

973 $\frac{11}{8-67}$

2.3



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

В.В. Волков, Л. Поморский, Я. Тыс, Г.Н. Флеров

P-973

РЕАКЦИИ ПЕРЕДАЧИ $2n$ И $3n$

ПРИ ОБЛУЧЕНИИ Al, Si, Ta

ИОНАМИ N^{15} И N^{14}

ЖЭТФ, 1962, т 43, в 3, с 865-872.

В.В. Волков, Л. Поморский^{х)}, Я. Тыс^{хх)}, Г.Н. Флеров

РЕАКЦИИ ПЕРЕДАЧИ 2 n И 3 n
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ Al, Cu, Ta
ИОНАМИ N¹⁵ И N¹⁴

Направлено в ЖЭТФ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

х) Институт ядерной физики, Краков, Польша.

хх) Институт ядерных исследований, Варшава, Польша.

1468/1 сур.

А н н о т а ц и я

В работе изучались реакции подхвата 2-х и 3-х нейтронов при облучении *Al*, *Cu* и *Ta* ионами N^{15} и N^{14} . В качестве детектируемой частицы использовались ядра N^{17} , испускающие запаздывающие нейтроны. Получены кривые выхода для толстых мишеней и эффективные сечения в интервале энергии ионов 50-140 Мэв. Проведено сравнение эффективных сечений реакций передачи одного, двух и трех нейтронов.

Abstract

The transfer reactions of two and three neutrons were investigated by bombardment of *Al*, *Cu* and *Ta* with ions of N^{15} and N^{14} . Nucleus of N^{17} as particle detection was taken. The thick targets yields and cross sections in the interval energy of the ions 50 - 140 MeV have been obtained.

Comparison cross sections for the transfer reactions of one two and three neutrons have been made.

В в е д е н и е

В физике тяжелых ионов большой интерес представляет исследование реакций, возникающих при краевых столкновениях ядер мишени с ядрами налетающих частиц. При столкновениях такого рода может произойти передача одного или даже целой группы нуклонов от одного ядра к другому без образования составного ядра. Реакции такого типа получили название "реакции передачи" (*transfer reactions*).

Все реакции передачи в целях систематизации можно разделить на три класса:

1. Реакции передачи одного нуклона;

2. Реакции передачи нескольких нуклонов (например, $2n, 3n, 2p, 3p$) или связанных комплексов нуклонов: α, T, Li и т.п.;

3. Реакции обмена нуклонами.

Наиболее подробно изучалась реакция передачи одного нейтрона. Впервые она наблюдалась в работах ^{/1,2/}; к настоящему времени изучению этой реакции посвящен целый ряд работ. Полученный экспериментальный материал включает в себя в основном функции возбуждения ^{/3-7/} и угловые распределения продуктов реакции ^{/7-14/}.

Передача нескольких нуклонов наблюдалась в работах ^{/14-16/}, реакции обмена - в работах ^{/15,17/}.

Обычно при исследовании реакции передачи экспериментальный метод основан на детектировании таких радиоактивных продуктов реакции как $C^{11}, N^{13}, O^{15}, F^{18}$, обладающих удобными для регистрации периодами полураспада.

Измерения угловых распределений и пробегов продуктов реакций передачи свидетельствуют о том, что эти реакции происходят при касательном соударении взаимодействующих ядер. Поскольку эти реакции разыгрываются на поверхности сталкивающихся ядер, их детальное и систематическое исследование может дать полезные сведения о строении периферии ядра и состояниях периферийных нуклонов.

Нам кажется, что особый интерес представляет систематическое исследование и сравнение передачи одного, двух, трех и четырех нейтронов. При сопоставлении эффективных сечений и угловых распределений этих реакций можно ожидать проявления корреляции поверхностных нуклонов и, в частности, эффекта спаривания нейтронов.

Указание на возможность реакции подхвата 2-х нейтронов впервые было получено в работе ^{/18/}. В этой работе наблюдалось образование ядер N^{16} при облучении мишени из $LiCl$ ионами N^{14} с энергией 15,6 Мэв. Однако из полученных данных трудно сделать определенный вывод относительно механизма образования этого изотопа. Реакция подхвата 2-х нейтронов ядром N^{14} изучалась в работе ^{/19/}. Мишени из LiF, Al и Cu облучались

ионами N^{14} с энергией около 100 Мэв. Измерялся выход ядер N^{16} в условиях, когда эти ядра могли образоваться лишь за счет подхвата 2-х нейтронов. Были получены усредненные значения сечений реакции в интервале энергии 92-55 Мэв.

В настоящей работе исследовались реакции подхвата 2-х и 3-х нейтронов при облучении мишени из Al , Cu и Ta , соответственно, ионами N^{15} и N^{14} . В качестве детектируемой частицы использовались ядра N^{17} , являющиеся эмиттером запаздывающих нейтронов.

Реакция подхвата 3-х нейтронов наблюдалась впервые.

Аппаратура и проведение эксперимента

Эксперименты проводились на внутреннем пучке циклотрона тяжелых ионов Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Для регистрации нейтронной активности ядер N^{17} использовались пропорциональные счетчики с BF_3 , помещенные в замедлитель из плексигласа. Головка мишени была расположена в центре лобовой части измерительного блока. На рис. 1 представлен общий вид детектора и головки мишени. Детектор нейтронов был смонтирован на конце длинной трубы, которая вводилась через вакуумный шлюз между дуантами циклотрона. Общий вид расположения пробника внутри машины представлен на рисунке 2. В оптимальных условиях работы (напряжение на счетчиках 3000 в, коэффициент радиотехнического усиления 400, порог дискриминатора 35 в) эффективность детектора составляла около 0,1 % для полониево-бериллиевого источника нейтронов, помещенного в месторасположение мишени. Фон детектора в присутствии Co^{60} (2 мС) не превышал двух импульсов в минуту. Блок-схема экспериментальной аппаратуры представлена на рис. 3. Более детальное описание измерительной аппаратуры дано в работе /15/.

Во время измерений циклотрон работал в импульсном режиме. Поскольку период полураспада N^{17} равен 4,15 сек, мишень облучалась 30 сек, затем снималось высокочастотное напряжение на дуантах и в течение 30 сек регистрировалась нейтронная активность. Энергия бомбардирующих ионов определялась по радиусу пучка. Для каждого значения энергии ионов проводилось 4-5 циклов облучения. Интенсивность пучка, измерявшаяся с помощью интегратора тока, лежала в пределах 0,1-1 мА. Поскольку эксперименты проводились внутри циклотрона, естественно, возник вопрос о величине фона запаздывающих нейтронов, который дает сама машина. Этот фон может возникать за счет рассеянных ионов, попавших на дуанты. Для оценки величины этого фона были проведены следующие измерения:

а) при пучке максимальной интенсивности пробник выдвигался на такое расстояние от центра, до которого ускоряемые частицы не могли дойти из-за фазовых потерь. В этих условиях весь пучок рассеивался внутри машины, тем не менее количество импульсов от запаздывающих нейтронов оставалось в пределах обычного фона;

б) облучение мишени из графита показало, что выход на нем в десятки и сотни раз меньше, чем при облучении Al , Cu и Ta ; это свидетельствует о том, что фон, даваемый машиной, составляет ничтожную часть эффекта.

Хорошие "фоновые" свойства графита были использованы для изготовления коллиматор-

ра (см. рис. 1), препятствовавшего попаданию пучка на болты крепления головки мишени и края дуантов. При использовании мишени из алюминия и меди все части головки, на которые попадал пучок, изготавливались из исследуемого материала.

При облучении тантала для задержки однозарядных ионов использовалась графитовая фольга толщиной 20 микрон, вкладом от которой можно было пренебречь.

Результаты измерений

Для исследования реакции передачи $(+2n)$ и $(+3n)$ (знак + обозначает передачу нуклонов от ядра мишени к ядру налетающей частицы; знак - передачу в обратном направлении) толстые мишени из Al , Cu и Ta были облучены пучками ионов $N^{15(3+)}$ и $N^{14(3+)}$ в интервале энергии $\sim 50 - 140$ Мэв. Во всех случаях наблюдалось образование нейтронной активности, период полураспада которой в пределах погрешности измерений совпадал с табличными данными для периода полураспада N^{17} .

Типичные кривые распада нейтронной активности для реакции $Ta + N^{14} \rightarrow N^{17}$ и $Cu + N^{15} \rightarrow N^{17}$ показаны на рис. 4а,б. Зависимость выхода N^{17} от энергии бомбардирующих ионов была измерена путем постепенного изменения радиуса, на котором проводилось облучение мишени.

Полученные кривые выхода для реакции передачи $(+2n)$ и $(+3n)$ показаны на рис. 5 и 6. Для экспериментальных точек указаны статистические ошибки.

Кривые эффективных сечений реакций, полученные обычным методом дифференцирования кривых выхода, приведены на рис. 7 и 8. Необходимые для этих расчетов пробеги ионов N^{14} и N^{15} были взяты из работ ^{/21; 22/} или вычислялись по формулам, приведенным в работе ^{/22/}. Фон, создаваемый рассеянными ионами, попадавшими на дуанты циклотрона, составлял заметную величину лишь для самых низких значений энергии ионов; во всех остальных случаях им можно было практически пренебречь. По нашим оценкам ошибка в определении абсолютной величины эффективного сечения составляет около 40%.

Обсуждение результатов

Характер ядерной реакции в основном определяется энергетической зависимостью сечения и угловым распределением продуктов реакции. В наших экспериментах мы имели возможность измерять лишь энергетическую зависимость сечений реакций, тем не менее сама форма полученных кривых (см. рис. 7 и 8) определенно указывает на то, что N^{17} образуется не за счет распада компаунд-ядра. Как хорошо известно, сечения реакций, протекающих через составное ядро, имеют колоколообразную форму с полушириной около 10 Мэв ^{/23-25/}. В нашем случае сечение быстро растет вблизи кулоновского барьера, а затем сравнительно мало меняется на протяжении 25-30 Мэв; особенно отчетливо это проявляется для реакции подхвата 3-х нейтронов. Сопоставление полученных нами кривых с кривыми многонуклонных передач из работы ^{/14/} показывает большее сходство. Все это позволяет сделать вывод, что образование N^{17} при облучении Al , Cu и Ta ионами N^{15} и N^{14} , идет за счет реакции подхвата 2-х и 3-х нейтронов ядром налетающей частицы.

Большой интерес представляет сравнение эффективных сечений реакции передачи

2-х и 3-х нейтронов ($+2n$) и ($+3n$) с сечениями реакции передачи одного нейтрона ($-1n$), полученными в работах /7,11/. Хотя может возникнуть некоторое сомнение в правомерности сопоставления реакции срыва нейтрона и реакции подхвата 2-х и 3-х нейтронов, однако, можно думать, что срыв и подхват нейтрона - близкие типы реакции, поэтому такое сравнение возможно.

Для сравнения удобно представить полученные эффективные сечения в зависимости от величины $(E_{CM} - E_{CB})$ - разности энергии иона и высоты кулоновского барьера в системе центра масс. На рис. 9 представлены кривые сечения реакции передачи ($-1n$), ($+2n$) и ($+3n$) в зависимости от $(E_{CM} - E_{CB})$. В таблице 1 приведены величины кулоновского барьера, а также значения Q для интересующих нас реакций передачи. Значение Q вычислялось по массам, приведенным в работах /26,27/. Величина кулоновского барьера E_{CB} вычислялась для $r_0 = 1,5 \cdot 10^{-13}$ см при предположении сферичности ядер.

Из рис. 9 видно, что все кривые распадаются на три отдельные группы соответственно числу передаваемых нейтронов. В группах соответствующих реакций ($+2n$) и ($+3n$) сечение возрастает при переходе от алюминия к меди и танталу. Можно указать, по крайней мере, на две причины, действие которых должно вызывать изменение сечения именно в этом направлении: Q реакции и размер ядра. Для реакции передачи область, в которой разыгрывается процесс, представляет собой шаровой слой, примыкающий к поверхности ядра и возрастающий при переходе к большим A . Из таблицы 1, где приведены соответствующие данные, видно, что Q реакции возрастает при переходе от Al к Cu и Ta . Возможно, что кроме указанных факторов на величину сечения влияют и другие причины, например, структура ядер мишени, особенно состояние периферийных нейтронов.

Далее обращает на себя внимание различие в энергетической зависимости сечения реакции передачи нечетного ($-1n$), ($+3n$) и четного ($+2n$) числа нейтронов. В первом случае кривые сечения достигают характерного "насыщения", тогда как во втором - сечение продолжает быстро расти с увеличением энергии. Возможно, что эта особенность связана с эффектом спаривания нейтронов в ядре. Во всех экспериментах, данные которых приведены на рис. 9, облучались ядра с четным числом нейтронов, однако, в реакциях ($-1n$) и ($+3n$) облучающей частицей было ядро N^{14} , имеющее один неспаренный нейтрон, и от ядра к ядру переходило нечетное число нейтронов; в реакции ($+2n$) ядро N^{15} имеет четное число нейтронов и подхватывает два нейтрона.

Возможно также, что подхват 3-х нейтронов приводит к большему возбуждению ядра N^{17} , которое в этом случае может испустить нейтрон. Если величина возбуждения увеличивается с энергией ионов, вероятность такого процесса будет возрастать и мы получим в ходе сечения "насыщение". Для реакции срыва одного нейтрона необходимо иметь в виду, что ядро N^{13} имеет слабо связанный протон ($E_{св} = 1,94$ Мэв), поэтому оно будет легко распадаться при энергичных столкновениях.

Из этого же рисунка видно, что величина абсолютных сечений реакций передачи 2-х нейтронов примерно на порядок больше сечения реакций передачи 3-х нейтронов. Эта разница зависит не только от значения Q реакции, так например, для реакции $Cu + N^{14} \rightarrow N^{17}$ и $Cu + N^{14} \rightarrow N^{17}$ значения Q почти одинаковы, в то время как сечения различаются на

порядок. Этот факт можно объяснить уменьшением вероятности процесса передачи с увеличением числа передаваемых нейтронов.

Возможно, что переход нескольких нейтронов от ядра к ядру происходит не независимо, а в виде связанной группы; в этом случае изучение реакций передачи может дать полезные сведения о характере нуклонных корреляций в ядрах.

Следует заметить, что при взаимодействии тяжелого иона с ядром-мишенью возможно образование N^{17} в возбужденном состоянии с энергией возбуждения выше энергии связи нейтрона (5,7 Мэв). Такое возбуждение N^{17} будет приводить к мгновенному испусканию нейтрона и образованию ядер N^{16} .

Полученные результаты показывают, что реакции передачи нейтронов обладают рядом интересных особенностей, которые связаны с механизмом реакции и со структурой участвующих в реакции ядер. Для полного выяснения этих связей необходимы дальнейшие эксперименты, в первую очередь, измерение сечений на разделенных изотопах, особенно в окрестностях замкнутых оболочек, измерение угловых распределений и энергетического спектра ядер N^{17} .

В заключение считаем своим приятным долгом выразить благодарность всем сотрудникам циклотронной группы, обеспечившим бесперебойную работу машины, в особенности Ю.Ц.Оганесяну, Ю.В.Лобанову, А.С.Пасюку, Б.Н.Маркову, И.А.Шелаеву, В.А.Шеголеву, Хэ Чен Сунь.

Т а б л и ц а 1

Реакция	Тип передачи	Q (Мэв)	$E_{св}$ (Мэв)	Литература
$Al + N^{14} \rightarrow N^{13}$		- 2,83	16	/7/
$Ni + N^{14} \rightarrow N^{13}$	(- 1 n)	{ -1,55 (Ni^{58}) - 2,73 (Ni^{60})	29	/7/
$Au + N^{14} \rightarrow N^{13}$		- 4,06	64	/11/
$Al + N^{15} \rightarrow N^{17}$		- 16,18	16	
$Cu + N^{15} \rightarrow N^{17}$	(+ 2 n)	{ - 11,48 (Cu^{63}) - 9,58 (Cu^{65})	30	
$Ta + N^{15} \rightarrow N^{17}$		- 4,79	61	
$Al + N^{14} \rightarrow N^{17}$		- 22,42	16	
$Cu + N^{14} \rightarrow N^{17}$	(+ 3 n)	{ - 12,39 (Cu^{63}) - 9,58 (Cu^{65})	30	
$Ta + N^{14} \rightarrow N^{17}$		- 2,19	61	

З а м е ч а н и е

В результатах измерений нашей работы, опубликованной в препринте ОИЯИ Р-736, по вине авторов допущена ошибка в оценке эффективного сечения (таблица 1) и выхода (таблица 2). Ниже приводятся исправленные данные.

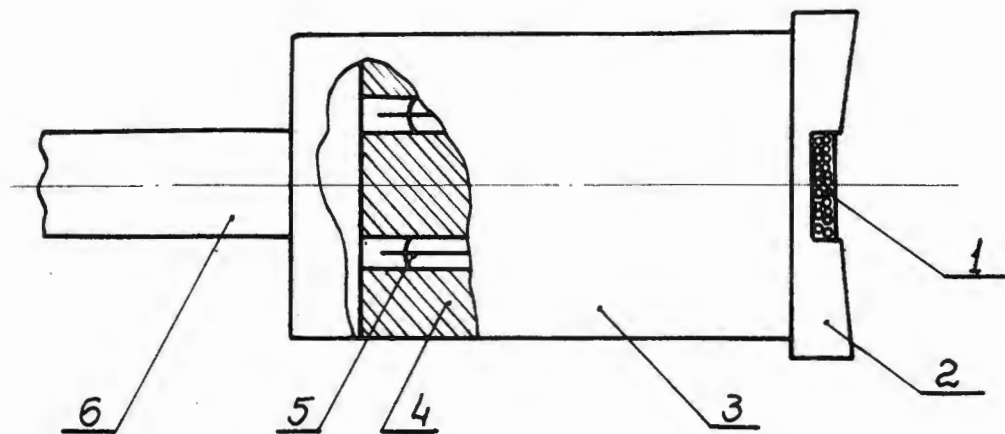
Т а б л и ц а 1

Мишень	σ (см ²)
$Li_2 CO_3$	$4 \cdot 10^{-27}$
Cu	$1 \cdot 10^{-27}$
Al	$1 \cdot 10^{-28}$
C	$1 \cdot 10^{-29}$

Т а б л и ц а 2

Мишень	O^{16}	Ne^{22}
C	$1 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-8}$
Al	$5 \cdot 10^{-10}$	-
Cu	$6 \cdot 10^{-9}$	-

а. Детектор



б. Головка мишени

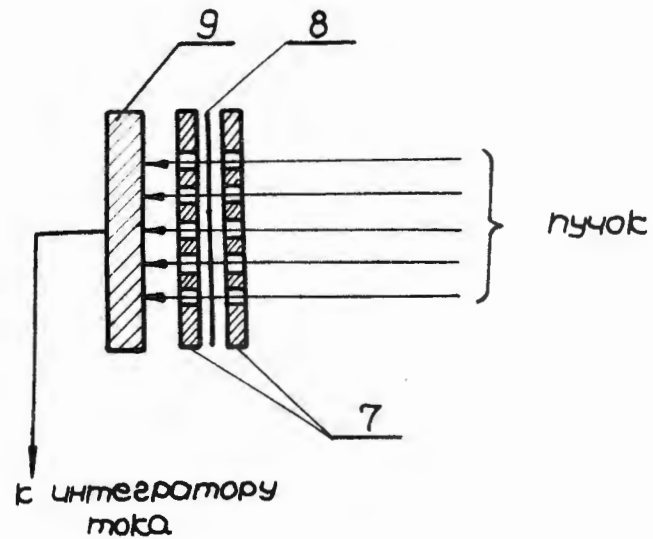


Рис. 1. Общий вид детектора и головки мишени.

1. Головка мишени.
2. Графитовая защита - коллиматор.
3. Медный кожух.
4. Замедлитель из плексигласа.
5. Счетчики с BF_3 .
6. Труба - держатель пробника.
7. Решетки головки мишени.
8. Защитная фольга.
9. Мишень - коллектор тока.

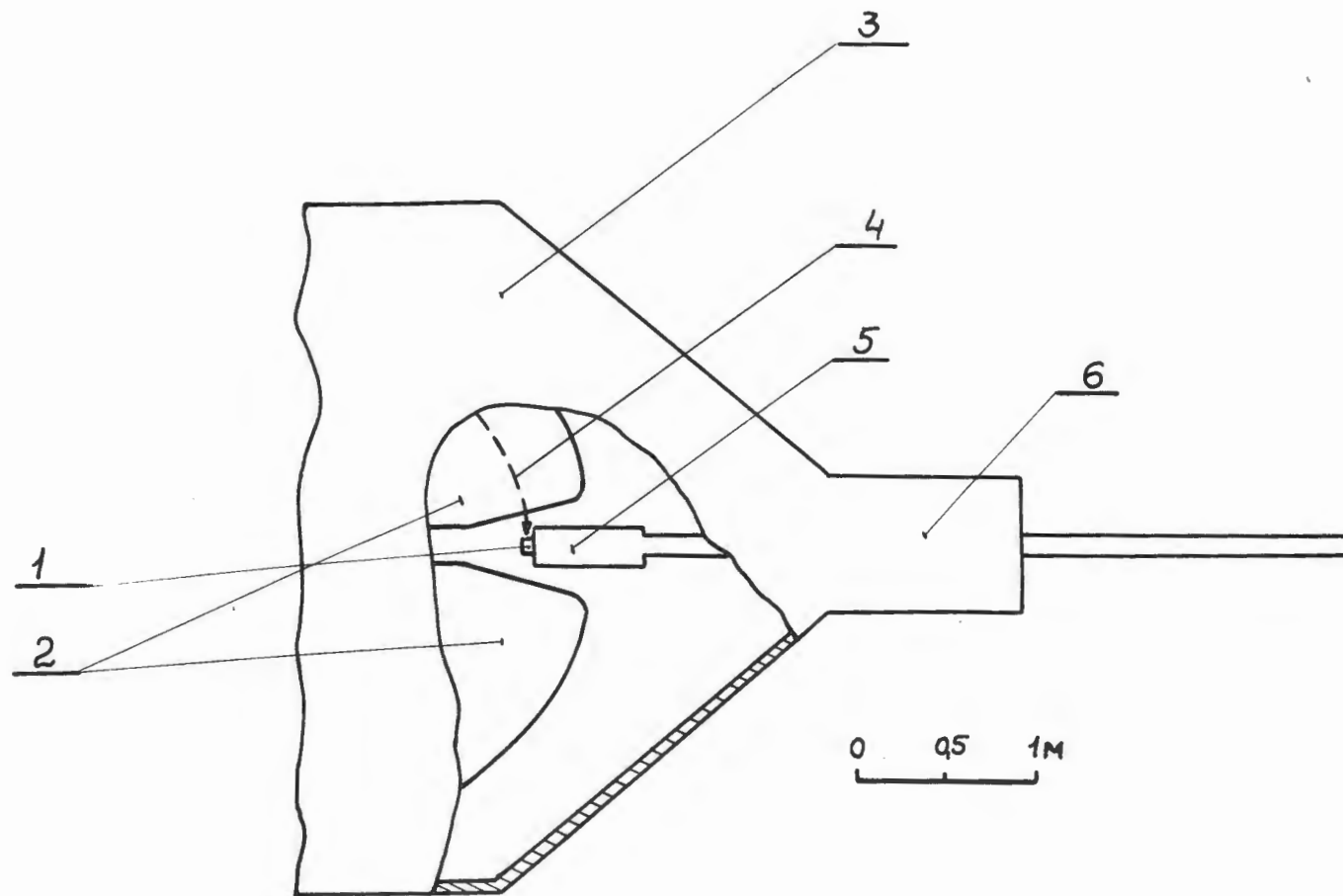


Рис. 2. Общий вид расположения измерительного пробника внутри машины.
1. Мишень. 2. Дуанты. 3. Камера циклотрона. 4. Пучок ионов. 5. Детектор нейтронов.
6. Вакуумный шлюз.

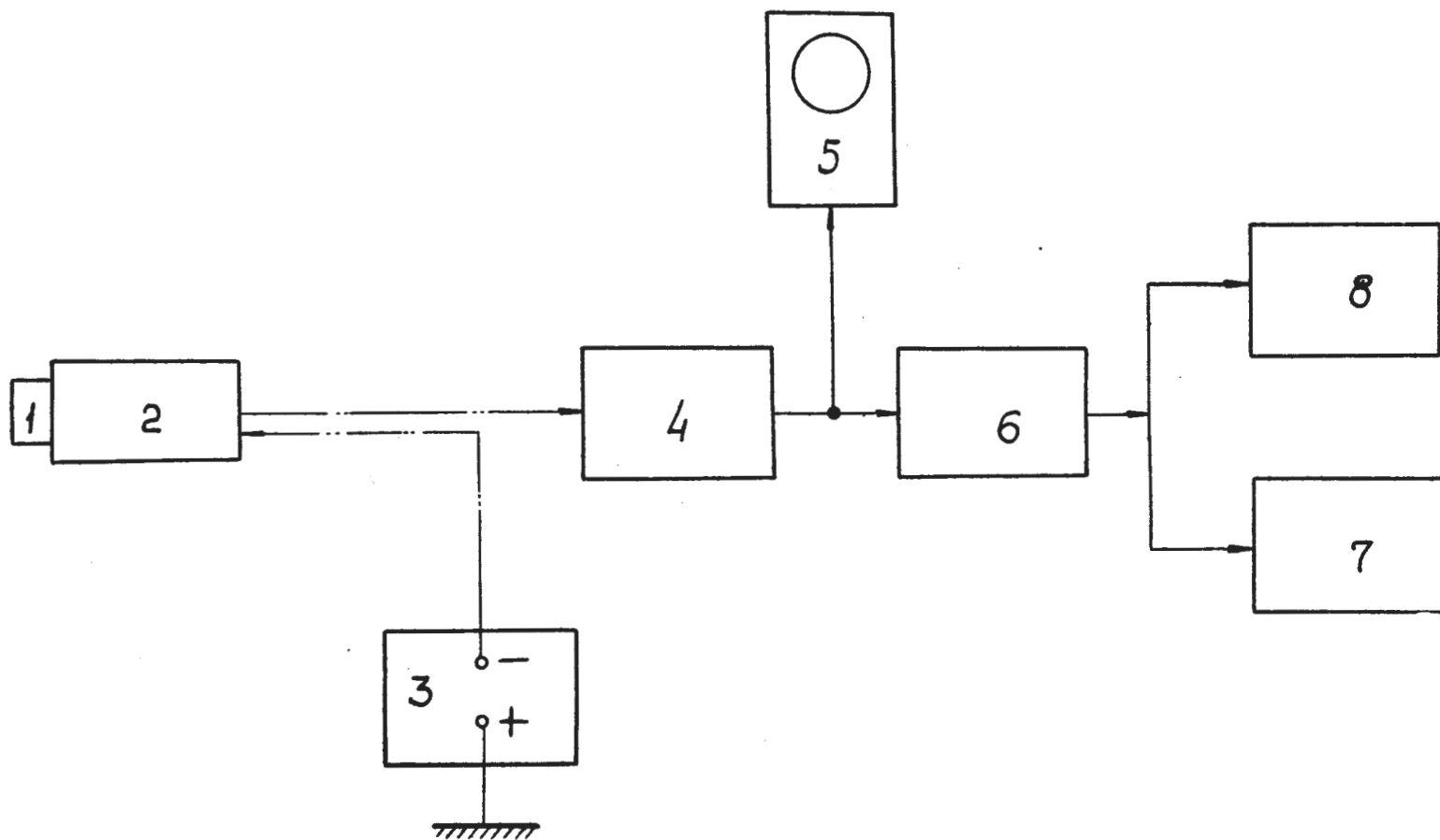
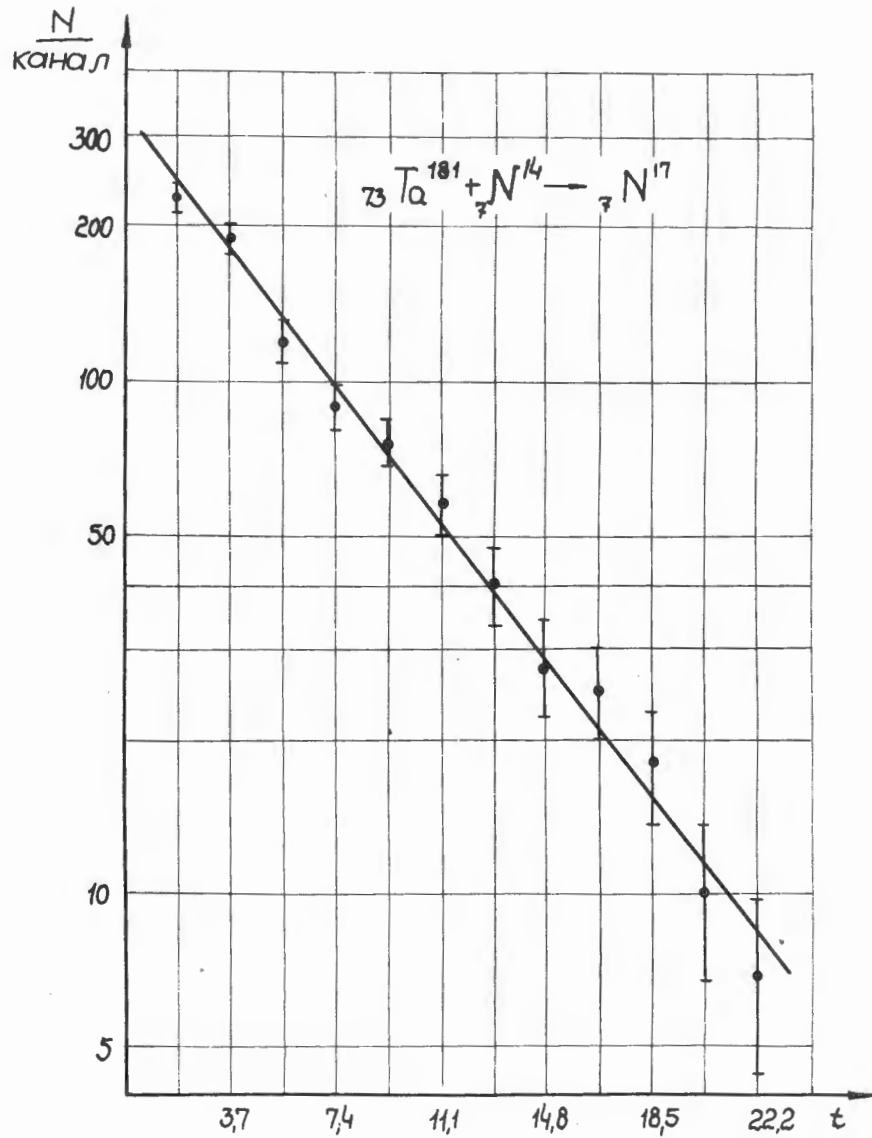


Рис. 3. Блок-схема измерительной аппаратуры.

1. Головка мишени. 2. Детектор нейтронов. 3. Высоковольтный выпрямитель. 4. Линейный усилитель. 5. Осциллограф. 6. Амплитудный дискриминатор. 7. Временной анализатор. 8. Пересчетный прибор.

a



б

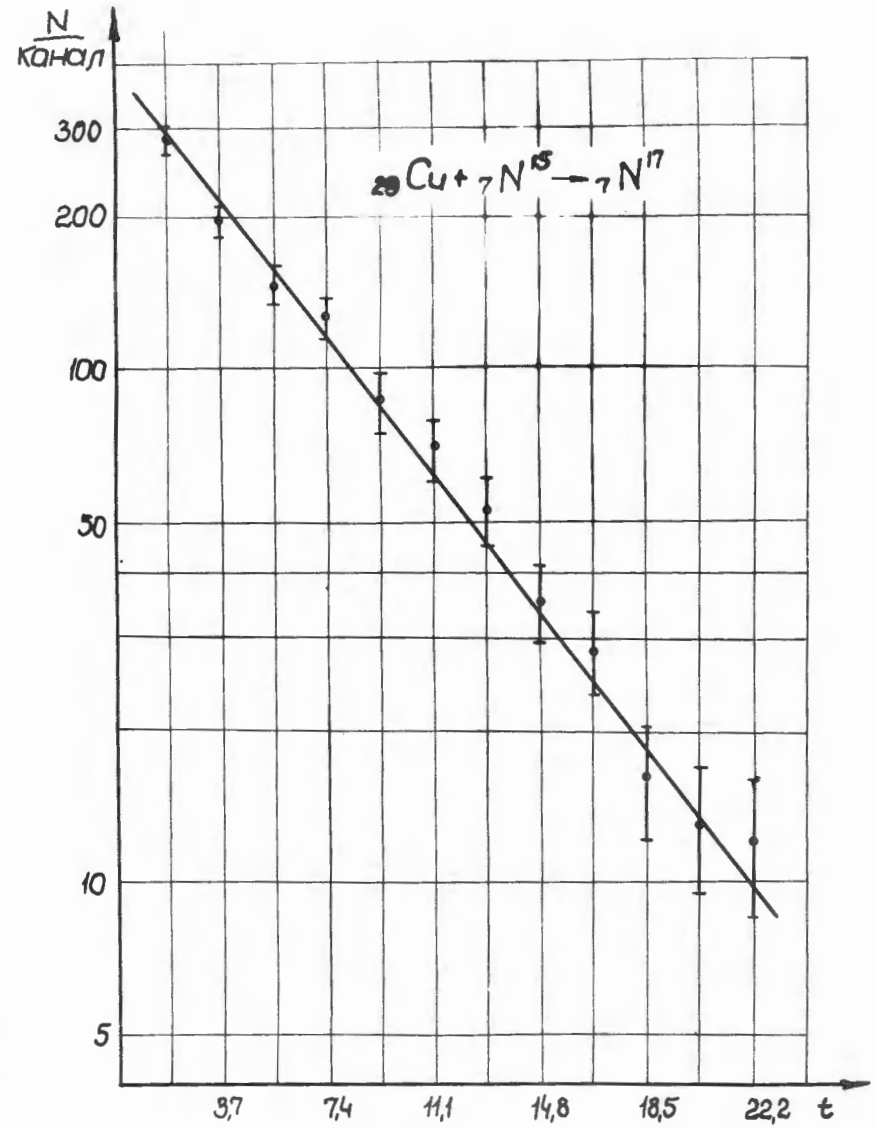


Рис. 4. Кривые распада нейтронной активности ядер N^{17} для реакции:
 а) $\text{Ta} + N^{14} \rightarrow N^{17}$, б) $\text{Cu} + N^{15} \rightarrow N^{17}$

а) $Ta + N^{15} \rightarrow N^{17}$, б) $Cu + N^{15} \rightarrow N^{17}$

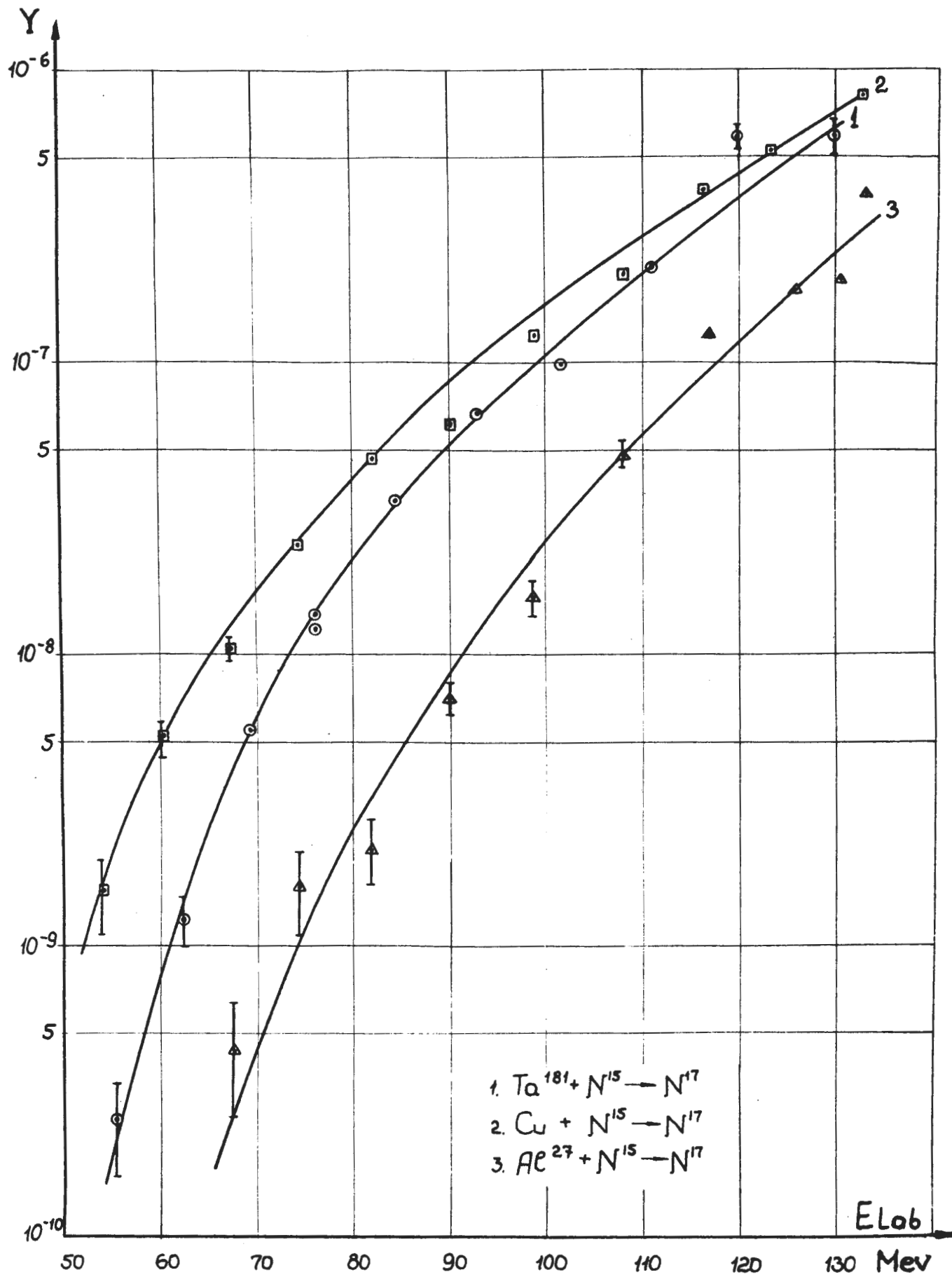


Рис. 5. Выход ядер N^{17} для реакции передачи (+ 2 n) на Al, Cu и Ta.

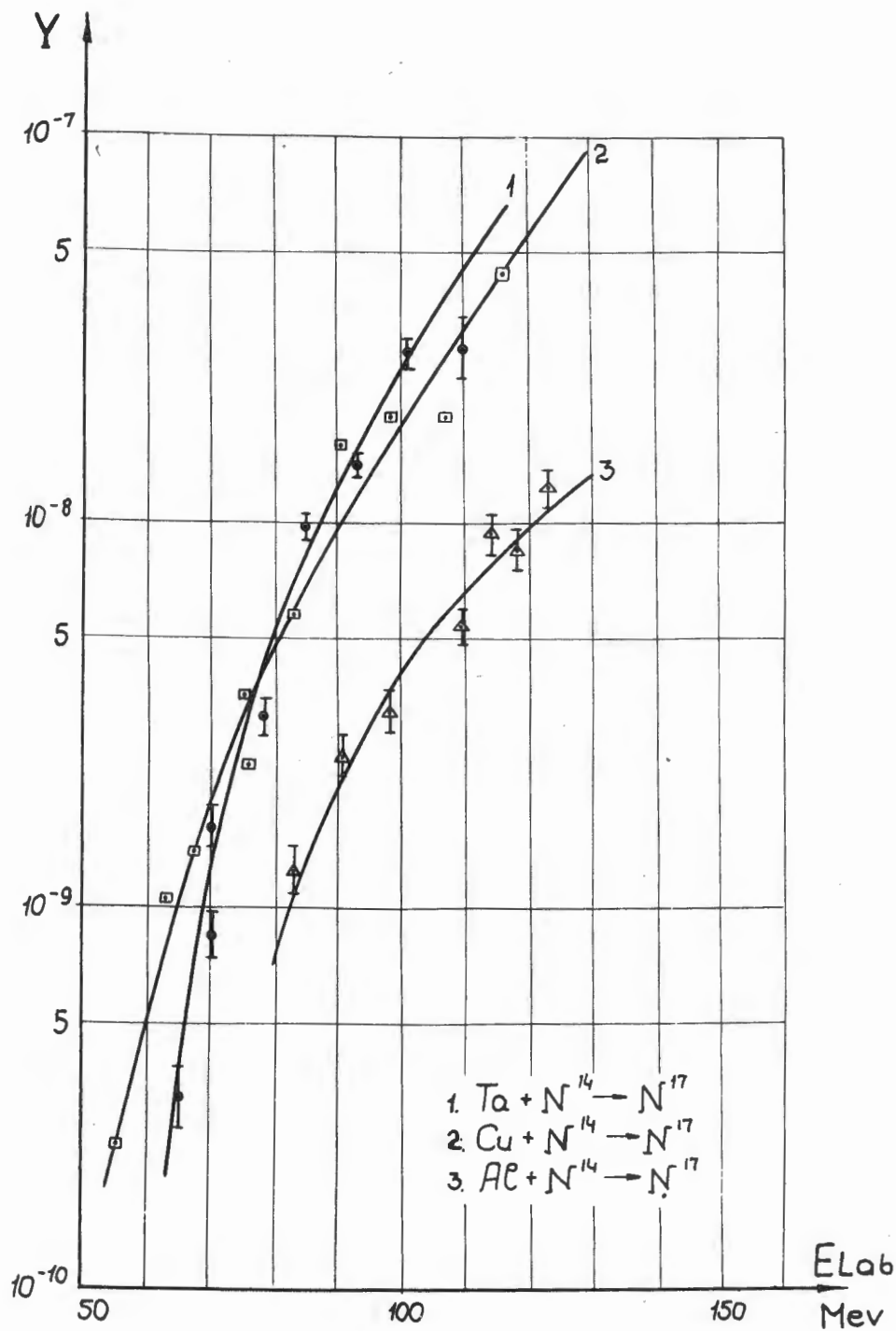


Рис. 6. Выход ядер N^{17} для реакции передачи (+ 3 n) на Al, Cu и Ta.

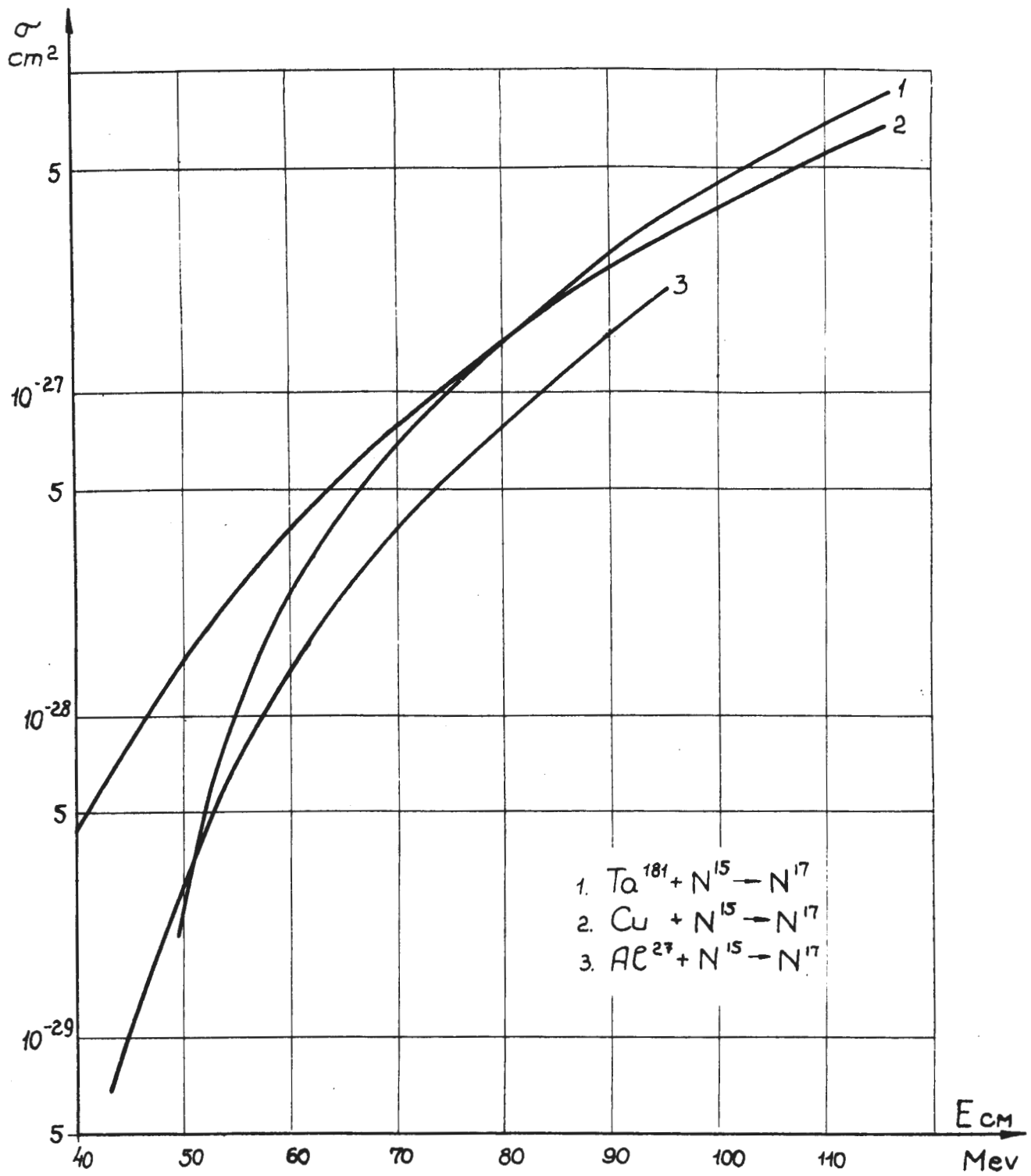


Рис. 7. Эффективные сечения реакций: (1) $Ta + N^{15} \rightarrow N^{17}$; (2) $Cu + N^{15} \rightarrow N^{17}$; (3) $Al + N^{15} \rightarrow N^{17}$ в зависимости от энергии в системе центра масс.

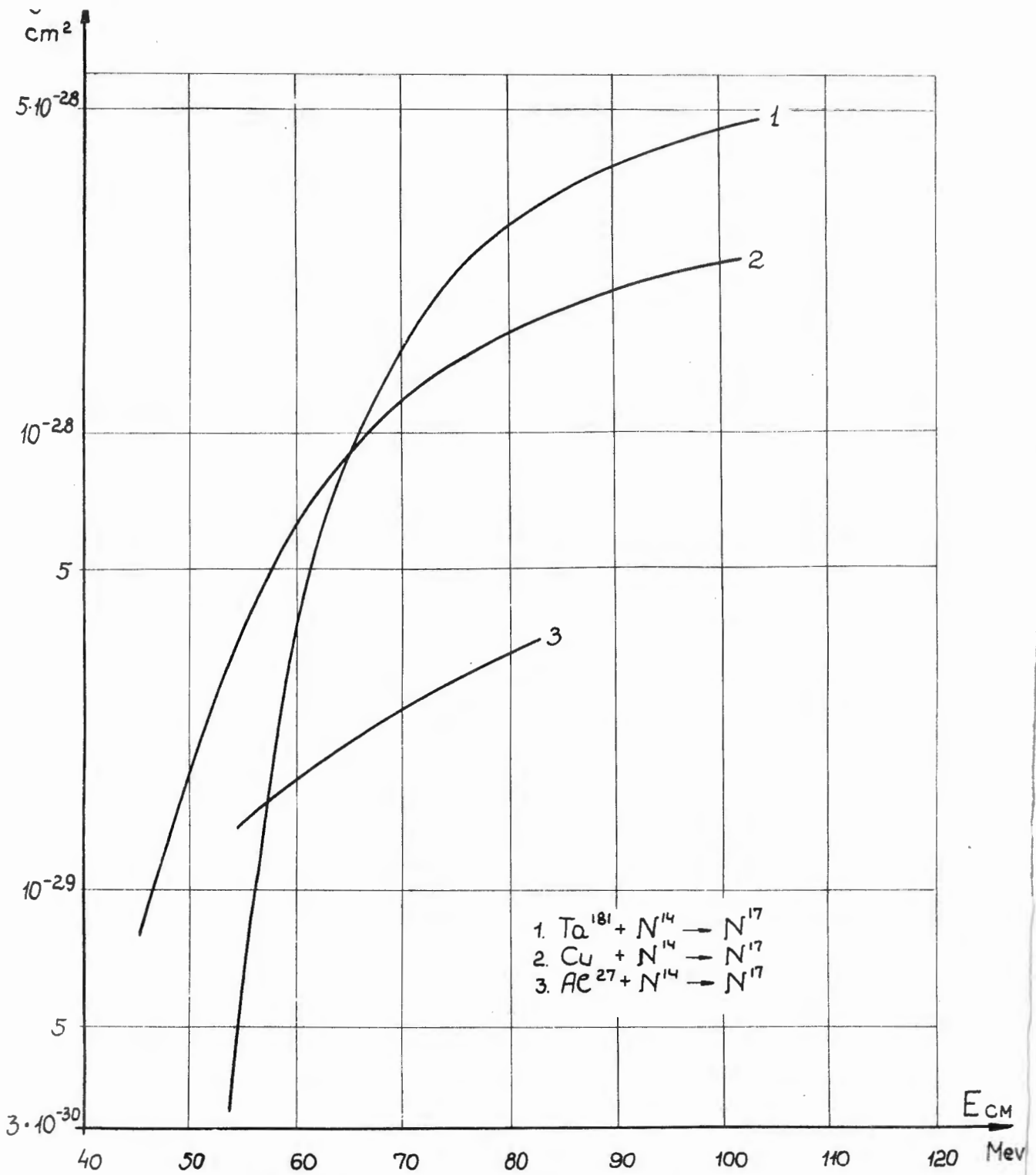


Рис. 8. Эффективные сечения реакций:

(1) $Ta + N^{14} \rightarrow N^{17}$; (2) $Cu + N^{14} \rightarrow N^{17}$; (3) $Al + N^{14} \rightarrow N^{17}$
 в зависимости от энергии в системе центра масс.

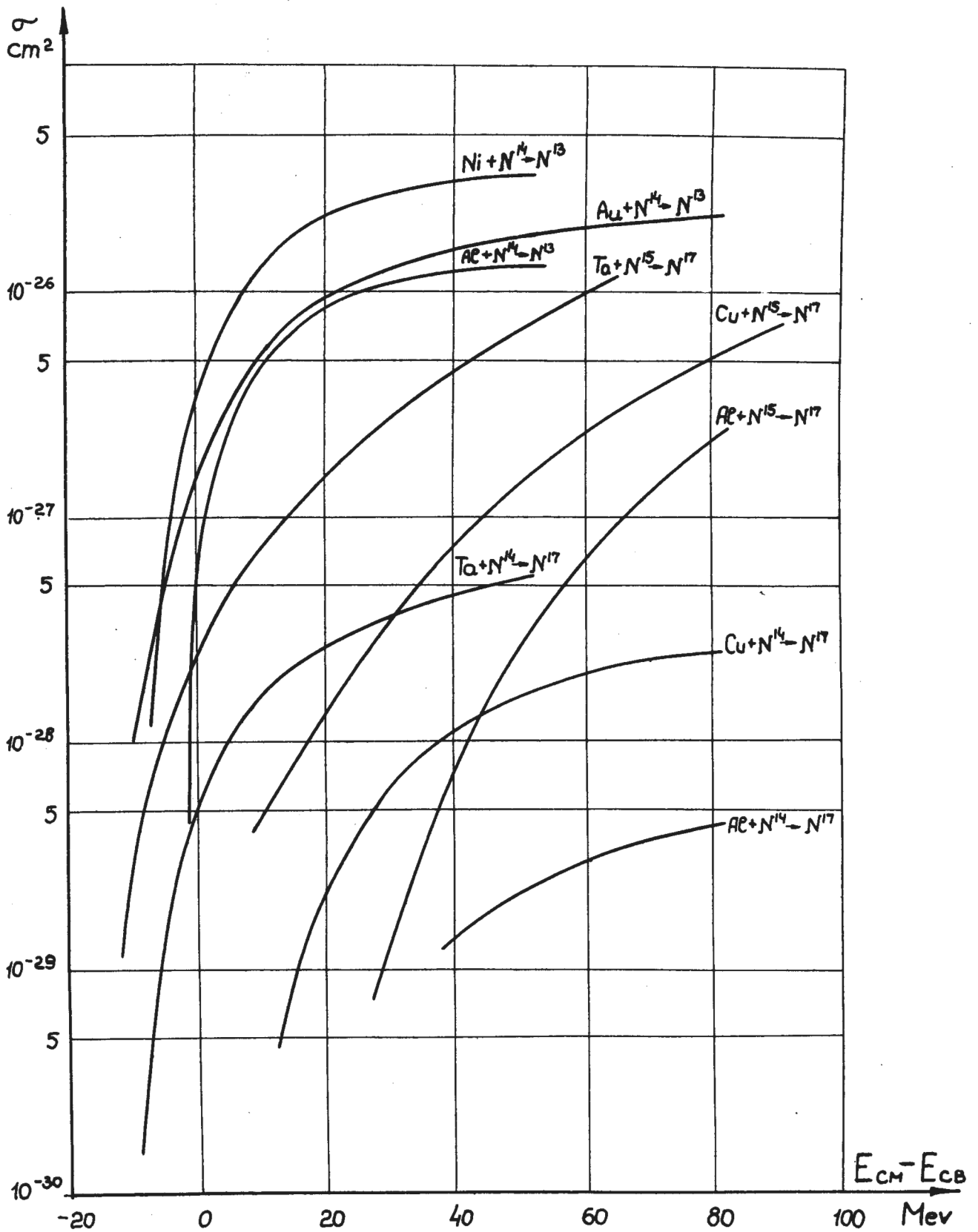


Рис. 9. Сопоставление эффективных сечений реакции передачи $(-1n)$, $(+2n)$ и $(+3n)$ в зависимости от $(E_{\text{CM}} - E_{\text{CB}})$ - разности энергии ионов и высоты кулоновского барьера в системе центра масс.

Л и т е р а т у р а

1. H.L. Reynolds, D.W. Scott and A. Zucker. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S. 39, 975 (1953).
2. K.F. Chackett and J.H. Fremlin. Phil. Mag. 45, 735 (1954).
3. H.L. Reynolds and A. Zucker. Phys.Rev. 101, 166 (1956).
4. H.L. Reynolds, D. W. Scott and A. Zucker. Phys. Rev. 102, 237 (1956).
5. M.L. Halbert, T.H. Handley, J.J. Pinajian, W.H. Webb and A. Zucker. Phys.Rev. 106, 251 (1957).
6. D.E. Fisher, A. Zucker and A. Groopp. Phys.Rev. 113, 542 (1959).
7. В.В. Волков, А.С. Пасюк, Г.Н. Флеров. ЖЭТФ, 33, 595 (1957).
8. H.L. Reynolds and A. Zucker. Phys.Rev. 101, 166 (1956).
9. M.L. Halbert and A. Zucker. Phys.Rev. 108, 336 (1957).
10. K.S. Toth. Phys.Rev. 121, 1190 (1961). Phys.Rev. 123, 582 (1961).
11. J.A. McIntire, T.L. Watts and F.C. Jobs, Phys.Rev. 119, 1331 (1960).
12. E.L. Hubbard and G. Merkel. Proceedings of the Second Conference on Reactions Between Complex Nuclei p 253-29, edited by A. Zucker, E.C. Halbert and F.T. Howard (John Wiley and Sons, New York 1960).
13. R. Kaufmann and R. Wolfgang. Phys.Rev. 121, 206' (1961).
14. R. Kaufmann and R. Wolfgang. Phys.Rev. 121, 192 (1961).
15. Г.Н. Флеров, В.В. Волков, Л.Поморский, Я.Тыс. ЖЭТФ, 41, 1365 (1961).
16. В.В. Волков, Л.Поморский, Я.Тыс, Г.Н. Флеров. ЖЭТФ, 42, 635 (1962).
17. J.J. Pinajian. Nucl.Phys. 17, 44 (1960).
18. Д.Г. Алхазов, Ю.П. Гангрский, Н.Х. Лемберг. ЖЭТФ, 33, 1160 (1957).
19. В.А. Карнаухов, Г.М. Тер-Акопян, В.И. Хализев. ЖЭТФ, 36, 748 (1959).
20. D. Strominger, J.M. Hollander, C.J. Seaborg. Rev.Mod.Phys. 30, 606 (1959).
21. Ю.Ц. Оганесян. ЖЭТФ, 36, 936 (1959).
22. L.C. Northcliffe. Phys.Rev. 120, 1744 (1960).
23. С.А. Баробошкин, А.С. Карамян, Г.Н. Флеров. ЖЭТФ, 32, 1294 (1957).
24. R.E. Bell, H.M. Skarsgard. Canad. J. Phys. 34, 745 (1956).
25. J.D. Jackson. Canad. J. Phys. 34, 767 (1956).
26. F. Everling, L.A. Konig, J.H. E. Mattauch and A.H. Wapstra. Nucl. Phys. 18, 529 (1960).
27. A.G. W. Cameron. Canadian Report CRP - 690, AECL - 433 (1957).

Рукопись поступила в издательский отдел
18 апреля 1962 года.