

## Разработка программного пакета NTSim для моделирования нейтринных телескопов

А. С. Белякова<sup>1,\*</sup>, С. И. Завьялов<sup>2,3,†</sup>, Д. В. Зубченко<sup>2‡</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт, Физтех-школа физики и исследований имени Ландау  
Россия, 141701, Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра физики элементарных частиц  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>3</sup>Объединенный институт ядерных исследований  
Россия, 141980, Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

(Поступила в редакцию 09.06.2024; подписана в печать 03.10.2024)

Эксперименты, нацеленные на исследование нейтрино высоких энергий, играют особую роль в решении фундаментальных проблем современной физики элементарных частиц. Моделирование различных физических процессов с расчетом отклика детектора является неотъемлемой частью получения результатов. Для данных целей разрабатывается NTSim — программный комплекс для моделирования нейтринных телескопов, таких как IceCube, KM3NeT/ARCA, Baikal-GVD, HUNT и других, запланированных в будущем, с основным фокусом на Baikal-GVD. В данной работе дается общее описание цепочки моделирования NTSim и его основных модулей.

PACS: 07.05.Tr; 02.70.Tt

УДК: 1683, 3937.

Ключевые слова: нейтрино, нейтринная астрономия, моделирование, Geant4, Baikal-GVD, NTSim.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия происходит бурное развитие нейтринной астрономии как самостоятельной области фундаментальных исследований, чему поспособствовали регистрация нейтрино от сверхновой SN 1987A [1–5] в 1987 г. и открытие диффузного потока астрофизических нейтрино коллаборацией IceCube [6] в 2013 г. Основные задачи нейтринной астрономии в области физики высоких энергий включают в себя измерение потока высокоэнергетических астрофизических нейтрино и определение их источников.

Из-за того, что нейтрино слабо взаимодействуют с веществом, для их наблюдения требуются нейтринные телескопы большого объема. Для анализа данных, получаемых с уже работающих телескопов, а также для проектирования планируемых в будущем детекторов используются различные методы моделирования. Каждый современный эксперимент обладает собственным программным обеспечением.

Программный комплекс Neutrino Telescope Simulation (NTSim) [7] разрабатывается как общедоступный и универсальный пакет, с помощью которого пользователь сможет производить вычисления для нейтринных телескопов различных конфигураций, что позволит оперативно оценивать отклик детекторов на нейтринные события, а также производить оценки эффективности разного типа детекторов. На момент начала разработки NTSim подобных решений представлено не было, каждая коллаборация использовала свое частично закрытое для внешнего пользователя

программное обеспечение. Только в последнее время наблюдается создание открытых платформ для моделирования нейтринных телескопов, таких как NTSim и Prometheus [8]. В отличие от Prometheus, который представляет собой комплексную систему доступных на данный момент программных пакетов от различных коллабораций, в NTSim используются собственные решения для ряда ключевых элементов цепочки моделирования. Из них можно выделить собственный нейтринный генератор на основе пакетов `nupropagator` [9] и `nudisxs` [10], программный пакет `g4camp` [11] для протаскивания частиц в среде телескопа на основе Geant4 [12–14], метод параметризации индивидуальных электромагнитных каскадов высоких энергий и новый численный метод описания распространения света в прозрачной среде [15, 16].

Для создания такого программного комплекса была разработана модульная система, в которой каждый модуль отвечает за индивидуальную задачу и может работать обособленно. В данной работе описаны основные модули и методы, используемые в NTSim.

### 1. BAIKAL-GVD

Нейтринный телескоп Baikal-GVD [17, 18], инструментальный объем которого на данный момент составляет приблизительно  $0.6 \text{ км}^3$ , находится в озере Байкал. Независимой структурной единицей телескопа является кластер, состоящий из восьми струн, семь из которых расположены в вершинах правильного семиугольника с длиной стороны 60 м, а одна в центре. На струнах установлено по 36 оптических модулей (ОМ) на расстоянии 15 м друг от друга, таким образом, высота кластера составляет 525 м. Схематичное изображение установки представлено на рис. 1, в настоящий

\* [beliakova.as@phystech.edu](mailto:beliakova.as@phystech.edu)

† [zavialov.si18@physics.msu.ru](mailto:zavialov.si18@physics.msu.ru)

‡ [zubchenko.dv21@physics.msu.ru](mailto:zubchenko.dv21@physics.msu.ru)

момент установлено 14 кластеров.

ОМ Baikal-GVD состоит из направленного вниз фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), низковольтного источника питания и дополнительной электроники, помещенных в герметичную сферу. Кластеры Baikal-GVD работают независимо друг от друга, поэтому возможно проводить однокластерный или многокластерный анализ.

Геометрия Baikal-GVD является основной в NTSim, однако программный комплекс может быть использован и для других нейтринных телескопов.

## 2. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС NTSIM

Структура NTSim основана на модульном принципе и представляет собой набор независимых модулей, благодаря чему пользователь, без глубокого погружения во внутреннюю структуру, имеет возможность интегрировать собственные модули, оптимизированные под конкретную задачу.

Каждый модуль NTSim включает в себя два обязательных подмодуля: `Base` — класс, определяющий общую структуру модуля через абстрактные методы и позволяющий задавать общие параметры для классов модуля; `Factory` — класс, отвечающий за интеграцию отдельных реализаций каждого модуля в общую цепочку моделирования.

Базовыми объектами системы являются: `gParticles`, `gTracks`, `gPhotons`, `gHits` и `gEvent`, каждый из которых представляет собой структуру данных о частицах, треках, фотонах, срабатываниях ОМ и о событии в целом, соответственно. Объекты `gParticles` и `gTracks` содержат информацию о типе моделируемой частицы, ее энергии, положении, времени генерации и направлении движения. Объект `gPhotons` содержит информацию об образовавшихся фотонах, такую как их положение, направление движения, время прихода, а также о шаге рассеяния и длине волны. `gHits` содержит сведения о сработавших оптических модулях, времени их срабатывания и среднем количестве возникших фотоэлектронов. Наконец, `gEvent` включает в себя все упомянутые объекты, относящиеся к конкретному событию, и предоставляет к ним доступ всем модулям NTSim.

Общая структура NTSim представлена на рис. 2. `PrimaryGenerator` инициализирует цепочку моделирования, образуя данные о первичных частицах, в то время как `ParticlePropagator` отвечает за распространение частиц в среде детектора. Генерация черенковских фотонов осуществляется в модуле `CherGen`, тогда как их распространение происходит в `MCPhotonTransporter`. Определением срабатывания ОМ занимается модуль `RayTracer`. На схеме также представлен ряд вспомогательных модулей, обеспечивающих внутреннюю работу NTSim. Запись результатов моделирования осуществляется модулем

`Writer`, который вносит данные в HDF5-файл. Функционал модуля позволяет пользователю выбирать необходимую для записи информацию. Запуск моделирования может быть осуществлен с помощью графического интерфейса GUI, а для визуализации событий используется мультифункциональный интерфейс VIOLINE.

В качестве примера использования на рис. 3, 4 представлены два типичных события для нейтринной астрономии: (i) трекоподобное, образующееся в результате взаимодействия мюонного нейтрино через заряженный ток, и (ii) каскадоподобное событие, возникающее при взаимодействии нейтрино любого флейвора по каналу нейтрального тока и при взаимодействии электронного и тау-нейтрино через заряженный ток.

## 3. ГЕНЕРАТОРЫ ПЕРВИЧНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Как было упомянуто в предыдущем разделе, модуль `PrimaryGenerator` необходим для инициализации всей цепочки моделирования. Он отвечает за генерацию первичной вершины взаимодействия. В зависимости от выбранного генератора пользователь может задать тип частицы, ее начальную энергию, положение и вектор направления. Кроме того, точка генерации события может быть случайно разыграна в заданном объеме. Стандартный объем генерации в NTSim представляет собой два соосных цилиндра, соответствующих земной толщине дна озера Байкал и водяному столбу над ним. Информация от этого модуля передается в объекты `gParticles` в случае генерации частицы и `gPhotons` при генерации фотонов. `PrimaryGenerator` представлен в нескольких реализациях, описанных далее.

### 3.1. NuGen

Для моделирования нейтринных событий в NTSim используется модуль NuGen, включающий в себя два программных пакета: `nupropagator` и `nudisxs`, находящихся в общественном доступе. Так как NTSim предполагает моделирование процессов с нейтрино высоких энергий (более 100 ГэВ), преобладающим процессом взаимодействия является глубоко неупругое рассеяние на нуклонах [19]. При таких энергиях нейтрино способны различать внутреннюю структуру нуклонов и взаимодействовать непосредственно с составляющими адронов — партонами. Распределение партонов внутри нуклонов описывается с помощью партоновых функций распределения (Parton Distribution Functions, PDFs) [19, 20]. Сечение взаимодействия нейтрино с нуклонами является доминирующим на несколько порядков по сравнению с их рассеянием на электронах практически во всем диапазоне энергий, интересных для нейтринной астрономии. Исключение составляет узкий пик около 6.33 ПэВ, соответствующий резонансному рассеянию электронных антиней-

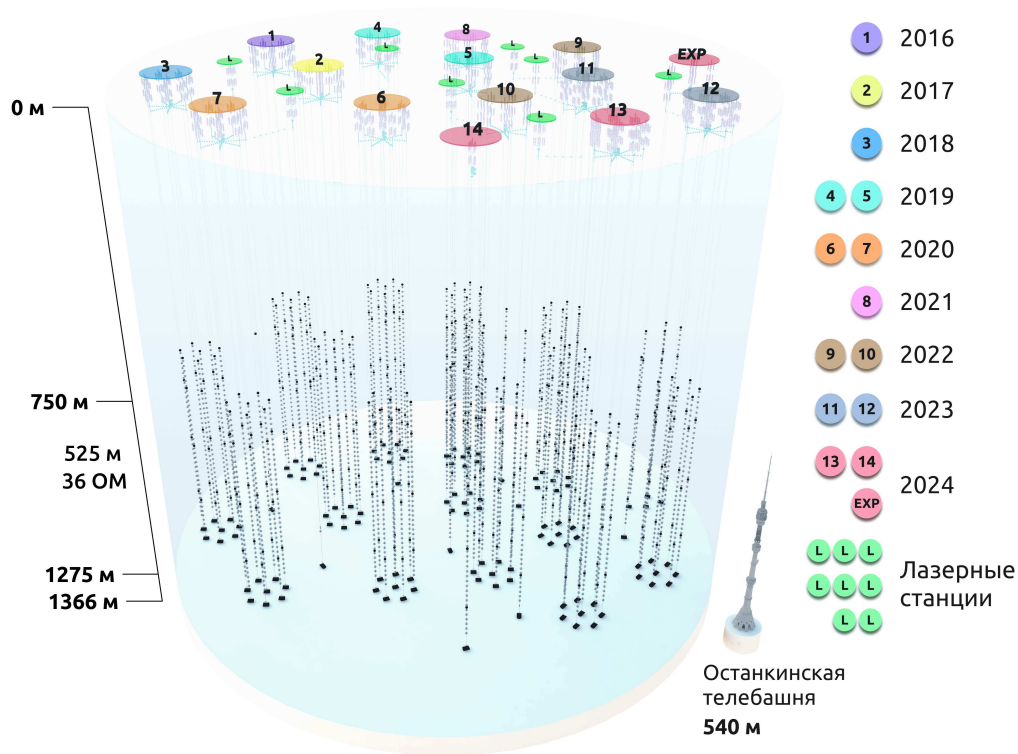


Рис. 1. Схематичное изображение установки Baikal-GVD

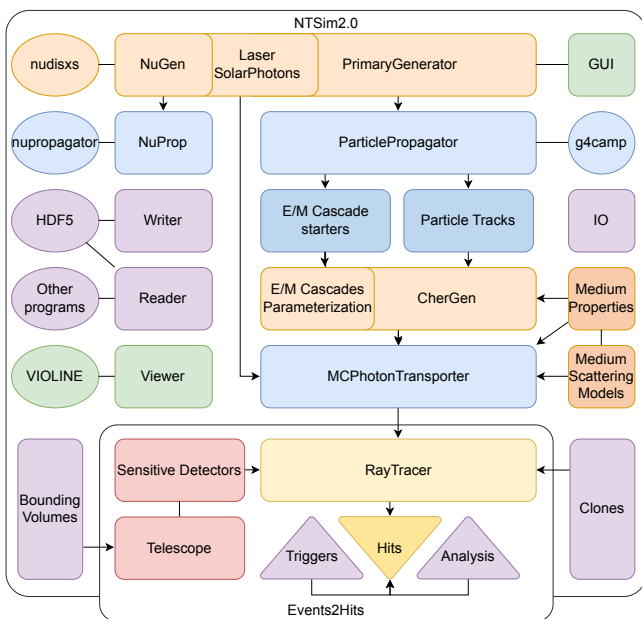


Рис. 2. Общая цепочка моделирования в NTSim

трино на электронах  $\bar{\nu}e^- \rightarrow W^-$  [21]. NuGen включает в себя данные о сечениях нейтрино всех флейворов на нуклонах.

### 3.2. ToyGen

Возможности NTSim позволят пользователю не только моделировать нейтринные события, но и производить расчеты для атмосферных мюонов, а также выполнять другие возможные задачи в рамках моделирования. Генератор ToyGen предназначен для инициализации частицы или потока частиц, доступных в программном пакете Geant4 и определенных в классе G4ParticleDefinition. При запуске моделирования пользователь может указать идентификатор первичной частицы PDGID из справочника Particle Data Group [22].

### 3.3. Laser

Лазерные калибровочные установки, которыми оборудованы дополнительные межкластерные струны Baikal-GVD, необходимы для временной калибровки оптических модулей и исследования оптических свойств воды. Генератор Laser моделирует световые импульсы от лазерных калибровочных установок. Он способен разыгрывать фотоны в различных направлениях, например, возможна имитация изотропного источника, а также конусообразного распределения, подобного черенковскому излучению.

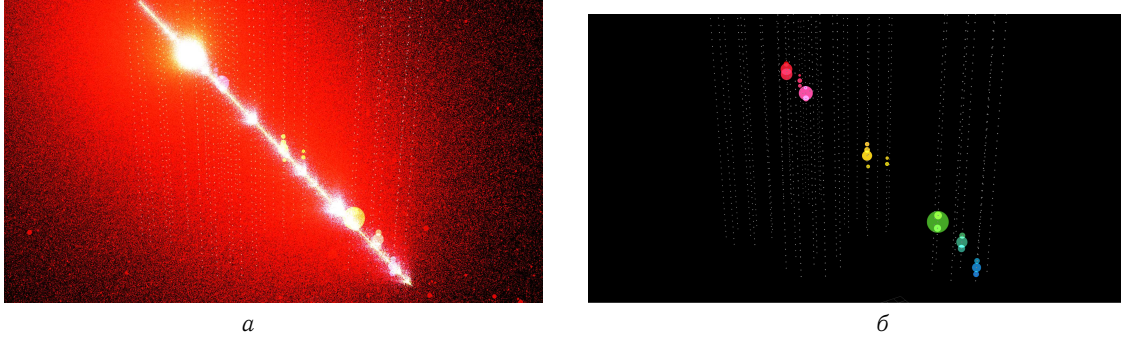


Рис. 3. Визуализация событий с использованием VIOLINE: *а* — черенковские фотоны, возникшие в результате движения в среде озера Байкал мюона с энергией 4 ТэВ, *б* — отклик детектора на данное событие

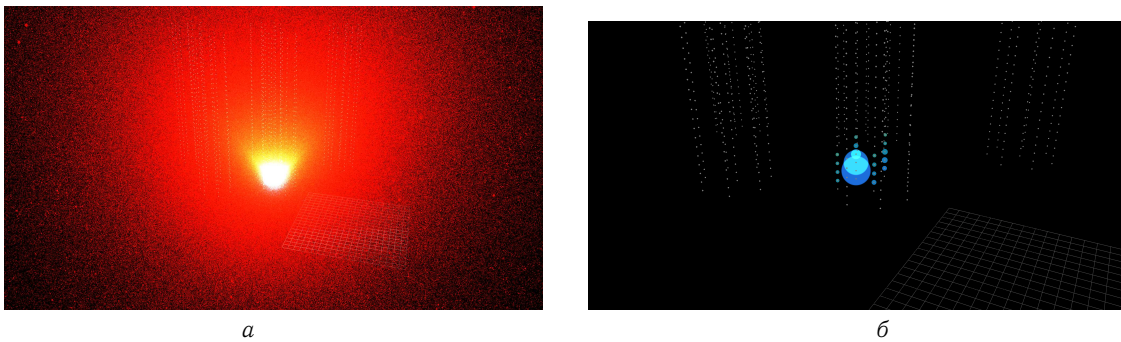


Рис. 4. Визуализация событий с использованием VIOLINE: *а* — черенковские фотоны, возникшие в результате движения в среде озера Байкал положительно заряженного пиона с энергией 10 ТэВ, *б* — отклик детектора на данное событие

### 3.4. SolarPhotons

Одним из источников возможного шума для Baikal-GVD является солнечное излучение, которое может приводить к ложным срабатываниям верхних оптических модулей. Класс `SolarPhotons` предназначен для моделирования приходящих на поверхность озера солнечных фотонов, спектр которых рассчитан с помощью библиотеки `pvlip python` [23]. Среди его опций можно выделить возможность выбора даты и времени, в которые будет рассчитан спектр, и радиуса, задающего круг, в котором будут равномерно генерироваться фотоны.

## 4. ПРОПАГАТОРЫ ЧАСТИЦ

Данные из `PrimaryGenerator` передаются в модуль `PrimaryPropagator`, осуществляющий их распространение. На вход этому модулю могут подаваться частицы, сгенерированные, к примеру, в `ToyGen` или образовавшиеся в результате взаимодействия нейтрино вторичные частицы. На выходе `PrimaryPropagator` формируется объект `gTracks`, содержащий в себе информацию об эволюции частиц при их прохождении через вещество детектора, а если включена параметризация электромагнитный каскадов, то также образуется структура `gParticles`.

### 4.1. NuProp

Модуль `NuProp`, включенный в `NuGen`, отвечает за реконструкцию направления прихода нейтрино, которое рассчитывается с учетом эволюции потока при прохождении сквозь толщу Земли согласно модели `Preliminary Reference Earth Model (PREM)` [24], показанной на рис. 5. Вероятность прохождения учитывается с помощью метода  $\mathcal{Z}$ -фактора [25]. Расчет вероятности прохождения восходящего потока мюонных нейтрино представлен на рис. 6.

Кинематические параметры вторичных частиц вычисляются в соответствии с реконструированным направлением прилета нейтрино. Возможности `NuProp` позволяют пользователю самостоятельно задать направление прилета нейтрино, что дает возможность производить оценки сигнала из интересующих областей небесной сферы.

### 4.2. ParticlePropagator

Расчет взаимодействий частиц с веществом, их распространение и рождение вторичных продуктов осуществляются в модуле `ParticlePropagator`. Для этого используется программный пакет `Geant4`, интеграция функций которого в цепочку моделирова-

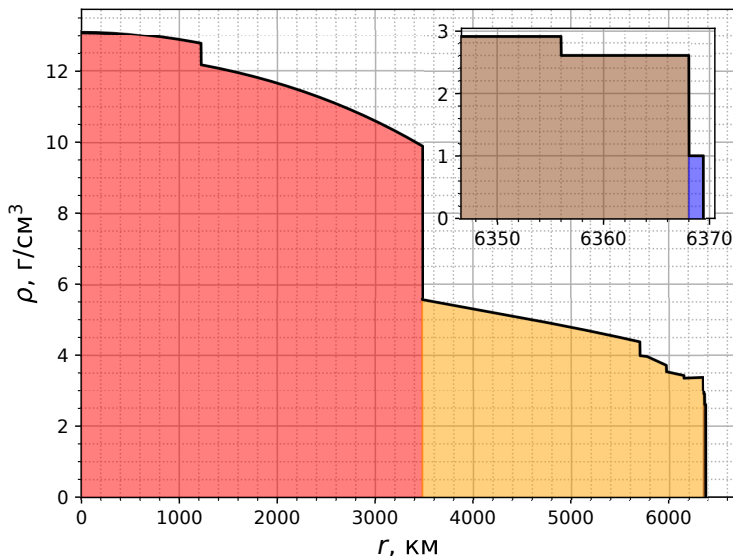


Рис. 5. Модель строения Земли PREM. Принятые обозначения цветов: красный — ядро, оранжевый — мантия, коричневый — кора, синий — вода

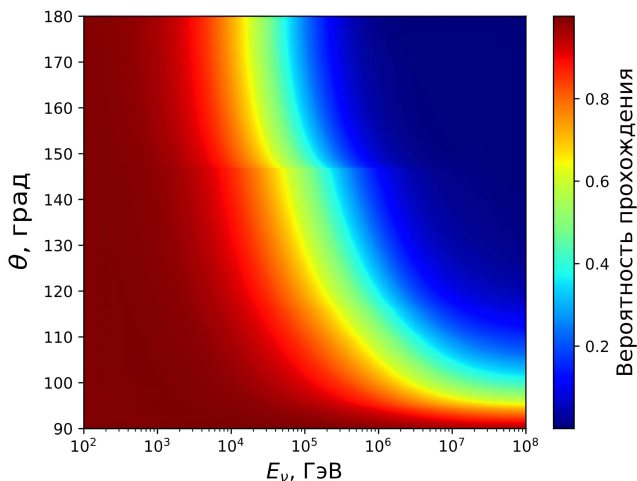


Рис. 6. Вероятность прохождения восходящего потока мюонных нейтрино через Землю в зависимости от зенитного угла и энергии нейтрино, для детектора на глубине 1 км под водой в месте расположения озера Байкал

говые значения для рождения частиц и инициаторов электромагнитных каскадов. Все эти параметры могут быть заданы пользователем самостоятельно, исходя из интересующих его целей исследования.

### 4.3. MCPhotonTransporter

Для вычисления траекторий фотонов применяются стандартные методы Монте-Карло. Моделирование рассеяния основано на индикатрисе Хеньи-Гринштейна [27] и рассеянии Рэлея [28]. Пользователь может задать требуемое количество шагов рассеяния и коэффициент анизотропии  $g = \langle \cos \theta \rangle$ , где  $\theta$  — зенитный угол рассеяния относительно предыдущего направления движения фотона. Поглощение фотона учитывается экспоненциальным множителем  $e^{-L/\lambda_{abs}}$ , где  $L$  — полный путь фотона за все шаги рассеяния,  $\lambda_{abs}$  — длина поглощения фотона.

## 5. ГЕНЕРАЦИЯ ЧЕРЕНКОВСКИХ ФОТОНОВ В МОДУЛЕ CHERGEN

ния производится с помощью `g4camp`, являющимся специально разработанной на основе `g4pybind` [26] Python-оболочкой, которая предоставляет Python-интерфейсы для классов, используемых в `Geant4`. Пользователю доступен выбор набора физических процессов, поставляемых `Geant4`, через класс-наследник `CustomPhysicsList`. `ParticlePropagator` на вход принимает список частиц, предназначенных для распространения в пределах объема нейтринного телескопа, параметры и размеры среды, а также поро-

Моделирование физических процессов осуществляется с помощью `Geant4`, однако для генерации и распространения черенковских фотонов в объеме нейтринного телескопа используются модули `CherGen` и `MCPhotonTransporter`, так как рождение черенковских фотонов в `Geant4` приводит к значительному замедлению всей цепочки моделирования.

Преимущество во времени достигается за счет генерации фотонов не по отдельности, а в совокупности.

Это достигается в модуле `CherGen` благодаря использованию библиотек `NumPy` [29] и `Numba` [30]. Применение этих пакетов позволяет осуществлять одновременную генерацию черенковских фотонов для треков заряженных частиц выше черенковского порога согласно формуле Франка–Тамма [31]. После генерации происходит процедура одновременного вращения траекторий фотонов для соответствия направлениям движения заряженных частиц.

С целью сокращения времени моделирования в `NTSim` используется параметризация индивидуальных электромагнитных каскадов, порождаемых вторичными частицами с энергиями в диапазоне от 10 ГэВ до 10 ТэВ. Распределение черенковских фотонов вдоль оси развития индивидуального электромагнитного ливня определяется на основе параметризации продольного распределения электронов и позитронов в каскаде. На данный момент в `NTSim` используются продольные параметризации на основе: (i) гамма-распределения [32, 33], (ii) модифицированной функции Грейзена [34–37], тогда как для углового распределения черенковских фотонов в ливне используется усредненная параметризация по возрасту ливня.

## 6. ТЕЛЕСКОПЫ

Для конструирования различных геометрий нейтринных телескопов используется модуль `Telescopes`. Он позволяет размещать оптические модули в ограничивающих объемах класса `BoundingVolumes`, таких как параллелепипед, цилиндр и сфера. Эти логические объемы используются модулем `RayTracer` для итерационного поиска пересечений траекторий фотонов не со всеми ОМ сразу, а только с теми, что принадлежат структурам, которые лежат на пути следования фотонов. Обычно ОМ ограничиваются сферой, а струны и кластеры, образованные структурами ОМ, ограничиваются цилиндрами или параллелепипедами. Такая иерархия применена в основной геометрии, представляющей конфигурацию `Baikal-GVD`, показанной на рис. 7.

Кроме геометрии `Baikal-GVD` в `NTSim` реализованы примеры экспериментальных телескопов с топологиями в виде пчелиных сот, кристаллической решетки, цветка подсолнуха (рис. 8).

Конструирование оптических модулей в `NTSim` осуществляется с помощью классов модуля `SensitiveDetectors`. В настоящий момент доступны схемы ОМ с одним большим ФЭУ и с несколькими ФЭУ, расположенными по всей поверхности сферы, охватывая угол обзора в  $4\pi$  (рис. 9). Помимо выбора конструкции ОМ возможно задать параметры ФЭУ, такие как квантовая эффективность фотокатода, угловое разрешение и другие, которые нужны для расчета среднего числа генерируемых фотоэлектронов.

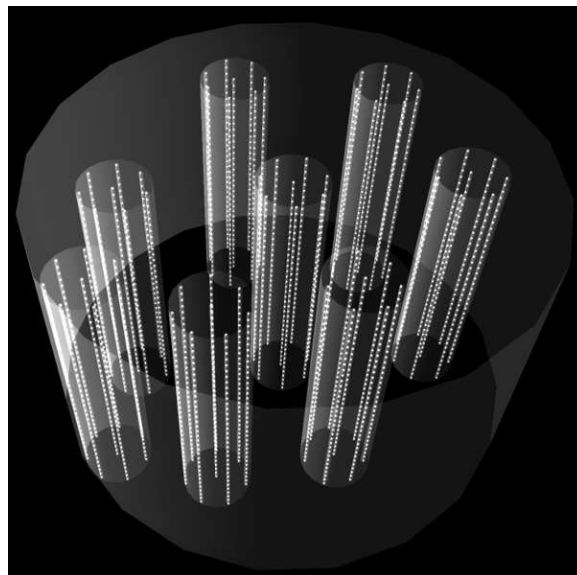


Рис. 7. Геометрия модели `Baikal-GVD`

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активное развитие области нейтринной астрономии требует создания программных пакетов для моделирования и обработки экспериментальных данных. Программный комплекс `NTSim`, описанный в данной работе, представляет собой удобный инструмент для задач нейтринной астрономии, включая моделирование потоков астрофизических и атмосферных нейтрино, а также групп мюонов. Разрабатываемый в первую очередь для коллаборации `Baikal-GVD` `NTSim` также может быть использован для моделирования экспериментов будущего поколения, таких как `HUNT` [38], `TRIDENT` [39] и `NEON` [40]. В работе приводится описание основных модулей системы, выполняющих функции генерации и распространения частиц в среде детектора, рождения черенковских фотонов и расчета отклика нейтринного телескопа, с кратким описанием методов, используемых в каждом из модулей.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность всему коллективу научной группы `NTSim`, включая Д. В. Наумова, В. А. Аллахвердяна, А. С. Шешукова, И. А. Перевалову, И. В. Черноусова и Я. В. Дубовика, за совместную работу и поддержку. Также благодарность адресуется Д. Н. Заборову за ценные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (гранты: FZZE-2022-0001, FZZE-2023-0004, FZZE-2020-0024).

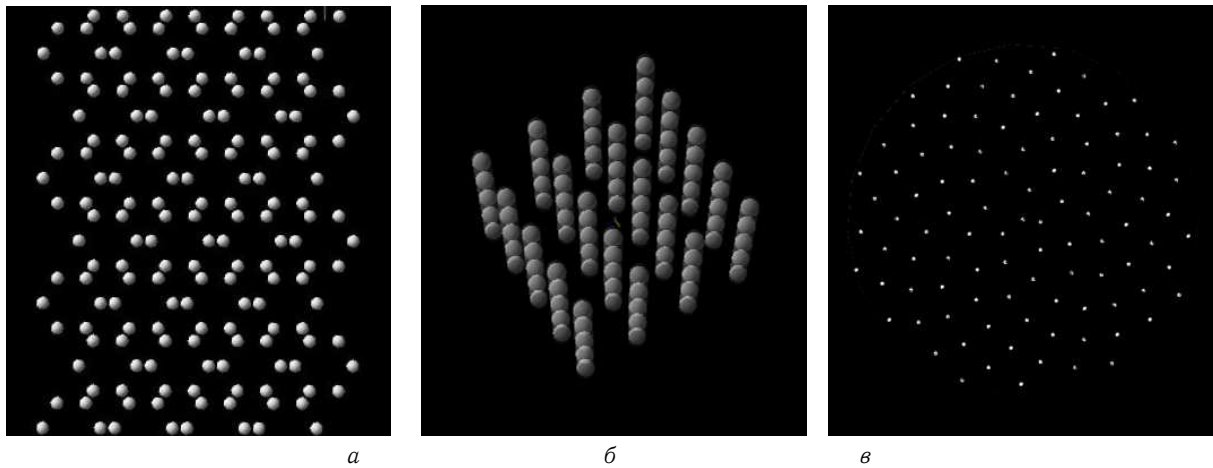


Рис. 8. Различные конфигурации телескопов: *a* — локально плотные пчелиные соты, *б* — кристаллическая решетка, *в* — цветок подсолнуха

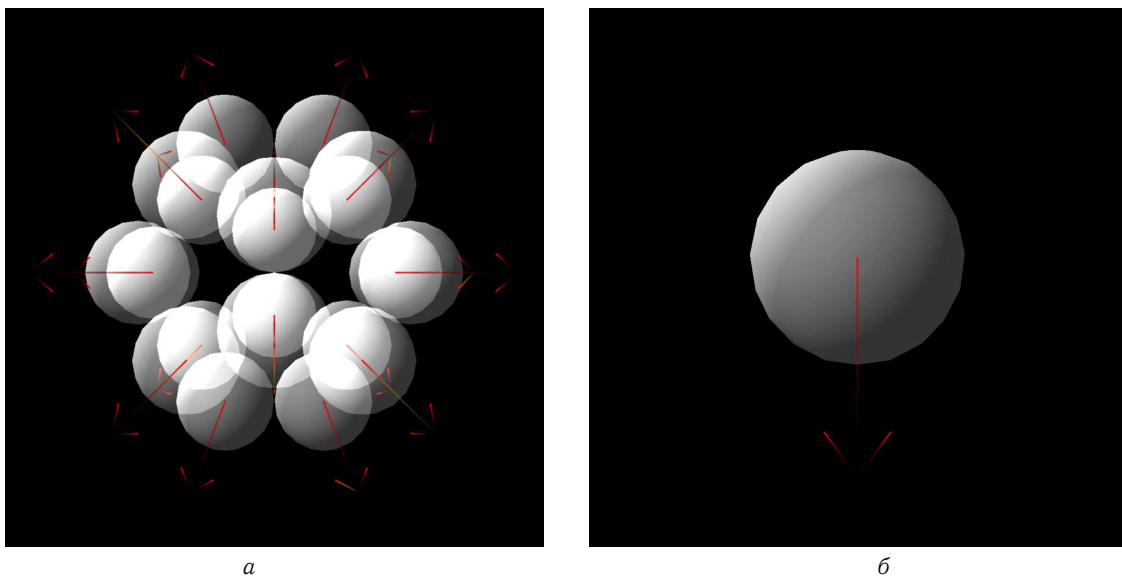


Рис. 9. Примеры ОМ. Каждая сфера отображает ФЭУ, вектор нормали к фотокатоду которого показан красной стрелкой: *a* — ОМ с ФЭУ, покрывающими телесный угол равный  $4\pi$ ; *б* — ОМ с одним направленным вниз ФЭУ

- 
- [1] Hirata K., Kajita T., Koshiya M. et al. // Phys. Rev. Lett. **58**. 1490 (1987).  
 [2] Bionta R.M., Blewitt G., Bratton C.B. et al. // Phys. Rev. Lett. **58**. 1494 (1987).  
 [3] Alekseev E.N., Alekseeva L.N., Volchenko V.I., Krivosheina I.V. // JETP Lett. **45**, N 10. 589 (1987).  
 [4] Aglietta M., Badino G., Bologna G. et al. // JETP Lett. **45**, N 10. 593 (1987).  
 [5] Aglietta M., Badino G., Bologna G. et al. // Europhys. Lett. **3**, N 12. 1315 (1987).  
 [6] Aartsen M.G., Abbasi R., Abdou Y. et al. // Science. **342**, N 6161. 1242856 (2013).  
 [7] NTSim PyPi project: <https://pypi.org/project/ntsim/>.  
 [8] Lazar J., Meighen-Berger S., Haack C. et al. // Comput. Phys. Commun. **304**. 109298 (2024).  
 [9] nupropagator PyPi project: <https://pypi.org/project/nupropagator/>.  
 [10] nudisxs PyPi project: <https://pypi.org/project/nudisxs/>.  
 [11] g4camp PyPi project: <https://pypi.org/project/g4camp/>.  
 [12] Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. **506**. 250 (2003).  
 [13] Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. **53** 270 (2006).  
 [14] Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. **835**. 186 (2016).

- [15] *Allakhverdian V., Naumov D.* // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. **310**. 108726 (2023).
- [16] *Allakhverdian V., Naumov D.* // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. **326**. 109126 (2024).
- [17] *Aynutdinov V.M., Allakhverdyan V.A., Avrorin A.D.* et al. // Physics of Atomic Nuclei. **86**, N 6. 989 (2023).
- [18] *Dzhilkibaev Zh.-A.M., Aynutdinov V.M., Allakhverdyan V.A.* et al. // Physics of Atomic Nuclei. **86**, N 6. 995 (2023).
- [19] *Кузьмин К.С.* Рассеяние нейтрино на нуклонах и поляризация заряженных лептонов в квазиупругих реакциях. Дисс... канд. физ.-мат. наук: 01.04.16: Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова, 2009.
- [20] *Kretzer S., Reno M.* // Phys. Rev. D. **66**, N 11. 113007 (2002).
- [21] *Glashow S.* // Phys. Rev. **118**, N 1. 316 (1960).
- [22] *Navas S., Amsler C., Gutsche T.* et al. // Phys. Rev. D. **110**. 030001 (2024).
- [23] *Pvlib* PyPi project: <https://pypi.org/project/pvlib/>.
- [24] *Dziewonski A., Anderson D.* // Physics of the Earth and Planetary Interiors. **25**. 297 (1981).
- [25] *Naumov V., Perrone L.* // Astroparticle Physics. **10**. 239 (1999).
- [26] *geant4* pybind project: [https://github.com/HaarigerHarald/geant4\\_pybind](https://github.com/HaarigerHarald/geant4_pybind).
- [27] *Heney L., Greenstein, J.* // Astrophysical Journal. **93**. 70 (1941).
- [28] *Lord Rayleigh F.R.S.* // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. **12**. N 73. 81 (1881).
- [29] NumPy web page: <https://numpy.org/>.
- [30] Numba web page: <https://numba.pydata.org/>.
- [31] *Tamm I., Frank I.* // Proc. USSR Acad. Sci. **14**, N 3. 107 (1937).
- [32] *Grindhammer G., Peters S.* // International Conference on Monte Carlo Simulation in High Energy and Nuclear Physics. USA. 1993.
- [33] *Radel L., Wiebusch C.* // Astroparticle Physics. **44**. 102 (2013).
- [34] *Nelson W., Ralph H., Rogers D.* // SLAC-0265. SLAC-265. SLAC-R-0265. SLAC-R2027 1985.
- [35] *Rossi B., Greisen K.* // Reviews of Modern Physics. **13**. N 4. 240 (1941).
- [36] *Greisen K.* // Annual Review of Nuclear and Particle Science. **10**. 63 (1960).
- [37] *Stadelmaier M., Vicha J., Novotný V.* // Phys. Rev. D. **107**. N 10. 103056 (2023).
- [38] *Tian-Qi Huang, Zhen Cao, Mingjun Chen* et al. // PoS. **ICRC2023**. 1080 (2023).
- [39] *Ye Z.P., Hu F., Tian W.* et al. // arXiv. **2207.04519** (2024).
- [40] *Chengyu Shao, Yudong Cui, Pingzheng Dong* // PoS. **ICRC2023**. 1013 (2023).

## Development of the NTSim software package for modelling neutrino telescopes

A. S. Belyakova<sup>1,a</sup>, S. I. Zavialov<sup>2,3,b</sup>, D. V. Zubchenko<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow 141701, Russia

<sup>2</sup>Department of Elementary Particle Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

<sup>3</sup>Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 141980, Russia

E-mail: <sup>a</sup>[beliakova.as@phystech.edu](mailto:beliakova.as@phystech.edu), <sup>b</sup>[zavialov.si18@physics.msu.ru](mailto:zavialov.si18@physics.msu.ru), <sup>c</sup>[zubchenko.dv21@physics.msu.ru](mailto:zubchenko.dv21@physics.msu.ru)

Experiments studying high-energy neutrino have become an important part of modern elementary particle physics. Simulation of various physical processes with detector's response is essential for obtaining results and data analysis. NTSim is a new software package under development for modelling neutrino telescopes. Though the initial aim has been to create simulation for Baikal-GVD experiment, the framework can be used for a wide range of detectors such as IceCube, KM3NeT/ARCA, HUNT and others. Main principles of NTSim design and work are described in this article.

PACS: 07.05.Tp; 02.70.Tt

Keywords: neutrino, neutrino astronomy, simulation, Geant4, Baikal-GVD, NTSim.

Received 09 June 2024.

### Сведения об авторах

1. Белякова Анна Степановна — студент, e-mail: [beliakova.as@phystech.edu](mailto:beliakova.as@phystech.edu).
2. Завьялов Сергей Игоревич — аспирант, e-mail: [zavialov.si18@physics.msu.ru](mailto:zavialov.si18@physics.msu.ru).
3. Зубченко Даниил Валерьевич — студент, e-mail: [zubchenko.dv21@physics.msu.ru](mailto:zubchenko.dv21@physics.msu.ru).