

ВЫХОДЫ НЕЙТРОНОВ ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ ТОЛСТЫХ МИШЕНЕЙ ИОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ НИЖЕ 1,75 МэВ/нуклон

*К. Б. Гикал^а, Ю. Г. Тетерев^а, М. В. Здоровец^{б,в},
И. А. Иванов^{б,в}, М. В. Колобердин^{б,в}, С. Г. Козин^в*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Астанинский филиал Института ядерной физики РК, Астана

^в Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана

В эксперименте на циклотроне ДЦ-60 филиала Института ядерной физики в Астане измерены выходы нейтронов при облучении толстых мишеней: LiF, Be, C, Al, Al₂O₃ и Cu — ионами Li, C и N с энергией ниже 1,75 МэВ/нуклон. Измерены угловые распределения нейтронов из мишеней, предложена эмпирическая формула, описывающая результаты этих измерений. Проведено сравнение результатов измерения выходов нейтронов с расчетами, выполненными с использованием программы LISE++. Установлено, что измеренные и рассчитанные выходы нейтронов в реакциях совпадают с точностью до коэффициента 2.

The yields of neutrons produced in thick targets: LiF, Be, C, Al, Al₂O₃ and Cu at irradiation by Li, C and N ions with energies below 1.75 MeV/nucleon are measured at the DC-60 cyclotron at the branch of Institute of Nuclear Physics (Astana, Kazakhstan). The experimental angular distributions of the neutron yield are obtained and the empirical formula describing the distributions is proposed. The measured neutron yields are compared with the ones calculated by the program code LISE++. Measured and calculated neutron yields in the reactions coincide to within a factor of 2.

PACS: 25.-70.Jj

В настоящее время ускорители тяжелых ионов стали важным инструментом как для выполнения научных исследований, так и для внедрения ядерных технологий в промышленность. Выбор типа ускорителя в каждом конкретном случае определяется поставленными целями и списком задач. В работе [1] приводится обоснование выбора параметров ускорителя, энергии ионов и интенсивности пучка для решения научных и прикладных задач, поставленных перед исследовательским центром при Евразийском национальном университете (Астана). Отмечено, что главной задачей использования ускорителя является подготовка высококвалифицированных научных кадров. Основным способом подготовки является участие студентов и преподавателей в научно-исследовательской работе по самым актуальным направлениям.

В работе [1] представлена программа научных и прикладных исследований, дающая убедительное обоснование для создания специализированного циклотрона тяжелых ионов на энергию 1,35–1,8 МэВ/нуклон в научном центре при университете. Циклотрон

ДЦ-60, запущенный в МНИК ЕНУ в 2006 г., является оптимальным с точки зрения актуальности исследований для внедрения наукоемких ядерных технологий в промышленные процессы. Вместе с тем он обладает низким энергопотреблением, небольшими габаритами и не представляет радиационной опасности. Циклотрон ДЦ-60 создан с использованием современной техники, он оборудован, в том числе, современным источником ионов электронно-циклотронного резонанса.

Одной из задач при проектировании ускорителей является расчет и оптимизация биологической защиты от радиационного излучения. К сожалению, для точного прогнозирования радиационных полей в указанном диапазоне энергий в литературе недостаточно экспериментальных данных. В расчетах необходимо учитывать не только прямые реакции с выходом нейтронов, но и эффекты вторичных реакций. В работе [2] показано, что при облучении тяжелыми ионами легких мишеней, например $^{136}\text{Xe} + ^{12}\text{C}$, даже с энергией ниже пороговой возможно излучение нейтронов в результате вторичных реакций, которые происходят из-за того, что энергия ядер отдачи углерода при упругом рассеянии ксенона на углероде может достигать 6 МэВ/нуклон, что намного выше кулоновского барьера для реакции $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$, вследствие чего может происходить реакция слияния ядер отдачи с ядрами мишени, которая сопровождается испусканием нейтронов. Не исключено сочетание пучков ускоренных ионов и мишеней, когда образуются нейтроны в результате прямых реакций в диапазоне низких энергий 1,5–1,7 МэВ/нуклон.

Наиболее близкими к исследуемому диапазону энергий тяжелых ионов являются результаты измерений выходов нейтронов в работах [3] и [4], но этих данных недостаточно, и получены они при больших энергиях. Кроме того, в работе [3] отмечается относительно низкий выход нейтронов для реакций с ионами Li, что требует дополнительного изучения и проверки.

Целью данной работы является исследование выхода нейтронов при различных сочетаниях материала мишени и типа ускоренных ионов при энергиях ниже 1,75 МэВ/нуклон. Измерения проводились на циклотроне ДЦ-60 [5] МНИК.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерений выходов нейтронов использовался детектор нейтронов СНМ-16 в водяном замедлителе диаметром 150 мм. Детектор имеет область чувствительности в широком спектре энергий нейтронов [6]. Детектор располагался в медианной плоскости циклотрона на высоте 1300 мм над уровнем пола из бетона.

В экспериментах по измерению выходов нейтронов и их угловых распределений облучаемая мишень располагалась в боксе, находящемся в конце канала транспортировки пучка на расстоянии около 8 м от циклотрона. Излучение от ускорителя не вносило заметного вклада в результаты измерений.

Перед боксом располагался блок диагностики, в котором последовательно размещены подвижные многопроволочный профилометр пучка и цилиндр Фарадея для измерения формы и интенсивности пучка. С использованием фокусирующих элементов канала транспортировки на мишени размером 5×10 см и толщиной 1 см формировался пучок диаметром 2–3 см. Ток пучка ионов предварительно измерялся цилиндром Фарадея. Контроль стабильности пучка в процессе облучения осуществлялся путем измерения тока с мишени, которая была установлена на электрически изолированном держателе. В эксперименте колебания тока пучка не превышали 5 %.

Калибровка детектора сделана путем установки на место мишени Pu–Be-источника с выходом нейтронов $(4,8 \pm 0,3) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. При таком способе калибровки автоматически учитывается эффект ослабления потока нейтронов всем окружающим источником веществом.

В экспериментах использовались мишени из LiF, Be, C, Al, Al₂O₃ и Cu.

Облучения мишеней проводились:

- пучками ионов Li с энергией 0,72; 0,98 и 1,33 МэВ/нуклон;
- пучками ионов C с энергией 1,3; 1,47 и 1,72 МэВ/нуклон;
- пучками ионов N с энергией 0,7; 1,02 и 1,67 МэВ/нуклон.

Мишень из LiF выбрана с целью исследования выходов нейтронов в инверсной кинематике, когда Li облучается ионами других элементов, которые могут быть ускорены на ДЦ-60 до энергии 1,72 МэВ/нуклон.

Мишень из Al₂O₃ выбрана исходя из того, что этот материал часто используют в качестве люминофоров при измерении профиля пучка в каналах транспортировки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Выход нейтронов из толстой мишени при бомбардировке ее ионами определялся путем интегрирования измеренных угловых распределений нейтронов. Измерения проводили на расстоянии 1–2 м от мишени под углами 0, 15, 30, 45, 60, 90, 135 и 150° к направлению оси пучка.

Перед каждой серией измерений, в которой изменялся тип ионов или их энергии, измерялся фон нейтронов, вызванный потерями пучка в циклотроне или в канале транспортировки, для чего на место мишени помещалась пластина из тантала. Пороговая энергия для ядерных реакций на тантале для всех указанных выше ионов существенно выше исследуемого диапазона энергий, и выход нейтронов из такой мишени пренебрежимо мал.

Установлено, что вклад фоновых нейтронов во всех случаях не превышал 10 % от выхода нейтронов из исследуемых мишеней, тем не менее он учитывался при обработке результатов измерений.

Полученные угловые распределения описывались эмпирической формулой, предложенной в работе [7]:

$$f(\theta) = (4\pi \ln(1 + 1/\gamma)(\gamma + \sin^2 \theta/2))^{-1},$$

где θ — угол к направлению пучка, а γ — параметр, который подбирался для каждого измеренного распределения.

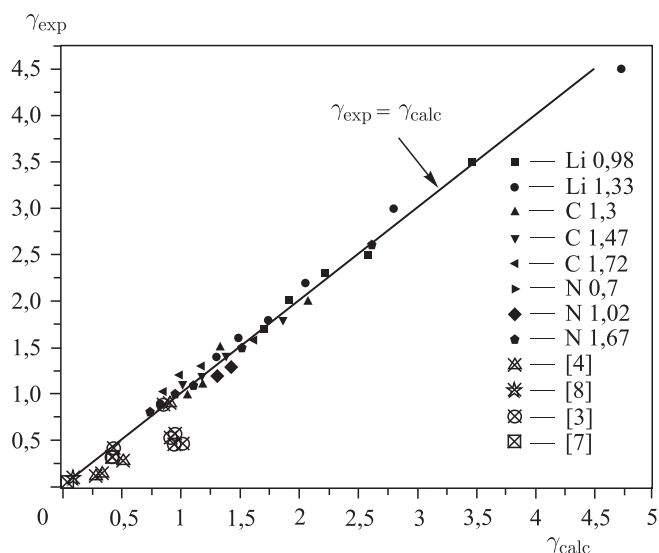
В результате обработки измеренных угловых распределений при различных сочетаниях масс ядер мишеней и бомбардирующих ядер, имеющих к тому же различные энергии, был получен большой набор параметров γ в диапазоне значений от 0,8 до 4,5 (табл. 1). Ошибка значений параметров γ при их подборе в зависимости от статистики составляет от 10 до 20 %.

Наличие такого массива данных дало возможность подобрать эмпирическую формулу для расчета параметра γ_{calc} :

$$\gamma_{\text{calc}} = 0,076(R + 130/R) - 1,8,$$

Таблица 1. Коэффициент γ в функции углового распределения нейтронов при бомбардировке толстых мишеней ускоренными ионами (ошибка измерения — $\pm 10-20\%$)

Мишень	Пучки ионов и их энергии, МэВ/нуклон								
	Li			C			N		
	0,72	0,98	1,33	1,3	1,47	1,72	0,7	1,02	1,67
LiF	2	1,7	1,4	1	0,95	0,8	1,5	1,2	0,8
Be	2,2	2	1,6	1,1	1,1	1,0	1,6	1,3	0,9
C	2,5	2,3	1,8	1,6	1,2	1,2	—	—	1
Al ₂ O ₃	—	2,5	2,2	—	1,4	1,3	—	—	1,1
Al	—	3,2	3	2,0	1,8	1,6	—	—	1,5
Cu	—	—	4,5	—	—	—	—	—	2,5

Рис. 1. Результаты сравнения параметра γ_{exp} , подобранного для измеренных угловых распределений нейтронов, с рассчитанным γ_{calc} по предлагаемой эмпирической формуле. Темными значками отмечены результаты, полученные в данной работе, светлыми — взятые из работ [3, 4, 7, 8]. В обозначении значков указано название иона и его энергия или ссылка на работу, из которой взяты результаты

где $R = [(A_p + A_t) amu/E_p]^{1/2}$, A_p и A_t — атомные веса ядер бомбардирующего иона и мишени соответственно, $amu = 931,5$ МэВ — атомная единица массы и E_p — полная кинетическая энергия иона в МэВ.

В процессе подбора этой формулы были использованы и результаты измерения параметра γ , представленные в работах [4, 7, 8] для другого диапазона энергий. Этот параметр был также извлечен из данных работы [3], где приведены плотности потока нейтронов, измеренные под углами 0 и 90°.

Таблица 2. Выходы нейтронов (нейтронов/ион) при бомбардировке толстых мишеней ускоренными ионами (ошибка измерения — $\pm 30\%$)

Мишень	Пучки ионов и их энергии, МэВ/нуклон								
	Li			C			N		
	0,72	0,98	1,33	1,3	1,47	1,72	0,7	1,02	1,67
LiF	1,0E-5	2,5E-5	6,1E-5	3,2E-6	8,2E-6	1,7E-5	1,0E-7	1,3E-6	2,2E-5
Be	1,7E-5	4,9E-5	1,3E-4	1,9E-5	3,0E-5	5,6E-5	4,7E-8	2,6E-6	4,0E-5
C	1,3E-6	8,3E-6	2,1E-5	8,4E-7	1,2E-6	2,4E-6	—	1,1E-7	1,1E-5
Al ₂ O ₃	1,7E-7	1,9E-6	7,8E-6	—	5,4E-7	2,2E-6	—	1,0E-8	4,0E-6
Al	3,1E-8	6,7E-7	6,3E-6	7,0E-8	2,3E-7	1,6E-6	—	3,2E-9	2,2E-6
Cu	—	—	1,3E-6	—	—	—	—	—	4,3E-7

На рис. 1 приведены результаты сравнения параметра γ_{calc} , вычисленного по предлагаемой эмпирической формуле, и параметра γ_{exp} , подобранного для некоторых из измеренных угловых распределений нейтронов. Там же приведены результаты измерения или оценки параметра γ_{exp} из работ [3, 4, 7, 8]. Приведенные здесь экспериментальные значения перекрывают диапазон энергий от 0,7 до 86 МэВ/нуклон.

Можно отметить удовлетворительное соответствие измеренных и рассчитанных значений параметра γ . Отклонение некоторых данных из работы [3] можно объяснить недостаточной точностью измерений плотности потока нейтронов под углами 0 и 90°.

В табл. 2 приведены измеренные значения выходов нейтронов. Ошибка измерения детектором нейтронов в замедлителе обусловлена главным образом тем обстоятельством, что функция чувствительности используемого детектора зависит от энергии нейтронов. Энергетические спектры измеряемых потоков нейтронов зависят от угла вылета нейтронов из мишени и вещества мишени, а также массы и энергии ионов пучка. К тому же энергетические спектры нейтронов, вылетающих из мишеней, отличаются от спектра Pu-Be-источника, использованного для калибровки. В большинстве работ, например в работе [8], ошибка в этом случае принимается равной 25%. Кроме того, в результаты измерений вносится ошибка, связанная с неточностью оценки выхода нейтронов Pu-Be-источника, нестабильностью тока пучка, неточностью подбора параметра γ , и статистическая ошибка. Общая ошибка измерения оценивается $\pm 30\%$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ВЫХОДОВ НЕЙТРОНОВ

Проведено сравнение результатов измерений, представленных в этой работе, и данных из [3] с результатами расчета выходов нейтронов с использованием программы LISE++ [9]. Расчеты проводились по последовательным тонким слоям мишени, в которых исследуемый ион терял одинаковую порцию своей энергии ΔE . Полный выход нейтронов из толстой мишени определялся суммированием по всем слоям, в которых происходили последовательные потери энергии. Выбор этой универсальной программы связан с тем, что ее наиболее часто используют экспериментаторы для своих текущих расчетов. Кроме того, программа LISE++ дает возможность экстраполяции полученных

зависимостей на другие ионы и другие энергии. Такие сопоставления делались ранее в наших работах [2] и [4] для других ионов. Было показано, что результаты расчета совпадают с экспериментальными данными в пределах коэффициента 2.

Сравнение измеренных экспериментально значений выходов нейтронов с расчетными данными дают рис.2 и 3. На рис.2 приведены зависимости выхода нейтронов из мишеней Be, C и Al от энергии бомбардирующих ионов Li. На рис.3 дана зависимость выхода нейтронов из мишени LiF при бомбардировке ее ионами Li, C и N с энергией до 1,8 МэВ/нуклон. Так же, как и в работах [2] и [4], результаты расчета совпадают с экспериментальными данными в пределах коэффициента 2.

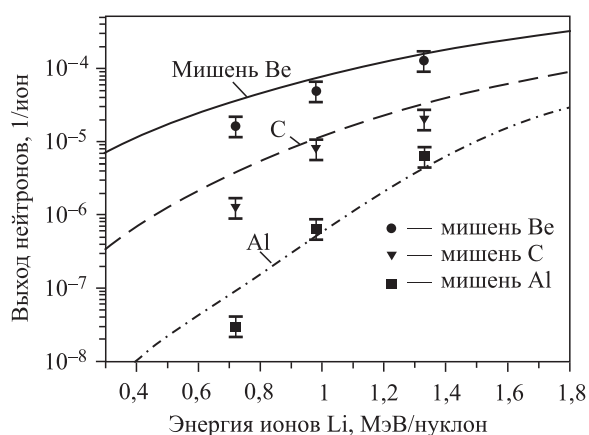


Рис. 2. Зависимость выхода нейтронов при облучении мишеней из Be, C и Al пучком ионов Li разной энергии: ● — результаты эксперимента при облучении мишени из Be; ▼ — мишени из C; ■ — мишени из Al; сплошная линия — результаты расчета выхода при облучении мишени из Be; штриховая — мишени из C и штрихпунктирная — мишени из Al

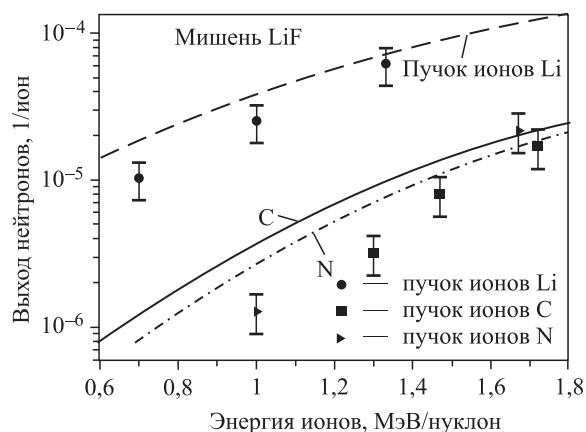


Рис. 3. Зависимость выхода нейтронов при облучении мишени LiF пучком ионов Li, C и N разной энергии: ● — результаты эксперимента при облучении ионами Li; ■ — ионами C и ► — ионами N; штриховая линия — результаты расчета выхода при облучении ионами Li; сплошная — ионами C и штрихпунктирная — ионами N

Аналогичный результат наблюдается и при сопоставлении экспериментальных и расчетных данных при других комбинациях бомбардирующих ядер и мишеней.

Несмотря на то, что наши эксперименты проведены при более низких энергиях, чем в работе [3], было показано, что выходы нейтронов в реакциях с ядрами Li в наших экспериментах выше при облучении тех же мишеней.

Следует отметить, что во всех проведенных измерениях наблюдается более сильное снижение выхода нейтронов с уменьшением энергии, чем это следует из расчетов, выполненных с использованием программы LISE++.

В реализованных экспериментах наблюдалось излучение нейтронов при облучении мишеней из меди с интенсивностью существенно выше, чем это следует из результатов расчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В эксперименте на циклотроне ДЦ-60 Института ядерной физики (Астана) измерены выходы нейтронов при облучении толстых мишеней из LiF, Be, C, Al, Al₂O₃ и Cu ионами Li, C и N, имеющими энергию ниже 1,75 МэВ/нуклон. Измерены также угловые распределения нейтронов из мишеней, предложена эмпирическая формула, описывающая результаты этих измерений. Проведено сравнение результатов измерений выходов нейтронов и расчетов, выполненных с использованием программы LISE++. Установлено, что расчеты позволяют оценить выходы нейтронов с точностью до коэффициента 2.

Авторы благодарны сотрудникам, обеспечивающим работу циклотрона ДЦ-60 АФ ИЯФ (Астана) за предоставленную возможность проведения измерений и поддержание бесперебойной работы ускорителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Школьник В.С. и др. Обоснование создания в Евразийском национальном университете им. Л. Н. Гумилева междисциплинарного научно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов. Препринт ДГП Ин-та ядерной физики, РГП Нац. ядерного центра Республики Казахстан, №22. Алма-Ата, 2003. 78 с.
2. Gikal B.N. et al. Secondary Fusion Reactions in the Bombardment of Light-Element Targets with Low-Energy Heavy Ions // Phys. Part. Nucl. Lett. 2014. V. 11, No. 4. P. 462–466 (Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, №4(188). С. 716–723).
3. Sunil C. et al. Neutron Yield and Dose Equivalent from Heavy Ion Interactions on Thick Target // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 534. P. 518–530.
4. Gikal B.N. et al. Neutron Yields from Structural Metals during Bombardment by Heavy Ions with 2.5 MeV/Nucleon Energy // Phys. Part. Nucl. Lett. 2014. V. 11, No. 2. P. 180–184 (Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, №2(186). С. 293–301).
5. Гикал Б.Н. и др. Циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий. Препринт ОИЯИ Р9-2007-104. Дубна, 2007; АЭ. 2007. Т. 103, №6. С. 357–364.
6. Мартинкович Й., Тимошенко Г.Н. Расчет функций чувствительности многосферного спектрометра нейтронов. Препринт ОИЯИ Р16-2005-105. Дубна, 2005.

7. *Clavier F. B., Zaidins C. S.* Neutron Dose Equivalent Rates Due to Heavy Ion Beams // Nucl. Instr. Meth. 1983. V. 217. P. 489–494.
8. *Aleinikov V. E. et al.* Neutron Radiation Field Due to 6.6 MeV/amu ^{58}Ni Ions Bombarding a Thick Cu Target // Rad. Protect. Dosimetry. 1985. V. 11, No. 4. P. 245–248.
9. *Tarasov O. B., Bazin D.* LISE⁺⁺: Radioactive Beam Production with In-Flight Separators // Nucl. Instr. Meth. B. 2008. V. 266. P. 4657–4664.

Получено 20 августа 2015 г.