

СЗ44.14

В-18

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



647/2-76

~~25/11-76~~

P13 - 9315

Г.Л.Варденга, В.Д.Володин, Н.С.Глаголева,
П.С.Кузнецов, Ю.Р.Лукстиныш, А.Т.Матюшин,
В.Т.Матюшин, М.Г.Мещеряков,
Э.О.Оконов, С.А.Хорозов

ДВУХМЕТРОВАЯ СТРИМЕРНАЯ КАМЕРА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ
РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ.
РЕЗУЛЬТАТЫ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

1975

P13 - 9315

**Г.Л.Варденга, В.Д.Володин, Н.С.Глаголева,
П.С.Кузнецов, Ю.Р.Лукстиныш, А.Г.Матюшин,
В.Т.Матюшин, М.Г.Мещеряков,
Э.О.Оконов, С.А.Хорозов**

**ДВУХМЕТРОВАЯ СТРИМЕРНАЯ КАМЕРА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ
РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ.
РЕЗУЛЬТАТЫ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Как трековый детектор ионизирующих частиц стримерная камера отличается изотропностью регистрации в задаваемые короткие интервалы времени в сочетании с высокой точностью локализации следов. Благодаря этим специфическим свойствам, стримерные камеры в последние годы нашли широкое применение в разнообразных физических исследованиях. /См. краткие характеристики в 1,2/ /.

Ниже описывается двухметровая стримерная камера, предназначенная для исследований в области релятивистской ядерной физики, и приводятся результаты ее стендовых испытаний, предпринятых с целью выбора оптимальных условий регистрации следов частиц высоких энергий и изучения факторов, определяющих величину световых выходов от следов и способность камеры с зазорами 30 см к изотропной регистрации частиц. Такие испытания ранее были проведены с камерой, имеющей рабочие зазоры примерно на порядок меньшей величины ^{/3/}, и поэтому представлялось необходимым, во-первых, получить сравнительные картины развития стримерного процесса в широкозазорной камере, и, во-вторых, выяснить, как с изменением шага намотки и диаметра проволок, из которых были изготовлены внутренние электроды камеры, сдвигался порог возникновения коронного разряда на электродах ^{/4,5/}.

Экспериментальная установка

Схема стендовых испытаний двухметровой стримерной камеры приведена на рис. 1. Камера представляла собой участок экранированной симметричной полосковой передающей линии, согласованной на конце резисторами типа ТВО-60 с результирующим сопротивлением 36 Ом, и

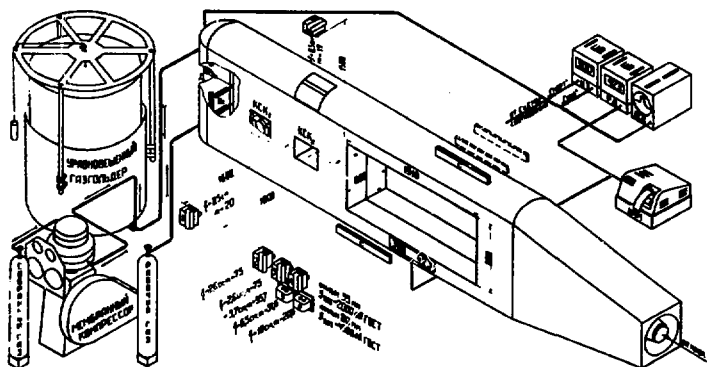


Рис. 1. Схема стендовых испытаний двухметровой стримерной камеры КСК₁, КСК₂ - контрольные стримерные камеры; Р - резисторы согласующей нагрузки 10 сопротивлений ТВО-60 величиной 380 Ом каждое; Д - делитель выходного напряжения; ИЗ - блок измерения задержки высоковольтного импульса с цифровым вольтметром; ЦВ; РД - блок расширения выходного импульса с цифровым вольтметром; ОСЦ - осциллограф для контроля формы импульса; ЦПМ - цифровая печатающая машина для регистрации показаний ЦВ; С - сцинтилляционные счетчики; ФР - фоторегистраторы.

с помощью перехода присоединялась к коаксиальной двойной формирующей линии генератора высоковольтных импульсов /6/. Эскиз камеры показан на рис. 2. Стенки ее каркаса для уменьшения неоднородностей в передающей линии были выполнены из листового пенопласта - материала с низким значением диэлектрической проницаемости. Верхний и центральный электроды камеры - проволочные, нижний - пластина из дюралюминия. Каркас и электроды камеры соединялись эпоксидным клеем. Окно для фотографирования следов в рамке верхнего электрода /размеры 191x88 см²/ было герметично затянуто пленкой из лавсана толщиной 0,175 мм. Объем камеры - 1 м³.

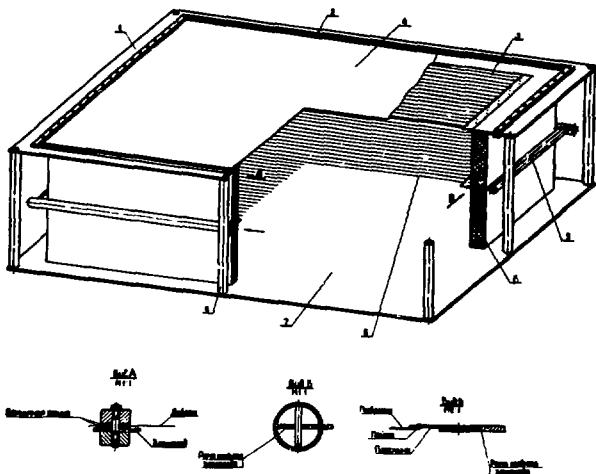


Рис. 2. Эскиз камеры. 1 - рама верхнего электрода; 2 - накладки для герметизации окна камеры; 3 - проволоки верхнего электрода; 4 - лавсановая пленка; 5 - центральный электрод; 6 - проволоки центрального электрода; 7 - нижний электрод; 8 - каркас; 9 - стяжки.

В описываемых экспериментах амплитуда и задержка импульса постоянной длительности, поступающего от генератора на центральный электрод передающей линии - камеры, непрерывно контролировалась с помощью специально разработанной для этой цели аппаратуры ^{/7,8/}, обеспечивающей возможность проведения измерения абсолютных значений амплитуды высоковольтного импульса на электродах камеры с точностью $\pm 5-7\%$ и контроля за стабильностью амплитуды с ошибкой не более $\pm 0,2\%$.

Фотографирование рабочего объема камеры производилось тремя аппаратами типа РФК-5 и двумя фотоаппаратами типа АФА-39, обеспечивающими получение в различных масштабах снимков следов в направлении электрического поля.

Регистрация развития стримерного процесса одновременно в двух проекциях /параллельно и перпендикулярно электрическому полю/ осуществлялась двумя дополнительными аппаратами типа РФК-5 в двухэлектродной вспомогательной /контрольной/ стримерной камере КСК2, включенной в общую передающую линию.

Синхронное срабатывание всех фоторегистраторов и контроль за протяжкой пленки осуществлялся с помощью аппаратуры, описанной в работе /9/.

Другая вспомогательная камера КСК1, сменные электроды которой были изготовлены из проволок различного диаметра и с разным шагом намотки, использовалась для выяснения условий возникновения электрической короны.

Запуск камеры на стенде осуществлялся при помощи сцинтилляционных счетчиков, регистрирующих космические частицы. Размеры сцинтилляторов $10 \times 80 \times 3 \text{ см}^3$. Счетчики устанавливались попарно сверху и внизу камеры в плоскости, параллельной электродам, и в процессе испытаний перемещались по глубине камеры так, чтобы можно было выделять различные участки ее рабочего объема.

Система газообеспечения камеры состояла из уравновешенного газгольдера, мембранного компрессора и баллонов для рабочего и протекшего через камеру газа /10/.

В качестве рабочего газа использовался неон "особой чистоты". После продува через камеру газ собирался в газгольдере и компрессором закачивался в баллоны для последующей регенерации. Следы в камере начинали наблюдаться после прохождения через камеру $6-8 \text{ м}^3$ неона; более яркие и короткие стримеры наблюдались, однако, позже - после продува $15-20 \text{ м}^3$ газа. Камера была достаточно герметичной, так что двухнедельное перекрытие входа и выхода не вызвало падения давления в камере относительно атмосферного, а стримерные следы продолжали регистрироваться, хотя яркость их значительно снижалась.

Работа камеры подробно исследована при двух значениях длительности высоковольтного импульса. В одном случае импульс имел практически треугольную форму

с длительностью на полувысоте 30 нс, в другом - форма импульса приближалась к синусоидальной, а длительность составила 15,5 нс. При этом соответствующее значение длительности эквивалентного прямоугольного импульса^{/11/} было равно 45 в первом случае и 19 нс - во втором. Зарисовки осциллограмм импульсов, поступавших на электроды камеры, приведены на рис. 4. Стабильность амплитуды импульсов была не хуже 1,5%.

Всего было получено около 30 тыс. снимков, на которых следы частиц анализировались при помощи полуавтоматических измерительных микроскопов ПУОС.

Экспериментальные результаты

Как показывает анализ фотоснимков, камера в обоих режимах работала устойчиво. Стабильность аппаратуры была достаточна для регистрации стримерных следов на пленке с близким средним почернением.

В начальной стадии развития стример имел вид ориентированного вдоль электрического поля стержня со сравнительно малыми длиной и диаметром, при этом, однако, чувствительность пленки оказывалась недостаточной для его фоторегистрации. На более поздних стадиях, когда, в соответствии с^{/12/}, можно считать, что радиус экранирования /дебаевский радиус/ становится много меньше размеров стримера, т.е. выполняется естественный критерий плазменного состояния^{/13/} с присущей плазме квазинейтральностью, на концах стримера появлялись сравнительно слабо светящиеся, но значительные по размерам области, обусловленные, по видимому, возникновением и ростом новых лавин, инициированных процессами фотоионизации газа излучением стримера /ионизирующий газ радиации^{/14/}/ причем рост лавин происходил в усиленном за счет квазинейтральности стримера электрическом поле, а рост самого стержня при этом замедлялся /рис. 3/.

Так как яркость стримера в направлении электрического поля существенно больше яркости в поперечном направлении, то при фотографировании стримера вдоль поля или под небольшими к нему углами на снимках отчетливо

обнаруживаются изображения стримеров в виде стержней длиной ℓ_c и диаметром d_c .

В боковой проекции стримеры выглядят в виде ленты шириной L_c , имеющей характерные "перетяжки", соответствующие по длине и диаметру изображению стримеров, полученному при фотографировании вдоль поля. При сравнительно пологом фронте нарастания импульса лента может разделиться на две ^{15/}. Четкое изображение стримеров длиной ℓ_c возможно получить даже при максимальной ширине ленты L_c , равной зазору камеры, однако при этом возрастает общая засветка всего ее объема, особенно в тех местах у электродов, вблизи которых прошла частица.

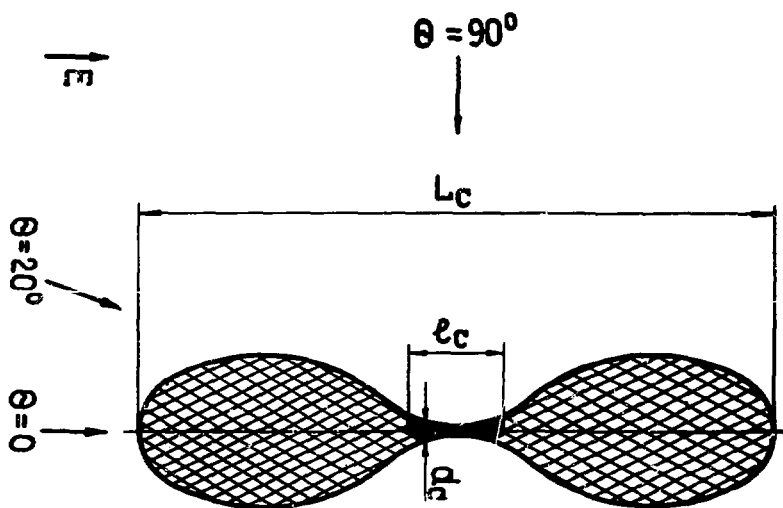


Рис. 3. Изображения стримера на снимках, полученных при фотографировании следа под различными углами θ к направлению электрического поля E . Заштрихованы менее яркие области стримера.

Размеры стримера

На рис. 4 представлены зависимости ширины ленты L_c , длины l_c и диаметра d_c стримеров от градиента поля в камере при двух длительностях высоковольтного импульса и различных относительных отверстиях объективов: 1: $n_{эф}$. Фоторегистрация стримеров становится возможной, начиная с $l_c = 15 \text{ мм} / T_H = 30 \text{ нс/}$ и $l_c = 7 \text{ мм} / T_H = 15,5 \text{ нс/}$. Найдено, что при постоянных амплитуде и длительности импульса, т.е. при одинаковой длине стримера, произведение $d \cdot n_{эф}$ остается примерно постоянным при изменении диафрагмы объектива в 2-4 раза. Величина этого произведения возрастает с уменьшением длительности импульса и соответствующем увеличении напряженности поля. При этом улучшается локализация следов в стримерной камере^{/11/}.

При фотографировании следов плоскость наводки объективов на резкость была близка к плоскости среднего электрода, счетчики же вначале располагались в этой плоскости, затем на расстояниях на 25 см ближе и дальше от нее. На рис. 5 приведены значения среднего диаметра изображений стримера на снимках, полученных при указанных на рис. 1 различных масштабах фотографирования. Пунктирные линии соответствуют усредненным по всей глубине камеры расчетным кривым для диаметров 1 и 2 мм при реальной разрешающей способности пленки 25 лин/мм.

На рис. 6 показана зависимость величины диаметра изображения стримера, восстановленного в пространстве камеры, от масштаба фотографирования; там же приводятся и соответствующие расчетные кривые, имеющие слабо выраженный минимум при масштабе 1:42. Обращает на себя внимание тот факт, что при увеличении масштаба диаметр изображения стримера оказывается меньше расчетного значения. Расчет был сделан в предположении, что распределение яркости по сечению стримера равномерное. В реальных условиях яркость стримера возрастала к его центру и при увеличении масштаба, несмотря на слабое диафрагмирование объектива и значительную глубину камеры, размеры изображений стримеров у ее краев не достигали расчетных. По-видимому,

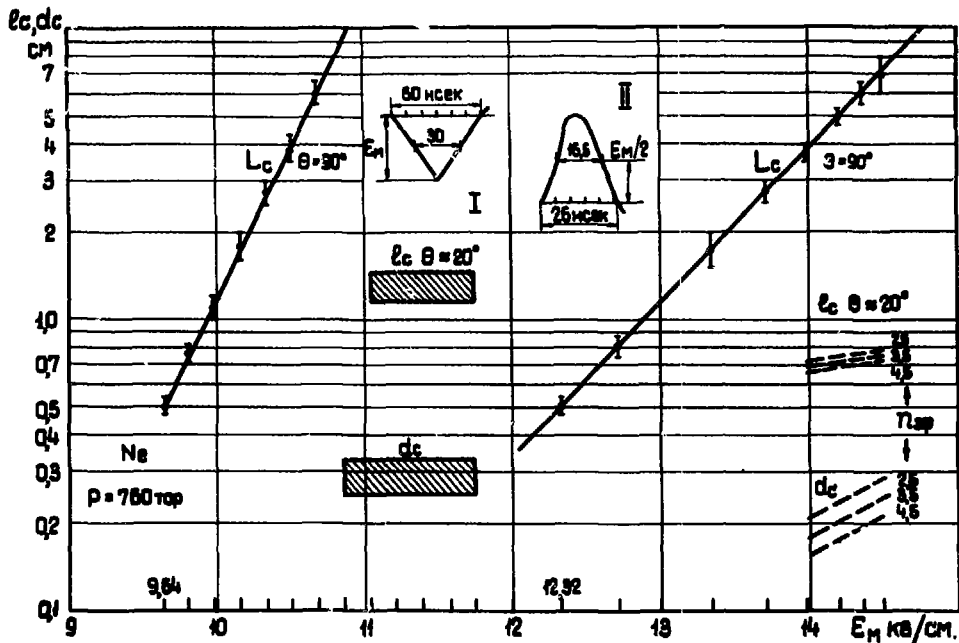


Рис. 4. Зависимости длин (L_c , l_c) и диаметров (d_c) стримеров от максимального значения напряженности поля в камере (E_M) при двух значениях длительности высоковольтного импульса.

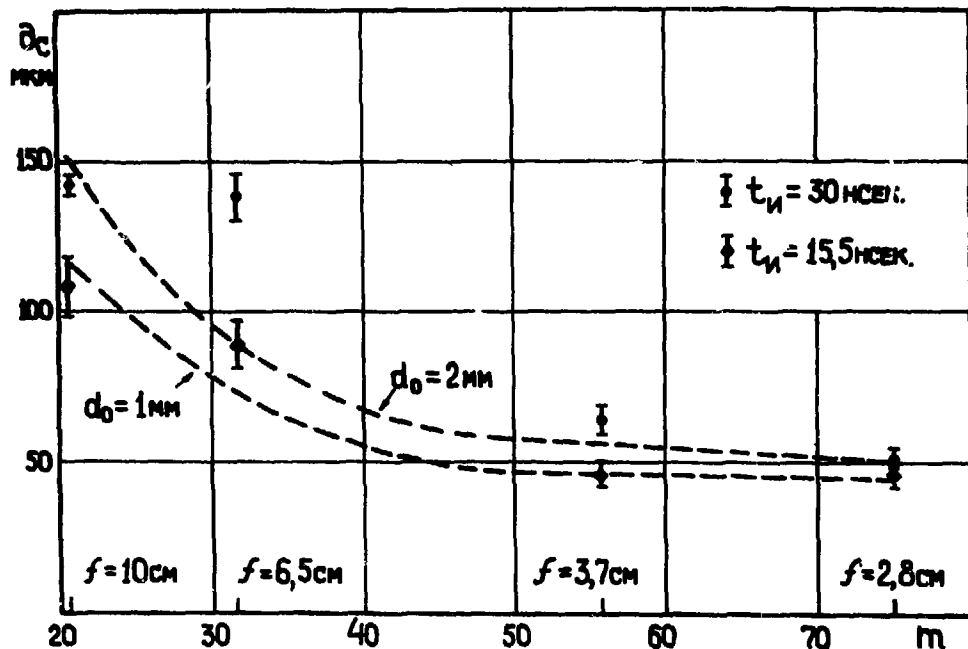


Рис. 5. Зависимость среднего диаметра изображения стримера на пленке (d_c) от величины m (1: m) - масштаб фотографирования. Пунктирные линии - расчетные значения для диаметров стримеров в камере 1 и 2 мм.

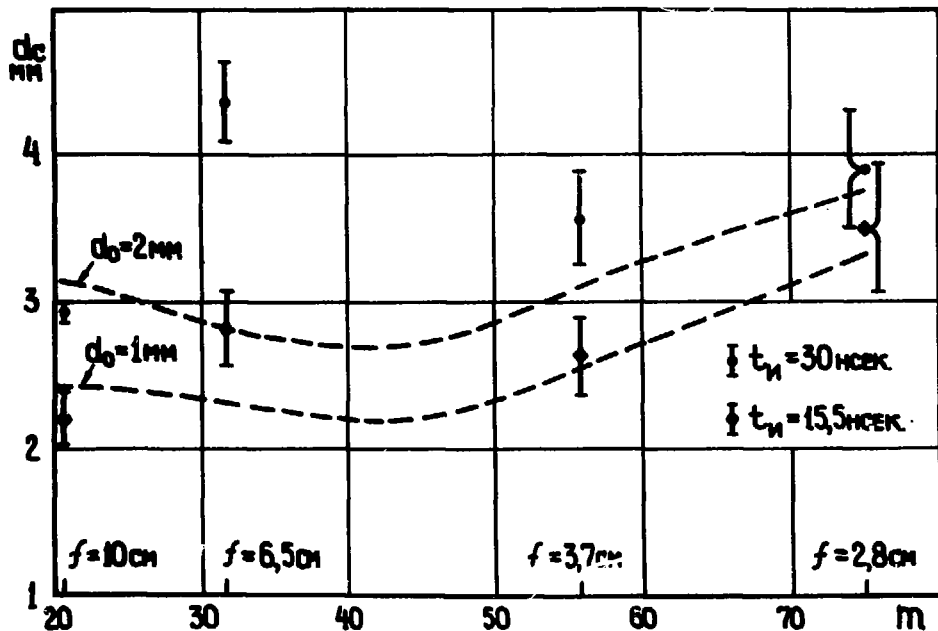


Рис. 6. Зависимость диаметра изображения струйера, восстановленного в пространстве камеры, от m .

это можно объяснить тем, что по мере дефокусировки изображения и общего падения его освещенности на снимках регистрировалась только более яркая и тонкая сердцевина стримера. При фотографировании в плоскости наводки на резкость и масштабе 1-20,6 средний диаметр стримеров оказался равным, соответственно, ≈ 3 мм при $T_{и} = 30$ нс и ≈ 2 мм при $T_{и} = 15,5$ нс.

Яркость стримера найдена приблизительно пропорциональной L_c , с другой стороны, длина стримера l_c во всей области фоторегистрации менялась не более, чем на 15-20%. Длина стримеров одинаковой яркости оказалась вдвое меньше при $T_{и} = 15,5$ нс, чем при $T_{и} = 30$ нс. Таким образом, при сокращении длительности импульса вдвое происходит, по крайней мере, двукратное увеличение яркости стримеров той же длины. Расчеты^{/11/} показывают, что рост яркости с укорочением импульса может происходить даже более резко.

Распределение яркости по сечению стримера находилось путем фотографирования следов при различных градиентах поля и определения соответствующих им величин отношений максимального значения диафрагмы объектива, при котором изображения стримеров на пленке едва различимы, к минимальному, когда объектив полностью открыт и средний диаметр изображения стримера максимален^{/16/}. Изменяя диафрагму объектива в указанных пределах, можно получить промежуточные величины диаметров изображений стримеров на следе частицы и соответствующие им значения яркости. Наблюдаемый при этом характер изменения яркости стримера по сечению хорошо иллюстрирует *рис. 7*, при построении которого был принят нормальный закон распределения яркости по сечению стримера.

По фотографическому почернению пленки известной чувствительности и в предположении, что время высвечивания стримера $\approx 10^{-8} \text{ с}^{1/4}$, а характер поведения изоплаки^{/17/} не меняется в области малых времен экспозиции, было найдено абсолютное значение яркости стримера - 1 *Мнн*.

Более подробно вопрос о влиянии амплитуды и длительности импульса на размеры стримера и его яркость рассмотрены в работе^{/11/}.

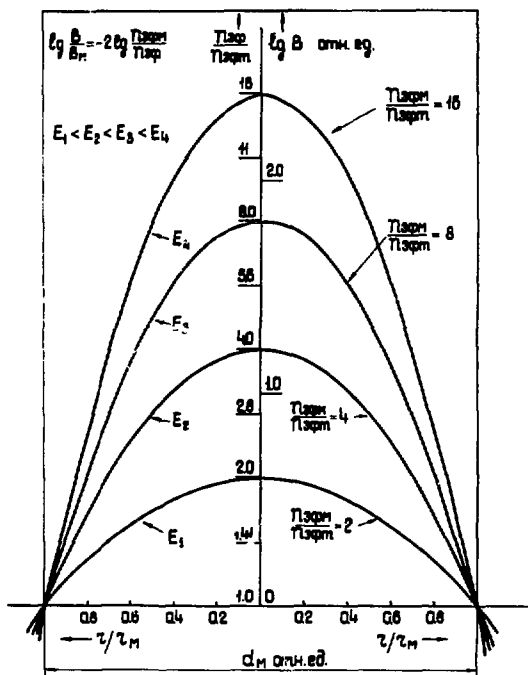


Рис. 7. Характер зависимости яркости стримера от его радиуса в относительных единицах. Зависимость фиксируемого относительного радиуса стримера на следе r/r_m от относительного значения диафрагмы объектива $n_{эф}/n_{эф}$. r_m - радиус, фиксируемый при полном открытии диафрагмы ($n_{эфm}$).

Точность локализации следов в стримерной камере при прочих равных условиях зависит от диаметра и длины стримеров, и по оценкам, приведенным в работе ^{18/}, должна быть не хуже, чем одна-две десятых от зарегистрированных размеров стримера. Таким образом, в рассматриваемом случае при масштабе фотографирования 1:55,7 в пространстве камеры ошибка составляла величину 0,25-0,5 мм в плоскостях, параллельных электродам (XY).

Найденное, без учета оптических искажений, распределение отклонений точек от прямой вдоль следа частицы, сфотографированного в том же масштабе, приводится на рис. 8. Среднеквадратичное отклонение при этом составляет $7+3$ мкм или $\approx 0,4$ мм в пространстве камеры, что соответствует ранее произведенной оценке.

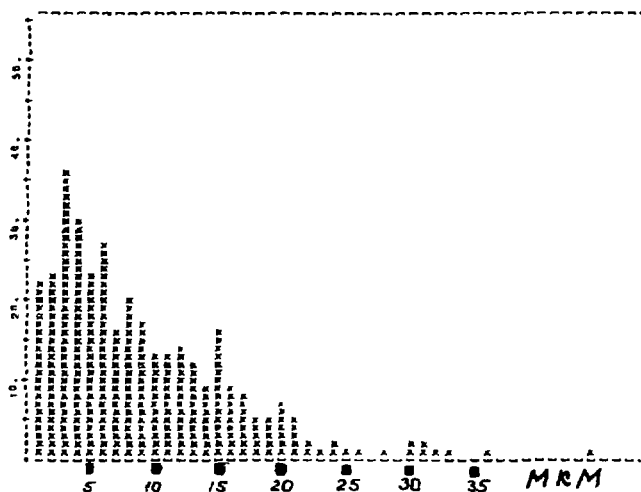


Рис. 8. Распределение отклонений от прямой линии точек, измеренных на прямом следе частицы.

В рабочих условиях масштаб фотографирования должен быть 1:40. Учитывая сказанное выше о размерах изображения стримера на снимках, полученных при разных масштабах фотографирования, а также уменьшение размеров стримера в магнитном поле, следует ожидать уменьшения ошибки в определении координат точек на следе частицы. Это подтверждают и результаты работы^{19/}, где на основе анализа точности локализации следов в стримерных камерах ошибка в измерении координат

нат точек вдоль следов поставлена в зависимость только от масштаба фотографирования и точности измерений координат на пленке.

Для рассматриваемого случая двухметровой камеры на основании этих результатов можно ожидать, что точность локализации следов будет не хуже 0,2-0,25 мм в плоскости XY и 1,5-2,00 мм по глубине камеры.

Режим обработки фотопленки. Судя по снимкам, полученным при одних и тех же условиях работы камеры, но с различной длительностью проявления, оказался оптимальным при условиях, рекомендуемых заводом-изготовителем пленки, несмотря на существенное различие в длительностях экспозиций.

Добавление к неону примесей аргона /до $\approx 1\%$ /, ксенона /до $\approx 1,5\%$ / или пропана /до $\approx 0,2\%$ / приводит к возрастанию яркости стримеров при тех же значениях градиента поля. Наблюдаемое изменение яркости, по-видимому, обусловлено, в первую очередь, ростом длины стримера. При равных длинах стримеров яркость их примерно одинакова, как с добавками, так и без них.

Коронирование электродов при обоих изученных режимах работы камеры не наблюдалось. По измерениям, проведенным с помощью контрольной камеры при $T_{и} = 30$ нс, корона на проволоках центрального электрода диаметром 0,1 мм появлялась при напряженности поля 9,8 и 11,2 кВ/см, соответственно, при шаге катушки электрода 3 и 1,5 мм.

На проволоках заземленного электрода при том же диаметре и шаге катушки 4 мм корона не возникала даже при напряженности 11,75 кВ/см. В случае $T_{и} = 15,5$ нс коронирование на проволоках диаметром 0,1 мм центрального электрода начиналось при напряженности поля, равной 14,2 кВ/см при шаге катушки 1 мм. Коронирование заземленного электрода, изготовленного из проволок диаметром 0,2 мм при шаге катушки 3 мм, возникает при 13,7 кВ/см. При шаге катушки центрального и заземленного электродов 2 мм и диаметре проволок 0,2 мм корона возникала почти одновременно на обоих электродах при 12,5 кВ/см.

Эти данные соответствуют расчетным ^{/5/} значениям напряженности поля на поверхности проволок, равным 130-150 кВ/см в первом случае / $T_{и} = 30$ нс - отрицательная полярность импульса/ и 80-100 кВ/см - во втором / $T_{и} = 15,5$ нс - положительная полярность импульса/.

Фотографии треков частиц, зарегистрированные в камере при одновременном фотографировании в разных масштабах, приведены на рис. 9. Видно, что при мелко-масштабной съемке отдельные стримеры сливаются в сплошной стримерный след. При укрупнении масштаба стример разделяется.

После этих испытаний камера была смонтирована в магните ИСП-41 и при поле 10 кЭ облучена протонами с энергиями 8,3 ГэВ. На рис. 10 приведен рабочий момент монтажа камеры на ускорителе, на рис. 11 показаны следы первичных протонов в камере.

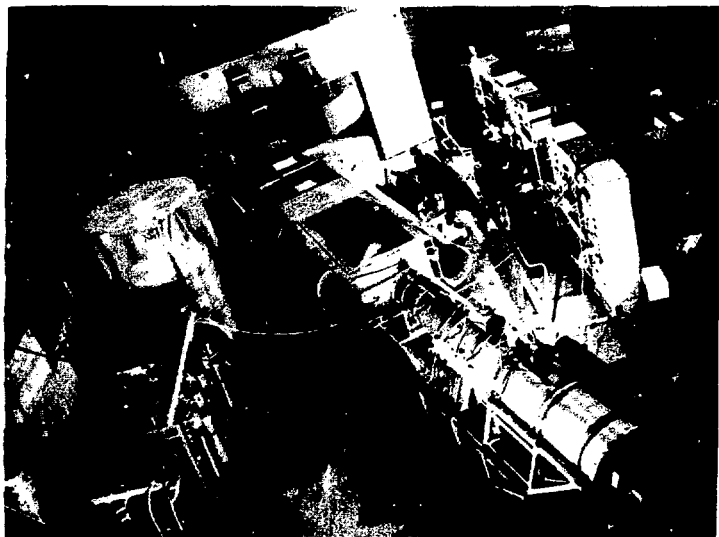


Рис. 10. Монтаж камеры на ускорителе.



а)



б)

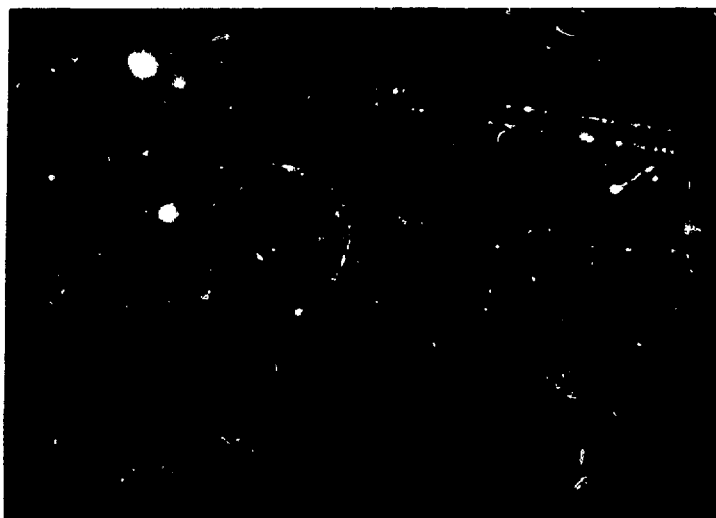
Рис. 9. Снимки ливня космических частиц при $T_{и} = 15,5$ нс в различных масштабах фотографирования $\frac{1}{m}$ и относительных отверстиях объективов: а/ $m = 20,6$; $1:2,5$; б/ $m = 31,6$; $1:3,5$; в/ $m = 55,6$; $1:2,8$; г/ $m = 75$; $1:2$.



В)



Г)



*Рис. 11. Треки пучковых частиц в магнитном поле:
а/ $T_{И} = 15$ нс; б/ $T_{И} = 10,5$ нс.*

В процессе испытаний камеры на ускорителе было произведено дальнейшее сокращение длительности высоковольтного импульса до 10,5 нс, однако при этом существенно возрастало коронирование краев центрального электрода, а также возникали пробки в переходе от генератора к камере, даже при заполнении объема перехода элегазом, и по стенкам камеры в месте ввода пучка. В связи с этим длительность импульса была выбрана равной 12,5 нс. Это позволило сохранить удовлетворительное качество следов, не превышая допустимый уровень коронирования и пробоев.

Итогом описанных работ явилось создание двухметровой стримерной камеры, эффективно используемой в настоящее время в исследованиях по релятивистской ядерной физике.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность сотрудникам Томского политехнического института Н.С.Руденко, В.И.Цветкову и др., совместно с которыми проведена разработка генератора для стримерной камеры; сотрудникам Института физики высоких энергий АН КазССР С.М.Биттибаеву, Н.Н.Нургожину, Ж.Ж.Мусульманбекову, Т.У.Иманбекову и др., совместно с которыми была разработана система газообеспечения камеры; сотрудникам Института ядерных исследований г. Лодзь /ПНР/, принявших активное участие в разработке аппаратуры контроля за режимом работы камеры; Т.Ф.Жмыровой, выполнившей многочисленные измерения параметров стримеров; С.А.Краснову, Г.Ф.Акимовой, Н.Н.Графову, В.П.Садилу, А.А.Верещагину, А.И.Завгороднему, Б.Е.Роганову, В.Я.Рубцову за активное участие в работах по настройке аппаратуры и проведению экспериментов.

Авторы благодарят А.М.Балдина и Ж.С.Такибаева за постоянную поддержку.

Литература

1. М.Х.Аникина, А.М.Балдин, Г.Л.Варденга и др. Препринт ОИЯИ, 13-4527, Дубна, 1969.
2. G. L. Vardenga, V. D. Volodin, N. S. Glagoleva, Yu. A. Karzhavin et al. Intern. Conf. in Instrumentation for High Energy Physics. Frascati (Italy), 8-12, May, 1973.
3. В.Д.Володин, Н.С.Глаголева, Ю.А.Каржавин, П.С.Кузнецов, А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин. Препринт ОИЯИ, P13-5529, Дубна, 1970; ПТЭ, 5, 62 /1971/.
4. А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин. Препринт ОИЯИ, P-2312, Дубна, 1965; ПТЭ, 5, 75 /1966/.
5. А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин. Препринт ОИЯИ, P-2364, Дубна, 1965.
6. В.Д.Володин, Н.С.Глаголева, Ю.Лукстиньш, М.И.Козлов и др. Препринт ОИЯИ, P13-7792, Дубна, 1974.
7. В.Д.Володин, Н.С.Глаголева, П.С.Кузнецов, А.Т.Матюшин и др. Препринт ОИЯИ, P13-7811, Дубна, 1974.
8. Н.С.Глаголева, А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин. Авт. свид. ЧОЗ 5/04 371678. Бюллетень ОНПОТЗ, 12, 165, 1973.
9. В.Д.Володин, Н.С.Глаголева, А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин. Препринт ОИЯИ, 13-6560, Дубна, 1972; ПТЭ № , 1973.
10. В.М.Белякин, С.М.Биттибаев, Ю.П.Мальков, Е.М.Матюшевский и др. Препринт ОИЯИ, 13-7879, Дубна, 1974.
11. Н.С.Глаголева, Ю.Р.Лукстиньш, А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин. Сообщение ОИЯИ, P13-7791, Дубна, 1974.
12. А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин. Препринт ОИЯИ, P13-5504, Дубна, 1970.
13. В.Л.Грановский. Электрический ток в газе. М., Наука, 1974, стр. 99.
14. Г.Рейер. Электронные лавины и пробой в газах. М., Мир, 1968.
15. Э.А.Долгошеин, М.И.Дайон и др. Искровая камера, М., Атомиздат, 1967.
16. В.Д.Володин, Н.С.Глаголева, Т.Ф.Жмырова, А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин. Депонированная публикация ОИЯИ, Б1-13-8985, Дубна, 1975.
17. Ю.Н.Гороховский, В.П.Баранова. Свойства черно-белых фотোগрафических пленок. М., Наука, 1970.

18. *F. Bulos, A. Odian, F. Villa and D. Yount. Streamer Chamber Development, SLAC-74, 1967.*
19. *F. Villa. Intern. Conf. on Instrumentation for High Energy Physics, Frascati (Italy), 8-12 May, 1973.*

*Рукопись поступила в издательский отдел
17 ноября 1975 года.*