

## О ГАЛЛИЕВОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ BEST-2 С ИСТОЧНИКОМ $^{65}\text{Zn}$ ПО ПОИСКУ НЕЙТРИННЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ НА КОРОТКОЙ БАЗЕ

© 2019 г. В. Н. Гаврин<sup>1)</sup>, В. В. Горбачёв<sup>1)\*</sup>, Т. В. Ибрагимова<sup>1)</sup>, В. Н. Корноухов<sup>1)</sup>, А. А. Джанелидзе<sup>2)</sup>, С. Б. Злоказов<sup>2)</sup>, Н. А. Котельников<sup>2)</sup>, А. Л. Ижутов<sup>3)</sup>, С. В. Майнсков<sup>3)</sup>, В. В. Пименов<sup>3)</sup>, В. П. Борисенко<sup>4)</sup>, К. В. Киселев<sup>4)</sup>, М. П. Цевелев<sup>4)</sup>

Поступила в редакцию 13.06.2018 г.; после доработки 13.06.2018 г.; принята к публикации 13.06.2018 г.

Рассматривается использование источника  $^{65}\text{Zn}$  в галлиевом эксперименте BEST-2 для ограничения области определения разрешенных осцилляционных параметров. Рассчитана необходимая активность источника  $^{65}\text{Zn}$  для эксперимента BEST-2, его размеры, влияние на результаты осцилляционных измерений, а также возможности изготовления такого источника. Рассмотрены схемы проведения измерений.

DOI: 10.1134/S0044002719010069

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для проверки гипотезы существования стерильных нейтрино или четвертого собственного массового состояния нейтрино в настоящее время идет подготовка нескольких экспериментов с различными источниками нейтрино [1–4].

В настоящей работе показаны возможности эксперимента BEST-2 с интенсивным искусственным источником нейтрино  $^{65}\text{Zn}$  на двухзонной галлиевой мишени [5, 6]. Эксперимент BEST-2 рассматривается как продолжение и дополнение эксперимента BEST с источником  $^{51}\text{Cr}$  активностью 3 МКи [1, 2].

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТ BEST

Эксперимент BEST готовится на базе галлиевого нейтринного телескопа ГНТ в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, который с 1990 г. используется для солнечных нейтринных измерений в эксперименте SAGE [7].

В ГНТ нейтрино регистрируются по реакции  $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$ , и число взаимодействий определяется по измеряемому количеству рождаемых атомов  ${}^{71}\text{Ge}$ .

В эксперименте BEST поиск осцилляций на короткой базе будет производиться по анализу скоростей захвата электронных нейтрино от интенсивного источника  $^{51}\text{Cr}$  активностью 3 МКи на ядрах галлиевой мишени [1]. Мишень, содержащая 50 т жидкого металлического галлия, разделена по двум зонам — внутренней шаровой и внешней цилиндрической, с общим центром. Источник объемом около 1 л помещается в центр обеих зон мишени по трубе, проходящей сверху вдоль оси цилиндрической зоны мишени. При одинаковой средней длине пробега нейтрино от источника в обеих зонах мишени, т.е. равной толщине галлия в  $4\pi$ -геометрии, скорости захвата нейтрино в обеих зонах при отсутствии осцилляций будут одинаковыми и равны  $65 \text{ сут}^{-1}$  (при этом скорость захвата солнечных нейтрино во всей мишени составляет около  $1 \text{ сут}^{-1}$ ).

Осцилляции изменяют аромат нейтрино и уменьшают скорость захвата электронных нейтрино. Для осцилляций на короткой базе вероятность сохранения аромата электронных нейтрино равна:

$$P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m^2 L}{E} \right), \quad (1)$$

где энергия нейтрино  $E$  измеряется в единицах МэВ, а длина пробега  $L$  — в метрах. Параметры — амплитуда осцилляций  $\sin^2 2\theta$  и разность квадратов масс собственных массовых состояний  $\Delta m^2$  (эВ<sup>2</sup>) — являются характеристиками осцилляций, которые необходимо найти в эксперименте.

Результаты предыдущих экспериментов с малыми длинами пролета нейтрино (ускорительных,

<sup>1)</sup>Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия.

<sup>2)</sup>АО “Институт реакторных материалов”, г. Заречный, Свердловская обл., Россия.

<sup>3)</sup>АО “ГНЦ НИИАР”, г. Димитровград, Ульяновская обл., Россия.

<sup>4)</sup>ФГУП “ПО “Маяк”, г. Озерск, Челябинская обл., Россия.

\*E-mail: vvgor\_gfb1@mail.ru

галлиевых с интенсивными искусственными источниками, реакторных с расстояниями до 100 м) [8–13] указывают, что параметр  $\Delta m^2$  имеет значение порядка 1 эВ<sup>2</sup>. Для нейтрино с энергией 1 МэВ длина осцилляций при  $\Delta m^2 = 1$  эВ<sup>2</sup> составляет 2.5 м, поэтому при толщине каждой зоны мишени в эксперименте BEST порядка 60 см можно ожидать, что скорости захвата нейтрино в двух зонах будут заметно различаться из-за осцилляций. В измерениях скорости захвата суммируются по всем расстояниям внутри одной зоны:

$$R = \frac{\int P_{ee}(L)s(L)dL}{\int s(L)dL}. \quad (2)$$

Величина  $R$  здесь определяется как отношение измеряемой скорости захвата к ожидаемой для данной зоны мишени. Функция  $s(L)$  определяет относительное количество нейтринных взаимодействий на расстоянии  $L$  между точками излучения и захвата нейтрино. При этом влияние осцилляций на скорости захвата усредняется по расстояниям в пределах каждой зоны мишени.

Чувствительность эксперимента BEST к осцилляциям определяется ошибками эксперимента. При отсутствии осцилляций ожидаемая статистическая ошибка измерений по каждой зоне мишени равна 3.7% или 2.6% для измерений по всей мишени целиком. Предполагается, что систематическая ошибка составит также 2.6% для каждой зоны и суммарно по всей мишени. Тогда полная ошибка измерений — статистическая плюс систематическая — составит 4.5% для каждой зоны и 3.7% для всей мишени. Дополнительно в ошибку необходимо включить неопределенности сечения захвата нейтрино ядрами <sup>71</sup>Ga, составляющие +3.6/–3.0% [14].

При этом возможность определения значений параметра  $\Delta m^2$  в эксперименте BEST ограничена интервалами значений  $\Delta m^2$ , при которых скорости захвата во внешней и внутренней зонах мишени значительно различаются (см. рис. 7) [15]. Для того чтобы расширить диапазон определяемых значений  $\Delta m^2$ , которые могут быть определены в измерениях, предложен эксперимент BEST-2 по схеме и на базе эксперимента BEST с другим нейтринным источником. Вместо источника <sup>51</sup>Cr будет использоваться источник <sup>65</sup>Zn [5, 6]. Энергия нейтрино, образующихся при распаде изотопа <sup>65</sup>Zn, равна 1.35 МэВ, в 1.8 раза больше энергии нейтрино от <sup>51</sup>Cr (0.75 МэВ). Ниже мы рассмотрим возможности проведения эксперимента BEST-2, его ожидаемые результаты и сравним их с результатами эксперимента с источником <sup>51</sup>Cr.

### 3. ИСТОЧНИК <sup>65</sup>Zn

Распад изотопа <sup>65</sup>Zn показан на рис. 1.

Нейтрино с энергией 1.35 МэВ излучается почти в половине распадов. Остальные распады приводят к излучению нейтрино с энергией 235 кэВ, т.е. вблизи порога захвата на галлии (233 кэВ), и сечение таких захватов мало.

Сечение захвата на ядрах <sup>71</sup>Ga нейтрино с энергией 1.35 МэВ примерно в 3 раза больше, чем у нейтрино с энергией 0.75 МэВ от <sup>51</sup>Cr [14]. Поэтому ожидаемая скорость захвата нейтрино от источника <sup>65</sup>Zn активностью 3 МКи в одной зоне при одинаковых размерах источников и зон мишеней будет равна  $n_0 = 108$  сут<sup>–1</sup>. Учитывая, что время жизни <sup>65</sup>Zn больше времени жизни <sup>51</sup>Cr ( $T_{1/2} = 244.1$  и 27.7 сут соответственно), измерения с <sup>65</sup>Zn могут проводиться в течение большего времени, и для набора сравнимой статистики активность источника может быть заметно меньше. Оценим, какую активность может иметь источник <sup>65</sup>Zn.

### 4. АКТИВНОСТЬ ИСТОЧНИКА <sup>65</sup>Zn

Процедуры облучения и извлечения из ГГНТ хорошо изучены и отлажены на протяжении длительного времени в эксперименте SAGE [7]. В течение времени  $t_1$  производится облучение (экспозиция) мишени потоком нейтрино с образованием атомов <sup>71</sup>Ge, после чего в течение времени  $t_2$  образовавшиеся атомы извлекаются из мишени для последующего проведения процедур счета их количества. Время облучения  $t_1$  зависит от времени жизни образуемого в мишени изотопа <sup>71</sup>Ge ( $T_{1/2} = 11.43$  сут). Например, для солнечных извлечений

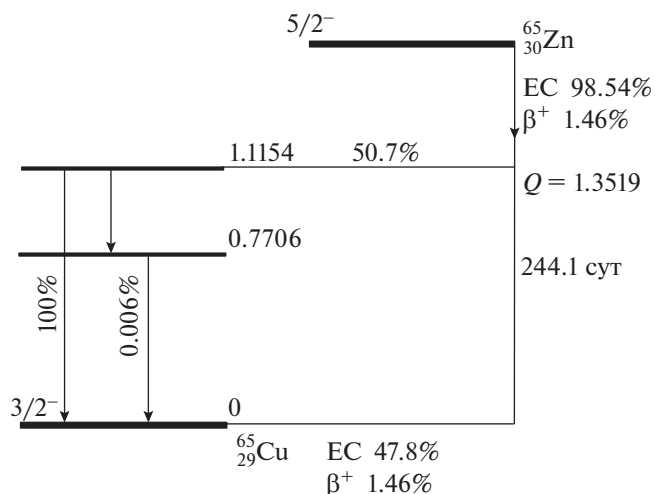
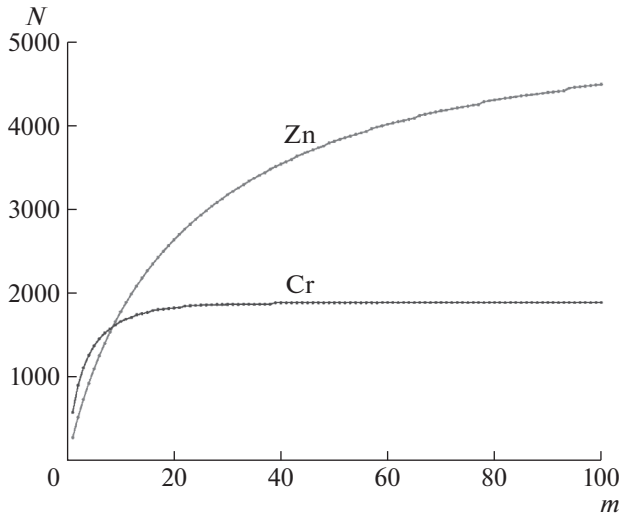
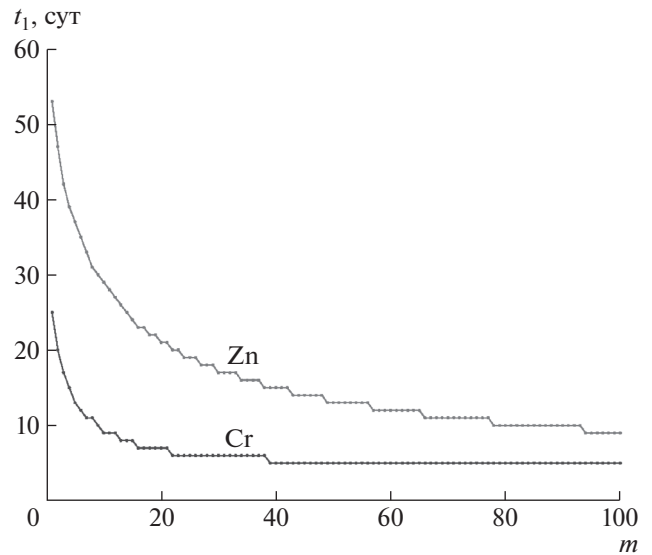


Рис. 1. Схема распада <sup>65</sup>Zn.



**Рис. 2.** Зависимость числа событий  $N$  от количества экспозиций  $m$  для экспериментов с источниками  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{65}\text{Zn}$ . Длительность экспозиции  $t_1$  различна для разных  $m$ , для получения максимального числа событий  $N$ .



**Рис. 3.** Зависимость длительности экспозиции  $t_1$  от количества экспозиций  $m$  для экспериментов с источниками  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{65}\text{Zn}$ . Длительности  $t_1$  принимают только целые значения и меняются в зависимости от  $m$  для получения максимального числа событий  $N$ .

было принято расписание экспозиций (облучений солнечными нейтрино) с  $t_1 = 30$  сут. Время  $t_2$  составляло порядка 1 сут.

Если проводить все облучения в эксперименте в течение одинакового времени  $t_1$  и делать одинаковые перерывы между облучениями  $t_2$ , то накопление статистики в эксперименте описывается выражением

$$N(m) = \frac{n_0}{\lambda_1 - \lambda_0} (e^{-\lambda_0 t_1} - e^{-\lambda_1 t_1}) \frac{1 - e^{-mB}}{1 - e^{-B}}, \quad (3)$$

где  $m$  — количество экспозиций;  $\lambda_1$  и  $\lambda_0$  — постоянные распада источника и  $^{71}\text{Ge}$  соответственно;  $B = \lambda_1(t_1 + t_2)$ .

На рис. 2 приведены зависимости суммарного количества накопленных атомов  $^{71}\text{Ge}$   $N(m)$  для источников  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{65}\text{Zn}$  от количества экспозиций для целых значений  $t_1$ , при которых значение  $N$  максимально для данного  $m$ . На рис. 3 показаны значения  $t_1$ , обеспечивающие достижение максимального  $N$  для заданных значений  $m$ .

Процедуры эксперимента BEST-2 с источником  $^{65}\text{Zn}$  аналогичны BEST с источником  $^{51}\text{Cr}$ , и ошибки в них будут сравнимы. Систематика экспериментов будет почти одинаковой, разница только в ошибке, связанной с фоном солнечных нейтрино из-за различных времен одной экспозиции  $t_1$ , количества экспозиций  $m$  и из-за разных способов измерения активности источников. Фон солнечных нейтрино в BEST приводит к ошибке, которая при  $t_1 = 9$  сут равна примерно 0.18%, и для увеличенного примерно в 3 раза времени облучения  $t_1 \approx 30$  сут при одинаковом числе облучений  $m = 10$

ошибка увеличится в  $\sim 1.8$  раза (накопление атомов  $^{71}\text{Ge}$  в мишени пропорционально  $(1 - e^{-\lambda t_1})$ ), т.е. до 0.3%.

Статистика в эксперименте BEST определяется количеством суммарно извлекаемого  $^{71}\text{Ge}$ . При схеме облучения с  $m = 10$  и  $t_1 = 9$  сут ожидаемое при отсутствии осцилляций количество извлеченных атомов  $^{71}\text{Ge}$  составит 1657. Для получения такого же числа событий и в BEST-2 определим далее необходимую активность источника  $^{65}\text{Zn}$ .

Для источника  $^{65}\text{Zn}$ , имеющего большее время жизни, удобно использовать схему измерений с  $t_1 \approx 30$  сут, что соответствует схеме солнечных нейтринных измерений SAGE. На рис. 4 приведены зависимости суммарного числа извлекаемых атомов  $^{71}\text{Ge}$  от количества экспозиций мишени  $N(m)$  с фиксированным временем одной экспозиции  $t_1 = 30$  сут для различных активностей источника.

Суммарного количества событий  $N = 1657$  можно достичь уже с источником  $^{65}\text{Zn}$  активностью 0.33 МКи, т.е. почти в 10 раз меньше, чем активность источника  $^{51}\text{Cr}$  в эксперименте BEST. Число экспозиций при этом будет  $m \sim 28$ , и эксперимент продлится  $t \approx (t_1 + t_2)m \approx 868$  сут = 2.38 г.

## 5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИСТОЧНИКА

Источник  $^{65}\text{Zn}$  может быть изготовлен облучением цинка, обогащенного до  $\sim 94\%$  по изотопу  $^{64}\text{Zn}$ , в потоке тепловых нейтронов ядерного

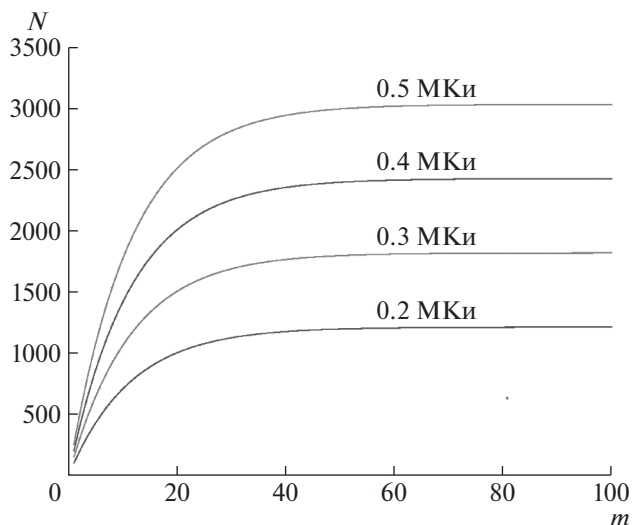


Рис. 4. Накопление статистики  $N(m)$  в экспериментах с источником  $^{65}\text{Zn}$  с активностями от 0.2 до 0.5 МКи. Ось абсцисс — количество экспозиций  $m$  с  $t_1 = 30$  сут.

реактора. В табл. 1 приведены сечения захвата тепловых нейтронов для разных изотопов цинка.

Изотоп  $^{64}\text{Zn}$  имеет малое сечение захвата нейтрона, поэтому для наработки значительного количества  $^{65}\text{Zn}$  необходимо облучить большую массу  $^{64}\text{Zn}$ . В свою очередь, образующийся  $^{65}\text{Zn}$  имеет большое сечение захвата нейтронов и будет заметно “выгорать” в реакторе. Накопление  $^{65}\text{Zn}$  в

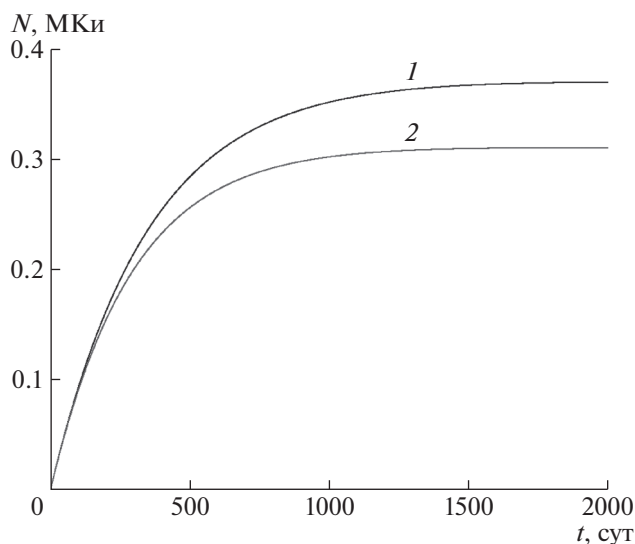


Рис. 5. Кривые накопления количества  $N_{65}$  активности  $^{65}\text{Zn}$  в потоке тепловых нейтронов  $\Phi = 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  для цинковой мишени массой 20 кг с 94%-ным обогащением по изотопу  $^{64}\text{Zn}$ ; 1 — без учета “выгорания”  $^{65}\text{Zn}$ ; 2 — с учетом “выгорания”  $^{65}\text{Zn}$ .

реакторе описывается выражением

$$N_{65}(t) = \frac{N_{64}(0)\Phi\sigma_{64}}{\Phi(\sigma_{64} - \sigma_{65}) - \lambda} \times (e^{-(\lambda + \Phi\sigma_{65})t} - e^{-\Phi\sigma_{64}t}). \quad (4)$$

Здесь  $N_{64}(0)$  — начальное количество атомов  $^{64}\text{Zn}$  в потоке нейтронов  $\Phi$ ;  $\sigma_{64}$  и  $\sigma_{65}$  — сечения захвата нейтронов изотопами  $^{64}\text{Zn}$  и  $^{65}\text{Zn}$ ;  $\lambda$  — постоянная распада  $^{65}\text{Zn}$ .

На рис. 5 приведена кривая накопления  $N_{65}(t)$ .

В реакторе с потоком тепловых нейтронов  $\Phi = 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  на мишени массой 20 кг с 94%-ным обогащением по изотопу  $^{64}\text{Zn}$  можно достичь максимальной активности около 0.3 МКи.

В справочнике [16] сечение выгорания  $^{65}\text{Zn}$  (в  $(n, \alpha)$ -реакции) в потоке тепловых нейтронов равно 250 бн; в этом случае для накопления активности необходимо использовать массу облучаемого цинка примерно на 20% больше. Все оценки, приведенные ниже, сделаны для  $\sigma_{65} = 64$  бн.

Расчеты наработки  $^{65}\text{Zn}$  были сделаны для трех реакторов: МИР (АО “ГНЦ НИИАР”, Дмитровград, Ульяновская обл.), ИВВ-2М (АО “ИРМ”, Заречный, Свердловская обл.) и Л-2 (ФГУП “ПО “Маяк”, Озерск, Челябинская обл.).

Для исследовательского реактора МИР изучались возможности накопления  $^{65}\text{Zn}$  при облучении двух типов материала мишени — оксида цинка

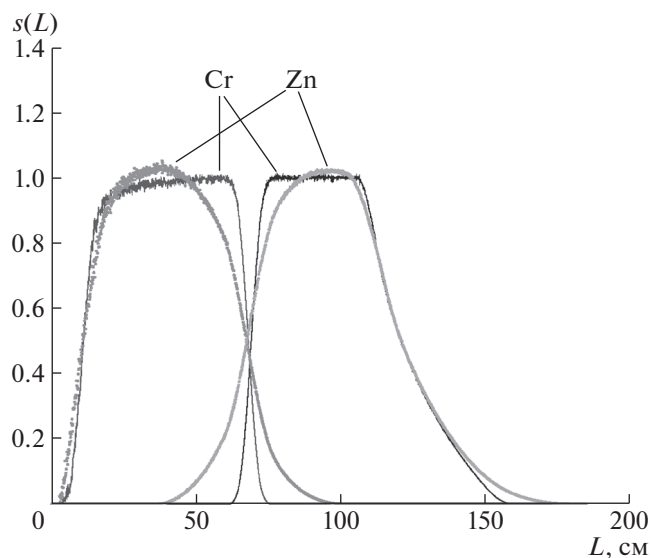


Рис. 6. Зависимости относительных вероятностей регистрации нейтрино  $s(L)$  во внутренней (сферической) и внешней (цилиндрической) зонах галлиевой мишени от длины пробега  $L$  от точки рождения для цилиндрических источников  $^{51}\text{Cr}$  ( $\varnothing 8.6 \times 9.5$  см) и  $^{65}\text{Zn}$  ( $\varnothing 16 \times 40$  см).

**Таблица 1.** Изотопный состав и сечения захвата тепловых нейтронов

Изотоп цинка	64	65	66	67	68	70
Содержание в природном Zn [%]	48.6	0	27.9	4.1	18.8	0.62
Содержание в обогащенном Zn [%]	94	0	6	0	0	0
Сечение захвата теплового нейтрона [бн]	0.787	64.03	0.618	7.47	1.065	0.0917

ZnO и металлического цинка Zn, обогащенных по изотопу  $^{64}\text{Zn}$ , — при различных вариантах размещения мишеней в облучательном устройстве.

Активности 0.33 МКи  $^{65}\text{Zn}$  можно достичь облучением оксида ZnO массой 32 кг (объемом 6.4 л) в течение 295 сут; при увеличении массы оксида до 42 кг (8.4 л) длительность облучения снижается вдвое, до 150 сут. Такую же активность (0.33 МКи) на металлическом цинке можно получить при массе цинка 33 кг (4.7 л) облучением в течение 230 сут или 40 кг (5.7 л) в течение 170 сут.

С теми же массами облучаемого материала можно достичь активности 0.5 МКи. Для этого необходимо увеличить длительность облучения до 2 лет для массы 32 кг ZnO и 33 кг металлического цинка и до 480 сут для 42 кг ZnO или 40 кг металлического цинка.

Расчеты наработки  $^{65}\text{Zn}$  в реакторе ИВВ-2М показали возможность получения активности 0.5 МКи при облучении в течение 460 сут 30 кг металлического цинка или в течение 490 сут 40 кг оксида цинка, обогащенных до 94% по  $^{64}\text{Zn}$ .

Для получения активности 0.33 МКи понадобится приблизительно в 1.5 раза меньшее количество материалов.

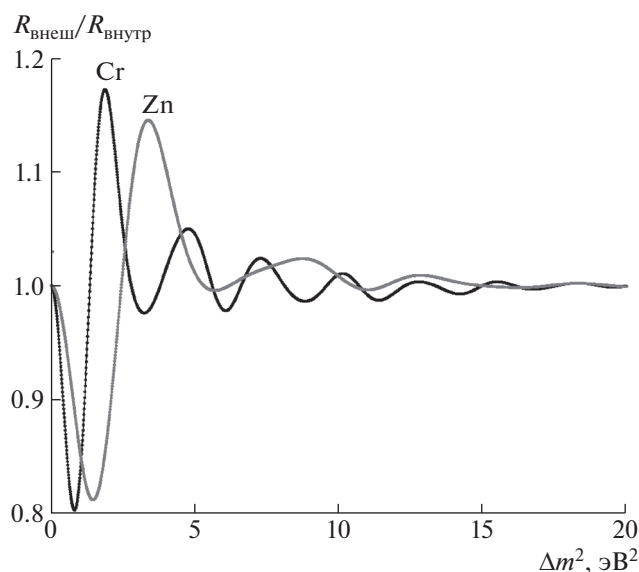
По расчетам наработки  $^{65}\text{Zn}$  в реакторе Л-2 в ФГУП “ПО “Маяк” за 200 сут облучения цинка с 94%-ным обогащением по изотопу  $^{64}\text{Zn}$  можно достичь удельной активности 9.5 Ки/г Zn. В расчетах предполагается использование цинка в форме таблеток оксида цинка плотностью около 5 г/см<sup>3</sup> (плотность цинка в оксиде 4 г/см<sup>3</sup>). В этом случае для получения активности 0.33 МКи необходимо облучить в реакторе порядка 34.7 кг Zn или 43 кг ZnO. Объем активной части источника в этом случае составит 8.7 л, т.е. в ~15 раз больше, чем объем источника  $^{51}\text{Cr}$  в эксперименте BEST.

Таким образом, активная часть источника  $^{65}\text{Zn}$  0.33 МКи будет иметь размеры от 3.0 до 8.7 л, в зависимости от того, в каком реакторе источник будет изготавливаться. Рассмотрим, как влияют размеры источника на качество измерений BEST-2, сравнивая измерения источника  $^{65}\text{Zn}$  с размерами, близкими к максимальным (8 л), с измерениями источника  $^{51}\text{Cr}$  объемом ~0.6 л.

## 6. РАЗМЕР ИСТОЧНИКА

Источник в эксперименте BEST-2 будет помещаться в центр обеих зон мишени по трубе с внутренним диаметром 21 см. Поэтому для цилиндрического источника диаметр его не должен превышать 19 см. Для обеспечения безопасности персонала источник будет закрыт вольфрамовой защитой толщиной 1.5 см. Тогда диаметр активной части источника составит около 16 см, а высота ее для активности 0.3 МКи и объема 8 л — около 40 см. На рис. 6 приведены функции  $s(L)$  — относительные вероятности регистрации нейтрино в зонах мишени на расстоянии  $L$  от точки рождения в источнике, низ которого смещен на 10 см ниже центра мишеней. По сравнению с функциями  $s(L)$ , полученными для размеров хромового источника, для цинкового источника, имеющего большие размеры, характерна большая область пересечения длин  $L$ , одинаковых для обеих зон мишени.

На рис. 7 приведены отношения ожидаемых скоростей захвата в двух зонах мишени



**Рис. 7.** Зависимости отношений ожидаемых скоростей захвата нейтрино в двух зонах мишени ( $R_{\text{внеш}}/R_{\text{внутр}}$ ) от параметра осцилляций  $\Delta m^2$  для амплитуды осцилляций  $\sin^2 2\theta = 0.30$  для источников  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{65}\text{Zn}$ .

$(R_{\text{внеш}}/R_{\text{внутр}})$  для источников  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{65}\text{Zn}$  в зависимости от величины параметра осцилляций  $\Delta m^2$  для амплитуды осцилляций  $\sin^2 2\theta = 0.30$ . Области чувствительности определения  $\Delta m^2$  для двух источников сдвинуты относительно друг друга таким образом, что максимумы и минимумы одной кривой приходятся на значения, равные единице, другой, что означает разную чувствительность экспериментов с этими источниками к возможности определения параметра  $\Delta m^2$ . Амплитуда первых минимумов и максимумов кривой  $^{65}\text{Zn}$  меньше, чем для  $^{51}\text{Cr}$  на примерно 15%, и эту разницу в чувствительности можно уменьшить за счет уменьшения размеров источника.

При проведении одного эксперимента — BEST или BEST-2 — наиболее вероятные значения  $\Delta m^2$ , определяемые из экспериментов, соответствуют экстремумам кривых, показанных на рис. 7. В случае выполнения двух экспериментов наиболее вероятное значение  $\Delta m^2$  будет определяться согласно весу в каждом и может принимать любое значение в соответствующем интервале величин.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены вопросы проведения эксперимента BEST-2 по поиску осцилляций электронных нейтрино от источника  $^{65}\text{Zn}$  в стерильные состояния на двухзонной галлиевой мишени. Эксперимент BEST-2 является естественным продолжением эксперимента BEST с источником  $^{51}\text{Cr}$  активностью 3 МКи. Эксперименты будут проводиться на одном оборудовании по одинаковой схеме. Для сравнимой чувствительности к осцилляциям источник  $^{65}\text{Zn}$  может иметь активность порядка 0.33 МКи. Источник  $^{65}\text{Zn}$  может быть изготовлен облучением тепловыми нейтронами в реакторах типа МИР (АО “ГНЦ НИИЯР”, Димитровград, Ульяновская обл.), ИВВ-2М (АО “ИРМ”, Заречный, Свердловская обл.) или Л-2 (ФГУП “ПО “Маяк”, Озерск, Челябинская обл.) в течение от 200 до 490 сут. Размеры источника (от 3.0 до 8.7 л) позволяют провести качественные измерения по поиску осцилляций на короткой базе на двухзонной мишени эксперимента BEST.

Эксперименты BEST и BEST-2, обладая сравнимой чувствительностью к осцилляциям, дополняют друг друга при определении параметра  $\Delta m^2$  осцилляций: из-за разницы энергий нейтрино от двух источников  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{65}\text{Zn}$  зоны чувствительности к определению параметра  $\Delta m^2$  в двух экспериментах оказываются сдвинуты так, что максимальная чувствительность одного эксперимента примерно попадает на минимальную чувствительность второго и наоборот. Суммарный результат обоих

экспериментов даст не только лучшую экспериментальную обеспеченность измеренных осцилляций (если они есть в области поиска), но и возможность точно измерить параметры этих осцилляций.

Работа выполнена с использованием научного оборудования УНУ ГГНТ БНО ИЯИ РАН при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ: соглашение № 14.619.21.0009, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61917X0009.

Работа сотрудников Института ядерных исследований РАН по оценке необходимой активности источника  $^{65}\text{Zn}$ , его размеров и возможностей изготовления выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-02-00690.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. N. Gavrin, V. V. Gorbachev, E. P. Veretenkin, and B. T. Cleveland, arXiv:1006.2103 (2010).
2. K. N. Abazajian, M. A. Acero, S. K. Agarwalla, A. A. Aguilar-Arevalo, C. H. Albright, S. Antusch, C. A. Argüelles, A. B. Balantekin, G. Barenboim, V. Barger, P. Bernardini, F. Bezrukov, O. E. Bjaelde, S. A. Bogacz, N. S. Bowden, A. Boyarsky, *et al.*, arXiv:1204.5379.
3. O. Smirnov *et al.* (BOREXINO Collab.), ЭЧАЯ **46**, 166 (2015) [Phys. Part. Nucl. **46**, 305 (2015)].
4. I. Alekseev, V. Belov, V. Brudanin, M. Danilov, V. Egorov, D. Filosofov, M. Fomina, Z. Hons, S. Kazartsev, A. Kobayakin, A. Kuznetsov, I. Machikhiliyan, D. Medvedev, V. Nesterov, A. Olshevsky, D. Ponomarev, *et al.*, arXiv:1606.02896v1 [physics.ins-det].
5. В. Н. Гаврин, Б. Т. Кливланд, В. В. Горбачев, Т. В. Ибрагимова, А. В. Калихов, Ю. П. Козлова, И. Н. Мирмов, А. А. Шихин, Е. П. Веретенкин, ЭЧАЯ **48**, 933 (2017) [Phys. Part. Nucl. **48**, 967 (2017)].
6. V. Barinov, B. Cleveland, V. Gavrin, D. Gorbunov, and T. Ibragimova, arXiv:1710.06326 [hep-ph].
7. J. N. Abdurashitov *et al.* (SAGE Collab.), Phys. Rev. C **80**, 015807 (2009).
8. A. Aguilar *et al.* (LSND Collab.), Phys. Rev. D **64**, 112007 (2001).
9. A. A. Aguilar-Arevalo *et al.* (MiniBooNE Collab.), Phys. Rev. Lett. **105**, 181801 (2010).
10. J. N. Abdurashitov *et al.* (SAGE Collab.), Phys. Rev. C **59**, 2246 (1999).
11. J. N. Abdurashitov *et al.* (SAGE Collab.), Phys. Rev. C **73**, 045805 (2006).
12. P. Anselmann *et al.* (Gallex Collab.), Phys. Lett. B **342**, 440 (1995).
13. W. Hampel *et al.* (Gallex Collab.), Phys. Lett. B **420**, 114 (1998).

14. J. N. Bahcall, Phys. Rev. C **56**, 3391 (1997); arXiv:hep-ph/9710491.
15. V. V. Gorbachev, V. N. Gavrin, and T. V. Ibragimova, Phys. Part. Nucl. **49**, 685 (2018).
16. *Table of Isotopes*, Ed. by R. B. Firestone and V. S. Shirley, CD ROM, Ed. by S. Y. Frank Chu (Wiley-Interscience, 1996).

## ON THE GALLIUM EXPERIMENT BEST-2 WITH A $^{65}\text{Zn}$ SOURCE TO SEARCH FOR NEUTRINO OSCILLATIONS ON A SHORT BASELINE

**V. N. Gavrin<sup>1)</sup>, V. V. Gorbachev<sup>1)</sup>, T. V. Ibragimova<sup>1)</sup>, V. N. Kornoukhov<sup>1)</sup>,  
A. A. Dzhanelidze<sup>2)</sup>, S. B. Zlokazov<sup>2)</sup>, N. A. Kotelnikov<sup>2)</sup>, A. L. Izhutov<sup>3)</sup>, S. V. Mainskov<sup>3)</sup>,  
V. V. Pimenov<sup>3)</sup>, V. P. Borisenko<sup>4)</sup>, K. B. Kiselev<sup>4)</sup>, M. P. Tsevelev<sup>4)</sup>**

<sup>1)</sup>*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

<sup>2)</sup>*Joint Stock Company Institute of Nuclear Materials (JSC IRM),  
Zarechny, Sverdlovsk oblast, 624051, Russia*

<sup>3)</sup>*ISC "SSC RIAR", Dimitrovgrad, Ulyanovsk oblast, 433510 Russia*

<sup>4)</sup>*Federal State Unitary Enterprise "Mayak Production Association",  
Ozersk, Chelyabinsk oblast, Russia*

In the paper is considered the use of a  $^{65}\text{Zn}$  source in the BEST-2 gallium experiment to constrain the regions of the allowed oscillation parameters. The required activity of the  $^{65}\text{Zn}$  source for the BEST-2 experiment, its size, the effect on the results of oscillatory measurements, as well as the possibility of production of such a source are calculated. Schemes of measurements execution are considered.