

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКА СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО В РОССИЙСКО-АМЕРИКАНСКОМ ГАЛЛИЕВОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ SAGE ЗА ПОЛОВИНУ 22-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Д. Н. Абдурашитов, Е. П. Веретенкин, В. М. Вермул, В. Н. Гаврин, С. В. Гурин,
В. В. Горбачев, П. П. Гуркина, Г. Т. Зацепин, Т. В. Ибрагимова, А. В. Калихов,
Т. В. Кнодель, И. Н. Мирмов, Н. Г. Хайрнасов, А. А. Шихин, В. Э. Яни*

*Институт ядерных исследований Российской академии наук
117312, Москва, Россия*

*Т. Дж. Боулс**, У. А. Гисдейл***

*Лос-Аламосская национальная лаборатория
НМ 87545, США*

*Дж. С. Нико****

*Национальный институт стандартов и технологии
Гайзерсбург, МД 20899, США*

Дж. Ф. Вилкерсон†, Б. Т. Кливленд†, С. Р. Эллиот†

*Университет Вашингтона
Сиэтл, ВА 98195, США
(коллаборация SAGE)*

Поступила в редакцию 15 февраля 2002 г.

Представлены результаты измерений скорости захвата солнечных нейтрино на металлическом галлии в российско-американском галлиевом эксперименте SAGE за период времени немногим более половины 22-летнего цикла солнечной активности. Объединенный анализ данных 92 измерений (ранов) за двенадцатилетний период с января 1990 г. по декабрь 2001 г. дает величину скорости захвата для солнечных нейтрино с энергией более 0.233 МэВ, равную $70.8^{+5.3}_{-5.2}$ (стат.) $^{+3.7}_{-3.2}$ (сист.) SNU. Это составляет чуть больше половины скорости, предсказываемой стандартной солнечной моделью, 130 SNU. Приведены результаты новых ранов с апреля 1998 г., а также дан анализ всех ранов, объединенных по годам, месяцам и по двухмесячным периодам, начиная с 1990 г. Простой анализ результатов SAGE совместно с результатами других солнечных нейтринных экспериментов дает оценку величины потока электронных $\nu\nu$ -нейтрино, достигающих Земли без изменения своего аромата, равную $(4.6 \pm 1.2) \cdot 10^{10}$ нейтрино/(см²·с). Оценка величины потока $\nu\nu$ -нейтрино, рождающихся в термоядерных реакциях Солнца, равна $(7.6 \pm 2.0) \cdot 10^{10}$ нейтрино/(см²·с), что находится в согласии с предсказанием стандартной солнечной модели $(5.95 \pm 0.06) \cdot 10^{10}$ нейтрино/(см²·с).

PACS: 96.60.Jw, 26.65.+t, 95.85.Ry, 13.15.+g

*E-mail: gavrin@adonis.iasnet.ru

**T. J. Bowles, W. A. Teasdale, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 87545, USA.

***J. S. Nico, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 20899, USA.

†J. F. Wilkerson, B. T. Cleveland, S. R. Elliott, University of Washington, Seattle, Washington, 98195, USA.

1. ВВЕДЕНИЕ

Последние несколько лет в нейтринной астрофизике характеризуются выдающимися достижениями в исследованиях солнечных нейтрино. Прежде всего это связано с вводом в строй больших водных черенковских детекторов СуперКамиоканде (СК) [1] и нейтринной обсерватории Садбери (СНО) [2], регистрирующих высокоэнергетические солнечные нейтрино от распада ${}^8\text{B}$ в режиме реального времени и обладающих большой скоростью счета событий.

Данные, полученные на этих двух гигантских нейтринных телескопах нового поколения, вносят очень важное дополнение к существующим данным хлорного и галлиевых радиохимических экспериментов [3–5] и эксперимента Камиоканде [6]. Сравнение данных СК по упругому рассеянию солнечных нейтрино на электронах с данными СНО по заряженным токам показывает, что вместе с электронными нейтрино на Землю от Солнца приходят нейтрино других ароматов. Объединенный анализ результатов всех этих экспериментов дает убедительное свидетельство того, что часть электронных нейтрино, образующихся в термоядерных реакциях в Солнце, на своем пути к Земле меняет свое ароматное состояние.

Исследование деталей изменения аромата солнечных нейтрино требует создания нейтринных телескопов следующего поколения, позволяющих регистрировать низкоэнергетическую часть солнечного нейтринного спектра ниже 2 МэВ, которая содержит протяженные спектры pp -нейтрино и нейтрино от CNO-цикла, а также моноэнергетические линии от ${}^7\text{Be}$ и pep -нейтрино.

Несмотря на ряд широко обсуждаемых сегодня многообещающих идей детектирования низкоэнергетических нейтрино в реальном времени [7], в настоящее время только радиохимические галлиевые эксперименты способны вести наблюдение и давать информацию об этой части солнечного нейтринного спектра. Низкий порог (233 кэВ) реакции захвата нейтрино ${}^{71}\text{Ga}(\nu_e, e^-){}^{71}\text{Ge}$ [8] позволяет измерять основную компоненту солнечного нейтринного спектра — pp -нейтрино, поток которых, если исключить экзотические гипотезы, определяется энерговыделением Солнца и не зависит от параметров солнечных моделей. При этом на скорость последующих реакций цепочки термоядерного синтеза в Солнце эти параметры оказывают значительное влияние.

Ожидаемая скорость захвата нейтрино на ${}^{71}\text{Ga}$,

вычисленная по стандартной солнечной модели (ССМ), равна 130_{-7}^{+9} SNU¹⁾ [9], с доминирующим вкладом pp -нейтрино 69.7 SNU. Из этих же вычислений вклады нейтрино от распадов ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$ составляют соответственно 34.2 SNU и 14.2 SNU. Полученный независимо результат вычислений 127.2 SNU [10] может свидетельствовать о нечувствительности скорости захвата нейтрино на галлии к параметрам солнечных моделей.

Из измерений в экспериментах СНО и СуперКамиоканде мы знаем с хорошей точностью величину потока нейтрино от распада ${}^8\text{B}$, а также какую его часть составляют электронные нейтрино при достижении Земли. Ожидается, что в ближайшем будущем эксперимент KamLAND [11] значительно сократит область возможных осцилляционных параметров для электронных нейтрино. Данные этого эксперимента и результаты эксперимента BOREXINO [12] позволят получить с хорошей точностью величину потока ${}^7\text{Be}$ -нейтрино. Вычитанием ${}^7\text{Be}$ - и ${}^8\text{B}$ -компонент солнечного нейтринного спектра из результата галлиевого эксперимента мы получим фундаментальный астрофизический параметр — поток нейтрино от pp -реакции с небольшим вкладом нейтрино от pep -реакции и CNO-цикла, который может быть определен из сравнения результатов СК и хлорного эксперимента. В конце нашей статьи мы даем предварительную оценку величины потока pp -нейтрино, используя имеющиеся на сегодняшний день экспериментальные данные. Так как в обозримом будущем только галлиевый эксперимент способен обеспечить эти измерения, очень важно, чтобы оба галлиевых эксперимента SAGE [4] и GNO [13] (преемник GALLEX) продолжали измерения, улучшая точность своих результатов.

В нашей статье [4] дано детальное описание эксперимента SAGE, включая извлечение германия из галлиевой мишени, счет единичных атомов ${}^{71}\text{Ge}$ и анализ полученных данных. В статье [4] представлены результаты SAGE за период с января 1990 г. по декабрь 1997 г. В настоящей статье кратко представлены основные принципы этого эксперимента, статистический анализ данных за период 1998–2001 гг., а также результаты новых анализов некоторых систематических неопределенностей. В заключение обсуждается значение результатов SAGE для солнечной и нейтринной физики.

¹⁾ SNU = 1 взаимодействие в секунду в мишени, содержащей 10^{36} атомов взаимодействующего с нейтрино изотопа.

2. ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТА SAGE

2.1. Лаборатория галлий-германиевого нейтринного телескопа

Измерения в эксперименте SAGE выполняются на галлий-германиевом нейтринном телескопе (ГГНТ), который размещен в специально построенной подземной лаборатории глубокого заложения Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований Российской академии наук в горах Северного Кавказа в Приэльбрусье [14]. Подземный комплекс лаборатории ГГНТ расположен в горизонтальном тоннеле, ведущем внутрь горы Андрычи, на расстоянии 3.5 км от входа. Основное помещение лаборатории представляет собой экспериментальный зал длиной 60 м, шириной 10 м и высотой 12 м. Горные породы над лабораторией создают защиту от мюонов космических лучей, соответствующую 4700 м водного эквивалента, и дают ослабление потока мюонов в 10^7 раз. Измеренный поток мюонов составляет $(3.03 \pm 0.10) \cdot 10^{-9} \text{ (см}^2 \cdot \text{с)}^{-1}$ [15]. Для снижения нейтронного и γ -фона от окружающих горных пород зал облицован низкорadioактивным бетоном толщиной 600 мм и стальным листом толщиной 6 мм. Поток нейтронов с энергией 1.0–11.0 МэВ в лаборатории не превышает $2.3 \cdot 10^{-7} \text{ (см}^2 \cdot \text{с)}^{-1}$ [16]. В подземном комплексе расположены также помещения для исследовательских работ по аналитической химии, для системы регистрации распадов ^{71}Ge , низкофонового полупроводникового Ge-детектора. Ряд помещений для вспомогательных измерений находится в лабораторных зданиях, расположенных на поверхности.

2.2. Процедуры эксперимента

Галлиевая мишень телескопа содержит в настоящее время около 50 т галлия, находящегося в виде жидкого металла в семи химических реакторах. Измерение скорости захвата солнечных нейтрино (ран) начинается с внесения в галлиевую мишень стабильного германия-носителя — в виде сплава Ga–Ge с известным содержанием германия — в количестве примерно 350 мкг, который равномерно распределяется между всеми реакторами. Содержимое реакторов тщательно перемешивается, чтобы равномерно распределить германий по всей массе галлия.

По окончании экспозиции (4 недели) германий-носитель вместе с атомами ^{71}Ge , образовавшимися в реакции захвата солнечных нейтрино и от фоновых реакций, химически извлекается из галлия. Для этого используются операции, описан-

ные в [4,17]. Заключительный этап химического извлечения — синтез моногермана (GeH_4), который помещается в пропорциональный счетчик в смеси с 70–90 % Xe. Полная эффективность извлечения — отношение массы Ge в моногермане к начальной массе Ge-носителя, обычно находится в диапазоне 80–90 %. Систематическая неопределенность эффективности извлечения составляет 3.4 %, в основном из-за неопределенности массы добавленного и извлеченного носителя. Во время каждого извлечения растворяется около 0.1 % галлия, который переходит в солянокислый раствор в виде хлорида. Растворы, содержащие галлий, поступают на переработку для восстановления галлия и его очистки, после которой галлий должен быть возвращен в мишень.

После заполнения пропорциональный счетчик помещается в колодец детектора NaI, расположенного в массивной пассивной защите, где в течение около пяти месяцев проводится счет распадов ^{71}Ge . При этом ^{71}Ge распадается электронным захватом с периодом полураспада 11.43 дня. Низкоэнергетические оже-электроны с *K*- и *L*-оболочек, а также рентгеновские кванты, излучаемые при снятии возбуждения электронных оболочек, производят близкую к точечной ионизацию в газе счетчика. Поэтому импульс от распада ^{71}Ge , снимаемый со счетчика, имеет быстро растущий передний фронт. В отличие от этого, треки ионизации большей части фоновых событий имеют заметную длину, и, соответственно, фронты импульсов от таких событий нарастают более медленно. Таким образом, мы проводим отбор событий-кандидатов на распад ^{71}Ge по энергии импульса в пропорциональном счетчике, которая должна соответствовать энергии *K*- или *L*-пики, и по времени нарастания фронта импульса. Кроме того, событие не должно иметь совпадения с импульсом от детектора NaI, поскольку излучения γ -квантов при распаде ^{71}Ge не происходит.

По мере развития эксперимента совершенствовалась электроника для сбора данных. В течение первых двух лет для измерения времени нарастания фронта импульса использовалась техника амплитуды дифференцированного импульса (ADP). Этот метод обеспечивал отбор событий в *K*-пики (10.4 кэВ), но не мог быть применен для отбора событий в *L*-пики (1.2 кэВ), который более чувствителен к нестабильности электроники и фон в котором более высокий. В 1992 г. была создана 8-канальная система счета, в состав которой входит цифровой осциллограф с полосой пропускания 1 ГГц, с помощью которого проводится запись формы импульсов со

счетчиков. Амплитуда и время нарастания фронта импульса (T_N) определяются аппроксимацией формы записанных импульсов [18]. Все результаты по L -пику и подавляющее большинство результатов по K -пику получены из такого анализа формы импульсов.

После заполнения счетчики регулярно калибруются источником ^{55}Fe (5.9 кэВ) через окно в железном катоде счетчиков. Дополнительные калибровки источником ^{109}Cd , излучение которого вызывает характеристическое излучение железного катода (6.4 кэВ) по всей длине счетчика, позволяют проводить коррекцию в положении пиков ^{71}Ge , связанную с полимерными наростами на анодной проволоке, появляющимися при длительной эксплуатации счетчика. Кроме того, для проверки линейности энергетической шкалы в пределах диапазона измерений используется характеристическое излучение источника $^{109}\text{Cd-Se}$ (1.4 кэВ и 11.2 кэВ).

Энергия импульса определяется интегрированием формы импульса в интервале 800 нс после начала импульса. Положение пиков ^{71}Ge с учетом поправки на полимеризацию счетчика и ширины энергетических окон, соответствующих этим пикам, которые берутся равными удвоенной ширине пика на половине максимума, вычисляются по калибровке ^{55}Fe . Увеличение ширины энергетических окон не приводит к заметному увеличению эффективности счета распадов ^{71}Ge , но значительно ухудшает отношение сигнала к шуму.

Если положение пика меняется между двумя калибровками, то окно для энергетического отбора линейно смещается по времени между двумя калибровками. Изменение усиления между калибровками не превышает обычно нескольких процентов, что приводит к неопределенности в эффективности счета не более 3.1 %.

Для того чтобы определить значения времени нарастания фронта импульсов при распаде ^{71}Ge , в каждом счетном канале были проведены измерения со счетчиками, в рабочий газ которых был введен $^{71}\text{GeH}_4$. Значения времени нарастания T_N для всех событий, отобранных в пределах энергетических окон K - и L -пику, были выстроены в возрастающем порядке, после чего был установлен верхний предел таким образом, чтобы исключить 5 % событий. Связанная с этим небольшая потеря эффективности счета компенсируется значительным ограничением количества фоновых событий. Полученные пределы для значений T_N в K - и L -пиках составляют, соответственно от 0.0 до 18.4 нс и от 0.0 до 10.0 нс. Вариации, связанные с газовым заполнением

счетчиков, а также с особенностями различных каналов счета, составляют 1.2 нс, что вносит неопределенность в определение эффективности около ± 1 %.

В табл. 1 приведены параметры 35 ранов солнечных нейтринных измерений 1998–2001 гг., используемых для определения солнечного нейтринного потока.

3. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОЛНЕЧНЫХ ДАННЫХ

По окончании счета распадов ^{71}Ge в пропорциональном счетчике отобранные по критериям ^{71}Ge -события группируются в наборы данных. Для событий из каждого набора данных проводится поиск максимума функции правдоподобия [19], при построении которой мы считаем, что причиной события является неизвестный постоянный во времени фон и распады ^{71}Ge , количество которых экспоненциально убывает во времени. Для минимизации возможного влияния радона и его дочерних элементов, которые попадают внутрь пассивной защиты во время периодических калибровок счетчиков и распад которых может имитировать распады ^{71}Ge , мы исключаем из рассмотрения 2.6 ч после каждого закрытия пассивной защиты. Очень опасен для измерения количества распадов ^{71}Ge в счетчиках радон, который попадает в газовый объем самого счетчика при заполнении (в количестве нескольких атомов). Большая часть радоновых распадов внутри счетчика производит медленные импульсы с энергией, превышающей энергетический диапазон системы регистрации распадов ^{71}Ge (так называемые зашкаливающие импульсы), но около 8 % распадов радона и его дочерних элементов приводят к быстрым импульсам, которые неотличимы от импульсов ^{71}Ge . Цепочка распадов радона в среднем приблизительно за 50 мин приводит к долгоживущему изотопу (^{210}Pb). Поэтому, исключая около каждого зашкаливающего импульса интервалы времени 15 мин до импульса и 3 ч после, мы удаляем подавляющую часть событий от радона, распадающегося внутри счетчика.

Скорость образования ^{71}Ge определяется положением максимума функции правдоподобия для каждого набора данных. Статистическую ошибку находим, интегрируя эту функцию по всем возможным значениям фоновой скорости счета. В полученной функции правдоподобия, которая зависит теперь только от скорости образования ^{71}Ge , устанавливаем минимальный диапазон скорости, в преде-

Таблица 1. Параметры всех рангов с апреля 1998 г., использованные в анализе для определения потока солнечных нейтрино

Дата эксп.	Средняя дата экспоз.	Длит. эксп., сут	Масса Ga, т	Эфф-ть извл.	Наим. счетч.	Давл., мм рт. ст.	% GeH ₄	Рабочее напр., В	Эфф. K-пика	Эфф. L-пика	Коэфф. полимериз.
Апр. 98	1998.225	44.9	48.05	0.85	A13	695	37.0	1480	0.243	0.219	1.01
Май 98	1998.347	30.0	51.17	0.91	LY4	690	29.5	1366	0.238	0.245	1.00
Июль 98	1998.477	45.6	51.06	0.90	A12	680	32.0	1414	0.235	0.237	1.00
Авг. 98	1998.611	45.7	50.93	0.89	LA51	660	27.0	1356	0.234	0.244	1.04
Окт. 98	1998.745	45.8	50.81	0.92	A13	680	32.0	1404	0.244	0.212	1.00
Нояб. 98	1998.883	45.8	50.68	0.92	LY4	680	26.5	1322	0.238	0.244	1.00
Янв. 99	1999.014	44.7	50.54	0.92	A12	700	30.0	1398	0.239	0.241	1.00
Фев. 99	1999.130	38.7	50.43	0.89	LA51	705	11.0	1194	0.248	0.234	1.05
Апр. 99	1999.279	51.7	50.29	0.89	A13	665	13.5	1206	0.253	0.231	1.05
Июнь 99	1999.417	46.7	50.17	0.87	LY4	670	11.0	1140	0.246	0.239	1.00
Июль 99	1999.551	45.7	50.06	0.90	L116	635	12.5	1164	0.243	0.244	1.03
Сент. 99	1999.685	45.7	49.91	0.91	LA51	660	11.5	1172	0.242	0.238	1.05
Окт. 99	1999.801	38.7	49.78	0.90	A13	665	12.5	1186	0.254	0.202	1.01
Янв. 00	2000.035	28.8	49.59	0.91	LA51	700	13.5	1224	0.324	0.310	1.05
Фев. 00	2000.127	30.7	49.48	0.83	LY4	646	10.4	1130	0.320	0.316	1.01
Март 00	2000.207	28.8	49.42	0.91	A13	665	14.5	1206	0.332	0.329	1.10
Май 00	2000.359	30.7	49.24	0.92	LA116	705	14.0	1244	0.329	0.315	1.03
Июнь 00	2000.451	33.7	49.18	0.84	LA51	652	12.0	1160	0.317	0.314	1.03
Июль 00	2000.540	32.0	49.12	0.92	LY4	670	13.8	1182	0.321	0.316	1.01
Авг. 00	2000.626	31.3	49.06	0.73	A13	707	9.5	1176	0.343	0.321	1.08
Сент. 00	2000.704	27.7	49.00	0.89	A12	690	14.7	1224	0.324	0.312	1.00
Окт. 00	2000.796	30.7	48.90	0.84	LA116	734	9.4	1188	0.337	0.303	1.03
Нояб. 00	2000.876	28.7	48.84	0.93	LA51	680	11.9	1196	0.345	0.330	1.03
Дек. 00	2000.958	30.7	48.78	0.93	LY4	697	12.0	1174	0.327	0.312	1.02
Фев. 01	2001.122	29.8	41.11	0.87	LA116	687	9.2	1144	0.330	0.314	1.04
Март 01	2001.214	33.4	48.53	0.92	LA51	635	13.5	1180	0.314	0.317	1.02
Апр. 01	2001.290	22.7	48.43	0.90	УСТ1	695	13.1	1210	0.344	0.333	1.00
Май 01	2001.373	31.7	48.37	0.88	УСТ2	625	14.9	1178	0.332	0.342	1.00
Июнь 01	2001.469	31.7	48.27	0.92	УСТ3	678	12.2	1190	0.342	0.334	1.00
Июль 01	2001.547	23.7	48.17	0.93	LA116	690	12.7	1196	0.328	0.315	1.03
Авг. 01	2001.624	28.7	48.11	0.59	A12	768	7.2	1148	0.340	0.302	1.00
Сент. 01	2001.701	27.7	48.06	0.90	УСТ1	665	15.0	1204	0.338	0.337	1.00
Окт. 01	2001.793	30.7	47.96	0.88	УСТ2	758	12.2	1210	0.354	0.326	1.00
Нояб. 01	2001.887	34.8	47.91	0.92	УСТ3	685	14.2	1210	0.342	0.335	1.00
Дек. 01	2001.955	22.8	47.86	0.86	УСТ4	685	11.4	1176	0.344	0.333	1.00

Примечание. Эффективности K- и L-пиков определяются как отношение количества распадов ⁷¹Ge, регистрируемых в соответствующем энергетическом диапазоне, к полному числу распадов ⁷¹Ge. В значения эффективностей включены эффективности энергетического отбора (0.98), отбора по времени нарастания фронта импульсов (0.95), а также учтено, что программа сбора данных в 1996–99 гг. содержала ошибку в триггерной логике (0.76). Коэффициент полимеризации — коэффициент коррекции энергетической шкалы, определяемый из отношения пиков в калибровках ⁵⁵Fe и ¹⁰⁹Cd.

Таблица 2. Результаты анализа данных, полученных во всех ранах, начиная с апреля 1998 г.

Время извлечения	Число событий-кандидатов ^{71}Ge	Число распадов ^{71}Ge	Результат, SNU	Интервал 68 %, SNU	$N\omega^2$	Вероятность, %
Апр. 98	39	5.4	75	26–134	0.052	72
Май 98	23	3.4	44	10–88	0.051	68
Июль 98	22	4.8	61	24–108	0.065	52
Авг. 98	33	3.6	46	5–97	0.039	84
Окт. 98	40	3.8	45	4–95	0.028	95
Нояб. 98	32	5.9	67	28–116	0.101	30
Янв. 99	21	4.5	56	15–107	0.036	84
Фев. 99	16	1.6	24	0–67	0.114	28
Апр. 99	10	1.8	38	5–83	0.105	36
Июнь 99	14	12.9	172	123–232	0.048	80
Июль 99	17	5.5	103	49–172	0.118	20
Сент. 99	20	7.1	93	43–154	0.099	28
Окт. 99	16	10.0	138	80–206	0.066	56
Янв. 00	24	5.4	63	23–111	0.060	59
Фев. 00	21	9.1	107	63–157	0.058	55
Март 00	19	10.1	117	78–165	0.046	79
Май 00	15	0.0	0	0–32	0.143	40
Июнь 00	17	1.4	23	0–75	0.179	17
Июль 00	29	6.4	69	33–111	0.088	34
Авг. 00	14	5.2	74	39–117	0.086	33
Сент. 00	30	9.2	111	64–166	0.093	24
Окт. 00	14	3.0	37	8–75	0.020	99
Нояб. 00	25	2.9	32	0–73	0.208	9
Дек. 00	27	7.6	81	43–127	0.062	68
Фев. 01	21	6.3	79	43–125	0.088	34
Март 01	18	3.8	44	14–80	0.120	24
Апр. 01	17	6.7	76	43–117	0.074	45
Май 01	21	11.9	127	90–171	0.088	31
Июнь 01	20	9.4	93	57–135	0.025	96
Июль 01	9	2.1	24	0–58	0.033	92
Авг. 01	21	5.4	90	38–155	0.065	57
Сент. 01	10	2.1	22	0–53	0.139	18
Окт. 01	12	7.5	73	44–109	0.082	41
Нояб. 01	15	2.6	23	0–54	0.084	38
Дек. 01	9	5.2	62	34–101	0.063	70
Объединенный результат	711	191.8	67	60–74	0.080	42

Примечание. Описание и интерпретация тестовой статистики $N\omega^2$ приведены в [20]. Соответствующая значению $N\omega^2$ вероятность того, что последовательность измеренных событий описывается в рамках гипотезы о распаде ^{71}Ge при постоянной фоновой скорости счета, получена методом Монте-Карло и приведена в последнем столбце. Точность приведенных значений вероятности составляет приблизительно 1.5% для индивидуальных ранов и порядка 4% для объединенного результата.

лах которого заключено 68 % полной площади под кривой. Эта процедура проводится отдельно для событий, отобранных в L - и K -пиках. Функция правдоподобия для анализа нескольких ранов (а также для совместного анализа событий, отобранных в L - и K -пиках в отдельных ранах) получается умножением функций правдоподобия для отдельных наборов данных при дополнительном требовании, что скорость образования ^{71}Ge в единице массы галлия постоянна, а фоновые скорости различны для каждого набора данных. В анализе учитывается небольшое изменение скорости образования ^{71}Ge вследствие ненулевого эксцентриситета орбиты Земли из-за изменения расстояния до Солнца не более чем 3%. Положение максимума комбинированной функции правдоподобия определяет среднюю скорость образования ^{71}Ge . Доверительный интервал 68 % определяется значениями скорости образования, при которых значение функции уменьшается в 0.606 раза по сравнению с ее максимумом; при этом другие переменные остаются такими же, как в положении максимума. Результаты комбинированного анализа последних извлечений приведены в табл. 2. Результаты всех ранов SAGE представлены на рис. 1.

После публикации статьи [4], в которой содержатся результаты измерений, проведенных с января 1990 г. по декабрь 1997 г., было обнаружено, что в период с июня 1996 г. по декабрь 1999 г. нами использовалась ошибочная программа сбора событий. В начале этого периода было проведена замена вышедшей из строя части электронного оборудования системы сбора данных, что потребовало изменения системы определения совпадений импульсов от событий в детекторе NaI и событиями в пропорциональных счетчиках. Новая система повлекла за собой изменение программы сбора, в которой обнаружилась ошибка в триггерной логике. В результате ошибки терялось 23.9 ± 0.4 (стат.) ± 0.5 (сист.) % триггеров. Эта ошибка искусственно занижала результаты индивидуальных ранов, счет в которых проводился в течение этого периода, и повлияла на полный результат. Скорректированные результаты приведены в работе [21].

4. СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

В табл. 3 представлены систематические эффекты, которые могут исказить измеряемую скорость захвата солнечных нейтрино. Их можно условно разбить на три основные категории: неопределенности,

связанные с эффективностью извлечения, с эффективностью счета распадов ^{71}Ge и с фоном. Некоторые из этих эффектов приведены выше, остальные мы коротко обсудим в этом разделе. Эффективность счетчиков определялась в серии измерений с различным газовым заполнением счетчиков; в состав газовых смесей входили ^{71}Ge , ^{37}Ar и ^{69}Ge . Неопределенности в измерении эффективности счетчиков связаны с неопределенностью объемной эффективности, концевых эффектов и состава газовой смеси. Квадратичное суммирование этих эффектов приводит к неопределенности $\pm 1.8\%$ в эффективности счетчиков.

К неопределенностям приводят также систематические эффекты, связанные с фоновыми источниками образования изотопов германия в галлиевой мишени, а также распад радона внутри и вблизи счетчиков. Из измеренных потоков быстрых нейтронов [16, 22] и мюонов космических лучей в подземной лаборатории [15] были получены пределы на образование ^{71}Ge по реакции (n, p) на ^{71}Ga . Измерения предельных значений концентраций U и Th в галлии, которые также могут приводить к образованию изотопов германия, были выполнены на полупроводниковом германиевом детекторе [23] и на масс-спектрометре [24]. Суммарная скорость образования ^{71}Ge от всех этих процессов не превышает 1 SNU.

Из внутреннего объема пассивной защиты, где находятся счетчики, радон удаляется испаряющимся жидким азотом. Чтобы исключить возможность попадания радона в счетчик, при заполнении применяются специальные антирадоновые процедуры очистки газовой смеси. Влияние остающегося количества радона на результаты измерений скорости образования ^{71}Ge было изучено с помощью специальных измерений со счетчиками, в состав газовой смеси которых добавлялось некоторое количество радона, а также при исследовании реакции счетчиков на внешнее γ -излучение [25, 26]. Полученные в результате этих исследований значения верхнего предела систематической ошибки, связанной с распадами радона внутри счетчика и вне его, составляют соответственно 0.2 SNU и 0.03 SNU.

Имитировать события ^{71}Ge могут распады ^{68}Ge и ^{69}Ge , которые образуются в галлиевой мишени в фоновых процессах. Количество ^{68}Ge , который образуется во взаимодействиях мюонов космических лучей, можно оценить по ожидаемой скорости образования ^{71}Ge в мюонных взаимодействиях. Она оказывается равной 0.012 ± 0.006 атомов в сутки в 60 т галлия [4, 27]. При измеренном отношении сечений про-

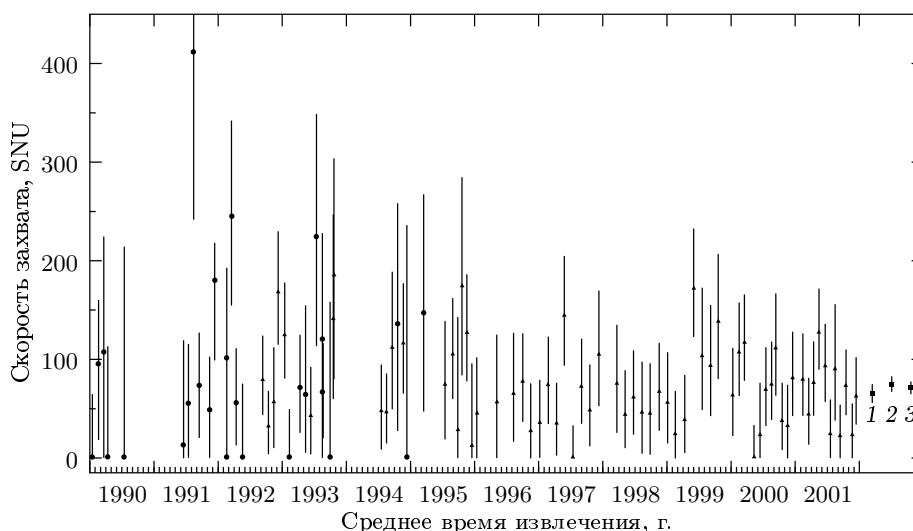


Рис. 1. Скорость захвата по всем извлечениям SAGE, представленная как функция времени: ▲ — *L*- и *K*-пики, ● — только *K*-пик, вертикальные линии около каждой точки соответствуют статистической ошибке 68 %. 1 — результаты обработки по *L*-пику, 2 — по *K*-пику, 3 — объединенный результат по всем наборам данных

Таблица 3. Систематические эффекты и связанные с ними неопределенности в измерении скорости захвата нейтрино (в SNU). Значения для эффективностей извлечения и счета получены для скорости захвата 70.8 SNU

Эффективность извлечения	Масса Ge-носителя	±1.5
	Масса извлеченного Ge	±1.8
	Остаток Ge-носителя в реакторе	±0.6
	Масса галлия	±0.2
Эффективность счета	Объемная эффективность счетчиков	±1.3
	Смещение газового усиления	+2.3
	Разрешение	-0.4, +0.5
	Пределы времени нарастания	±0.7
	Время экспозиции и время до начала счета	±0.6
Фоны	Нейтроны	< -0.02
	U и Th	< -0.7
	Мюоны космических лучей	< -0.7
	Внутренний радон	< -0.2
	Внешний радон	0
	Другие изотопы Ge	< -0.7
Суммарно		-3.2, +3.7

цессов образования ^{68}Ge и ^{71}Ge в реакциях с галлием мюонов с энергией 280 ГэВ, равно 2.1 ± 0.05 [28] в 50 т галлия в сутки, образуется 0.022 ± 0.013 атомов ^{68}Ge . При периоде полураспада ^{68}Ge 271 сут эти импульсы распределяются почти равномерно во вре-

мени в течение счета, увеличивая только среднюю фоновую скорость. Однако в начальный период счета эти импульсы могут давать некоторое увеличение скорости счета ^{71}Ge . Расчет методом Монте-Карло показал, что при типичных параметрах наших изме-

рений — время экспозиции 30 сут, масса галлия 50 т, эффективность извлечения 0.9, эффективность счета (L -пик + K -пик) 0.6, фоновая скорость (L -пик + K -пик) 0.175 события в сут — скорость образования ^{68}Ge 0.022 события в сут дает вклад в скорость образования ^{71}Ge , равный 0.0085 события в сут, что эквивалентно 0.05 SNU.

Изотоп ^{69}Ge образуется в галлиевой мишени в результате взаимодействия α -частиц от внутренней радиоактивности мишени и нейтронов, излучаемых окружающими породами, а также во взаимодействиях солнечных нейтрино и мюонов космических лучей. Скорость образования ^{69}Ge в 60 т галлия равна 0.21 атомов в сутки [4] при неопределенности около 50%. Поскольку большая часть распадов ^{69}Ge сопровождается γ -излучением, которое регистрируется детектором NaI с эффективностью 90%, и счетчик устанавливается на счет примерно через 1.5 сут после извлечения, при малом периоде полураспада ^{69}Ge (1.6 сут) в одном ране наблюдается только 0.045 событий от ^{69}Ge [4], в 100 раз меньше, чем среднее количество регистрируемых распадов ^{71}Ge . Таким образом, фоновый эффект от ^{69}Ge составляет не более 0.7 SNU.

Возможности системы регистрации распадов ^{71}Ge и большое количество проведенных измерений позволили нам провести поиск событий, связанных с распадом ^{68}Ge и ^{69}Ge , в солнечных ранах [29]. Методы и эффективности отбора событий определялись с учетом особенностей распада этих изотопов. Полученная скорость образования ^{68}Ge составила $0.18_{-0.12}^{+0.13}$ атомов в 60 т галлия в сутки, что примерно в 7 раз превышает ожидаемое значение, хотя в пределах ошибок эти значения согласуются друг с другом. Поскольку скорость образования ^{68}Ge была получена из экспериментов с мюонами с меньшими ошибками, мы берем для определения неопределенности именно это значение. В [29] рассматривается возможность прямого измерения скорости образования изотопов германия во взаимодействиях мюонов космических лучей в подземных условиях Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

Аналогичный поиск событий ^{69}Ge показал, что скорость образования ^{69}Ge в 60 т галлия не превышает 0.49 атомов в сутки. Это хорошо согласуется со значением, приведенным выше. Полученное ограничение не исключает того, что скорость образования этого изотопа при взаимодействии мюонов космических лучей может быть выше предсказываемой, на что, возможно, получено указание в анализе событий ^{68}Ge .

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

В этом разделе мы представляем результаты измерений скорости захвата солнечных нейтрино галлием, проведенных с января 1990 г. по декабрь 2001 г. Скорость захвата, полученная в результате анализа 92 ранов и 158 отдельных наборов данных, равна $70.8_{-5.2}^{+5.3}$ SNU. Здесь приведены только статистические неопределенности. В выделенных границах L - и K -пигов ^{71}Ge отобрано 1723 события, из которых 406.4 отнесено временным анализом к ^{71}Ge (полное живое время счета составило 29.5 г.). Результаты анализа событий, отобранных отдельно в L - и K -пиках, равны соответственно $64.5_{-8.2}^{+8.5}$ SNU и $74.4_{-6.6}^{+6.8}$ SNU. Согласие между этими двумя результатами может служить проверкой качества критериев отбора событий. Полная систематическая неопределенность получается квадратичным суммированием всех систематических вкладов, представленных в табл. 3. Таким образом, результат эксперимента SAGE составляет $70.8_{-5.2}^{+5.3+3.7}$ SNU. Для сравнения, последний результат эксперимента GNO (включая данные GALLEX) составляет $74.1_{-5.4-4.2}^{+5.4+4.0}$ SNU [13]. При квадратичном суммировании статистических и систематических неопределенностей результат эксперимента SAGE равен $70.8_{-6.1}^{+6.5}$ SNU.

5.1. Проверка эффективности извлечений ^{71}Ge

Технологии, используемые в эксперименте, позволяют производить химическое извлечение нескольких атомов ^{71}Ge , образующихся при взаимодействии нейтрино, из мишени, содержащей $5 \cdot 10^{29}$ атомов галлия, с высокой и хорошо известной эффективностью. Для измерения этой эффективности в начале каждой экспозиции в галлий добавляется около 350 мкг стабильного германия-носителя. При этом с учетом носителя на один атом германия приходится 10^{11} атомов галлия. Мы провели ряд вспомогательных измерений, которые подтвердили эффективность нашей технологии извлечения единичных атомов ^{71}Ge из металлического галлия.

В реактор, в котором содержалось 7 т галлия, был добавлен германий-носитель с включенным в его состав известным количеством ^{71}Ge . Были проведены три извлечения, в каждом из которых посчитано количество атомов извлеченного ^{71}Ge . Результаты этой работы [17] показали, что эффективности извлечения стабильного германия-носителя и ^{71}Ge одинаковы.

Задача второго эксперимента состояла в том,

Рис. 2. Распределение событий по энергии и времени нарастания импульсов для всех ранов, в которых эти величины определялись по форме импульсов. *a* — События, зарегистрированные в течение первых 22.86 сут счета после извлечения для всех ранов (кроме майского извлечения 1996 г.). Суммарное живое время счета составляет 1169.9 сут. Положение *L*- и *K*-пиков ^{71}Ge , определенное по калибровкам, показано темным цветом. *b* — Та же гистограмма для всех событий, которые были зарегистрированы в течение такого же времени счета через 100 сут после извлечения

чтобы определить, образует ли ^{71}Ge , атомы которого могут рождаться в реакции обратного β -распада в возбужденном или ионизированном состоянии, химические связи, которые не позволяют эффективно его извлекать. Был подготовлен и проведен ряд измерений для прямой проверки такой возможности, в которых наблюдался β -распад радиоактивных изотопов галлия в жидком металлическом галлии. Полученный результат [17] с точностью 10 % совпадает с ожидаемым значением.

Проверка всего эксперимента в целом (т. е. полная проверка всех процедур эксперимента, в том чис-

ле эффективности химического извлечения, счетной эффективности, техники анализа) была осуществлена с использованием искусственного источника нейтрино ^{51}Cr интенсивностью 19.1 ПБк (517 кКи) [30, 31]. Результат, выраженный как отношение измеренной скорости образования ^{71}Ge к ожидаемой, составил $(0.95 \pm 0.12) \%$. Это является доказательством того, что экспериментальные эффективности соответствуют тем, которыми мы пользуемся, а также обосновывает фундаментальное предположение радиохимических экспериментов о том, что эффективность извлечения атомов, образовавшихся в ней-

тринных взаимодействиях, не отличается от эффективности извлечения носителя.

5.2. Проверка положений анализа

Наглядное свидетельство того, что мы действительно наблюдаем распад ^{71}Ge , представлено на рис. 2, где показаны все события, зарегистрированные в течение живого времени счета, которые не имели совпадений с импульсами от детектора NaI. Ожидаемое положение L - и K -пигов ^{71}Ge выделено более темным цветом. Эти пики явно присутствуют на верхней гистограмме, но их нет на нижней, поскольку здесь ^{71}Ge уже распался. Вне области пиков количество событий на рис. 2а и б примерно равное, так как эти события, в основном, имеют фоновое происхождение.

5.2.1. Временная последовательность событий

Основное положение анализа состоит в том, что временная последовательность наблюдаемых событий для каждого рана состоит из суперпозиции событий от распада фиксированного количества атомов ^{71}Ge и фоновых событий, которые происходят с постоянной скоростью. Величина $N\omega^2$ [20] и соответствующая ей вероятность аппроксимации дают количественное заключение о том, насколько хорошо данные счета описываются в рамках этого положения. Эти величины, которые вычислялись для каждого набора данных, представлены в табл. 2. Встречаются раны с низкой вероятностью аппроксимации, но количество таких ранов не больше, чем ожидается при нормальных статистических вариациях.

Метод $N\omega^2$ может быть использован также для оценки качества аппроксимации комбинированных временных последовательностей для всех событий L - и K -пигов для любого сочетания ранов. Значение тестовой статистики для суммарного набора данных от всех ранов равно $N\omega^2 = 0.053$; соответствующая этому значению вероятность аппроксимации составляет $(72 \pm 4.5)\%$. Качество такой аппроксимации видно на рис. 3, на котором показана средняя скорость счета событий в L - и K -пиках по всем измерениям в зависимости от времени, прошедшего после извлечения. Дополнительное количественное подтверждение того, что в эксперименте проводится счет ^{71}Ge , может быть получено, если ввести в функцию правдоподобия постоянную распада в качестве свободной переменной, так же как ско-

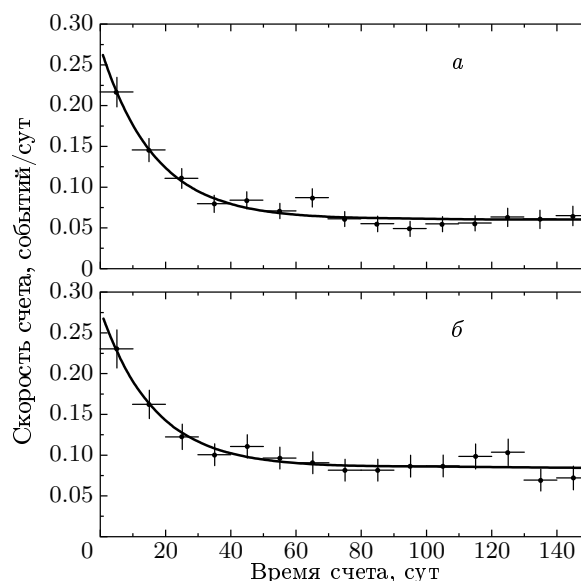


Рис. 3. Средняя скорость счета событий, отобранных в K - (а) и L - (б) пиках во всех ранах с января 1990 г. Сплошная линия — кривая распада ^{71}Ge с периодом полураспада 11.4 сут при постоянной фоновой скорости счета событий. Ошибки, обозначенные около каждой точки вертикальными линиями, пропорциональны квадратному корню от числа событий. Горизонтальные линии — временные интервалы ± 5 сут, в пределах которых берется средняя скорость счета событий

рость образования ^{71}Ge и все фоновые скорости счета. Найденный таким образом период полураспада для всех отобранных событий в L - и K -пиках равен $9.7^{+1.5}_{-1.3}$ сут, что согласуется с измеренным значением 11.43 сут [32].

5.2.2. Скорость образования ^{71}Ge

Другое положение анализа состоит в том, что скорость образования ^{71}Ge постоянна во времени. Как видно из рис. 1, в пределах больших статистических неопределенностей для отдельных ранов заметных отклонений скорости от среднего значения нет.

Это положение о постоянстве скорости образования можно рассмотреть также с использованием функции распределения скорости образования $C(p)$, определяемой как относительное количество наборов данных, в которых скорость образования меньше, чем p . На рис. 4 показано это распределение для всех наборов экспериментальных данных. Для сравнения здесь приведено распределение, полученное методом Монте-Карло в предположении, что истин-

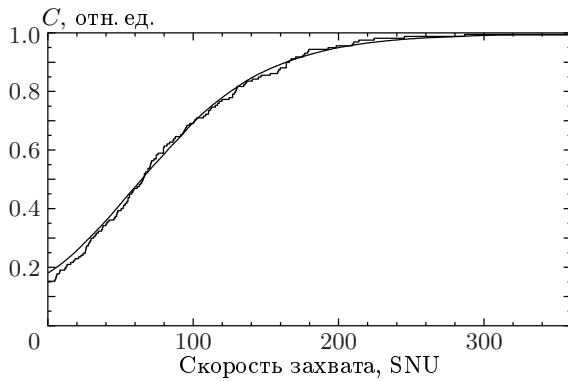


Рис. 4. Сравнение функций распределения скорости захвата нейтрино — измеренной в 158 наборах данных SAGE (гистограмма) с полученной в результате розыгрыша Монте-Карло (сплошная линия). Скорость захвата в розыгрышах принималась равной 70.8 SNU

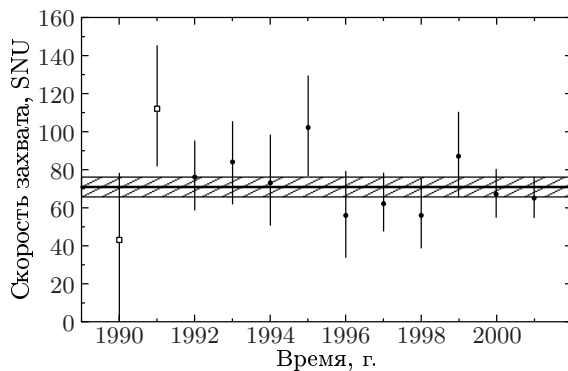


Рис. 5. Результаты измерений, объединенных по году; \square — только K -пик, \bullet — K - + L -пики, заштрихованная область соответствует результату SAGE $70.8_{-5.2}^{+5.3}$ SNU. Приведенные данные имеют статистическую ошибку 68 %

ная скорость образования равна 70.8 SNU. Две кривые расположены близко друг к другу, и их можно сравнить, вычислив тестовую статистику $N\omega^2$ [20]. Это вычисление дает $N\omega^2 = 0.337$, что соответствует уровню значимости 11 %.

5.3. Комбинирование данных по времени

Если причиной малой измеренной скорости захвата нейтрино галлием по сравнению с предсказанной по ССМ являются вакуумные осцилляции, то надо ожидать сезонных вариаций скорости захвата [33, 34]. Другие явления также могут приводить к временным вариациям (см., например, [35, 36]).

В табл. 4 представлены результаты анализа рангов SAGE, скомбинированных различным образом — по месяцам, по парам месяцев и по годам. Ни в одной из этих комбинаций нет неоспоримого свидетельства временных вариаций. Результаты анализа рангов, скомбинированных по годам, представлены на рис. 5, из которого видно, что скорость захвата нейтрино была постоянна в течение всего периода сбора данных. Значение тестовой статистики χ^2 в предположении о постоянной скорости захвата 70.8 SNU равно $\chi^2 = 6.6$, при 11 степенях свободы это соответствует вероятности 83 %.

6. ПОТОК pp -НЕЙТРИНО

Одной из основных задач галлиевого эксперимента является получение информации, необходимой для определения величины приходящего на Землю потока pp -нейтрино. В этом разделе мы даем оценку состояния этой проблемы, используя имеющиеся на сегодняшний день результаты всех солнечных нейтринных экспериментов.

Из результатов экспериментов SAGE, GALLEX и GNO средняя скорость захвата нейтрино в галлиевом эксперименте составляет 72 ± 5 SNU. Эта скорость представляет собой сумму скоростей от всех компонент солнечного нейтринного потока, которую мы обозначаем как $[pp + {}^7\text{Be} + \text{CNO} + pep + {}^8\text{B}|\text{Ga}]_{exp}$, где индекс «*exp*» указывает на то, что это экспериментально измеренная величина. Мы пренебрегаем здесь hep -нейтрино, так как вклад этой компоненты пренебрежимо мал — 0.05 % от полной скорости захвата, предсказываемой ССМ [9]. Единственной известной компонентой потока солнечных электронных нейтрино является ${}^8\text{B}$ -нейтрино, величина потока которых измерена в СНО: $[{}^8\text{B}|\text{CNO}]_{exp} = (1.75 \pm 0.15) \cdot 10^6$ электронных нейтрино / (см² · с) [2]. Спектры, измеренные в СНО и СК, близки по форме к спектру, предсказываемому ССМ. Для определения вклада нейтрино от ${}^8\text{B}$ в скорость захвата, измеряемую в галлиевых экспериментах, можно использовать величину потока электронных нейтрино, измеренную в СНО, и сечение захвата для ${}^8\text{B}$ -нейтрино из ССМ ($2.40_{-0.36}^{+0.77} \cdot 10^{-42}$ см²), так как сечение захвата нейтрино на галлии резко возрастает с ростом энергии:

$$[{}^8\text{B}|\text{Ga}]_{exp} = 4.2_{-0.7}^{+1.4} \text{ SNU}.$$

Вычитание этой величины из измеряемой в галлии полной скорости дает нам величину вклада в галли-

Таблица 4. Результаты анализа данных всех измерений SAGE, скомбинированных по месяцам, по парам месяцев и по годам

Период экспозиции	Число наборов данных	Число событий-кандидатов ${}^{71}\text{Ge}$	Число распадов ${}^{71}\text{Ge}$	Результат, SNU	Интервал 68 %, SNU	$N\omega^2$	Вероятность, %
1990	5	43	4.9	43	2–78	0.260	9
1991	6	59	25.5	112	82–145	0.120	17
1992	13	145	39.8	76	59–95	0.047	68
1993	15	97	33.2	84	62–105	0.199	6
1994	10	155	24.1	73	51–98	0.027	95
1995	13	210	37.7	102	77–129	0.041	82
1996	10	121	19.4	56	34–79	0.064	51
1997	16	183	35.7	62	48–78	0.057	62
1998	12	189	26.7	56	39–75	0.064	60
1999	14	114	40.8	87	66–110	0.068	33
2000	22	235	62.2	67	55–80	0.102	29
2001	22	173	64.4	65	55–76	0.050	70
январь	11	129	24.8	58	37–80	0.082	35
февраль	12	101	25.5	60	44–77	0.045	74
март	9	129	34.5	102	79–127	0.043	78
апрель	9	80	16.9	54	37–73	0.072	39
май	12	114	34.7	75	59–94	0.051	62
июнь	11	101	33.6	79	58–102	0.175	5
июль	15	176	26.6	52	37–69	0.091	35
август	15	161	38.7	78	60–96	0.058	51
сентябрь	20	220	48.5	68	54–84	0.035	91
октябрь	17	169	40.3	73	56–91	0.080	45
ноябрь	15	197	37.6	59	44–75	0.033	90
декабрь	12	147	46.4	105	84–127	0.040	89
январь+фев.	23	230	50.5	59	46–73	0.095	34
март+апр.	18	209	49.2	75	61–91	0.026	> 99
май+июнь	23	215	68.0	77	63–91	0.111	10
июль+авг.	30	337	65.4	65	53–78	0.075	50
сентябрь+окт.	37	389	88.7	71	60–82	0.041	85
ноябрь+декаб.	27	344	84.3	78	66–91	0.040	85
февраль+март	21	230	58.8	77	63–91	0.037	84
апрель+май	21	194	50.8	66	54–79	0.049	60
июнь+июль	26	277	58.7	63	50–77	0.081	42
август+сентяб.	35	381	87.2	73	61–84	0.043	84
октябрь+нояб.	32	366	78.1	66	54–78	0.044	82
декабрь+январь.	23	276	73.6	84	70–99	0.059	65
февраль+нояб.	27	298	63.1	59	48–71	0.017	99
март+октябрь.	26	298	75.1	84	71–99	0.062	66
апрель+сентяб.	29	300	64.3	63	52–75	0.042	86
май+август.	27	275	73.3	77	64–89	0.045	75

Примечание. Раны соотнесены с каждым временным интервалом в соответствии со средним временем экспозиции. Точность оценки вероятности приблизительно 4 %.

евом эксперименте pp -нейтрино и нейтрино средних энергий

$$[pp + {}^7\text{Be} + \text{CNO} + \text{pep}|\text{Ga}]_{\text{exp}} = 67.8_{-5.2}^{+5.1} \text{ SNU}.$$

Измеренная скорость захвата нейтрино в хлорном эксперименте

$$[{}^7\text{Be} + {}^8\text{B} + \text{CNO} + \text{pep}|\text{Cl}]_{\text{exp}} = 2.56 \pm 0.23 \text{ SNU}$$

[3]. Вкладом hep -нейтрино мы опять пренебрегаем, так как он составляет только 0.5 % от полной величины, предсказываемой ССМ. В силу того что в хлорном эксперименте доминирующий вклад вносят нейтрино с энергией выше 5 МэВ, мы можем снова использовать поток, измеренный в СНО, и сечение, вычисленное для ССМ, равное $(1.14 \pm 0.04) \cdot 10^{-42} \text{ см}^2$. Таким образом, получаем вклад ${}^8\text{B}$ -нейтрино:

$$[{}^8\text{B}|\text{Cl}]_{\text{exp}} = 2.0 \pm 0.2 \text{ SNU}.$$

Вычитание этой компоненты дает величину вклада в хлорный эксперимент нейтрино средних энергий

$$[{}^7\text{Be} + \text{CNO} + \text{pep}|\text{Cl}]_{\text{exp}} = 0.56 \pm 0.29 \text{ SNU}.$$

Влияние нейтринных осцилляций обычно учитывается введением так называемого «фактора выживания» — вероятности того, что нейтрино сохранит свой аромат на пути к Земле. Для нейтрино средних энергий в хлорном эксперименте этот фактор может быть получен из отношения измеренной скорости захвата к предсказываемой ССМ

$$[{}^7\text{Be} + \text{CNO} + \text{pep}|\text{Cl}]_{\text{CCM}} = 1.79 \pm 0.23 \text{ SNU}.$$

Если предположить, что фактор выживания в области средних энергий меняется слабо, можно принять его равным

$$\frac{[{}^7\text{Be} + \text{CNO} + \text{pep}|\text{Cl}]_{\text{exp}}}{[{}^7\text{Be} + \text{CNO} + \text{pep}|\text{Cl}]_{\text{CCM}}} = 0.31 \pm 0.17.$$

Так как нейтрино от ${}^7\text{Be}$ в области средних энергий дают основной вклад в результат хлорного эксперимента и спектр их представляет собой моноэнергетическую линию, то ошибка в определении этого фактора может быть оценена в предположении, что относительный вклад остальных компонент в ошибку такой же, каким предсказывает ССМ их вклад в полный вклад нейтрино средних энергий, т. е. 36%. Таким образом, мы увеличиваем неопределенность фактора выживания: $0.17 + 0.31 \cdot 0.36 = 0.28$.

Относительные вклады в скорость захвата нейтрино средних энергий в Ga приблизительно такие

же, как и в Cl (например, от ${}^7\text{Be}$ -нейтрино — 75 % в Ga и 64 % в Cl). Это дает основания применить фактор выживания, найденный для Cl, к галлиевому эксперименту, т. е.

$$[{}^7\text{Be} + \text{CNO} + \text{pep}|\text{Ga}]_{\text{exp}} = (0.31 \pm 0.28) \times \\ \times [{}^7\text{Be} + \text{CNO} + \text{pep}|\text{Ga}]_{\text{SSM}} = 14.4 \pm 13.0 \text{ SNU}.$$

Вычитая этот вклад нейтрино средних энергий из найденной выше скорости захвата в галлии, получаем измеренную скорость захвата pp -нейтрино в галлиевом эксперименте

$$[pp|\text{Ga}]_{\text{exp}} = [pp + {}^7\text{Be} + \text{CNO} + \text{pep}|\text{Ga}]_{\text{exp}} - \\ - [{}^7\text{Be} + \text{CNO} + \text{pep}|\text{Ga}]_{\text{exp}} = 53.4 \pm 14.0 \text{ SNU}.$$

Так как сечение захвата pp -нейтрино, взаимодействующих с Ga в узком интервале энергии 0.23–0.42 МэВ, заметно не меняется, делим измеренную скорость захвата на вычисленное для ССМ сечение захвата электронных нейтрино $(11.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-46} \text{ см}^2$ и получаем измеренный поток pp -нейтрино на Земле: $(4.6 \pm 1.2) \cdot 10^{10}$ электронных нейтрино/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$).

С другой стороны, зная сечение захвата и фактор выживания, из полученной скорости захвата нейтрино на галлии получаем величину потока pp -нейтрино, излучаемых в термоядерных реакциях в Солнце. Если параметры осцилляций нейтрино заключены в области LMA (область больших углов смешивания), которая сейчас рассматривается как наиболее предпочтительная, фактор выживания равен 60 % и величина потока излучаемых pp -нейтрино составляет $(7.6 \pm 2.0) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}/\text{с}$, что согласуется с величиной, предсказываемой ССМ, $(5.95 \pm 0.06) \cdot 10^{10}$ нейтрино/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$) [37, 38]. Значительная часть ошибки в измерении потока pp -нейтрино связана с неизвестием зависимости фактора выживания от энергии.

При вычислении этих значений потока pp -нейтрино нами было сделано несколько допущений; величина возникающих при этом погрешностей не может быть получена простым путем. В связи с этим приводимые здесь ошибки, возможно, занижены. Как отмечалось во Введении, мы сможем существенно уменьшить эту ошибку, когда будет ограничена область возможных параметров масс и угла смешивания из измерений KamLAND и будет непосредственно измерен поток ${}^7\text{Be}$ -нейтрино, как ожидается в эксперименте BOREXINO. Тогда доминирующей ошибкой станет неопределенность в измерениях самого галлиевого эксперимента. Поэтому наши усилия сейчас направлены на сни-

жение статистической и систематической ошибок в эксперименте SAGE.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе приведено описание основных принципов и методов эксперимента SAGE и представлены результаты анализа 92 извлечений, проведенных в течение 12 лет с января 1990 г. по декабрь 2001 г. Измеренная скорость захвата солнечных нейтрино галлием составляет $70.8_{-5.2}^{+5.3}$ SNU. Здесь указаны только статистические неопределенности. Анализ известных систематических эффектов показал, что полная систематическая неопределенность меньше, чем статистическая ошибка, и составляет $_{-3.2}^{+3.7}$ SNU. Наконец, проведенные нами исследования данных счета показали, что они действительно содержат информацию о распаде ^{71}Ge , что счетные данные согласуются с положениями анализа и являются внутренне самосогласованными.

Результат эксперимента SAGE, равный 70.8 SNU, составляет 54% от величины, предсказанной по ССМ [9, 10]. Проверка систематических эффектов и проведенные дополнительные измерения, особенно эксперимент с нейтринным источником ^{51}Cr [30, 31], дают основания утверждать, что отличие полученной скорости захвата солнечных нейтрино от значения, предсказанного по ССМ, (6.2σ , σ — стандартное отклонение) является сильным свидетельством в пользу того, что интенсивность потока солнечных нейтрино с энергией ниже 2 МэВ значительно меньше ожидаемой. Это же было показано для потока ^8B -нейтрино хлорным нейтринным экспериментом, экспериментами Камиоканде и СНО. Результат эксперимента SAGE меньше даже минимальной астрофизической величины скорости захвата $79.5_{-2.0}^{+2.3}$ SNU [39].

В ряде феноменологических статей [40–42] обсуждается комбинированный результат всех солнечных нейтринных экспериментов. Основное их заключение сводится к тому, что электронные нейтрино, которые рождаются в Солнце, достигают Земли в другом ароматном состоянии, и в качестве механизма изменения аромата солнечных нейтрино больше всего подходят осцилляции Михеева–Смирнова–Вольфенштейна с осцилляционными параметрами в области LMA. Для более точного определения параметров осцилляций требуются дополнительные данные, особенно получаемые в экспериментах, чувствительных к низкоэнергетическим нейтрино. С этой целью коллаборация SAGE

производит солнечные нейтринные извлечения регулярно каждые четыре недели из приблизительно 50 т галлия, уменьшая статистическую ошибку, и исследует дальнейшие возможности уменьшения систематических неопределенностей.

Мы выражаем благодарность Дж. Бакалу, М. Балдо-Сеолин, Дж. Т. Гарви, В. Хакстону, В. А. Кузьмину, В. В. Кузьминову, В. А. Матвееву, Л. Б. Окуню, В. А. Рубакову, Р. Г. Х. Робертсону, А. Ю. Смирнову, А. Н. Тавхелидзе, а также членам коллаборации GALLEX и GNO за их постоянный интерес и за полезные обсуждения. Мы высоко ценим вклад наших коллег, прежде работавших в коллаборации — О. А. Аносова, О. В. Бычука, П. В. Вильденхайна, Р. Дэвиса мл., Ю. И. Захарова, В. Н. Корноухова, И. И. Кнышенко, Р. Т. Кузеса, К. Ланде, А. В. Остринского, Д. Л. Вока, М. Л. Черри.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 96-02-18399, 99-02-161106, 00-15-96632), Отделения ядерной физики департамента энергии США (грант DEFG03-97ER4120), Международного научного фонда (гранты M7F000 и M7F300), Американского фонда гражданских исследований и развития (гранты RP2-159, RP2-2253).

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Fukuda, Y. Fukuda, M. Ishitsuka et al., E-print archives, hep-ex/0103032, Phys. Rev. Lett. **86**, 5651 (2001); E-print archives, hep-ex/0103033, Phys. Rev. Lett. **86**, 5656 (2001).
2. Q. R. Ahmad, R. C. Allen, T. C. Andersen et al., E-print archives, nucl-ex/0106015; Phys. Rev. Lett. **87**, 071301 (2001).
3. B. T. Cleveland, T. J. Daily, R. Davis, Jr. et al., Astrophys. J. **496**, 505 (1998).
4. J. N. Abdurashitov, V. N. Gavrin, S. V. Girin et al., E-print archives, astro-ph/9907113; Phys. Rev. C **60**, 055801 (1999).
5. W. Hampel, J. Handt, G. Heusser et al., Phys. Lett. B **447**, 127 (1999).
6. Y. Fukuda, T. Hayakawa, K. Inoue et al., Phys. Rev. Lett. **77**, 1683 (1996).
7. www.sns.ias.edu/~jnb/Meetings/lownu/index.html; www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/lownu/index.html.
8. В. А. Кузьмин, ЖЭТФ **49**, 1532 (1965).

9. J. N. Bahcall, M. C. Gonzalez-Garcia, and C. Peña-Garay, E-print archives, hep-ph/0111150.
10. A. S. Brun, S. Turck-Chieze, and P. Morel, E-print archives, astro-ph/9806272; *Astroph. J.* **506**, 913 (1998).
11. A. Piepke, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **91**, 99 (2001).
12. G. Alimonti, C. Arpesella, H. Back et al., E-print archives, hep-ex/0012030; submitted to *Astropart. Phys.* (2002).
13. M. Altmann, M. Balata, P. Belli et al., E-print archives, hep-ex/0006034; *Phys. Lett.* **490**, 16 (2000).
14. В. Н. Гаврин, В. Н. Корноухов, Г. Т. Зацепин, Препринт ИЯИ АН СССР П-0690 (1991).
15. В. Н. Гаврин, В. Э. Гуренцов, В. Н. Корноухов и др., Препринт ИЯИ АН СССР П-0698 (1991).
16. J. N. Abdurashitov, V. N. Gavrin, A. V. Kalikhov et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A (Proc. Suppl.)* **476**, 322 (2002).
17. J. N. Abdurashitov, E. L. Faizov, V. N. Gavrin et al., *Phys. Lett. B* **328**, 234 (1994).
18. S. R. Elliott, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **290**, 158 (1990).
19. B. T. Cleveland, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **214**, 451 (1983).
20. B. T. Cleveland, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **416**, 405 (1998).
21. V. N. Gavrin, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **91**, 36 (2001).
22. В. Н. Гаврин, В. Н. Корноухов, В. Э. Янц, Препринт ИЯИ АН СССР П-0703 (1991).
23. В. Н. Гаврин, С. Н. Даньшин, А. В. Копылов и др., Препринт ИЯИ АН СССР П-0494 (1986).
24. Ch. Evans, Associated Report (unpublished).
25. В. Н. Гаврин, В. В. Горбачев, И. Н. Мирмов, *ЯФ* **65**, 1 (2002).
26. Е. П. Веретенкин, В. Н. Гаврин, А. М. Григорьев и др., *Атомная энергия* **72**, 260 (1992).
27. В. Н. Гаврин, Ю. И. Захаров, Препринт ИЯИ АН СССР, П-0560 (1987).
28. M. Cribier, B. Pichard, J. Rich et al., *Astropart. Phys.* **6**, 129 (1997).
29. В. Н. Гаврин, В. В. Горбачев, Т. В. Ибрагимова, Б. Т. Кливленд, *ЯФ* **65**, 1309 (2002).
30. J. N. Abdurashitov, V. N. Gavrin, S. V. Girin et al., *Phys. Rev. Lett.* **77**, 4708 (1996).
31. J. N. Abdurashitov, V. N. Gavrin, S.V.Girin et al., E-print archives, hep-ph/9803418; *Phys. Rev. C* **59**, 2246 (1999).
32. W. Hampel and L. Remsberg, *Phys. Rev. C* **31**, 666 (1985).
33. V. Berezinsky, G. Fiorentini, and M. Lissia, E-print archives, hep-ph/9904225; *Astropart. Phys.* **12**, 299 (2000).
34. G. L. Fogli, E. Lisi, D. Montanino et al., E-print archives, hep-ph/9910387; *Phys. Rev. D* **61**, 073009 (2000).
35. J. Pulido and E. Kh. Akhmedov, E-print archives, hep-ph/9907399; *Astropart. Phys.* **13**, 227 (2000).
36. P. A. Sturrock and J. D. Scargle, E-print archives, astro-ph/0011228; *Astrophys. J.* **550**, L101 (2001).
37. J. N. Bahcall, M. H. Pinsonneault, and S. Basu, E-print archives, astro-ph/0010346; *Astrophys. J.* **555**, 990 (2001).
38. J. N. Bahcall, E-print archives, hep-ph/0108148; *Phys. Rev. C* **65**, 025801 (2002).
39. J. N. Bahcall, E-print archives, hep-ph/9710491; *Phys. Rev. C* **56**, 3391 (1997).
40. J. N. Bahcall, M. C. Gonzalez-Garcia, and C. Peña-Garay, E-print archives, hep-ph/0106258; *JHEP* **0108**, 014 (2001).
41. P. I. Krastev and A. Yu. Smirnov, E-print archives, hep-ph/0108177.
42. M. C. Gonzales-Garcia, M. Maltoni, and C. Peña-Garay, E-print archives, hep-ph/0108073.