

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 539.17

ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЙ ИСТОЧНИК ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ

Б. С. Ишханов, С. П. Лихачёв

(НИИЯФ)

E-mail: likhach@depni.sinp.msu.ru

Запуск в НИИЯФ МГУ ускорителя электронов — разрезного микротрона с энергией 70 МэВ — открывает большие возможности для генерации вторичных пучков фотонов и нейтронов. Настоящая работа посвящена изучению возможностей этого ускорителя для генерации вторичных пучков на мишенях различной толщины из ^{238}U .

Создание пучков вторичных частиц под действием ускоренных электронных пучков в настоящее время представляет особый интерес. При этом наиболее актуально создание вторичных пучков фотонов и нейтронов. Высокоинтенсивные пучки тормозных фотонов широко используются как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях. В частности, такие пучки могут быть использованы для целей радиационного контроля [1], получения широкого спектра радиоактивных изотопов [2]. Интенсивные пучки вторичных нейтронов могут быть получены при взаимодействии ускоренных электронов с мишенями из тяжелых материалов, и в частности при взаимодействии пучка электронов с энергией выше энергии гигантского дипольного резонанса ($E_\gamma \approx 15-20$ МэВ) с тормозной мишенью из естественной смеси изотопов урана.

Целью настоящей работы является изучение возможностей недавно запущенного в НИИЯФ разрезного микротрона с энергией 70 МэВ для генерации вторичных пучков на мишенях различной толщины из ^{238}U , составляющего 99.7% в естественной смеси изотопов.

Исследования выполнены на основе компьютерного моделирования. Была создана специальная программа на основе пакета GEANT3.21 (CERN) [3]. При проведении расчетов учитывались все основные процессы, происходящие при взаимодействии электронов с энергией 70 МэВ с атомами и атомными ядрами, — тормозное излучение электронов, комптоновское рассеяние, множественное рассеяние, эффект образования пар, фотоэффект, аннигиляция и реакция фотоделения. Результаты моделирования многократно проверялись на соответствие экспериментальным данным [3].

Так как реакция фотоделения на ^{238}U имеет низкий порог ($E_{\text{th}} = 6.2$ МэВ), большую величину интегрального сечения (1400 МэВ·мб) и в результате реакции фотоделения образуется 2 нейтрона на один акт деления [4], то нейтроны, образующиеся в реакции фотоделения, будут давать существенный вклад в полный выход нейтронов.

Блок-схема расчетной модели образования вторичных частиц показана на рис. 1.

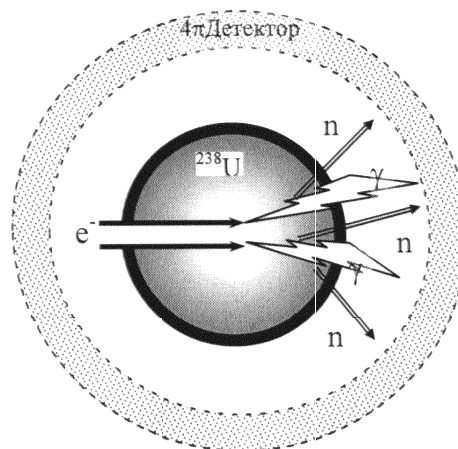


Рис. 1. Блок-схема расчетной модели образования вторичных частиц: e^- — вводимый внутрь ^{238}U сферы электронный пучок; 4π Детектор — 4π -детектор, регистрирующий образующиеся вторичные нейтроны (n) и фотоны (γ)

Электронный пучок от ускорителя с энергией $E = 70$ МэВ направлялся в центр сферической мишени из ^{238}U . В процессе моделирования рассчитывались следующие параметры частиц: тип частицы, направляющие косинусы вектора импульса, модуль импульса, полная и кинетическая энергии, координаты фотонов и нейтронов. Из этих данных были получены энергетические спектры частиц и значения полного выхода для образовавшихся в мишени и вышедших наружу частиц.

Расчеты выполнялись для следующих значений радиуса мишени из ^{238}U : 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 12.0 и 15 см.

На рис. 2 показаны спектры образовавшихся в мишени радиуса $R = 1$ см и вышедших из нее при облучении ее электронами с энергией 70 МэВ фотонов (а) и нейтронов (б). Полное число электронов, упавших на мишень, 10^6 .

Энергетический спектр фотонов (рис. 2, а) имеет характерный вид тормозного спектра с верхней границей 70 МэВ. Отношение полного числа образовавшихся фотонов к числу вылетевших из мишени ≈ 2 .

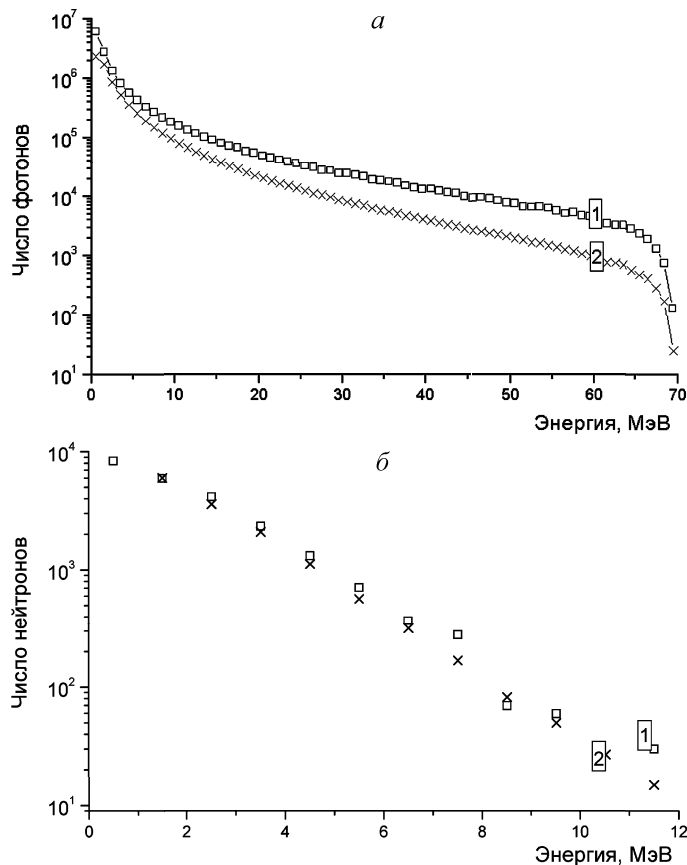


Рис. 2. Спектры вторичных γ -квантов (а) и нейтронов (б), образовавшихся в мишени и вышедших из нее (кривые 1 — образовавшиеся частицы, 2 — вышедшие частицы)

При этом наблюдается смещение в сторону меньших энергий спектра вышедших из нее фотонов, обусловленное процессами их перерассеяния в мишени.

Спектр нейтронов имеет форму, характерную для спектра нейтронов деления, и монотонно спадает вплоть до энергии 10–12 МэВ. Основная часть нейтронов расположена в области энергии < 6 МэВ. Спектры нейтронов, образовавшихся в мишени радиуса 1 см и вылетевших из нее, практически совпадают, что согласуется с оценками длины свободного пробега нейтронов в ^{238}U .

В таблице приведены числа нейтронов и фотонов, образовавшихся в мишени и вышедших из нее,

в зависимости от ее радиуса. В связи с тем что спектры фотонов и нейтронов существенно меняются в зависимости от энергии, в таблице наряду с полным выходом фотонов и нейтронов приведены зависимости выходов для рассматриваемых частиц в диапазонах энергий от 0 до 5 и от 5 до 70 МэВ.

Из данных, представленных в таблице, видно, что вплоть до значения радиуса мишени 2 см наблюдается наиболее существенный рост числа фотонов, при дальнейшем увеличении радиуса мишени число фотонов остается практически постоянным. За пределы же мишени выходит максимальное число фотонов при ее радиусе, равном 0.5–1 см, при этом наружу выходит незначительно меньшее количество фотонов, чем образуется в мишени. До значения радиуса 5 см наблюдается медленный спад числа вышедших фотонов, а при значении радиуса 10 см выход фотонов уменьшается на порядок величины по сравнению с радиусом 0.5–2 см. При значении радиуса 15 см количество вышедших фотонов составляет уже $\sim 10^{-4}$ от общего числа образовавшихся в мишени. Высокоэнергетическая доля фотонного спектра также нарастает при увеличении радиуса мишени до 2 см и затем остается практически постоянной. Низкоэнергетическая же часть фотонного спектра для значения радиуса мишени 0.2 см сравнима по величине с высокоэнергетической и с общим количеством рожденных фотонов. При дальнейшем увеличении радиуса урановой мишени она растет относительно медленно для рожденных фотонов, для вышедших фотонов она спадает с увеличением радиуса сферы до значения максимального количества $10^{-4} - 10^{-5}$.

Нейтроны слабее поглощаются в веществе мишени. Близкий к максимальному выход числа нейтронов наблюдается в диапазоне значений радиуса мишени от 2 до 10 см. При этом отличие числа рожденных от числа вышедших нейтронов не такое существенное, как для фотонов. При значении радиуса более 10 см доля поглощенных нейтронов сильно возрастает, рост общего числа рожденных нейтронов не прекращается, хотя и сильно замедляется. Максимальное значение числа вышедших нейтронов в

Выходы фотонов и нейтронов в зависимости от радиуса мишени ^{238}U

R, см	Фотоны				Нейтроны			
	Полный спектр		Диапазоны энергий 0–5/5–70 МэВ		Полный спектр		Диапазоны энергий 0–5/5–70 МэВ	
	Образ.	Вышед.	Образ.	Вышед.	Образ.	Вышед.	Образ.	Вышед.
0.2	$3.37 \cdot 10^6$	$3.03 \cdot 10^6$	$2.12 \cdot 10^6 / 1.25 \cdot 10^6$	$1.92 \cdot 10^6 / 1.12 \cdot 10^6$	$1.96 \cdot 10^3$	$1.35 \cdot 10^3$	$1.89 \cdot 10^3 / 7.1 \cdot 10^1$	$1.3 \cdot 10^3 / 4.9 \cdot 10^1$
0.5	$8.88 \cdot 10^6$	$6.38 \cdot 10^6$	$6.52 \cdot 10^6 / 2.35 \cdot 10^6$	$2.67 \cdot 10^6 / 1.06 \cdot 10^6$	$9.36 \cdot 10^3$	$4.50 \cdot 10^3$	$9.02 \cdot 10^3 / 3.4 \cdot 10^2$	$4.45 \cdot 10^3 / 5.0 \cdot 10^1$
1	$1.47 \cdot 10^7$	$7.30 \cdot 10^6$	$1.21 \cdot 10^7 / 2.67 \cdot 10^6$	$6.06 \cdot 10^6 / 1.24 \cdot 10^6$	$2.37 \cdot 10^4$	$1.41 \cdot 10^4$	$2.29 \cdot 10^4 / 8.1 \cdot 10^2$	$1.14 \cdot 10^4 / 0.6 \cdot 10^3$
2	$1.98 \cdot 10^7$	$3.87 \cdot 10^6$	$1.67 \cdot 10^7 / 3.08 \cdot 10^6$	$2.42 \cdot 10^6 / 6.8 \cdot 10^5$	$4.12 \cdot 10^4$	$3.72 \cdot 10^4$	$3.97 \cdot 10^4 / 2.7 \cdot 10^3$	$3.5 \cdot 10^4 / 2.0 \cdot 10^3$
5	$2.32 \cdot 10^7$	$4.91 \cdot 10^5$	$2.01 \cdot 10^7 / 3.17 \cdot 10^6$	$4.48 \cdot 10^5 / 6.4 \cdot 10^4$	$5.94 \cdot 10^4$	$4.44 \cdot 10^4$	$5.72 \cdot 10^4 / 2.12 \cdot 10^3$	$4.42 \cdot 10^4 / 2.0 \cdot 10^3$
10	$2.36 \cdot 10^7$	$1.5 \cdot 10^4$	$2.04 \cdot 10^7 / 3.18 \cdot 10^6$	$1.43 \cdot 10^4 / 8.22 \cdot 10^2$	$7.16 \cdot 10^4$	$4.20 \cdot 10^4$	$6.88 \cdot 10^4 / 2.63 \cdot 10^3$	$4.13 \cdot 10^4 / 1.4 \cdot 10^3$
12	$2.35 \cdot 10^7$	$5.89 \cdot 10^3$	$2.04 \cdot 10^7 / 3.18 \cdot 10^6$	$5.26 \cdot 10^3 / 6.3 \cdot 10^2$	$7.67 \cdot 10^4$	$4.17 \cdot 10^3$	$7.40 \cdot 10^4 / 2.69 \cdot 10^3$	$4.10 \cdot 10^3 / 2.0 \cdot 10^2$
15	$2.36 \cdot 10^7$	$2.28 \cdot 10^3$	$2.05 \cdot 10^7 / 3.17 \cdot 10^6$	$1.86 \cdot 10^3 / 4.26 \cdot 10^2$	$8.10 \cdot 10^4$	$5.67 \cdot 10^2$	$7.81 \cdot 10^4 / 2.88 \cdot 10^4$	$5.62 \cdot 10^2 / 5.0 \cdot 10^0$

спектре, согласно данным таблицы, достигается при значениях радиуса урановой мишени от 2 до 10 см.

Средний ток пучка электронов микротрона при максимальной энергии $E = 70$ МэВ составляет 15 мкА, что соответствует потоку $9.4 \cdot 10^{13}$ электронов в секунду. При таких параметрах ускорителя полное число образующихся в секунду фотонов составляет $1.9 \cdot 10^{15}$ фотонов/с. Выход нейтронов в секунду составляет $6 \cdot 10^{12}$ нейтронов/с. Ток ускорителя в импульсе составляет 15 мА. При этом число нейтронов в импульсе увеличивается на три порядка, что обеспечивает уникальные возможности для проведения экспериментов с регистрацией спектра нейтронов по времени пролета.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (грант НШ-1619.2003.2).

Литература

1. Ишханов Б.С., Гришин В.К., Лихачёв С.П. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2004. № 4. С. 29 (Moscow University Phys. Bull. 2004. N 4).
2. Ишханов Б.С., Павлов С.И. Воздействие интенсивных потоков γ -излучения на атомные ядра. М., 2003.
3. Brun R., Bruyant F., Maire M. et al. GEANT3.21 (User's Guide). CERN, Geneva, 1998.
4. Fesefeldt H.C. // Technical Report PITNA 85-02, III Physikalisches Institut, RWTHAachen Physikzentrum, 5100 Aachen. Germany, September 1985.

Поступила в редакцию
24.12.03