

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННОГО ФОНА БЕТАТРОНА НА 25 МэВ С ПОМОЩЬЮ ЯДЕРНЫХ ФОТОЭМУЛЬСИЙ

А. К. БЕРЗИН, Б. М. ЯКОВЛЕВ, А. А. ЯТИС

Введение

При работе бетатрона с максимальной энергией излучения выше 10 МэВ, в результате взаимодействия тормозного γ -излучения с деталями конструкции ускорителя образуются нейтроны, энергетическое и угловое распределение которых представляет особенность каждой ускорительной установки в отдельности. Интенсивность потоков и энергия нейтронов колеблются в значительных пределах и зависят в основном от выхода и энергии тормозного γ -излучения бетатрона.

Главную роль в качестве источника нейтронов в ускорительной установке играют мишень и фильтр, а также ускорительная камера, система диафрагм и защитных экранов.

При проведении физических экспериментов по изучению фото-ядерных реакций, например, при исследовании угловых и энергетических распределений фотонейтронов от различных элементов, вклад нейтронов от бетатрона в результаты эксперимента может существенно изменить действительную картину и внести определенные ошибки в измерения. При использовании бетатронов в медицине для терапевтических целей, а также при биологических исследованиях потоки нейтронов в поле облучения объекта создают некоторую дополнительную дозу, которую, по-видимому, необходимо учитывать, особенно при длительном времени облучения, принимая во внимание высокую биологическую эффективность нейтронов.

По указанным выше вопросам измерения выхода, энергетического и углового распределения нейтронов от ускорителей электронов типа бетатрона или синхротрона в литературе имеется сравнительно мало данных. Для количественных измерений и угловых распределений потоков нейтронов использовался метод наведенной активности с помощью активации фольг из различных материалов: родия, индия, золота или активации образцов из алюминия, марганца или фосфора. Большое применение при измерениях потоков нейтронов находят BF_3 -счетчики [1, 2]. Для определения выхода нейтронов от бетатрона были использованы и фотоэмульсии типа Ilford С—2 и Agfa [3]. Автором был ориентировочно определен поток нейтронов в пучке тормозного γ -излучения бетатрона на 15 МэВ, равный $3,8 \cdot 10^5$ нейтронов/см²·сек, причем средняя энергия быстрых нейтронов принята

равной 1,33 Мэв; не указано, на каком расстоянии от мишени ускорителя проводились измерения. Сделана приближенная оценка величины поправочного коэффициента (несколько больше 100) для определения абсолютного потока быстрых нейтронов. Приведено также энергетическое распределение быстрых нейтронов без каких-либо поправок на фон.

Проведенные в 1957-59 гг. измерения потоков тепловых и быстрых нейтронов от нескольких бетатронов на 15 и 25 Мэв [4, 5, 6.] показали, что использованная нами методика измерений и экспериментальная аппаратура: счетчики BF₃, „всеволновый“ счетчик нейтронов и метод наведенной активности не дают возможности полностью произвести оценку выхода нейтронов от бетатрона, их энергетического и пространственного распределения. В связи с этим нами для оценки величины фона нейтронов, а также определения спектра быстрых нейтронов в поле тормозного γ -излучения бетатрона, спектра и распределения нейтронов в фантоме и определения дополнительных доз за счет нейтронов в облучаемом объекте были проведены в 1958-60 гг. эксперименты с использованием отечественных ядерных фотоэмульсий.

В настоящей работе приводятся результаты измерений нейтронного фона в бетатронной лаборатории с помощью ядерных фотоэмульсий.

Постановка эксперимента

Для измерений потоков нейтронов использовались ядерные фотоэмульсии типа НИКФИ Т-3 и Я-2. Сущность метода ядерных фотоэмульсий заключается в том, что быстрые нейтроны, проходя через эмульсию, в результате (n, p) - рассеяния на водороде выбивают протоны отдачи, которые оставляют в эмульсии хорошо различимые и точно измеряемые следы, по величине которых можно судить об энергии частиц.

В качестве оптимальной толщины слоя эмульсии для наших экспериментов оказались наиболее пригодными толщины 100 и 200 микрон, так как при таких толщинах в эмульсии было обнаружено достаточное количество следов и, кроме того, методы проявления таких пластинок являются хотя и довольно длительными во времени, но не слишком сложными.

При облучении пластинок в пучке тормозного γ -излучения бетатрона на 25 Мэв или в полях рассеянного γ -излучения прежде всего было необходимо определить оптимальную дозу γ -излучения для этих пластинок. При этом необходимо было учитывать, с одной стороны, то обстоятельство, что величина дозы γ -излучения должна быть большой, чтобы имелась возможность к образованию достаточного количества протонов отдачи в эмульсии в результате ядерных реакций под действием нейтронов, но вместе с тем величина дозы, с другой стороны, должна быть малой, чтобы не было слишком сильного почернения пластинок, что затруднит просмотр следов частиц, в особенности тех, которые проходят внутри эмульсии под большими углами.

Были проведены предварительно облучения серии пластинок типа Т-3, толщина эмульсии 200 микрон, а затем несколько серий пластинок типа Я - 2, толщина эмульсии 100 микрон в пучке тормозного γ -излучения с энергией 24 Мэв, причем пластинки помещались на расстоянии 1 м от мишени под углом 10° к оси пучка. Оптимальная до-

за γ -излучения оказалась равной 4:6 *p*. При дозе излучения 8--10 *p* почернение пластинок было настолько сильным, что затрудняло идентификацию следов частиц, а большая часть следов, длина которых невелика, выпадала из поля зрения. При дозе γ -излучения 15 *p* пластинки были совершенно черными и разобрать на них какие-либо следы не представлялось возможным.

Прежде чем проводить эксперимент, необходимо было выяснить вопрос о том, как влияет упаковочный материал и его толщина на число треков в эмульсии. В состав упаковочного материала (черная бумага, в которую завернуты пластинки для избежания их преждевременного засвечивания) входят элементы: водород H^1 , углерод C^{12} , азот N^{14} , кислород O^{16} , и под действием тормозного γ -излучения с энергией до 24 *Мэв* на этих элементах могут протекать фотоядерные реакции типа (γ, n) и (γ, p) . В результате, помимо протонов отдачи, образующихся за счет быстрых нейтронов, обусловленных излучением от самой ускорительной установки, в эмульсии будут регистрироваться и протоны, обязанные своим возникновением (γ, p) -реакциям на различных элементах, и протоны отдачи, возникшие в результате (γ, n) -реакций. Фотопластинки обертывались несколькими слоями бумаги, после чего облучались в пучке тормозного γ -излучения бетатрона, причем доза γ -излучения в каждом случае оставалась постоянной. При просмотре этих пластинок было установлено, что в пластинках с одним слоем упаковочной бумаги было зафиксировано около 140 треков/ $см^2 \cdot сек$, а в пластинках с 5 слоями бумаги число треков было в 2,5 раза больше. Поэтому в дальнейших экспериментах для избежания возможных ошибок за счет протонов, обусловленных наличием упаковочного материала, облучение пластинок проводилось без него в затемненном помещении.

Для просмотра пластинок использовался микроскоп типа МБИ-3 с масляным иммерсионным увеличением.

При просмотре пластинок на микроскопе с кратностью увеличения 900 X на различной глубине в эмульсии наблюдались всевозможные треки, вилки, звезды. Протоны отдачи, образующиеся в результате взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами различных элементов, входящих в состав эмульсии, имеют характерные треки с едва заметным началом и несколько изогнутым утолщенным концом. Протоны, возникшие в результате (n, p) -рассеяния в стеклянной подложке эмульсии, треки которых входят в эмульсию со стороны подложки, во внимание не принимались. Треки, уходящие из эмульсии в подложку и выходящие из эмульсии, учитывались при исследовании пластинок, и величина их пробега приблизительно оценивалась по среднему вероятному пробегу основного числа треков протонов отдачи, имеющих начало и конец в эмульсии. Количество их составляло около 5--10% от общего числа треков. Протоны, рассеянные на протонах, также фиксировались в эмульсии, и энергия протона в этом случае определялась по закону сохранения энергии и импульса в системе центра инерции. Протоны, образованные в результате (γ, p) - или (n, p) -реакций на ядрах элементов, входящих в состав воздуха, а также коллиматора и защитных экранов, регистрировались эмульсией, однако следует отметить, что поперечное сечение этих реакций невелико и выход реакций незначителен. Соотношение между энергией протонов и пробегом их в воздухе дает основание для предположения, что расстояние от ближайших точек поверхности коллиматора и защиты до пластинок в 20--25 *см* будет оказывать препятствие для регистрации в эмульсии протонов с энергией до 4,0 *Мэв*. Тем не ме-

нее зарегистрировано значительное количество треков протонов, начинающихся с поверхности эмульсии не только в этих пластинках, но и в пластинках, удаленных на расстояние 70-80 см от поверхности коллиматора и защитных экранов. Следовательно, протоны отдачи возникают не только внутри эмульсии, но и на ее поверхности. Кроме того, при тщательном изучении следов протонов, входящих в эмульсию извне, и следов протонов отдачи, образующихся на поверхности эмульсии, можно заметить различия в месте образования трека в эмульсии: след протона отдачи имеет неясно выраженное расплывчатое начало, начало же следа протона очень четкое.

В общем количество треков протонов отдачи вносят свой вклад также протоны и нейтроны, образующиеся в результате реакций типа: (γ, n) , (γ, p) , (γ, np) , а также реакции $N^{14}(n, p)C^{14}$, на ядрах изотопов кислорода, углерода и азота, входящих в состав эмульсии. Треки этих событий можно идентифицировать однозначно по продуктам реакции и геометрии распада. Реакция типа (γ, n) характеризуется наличием лишь одного следа, — следа ядра отдачи, чем и отличается от других реакций. Реакции типа (γ, p) и (γ, np) характеризуются наличием двух следов: протона и ядра отдачи. Чтобы идентифицировать эти две реакции, необходимо иметь в виду, что при (γ, p) -реакции в эмульсии угол между следами протона и ядра отдачи близок к 180° , а суммарный импульс лежит в одной плоскости с ними и совпадает с направлением пучка γ -квантов. При (γ, np) -реакции вылетающие частицы могут иметь разные по величине и направлению импульсы и любые углы по отношению к направлению пучка γ -излучения. Образующиеся в результате реакции $N^{14}(n, p)C^{14}$ на медленных нейтронах треки можно идентифицировать по суммарному пробегу протона и ядра отдачи (около 6 микрон). В качестве примера следов частиц в эмульсии пластинок на рис. 1 приведена фотография следа протона отдачи.

Для вычисления величины пробега протонов отдачи с помощью окулярной шкалы микроскопа измерялись горизонтальная проекция следа и вертикальная составляющая („погружение“), причем вносилась поправка на коэффициент усадки эмульсии, величина которого для различных пластинок колебалась в пределах 1,83 : 2,2. Точность измерений при определении вертикальной проекции следа ограничивалась ценой деления микрометрического винта (до 1 микрона).

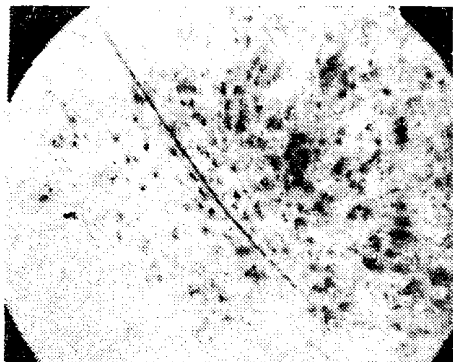


Рис. 1

Для вычисления энергии протонов отдачи по их пробегам в эмульсии нами использовались номограммы пробег-энергия, приведенные в работе [7]. Эти номограммы составлены для пластинок типа Iford С - 2, но могут быть использованы и для отечественных пластинок, так как разница в составе этих эмульсий невелика и ошибки в определении величины энергии протонов отдачи будут незначительными.

Результаты измерений

Схема расположения фотопластинок типа Я - 2, 100 микрон в помещениях бетатронной лаборатории представлена на рис. 2. Основ-

ное внимание уделялось измерениям нейтронного потока в пучке тормозного γ -излучения, а также в помещении пультовой комнаты у перископа (11) и пульта управления (12), где находятся экспериментаторы и обслуживающий персонал во время работы ускорителя. Как уже упоминалось выше, оптимальная доза γ -излучения для пластинок, установленных в пучке на расстоянии 1 м от мишени, составляла 5р. Контроль за постоянством интенсивности γ -излучения осуществлялся с помощью двух ионизационных камер, одна из кото-

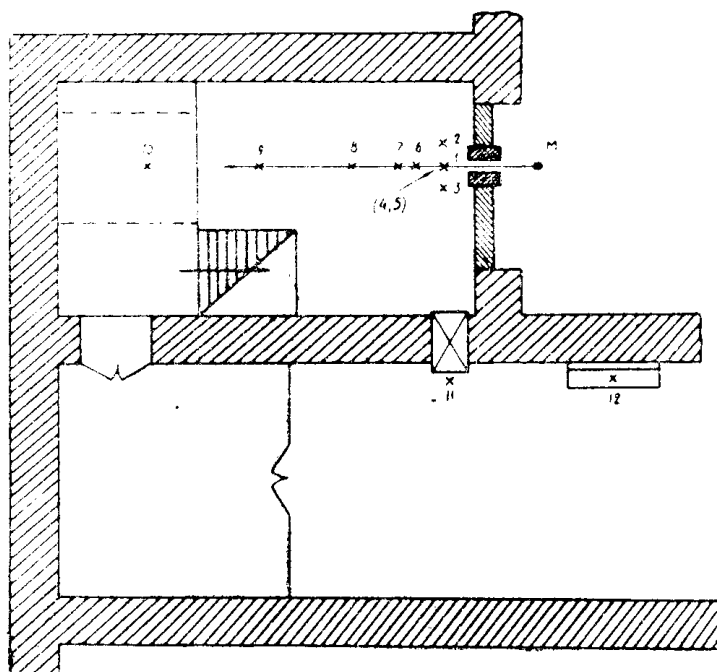


Рис. 2

рых находилась в пучке тормозного γ -излучения на расстоянии 1 м от мишени, а вторая—в рассеянном излучении ускорителя. При изучении потоков нейтронов в пультовой комнате доза γ -излучения в пучке на расстоянии 1 м от мишени составляла 100р. Облучение пластинок в экспериментальном зале проводилось без упаковки в затемненном помещении; пластинки, находящиеся в пультовой комнате, были помещены в однослойные конверты из плотной черной бумаги. Результаты измерений приведены в таблице.

Как видно из результатов измерений, наибольшая величина потока быстрых нейтронов составляет $6,38 \cdot 10^4 \text{ нейтр/см}^2$ на 1р тормозного γ -излучения. Из приведенных в таблице данных для потоков быстрых нейтронов, измеренных в точках 2, 3, 4 и 5, расположенных симметрично относительно оси пучка тормозного γ -излучения, видно, что в точке 2, находящейся в горизонтальной плоскости на расстоянии 20 см вправо от пучка, поток быстрых нейтронов больше, чем в остальных точках. Это можно, по-видимому, объяснить дополнительным вкладом за счет нейтронов, отраженных от стены помещения. Отмечается уменьшение потока быстрых нейтронов в пучке тормозного γ -излучения по мере удаления от мишени ускорителя. Возрастание величины потока нейтронов в точке, удаленной от мишени на расстояние 4,2 м, в „абсолютно черном теле“, объясняется обратным рассеянием нейтронов от стенок „черного тела“. Эти измерения

Таблица

Точки, в которых производились измерения	Потоки быстрых нейтронов в нейтрон $\text{см}^2\text{рентген}$	Примечание
В экспериментальном зале		
1	$6,38 \cdot 10^4$	в пучке, 1 м от мишени
2	$2,36 \cdot 10^4$	1 м от мишени, 20 см вправо от оси пучка
3	$1,89 \cdot 10^4$	1 м от мишени, 20 см влево от оси пучка
4	$1,70 \cdot 10^4$	1 м от мишени, 20 см вверх от оси пучка
5	$1,75 \cdot 10^4$	1 м от мишени, 20 см вниз от оси пучка
6	$4,78 \cdot 10^4$	в пучке, 1,3 м от мишени
7	$3,07 \cdot 10^4$	в пучке, 1,5 м от мишени
8	$2,32 \cdot 10^4$	в пучке, 2,0 м от мишени
9	$1,58 \cdot 10^4$	в пучке, 3,0 м от мишени
10	$3,31 \cdot 10^4$	в пучке, 4,2 м от мишени (в абсолютно черном теле*)
В пультовой комнате		
11	4,6	у перископа
12	—	у пульта управления

Примечание. В точках 11 и 12 измерения быстрых нейтронов отнесены к дозе γ -излучения 100 рентген в пучке на расстоянии 1 м от мишени.

еще раз подтверждают результаты измерений потоков нейтронов, проведенных ранее с помощью других методов [8].

Приведенные в настоящей работе данные измерений потоков быстрых нейтронов с помощью фотопластинок являются первыми результатами исследований потоков нейтронов, их энергетического и пространственного распределения с использованием ядерных фотоэмульсий, проводимых на бетатронах с энергией тормозного γ -излучения на 25 Мэв.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. S. Laughlin. — *Nucleonics*, **8**, №4, 5, 1951.
2. H. Wäffler. Das Brown Boveri Betatron, s. 17, 1958.
3. D. Hofmann. *Strahlentherapie*, **97**, 239, 1955.
4. В. Л. Королев, Г. А. Череватенко, Б. М. Яковлев. Научный отчет, № 139, ТПИ, 1958; Научный отчет № 65, НИИ ТПИ, 1958.
5. А. Л. Грязнов, Р. П. Мещеряков, Б. М. Яковлев. Научный отчет, № 0857 71, НИИ ТПИ, 1959.
6. Б. М. Яковлев, Р. П. Мещеряков, А. Л. Грязнов. Доклад на III Всесоюзной межвузовской конференции по электронным ускорителям, г. Томск, 1959.
7. P. Demers. *Ionographie*, p. 252, 1958.
8. Р. П. Мещеряков, Б. М. Яковлев, А. Л. Грязнов, Г. А. Цыба. Доклад на III Всесоюзной межвузовской конференции по электронным ускорителям, г. Томск, 1959.