

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

$\frac{18}{3-63}$ 2.3.
557

ЭКС. ЧИТ. ЗЭ V



Л.П. Зиновьев, И.Б. Иссинский, К.П. Мызников

557

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД
НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПУЧКОМ
В СИНХРОФАЗОТРОНЕ НА 10 БЭВ

Дубна 1960 год

Л.П. Зиновьев, И.Б. Иссинский, К.П. Мизников

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД
НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПУЧКОМ
В СИНХРОФАЗОТРОНЕ НА 10 БЭВ

477/9 мп.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Рассматриваемый метод наблюдения за пучком протонов в камере синхрофазотрона основан на взаимодействии протонов с мишенью из сцинтиллирующего материала. Световой сигнал, испускаемый мишенью, регистрировался фотоумножителем, импульс напряжения с которого наблюдался на экране осциллографа. Этот метод нашел широкое применение для регистрации пучков малой интенсивности при проведении пуско-наладочных работ на синхрофазотроне. Поскольку в начальный период запуска ускорителя работы велись при интенсивности пучка значительно ниже проектной, большое внимание уделено повышению чувствительности регистрирующих устройств.

В одной статье невозможно описать множество измерительных устройств, применявшихся для наблюдения за пучком. Ниже рассматриваются лишь общие вопросы, которые были решены при разработке метода.

1. Выбор сцинтиллирующего материала

В зависимости от условий эксперимента к материалу мишени предъявляются те или иные требования. Важнейшие из них следующие:

а/ Материал должен быть эффективным для регистрации протонов в диапазоне от 9 Мэв до 10^4 Мэв.

б/ Световой выход сцинтиллятора на единицу поглощенной энергии не должен зависеть от мощности дозы облучения.

в/ Свойства материала не должны изменяться при длительном облучении.

г/ Так как мишени из сцинтиллирующего материала помещаются в камеру ускорителя, откачиваемую до высокого вакуума, материал мишени не должен ухудшать вакуум при бомбардировке пучком.

д/ Для точного воспроизведения структуры пучка во времени длительность послесвечения сцинтиллирующего материала должна быть достаточно мала / $\sim 10^{-6}$ сек/.

е/ В зависимости от технологии приготовления мишени к материалу могут быть предъявлены требования простоты обработки, удобства приготовления мишеней больших размеров и т.д.

Эти требования ограничивают круг сцинтилирующих материалов, который может быть применен для наблюдения за пучком в синхрофазотроне. Так, например, органические сцинтилляторы, ввиду их недостаточной стойкости к облучению¹, а также вследствие того, что они ухудшают вакуум при бомбардировке пучком, оказываются непригодными. Для выбора наиболее подходящего материала были исследованы некоторые отечественные сцинтилляторы.

Поскольку большинство экспериментов по исследованию режима инжекции и начального этапа ускорения проводились при энергии, близкой к энергии инжекции /9 Мэв/, представляло интерес определить эффективность фосфоров по отношению к протонам этой энергии.

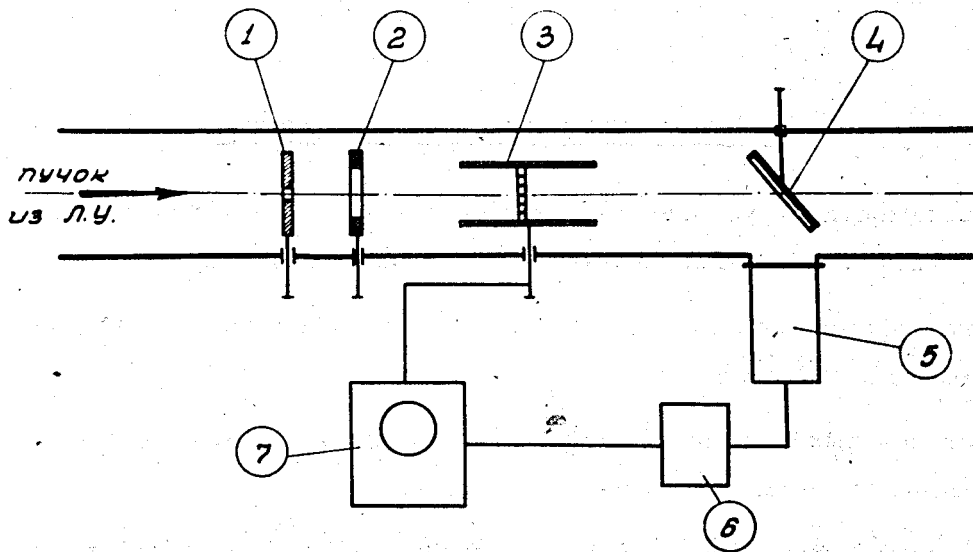


Рис. 1. Схема опыта по определению эффективности сцинтилляторов.

На рис. 1 показана схема опыта. Пучок протонов, выходящий из линейного ускорителя, диафрагмировался с помощью вертикальной /1/ и горизонтальной диафрагмы /2/. Затем он проходил через цилиндр Фарадея с решетчатым дном /3/ и попадал на исследуемый сцинтилирующий материал /4/. Световой сигнал от сцинтиллятора регистрировался с помощью фотоумножителя ФЭУ-19М /5/ и подавался на один из входов двухлучевого осциллографа /7/. На второй луч

этого осциллографа подавался сигнал с цилиндра Фарадея. Цилиндр Фарадея, задерживая 9/10 частей проходящего через него пучка, служил монитором для контроля за интенсивностью пучка протонов. Фон частиц малой энергии, содержащийся в пучке из линейного ускорителя, устранялся с помощью алюминиевой фольги толщиной 50 микрон, которая была приклеена на одну из диафрагм. Чтобы избежать искажения сигнала, выбирался фотоумножитель, обладающий линейной зависимостью выходного сигнала от падающего светового потока в исследуемом диапазоне значений светового потока. Анод фотоумножителя был нагружен на сопротивление 100 ком. Далее сигнал подавался на вход катодного повторителя, амплитудная характеристика которого была также линейна для значений амплитуды отрицательного сигнала до 100 в. Фотоумножителем регистрировался технический выход света^{х/}. Толщина образцов во всех измерениях выбиралась такой, чтобы в ней укладывался пробег протонов с энергией 9 Мэв. Поправки на поглощение света люминесценции в сцинтиллирующем материале не учитывались. Не учитывалось также различие спектров люминесценции различных сцинтилляторов и спектральной чувствительности фотокатода ФЭУ-19-М.

Точность измерения амплитуд сигналов была не хуже 10%. Амплитуды сигналов от различных сцинтилляторов, отнесенные к одинаковой интенсивности, сравнивались с амплитудой сигнала от люминесцентного порошка вольфрамата кальция $/CaWO_4/$. Результаты измерений приведены в таблице 1. Наиболее эффективным из неорганических материалов является светосостав К-11. Однако, он обладает большим временем послесвечения—порядка 10^{-5} сек. Кроме того этот материал дает фосфоресценцию, которая имеет большую длительность. В силу этого светосостав К-11 для регистрации импульсов частиц нами не применялся. Более широкое применение он нашел для визуального наблюдения за пучком.

^{х/} Технический выход света зависит от физического выхода света /доли поглощенной энергии, превращенной в свет/, прозрачности материала к спектру люминесценции и от поглощения первичного излучения.

Таблица 1

Сцинтиллирующий материал	Относит.эффек- тивность
Люминесцентный CaWO_4 /порошок/	1
Усиленный люминесцентный CaWO_4 /порошок/	2,5
Светосостав К-11	4
$\text{KJ}(\text{Te})$ - монокристалл	3
$\text{CsJ}(\text{Te})$ - монокристалл	9
KJ - неактивированный	0,2
2% атрацена в полистироле	0,5
2% ρ -терфенила в полистироле	0,7
2% ρ -терфенила + РОРОР 0,02% в полистироле	1,1

Этот же недостаток присущ монокристаллам йодистого цезия $\text{CsJ}(\text{Te})$. В наших условиях $\text{CsJ}(\text{Te})$ не нашел применения.

Более удобным материалом является йодистый калий $\text{KJ}(\text{Te})$. Он легко выращивается в виде больших кристаллов, не гигроскопичен, обладает достаточной эффективностью. Длительность послесвечения лежит в интервале 10^{-5} - 10^{-6} сек. $\text{KJ}(\text{Te})$ устойчив к действию излучения, эффективность светового выхода мало зависит от энергии падающих протонов ^{1, 2, 3}. В ряде случаев кристаллы $\text{KJ}(\text{Te})$ успешно нами применялись.

Для приготовления мишеней больших размеров применялся порошок люминесцентного вольфрамата кальция CaWO_4 . Слои небольшой толщины могут быть легко получены на поверхности мишени нужной формы путем осаждения порошка CaWO_4 из раствора спирта с небольшой добавкой клея БФ-4. CaWO_4 достаточно эффективен, обладает стойкостью к облучению, эффективность светового выхода не зависит от энергии протонов ^{1,2,4}. Длительность послесвечения $\sim 10^{-6}$ сек ¹. Этот сцинтиллятор нашел широкое применение при работе с фотоумножителем, а также для визуального наблюдения за пучком.

Наиболее удобным материалом для многих исследований пучка являются пластические сцинтилляторы. В большинстве случаев применялись пластмассы

с 2% содержанием р-терфенила или пластмассы с 2% Р - терфенила с добавкой 0,02% РОРОР⁵. Эти пластмассы эффективны к регистрации протонов, достаточно стойки к облучению⁶, обладают временем высвечивания порядка 10^{-9} сек, что позволяет применять их для наблюдения за временной структурой импульсов частиц. Сравнительно легко могут быть приготовлены пластмассы больших размеров⁷. При этом они обладают большой прозрачностью к спектру люминесценции и хорошо обрабатываются.

Рассмотрим подробнее вопрос о возможности применения пластических сцинтилляторов для регистрации относительной интенсивности пучка на высоких энергиях.

Световой выход из сцинтиллятора определяется, с одной стороны, долей энергии, потерянной в нем частицей, с другой стороны — эффективностью сцинтиллятора и его прозрачностью к спектру люминесценции. Удельные потери энергии для сложных веществ, состоящих из нескольких элементов, могут быть получены путем сложения удельных потерь энергии в каждом из элементов, входящих в состав этого вещества /правило Брэгга⁸/

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z}{m\beta^2 c^2} \sum_i n_i Z_i \left[\ln \frac{2m\beta^2 c^2}{I_i(1-\beta^2)} - \beta^2 \right].$$

Здесь z — заряд бомбардирующей частицы, βc — скорость бомбардирующей частицы, m — масса электрона, e — заряд электрона, n_i — число атомов элемента i в 1 см^3 бомбардируемого вещества, Z_i — заряд ядра элемента i , I_i — средний потенциал возбуждения элемента i

$$n_i = \frac{\alpha_i \rho N}{A_i}.$$

Здесь ρ — плотность вещества, α_i — доля элемента i по весу в 1 см^3 , A_i — атомный вес элемента i , N — число Авогадро.

Для пластических сцинтилляторов на основе полистирола:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{16,8 \cdot 10^4}{\beta^2} \left[9,7 + 2 \ln \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} - \beta^2 \right] \frac{\text{эВ}}{\text{см}}$$

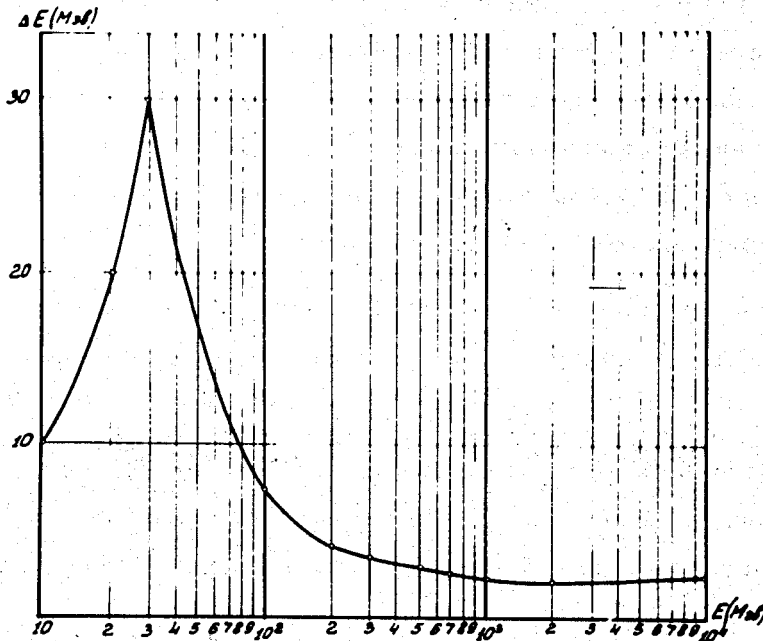


Рис. 2. Зависимость энергии, теряемой протоном в пластическом сцинтилляторе толщиной 1 см, от энергии протонов.

На рис. 2 показана зависимость энергии, потерянной протоном в пластмассе толщиной 1 см, от энергии протона. Долей энергии, пошедшей на ядерные взаимодействия, при такой толщине вещества можно пренебречь. Эффективность преобразования поглощенной энергии в световую может зависеть от энергии падающих протонов и их интенсивности. По данным работы ⁹ пропорциональность между выходом люминесценции и мощностью дозы ионизирующего излучения сохраняется для пластмассовых сцинтилляторов по крайней мере до $10^6 \frac{\text{эрг}}{\text{г.сек}}$. При точности измерений порядка 10% эффектами уменьшения выхода и дополнительным поглощением собственной люминесценции от повреждения сцинтилляторов облучением можно пренебречь вплоть до общей дозы $3 \cdot 10^8$ эрг/г. Мощность дозы облучения при бомбардировке мишени импульсом частиц, равномерно распределенных во времени, определяется соотношением:

$$D = \frac{1,6 \cdot 10^{-12} \Delta E N}{\tau \gamma}$$

Здесь ΔE - энергия в эв, выделяемая протоном в веществе мишени, N - число частиц в импульсе, τ - время, за которое пучок попадает на мишень, γ - вес облучаемой части сцинтиллятора.

Из кривой рис. 2 следует, что при энергии протонов большей ~ 500 Мэв, величина энергии, теряемой в пластическом сцинтилляторе определенной толщины, слабо зависит от энергии падающей частицы. Определим мощность дозы в этом диапазоне энергий. Если толщина сцинтиллятора в направлении пучка 1 см, время попадания пучка на мишень в указанном диапазоне энергий 1 мсек, то при размере участка рабочей мишени, облучаемого пучком, 4 см по высоте и 3 см по радиусу, при интенсивности 10^9 протонов, мощность дозы в импульсе $= 3 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{г.сек}}$. При такой мощности дозы выход света прямо пропорционален энергии, выделенной частицей в сцинтилляторе. Так как импульсы следуют с частотой один раз в 12 сек, эта зависимость сохраняется на протяжении длительного времени / $\sim 10^6$ циклов ускорения/. Прозрачность пластических сцинтилляторов к собственной люминесценции велика ⁷, поэтому потерей света в толщинах ~ 3 см можно пренебречь.

Из сказанного следует, что пластические сцинтилляторы можно применять для наблюдения за относительным изменением интенсивности пучка в области энергий свыше 500 Мэв. Амплитуда сигнала в этом случае с точностью до 20% будет пропорциональна числу частиц, пришедших на мишень, по крайней мере, до интенсивности 10^9 частиц в импульсе.

2. Передача света от мишени на фотокатод умножителя

Выбор формы и размеров мишени определяется условиями эксперимента. Мишень помещается в вакуум и магнитное поле, т.е. в такие условия, куда технически неудобно поместить фотоумножитель. Поэтому фотоумножитель приходится располагать в окне электромагнита синхрофазотрона. Распределение магнитного поля в окне при различных значениях напряженности магнитного поля в зазоре магнита показано на рис. 3.

Видно, что существует область на расстоянии 2,4-2,7 м от центра магнита, в которой значение магнитного поля не превышает 200 эрстед в течение всего цикла ускорения. В этой области помещался защищенный от действия магнитного поля фотоумножитель. Способ экранировки ФЭУ описан ниже.

В тех случаях, когда размеры мишени малы, сбор света с нее на фотокатод умножителя производился с помощью световодов. Для этой цели приме-

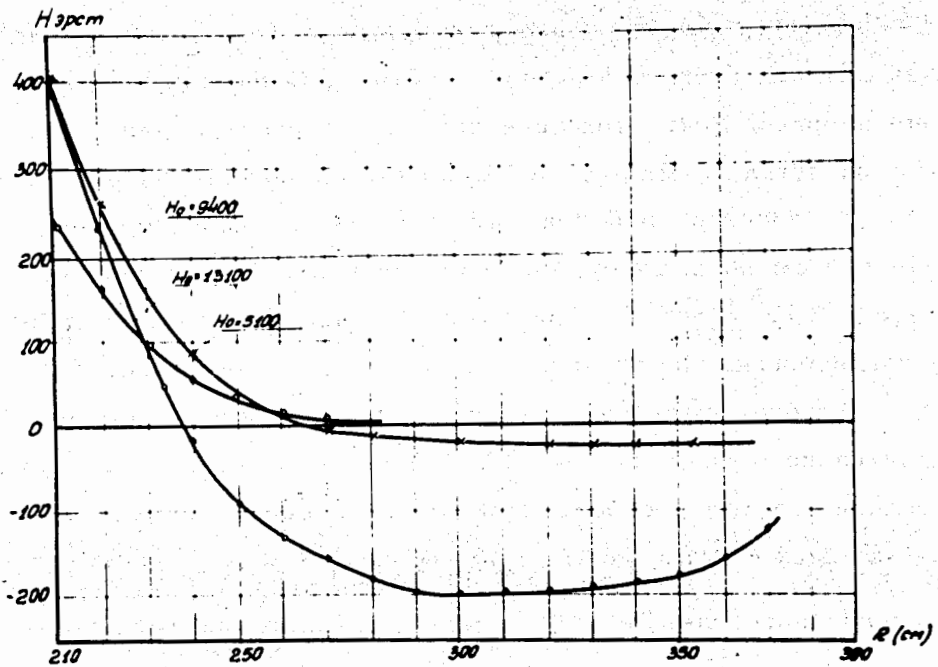


Рис. 3. Распределение напряженности рассеянного магнитного поля в направлении радиуса в окне магнита при различных значениях поля в рабочей области. По оси абсцисс указано расстояние от центра рабочей области магнита.

нялись круглые полированные стержни из плексигласа. Они очень удобны в обращении, хорошо полируются и изгибаются, что позволяет придать световоду любую форму. Прозрачность таких стержней к свету люминесценции сцинтиллятора зависит от сорта плексигласа. Наиболее подходящим с этой точки зрения является авиационный плексиглас. В отдельных случаях применялись световоды длиной 2 – 3 м. Мишень изготовлялась из материала, прозрачного к собственной люминесценции /например, пластического сцинтиллятора/. Оптический контакт между мишенью и световодом создавался с помощью тонкого слоя вазелинового масла. Сбор света с помощью световода является наиболее эффективным, так как в этом случае велик телесный угол, под которым торец световода виден из любой точки мишени.

Сбор света с мишеней больших размеров осуществлялся с помощью оптической системы. Вакуумная камера синхрофазотрона имеет отверстия во внутрен-

ней и внешней стенках, расположенные друг против друга. Через одно из этих отверстий внутрь вакуумной камеры вводилась мишень из сцинтиллятора. Для того, чтобы собрать свет с мишени на фотокатод умножителя, расположенный в области минимального магнитного поля, к противоположному отверстию через плексигласовое окно присоединялась оптическая система /рис. 4/. Положение мишени может изменяться в пределах рабочей области синхрофазотрона ± 70 см от центра камеры, поэтому оптическая система должна передать с минимальными потерями весь попадающий в нее свет на фотокатод умножителя при любом положении мишени. Для выполнения этих требований была применена двухлинзовая конденсорная оптическая система, получившая название "системы с промежуточным отображением" ¹⁰. Оптическая схема этой системы и ход лучей для двух крайних положений мишени представлены на рис. 5. Для получения

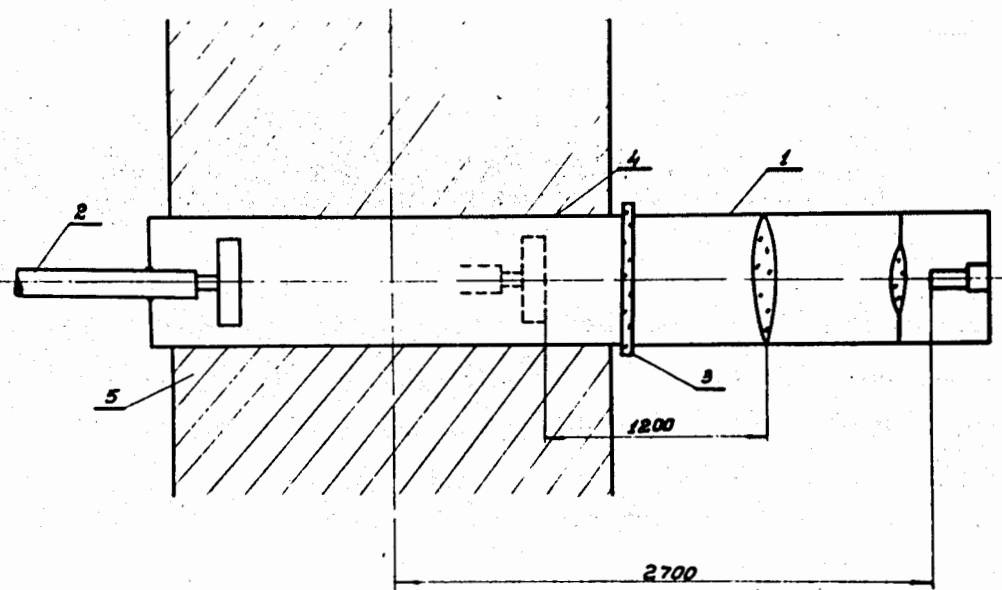


Рис. 4. Относительное расположение оптической системы и измерительной мишени на камере синхрофазотрона. 1 - оптическая система, 2 - измерительная мишень, 3 - смотровое окно, 4 - вакуумная камера, 5 - магнит. На рисунке указаны крайние положения мишени.

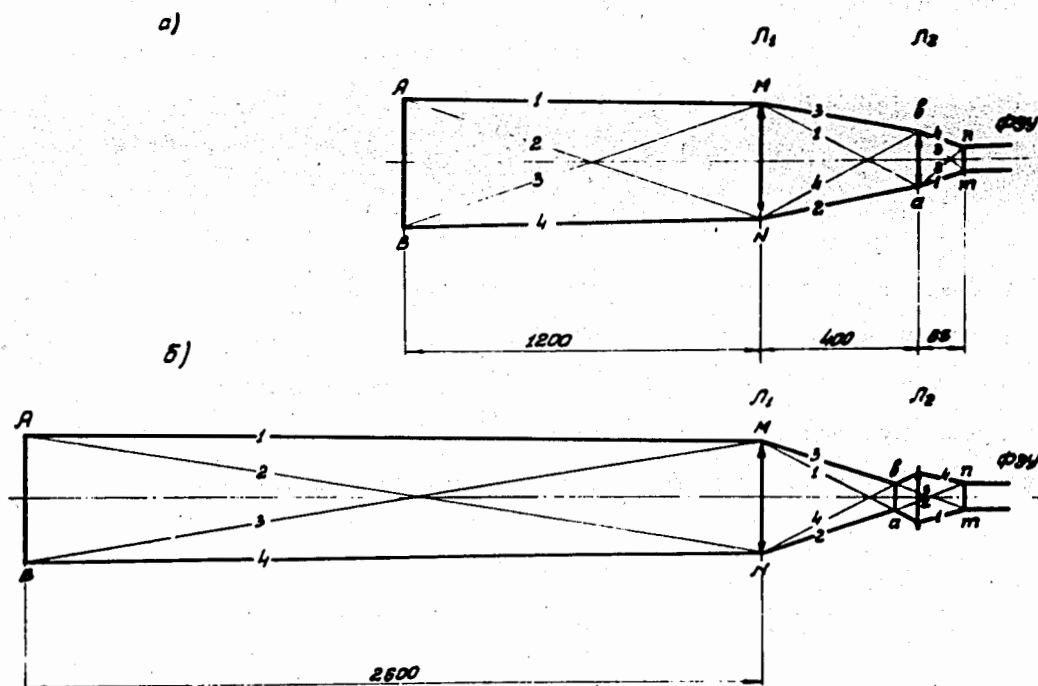


Рис. 5. Оптическая схема конденсорной системы и ход лучей для двух крайних положений мишени.

достаточной светосилы системы диаметр линзы L_1 выбран максимально возможным, а именно—210 мм при фокусном расстоянии 300 мм. Для того чтобы условия прохождения света через систему остались неизменными при различных положениях мишени, необходимо, чтобы линза L_2 не ограничивала проходящий через нее световой поток при всех промежуточных положениях мишени. Это достигается соответствующим выбором диаметра линзы L_2 . Так как эта линза должна быть короткофокусной, то, исходя из разумного соотношения диаметра и фокуса, ее составили из двух линз, каждая из которых имеет диаметр 75 мм и фокусное расстояние 100 мм. При этих параметрах оптическая система обеспечивает передачу света без потерь с поверхности мишени, диаметром 250 мм, на фотокатод умножителя, диаметром 35 мм, при положении мишени 1200 мм—2600 мм от первой линзы. В каждом положении мишени свет, исходящий из каждой точки мишени, равномерно освещает линзу L_1 , поэтому поверхность фотокатода будет освещена также равномерно. Это позволяет исключить влияние неравномерности чувствительности поверхности фотокатода.

Линзы изготовлены из оптического стекла марки К-8, которое хорошо пропускает свет люминесценции сцинтилляторов. Конструктивно система объединена в светонепроницаемый блок, сочленяющийся с блоком фотоумножителя. Для того, чтобы скорректировать влияние aberrаций и толщины линз, положение линзы L_2 может изменяться относительно линзы L_1 и фотокатода умножителя в пределах ± 20 мм.

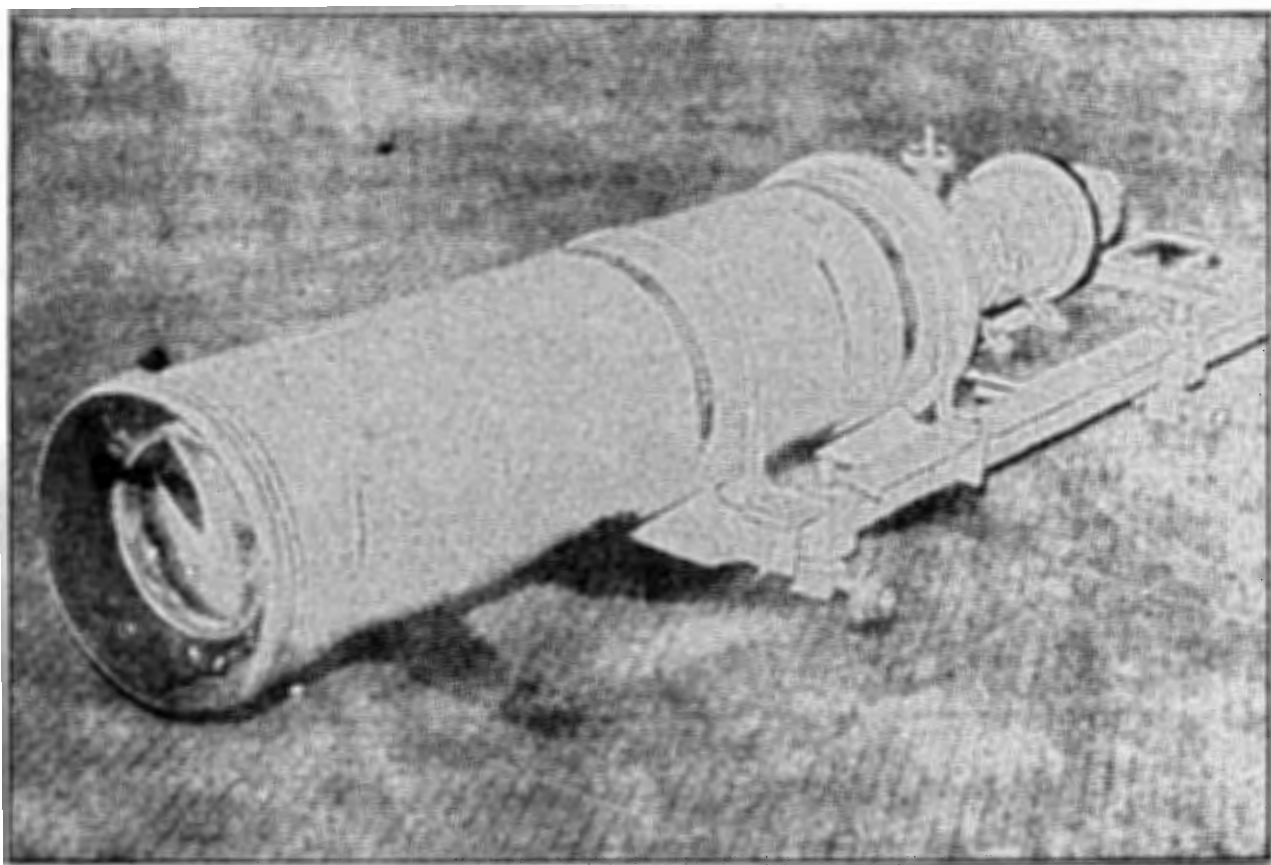


Рис. 6. Оптическая система с блоком фотоумножителя.

На рис. 6 дана фотография оптической системы с блоком фотоумножителя.

3. Схема фотоумножителя

Световой сигнал, излучаемый мишенью под действием пучка, регистрируется фотоэлектронным умножителем. Фотоумножитель должен работать в режиме, обеспечивающем большую чувствительность при малом уровне шумов и возможность передачи структуры светового сигнала без искажений. При загрузке фотоумножителя интенсивными световыми сигналами он должен сохранять линейность до возможно больших величин сигналов.

В рассматриваемой системе наблюдения за пучком применялись фотоумножители ФЭУ-19 и ФЭУ-25. Свойства ФЭУ-19 специально исследовались применительно к условиям их использования на синхрофазотроне. Фотоумножители ФЭУ-25 использовались в малогабаритной аппаратуре, а также в случаях регистрации интенсивных световых сигналов. Электрическая схема фотоумножителя показана на рис. 7. Сигнал с фотоумножителя подается на катодный повторитель, который собран по схеме, пропускающей без искажений отрицательный сигнал с амплитудой до 100 в. Чтобы обеспечить линейность между выходным сигналом и падаю-

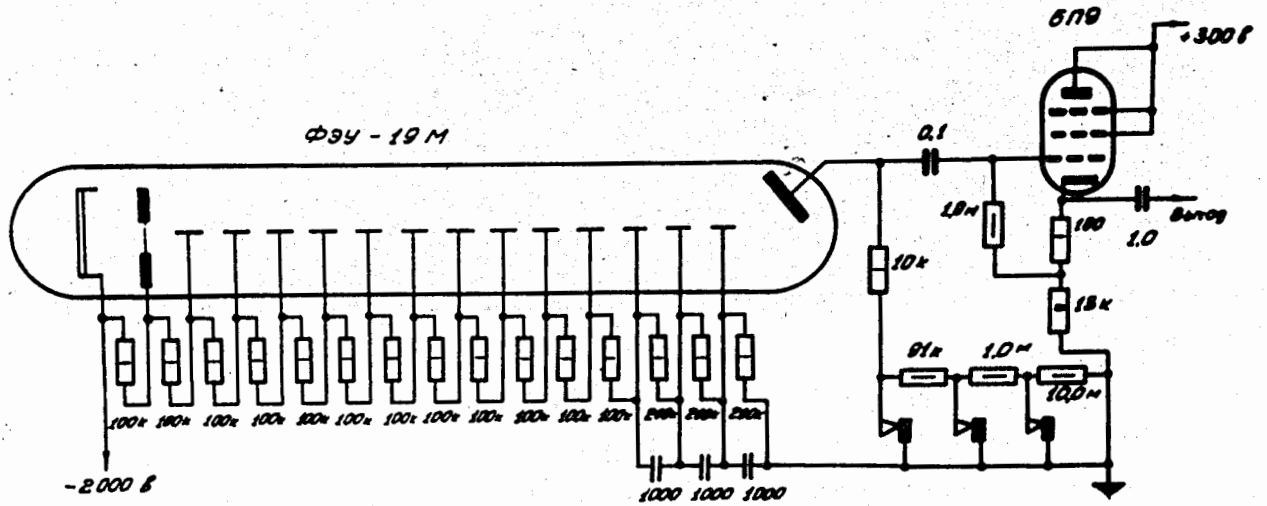


Рис. 7. Схема фотоумножителя.

щим световым импульсом, напряжение на последние каскады дается большее, чем на предыдущие. Подключение на последние каскады емкостей уменьшает скачок напряжения на них в момент прохождения мощных импульсов. Экземпляры ФЭУ отбирались по максимальной чувствительности, минимальному уровню шумов и линейности амплитудной характеристики. На рис. 8 приведена зависимость выходного сигнала фотоумножителя при нагрузочном сопротивлении 100 ком от светового потока, падающего на фотокатод, для пригодного и непригодного экземпляра. На оси абсцисс отложена величина импульсного светового потока в относительных единицах, по оси ординат величина сигнала на выходе катодного повторителя. Видно, что хорошие образцы ФЭУ пропускают без искажений импульсные токи до 500 мка.

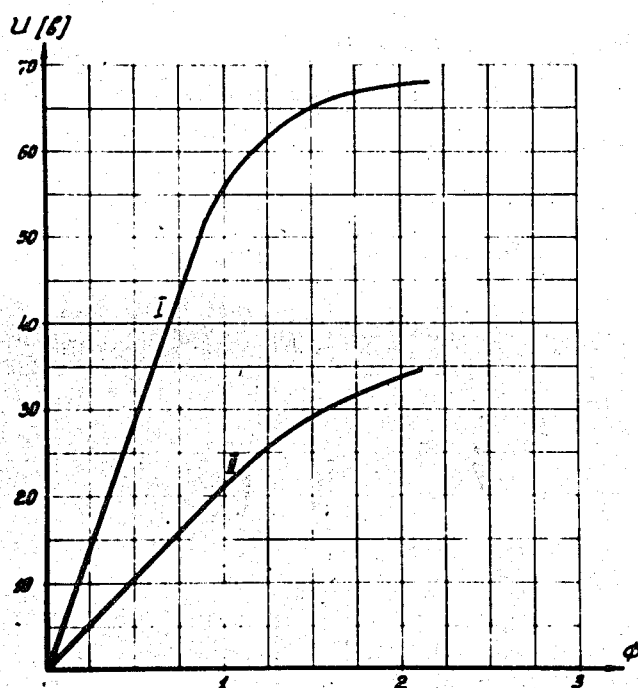


Рис. 8. Зависимость выходного сигнала от светового потока, падающего на фотоумножитель. 1 - для пригодного экземпляра, II - для непригодного экземпляра. Кривые сняты при напряжении на фотоумножителе 1700 в.

В различных режимах синхрофазотрона длительность световых сигналов может изменяться от нескольких мксек до сотен мсек. Чтобы регистрировать эти сигналы без искажений, на выходе ФЭУ предусмотрено изменение значения RC от 10^{-7} сек до 10^{-3} сек. Переключение RC производится дистанционно с помощью реле. Изменение RC на выходе ФЭУ позволяет также получать наивыгоднейшее отношение величины сигнала к шуму. Это бывает необходимо при регистрации слабых световых сигналов на уровне шумов, обусловленных посторонним светом в камере синхрофазотрона.

Делитель фотоумножителя питается от высоковольтного выпрямителя, дающего регулируемое напряжение до 2000 в., стабилизированное с точностью до 0,1%. Чтобы уменьшить ограничение токов на последних эмиттерах в случаях регистрации фотоумножителем интенсивных световых сигналов, делитель умножителя выбирался таким, чтобы ток через делитель был значительно больше, чем ток через фотоумножитель; в этих случаях он достигал 5 ма.

Для иллюстрации на рис. 9 дана типичная осциллограмма сигнала с фотоумножителя. В начале развертки виден импульс от частиц, не захваченных в

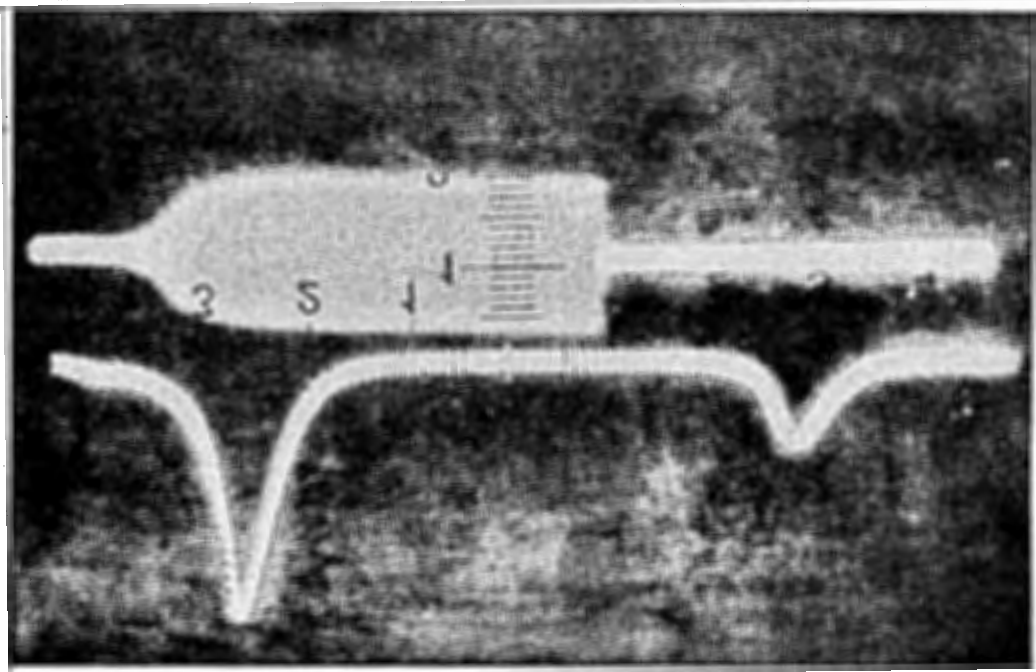


Рис. 9. Осциллограмма сигнала с фотоумножителя. Верхний луч — осциллограмма ускоряющего в.ч. напряжения. Нижний луч — сигнал от частиц, свернувшихся к внутреннему краю рабочей области.

ускорение и свернувшихся на мишень, расположенную у внутреннего края рабочей области магнита. Второй импульс обусловлен ускоренными частицами, свернувшимися на мишень после выключения высоко-частотного напряжения. При исследовании потерь в начальный период ускорения бывает необходимо наблюдать малые импульсы от частиц, выпавших из ускорения, которые следуют сразу же после мощного импульса от частиц, выпавших при захвате. Это затрудняется тем обстоятельством, что сразу после регистрации мощного светового импульса значительно уменьшается чувствительность фотоумножителя и возрастает уровень шумов, маскирующих полезный сигнал. Чтобы обойти эту трудность, напряжение на делитель фотоумножителя подавалось импульсно. В момент прихода мощной засветки фотоумножитель работает при напряжении 600 в, после прохождения импульса напряжение резко возрастает до 1800-2000 в. Схема импульсного питания фотоумножителя показана на рис. 10. В цепь высоковольтного источника

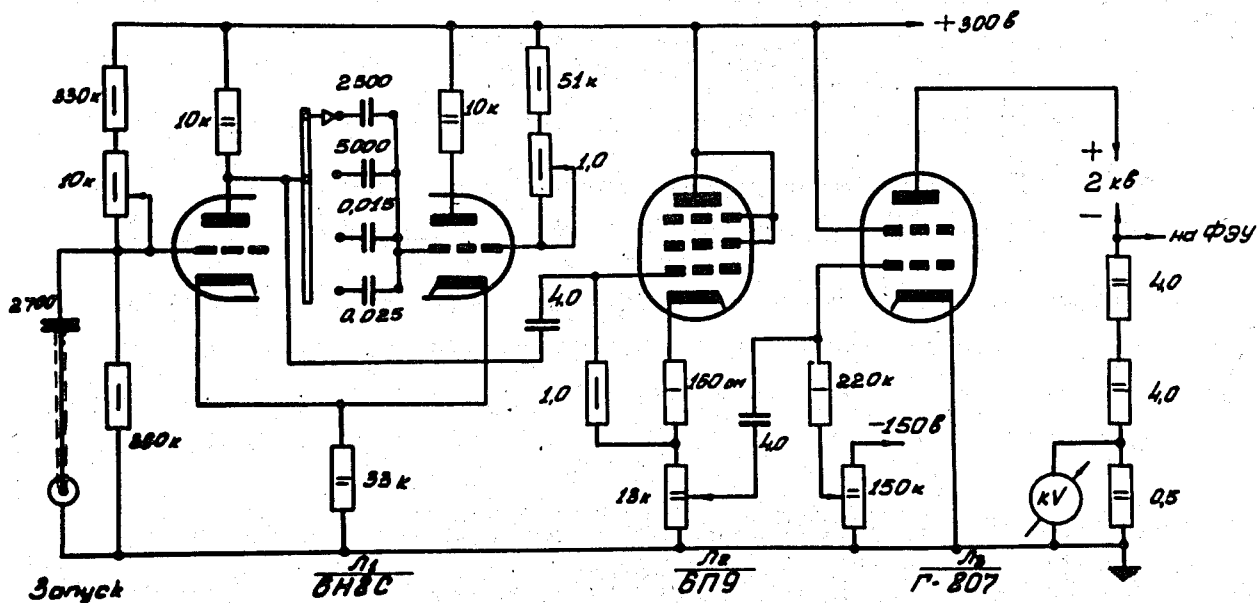


Рис. 10. Схема импульсной подачи высоковольтного напряжения на фотоумножитель.

питания последовательно с делителем фотоумножителя включена регулирующая лампа L_3 . К моменту мощной световой загрузки фотоумножителя на сетку этой лампы подается отрицательный импульс, генерируемый мультивибратором / L_4 /. Импульс, запускающий мультивибратор, синхронизован с магнитным полем ускорителя и может быть подан на сетку L_4 в любой момент цикла ускорения. Фронт нарастания высокого напряжения на делителе фотоумножителя 1 мсек. Уровень высокого напряжения может регулироваться путем изменения напряжения смещения на сетке L_3 .

Как указывалось выше, при работе в системе наблюдения за пучком фотоумножитель располагается в области рассеянного магнитного поля ускорителя ~ 200 эрстед. Нормальная работа фотоумножителя возможна при полях, не превышающих 0,4 эрстеда, поэтому предусматривалась экранировка фотоумножителя от действия магнитных полей. Экранировка осуществлялась с помощью труб из стали 3, внутрь которых помещался фотоумножитель. Для получения коэффициента экранирования ~ 1000 применялись многослойные экраны. Расчет диаметров и толщин экранирующих труб, расстояния между ними производился по формуле ¹¹ :

$$\eta = \frac{\mu t}{2R},$$

где η - коэффициент экранирования одной стальной трубы, μ - магнитная проницаемость, t - толщина трубы, R - наружный радиус трубы.

Для многослойного экрана: $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_k \cdot \dots \cdot \eta_n$, где η_k - коэффициент экранирования каждого слоя. Надежность экранировки фотоумножителя от магнитного поля проверялась экспериментально.

4. Индикация пучка малой интенсивности на высоких энергиях

При первоначальной наладке режима ускорения крайне важно иметь надежную индикацию, позволяющую следить за относительными изменениями интенсивности, положением и размерами пучка и т.п. Эти наблюдения производились с помощью сцинтилляционных мишеней, расположенных у внутреннего края рабочей области. На рис. 11 дана осциллограмма сигнала с такой мишени от пучка

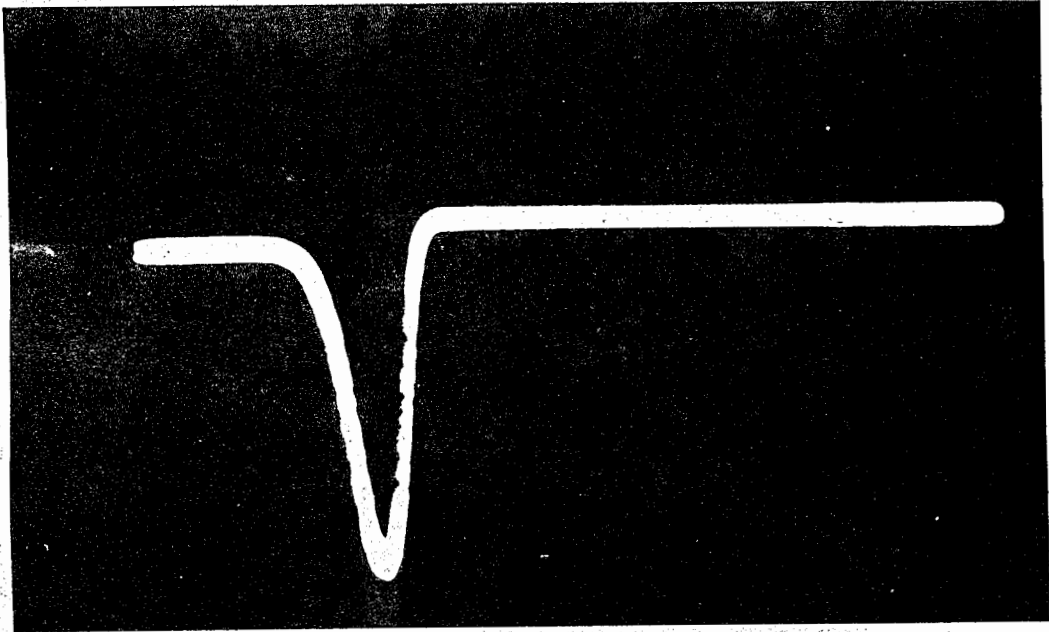


Рис. 11. Осциллограмма сигнала с мишени, расположенной у внутреннего края рабочей области магнита.

частиц, ускоренных до конечной энергии и свернувшихся после выключения высокочастотного напряжения на мишень. Измеряя интервал времени от момента выключения высокочастотного напряжения до появления импульса и длительность импульса, можно определить соответственно радиальное положение пучка в конце ускорения и его радиальный размер. Изменяя вертикальное положение мишени можно определить положение пучка по вертикали и вертикальный размер пучка. Амплитуда регистрируемого сигнала дает представление об интенсивности ускоренного пучка.

Чтобы увеличить чувствительность регистрирующей системы при работах с пучком малой интенсивности на больших энергиях, этот пучок первоначально направлялся на радиатор из тяжелого вещества. В результате ядерных взаимодействий в веществе образуются многочисленные вторичные частицы, в том числе частицы малых энергий, которые более эффективно регистрируются сцинтиллятором. Схема такой мишени приведена на рис. 12. Поскольку в тяжелом веществе при одинаковых геометрических размерах доля частиц, испытавших ядерные взаимодействия, больше, чем в случае легкого вещества, и в

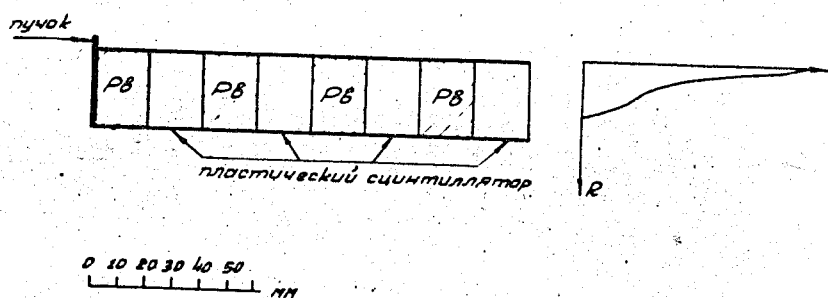


Рис. 12. Схема мишени для индикации на высоких энергиях.

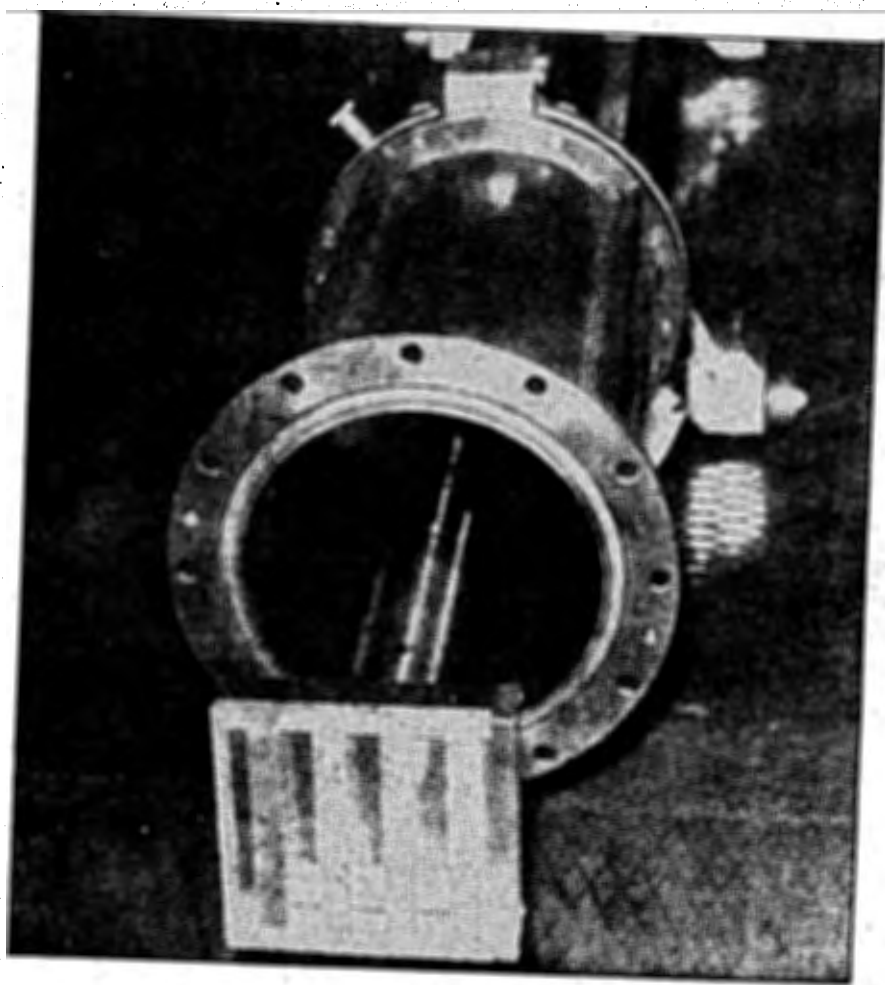


Рис. 13. Мишень для регистрации малоинтенсивных пучков частиц высокой энергии.

каждом акте ядерного взаимодействия образуется большее количество вторичных частиц, в качестве радиатора были использованы бруски свинца, толщиной 2 см в направлении пучка. Суммарная толщина свинца в направлении пучка составляла 8 см.

Доля частиц первичного пучка, испытавших ядерные взаимодействия, определяется соотношением ¹² :

$$\xi = 1 - e^{-\frac{x}{L_c}}$$

где x - толщина вещества в г/см², L_c - средняя длина свободного пробега протона в веществе в г/см².

При больших энергиях протонов для свинца $L_c = 164$ г/см². При суммарной толщине свинца 8 см 43% первичного пучка испытают ядерные взаимодействия. Для того, чтобы эффективно регистрировать вторичные частицы малой энергии, между свинцовыми брусками помещены бруски сцинтиллятора. Так как среди вторичных продуктов ядерных взаимодействий имеется большое количество медленных нейтронов с энергией до 100 Мэв ¹², для регистрации их по протонам отдачи в качестве сцинтиллятора было выбрано водородосодержащее вещество /полистирол с терфинилом/.

Чтобы мишень давала выигрыш величины светового сигнала на каждый падающий протон, необходимо обеспечить прохождение полной толщины мишени первичной частицей. Так как шаг свертывания пучка за оборот в конце ускорения мал / $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ см/, то становится существенным влияние перекосов мишени относительно равновесной орбиты. Для увеличения шага свертывания при попадании пучка на мишень к краю мишени была прикреплена металлическая пластинка /"флажок"/, выступающая на несколько миллиметров за мишень по направлению радиуса в сторону к равновесной орбите /рис. 12/. Чтобы рассеяние первичного пучка во "флажке" было невелико, он изготовлен из алюминия. Сворачивающийся пучок первоначально попадает на "флажок" и теряет в нем энергию ΔE , вследствие этого шаг свертывания увеличивается до величины

$$\Delta z = \frac{R \Delta E}{\beta^2 (1-n) E}$$

где E - полная энергия частицы, n - показатель спада магнитного поля, R - радиус равновесной орбиты, β - отношение скорости частицы к скорости света.

Распределение падающих частиц с энергией 9 Бэв по мишени в направлении радиуса при толщине "флажка" 1,5 мм показано на рис. 12. Толщина "флажка" подбиралась экспериментально. Чтобы надежно перекрыть вертикальный размер пучка, даже в случае искажения средней плоскости магнитного поля /плоскость, где $H_z = 0$ / , размер мишени по высоте взят равным 10 см. Сбор света с мишени осуществлялся при помощи описанной выше оптической системы. Бруски свинца и сцинтиллятора набирались в обойму, внутренняя поверхность которой сделана зеркальной, чтобы отражать свет в сторону оптической системы. Фотография мишени, предназначенной для регистрации малоинтенсивных пучков частиц высокой энергии, дана на рис. 13.

З а к л ю ч е н и е

Описанный метод был разработан в 1954-56 г.г. и успешно применялся в работах по наладке режима инжекции, режима ускорения, в работах по повышению интенсивности ускоренного пучка и т.п. Увеличение интенсивности пучка позволило применить менее чувствительные способы наблюдения, такие как сигнальные электроды¹³, различные модификации цилиндра Фарадея¹⁴ и т.п. В настоящее время система наблюдения приспособлена к условиям эксплуатации синхрофазотрона и дает возможность контролировать параметры пучка, инжектируемого в камеру, захват на первом этапе инжекции, захват в режим ускорения, процесс ускорения пучка и параметры вторичных пучков, выводимых из камеры синхрофазотрона.

Авторы пользуются предоставившейся возможностью, чтобы выразить признательность академику В.И.Векслеру и проф. В.А.Петухову за ценные обсуждения при выполнении этой работы, а также В.Н.Булдаковскому, А.И.Крюкову и М.Д.Ершову, проделавшим большую работу по наладке устройств и схем системы наблюдения за пучком.

Рукопись поступила в издательский отдел

22 июня 1960 года.

Л и т е р а т у р а

1. I. V. Birks. Scintillation counters. London, 1953.
Русский перевод: Дж. Биркс. Сцинтилляционные счетчики, Москва, 1955.
2. Hofstadter, Nucleonics, 6, №5, 70, 1950.
3. Franzen, Pelle, Sherr, Phys. Rev. 79, 742, 1950.
4. Broser und Kallman, Z. f. Naturforsch. 5a, 381, 1950.
5. М.Н.Медведев, Е.Н.Матвеева, Л.Я.Жильцова. ПТЭ, № 1, 55, 1957.
6. И.М.Розман, К.Г.Циммер, Атомная энергия 2, № 1, 54, 1957.
7. М.Н.Медведев, Е.Н.Матвеева, Л.Я.Жильцова. ПТЭ, № 3, 45, 1958.
8. E. Segre. Experimental nuclear physics, Vol. 1, New-York, London 1953.
Русский перевод: Э.Сегре. Экспериментальная ядерная физика, т.1, Москва, 1955.
9. И.М.Розман, К.Г.Циммер, Атомная энергия 2, 1, 70, 1957.
10. С.Л.Мандельштам. Введение в спектральный анализ. Москва-Ленинград 1946, стр.112.
11. P. Hummond. Proc. of IEE 103, part C, №3, 1956.
12. Б.Росси. Частицы больших энергий, Москва 1955 г.
13. F. A. Vodop'yanov, A. A. Kuzmin, S. M. Rubchinskij, V. A. Uvarov CERN, 1959, proceedings, p.470-477.
14. Л.П.Зиновьев, И.Б.Иссинский, К.П.Мызников. Препринт ОИЯИ, 556.