

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

УДК 539.123

ОТЧЕТ
О НАУЧНО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ:
ОЦЕНКА МАССЫ НЕЙТРИНО НА ОСНОВЕ ДАННЫХ
БОРЕКСИНО ПО ГАММА-ВСПЛЕСКАМ

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

_____ Е. А. Литвинович

Выполнил

_____ И. Н. Жутиков

Москва 2020

Оглавление

1	Введение	2
2	Образование гамма-всплесков	2
3	Детектор Борексино	3
4	Отбор гамма-всплесков и анализ данных	5
5	Оценка массы нейтрино	5
6	Заключение	8
	Список использованных источников	9

1 Введение

Настоящая работа посвящена оценке массы нейтрино по наблюдению гамма-всплесков во Вселенной. Гамма-всплеск (ГВ) — масштабный космический выброс энергии взрывного характера, в настоящее время наблюдаемый в отдалённых галактиках в самой жёсткой части электромагнитного спектра. ГВ — наиболее яркие электромагнитные события, происходящие во Вселенной. Продолжительность ГВ может варьироваться от миллисекунд до нескольких часов. За первоначальным всплеском обычно следует долгоживущее «послесвечение», излучаемое на более длинных волнах (рентген, УФ, оптика, ИК и радио). ГВ подразделяются на короткие длительностью менее 2 с и длинные длительностью более 2 с. По наиболее распространённым теориям возникновения ГВ связывают с коллапсом массивных звезд [1]. Короткие ГВ в таких моделях приписывают слиянию двух нейтронных звезд или черной дыры и нейтронной звезды [2]. Длинные же ГВ приписывают взрывам сверхновых [3]. Оба сценария приведут к образованию компактной вращающейся черной дыры с аккреционным диском МэВ или более высоких температур, которая генерирует релятивистские джеты, которые и наблюдаются как ГВ. Хотя такая модель перспективна и привлекательна, начальное условие и механизм генерации фаерболлом релятивистских джетов все еще неизвестны, так как трудно наблюдать оптически толстую центральную область ГВ электромагнитными волнами. Предполагается, что такой катаклизмический процесс приводит и к выделению тепловых нейтрино [4], по которым можно лучше изучить модель образования ГВ или же наоборот, как в данной работе, свойства самих нейтрино.

2 Образование гамма-всплесков

Детальней обсудим наиболее распространённую модель образования ГВ [1]. Как говорилось ранее главной причиной появления ГВ считают катаклизмические процессы по типу слиянию нейтронных звезд или черной дыры и нейтронной звезды, образование сверхновых. В обоих случаях центральным

объектом, скорее всего, будет черная дыра массой в несколько солнечных масс, хотя это может быть и быстро вращающаяся нейтронная звезда, которая в конце концов, сколлапсирует в черную дыру. В любом случае, гравитационная энергия, от коллапса или слияния высвободится за короткое время порядка миллисекунд в достаточно малом объеме порядка десятков километров кубических. После эта энергия увеличится за счет аккреции газа на центральный объект. Главным результатом быстрого высвобождения гравитационной энергии (порядка солнечной массы покоя) в таком компактном объеме является преобразование большей части этой энергии, порядка 90%, в нейтрино энергий порядка МэВ, и в гравитационные волны, в то время как только небольшая часть энергии порядка 10% идёт на образование высокотемпературного фаербола, состоящего в основном из электронов, позитронов и барионов. Характерное время между образованием нейтрино и моментом образования γ излучения для данной модели будем считать равным $\tau_d \approx 150\text{с}$ [5], здесь стоит отметить, что это время не является точно достоверным а просто наиболее часто используемым. Одновременно вдоль оси аккреционного диска запускаются релятивистские джеты, пробивающие оболочку звезды и наблюдающиеся как ГВ. В дальнейшем радиационное давление, превышающее силы само-гравитации, приведёт к расширению фаербола с релятивистской скоростью.

3 Детектор Борексино

Борексино - нейтринный детектор на основе жидкого органического сцинтиллятора (ЖОС), созданный для спектроскопии низкоэнергетических нейтрино от Солнца. Детектор располагается в зале С подземной Национальной лаборатории Гран-Сассо Национального Института Ядерной Физики Италии (INFN LNGS) в центральной Италии на глубине 3800 м водного эквивалента. Основной особенностью детектора является беспрецедентно высокая степень радиохимической чистоты сцинтиллятора и конструкционных материалов, столь необходимая в низкоэнергетических экспериментах. Благодаря

этому энергетический порог Борексино составляет всего ≈ 200 кэВ. Устройство детектора схематично изображено на рисунке 1. Мишенью Борексино служат 278 тонн ЖОС, заключённые в тонкой (125 мкм) нейлоновой сфере радиусом 4.25 м. Внутренняя сфера со сцинтиллятором расположена внутри другой нейлоновой сферы радиусом 5.5 м, заполненной несцинтиллирующей жидкостью. Две концентрические нейлоновые сферы находятся внутри стальной сферы радиусом 6.85 м, которая также заполнена несцинтиллирующим составом. На стальной сфере установлены 2212 восьмидюймовых ФЭУ, изготовленных из низкорadioактивных материалов. Стальная сфера расположена внутри цилиндрического бака радиусом 9 м и высотой 16.9 м, содержащего 2100 м^3 сверхчистой воды, экранирующей чувствительный объем от радиоактивности окружающих пород. Внутри водяного бака установлены 208 ФЭУ (внешний черенковский детектор), обеспечивающих активное veto детектора от мюонов космических лучей (при этом поток мюонов значительно подавлен благодаря подземному расположению детектора). Так же стоит отметить что низкий порог энергии и высокая радиохимическая чистота в теории делают

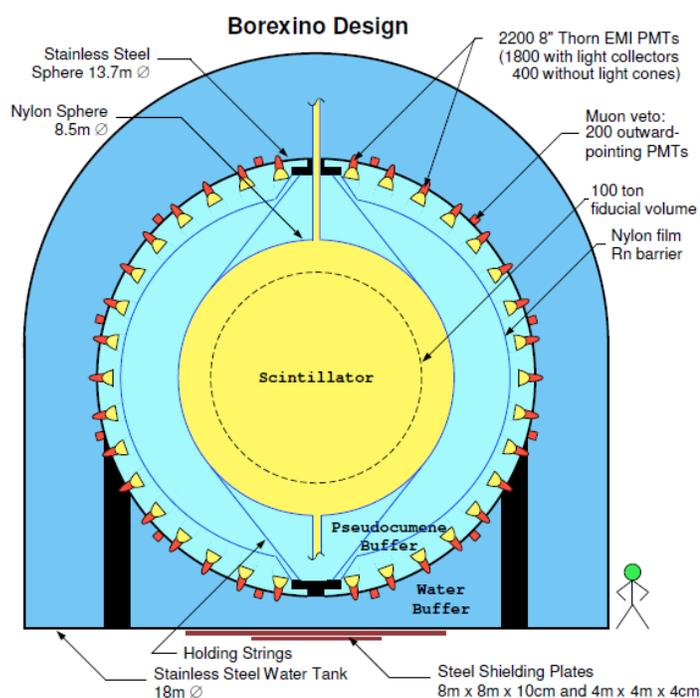


Рисунок 1 – Схематическое устройство детектора Борексино

Борексико очень перспективным для наблюдения на нем нейтрино от ГВ.

4 Отбор гамма-всплесков и анализ данных

В данной работе использовались данные о ГВ, которые были зафиксированы такими космическими гамма-телескопами как FERMI, SWIFT, INTEGRAL, AGILE, MAXI, за период с 2009 по 2019 год, доступные на сайте NASA¹. Из порядка 3000 всплесков было отобрано 125 всплесков во время которых Борексико проводил наблюдения и для которых известны красное смещение и флюенс. Среди отобранных ГВ зарегистрировано 110 длинных и 15 коротких. В экспериментальных данных Борексико искались одиночные события, соответствующие рассеянию нейтрино на электронах, так как сечение рассеяния для мюонных и тау нейтрино в несколько раз меньше, то получаемая оценка вполне справедлива для электронных нейтрино. При обработке данных использовалась система сбора данных LABEN, что позволило снизить порог энергии до 250 КэВ. При отборе данных искалось превышение фона в пределах ± 2000 с от момента начала вспышки. Отдельно для вспышек флюенс которых был меньше $200 \cdot 10^{-7} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2}$ каких либо превышений не было обнаружено. По этому было отобрано 10 длинных всплесков с флюенсом больше $200 \cdot 10^{-7} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2}$. Гистограммы для ГВ с флюенсом меньше $200 \cdot 10^{-7} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2}$ представлены на рисунке 2, на ней представлена скорость счета Борексико во временном окне ± 2000 с до/после ГВ. Для всплесков с флюенсом больше $200 \cdot 10^{-7} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2}$ удалось получить такую же гистограмму 3 на которой видно превышение в районе 550с.

5 Оценка массы нейтрино

Оценим массу нейтрино из предположения, что наблюдаемый рост скорости счета Борексико вызван взаимодействиями электронных нейтрино от ГВ. Для начала получим примерное значение массы из более простых рас-

¹<http://gcn.gsfc.nasa.gov/>

суждений. Будем считать нейтрино моноэнергетичными со средней энергией порядка 1 МэВ. Распределение событий по энергии представлено на гистограмме 4. Тогда разброс времени прилёта нейтрино будет объясняться только различием в расстоянии между источником ГВ и детектором. На гистограмме 3 пик приходится на время 550с следовательно это будет средним временем на которое нейтрино отстаёт от света за счёт не нулевой массы. Учтя то, что нейтрино образовались на $\tau_d \approx 150\text{с}$ [5] раньше получим общую разницу времени между γ излучением и нейтрино равную $t_d = 700\text{с}$. Среднее красное смещение для выборки из 10 длинных ГВ равно $z=1.225$. Пусть t время за

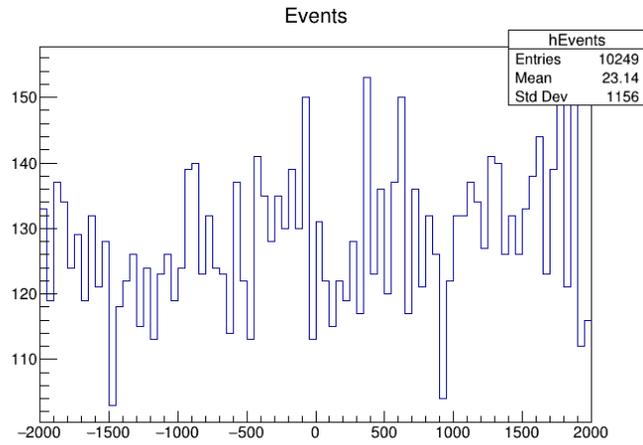


Рисунок 2 – Гистограмма для всплесков с флюенсом меньше $200 \cdot 10^{-7} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2}$

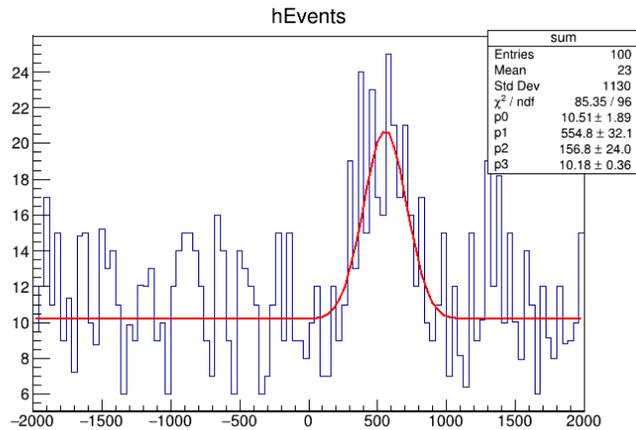


Рисунок 3 – Гистограмма для всплесков с флюенсом больше $200 \cdot 10^{-7} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2}$

которое свет достигает детектора, $t = \frac{r}{c}$ где r расстояние до источника ГВ и c скорость света соответственно. Время же t' за которое нейтрино достигнет детектора выражается как $t = \frac{r}{v}$, где v скорость нейтрино. Тогда

$$t_d = t' - t = \frac{rc - rv}{cv} \quad (1)$$

выразив r из закона Хаббла $r = \frac{cz}{H_0}$ получим выражение

$$\frac{z}{H_0} \left(\frac{c}{v} - 1 \right) = t_d \quad (2)$$

Взяв отношение квадрата массы покоя m_ν нейтрино к квадрату его энергии E_ν получим

$$\frac{m_\nu^2}{E_\nu^2} = 1 - \frac{v^2}{c^2} \quad (3)$$

И наконец выразив отношение скорости нейтрино к скорости света из **3** и подставив его в **2** получим конечную формулу.

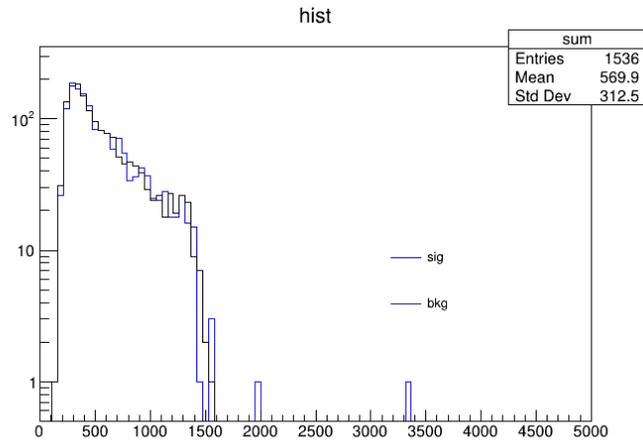


Рисунок 4 – Распределение событий по энергии (энергии в 1 МэВ соответствует примерно 500 фотоэлектронов)

$$m_\nu = \sqrt{\left(1 - \left(\frac{z}{t_d H_0 + z}\right)^2\right) E_\nu^2} \quad (4)$$

Подставив сюда численные значения получим $m_\nu = 49\text{мэВ}$

Теперь рассчитаем массу нейтрино используя формулу 5 для времени задержки учитывая зависимость параметра Хаббла от времени [6]. Так же будем считать, что все нейтрино имеют одну энергию и так же возьмём $z=1.225$ и $E_\nu = 1\text{МэВ}$

$$t_d = \frac{1 m_\nu^2}{2 E_\nu^2} \int_0^z \frac{dz'}{(1+z')^2 H_0 \sqrt{\Omega_\Lambda + (1+z')^3 \Omega_m}} \quad (5)$$

можно получить выражение для массы нейтрино

$$m_\nu = \sqrt{\frac{2 t_d E_\nu^2}{C}} \quad (6)$$

$$C = \int_0^z \frac{dz'}{(1+z')^2 H_0 \sqrt{\Omega_\Lambda + (1+z')^3 \Omega_m}}$$

Где m_ν масса нейтрино, E_ν энергия нейтрино, t_d время задержки для нейтрино, z среднее красное смещение, $H_0 = 67.3 \frac{\text{км}}{\text{с}} \text{Мпк}^{-1}$ постоянная Хаббла, $\Omega_\Lambda = 0.685$, $\Omega_m = 0.315$. Подставив все значения получается значение для массы нейтрино $m_\nu = 83\text{мэВ}$, что примерно, по порядку, сходиться с оценкой которая была получена на Борексине ранее [7].

6 Заключение

В ходе данной работы была обработана база данных ГВ, отобраны вспышки различных флюенсов. Для вспышек флюенсом менее $200 \cdot 10^{-7} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2}$ не было найдено превышений над фоном, для вспышек с большим флюенсом было получено превышение в районе 550с. В предположении, что наблюдаемый

рост скорости счета Борексино вызван взаимодействиями моноэнергетических нейтрино, была получена оценка на массу электронного нейтрино. Полученное значение массы по наиболее простому методу составляет $m_\nu = 49\text{мэВ}$ и $m_\nu = 83\text{мэВ}$ с учетом зависимости параметра Хаббла от времени. Данные значения в принципе находятся в соответствии с существующими оценками массы нейтрино а так же в соответствии, по порядку, с подобной оценкой произведённой в [7] равной $m_\nu = 35\text{мэВ}$. Дальнейшее более детальное изучение механизма образования ГВ может детальней уточнить время τ_d между образованием нейтрино и γ излучением, что может сделать оценку более точной.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Meszaros P.* Gamma-Ray Bursts // Rept. Prog. Phys. — 2006. — Vol. 69. — P. 2259–2322.
2. Discovery of the short gamma-ray burst GRB 050709 / J. Villasenor [et al.] // Nature. — 2005. — Vol. 437. — P. 855–858.
3. *Woosley S., Eastman R. G., Schmidt B. P.* Gamma-ray bursts and type Ic supernovae: SN 1998bw // Astrophys. J. — 1999. — Vol. 516. — P. 788.
4. Gravitational waves and neutrino emission from the merger of binary neutron stars / Y. Sekiguchi [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2011. — Vol. 107. — P. 051102.
5. Study of electron anti-neutrinos associated with gamma-ray bursts using KamLAND / K. Asakura [et al.] // Astrophys. J. — 2015. — Vol. 806, — P. 87.
6. *Choubey S., King S.* Gamma-ray bursts as probes of neutrino mass, quantum gravity and dark energy // Phys. Rev. D. — 2003. — Vol. 67. — P. 073005.
7. *Drachnev I. S.* Search for low-energy Borexino signal in correlation with GRB. — Borexino collaboration internal report, 2019.