**Разработка программного пакета NTSim для моделирования нейтринных телескопов и оценка эффективности регистрации нейтринных событий в эксперименте Baikal-GVD**

**Завьялов С.И.1, *Зубченко Д.В.* 1, *Белякова А.С.* 2, *Черноусов И.В.* 2**

1,2студент

1Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,физический факультет, Москва, Россия

2Иркутский государственный университет,физический факультет, Иркутск, РоссияE–mail: zavialov.si18@physics.msu.ru

Первостепенной задачей в современной нейтринной астрономии является разработка и масштабирование нейтринных телескопов, которые представляют собой массивы оптических детекторов, размещенных в природной прозрачной среде, такой как вода или лед. Примерами таких нейтринных телескопов являются эксперименты, такие как IceCube [8] на Южном полюсе, KM3NeT [9] в Средиземном море и Baikal-GVD [4] на озере Байкал. Основным методом обнаружения астрофизических нейтрино является наблюдение черенковского излучения, которое возникает при прохождении вторичных заряженных частиц через прозрачную среду со скоростью выше фазовой скорости света в этой среде. Этот принцип обнаружения лежит в основе работы нейтринных телескопов и является одним из ключевых компонентов их функционирования.

Для успешного анализа данных и проверки теоретических моделей, а также для оценки эффективности регистрации нейтринных событий, крайне важно проводить детальное моделирование физических процессов, происходящих в объеме детектора.

С этой целью разрабатывается программный пакет NTSim (Neutrino Telescope Simulation) для моделирования нейтринных телескопов. Среди подобных программ моделирования NTSim выделяется по следующим основополагающим принципам. Во-первых, NTSim написан на языке программирования Python, включая центральное ядро моделирования - питонизированную оболочку для пакета Geant4 [1,2,3] - благодаря которому происходит симуляция прохождения частиц через вещество детектора [6,7]. Во-вторых, используется модульный принцип, который позволяет пользователю создавать различные конфигурации нейтринных телескопов и рассчитывать отклик детектора на нейтринные события. В-третьих, достигается оптимальный баланс между скоростью выполнения моделирования и точностью воспроизведения физических процессов, таких как возникновение и развитие адронных и электромагнитных каскадов.

NTSim предоставляет для работы различные генераторы первичных событий, такие как NuGenerator, позволяющий моделировать взаимодействие нейтрино с веществом, и ToyGen, который создает частицы из списка Geant4. Распространение вторичных частиц осуществляются модулем Propagator. Генерация черенковских фотонов в результате прохождения заряженных частиц происходит в теле NTSim. Также предусмотрена параметризация черенквоского спектра от электромагнитных каскадов [5], что существенно увеличивает скорость моделирования нейтринных событий. Модуль Telescope позволяет пользователю задать произвольную геометрию нейтринного телескопа и провести оценку его эффективности регистрации к нейтринным событиям различной энергии.

Все это делает NTSim удобным и эффективным инструментом для моделирования как существующих, так и планируемых нейтринных телескопов, а также для реконструкции нейтринных событий.

**Литература**

1. *Agostinelli, S. et al. GEANT4--a simulation toolkit // Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. V. 506. P.* *250-303*
2. *Allison, J. et al.* Geant4 Developments and Applications // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. V. 53. P. 270-278.
3. *Allison, J. et al.* Recent Developments in GEANT4 // Nucl. Instrum. Meth. A. 2016. V. 835. P. 186-225.
4. Dzhilkibaev, Zh.-A. M. et al.Neutrino Telescope in Lake Baikal: Present and Nearest Future // Proc. Sci. ICRC2021. 2022. V. 395. P. 002.
5. *Rädel L., Wiebusch C. Calculation of the Cherenkov light yield from electromagnetic cascades in ice with Geant4 // Astroparticle Physics. 2013. V. 44. P. 102-113.*
6. g4camp: <http://malyshkin.pages.jinr.ru/g4camp/>
7. geant4\_pybind: <https://github.com/HaarigerHarald/geant4_pybind>
8. *IceCube:* <https://icecube.wisc.edu/>
9. *KM3NeT:* [*https://www.km3net.org/*](https://www.km3net.org/)