

Поиск низкоэнергетических нейтрино от астрофизических источников в эксперименте Борексино

Жутиков И.Н.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

25 апреля 2021 г.

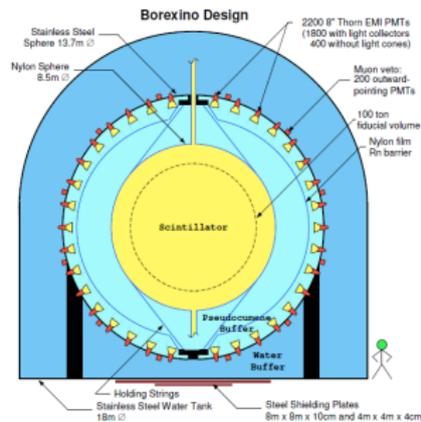
Введение

Цель работы: Поиск МэВ нейтрино от астрофизических источников.

В данной работе рассматривался ряд высокоэнергичных астрофизических явлений таких как: GRB, GWB, FBOT, современные теоретические представления о которых говорят, что в данных процессах должны образовываться нейтрино МэВ энергий.

Детектор Борексино

Борексино - нейтринный детектор на основе жидкого органического сцинтиллятора, созданный для спектроскопии низкоэнергетических нейтрино от Солнца. Благодаря высокой степени радиохимической чистоты энергетический порог Борексино составляет всего 200 кэВ. Что делает наблюдения на нём низкоэнергетических нейтрино от астрофизических объектов весьма перспективными.



Отбор данных

В данной работе использовались следующие данные:

- Данные о GRB, за период с 2009 по 2019 год, доступные на сайте онлайн каталога GRB¹
- Данные о GWB, за период с 2015 по 2019 год доступные на сайте гравитационно-волновой обсерватории LIGO²
- Данные по всем кандидатам в FBOT за период с 2009 по 2019 год
- Данные за тот же период полученные FADC системой Борексина (мюонные события были исключены)

¹<http://grbweb.icecube.wisc.edu/>

²<https://gracedb.ligo.org/>

Анализ данных

В данной работе применялись два типа анализа через рассеяние на электронах и через обратный бета-распад. В рассеянии искались одиночные события с энергией больше 1 МэВ, в различных временных окнах для различных объектов. В анализе по обратному бета распаду искалась пара событий, удовлетворяющая следующим условиям:

- Энергия мгновенного события должна быть больше 0.8 МэВ
- Энергия задержанного события должна быть в диапазоне [1.4;5.5] МэВ
- Время задержки должно быть в диапазоне [20,1280] мкс
- Не должно быть событий с энергией больше 1 МэВ в течении 2 мс до или после мгновенного или задержанного событий

Расчёт предела на флюенс по IBD

Расчет верхнего предела на флюенс был проведен по следующим этапам :

1) Предел на количество событий ассоциируемых с со всеми событиями данного типа μ_{90} был рассчитан следуя процедуре Фельдмана-Казинса, после чего получен предел на количество нейтрино от одного события как $N_{90} = \mu_{90}/N_{ev}$

2) После чего предел на флюенс рассчитан как

$$\Phi_{\bar{\nu}_e} = \frac{N_{90}^{IBD}(E_{\bar{\nu}_e})}{N_p \langle \varepsilon \rangle \sigma(E_{\bar{\nu}_e})}$$

Расчёт предела на флюенс через $\nu - e$ рассеяние

Расчет верхнего предела на флюенс через рассеяние на электронах был проведен аналогично обратному бета-распаду

1) Предел на количество событий ассоциируемых с со всеми событиями данного типа μ_{90} был рассчитан следуя процедуре Фельдмана-Казинса, после чего получен предел на количество нейтрино от одного события как $N_{90} = \mu_{90}/N_{ev}$

2) Полное эффективное сечение рассчитано как

$$\sigma_{\text{eff}} = \int_{T_{\text{th}}}^{T_{\nu}^{\text{up}}} \int_{T^-}^{T^+} \frac{d\sigma(E_{\nu}, T')}{dT'} G(T', \sigma_T(T'); T) dT' dT$$

3) И наконец получен предел на флюенс нейтрино как

$$\Phi_{\nu}(E_{\nu}) = \frac{N_{90}(E_{\nu})}{N_e \sigma_{\text{eff}}(E_{\nu})}$$

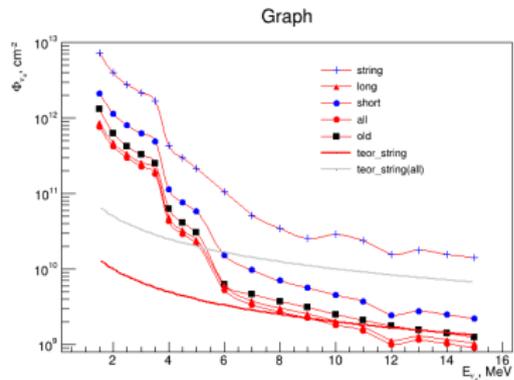
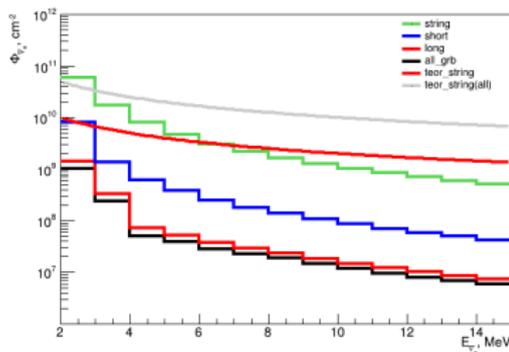
Гамма-всплески

GRB высокоэнергетическое космическое событие, сопровождаемые всплеском гамма излучения. В настоящее время гамма всплески подразделяют на длинные длительностью более 2 с и короткие длительностью менее 2 с. Длинные GRB приписывают коллапсу массивных звезд, а короткие слиянию компактных объектов по типу черной дыры или нейтронной звезды. Однако есть еще модель с космическими струнами, направленная на то, чтобы лучше объяснить свойства некоторых GRB. Так же следствиями всех этих моделей должно являться образование нейтрино МэВ энергий.

Всего из более чем 3000 GRB было отобрано 1751, из которых 1393 длинных 358 коротких, в течении временного окна ± 2000 с которых Борексина проводил наблюдения не менее 95% времени.

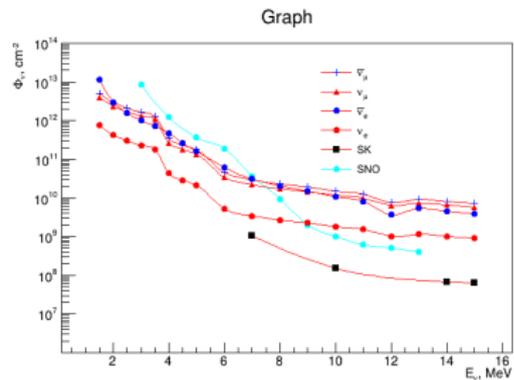
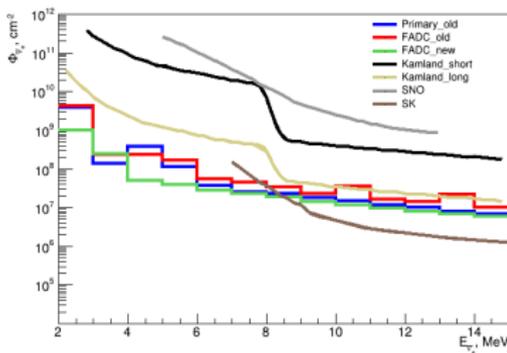
Ограничение на флюенс нейтрино для GRB

В результате вычислений получена зависимость ограничения на флюенс от энергии нейтрино через обратный бета-распад (слева) и через рассеяние на электронах (справа, показана зависимость только для электронного нейтрино для разным моделей GRB).



Сравнение результатов для GRB

На данных рисунках представлено сравнение полученных результатов с результатами других нейтринных телескопов. Из графиков видно, что полученные результаты являются лучшими в области менее 7 МэВ.



Постановка ограничения по параметр модели со струнами

Флюенс нейтрино для модели со струнами может быть записан как

$$\Phi_\nu = 10^8 \text{ см}^{-2} \left(\frac{10^{-10}}{\eta_\gamma} \right) \left(\frac{100 \text{ МэВ}}{E_\nu} \right) \left(\frac{F_\gamma}{10^{-6} \text{ эрг} \cdot \text{ см}^2} \right),$$

где η_γ - отношение флюенсов нейтрино и гамма квантов. Для данной модели $10^{-10} < \eta_\gamma < 10^{-9}$. Однако полученный предел через обратный бета распад оказывается меньше чем теоретическое значение для минимального значения параметра η_γ , что означает, что этот параметр должен иметь следующие ограничения $2.62 \cdot 10^{-10} < \eta_\gamma < 10^{-9}$

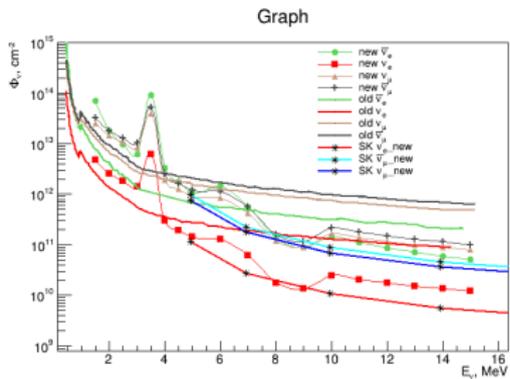
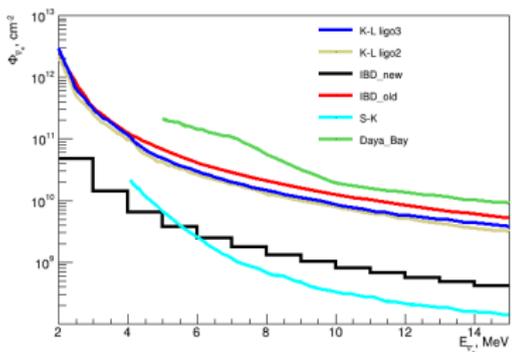
Всплески гравитационных волн

Гравитационные волны это изменения гравитационного поля, вызываемые движением массивных тел. Современные детекторы способны зафиксировать только всплески гравитационных волн от слияния таких компактных объектов как черная дыра или нейтронная звезда, что само по себе является катаклизмическим процессом в ходе которого, по современным теориям, один из объектов обычно бывает разорван приливными силами и образует аккреционный диск во круг другого. В процессе аккреции вещества на второй объект должны образовываться нейтрино МэВ энергий.

Всего из 67 всплесков было отобрано 25 в течении временного окна ± 1000 с которых Бorexино проводил наблюдения не менее 95% времени.

Ограничение на флюенс нейтрино для GWB

В результате вычислений получена зависимость ограничения на флюенс от энергии нейтрино через обратный бета-распад (слева) и через рассеяние на электронах (справа). Из графиков видно, что полученные результаты оказываются лучшими в районе менее 5 МэВ по обратному бета-распаду и в диапазонах 4-5 МэВ и 8-9 МэВ по рассеянию на электронах.



Быстрый голубой оптический переходной процесс

FBOT это класс высокоэнергетических явлений, сопровождающийся ярким излучением в ультрафиолетовой части видимого спектра, и характеризующиеся относительно быстрым (~ 7 дней) протеканием. Данный класс событий ещё очень плохо изучен, однако он явно отличающихся от всех известных типов астрофизических событий. Так, например, в отличие от GRB в которых относительно небольшая масса $10^{-6}M_{\odot}$ разгоняется в джетах почти до скорости света, FBOT выбрасывают в процессе взрыва порядка $10^{-2}M_{\odot}$ вещества с релятивистской скоростью порядка $0.3 - 0.5c$, что не характерно для обычных сверхновых ($v_{SN} \sim 0.03c$).

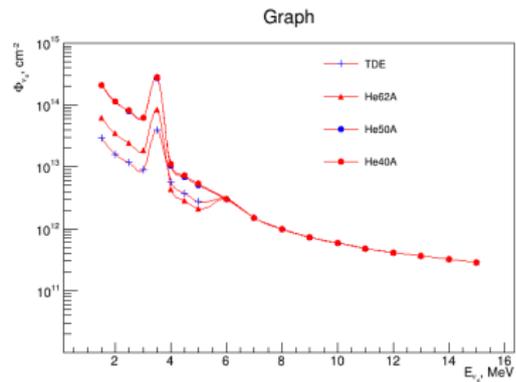
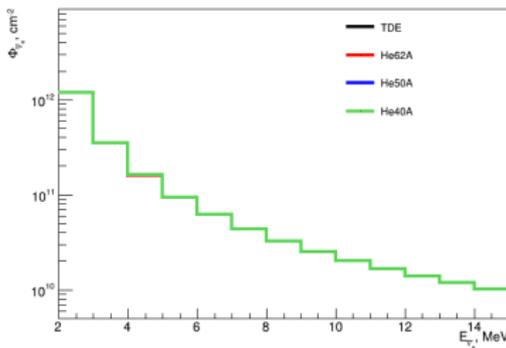
Быстрый голубой оптический переходной процесс

На данный момент существует по сути две модели образования FBOT: TDE (Tidal Distraction Event), или какой-то необычный тип сверхновых на подобие PPISN (Pair Pulsation Instability Supernova). В обеих теориях должно происходить образование нейтрино МэВ энергий.

Всего было отобрано 2 FBOT для которых время начала события удалось установить достаточно точно и в течении временного окна которых (временное окно выбиралось различным в зависимости от модели: ± 24 ч, ± 22 ч, ± 4 ч, ± 2000 с) детектор работал не менее 95% времени.

Ограничение на флюенс нейтрино для FВOT

В результате вычислений были получены первые в мире ограничения на флюенсы нейтрино от FВOT в зависимости от энергии нейтрино через обратный бета-распад (слева) и через рассеяние на электронах (справа).



Заключение

Подведем итоги, в данной работе были получены:

- Для GRB были получены более строгие пределы на флюенс через обратный бета распад в диапазоне от 2 до 8 МэВ и более строгие пределы чрез рассеяние на электронах в диапазоне от 1.5 до 7 МэВ, так же было получено ограничение на модель со струнами η_γ , отношение флюенсов нейтрино и гамма-излучения, $2.62 \cdot 10^{-10} < \eta_\gamma < 10^{-9}$.
- Для GWB были получены более строгие пределы на флюенс через обратный бета распад от 2 до 5 МэВ и и более строгие пределы чрез рассеяние на электронах в диапазонах от 4 до 5 МэВ и от 8 до 9 МэВ.
- Для FVOT были получены первые пределы на флюенс через обратный бета распад в диапазоне от 2 до 15 МэВ и чрез рассеяние на электронах в диапазоне от 1.5 до 15 МэВ.