

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

УДК 539.123

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ПОИСК СИГНАЛА ОТ ГРУППЫ СОЛНЕЧНЫХ
ВСПЫШЕК ПРИ ПОМОЩИ ДЕТЕКТОРА
БОРЕКСИНО

Научный руководитель
Лаборант-исследователь

_____ Р. Р. Нугманов

Студент

_____ К. К. Киселев

Москва 2022

Содержание

Введение	3
Нейтрино	3
Солнце. Стандартная солнечная модель. Солнечные вспышки	3
Детектор Борексино	5
1 Отбор солнечных вспышек	7
2 Поиск нейтринного сигнала	7
2.1 Рассеяние на электронах	7
2.2 Обратный бета-распад	9
3 Заключение	11
Список литературы	12

Введение

Нейтрино

Нейтрино – элементарные частицы, лептоны, которые участвуют только в слабом и гравитационном взаимодействиях. Существует три типа нейтрино: электронное, мюонное и тау-нейтрино [1], однако некоторые теории предсказывают существование четвёртого типа – стерильного [2]. Нейтрино имеют массу (экспериментальная верхняя оценка суммы масс всех типов: 0.28 эВ [3]), что выходит за рамки Стандартной модели.

Нейтрино образуются во многих физических процессах, например, в реакциях, приведенных в таблицах 1 и 2. Так как они практически не взаимодействуют с веществом, они являются источником первичной информации о явлениях, которые мы не можем непосредственно наблюдать.

Нейтрино могут выделяться в распадах радиоактивных элементов, в ядерных реакторах и в ускорителях высоких энергий, а также в Солнце.

Солнце. Стандартная солнечная модель. Солнечные вспышки

Солнце – центр нашей планетной системы, звезда G-типа главной последовательности. Оно образовалось в результате гравитационного коллапса молекулярного облака 4.6 миллиардов лет назад. Солнце будет стабильно ещё около 5 миллиардов лет, после чего станет красным гигантом, а затем белым карликом [4].

В ядре солнца температура достигает $15 \cdot 10^6$ К, что позволяет протекать термоядерным реакциям – источнику энергии Солнца. Основа термоядерных реакций – слияние ядер водорода в ядра гелия. В Солнце существуют два основных пути, по которым протекают термоядерные реакции: протон-протонная цепочка и CNO-цикл.

Таблица 1 – Реакции протон-протонной (pp) цепочки [1]

Реакция	Номер	Конечная реакция, %	Энергия ν , МэВ
$p + p \longrightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$	1a	100	≤ 0.420
или			
$p + e^- + p \longrightarrow {}^2\text{H} + \nu_e$	1б (пер)	0.4	1.442
${}^2\text{H} + p \longrightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	2	100	
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \longrightarrow \alpha + 2p$	3	85	
или			
${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \longrightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$	4	15	
${}^7\text{Be} + e^- \longrightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	5	15	(90%) 0.861 (10%) 0.383
${}^7\text{Li} + p \longrightarrow 2\alpha$	6	15	
или			
${}^7\text{Be} + p \longrightarrow {}^8\text{B} + \gamma$	7	0.02	
${}^8\text{B} \longrightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$	8	0.02	< 15
${}^8\text{Be}^* \longrightarrow 2\alpha$	9	0.02	
или			
${}^3\text{He} + p \longrightarrow {}^4\text{He} + e^+ + \nu_e$	10 (пер)	0.00002	≤ 18.77

Особенностью CNO-цикла является то, что он протекает только в достаточно массивных звёздах. По этой причине обнаружить нейтрино, образующиеся в результате реакций этого цикла, долго не удавалось, однако это смогли сделать учёные из коллаборации Борексико [5].

Таблица 2 — Основные реакции CNO-цикла [1]

Реакция	Энергия ν , МэВ
$^{12}\text{C} + \text{p} \longrightarrow ^{13}\text{N} + \gamma$	
$^{13}\text{N} \longrightarrow ^{13}\text{C} + \text{e}^+ + \nu_e$	$\lesssim 1.199$
$^{12}\text{C} + \text{p} \longrightarrow ^{14}\text{N} + \gamma$	
$^{14}\text{N} + \text{p} \longrightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$	
$^{15}\text{O} \longrightarrow ^{15}\text{N} + \text{e}^+ + \nu_e$	$\lesssim 1.732$
$^{15}\text{N} + \text{p} \longrightarrow ^{12}\text{C} + \alpha$	
Итоговая реакция	
$4\text{p} \longrightarrow \alpha + 2\text{e}^+ + 2\nu_e$	

Стандартная солнечная модель – компьютерная модель, имеющая исходные параметры и дающая теоретические оценки некоторых свойств ближайшей к нам звезды.

Основные исходные параметры: скорости термоядерных реакций, солнечная светимость, возраст, уравнение состояния, распространённость химических элементов и радиационная непрозрачность.

Основные приближения:

- Гидростатическое равновесие (давление излучения и частиц полностью уравновешивает силу тяжести)
- Перенос энергии фотонами в глубоких слоях и конвективными потоками в верхних слоях
- Основной источник энергии – реакции ядерного синтеза
- Изменения в распространённостях элементов вызываются исключительно ядерными реакциями

Один из результатов: теоретические значения нейтринных потоков и их энергетический спектр [1].

Потоки нейтрино являются частью солнечных космических лучей, образующихся в том числе и в результате солнечных вспышек. Солнечная вспышка происходит, когда магнитные линии, выходящие из одного солнечного пятна и входящие в другое, перезамыкаются, и тем самым ускоряют заряженные частицы, которые образуют два потока: один направлен к поверхности Солнца, другой – в космическое пространство [6].

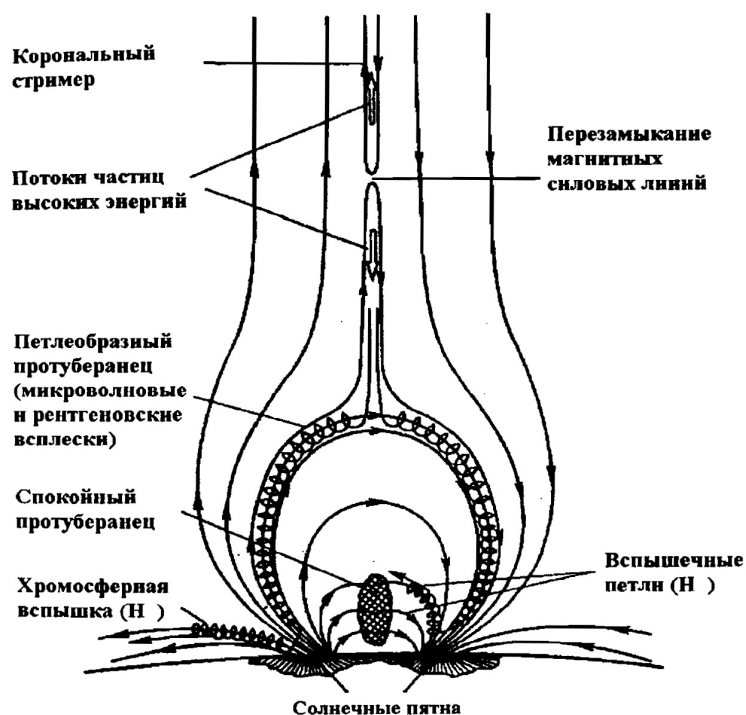


Рисунок 1 — Схема развития солнечной вспышки [6]

Солнечные вспышки по мощности принято разделять на классы (таблица 3). Данная классификация была предложена Д. Бейкером [7]. Каждый класс солнечных вспышек делится по логарифмической шкале от 1 до 9. Класс X отличается тем, что у него существуют вспышки с интенсивностью X10 и более, называемые солнечными вспышками Super X-класса.

Таблица 3 — Классификация солнечных вспышек по интенсивности [7]

Класс солнечной вспышки	Энергетический поток в диапазоне 1-8 Å, Вт/м ²
A	$< 10^{-7}$
B	$\geq 10^{-7} < 10^{-6}$
C	$\geq 10^{-6} < 10^{-5}$
M	$\geq 10^{-5} < 10^{-4}$
X	$\geq 10^{-4}$

Детектор Борексино

Детектор Борексино – нейтринный детектор на основе жидкого органического сцинтиллятора, созданный для спектроскопии низкоэнергетических солнечных нейтрино. Детектор расположен в Национальной Лаборатории Гран-Сассо Национального Института Ядерной Физики Италии [8].

Благодаря высокой степени радиохимической чистоты сцинтиллятора и конструкционных материалов, энергетический порог детектора очень мал: ~ 200 кэВ.

Основные задачи Борексино: изучение потоков низкоэнергетических солнечных нейтрино [9] и проверка стандартных солнечных моделей, поиск CNO-цикла на Солнце, исследование реакторных и геонейтрино [10], регистрация нейтрино от астрофизических источников [11].

Также Борексино представляет собой лабораторию для проверки и установления пределов некоторых гипотетических процессов, таких как распад электрона [12], существование стерильных нейтрино [13], нарушение принципа Паули [14] и рождение аксионов на Солнце [15].

Основные каналы регистрации нейтрино в детекторах на жидком органическом сцинтилляторе:

- Упругое рассеяние низкоэнергетических нейтрино на электронах (нет порога реакции)



- Обратный бета распад на протоне (энергетический порог: 1.8 МэВ)



- Реакции на углероде (с энергетическими порогами 17.34 МэВ, 13.37 МэВ, 2.22 МэВ соответственно)



Детектор Борексино представляет собой расположенный на глубине 3400 м водного эквивалента, заполненный сверхчистой водой цилиндрический бак, внутри которого находятся 3 концентрические сферы: стальная (радиусом 6.85 м) и две нейлоновые (радиусами 5.5 и 4.25 м). Внутренняя нейлоновая сфера заполнена 278 тоннами жидкого органического сцинтиллятора (псевдокумол с сцинтиллирующей добавкой 1.5 г/л 2.5-диметиллоксазол), внешняя нейлоновая сфера заполнена несцинтиллирующей жидкостью. На стальной сфере установлены 2212 ФЭУ из низкорadioактивных материалов. Внутри водяного бака установлены 208 ФЭУ, обеспечивающих детектирование мюонов космических лучей.

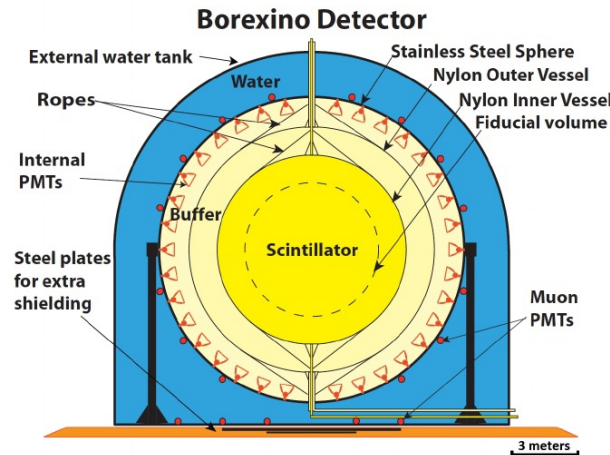


Рисунок 2 — Схема строения детектора Борексино

В этом семестре была продолжена работа с данными детектора Борексина, начавшаяся в прошлом семестре. Были использованы данные о группе других солнечных вспышек и взята выборка событий около максимума интенсивности каждой вспышки.

1 Отбор солнечных вспышек

Для поиска сигнала от солнечных вспышек был произведён их отбор по следующим критериям:

- Мощность вспышки: чем мощнее солнечная вспышка, тем ожидаемый сигнал больше
- Дата вспышки: вспышка произошла позже 2011 года
- Наличие данных о вспышке: вспышка произошла во время набора данных детектором

Поиск подходящих солнечных вспышек производился с помощью сайта [16].

Таблица 4 — Отобранные вспышки

Номер	Дата	Класс	Время максимума интенсивности
1	2014/02/25	X4.9	00:49
2	2013/11/05	X3.3	22:12
3	2013/05/14	X3.2	01:11
4	2014/10/24	X3.1	21:07
5	2013/05/13	X2.8	16:05
6	2015/05/05	X2.7	22:11
7	2014/12/20	X1.8	00:28
8	2013/10/29	X2.3	21:54
9	2013/10/25	X1.7	08:01
10	2013/05/13	X1.7	02:17

2 Поиск нейтринного сигнала

В работе использовались два канала поиска сигнала: канал рассеяния нейтрино на электронах (1) и канал обратного бета-распада (2).

2.1 Рассеяние на электронах

Для отбора событий-кандидатов рассеяния нейтрино на электроне использовались следующие критерии отбора:

- Мюонное вето в 2 мс [10]
- Энергия событий больше 1 МэВ
- Событие не является шумом электроники
- Тип триггера 1

- Событие кандидат имеет один кластер

Данные об отобранных событиях записывались, затем строилось энергетическое распределение событий.

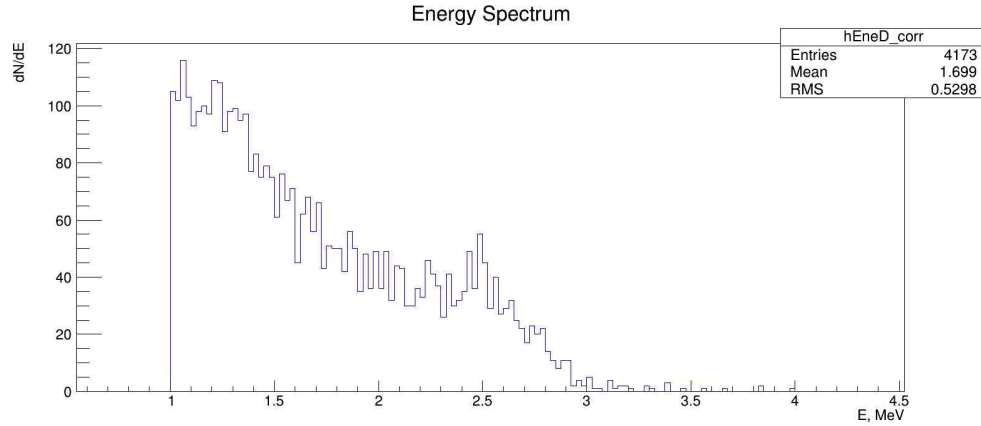


Рисунок 3 — Энергетический спектр отобранных событий-кандидатов. По оси абсцисс отложена энергия в МэВ, по оси ординат - количество событий.

Была получен фоновый сигнал: отобраны все подходящие под критерии события во временном окне длительностью около 6 часов (одна серия набора данных детектором).

Также была получена сигнальная выборка событий во временном окне длительностью 1000 секунд. Было выбрано симметричное временное окно: за нуль по оси времени был взят момент максимума интенсивности вспышки, события отобраны в интервале от 500 секунд до момента максимума до 500 секунд после момента максимума.

Таблица 5 — Количество событий в фоновых и сигнальных выборках вспышек

Номер вспышки	Фоновая выборка	Сигнальная выборка
1	408	0
2	380	20
3	433	0
4	418	14
5	435	21
6	450	21
7	388	0
8	448	0
9	404	0
10	409	0

По полученным данным для каждой из солнечных вспышек построены гистограммы скорости счёта сигнальной выборки, а также распределения событий по энергиям в выбранном временном окне. Затем все гистограммы скорости счёта были объединены в общую гистограмму (рисунок 4), все распределения событий по энергиям во временном окне – в общее распределение (рисунок 5).

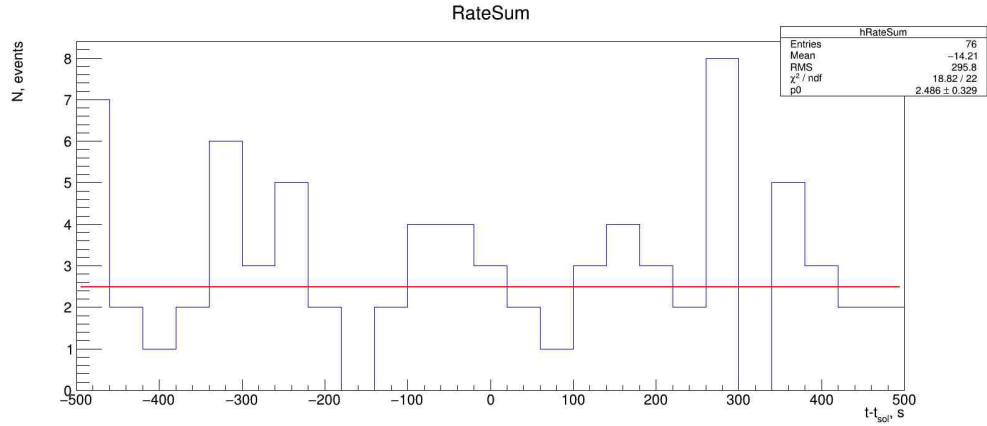


Рисунок 4 — Скорость счёта сигнальной выборки. По оси абсцисс отложено время относительно максимума интенсивности, по оси ординат - количество событий. Красной линией изображено фитирование графика полиномом нулевой степени.

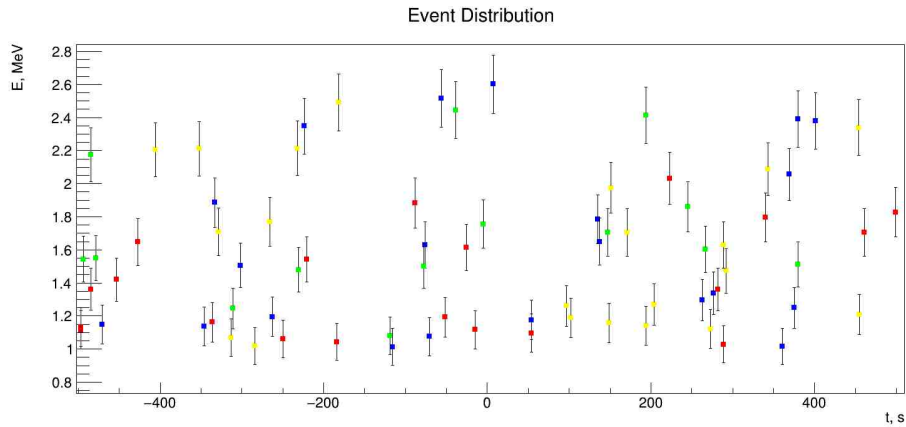


Рисунок 5 — Распределение событий по энергиям во временном окне. По оси абсцисс отложено время относительно максимума интенсивности, по оси ординат - энергия события. Красным цветом отмечены события, соответствующие вспышке 2, зелёным - вспышке 4, синим - вспышке 5, жёлтым - вспышке 6.

Также были получены средние скорости счёта сигнальной выборки и фоновой:

$$\left\langle \frac{dN}{dt} \right\rangle_{Sign} = (1.9 \pm 0.2) \cdot 10^{-2} \text{ Гц}$$

$$\left\langle \frac{dN}{dt} \right\rangle_{Bkgnd} = (1.92 \pm 0.03) \cdot 10^{-2} \text{ Гц}$$

2.2 Обратный бета-распад

Так как в обратном бета-распаде (формула 2) из более лёгкого протона образуется более тяжёлый нейтрон, то существует энергетический порог в 1.806 МэВ. В результате

реакции образуются позитрон, который достаточно быстро аннигилирует с электроном, высвобождая два гамма-кванта с энергиями 511 кэВ и создавая первичный сигнал с энергией от 784 кэВ, и нейтрон, который сталкивается с протоном и высвобождает гамма-квант с энергией 2.22 МэВ, который претерпевает несколько комптоновских рассеяний на электронах. Затем эти электроны сцинтиллируют и общий сигнал от этих сцинтилляций регистрируется детектором как задержанный сигнал.

Для отбора событий-кандидатов использовались следующие критерии отбора:

- Мюонное вето в 2 мс [10]
- У первого события энергии больше 1 МэВ
- У второго события энергии больше 2.2 МэВ
- Время между событиями не превышает 1.25 мс
- События не являются шумом электроники
- Тип триггера 1
- События-кандидаты имеют один кластер

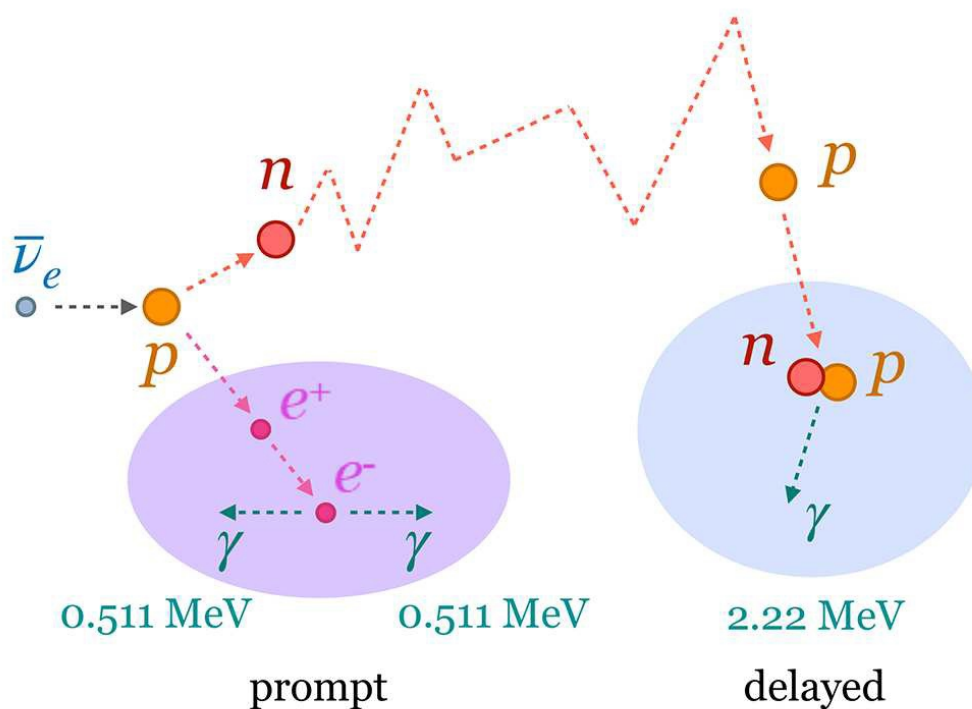


Рисунок 6 — Схема получения первичного и задержанного сигналов от обратного бета-распада с участием нейтрино [10].

Была исследована группа солнечных вспышек (таблица 4), ни одного события-кандидата не было найдено.

3 Заключение

- Был произведён поиск нейтринных событий для максимума интенсивности группы солнечных вспышек по реакции рассеяния нейтрино на электронах. Уровень сигнальной выборки совпадает с уровнем фоновой выборки в пределах погрешности.
- Был произведён поиск нейтринных событий от группы солнечных вспышек по реакции обратного бета-распада. Не было отобрано ни одного события-кандидата.

Список литературы

- [1] Бакал Дж., Нейтринная астрофизика: Пер. с англ. – М.: Мир, 1993. – 624 с., ил., ISBN 5-03-002479-4
- [2] P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020)
- [3] Shaun A. Thomas, Filipe B. Abdalla, and Ofer Lahav, Phys. Rev. Lett. 105, 031301
- [4] Astrophysics: Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis. Donald D. Clayton. McGraw-Hill, New York, 1968.
- [5] M. Agostini et al. (The Borexino Collaboration). Experimental evidence of neutrinos produced in the CNO fusion cycle in the Sun. Nature 587, 577–582 (2020).
- [6] Гальпер А. М. Космические лучи. – М.: МИФИ, 2002.
- [7] Craig I. J. et al., Solar Flare Magnetohydrodynamics, ISBN 0677055307, Gordon and Breach Science Publishers, 1981
- [8] G. Alimonti et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 600, Issue 3, 2009
- [9] G. Bellini et al. (Borexino Collaboration) Phys. Rev. D 89, 112007 – Published 25 June 2014
- [10] M. Agostini et al. (Borexino Collaboration) Phys. Rev. D 101, 012009 – Published 21 January 2020
- [11] M. Agostini et al. (Borexino Collaboration) Search for low-energy neutrinos from astrophysical sources with Borexino, Astroparticle Physics, Volume 125, 2021, 102509, ISSN 0927-6505
- [12] M. Agostini et al. (Borexino Collaboration) Phys. Rev. Lett. 115, 231802 – Published 3 December 2015
- [13] G. Bellini et al. (Borexino Collaboration) Phys. Rev. D 88, 072010 – Published 29 October 2013
- [14] Back, H.O., Balata, M., de Bari, A. et al. New experimental limits on violations of the Pauli exclusion principle obtained with the Borexino Counting Test Facility. Eur. Phys. J. C 37, 421–431 (2004).

[15] G. Bellini et al. (Borexino collaboration) Phys. Rev. D 85, 092003 – Published 4 May 2012

[16] <https://www.spaceweatherlive.com>