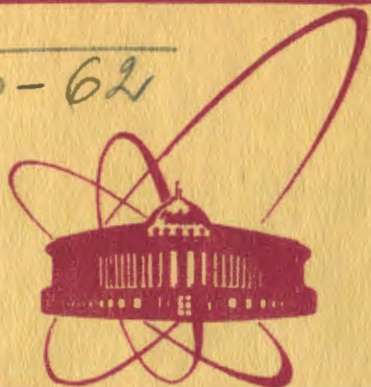


B-62



♀  
объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
дубна

2292/2-81

11/5-81  
P3-80-880

Во Дак Банг, Ю.П.Гангский, М.Б.Миллер,  
Л.В.Михайлов, Фам Зуи Хиен, И.Ф.Харисов

ЭМИССИЯ НЕЙТРОНОВ ИЗ ЯДРА  ${}^9\text{Be}$   
ПОД ДЕЙСТВИЕМ  $\beta^+$  и  $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЯ,  
ИСПУСКАЕМОГО ПРИ РАДИОАКТИВНОМ  
РАСПАДЕ

Направлено на V конференцию  
по нейтронной физике, Киев, 1980 г.

1980

Ядро  $^9\text{Be}$  имеет наименьшую среди стабильных ядер энергию связи нейтрона /1,667 МэВ/. Поэтому ядерные реакции  $^9\text{Be}$  с различными бомбардирующими частицами, как искусственно ускоренными, так и испускаемыми при радиоактивном распаде, характеризуются наибольшим выходом нейтронов. Эти реакции широко используются в качестве источников нейтронов. В последнее время получили распространение источники, которые основаны на реакции  $^9\text{Be}(\gamma, n)$ , вызываемой  $\gamma$ -излучением, испускаемым при радиоактивном распаде изотопов /чаще всего используется радиоактивный изотоп  $^{124}\text{Sb}$ /. Такие источники просты в изготовлении, удобны в обращении и могут успешно применяться для нейтронно-активационного анализа /1-3/. Поэтому расширение круга используемых изотопов и выяснение механизма образования нейтронов представляет определенный интерес. Целью данной работы было измерение выхода нейтронов под действием  $\beta^+$ - и  $\gamma$ -излучения, испускаемого при радиоактивном распаде целого ряда изотопов, и определение вклада в этот выход от позитронов и  $\gamma$ -квантов различных энергий. В опытах использовались изотопы  $^{11}\text{C}$ ,  $^{62}\text{Cu}$ ,  $^{66}\text{Ga}$ ,  $^{74g}\text{Br}$  и  $^{74m}\text{Br}$ . Характеристики распада этих изотопов: период полураспада  $T_{1/2}$ ; максимальная энергия  $E_{\beta}$ ; выход позитронов  $Y_{\beta}$  и  $\gamma$ -квантов с энергией выше 1,667 МэВ  $Y_{\gamma}/E \geq 1,667 \text{ МэВ/}$  на один акт распада изотопа, а также реакции их получения, представлены в табл.1. Указанные изотопы были получены при облучении соответствующих мишеней /в виде тонких фольг/ на изохронном циклотроне У-200 и микротроне Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Активности изотопов составляли несколько мКи.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Используемые изотопы размещались непосредственно на бруске бериллия размером  $10 \times 5 \times 1 \text{ см}^3$ , который располагался на блоке из парафина. Этот блок служил замедлителем испускаемых из бериллия нейтронов; внутри него находился нейтронный счетчик типа СМ-14, с помощью которого измерялся выход нейтронов в зависимости от времени. Представленные на рис. 2 зависимости соответствуют периодам полураспада используемых изотопов и указывают на то, что регистрируемые нейтроны возникают в результате взаимодействия  $\beta^+$ - и  $\gamma$ -излучения, испускаемого при радиоактивном распаде. В случае активности, полученной в реакции  $^{65}\text{Cu} + ^{12}\text{C}$ , четко видны два периода, соответствующие основному и изомерному состояниям изотопа  $^{74}\text{Br}$ .

Таблица 1

Характеристики распада используемых изотопов и реакции их получения

Изотоп	Реакция получения	$T_{1/2}$	$E_{\beta}$ , МэВ	$\gamma_{\beta}$ %	$\gamma_{\gamma}$ % / $E \geq 1,667 \text{ МэВ}$
$^{11}\text{C}$	$^{12}\text{C}(\gamma, n)$	20,3 мин.	0,930	100	- / 4/
$^{62}\text{Cu}$	$^{63}\text{Cu}(\gamma, n)$	9,7 мин.	2,949	97	0,06 / 5/
$^{66}\text{Ga}$	$^{65}\text{Cu}(\alpha, n)$	9,4 ч.	4,175	57	48 / 6/
$^{74g}\text{Br}$	$^{65}\text{Cu}(^{12}\text{C}, 3n)$	25,3 мин.	5,918	90	88 / 7/
$^{74in}\text{Br}$	$^{65}\text{Cu}(^{12}\text{C}, 3n)$	41,5 мин.	6,110	92	53 / 7/

Результаты измерений - выход нейтронов, отнесенный на один акт распада используемого изотопа, - представлены в табл. 2. Известно, что эмиссия нейтронов при взаимодействии  $\beta^+$ -и  $\gamma$ -излучения с ядрами вызывается следующими процессами:

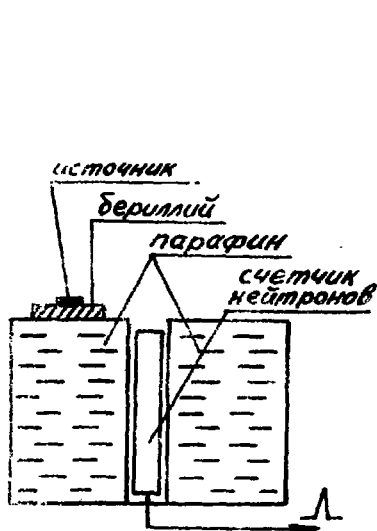


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

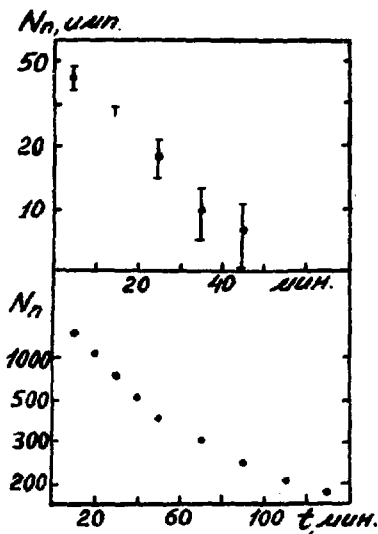


Рис. 2. Зависимость выхода нейтронов от времени: вверху - изотоп  $^{62}\text{Cu}$ ; внизу - изотоп  $^{74}\text{Br}$ .

1/ поглощением дискретных  $\gamma$ -квантов, испускаемых при радиоактивном распаде используемых изотопов;

2/ поглощением  $\gamma$ -квантов непрерывного спектра, возникающих при торможении позитронов в веществе /при этом происходят излучение тормозное и излучение вследствие аннигиляции позитронов на лету/;

3/ неупругим рассеянием позитронов, приводящим к возбуждению уровней  ${}^9\text{Be}$ ;

4/ безрадиационной аннигиляцией позитронов на К-оболочке атомов  ${}^9\text{Be}$ .

Вклад каждого из этих процессов определяется энергетическим спектром  $\beta^+$ - и  $\gamma$ -излучения и свойствами уровней ядра  ${}^9\text{Be}$ . Схема нижних уровней  ${}^9\text{Be}$ , их характеристики /энергия  $E$ ; спин и четность  $I^\pi$ ; полная  $\Gamma_0$  и радиационная  $\Gamma_\gamma$  ширины/ и способы разрядки<sup>/4/</sup> представлены на рис. 3. Основной особенностью уровней ядра  ${}^9\text{Be}$  является то, что все они расположены выше энергии связи нейтрона. Поэтому нейтронная ширина составляет преобладающую долю полной, и возбуждение любого из уровней приводит к эмиссии нейтрона.

Эти данные об уровнях  ${}^9\text{Be}$  позволяют вычислить сечения указанных выше процессов и зависимость сечений от энергии позитронов и  $\gamma$ -квантов. Такие вычисления были выполнены с помощью выражений для сечений, приведенных в работах<sup>/8/</sup> - для фотопоглощения, в<sup>/9/</sup> - для неупругого рассеяния позитронов и в работе<sup>/10/</sup> - для безрадиационной аннигиляции позитронов. Один из примеров расчета - зависимость сечения реакции  ${}^9\text{Be}(\gamma, n)$  от энергии  $\gamma$ -квантов - представлен на рис. 4. Для сравнения

Таблица 2

Выход нейтронов из различных изотопов под действием  $\beta^+$ - и  $\gamma$ -излучения

Изотоп	Выход, $\frac{1}{\text{расп.}}$
${}^{11}\text{C}$	$\leq 10^{-6}$
${}^{62}\text{Cu}$	$5 \cdot 10^{-6}$
${}^{66}\text{Ga}$	$2 \cdot 10^{-4}$
${}^{74g}\text{Br}$	$3 \cdot 10^{-4}$
${}^{74m}\text{Br}$	$2 \cdot 10^{-4}$

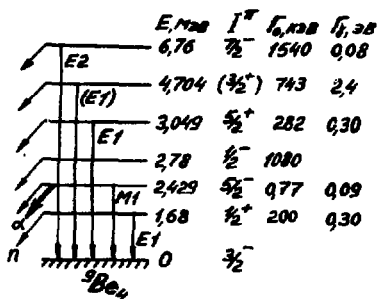


Рис. 3. Схема нижних уровней ядра  ${}^9\text{Be}$ .

приведена аналогичная зависимость, измеренная на опыте<sup>11/</sup> Видно хорошее согласие обеих зависимостей. Узкий и высокий резонанс при энергии 2,429 МэВ оказался на экспериментальной кривой значительно ниже и шире из-за конечного энергетического разрешения пучка  $\gamma$ -квантов /несколько десятков кэВ/.

Использование рассчитанных зависимостей сечений от энергии, а также известных спектров  $\beta^+$ -и  $\gamma$ -излучения<sup>4-7/</sup> позволяет определить вклады от указанных выше процессов в наблюдаемый выход нейтронов. С другой стороны, эти же величины вкладов можно получить из представленных в табл. 2 экспериментальных данных. Спектры и интенсивности  $\beta^+$ -и  $\gamma$ -излучения используемых в опытах изотопов, как видно из табл. 1, существенно различаются, поэтому для каждого из изотопов преобладает вклад одного из указанных процессов. Например, в случае изотопа  $^{14}\text{C}$  энергия позитронов такова, что эмиссия нейтронов может иметь место лишь при безрадиационной аннигиляции позитронов. С ростом энергии позитронов /изотоп  $^{62}\text{Si}$ / эмиссия нейтронов оказывается возможной при неупругом рассеянии позитронов и при фотопоглощении  $\gamma$ -квантов, возникающих при торможении позитронов. Для разделения вкладов от этих процессов между облучен-

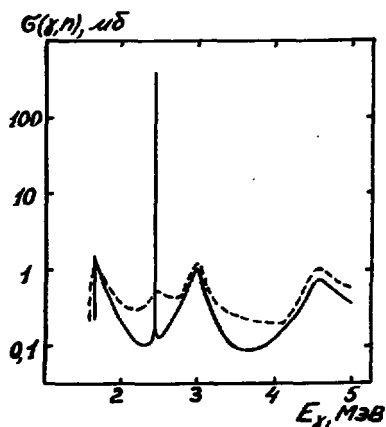


Рис. 4. Зависимость сечения реакции  $^8\text{Be}(\gamma, n)$  от энергии  $\gamma$ -квантов: — — расчетные; --- — экспериментальные данные<sup>11/</sup>.

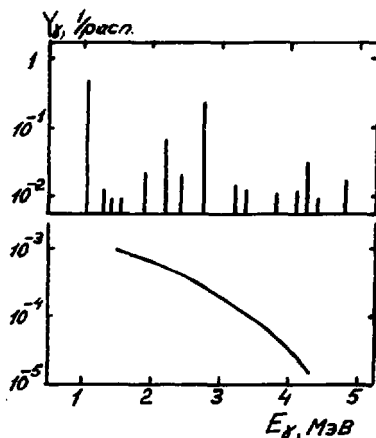


Рис. 5. Спектры  $\gamma$ -излучения изотопа  $^{66}\text{Ga}$ : сверху — дискретные  $\gamma$ -линии; внизу — непрерывный спектр, возникающий вследствие торможения позитронов.

ной медной фольгой и бруском бериллия помещались поглотители из различных материалов (Al, Cu, Pb), толщина которых превышала длину пробега позитронов. В результате наблюдалось повышение выхода нейтронов, связанное с ростом атомного номера поглотителя. Это означало, что выход нейтронов обусловлен  $\gamma$ -излучением, возникающим при торможении позитронов. Из табл. 2 видно, что наибольший выход нейтронов происходит у изотопов, при распаде которых испускается большое число  $\gamma$ -квантов с энергией выше 1,667 МэВ ( $^{66}\text{Ga}$ ,  $^{74}\text{Br}$ ). Один из примеров такого спектра представлен на рис. 5. Использование в этих случаях поглотителя для позитронов не уменьшало выхода нейтронов; это свидетельствует о том, что источником нейтронов являются жесткие  $\gamma$ -кванты, а непрерывный спектр от торможения позитронов играет малую роль.

Таким образом, проведенные эксперименты и расчеты позволяют достаточно определенно судить о вкладе различных процессов в эмиссию нейтронов из ядра  $^9\text{Be}$  под действием  $\beta^+$ - и  $\gamma$ -излучения.

1. Основной вклад в эмиссию нейтронов вносит жесткое  $\gamma$ -излучение /с энергией выше 1,667 МэВ/. Выход нейтронов из толстой бериллиевой мишени достигает  $5 \cdot 10^{-4}$  на один  $\gamma$ -квант /то есть того же порядка, что и в случае широко используемого изотопа  $^{124}\text{Sb}$ / и сравнительно слабо зависит от спектра  $\gamma$ -излучения.

2. Выход нейтронов под действием позитронов почти на два порядка ниже; он связан с  $\gamma$ -излучением, возникающим при взаимодействии позитронов с веществом.

3. Другие процессы взаимодействия позитронов с ядром  $^9\text{Be}$  /неупругое рассеяние и безрадиационная аннигиляция/ практически не вносят вклада в наблюдаемый выход нейтронов.

В заключение авторы выражают благодарность Г.Н.Флерову и Ю.Ц.Оганесяну за постоянный интерес к работе, а также А.Г.Белову и Н.В.Пронину за помощь при облучениях образцов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Tolmie R.W., Thompson C.J. Nuclear Techniques and Mineral Resources, IAEA, Vienna, 1969, p. 489.
2. Выропаев В.Я., Бурмистенко Ю.Н. ОИЯИ, 18-80-584, Дубна, 1980.
3. Тетерев Ю.Т., Замятин Ю.С., Кучер А.М. ОИЯИ, 18-80-599, Дубна, 1980.
4. Ajzenberg-Selove F. Nucl. Phys., 1979, A320, p. 1.
5. Auble R.L. Nucl. Data Sheets, 1979, 26, p. 5.
6. Chaubert M.L. Nucl. Data Sheets, 1975, 16, p. 383.

7. Kocher D.S. Nucl.Data Sheets, 1976, 17, p. 519.
8. Ишханов Б.С., Капитонов И.М. Взаимодействие электромагнитного излучения с ядрами. Изд-во МГУ, М., 1979.
9. Berger W.C. Ann.Rev.Nucl.Sci., 1962, 12, p. 1.
10. Present R.D., Chen S.C. Phys.Rev., 1952, 85, p. 447.
11. Jacobson M.J. Phys.Rev., 1961, 123, p. 229.

Рукопись поступила в издательский отдел  
30 декабря 1980 года.