

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное учреждение

высшего образования

«Национальный исследовательский ядерный университет

«МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

УДК 524.35

**ОТЧЁТ**

**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

**РАСЧЁТ ОЖИДАЕМОГО ЭФФЕКТА В  
БОРЕКСИНО ОТ ВЗРЫВА ГОЛУБОГО  
СВЕРХГИГАНТА С ПЕРЕХОДОМ В ГИБРИДНУЮ  
ЗВЕЗДУ**

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ Е. А. Литвинович

Выполнила

\_\_\_\_\_ Е. А. Чуева

Москва 2020

# 1 Введение

Эволюция звезды главным образом зависит от её массы. Звёзды главной последовательности с массами, превышающими  $\sim 9 M_{\odot}$ , способны эволюционировать до вспышки сверхновой [1].

В данной работе будет рассмотрена модель взрыва голубого сверхгиганта массой  $50 M_{\odot}$  с переходом в гибридную звезду, описанная в статье [1]. От стандартной вспышки сверхновой эта модель отличается тем, что в ней происходит переход адронной материи в кварковую. Данный процесс отражается на спектрах нейтрино и антинейтрино и, как следствие, на ожидаемом количестве событий в детекторе, что будет показано в разделах 3 и 4.

С 1987 года, когда была зарегистрирована знаменитая сверхновая SN1987A, заметно улучшились возможности детектирования нейтрино от вспышек сверхновых. Оценка ожидаемого эффекта в детекторе Борексино от процесса в рамках выбранной модели представляет интерес потому, что даёт представление о том, каким может быть сигнал от подобных экзотических взрывов.

## 2 Регистрация нейтрино от вспышек сверхновых в детекторе Борексино

Эксперимент Борексино расположен в Национальной лаборатории Гран-Сассо в Италии. Детектор имеет центральный объём в виде трёхсоттонного органического жидкого сцинтиллятора на основе  $C_9H_{12}$  (псевдокумола), окружённого нейлоновой сферой и просматриваемого 2200 фотумножителями [2].

В сцинтилляционных детекторах регистрация заряженных частиц происходит из-за взаимодействия последних с веществом детектора и реализуется в виде рассеяния на электроны, обратного бета-распада и реакциях на  $^{12}C$ . Детектор Борексино способен отчётливо зарегистрировать все вышеперечисленные взаимодействия, за исключением рассеяния на электроны [2].

Как видно из результатов статьи [2], основным каналом, по которому происходит регистрация нейтрино, является бета-распад: для сверхновой с выбросом энергии  $3 \cdot 10^{53}$  эрг количество событий равно 79, в то время

как на остальные каналы взаимодействия суммарно приходится меньше 30 событий. Это объясняется тем, что в составе жидкого сцинтиллятора находится большое количество мишеней-протонов [3], реакция обладает низкой пороговой энергией и сравнительно большим сечением. Для детектора Борексино количество мишеней-протонов составляет  $N_p = (6.007 \pm 0.001) \cdot 10^{28}$  [4] на тонну.

Реакция обратного бета-распада (ОБР) выглядит следующим образом:



Пороговая энергия составляет  $E_{\text{thres}} = 1.806$  МэВ. Детектор Борексино даёт два сигнала от этой реакции. Первый (мгновенный) сигнал вызван аннигиляцией позитрона с испусканием гамма-кванта с энергией 0.511 МэВ [3]. Второй сигнал представляет собой задержанный сигнал от гамма-кванта, который образуется при захвате нейтрона на протоне или углероде. Время задержки второго сигнала составляет приблизительно 200 мкс [3], энергии гамма-квантов равны соответственно 2.2 и 4.95 МэВ. Два сигнала от одного события взаимодействия антинейтрино и протона позволяют существенно подавить фоновые события при анализе экспериментальных данных.

### 3 Используемая модель

В статье [1] авторы провели моделирование вспышки сверхновой с последующим переходом в гибридную звезду. Гибридная звезда — это звезда, часть материи которой состоит из кварк-глюонной плазмы. Для выбранной авторами модели описания фазового перехода верхние значения массы и радиуса для такой звезды составляют  $2.17 M_{\odot}$  и 10.2 км.

Звезда-предшественница представляла собой голубой сверхгигант с массой  $50 M_{\odot}$ , прошедший все стадии термоядерного синтеза и дошедший до железного ядра. Вместе с прилегающими слоями углерода и кислорода (масса которых составляла  $\sim 9 M_{\odot}$ ) ядро имело радиус  $10^5$  км. Для этой звезды были смоделированы процессы коллапса и отскока ядра. Далее происходил процесс аккреции материи на компактную протонейтронную звезду за счёт гравитационно нестабильных слоёв материи вне ядра.

В моделях без перехода в гибридную звезду аккреция просходит до

тех пор, пока протонейтронная звезда не станет максимально возможной массы, после чего формируется чёрная дыра [1]. В данной же модели рассматривался переход адронной материи в кварк-глюонную плазму. Протонейтронная звезда сначала так же, как и в других моделях, увеличивалась в массе и сжималась. В некоторый момент времени скорость сжатия составляла  $10^3$  км/с. Однако после этого момента произошёл второй сверхбыстрый коллапс (меньше, чем за 1 мс), который привёл к переходу в кварковую материю. Во время этого перехода было выброшено около  $0.013 M_{\odot}$  с поверхности протонейтронной звезды. В конечном итоге это привело к образованию звезды с барионной массой  $2.092 M_{\odot}$  и кварковым ядром массой приблизительно  $1.82 M_{\odot}$ . Массая ядра позже после охлаждения звезды и наступления бета-равновесия приняла асимптотическое значение  $1.56 M_{\odot}$ .

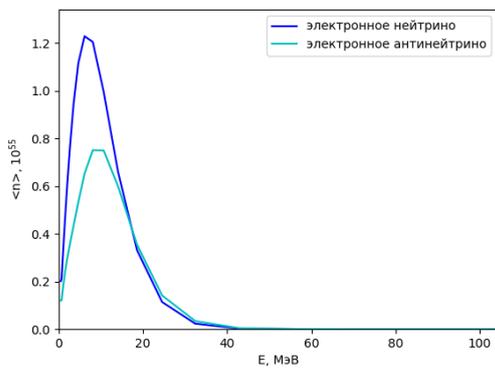


Рисунок 1 – нейтрино во время вспышки сверхновой

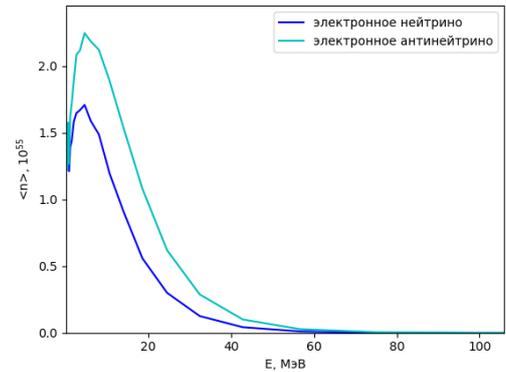


Рисунок 2 – нейтрино во время перехода в гибридную звезду

Переход в гибридную звезду даёт сигнал, который возможно зарегистрировать. Также он имеет качественное отличие от стандартной вспышки сверхновой: во время последней преобладает поток электронного нейтрино, в то время как во время перехода в кварковую материю — электронного антинейтрино. Это можно проиллюстрировать на примере выбранной в этой работе модели, взяв данные для двух моментов времени, соответствующие вспышке сверхновой и переходу в гибридную звезду (рис.1 и рис.2). Во время вспышки сверхновой происходит процесс захвата электронов на протонах, что приводит к преобладанию испускания электронных нейтрино. Во время перехода в гибридную звезду материя преимущественно состоит из нейтронов и при этом есть избыток позитронов, что приводит в свою

очередь к преобладанию испускания электронного антинейтрино.

## 4 Расчёт числа событий ОБР от вспышки сверхновой с переходом в гибридную звезду

Авторы вышеупомянутой статьи согласились предоставить спектры нейтрино, которые получились в результате данного моделирования, для проведения оценки числа событий от подобного процесса в детекторе Борексино. Данные спектры представляют собой чуть больше тысячи текстовых файлов. В каждом из файлов приведены энергии от 0.5 до 300 МэВ и спектры для электронных, мюонных и тау нейтрино и антинейтрино в заданный момент времени.

Для анализа этих данных были написаны программы на языке программирования Python, выполняющие следующие функции:

- 1) подсчёт значений сечений ОБР для заданных энергий;
- 2) чтение данных из текстовых файлов, отбор регистрируемого спектра и расчёт числа событий от ОБР в детекторе Борексино;
- 3) запись полученного значения в специально созданный для этого текстовый файл;
- 4) суммирование всех событий из текстового файла из пункта 3 и вывод полученного значения с погрешностью;
- 5) построение гистограммы числа событий в детекторе с биннингом в 0.02 с.

Для анализа числа обратных бета-распадов в детекторе необходимо было отобрать все данные (в каждом предоставленном текстовом файле), которые находятся в диапазоне от 1.806 МэВ (пороговой энергии) до 50 МэВ. Верхнее ограничение ставится в связи с ухудшением разрешения детектора. В итоге из всех файлов были выбраны данные с энергиями больше 1.5 МэВ и меньше 56.5 МэВ. Некоторый запас по энергиям на границах необходим для последующей интерполяции на выбранном диапазоне 1.806-50 МэВ.

Сечения для ОБР были получены с помощью таблицы сечений, приведённой в статье [5]. Табличные сечения были интерполированы методом сплайн-функций. После интерполяции были определены сечения для вы-

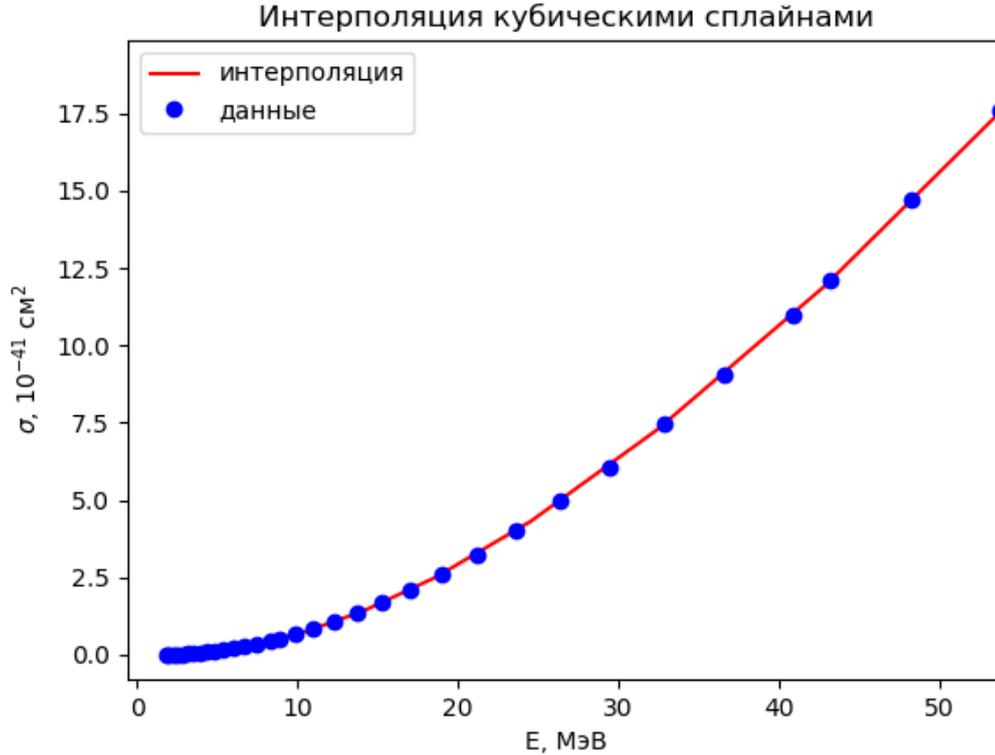


Рисунок 3 – Графический результат программы, выполнявшей подсчёт сечений ОБР

бранных энергий (от 1.5 МэВ до 56.5 МэВ). Помимо непосредственного расчёта сечений для выбранных энергий был также построен график сечения в зависимости от энергии после интерполяции данных (рис.3).

В модуле, осуществлявшем описанные в пункте 2 действия, подсчёт числа событий производился по формуле [5]:

$$N = N_p \int_{E_{\text{thres}}}^{50} dE_\nu \frac{d\Phi}{dE_\nu} \sigma(E_\nu) \quad (2)$$

Здесь  $N_p$  — число мишеней-протонов,  $\Phi$  — флюенс,  $E_\nu$  — энергия нейтрино. Количество мишеней-протонов было взято для 300 т сцинтиллятора, а расстояние до звезды было выбрано 10 кпк. В данном модуле программы сначала осуществлялся подсчёт численных значений подинтегральной функции, затем эти значения были интерполированы методом сплайн-функций, а после получившийся результат был проинтегрирован на отрезке энергий от 1.806 МэВ до 50 МэВ по формуле Симпсона. Для каждого из предоставленных файлов результат был записан в специально

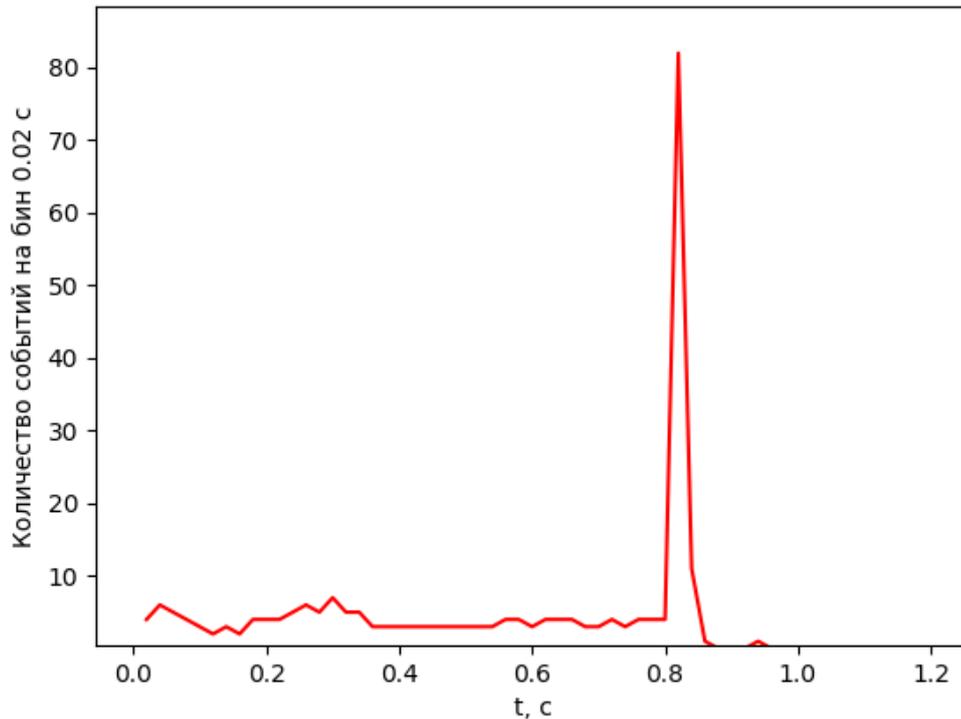


Рисунок 4 – График зависимости количества событий ОБР в детекторе Борексино от времени

выделенный для этого текстовый файл.

Далее была запущена программа, выполняющая действия, описанные в пункте 4. Полученный результат (количество событий от всего процесса в рамках выбранной модели) составил

$$N = 258 \pm 36. \quad (3)$$

Погрешность количества событий обусловлена выбранным методом интегрирования и наличием погрешности для числа протонов в детекторе.

График числа событий в детекторе от времени строился на основе вышеупомянутого файла с результатами подсчётов по формуле (2). Результат работы данной программы можно увидеть на рис.4.

## 5 Заключение

В работе было получено значения числа событий для ОБР в детекторе Борексино в случае вспышки сверхновой с последующим переходом в гибридную звезду. В данной работе не были учтены осцилляции нейтрино

и другие каналы, по которым возможна регистрация.

Полученный результат можно сравнить с результатом статьи [2], где было рассчитано число событий для стандартной вспышки сверхновой. В рамках выбранной модели получено значительно большее количество зарегистрированных событий ОБР. Также во время стандартной вспышки сверхновой нет пика электронных антинейтрино, который можно заметить на рис.4 на  $\sim 0.8$  с. В случае реальной регистрации похожего пика детектором Борексино возможное объяснение нестандартному для обычной сверхновой процессу может быть найдено в переходе в гибридную звезду, подобном описанному в выбранной модели.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Quark deconfinement as a supernova explosion engine for massive blue supergiant stars / T. Fischer [et al.] // *Nature Astron.* — 2018. — Vol. 2, no. 12. — P. 980–986.
2. *Cadonati L., Calaprice F., Chen M.* Supernova neutrino detection in Borexino // *Astropart. Phys.* — 2002. — Vol. 16. — P. 361–372.
3. *Scholberg K.* Supernova neutrino detection // *AIP Conf. Proc.* — 2015. — Vol. 1666, no. 1. — P. 070002.
4. Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino / M. Agostini [et al.] // *Phys. Rev. D.* — 2020. — Vol. 101, no. 1. — P. 012009.
5. *Strumia A., Vissani F.* Precise quasielastic neutrino/nucleon cross-section // *Phys. Lett. B.* — 2003. — Vol. 564. — P. 42–54.