

Annotation of the Baikal-GVD Talk at PAC 2024

Baikal-GVD is the largest neutrino telescope currently operating in the Northern hemisphere. It is being constructed in Lake Baikal, with new clusters being added every spring. The telescope consists of clusters of optical modules, currently 13, with each cluster operated as an independent unit. The modular design of the detector enables physical results to be obtained already during the construction phase. The cluster consists of 9 525-meters long strings. At present, the underwater installation consists of 4,104 optical modules arranged in 114 strings. Like other water Cherenkov instruments, it detects neutrino-induced events as cascades and tracks, with very different sensitivities and analysis procedures. In the nearest future, two full-scale telescope clusters will be deployed and field testing of the new equipment will continue for the next-generation detector.

The high-energy cascade sample contains events with reconstructed energy $E \geq 100$ TeV from all directions of incoming particles or with $E \geq 15$ TeV from below, where the background from atmospheric muons significantly reduced. The sample has an expected probability of the astrophysical origin $> 50\%$, estimated from simulations. Recently, we have added two more years of data collection. These two additional years almost doubled the exposure, corresponding to ≈ 27 years of one-cluster operation from Spring 2018 to Spring 2024. The significance of the excess over the expected number of atmospheric background events was estimated as 5.1σ . We have made a global fit to these neutrino data, fitting the cascade energy distribution, to extract information about the astrophysical neutrino flux. The measured values of a power law spectral index of $\gamma = 2.58 \pm 0.30$ and the astrophysical flux normalization for each neutrino flavor at 100 TeV $\phi = 3.04$ are in good agreement with the previous fits derived from the IceCube data. With these results we confirm for the first time the IceCube observation of astrophysical diffuse neutrino flux at 5σ confidence level.

We leverage the relatively high angular resolution of the telescope for cascades (2–3 degrees), made possible by using liquid water as a detection medium, enabling the study of astrophysical point sources even in this neutrino registration channel. We estimate the sensitivity of the telescope in the cascade channel for high-energy astrophysical sources. We primarily focus on cascade events with energies exceeding 100 TeV, which we employ to search for correlation with radio-bright blazars. Currently, the limited size of the neutrino sample provides no statistically significant results. However, our analysis has suggested a number of potential associations with both extra-galactic and galactic sources. Specifically, we have observed a triplet of candidate neutrino events in the galactic plane, focusing on their potential connection to certain galactic sources, and have analyzed of the coincidence of cascade events with several bright and flaring blazar sources.

We reported on the detection of a rare neutrino event with an estimated energy of 224 ± 75 TeV coming from the direction of TXS 0506+056. Before that, IceCube had detected the 290 TeV neutrino from the same direction. This is the highest-energy neutrino cascade detected to date by Baikal-GVD, came from below the horizon. The probability that it has an astrophysical origin was estimated at 97.1%. The result supports the previous suggestion that radio blazars are generally the sources of high-energy neutrinos.

Also, we consider 8 cascade events that passed the $E \geq 200$ TeV cutoff. Only one of these events came from below the horizon, because the Earth becomes opaque to neutrinos with sub-PeV energy. Monte-Carlo simulations indicate that about 64% of the events that pass the selection criteria with $E \geq 200$ TeV are expected to be of astrophysical origin. We take a model-independent approach that does not depend on any assumptions about the origin or properties of the galactic signal, and only tests for an excess of events in the Galactic plane. We introduce the non-parametric test statistic: the median absolute value of the Galactic latitude ($|b_{\text{med}}|$) calculated over the event sample.

We compare the observed value of $|b_{\text{med}}|$ with the reshuffled right ascension values of the observed events, which provides a robust data-driven method for generating random sets of arrival directions, that is used multiple times. In this way, we generate 10^5 artificial sets with 8 events each and calculate $|b_{\text{med}}|$ for each of them. For the experimental data set, $|b_{\text{med}}| = 10.4^\circ$, while the value expected from reshuffling is 31.4° , indicating the presence of the Galactic excess in the data corresponding to the 2.5σ significance. We estimated the fraction of Milky Way events in the overall astrophysical neutrino flux above 200 TeV and obtained rough estimates of the Milky Way neutrino flux at energies between 200 TeV and 1 PeV. Our results agree well with IceCube's tracks and cascades within the given uncertainties. The Galactic neutrino component at very high energies is so prominent that it is clearly seen despite low statistics. The fraction of galactic events in the total astrophysical flux above 200 TeV reaches several tens per cent, which is in a disagreement with assumptions of many model-dependent theoretical predictions.

Moreover, we have also found an excess above 200 TeV in the most recent public data sets from IceCube. We performed a combined analysis of the Baikal-GVD and IceCube data that has a significance of 3.6σ for the existence of galactic neutrinos above 200 TeV.

The implementation of an automated data processing system has reduced analysis delays to 3–10 minutes, allowing to perform real-time searches for astrophysical sources associated with multimessenger signals, such as gamma-ray bursts, gravitational waves, neutrino alerts etc. The system searches for coincidences in space and time between Baikal-GVD events and external alerts from other observatories and assesses their significance. In case where no significant signal is detected, an upper limit on neutrino flux is calculated. Since 2021, only one coincidence with a significance above 2.5σ (pre-trial) has been observed. On December 8th, 2021, the IceCube telescope published an almost immediate alert about the detection of high-energy neutrino in the direction close to the bright blazar PKS 0735+17. Other observatories detected the active state of the source in almost the entire range of electromagnetic waves. The Baikal-GVD telescope registered a high-energy cascade event in the direction of this source 4 hours after the IceCube event. We published the first astronomical telegram about this observation.

The track channel for neutrino registration is much more challenging to develop than the cascade channel due to fluctuations in energy loss, and therefore the corresponding results take longer to obtain. About 2613 track-like neutrino candidates were extracted from the data between 2020 and 2023. Among them, 33 events had energies greater than 60 TeV and 20 had energies above 100 TeV. Analysis of this sample is ongoing.

Аннотация выступления Baikal-GVD на PAC 2024

Baikal-GVD - крупнейший нейтринный телескоп, работающий в настоящее время в Северном полушарии. Он строится на озере Байкал, и каждую весну вводятся в эксплуатацию новые кластеры. Телескоп состоит из кластеров оптических модулей, которых в настоящее время 13, причем каждый кластер работает как независимая единица. Модульная конструкция детектора позволяет получать физические результаты уже на этапе строительства. Кластер состоит из 9 гирлянд длиной 525 метров. В настоящее время подводная установка состоит из 4104 оптических модулей, расположенных в 114 гирляндах. Как и другие водные черенковские детекторы, телескоп регистрирует нейтрино в виде каскадных и трековых событий с различной чувствительностью и процедурами анализа. В самое ближайшее время планируется развернуть два полноценных кластера, а также продолжить натурные испытания нового оборудования для детектора следующего поколения.

Полученный на телескопе набор каскадных событий высоких энергий содержит события с энергиями выше 100 ТэВ, пришедших со всех направлений, или выше 15 ТэВ, пришедших из-под горизонта, где фон от атмосферных мюонов значительно подавлен. Выборка имеет ожидаемую вероятность астрофизического происхождения выше 50%, оцененную на основе моделирования. Недавно в указанный анализ были включены данные, набранные за два года. При этом, совокупный набор данных, набранный за период с весны 2018 по весну 2024 года, фактически удваивает экспозицию, которая составила примерно 27 лет работы одного кластера. Значимость превышения ожидаемого количества событий над атмосферным фоном составила 5.1σ . Был произведен глобальный фит этих данных, чтобы извлечь информацию об астрофизическом потоке нейтрино. Полученные индекс степенного спектра $\gamma = 2.58 \pm 0.30$, и нормировка астрофизического потока для каждого нейтринного аромата при 100 ТэВ $\phi = 3.04$, хорошо согласуются с предыдущими измерениями, полученными на телескопе IceCube. Результаты Baikal-GVD впервые независимо подтверждают наблюдение IceCube астрофизического диффузного потока нейтрино со значимостью в 5σ .

Относительно высокое угловое разрешение телескопа для каскадных событий (2-3 градуса), ставшее возможным благодаря использованию воды оз. Байкал в качестве мишени, позволяет изучать астрофизические точечные источники в этом канале регистрации нейтрино. Была оценена чувствительность телескопа в каскадном канале для высокоэнергетических астрофизических источников. В первую очередь рассматривались каскады с энергиями выше 100 ТэВ для поиска корреляции с радиояркими блазарами. В настоящее время ограниченный размер выборки нейтрино не дает статистически значимых эффектов. Однако анализ выявил ряд возможных ассоциаций как с внегалактическими, так и с галактическими источниками. В частности, был обнаружен триплет событий-кандидатов в нейтрино в плоскости Галактики, статистически оценена его связь с определенными галактическими источниками и проведен анализ совпадения каскадов с несколькими яркими и активными блазарами.

Было зарегистрировано редкое нейтринное событие с энергией 224 ± 75 ТэВ в направлении яркого блазара TXS 0506+056, с которого ранее телескопом IceCube было обнаружено нейтрино с энергией 290 ТэВ. Событие Baikal-GVD примечательно тем, что является каскадом самой высокой энергии, когда-либо обнаруженным в телескопе в направлении из-под горизонта. Вероятность его астрофизического происхождения оценивается в 97.1%. Этот результат подтверждает предыдущие предположения о том, что радиоблазары в целом являются источниками высокоэнергетических нейтрино.

Кроме того, были отдельно рассмотрены 8 каскадных событий с энергией выше 200 ТэВ. Только одно из этих событий пришло из-под горизонта, потому что Земля становится непрозрачной для нейтрино с энергиями около ПэВ. Моделирование методом Монте-Карло показывает, что около 64% событий, удовлетворяющих критериям отбора и имеющих $E \geq 200$ ТэВ, имеют астрофизическое происхождение. Был использован модельно-независимый

подход, который не опирается на какие-либо предположения о происхождении и свойствах галактического сигнала и рассматривает только избыток событий из плоскости Галактики. Мы вводим единственную непараметрическую тестовую статистику, медиану абсолютного значения галактической широты, $|b_{med}|$, рассчитанную по выборке событий.

Наблюдаемое значение $|b_{med}|$ было сравнено со значениями наблюдаемых событий, перетасованных по прямому восхождению, что обеспечивает надежный способ генерации случайных наборов направлений событий на основе данных. Таким образом, было сгенерировано 10^5 искусственных наборов по 8 событий в каждом и вычислено $|b_{med}|$ для каждого из них. Для реального набора данных $|b_{med}| = 10.4^\circ$, в то время как значение, ожидаемое от такой перетасовки, равно 31.4° , что указывает на наличие галактического избытка событий в данных со статистической значимостью 2.5σ . Была оценена доля событий из Млечного Пути в общем потоке астрофизических нейтрино выше 200 ТэВ и получена приблизительная оценка потока нейтрино из Млечного Пути при энергиях от 200 ТэВ до 1 ПэВ. Результаты хорошо согласуются с результатами IceCube в пределах неопределенностей. Компонента от галактических нейтрино при очень высоких энергиях настолько заметна, что ее отчетливо видно, несмотря на низкую статистику. Доля галактических событий в общем астрофизическом потоке выше 200 ТэВ достигает нескольких десятков процентов, что противоречит предположениям многих теоретических модельно-зависимых предсказаний.

Более того, было обнаружено превышение событий выше 200 ТэВ в самых последних общедоступных данных IceCube, как по каскадным, так и по трековым событиям. Был проведен совместный анализ данных Baikal-GVD и IceCube, результатом которого является наблюдение галактических нейтрино с энергией выше 200 ТэВ на уровне значимости в 3.6σ .

Внедрение автоматизированной системы обработки данных сократило задержки анализа до 3-10 минут, что позволяет выполнять поиск астрофизических источников, связанных с оповещениями от других обсерваторий гамма-всплесков, гравитационных волн, нейтрино и других, в режиме реального времени. Система рассчитана на поиск совпадений по времени и направлению между событиями Baikal-GVD и внешними алерт-сигналами и оценивает их значимость. В случаях, когда не обнаруживается значимого сигнала, рассчитывается верхний предел на поток нейтрино. С 2021 года было обнаружено только одно совпадение со значимостью выше 2.5σ (pre-trial). 8-го декабря 2021 года телескопом IceCube был практически без задержки опубликован алерт-сигнал о регистрации нейтрино высокой энергии в направлении близком к яркому блазару PKS 0735+17. Другими обсерваториями было обнаружено активное состояние источника практически во всем диапазоне электромагнитных волн. Телескоп Baikal-GVD зарегистрировал каскадное событие с высокой энергией в направлении на этот источник через 4 часа после события IceCube. Об этом наблюдении была опубликована астрономическая телеграмма.

Трековый канал регистрации нейтрино намного сложнее в разработке, чем каскадный, из-за выраженного стохастического характера потерь энергии, и поэтому соответствующие результаты будут доложены позднее. Из данных за период 2021-2023 годы было выделено около 2613 трековых нейтринных кандидатов. Среди них 33 события с энергией выше 60 ТэВ и 20 событий с энергией выше 100 ТэВ. Анализ этих данных продолжается.