

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-225

P7-96-225

Е.А.Сокол, В.И.Смирнов, С.М.Лукьянов, Ю.Э.Пенионжкевич

ДЕТЕКТОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МНОЖЕСТВЕННОСТИ  
И УГЛОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ НЕЙТРОНОВ

Направлено в журнал «Nuclear Instruments and Methods A»

1996

Описывается детектор нейтронов на основе пропорциональных счетчиков, заполненных  $^3\text{He}$ , для исследований множественности и угловых характеристик низкоэнергетических нейтронов, возникающих при распадах ядер.

В настоящей работе использовались принципы и опыт создания и применения подобных детекторов в ЛЯР им. Г. Н. Флерова ОИЯИ [1, 2].

Рассматривается возможность использования такого детектора для измерений угловых корреляций между нейтронами, возникающими после бета-распада легких нейтроноизбыточных ядер, в частности, ядер  $^{11}\text{Li}$ . Структура нейтронного гало  $^{11}\text{Li}$  исследовалась в ряде работ в разных экспериментальных подходах (см., напр., [3-6]). Детектор на основе гелиевых счетчиков может дать интересную информацию о корреляциях между бета- запаздывающими нейтронами при распаде этого ядра.

### ОПИСАНИЕ ДЕТЕКТОРА

Общий вид и схема детектора приведены на рис. 1.

Детектор нейтронов состоит из отдельных модулей (рис. 2), состоящих из пропорционального счетчика, заполненного  $^3\text{He}$  (1), замедлителя (2), высоковольтного ввода и предусилителя (3). Использовались счетчики нейтронов двух типов:

- давление газа 7 атм, длина  $l=50$  см, диаметр 3,2 см;
- давление газа 4 атм, длина  $l=30$  см, диаметр 3,2 см.

Всего в детекторе используется 182 счетчика, из них 144 первого типа. В качестве замедлителя использовался полиэтилен, размеры модуля -  $h = 5$  см между параллельными плоскостями и, соответственно, толщина слоя замедлителя между счетчиками нейтронов составляла около 2 см. Детектор состоит из двух одинаковых половин, в каждой из них детектирующие модули образуют шестигранные слои с 1, 6, 12, 18, 24 и 30 счетчиками нейтронов (номера счетчиков в слоях соответственно 1, 2-7, 8-19, 20-37, 39-61, 62-91 в первой половине детектора и 92, 93-98, 99-110, 111-128, 129-152, 153-182 во второй). Счетчики 1-19 и 92-110 заполнены гелием до 4 атм, остальные - до 7 атм. Расстояние от центра детектора до торца счетчиков 1 и 92 - по 25 см, сдвиг каждого слоя

относительно соседнего составлял 5 см, а счетчики последних слоев, т.е. с 62 по 91 и с 153 по 182, в первой и второй половинах, соответственно, соприкасались своими торцами. Полость в центре детектора имела форму, близкую к сферической с радиусом 25 см.

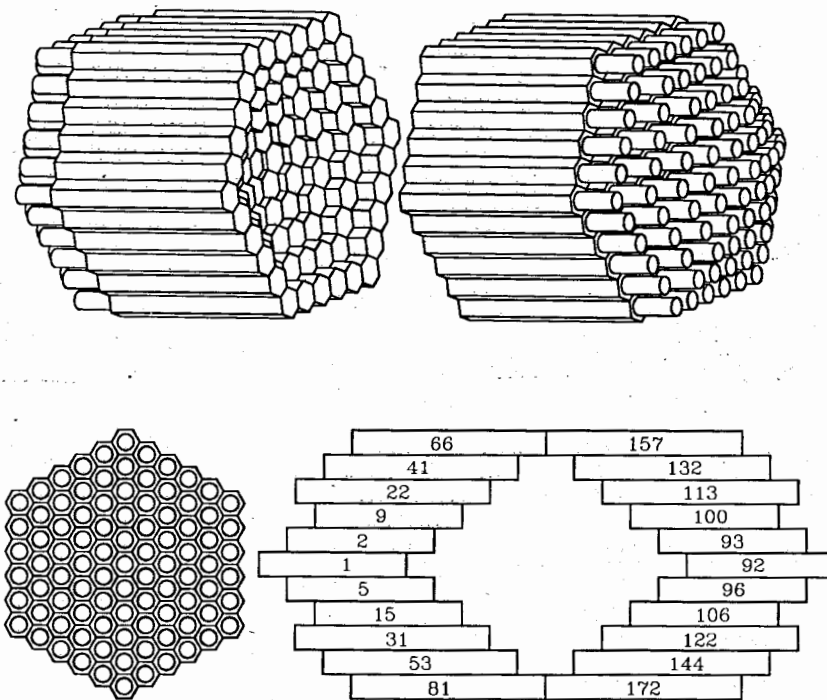


Рис. 1. Общий вид (а) и схема детектора нейтронов (б). Цифрами обозначены номера счетчиков

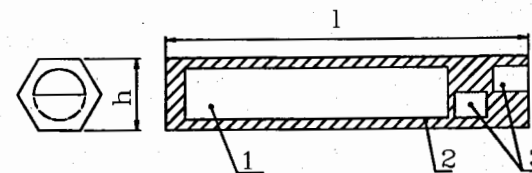


Рис. 2. Конструкция отдельного модуля нейтронного детектора

Принцип работы детектора заключается в следующем: нейтроны, испущенные из источника, замедляются за несколько микросекунд до тепловых энергий и затем диффундируют в сборке и либо поглощаются счетчиками и замедлителем, либо уходят из детектора. Детектирование нейтронов в гелиевых счетчиках происходит путем поглощения теплового нейтрона в реакции  ${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^3\text{H} + p + 780 \text{ кэВ}$  с сечением 5320 барн, т.е. нейтрон может быть зарегистрирован только один раз и так называемый "cross talk" отсутствует в принципе, а так как поглощаются тепловые нейтроны, то энергетический порог практически нулевой. Гелиевые счетчики мало чувствительны к гамма-квантам и не дают информации об энергии нейтронов.

Распределение времен регистрации нейтронов приведено на рис. 3. Время жизни нейтронов определяется как величина  $\tau$  в формуле

$$N(t) = N_0 \exp(-t/\tau),$$

где  $t$  - время регистрации, для данной сборки  $\tau = 25$  мкс.

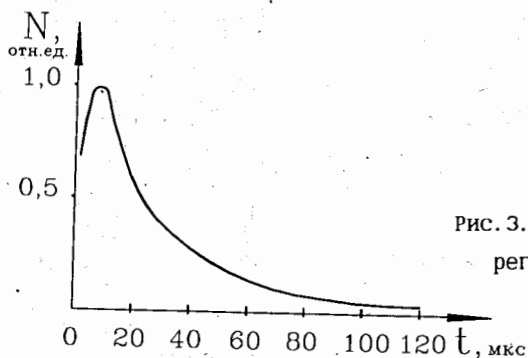


Рис. 3. Распределение времен регистрации нейтронов

Электронная система работает следующим образом: стартовый сигнал - либо от внешнего детектора, либо от любого из 182-х счетчиков нейтронов - открывает на 128 мкс временные ворота и для всех сработавших в течение этого интервала счетчиков нейтронов запоминаются номера и времена относительно старта.

## ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРЕДЕЛЕНИЙ НЕЙТРОНОВ ПО МНОЖЕСТВЕННОСТИ

Множественная эмиссия нейтронов может быть описана средним числом нейтронов на распад  $\nu$ , дисперсией распределения по множественности  $\sigma$  и вероятностями эмиссии различного числа нейтронов  $P_i$ ,  $i=0, \dots, i_{\max}$ .

Эти величины могут быть получены из следующего набора соотношений:

$$\langle n \rangle = \nu \epsilon = \sum_i i N_i \sum_{i=0} N_i, \quad (1)$$

$$N_i = N_d F_i = N_d \sum_{k=i} \{k! / [(k-i)! i!]\} \epsilon^i (1-\epsilon)^{k-i} P_k, \quad (2)$$

$$N_i / N_k = F_i / F_k = f(\epsilon), \quad (3)$$

$$\sum_{i=0} F_i = 1, \quad k=0, 1, \dots, k_{\max}, \quad i=0, 1, \dots, i_{\max},$$

где  $\langle n \rangle$  - среднее число нейтронов, зарегистрированных на один распад,  $\nu$  - среднее число нейтронов на один распад,  $\epsilon$  - эффективность регистрации нейтронов,  $N_i$  - число событий, в которых зарегистрировано  $i$  нейтронов,  $N_d$  - число распадов,  $F_i$  - вероятность регистрации  $i$  нейтронов,  $P_k$  - вероятность эмиссии  $k$  нейтронов.

Эффективность регистрации нейтронов  $\epsilon$  определялась для нейтронов спонтанного деления  ${}^{248}\text{Cm}$ . Имеется два пути определения эффективности при использовании спонтанно делящихся ядер, так как при спонтанном делении происходит множественная эмиссия нейтронов. Для спонтанного деления  ${}^{248}\text{Cm}$   $\nu=3.14$ , при этом с определенными вероятностями испускается 0, 1, 2, ... нейтрона [7]. Значение  $\epsilon$  можно получить из соотношений (1)-(3), но для получения  $\epsilon$  из (1) необходимо знание  $N_0$ , т.е. принципиально необходим внешний стартовый сигнал от осколков или гамма-квантов деления. При использовании соотношений (2)-(3) такой сигнал не нужен, как не нужно в обоих случаях знание заранее абсолютной интенсивности источника.

Для детектора, представленного на рис. 1, для источника в центре полости получена эффективность  $\epsilon = 0.36 \pm 0.02$  для делительных нейтронов. Распределение эффективности по отдельным слоям счетчиков в расчете на один счетчик приведено на рис. 4.

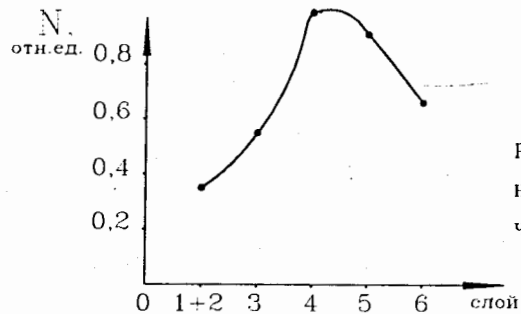


Рис. 4. Распределение эффективности по отдельным слоям в расчете на один счетчик нейтронов

После определения эффективности становятся известны все параметры детектора для измерений характеристик распределений по множественности нейтронов из системы уравнений (2). Такой подход использовался нами для измерения вероятностей эмиссии запаздывающих нейтронов ряда легких ядер. Эксперимент был выполнен на циклотроне У400 ЛЯР ОИЯИ. Детали эксперимента описаны в [2]. Результаты приведены в таблице. Анализ данных показывает хорошее согласие данных по периодам полураспада.

Таблица. Периоды полураспада  $T_{1/2}$ , вероятности испускания различного числа нейтронов  $P_i$  и полные вероятности  $W$  испускания нейтронов после  $\beta$ -распада

Ядро	$T_{1/2}$ (мс) эксперим.	$T_{1/2}$ (мс) др. работы	$P_i, W$ (%) эксперим.	$P_i, W$ (%) др. работы
$^8\text{He}$	124,5±0,2	119±1,5 [12]	$P_0=87,0\pm1,1$	84±1 [12]
			$P_1=12,7\pm2,6$	16±1 [12]
$^9\text{Li}$	181,8±0,4	178,3±0,4 [11]	$P_0=86,6\pm0,9$	$W=50\pm4$ [11]
			$P_1=13,3\pm3,4$	
$^{11}\text{Li}$	8,0±1,0	8,5±0,2 [11]	$P_0=45,9\pm4,6$	85±1 [11]
			$P_1=29,4\pm2,6$	4,1±0,4 [11]
			$P_2=15,2\pm3,0$	1,9±0,2 [11]
			$P_3=5,1\pm3,0$	95±8 [11]
$^{12}\text{Be}$	13,1±0,5	11,4±0,5 [11]		
		23,6±0,9 [12]	$W<0,08$	<1 [12]
$^{13}\text{B}$	17,0±0,4	17,4±0,2 [12]	$W<0,03$	$P_0=100$ [12]

Вероятности  $P_n$   $\beta$ -задержанной эмиссии нейтронов для изотопа  $^8\text{He}$  хорошо согласуются с табличными значениями [12]. Для распада  $^{12}\text{Be}$  и  $^{13}\text{B}$  не наблюдалось эмиссии нейтронов, что позволило получить пределы, которые не противоречат известным данным [12]. Что касается  $^9\text{Li}$ , то нами получено меньшее значение вероятности нейтронной эмиссии по сравнению с приведенным в работе [11]. Заметим, что данные по распределению по множественности нейтронов для  $^{11}\text{Li}$  также расходятся с результатами [11], хотя полная вероятность эмиссии нейтронов из этого ядра  $W$  совпадает в обеих работах.

С точки зрения задачи определения параметров распределений нейтронов по множественности более подходящей является геометрия детектора нейтронов в работе [2], но в детекторе, описываемом в настоящей работе, появляются возможности получения информации об угловых характеристиках испускаемых нейтронов.

#### УГЛОВЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ НЕЙТРОНАМИ

Как уже отмечалось, при детектировании нейтронов определяются номера сработавших счетчиков. С оговорками, о которых пойдет речь ниже, каждому счетчику можно приписать определенные координаты  $(x, y, z)_i$  в системе координат, в которой центр детектора имеет координаты  $(0, 0, 0)$ . Тогда при регистрации двух нейтронов угол между ними определяется по формуле [8]

$$\alpha = \arccos\left\{ \frac{|x_i x_j + y_i y_j + z_i z_j|}{\sqrt{(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)} \sqrt{(x_j^2 + y_j^2 + z_j^2)}} \right\},$$

где  $(x, y, z)_i$  и  $(x, y, z)_j$  - координаты счетчиков  $i$  и  $j$  соответственно.

На рис.5 приведено распределение углов между нейтронами для спонтанного деления  $^{248}\text{Cm}$ . По оси  $x$  приведены углы между счетчиками, зарегистрировавшими нейтроны спонтанного деления при условии, что в данном распаде было зарегистрировано два нейтрона. Всего было зарегистрировано около 23000 событий с двумя нейтронами.

Счетчики нейтронов не являются точечными, но неопределенность по координатам  $x$  и  $y$  невелика по сравнению с расстоянием источник-детектор, чего нельзя сказать о координате  $z$ . При выборе координаты  $z$  счетчиков и разрешения по углу мы исходили из известных данных по

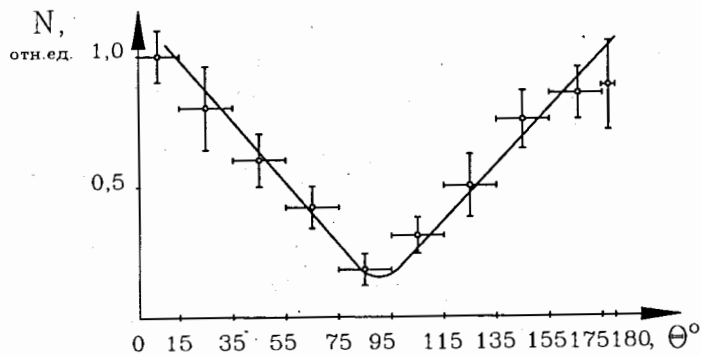


Рис. 5. Распределение углов разлета между нейтронами спонтанного деления  $^{248}\text{Cm}$

угловым распределениям нейтронов деления. При сравнении с литературными данными необходимо учесть следующее:

- литературные данные крайне ограничены; имеются данные только для нейтронов спонтанного деления  $^{252}\text{Cf}$  [9, 10];
- энергетический порог составлял несколько сотен кэВ;
- измерения проводились при низкой эффективности регистрации нейтронов.

Опираясь на литературные данные, можно утверждать, что в распределении углов разлета нейтронов имеется минимум при 90 градусах, при этом отношение счета в максимуме при нулевом угле к счету при 90 градусах равно нескольким единицам, и, по-видимому, распределение не имеет каких-либо других экстремальных точек.

Несмотря на несколько другие условия в наших измерениях мы также накладываем требование, чтобы эти общие характеристики воспроизводились в наших результатах, это достигается ограничениями на возможный диапазон изменения координаты  $z$  и закруглением углового разрешения так, чтобы распределение углов разлета не имело промежуточных экстремальных точек и отношение счета при 0 и 90 градусах составляло несколько единиц. Эти требования удается выполнить, варьируя  $z$  на расстоянии от 0 до 10 см от ближнего к центру детектора торца счетчиков и разбивая диапазон углов разлета так, как показано на рис. 5. Максимальная ошибка в определении угла разлета при указанных выше ограничениях составляла около 20 градусов и возможна при реальных углах разлета, близких к 0 градусов.

## Возможности изучения корреляций между бета-запаздывающими нейтронами при распаде легких нейтроноизбыточных ядер

Множественная нейтронная эмиссия возможна в результате  $\beta$ -распада ряда легких нейтроноизбыточных ядер. Особый интерес представляют ядра с нейтронным гало, для которых важна информация о структуре гало, о взаимодействиях между кором и гало и между нейтронами в самом гало. Имеется целый ряд ядер ( $^6\text{He}$ ,  $^{11}\text{Li}$ ,  $^{14}\text{Be}$ ), для которых открыто существование нейтронного гало (для  $^6\text{He}$  - скорее "нейтронной кожи"). Наиболее изученным является ядро  $^{11}\text{Li}$ , которое сравнительно легко получается (>100 частиц/с). Из экспериментов с пучками ядер  $^{11}\text{Li}$  при различных энергиях на разных мишенях [3, 4], по-видимому, следует вывод об отсутствии сильных корреляций между нейтронами гало.

Другой возможный подход - это исследование угловых корреляций между  $\beta$ -запаздывающими нейтронами от распада  $^{11}\text{Li}$ . Этот подход был реализован в работе [5а], в которой содержатся указания на наличие корреляций между  $\beta$ -запаздывающими нейтронами. Основная трудность интерпретации данных в этой работе связана с эффектом "cross talk", так как при наличии сильных корреляций между нейтронами гало и при условии сохранения этих корреляций в ходе  $\beta$ -распада нейтроны из ядра будут вылетать с близкой энергией и малым углом разлета, что при детектировании даст сигналы в соседних детекторах с близким временем пролета, а это является характерным признаком и "cross talk". При использовании для детектирования  $\beta$ -запаздывающих нейтронов  $^3\text{He}$ -счетчиков эффект "cross-talk" исключается самим принципом регистрации нейтронов в реакции поглощения, а углового разрешения нашего детектора достаточно при сильных корреляциях между нейтронами. Порог 350 кэВ в работе [5а] и отсутствие порога в нашем детекторе, по-видимому, не играет существенной роли с учетом данных об энергиях нейтронов. Вероятность эмиссии двух нейтронов после  $\beta$ -распада  $^{11}\text{Li}$  составляет от 4.1% [11] до 15.2% по нашим измерениям. При эффективности детектора 36% и при интенсивности пучка  $^{11}\text{Li}$  100 частиц/с будет регистрироваться от  $4 \cdot 10^4$  до  $1.6 \cdot 10^5$  угловых корреляций в сутки, т.е. будет набираться статистика в несколько раз лучше, чем на рис. 5.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные параметры детектора:

- энергетический порог практически отсутствует;
- эффективность регистрации нейтронов делительного спектра  $\epsilon = 0.36 \pm 0.02$ ;
- время жизни нейтронов 25 мкс;
- угловое разрешение около 20 градусов;
- эффект "cross talk" отсутствует.

Авторы выражают глубокую благодарность профессору Ю.П.Оганесяну за внимание к данной работе и полезные обсуждения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ter-Akopian G.M. et.al., NIM, 1981, v.190, p.119.
- [2] Lukyanov S.M. et.al., In: Proc. of the Int.Conf. on Exotic Nuclei, Foros, Crimea, 1991. World Scientific Publishing Co., Singapore, 1992, p.415.
- [3] Orr N.A. et.al. Phys.Rev.C, 1995, v.51, p.3116.
- [4] Jonson B. Nucl.Phys.A, 1995, v.583, p.733.
- [5] Belbot M.D. et.al. Phys.Rev.C, 1995, v.51, p.2372.
- [5a] Yu.Ts.Oganessian, D.J.Morrissey, D.Basin et.al., FLNR Scientific Report 1991-1992, E7-93-57, 1993, Dubna, p.88.
- [6] Galonsky A. et.al., In: Proc. of CORINNE-II - Int.Workshop on Multiparticle Correlations and Nuclear Reactions, Nantes, France, September 6-10, 1994 (unpublished).
- [7] Holden N.E. and Zucker M.S. In: Nucl.Data for Basic and Applied Science, Proc. of the Int.Conf., Santa Fe, New Mexico, 13-17.05.85, v.2, p.1631.
- [8] Г.Корн и Т.Корн, Справочник по математике, "Наука", М., 1974, с.78.
- [9] Bowman H.D. et.al., Phys.Rev., 1962, v.126, p.2120.
- [10] Pringle J.S. and Brooks F.D., Phys. Rev. Lett., 1975, v.35, p.1563.
- [11] Bjornstad T.B. et.al., Nucl. Phys.A., 1981, v.359, p.1.
- [12] Ajzenberg-Selove F., Nucl. Phys. A., 1990, v.506, p.1.

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 июня 1996 года.

Сокол Е.А. и др.

P7-96-225

Детектор для измерения множественности  
и угловых корреляций нейтронов

Описывается детектор нейтронов на основе пропорциональных счетчиков, заполненных  $^3\text{He}$ , для исследований множественности и угловых характеристик нейтронов, возникающих при распадах легких нейтроноизбыточных ядер. Эффективность регистрации нейтронов составила 0,36, угловое разрешение — около 20°, энергетический порог и эффекты перерасеяния практически отсутствуют.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н.Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1996

## Перевод авторов

Sokol E.A. et al.

P7-96-225

A Detector for Measuring the Multiplicities  
and the Angular Correlations of Neutrons

A neutron detector utilizing  $^3\text{He}$ -filled proportional counters is described intended for researching the multiplicities and the angular characteristics of the neutrons originated in the decay of light neutron-rich nuclei and having a neutron detection efficiency of 0.36, an angular resolution of about 20°, practically a zero energy threshold, being virtually cross talk-free.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.