

Поиск совпадений нейтрино на БПСТ с сигналами гравитационно-волновых детекторов LIGO, Virgo и KAGRA во время их 4-го наблюдательного периода

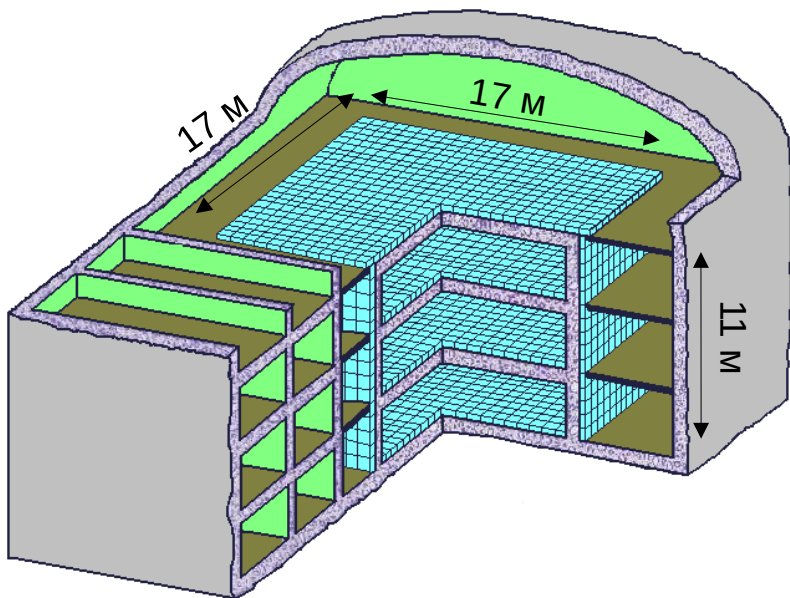
Унатлоков И.Б. и коллаборация БПСТ

Институт ядерных исследований РАН

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп

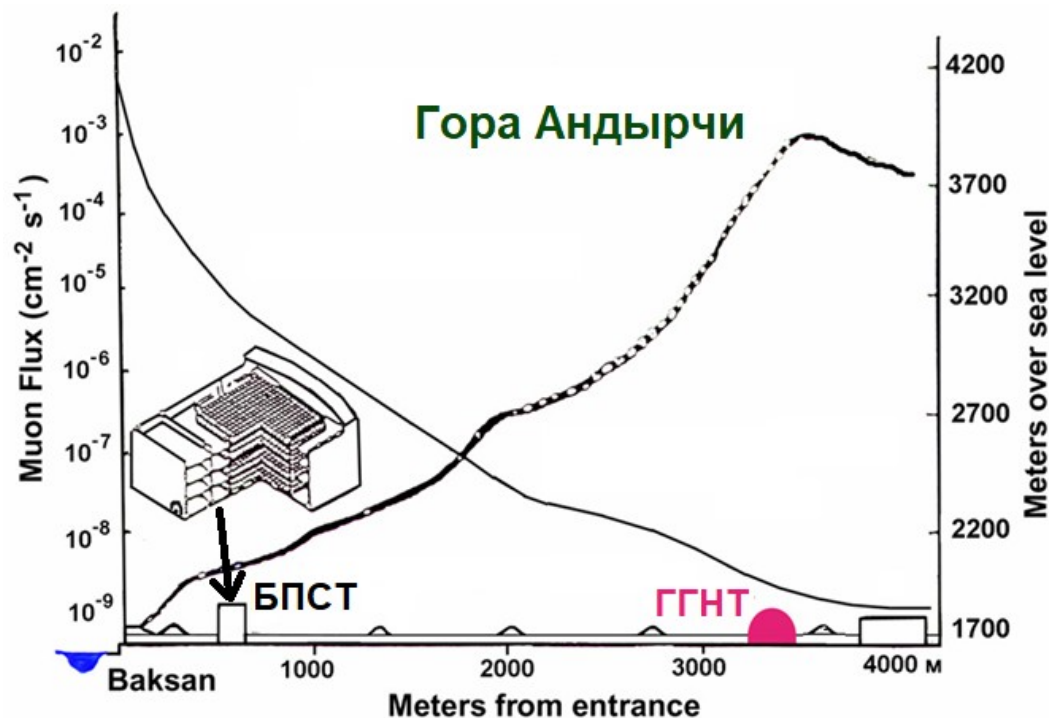
БПСТ - многоцелевой детектор, предназначенный для широкого диапазона исследований в области физики космических лучей, элементарных частиц и нейтринной астрофизики.

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

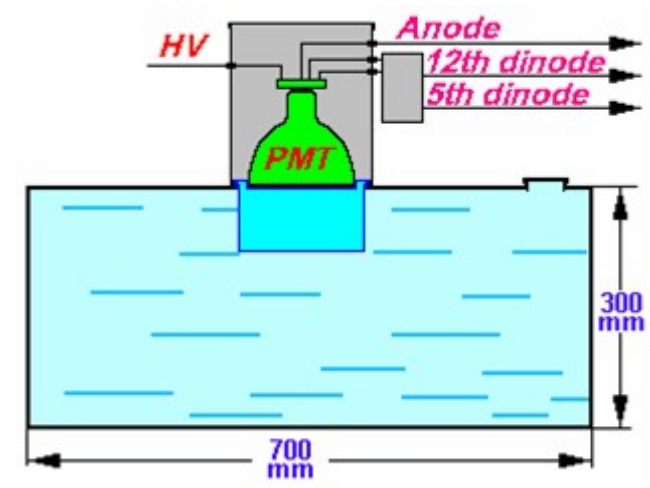
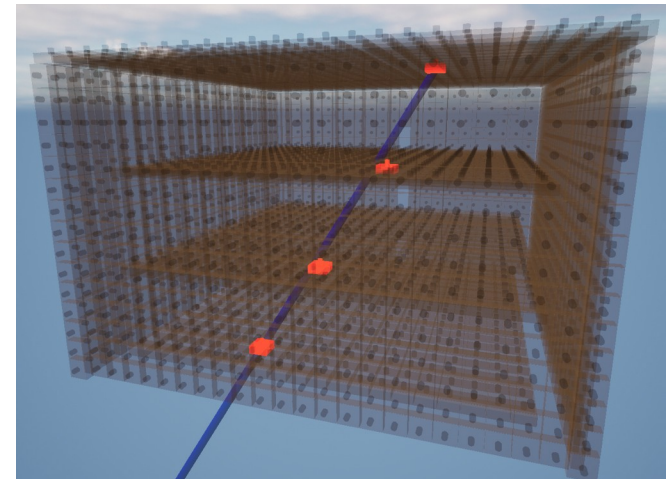


Схема события из
нижней полусферы

Из направления нижней полусферы отсутствует фон от проникающих под землю мюонов. Благодаря этому, в случае если мюон прилетел из нижней полусферы, можно считать, что он порожден от взаимодействия нейтрино с веществом под установкой. При пороге регистрации 1 ГэВ неопределенность направления нейтрино $\approx 5^\circ$.



Алерты LVC на портале GCN

https://gcn.gsfc.nasa.gov/lvc_events.html

- Всего просмотрено алертов: **8567**.
- Типы алертов: **Preliminary (8091), Initial (207), Update (216)**.
- **Preliminary**: первый алерт с временем и локализацией ГВ-события (вероятности расположения источника по небесной сфере), обработка данных автоматизирована.
- **Initial**: улучшенная локализация события после ручной обработки данных.
- **Update**: еще более улучшенная локализация события после более подробной обработки данных.
- Для некоторых триггеров высылаются алерты **Retracted** после того как выясняется что они имеют неастрофизическое происхождение.

Алерты LVC на портале GCN

for more information on the LVC operation, [LVC](#).

Mail questions/suggestions/complaints to [Scott Barthelmy](#).

LVC EVENTS																					
EVENT				OBSERVATION																	
EventNum	Date	Time UT	S E Q #	CBC								Burst								Cpart	
				Notice Type	Group Type	Search Type	Pipeline Type	FAR	NS	REMN	BNS	NSBH	BBH	Mass Gap	Terres	Fluence	Central Freq	Duration		SKYMAP	Event
S250617bc XML	2025/06/17	11:02:47.979979	2	Pre	1	1	15	5.909e-06	1.00	1.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.99					SKYMAP	EVENT
S250617bc	2025/06/17	11:02:47.979979	1	Pre	1	1	15	5.909e-06	1.00	1.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.99					SKYMAP	EVENT

TITLE: GCN/LVC NOTICE
 NOTICE_DATE: Tue 01 Apr 25 13:40:53 UT
 NOTICE_TYPE: LVC Preliminary
 TRIGGER_NUM: S250401cw
 TRIGGER_DATE: 20766 TJD; 91 DOY; 2025/04/01 (yyyy/mm/dd)
 TRIGGER_TIME: 49179.382800 SOD {13:39:39.382800} UT
 SEQUENCE_NUM: 1
 GROUP_TYPE: 1 = CBC
 SEARCH_TYPE: 8 = BBH
 PIPELINE_TYPE: 2 = CWB
 FAR: 2.803e-06 [Hz] (one per 4.1 days) (one per 0.01 years)
 TRIGGER_ID: 0x10
 MISC: 0x1898C03
 SKYMAP FITS URL: <https://gracedb.ligo.org/api/superevents/S250401cw/files/cwb.multiorder.fits,0>
 EVENTPAGE_URL: <https://gracedb.ligo.org/superevents/S250401cw/view/>
 COMMENTS: LVC Preliminary Trigger Alert.
 COMMENTS: This event is an OpenAlert.
 COMMENTS: LIGO-Hanford Observatory contributed to this candidate event.
 COMMENTS: LIGO-Livingston Observatory contributed to this candidate event.

Условия и результаты поиска

- Поиск совпадений ведется в интервале ± 500 секунд.
- При обнаружении совпадения по времени проверяется условие пересечения координаты нейтрино на БПСТ (с кругом ошибки 5°) с пятном локализации ГВ.

За период **2023/05/18 — 2025/04/01**:

Нейтринных событий на БПСТ: **81**.

Триггеров LVC: **4049**.

Пересечений по времени: **4**.

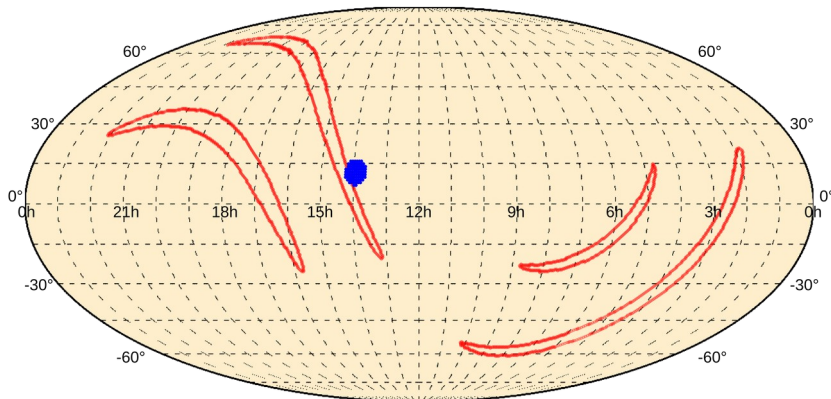
Совпадений по времени и координатам: **2**.

Число ожидаемых случайных пересечений по времени: **5.6**.

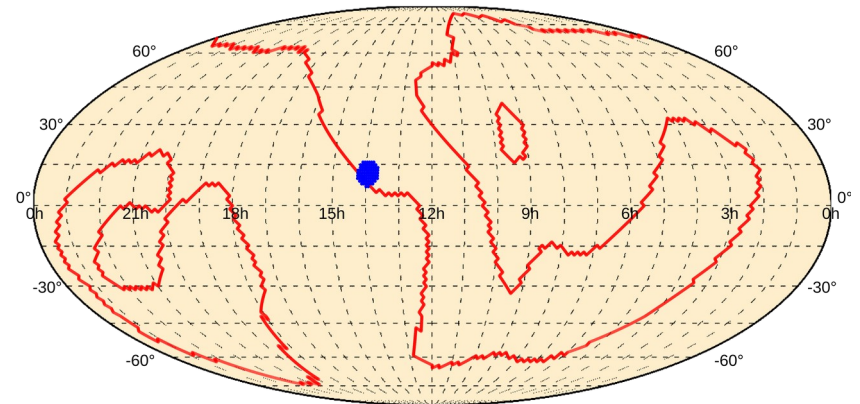
Найденные совпадения

Нейтрино на БПСТ 20.05.2024, 06:55:33 UT:

Пересечение с **S240520ac**,
06:56:54.6 UT, интервал между
событиями 81.6 секунд



Пересечение с **S240520ad**,
07:00:04.2 UT, интервал между
событиями 270.8 секунд



S240520ac и S240520ad относятся к типу алертов «Preliminary».

IceCube не сообщал о нейтрино от этих ГВ-триггеров.

Event Name	Merger Time (ISO)	LVK GCN Link	IceCube GCN	Duration (s)	N Coincident Neutrinos	IceCube Sensitivity ($E^2 dN/dE$, GeV cm^2)	Neutrino Information
S240520ad-2-Preliminary	2024-05-20 07:00:03.788818	LVK GCN	GCN Notice	1.00e+03	0	[0.028, 0.988]	-
S240520ad-1-Preliminary	2024-05-20 07:00:04.215546	LVK GCN	GCN Notice	1.00e+03	0	[0.028, 0.641]	-

Ограничения на E^2F

Число событий от источника:

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

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

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

$$\frac{d\Phi_{\nu}}{dE_{\nu}} = \Phi_0 \left(\frac{E_{\nu}}{\Gamma \text{ЭВ}} \right)^{-\gamma}$$

Ограничение на 90% доверительном уровне на Φ_0 :

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

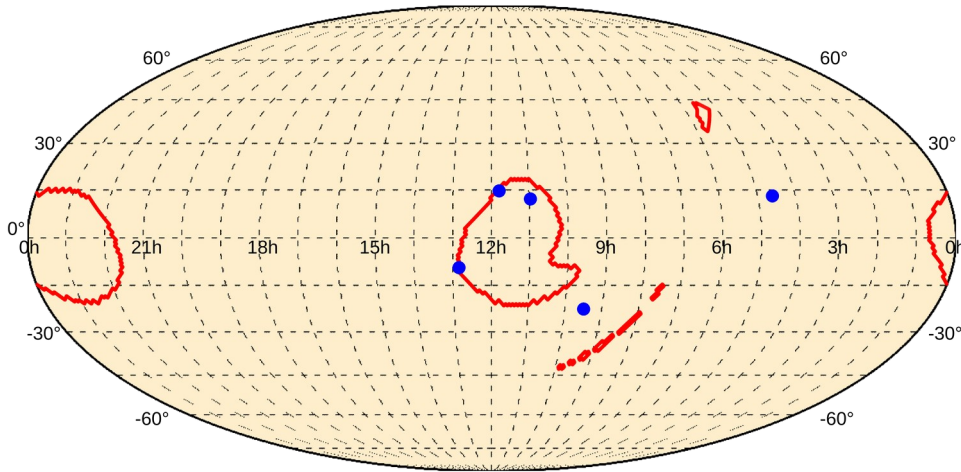
IceCube Realtime Gravitational Wave Follow-up

<https://roc.icecube.wisc.edu/public/LvkNuTrackSearch/>

Event Name	Merger Time (ISO)	LVK GCN Link	IceCube GCN	Duration (s)	N Coincident Neutrinos	IceCube Sensitivity ($E^2 dN/dE$, GeV cm^{-2})	Neutrino Information
S230604z-2-Preliminary	2023-06-04 09:20:31	LVK GCN	GCN Notice	1.00e+03	5	[0.028, 0.598]	here
S230605o-1-Preliminary	2023-06-05 06:53:43	LVK GCN	GCN Notice	1.00e+03	4	[0.028, 1.099]	here
S230608as-2-Initial	2023-06-08 20:50:47	LVK GCN	GCN Notice	1.00e+03	3	[0.028, 0.313]	here
S230608as-1-Preliminary	2023-06-08 20:50:47	LVK GCN	GCN Notice	1.00e+03	3	[0.028, 0.313]	here
S231113bs-2-Preliminary	2023-11-13 18:56:02	LVK GCN	GCN Notice	1.00e+03	3	[0.028, 0.885]	here
S231113bs-1-Preliminary	2023-11-13 18:56:02	LVK GCN	GCN Notice	1.00e+03	3	[0.028, 0.885]	here
S231215i-2-Preliminary	2023-12-15 02:30:21	LVK GCN	GCN Notice	1.00e+03	3	[0.028, 0.256]	here
S231215i-1-Preliminary	2023-12-15 02:30:21	LVK GCN	GCN Notice	1.00e+03	3	[0.028, 0.256]	here
S241225c-1-Preliminary	2024-12-25 04:25:53.245390	LVK GCN	GCN Notice	1.00e+03	3	[0.028, 0.854]	here
S230522a-2-Preliminary	2023-05-22 00:30:05	LVK GCN	GCN Circular	1.00e+03	2	[0.028, 1.133]	here

Нейтринные события IceCube	Число совпадений
5	1
4	1
3	7
2	44
1	365

IceCube Realtime Gravitational Wave Follow-up

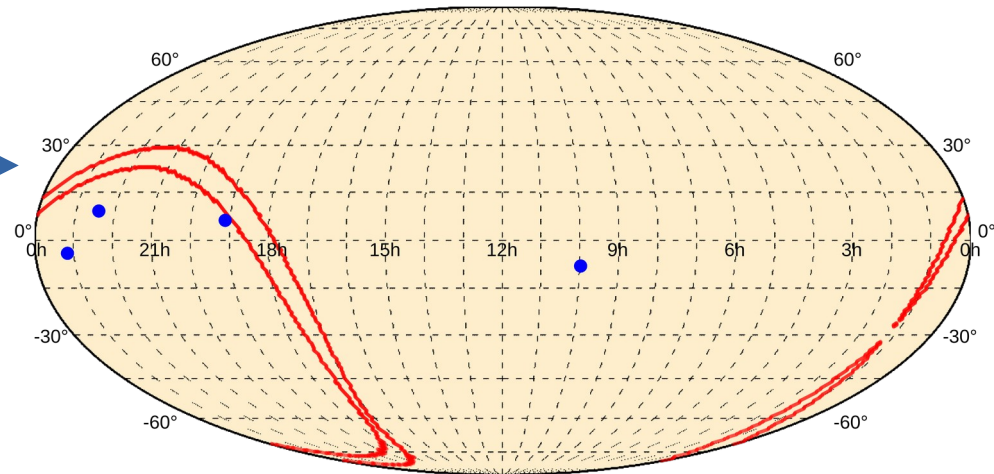


← S230604z-2-Preliminary, 5 Neutrinos

S230605o-1-Preliminary, 4 Neutrinos →

S230605o-2-Preliminary, 2 Neutrinos

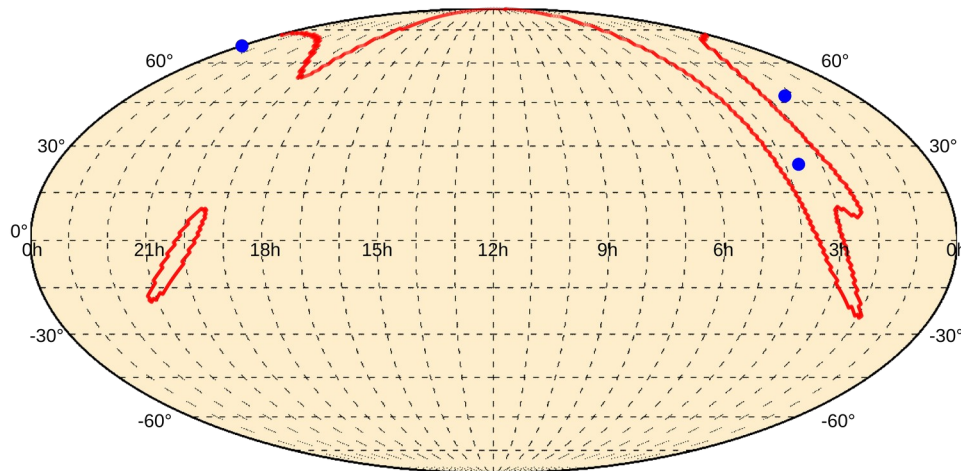
S230605o-4-Update, 0 Neutrinos



S230608as-1-Preliminary, 3 Neutrinos

← S230608as-2-Initial, 3 Neutrinos

S230608as-3-Update, 0 Neutrinos



Выводы

- За период 2023/05/18 — 2025/04/01 было 81 нейтринное событие на БПСТ и 4049 триггеров от детекторов LVK. Это соответствует ожидаемому числу случайных пересечений по времени ~ 5.6 . Обнаруженное число пересечений по времени 4.
- За период 2023/05/18 — 2025/04/01 обнаружено совпадение одного нейтринного события на БПСТ с двумя ГВ-триггерами, которые появились с интервалами 81.6 с. и 270.8 с (интервал между ГВ-триггерами 189.2 с.). На установке IceCube не зарегистрированы нейтрино от этих ГВ-триггеров.
- Для следующего наблюдательного периода LVK нужно реализовать возможность своевременного размещения результатов поиска совпадений нейтрино на БПСТ с ГВ-триггерами на интернет-ресурсе.

Спасибо за внимание!