

P1-2002-16

Д. Чултэм, Ц. Тумэндэлгэр\*, М. И. Кривопустов,  
Ш. Гэрбиш\*, Ц. Тумэндэмбэрэл\*, А. В. Павлюк,  
О. С. Заверюха

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ МАСС ОСКОЛКОВ  
ДЕЛЕНИЯ И ВЫХОДОВ  $(n, \gamma)$ - И  $(n, 2n)$ -РЕАКЦИЙ  
В ПОДКРИТИЧЕСКОМ УРАНОВОМ БЛАНКЕТЕ  
ЭЛЕКТРОЯДЕРНОЙ СИСТЕМЫ «ЭНЕРГИЯ ПЛЮС  
ТРАНСМУТАЦИЯ» НА ПРОТОННОМ ПУЧКЕ  
СИНХРОФАЗОТРОНА **ОИЯИ** ПРИ ЭНЕРГИИ 1,5 ГэВ

Направлено в журнал «Kerntechnik»

---

\*Государственный университет, Улан-Батор, Монголия

# 1 Введение

На пучках ускорительного комплекса синхрофазотрон/нуклотрон Лаборатории высоких энергий ОИЯИ (Дубна) начата серия экспериментов по исследованию энерговыделения в гетерогенной подкритической сборке, состоящей из свинцовой мишени и модели уранового бланкета. В нашей работе [1] подробно описан эксперимент по калориметрии электроядерной свинцовой мишени, а в работе [2] — первый эксперимент по калориметрии модели двухсекционного уранового бланкета, проведенный в ноябре 1999 г. на протонном пучке синхрофазотрона при энергии 1,5 ГэВ.

Описываемый в настоящей статье эксперимент (см. рис.1), выполненный в июне 2000 г., является очередным этапом этой серии; при этом форма и размеры модели двухсекционного уранового бланкета и тип использованных активационных детекторов остались прежними. Однако в этом облучении урановые активационные детекторы были размещены не только на центральной пластине, но и на передней и задней детекторных пластинах.

## 2 Эксперимент

Подробное обсуждение методики эксперимента, основных параметров ускорителя, вопросов мониторинга пучков и радиационной защиты, а также характеристик свинцовой нейтронно-генерирующей мишени и модели уранового бланкета приведены в нашей работе [2].

Облучение модели U/Pb-сборки продолжалось 2 ч. 40 мин. на протонном пучке синхрофазотрона; при этом флюенс составил  $4,0 \cdot 10^{13}$  протонов. На каждой из трех пластин было размещено по 8 активационных детекторов из металлического урана, изготовленных в виде таблеток (диаметр 8 мм, толщина 1 мм; масса  $\approx 0,95$  г).

Особенность данного эксперимента (по сравнению с описанным в работе [2]) состояла в том, что передние торцы (по ходу пучка) свинцовой мишени и уранового бланкета были совмещены, т.е. эти торцы составляют одну плоскость.

Спектры гамма-квантов изотопов, образовавшихся в активационных детекторах, измерялись с помощью HPGe-спектрометра высокого энергетического разрешения и высокой эффективности регистрации гамма-квантов. Последовательные измерения гамма-спектров короткоживущих и долгоживущих изотопов проводились после охлаждения не менее чем через 7 ч. и 7 дн. соответственно, при этом продолжительность измерений этих спектров составляла 0,5 и 2 ч.

На основе результатов обработки первичных спектров с помощью компьютерных

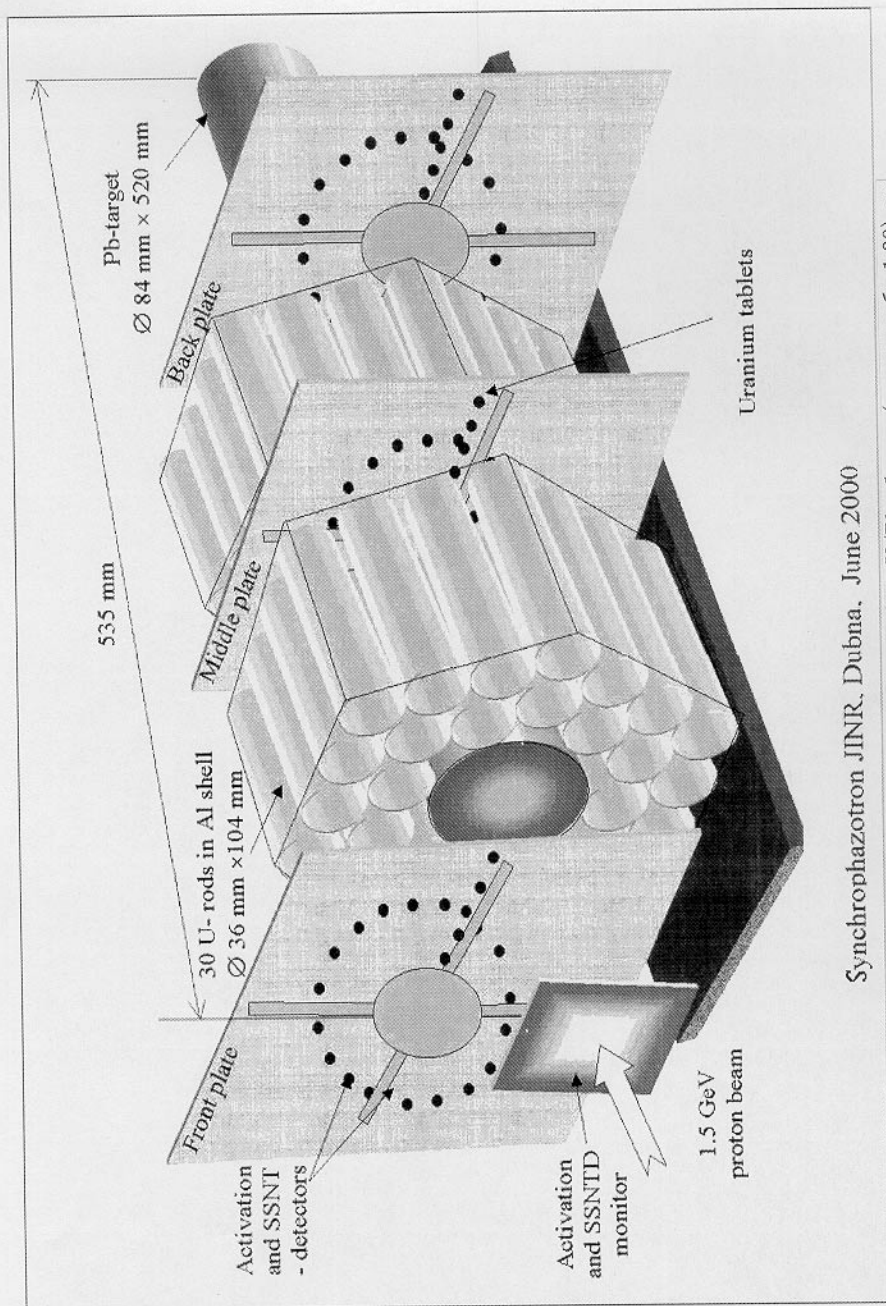


Рис. 1. Схема эксперимента по моделированию U/Pb-сборки (в масштабе 1:30) на протонном пучке синхротрона ОИЯИ (проект "Энергия плюс трансмутация")

программ были идентифицированы образовавшиеся в активационных детекторах радионуклиды и определены их выходы.

### 3 Спектры масс осколков деления и выходов $(n, \gamma)$ - и $(n, 2n)$ -реакций в естественном уране

После идентификации радионуклидов были рассчитаны кумулятивные и независимые выходы изобар осколков деления (см. табл. 1, которая приведена в Приложении) по алгоритму, описанному в работе [3]. На основе вычисленных выходов были построены спектры масс осколков деления в интервале от  $A = 80$  до 160 в каждом активационном детекторе – урановой таблетке (см. рис 2). Полученная двугорбая форма спектров соответствует известному асимметричному спектру осколков деления ядер урана. С целью улучшения статистики были использованы зеркальные партнёры осколков деления и полученные массовые спектры от  $A = 120$  до 160 фитированы квадратичными функциями в логарифмическом масштабе. Коэффициенты ( $a$ ,  $b$  и  $c$ ) этих параболических уравнений определены методом наименьших квадратов – (МНК) (см. табл. 2, приведенную в Приложении). Каждый из этих коэффициентов линейно зависит от радиуса. С учетом этой зависимости и с использованием МНК определены уточнённые значения коэффициентов  $a'$ ,  $b'$  и  $c'$  для каждого параболического уравнения. Для получения полного выхода реакций деления  $Y$  были суммированы выходы всех изобар от  $A = 120$  до 160:

$$Y = \sum_A (a' \cdot A^2 + b' \cdot A + c'),$$

где  $A$  — массовые числа осколков деления.

На рис. 3 показаны значения выходов реакций  $^{238}\text{U}(n, \gamma, \beta)$ ,  $^{239}\text{Np}$  и  $^{238}\text{U}(n, 2n)$ ,  $^{237}\text{U}$  и реакций деления урана, происходящих в активационных таблетках из естественного урана, которые размещены на трех детекторных пластинах, в зависимости от значений расстояния от оси симметрии бланкета (см. рис. 1).

### 4 Обсуждение результатов

Анализ полученных результатов показывает, что выходы  $(n, f)$ -,  $(n, \gamma)$ - и  $(n, 2n)$ -реакций во всех урановых таблетках, размещенных на центральной пластине, имеют большие значения, чем на крайних пластинах. Это объясняется тем, что крайние

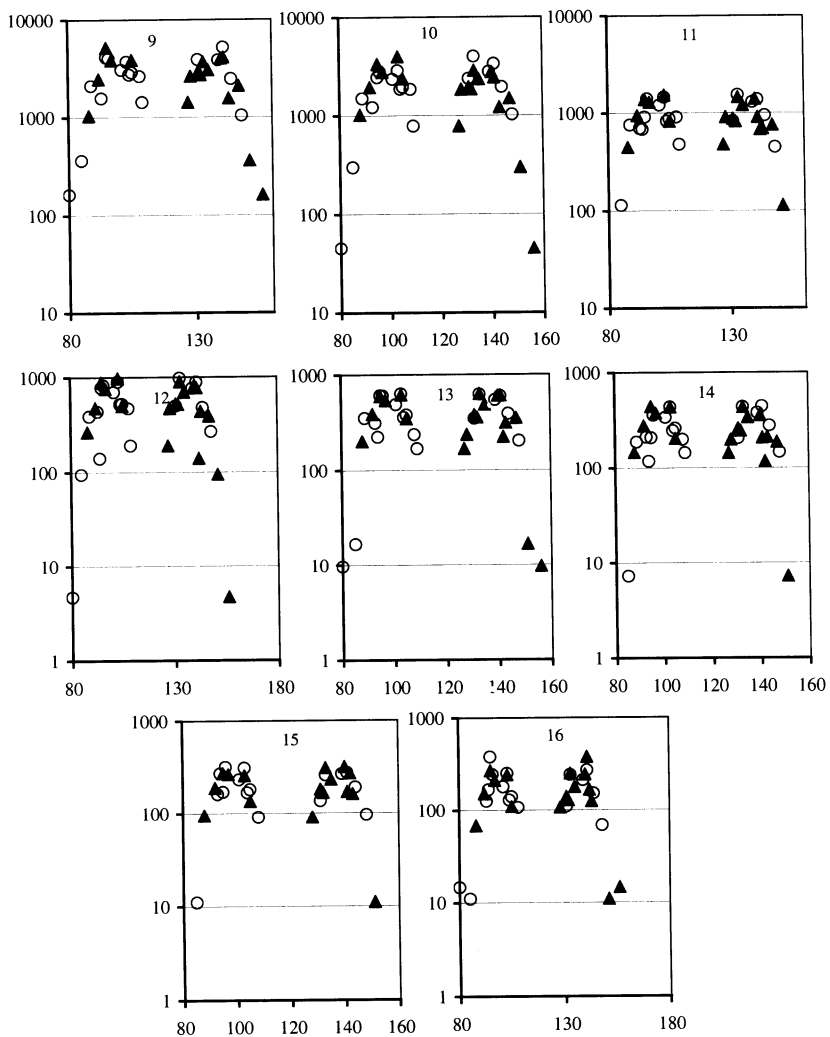


Рис. 2: Спектры масс осколков деления в урановых таблетках, расположенных на центральной детекторной пластине (см. рис.1). По оси абсцисс отложены значения массовых чисел  $A$  — осколков деления, по оси ординат — выходы осколков деления в относительных единицах. В верхней части каждого рисунка указан номер урановой таблетки (номера от 1 до 8 и от 17 до 24 присоеены урановым таблеткам, размещенным на передней и задней детекторных пластинах соответственно).  $\blacktriangle$  — выходы осколков деления,  $\circ$  — зеркальные партнёры осколков деления

пластины облучаются нейтронами с одной стороны, а центральная пластина — с двух сторон. То, что значения выходов указанных реакций в урановых таблетках на задней пластине больше, чем на передней пластине, означает, что поток нейтронов увеличивается по ходу первичного протонного пучка в толщине мишени (см. рис. 1).

Результаты эксперимента позволяют сделать некоторые замечания относительно спектра нейтронов в свинцовой мишени и урановом бланкете.

На рис.3 представлены пространственные распределения выходов реакций в урановых таблетках, размещенных на трех детекторных пластинах. Зависимости выходов каждой реакции от радиуса имеют аналогичный вид во всех трех пластинах; в то же время пространственные распределения исследуемых трех реакций сильно отличаются друг от друга в каждой пластине. Выходы  $(n, f)$ - и  $(n, 2n)$ -реакций резко уменьшаются к поверхности бланкета, а выходы  $(n, \gamma)$ -реакций спадают существенно медленнее.

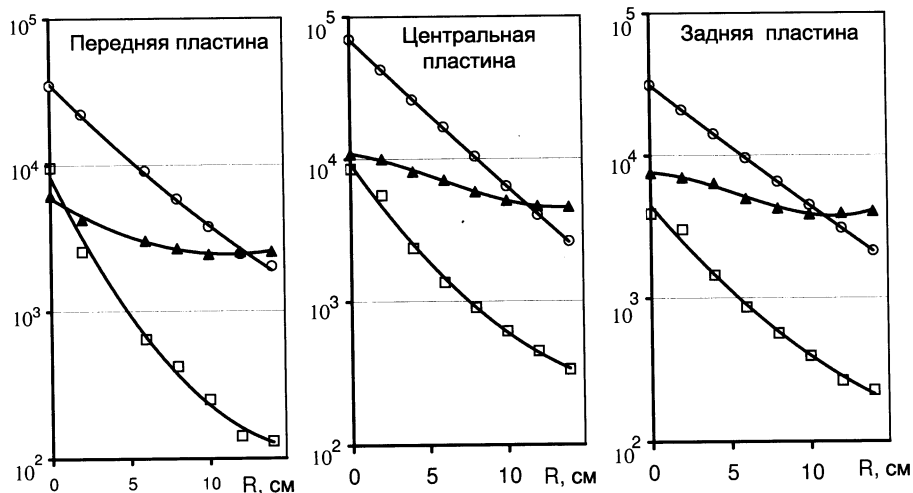


Рис. 3: Зависимости выходов  $(n, f)$ -,  $(n, \gamma)$ - и  $(n, 2n)$ -реакций на ядре урана-238 от  $R$  — расстояния от оси симметрии U/Pb-сборки. По оси ординат отложены выходы указанных реакций в относительных единицах.  $\circ$  —  $(n, f)$ -,  $\blacktriangle$  —  $(n, \gamma)$ - и  $\square$  —  $(n, 2n)$ -реакции соответственно

Если рассмотреть сечения  $(n, f)$ -,  $(n, \gamma)$ - и  $(n, 2n)$ -реакций на ядре урана-238 (см. рис.4), то пересечения функций возбуждения  $(n, \gamma)$ - и  $(n, 2n)$ -реакций с функцией

возбуждения  $(n, f)$ -реакции расположены при энергиях нейтронов 1,25 и 8 МэВ соответственно. Таким образом, максимум спектра нейтронов находится между этими энергиями, т.е. значительно выше порога деления ядер урана-238, составляющего около 0,8 МэВ.

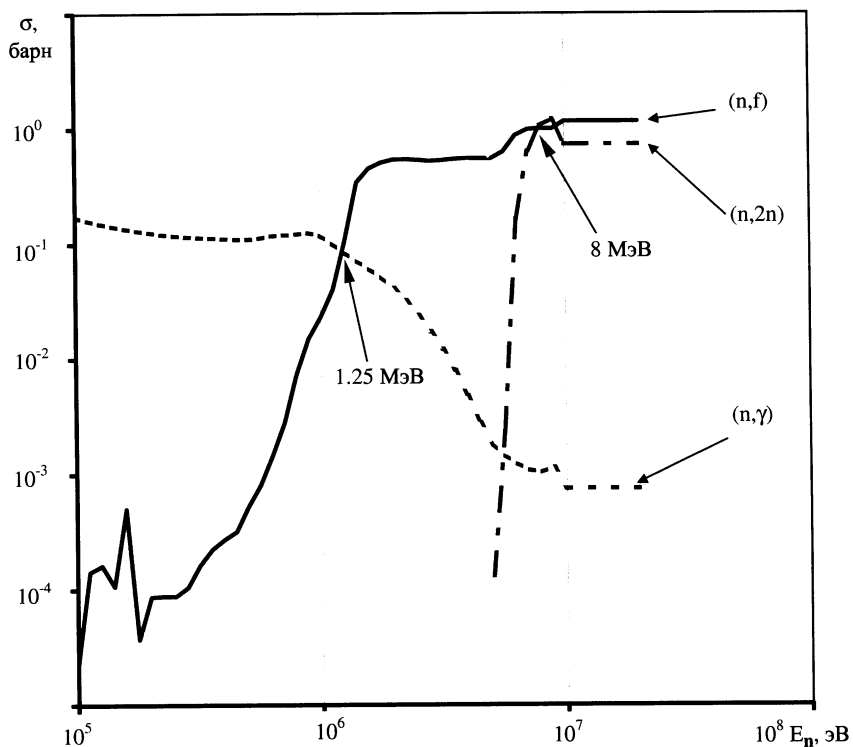


Рис. 4: Функции возбуждения  $(n, f)$ -,  $(n, \gamma)$ - и  $(n, 2n)$ -реакций на уране естественного изотопного состава

Во внутренней части бланкета (при отсутствии замедлителя) имеется большое число быстрых нейтронов, которые инициируют деление ядер урана-238. Основные компоненты подкритической сборки (уран и свинец) относятся к слабым замедлителям нейтронов. При использовании эффективного замедлителя спектр нейтронов естественно будет смягчаться за счет упругого рассеяния.

Из этого следует, что процесс деления в урановом бланкете инициируется быст-

рыми нейтронами. Такой вывод совпадает с результатом, полученным с помощью так называемых *трековых интеграторов деления урана* (см. наши работы [2, 4]).

В работе [5], в которой изучалось взаимодействие релятивистских ядер (протоны с импульсом до 8 ГэВ/с и дейтоны, гелий-4 и углерод-12 с импульсом до 4,5 ГэВ/с на нуклон) в свинцовом блоке ( $50 \times 50 \times 80 \text{ см}^3$ ), показано, что спектр генерируемых нейтронов значительно жестче спектра нейтронов деления.

Такой же результат получен и в описываемом здесь эксперименте с моделью уранового бланкета (см.рис.1) при энергии протонов 1,5 ГэВ. Это объясняется тем, что замедляющие способности (произведение  $\xi$  — средней логарифмической потери энергии и  $\Sigma_S$  — макроскопического сечения рассеяния нейтронов) урана и свинца имеют близкие значения [6, 7].

В связи с тем, что спектр нейтронов является важнейшей характеристикой калориметрии и нейтроники электроядерного бланкета, необходимо дополнительно сравнить имеющиеся данные из гамма — спектрометрических исследований с результатами, которые получены другими методиками (активационными пороговыми и твердотельными трековыми детекторами ) в одном и том же эксперименте с урановым бланкетом [2]. Такое сравнение будет выполнено авторами позднее.

В заключение отметим, что результаты, полученные в настоящей работе на модели гетерогенной U/Pb-сборки, которая изготовлена в масштабе 1:30, будут использованы в ходе создания в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ полномасштабной подкритической электроядерной системы "Энергия плюс трансмутация" для экспериментов на пучках нового сверхпроводящего ускорителя — нуклотрон (см. наши работы [2, 4, 8], а также обзор А.М.Балдина, А.И.Малахова и А.Н.Сисакаяна [9]).

Авторы с благодарностью вспоминают академика А.М.Балдина (1926–2001) за эффективную поддержку электроядерных исследований.

Авторы благодарят А.И.Малахова, Ю.С.Анисимова и П.И.Зарубина за содействие в решении вопросов подготовки экспериментов, описанных в данной работе. Персонал инженерно-технических отделов Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, руководимых А.Д.Коваленко, авторы благодарят за обеспечение стабильной работы синхрофазотрона при облучении модели уран-свинцовой сборки. Авторы признательны Е.М.Павлюк за помощь в оформлении настоящей публикации.

Авторы благодарят Министерство по атомной энергии России за предоставление материала, из которого скомпонована модель уранового бланкета, как основная часть создаваемой экспериментальной системы «Энергия плюс трансмутация».

Эксперименты по исследованию физических аспектов электроядерного способа



производства энергии, которые описаны в данной работе, выполнены при поддержке целевыми грантами, выделенными Российским фондом фундаментальных исследований (проект 00-02-16476) и Международным научно-техническим центром (проект 1372: ФЭИ, Обнинск — ОИЯИ, Дубна), а также грантом дирекции ОИЯИ на обеспечение эксплуатации ускорительных и реакторных установок Института.

## Приложение

Таблица 1: Выходы нуклидов, образовавшихся в урановых таблетках на центральной детекторной пластине (см. рис. 1)

El	A	$T_{1/2}$ , h	E, keV	I, %	Номера урановых таблеток-детекторов							
					9	10	11	12	13	14	15	16
Kr	88	2,84	1836	23,9	1041	1019	449	266	201	146	95,6	68,1
Sr	92	2,71	1384	90	2463	1940	947	479	389	276	191	153
Zr	95	1537	756,5	54,5	5185	3329	1380	885	598	444	275	272
Nb	97	16,9	658,2	98,2	3831	2759	1296	764	543	377	266	212
Ru	103	942,2	497	91		3962	1535	971	621	435	259	243
Rh	105	35,36	319,3	19,1	3858	2354	825	501	346	204	136	110
Sb	127	92,4	781,8	14,8	1421	783	477	190	167	144		
Sb	128	9,01	754,1	99,7	2617	1841	911	470	234	199	90,9	107
I	131	192,5	364,5	81,3	2876	1937	877	526	379	260	183	140
Te	132	76,9	667,7	102	2717	1850	827	521	358	245	168	130
I	133	20,8	530	86,3	3689	2856	1457	895	632	436	312	252
Xe	135	9,14	250	89,9	3044	2337	1208	700	488	338	233	180
Ba	140	306,1	537,1	24,4	3992	2762	1400	827	604	357	319	245
La	141	3,92	1354	1,64	4106	2434	912	775	609	207	172	382
La	142	1,518	641,2	47,4			682	139	222	117	272	168
Ce	143	33,04	293,4	42,8	1564	1214	699	435	313	210	162	126
Nd	147	263,5	531	13,3	2093	1488	760	387	351	187		
Pm	151	28,4	340	22,5	362	300	114	94,4	16,6	7,2	11,1	11
Sm	156	9,4	201,9	20	162	45		4,7	9,7			14,7
U	237	162	208	21,1	8549	5578	2360	1354	902	618	446	332
Np	239	56,54	277,6	14,5	10833	10000	8132	7104	5890	5101	4645	4569

Таблица 2: Коэффициенты параболических уравнений

Номера таблеток	Коэффициенты фитирования			Уточнённые коэффициенты		
	$a$	$b$	$c$	$a'$	$b'$	$c'$
Передняя детекторная пластина						
1	-0,0054	1,5002	99,6431	-0,0052	1,4270	94,6220
2	-0,0044	1,2148	80,0570	-0,0048	1,3322	88,3740
3	-0,0049	1,3521	90,6342	-0,0045	1,2374	82,1260
4	-0,0038	1,0467	68,9047	-0,0042	1,1426	75,8780
5	-0,0069	1,9034	-128,1400	-0,0038	1,0478	69,6300
6	-0,0061	1,6840	-113,7600	-0,0035	0,9530	63,3820
7	-0,0070	1,9336	-131,6100	-0,0031	0,8582	57,1340
8	-0,0028	0,7880	52,6231	-0,0028	0,7634	50,8860
Центральная детекторная пластина						
9	-0,0036	0,9877	63,6069	-0,0038	1,0265	66,3950
10	-0,0049	1,3324	87,7620	-0,0043	1,1700	76,4870
11	-0,0043	1,1869	77,9823	-0,0048	1,3135	86,5790
12	-0,0056	1,5309	101,7875	-0,0053	1,4571	96,6710
13	-0,0053	1,4512	96,5881	-0,0058	1,6006	106,7630
14	-0,0064	1,7488	116,6975	-0,0064	1,7441	116,8550
15	-0,0071	1,9616	132,3108	-0,0069	1,8877	126,9470
16	-0,0063	1,7341	116,4737	-0,0074	2,0312	137,0390
Задняя детекторная пластина						
17	-0,0031	0,8528	55,1784	-0,0031	0,8396	53,9881
18	-0,0032	0,8799	57,0173	-0,0036	0,9811	63,9174
19	-0,0047	1,2772	84,4772	-0,0041	1,1226	73,8467
20	-0,0048	1,3185	87,0369	-0,0046	1,2641	83,7760
21	-0,0055	1,4930	99,5637	-0,0051	1,4056	93,7053
22	-0,0046	1,2515	83,3626	-0,0056	1,5471	103,6346
23	-0,0056	1,5377	103,4576	-0,0062	1,6886	113,5639
24	-0,0075	2,0669	139,8459	-0,0067	1,8301	123,4932

## Список литературы

- [1] Ц.Тумэндэлгэр, М.И. Кривоустов, Д.Чултэм и др. Калориметрия электроядерной мишени для уран-свинцовой сборки при энергии протонов 1.5 ГэВ. Сообщение ОИЯИ P1-99-247, Дубна, 1999.
- [2] М.И.Кривоустов, Д.Чултэм, Ц.Тумэндэлгэр и др. О первом эксперименте по калориметрии уранового бланкета на модели U/Pb-сборки электроядерной системы "Энергия плюс трансмутация" на пучке синхрофазотрона ОИЯИ при энергии протонов 1.5 ГэВ. Препринт ОИЯИ P1-2000-168, Дубна, 2000 (принято в Kerntechnik).
- [3] E.A.C.Crouch. Fission-product yields from neutron-induced fission. Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1977, 19, p.419.
- [4] Д.Чултэм, Ц.Тумэндэлгэр, М.И.Кривоустов. Трековый интегратор деления урана для исследования энерговыделения в подкритическом урановом бланкете электроядерной системы. Препринт ОИЯИ P1-2001- 128, Дубна, 2001 (направлено в журнал Nuclear Tracks and Radiation Measurements).
- [5] В.А.Воронко, ..., К.Д.Толстов, Н.А.Хижняк. Изучение взаимодействия релятивистских ядер со свинцовой мишенью. Гамма-спектрометрические исследования. Препринт ХФТИ, ЦНИИатоминформ, М., 1988. Генерация нейтронов в протаженой свинцовой мишени. Атомная энергия. 1990, 68, с.449.
- [6] Ф.Л.Шапиро. Собрание трудов. Том 1 — Физика нейтронов. М., Атомиздат, 1976.
- [7] Физическая энциклопедия. Том 2. М., Изд-во СЭ, 1990.
- [8] М.И.Кривоустов, Д.Чултэм. Об экспериментах по электроядерной технологии и трансмутации радиоактивных отходов атомной энергетики на пучках синхрофазотрона. Новости ОИЯИ, 1998, 3, с.27–30, Дубна. M.I.Krivopustov, D.Chultem, Ts.Tumendelger et al. In "Research Program of the Laboratory of High Energies JINR". Editor A.M.Baldin. 99-266, Dubna, 1999, pp.135–139.
- [9] А.М.Балдин, А.И.Малахов, А.Н.Сисакян. Некоторые проблемы релятивистской ядерной физики и множественного рождения частиц. Сообщение ОИЯИ P1-2001-106, Дубна, 2001 (направлено в журнал ОИЯИ "Физика элементарных частиц и атомного ядра"), с.58–59.

Получено 6 февраля 2002 г.

Чултэм Д. и др.

P1-2002-16

Исследование спектров масс осколков деления и выходов  $(n, \gamma)$ - и  $(n, 2n)$ -реакций в подкритическом урановом blankets электроядерной системы «Энергия плюс трансмутация» на протонном пучке синхрофазотрона ОИЯИ при энергии 1,5 ГэВ

Настоящая работа посвящена изучению пространственного распределения выходов  $(n, f)$ -,  $(n, \gamma)$ - и  $(n, 2n)$ -реакций в двухсекционной модели уранового blankets электроядерной установки, создаваемой в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ для экспериментов по программе «Исследования физических аспектов электроядерного способа производства энергии и трансмутации радиоактивных отходов атомной энергетики на пучках синхрофазотрона/нуклотрона» — проект «Энергия плюс трансмутация».

Определен спектр масс осколков деления и выходов вышеназванных реакций в урановых активационных детекторах, размещенных по радиусам так называемых детекторных пластин. Экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что деление ядер в урановом blankets происходит быстрыми нейтронами. Этот вывод совпадает с результатом, полученным с помощью трековых интеграторов деления урана.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод Л. Н. Барабаш

Chultem D. et al.

P1-2002-16

Research of the Mass Spectra of the Fission Products and Yields of  $(n, \gamma)$  and  $(n, 2n)$  Reactions in a Model Subcritical Uranium Blanket of the Electronuclear System «Energy Plus Transmutation» on Proton Beam of the Dubna Synchrophasotron at 1.5 GeV Energy

This paper is devoted to the research of the spatial distributions of the yields of  $(n, f)$ ,  $(n, \gamma)$  and  $(n, 2n)$  reactions in a two-section model of the uranium blanket electronuclear installation constructed at the Laboratory of High Energies, JINR (Dubna) for experiments according to the program «Research of physical aspects of the electronuclear method of energy production and of radioactive waste transmutation in atomic power-engineering on beams of the synchrophasotron and nuclotron» — project «Energy plus Transmutation».

The mass spectrum of the fission products and yields of above reactions in uranium activation detectors placed on the radii of the so-called detector plates is determined. The experimental results testify that the fission of nuclei in the uranium blanket is made by fast neutrons. This conclusion coincides with the result obtained with track integrators of uranium fission.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

Редактор *М. И. Зарубина*  
Макет *Н. А. Киселевой*

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 02.04.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,82. Уч.-изд. л. 0,75. Тираж 385 экз. Заказ № 53205.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.