater Muon And Neutrino Detector) [8] вблизи Гавайских островов в Тихом океане.

Практически одновременно с американскими работами в Тихом океане начались работы в данном направлении и в СССР. А.Е. Чудаков предложил создавать глубоководный нейтринный телескоп на озере Байкал, провидчески указав на приемлемую глубину и прозрачность воды озера и наличие в течение 1,5 месяцев надёжного ледового покрова, позволяющего вести монтажные работы при постанковке, сборке и тестировании элементов нейтринного телескопа.

В 1983 году Г. ван Аллер с сотрудниками из Philips Laboratories предложили идею создания крупногабаритного гибридного фотодетектора для глубоководных нейтринных телескопов на базе электронно-оптического предусилителя [9]. В этом гибридном фотодетекторе фотоэлектрон с фотокатода большой площади ускоряется разностью потенциалов 20–30 кВ, попадает в тонкий люминесцентный экран малого размера и производит вспышки света, которые регистрируются малогабаритным фотоумножителем традиционного типа. Такой подход позволяет достичь хороших временных и амплитудных характеристик гибридного фотодетектора. В 1986 г. Г. ван Аллер с сотрудниками разработали уже полноценный гибридный фотоумножитель со сферическим фотокатодом диаметром 35 см XR2600 [10].

Следует отметить, что подобная идея выдвигалась и ранее, например, А.Е. Чудаковым в 1950-е годы [11]. Д. Винн и К. Руббиа выдвигали схожую идею создания большого бочкообразного гибридного фотодетектора [12].

В 1984 году в ИЯИ РАН совместно с ОКБ КАТОД г. Новосибирска началась разработка отечественного крупногабаритного гибридного фотоумножителя КВА-ЗАР-370. Настоящая статья публикуется в год сорокалетия этого знаменательного события, поэтому уделим чуть большее внимания упомянутому детектору фото-

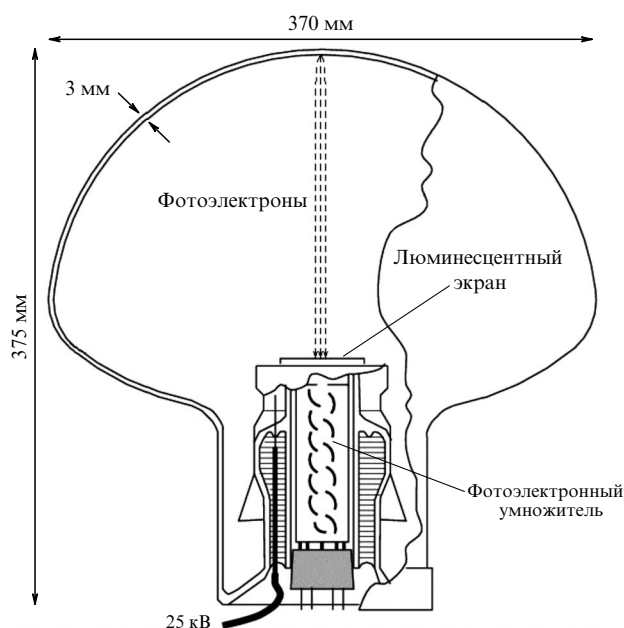


Рис. 1. Гибридный детектор фотонов КВАЗАР-370 [13–15].

нов. Сначала на прототипах были оптимизированы люминесцентные экраны и другие конструкционные элементы. Проведены тщательные расчёты электронной оптики фотоумножителя. В результате расчётов оптимизирована форма стеклооболочки и анодного узла для достижения максимально возможного сбора фотоэлектронов и наилучшего временного разрешения.

На рисунке 1 показан эскиз детектора фотонов КВАЗАР-370 [13–15], который был разработан нами специально для первого в мире глубоководного нейтринного телескопа НТ-200 [16] на озере Байкал. Данный детектор фотонов является гибридным вакуумным фотодетектором, состоящим из электронно-оптического преобразователя света с полусферическим фотокатодом диаметром 37 см и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) классического типа с фотокатодом малого диаметра (~ 3 см). Форма стеклооболочки фотодетектора оптимизирована для минимизации разности времён пролёта фотоэлектронов по фотокатоду. Такой подход позволяет получить прекрасные временные и амплитудные параметры всего фотодетектора в целом: разброс времени пролёта фотоэлектронов при однофотозлектронной засветке фотокатода составляет 1,8–2,2 нс (FWHM) и однофотозлектронное разрешение 70–80 % (FWHM). Разность времён пролёта фотоэлектронов по фотокатоду меньше 1 нс. Конструкция детектора фотонов КВАЗАР-370 обеспечивает его чувствительность в телесном угле ~ 2π, при этом уровень неоднородности анодной чувствительности фотодетектора по всему чувствительному полю фотокатода не превышает 10%. Было налажено производство фотоумножителей КВАЗАР-370 малыми сериями в ОКБ КАТОД г. Новосибирска.

На базе детектора фотонов КВАЗАР-370 в сотрудничестве с рядом отечественных предприятий и институтов был разработан и создан оптический модуль [15] Байкальского глубоководного нейтринного телескопа НТ-200. На рисунке 2 представлен эскиз оптического модуля. Защитный стеклянный корпус модуля выполнен из боросиликатного безкальевого стекла С-49-1. Такой глу-

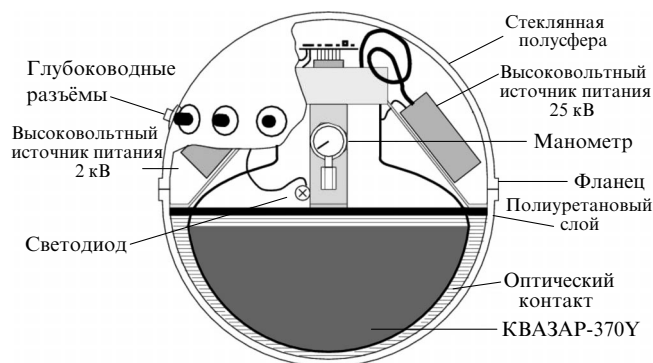


Рис. 2. Оптический модуль нейтринного телескопа НТ-200 [15].

боководный защитный корпус используется для всех глубоководных модулей нейтринного телескопа НТ-200: как оптических модулей, так и модулей электроники. Оптический контакт детектора фотонов КВАЗАР-370 с защитной стеклянной сферой осуществляется при помощи химически чистого глицерина или оптического геля. Нейтринный телескоп НТ-200 состоит из 192 оптических модулей.

В целях улучшения параметров детектора фотонов КВАЗАР-370 были разработаны и созданы ряд его модификаций. Такие модификации связаны, в первую очередь, с использованием новых сцинтилляционных материалов в составе люминесцентного экрана детектора фотонов КВАЗАР-370.

Наилучшие результаты на сегодняшний день достигаются в модификациях с сцинтилляторами YAP, SBO и LSO (КВАЗАР-370YAP, КВАЗАР-370SBO, КВАЗАР-370LSO соответственно) [17–19]: временное разрешение при однофотозлектронной засветке ~ 1–1,2 нс (FWHM) и однофотозлектронное разрешение ~ 30–40 % (FWHM). Эти детекторы фотонов наиболее полно на сегодняшний день отвечают требованиям к фотодетекторам для нейтринных телескопов следующего поколения. На рисунке 3 показаны зависимости разброса времён пролёта фотоэлектронов при однофотозлектронной засветке фотокатода от ускоряющего напряжения для различных модификаций детектора фотонов КВАЗАР-370. Для детектора фотонов КВАЗАР-370LSO с люминесцентным экраном на базе сцинтиллятора LSO разброс времён пролёта фотоэлектронов составляет < 1 нс (FWHM).

Зарядовое распределение многофотозлектронных импульсов фотодетектора КВАЗАР-370LSO показано на рис. 4. Разрешение однофотозлектронного пика лучше 30 %, что позволяет получить прекрасное разделение пиков от одного, двух, трёх и т.д. фотоэлектронов в зарядовом спектре.

Временное разрешение вакуумных фотодетекторов играет важную роль в нейтринных экспериментах. Основными факторами, влияющими на точность временных измерений с вакуумными фотодетекторами, являются предимпульсы, задержанные импульсы и послеприимпульсы. Задержанные импульсы — те же основные импульсы, но задержанные на примерно двойное время пролёта фотоэлектрона в катодной камере. В этом их принципиальное отличие от послеприимпульсов. Возникновение задержанных импульсов объясняется обратным, упругим или неупругим, отражением фотоэлектронов от первого динода, фокусирующих электродов или элемен-

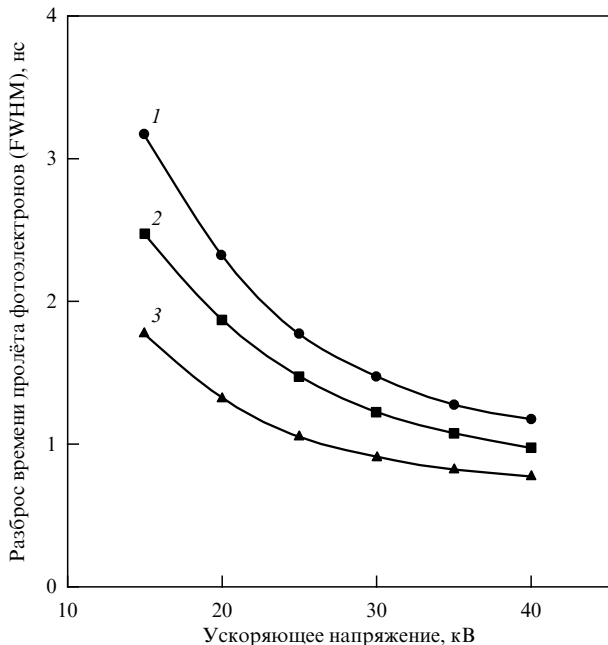


Рис. 3. Зависимость разброса времён пролёта фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода детектора фотонов КВАЗАР-370 от ускоряющего напряжения [17–19].

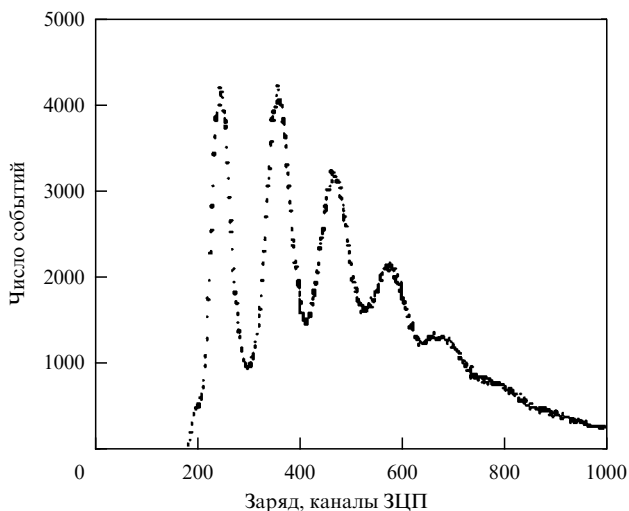


Рис. 4. Зарядовое распределение многофотоэлектронных импульсов детектора фотонов КВАЗАР-370 [18].

тов конструкции ФЭУ. Вероятность появления задержанных импульсов не превышает  $\sim 3-4\%$ . Такие же задержанные события наблюдаются в фотоумножителях с микроканальными пластинами (ФЭУМКП) и гибридных вакуумных фотодетекторах. В детекторах фотонов КВАЗАР-370 предимпульсы практически отсутствуют, а вклад задержанных импульсов и послеимпульсов существенно подавлен в силу конструктивных особенностей детектора.

Нужно отметить, что временные и амплитудные характеристики фотоумножителей КВАЗАР-370 до сих пор остаются рекордными. Практически отсутствуют предимпульсы, а вероятности появления задержанных импульсов и послеимпульсов существенно подавлены по сравнению с ФЭУ классического типа. Высокая однород-

ность анодной чувствительности этих детекторов фотонов достигается в широком телесном угле ( $\sim 2\pi$ ). Наконец, характеристики детекторов фотонов КВАЗАР-370 не зависят от магнитного поля Земли. Все вышеперечисленное делает такие детекторы фотонов наиболее близкими к идеальному фотодетектору [17, 19] для гигантских нейтринных детекторов следующего поколения, активно обсуждающихся в последнее время.

### 3.2. Детекторы фотонов нейтринного телескопа AMANDA

Начиная с середины 1990-х годов в крупногабаритных вакуумных фотоумножителях стали применяться более эффективные динодные системы с линейной фокусировкой и первым динодом большой площади, решив проблему изохронности траекторий фотоэлектронов и вторичных электронов в умножительной системе, что позволило существенно улучшить основные параметры крупногабаритных вакуумных фотоумножителей. Это в свою очередь послужило толчком к развитию работ по созданию нейтринных телескопов в морской воде и антарктическом льду.

В начале 1990-х годов начались работы по созданию нейтринного телескопа глубоко во льду на Южном Полюсе — AMANDA (Antarctic Muon AND neutrino Array) [20, 21]. В оптических модулях данного телескопа применялись восьмидюймовые фотоумножители серии ET9350 производства ET Enterprises (Великобритания) и R5912 производства Hamamatsu Photonics. По тем временам это были пионерские разработки. Впервые в крупногабаритных фотоумножителях с полусферическим фотокатодом была применена динодная система с линейной фокусировкой и с первым динодом большой площади. При этом удалось достичь приемлемого однофотоэлектронного отклика и хорошего временного разрешения. Отношение пик/долина зарядового спектра однофотоэлектронных импульсов составляло в среднем  $\sim 2$ , а временное разрешение — 3 нс. Фотокатод фотоумножителей — традиционный бищелочной фотокатод ( $K_2CsSb$ ) с максимумом чувствительности на длинах волн 400 нм с квантовой эффективностью  $\sim 25\%$ . Скорость счёта импульсов темнового тока не превышала  $10^4 \text{ с}^{-1}$  при  $20^\circ\text{C}$ .

Из-за высокой прозрачности глубинного антарктического льда в ближней ультрафиолетовой области спектра и характера спектра черенковского излучения при использовании таких фотокатодов большая часть черенковского излучения остаётся не зарегистрированной фотоумножителями. Для увеличения эффективности регистрации черенковского излучения нами были разработаны тонкоплёночные сместители спектра [22] для оптических модулей телескопа AMANDA. При применении таких плёнок эффективность регистрации черенковского излучения оптическими модулями увеличивалась в  $\sim 1,5$  раза.

### 3.3. Детекторы фотонов нейтринного телескопа ANTARES

Фотоумножители ET9350 и R5912 послужили хорошей платформой для следующей разработки крупногабаритных фотоумножителей — десятидюймового фотоумножителя R7081-02, ставшего основой оптических модулей нейтринного телескопа ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch)

[23, 24] в Средиземном море недалеко от Тулона, Франция. Фотокатод фотоумножителя пока ещё также традиционный бищелочной с теми же параметрами, как у R5912 и ET9350.

Однофотоэлектронный отклик несколько лучше с отношением пик/долина зарядового спектра однофотоэлектронных импульсов  $\sim 2-2,5$ . Разброс времени пролёта фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода составляет  $\sim 3$  нс (FWHM).

Число крупногабаритных фотоумножителей в нейтринных телескопах первого поколения составляло 192 в NT-200, 677 в AMANDA и 900 в ANTARES. Что касается фотоумножителей, нейтринный телескоп ANTARES послужил неким связующим звеном между нейтринными телескопами первого и второго поколений, так как платформа фотоумножителя R7081 стала практически основой фотодетекторов нейтринных телескопов второго поколения.

#### 4. Детекторы фотонов нейтринных телескопов второго поколения

##### 4.1. Детекторы фотонов нейтринных телескопов ICESUBE и BaikalGVD

В настоящее время работают два нейтринных телескопа второго поколения — IceCube на Южном Полосе [25–27] и GVD на озере Байкал [28, 29]. В этих телескопах число детекторов фотонов составляет уже несколько тысяч, например, в телескопе IceCube — 5160 фотоумножителей. В обоих телескопах детекторами фотонов являются фотоумножители R7801 того же типа, что и в ANTARES. Только в IceCube используется модификация такого фотоумножителя R7801-20 с традиционным ещё бищелочным фотокатодом, а в GVD применяется версия R7801-100 уже с так называемым супербищелочным фотокатодом с высокой чувствительностью.

На рисунке 5 представлен фотоумножитель R7801-100, подготовленный для использования в прототипах ББНТ (Баканского большого нейтринного телескопа) [30]. В таких фотокатодах квантовая эффективность в максимуме чувствительности превышает 35%. Есть образцы данных фотоумножителей, у которых максимальная квантовая эффективность фотокатода превышает даже 40%. Следует отметить, что чувствительность фотоумножителей достигает максимума на длинах волн 360–380 нм, что ещё более увеличивает их чувствительность к черенковскому свету. На рисунке 6 показана типичная зависимость квантовой эффективности фотокатода фотоумножителя R7801-100, измеренная для образцов прототипов ББНТ [30].

На рисунках 7 и 8 показаны типовые распределения зарядов и распределение времён пролёта фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода фотоумножителей R7801-100 [31]. Как видно из рисунков, фотоумножитель характеризуется хорошим однофотоэлектронным откликом — отношение пик/долина  $P/V > 3$ , разрешение однофотоэлектронного пика составляет  $\sim 50\%$  (FWHM). Распределение времён пролёта фотоэлектронов составляет  $\sim 2,2$  нс (FWHM). Вероятность появления послеимпульсов — не более 4% на фотоэлектрон. Скорость счёта импульсов темнового тока не превышает  $3 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  при температуре 20°C.



Рис. 5. Фотография 10-дюймового фотоумножителя R7801-100 [30].

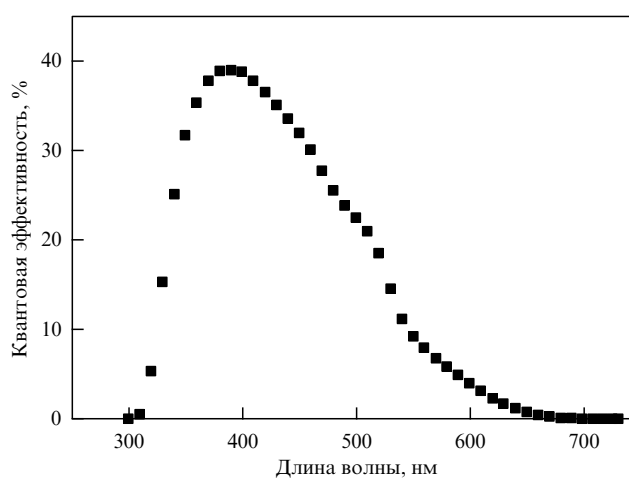


Рис. 6. Зависимость квантовой эффективности фотокатода фотоумножителя R7801 от длины волны [30].

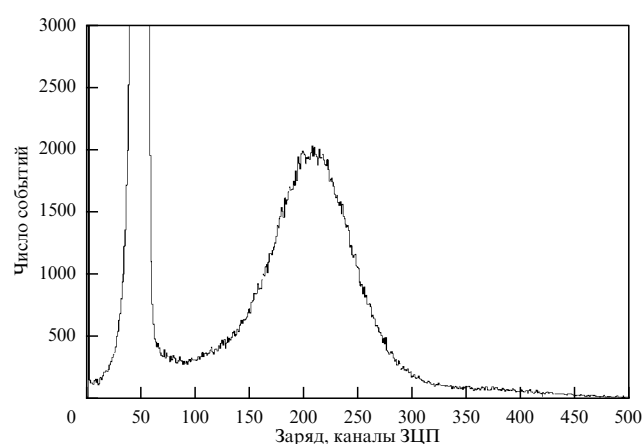


Рис. 7. Зарядовое распределение однофотоэлектронных импульсов при однофотоэлектронной засветке фотокатода фотоумножителя R7801-100 [31].

##### 4.2. Детекторы фотонов нейтринного телескопа KM3NeT

В настоящее время ведутся активные работы по созданию нейтринного телескопа KM3NeT [32], который по масштабам также можно отнести ко второму поколению телескопов. Этот телескоп можно смело назвать наследником телескопа ANTARES. Однако, в отличие от пред-



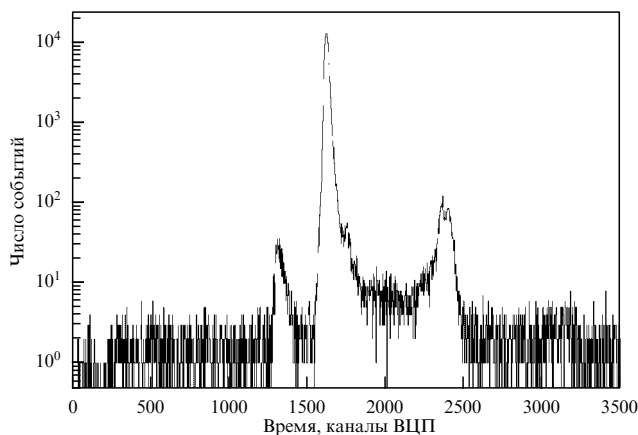


Рис. 8. Распределение времён пролёта фотоэлектронов при однофотонной засветке фотокатода фотоумножителя R7801-100 [31].



Рис. 9. Оптический модуль нейтринного телескопа KM3NeT [33].

шественника, в KM3NeT взят курс на использование оптического модуля на базе большого количества фотоумножителей малого размера [33], например, R14374 (Hamamatsu Photonics) со стеклооболочкой диаметром 76 мм (~ 3 дюйма). Один оптический модуль состоит из 31 такого фотоумножителя. На рисунке 9 показан оптический модуль нейтринного телескопа KM3NeT.

Несмотря на сложности работы с большим количеством фотоумножителей в одном оптическом модуле, такой подход обеспечивает чувствительность модуля практически в телесном угле 4π. Немного подробнее о малогабаритных фотоумножителях расскажем в разделе 5, посвящённом нейтринным телескопам следующего поколения.

И опять, как и в случае с его предшественником, телескоп KM3NeT создаёт связь поколений телескопов. На этот раз связь между нейтринными телескопами второго поколения и телескопами следующего поколения основана на малогабаритных фотоумножителях.

## 5. Детекторы фотонов нейтринных телескопов следующего поколения

Активные работы ведутся сегодня по проектированию нейтринных телескопов следующего поколения с эффек-

тивными объёмами, на порядок превышающими объёмы существующих телескопов. Это проект расширения нейтринного телескопа на Южном Полюсе — IceCube-Gen2 [34]; проект создания нейтринного телескопа в северной части Тихого океана у берегов Британской Колумбии — P-ONE [35]; и наконец, проект гигантского мультикубокилометрового нейтринного телескопа TRIDENT [36] в Южно-Китайском море. Интересно, что во всех перечисленных проектах отдаётся предпочтение концепции оптического модуля на основе большого количества малогабаритных фотоумножителей в одном оптическом модуле.

В проекте IceCube-Gen2 одновременно рассматриваются несколько вариантов оптических модулей с трёх-, четырёх- и пятидюймовыми фотоумножителями [37]. В то же время в проекте продолжают разрабатывать оптический модуль с 10-дюймовым уже упоминавшимся фотоумножителем R7801-100 и оптический модуль с двумя восьмидюймовыми фотоумножителями [38]. Общее количество малогабаритных фотоумножителей в проекте может составить 160–180 тыс. штук.

В проекте нейтринного телескопа P-ONE разрабатывают оптический модуль [39], схожий по конструкции с оптическим модулем телескопа KM3NeT, с 31 фотоумножителем R14374. Общее количество фотоумножителей в проекте довольно скромное на фоне других проектов — 22400 штук.

Рассматриваемые в качестве кандидатов малогабаритные фотоумножители (например, R14374, R15458-02, XP72B20, СФЕРА и др.) снабжены традиционными бишелочными фотокатодами с квантовыми эффективностями 25–30 % в максимуме чувствительности. На фотографии на рис. 10 показаны фотоумножители R14374, XP72B20 и СФЕРА.

Фотоумножитель СФЕРА [40] разрабатывался в ИЯИ РАН совместно с ООО МЭЛЗ-ФЭУ для использования в черенковских и сцинтилляционных детекторах нейтринных экспериментов.

Фотоумножители СФЕРА обладают параметрами, не уступающими параметрам других фотоумножителей, хорошим однофотонным откликом и приемлемым временным разрешением. Отношение пик/долина зарядового распределения однофотонных импульсов составляет  $P/V = 3,5$ . Распределение времени пролёта фотоэлектронов характеризуется шириной 2,5 нс (FWHM). Скорость счёта импульсов темнового тока не превышает величину  $400 \text{ с}^{-1}$  при комнатной температуре. Квантовая эффективность фотокатодов опытных образцов фотоумножителя СФЕРА в максимуме чувствительности на длине волны 390 нм составляет ~ 28–33 %. К сожалению, надо признать, что существуют большие проблемы с массовым производством этого фотоумножителя.

Как видим, здесь есть ещё большой потенциал в увеличении чувствительности трёхдюймовых фотоумножителей к черенковскому свету в случае применения супербишелочного фотокатода.

За последние несколько лет в Китае стал активно разрабатываться проект нейтринного телескопа TRIDENT [36, 41], который планируется разместить в Южно-Китайском море. В этом проекте выдвигается концепция гибридного оптического модуля, включающего в себя 31 трёхдюймовый вакуумный фотоумножитель XP72B20 (HZC/NNVT) и 20 сборок кремниевых фотоумножителей PA3325-WB-0808 (КЕТЕК) с чувствительной площадью



Рис. 10. Фотография трёхдвоймовых фотоумножителей. Слева направо: XP72B20, R14374 и СФЕРА.



Рис. 11. Оптический модуль проекта TRIDENT [41].

7,2 см<sup>2</sup> каждая. Общий вид оптического модуля представлен на рис. 11 [41]. Всего планируется установить 24220 таких гибридных оптических модулей. Таким образом, при осуществлении данного проекта в этом нейтринном телескопе будет работать более 750 тыс. трёхдвоймовых фотоумножителей. С учётом того что каждая сборка кремниевых фотоумножителей состоит из 64 отдельных кремниевых фотоумножителей с чувствительной площадью 3 × 3 мм<sup>2</sup>, общее число кремниевых фотоумножителей в нейтринном телескопе превысит 3 млн 100 тыс. штук. Как уже упоминалось ранее, изобретение кремниевых фотоумножителей было во многом инспирировано началом разработок детекторов фотонов для глубоководных нейтринных экспериментов. Вот такое замечательное возвращение кремниевых фотоумножителей в нейтринные телескопы!

## 6. Перспективы развития детекторов фотонов нейтринных телескопов

Мой учитель Александр Евгеньевич Чудаков, перефразируя Иммануила Канта, любил повторять, что "фо-

тоумножители — это вещь в себе". Тем самым он призывал глубоко изучать свойства фотоумножителей, что поможет разрабатывать более совершенные фотоумножители. Действительно, в детекторах фотонов сошлось много областей физики: физика твёрдого тела, физика поверхности, вакуумная физика и т.д. Практически у всех типов детекторов фотонов есть огромный потенциал для дальнейшего развития. Даже в традиционных, "динодных" фотоумножителях за последние 20 лет произошли революционные изменения. Например, разработка супербищелочного фотокатода, приведшая к резкому увеличению квантовой эффективности фотокатодов фотоумножителей в синей и ближней ультрафиолетовой области спектра до 40 %, а есть отдельные образцы с квантовой эффективностью до 50 %. А эта область спектра крайне важна для черенковских детекторов, коими нейтринные телескопы и являются. Уже в ближайшее время можно ожидать появления технологии производства "ультра-бищелочных фотокатодов" с квантовой эффективностью 50 % и более. Возможны прорывные достижения в разработках высокоэффективных монокристаллических фотокатодов, например, фотокатодов на основе InGaN с высокой чувствительностью к черенковскому излучению.

Более точные расчёты электронной оптики позволяют существенно улучшить спектротрические и временные параметры фотоумножителей. Пример появления нового восьмидвоймового фотоумножителя R14688-100 с временным разрешением  $\sim 1$  нс, что более чем в два раза лучше временного разрешения его предшественника R5912-100, служит наглядным подтверждением огромного потенциала в развитии фотоумножителей традиционного типа. Можно ещё добавить поиск новых, более эффективных, материалов для эмиттеров динодной системы, эффективное подавление обратного ионного тока (послеимпульсов) и т.д.

Все вышеприведённые доводы можно отнести и к малогабаритным фотоумножителям. До сих пор во всех оптических модулях, использующих малогабаритные фотоумножители, применяются фотоумножители с обычными бищелочными фотокатодами. Использование фотоумножителей с супербищелочными фотокатодами с высокой квантовой эффективностью позволит существенно улучшить чувствительность оптических модулей к черенковскому излучению.

Такие же многообещающие перспективы открываются и перед гибридными фотоумножителями, особенно в свете появления новых эффективных и быстродействующих неорганических сцинтилляторов. Всё это вкупе с дальнейшим совершенствованием электровакуумной технологии и технологии высоковольтных композитов позволит создать крупногабаритный гибридный вакуумный фотоумножитель, подобный детектору фотонов КВАЗАР-370, с временным разрешением  $\sim 100$  пс.

Огромный потенциал видится и в использовании кремниевых фотоумножителей в нейтринных телескопах. Как уже упоминалось выше, кремниевые фотоумножители своим появлением во многом обязаны нейтринным телескопам. Их возвращение в эту область можно только приветствовать. Очень интересно и полезно отслеживать, насколько "новые" и "старые" идеи в детектировании фотонов глубоко диалектически взаимосвязаны [42].

Отдельные слова нужно сказать о настоятельной необходимости возрождения разработок и массового про-

изводства фотоумножителей в России, как вакуумных, так и кремниевых. С сожалением приходится констатировать, что в настоящее время все попытки такого возрождения терпят неудачу. Особенно обидно, что это происходит в нашей стране — родине вакуумных и кремниевых фотоумножителей, а также первого глубоководного нейтринного телескопа.

## 7. Заключение

Детекторы фотонов после некоторого затишья 2000-х гг. сегодня снова бурно развиваются. Ярким примером этого являются разработки детекторов фотонов для нейтринных телескопов.

Жизненно необходимо возродить разработки и массовое производство вакуумных и кремниевых фотоумножителей в России.

Очень важно в эксперименте не довольствоваться только тем, что есть, что доступно, а стремиться разрабатывать новые более совершенные детекторы, тогда и эксперимент будет более чувствительным и более совершенным, будет открывать новые горизонты в понимании мира.

Закончим словами Марселя Пруста: "Вместо того чтобы искать новые пейзажи, развивайте новые глаза". Детекторы фотонов и есть глаза нейтринных телескопов. Развивайте эти глаза, и вы обязательно увидите новые, немислимые ранее пейзажи!

Автор выражает свою искреннюю признательность В.Ч. Лубсандоржиевой и Н.А. Ушакову за многочисленные ценные замечания и помощь в подготовке статьи.

## Список литературы

- Кубецкий Л А, Авторское свидетельство № 24040, приоритет 04.08.1930 (1930)
- Гасанов А Г и др. *Письма в ЖТФ* **14** 706 (1988); Gasanov A G et al. *Sov. Tech. Phys. Lett.* **14** 313 (1988)
- Roberts A, in *Proc. of the 1978 DUMAND Summer Workshop, La Jolla, Calif., July 24 – September 2, 1978* Vol. 2 (Ed. A Roberts) (La Jolla, CA: Scripps Institution of Oceanography, 1979) p. 103
- Lescovar B, in *Proc. of the 1980 DUMAND Signal Processing Workshop* (Ed. A Roberts) (Honolulu, HI: Hawaii DUMAND Center, Univ. of Hawaii, 1980) p. 21
- Learned J G, Roberts A, in *Proc. of the DUMAND Signal Processing Workshop* (Ed. A Roberts) (Honolulu, HI: Hawaii DUMAND Center, Univ. of Hawaii, 1982) p. 57
- Lubsandorzhev B K *ЭЧАЯ* **47** 1758 (2016); *Phys. Part. Nucl.* **47** 957 (2016)
- Kume H, Kyushima H, Ohashi Y, in *Proc. of the DUMAND Optical Module Workshop* (Eds S Tanaka, A Yamaguchi) (Sendai: Tohoku Univ., 1990) p. 1
- Learned J et al. "DUMAND II Proposal", DUMAND Center Report HDC-2-88 (Honolulu, HI: DUMAND Center, Univ. of Hawaii, 1988)
- van Aller G et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **30** 469 (1983)
- van Aller G et al. *Helv. Phys. Acta* **59** 1119 (1986)
- Чудаков А Е, Частное сообщение
- Winn D R *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **36** 128 (1989)
- Багдуйев Р И и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **57** (4) 135 (1993)
- Bagdueva R I et al., in *Trends in Astroparticle-Physics* (Teubner Texte zur Physik, Vol. 28, Ed. P C Bosetti) (Wiesbaden: Springer Fachmedien, 1994) p. 132, [https://doi.org/10.1007/978-3-663-01466-9\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-663-01466-9_12)
- Bagdueva R I et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **420** 138 (1999)
- Belolapnikov I A et al. *Astropart. Phys.* **7** 263 (1997)
- Lubsandorzhev B K *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **595** 58 (2008)
- Lubsandorzhev B K, Combettes B *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 1333 (2008)
- Lubsandorzhev B K *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **602** 201 (2009)
- Halzen F et al. (The AMANDA Collab.) *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **77** 474 (1999)
- Andres E et al. *Astropart. Phys.* **13** 1 (2000)
- Лубсандоржиев Б К, Шпиринг К К, Кузьмичев Л А *Приборы и техника эксперимента* (6) 13 (2002); Lubsandorzhev B K, Spiering C, Kuzmichev L A *Instrum. Exp. Tech.* **45** 742 (2002)
- Amram P et al. (The ANTARES Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **484** 369 (2002)
- Hallewell G D (Representing the ANTARES Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **595** 51 (2008)
- Achterberg A et al. (IceCube Collab.) *Astropart. Phys.* **26** 155 (2006)
- Abassi R et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **618** 139 (2010)
- Aarsten M G et al. *JINST* **12** P03012 (2017)
- Аврорин А В и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **83** 1016 (2019); Avrorin A V et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **83** 921 (2019)
- Аврорин А В и др. *Письма в ЭЧАЯ* **13** 1143 (2016); Avrorin A V et al. *Phys. Part. Nuclei Lett.* **13** 737 (2016)
- Ушаков Н А "Разработка и создание полутонного прототипа Баканского большого нейтринного телескопа", Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М.: ИЯИ РАН, 2022)
- Ushakov N A et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **1787** 012037 (2021) <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1787/1/012037>
- Adrián-Martínez S et al. *J. Phys. G* **43** 084001 (2016)
- Leonora E, KM3NeT Collab. *Nucl. Part. Phys. Proc.* **306–308** 139 (2019)
- Abassi R *PoS ICRC2023* 994 (2023)
- Agostini M et al. *Nat. Astron.* **4** 913 (2020)
- Ye Z P et al. *Nat. Astron.* **7** 1497 (2023)
- Schlüter B, Abassi R et al. (IceCube Collab.) *PoS ICRC2023* 984 (2023)
- Basu V et al., Abassi R et al. (IceCube-Gen2 Collab.) *PoS ICRC2021* 1062 (2021)
- Resconi E et al. *PoS ICRC2021* 024 (2021)
- Lubsandorzhev S et al. *PoS ICRC2019* 948 (2019)
- Hu F, Li Z, Xu D *PoS ICRC2021* 1043 (2021); arxiv:2108.05515
- Lubsandorzhev B K *PoS PhotoDet2015* 040 (2015)

## Photon detectors for neutrino telescopes

**B.K. Lubsandorzhev**

*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, prosp. 60-letiya Oktyabrya 7a, 117312 Moscow, Russian Federation*  
E-mail: lubsand@rambler.ru

The tremendous success of neutrino telescopes witnessed today is primarily due to their 'workhorses,' photon detectors. Photon detectors used in neutrino telescopes are briefly reviewed, and various approaches to the development of these devices for suchlike applications are described. Prospects for the creation of photon detectors for next-generation neutrino telescopes are discussed.

**Keywords:** neutrinos, neutrino telescopes, photon detectors, photomultipliers

PACS numbers: **29.40. – n**, 85.60. Ha, **95.55. – n**

Bibliography — 42 references

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **194** (4) 446–453 (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.04.039602>

Received 21 April 2023

*Physics – Uspekhi* **67** (4) (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.04.039602>