

## ПЕРСПЕКТИВЫ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ЧЕРЕНКОВСКОЙ УСТАНОВКИ TAIGA-HiSCORE И СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКИ TUNKA-GRANDE В ИССЛЕДОВАНИИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

**А.Л. Иванова, Р.Д. Монхоев, А.Л. Пахоруков**

Научный исследовательский институт прикладной физики,  
Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия  
annaiv.86@mail.ru

## PERSPECTIVES OF JOINT OPERATION OF THE HiSCORE CHERENKOV ARRAY AND TUNKA-GRANDE SCINTILLATOR ARRAY FOR STUDYING HIGH-ENERGY GAMMA-RAY EMISSION

**A.L. Ivanova, R.D. Monkhoev, A.L. Pakhorukov**

Applied Physics Institute of the Irkutsk State University, Irkutsk, Russia  
annaiv.86@mail.ru

**Аннотация.** Обсуждаются перспективы объединения гамма астрономии и нейтринной астрофизики. Приводится описание возможного метода определения происхождения астрофизического источника по совместным данным гамма-обсерватории TAIGA и нейтринного телескопа.

**Ключевые слова:** гамма астрономия, нейтринная астрофизика, ШАЛ, Tunka-Grande, HiSCORE.

**Abstract.** The prospects of combining Gamma-ray Astronomy and Neutrino Astrophysics are discussed. A possible method for determining the origin of an astrophysical accelerators from the combined data of the hybrid Air Shower Array TAIGA and neutrino telescope is described.

**Key words:** gamma astronomy, neutrino astrophysics, EAS, Tunka-Grande, TAIGA-HiSCORE.

### ВВЕДЕНИЕ

Гамма-астрономия и нейтринная астрофизика являются на сегодня самыми бурно развивающимися направлениями астрофизики. Потоки космических нейтрино и гамма-квантов несут в себе информацию о природе астрофизических источников, механизмах ускорения и распространения частиц, характеристиках ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях. Нужно только научиться правильно её считывать и расшифровывать. Важную роль в этом процессе играют точность, с которой мы можем выделить искомое событие из общего фона, и количество информации, которое мы можем извлечь из каждого зарегистрированного события.

Одним из обсуждаемых сегодня вопросов является объединение гамма-астрономии и нейтринной астрофизики при исследовании астрофизических объектов. Речь идет о возможности анализа природы и происхождения астрофизического источника по наличию или отсутствию потока гамма-квантов с энергией выше 100 ТэВ при надёжной регистрации нейтринного сигнала от источника. В случае подтверждения такой возможности у исследователей появится новая методика разделения внегалактических и галактических астрофизических источников.

### ГАММА ИЗЛУЧЕНИЕ КАК УКАЗАТЕЛЬ ГАЛАКТИЧЕСКОГО/ВНЕГАЛАКТИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ИСТОЧНИКА

На сегодня известно, что гамма-излучение высоких энергий ( $E > 0.1$  ТэВ) возникает в результате взаимодействия космических лучей сверхвысоких

энергий (КЛ СВЭ) с окружающим газом, фотонами и магнитными полями. Мы можем наблюдать как излучение от отдельных галактических и внегалактических источников, так и диффузное фоновое гамма-излучение. Основными кандидатами на роль галактических источников гамма-квантов высоких энергий являются остатки сверхновых (SNR). Однако до сих пор не ясно, доминирует ли в этих объектах механизм генерации гамма-квантов от протонов через распад нейтральных пионов (адронное происхождение гамма-квантов), или преобладает рождение гамма-квантов в результате обратного комптоновского рассеяния электронов на реликтовых фотонах. Только адронный механизм генерации может дать на выходе гамма-излучение с энергией не менее 100 ТэВ.

Регистрация такого гамма-сигнала станет прямым доказательством, что в SNR доминирует механизм рождения гамма-квантов от протонов. И, следовательно, будет напрямую доказано, что остатки сверхновых являются эффективными ускорителями КЛ до СВЭ.

Кроме того, станет возможным применение новой методики разделения галактических и внегалактических астрофизических источников по наличию гамма-излучения с  $E > 100$  ТэВ. Выделяющееся в источнике нейтринное излучение высоких энергий сопровождается гамма-излучением и КЛ. В отличие от КЛ нейтрино и гамма-кванты электрически нейтральны и сохраняют свое первоначальное направление. Наша Вселенная прозрачна для гамма-квантов с энергией до 100 ТэВ, а при  $E > 100$  ТэВ начинается их поглощение за счет рассеяния гамма-квантов на реликтовых фотонах с образованием электрон-позитронных пар [Berezinsky, Smirnov, 1975]. Если источник будет

иметь внегалактическое происхождение, то на Земле от него будет зарегистрирован только нейтринный сигнал, так как гамма-излучение поглотится во время распространения. Если же источник галактический, то от него будут зарегистрированы потоки и нейтринного, и гамма-излучения [Ahlers, Halzen, 2017].

Более чем за 50 лет работы по поиску космических гамма-квантов не было обнаружено астрофизических фотонов с энергией свыше 100 ТэВ и в многочисленных экспериментах установлены только ограничения на их поток. Наилучший результат в этом направлении был получен экспериментом KASCADE [Apel et al., 2017]. По последним данным в эксперименте Fermi наблюдалась диффузная галактическая составляющая гамма-излучения в области ТэВ энергий с амплитудой, согласующейся с необъясненным избытком энергии в астрофизическом сигнале нейтрино, найденном IceCube [Neronov et al., 2018].

В связи с этим представляется перспективным поиск диффузного излучения в области энергий выше 100 ТэВ и анализ экспериментальных данных нейтринных телескопов и установок ШАЛ на наличие совместных событий.

### СОВМЕСТНАЯ РАБОТА HiSCORE И TUNKA-GRANDE

Гамма-обсерватория TAIGA [Budnev et al., 2015] располагает всем необходимым для проведения подобного исследования. Выделение гамма-квантов из фона КЛ возможно вести путем совместных измерений черенковского излучения, а также мюонной и электронно-фотонной компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ). Интересующая нас область энергий — 100 ТэВ и выше, поэтому в качестве установки для измерения черенковского излучения будет использоваться низкопороговая широкоугольная черенковская установка TAIGA-HiSCORE. Измерение мюонной и электронно-фотонной компонент ШАЛ будет вестись с помощью сцинтилляционной установки Tunka-Grande. Благодаря тому, что установки различного типа и независимы друг от друга, возможно применение мультикомпонентного метода восстановления параметров ШАЛ и породившей его первичной частицы. Метод заключается в том, что каждый отдельный параметр ШАЛ восстанавливается по данным той установки, которая позволяет сделать это с наилучшей точностью. Метод был опробован при проведении совместных измерений на сцинтилляционной установке Tunka-Grande, радио установке Tunka-Rex и черенковской установке Tunka-133. Т.к. качество восстановления выше у широкоугольной черенковской установки (ошибка восстановления направления ШАЛ порядка  $0.1^\circ$ , положения оси — 5–6 м, энергии — 10–15 %) [Porelli et al., 2015], то основные параметры ливня будут восстанавливаться по данным TAIGA-HiSCORE. Данные же об электронно-фотонной и мюонной компонентах ШАЛ со сцинтилляционной установки Tunka-Grande позволяют

из общего потока информации выделить события от гамма-квантов (по соотношению числа мюонов в ливне).

### ПОИСК СОВМЕСТНЫХ СОБЫТИЙ С НЕЙТРИННЫМИ ТЕЛЕСКОПАМИ

По предварительной оценке временные интервалы работы и область наблюдения небесной сферы гамма-обсерватории TAIGA позволяют рассчитывать на наличие совместных событий с нейтринными телескопами (HT-200+, ГВД, возможно IceCube). Для поиска таких событий необходимо найти общие временные интервалы работы экспериментов, выделить перекрытие областей наблюдений небесной сферы, провести калибровку абсолютного времени. В результате можно будет выделить совпадающие по времени и направлению события от нейтрино и гамма-квантов и сформировать базу таких совместных событий, либо уточнить предел на поток астрофизических гамма-квантов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установка Tunka-Grande обладает большим потенциалом и её совместная работа с низкоэнергетической высокоточной черенковской установкой TAIGA-HiSCORE позволит значительно улучшить верхние пределы на поток диффузного гамма излучения. Такой комплекс установок, способный вести поиск гамма-квантов с энергией выше 100 ТэВ путем совместных измерений черенковского излучения, а также мюонной компоненты ШАЛ, при значительно меньшей себестоимости вполне способен конкурировать с крупнейшими зарубежными экспериментами — европейским СТА и китайским LHAASO, главными конкурентами гамма-обсерватории TAIGA.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ahlers M., Halzen F. IceCube: Neutrinos and multimessenger astronomy. // *Progress of Theoretical and Experimental Physics*. 2017. V. 12. 12A105.
- Apel W.D., et al. KASCADE-Grande Limits on the Isotropic Diffuse Gamma-Ray Flux between 100 TeV and 1 EeV. // *Astrophys. J.* 2017. 848, 1.
- Berezinsky V., Smirnov A. Cosmic neutrinos of ultra-high energies and detection possibility.// *Astrophys. Space Sci.* 1975. V. 32. P. 461–482.
- Budnev N., et al. Multi-TeV Gamma-Ray Astronomy // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2015. V. 632. 012034.
- Neronov A., Kachelriess M., Semikoz D. Multimessenger gamma-ray counterpart of the IceCube neutrino signal. // *Phys. Rev.* 2018. D 98. 023004.
- Porelli A., et al. Timing calibration and directional reconstruction for Tunka-HiSCORE.// *J. Phys.: Conf. Ser.* 2015. V. 632. 012041.