

20/1х-82

4497/82



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

9-82-357

В.П.Саранцев, С.И.Тютюнников

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ВЫХОДА ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА
НА ПРОТОТИПЕ КУТИ

1982

ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты по измерению параметров ионов, ускоряемых на прототипе КУТИ ^{1,2/}, базировались на расчетных значениях порогов реакций ионов азота с мишенями из дейтерия, никеля, титана. В основном этот порог определяется кулоновскими барьерами. Кроме этого, нужна была достоверная калибровка по выходу линии $E_{\gamma}=511$ кэВ для ионов азота с мишенями из Ni, Ti D₂, поскольку в γ -спектрах, получаемых на прототипе КУТИ, содержалась только линия $E_{\gamma}=511$ кэВ. Была поставлена задача измерить в данной работе на линейном ускорителе тяжелых ионов выход активности по линии $E_{\gamma}=511$ кэВ для тех же самых мишеней, которые употреблялись на прототипе КУТИ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эксперименты проводились на пучке ионов азота линейного ускорителя тяжелых ионов Центрального института физики /Бухарест/, который по диапазону параметров пучка близок к прототипу коллективного ускорителя тяжелых ионов: энергия ионов $E_1 \leq 60$ мэВ, поток ионов $n_1 \approx 10^{12}$ ион/с. Геометрия облучения мишеней и измерения γ -спектров была полностью тождественна используемой на коллективном ускорителе ^{1,2/} /см. рис.1/. Камера, в которой проводилось облучение, была электрически изолирована, как и держатель мишени для мониторингирования потока ионов, падающего и прошедшего сквозь мишень. Измерение активности производилось Ge(Li)-детекторами, установленными вбли-

зи стенки камеры, при этом в режиме измерения активности плоскость мишени поворачивалась к детектору. При работе с дейтериевой мишенью с целью мониторингирования перед ней помещалась алюминиевая фольга толщиной 5 мк.

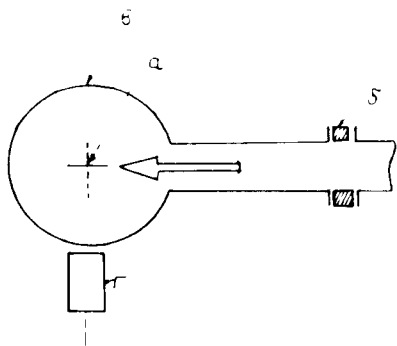


Рис.1. Геометрия эксперимента:
а/ мишень, б/ изолятор,
в/ коллектор, г/ Ge(Li)-детектор.

Времена облучения и измерения выбирались такими, как и в экспериментах на прототипе КУТИ: $t_{обл.} = 5$ мин, $t_{изм.} = 200$ с. Диапазон энергий ионов азота составлял от 20 до 50 МэВ. Шаг по энергии равнялся 5 МэВ. Точность задания энергии ионов азота была не хуже чем 1 кэВ и устанавливалась оператором по экспериментальным таблицам параметров ускорителя.

Как было сказано выше, в качестве мишеней для измерений использовались фольги никеля и титана толщиной 10 и 20 мк соответственно, в качестве дейтериевой мишени использовался обогащенный дейтерием полиэтилен толщиной 1 мм. Облучение происходило в течение 5 мин, затем производилось измерение полученной активности с помощью Ge(Li)-детектора с анализатором "Самбегга", результаты измерений записывались на магнитную ленту и затем после облучений обрабатывались. На рис.2 приведены γ -спектры, полученные при облучении мишени из Ti /а/, Ni /б/ и D₂/в/; время облучения $t_{обл.} = 300$ с.

На рис.3 представлены значения измеренных периодов полураспада полученной при облучении активности. Эти значения равны: в случае титановой мишени для линии $E_{\gamma} = 511$ кэВ $T_{1/2} = 12$ мин; в случае никелевой мишени для линии $E_{\gamma} = 511$ кэВ $T_{1/2} = 12$ мин, для линии $E_{\gamma} = 166$ кэВ $T_{1/2} = 10$ мин; в случае дейтериевой мишени $T_{1/2} = 2$ мин для $E_{\gamma} = 511$ кэВ.

Для измерения зависимости выхода продуктов реакций от энергий при переходе к следующему значению энергии перед облучением производилось определение активности, которая является фоном, при этом учитывались временная зависимость наведенной активности, измерялось время от конца фонового измерения до начала нового облучения.

По измеренным площадям фотопиков производилось определение выхода активности, при этом полагалось, что квантовый выход для линий с $E_{\gamma} = 511$ кэВ равен 100%. Полная эффективность регистрации излучения, включающая в себя геометрическую, обусловленную рассеянием от детектора мишени, и энергетическую, определяемую объемом детектора, была измерена с помощью образцовых источников. Ее значение для $E_{\gamma} = 511$ кэВ $\epsilon = 4,5 \cdot 10^{-8}$.

Поскольку в данных экспериментах идентифицировать канал реакции, дающий линию $E_{\gamma} = 511$ кэВ, не представляется возможным только по периоду полураспада, то определяется не сечение реакции, а выход активности по линии $E_{\gamma} = 511$ кэВ на один падающий ион. Эта величина удобна для нахождения количества ионов, ускоряемых на КУТИ, поскольку берутся мишени одинаковой толщины. На рис.4 представлены выходы активности по линии $E_{\gamma} = 511$ кэВ из мишеней Ni и Ti. На рис.5 приведены зависимости выхода активности для дейтериевой мишени при облучении ионами азота, прямой линией отмечен фон, определяющий порог чувствительности по регистрации активности. При определении выхода

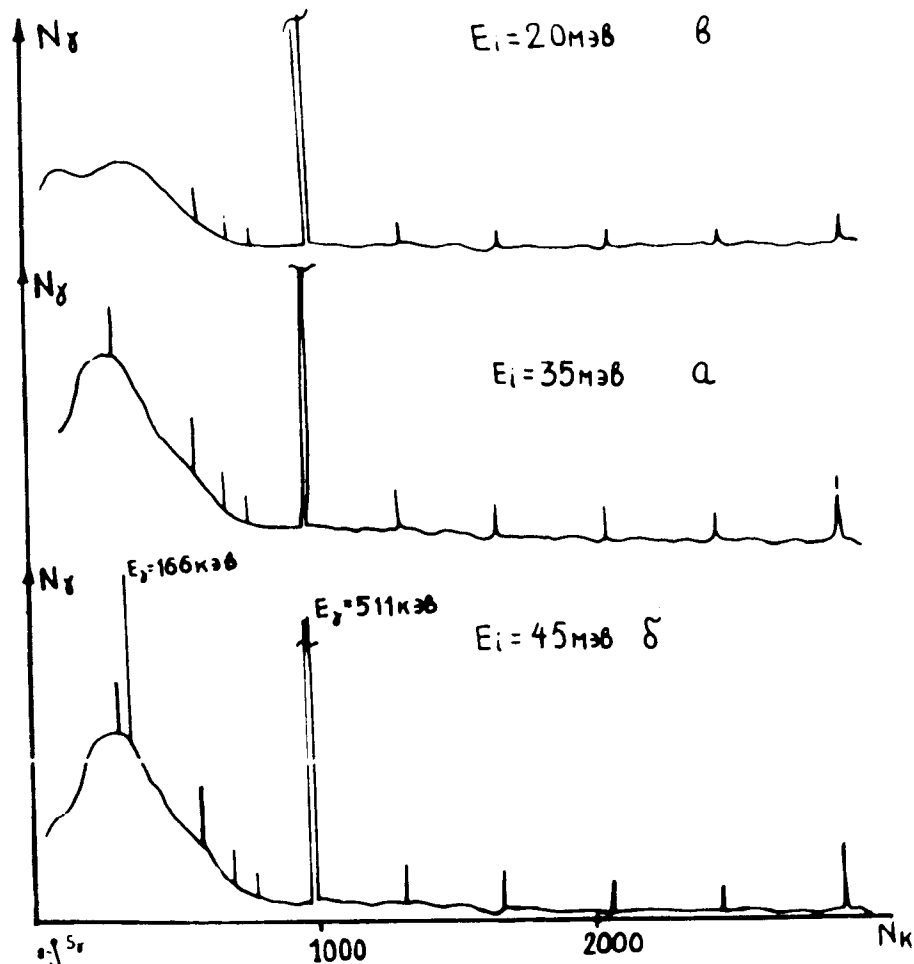


Рис.2. γ -спектры продуктов реакций при взаимодействии ионов азота с мишенями: а/титан, б/никель, в/дейтерий.

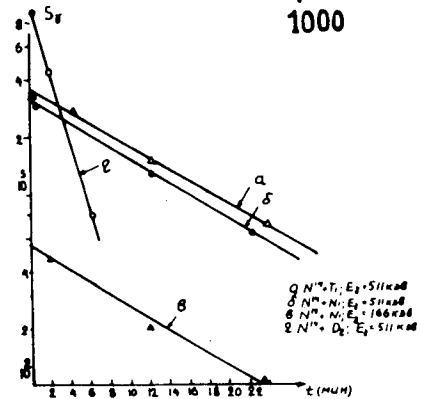


Рис.3. Спад, полученный при облучении активности, во времени.

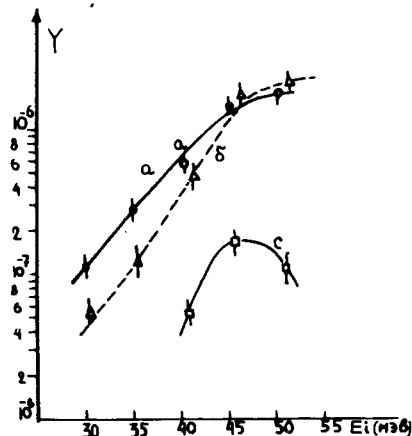


Рис.4. Выходы активности в зависимости от энергии при облучении мишеней ионами азота из дейтерия.

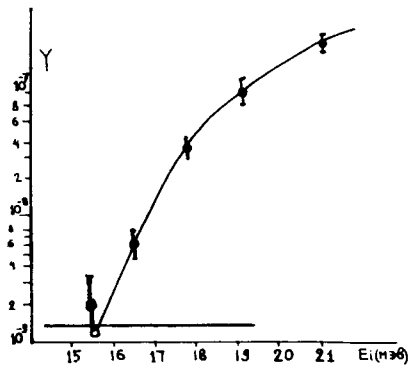


Рис.5. Зависимость выхода активности от энергии при облучении ионами азота мишени из дейтерия.

активности на один ион ошибка складывается из двух факторов: ошибки в мониторинговании потока ионов /20%/ и статистической ошибки измерений.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОНОВ, УСКОРЯЕМЫХ НА ПРОТОТИПЕ КУТИ

в работе [1] приводятся результаты по измерению активности по линии $E_\gamma = 511$ кэВ при облучении ионами азота дейтериевой мишени в зависимости от фактора загрузки кольца ионами, который определяет соответственно их энергию и интенсивность. На рис.6 представлена кривая, которая показывает пороговый рост активности в зависимости от загрузки. В качестве пороговой загрузки укажем то значение, которое дает 50%-ное превышение активности над фоном. Ему соответствует давление остаточного газа $P = 8 \cdot 10^{-8}$ Тор.

Аналогичное значение порога реакции для выхода активности ^{15}O из реакции $^{14}\text{N}(\text{D}_2, \text{p})^{15}\text{O}$, полученное на линейном ускорителе, равно $E_i = 16$ МэВ; при этих определениях пороговой энергии фон, приведенный к одной эф-

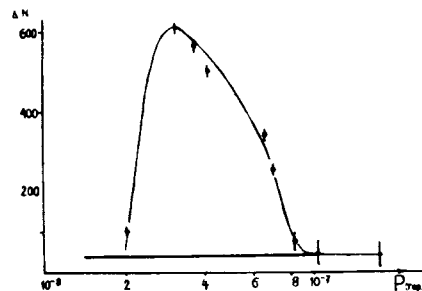


Рис.6. Зависимость активности, полученной при использовании дейтериевой мишени, от загрузки кольца ионами азота.

фективности регистрации, составляет одну величину /50±14 отсчетов по линии $E_\gamma = 511$ кэВ/. На рис.5 порог регистрации, определяемый фоном, представлен прямой линией; на рис.6 прямой также показан фон. Из рис.5 и 6 видно, что пороговой энергии $E_\gamma = 16$ МэВ соответствует загрузка $P = 8 \cdot 10^{-8}$ Тор, из сравнения для остальных экспериментальных точек можно получить также энергию для каждого значения загрузки.

Определим значения энергии для точек кривой, соответствующих загрузке $P = 6 \cdot 10^{-8}$ Тор и $P = 3 \cdot 10^{-8}$ Тор на рис.6. При этом мы исходим из предположения, что выход активности линейно зависит от загрузки кольца /в единицах давления/; нормируя результаты на единицу загрузки, можем получить выход активности по отношению к минимальной, определяемой при пороговой загрузке $P = 8 \cdot 10^{-8}$ Тор:

$$\frac{Y(P)}{Y(P = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Тор})}$$

Здесь $Y(P) = \frac{\Delta N(P)}{P}$, где P - величина потока ионов в единицах загрузки кольца. ΔN - величина активности, приведенной на рис.6, соответствующая давлению P .

В табл.1 представлены результаты, полученные для 3 загрузок кольца, и вычисленные из рис.5 значения энергии, соответствующие им.

Таблица 1

Загрузка в единицах Γ	$8 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$
$Y(P)/Y(P = 8 \cdot 10^{-8})$	1	17	60
E_i /МэВ/	16	18	21
N_i	$2,3 \cdot 10^{12}$	$1,6 \cdot 10^{12}$	$8 \cdot 10^{11}$

Исходя из измеренных значений выходов активности по линии $E_\gamma = 511$ кэВ для дейтерия /см. рис.5/, можно определить интенсивности пучков ионов азота для соответствующих загрузок, представленных в табл.1. Значение числа ионов N_i находится по формуле

$$N_i = \frac{\Delta N \cdot e^{\lambda t_{\text{зад.}}} \cdot t_{\text{обл.}}}{\epsilon(1 - e^{-\lambda t_{\text{обл.}}}) \cdot t_{\text{изм.}}} \cdot \frac{1}{Y(E_i)}$$

где $t_{\text{обл.}} = 5$ мин, $t_{\text{изм.}} = 2$ мин, $t_{\text{зад.}}$ - время от конца облучения, - 2 мин, ΔN - полная активность по линии $E_\gamma = 511$ кэВ, $Y(E_i)$ - выход активности на один ион /по рис.5/ для соответствующей энергии.

Определенное по этой формуле число ионов представлено в табл.1 для разных загрузок. Как видно из этой таблицы, число

ионов линейно зависит от загрузки, определяемой давлением остаточного газа. Для значения загрузки $P=3 \cdot 10^{-8}$ полученное значение энергии ионов является предельным, соответственно темп ускорения в этом случае $\Delta E_i = 3$ МэВ/нукл. м, поскольку в экспериментах была использована эффективная длина ускорения $L=0,6$ метра, для загрузки при $P=3 \cdot 10^{-8}$ ускорение происходит при градиентах больших, чем предельно допустимые, и при этом процесс ускорения ионов срывается. В работе^{12/} был исследован процесс ускорения ионов азота в спадающем магнитном поле двух соленоидов и в электрическом поле ускоряющей секции индукционного типа. Длина ускорения в спадающем магнитном поле соответствовала 1,6 метра. На рис.7 приведены результаты по измерению выхода активности по линии $E_\gamma=511$ кэВ в зависимости от фактора загрузки кольца в двух режимах: /а/ - в спадающем поле двух соленоидов, /б/ - с включением дополнительно электрического поля ускоряющей секции.

Кроме того, на прототипе КУТИ^{12/} было найдено, что активность, полученная при взаимодействии ионов азота с титановой мишенью, имела период полураспада $T_{1/2}=10$ мин. Проведенные на линейном ускорителе измерения активности с титановой мишенью дали тот же период полураспада $T_{1/2}=12 \pm 2$ мин, поэтому для измерения потока ионов, ускоряемых в электронных кольцах, в случае титановой мишени можно использовать приведенные на рис.4 экспериментальные результаты по выходу активности линии $E_\gamma=511$ кэВ. Сравнение графиков 7 и 4 позволяет построить график изменения энергии ионов азота в зависимости от загрузки кольца в единицах давления. На рис.8 показана эта зависимость.

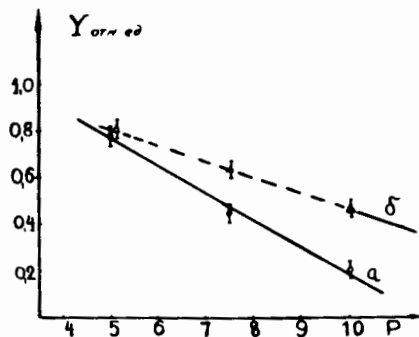


Рис.7. Зависимость выхода активности для реакции ионов азота с мишенью из титана от загрузки в двух режимах: а/в спадающем поле соленоидов, б/с включением электрического поля индукционной секции.

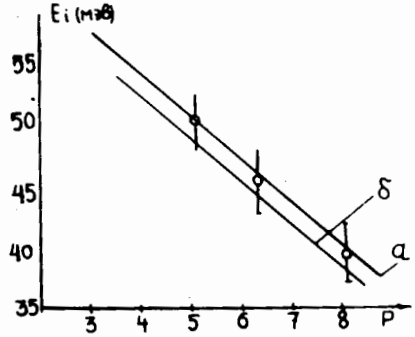


Рис.8. Зависимость энергии ионов, ускоряемых в электронном кольце, от загрузки кольца в единицах давления остаточного газа: а/по данным этой работы /для ионов азота/, б/ по данным работы^{12/} /для ионов кислорода/

Отсюда следует, что максимально достигаемая энергия ионов азота составляет 52 МэВ для загрузки $P=5 \cdot 10^{-8}$ Тор. Эта энергия соответствует длине ускорения 1,6 метра.

Таким образом, сравнение экспериментальных данных по энергии ионов азота, приобретаемой ими при ускорении в спадающем внешнем магнитном поле электрон-ионного кольца, показывает линейную зависимость между энергией и длиной ускорения. Действительно, энергия ионов азота при длине ускорения $L=0,6$ метра $E_i = 21 \pm 1$ МэВ, при $L=1,6$ метра - 52 МэВ. Этим фактом еще раз подтверждается регулируемое коллективное ускорение ионов азота собственным полем электронного кольца. Темп ускорения при этом $\Delta E_i = 3$ МэВ/нукл.метр.

Из сравнения результатов, показанных на рис.4 и 7, можно определить прирост энергии ионов азота в электрическом поле, который составляет $\Delta E=7$ МэВ. Значение числа ионов, ускоряемых в спадающем магнитном поле двух соленоидов на длине $L=1,6$ метра, составляет $N_i = 6 \cdot 10^{11}$.

В заключение обсудим возможность использования расчетных значений порогов реакций; расчетные значения кулоновского барьера для ионов азота с мишенями из Ni, Ti, D для лабораторной системы координат при условии, что

$$E_c^{лаб.} = \frac{0,08 \cdot Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}} \left(1 + \frac{A_1}{A_2}\right), \quad /1/$$

где Z_1 - заряд налетающего иона, Z_2 - заряд ядра мишени, A_1 - масса налетающего иона, A_2 - масса ядра мишени. показаны в табл.2.

Таблица 2

Мишень	D ₂	Ti	Ni
E_c /теор./ /МэВ/	16 МэВ	32 МэВ	39 МэВ
E_c /эксп./ /МэВ/	16,5 МэВ	32 МэВ	37 МэВ

Для образования компаунд-ядер сечение образования^{13/}

$$\sigma_c = \pi r_0^2 (A_1^{1/3} + A_2^{1/3}) \left(1 - \frac{E_c}{E_i}\right), \quad /2/$$

где E_i - энергия ионов азота в лаб.системе координат. Если экспериментально определить E_c как энергию, при которой сечение $\sigma_c = 0,1 \sigma_{max}$, то получим значения экспериментальных порогов, которые равны /с точностью 10%/: для D₂ $E_c=16,5$ МэВ, для Ti $E_c=32$ МэВ, для Ni $E_c=37$ МэВ. Как видно из табл.2, расчетные и экспериментальные значения порогов хорошо совпадают. Использование формулы /1/ для определения порогов более

тяжелых ионов, чем азот, например Хе, приводит к большой неопределенности из-за неточности знания r_0 - радиуса действия ядерных сил, который находится для каждой комбинации мишень-частица экспериментально ^{1/4}. Поэтому для тяжелых налетающих ионов требуется только экспериментальное определение порога. Для ионов азота при определении пороговой энергии можно использовать в качестве порога реакции расчетное значение кулоновского барьера в л.с.к.

ВЫВОДЫ

1. Измерены зависимости выхода активности по линии $E_\gamma = 511$ кэВ для реакций ионов азота с мишенями из D_2 , Ti, Ni от энергии ионов вблизи порога реакции.
2. Показано хорошее согласие расчетных и экспериментальных порогов для этих реакций.
3. Экспериментально определена энергия ионов азота при ускорении электронными кольцами, получено значение темпа ускорения.
4. Показана экспериментально линейная зависимость между энергией, приобретаемой ионом азота, и длиной ускорения.
5. Определены значения числа ионов, ускоряемых электронными кольцами, при разной загрузке кольца и разной длине ускорения.
 - а/ линейная зависимость интенсивности ионов от загрузки:
 $N_i = 8 \cdot 10^{11}$ при $P = 3 \cdot 10^{-8}$ Тор,
 $N_i = 2 \cdot 10^{12}$ при $P = 8 \cdot 10^{-8}$ Тор;
 - б/ отсутствие потерь по длине ускорения:
 $N_i = /8+2/ \cdot 10^{11}$, $L = 0,6$ метра,
 $N_i = /6+2/ \cdot 10^{11}$, $L = 1,6$ метра.
6. Измерено значение прироста энергии в электрическом поле ускоряющей секции, которое составляет $\Delta E = 7$ МэВ.

В заключение авторы выражают благодарность К.Процопу за большую помощь в организации и проведении этой работы, всем сотрудникам секции тяжелых ионов Центрального института физики /Бухарест/ за помощь в работе и И.В.Кузнецову - за обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, Р9-11191, Дубна, 1978.
2. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, Р9-12414, Дубна, 1979.
3. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика, Атомиздат, М., 1974.
4. Lefort M., Le Beyer Y. J.Peter. IPNO-RC-73-04, ORSAY, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 мая 1982 года.

Саранцев В.П., Тютюнников С.И. Экспериментальное определение 9-82-357 выхода ядерных реакций, используемых для диагностики пучка на прототипе КУТИ

Приводятся экспериментальные результаты по измерению выхода активности по линии $E_\gamma = 511$ кэВ на один ион для реакций ионов азота с мишенями из D_2 , Ni, Ti, полученные на линейном ускорителе тяжелых ионов Центрального института физики /Бухарест/.

На основании приведенных данных уточняются параметры ионов, ускоренных на прототипе КУТИ ОНУ ОИЯИ.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Sarantsev V.P., Tutyunnikov S.I. Experimental Determination 9-82-357 of the Yield of Nuclear Reactions Used for Beam Diagnostics of the KUTI Prototype

Experimental results on the of yield activity along $E_\gamma = 511$ keV line to one ion for the reaction of nitrogen ions with D_2 , Ni, Ti targets, which have been obtained on the heavy ion linear accelerator of the Central Institute of Physics (Bucharest) are presented. On the basis of the data obtained parameters of ions accelerated on KUTI prototype (JINR) are determined more precisely.

The investigation has been performed at the Department of New Methods of Acceleration, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.