УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

539 107.49

новые приборы и методы измерений

ДЕТЕКТОРЫ ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОНПООПТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ СВЕТА

М. Н. Медведев

ВВЕДЕНИЕ

Прохождение заряженных частиц через сциптиллятор сопровождается световыми вспышками, возникающими вдоль их траекторий. Длительность всиышек определяется свойствами сцинтиллятора и обычно составляет $10^{-5}-10^{-7}$ сск в неорганических монокристаллах и $10^{-8}-10^{-9}$ сек в органических сцинтилляторах. Интенсивность этих вспышек не превышает 10^4-10^6 световых квантов на 1 см пути частицы.

Если скорость частиц больше фазовой скорости света в веществе, то они возбуждают световые вспышки Вавилова — Черенкова длительностью порядка 10⁻¹⁰ сек и интенсивностью 1—200 световых квантов на 1 см пути.

Применение усилителей света позволяет в принципе создать детекторы ядерного излучения, в которых регистрируются на кинопленку не только следы частиц в сцынтилляторах, по и кольца от излучения Вавилова — Черепкова, возбуждеемого одиночными заряженными частицами в радиаторах. Эти детекторы должны обладать непрерывной чувствительностью, высоким временным разрешением и допускать программирование своей работы.

Один из этих детекторов — люминесцентная камера — был предложен в 1952 г. Е. К. Завойским с сотрудниками ¹, ². Выбрав в качестве рабочего объема кристалл CsJ(Tl), авторы сфотографировали на кинопленку следы протонов и медленных µ-мезонов.

За последние годы разработаны электронноонтические усилители света с больними входными фотокатодами и высоким геометрическим разрешением и созданы более эффективные источники световых вспытек, возбуждаемых заряженными частицами. Это позволило создать люминесцентные камеры и камеры Вавилова — Черенкова с рабочими объемами в несколько литров ⁶. Однако геометрическое разрешение детекторов не превышает 8—10 парных штрихов на 1 мм. Это требует дальнейших усовершенствований электроннооптических усилителей света.

В обзоре рассматриваются работы по детекторам ядерного излучения на основе электроннооптических усилителей света, опубликованные за последние 8—9 дет, и приводятся в качестве иллюстраций результаты некоторых псследований, выполненных с этими детекторами.

1. ЭЛЕКТРОННООПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ СВЕТА

Регистрация на кипопленку световых следов частиц в сцинтилляторе и колси от излучения Вавилова — Черенкова возможна только при определенных нараметрах усплителей света. Во-первых, необходимо, чтобы усилители света обладали коэффициентом усиления порядка 10⁷ и геомстрическим разрешением около десяти париых итрихов на 1 мм, т. е. 0,1 мм. Во-вторых, необходимо, чтобы они допускали быстроустановление стационарного режима работы при малых собственных шумах. В-третьих, необходимо, чтобы спектральная чувствительность входного фотокатода усилителя света соответствовала спектральному составу спинтилляционных вспышек и всимиск Вавилова — Черенкова. Этим требованиям более нолно удовлетворяют многокаскадные электроннооптические преобразователи, коокструкция которых описана в работах ^{2,7}, 6³. Принцип работы электроннооптического преобразователя состои в сме системы и люминесцентного экрана — вновь в видимое со спектральным составом, определяемым люминофором, из которого изготовлен экран.

В люминесцентных камерах и детекторах Вавилова — Черенкова электроннооптический преобразователь выполняет роль усилителя яркости оптических изображений следов частиц и колец от излучения Вавилова — Черенкова. Поэтому в обзоре ЭОП называются электроннооптическими усилителями света.

Устройство, принцип работы и характеристики однокаскадных электроннооптических усилителей света описаны в работах ³, ⁸. В люминесцентных камерах и камерах Вавилова — Черенкова однокаскадные усилители света применяются только с большой поверхностью входного фотокатода для преобразования размеров оптических изображений исследуемых объектов. Геометрическое разрешение этих усилителей составляет 4—6 парных штрихов на 1 мм, а коэффициент усиления не превышает 20 ⁶, ⁸, ⁴⁹

§ 1. Устройство и принцип работы многокаскадного электроннооптического усилителя света

Многокаскадный электроннооптический усилитель света представляет собой цилиндрическую колбу, внутри которой размещены усилительные камеры. Устройство усилителей схематически представлено на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Блок-схема многокаскадного электроннооптического усилителя света.

^{1 —} фотокатод; 2 — люминесцентный экран; 3 — пленка алюминия; 4 — люминофор; 5 — стекло или слюда; 6 — соленоид.



Рис. 2. Блок-схема электроннооптического усилителя света со вторичной эмиссией.

 фотокатод; 2 — экран; 3 — пленка окиси алюминия;
 4 — слой алюминия; 5 — материал со вторичной эмиссией (KCl); 6 — люминесцентный экран; 7 — соленоид.

Усилитель, блок-схема которого представлена на рис. 1, состоит из входной и пяти усилительных камер. Входная камера имеет полупрозрачный фотокатод торцевого типа. За фотокатодом следует люминесцентный экран, который нанесен на тонкую прозрачную пленку из стекла или слюды. На другой стороне пленки размещается фотокатод первой усилительной камеры. Аналогично устроены и все остальные усилигельные камеры. Пятая усплительная камера оканчивается люминесцентным экрапом, с когорого фотографируется оптическое изображение исследуемого объекта. Все люминесцентные экраны покрыты тонким слоем алюминия, ибо металлизация значительно повышает светоотдачу экрана и защищает его от щелочных металлов при изгоговлении фотокатодов ⁸

Электрон, вышедшии с входного фотокатода, ускоряется постоянным электрическим полем и фокуспруется аксиальным магнциным полем на экраи входной камеры. Проходя через лючинофор, электрон теряет свою энергию. Часть этой энергии излучается молекулами лючинофора в виде фотонов, которые проходят через прозрачихю иленку и понадают на фотокатод первой усилительной камеры. В результате возникают новые электроны и т. д.

Число фотонов, образованных одним электроном, зависит от эпергии электрона *E*, толщины экрана и эпергегического выхода люминофора є. Зная квантовыя выход фотокатода у усплителя и эпергию фотонов *hv*, излучаемых люминофором, можно опреселить коэффициент успления *W* одной камеры из выражения

$$M = \frac{\eta \epsilon E}{h_{\rm V}} \quad . \tag{1}$$

Так, например, один электрои, ускоренный до 15 10^3 зв, создает в люминофоре, обладающем энергетическим выходом ~10%, до 500 фотонов с энергиен 3 зв Это означает, что при квантовом выходе фотокатода порядка 10% коэффициент усиления однон камеры может составлять около 50.

Ускорение электронов в камерах до более высоких энергия, по-видимому, не чмеет смысла, ибо для их поглощения потребуются более толстые экраны. Увеличение полцины экранов приведет к ухудшению прозрачности люмпнофора для собственного излучения и, следовательно, к снижению коэффициента усиления. Кроме того, увеличение толщины акранов приведег к ухудшению геометрического разрешения усилителя света, камеры которого соединены друг с другом посредством оптического контакта.

Электроннооптические усилители света, описанные в работах Е. К. Завоиского с сотрудниками^{2,9} и других авторов ¹⁰, позволяют регистрировать на кинопленку световую вспышку от одного фотоэлектрона, эмиттированного с входного фотокатода. Геометрическое разрешение таких усилителей составляет 0,1 мм, т. е. один электрон, эмиттированный входным фотокатодом, возбуждает на выходном экране усилителя светящуюся точку днаметром 0,1 мм⁹. Подобные усилители света, но только с тремя усилительными камерами описаны в работе¹¹

На рпс. 2 слематически представлен электроннооптический усилитель света со вторичной эмиссиеи. Он состоит из шести усилительных камер. Первая камера имеет полупрозрачный фотокатод торцевого типа, за которым следуют иять экранов. Выходная камера усилителя оканчивается люминесцентным экраном.

Электрон, вышедшии с фотокатода, ускоряется электрическим полем и фокусируется аксиальным магнитным полем на экран первой усилительной камеры. С первого экрана выходят вторичные электроны, которые ускоряются и попадают на второй экран, и т. д. В конечной камере вторичные электроны ускоряются и фокусируются на люминесцентный экран, с которого и фотографируется оптическое изображение исследуемого объекта.

В усплителе применены экраны, обладающие вторичной эмиссией. Экран состоит из пленки окиси алюминия толщиной 400 Å, на которую наносятся проводящий слои из алюминия и слои из КСІ толщиной 400 Å. Коэффициент вторичной эмиссии КСІ зависит от энергип первичных электронов. Так, например, для электронов с энергиен 5 10³ эв его значение, согласно измерениям некоторых авторов ¹², ¹³, близко к 5. Так что общии коэффициент усиления электронноонтического усилителя света со вторичной эмиссиен не превышаег (1 — 2) 10⁵? Однако эти значения коэффициента усиления недостаточны для регистрации на кинопленку световой вспышки, возбуждаемой одним электроном, выходящим с входного фотокатода

Геометричесьое разрешение в усилителях данного типа определяется в основном скоростью электронов и составляет около 0,07 им при напряженности электрического поля 40³ в/см и фокуспрующем магнитном поле 200-.300 в

Электроиноонтические усилители света, применяемые в детекторах ядерного излучения, изготовляются, как правило, с сурьмяно-цезиевым или сурьмяно-натриево калиево-цезиевым входными фогокато (ами Для иллюстрации на рис 3 приведены кривые относительной спектральной чувствительности некоторых фотокатодов.

Наибольшен чувствительностью обладает многощелочной фотокатод Его квантовый выход в области максимальной чувствительности составляет около 20%, а у некогорых образцов значительно превосходит это значение ⁸ Темновой ток мультищелоч ного фотокатода, несмотря на сравнительно большую чувствительность в красной области, не превышает темнового тока от сурьмяно цезиевого фотокатода.

10 УФИ, т. 90, выл 1

Квантовый выход сурьмяно-цезиевого фотокатода значительно ниже квантового выхода мультищелочного фотокатода, а спектральная чувствительность располагается в области от 3000 Å до 6000 Å. Темновой ток сурьмяно-цезиевого фотокатода слабо зависит от температуры. Поэтому усилительные камеры многокаскадных электронно-



Рис. 3. Кривые относительной спектральной чувствительности некоторых фотокатодов.

многощелочной катод; 2 — сурьмяно-цезиевый катод;
 3 — кислородно-цезиевый катод.

оптических усилителей света в большинстве случаев изготовляются с сурьмяно-цезиевыми фотокатодами⁸.

Выходные экраны электроннооптических усилителей света изготовляются в основном из люминофоров ZnS(Ag) или ZnS(Cu), геометрическое разрешение которых составляет около 0,05 мм.

§ 2. Собственные шумы электроннооптических усилителей света

Многокаскадный электроннооптический усилитель позволяет регистрировать на кинопленку световую вспышку от одного электрона, выходящего с входного фотокатода. Это означает, что пороговая интенсивность световой вспышки для регистрации на кинопленку определяется в основном квантовым выходом вход-

ного фотокатода усилителя. Высокий коэффициент усиления приводит к неизбежным помехам — собственным шумам усилителя, которые проявляются в виде светящихся точек на выходном экране усилителя света ², ¹⁰, ¹⁹.

Собственные шумы усилителя обусловлены темновыми электронами, появление которых связано как с термо- и автоэлектронной эмиссией с фотокатодов, так и с ионной и оптической обратной связью. Основной вклад в число темновых электронов вносит термоэлектронная эмиссия с фотокатодов.

Количество термоэлектронов быстро растет с температурой, и их число можно определить из выражения

$$m = AN^{1/2}T^{5/4}e^{-\varphi_0/RT},\tag{2}$$

где A — постоянная, N — концентрация атомов примеси, φ_0 — работа выхода, T — температура и k — постоянная Больцмана. Так, например, с квадратного сантиметра поверхности сурьмяно-цезиевого фотокатода при комнатной температуре вырывается до 10^4 — 10^5 электронов/сек ¹⁴.

Автоэлектронная эмиссия становится заметной для поверхностей с малой работой выхода при напряженности электрического поля порядка 10⁵ s/cm¹⁵. Поля с такой напряженностью могут возникать в усилительных камерах в результате неоднородностей на поверхностях фотокатодов¹⁶.

При автоэлектронной эмиссии электроны вырываются не только с неоднородностей фотокатодов, но и с отдельных участков подложки фотокатодов, активированных цезием ¹⁷, и стенок колбы ¹⁸. Поэтому автоэлектронная эмиссия может вносить немалую долю в общее число темновых электронов.

В некоторых образцах усилителей света наблюдается расплывчатое светлое пятно в центре выходного экрана. Природа светлого пятна, по-видимому, связана с бомбардировкой фотокатодов ионами, которые выбивают целые группы вторичных электронов. Эти электроны, сфокуспрованные магнитным полем на люминесцентные экраны, и вызывают появление светлого пятна на выходном экране усилителя света ⁸.

Количественные исследования собственных шумов в многокаскадном электропнооптическом усилителе света с сурьмяно-цезиевым фотокатодом проведены в работе ⁹.

При визуальном наблюдении было установлено, что световые вспышки на выходном экране усилителя, вызываемые темновыми электронами с входного фотокатода, различаются не только размерами, но и яркостью. Слабые световые вспышки размерами порядка 10⁻⁴ см² вызывались, по-видимому, отдельными электронами, а более яркие — целыми группами электронов.

Для выяснения характера многоэлектронной компоненты собственных шумов и для определения числа электронов в группе авторы применили расфокусировку электронного изображения во входной камере усплителя. В результате яркая световая вспышка распадалась на отдельные светящиеся точки примерно с одинаковой яркостью. Это позволило определить число электронов в группе, которое менялось от 2—3 до 15—20 в зависимости от напряжения на входной камере усплителя.

В результате анализа экспериментальных данных авторы делают вывод, что при компатной температуре и разности потенциалов на входной камере 12 ке сурьмяноцезиевый фотокатод эмиттирует около 20 отдельных электронов с 1 см² в 1 сек и около 500 локальных электронных групп. Зависимость числа электронных групи N от разности потенциалов на входной камере приведена на рис. 4.

Таким образом, в многокаскадном электроннооптическом усилителе света с сурьмяно-цезиевым фотокатодом основной составляющей собственных шумов являетси многоэлектронная компонента. Число электронных групп не зависит от температуры входного фотокатода усилителя и определяется в основном разностью потепциалов на входной камере.

Уменьшая разность потенциалов на входной камере, можно значительно снизить число электронных групп. Но при этом будет падать геометрическое разрешение усилителя света, определяемое в основном входной камерой усилителя и зависящее от напряженности поля у входного фотокатода. Действительно, для обеспечения минимального кружка размытия $\Delta \delta$ в электроннооптическом усилителе света необходимо, чтобы напряженность поля U у фотокатода была не меньше того значения, которое следует из выражения ⁸

$$U = 2L \frac{v_0}{\Delta \delta} , \qquad (3)$$

где *L* — расстояние между фотокатодом п люминесцентным экраном, а *v*₀ — началь-

ная энергия электрона. Из рассмотрения этого выражения следует, что разность потенциалов на входной камере ограничена снизу. Поэтому лучшим методом подавления собственных шумов многокаскадного электроннооптического усилителя света, обусловленных темновыми электронами, является импульсное питание усилительных камер.

§3. Импульсный режим работы усилителя света

Темновые электроны выходят с входного фотокатода усилителя света независимо друг от друга. Это означает, что при длительности световых вспышек $10^{-10} - 10^{-8}$ сек следы частиц в сцинтилляторах и конусы излучения Вавилова — Черенкова можно регистрировать без собственных шумов усилителя, ибо за это время «не успеют» выйти с входного фотокатода ни одиночные электроны, ни электронные группы. Но это условие выполняется только в том случае, если на входную камеру усилителя подавать напряжение одновременно с прохождением частицы через сцинтиллятор или радиатор, т. е. синхронизированно.

Оценки показывают, что синхронизированное питание входной камеры усилителя от сцинтилляционных счетчиков или счетчиков Вавилова — Черенкова ограничивается задержками управляющего сигнала в радиотехнических схемах управления, если длительность световых вспышек в сцинтилляторах меньше 10⁻⁸ сек. Поэтому в работах ¹, ², ⁶, ¹⁰, ¹⁹ предложены схемы синхропизированного импульс-

Поэтому в работах ¹, ², ⁶, ¹⁰, ¹⁹ предложены схемы синхронизированного импульсного питания усилительных камер электроннооптического усплителя света при рабочем состоянии входной камеры. В этом случае оптическое изображение исследуемого объекта проходит через входную камеру и запомпнается на люминесцентном экране на время высвечивания люминофора. Передача оптического изображения с экрана входной камеры на выходной экран усилителя осуществляется при синхронизированном импульсном питании усплительных камер.

Число шумовых световых вспышек на выходном экране усилителя будет определяться в этом случае длительностью импульса. Действительно, из выражения

$$m = N_0 \left(1 - e^{-t/\tau_0} \right), \tag{4}$$

10*



Рис. 4. Зависимость числа электронных групп от разности потепциалов на входпой камере.

в котором через N_0 обозначено число возбужденных молекул люминофора, а через m — число молекул, высветившихся за время t, видно, что для уменьшения числа шумовых световых вспышек на выходном экране усилителя необходимо передавать оптическое изображение объекта с входной камеры на усилительные за интервал времени t, меньший времени высвечивания люминесцентного экрана τ_0 . Это возможно только при условии, что длительность усиливаемого оптического изображения объекта во много



Рис. 5. Блок-схема синхронизированного импульсного питания первой усилительной камеры электроинооптического усилителя света.

Х — объект исследования; О — объектив; ЭОП — электроннооптический усилитель света; ФЭУ — фотоумножитель; БПИ — блок пусковых импульсов; ВИП — высоковольтный источник питания.

раз меньше длительности свечения люминесцентного экрана. Но при импульсном интании камер усилителя света уменьшается как число шумовых световых вспышек на выходном экране усилителя, так и яркость оптического изображения фотографируемого объекта, ибо не полностью используется коэффициент усиления прибора.



Рис. 6. Высокочастотная электроннооптическая развертка искрового разряда в счетчике.

Снимки получены в статическом режиме питания усилительных камер (a) и в импульсном (б).

Это утверждение справедливо для усилителя света, люминесцентные экраны которого обладают равными или близкими временами высвечивания.

Блок-схема синхронизированного импульсного питания первой усилительной камеры электроннооптического усилителя ¹⁹ приведена на рис. 5. В исходном состоянии фотокатод усилителя света заземлен, а на экраны входной 2 и первой усилительной 3 камер подано высокое напряжение положительной полярности. При равенстве

потенциалов на этих экранах входная камера находится в рабочем состоянии, а первая усилительная — закрыта В результате оптическое изображение исследуемого объекта проходит через входную камеру и запоминается на экране входнои камеры на интервал времени, равный времени высвечивания люминофора

Изображение с экрана входнои камеры передается на выходноп экран усилителя свега только при снятши напряжения с экрана вхочной камеры В результате этои операции первая усилительная камера переходит в рабочее состояние, ибо между фотокатодом и экраном этои камеры возникает разность потенциалов, а входная камера закрывается для приема новых событии, так как фотокатод и экран этои камеры нахо (ятся под одинаковыми потенциалами

Снятие напряжения с экрана входной камеры осуществляется управляющим импульсом синхропизированным с исследуемым объектом. Он поступает на вход блока пусковых импульсов, который формирует два сдвинутые во времени импульса. Первый импульс подается на сетку тпратрона I_4 и зажигает его. В результате конденсагор C_4 разряжается на землю и снимает напряжение с экрана входной камеры. Второй пусковой импульс через промежуток времени t после первого по цается на сетку тпратрона I_2 и зажигает его. Конденсатор C_4 заряжается до необходимого потенциала, и усилитель света переходит в исходное состояние

Для излюстрации на рис 6 приведены фотографии высокочастогнои электроннооптической развертки искрового разряда в счетчике ¹⁹ Фотография а) получена при статическом режиме питания усилителя света, а фотография б) — при импульсном питании первой усилительной камеры длительностью 80 10⁻⁶ сск Из фотографий рис 6 визно, что собственные шумы усилителя почти полностью подавлены при импульсном питании первои усилите внои камеры Заметим, что импульсное питание камер электроннооптического уси пителя света используется для программирования работ люминесцентных камер и камер Вавилова — Черенкова

П ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ КАМЕРЫ

При изучении взаимодеиствии частиц больших энергии с нуклонами и ядрами желательно ирименять детекторы, принции деиствия которых позволял бы программировать эти исследования Таким детектором является люмпиесцентная камера состоящая из сциптиллятора, электроинооптического усилителя света и управляющих счетчиков

Выбор сцинтиллятора определяется в основном физической задачей, решаемой с данным детектором В некоторых исследованиях применялась люмпиесцентная камера с однородным рабочим объемом 10, 20 63, 64 В таком детекторе используется ие весь объем сцинтиллятора, а только небольшая часть его, определяемая в основном углом зрешия и фокусным расстоянием объектива

Эффективность оптических систем, проектирующих следы частиц из сцинтиллятора на входнои фотокатод усилитетя света, не превышает нескольких процентов Поэтому при разработке люминесцентных камер особое внимание уделяется вопросу сочленения рабочего объема с входным фотокатодом усилителя света

В работах ^{21, 23} были предложены люминесцентные камеры с литевыми сцинтилляторами.

§ 4. Характеристики некоторых сцинтитлирующих материалов

Основные требования, предъявляемые к сцинтиллирующим материалам, из которых изготовляются рабочие объемы люминесцептных камер, таковы

а) большои световой выход,

б) малая длигельность световои вспышьи,

 в) высокая прозрачность материала сцинтиллятора для собственного палучения;
 г) соответствие сисктрального состава световой всимики со спектральной чувствительностью входного фотокатода усимителя

Характеристики некоторых сцинтиллирующих материалов приведены в табл I

Из данных табл I следует, что однородные рабочие объемы для люминесцентных качер можно изготовлять как из монокристаллов, так и из жидкостных и пластиче ских сцинтилляторов Световои выход этих сцинтилляторов достагочен для образова иля онтического изображения проекции следа частицы на входном фотокатоде усили теля света.

Хорошим материалом для изготовления сцинтиллирующих нитеи является сцин тиллирующая пластмасса, содержащая 2^{0} терфенила + 0,02% РОРОР в волистироле 39

Таблица І

| Наименование сцинтиллятора | Амплитуда импульсов, отн. ед. | Время высвечи- вания, сек | Макси- мум спектра излуче- ния, Å | Содерж. водо- рода, % | Плот- ность, г/см3 |
|--|--|---|---|-----------------------------|---|
| NaJ(Te) ²⁴ CsJ(Te) ²⁵ Антрацен ^{26–28} Стильбен Толан Нафталин + 1% антранило- | $\begin{array}{c}1\\0,75\\0,50\\0,26\\0,25\\0,25\\0,25\end{array}$ | $2,5\cdot10^{-7} \\ 1\cdot10^{-6} \\ 2,7\cdot10^{-8} \\ 8\cdot10^{-9} \\ 7\cdot10^{-9} \\ 2\cdot10^{-8} $ | 4100 белый 4400 4100 3900 4060 | | 3,67 4,5 1,25 1,16 1 1,1 |
| вои кислоты 29 Раствор 3 г/л терфенила + + 100 мл/л РОРОР в то- | 0,20 | 2·10 ⁻⁹ | 4200 | 53 | 0,87 |
| луоле 2% терфенила + 0,02% РОРОР в полистироле ³⁰ , ³¹ | 0,20 | 2·10 ⁻⁹ | 4250 | 50 | 1 |

§ 5. Люминесцентная камера с однородным рабочим объемом

Прохождение заряженной частицы через сцинтиллятор сопровождается образованием светящегося следа, число фотонов в котором зависит от энергии *E*, оставленной частицей в сцинтилляторе, и энергии *E*_d, затрачиваемой на образование одного фотона.



Рис. 7. Схема люминесцентной камеры.

 К — кристалл-сцинтиллятор; О — объектив; І — люминесцентный экран;
 2 — фотокатод; З — соленомл; 4 — диафрагма; 5 — фокусирующий электрод;
 6 — отклоняющие пластины; 7, 8 — импульсный электронный затвор;
 0 — фотоаппарат; ГИ-1 — генератор импульсов этектронный затвора;
 ГИ-2 — генератор импульсов ысокого напряжения; ГИ-3 — генератор импульсов управления фотоаппаратом; В4Г — генератор развертки.

Число светящихся точек *m*, приходящихся на 1 см проекции следа релятивистской частицы, можно определить из выражения

$$m = \frac{\eta \frac{E}{E_{\phi}}}{16n^2} B^2 \frac{K^2}{(1+K)^2} \,. \tag{5}$$

Здесь через η обозначен квантовый выход входного фотокатода усилителя, а через *п* показатель преломления материала сцинтиллятора; *В* п *К* — относительное отверстие и коэффициент увеличения объектива. Проведенные оценки показывают, что это число не превышает 12 и примерно равно числу точек в проекции следа релятивистских частиц, получаемых в пузырьковых камерах.

Люминесцентная камера, описанная в работах ^{1, 2}, состояла из монокристалла CsJ(Tl), многокаскадного электроннооптического усилителя света и фотоаппарата.



Рис. 8. Фотографии следов частиц: а) протонов с E ~ 200 Мав в CsJ (Tl); б) а-частиц с E = 5,2 Мав в CsJ (Tl); в) а-частиц с E = 5,2 Мав в антрацене.

Изображения следов частиц в кристалле проектировались светосильным объективом на входной фотокатод усилителя, который работал в импульсном режиме. Блок-схема камеры приведена на рис. 7.

Заряженная частица, попадающая в кристалл, возбуждала световые вспышки, которые регистрировались двумя фотоумножителями, работавшими на совпадение.

Результирующий импульс после усиления подавался на схему управления импульсных затворов входной и конечной камер усилителя. Длительность импульса на входной камере не превышала 3.10⁻⁶ сек. В результате собственные шумы усилителя полностью подавлялись.

Для иллюстрации на рис. 8 приведены фотографии следов протонов с кинетической энергией $\sim 200~M_{36}$ и α -частиц в кристаллах CsJ(Tl) и антрацена. Так как пробеги α -частиц с $E = 5,2~M_{36}$ не превышают нескольких десятков микрон, то фотографирование следов проводилось через микроскоп с увеличением в 200 раз.

Рассмотрение фотографий рис. 8 показывает, что структура следов в кристалле CsJ(Tl) зависит от энергии, оставленной частицей в сцинтилляторе. В тех случаях, когда частица оставляет в сцинтилляторе всю свою энергию, следы получаются сплошными. С ростом кинетической энергии частицы уменьшаются ее понизационные потери, и следы из сплошных превращаются в дискретные, т. е. состоящие из отдельных светящихся точек. Разрывы в следах обусловлены квантовыми флуктуациями света.

Представляют большой интерес исследования регистрации следов частиц с минимальной ионизацией. Они проводились как в космических лучах, так и в пучках частиц, генерируемых на ускорителях ¹⁰, ²⁰, ³⁵, ⁶³, ⁶⁴.



Рис. 9. Фотографии следов релятивистских частиц в кристалле NaJ(Tl):

а) космической частицы;
 б) π-мезона с импульсом 2 Гэв/с.

В работе ¹⁰ описаны опыты по регистрации следов релятивистских космических частиц. В камере применялся кристалл NaJ(Tl), который с блоком из свинца толщиной 115 г/см² размещался между двух сцинтилляционных счетчиков, выделявших направление космических частиц и работавших на совпадение. Электроннооптический усилитель работал в импульсном режиме. Управление осуществлялось от сцинтиляционных счетчиков. Длительность импульса составляла 10⁻⁴ сек. С выходного экрана усилителя оптические изображения следов частиц фотографировались на кинопленку. Фотография следа релятивистской частицы в кристалле NaJ(Tl) приведена на рис. 9, *а.* В работах ²⁰, ³³⁻³⁵ описана люминесцентная камера, которая работала в пучках

В работах ²⁰, ³³⁻³³ онисана люминесцентная камера, которая работала в пучках л-мезонов с импульсом 2 $\Gamma_{\partial\theta}/c$. Рабочий объем камеры состоял из кристалла NaJ(Tl) размерами 50 × 50 × 100 мм³. Усиление оптических изображений следов частиц осуществлялось песколькими электроннооптическими усилителями света, из которых второй и конечный работали в импульсном режиме. Управление осуществлялось от сцинтилляционных счетчиков. Длительность импульса на втором усилителе составляла (2 ÷ 15) ·10⁻⁶ сек, а на конечном (1 ÷ 15) ·10⁻³ сек. Для иллюстрации на рис. 9, 6 приведены следы от л-мезонов с импульсом 2 $\Gamma_{\partial\theta}/c$.

Рассмотрение фотографий следов частиц, полученных в люминесцентной камере с однородным рабочим объемом, показывает, что детектор обладает удовлетворительным геометрическим разрешением. Но его применение ограничено из-за малых рабочих объемов.

§ 6. Люминесцентная камера с нитевым сцинтиллятором

Рабочий объем люмпнесцентной камеры изготовляется из оптически прозрачных сцинтиллирующих нитей. Нити набираются рядами, причем торцы нитей четных рядов повернуты на 90° относительно торцов нитей нечетных рядов. След частицы в таком сцинтиляторе воспроизводится по свечению торцов нитей, через которые прошла частица. Действительная траектория движения частицы, прошедшей через нитевый сцинтилятор, воспроизводится по двум ортогональным проекциям ⁶, ^{42-48, 65}.

В большинстве случаев нитевый сцинтиллятор применяется в оптическом контакте с входным фотокатодом электроннооптического усилителя света. В результате геометрическая ширина следа определяется диаметром сцинтиллирующих нитей, из которых изготовлен сцинтиллятор. Для получения высокого геометрического разрешения желательно рабочий объем люминесцентной камеры изготовлять из сцинтиллирующих нитей минимально возможного диаметра d₀, который можно оценить из выражения

$$d_0 = \frac{E_{\phi}}{\eta K E} . \tag{6}$$

Здесь E — энергия, теряемая частицей на 1 см иути, а K — доля света, которая достигает торца нити и, следовательно, входного фотокатода усилителя. Для пластмассовых сцинтилляторов $E_{\Phi} \sim 100$ зв ³², а $E \simeq 2 \div 2,5$ Мэв. При $K = \eta = 0,1$ минимальный дпаметр нити не превышает 0,006 мм. Изготовление сцинтиллирующих нитей такого диаметра связано с определенными техническими трудностями, обусловленными свойствами исходного материала ^{22, 23, 36}. В работе ³⁹ описана технология изготовленны сцинтиллирующих нитей дпаметром от 0,3 до 5 мм и длиной 1000—1200 мм. Прозрачные п эластичные нити без воздушных «пузырей» иолучались из сцинтиллирующей пластмассы, содержащей 2% терфенила + 0,02% РОРОР в полистироле, приготовляемой по технологии, описанной в работе ⁴⁰.

Представляет большой интерес вопрос о прозрачности сцинтиллирующих нитей к собственному излучению ³⁹, ⁴¹, ⁴³. В работе ³⁹ изучалась прозрачность нитей, приготовленных из сцинтиллирующей пластмассы, содержащей 2[°] терфенила — 0,02% РОРОР в полистироле. Измерялись амплитуды импульсов на выходе ФЭУ в зависимости от места облучения нити коллимированным иучком ү-лучей Со⁶⁰. Ослабление амплитуд импульсов на длине нити 480 мм составило 35% и не зависело от диаметра нитей. Эти результаты дают основание полагать, что люминесцентную камеру с нитевым сцинтиллятором можно изготовлять с рабочим объемом до кубического метра.

Норог чувствительности люмпнесцентной камеры с нитевым сцинтиллятором, найденный из выражения

$$E_0 = \frac{E_{\Phi}}{\eta K} , \qquad (7)$$

составляет около 10—15 кэв. Эта величина удовлетворительно согласуется со значением 40—60 кэв, полученным из анализа следов релятивистских частиц, зарегистрированных в люминесцентной камере с нитевым сцинтиллятором. Следовательно, в данном детекторе будут регистрироваться и заряженные частицы, пробеги которых меньше диаметра сцинтиллирующих нитей. Столь малый порог чувствительности люминесцентной камеры с нитевым сцинтиллятором делает ее перспективным детектором для изучения упругого рассеяния на малые углы как релятивистских и сильно ионизирующих частиц, так и нейтронов и ү-лучей.

На рис. 10 приведены фотографии следов релятивистских частиц ⁵⁰. Из рассмотрения этих фотографий следует, что геометрическая ширина следов частиц значительно превосходит размеры диаметра сцинтиллирующих нитей. «Размытие» следов частиц в люминесцентной камере с нитевым сцинтиллятором обусловлено, по-видимому, большой толщиной стекла входного фотокатода электроннооптического усилителя света и засветками соседних питей. Последнюю причину можно свести к минимуму, если между рядами сцинтиллирующих нитей прокладывать черную бумагу.



Рис. 10. Фотографии следов релятивистских частиц в люминесцентной камере с нитевым сцинтиллятором.

Шприна следов частиц, получаемых в люминесцентной камере с интевым сцинтиллятором, не ограничивает применение данного детектора для регистрации упругих и неупругих процессов взаимодействия ядерного излучения с веществом ⁶⁶⁻⁷⁰.

§ 7. Некоторые применения люминесцентной камеры с нитевым сцинтиллятором

Люмпнесцентная камера с интевым сцинтиллятором применялась некоторыми исследователями для изучения целого ряда физических задач. Рассмотрим некоторые из них.

а) Определение геометрии пучков заряженных частиц, генерируемых на ускорителях. В работе⁴⁹ описана установка для определения геометрии и состава пучков заряженных частиц с импульсом 735 Мэв/с. генерируемых на ускорителе и прошедших через сепаратор. Она состояла из нитевого сцинтиллятора, электроннооптического усилителя света и телевизионной системы (рис. 11).

Нитевый сциптиллятор диаметром 125 мм и длиной 31 мм изготовлялся из нитей диаметром 0,75 мм. Он находился на оптическом контакте с входным фотокатодом однокаскадного усилителя света. Оптическое изображение конфигурации пучка рассматривалось на экране телевизора.

б) Исследования распада ядер В¹². В работе ⁵⁰ описана люминесцентная камера, в которой нитевый сцинтиллятор одновременно служил мишенью для изучения реакции

$$\mu^- + C_6^{12} \longrightarrow B_5^{12} + \nu. \tag{A}$$

Рабочий объем камеры изготовлялся из сцинтиллирующих нитей диаметром 0,75 мм и длиной 75 мм. Он имел форму цилиндра, оптически разделенного на три части. Сцинтиллятор находился в оптическом контакте с входным фотокатодом электроннооптического усилителя света. Управление работой камеры осуществлялось от сцинтилляционных счетчиков. Блок-схема установки представлена на рис. 12. При обработке 800 фотографий с распадом ядра В $_3^{12}$ было установлено, что время жизни ядра В $_3^{12}$ составляет 27 $\cdot 10^{-3}$ сек. Для иллюстрации на рис. 13 приведены



Рис. 11. Блок-схема установки для определения геометрии пучков частиц.

1 — нитевый сцинтиллятор; 2 — однокаскадный усилитель; 3 — линзы; 4 — усилитель света; 5 — телевизионная система.

фотографии распада и-мезона и ядра B¹². Точки распада и -мезона и ядра B¹² отмечены на фотографиях двумя реперными точками по вертикали.



Рис. 12. Блок-схема управления люминесцентной камеры. 1, 2, 6 — сцинтилляционные счетчики; 3, 4, 5 — нитевые сцинтилляторы, которые находились на оптическом контакте с усилителем света и фотоумножителями.

Изменив конструкцию рабочего объема камеры, авторы провели изучение схемы распада л⁺-мезона:

$$\pi^+ \to \pi^0 + e^+ + \nu. \tag{(6)}$$

в) Измерение углового распределения заряженных частиц в заданном телесном угле. В работе ⁵¹ авторы описали метод



Рис. 13. Фотографии распада: *а* µ-мезона; б) ядра B_5^{12} .

измерения углового распределения заряженных частиц в заданном телесном угле с помощью люминесцентной камеры с нитевым сцинтиллятором. Идея метода сводится

154

к следующему: если направление движения частицы совпадает с выбранным направлением нитевого сцинтиллятора, то ее прохождение через сцинтиллирующую нить зарегистрируется в виде одной светящейся точки.

Если частица проходит через нитевый сцинтиллятор под углом α, то число световых вспышек будет соответствовать числу нитей, через которые прошла частица. Измерив проекцию следа, легко находится угол α , под которым частица прошла через нитевый сцинтиллятор, т е.

$$tg a = \frac{b}{l} , \qquad (8)$$

где b — проекция следа, а l — длина нитевого сцинтиллятора.

Метод проверялся экспериментально на установке, состоявшей из нитевого сцинтиллятора, электроннооптического усилителя, фотоаппарата и сцинтилляционного счетчика.

Питевый сцинтиллятор собирался из нитей диаметром 0,5 мм и длиной 50 мм. Конструкция сцинтиллятора исключала попадание света из данной нити в соседние. Нитевый сцинтиллятор располагался в вертикальной плоскости. Одна илоскость торцов питей с помощью зеркала и линз проектировалась на фотокатод усилителя, а вторая — осматривалась фотокатодом ФЭУ. В сцинтилляционном счетчике использовался пластический сцинтиллятор диаметром 40 мм.

В данных опытах электропнооптический усилитель работал в импульсном режиме и программное управление осуществлялось от сцинтилляционных счетчиков, работавших на совпадение.

Полученные экспериментальные данные подтвердили правильность предлагаемого метода.

III. КАМЕРА ВАВИЛОВА – ЧЕРЕНКОВА

При исследованиях, проводимых в пучках частиц, генерируемых ускорителями, часто возникают задачи по регистрации частиц с определенной скоростью. Из всех типов детекторов только угловые счетчики Вавилова — Черенкова позволяют непосредственно измерять скорости частиц.

Для определения скоростей и направлений движения частиц в широкой области энергий предложен детектор, состоящий из радиатора, электроннооптического усили-теля света, фотоаппарата и управляющих счетчиков ^{52, 53, 58}. В основу этого детектора положено явление Вавилова — Черенкова, и поэтому предлагается назвать этот детектор камерой Вавилова — Черенкова.

§ 8. Описание метода

Пусть заряженная частица движется по прямой АВ через камеру Вавилова -Черенкова, блок-схема которой приведена на рис. 14. Если скорость частицы вс больше фазовой скорости света в материале

раднатора u = c/n (v), то в нем возникает излучение Вавилова - Черен-Характерной особенностью кова. этого излучения является резко выраженная направленность. Согласно теории И. Е. Тамма и И. М. Франка 54, направление излучения составляет с направлением движения излучающей частицы угол 0, определяемый соотношением

$$\cos\theta = \frac{1}{n\beta} , \qquad (9)$$

где $\beta c = r$ — скорость частицы, а n -- показатель преломления материала радиатора.

Излучение Вавилова - Черенкова, проходя через оптическую систему, собпрается в фокальной пло-скости в кольцо, радиус r которого связан с углом излучения выражением 0)

$$r = f \operatorname{tg} \theta, \qquad (1)$$



Рис. 14. Блок-схема камеры Вавилова - Черепкова.

1 — радватор; 2 — зеркало; 3 — линза; 4 — электроннооптический усилитель света.

где f - фокусное расстояние оптической системы. Это кольцо можно рассматривать как «изображение» частицы, т. е. частица как источник света эквивалентна бесконечно удаленному кольцу.

Измерив радиус кольца от излучения Вавилова — Черенкова, находим угол Ф и, следовательно, скорость частицы. Разрешение частиц по скоростям в камере Вавилова — Черенкова определяется точностью измерения радиуса кольца и размытием угла излучения θ :

$$\frac{d\beta}{\beta} = \frac{r^2}{r^2 + j^2} \frac{dr}{r} , \qquad (11)$$

и

$$\frac{d\beta}{\beta} = \frac{r}{f} \, d\theta. \tag{12}$$

Геометрическое разрешение многокаскадных электроннооптических усилителей света позволяет измерять радиус кольца с точностью до 0,1 мм. Это обеспечивает разрешение частиц по скоростям до $d\beta/\beta \sim 10^{-5}$. Размытие угла излучения Вавилова — Черенкова обусловлено потерями энергии

Размытие угла излучения Вавилова — Черенкова обусловлено потерями энергии частицей в радиаторе, эффектами дифракции и многократного рассеяния, а также дисперсией материала радиатора. Наибольший вклад в размытие угла излучения вносит последний эффект ⁵⁵⁻⁵⁷.

Зависимость скорости частицы от дисперсии материала радиатора имеет вид

$$\frac{d\beta}{\beta} = \frac{dn}{n} \,. \tag{13}$$

Проведенные оценки показывают, что $d\beta/\beta$ составляет около 10^{-5} для газовых радиаторов и $(3 \div 5) \cdot 10^{-3}$ для радиаторов из конденсированных сред.

§ 9. Материалы для радиатора и размеры рабочего объема

Измерения скоростей частиц по раднусу колец от излучения Вавилова — Черенкова налагают определенные требования на материал радиатора и его рабочую длину: во-первых, чтобы материал радиатора был проврачным как для видимого света, так и ближнего ультрафиолета; во-вторых, чтобы он обладал наименьшей дисперсией и был оптически однородным; в-третьих, чтобы он имел малую илотность, чтобы свести к минимуму понизационные потери, и низкий атомный номер для уменьшения углового размытия конуса излучения, обусловленного многократным рассеянием.

Более полно этим требованиям удовлетворяют газы. Но из-за малых значений показателей преломления интенсивность излучения Вавилова — Черенкова не превышает 0,5—1 фотона на 1 см пути частицы. Применяя в рабочем объеме сжатые газы, можно интенсивность излучения довести до 10—15 фотонов на 1 см пути частицы. Но при этом будет увеличиваться и дисперсия материала. В табл. П приведены значения показателей преломления некоторых газов при различных давлениях.

Таблица II

| | Показатель преломления | | | | | |
|---|--|------------------------------|--|---|--|--|
| Вещество | при 1 атм, 0° С | при 14 атм, 25° С | при критических условиях | в жидком состоянии | | |
| Водород Гелий Азот Воздух Углекислый газ | $\begin{array}{c} 1,000138\\ 1,000036\\ 1,000296\\ 1,0003\\ 1,000415\end{array}$ | 1,00046 1,00381 1,0060 | 1,0264, 25° C, P = 63,5 am.w | 1,097 – 253° C 1,0206 – 4,22° K 1,0269 – 2,26° K 1,205 – 190° C – | | |
| Этан | 1,0007 | 1,0099 | 1,0263, 25° C, $P = 37.3 \ amm$ | | | |
| Пропан | 1,001 | | 1,009, 22° C, | 1.19-1,23 | | |
| Фреон 13-В-1 | 1,000864 | 1,0153 | $P = 9 \ am_M$ 1,0153 42° C, $P = 14,3 \ am_M$ | | | |
| Этиловыи эфир | 1,00152 | | 34.6° C, $P=1$ amm | | | |
| Пентан | 1,00171 | 4.00000 | | - | | |
| Аргон Метан | 1,000281 | 1,00360 | | | | |

Из данных табл. Иследует, что напболее подходящим материалом для раднатора является пропан или пентан. Действительно, значение показателя преломдения n = 1.01 можно получить при давлении газа 10-12 амм.

Из твердых и жидких диэлектриков в некоторой степени удовлетворяют этим требованиям дистиллированиая вода и оргстекло. Действительно, вода, показатель преломления которой n = 1,334, обладает хорошей прозрачностью для видимого света и ближнего ультрафиолета и содержит до 70% водорода. А изменение показателя преломления в области максимальной спектральной чувствительности сурьмяно-цезпевого фотокатода не превышает 4 10^{-3} . Опти-

фотокатода не превышает 4-10 °. Онтические характеристики оргстекла мало отдичаются от оптических характеристик листиллированной воды,

Регистрация кольца от излучения Вавилова — Черенкова одиночной частицы на кинопленку возможна только при определенной интенсивности этого излучения. Число фотоэлектронов m_e от излучения Вавилова — Черенкова, возбуждаемого заряженной частицей на 4 см нути в радиаторе, можно определить из выражения ⁵⁷

$$\frac{dm_e}{dL} = \frac{2\pi}{137} \, \mathrm{sy}\left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right) \int_{c}^{c} S(\lambda) \, \frac{d\lambda}{\lambda^2} \, , \qquad (14)$$

в котором через ξ обозначена эффективность собирания света на входной фотокатод усилителя света, а через η и $S(\lambda)$ — квантовый выход фотокатода и его относительная спектральная характеристика соответственно.

Если предположить, что электроннооптический усилитель света позволяет регистрировать на киноиленку световую вспышку от одного фотоэлектрона, то в этом случае числу фотоэлектронов m_e будут соответствовать m_e светяцихся точек кольца от излучения



Рис. 15. Зависимость угла излучения Вавилова — Черепкова и длины радиатора от nß.

Длина радиатора рассчитана для формирования кольца из 32 светящихся точек.

светящихся точек кольца от излучения Вавилова — Черенкова. Так, например, в радиаторе, показатель преломления которого n = 1,006, заряженная частица с $\beta = 0,999$ на 1 см пути создает примерно 0,32 светящихся точек. Это значение получено ири условии, что $\xi = 07$, п $\eta = 0,1$, а $\int S(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda^2} = 1,03 \cdot 10^4$ в области длин воли λ от 3000 до 6000 Å. При этих

иредноложениях проведены расчеты длины радиатора в зависимости от $n\beta$ для формирования кольца от излучения Вавилова — Черенкова из 32 светящихся точек. Результаты представлены на рис. 15, на котором также приведены значения угла излучения θ в функции $n\beta$ ⁵³. Расчетные кривые рис. 15 позволяют выбрать не только длину, но и показатель преломления материала, обеспечивающие регистрацию кольца от излучения Вавилова — Черенкова на кинопленку.



В настоящее время опубликованы работы, в которых описаны камеры Вавилова — Черенкова для регистрации колец от излучения Вавилова — Черенкова одпиочных релятивистских частиц. Рассмотрим некоторые из них.

В работах ⁵⁹, ⁶⁰ описана камера для регистрации колец от излучения Вавилова — Черенкова релятивистских космических частии. Радпатор камеры изготовлялся из оргстекла. Он имел форму цилиндра днаметром 30 мм и длиной 150 мм, который оканчивался конусом с линзой. Угол конуса не превышал 24°. Конус радиатора имел цилиндрическую выемку днаметром 30 мм и глубиной 45 мм. Поверхность выемки нокрывалась черным лаком. В выемке размещался интевый сцинтиллятор, изготовленный из сцинтиллирующих нитей диаметром 0,5 мм и длиной 50 мм. Иаправление нитей совпадало с наиравлением оси радиатора.

Электроннооптический усплитель света работал в импульсном режиме. Управление осуществлялось от сцинтилляционных счетчиков, которые выделяли направление

М. Н. МЕДВЕДЕВ

космических частиц, проходящих через радиатор и нитевый сцинтиллятор. На рис. 16 приведены две фотографии колец от излучения Вавилова — Черенкова одиночных релятивистских частиц. Светящаяся точка в центре кольца соответствует прохождению частицы через нитевый сцинтиллятор. Кольца формируются 12—15 светящимися точками.



Рис. 16. Фотографии колец от излучения Вавилова — Черенкова одиночных релятивистских частиц.

 а) Радиатор с нитевым сцинтиллятором. Точка в центре кольца соответствует прохождению частицы через нитевый сцинтиллятор; вторая точка — фон; б) цилиндрический радиатор со сферической линзой.

В работе ⁶¹ описана камера Вавилова — Черенкова для определения скорости л-мезонов с импульсом 820 *Мэв/с*. В камере применялся конический радиатор из оргстекла длиной 48 *мм*. Угловой раствор конуса составлял 19°.



Рис. 17. Фотографии колец от излучения Вавилова — Черенкова л-мезонов с импульсом 820 Мэв/с:

а) от одиночного п-мезона; б) от двух п-мезонов.

Световые лучи от вспышек Вавилова — Черенкова, возбуждаемые л-мезонами, выходили из раднатора под углом 14° и собирались онтической системой на входной фотокатод усилителя света, который работал в импульсном режиме. Управление осуществлялось от двух сцинтилляционных счетчиков, работавших на совпадение. На рис. 17 приведены фотографии колец от излучения Вавилова — Черенкова л-мезонов с $p = 820 M_{\partial e/c}$. Кольцо состоит из 5—6 светящихся точек. Когда через радиатор проходили два л-мезона, число точек в кольце увеличивалось в два раза (рис. 17, 6). Малое число точек в кольце авторы объясняют плохой эффективностью оптической системы ($\xi \sim 20\%$).

Камера Вавилова — Черенкова с газовым радиатором описана в работе ⁶². Материалом для радиатора служил фреон-13, показатель преломления которого при давлении 18 *атм* составлял 1,021. Газ находился в сосуде диаметром 90 *мм* и длиной 850 *мм*.

Световые лучи от вспышек Вавилова — Черенкова, возбуждаемых л-мезонами с p = 700 Mae/c, после отражения от зеркала, установленного под углом 45° к оси радиатора, проходили через окно и собирались системой линз в кольцо диаметром 16 мм на входном фотокатоде усилителя света.

Усилители света работали в импульсном режиме. Управление осуществлялось от двух сцинтилляционных счетчиков, которые работали на совпадение.

На рис. 18 приведены фотографии колец от излучения Вавилова — Черенкова л-мезонов с импульсом 700 *Мэв/с*. При просмотре фотографий наблюдаются большие



Рис. 18. Фотографии колец от излучения Вавилова — Черенкова одиночных л-мезонов с импульсом 700 Мав/с в газовом радиаторе.

флуктуации как радиусов колец, так и числа светящихся точек и их размеров. Этн флуктуации авторы объясняют большим разбросом импульсов л-мезонов в пучке и эффектами ионизационных потерь и многократного рассеяния. Однако основная причина — это статистические флуктуации малого числа светящихся точек, формирующих кольцо.

Регистрация колец на кинопленку делает особенно перспективным применение камеры Вавилова — Черенкова для изучения упругого рассеяния частиц больших энергий на малые углы, ибо разрешение частиц по углам в камере может составлять (1 ÷ 5) ·10⁻⁴ рад и не зависит от угловой расходимости пучка частиц.

Объединенный институт ядерных исследований

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Е. К. Завойский, М. М. Бутслов, А. Г. Плахов, Г. Е. Смол-кин, ДАН СССР 100, 241 (1955).
 Е. К. Завойский, М. М. Бутслов, А. Г. Плахов, Г. Е. Смол-кин, Атомная энергия, № 4, 35 (1956).
 Е. С. К. Смол-кин, Атомная энергия, № 4, 35 (1956).
- F. Eckart, Ann. Phys. 14, 1 (1954).
 J. A. Jenkins and R. A. Chippedale, Brit. Inst. Radio Enghg. 11 (11), 55 (1951).

- М. И. Ванюков, УФН 60 (2), 295 (1956).
 Ю. А. Акимов, М. М. Бутслов, О. В. Савченко, Л. М. Сороко, Атомная энергия 12, 413 (1962).
- 7. J. D. M c L e e, Proc. of the Symp. on Nucl. Inst., Harwell, September 1961.
- 8. П. В. Щеглов, Электронная телескопия, Физматгиз, 1963.
- 9. Е. К. Завойский, М. М. Бутслов, Г. Е. Смолкин, ДАН СССР 111, 996 (1956).
- 10. Б. А. Демидов, С. Д. Фанченко, ЖЭТФ **3**9 (7), 64 (1960). 11. R. G. Stoudenheimer, J. M. Moor and H. L. Palmer, IRE Trans.
- Nucl. Sci., No. 2-3, 136 (1960).
 12. W. L. Wilcock, D. L. Einberson and B. Weekley, IRE Trans. Nucl. Sci., No. 2-3, 126 (1960).

- А. К. 1950, 120 (1950).
 А. Е. А. n. d. e. r.s. on, I. R.E. Trans. Nucl. Sci., No. 2-3, 133 (1960).
 R. E. n.g.strom, J. Opt. Soc. Amer. 37, (6), 420 (1947).
 Б. Т. Б.режнев, ЖЭТФ 17, 2 (1947).
 (1. И. Л.УКИРСКИЙ, ИЗВ. АН СССР, сер. физ., 10, 3 (1946).
- 17. S F. Essig, Advances Electronics and Electron Phys. 12, 73 (1960).

- 21. G. T. Reynold's and P. E. Condon, Rev. Sci. Inst. 28, 1098 (1957).
- 22. G. T. Reynolds, Nucleonics, No. 6, 60 (1958). 23. О. В. Савченко, ПТЭ 4, 142 (1959).
- 24. Д. Биркс, Сцинтилляционные счетчики. М., ИЛ, 1955.

- 21. J. D K P K C, Chamman and Control and Con
- 29. Г.С.Беликова, Л.М.Беляев, Х.В.Протопопов, Сцинтилляторы и сцинтилляционные материалы, М., 1960.
- 30. М. Н. Медведев, Е. Н. Матвеева, Л. Я. Жильцова, ПТЭ, № 1, 55 (1957).
- 31. Е. Н. Матвеева, М. Н. Медведев, М. Д. Шафранов, Изв. АН СССР, сер. физ., 13 (1), 108 (1959).

- 32. Е. А. Андреещев, И. М. Розман, Оптика и спектроскопия 5 (1), 39 (1958).
 33. М. L. Perl. and L. W. Jones, Phys. Rev. Letts. 2, 116 (1959).
 34. L. W. Jones and M. L. Perl, Conference on High Energy Accel. and Sjust. CERN, 561 (1959).
- 35. L. W. J on ès and M. L. Perl, Nucl. Sjust. Methods 10, 348 (1961).

- L. W. J о н е s анd М. L. Регі, Nucl. Sjust. Methods 10, 348 (1961).
 B. Г. К о к о у л и н, ПТЭ 4, 183 (1963).
 P. A. Т о v е, Rev. Sci. Inst. 27, 143 (1956).
 R. M. W е i n s t е i n and H. V. В г а d t, Rev. Sci. Inst. 30, 206 (1959).
 A. С. И с а е в, М. Н. М е д в е д е в, В. И. П р о х о р о в, Сцинтилляторы и сцинтилляционные материалы, Труды конференции, Харьков, 1963.
 М. М. К о т о н, Ю. П. П а н о в, А. Н. П и с а р е в с к и й, Т. В. Т и м о ф е-о р. ПТЭ 4, 40 (1957).
- ПТЭ 1, 49 (1957). ева,
- 41. R. J. Potter and R. E. Hopkins, IRE Trans. Nucl. Sci., No. 2-3 (1960). 42. G. T. Reynolds, R. Giaconni and D. Scarl, Rev. Sci. Inst. 30, 497 (1959).
- 43. K. Lande, A. K. Mann, M. M. Schlacter, D. M. Skyrme and H. U to, Rev. Sci. Inst. 30, 486 (1959).

- 44. L. W. Jones and M. L. Perl, Rev. Sci. Inst. 29, 441 (1958).
 45. R. J. Potter and R. E. Hopkins, J. Opt. Soc. Amer. 49, 1128 (1959).
 46. K. Lande, A. K. Mann, K. Reibel and D. H. White, IRE Trans. Nucl. Sci., No. 2-3, 121 (1960).
- 47. G. T. Reynolds, IRE Trans. Nucl. Sci., No. 2-3, 115 (1960). 48. G. T. Reynolds, R. A. Swanson and D. B. Scarl, Rev. Sci. Inst. 31, 101 (1960).
- (1300).
 J. R. Waters, G. T. Reynolds, D. B. Scarl and R. A. Zdanis, Nucl. Inst. Methods 17, 44 (1962).
 G. T. Reynolds, D. B. Scarl, R. A. Swanson, J. R. Waters and R. A. Zdanis, Proc. Symp. Nucl. Inst., Harwell, September 1961.
 M. M. Butslov, M. N. Medvedev and V. M. Sheshunov, Nucl. Inst. Methods 20, 242 (1962).
- Methods 20, 242 (1963). 52. A. Roberts, Rev. Sci. Inst. 31, 579 (1960)

- 53. A. Roberts, Nucl. Inst. Methods 9, 55 (1960). 54. И. Е. Тамм, И. М. Франк, ДАН СССР 14, 109 (1937). 55. К. G. Dedrick, Phys. Rev. 87, 891 (1952).

- 56. П. А. Черенков, ДАН СССР 20, 651 (1938).

- ло, В. М. Шешунов, Атомная энергия 12, 412 (1962).
 60. М. М. в utslov, М. N. Medvedev, J. V. Chuvilo and V. M. Sheshunov, Nucl. Inst. Methods 20, 263 (1963).
 61. S. K. Roultney, G. T. Reynolds and J. R. Waters, Rev. Sci. Inst. 20, 577 (1962).
- 33, 574 (1962).
 62. D. Binnie, M. R. Jane, J. A. Newth, D. C. Potter and J. Walters, Nucl. Inst. Methods 21, 81 (1963).
 63. O. Gildemeister and R. Giese, Nucl. Inst. Methods 20, 233 (1963).
 64. D. Binnie, M. R. Lane, J. A. Newth, D. C. Potter and I. Walters, Nucl. Inst. Methods 20, 243 (1963).
- 64. D. Binnie, M. R. Jane, J. A. Newth, D. C. Potter and J. Walters, Nucl. Inst. Methods 20, 221 (1963).
 65. K. Lande, A. K. Mann and D. H. White, Nucl. Inst. Methods 20, 245
- (1963).
 66. J. M. Dobs, K. Lande, A. K. Mann, K. Reible, F. J. Schinlli, H. Uto, D. H. White and K. K. Young, Phys. Rev. Letts. 8, 295 (1962).
 67. International Conference on High Energy Accel. and Sjust., Geneva, 1959.

- IRE Trans. Nucl. Sci., No. 5, 9, 3 (1962).
 Proc. of the Sympos. on Nucl. Instr., Harwell, September 1961.
- 70. Instrumentation for High Energy Physics, Nucl. Inst. Methods 20 (1963).