

УДК 539.074.8

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ В ИОНИЗАЦИОННО-НЕЙТРОННОМ КАЛОРИМЕТРЕ

А. П. Жуков<sup>1</sup>, Г. Т. Зацепин<sup>1</sup>, Г. И. Мерзон<sup>2</sup>, Р. А. Мухамедшин<sup>1</sup>, В. А. Рябов<sup>2</sup>,  
Т. Сайто<sup>3</sup>, Н. М. Соболевский<sup>1</sup>, В. А. Царев<sup>2</sup>, А. П. Чубенко<sup>2</sup>

*Анализируются возможности использования в ионизационно-нейтронном калориметре годоскопа сцинтилляционных детекторов на основе пластического сцинтиллятора в качестве замедлителя и детектора нейтронов, образованных при взаимодействии космических частиц высокой энергии. Показано, что введение в структуру калориметра тонких слоев кадмия или гадолиния повышает эффективность регистрации нейтронов и позволяет существенно уменьшить вклад фоновых нейтронов.*

Идея регистрации нейтронов, возникающих при взаимодействии космических лучей высокой энергии с веществом, была высказана еще в 1973 г. [1] и получила дальнейшее развитие в проекте ионизационно-нейтронного калориметра (ИНКА), предназначенного для исследования первичных космических лучей [2 – 4]. Привлекательность этой идеи состоит в том, что измерение числа нейтронов, образованных при возбуждении и расщеплении атомных ядер поглотителя ионизационного калориметра (ИК), когда в нем развивается каскад вторичных частиц, дает независимую дополнительную информацию об энергии и природе первичной частицы [2 – 4]. Так, например, число нейтронов в адронных ливнях является мерой их энергии и, в среднем, примерно в 20 раз превышает число нейтронов в электромагнитных ливнях той же энергии [2, 3]. Таким образом,

<sup>1</sup>Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия.

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия.

<sup>3</sup>Токийский университет, Токио, Япония.

ИНКА оказывается более информативным и, следовательно, более универсальным измерительным прибором, чем обычный ИК.

Т а б л и ц а 1

Термализация и диффузия нейтрона до захвата в обычном и борированном ( $0.6\%^{10}B$ ) полистироле, а также в годоскопе сцинтилляционных детекторов сечением  $2 \times 2 \text{ см}^2$  на основе полистирола, покрытых слоем гадолиния толщиной  $10 \text{ мкм}^*$

Вещество	Обычный полистирол $(CH_2)_n$		Борированный** полистирол $(CH_2)_n + 0.6\%^{10}B$		Детектор на основе $(CH_2)_n + 10 \text{ мкм Gd}$	
	1	2	1	2	1	2
Начальная энергия нейтрона $E_n, \text{ МэВ}$						
Длина термализации нейтрона $l_T, \text{ см}$	6.38	8.07	3.95	4.97	6.34	8.05
Время термализации нейтрона $t_T, \text{ мкс}$	1.7	1.7	0.83	0.81	1.62	1.63
Длина миграции нейтрона $l_M, \text{ см}$	10.2	11.5	6.59	8.3	6.66	8.41
Время диффузии до захвата нейтрона $t_D, \text{ мкс}$	100	99.8	2.45	2.43	4.24	4.23
Потери на захват нейтронов при термализации, %	0	0	~ 40	~ 40	0	0

Примечания:

\* Расчет по коду LOENT на основе 28-групповых констант VNAV. Нейтрон считается термализованным, если его энергия в результате очередного акта рассеяния стала  $\leq 0.215 \text{ эВ}$ .

\*\* Потери нейтронов в процессе термализации в борированном полиэтилене достигают 40%. Поэтому цифры относятся к 60% нейтронов, избежавших захвата при термализации.

Подавляющая часть вторичных нейтронов возникает в процессе испарения возбужденных ядер. Поэтому первоначальная энергия нейтронов  $E_n$  близка к  $1 - 2 \text{ МэВ}$ , т.е. они являются быстрыми нейтронами. Поскольку значительно удобнее регистрировать

тепловые, а не быстрые нейтроны, их предварительно термализуют (т.е. замедляют до тепловой скорости). Для этого в состав ИНКА вводят водородосодержащий замедлитель (например, полиэтилен) [2 – 5]. Процесс термализации длится 1 – 2 мкс (табл. 1). Поэтому нейтронный сигнал запаздывает по отношению к сигналу от каскада заряженных частиц (ионизационному или ливневому сигналу). Различие во времени появления этих сигналов позволяет измерять их отдельно (и даже одними и теми же детекторами).

Нейтронный сигнал регистрируют во временном окне, отвечающем времени диффузии тепловых нейтронов до их захвата в материале ИНКА (табл. 1). Для регистрации нейтронов в состав ИНКА вводят нейтронные детекторы, например, пропорциональные счетчики СН-17 или СН-18 [2, 3, 5], наполненные газообразным  ${}^3\text{He}$  под давлением 7 атм. Захват тепловых нейтронов в  ${}^3\text{He}$  происходит в реакции  $n + {}^3\text{He} \rightarrow p + {}^3\text{H} + Q$ , идущей с сечением  $\sigma_c = 5400 \text{ бн}$  и выделением энергии  $Q = 0.764 \text{ МэВ}$  [6 – 8], что с вероятностью около 80%, обеспечивает регистрацию теплового нейтрона, попавшего в объем счетчика.

В полиэтилене (или полистироле) суммарное среднее смещение (длина миграции)  $l_M$  испарительного нейтрона в процессе его термализации и последующей диффузии теплового нейтрона (между точками образования и захвата нейтрона) составляет 10–12 см (табл. 1). Поэтому для эффективной регистрации нейтронов нейтронные детекторы следует располагать примерно на таком же или меньшем расстоянии друг от друга. Однако при объеме ИНКА порядка  $1 \text{ м}^3$  необходимое количество таких детекторов и доля занимаемого ими объема оказываются слишком велики, а стоимость ИНКА заметно возрастает.

*Регистрация нейтронов сцинтилляционными детекторами ИНКА.* Возможен и другой альтернативный вариант структуры ИНКА, когда полистирол, составляющий основу сцинтилляторов сцинтилляционных счетчиков, которые регистрируют ливневые заряженные частицы, служит также и для замедления нейтронов, после чего они детектируются теми же счетчиками [4].

Полистирол  $(\text{C}_6\text{H}_5)_n$  – углеводород с плотностью  $1.032 \text{ г см}^{-3}$  эффективно замедляет нейтроны, поскольку содержит 14.3% водорода. Захват тепловых нейтронов в полистироле происходит в реакциях  $n + p \rightarrow d + Q(2.24 \text{ МэВ})$  и  $n + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{13}\text{C}$ , идущих с сечениями  $\sigma_c^H = 311 \text{ мбн}$  и  $\sigma_c^C = 3.8 \text{ мбн}$ , соответственно [6, 7]. В последнем случае образуется устойчивый изотоп  ${}^{13}\text{C}$ .

Применение обычных пластических сцинтилляторов на основе  $(\text{C}_6\text{H}_5)_n$  для регистрации нейтронов, вообще говоря, возможно, но неэффективно. Действительно, длина

пробега до взаимодействия в полистироле захватного (т.е. образованного при захвате теплового нейтрона) гамма-кванта с энергией  $2.24 \text{ МэВ}$  составляет  $20 \text{ см}$  [12]. Поэтому, учитывая миграцию нейтрона до его захвата, гамма-квант материализуется в заряженные частицы (фотоэлектрон, комптон-электрон или электрон-позитронную пару) на расстоянии порядка  $25 \text{ см}$  от точки рождения нейтрона. При этом амплитуда создаваемого сигнала ( $2.24 \text{ МэВ}$ ) в пластине сцинтиллятора сечением  $2 \times 2 \text{ см}^2$  оказывается примерно в 2 раза меньше сигнала ( $\geq 4 \text{ МэВ}$ ) от релятивистской заряженной частицы, пересекающей эту пластину. Время диффузии  $t_D$  до захвата тепловых нейтронов в  $(\text{CH}_2)_n$  близко к  $100 \text{ мкс}$  (табл. 1), что, вообще говоря, удобно для измерения нейтронного сигнала. Однако в течение этого времени регистрируются не только нейтроны, рожденные в столкновении космической частицы высокой энергии, но и фоновые нейтроны, поэтому  $t_D$  следует по возможности сокращать.

*Пути повышения эффективности регистрации нейтронов и отношения сигнал/фон.* Очевидно, что измеряемый фон посторонних нейтронов пропорционален (а) доле объема ИНКА, в котором регистрируются нейтронные события, и (б) длительности  $t_W$ , временного окна, используемого для измерения амплитуды нейтронного сигнала.

Для подавления постороннего фона целесообразно ограничить регистрацию нейтронных событий только той долей объема ИНКА, где развивается каскад заряженных частиц и возникают испарительные нейтроны (область ионизации, индивидуальная для каждого события). Точнее говорить о более широкой области, включающей и заряженные частицы, образованные при конверсии захватных гамма-квантов (нейтронная область). Организуя опрос детекторов в соответствии с картиной развития ливня (т.е. только в области ионизации), можно уменьшить вклад фоновых нейтронов в регистрируемый нейтронный сигнал. При подобном пространственном ограничении опрашиваемых детекторов потери счета нейтронов оказываются тем меньше, чем больше число захватных гамма-квантов и, соответственно, электронов их конверсии.

Необходимая длительность временного окна для регистрации нейтронного сигнала определяется временем диффузии тепловых нейтронов до их захвата ( $t_W \approx 3t_D$ ), а момент открытия окна – временем  $t_T$  термализации нейтронов. Чтобы уменьшить вклад фоновых событий, оба эти параметра также следует сокращать.

Таким образом, для эффективной регистрации нейтронов в ИНКА и максимального отсека фоновых нейтронов, необходимо, чтобы выполнялись следующие условия:

- (1) Малые время и длина термализации нейтрона. Этому способствует выбор замед-

лителя с высокой плотностью водорода, например,  $(CH_2)_n$  ( $\rho_H = 0.148 \text{ г/см}^3$ , табл. 1).

(2) Малые время и длина диффузии термализованных нейтронов, что позволяет сократить длительность временного окна, в котором они регистрируются. С этой целью в структуру ИНКА вводят материалы (литий, бор, кадмий, гадолиний), обладающие большим сечением захвата тепловых нейтронов [6, 7].

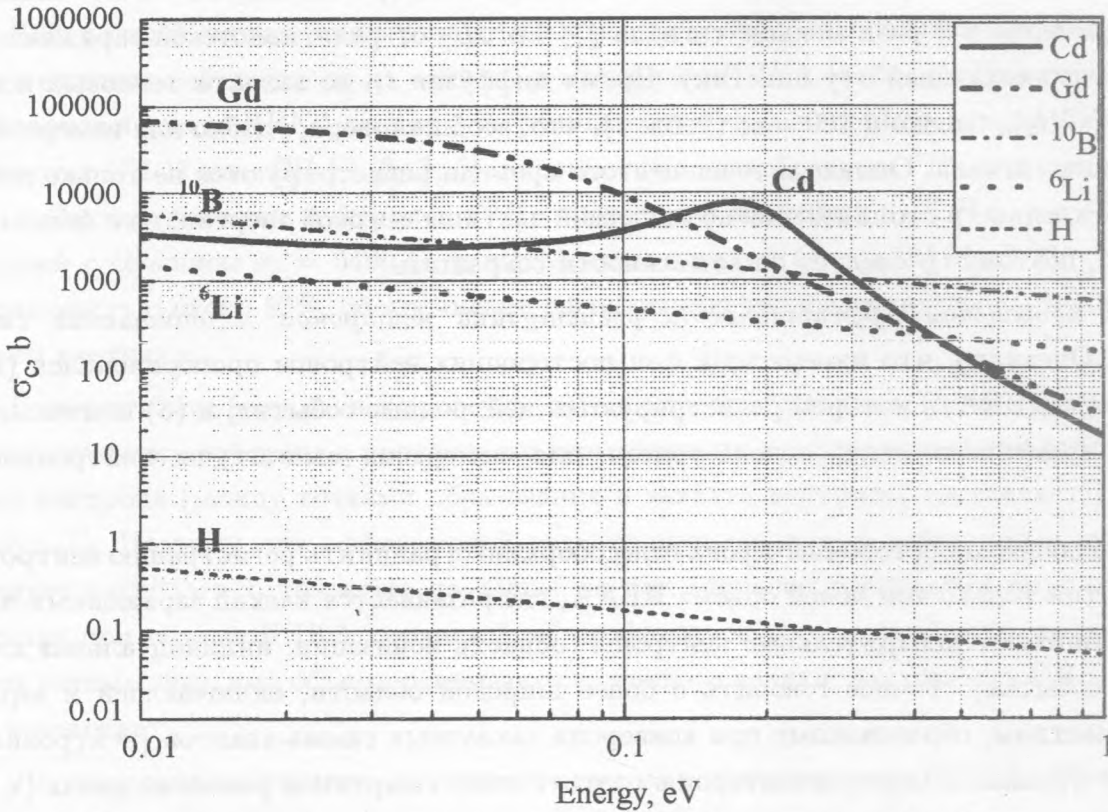


Рис. 1. Сечения захвата тепловых и надтепловых нейтронов в водороде, литии, боре, кадмии и гадолинии [6, 7].

Т а б л и ц а 2

Отношение сечений захвата нейтронов при энергиях  $E_n = 1 \text{ эВ}$  (надтепловой нейтрон) и  $E_n = 0.026 \text{ эВ}$  (тепловой нейтрон) в  $Li, B, Cd$  и  $Gd$

Вещество	$Li$	$B$	$Cd$	$Gd$
$\sigma_c(1 \text{ эВ})/\sigma_c(0.026 \text{ эВ})$	0.164	0.171	0.0077	0.00011

(3) Отсутствие захвата нейтронов в процессе термализации. Для этого конструкционные материалы ИНКА должны обладать малым сечением захвата быстрых и

надтепловых нейтронов. Чтобы совместить требования (2) и (3), следует применять в качестве поглотителей нейтронов не литий или бор, а кадмий или гадолиний [8]. Действительно, сечения захвата нейтронов в литии и боре в надтепловой области падают с энергией значительно медленнее, чем в кадмии и гадолинии [6, 7] (рис. 1). Поэтому, как показывают расчеты (табл. 2), при термализации в пластическом сцинтилляторе, содержащем 0.6%  $^{10}\text{B}$ , поглощается около 40% образованных нейтронов.

Т а б л и ц а 3

Захват тепловых нейтронов в  $\text{H}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $\text{Cd}$ , и  $\text{Gd}$

Элемент	$\text{H}^*$	$^6\text{Li}$	$^{10}\text{B}$	$\text{Cd}$	$\text{Gd}$
Заряд ядра $Z$	1	3	10	48	64
Атомная масса $A$	1.008	6.0	10.82	112.11	157.26
Плотность $\rho$ , г/см $^3$ *	0.143**	0.534	2.45	8.65	7.95
Сечение захвата теплового нейтрона $\sigma_c$ , бн	0.311	945	3838	2537	46617
Длина поглощения теплового нейтрона $l_a$ , мкм	$36 \times 10^4$	200	90	84	7
Среднее число $N_\gamma$ захватных $\gamma$ -квантов	1	0	1	4.1	4.6
Энергетический выход реакции захвата $Q$ , МэВ	0.764	4.785	2.791	16.4	13.9
Полная энергия $E$ , МэВ, переданная $\gamma$ -квантам	2.24	0	0.478	16.4	13.9
Средняя энергия $E_\gamma$ , МэВ захватного $\gamma$ -кванта	2.24	0	0.478	4.0	3.1

\* Для водорода в полистироле.

\*\* Парциальная плотность водорода в полистироле.

(4) Число и суммарная энергия захватных гамма-квантов должны быть, по возможности, велики. Заметим, что с этой точки зрения наиболее выгодны также кадмий и гадолиний, в которых, в среднем, образуются 4.1 и 4.6 захватных гамма-квантов со средней энергией 3.9 и 3.1 МэВ, соответственно [9] (табл. 3).

(5) Вторичные электроны от материализации захватных гамма-квантов должны возникать вблизи точки захвата нейтрона. Последнее возможно только при короткой

радиационной длине материала ИНКА, что противоречит его концепции, требующей наличия значительной доли легкого вещества. В то же время электроны конверсии захватных гамма-квантов имеют энергию до нескольких мегаэлектронвольт, и их пробег в  $(CH_2)_n$  не превышает 1–2 см.

*Введение кадмия и гадолиния в структуру ИНКА.* Выше была обоснована целесообразность введения в структуру ИНКА кадмия или гадолиния, которые интенсивно поглощают тепловые нейтроны, уменьшают длину их миграции и время диффузии до захвата и не создают (как в случае применения бора) потерь быстрых и надтепловых нейтронов при их термализации, а также образуют большое число захватных гамма-квантов (и, соответственно, конверсионных электронов). Это способствует эффективной регистрации нейтронов и подавлению постороннего фона, что отвечает условиям (1)–(4). Так, например, время диффузии тепловых нейтронов в  $(CH_2)_n$  в присутствии малых количеств гадолиния падает со 100 до 4.2 мкс (табл. 1), что позволяет во столько же раз снизить вклад фоновых нейтронов.

Сечения захвата тепловых нейтронов в природных смесях изотопов кадмия и гадолиния равны, соответственно, 2537 и 46617 бн [6, 7] (табл. 3). Как уже говорилось, при захвате ими тепловых нейтронов высвечивается, в среднем, 4.1 и 4.6 захватных гамма-квантов с энергией до  $\sim 9$  и  $\sim 7$  МэВ [9]. Таким образом, в противоположность поглощению нейтрона бором-10, где возникает лишь один сравнительно мягкий гамма-квант с энергией 0.478 МэВ, в кадмии и гадолинии интенсивность нейтронного сигнала возрастает из-за большего числа и более высокой энергии захватных гамма-квантов.

Длины поглощения  $l_a$  теплового нейтрона в  $Cd$  и  $Gd$  малы и составляют, соответственно, 84 и 7 мкм (а в  $CdO$  и  $Gd_2O_3$  –  $\sim 120$  и 10 мкм). Для реализации предлагаемого метода пластины сцинтиллятора прокладываются кадмиевой фольгой толщиной 0.1 мм, что обеспечивает эффективный захват тепловых нейтронов. (Известны также попытки ввести пропионат кадмия в состав пластического сцинтиллятора без ухудшения его оптических свойств [10].) Еще удобнее применять в качестве поглотителя тепловых нейтронов окись гадолиния  $Gd_2O_3$  – аморфный порошок белого цвета с плотностью 7.41 г/см<sup>3</sup> [11]. Благодаря громадному сечению захвата тепловых нейтронов природным гадолинием, достаточно нанести на пластину сцинтиллятора слой  $Gd_2O_3$  толщиной всего 10 мкм. Смесь окиси гадолиния с олифой или другой органической основой может быть использована в виде краски, способной также диффузно отражать свет сцинтилляций, возникающих под действием ионизирующих частиц. Следует также изучить возможность введения металлоорганических соединений гадолиния в состав

сцинтиллятора. Некоторым недостатком применения кадмия и гадолиния является то, что пробег энергичных захватных гамма-квантов в  $(CH_2)_n$  достигает 20–30 см [12]. Расстояние, на котором материализуются эти гамма-кванты, сокращается при чередовании в структуре ИНКА слоев сцинтиллятора и свинца.

*Компоновка ИНКА, содержащего кадмий или гадолиний.* Выбрана следующая компоновка варианта ИНКА, предназначенного для аэростатных исследований спектра первичных электронов космических лучей в области энергий 1 – 10 ТэВ [2, 3].

Сборка ИНКА имеет форму параллелепипеда с площадью основания  $1 \text{ м}^2$  и толщиной 0.46 м и содержит сцинтилляционные детекторы в виде стержней сечением  $2 \times 2 \text{ см}^2$  и длиной 1 м. Заметим, что электроны с энергией 3–4 МэВ, возникающие при конверсии захватных гамма-квантов, тормозятся и регистрируются в пределах одного или двух соседних сцинтилляционных детекторов.

Стержни четных и нечетных рядов уложены крест-накрест. С торцов каждый из них просматривается фотодетектором. Возможна иная система собирания света с применением переизлучающих пластин (шифтеров), торцы которых заведены на многоканальный фотодетектор. На боковые плоскости стержней нанесено покрытие, эквивалентное слою  $Gd_2O_3$ , толщиной 10 мкм. Каждый стержень обернут свинцовой фольгой (0.5 мм), так что толщина свинца между соседними стержнями составляет  $1 \text{ мм} = 0.2L_{Pb}$  ( $L_{Pb} = 0.56 \text{ см}$  – радиационная длина свинца). Наличие тяжелого поглотителя между соседними стержнями также способствует конверсии захватных гамма-квантов.

Аэростатный модуль ИНКА [2] размером  $1 \times 1 \times 0.46 \text{ м}^3$  содержит 21 ряд сцинтилляционных детекторов на основе  $(CH_2)_n$  по 45 в одном ряду. Каждый детектор заключен в оболочку из свинцовой фольги. Общее число сцинтилляционных детекторов ИНКА – 945. Их общий вес (без фотодетекторов, каркаса, контейнера, радиоэлектронной аппаратуры и источника питания) составляет около 850 кг, а вместе с этими аксессуарами – около 1 т. Космическая частица, проходящая вдоль оси симметрии ИНКА, пересекает  $43.3 \text{ гсм}^{-2}$  полистирола (1.04 радиационных или 0.53 ядерных длин, соответственно) и  $23.84 \text{ гсм}^{-2}$  свинца (3.75 радиационных или 0.12 ядерных длин, соответственно), в сумме,  $67.14 \text{ гсм}^{-2}$  вещества, т.е. 4.8 радиационных или 0.65 ядерных длин. Таким образом, аэростатный вариант ИНКА, имеющий апертуру  $4.73 \text{ м}^2 \text{ стер}$  и весом около 1 т способен за 1 месяц полета зарегистрировать около 50 электронов первичного космического излучения с энергией  $E_e \geq 10^{12} \text{ эВ}$ , ожидаемый спектр которых широко дискутируется в литературе (см., например, [2], рис. 2.1 и рис. 2.4).



Итак, мы можем заключить, что введение в структуру ионизационно-нейтронного калориметра небольших количеств кадмия или гадолиния обеспечивает эффективную регистрацию нейтронов в сцинтилляционных детекторах, которые используются для регистрации каскадов заряженных частиц, образованных первичной космической частицей высокой энергии, при одновременном сокращении в  $\sim 25$  раз вклада фоновых нейтронов.

Настоящая работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект N 05-02-17599.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Bezrukov L. B., Beresnev V. I., Zatsepin G. T., et al. *Sov. J. Nucl. Phys.*, **17**, 98 (1973).
- [2] Aleksandrov K. V., Ambrosio M., Ammosov V. V., et al. Preprint of Lebedev Physical Institute No. 47, Moscow, 1998.
- [3] Aleksandrov K. V., Ammosov V. V., Antonova V. P., et al. *Nucl. Instr. Meth.*, **459A**, 135 (2001).
- [4] Александров К. В., Аммосов В. В., Антонова В. П. и др. *Изв. Академии наук, Сер. физ.*, N 1, 1624 (2002).
- [5] Аммосов В. В., Мерзон Г. И., Саито Т. и др. *Письма в ЖТФ*, **24**, N 20, 35 (1998).
- [6] Таблицы физических величин, ред. И. К. Кикоин (Москва, Атомиздат, 1976).
- [7] Атлас нейтронных сечений. Изд. 2. (Москва, Атомиздат, 1959).
- [8] Александров К. В., Кузнецов Е. П., Мерзон Г. И. и др. *ДАН*, **363**, N 5, 610 (1998).
- [9] Грошев Л. В., Демидов А. М., Луценко В. Н., Пелехов В. И. Атлас гамма-лучей радиационного захвата тепловых нейтронов (Изд. ГУ ИАЭ СМ СССР, Москва, 1958).
- [10] Hues F. N., Ott D. G., and Kerr V. Y. *Nucleonics*, **14**, 42 (1956).
- [11] Handbook of Chemistry and Physics, 35th Edition. Ed. by C. D. Hodgman (Chemical Rubber Publ. Co., Cleveland, 1955).
- [12] Review of Particle Physics. *The European Physical Journal*, **15C**, no. 1-4, 169 (2000).

Поступила в редакцию 22 апреля 2005 г.