ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2000–34
ОРИ

Г.И. Крупный, Г.Н. Стеценко, А.А. Янович

ВЫХОД ВТОРИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ ТЯЖЕЛЫХ МИШЕНЕЙ, ОБЛУЧАЕМЫХ ПРОТОНАМИ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ ($E_P \sim 1$ ГЭВ)

Направлено в АЭ

Протвино 2000

УДК 539.1.074.3 М-24

Аннотация

Крупный Г.И., Стеценко Г.Н., Янович А.А. Выход вторичного излучения с поверхности тяжелых мишеней, облучаемых протонами средних энергий (E_p ~ 1 ГэВ): Препринт ИФВЭ 2000–34. – Протвино, 2000. 12 с., 3 рис., табл. 8, библиогр.: 8.

Представлены экспериментальные данные по скоростям ядерных реакций пороговых активационных детекторов: родий, индий, фосфор, сера, алюминий, углерод, ниобий и висмут. Детекторы устанавливались на цилиндрической поверхности мишеней полного поглощения: вольфрамовой, урановой и хлоридной с молярным соотношением солей: 70% - NaCl и 30% - $PbCl_2$. Мишени облучались протонами с энергиями от 0.8 до 1.21 ГэВ.

Abstract

Krupny G.I. et al. Secondary Radiation Yield from a Surface of Heavy Targets, Irradiated by Protons of Average Energies (E_p ~ 1 GeV): IHEP Preprint 2000–34. – Protvino, 2000, – p. 12, figs 3, tables 8, refs.: 8.

The experimental data on rate of threshold nuclear reactions of activation detectors are presented: rhodium, indium, phosphorus, sulfur, aluminium, carbon, niobium and bismuth. The detectors were placed on a cylindrical surface of full absorption targets: tungsten, uranium and chloride with a molar ratio of salts: 70 % - NaCl and 30 % - PbCl2. The targets were irradiated by protons with energies from 0.8 up to 1.21 GeV.

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2000

Введение

В последние годы появился большой интерес к проблеме трансмутации долгоживущих радиоактивных элементов и практическому использованию энергии деления урана в глубокоподкритическом реакторе, в котором цепная реакция поддерживается внешним источником нейтронов [1, 2, 3]. Мощные потоки нейтронов можно получить при облучении тяжелых мишеней высокоинтенсивными пучками протонов с энергией ~1 ГэВ.

В данной работе представлены экспериментальные данные по скоростям реакций, полученных с помощью пороговых активационных детекторов при облучении вольфрамовой мишени протонами с энергиями 0.895 и 1.21 ГэВ, хлоридной мишени протонами с энергиями 0.8 и 1.2 ГэВ (проекты МНТЦ № 157 и 477) и урановой мишени протонами с энергией 1 ГэВ. Работа выполнена в ГНЦ ИФВЭ на высокоинтенсивном ускорителе протонов У-1.5.

Описание экспериментальной установки

Пучок протонов, выведенный из У-1.5, транспортируется по вакуумированному ионопроводу на исследуемую мишень. Расстояние ~2 м от выходного окна ионопровода до передней плоскости мишени пучок проходит по воздуху. Настройка положения пучка осуществляется с помощью телевизионного монитора и двух координатных δ-камер. За время экспозиции возможен эпизодический уход пучка от геометрического центра мишени в пределах ±5 мм как по горизонтали, так и по вертикали. Усредненное за экспозицию положение центра тяжести пучка определяется в результате обсчета алюминиевой фольги толщиной 200 микрон, установленной на переднем торце мишени. Центральная часть фольги (100×100 мм^2) с шагом 10 мм по вертикали и горизонтали обсчитывается по наведенной радиоактивности двумя способами:

- измерением мощности дозы от элемента фольги 10×10 мм экранированным дозиметром;
- измерением активности Na^{24}, Na^{22} от элемента фольги 10×10 мм на полупроводниковом гамма-спектрометре.

Результаты по определению смещения пучка от геометрического центра хлоридной мишени и параметры гауссиана, описывающие размеры пучка по вертикали σ_z и горизонтали σ_x в каждой из шести экспозиций, приведены в табл. 1.

<u>Таблица 1.</u> Параметры гауссиана (σ_x, σ_z) и смещения центра тяжести пучка (Δ_x, Δ_z)

Экспозиция №	Энергия протонов, ГэВ	σ_x, мм	σ_z, мм	Δ_x, мм	Δ_z, мм
1	0.8	13.0	17.6	+3.5	-1.8
2	0.8	12.4	15.8	+7.7	-4.5
3	0.8	14.4	18.0	+8.2	-1.3
4	1.2	10.4	13.5	+0.7	-1.5
5	1.2	16.8	19.4	+2.8	-0.4
6	1.2	18.3	20.6	+1.8	-0.1

При этом оба способа в пределах погрешности дают примерно одинаковые результаты.

Схема эксперимента и мишень с выбранной системой координат показаны на рис. 1.

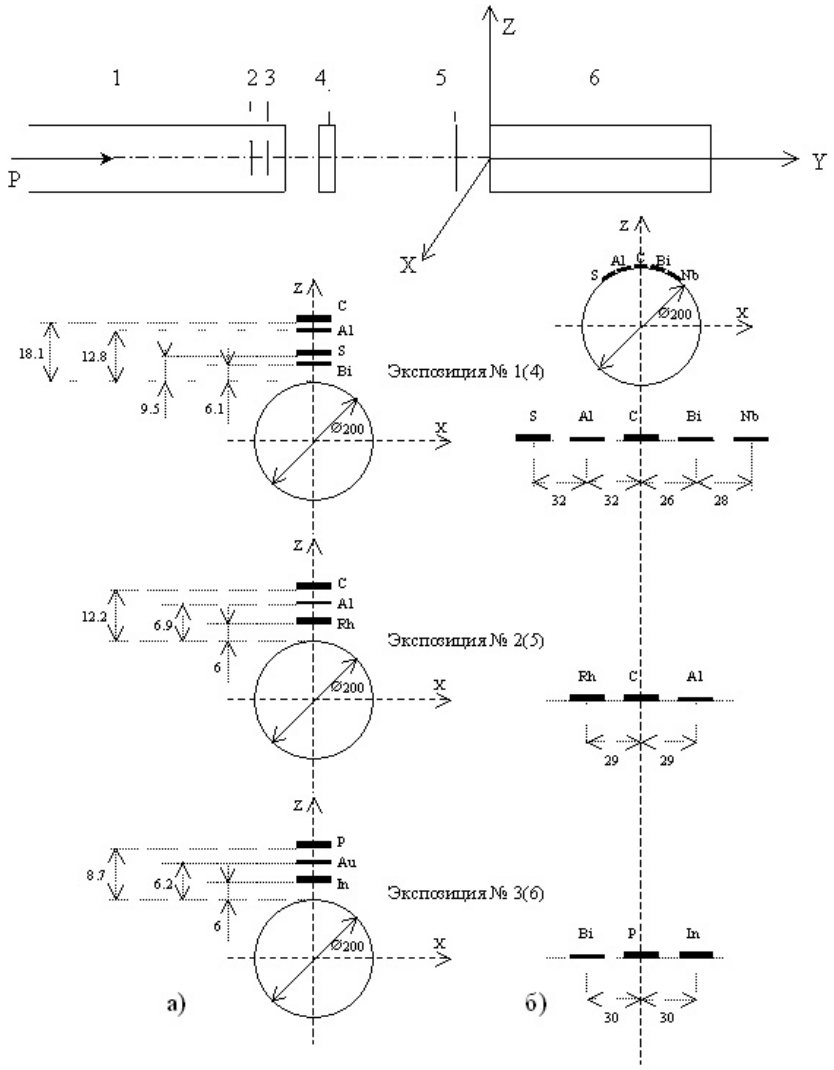

Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – вакуумированный ионопровод; 2, 3 – δ-камеры; 4 – индукционный датчик тока; 5 – алюминиевая фольга; 6 – мишень.

Мишень вольфрамовая, плотность $\rho = 19.3$ г/см^3, набрана из отдельных дисков диаметром 200 мм и толщиной 20 мм, общая длина мишени по пучку 600 мм.

Мишень хлоридная твердая, плотность $\rho = 3.047$ г/см^3, набрана из отдельных дисков диаметром 200 мм и толщиной 50 мм, общая длина мишени по пучку 2000 мм. Химический состав мишени: 70% молей - NaCl и 30% молей - $PbCl_2$; весовые доли химических элементов распределены так: Na – 0.129; Cl – 0.371; Pb – 0.5.

Мишень урановая размещена в стальной камере диаметром 320 мм на тефлоновых вкладышах; толщина стенки камеры – 10 мм. Камера скреплена через фланец с платформой, установленной на подставке (рис. 2).

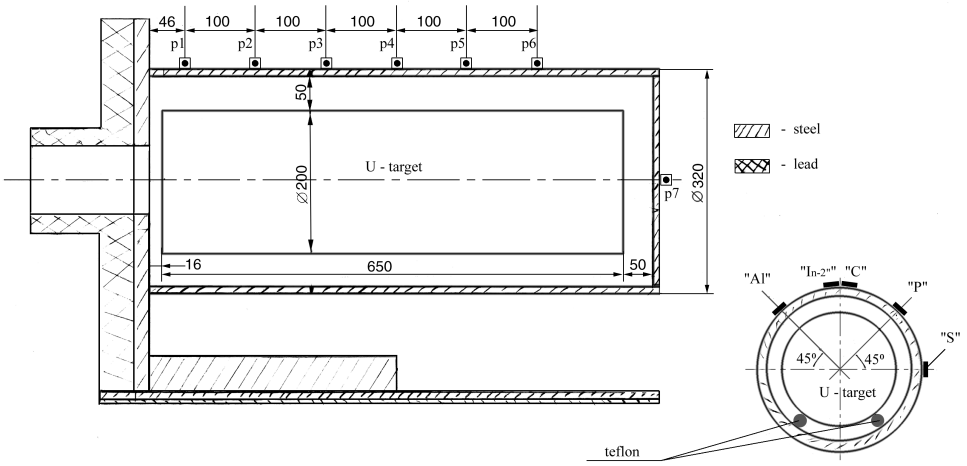

Рис. 2. Размещение активационных детекторов на поверхности камеры по длине и азимуту мишени.

Воздух из камеры откачивается. Мишень юстируется на пучке таким образом, чтобы обеспечить совпадение геометрической оси мишени с осью пучка. Мишень урановая (естественный уран со средним коэффициентом обеднения 0.3 и средней плотностью 18.8 г/см^3) длиной 650 мм и диаметром 200 мм. Мишень набрана из пассивных дисков “М” толщиной 10 мм каждый и измерительных блоков: сплошных “С” и разрезных “Р”, в которых размещаются температурные датчики. Структура мишени по ходу пучка представлена в виде 2MCP11MCP5MCP5MCP10MCP2M, где буквы обозначают тип диска (М, С либо Р), а цифры — число пассивных дисков М. Сплошной и разрезной измерительные блоки состоят каждый из пяти урановых дисков толщиной по 5 мм, разделенных между собой 1 мм зазором; в отличие от измерительного блока “С”, в разрезном блоке “Р” на диаметрах 20, 50, 100, 150 мм сделаны щели $\delta = 1$ мм для размещения температурных датчиков.

Активационные детекторы размещались на боковой поверхности мишени при следующих значениях y:

- $y_1 = 20$, $y_2 = 80$, $y_3 = 120$, $y_4 = 170$, $y_5 = 300$, $y_6 = 550$ мм (вольфрамовая мишень); детекторы устанавливались вертикальными сборками (см. рис 1а);
- $y_1 = 25$, $y_2 = 190$, $y_3 = 380$, $y_4 = 740$, $y_5 = 1230$, $y_6 = 1660$, $y_7 = 1970$ мм (хлоридная мишень); детекторы устанавливались непосредственно на поверхности мишени (см. рис 1б).

Для урановой мишени детекторы размещались на боковой поверхности стальной камеры (рис. 2) при:

- $y_1 = 30$, $y_2 = 130$, $y_3 = 230$, $y_4 = 330$, $y_5 = 430$, $y_6 = 530$ мм, (y_7=700 мм – на оси).

Мониторирование

Число выведенных из У-1.5 протонов определялось индукционным датчиком тока в течение каждого суперцикла длительностью ~1.5 с, которые следуют с периодом ~10 с. В наших экспозициях интенсивность пучка изменялась в пределах $(1 - 1.3)\cdot 10^{13}$ протонов за суперцикл. Погрешность определения числа протонов ±5%.

Детекторы

Полный перечень использованных пороговых активационных детекторов включает в себя: родий, индий, фосфор, серу, алюминий, углерод, ниобий и висмут. Характеристики активационных детекторов, рассматриваемые пороговые реакции и идентифицируемые линии гамма-квантов можно найти в работе [4]. Режим облучения детекторов: $\Delta T_{обл}$ – длительность облучения много меньше периода полураспада $T_{1/2}$, образующегося в детекторе радионуклида, т.е. $\Delta T_{обл} << T_{1/2}$. Обсчет бета-активных нуклидов проведен на радиометрическом измерительном тракте [5], гамма-активных – на полупроводниковом спектрометре измерительного комплекса [4]. Программа обработки информации с измерительного комплекса позволяет, учитывая индивидуальные характеристики активационных детекторов, получить нормированные на один протон значения скоростей реакций используемых активационных детекторов [4].

Результаты

Полученные данные по скоростям ядерных реакций с погрешностями приведены в табл. 2 и 3 для вольфрамовой мишени при энергиях протонов E_p= 0.895 и E_p= 1.21 ГэВ, для хлоридной мишени в табл. 4 и 5 при энергиях E_p= 0.8 и E_p= 1.2 ГэВ, соответственно, а для урановой мишени при энергии E_p= 1.0 ГэВ в табл. 6.

В эксперименте с урановой мишенью применялся также детектор промежуточных нейтронов (0.5 эВ < E < 200 кэВ): кадмированный полиэтиленовый шар диаметром 5.08 см, в центре которого находится детектор тепловых нейтронов – In - фольга диаметром 10 мм, толщиной 0.12 мм [6]. При определении флюенса тепловых нейтронов используется сечение активации $\sigma_{акт}$ = 160 барн реакции радиационного захвата $In^{115}(n, \gamma)In^{116m}$ [7]. Градуировка потокомера промежуточных нейтронов выполнена в поле эталонного радионуклидного источника нейтронов Cf^{252} в свободной геометрии.

Оценка погрешности δY измерения скорости реакции Y выполнена по формуле:

$$\delta Y = \sqrt{(\delta I_p)^2 + (\delta ST)^2 + (\delta G_{\gamma(\beta)})^2} ,$$

где δI_p – погрешность определения числа протонов за экспозицию; δST – погрешность определения площади фотопика, обусловленная статистикой и методом оценки площади фотопика при работе на гамма-спектрометре, в случае работы на радиометрическом тракте эта погрешность обусловлена статистикой; $\delta G_{\gamma(\beta)}$ – погрешность градуировочных измерений с помощью образцовых источников гамма - и бета-излучений.

Следует отметить некоторые общие закономерности:

- рост скорости реакции с увеличением энергии первичных протонов;
- рост скорости реакции с увеличением атомного номера мишеней;
- наличие сечения мишени, на котором наблюдается максимальное значение скорости реакции.

<u>Таблица 2.</u> Экспериментальные значения скоростей реакций при E_p= 0.895 ГэВ (вольфрамовая мишень)

Детектор→ радионукл.	Скорость реакции, протон$^{-1}$					
	Y_1= 20, мм	Y_2= 80, мм	Y_3= 120, мм	Y_4= 170, мм	Y_5= 300, мм	Y_6= 550, мм
Rh→^{103m}Rh	$2.31\bullet10^{-27}$ ±6.1%	$4.30\bullet10^{-27}$ ±6.0%	$3.90\bullet10^{-27}$ ±6.0%	$2.70\bullet10^{-27}$ ±6.0%	$7.49\bullet10^{-28}$ ±6.5%	$2.10\bullet10^{-29}$ ±7.6%
In→^{115m}In	$5.75\bullet10^{-28}$ ±6.7%	$9.88\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$9.47\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$7.17\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$2.02\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$6.17\bullet10^{-30}$ ±17.0%
P→^{31}Si	$1.44\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$2.34\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$2.15\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$1.79\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$5.81\bullet10^{-29}$ ±22.6%	$1.63\bullet10^{-30}$ ±22.7%
S→^{32}P	$3.60\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$4.33\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$3.78\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$2.76\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$6.67\bullet10^{-29}$ ±22.7%	$1.73\bullet10^{-30}$ ±22.7%
Al→^{7}Be	$1.05\bullet10^{-31}$ ±52.9%	$3.25\bullet10^{-31}$ ±29.6%	$4.12\bullet10^{-31}$ ±27.3%	$4.49\bullet10^{-31}$ ±28.4%	$2.43\bullet10^{-31}$ ±31.6%	-
Al→^{27}Mg	$4.49\bullet10^{-29}$ ±8.6%	$7.10\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$5.14\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$3.22\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$9.96\bullet10^{-30}$ ±6.6%	$2.37\bullet10^{-31}$ ±7.9%
Al→^{24}Na	$3.64\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$5.89\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$5.01\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$3.48\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$1.02\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$3.52\bullet10^{-31}$ ±8.0%
Al→^{22}Na	$4.22\bullet10^{-30}$ ±7.6%	$8.88\bullet10^{-30}$ ±6.8%	$1.01\bullet10^{-29}$ ±7.2%	$8.02\bullet10^{-30}$ ±7.5%	$2.80\bullet10^{-30}$ ±10.6%	$3.58\bullet10^{-31}$ ±18.2%
C→^{11}C	$5.94\bullet10^{-30}$ ±22.6%	$1.54\bullet10^{-29}$ ±22.6%	$1.34\bullet10^{-29}$ ±22.5%	$1.64\bullet10^{-29}$ ±22.5%	$5.77\bullet10^{-30}$ ±22.6%	$2.73\bullet10^{-31}$ ±23.2%
Bi→^{203}Bi	$2.50\bullet10^{-29}$ ±24.7%	$5.85\bullet10^{-29}$ ±16.1%	$5.24\bullet10^{-29}$ ±26.6%	$4.09\bullet10^{-29}$ ±28.6%	$2.21\bullet10^{-29}$ ±17.1%	$4.25\bullet10^{-31}$ ±38.5%
Bi→^{204}Bi	$6.29\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$1.10\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$1.03\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$9.48\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$3.28\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$9.60\bullet10^{-31}$ ±6.6%
Bi→^{205}Bi	$9.32\bullet10^{-29}$ ±6.6%	-	$1.57\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$1.20\bullet10^{-28}$ ±18.0%	$2.53\bullet10^{-29}$ ±26.6%	$1.09\bullet10^{-30}$ ±48.6%
Bi→^{206}Bi	$1.54\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$2.43\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$2.50\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$1.49\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$6.34\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$1.57\bullet10^{-30}$ ±8.7%
Bi→^{207}Bi	$3.46\bullet10^{-28}$ ±8.1%	$5.63\bullet10^{-28}$ ±5.9%	$5.20\bullet10^{-28}$ ±6.2%	$3.37\bullet10^{-28}$ ±7.3%	$1.27\bullet10^{-28}$ ±7.7%	-

<u>Таблица 3.</u> Экспериментальные значения скоростей реакций при E_p=1.21 ГэВ (вольфрамовая мишень)

Детектор→ радионукл.	Скорость реакции, протон$^{-1}$					
	Y_1=20, мм	Y_2=80, мм	Y_3=120, мм	Y_4=170, мм	Y_5=300, мм	Y_6=550, мм
Rh→^{103m}Rh	$3.89\bullet10^{-27}$ ±5.9%	$6.28\bullet10^{-27}$ ±5.9%	$5.24\bullet10^{-27}$ ±6.1%	$4.05\bullet10^{-27}$ ±5.9%	$1.42\bullet10^{-27}$ ±6.1%	$4.20\bullet10^{-29}$ ±8.2%
In→^{115m}In	$1.32\bullet10^{-27}$ ±6.6%	$1.79\bullet10^{-27}$ ±6.6%	$1.66\bullet10^{-27}$ ±6.6%	$1.19\bullet10^{-27}$ ±6.6%	$3.62\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$1.10\bullet10^{-29}$ ±6.8%
P→^{31}Si	$3.43\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$4.26\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$3.93\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$2.88\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$9.15\bullet10^{-29}$ ±22.6%	$3.11\bullet10^{-30}$ ±22.6%
S→^{32}P	$4.87\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$6.53\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$6.27\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$4.42\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$1.39\bullet10^{-28}$ ±22.6%	$4.52\bullet10^{-30}$ ±22.6%
Al→^{27}Mg	$8.09\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$1.02\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$8.86\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$6.44\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$2.49\bullet10^{-29}$ ±26.0%	$4.54\bullet10^{-31}$ ±6.6%
Al→^{7}Be	$2.37\bullet10^{-31}$ ±27.3%	$7.95\bullet10^{-31}$ ±17.5%	$8.02\bullet10^{-31}$ ±15.1%	$5.85\bullet10^{-31}$ ±21.5%	$4.03\bullet10^{-31}$ ±23%	-
Al→^{24}Na	$6.95\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$9.66\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$7.91\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$6.26\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$2.25\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$6.58\bullet10^{-31}$ ±6.6%
Al→^{22}Na	$8.16\bullet10^{-30}$ ±6.6%	$1.46\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$1.44\bullet10^{-29}$ ±6.7%	$1.27\bullet10^{-29}$ ±6.7%	$5.32\bullet10^{-30}$ ±8.4%	$6.60\bullet10^{-31}$ ±11.8%
C→^{11}C	$7.35\bullet10^{-30}$ ±22.6%	$2.21\bullet10^{-29}$ ±22.6%	$2.58\bullet10^{-29}$ ±22.6%	$2.31\bullet10^{-29}$ ±22.6%	$1.14\bullet10^{-29}$ ±22.6%	$7.09\bullet10^{-31}$ ±22.6%
Bi→^{203}Bi	$2.69\bullet10^{-29}$ ±26.9%	$9.78\bullet10^{-29}$ ±16.6%	$7.23\bullet10^{-29}$ ±15.9%	$6.38\bullet10^{-29}$ ±13.3%	$2.82\bullet10^{-29}$ ±13.9%	$9.78\bullet10^{-31}$ ±21.0%
Bi→^{204}Bi	$1.05\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$1.65\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$1.56\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$1.38\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$5.76\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$2.62\bullet10^{-30}$ ±6.8%
Bi→^{205}Bi	$1.61\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$2.51\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$2.24\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$1.58\bullet10^{-28}$ ±6.7%	$8.57\bullet10^{-29}$ ±6.8%	$3.07\bullet10^{-30}$ ±13.8%
Bi→^{206}Bi	$3.06\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$4.58\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$4.08\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$3.60\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$1.41\bullet10^{-28}$ ±6.6%	$3.23\bullet10^{-30}$ ±6.7%
Bi→^{207}Bi	$5.85\bullet10^{-28}$ ±6.9%	$7.99\bullet10^{-28}$ ±4.0%	$7.10\bullet10^{-28}$ ±3.6%	$6.13\bullet10^{-28}$ ±3.6%	$2.30\bullet10^{-28}$ ±5.0%	-

<u>Таблица 4.</u> Экспериментальные значения скоростей реакций при E_p=0.8 ГэВ (хлоридная мишень)

Детектор→ радионукл.	Скорость реакции, протон $^{-1}$						
	Y_1=25, мм	Y_2=190, мм	Y_3=380, мм	Y_4=740, мм	Y_5=1230, мм	Y_6=1660, мм	Y_7=1970, мм
Rh→^{103m}Rh	$5.07\bullet10^{-28}$ ±7.0%	$7.63\bullet10^{-28}$ ±7.0%	$6.92\bullet10^{-28}$ ±7.0%	$2.83\bullet10^{-28}$ ±7.0%	$5.90\bullet10^{-29}$ ±9.0%	$4.78\bullet10^{-30}$ ±29.7%	-
In→^{115m}In	$2.40\bullet10^{-28}$ ±8.2%	$3.52\bullet10^{-28}$ ±8.6%	$2.83\bullet10^{-28}$ ±8.8%	$1.21\bullet10^{-28}$ ±9.0%	$1.50\bullet10^{-29}$ ±9.4%	$2.15\bullet10^{-30}$ ±10.6%	$1.46\bullet10^{-30}$ ±13.9%
P→^{31}Si	$5.30\bullet10^{-29}$ ±25.5%	$8.14\bullet10^{-29}$ ±25.5%	$6.09\bullet10^{-29}$ ±25.5%	$3.03\bullet10^{-29}$ ±25.5%	$4.44\bullet10^{-30}$ ±25.6%	$4.53\bullet10^{-31}$ ±26.2%	$2.71\bullet10^{-31}$ ±26.9%
S→^{32}P	$9.79\bullet10^{-29}$ ±25.5%	$1.59\bullet10^{-28}$ ±25.5%	$1.16\bullet10^{-28}$ ±25.5%	$5.07\bullet10^{-29}$ ±25.6%	$6.60\bullet10^{-30}$ ±26.2%	$8.44\bullet10^{-31}$ ±36.0%	$6.11\bullet10^{-31}$ ±46.0%
Al→^{7}Be	$5.58\bullet10^{-32}$ ±34.0%	$2.85\bullet10^{-31}$ ±12.4%	$4.97\bullet10^{-31}$ ±8.4%	$4.06\bullet10^{-31}$ ±9.3%	$4.63\bullet10^{-32}$ ±29.0%	-	-
Al→^{27}Mg	$1.01\bullet10^{-29}$ ±13.5%	$1.69\bullet10^{-29}$ ±12.1%	$1.30\bullet10^{-29}$ ±9.3%	$5.02\bullet10^{-30}$ ±8.0%	$5.62\bullet10^{-31}$ ±9.3%	$5.12\bullet10^{-32}$ ±12.7%	$3.40\bullet10^{-32}$ ±11.5%
Al→^{24}Na	$1.01\bullet10^{-29}$ ±6.2%	$2.02\bullet10^{-29}$ ±6.5%	$1.85\bullet10^{-29}$ ±6.3%	$8.27\bullet10^{-30}$ ±6.3%	$1.30\bullet10^{-30}$ ±6.2%	$1.41\bullet10^{-31}$ ±6.3%	$5.84\bullet10^{-32}$ ±7.1%
Al→^{22}N	$1.44\bullet10^{-30}$ ±7.2%	$6.12\bullet10^{-30}$ ±6.2%	$6.97\bullet10^{-30}$ ±6.1%	$4.18\bullet10^{-30}$ ±7.1%	$1.25\bullet10^{-30}$ ±9.1%	-	-
C→^{11}C	$7.37\bullet10^{-31}$ ±25.6%	$3.01\bullet10^{-30}$ ±25.5%	$3.87\bullet10^{-30}$ ±25.5%	$1.93\bullet10^{-30}$ ±25.5%	$9.95\bullet10^{-31}$ ±25.5%	$4.23\bullet10^{-32}$ ±25.8%	$1.65\bullet10^{-32}$ ±26.0%
Nb→^{92m}Nb	$3.35\bullet10^{-29}$ ±6.5%	$6.22\bullet10^{-29}$ ±7.6%	$4.79\bullet10^{-29}$ ±6.5%	$2.07\bullet10^{-29}$ ±8.7%	$4.48\bullet10^{-30}$ ±8.0%	$3.10\bullet10^{-31}$ ±13.3%	$1.10\bullet10^{-31}$ ±12.2%
Bi→^{201}Bi	-	-	$3.33\bullet10^{-30}$ ±30.8%	-	-	-	-
Bi→^{202}Bi	$1.01\bullet10^{-29}$ ±11.9%	$3.47\bullet10^{-29}$ ±11.9%	$2.90\bullet10^{-29}$ ±12.2%	$1.59\bullet10^{-29}$ ±14.5%	$3.26\bullet10^{-30}$ ±13.7%	$3.26\bullet10^{-31}$ ±12.9%	$7.62\bullet10^{-32}$ ±28.7%
Bi→^{203}Bi	$1.07\bullet10^{-29}$ ±14.7%	$4.00\bullet10^{-29}$ ±17.7%	$4.59\bullet10^{-29}$ ±15.1%	$2.53\bullet10^{-29}$ ±17.0%	$5.81\bullet10^{-30}$ ±16.5%	$3.25\bullet10^{-31}$ ±18.4%	-
Bi→^{204}Bi	$1.77\bullet10^{-29}$ ±7.4%	$5.66\bullet10^{-29}$ ±7.4%	$5.56\bullet10^{-29}$ ±7.0%	$3.03\bullet10^{-29}$ ±8.6%	$9.68\bullet10^{-30}$ ±6.9%	$4.06\bullet10^{-31}$ ±8.3%	$1.38\bullet10^{-31}$ ±18.7%
Bi→^{205}Bi	$2.62\bullet10^{-29}$ ±7.3%	$6.75\bullet10^{-29}$ ±7.9%	$6.83\bullet10^{-29}$ ±7.3%	$3.58\bullet10^{-29}$ ±7.7%	$1.24\bullet10^{-29}$ ±6.6%	$6.05\bullet10^{-31}$ ±10.0%	$1.79\bullet10^{-31}$ ±22.9%
Bi→^{206}Bi	$3.68\bullet10^{-29}$ ±7.0%	$9.42\bullet10^{-29}$ ±7.1%	$8.47\bullet10^{-29}$ ±7.1%	$3.59\bullet10^{-29}$ ±8.3%	$8.93\bullet10^{-30}$ ±6.5%	$5.35\bullet10^{-31}$ ±10.1%	$1.84\bullet10^{-31}$ ±10.5%
Bi→^{207}Bi	-	$1.36\bullet10^{-28}$ ±30.6%	$8.92\bullet10^{-29}$ ±40.3%	-	-	-	-

<u>Таблица 5.</u> Экспериментальные значения скоростей реакций при E_p=1.2 ГэВ (хлоридная мишень)

Детектор→ радионукл.	Скорость реакции, протон $^{-1}$						
	Y_1=25, мм	Y_2=190, мм	Y_3=380, мм	Y_4=740, мм	Y_5=1230, мм	Y_6=1660, мм	Y_7=1970, мм
Rh→^{103m}Rh	$5.39\bullet10^{-28}$ ±7.0%	$9.52\bullet10^{-28}$ ±7.0%	$7.80\bullet10^{-28}$ ±7.0%	$3.93\bullet10^{-28}$ ±7.0%	$1.38\bullet10^{-28}$ ±8.0%	$4.02\bullet10^{-29}$ ±9.0%	$1.25\bullet10^{-29}$ ±12.0%
In→^{115m}In	$3.27\bullet10^{-28}$ ±7.8%	$5.34\bullet10^{-28}$ ±7.9%	$4.46\bullet10^{-28}$ ±8.7%	$2.15\bullet10^{-28}$ ±8.0%	$6.06\bullet10^{-29}$ ±9.4%	$1.47\bullet10^{-29}$ ±11.0%	$5.35\bullet10^{-30}$ ±12.0%
P→^{31}Si	$7.71\bullet10^{-29}$ ±25.5%	$1.27\bullet10^{-28}$ ±25.5%	$1.13\bullet10^{-28}$ ±25.5%	$5.79\bullet10^{-29}$ ±25.5%	$1.72\bullet10^{-29}$ ±25.5%	$4.16\bullet10^{-30}$ ±25.6%	$1.52\bullet10^{-30}$ ±25.7%
S→^{32}P	$1.52\bullet10^{-28}$ ±25.5%	$2.57\bullet10^{-28}$ ±25.5%	$2.16\bullet10^{-28}$ ±25.5%	$1.08\bullet10^{-28}$ ±25.5%	$2.95\bullet10^{-29}$ ±25.6%	$6.29\bullet10^{-30}$ ±26.1%	$2.42\bullet10^{-30}$ ±27.8%
Al→^{7}Be	$9.87\bullet10^{-32}$ ±17.0%	$6.49\bullet10^{-31}$ ±8.6%	$9.59\bullet10^{-31}$ ±8.2%	$7.79\bullet10^{-31}$ ±7.4%	$4.25\bullet10^{-31}$ ±10.6%	$1.07\bullet10^{-31}$ ±16.5%	-
Al→^{27}Mg	$1.41\bullet10^{-29}$ ±9.5%	$2.40\bullet10^{-29}$ ±8.9%	$2.50\bullet10^{-29}$ ±10.3%	$1.27\bullet10^{-29}$ ±9.9%	$9.77\bullet10^{-31}$ ±8.3%	$3.87\bullet10^{-31}$ ±7.9%	$1.88\bullet10^{-31}$ ±7.3%
Al→^{24}Na	$1.73\bullet10^{-29}$ ±6.1%	$3.22\bullet10^{-29}$ ±6.3%	$3.02\bullet10^{-29}$ ±6.2%	$1.53\bullet10^{-29}$ ±6.1%	$4.72\bullet10^{-30}$ ±6.3%	$1.14\bullet10^{-30}$ ±6.1%	$3.70\bullet10^{-31}$ ±6.3%
Al→^{22}Na	$2.80\bullet10^{-30}$ ±6.5%	$9.15\bullet10^{-30}$ ±6.2%	$1.05\bullet10^{-29}$ ±6.3%	$6.52\bullet10^{-30}$ ±6.0%	$2.65\bullet10^{-30}$ ±6.9%	$7.67\bullet10^{-31}$ ±11.1%	-
C→^{11}C	$1.01\bullet10^{-30}$ ±25.6%	$3.14\bullet10^{-30}$ ±25.5%	$6.16\bullet10^{-30}$ ±25.5%	$6.00\bullet10^{-30}$ ±25.5%	$1.65\bullet10^{-30}$ ±25.5%	$6.40\bullet10^{-31}$ ±25.5%	$2.97\bullet10^{-31}$ ±25.5%
Nb→^{92m}Nb	$5.60\bullet10^{-29}$ ±6.0%	$9.13\bullet10^{-29}$ ±6.1%	$8.28\bullet10^{-29}$ ±6.2%	$4.09\bullet10^{-29}$ ±6.3%	$1.29\bullet10^{-29}$ ±6.5%	$2.72\bullet10^{-30}$ ±8.8%	$9.95\bullet10^{-31}$ ±10.3%
Bi→^{201}Bi	-	-	$5.12\bullet10^{-30}$ ±28.8%	-	-	-	-
Bi→^{202}Bi	$1.22\bullet10^{-29}$ ±8.5%	$4.77\bullet10^{-29}$ ±7.8%	$4.85\bullet10^{-29}$ ±7.7%	$2.79\bullet10^{-29}$ ±7.7%	$1.02\bullet10^{-29}$ ±9.0%	$3.30\bullet10^{-30}$ ±8.3%	$1.32\bullet10^{-30}$ ±9.3%
Bi→^{203}Bi	$1.73\bullet10^{-29}$ ±15.5%	$5.98\bullet10^{-29}$ ±17.2%	$5.83\bullet10^{-29}$ ±15.6%	$3.85\bullet10^{-29}$ ±15.3%	$1.22\bullet10^{-29}$ ±16.7%	$3.65\bullet10^{-30}$ ±17.0%	$1.42\bullet10^{-30}$ ±18.8%
Bi→^{204}Bi	$3.10\bullet10^{-29}$ ±6.9%	$8.39\bullet10^{-29}$ ±7.0%	$8.19\bullet10^{-29}$ ±7.7%	$4.87\bullet10^{-29}$ ±8.3%	$1.57\bullet10^{-29}$ ±9.2%	$4.75\bullet10^{-30}$ ±9.8%	$1.75\bullet10^{-30}$ ±9.7%
Bi→^{205}Bi	$4.48\bullet10^{-29}$ ±7.4%	$1.05\bullet10^{-28}$ ±6.9%	$1.08\bullet10^{-28}$ ±7.2%	$5.78\bullet10^{-29}$ ±7.9%	$2.11\bullet10^{-29}$ ±8.4%	$5.88\bullet10^{-30}$ ±7.9%	$2.26\bullet10^{-30}$ ±7.1%
Bi→^{206}Bi	$6.88\bullet10^{-29}$ ±7.0%	$1.34\bullet10^{-28}$ ±7.5%	$1.14\bullet10^{-28}$ ±7.8%	$6.88\bullet10^{-29}$ ±7.7%	$1.82\bullet10^{-29}$ ±9.0%	$3.97\bullet10^{-30}$ ±8.9%	$1.57\bullet10^{-30}$ ±9.5%
Bi→^{207}Bi	$1.45\bullet10^{-28}$ ±4.3%	$2.89\bullet10^{-28}$ ±5.8%	$2.62\bullet10^{-28}$ ±5.0%	$1.32\bullet10^{-28}$ ±6.9%	$4.12\bullet10^{-29}$ ±8.9%	-	-

<u>Таблица 6.</u> Экспериментальные значения скоростей реакций при $E_p = 1.0$ ГэВ (урановая мишень)

Детектор → радионукл.	Скорость реакции, протон$^{-1}$						
	Y_1=30, мм	Y_2=130, мм	Y_3=230, мм	Y_4=330, мм	Y_5=430, мм	Y_6=530, мм	Y_7=700, мм
In→^{116m}In полиэтил. шар диаметр 5.08 см	$5.27 \cdot 10^{-25}$ ±25 %	$4.37 \cdot 10^{-25}$ ±25 %	$2.93 \cdot 10^{-25}$ ±25 %	$1.79 \cdot 10^{-25}$ ±25 %	$1.07 \cdot 10^{-25}$ ±25 %	$7.71 \cdot 10^{-26}$ ±27 %	$7.19 \cdot 10^{-26}$ ±27 %
P→^{31}Si	$2.79 \cdot 10^{-28}$ ±23 %	$1.92 \cdot 10^{-28}$ ±23 %	$1.14 \cdot 10^{-28}$ ±23 %	$4.98 \cdot 10^{-29}$ ±23 %	$2.14 \cdot 10^{-29}$ ±23 %	$9.75 \cdot 10^{-30}$ ±25 %	$4.74 \cdot 10^{-30}$ ±25 %
S→^{32}P	$8.23 \cdot 10^{-28}$ ±25 %	$8.61 \cdot 10^{-28}$ ±25 %	$4.82 \cdot 10^{-28}$ ±25 %	$2.38 \cdot 10^{-28}$ ±25 %	$1.24 \cdot 10^{-28}$ ±26 %	$5.27 \cdot 10^{-29}$ ±30 %	$3.16 \cdot 10^{-29}$ ±30 %
Al→^{24}Na	$1.95 \cdot 10^{-29}$ ±7 %	$1.69 \cdot 10^{-29}$ ±6 %	$9.33 \cdot 10^{-30}$ ±9 %	$4.80 \cdot 10^{-30}$ ±10 %	$2.89 \cdot 10^{-30}$ ±15 %	$1.61 \cdot 10^{-30}$ ±19 %	$7.80 \cdot 10^{-31}$ ±25 %
C→^{11}C	$4.17 \cdot 10^{-3}$ ±23 %	$5.53 \cdot 10^{-30}$ ±23 %	$4.60 \cdot 10^{-30}$ ±23 %	$2.89 \cdot 10^{-30}$ ±23 %	$1.66 \cdot 10^{-30}$ ±23 %	$9.17 \cdot 10^{-31}$ ±23 %	$2.56 \cdot 10^{-31}$ ±25 %

В заключение авторы выражают признательность главному менеджеру проектов № 157 и 477 МНТЦ В.И. Белякову-Бодину за предложение принять участие в радиационно-физических исследованиях и обсуждение результатов.

Список литературы

1. Venneri F, Bowman C.D, Wender S.A. The Physic Design of Accelerator - Driven Transmutation Systems. Proc. of Int. Conf., GLOBAL'95, Sep. 11-14, 1995, France, pp. 474-481.
2. Адо.Ю.М. – Препринт ИФВЭ 93-24, Протвино,1993.
3. Rubbia C. et al. CERN/AT/95-44 (ET), 1995 .
4. Крупный Г.И., Стеценко Г.Н., Янович А.А. – Препринт ИФВЭ 2000-30, Протвино, 2000.
5. Волынчиков А.И. и др. – Препринт ИФВЭ 83-86, Серпухов, 1983.
6. Белогорлов Е.А. и др. //Kernenergie, 27, 1984, p.p. 386 -389.
7. Бекурц К., Виртц К. Нейтронная физика. – М.: Атомиздат, 1968.
8. Barish E.S. et al.– Preprint CALT - 68-102, 1982

Рукопись поступила 20 июля 2000 г.

Приложение

ГЕНЕРАЦИЯ НЕЙТРОНОВ ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНЬЮ, ОБЛУЧАЕМОЙ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 70 ГЭВ

Цель работы – получение экспериментальных данных для сравнения с развиваемыми методами расчета.

Измерения выполнены на выведенном из ускорителя У-70 пучке протонов с энергией 70 ГэВ (медленный вывод). Ось пучка проходит на высоте 1350 мм от бетонного пола. Мишень вольфрамовая (ρ = 19.3 г/см^3) размером 160x160x300 мм^3 набрана из пластин толщиной 10 мм и размещена на подставке. На этой же подставке на расстоянии 750 мм от геометрического центра мишени под углами +45°, 0° и -22.5° устанавливались три потокомера нейтронов (полиэтиленовый шар диаметром 12.7 см в кадмиевой оболочке с толщиной стенки 1 мм; в центре шара размещался детектор тепловых нейтронов – In - фольга диаметром 30 мм и толщиной 0,12 мм). Сборки активационных детекторов размещались на боковой поверхности мишени (см. рис.1П). В сборку входят активационные детекторы: углерод на основе пластического сцинтиллятора, родиевая фольга, фосфор в кадмиевом экране и алюминиевый детектор диаметром 40 мм и толщиной 6 мм. Размеры остальных детекторов указаны в работе [4].

Число протонов за экспозицию определяется по активации медной фольги толщиной 100 микрон, установленной перед мишенью.

Положение пучка протонов на входе и выходе из мишени определяется визуально с помощью фотобумаги в пристрелочном эксперименте без мишени. Такая юстировка позволяет обеспечить совмещение геометрической оси с направлением прохождения пучка.

В экспозиции с мишенью (длительность облучения 30 минут) положение пучка фиксировалось с помощью фотобумаги, что позволило визуально определить размеры пучка (~2 мм по горизонтали и ~6 мм по вертикали). Обработка медной фольги показала, что более 99 % интенсивности сосредоточено на площади 3x7 мм^2. Медная фольга после облучения и выдержки в течение ~70 часов обрабатывалась на однокристалльном (NaJ(Tl) ∅150x100 мм^3) сцинтилляционном гамма-спектрометре по линии Eγ = 2.75 МэВ - Na^{24}, который образуетсся в реакции скалывания Cu (p,spall) Na^{24}. Сечение этой реакции, по данным [8], при энергии протонов Ep = 70 ГэВ равно σ = (3.90 ± 0.13) мбарн.

Активационные детекторы обрабатывались на радиометрической и спектрометрических установках:

- алюминий, медная фольга – на сцинтилляционном гамма-спектрометре; родий – на полупроводниковом гамма-спектрометре типа ДГР5-1 (предназначен для регистрации низкоэнергетического и рентгеновского излучений);
- индий, фосфор и углерод – на низкофоновой радиометрической установке [5].

Полиэтиленовый шар диаметром 12.7 см, в центре которого размещается детектор тепловых нейтронов In, является потокомером нейтронов в диапазоне энергий (0.5 эВ < E_n < 10 МэВ) так же, как полиэтиленовый шар диаметром 5.08 см с детектором тепловых нейтронов – потокомером промежуточных нейтронов в диапазоне энергий (0.5 эВ < E_n < 200 кэВ) [6]. Градуировка In-фольг в полиэтиленовых шарах диаметрами 5.08 и 12.7 см выполнена в свободной геометрии от эталонного радионуклидного источника нейтронов Cf ^{252}; величина сечения активации тепловыми нейтронами принята равной σ_{act} = 160 барн [7]. Полная погрешность определения флюенса нейтронов по показаниям детектора тепловых нейтронов в полиэтиленовых шарах диаметрами 5.08 и 12.7 см не превосходит ± 30 %.

Число протонов J за время облучения, когда это время много меньше периода полураспада радионуклида (Na^{24}; $T_{1/2}$ = 15 час), определяется по формуле

$$J = \frac{s \cdot \exp(t_{выд} / \tau) \cdot \tau}{\varepsilon \cdot y \cdot t_{и} \cdot n_{я} \cdot \sigma \cdot h},$$

где s – площадь под фотопиком (E_γ = 2.75 МэВ) за время измерения $t_И$; ε – эффективность регистрации гамма-квантов с энергией E_γ = 2.75 МэВ; y – выход гамма-квантов на распад; $n_Я$ – число ядер мишени в единице объема; h – толщина фольги; τ – постоянная распада, $\tau = T_{1/2}/\ln 2$; σ – сечение образования Na^{24} в реакции скалывания Cu (p, spall); $t_{ВЫД}$ – время с момента окончания облучения до начала обсчета.

Погрешность определения J обусловлена в основном погрешностями определения величин s, ε и сечения σ. Полная погрешность определения числа протонов, включающая в себя упомянутые факторы, не превышает 5 %.

Результаты обработки экспериментальных данных приведены в таблице 1П.

<u>Таблица 1П.</u> Экспериментальные значения скоростей реакции при E_p = 70 ГэВ (вольфрамовая мишень)

Детектор → радионуклид	Скорость реакции, протон$^{-1}$				
	т.1	т.2	т.3	т.4	т.5
Rh→^{103m}Rh	$1.93 \bullet 10^{-27}$ ±15 %	$4.36 \bullet 10^{-27}$ ±15 %	$5.76 \bullet 10^{-27}$ ±15 %	$5.44 \bullet 10^{-27}$ ±15 %	$3.84 \bullet 10^{-27}$ ±15 %
P→^{31}Si	$3.35 \bullet 10^{-27}$ ±25 %	$6.70 \bullet 10^{-27}$ ±25 %	$9.05 \bullet 10^{-27}$ ±23 %	$8.31 \bullet 10^{-27}$ ±23 %	$5.46 \bullet 10^{-27}$ ±25 %
Al→^{24}Na	$6.60 \bullet 10^{-28}$ ±9 %	$1.35 \bullet 10^{-27}$ ±7 %	$1.65 \bullet 10^{-27}$ ±7%	$1.62 \bullet 10^{-27}$ ±7 %	$1.29 \bullet 10^{-27}$ ±9 %
C→^{11}C	$5.06 \bullet 10^{-29}$ ±23 %	$1.61 \bullet 10^{-28}$ ±23 %	$2.00 \bullet 10^{-28}$ ±23 %	$2.64 \bullet 10^{-28}$ ±23 %	$1.30 \bullet 10^{-28}$ ±23 %

Угол	+45°	0°	-22.5°
In→^{116m}In полиэтил. шар диаметр 12.7 см	$2.40 \bullet 10^{-24}$ ±10 %	$2.56 \bullet 10^{-24}$ ±10 %	$2.24 \bullet 10^{-24}$ ±10 %

В таблице 2П приведены флюенсы нейтронов в диапазоне энергий (0.5 эВ < E_n < 10 МэВ) на расстоянии 750 мм от геометрического центра мишени.

<u>Таблица 2П.</u> Значения флюенсов нейтронов

Детектор → радионуклид	Флюенс нейтронов, нейтрон · см$^{-2}$ · протон$^{-1}$		
	+45°	0°	-22.5°
In→^{116m}In полиэтил. шар диаметр 12.7 см	384.0 ±10 %	409.6 ±10 %	358.4 ±10 %

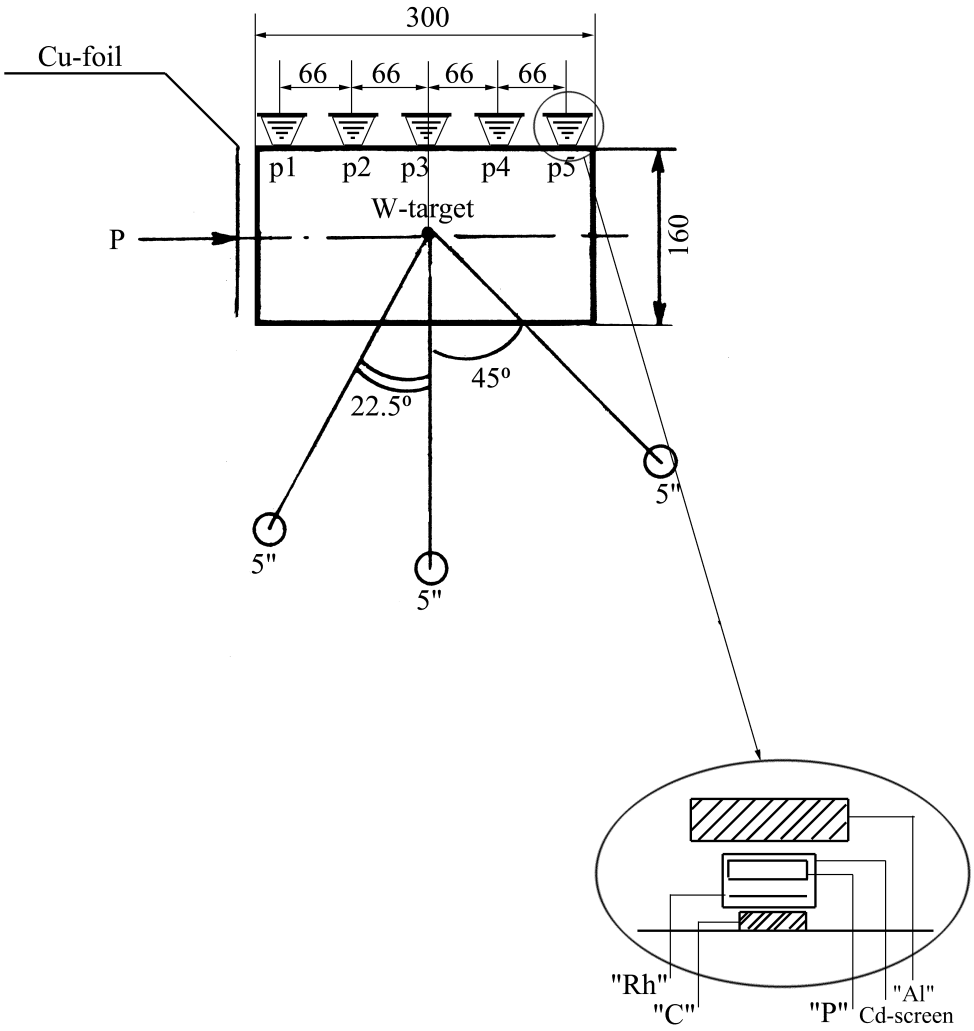

Рис. 1П. Схема размещения активационных детекторов.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Н.И.Калмычкову, А.А.Кузнецову, В.Н.Пелешко и Я.Н.Расцветалову за многочисленные полезные обсуждения при проведении эксперимента.

Г.И. Крупный, Г.Н. Стеценко, А.А. Янович
Выход вторичного излучения с поверхности тяжелых мишеней, облучаемых протонами средних энергий ($E_p \sim 1$ ГэВ).

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Л.Ф. Васильева. Технический редактор Н.В.Орлова

Подписано к печати 21.07.2000. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.
Печ.л. 1.5. Уч.– изд.л. 1.2. Тираж 130. Заказ 165. Индекс 3649. ЛР №020498 от 17.04.97

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142284, Протвино Московской области

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2000-34, И Ф В Э, 2000