

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Физический факультет

Кафедра физики частиц и космологии

Курсовая работа

на тему:

«Нейтринные вспышки радиоблазаров»

Выполнила студентка

213 группы

Сурай Алиса Игоревна

Научный руководитель:

член-корр. РАН

Троицкий Сергей Вадимович

МОСКВА

2023

Содержание

1	Введение	2
2	Постановка задачи	3
2.1	Ассоциация нейтрино низких и высоких энергий с радиоблазарами	3
2.2	Пи-мезонный механизм	4
3	Статистический анализ	6
3.1	Данные	6
3.2	Статистический метод	9
3.3	Результаты	11
4	Выводы	11
4.1	Научные результаты	11
4.2	Что было сделано	14

1 Введение

Существование нейтрино с энергиями в десятки ТэВ и выше надежно подтверждено наблюдениями обсерваторий по всему миру, таких как IceCube, ANTARES, Baikal-GVD. Нейтринная астрономия является средством выявления источников частиц с самой высокой энергией в нашей Вселенной, так как нейтрино не обладают электрическим зарядом, и следовательно не меняют направление под действием электромагнитного поля. Эти частицы могут нести информацию о явлениях, происходящих в самых отдаленных объектах. Известно, что они являются маркерами взаимодействий релятивистских адронов, так как это единственный способ рождения астрофизических нейтрино с энергиями ≥ 10 ТэВ, не привлекающий нестандартную физику. Начиная с 2016 года нейтринная обсерватория IceCube вносит неоценимый вклад в развитие данного раздела астрономии. Этот проект был разработан для достижения следующих целей: измерение потока и энергии нейтрино, а также осуществление попыток идентификации некоторых из их источников. Показано статистически, что нейтрино связаны с радиоблазарами. Но детали протекающих в них процессов неизвестны. Исследование приходящих от них нейтрино должно помочь более подробно изучить условия и процесс их рождения. Но многие из нейтрино вообще не астрофизические. Вероятно, есть и астрофизические, но от других источников (например, в нашей Галактике). Основным фоном для их регистрации являются мюоны и нейтрино от взаимодействия космических лучей с атмосферой Земли. За исключением нейтрино самых высоких энергий, которые просто не могут быть атмосферными, рассматривая отдельно взятую частицу, нельзя однозначно сказать имеет она атмосферное или астрофизическое происхождение. Однако анализ совокупности данных позволяет выделить астрофизическую компоненту.

2 Постановка задачи

2.1 Ассоциация нейтрино низких и высоких энергий с радиоблазарами

Существуют наблюдения указывающие на то, что нейтрино разных энергий рождаются в блазарах. Первым блазаром, который был сопоставлен с нейтринным событием высокой энергии IceCube-170922A, является TXS 0506+056 [1] (2017г.). Наиболее вероятная энергия нейтрино была оценена в 290 ТэВ. Также IceCube сообщила об обнаружении нейтрино с более низкими энергиями, пришедших с того же направления, [2] (2014-2015 гг). Кроме того, обсерватория Baikal-GVD обнаружила каскад с энергией 224 ТэВ в направлении TXS 0506+056 в 2021 году [3]. Статистическое доказательство связи между нейтрино высоких энергий, обнаруженными IceCube, и радиоблазарами приводится в работе [4], а между нейтрино более низких энергий и радиоблазарами — [5]. Но неизвестно, рождаются ли эти нейтрино в разных блазарах и не существует таких активных галактик, что они одновременно генерируют и нейтрино высокой энергии, и низкой, или наоборот каждый блазар может одновременно производить нейтрино совершенно разных энергий.

По каждому событию IceCube публикует сообщение, в котором указывает, сколько нейтрино меньших энергий пришло с того же направления примерно в то же время, что и высокоэнергичное. В каждом конкретном случае это совпадение можно объяснить случайными причинами. Задача состоит в том, чтобы разобраться, не происходит ли такое, что события, совпадающие с блазарами, чаще имеют дополнительный нейтрино, а не совпадающие - нет. Если такой эффект обнаружится, надо оценить его статистическую значимость, то есть вероятность того, что он является случайным и не означает ничего интересного.

Далее рассмотрим варианты образования нейтрино и оценим уносимую ими долю энергии начальных частиц.

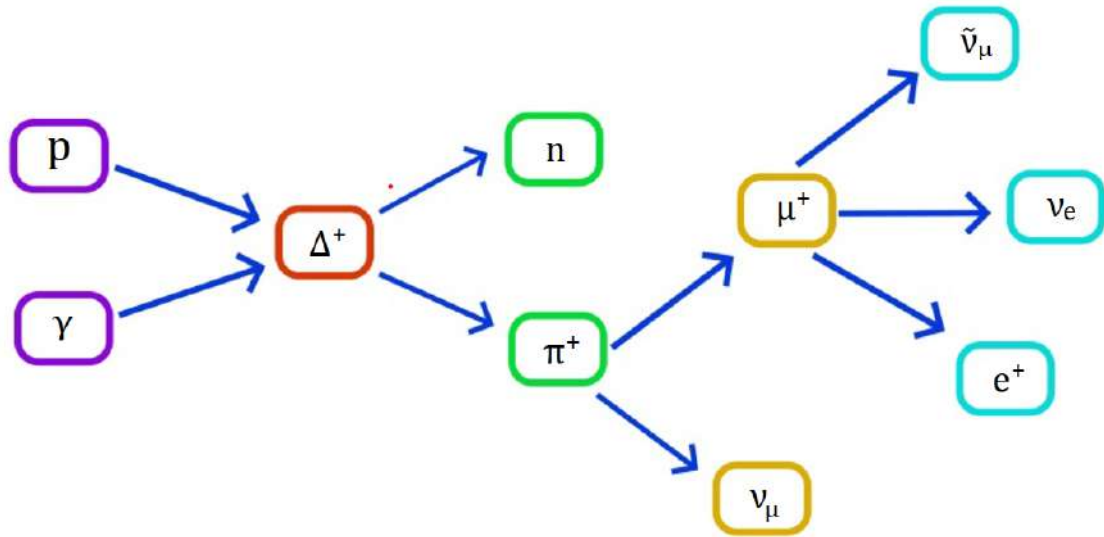


Рис.1 Вариант процесса рождения нейтрино в астрофизических источниках

2.2 Пи-мезонный механизм

Нейтрино высоких энергий могут быть получены как в результате распадов ультрарелятивистских ядер, так и при распаде или аннигиляции очень тяжелых медленных частиц. Мы рассмотрим механизм связанный с распадами π -мезонов, который гарантированно протекает в астрофизических условиях. Для реализации этого процесса требуется присутствие частиц космического излучения (высокоэнергичных протонов и ядер), которые взаимодействуют с окружающим веществом или излучением. А интенсивность этого процесса должна зависеть от количества вещества среды или фотонов-"мишеней". π -мезоны нестабильны, и среди продуктов их распада имеются нейтрино высоких энергий.

Протон-фотонное взаимодействие. Рассмотрим взаимодействие релятивистских протонов (будем считать все релятивистские адроны и адроны среды протонами(p)) с окружающими фотонами (γ). Основной вклад в рождение астрофизических нейтрино вносят реакции с рождением единичного π -мезона, так как значительные концентрации фотонов в источнике достигаются лишь при относительно небольших энергиях. Основным каналом реакции является резонансное рождение и последующий распад Δ^+ -бариона,

$$p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \quad (1)$$

$$\Delta^+ \rightarrow n + \pi^+ \quad (2)$$

(n — нейтрон)

Получим условие резонанса. Все расчеты будем производить в системе единиц $c=1$.

Запишем систему уравнений для реакции (1) в системе отсчета Δ^+ -бариона:

$$\begin{cases} E_p + E_\gamma = E_\Delta \\ \mathbf{p}_p + \mathbf{p}_\gamma = \mathbf{0} \\ E_p^2 = m_p^2 + \mathbf{p}_p^2 \\ E_\gamma = |\mathbf{p}_\gamma| \\ E_\Delta = m_\Delta \end{cases},$$

где E_p, E_γ, E_Δ — полные энергии протона, фотона, Δ^+ -бариона соответственно, а $\mathbf{p}_p, \mathbf{p}_\gamma, \mathbf{p}_\Delta$ — трехимпульсы протона, фотона и Δ^+ -бариона соответственно. Далее воспользуемся инвариантным соотношением $s = (p_1 + p_2)^2$ и запишем его для реакции (1).

$$(p_p + p_\gamma)^2 = (p_p' + p_\gamma')^2,$$

где p_p и p_γ — четырехимпульсы протона и фотона соответственно в системе отсчета Δ^+ . Учитывая, что $(p_p + p_\gamma)^2 = (E_p + E_\gamma)^2 + (\mathbf{p}_p - \mathbf{p}_\gamma)^2$, получим

$$E_p' E_\gamma' = m_\Delta^2, \quad (3)$$

где $m_\Delta \approx 1,23$ ГэВ — масса Δ -бариона.

Учет кинематики двухчастичного распада Δ^+ дает возможность определить долю энергии начальных частиц, уносимую π^+ -мезоном.

Получаем

$$E_\pi \approx \frac{E_p}{5} \quad (4)$$

Конечные продукты определяются распадами,

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (5)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \tilde{\nu}_\mu \quad (6)$$

Энергия при распаде делится примерно поровну между четырьмя лептонами. Поэтому энергию исходного протона можно оценить как $E_p \approx 20E_\nu$. Мы также можем оценить энергию исходного фотона в γ -процессе по энергии родившегося нейтрино E_ν . Используя условие резонанса получим

$$E_\gamma = \frac{m_\Delta^2}{20E_\nu} \approx 750 \text{ эВ} \left(\frac{E_\nu}{100 \text{ ТэВ}} \right)^{-1} \quad (7)$$

Приведенные оценки являются приближенными и в ряде случаев могут не выполняться.

3 Статистический анализ

3.1 Данные

В анализе использовалась средняя плотность потока радиоизлучения из РСДБ-наблюдений в диапазоне частот 8-12 ГГц (X-диапазон) собранных в базе данных http://astrogeo.org/sol/rfc/rfc_2022b/. В каталоге насчитывается $\approx 21,9$ млн источников. Отбор происходит по нижней границе плотности потока - 0,15 Ян. В итоге, наша выборка содержит 3411 радиоблазаров. Обсерватория IceCube публикует сообщения о наблюдении нейтрино с энергиями в десятки ТэВ и выше и указывает, сколько нейтрино меньших энергий пришло с того же направления примерно в то же время, что и высокоэнергичное. Рассматривался временной диапазон длиной 2 дня вокруг времени регистрации высокоэнергичного нейтрино. Кроме того, публикуется значение вероятности того, что приход дополнительного нейтрино совпадает с приходом атмосферного (p-value),

которое и используется в анализе. Эти данные брались из архива циркуляров https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html (2018-2022гг) и были дополнены данными из статьи [6] (2011-2018гг).

Табл.1 Высокоэнергичные события IceCube, используемые в анализе

Дата	E (ТэВ)	$ra(^{\circ})$	$ra_{err} +$ ($^{\circ}$)	$ra_{err} -$ ($^{\circ}$)	$dec(^{\circ})$	$dec_{err} +$ ($^{\circ}$)	$dec_{err} -$ ($^{\circ}$)	$p \pm 1\text{day}$
10.06.2011	210.0	272.22	1.230	1.190	35.55	0.28	0.29	1.0
14.07.2011	253.0	67.86	0.51	0.72	40.32	0.73	0.25	1.0
30.09.2011		266.48	2.090	1.550	-4.41	0.59	0.86	0.21
01.03.2012		238.01	0.6	0.59	18.600	0.46	0.39	1.0
15.05.2012	200.0	198.74	1.440	1.090	31.96	0.81	0.58	0.08
23.05.2012		171.03	0.81	0.9	26.36	0.49	0.3	1.0
07.08.2012	260.0	330.1	0.65	0.82	1.570	0.46	0.42	1.0
22.09.2012		70.75	1.560	1.630	19.79	1.370	0.68	1.0
11.10.2012	210.0	205.22	0.59	0.65	-2.39	0.51	0.57	0.05
26.10.2012	750.0	169.61	1.160	1.110	28.040	0.67	0.66	1.0
27.06.2013	200.5	93.43	0.8	0.85	14.020	0.72	0.75	1.0
14.10.2013	390.0	32.94	0.63	0.62	10.200	0.34	0.49	1.0
23.10.2013		301.82	1.100	0.93	11.490	1.190	1.090	1.0
04.12.2013		289.16	1.080	0.94	-14.25	0.91	0.81	0.07
08.01.2014		344.53	0.67	0.48	1.570	0.35	0.32	0.21
09.01.2014	850.0	292.85	0.87	0.94	33.06	0.5	0.46	1.0
22.01.2014	429.9	219.64	5.160	4.160	-86.16	0.55	0.6	1.0
03.02.2014		349.54	2.210	1.970	-13.71	1.230	1.380	1.0
09.06.2014	340.0	106.26	2.270	1.900	1.290	0.83	0.74	1.0
11.06.2014	4450.0	110.3	0.66	0.45	11.570	0.14	0.24	1.0
23.09.2014		169.72	0.91	0.86	-1.34	0.73	0.66	1.0
27.01.2015	210.0	100.48	0.95	1.870	4.560	0.68	0.5	1.0
15.05.2015	240.0	91.6	0.16	0.74	12.180	0.37	0.35	1.0
14.07.2015	300.0	325.5	1.770	1.460	26.100	1.680	1.850	1.0
12.08.2015	380.0	328.19	1.010	1.030	6.210	0.44	0.49	0.04
31.08.2015		54.85	0.94	0.98	33.96	1.070	1.190	1.0
04.09.2015	220.0	134.0	0.39	0.58	28.0	0.47	0.47	1.0

Дата	E (ТэВ)	$ra(^{\circ})$	$ra_{err} +$ ($^{\circ}$)	$ra_{err} -$ ($^{\circ}$)	$dec(^{\circ})$	$dec_{err} +$ ($^{\circ}$)	$dec_{err} -$ ($^{\circ}$)	$p \pm 1day$
23.09.2015		103.27	0.7	1.360	3.880	0.59	0.71	1.0
26.09.2015		194.5	0.76	1.210	-4.34	0.7	0.95	1.0
14.11.2015	740.0	76.3	0.75	0.74	12.600	0.61	0.58	1.0
22.11.2015		262.18	0.9	1.210	-2.38	0.73	0.43	1.0
28.01.2016		263.4	1.350	1.180	-14.79	0.99	1.020	1.0
31.03.2016	380.0	15.600	0.45	0.58	15.600	0.53	0.6	1.0
10.05.2016		352.34	1.630	1.310	2.090	0.99	0.85	1.0
31.07.2016	158.15	214.5	0.75	0.75	-0.33	0.75	0.75	1.0
06.08.2016		122.81	0.5	0.5	-0.81	0.5	0.5	1.0
10.12.2016		46.58	1.100	1.0	14.98	0.45	0.4	0.11
21.03.2017	62.14	98.3	1.200	1.200	-15.02	1.200	1.200	1.0
22.09.2017	290.0	77.43	0.95	0.65	5.720	0.5	0.3	1.0
06.11.2017	154.56	340.0	0.7	0.5	7.400	0.35	0.25	0.11
08.09.2018	54.31	144.58	1.550	1.450	-2.13	0.9	1.200	0.05
23.10.2018	61.48	270.18	2.0	1.700	-8.57	1.250	1.300	1.0
31.03.2019	1987.36	337.68	0.23	0.34	-20.7	0.3	0.48	1.0
03.05.2019	49.0	120.28	0.57	0.77	6.350	0.76	0.7	1.0
30.07.2019	299.0	225.79	1.280	1.430	10.470	1.140	0.89	1.0
15.06.2020	496.4	142.95	1.180	1.450	3.660	1.190	1.060	1.0
26.09.2020	670.5	96.46	0.73	0.55	-4.33	0.61	0.76	1.0
07.10.2020	682.7	265.17	0.52	0.52	5.340	0.32	0.23	1.0
14.11.2020	214.3	105.25	1.280	1.120	6.050	0.95	0.95	1.0
30.11.2020	203.4	30.54	1.130	1.310	-12.1	1.150	1.130	0.13
09.12.2020	418.6	6.86	1.020	1.220	-9.25	0.99	1.140	1.0
10.02.2021	287.4	206.06	1.400	0.95	4.780	0.62	0.56	1.0
11.08.2021	217.7	270.79	1.070	1.080	25.28	0.79	0.84	1.0
22.09.2021	750.8	60.73	0.96	0.66	-4.18	0.42	0.55	1.0
05.02.2022	215.9	266.8	0.511	0.511	-3.58	0.51	0.51	0.03
03.03.2022	398.1	267.8	1.500	1.170	11.420	0.89	1.140	0.12
06.03.2022	413.1	314.82	0.54	0.52	8.610	0.47	0.55	1.0
25.04.2022	604.0	268.24	1.980	1.660	-10.73	1.710	1.480	1.0
13.05.2022	207.9	224.03	1.360	1.270	-1.34	0.74	0.81	1.0
23.12.2022		350.54	0.67	0.67	34.71	0.67	0.67	1.0
29.12.2022		31.90	1.68	1.55	4.18	1.39	0.84	1.0

3.2 Статистический метод

Проверим статистически, действительно ли сообщениям совпадающим с блазарами соответствуют меньшие значения p -value. Усредним плотность потока по всем источникам лежащим внутри области неопределенности направления прихода нейтрино. В качестве тестовой статистики возьмем отношение средней плотности потока по нейтринным событиям, характеризующимся p -value < 1 , к усредненному значению плотности потока по всем событиям. Затем проверим, значительно ли оно выше того, что могло получиться для случайно выбранных блазаров. Будем использовать метод Монте-Карло следующим образом:

- Рассчитаем тестовую статистику для исходного положения событий IceCube. Обозначим её v_{real} .
- Повторим 100 000 раз следующее:
 - Присвоим каждому событию IceCube случайное прямое восхождение при сохранении остальных параметров.
 - Рассчитаем ту же тестовую статистику для этих, сдвинутых случайным образом, событий. Обозначим их v_i , $1 \leq i \leq N$.
- Эмпирическое распределение v_i представляет собой распределение тестовых статистик, рассчитанных из предположения, что они не связаны с обнаружением нейтрино.
- Подсчитаем сколько раз тестовая статистика v_i превзойдет v_{real} и наоборот.

$$M = \sum_i [v_i \geq v_{real}]$$

$$N = \sum_i [v_i \leq v_{real}]$$

. Определим величину

$$p = \frac{M + 1}{M + N + 1}$$

Под ней будем понимать вероятность случайного совпадения времени прихода высокоэнергичного нейтрино и нейтрино более низких энергий.

Для проведения данной процедуры нам необходимо определить области ошибок направления прихода нейтрино для каждого события IceCube. Изначально мы имеем значения 90%-ой двусторонней статистической неопределенности координат (прямого восхождения и склонения), которые так же указываются в циркулярах в архиве https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html в следующем виде:

$$RA(+errorRA1, -errorRA2); Dec(+errorDec1, -errorDec2)$$

На плоскости эта ошибка представляла бы собой прямоугольник со сторонами $(errorRA1 + errorRA2)$ и $(errorDec1 + errorDec2)$. Но хотим мы получить область на плоскости, ограниченную четырьмя четвертями эллипсов, в которой с 90%-ой вероятностью лежит наше измерение. Нетрудно догадаться, что полуоси такого эллипса не совпадут с имеющимися на данный момент ошибками координат. А именно, они будут больше приблизительно в 1,3 раза после умножения на отношение 90%-ых двух- и одномерных квантилей распределения Гаусса $\frac{\sqrt{-\log(1-0.9)}}{erf^{-1}(0.9)} \approx 1.30$. Помимо статистической ошибки нам необходимо определить ошибку систематическую. Подробности процедуры выбора систематической неопределенности можно посмотреть в статье [7]. А мы стартуем с уже готового результата $x = 0.45^\circ$.

Также рассчитаем вероятность случайного совпадения прихода низкоэнергетического нейтрино в направлении высокоэнергетического используя коэффициент ранговой корреляции Спирмена, который был посчитан по следующей формуле:

$$\rho = \frac{\frac{n^3-n}{6} - T_x - T_y - \sum_{i=1}^n d_i^2}{\sqrt{(\frac{n^3-n}{6} - 2T_x)(\frac{n^3-n}{6} - 2T_y)}}, \quad (8)$$

где n - количество элементов в ранжируемом списке,

d_i - разность между рангами,

T_x и T_y - поправка на одинаковые ранги

$$T_x = \frac{1}{12} \sum (p_x^3 - p_x); T_y = \frac{1}{12} \sum (p_y^3 - p_y),$$

где p_x - объем каждой группы одинаковых рангов в выборке x

p_y - объем каждой группы одинаковых рангов в выборке y

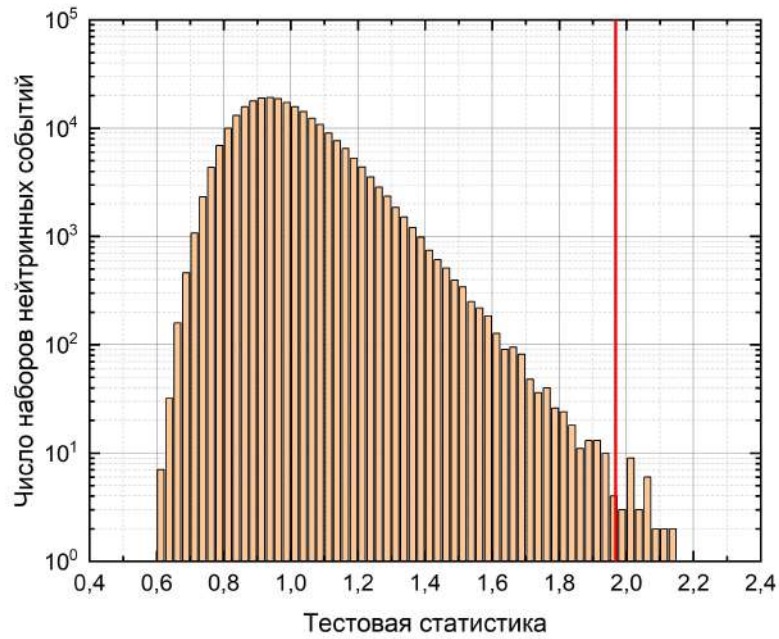
3.3 Результаты

В результате статистической обработки данных были получены значения вероятности случайного совпадения прихода низкоэнергетического нейтрино в направлении высокоэнергетического. В анализе использовались две статистики. Расчет, использующий в качестве тестовой статистики отношение средней плотности потока по нейтринным событиям, характеризующимся $p\text{-value} < 1$, к усредненному значению плотности потока по всем событиям, (рис.2(a)) дает значение вероятности $p = 0.13 * 10^{-3}$, а использующий тест ранговой корреляции Спирмена (рис.2(b)) – $p = 0.36 * 10^{-3}$.

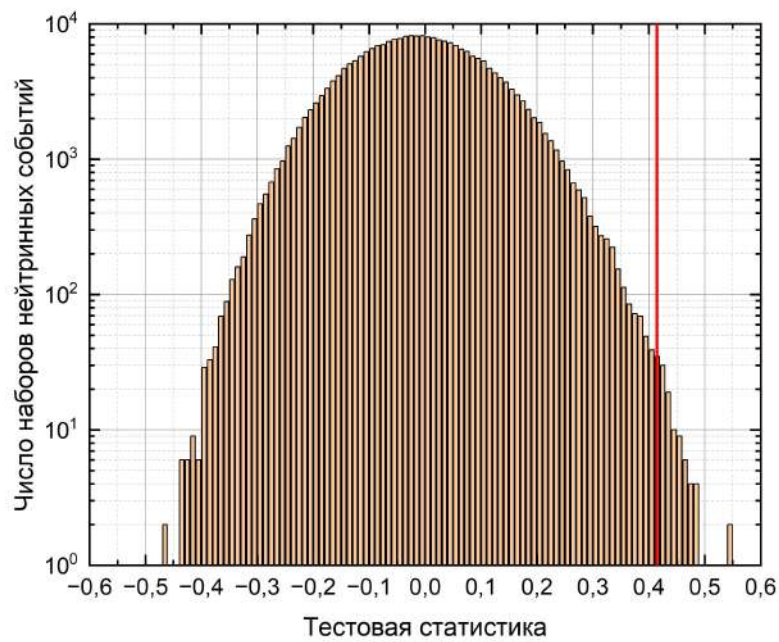
4 Выводы

4.1 Научные результаты

- Имеются серьезные статистические указания на то, что каждый блазар может производить как нейтрино энергии ≥ 200 ТэВ, так нейтрино более низких энергий.



(a)



(b)

Рис.2 Распределение случайных наборов нейтринных событий по тестовой статистике. (a) - в качестве тестовой статистики используется отношение средней плотности потока по нейтринным событиям, характеризующимся $p\text{-value} < 1$, к усредненному значению плотности потока по всем событиям; (b) - в качестве тестовой статистики используется коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Красной вертикальной линией отмечена тестовая статистика рассчитанная для исходного набора нейтринных событий. (a) - $v_{real} = 1,96828$; (b) - $v_{real} = 0,41452$

- Возникают дополнительные ограничения на модели образования нейтрино в ядрах активных галактик. Ведь, согласно классическому сценарию, рождение нейтрино происходит ещё до начала джета, вблизи черной дыры. В этой области плотность вещества невелика, релятивистские протоны могут быть ускорены до нужных значений энергии ($\sim 10^{16} - 10^{17}$ эВ) либо в магнитосфере чёрной дыры, либо в ударных волнах в окрестности аккреционного диска, который вдобавок является источником интенсивного излучения. Таким образом, вблизи черной дыры реализуются все необходимые условия для протекания $p\gamma$ -процесса. Однако данный механизм объясняет лишь нейтрино энергий ≥ 200 ТэВ. Между тем однозначная связь с блазарами установлена также для E_ν порядка 10 ТэВ, что требует модификаций обсуждённого сценария, либо дополнений к нему. Для получения таких нейтрино, согласно формуле (7), требуются рентгеновские фотоны, в то время как аккреционный диск излучает в основном в ультрафиолете, обеспечивая более высокие энергии. Существует предположение, что нейтрино рождаются уже в самом джете, вблизи его основания. Здесь имеются рентгеновские фотоны-"мишени", и протоны могут быть ускорены до нужных энергий. К тому же именно здесь рождается видимое радиоизлучение, корреляции момента прихода нейтрино с усилением которого было статистически доказано. Таким образом, возникают вопросы, связанные с объединением этих двух сценариев или поиском новых обоснований наблюдаемого эффекта.
- Полученные результаты необходимо проверять в будущих экспериментах. Перспективы более глубокого понимания процессов рождения наблюдаемых нейтрино в ядрах активных галактик связаны в первую очередь с работой нейтринных телескопов IceCube, Baikal-GVD и строящегося KM3NeT.

4.2 Что было сделано

В ходе данной работы мною было изучено:

- Принцип работы нейтринных телескопов. Трудности, возникающие при регистрации нейтрино, и способы их преодоления.
- Тест ранговой корреляции Спирмена.
- Различные механизмы рождения нейтрино в астрофизических условиях.

Мною было сделано:

- Оценена энергия исходных частиц по восстановленной энергии нейтрино.
- Проведен поиск и отбор публикуемых астрофизических данных.
- Написана программа для счёта средней плотности потока через 90%-ую область неопределенности направления прихода нейтрино.
- Написана программа для расчёта вероятности случайного совпадения прихода низкоэнергетического нейтрино в направлении высокоэнергетического, основанная на статистическом методе, описанном в пункте 3.2.
- Построены гистограммы, отражающие полученный результат.

Список литературы

- [1] IceCube Collaboration и др. “Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A”. В: *Science* 361.6398 (2018), eaat1378.
- [2] IceCube Collaboration и др. “Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+ 056 prior to the IceCube-170922A alert”. В: *Science* 361.6398 (2018), с. 147–151.
- [3] АК Erkenov и др. “High-energy neutrino-induced cascade from the direction of the flaring radio blazar TXS 0506+ 056 observed by the Baikal Gigaton Volume Detector in 2021”. В: *arXiv preprint arXiv:2210.01650* (2022).
- [4] Alexander Plavin и др. “Observational evidence for the origin of high-energy neutrinos in parsec-scale nuclei of radio-bright active galaxies”. В: *The Astrophysical Journal* 894.2 (2020), с. 101.
- [5] AV Plavin и др. “Radio astronomy locates the neutrino origin in bright blazars”. В: *arXiv preprint arXiv:2112.09053* (2021).
- [6] R Abbasi и др. “Constraints on populations of neutrino sources from searches in the directions of IceCube neutrino alerts”. В: *arXiv preprint arXiv:2210.04930* (2022).
- [7] AV Plavin и др. “Growing evidence for high-energy neutrinos originating in radio blazars”. В: *arXiv preprint arXiv:2211.09631* (2022).