

# Поиск низкоэнергетических нейтрино от астрофизических источников в эксперименте Борексино

Жутиков И.Н.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

28 июня 2021 г.

# Введение

Цель работы: Поиск МэВ нейтрино от астрофизических источников.

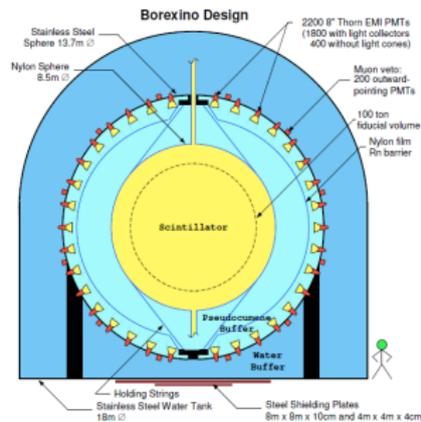
В данной работе рассматривался ряд высокоэнергичных астрофизических явлений таких как:

- Быстрые радио-всплески (FRB)
- Гамма-всплески (GRB)
- Гравитационно-волновые события (GWB)
- Быстрый голубой оптический переходной процесс (FBOT)

современные теоретические представления о которых говорят, что в данных процессах должны образовываться большие потоки 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 FRB, за период с 2009 по 2019 год, доступные на сайте онлайн каталога FRB<sup>1</sup>
- Данные о GRB, за период с 2009 по 2019 год, доступные на сайте онлайн каталога GRB<sup>2</sup>
- Данные по всем кандидатам в FBOТ за период с 2009 по 2019 год
- Данные о GWB, за период с 2015 по 2019 год доступные на сайте гравитационно-волновой обсерватории LIGO<sup>3</sup>
- Данные за тот же период полученные FADC системой Борексино (мюонные события были исключены)

---

<sup>1</sup><https://www.frbcat.org/>

<sup>2</sup><http://grbweb.icecube.wisc.edu/>

<sup>3</sup><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  $\mu_{90}$  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

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

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

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

1) Рассчитан предел на количество событий ассоциируемых с одним событием  $N_{90} = 1.64 \sqrt{N_{in} + N_{bkg}}/N_{ev}$

2) Рассчитано полное эффективное сечение как

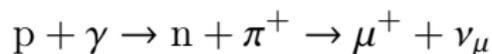
$$\sigma_{eff} = \int_{T_{th}}^{T_y^{up}} \int_{T^-}^{T^+} \frac{d\sigma(E_\nu, T')}{dT'} G(T', \sigma_T(T'); T) dT' dT$$

3) И наконец получен предел на флюенс нейтрино как

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

## Быстрые радио-всплески

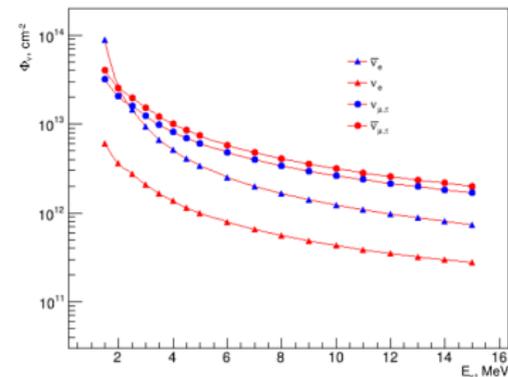
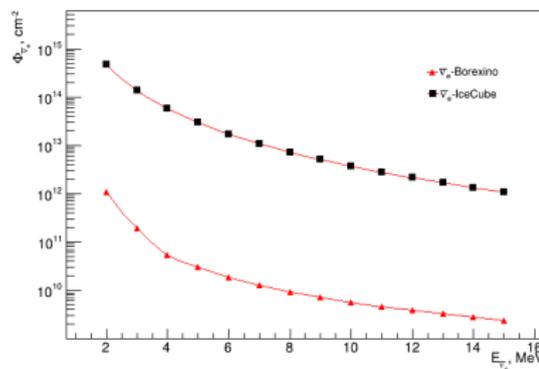
FRB высокоэнергетическое космическое событие, которое сопровождается коротким радио-всплеском в районе 1,4 ГГц. Сейчас наиболее правдоподобной версией формирования FRB является синхротронное мазерное излучение возникающее на фронте релятивистской ударной волны, вызванной переходными выбросами из магнетара (эта версия подтверждена наблюдением гамма и радио всплесков от магнетара SGR 1935+2154). Следствием такой модели должно быть образование нейтрино через взаимодействие релятивистских протонов с синхротронными фотонами.





# Ограничение на флюенс нейтрино для FRB

В результате получена зависимость ограничения на флюенс от энергии нейтрино через обратный бета-распад (слева) и через рассеяние на электронах (справа).

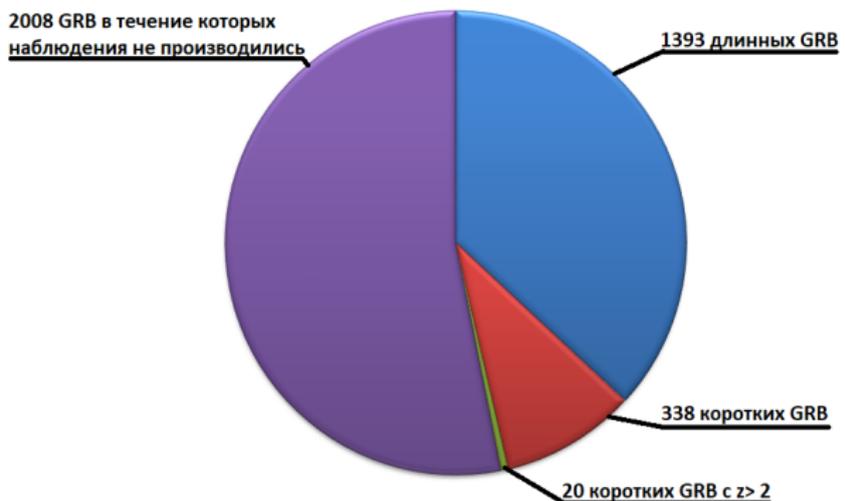


## Гамма-всплески

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 объяснить некоторые нетипичные GRB. Так же следствиями всех этих моделей должно являться образование нейтрино МэВ энергий.

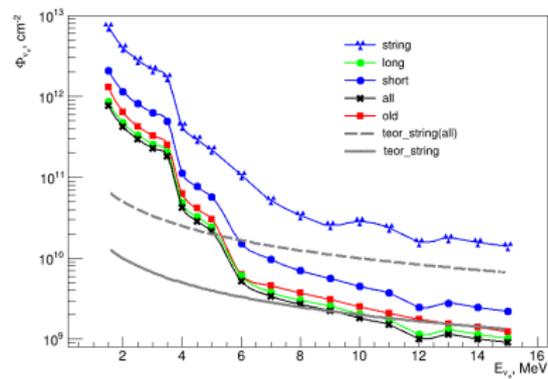
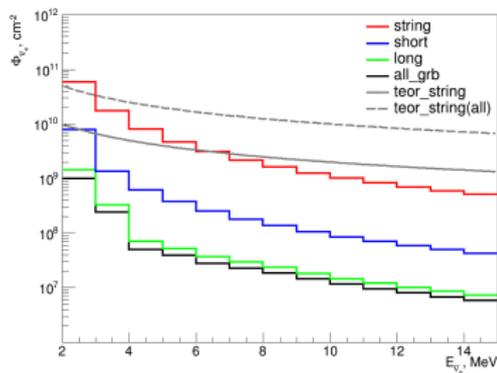
## Отбор данных и выбор временного окна

Всего из 3759 GRB было отобрано 1751, из которых 1393 длинных 358 коротких и 20 далеких и коротких для модели со струнами в течении временного окна  $\pm 2000$  с которых Бorexино проводил наблюдения не менее 95% времени, для анализа через обратный бета-распад было выбрано окно  $\pm 5000$  с.



# Ограничение на флюенс нейтрино для GRB

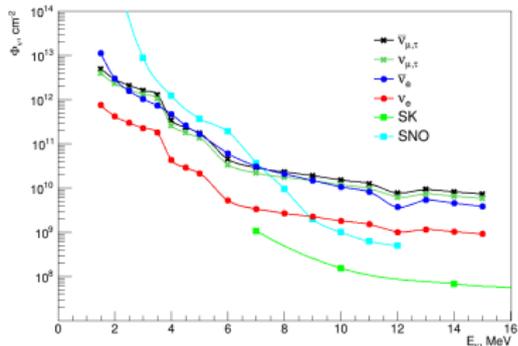
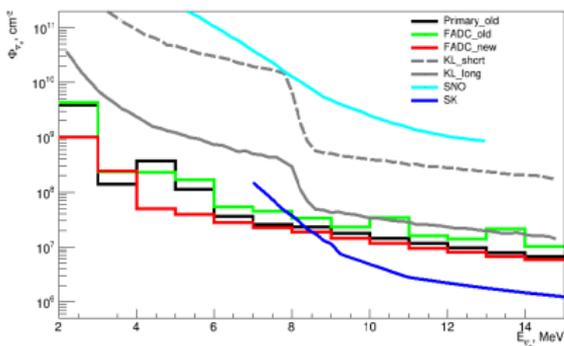
В результате вычислений получена зависимость ограничения на флюенс от энергии нейтрино через обратный бета-распад (слева) и через рассеяние на электронах (справа, показана зависимость только для электронного нейтрино для разным моделей GRB).





# 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.



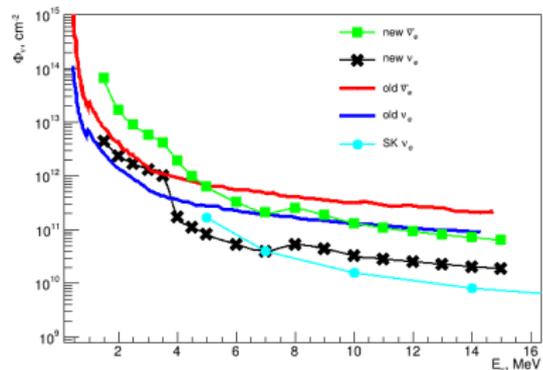
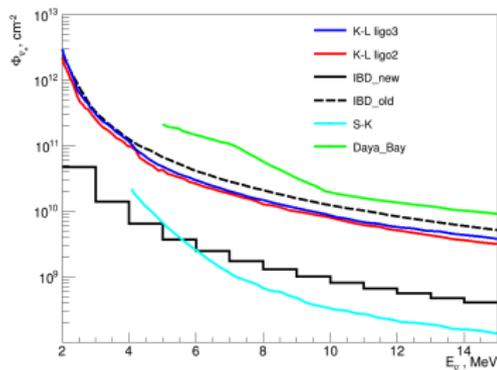
# Гравитационно-волновые события

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, должны образовываться нейтрино МэВ энергий через  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$  или  $n + e^+ \rightarrow p + \bar{\nu}_e$ .

Всего из 67 всплесков было отобрано 25 в течении временного окна  $\pm 1000$  с которых Борексина проводил наблюдения не менее 95% времени.

# Ограничение на флюенс нейтрино для GWB

В результате вычислений получена зависимость ограничения на флюенс от энергии нейтрино (антинейтрино) через обратный бета-распад (слева) и рассеяние на электронах (справа). Из графиков видно, что полученные результаты оказываются лучшими в районе от 4 до 7 МэВ по рассеянию и диапазоне от 2 до 5 МэВ по обратному бета-распаду.



## Быстрый голубой оптический переходной процесс

FBOT это класс высокоэнергетических явлений, сопровождающийся ярким излучением в ультрафиолетовой части видимого спектра, и характеризующиеся относительно быстрым ( $\sim 7$  дней) протеканием. Данный класс событий ещё достаточно 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 ( $v_{SN} \sim 0.03c$ ).

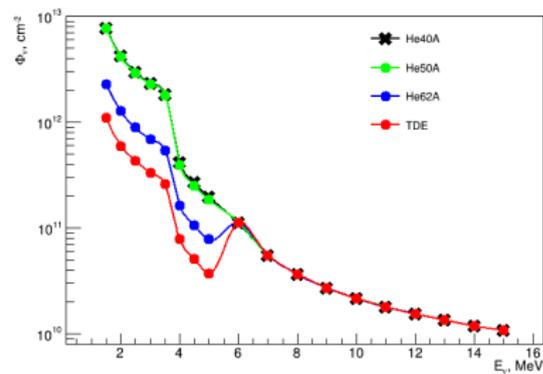
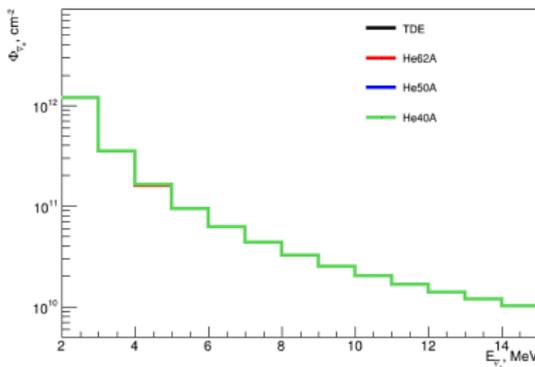
## Быстрый голубой оптический переходной процесс

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 через  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$  или  $n + e^+ \rightarrow p + \bar{\nu}_e$  для TDE модели или через  $e^+ + e^- \rightarrow \bar{\nu} + \nu$  для модели PPISN.

Всего из 69 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:  $\pm 24$  ч,  $\pm 22$  ч,  $\pm 4$  ч,  $\pm 2000$  с) детектор работал не менее 95% времени.

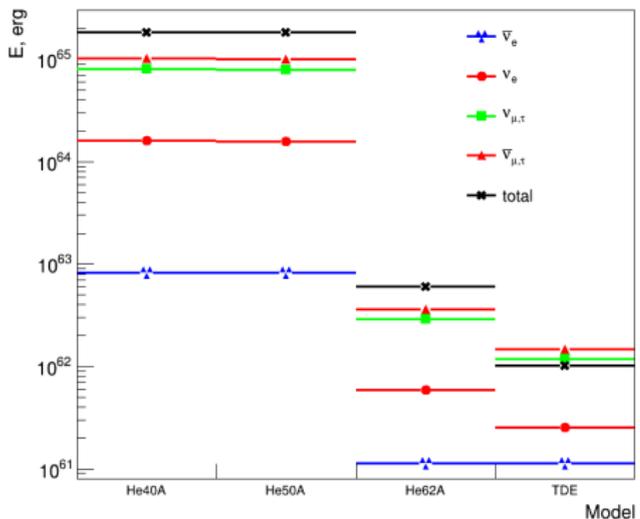
# Ограничение на флюенс нейтрино для FВOT

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).



# Ограничение на флюенс нейтрино для FВOT

Так же были получены пределы на энергию, выделяющуюся в виде нейтрино для различных моделей. Стоит отметить, что данные пределы намного выше чем энергия предсказываемая теоретически  $E_{\text{теор}} \sim 10^{54}$  эрг.



## Заключение

Подведем итоги, в данной работе:

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

## Запасные слайды

$$\Delta t = \frac{1}{2} \frac{m_\nu^2}{E_\nu^2} \int_0^z \frac{dz'}{(1+z')^2 H_0 \sqrt{\Omega_\Lambda + (1+z')^3 \Omega_m}}$$