

УДК 533.15+539.219.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОЙ СМЕСИ  
ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ СЧЕТЧИКОВ В ГАЛЛИЙ-ГЕРМАНИЕВОМ  
НЕЙТРИННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ SAGE© 2011 г. Д. Н. Абдурашитов, В. Н. Гаврин, В. В. Горбачев, Т. В. Ибрагимова,  
И. Н. Мирмов, А. А. Шихин, В. Э. Янц, В. Т. Cleveland\*

Институт ядерных исследований РАН

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

\*Department of Physics, University of Washington, Seattle, 98195-1560, USA

Поступила в редакцию 06.10.2010 г.

Определены оптимальные параметры газовой смеси пропорциональных счетчиков при помощи калибровок источников  $^{55}\text{Fe}$  и  $\text{Cd-Se}$ , в результате чего повышена точность определения энергетической области распадов атомов  $^{71}\text{Ge}$ , детектируемых в эксперименте SAGE по измерению потока солнечных нейтрино.

Определение величины солнечного нейтринного потока в эксперименте SAGE [1] основано на измерении скорости реакции  $^{71}\text{Ga}(\nu, e^-)^{71}\text{Ge}$  в  $\sim 50$  т жидкого металлического галлия. Способом измерения скорости этой реакции является подсчет распадов  $^{71}\text{Ge}$ , выделенного из галлиевой мишени и помещенного в составе рабочего газа в низкофоновый пропорциональный счетчик малого объема. Распады  $^{71}\text{Ge}$  регистрируются в двух энергетических диапазонах в области энергий 10.4 и 1.2 кэВ ( $K$ - и  $L$ -линии).

В качестве рабочего газа счетчика используется смесь получаемого в эксперименте моногермана (не более 25%) и ксенона. Характеристики смеси (чистота, соотношение компонентов, давление) влияют на эффективность счета. Соотношение компонентов и суммарное давление смеси определяются количеством германиевого носителя, внесенного в мишень, и объемом ксенона, добавляемого в моногерман ( $\text{GeH}_4$ ) при заполнении счетчика [2].

Стандартный анализ, принятый в SAGE [3], предполагает пропорциональность работы счетчиков в используемых режимах измерений. Положение и ширина окон  $K$ - и  $L$ -пиков  $^{71}\text{Ge}$  определяются на основании калибровки счетчика источником  $^{55}\text{Fe}$  (5.9 кэВ) с последующим пересчетом:

$$P_i = P(^{55}\text{Fe}) (E_i/5.9 \text{ кэВ}) \text{ и } \text{res}_i = \text{res}(^{55}\text{Fe}) \sqrt{5.9/E_i},$$

где  $P_i$  и  $\text{res}_i$  – положение и разрешение  $K$ - или  $L$ -пика германия,  $E_i$  – энергия  $K(L)$ -пика германия.

Однако при обработке данных, полученных в результате калибровок селеновым источником (11.2 кэВ, характеристическое излучение селена при облучении источником  $^{109}\text{Cd}$ ) часто обнару-

живалось нарушение линейности энергетической шкалы, что приводило к ошибкам в определении эффективности отбора событий – кандидатов на распад  $^{71}\text{Ge}$ . При малых отклонениях от линейности подобные нарушения можно устранить введением коэффициента коррекции положения и разрешения  $K$ - и  $L$ -пиков  $^{71}\text{Ge}$ .

Для определения коэффициентов коррекции были проведены измерения положения пиков и разрешений при калибровках  $^{55}\text{Fe}$  и  $\text{Se}$  при заполнении счетчиков газовыми смесями с различными параметрами в зависимости от приложенного высоковольтного напряжения  $HV$ . Коэффициенты были определены аппроксимацией отношений  $\text{res}(^{55}\text{Fe})/\text{res}(\text{Se})$ .

В данной работе применялась счетная система [4], на которой проводился ряд реальных измерений солнечного нейтринного потока. Для каждого заполнения счетчика измерялись параметры калибровок  $^{55}\text{Fe}$  и  $\text{Se}$  при разных значениях  $HV$ ; усиление выбиралось таким, чтобы пик  $^{55}\text{Fe}$  всегда попадал в район 700-го канала аналого-цифрового преобразователя, полная шкала которого равна 2048.

Счетчик LY 39, аналогичный применяемым в реальных измерениях, заполняли на установке синтеза моногермана при давлении  $700 \pm 5$  Торр смесями ксенона и моногермана с концентрацией  $C$  последнего, равной 5, 10, 20 и 40% (точность  $\pm 0.4\%$ ). Кроме того, были приготовлены смеси, имеющие разное давление (610 и 810 Торр), но одинаковое количество моногермана (20%). Для контрольного измерения с целью проверки отсутствия систематических ошибок, связанных с конкретным счетчиком, был использован счетчик LY 36, заполненный при давлении 700 Торр смесью с концентрацией 40%  $\text{GeH}_4$ .

Далее определяется положение пика Se по пику  $^{55}\text{Fe}$ . Зависимость отношения  $A_{\text{Se}} = P_{\text{Fe}}/P_{\text{Se}}$  от  $HV$  имеет довольно сложный характер и определяется со значительными погрешностями. Однако в рабочем диапазоне  $HV$  (на начальном участке нелинейности) эту зависимость можно аппроксимировать прямой.

В табл. 1 приведены коэффициенты наклона ( $b_1$ ) и смещение ( $HV_0$ ) аппроксимирующих прямых для разных заполнений (варьировались полное давление смеси и содержание моногермана в ней).

Фитирование прямой  $HV_0(C) = b_0C + a$  определяет зависимость граничного напряжения от концентрации  $\text{GeH}_4$  (табл. 2);  $b_0 = 10.5$ ,  $a = 1008$  (фитирование здесь проводилось по четырем первым точкам, для которых давление в счетчике одинаково).

На основании данных табл. 1 определяется зависимость  $b_1$  от концентрации моногермана:

$$b_1 = (2.56C + 158) \cdot 10^{-6}.$$

Таким образом, положение пика Se связано с положением пика  $^{55}\text{Fe}$  соотношением

$$P_{\text{Se}} = P_{\text{Fe}} / [b_1(HV - HV_0) + 0.526].$$

Считая, что изменение давления в счетчике меняет только величину  $HV_0$ , оставляя неизменной наклон характеристики, определим зависимость  $HV_0$  от давления газа  $p$  [Торр]:

$$HV_0, \text{ В} = 0.6p + 831,$$

а полная зависимость  $HV_0$  от газового наполнения имеет вид:

$$HV_0, \text{ В} = 10.5C + 0.6p + 588.$$

В табл. 2 приведены коэффициенты  $b_2$  наклона прямых, фитирующих отношения  $R_{\text{Se}} = \text{res}(^{55}\text{Fe})/\text{res}(\text{Se})$  как функцию от  $HV$ . Граничное значение  $HV_0$  меняется с изменением концентрации  $\text{GeH}_4$  по закону:

$$HV_0(C), \text{ В} = 5.96C + 0.33p + 824,$$

где  $HV_0$  находится как точка "выхода" прямой  $R_{\text{Se}}(HV)$  на пропорциональный участок, т.е. на значение  $\sqrt{11.2/5.9} = 1.378$ .

Зависимость наклона характеристики  $b_2$  от концентрации  $\text{GeH}_4$  не обнаруживается, поэтому будем считать параметр  $b_2$  постоянным для всех заполнений и равным  $-(2.0 \pm 0.6) \cdot 10^{-3}$ .

Разрешение пика Se связано с разрешением  $^{55}\text{Fe}$  соотношением

$$\text{res}(\text{Se}) = \text{res}(^{55}\text{Fe}) / [-2.0 \cdot 10^{-3}(HV - HV_0) + 1.378].$$

Имея в виду небольшую величину энергетического интервала между пиком Se и  $K$ -пиком  $^{71}\text{Ge}$ , будем считать поведение соответствующих характеристик для  $K$ -пика  $^{71}\text{Ge}$  схожим с рассмотренными выше. Тогда положение  $K$ -пика  $^{71}\text{Ge}$  и его разрешение можно определить по формулам:

**Таблица 1.** Параметры прямых, аппроксимирующих начальные участки зависимости отношений  $A_{\text{Se}}(HV) = b_1(HV - HV_0) + 0.526$ , где  $HV_0$  – рабочее напряжение, с которого начинается нелинейность

C, %; p, Торр	Параметры	
	$b_1, 10^{-6}$	$HV_0, \text{ В}$
5; -700	172	1050
10.5; -700	169	1100
20; -700	488	1257
40; -705	260	1414
20; -610	299	1190
20; -810	410	1310

**Таблица 2.** Параметры прямых, аппроксимирующих начальные участки зависимости отношений разрешений  $R_{\text{Se}}(HV) = b_2(HV - HV_0) + 1.378$

C, %; p, Торр	Параметры	
	$b_2, 10^{-3}$	$HV_0, \text{ В}$
5; -700	-1.08	1062
10.5; -700	-2.78	1126
20; -700	-2.62	1195
40; -705	-1.51	1282
20; -610	-2.18	1142
20; -810	-1.95	1210

$$P_K = P_{\text{Fe}} / [b_1(HV - HV_0) + (5.9/10.4)],$$

где  $b_1 = (2.5C + 158) \cdot 10^{-6}$ ,  $HV_0, \text{ В} = 10.5C + 0.6p + 588$ ;

$$\text{res}(K) = \text{res}(^{55}\text{Fe}) / (b_2(HV - HV_0) + \sqrt{10.4/5.9}),$$

где  $b_2 = -2.0 \cdot 10^{-3}$ ,  $HV_0, \text{ В} = 5.96C + 0.33p + 824$ .

Рассмотрим в заключение вопрос о соответствии калибровки  $^{55}\text{Fe}$   $L$ -пику  $^{71}\text{Ge}$ .

Проведенные измерения показали, что разрешение пика Se начинает ухудшаться при меньшем  $HV$ , чем разрешение  $^{55}\text{Fe}$ . При этом разрешение  $^{55}\text{Fe}$  остается практически постоянным во всем диапазоне используемых  $HV$ , т.е. изменение отношения  $\text{res}(^{55}\text{Fe})/\text{res}(\text{Se})$  происходит только за счет изменения  $\text{res}(\text{Se})$ . Таким образом, можно предположить, что для сигналов с меньшей 5.9 кэВ энергией область нелинейности начинается еще дальше за пределами диапазона изменения рабочих  $HV$  и отношение  $\text{res}(^{55}\text{Fe})/\text{res}(L) = \text{const}$ .

Что касается изменения положения  $L$ -пика, то здесь изменение отношения  $P_{\text{Fe}}/P_{\text{Se}}$  (о поведении отдельно пиков  $^{55}\text{Fe}$  или Se мы говорить не можем из-за изменения усиления в измерительном канале) начинается с больших  $HV$ , чем отношение

$\text{res}(^{55}\text{Fe})/\text{res}(\text{Se})$ , т.е. мы предполагаем, что изменение линейности энергетического диапазона в наших условиях также начинается с энергий, больших 5.9 кэВ, и поэтому между пиком  $^{55}\text{Fe}$  и  $L$ -пиком  $^{71}\text{Ge}$  мы имеем пропорциональное соответствие.

Точность определения положения окон для  $K$ - и  $L$ -пиков германия определяется содержанием моногермана в смеси, общим давлением в счетчике и напряжением между катодом и анодом. При содержании моногермана ниже 15%, общем давлении смеси до 700 Торр и напряжении не выше 1150 В в диапазоне энергий до 20 кэВ отклонения от пропорциональности в работе счетчиков пренебрежимо малы. Использование рабочих смесей с параметрами, не превышающими критических, дает возможность с минимальной погрешностью определить положение пика Ge при калибровке счетчика источником  $^{55}\text{Fe}$ .

При необходимости работы на смесях, имеющих параметры, отличные от оптимальных, используются коэффициенты коррекции, рассчитываемые по разработанной методике.

Оптимальные параметры рабочей смеси достигаются введением в мишень соответствующе-

го количества носителя, т.е. масса стабильного германия при ныне существующей эффективности химико-технологического цикла (~90%) не должна превышать 300–310 мкг.

Кроме того, представленная методика является универсальным способом проверки соблюдения пропорциональности любых счетчиков с любым газовым наполнением.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-02-00146а) и фонда Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (грант НШ-3517.2010.2).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gavrin V.N., Abazov A.I., Abdurashitov J.N. et al. // Proc. of Conf. "Inside the sun". Versailles, 1990. P. 201.*
2. *Abdurashitov J.N., Gavrin V.N., Girin S.V. et al. // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77. P. 4708.*
3. *Абдурашитов Д.Н., Веретёнкин Е.П., Вермул В.М. и др. // ЖЭТФ. 2002. Вып. 122. № 2. С. 211.*
4. *Abdurashitov J.N., Gavrin V.N., Girin S.V. et al. // Phys. Rev. C. 2006. V. 73. 045805. P. 1.*