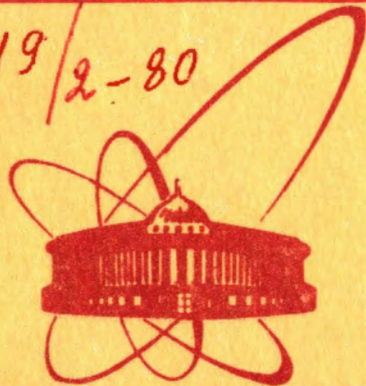


4949/2-80



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

20/4-80

P2-80-531

В.С.Барашенков, С.Ю.Шмаков

АНАЛИЗ ВЫХОДА НЕЙТРОНОВ,  
ОБРАЗОВАННЫХ ПРОТОНАМИ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ  
(По поводу статьи Й.Накахары и Х.Такахаши)

Направлено в АЭ

1980

В работе <sup>1/</sup> на основе теоретического анализа экспериментальных данных <sup>3/</sup> по взаимодействию протонов с энергией  $T = 0,3-0,66 \text{ ГэВ}^*$  с урановой мишенью в свинцовом экране сделан вывод о хорошем согласии с экспериментом метода расчетов, использованного авторами работы <sup>1/</sup>, и о существенном завышении выхода нейтронов при расчетах по методу <sup>2,4/</sup>, разработанному в Дубне. Нашей целью является показать, что этот вывод основан на недоразумении.

Прежде всего следует отметить, что различия обсуждаемых методов, связанные с пренебрежением в работе <sup>2/</sup> распадом  $\pi^\pm$ -мезонов и выбором постоянного значения параметра плотности  $a_n$  урней <sup>1/</sup>, на что особо обращают внимание авторы работы <sup>1/</sup>, несущественны. В области энергий, где выполнены измерения <sup>3/</sup>, мезонов вообще рождается очень мало /даже при  $T = 0,66 \text{ ГэВ}$  отношение числа  $\pi$ -мезонов к суммарной множественности вторичных частиц  $n_\pi/n_t \approx 1,5\%$ , а при больших энергиях распад нейтральных и заряженных мезонов рассчитывается монтекарловским розыгрышем с учетом релятивистского увеличения времени их жизни /все приведенные ниже данные выписаны с учетом распада мезонов/. Что касается зависимости параметра  $a_n$  от свойств распадающегося ядра, то это заметно сказывается лишь на выходе изотопов: множественность вторичных частиц, их энергия при этом практически не изменяются /см. табл. 1/ <sup>\*\*</sup>.

Значительно более важным различием работ <sup>1/</sup> и <sup>2,4/</sup> является то, что в работе <sup>1/</sup> для расчета взаимодействия высокоэнергетической частицы с ядром используется разработанная в Ок-Риджской лаборатории /США/ каскадно-испарительная модель /"код NMTC"/, в которой не учитывается процесс деления возбужденного остаточного /"послекаскадного"/ ядра <sup>8/</sup>.

\* Здесь и везде далее  $T$  - кинетическая энергия первичных протонов.

\*\* Кроме того, использованная в работе <sup>1/</sup> формула Ле Кутера очень груба /подробнее см. § 69 в книге <sup>5/</sup>. Существуют значительно лучшие параметризации величины  $a_n$ , однако уточнения существенно сказываются лишь в области слабо делящихся ядер <sup>6,7/</sup>.

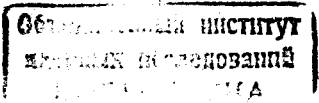


Таблица 1

Средняя кинетическая энергия и средняя множественность вторичных частиц, образующихся при распаде остаточного  $^{11}$ послекаскадного $^{11}$  ядра в реакции  $p + ^{238}\text{U}$ .

Индексами  $t$  и  $n$  отмечены величины, относящиеся соответственно ко всем вторичным частицам и только к нейтронам.

А - расчет в приближении  $a_n = 0,1$ ; Б - расчет с использованием формулы Ле Кутера. В обоих случаях учитывалась конкуренция процессов испарения и деления  $/a_t = a_n /$ . Указаны статистические погрешности расчета

	Т = 0,3 ГэВ		Т = 0,7 ГэВ	
	А	Б	А	Б
$\langle n_t \rangle$	$12,5 \pm 0,6$	$12,9 \pm 0,6$	$18,3 \pm 0,9$	$19,2 \pm 1,0$
$\langle n_n \rangle$	$12,4 \pm 0,6$	$12,9 \pm 0,6$	$17,3 \pm 0,9$	$18,5 \pm 0,9$
$\langle r_t \rangle$ , МэВ	$3,4 \pm 0,2$	$3,1 \pm 0,2$	$5,1 \pm 0,3$	$4,6 \pm 0,2$
$\langle r_n \rangle$ , МэВ	$3,4 \pm 0,2$	$3,1 \pm 0,2$	$4,4 \pm 0,2$	$4,1 \pm 0,2$

Наиболее обстоятельное сравнение разработанных в Дубне и в Ок-Ридже методов расчета взаимодействия высокоэнергетических частиц с делящимися средами выполнено Р.Г.Алсмитлером, Т.Габриэлем и Ж.Баришем<sup>/9/</sup>, которые в идентичных геометрических условиях получили приблизительно на 20-25% меньший выход нейтронов, чем в работах<sup>/2,4/</sup> \*. Если в нашей модели "выключить" конкуренцию процессов испарения и деления, то результаты расчета приближаются к данным Р.Г.Алсмитлера и др. /табл.2/ \*\*. Это объясняет также различие данных<sup>/1/</sup> и<sup>/2/</sup>, указанных на рис.5 работы<sup>/2/</sup>.

\* Мы благодарны Р.Г.Алсмитлеру за ознакомление с результатами этих расчетов до их опубликования.

\*\* Как показывают сравнительные расчеты, в области энергий, больших нескольких сотен МэВ, пренебрежение делением сравнительно слабо сказывается на множественности рождающихся частиц<sup>/10/</sup>. Однако при меньших энергиях  $/a$  средняя кинетическая энергия вылетающих из ядра каскадных частиц даже при  $T = 0,7$  ГэВ не превосходит сотни МэВ/ не учитывающая деление модель приводит к заниженной множественности частиц. Например, при  $T = 50$  и  $100$  МэВ среднее число частиц, рождающихся при неупругом взаимодействии  $p + ^{238}\text{U}$ , уменьшается соответственно на 35 и 25%.

Таблица 2

Среднее число  $(n, \gamma)$ -захватов в очень большой /практически бесконечной/ мишени из естественного урана, облучаемой протонами с энергией  $T$ .

Расчет выполнен с учетом /А/ и без учета /Б/ деления  $^{11}$ послекаскадного $^{11}$  ядра.

Т, ГэВ	Алсмитлер и др.	Наш расчет	
		А	Б
0,66	45	54	$37 \pm 4$
1,0	70	96	$63 \pm 6$
1,5	115	151	$100 \pm 10$

Важно подчеркнуть, что расчетные данные<sup>/2/</sup>, относящиеся к очень большой, практически бесконечной мишени, нельзя непосредственно сравнить с экспериментом<sup>/8/</sup>, где значительная часть нейтронов могла вылететь из мишени \*.

Результаты вычислений для уран-свинцовой мишени, применявшейся в эксперименте<sup>/3/</sup>, приведены на рис.1 и 2. Так же как в работе<sup>/2/</sup>, весь расчет распространения частиц в мишени выполнен методом Монте-Карло с использованием 26-групповой системы констант<sup>/11/</sup>; при этом рассматривалась реальная прямоугольная геометрия мишени без каких-либо упрощений /в работе<sup>/1/</sup> прямоугольная мишень заменялась цилиндрической/.

Рассчитанное нами суммарное число  $(n, \gamma)$ -захватов в мишени в пределах статистических погрешностей хорошо согласуется с экспериментом<sup>/3/</sup>; как видно из рис.1 - даже несколько лучше, чем результаты расчетов<sup>/1/</sup>. В то же время вычисленные и измененные дифференциальные распределения захватов различаются примерно в 1,5 раза. Более того, если теоретические значения суммарного числа захватов во всех случаях меньше экспериментальных, то расчетные дифференциальные распределения по своей величине, наоборот, превосходят экспериментальные.

\* В работе<sup>/1/</sup> неправильно указано, что расчеты<sup>/2/</sup> выполнены для случая изотропного источника протонов, расположенного в глубине мишени. В действительности рассматривался резко коллимированный пучок протонов, попадающий в узкую щель с глубиной около трети длины мишени.

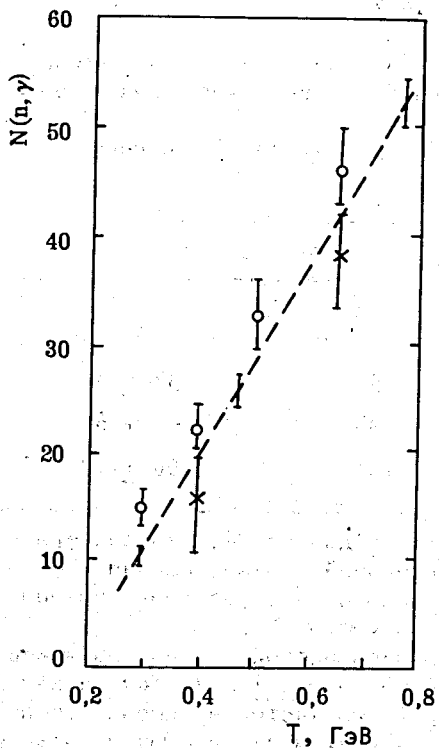
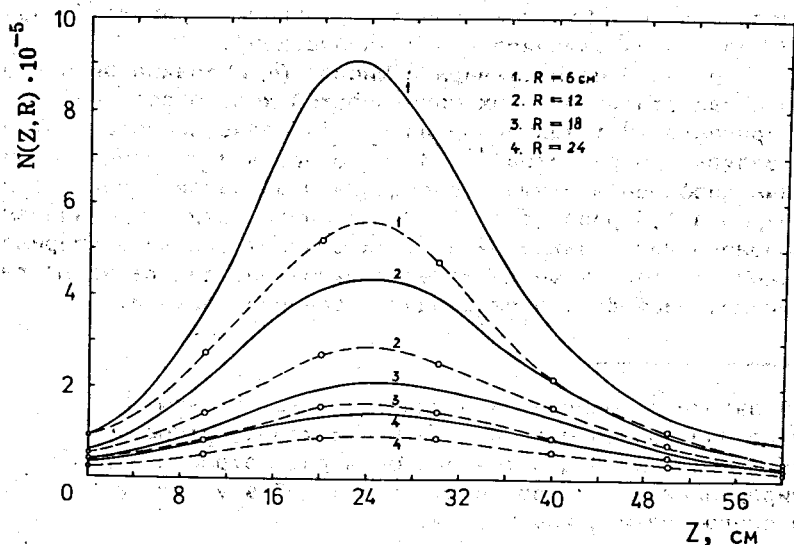


Рис.1. Число  $(p, \gamma)$ -захватов в мишени  $^{13}$  в расчете на один первичный протон. Пунктир - наш расчет /указаны статистические погрешности/. Значками X и O нанесены соответственно расчетные и экспериментальные данные из работ  $^{13}$ .

Рис.2. Распределение  $(p, \gamma)$ -захватов в мишени  $^{13}$  вдоль направления пучка протонов Z на различных расстояниях от оси пучка R /в расчете на один первичный протон и на один грамм материала мишени/. Сплошные кривые - наш расчет, пунктир и точки - экспериментальные данные  $^{13}$ .



Поскольку при теоретическом расчете суммарного числа  $(p, \gamma)$  захватов никаких дополнительных предположений не делается /просто суммируются все случаи захватов при любых R и Z/, то обнаруженное расхождение с экспериментом, по нашему мнению, указывает на противоречие между интегральными и дифференциальными данными работы  $^{13}$  и на необходимость более тщательной нормировки этих данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Накаха Я., Такахаши Х. АЭ, 1979, т.47, с.83.
2. Барашенков В.С. и др. АЭ, 1974, т.37, с.475.
3. Васильков Р.Г. и др. АЭ, 1978, т.44, с.329.
4. Барашенков В.С. ЭЧАЯ, 1978, т.9, с.871.
5. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. М., Атомиздат, 1972.
6. Ильинов А.С., Черепанов Е.А. Препринт ИЯИ, Р-0064, Москва, 1977.
7. Iljinov A.S. et al. Zs.f.Physik, 1978, v.A287, p.37.
8. Hahn R.L., Bertini H.W. Phys.Rev., 1972, v.C6, p.660.
9. Alsmiller R.G. Proc. of the Information Meeting on Accelerator-Breeding, held at Brookhaven National Laboratory 18-19 January 1977. BNL CONF - 770107, 1977.
10. Barashenkov V.S., Shmakov S.Ju. JINR, E2-12902, Dubna, 1979.
11. Абагян Л.П. и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 июля 1980 года.