

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 ОБРАЗОВАНИЕМ
ГИБРИДНОЙ ЗВЕЗДЫ**

Научный руководитель
к.ф.-м.н., доцент

_____ Е. А. Литвинович

Выполнила

_____ Е. А. Чуева

Москва 2021

1 Введение

В данной работе будет рассмотрена модель взрыва голубого сверхгиганта массой $50 M_{\odot}$ с переходом в гибридную звезду, которая описана 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 Борексино.

Оценка ожидаемого эффекта в детекторе Борексино от процесса в рамках выбранной модели представляет интерес потому, что она даёт представление о том, каким может быть сигнал от подобных экзотических взрывов. В данной работе будут представлены теоретические оценки числа событий обратного бета-распада для данного процесса в случае двух массовых иерархий нейтрино, а также будут рассмотрены характеристики, которые необходимы для дальнейшего Монте-Карло моделирования отклика детектора Борексино.

2 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 происходит 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 данного 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 $1.56 M_{\odot}$.

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. 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.

Авторы статьи [1] предоставили спектры нейтрино, которые получились в результате моделирования взрыва голубого сверхгиганта, для проведения оценки числа событий от подобного процесса в детекторе Борексина. Данные спектры представляют собой текстовые файлы. Всё моделирование взрыва было записано в 1074 текстовых файла. 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 данной модели ранее был учтён МСВ-эффект, который возникает при прохождении нейтрино сквозь плотные слои материи звезды после отскока ядра. МСВ-эффект был рассчитан для обеих массовых иерархий. На выходе были получены нейтринные спектры на Земле (расстояние до звезды было взято 12 кпк) для всех флейворов для обеих массовых иерархий, по 1074 файла на каждую иерархию. Графический вид полученных спектров для электронного антинейтрино во все моменты времени представлен на рис.1 и рис.2. Дальнейшие теоретические оценки и последующее

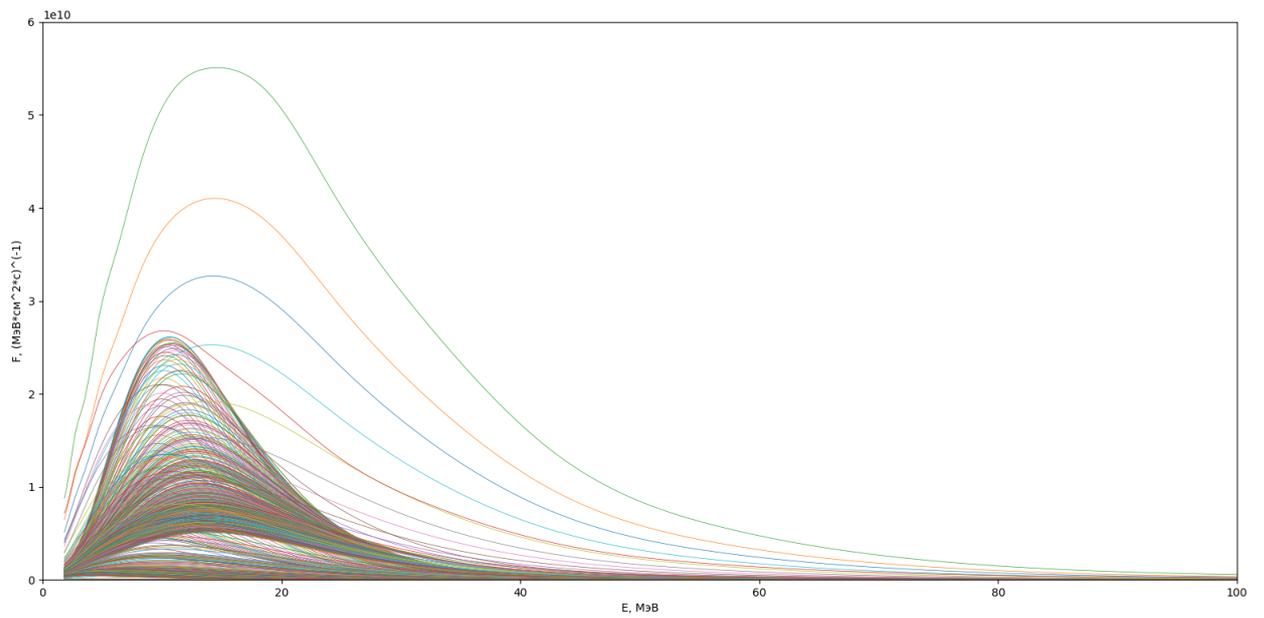


Рисунок 1 – Спектры электронного антинейтрино для нормальной массовой иерархии

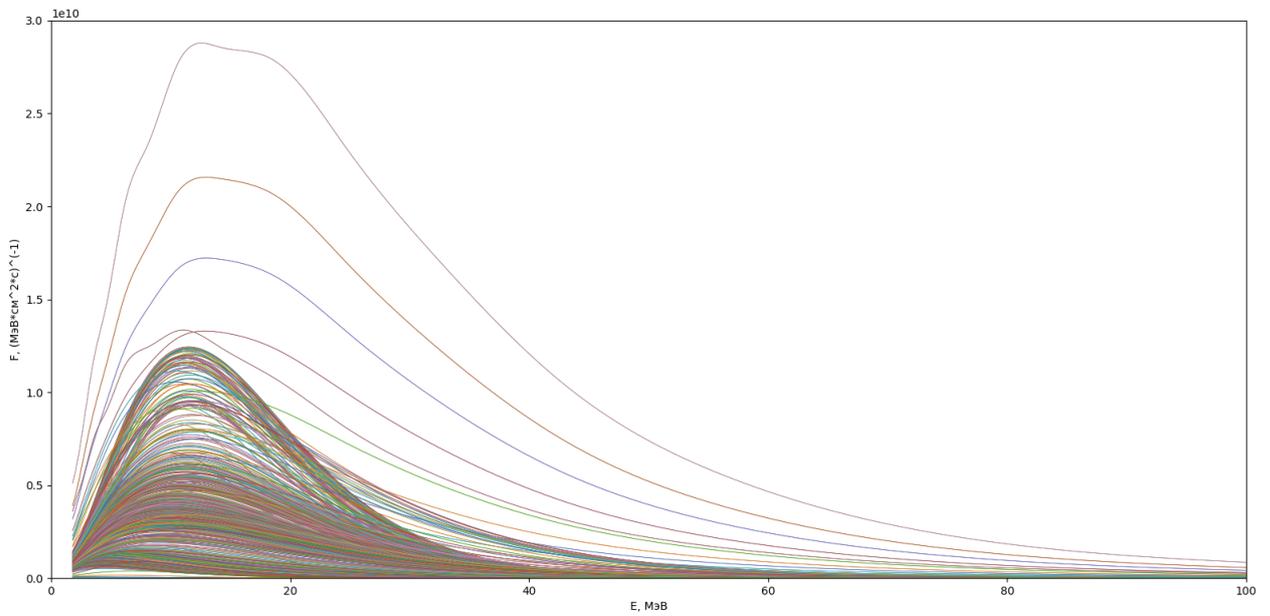


Рисунок 2 – Спектры электронного антинейтрино для обратной массовой иерархии

Монте-Карло моделирование отклика детектора Борексина будут произведены для спектров обеих массовых иерархий.

3 Регистрация нейтрино от вспышек сверхновых в Борексина

Эксперимент Борексина 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 фотоумножителями [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 Борексина 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 от сверхновых, является бета-распад: для сверхновой на расстоянии 10 кпк 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 Борексина количество мишеней-протонов составляет $N_p = (6.007 \pm 0.001) \cdot 10^{28}$ [4] на тонну.

Для модели взрыва голубого сверхгиганта ниже будет рассмотрена реакция обратного бета-распада как основного канала регистрации.

4 Сечение, кинематические характеристики обратного бета-распада, их использование в моделировании

Как известно, в системе покоя центра масс конечные продукты обратного бета-распада имеют фиксированную энергию. Однако в случае регистрации антинейтрино в детекторе следует рассматривать систему покоя

протона. В этом случае энергии продуктов (позитрона и нейтрона) оказываются распределёнными. Энергию позитрона можно выразить следующим образом [5]:

$$E_{1,2} = E_\nu - \delta - \frac{1}{m_p} E_\nu^{CM} (E_e^{CM} \pm p_e^{CM}), \quad \delta = \frac{m_n^2 - m_p^2 - m_e^2}{2m_p}, \quad (1)$$

где знак \pm отвечает за возможные значения угла вылета позитрона в системе покоя центра масс, E_ν^{CM} , E_e^{CM} , p_e^{CM} — энергия антинейтрино, энергия позитрона и импульс позитрона в системе покоя центра масс соответственно. Через s-инвариант и энергию налетающего нейтрино они выражаются следующим образом:

$$E_\nu^{CM} = \frac{s - m_p^2}{2\sqrt{s}}, \quad (2)$$

$$E_e^{CM} = \frac{s - m_n^2 + m_e^2}{2\sqrt{s}}, \quad (3)$$

$$p_e^{CM} = \frac{\sqrt{(s - (m_n^2 - m_e^2)^2)(s - (m_n^2 + m_e^2)^2)}}{2\sqrt{s}}, \quad (4)$$

$$s = m_p^2 + 2m_p E_\nu. \quad (5)$$

Для Монте-Карло моделирования необходима средняя энергия позитронов, которую можно оценить как:

$$\langle E_e \rangle \approx (E_1 + E_2)/2 = E_\nu - \delta - \frac{E_\nu^{CM} E_e^{CM}}{m_p} \quad (6)$$

Тогда среднюю энергию нейтронов, которая так же необходима для моделирования, можно выразить из закона сохранения энергии:

$$\langle E_n \rangle = E_\nu + m_p - \langle E_e \rangle \quad (7)$$

Нейтроны, которые образованы в результате реакции обратного бета-распада с участием реакторных антинейтрино (характерные энергии кото-

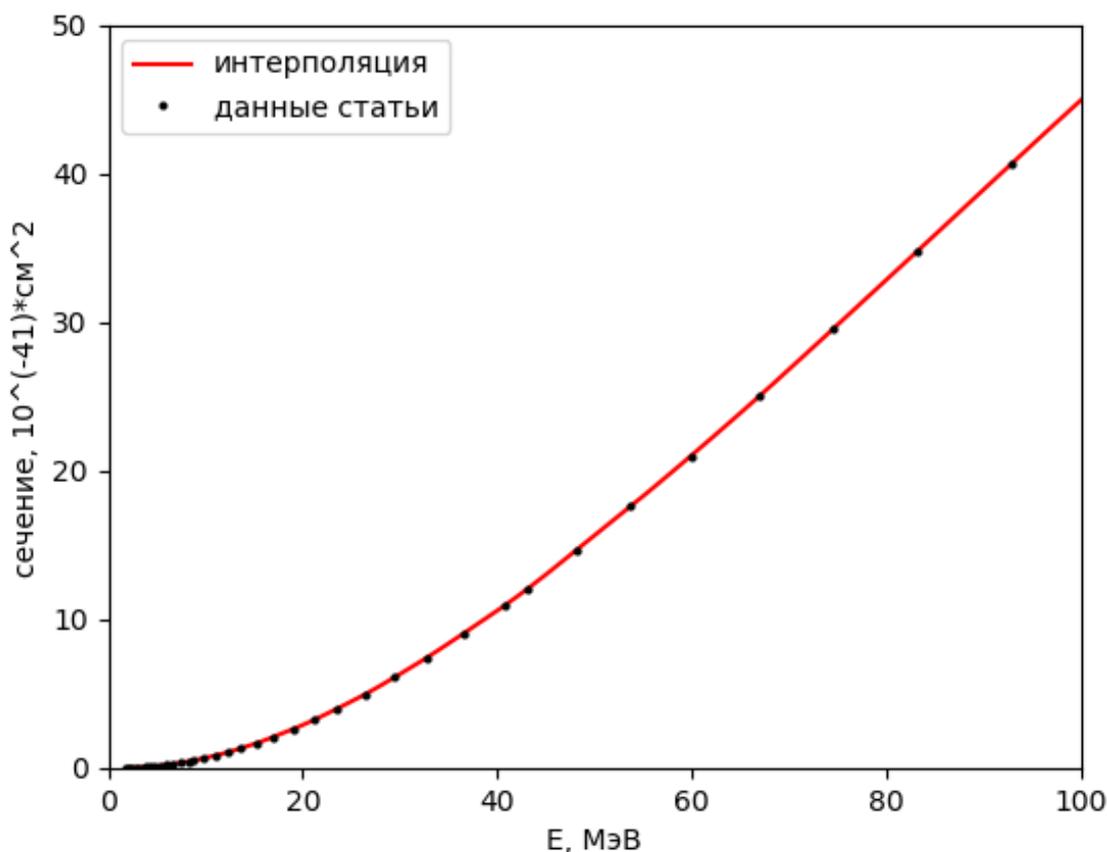


Рисунок 3 – Интерполяция сечения из статьи [5]

рых до 8 МэВ), имеют среднюю кинетическую энергию на уровне нескольких кэВ, которой часто можно пренебречь и считать нейтрон покоящимся. Однако спектр антинейтрино от взрыва голубого сверхгиганта доходит до энергий порядка 100 МэВ, а при таких энергиях кинетическая энергия нейтрона достигает нескольких (до 8) МэВ. Поэтому в данном случае учитывать кинетические энергии нейтронов необходимо. В представленных в статье [5] аппроксимациях для сечения обратного бета-распада в формулах отсутствует учёт кинетической энергии нейтрона, поэтому для согласованности расчётов (то есть для того, чтобы в программе для моделирования отклика детектора и в расчёте сечения был одновременный учёт кинетической энергии нейтрона) был выбран способ интерполяции полного сечения по таблице, представленной в этой же статье, в области энергий от 1.806 до 100 МэВ с шагом 50 кэВ (причина выбора такого шага будет объяснена ниже). Это было сделано с помощью программы на языке программирования Python, результат работы программы представлен на рис.3.

В Монте-Карло моделировании на основе пакета Geant4 для детектора Борексина не моделируется сам обратный бета-распад, поэтому необходимо получить нормированный на единицу спектр позитронов. Это можно сделать с помощью свёртки спектра антинейтрино и сечения обратного бета-распада. При строгом теоретическом рассмотрении реакции обратного бета-распада нельзя пользоваться кинематическими выражениями, которые были приведены выше, так как нейтрино имеют спектр, а не фиксированную заданную энергию. Однако наличие спектра не является проблемой в случае Монте-Карло моделирования, так как в каждой итерации программы рассматривается как раз случай моноэнергетического нейтрино. Именно поэтому все вышеуказанные формулы использовать можно. В интерполяции и конечном спектре для позитронов (таким образом, и моделирование будет происходить с таким же шагом) был взят шаг по энергии 50 кэВ. Согласно статье [6], на уровне 1 МэВ энергетическое разрешение Борексина составляет 5% (50 кэВ). На интересующем участке от 1.806 до 100 МэВ разбиение на бины по 50 кэВ приведёт к разбиению на 1964 бина. Такое разбиение является оптимальным с точки зрения отношения к энергетическому разрешению (они должны быть сопоставимы) и количества полученных бинов.

5 Разбиение спектров по времени и теоретическое предсказание отклика детектора

В полученных от авторов статьи [1] спектрах присутствует разбиение на 1074 различных момента времени в диапазоне от 0 до 10 с. Точная обработка всех спектров не представляется возможной в рамках моделирования отклика детектора. Для моделирования необходимо усреднить спектры в пределах выбранных временных бинов. При этом надо учесть две особенности при выборе разбиения по времени:

- 1) необходимо значительно сократить количество спектров
- 2) необходимо сохранить всплеск антинейтрино, приходящийся на переход в гибридную звезду, так как это признак, отличающий данную модель.

В результате с учётом этих требований был выбран переменный бин-

нинг, который привёл к 40 временным интервалам (файлам со спектрами):

1. 0.0—0.7 с: 100 мс;
2. 0.7—1.0 с: 25 мс (время соответствует переходу в гибридную звезду);
3. 1.0—2 с: 200 мс;
4. 2.0—10.0 с: 500 мс.

Для спектров антинейтрино $F(e)$ с учтённым МСВ-эффектом было произведено усреднение в рамках указанных бинов, затем было рассчитано количество взаимодействий по реакции обратного бета-распада по формуле:

$$N_{int} = N_p \int_{1.806}^{100} F(E)\sigma(E)dE \quad (8)$$

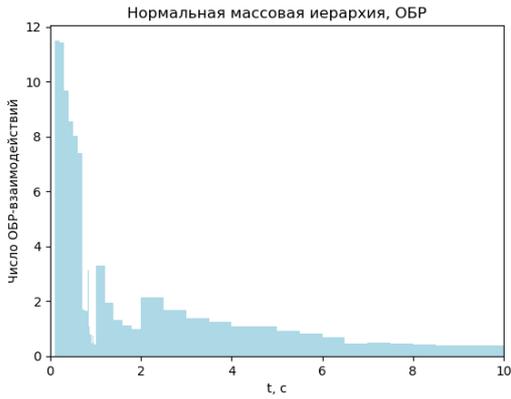


Рисунок 4 – Число взаимодействий для нормальной массовой иерархии Рисунок 5 – Число взаимодействий для обратной массовой иерархии

Результаты теоретических оценок приведены на рис. 4, 5, 6, 7. Общее число взаимодействий составило 95 для нормальной массовой иерархии и 75 для обратной. Как было сказано выше, для стандартной сверхновой на расстоянии 10 кпк по данной реакции регистрируется 79 событий. Число событий $\sim \frac{1}{d^2}$, где d — расстояние до звезды. Тогда можно пересчитать данный результат для стандартной сверхновой, которая удалена от Земли на 12 кпк, как в случае выбранной модели. Результат составит 55 событий. Таким образом, модель со взрывом голубого сверхгиганта обладает количественным отличием от стандартной сверхновой. Качественное отличие видно на рис. 6, 7 — заметен пик скорости событий в области 0.8 с,

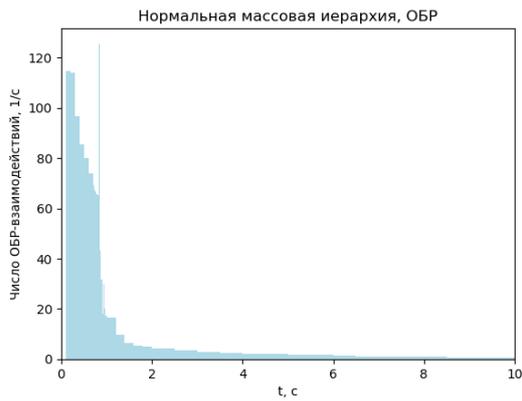


Рисунок 6 – Скорость взаимодействий для нормальной массовой иерархии



Рисунок 7 – Скорость взаимодействий для обратной массовой иерархии

который соответствует переходу в гибридную звезду.

6 Заключение

В данной работе была рассмотрена модель голубого сверхгиганта с переходом в гибридную звезду. Для спектров, в которых был учтён МСВ-эффект, были выбраны необходимые для последующего Монте-Карло моделирования энергетическое и временное разбиения, а также произведена теоретическая оценка числа событий в детекторе с учётом этих разбиений. Полученные результаты свидетельствуют о том, что взрыв голубого сверхгиганта в рамках выбранной модели имеет количественные и качественные отличия от стандартной сверхновой.

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.
6. The Borexino detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso / G. Alimonti [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 2009. — Mar. — Vol. 600, no. 3. — P. 568–593.