

**СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО И РЕЗУЛЬТАТЫ МЕЖДУНАРОДНЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО НЕЙТРИНО**

Озода Иноятилло
Самаркандский государственный университет,
Институт инженерной физики

Аннотация

Нейтрино от термоядерных реакций в ядре Солнца являются наиболее распространенным типом нейтрино из любого источника, наблюдаемого на Земле. В настоящее время в различных лабораториях мира проводятся сложные эксперименты по регистрации солнечных нейтрино, и в этой работе мы изучили результаты важнейших международных экспериментов.

Ключевые слова: термоядерные реакции, нейтрино, излучение Черенкова, реакция поглощения.

**QUYOSH NEYTRINOLARI VA XALQARO NEYTRINO TAJRIBALARI
NATIJALARI**

Annotatsiya

Quyosh yadrosidagi termoyadroviy reaksiyalardan kelib chiqadigan neytrinolar, Yerda kuzatilgan har qanday manbadan o'tadigan neytrinolarning eng keng tarqalgan turi hisoblanadi. Hozirgi kunda dunyoning turli laboratoriyalarida quyosh neytrinolarini qayd qilish bo'yicha murakkab eksperimentlar o'tkazilmoqda va bu ishda eng muhim xalqaro tajribalar natijalarini o'rganib chiqdik.

Kalit so'zlar: termoyadro reaksiyalari, neytrino, Cherenkov nurlanishi, yutilish reaksiyasi.

**RESULTS OF SOLAR NEUTRINOS AND INTERNATIONAL NEUTRINO
EXPERIMENTS**

Annotation

Neutrinos resulting from the fusion reactions in the Sun's core are the most common type of neutrino from any source observed on Earth. Currently, complex experiments on recording solar neutrinos are being conducted in various laboratories around the world, and in this work, we have studied the results of the most important international experiments.

Keywords: fusion reactions, neutrino, Cherenkov radiation, absorption reaction.

Реакции термоядерного синтеза на солнце играют важную роль в образовании нейтрино, которые в дополнение к энергии, выделяемой в виде γ -квантов, а также в виде кинетической энергии непосредственно генерируемых частиц, полностью проникают на всю поверхность Земли. Нейтрино- это частицы, которые очень слабо взаимодействуют с веществом. Следовательно, они свободно покидают внутреннюю часть Солнца и распространяются в пространственную среду со скоростью, очень близкой к скорости света, почти не поглощаясь веществом на своем пути.

Образование каждой α -частицы в результате реакций термоядерного синтеза на солнце связано с высвобождением энергии 26,7 МэВ, что обеспечивает наблюдаемую яркость Солнца. Каждая такая реакция сопровождается излучением двух нейтрино. Из этого следует, что суммарная нейтринная "яркость" солнца, независимо от деталей процессов термоядерного синтеза, составляет не менее $2 \times 3,85 \times 10^{20}$ МВт/26,7 МэВ $\approx 1,8 \times 10^{38}$ нейтрино за 1 секунду [1].

В таблице 1 обобщено, что нейтрино в разных реакциях имеют разные энергии, причем для одних из них энергия строго определена ("Монохроматическое" нейтрино), а для других считается важным иметь непрерывный спектр (рис.1). Скорость отдельных ядерных реакций и, следовательно, величина соответствующих потоков нейтрино сильно зависят от температуры и параметров химического состава, и, прежде всего, от содержания гелия. Следовательно, можно регистрировать потоки солнечных нейтрино различных энергий, в основном для получения прямых экспериментальных данных об условиях во внутреннем слое Солнца [2].

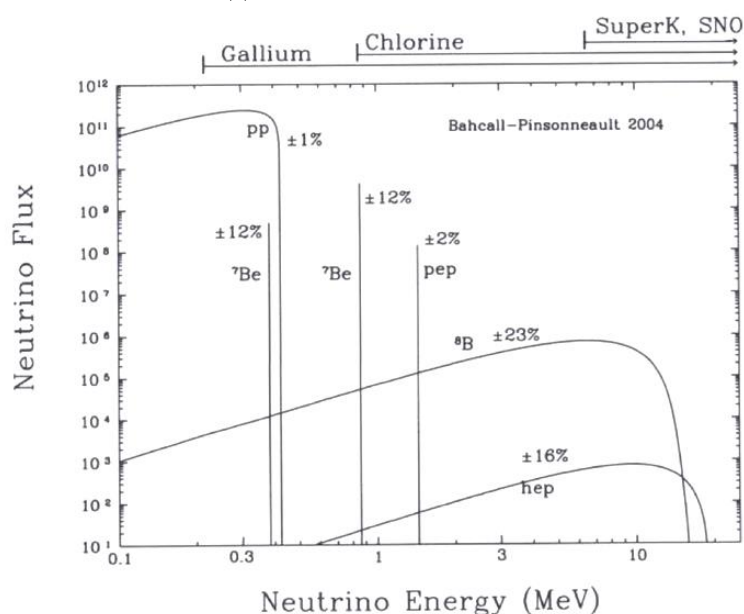
В настоящее время в различных лабораториях по всему миру проводятся сложные эксперименты по регистрации солнечных нейтрино. Они основаны на высокой вероятности захвата нейтрино некоторыми атомными ядрами (Cl, Ga, Li, Br, I и др.), а также на регистрации черенковского излучения, вызванного рассеянием нейтрино на электронах. Из них давайте рассмотрим результаты трех наиболее важных экспериментов.

1-таблица: Ядерные реакции, происходящие на солнце с испусканием нейтрино

Реакция	Энергия МэВ	Поток $10^{10} \nu(\text{см}^2 \cdot \text{с})$	Скорость измерения ^{37}Cl SNU	Скорость измерения ^{71}Ga SNU
$^1\text{H}(p, e^+ \nu)^2\text{D}$	<0,420	6,01	0	70,0
$^1\text{H}(pe^-, \nu)^2\text{D}$	1,44	0,014	0,22	3,1
$^7\text{Be}(e^-, \nu)^7\text{Li}$	0,861	0,47	1,00	30,5
$^8\text{B}(e^+ \nu)^8\text{Be}$	<14,06	0,00058	5,11	14,2
$^{13}\text{N}(e^+ \nu)^{13}\text{C}$	<12	0,06	0,06	2,1
$^{15}\text{O}(e^+ \nu)^{15}\text{N}$	<1,74	0,05	0,22	3,9

Хлор-аргоновый эксперимент был предложен Бруно Понтекорво в 1946 году и впервые проведен Раймондом Дэвисом в 1967 году в Южной Дакоте (США). Это реакция поглощения нейтрино: $^{37}\text{Cl}(\nu, e^-)^{37}\text{Ar}$. Рабочим веществом является перхлорэтилен (тетрахлорэтилен) C_2Cl_4 , богатый хлором. Ядра хлора в этом веществе способны поглощать нейтрино с энергией выше 0,814 МэВ, испускать электроны и образовывать

радиоактивный изотоп ^{37}Ar с периодом полураспада 35 дней. Это позволяет накапливать продукт реакции в течение длительного времени (3-4 месяца) и применять физико-химические методы его извлечения.



1-рисунок. Теоретический спектр солнечных нейтрино и возможность их регистрации различными детекторами.

На дне шахты глубиной 1455 метров установлен контейнер с 615 тоннами жидкого перхлорэтилена для предотвращения воздействия космических лучей. На рисунке 2 результаты двадцатилетних наблюдений показывают, что наблюдаемый при этом поток солнечных нейтрино с энергией выше 0,814 МэВ соответствует в среднем $0,420 + 0,045$ SNU в сутки или $2,55 + 0,25$ SNU в специальных “солнечных нейтринных единицах” (Solar Neutrino Units). 1 SNU соответствует потоку нейтронов, при котором в детекторе с 1036 ядрами ^{37}Cl за 1 с образуется одно ядро ^{37}Ar . Таким образом, в эксперименте Дэвиса фактически (с учетом фона, создаваемого космическими лучами) было зарегистрировано одно солнечное нейтрино за 2-3 дня. Теоретически ожидаемый ток солнечных нейтрино в этом эксперименте составляет $8,0 \pm 1,0$ SNU.

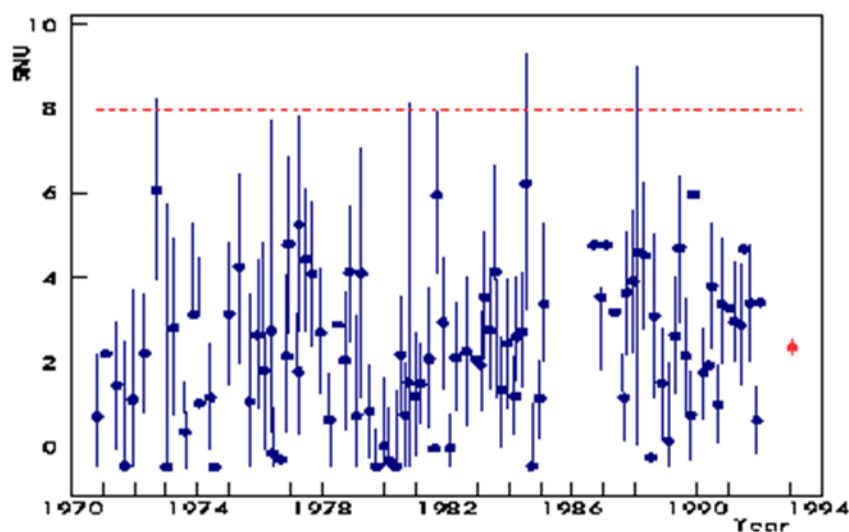
Галлиевый опыт В.А. был основан на реакции, предложенной Кузьминым: $^{71}\text{Ga}(\nu, e^-)^{71}\text{Ge}$. Важным преимуществом является большое эффективное сечение и низкий энергетический порог (0,233 МэВ), что позволяет регистрировать нейтрино от основной реакции протона при распаде позитрона. Период полураспада радиоактивного ^{71}Ge составляет 11,4 дня.

Для захвата одного нейтрино за сутки достаточно 20 тонн галлия. В 1990 году российский детектор SAGE (советско-американский эксперимент с галлием) в Боксанском ущелье на Северном Кавказе использовал 57 тонн галлия, а в следующем году он был запущен в Итальянских Альпах (GALLEX, 30 тонн Галлия). Первоначальные результаты Sage показали скорость вычислений 73 ± 19 SNU, а GALLEX 79 ± 12 SNU, в то время как теоретически ожидаемое значение оценивалось в 132 ± 7 SNU.

2- таблица: Результаты экспериментов по регистрации солнечных нейтрино

Детектор	Эксперимент	Граница МэВ	Измеренный SNU	Предполагаемый SNU	Измеренный/Предполагаемый
^{37}Cl	Devis	0,814	$2,55 \pm 0,25$	$8,0 \pm 1,0$	0,32
H_2O	Kamiokande	7,5			0,49
^{71}Ga	SAGE	0,2	73 ± 19	132 ± 7	0,55
^{71}Ga	GLLEX	0,2	79 ± 12	132 ± 7	0,63

Детектор воды используется для регистрации излучения Черенкова, вызванного рассеянием нейтрино с энергией, превышающей 7,5 МэВ, в $\nu + e \rightarrow \nu' + e'$ электронов молекул воды. Эксперимент Kamiokande II был построен на шахте Камиока (Японские Альпы) на глубине 1 км. Рабочий материал состоит из 680 тонн воды. Вспышки регистрируются фотоумножителями на стенке резервуара (сосуда), и они покрывают 20% его общей внутренней поверхности. Результаты первых измерений показали, что значения потока нейтрино будут вдвое меньше, чем ожидалось (в конце 90-х годов был запущен эксперимент SuperKamiokande, который впервые позволил получить нейтронное "изображение" солнца). Все результаты регистрации солнечных нейтрино показали, что они имеют значения в несколько раз меньше ожидаемого (табл.2). Особенно большая разница в 4 раза для детектора хлора (рис.2), для которого существует самая длинная серия (последовательность) наблюдений. Основная трудность в интерпретации этих различий (различий) связана с отсутствием внутреннего согласия между данными различных экспериментов. В последние двадцать лет прошлого столетия была проделана большая работа по совершенствованию методики эксперимента и переработке стандартных теоретических моделей внутреннего строения Солнца. Все это говорит о том, что основная причина несоответствий заключается в том, что нам не хватает знаний о конкретной физической природе нейтрино.



2- рисунок.
Наблюдаемое и теоретически ожидаемое (верхняя штрих-линия)

Литература

1. Vinyoles, N. et al. A New Generation of Standard Solar Models. *The Astrophysical Journal* 835, 2017
2. Karttunen H., Kroger P., Oja H., Poutanen M., Donner K.J. *Fundamental astronomy*. Sixth edition, Springer, 2017.