

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ ТИПА (d, p) НА МАГНИИ, АЛЮМИНИИ, КРЕМНИИ И КИСЛОРОДЕ**

Энергетические уровни атомных ядер в настоящее время изучены крайне недостаточно. Между тем, знание их имеет очень большое значение для всей ядерной физики, так как оно является экспериментальным обоснованием теории ядра. Поэтому изучение энергетических уровней принадлежит к числу наиболее важных задач этой области физики.

Недавно были опубликованы три работы, выполненные Ю. А. Немиковым, Л. И. Гедеоновым и Б. Л. Фунштейном, по исследованию протонов, возникающих при бомбардировке дейтонами нескольких веществ: магния, алюминия, кремния и кислорода¹⁻³. Целью этих работ было определение энергетических уровней, принадлежащих ядрам, образующимся в результате превращений типа (d, p), и изучение углового распределения протонов, знание которого чрезвычайно важно для установления механизма реакции этого типа.

Изучение распределения протонов по энергиям производилось следующим образом. Вблизи мишени из исследуемого вещества, бомбардируемой дейтонами, помещалась обыкновенная фотопластинка, а между пластинкой и мишенью — клиновидный ступенчатый фильтр, состоящий из листов алюминиевой фольги. Таким образом, различные участки фотопластинки были отделены от мишени слоем алюминия разной толщины. Допустим, что все протоны, образующиеся в данной реакции, имеют одинаковую кинетическую энергию. Тогда картина потемнения фотопластинки под действием протонов будет следующей: в том месте, где толщина клиновидного фильтра настолько велика, что при данной энергии протоны не могут его преодолеть, пластинка остаётся незатемнённой; этот незатемнённый участок простирается до того места фотопластинки, перед которым находится слой фильтра такой толщины, что, проходя через него, протоны растратят почти всю энергию и застрянут в эмульсии фотопластинки. Так как ионизационная способность частиц наибольшая в конце пробега, то протоны, останавливающиеся в эмульсии, вызовут резкое потемнение фотопластинки. На участках фотопластинки, защищённых ещё более тонкими слоями фильтра, потемнение будет несколько слабее, так как частицы пронизывают фотоэмульсию с большей энергией, а следовательно, с меньшей ионизационной способностью. Поэтому, если все протоны имеют одну и ту же кинетическую энергию, то на пластинке после проявления будет резкая тёмная полоса, степень потемнения которой постепенно убывает в направлении уменьшения толщины клина. Определив толщину фильтра (число слоёв алюминиевой фольги) на участке, прилежащем к границе тёмной полосы, и учтя геометрические условия опыта, можно найти пробег протонов

данной энергии в алюминии. Так как величина пробега однозначно связана с энергией частиц, то таким образом определится и энергия протонов.

В действительности на фотопластинках оказывалось несколько полос с различной степенью почернения, что свидетельствует о возникновении в каждой из исследованных реакций нескольких групп протонов с разными кинетическими энергиями и интенсивностями. Энергия каждой группы определялась по толщине фильтра вблизи границы создаваемой ею полосы, а различие в интенсивности почернения позволяло определять относительное число протонов, принадлежащих к данной группе.

Измерения производились с протонами, которые вылетали под углом $130-150^\circ$ по отношению к пучку первичных дейтронов. Энергия бомбардирующих дейтронов равнялась $3,9 \text{ MeV}$. Для более точного определения границ потемнения (т. е. энергий различных групп частиц) пластинки фотометрировались. По результатам фотометрирования строились графики, один из которых, полученный при исследовании магния, приведён для примера на рис. 1. На этом графике по горизонтальной оси отложено

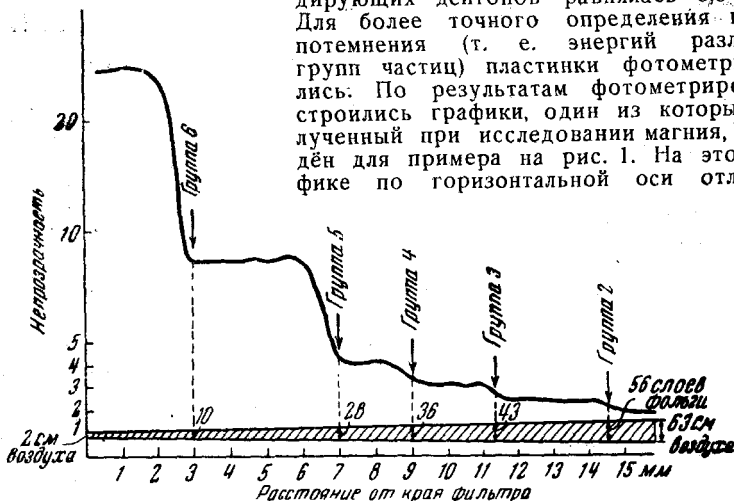


Рис. 1. Потемнение фотопластинки, облучённой продуктами реакции при бомбардировке магния дейтронами.

расстояние, отсчитываемое от края клиновидного фильтра (для наглядности фильтр изображён в нижней части графика); по вертикальной оси отложен коэффициент потемнения (степень непрозрачности) пластинки, т. е. отношение интенсивности света, проходящего через неэкспонированную часть пластинки, к интенсивности света, проходящего в данном месте. Полученные таким образом кривые потемнения имеют ступенчатый вид: каждая ступень связана с группой частиц, имеющих одну и ту же энергию. Обычно для каждого вещества применялось несколько фильтров с различной начальной и конечной толщиной. С помощью этих измерений определялась энергия реакции, соответствующая каждой группе протонов, а затем по энергии реакции и массам участвующих в реакции изотопов вычислялись энергетические уровни ядер, образующихся в результате реакции (подробнее об этом методе определения энергетических уровней см. статью В. Н. Кондратьева «Энергетические уровни атомных ядер»⁴).

Фотометрические данные служили также и для определения относительной интенсивности каждой группы. При этом предполагалось, что

потемнение пластинки прямо пропорционально числу действующих на неё частиц. Известно, что в определённых пределах это имеет место в случае световых квантов. Пригодность этого предположения для тяжёлых частиц проверялась контрольными опытами. В этих опытах различные участки фотопластинок облучались α -частицами от препарата полония в течение разных промежутков времени, выбранных так, чтобы перекрыть весь диапазон степеней почернения, встречавшихся в опытах с регистрацией протонов. Однако трудности в учёте зависимости степени потемнения от энергии частиц, фона от γ -лучей, а также неидентичность экспозиции и условий проявления пластинок делают оценку интенсивности приближённой.

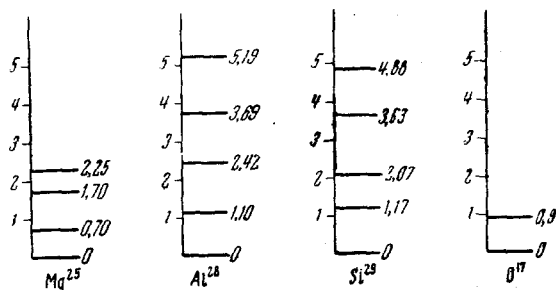


Рис. 2. Возбуждённые уровни ядер Mg^{25} , Al^{28} , Si^{29} и O^{17} (в MeV).

Так как в этих опытах предварительное разделение изотопов не производилось, то принципиально возможно, что группы протонов, обнаруживаемые при действии дейтронов на какое-либо вещество, принадлежат разным изотопам этого вещества. Поэтому для отождествления принадлежности каждой группы к определённому изотопу приходится пользоваться дополнительными соображениями. Энергии реакций типа (d, p), полученные в опытах с магнием, алюминием, кремнием и кислородом, вместе с относительными интенсивностями (там, где их удалось измерить), приведены в таблице. При оценке интенсивностей за единицу принималась интенсивность частиц с максимальным пробегом. Энергетические уровни ядер — продуктов реакции изображены на рис. 2. Ниже приводятся краткое описание опытов и обсуждение результатов по каждому из исследованных веществ.

Группа протонов	Магний		Алюминий		Кремний	Кислород
	энергия реакции в MeV	интенсивность	энергия реакции в MeV	интенсивность	энергия реакции в MeV	энергия реакции в MeV
1	$7,74 \pm 0,12$	1	$5,47 \pm 0,15$	1	$6,12 \pm 0,15$	1,9
2	$7,09 \pm 0,14$	2	$4,37 \pm 0,15$	1,5	$4,95 \pm 0,15$	1,0
3	$6,11 \pm 0,12$	1,5	$3,05 \pm 0,10$	3	$4,05 \pm 0,15$	—
4	$5,57 \pm 0,11$	3,5	$1,78 \pm 0,10$	5,5	$2,49 \pm 0,15$	—
5	—	—	$0,28 \pm 0,10$	7	$1,24 \pm 0,10$	—

Магний. Магниева мишень толщиной 2—3 μ получалась с помощью напыления в вакууме. Измерения производились с четырьмя фотопластинками, облучёнными при разных фильтрах. Средняя ошибка в определении положения края полосы была $\sim 0,2$ мм; возникающие в результате этого ошибки в энергии приведены в таблице. Как видно из таблицы,

в опытах с магнием были обнаружены четыре группы протонов. Магний имеет три стабильных изотопа Mg^{24} , Mg^{25} и Mg^{26} , процентное содержание которых равно, соответственно, 78,6%, 10,11% и 11,29%. Так как все четыре группы протонов имеют близкие интенсивности, то естественно предположить, что они возникают при действии дейтронов на основной изотоп магния, т. е. в реакции $Mg^{24}(d, p)Mg^{25}$, ибо если считать, что какая-нибудь группа возникает при реакции на другом изотопе магния, то эта реакция должна происходить с вероятностью, примерно на порядок величины большей, чем на основном изотопе. Поэтому все уровни возбуждения, определяемые этими группами протонов, относятся к ядру Mg^{25} и дают его основное состояние (с точностью до $\pm 0,30$ MeV) и три возбуждённых с энергиями $(0,70 \pm 0,27)$ MeV, $(1,70 \pm 0,26)$ MeV и $(2,25 \pm 0,25)$ MeV, изображённые на рис. 2. Эта картина уровней частично подтверждается данными других авторов. Уровни возбуждения ядра Mg^{25} исследовались Мак-Милланом и Лауренсом⁵ и Поллардом, Сэйлором и Уили⁶ с помощью реакции $Al^{27}(d, \alpha)Mg^{25}$. В первой работе было найдено два значения энергии реакции, определяющих возбуждённый уровень при 0,7 MeV; во второй — два возбуждённых уровня при 0,68 и 2,35 MeV. Таким образом, для первых трёх групп протонов имеется полное согласие с возбуждёнными уровнями Mg^{25} , полученными из другой реакции.

На рис. 1, изображающем фотометрическую кривую для магния, нет первой группы протонов, имеющей наибольшую энергию (она была получена с более толстым фильтром, чем изображённый на рис. 1); но кроме трёх остальных групп (2, 3 и 4), там имеются группы 5 и 6. Энергия протонов, принадлежащих к группе 5, с точностью до 0,2 MeV совпадает с энергией образования изотопа O^{17} в основном состоянии путём реакции $O^{16}(d, p)O^{17}$. Так как эта группа наблюдалась и в опытах с кислородом, то естественно предположить, что магниевая мишень была частично окислена. Группа 6 образована дейтонами, упруго рассеянными материалом подкладки мишени (серебро, платина), на которую напылялся магний. Контрольные опыты по бомбардировке чистого серебра или платины, проведённые с целью определения энергии первичных дейтронов, дали только эту группу. Эта же группа возникает и в опытах с другими веществами.

Алюминий. Мишенью служила алюминиевая фольга толщиной, эквивалентной 1,1 см воздуха. Было облучено 12 фотопластинок и профотометрировано 4 наиболее удачных из них, причём все они облучались при разных фильтрах. На всех пластинках было обнаружено пять групп протонов; соответствующие им энергии реакции приведены в таблице. Алюминий имеет всего лишь один стабильный изотоп Al^{27} , поэтому все протоны должны относиться к реакции $Al^{27}(d, p)Al^{28}$. Система уровней ядра Al^{28} приведена на рис. 2. Не исключено, что между уровнями с энергией 1,10 и 2,42 MeV находится ещё один уровень, который в данных условиях не удаётся выделить. Реакция $Al^{27}(d, p)Al^{28}$ уже исследовалась в трёх работах⁵⁻⁸. Однако результаты этих работ расходятся. Уровни, полученные в реферируемых работах^{2,3}, наиболее близки к данным Мак-Миллана и Лауренса⁵, получившим уровни при 0,8; 2,3; 3,5 и 4,7 MeV.

Кремний. Мишенью служила кварцевые плёнки толщиной около 5 μ . Было исследовано 5 пластинок, причём три из них экспонировались с кварцевыми мишенями. Сильное различие в интенсивности групп протонов не позволило получить все группы на одной и той же пластинке и произвести измерение относительных интенсивностей групп. Для того чтобы исключить влияние сравнительно медленных протонов от кислорода, со-

держашегося в кварце, при работе с кварцевыми мишенями пришлось ограничиваться наблюдением только групп наиболее энергичных протонов. Было обнаружено пять групп протонов (см. таблицу). Кремний имеет три стабильных изотопа Si^{28} , Si^{29} и Si^{30} , процентное содержание которых равно, соответственно, 92,2%, 4,67% и 3,05%. Максимальное значение энергии реакции хорошо согласуется с реакцией $\text{Si}^{28}(d, p)\text{Si}^{29}$, если предположить, что ядра Si^{29} оказываются в основном состоянии. Повидимому, и все остальные группы относятся к этой реакции, так как для того, чтобы дать наблюдаемую картину интенсивности, остальные изотопы должны иметь эффективные сечения (d, p) -процесса, в несколько десятков раз большие, чем у основного изотопа, что маловероятно. Картина энергетических уровней ядра Si^{29} приведена на рис. 2. Эта реакция изучалась Алленом и Уилкинсоном⁸, которые получили следующие значения энергии реакции: 6,16; 4,48; 4,16 и 3,16 MeV. Из таблицы видно, что впервые три значения находятся в хорошем согласии с результатами, полученными в работе².

Кислород. Мишенью служил слой окиси вольфрама, осаждённый на золотую фольгу. Толщина слоя $\sim 1 \text{ мг/см}^2$. Были обнаружены две группы протонов, соответствующие энергиям реакции 1,9 и 1,0 MeV. Кислород имеет три стабильных изотопа O^{16} , O^{17} и O^{18} , но процентное содержание двух последних очень мало (0,039 и 0,204%), так что в данном случае обе группы протонов возникают при реакции $\text{O}^{16}(d, p)\text{O}^{17}$. Им соответствует возбуждённый уровень с энергией 0,9 MeV в хорошем согласии с результатами предыдущих работ $(0,93 \pm 0,9) \text{ MeV}^{9-12}$.

Помимо определения энергетических уровней ядер, в работе³ было исследовано угловое распределение протонов, образующихся при реакции с кислородом и алюминием. Исследование производилось с помощью клиновидного фильтра, изогнутого по окружности, в центре которой помещалась мишень. С противоположной стороны к фильтру плотно прилежала фотоплёнка, регистрирующая протоны. После облучения плёнка фотометрировалась вдоль линий, соответствующих нескольким определённым углам вылета протонов. Для каждого угла строилась своя фотометрическая кривая. Сравнивая высоты ступеней, образованных одними и теми же группами протонов при разных углах вылета, авторы определяли зависимость относительной интенсивности этих групп от направления движения протонов. Пропорциональность между интенсивностью частиц и почернением фотоплёнки контролировалась с помощью полониевых α -частиц, и необходимые поправки учитывались.

Опыты с кислородом производились при двух энергиях дейтонов: 2,6 и 3,9 MeV. В обоих случаях угловое распределение протонов в реакции $\text{O}^{16}(d, p)\text{O}^{17}$ было резко ассиметричным: большинство частиц двигалось в направлении, близком к направлению пучка бомбардирующих дейтонов; эта ассиметрия выражена тем отчётливее, чем меньше энергия протонов. Угловые распределения протонов, найденные в работе³, существенно отличаются от распределения, полученного недавно Хейденбургом и Инглисом¹¹ с помощью счётчиков, расположенных под разными углами относительно мишени.

Опыты с алюминием производились в аналогичных условиях при энергии дейтонов 3,9 MeV. Угловое распределение протонов, принадлежащих трём последним (медленным) группам, приведено на рис. 3, а, а двум первым (быстрым) — на рис. 3, б (по горизонтальной оси отложены углы вылета протонов, а по вертикальной — отношение интенсивности протонов, вылетающих под углом θ , к интенсивности протонов, вылетающих под углом 90° , в системе координат, связанной с центром масс обеих частиц). Из рис. 3 видно, что с возрастанием энергии протонов уменьшается степень направленности углового распределения. У трёх медленных групп, приведённых на рис. 3, а, она видна отчётливо, а у двух групп бо-

лее быстрых протонов (рис. 3, б) никакой направленности не обнаруживается.

То обстоятельство, что в обеих реакциях большинство протонов движется вперёд, т. е. в направлении движения дейтронов, причём эта направленность растёт с уменьшением энергии, приобретаемой протонами в момент реакции, чрезвычайно важно, так как указывает на сохранение протоном некоторой доли начального импульса дейтрона. Подобное сохранение возможно лишь в случае, если протоны, образующиеся при реакции, не входят в состав промежуточного ядра, а являются осколками дейтронов. Не-

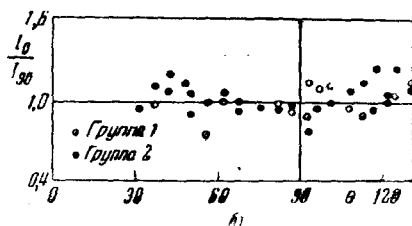
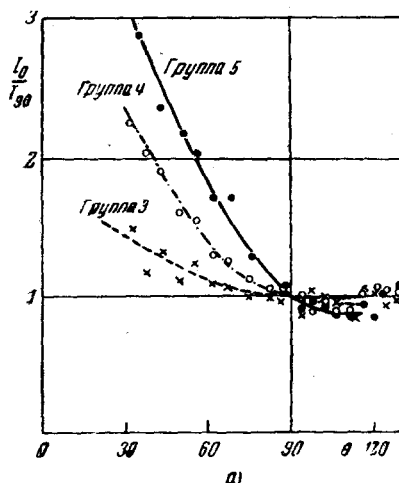


Рис. 3. Угловые распределения групп протонов, образующихся в реакции $\text{Al}^{27}(\text{d}, \text{p})\text{Al}^{28}$ при энергии дейтронов 3,9 MeV. а — для трёх групп медленных протонов, б — для двух групп быстрых протонов.

давно Сербер¹⁸ и Песли¹⁴ показали теоретически, что реакция типа (d, p) может происходить без образования промежуточного ядра, в которое дейтрон входил бы целиком, и осуществляется путём вырывания и захвата нейтрона полем ядра из пролетающего дейтрона (см. также дополнение в книге¹⁵). При таком механизме реакции протон сохранит часть того количества движения, которое он имел, находясь в составе дейтрона, и влияние этой части будет сказываться на нём тем сильнее, чем меньше энергия, приобретаемая им в момент реакции. Результаты изучения углового распределения протонов, полученные в реферируемой работе⁸, подтверждают описанный механизм реакций типа (d, p).

В. А. Лешковцев

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Немилов и Л. И. Геденов, ДАН СССР, LXIII, № 2 (1948).
2. Ю. А. Немилов, ДАН СССР, LXIV, № 3 (1949).
3. Ю. А. Немилов и Б. Л. Фунштейн, ДАН СССР, LXIV, № 4 (1949).
4. В. Н. Кондратьев, УФН, т. XXXVIII, вып. 2 (1949).
5. E. Mc Millan and E. O. Lawrence, Phys. Rev., 47, 343 (1935).
6. E. Pollard, V. S. Saylor and L. D. Wily, Bull. Am. Phys. Soc. 29, № 3 (1948); Phys. Rev. 74, 1233 (1948).

7. H. L. Schultz, W. L. Davidson and L. H. Ott, Phys. Rev. 58 1043 (1940).
 8. H. R. Allan and C. A. Wilkinson, Proc. Roy. Soc. 194, 131, (1948).
 9. Burcham and Smith, Proc. Roy. Soc. 168, 176 (1938).
 10. E. Pollard and W. L. Davidson, Phys. Rev. 72, 162, 736 (1947).
 11. Heydenburg and Inglis, Phys. Rev. 73, 230 (1948).
 12. Alburger, Phys. Rev. 74, 1240 (1948).
 13. R. Serber, Phys. Rev. 72, 1008 (1947).
 14. D. C. Peaslee, Phys. Rev. 74, 1001 (1948).
 15. А. Ахиезер и И. Померанчук, Некоторые вопросы теории ядра, Гостехиздат (1948).
-