

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 539.1.074.3

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРОВ НЕЙТРОНОВ ПО ДАННЫМ, ПОЛУЧЕННЫМ ПРИ ПОМОЩИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ CsI(Tl)

А. В. Богомолов, К. К. Гудима*, И. Н. Мягкова, С. П. Рюмин
(НИИЯФ)

Представлены методика восстановления спектров нейтронов при регистрации их детекторами на основе сцинтилляционных кристаллов CsI и результаты расчета сечений образования изотопов водорода и гелия в реакциях нейтронов с энергиями 10—1000 МэВ с ядрами CsI. Рассчитанные при помощи этой методики величины согласуются с экспериментальными значениями.

В последнее время в связи с впечатляющими результатами первых прямых измерений потоков нейтронов, рождающихся в солнечных вспышках [1], резко возрос интерес к методам регистрации и измерения спектров высокоэнергетичных (10—1000 МэВ) нейтронов. Исследование характеристик нейтронного излучения в околоземном космическом пространстве весьма актуально с точки зрения космической медицины. Оно также представляет интерес для уточнения величины потока нейтронов альbedo как источника протонов в радиационных поясах Земли. Для регистрации спектров нейтронов с энергиями более 10 МэВ ранее использовались системы, измеряющие время пролета частиц (см., напр., [2]). В дальнейшем предполагается использовать calorиметры на основе NaI(Tl) [3]. Но значительные размеры (более одного метра) и вес (несколько сотен килограммов и выше) существенно ограничивают возможности использования таких приборов для спутниковых экспериментов.

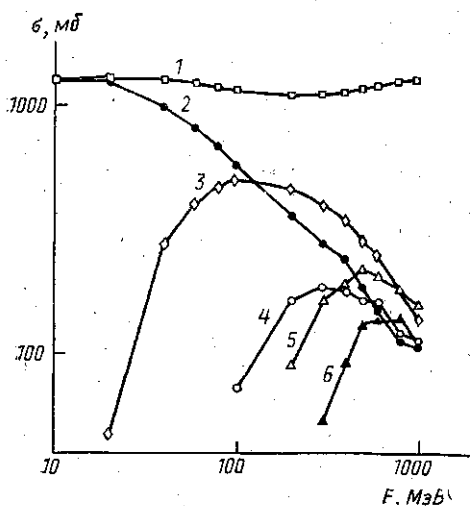
В настоящей работе представлен спектр нейтронов, полученный в результате обработки данных эксперимента с тонким (диаметр и высота — 7,5 см) кристаллом CsI(Tl) на ИСЗ «Космос-1686» [4]. Регистрация нейтронов осуществлялась по вторичным заряженным частицам — продуктам их взаимодействия с ядрами Cs и I. Нейтроны идентифицировались на фоне γ -квантов по форме светового импульса в CsI(Tl). Для оценок спектров использовались скорости счета вторичных частиц в трех интервалах энерговывделений: 4,6—13, 13—26 и 26—65 МэВ. Так как часть энергии первичных нейтронов уносилась вторичными нейтронами и γ -квантами, для получения энергетических спектров было необходимо рассчитать функции отклика прибора на потоки нейтронов заданных энергий.

Экспериментальных данных о сечениях взаимодействия нейтронов с энергиями 10—1000 МэВ с ядрами, близкими по числу нуклонов к ядрам Cs и I, и о спектрах образующихся в них вторичных частиц имеется мало [5], поэтому был сделан расчет этих величин для Cs и I. Расчеты проводились на основе каскадно-экситонной модели ядерной реакции, которая обобщает существенные черты дубненской версии модели внутриядерных каскадов [6] и модифицированной экситонной модели [7] и согласно которой ядерная реакция проходит три стадии: каскадную, предравновесную и равновесную. Получаемые в рамках данной модели системы каскадных уравнений и мастер-уравнений предравновесной эмиссии (равновесная стадия включалась в предравновесную) решались методом Монте-Карло, алгоритм решения подробно описан в [5]. На рис. 1 приведены полученные для ядер Cs величины сечений неупругого взаимодействия, сечений реакций с образованием 1, 2, 3 и 4 заряженных частиц и реакций без их образования. Получены зависимости сечений образования изотопов H (рис. 2, а) и He (рис. 2, б), возникающих в реакциях нейтронов с ядрами Cs, от кинетической энергии рождающейся заряженной частицы. Результаты аналогичного расчета для ядер I незначительно отличаются от приведенных для ядер Cs.

Для расчета функций отклика на моноэнергетические потоки нейтронов также использовался метод Монте-Карло. Энергия и угловые распределения падающих на детектор нейтронов и геометрия прибора задавались как начальные условия. При расчете помимо данных, приведенных на рис. 1, 2, учитывались: а) угловые распределения

*) Институт прикладной физики, Кишинев, Молдова.

вторичных частиц в упругих [8] и неупругих [5] взаимодействиях; б) вероятность последовательного вылета нескольких (до четырех) заряженных частиц в одном акте взаимодействия; в) величины световыходов в CsI(Tl) для протонов и α -частиц относительно световыходов для электронов [9, 10] (эти данные наиболее близки к измеренным нами величинам световыходов α -частиц для использованных кристаллов); г) возможность самовыключения прибора при попадании вторичных заряженных частиц в область активной антисовпадательной защиты.



Были выполнены расчеты функций отклика на нейтроны с энергиями от 20 до 1000 МэВ (сечение образования заряженных частиц для нейтронов с энергиями не более 10 МэВ пренебрежимо мало). Помимо расчетов для условий экс-

Рис. 1: Зависимость сечений σ взаимодействия нейтронов с ядром Cs от энергии: суммарное сечение неупругих взаимодействий (1), сечение реакций без образования заряженных частиц (2), с образованием одной (3), двух (4), трех (5) и четырех (6) заряженных частиц. Разыгрывалось 5000 неупругих событий

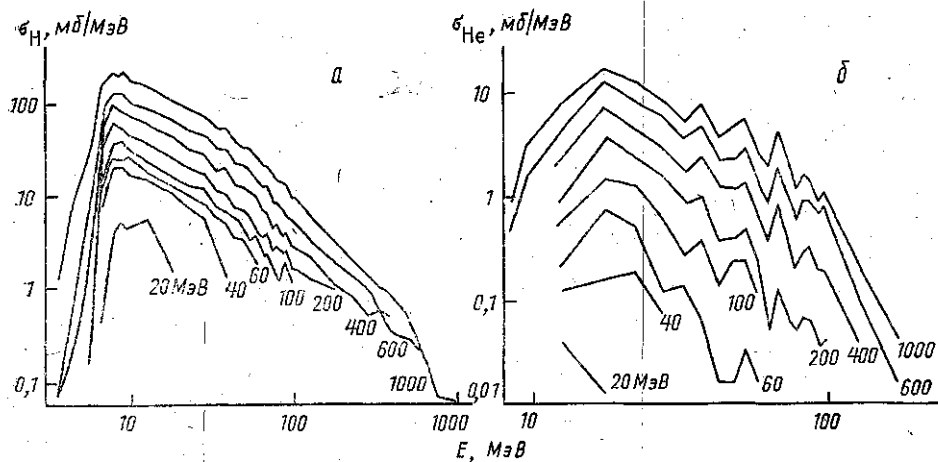


Рис. 2. Энергетические зависимости сечения образования изотопов водорода (σ_H) (а) и гелия (σ_{He}) (б) в реакциях нейтронов с энергиями 10—1000 МэВ (цифры рядом с кривыми). Учтены случаи одновременного образования одной, двух и т. д. частиц. Разыгрывалось 5000 неупругих событий

перимента на ИСЗ «Космос-1686» (всенаправленный поток нейтронов, активная антисовпадательная защита CsI со всех сторон) проводились расчеты для нашего эксперимента с аналогичным детектором на синхрофазотроне ИФВЭ [11] (параллельный пучок нейтронов, антисовпадательная защита только перед детектором). Полученные по данным измерений на ускорителе значения функций отклика вместе с рассчитанными величинами приведены в таблице. Видно, что в пределах полученных ошибок рассчитанные значения находятся в хорошем согласии с экспериментальными. К сожалению, измеренные функции отклика не позволяют восстанавливать спектры нейтронов как из-за относительно узкого диапазона энергий вторичных частиц, так и из-за того, что для достижения приемлемой статистики полученные данные нам пришлось суммировать в весьма широких интервалах энергий первичных нейтронов. Указанные в таблице ошибки рассчитанных функций отклика определяются в основном статистикой. Разыгрывалось 20 000 событий, а эффективность регистрации составляла не более 10%. К тому же только в ~35% зарегистрированных событий энерговыделение вторичных заряженных частиц было выше 30 МэВ.

Функция отклика прибора на потоки нейтронов, %

Энергия нейтронов, МэВ	Диапазоны энерговыделений, МэВ									
	30—40		40—50		50—60		60—70		70—80	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
40—100	42±4	36±3	27±4	26±3	17±3	21±2	8±2	11±2	6±2	6±2
100—300	37±4	34±4	23±4	27±3	19±3	22±4	12±2	10±2	9±2	7±2
300—700	33±3	32±4	25±3	28±3	18±2	19±3	15±2	13±2	9±2	8±2

Восстановление спектра регистрируемых потоков нейтронов проводилось исходя из измеренных скоростей счета и полученных функций отклика при помощи стандартной процедуры минимизации χ^2 . Считалось, что спектр имел вид $dN/dE \sim AE^{-1}$.

На рис. 3 приведен полученный по данным эксперимента на ИСЗ «Космос-1686» спектр нейтронов под радиационными поясами Земли для широты $\lambda=42^\circ$, а также спектры нейтронов, измеренные на границе атмосферы на этой же широте в более ранних экспериментах [12—17]. На рис. 3 видно, что полученные нами значения не противоречат данным других экспериментов. Коридор ошибок определяется ошибками при вычислении функций отклика и экспериментальными ошибками при измерении скоростей счета. Данные ошибки выше, чем приведен-

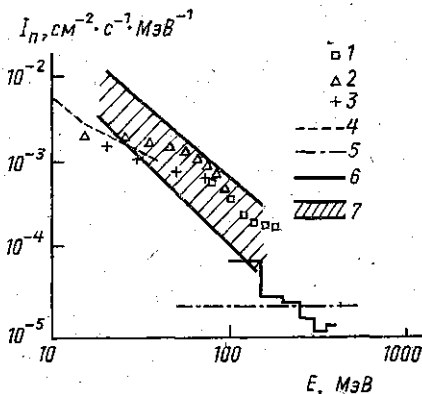


Рис. 3. Результаты измерений потоков нейтронов вблизи границы атмосферы на широте 42° по работам [12] (1), [14] (2), [13] (3), [15] (4), [17] (5) — дан нижний предел, [16] (6) и результаты обработки данных эксперимента на ИСЗ «Космос-1686» для той же широты (7)

ные в таблице, из-за того, что функции отклика для всенаправленного потока определялись путем суммирования с соответствующим весом функций отклика для параллельных пучков нейтронов, падавших под углами 9° , 27° , 45° , 63° и 81° к оси детектора. Для каждого угла разыгрывалось 20 000 событий. Полученные нами данные о спектре нейтронов (см. рис. 3) мы рассматриваем как предварительные. В дальнейшем мы планируем значительно увеличить статистику при расчетах и вследствие этого увеличить точность восстановления спектров. Также планируется получить широтные и долготные зависимости формы этого спектра.

Таким образом, рассчитанные нами величины согласуются с экспериментальными, полученными как на ускорителе, так и на ИСЗ. Разработанная методика может быть использована для определения спектров нейтронов при помощи детекторов на основе CsI для приборов любой конфигурации и при любых угловых распределениях падающих нейтронов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Chupp E. L. // Solar Phys. 1988. 118. P. 137. [2] Ryan J. V. et al. // Proc. 20th ICRC. M., 1987. V. 4. P. 421. [3] Dunphy P. P. et al. // Ibid. P. 436. [4] Панков В. М. и др. Препринт ИКИ РАН, Пр.-1777. М., 1992. [5] Барашенков В. С. и др. Взаимодействия высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. М., 1972. [6] Барашенков В. С. и др. // Acta Phys. Polon. 1969. 36. P. 415. [7] Гудима К. К. и др. // Ядерная физика. 1975. 21. С. 260. [8] Власов Н. А. Нейтроны. М., 1974. [9] Birks J. B. The Theory and Practice of Scintillation Counting. Oxford, 1964. [10] Viesti G. et al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 1986. A252. P. 75 [11] Антипов А. В. и др. Препринт НИИЯФ МГУ, № 92-7/256. М., 1992. [12] Kanbach G. et al. // J. Geophys. Res. 1974. 79. P. 5152. [13] Lockwood J. A. et al. // J. Geophys. Res. 1976. 81. P. 6211. [14] Preszler A. M. et al. // J. Geophys. Res. 1976. 81. P. 4715. [15] Дубинский Ю. А. и др. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1982. 46, № 9. С. 1680. [16] Heidebreder E. et al. // J. Geophys. Res. 1970. 75. P. 6347. [17] Daniel R. R. et al. // J. Geophys. Res. 1971. 76. P. 3152.

Поступила в редакцию
06.10.93