

Мюонные нейтрино на БПСТ от гравитационно-волновых событий LIGO/Virgo/KAGRA

Унатлоков И.Б. и коллаборация БПСТ

Институт ядерных исследований РАН

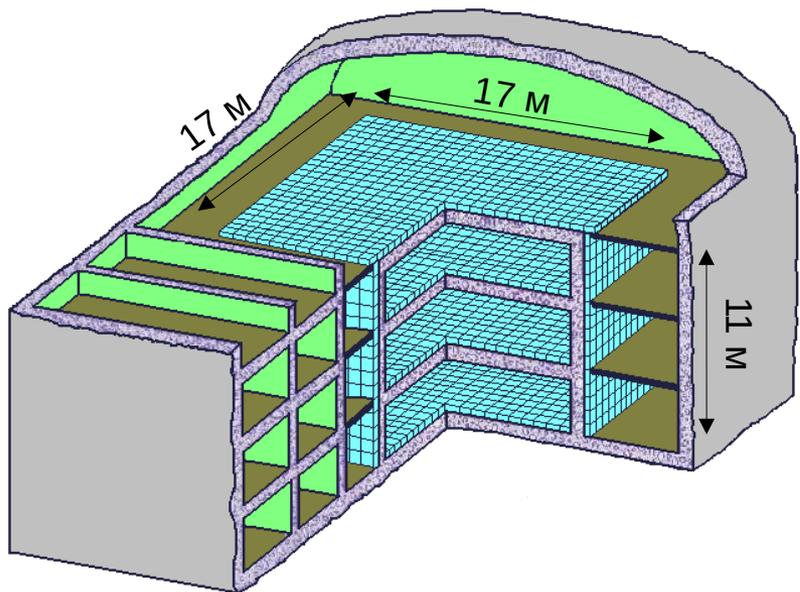
Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий»

10 – 13 марта 2026 г

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп

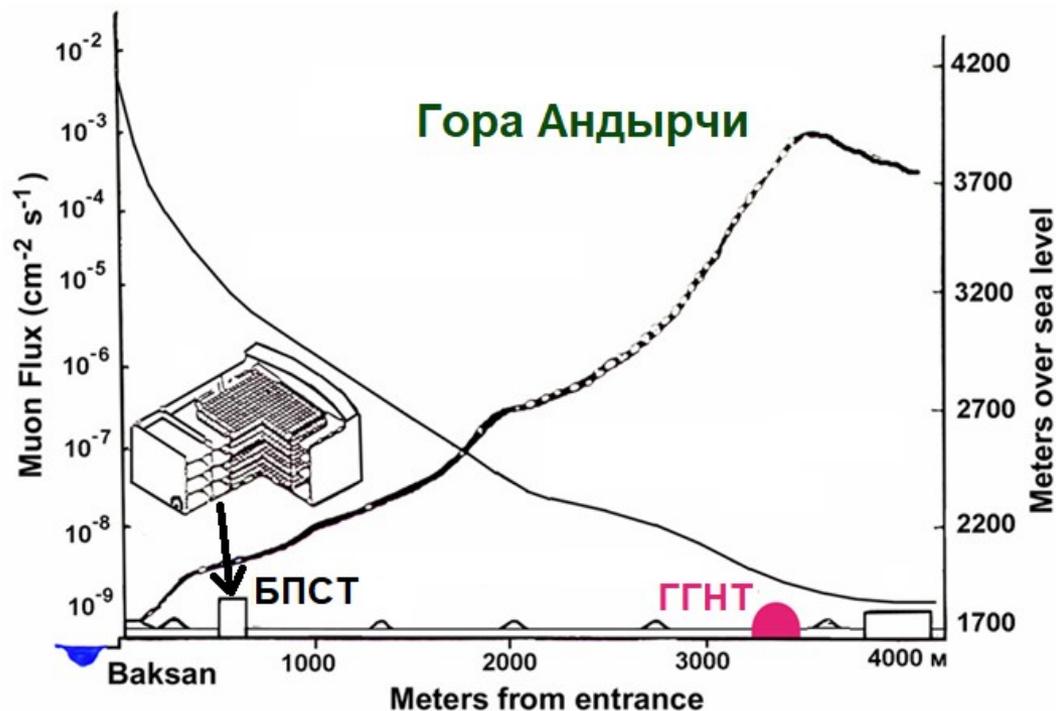
БПСТ - многоцелевой детектор, предназначенный для широкого диапазона исследований в области физики космических лучей, элементарных частиц и нейтринной астрофизики.

Схема БПСТ



- Общая масса сцинтиллятора 330 тонн (3180 счетчиков).
- $h_{\text{эфф}} = 850 \text{ м.в.э.}$
- Угловое разрешение $\approx 1.6^\circ$.

Схема расположения БПСТ в выработке горы Андырчи и зависимость потока мюонов от глубины



Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп

Фотография горизонтальной плоскости



Счетчик БПСТ

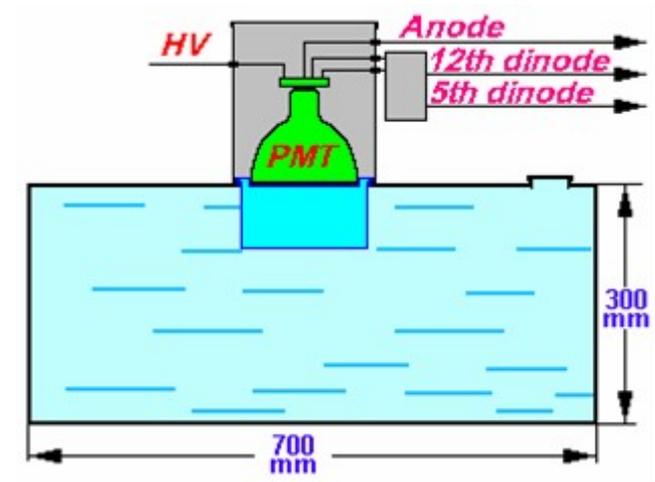
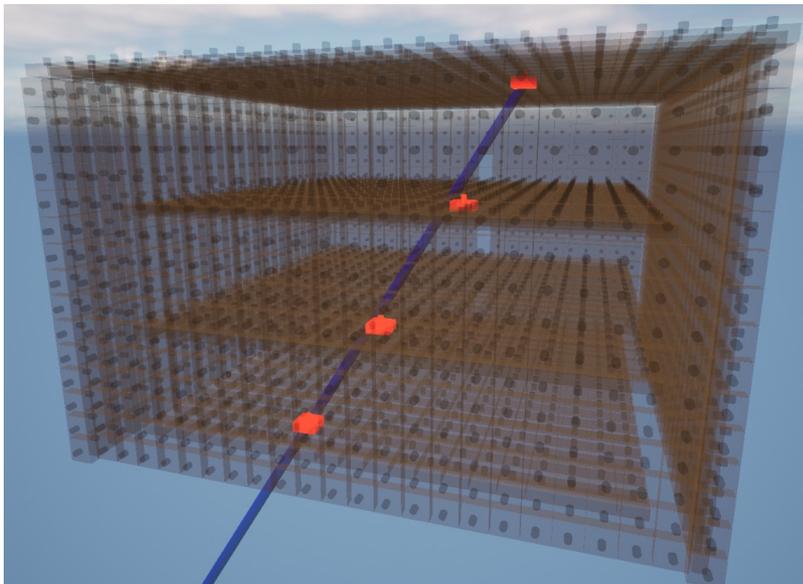


Схема события из нижней полусферы



Из нижней полусферы регистрируются мюоны, рожденные в реакции взаимодействия мюонного нейтрино (антинейтрино) с грунтом вокруг установки. При пороге регистрации 1 ГэВ неопределенность направления нейтрино $\approx 5^\circ$.

Гравитационно-волновые события

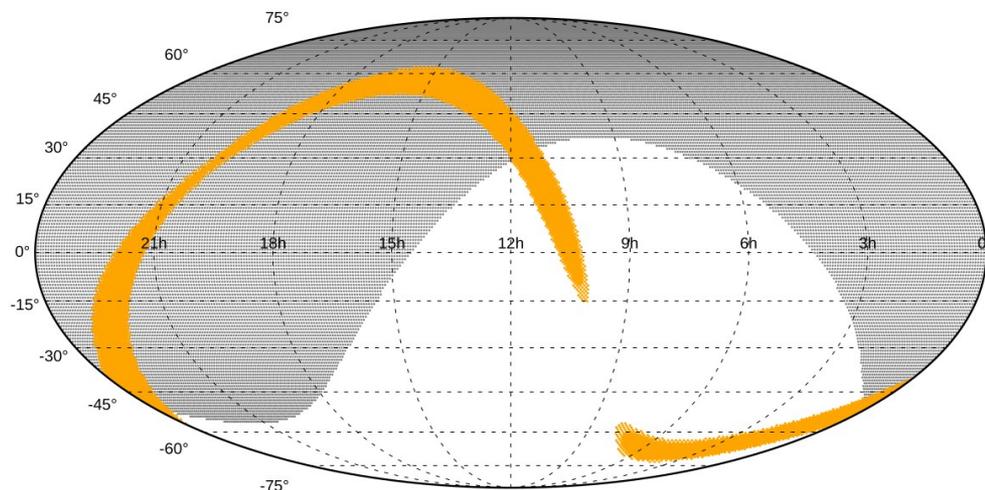
- Наблюдательный период **O1**
(12 сентября 2015 г. - 10 января 2016 г.)
- Наблюдательный период **O2**
(30 ноября 2016 г. - 25 августа 2017 г.)
11 подтвержденных событий
(каталог GWTC-1)
- Наблюдательный период **O3**
(1 апреля 2019 г. - 27 марта 2020 г.)
79 подтвержденных событий
(каталоги GWTC-2.1, GWTC-3)
- Наблюдательный период **O4**
(23 мая 2023 г. - 18 ноября 2025 г.)
128 подтвержденных событий
(каталог GWTC-4.0 - по данным до 16 января 2024 г.), более 5 тысяч кандидатов в гравитационные волны

<https://gracedb.ligo.org/>

Поиск совпадений

- Поиск совпадений ведется в интервале ± 500 секунд от события (нейтрино на БПСТ или ГВ).*
- При обнаружении совпадения по времени проверяется условие пересечения координаты нейтрино на БПСТ (с кругом ошибки 5°) с пятном локализации ГВ.
- Если нейтрино на БПСТ не обнаружено и пятно локализации ГВ пересекается с полем зрения БПСТ - проводится расчет диапазона ограничений на потоки внутри пятна локализации.

Поле зрения БПСТ (светлая область) и пятно локализации источника кандидата в гравитационные волны *S231231af*



* B. Baret et al. «Bounding the Time Delay between High-energy Neutrinos and Gravitational-wave Transients from Gamma-ray Bursts», *Astropart.Phys.* 35, 1, 2011

Ограничения на $E^2 dN/dE_\nu$

Эффективная площадь:

$$S_{eff}(E_\nu) = N_A \sigma_{CC}(E_\nu) R(E_\nu, E_\mu^{min}) L(h, E_\nu) S_T$$

Компонента заряженного тока
в сечении взаимодействия
нейтрино с веществом

Пробег мюона рожденного от
взаимодействия нейтрино с
веществом под установкой

Поглощение
нейтрино в Земле

Число событий от источника:

$$N = \int_{E_\mu^{min}}^{E_\mu^{max}} dE_\nu S_{eff}(E_\nu) \frac{dN}{dE_\nu}$$

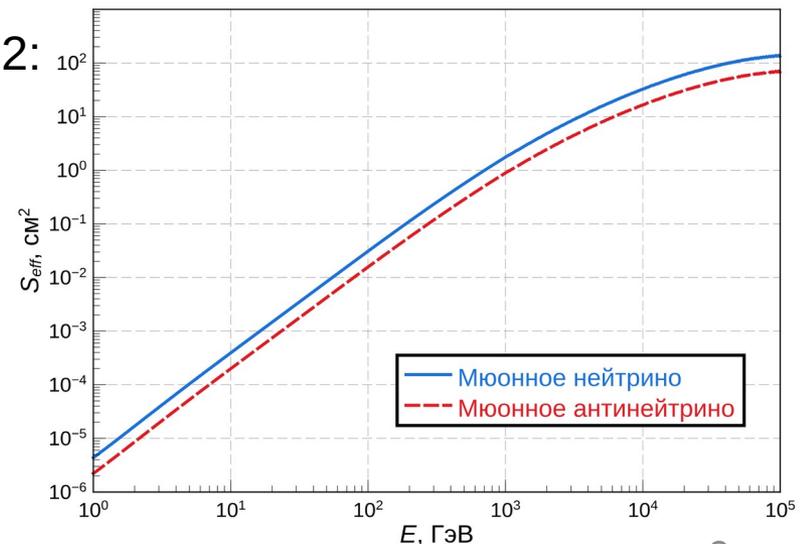
Предполагается что энергетический спектр
нейтрино подчиняется степенному закону, $\gamma = 2$:

$$\frac{dN}{dE_\nu} = \Phi_0 \left(\frac{E_\nu}{\text{ГэВ}} \right)^{-\gamma}$$

Ограничение на 90%
доверительном уровне на Φ_0 :

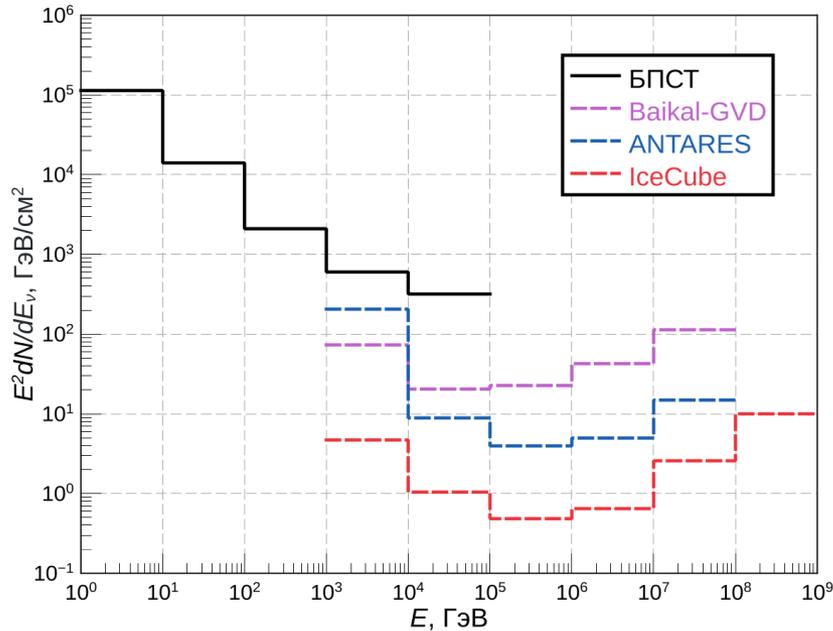
$$\Phi_0 = \frac{2.3}{\int_{E_\mu^{min}}^{E_\mu^{max}} dE_\nu S_{eff}(E_\nu) E_\nu^{-2}}$$

Зависимость эффективной
площади БПСТ от энергии при
зенитном угле 180° (для учета
поглощения в Земле использован
алгоритм «nuFATE»)

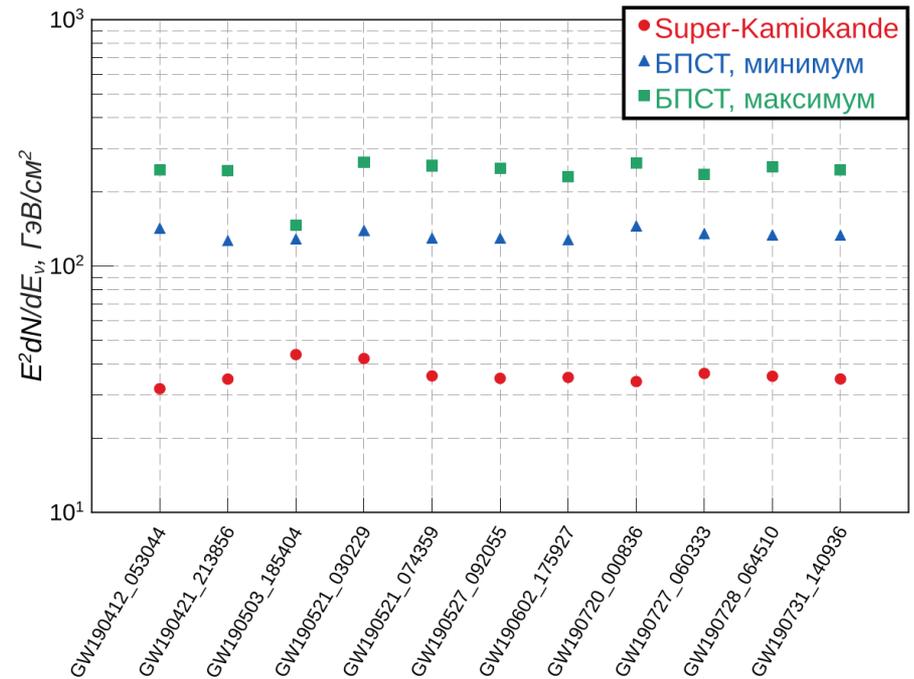


Ограничения на $E^2 dN/dE_\nu$

Ограничения на $E^2 dN/dE_\nu$ для события GW170817 от БПСТ, Baikal-GVD, IceCube и ANTARES



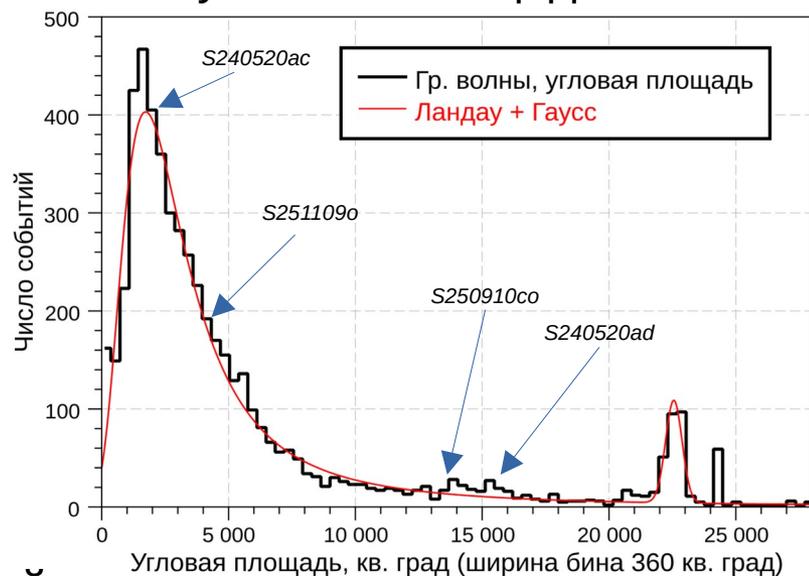
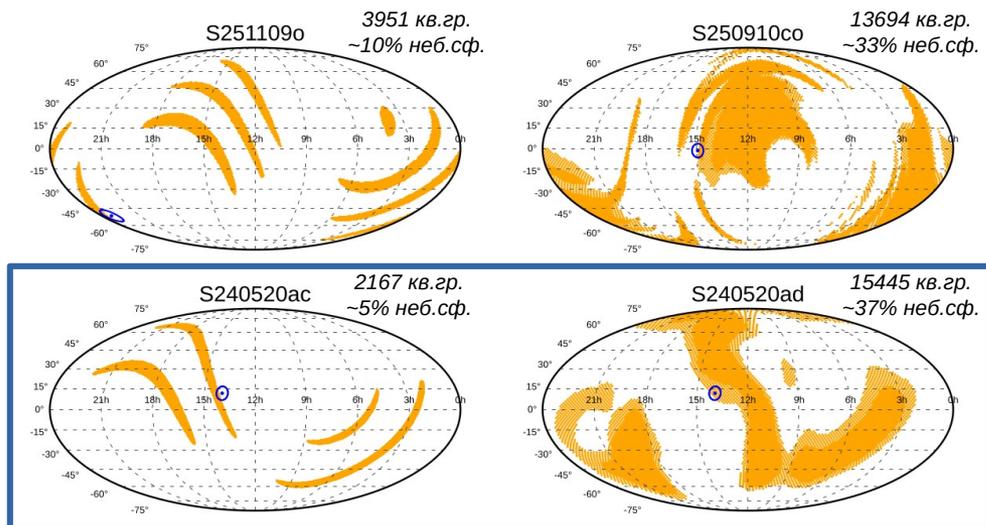
Ограничения на $E^2 dN/dE_\nu$, полученные на БПСТ (пороговая энергия 1 ГэВ) и Super-Kamiokande (пороговая энергия 1.6 ГэВ).



Поиск совпадений с событиями-кандидатами О4 *

События БПСТ (точки), совпавшие с гравитационно-волновыми триггерами LVK (пятна)

Распределение событий 4-го наблюдательного периода LVK по угловым площадям



Ожидаемое количество случайных совпадений за весь 4-й наблюдательный период LVK: ~1.2 события

Дата	Время, БПСТ	Время, кандидат LVK	Время относительно нейтрино на БПСТ
9.11.2025	16:32:24	16:25:25 (S251109o)	-418 с
10.9.2025	19:24:55	19:24:28 (S250910co)	-26 с
20.5.2024	6:55:33	06:56:54 (S240520ac)	81 с
20.5.2024	6:55:33	07:00:03 (S240520ad)	270 с

Результаты

- Осуществлен поиск совпадений нейтрино на БПСТ с доступными событиями всех 4 наблюдательных периодов гравитационно-волновых детекторов LVK. Обнаружено три совпадения (два кандидата в гравитационные волны S240520ac и S240520ac пересеклись с одним нейтрино на БПСТ).
- Проведена оценка ограничений на $E^2 dN/dE_\nu$ для всех доступных событий 4 наблюдательных периодов детекторов LVK.

Спасибо за внимание!