

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 свыше 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 BF₃-счетчики [1, 2]. Для определения выхода нейтронов от бетатрона были использованы и фотоэмульсии типа Ilford C—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 $1,33 \text{ Мэв}$; 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 BF_3 , „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 $4 \div 6 p$. При дозе излучения $8 \div 10 p$ 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 $24 Mэв$ 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 $140 \text{ треков/см}^2 \cdot \text{сек}$, 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 $900 \times$ 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 $5 \div 10\%$ 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 $20 \div 25 \text{ см}$ будет оказывать препятствие для регистрации в эмульсии протонов с энергией до $4,0 Mэв$. 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: $[(\gamma, n)]$, (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).

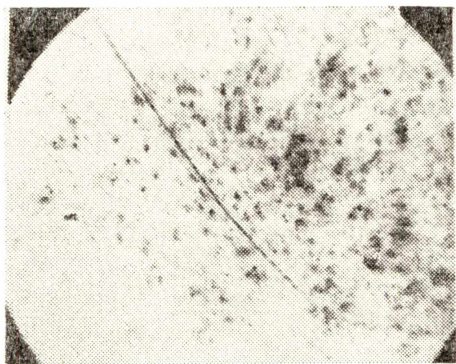


Рис. 1

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 Ilford C - 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 5 р. Контроль за постоянством интенсивности γ -излучения осуществлялся с помощью двух ионизационных камер, одна из кото-

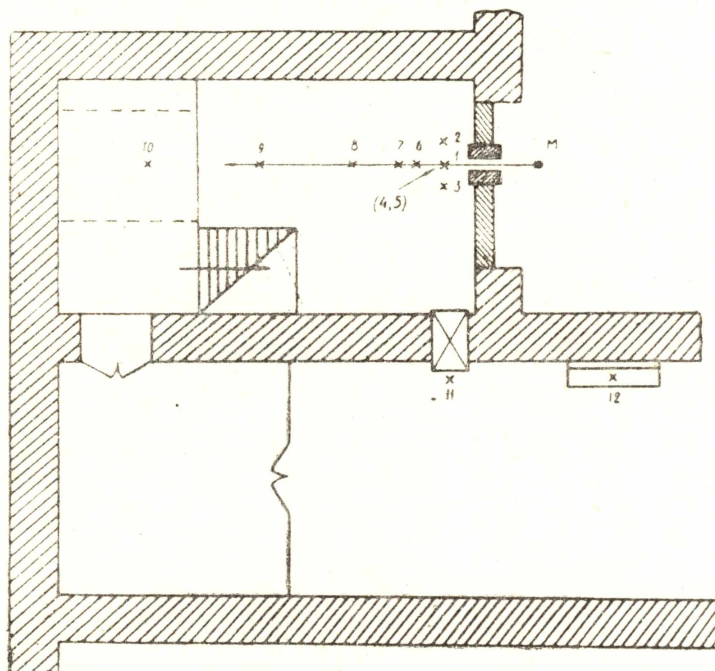


Рис. 2

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 100 р. 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 1 р 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/см ² 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. Д. 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. R. 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.