

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ С МИШЕНЯМИ ИЗ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.С.Барашенков, Л.Г.Левчук, Ж.Ж.Мусульманбеков,
А.Н.Соснин, С.Ю.Шмаков

Разработана статистическая монте-карловская модель для описания ядерно-физических процессов в мишенях из тяжелых элементов, облучаемых в пучке ионов с энергией вплоть до нескольких ГэВ/нуклон. Взаимодействие ионов с ядрами рассматривается на основе каскадно-испарительной модели с учетом деления. Учтены фрагментационные процессы. Результаты взаимодействия ионов ^4He и ^{12}C сопоставляются с соответствующими данными для пучков протонов и дейтронов.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Interaction of High Energy Ions with Targets Consisting of Heavy Elements

V.S.Barashenkov et al.

Statistical Monte-Carlo model for description of nuclear processes in targets consisting of heavy elements and irradiated by ion beams with energy up to several GeV per nucleon has been developed. Ion-nucleus interactions are considered in the framework of a cascade-evaporation model taking into account the fission process. Fragmentation processes are taken into consideration. Results of interactions produced by ^4He and ^{12}C ions are compared with corresponding data obtained for proton and deuteron beams.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Экспериментальными и теоретическими исследованиями многих авторов /см. обзоры ^{1,2}/, где приведена подробная библиография/ было показано, что мишени из делящегося вещества, урана или тория, облучаемые пучком высокоэнергетических частиц, могут служить источником нейтронов, по многим

параметрам сравнимым, а по некоторым даже существенно превосходящим мощные импульсные реакторы. В работах^{/3,4/} путем монте-карловского моделирования межъядерного каскада в большом блоке естественного урана вычислено среднее число нейтронов, рождаемых одним первичным протоном с энергией $T = 1$ ГэВ, $\langle n \rangle = 89 \pm 4^*$. Для ториевой мишени это число равно 55 ± 3 .

Многими авторами высказывалось предположение, что выход нейтронов будет больше в пучках ускоренных ионов. Расчеты показали^{/4,6/}, что в области $T \approx 1$ ГэВ замена пучка протонов дейтронами действительно увеличивает поток нейтронов приблизительно на 10-15%.

Нами разработана монте-карловская модель межъядерных каскадов в делящемся веществе под действием пучков более тяжелых ионов. Для описания неупругих столкновений ядер используется приближение внутриядерных каскадов с учетом конкурирующих между собой процессов испарения и деления возбужденного остаточного ядра. В области $T \leq 1$ ГэВ/нуклон и для не слишком тяжелых налетающих ядер такой подход хорошо согласуется с опытом, особенно когда речь идет о средних характеристиках взаимодействия^{/7,8/}. Упругое рассеяние ядер описывается в дифракционном приближении. Полные сечения упругих и неупругих ядерных взаимодействий σ_{el} и σ_{in} вычисляются в приближении внутриядерных каскадов и с помощью оптической модели, параметры которой подобраны из сравнения с известными экспериментальными данными.

При вычислениях прослеживаются как мезон-нуклонные каскады, так и каскады, инициируемые в веществе более тяжелыми фрагментами, образующимися при столкновениях ядер.

В остальных деталях вычисления мало отличаются от случая протонного или дейтронного пучка.

В таблице расчетные данные для α -частиц и ионов ^{12}C сопоставляются с соответствующими данными для пучков протонов и дейтронов^{**}. Для удобства сравнения приведены данные, поделенные на число нуклонов в налетающем ядре при одинаковой энергии $T = 1$ ГэВ/нуклон.

Как видно, выход нейтронов несколько возрастает при переходе к пучку дейтронов. Для α -частиц он практически такой же, как для протонов, а при использовании пучка ионов ^{12}C выход нейтронов снижается почти на четверть. Соответственно уменьшается и число ядерных взаимодействий

* Близкое значение было получено Ф.Алсмитлером^{/5/}.

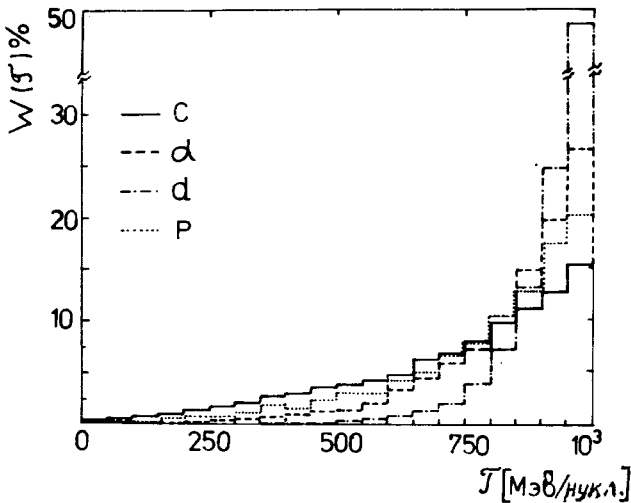
** Рассматривалась та же мишень, что и в^{/3,4,6/}: длина мишени 90 см, диаметр 120 см, пучок частиц попадает в осевую щель глубиной 26 см. Мишень состоит из металлического природного урана.

Таблица

Характеристики взаимодействия протонов и легких ядер с мишенью из естественного урана в расчете на один нуклон налетающего ядра при $T = 1$ ГэВ/нуклон. Указаны статистические погрешности расчета

	P	d	α	^{12}C
Число неупругих взаимодействий в мишени при $T < 10,5$ МэВ	340 ± 17	355 ± 18	317 ± 16	240 ± 30
Число захватов в ^{238}U	82 ± 4	94 ± 5	82 ± 4	61 ± 6
Число захватов в ^{235}U	$0,90 \pm 0,05$	$1,30 \pm 0,07$	$1,20 \pm 0,06$	$0,9 \pm 0,2$
Утечка нейтронов из мишени	$6,1 \pm 0,3$	$8,0 \pm 0,4$	$5,7 \pm 0,3$	$4,7 \pm 1,3$
Полный выход нейтронов	89 ± 4	103 ± 5	89 ± 4	67 ± 8
Тепловыделение в том числе: (ГэВ)	$4,6 \pm 0,25$	$5,1 \pm 0,25$	$4,8 \pm 0,25$	$3,8 \pm 0,5$
ионизация	$0,60 \pm 0,03$	$0,47 \pm 0,03$	$0,59 \pm 0,03$	$0,8 \pm 0,1$
деление при $T > 10,5$ МэВ*	$0,90 \pm 0,05$	$1,00 \pm 0,05$	$0,90 \pm 0,05$	$0,7 \pm 0,1$
деление при $T < 10,5$ МэВ*	$3,10 \pm 0,15$	$3,60 \pm 0,18$	$3,30 \pm 0,16$	$2,3 \pm 0,3$

* T - кинетическая энергия каскадной частицы.



Энергия, при которой происходит первое ядерное столкновение налетающей частицы в среде. По оси ординат отложена вероятность столкновения %/.

каскадных частиц внутри мишени, главным образом, в низко-энергетической области $\tau \leq 10$ МэВ. Такое поведение характеристик отражает конкуренцию между увеличением потерь энергии первичной частицы на ионизацию среды $\sim Z^2/M$, где Z - заряд частицы, M - ее масса/ и уменьшением длины пробега частицы до неупругого взаимодействия ($\sim 1/\sigma_{in}$). Средняя энергия, при которой первичный протон испытывает первое ядерное столкновение в среде, равна 760 ± 30 МэВ; нуклоны, входящие в состав первичных ионов 2D , 4He и ${}^{12}C$, первое ядерное взаимодействие испытывают, соответственно, при энергиях 920 ± 10 , 830 ± 30 и 630 ± 40 МэВ /см. рисунок; указаны статистические погрешности расчета/.

Для более тяжелых ионов снижение выхода нейтронов еще более заметно.

Литература

1. Барашенков В.С. ЭЧАЯ, 1978, т.9, с.871.
2. Васильков Р. и др. УФН, 1983, т.139, с.435.
3. Барашенков В.С., Шмаков С.Ю. АЭ, 1981, т.50, с.150.
4. Барашенков В.С. и др. ОИЯИ, 2-84-391, Дубна, 1984.
5. Alsmiller F.S. et al. ORNL/TM-7528, Oak Ridge, 1981.
6. Барашенков В.С. и др. АЭ, 1974, т.37, с.480.
7. Barashenkov V.S. et al. Zs.f.Phys., 1980, Bd.A296, s.371.
8. Барашенков В.С. и др. ЯФ, 1984, т.39, с.1133.