

**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

P13-87-474

Д. Бенце, И. Г. Пальчикова*, А. Г. Полещук*,
Л. М. Сороко

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЯМОГО МЕТОДА
РЕГИСТРАЦИИ "ЗВЕЗД"
В ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ
ПРИ ПОМОЩИ КИНОФОРМА
С КОЛЬЦЕВЫМ ОТКЛИКОМ**

*Институт автоматики и электрометрии СО АН СССР,
Новосибирск

1. ВВЕДЕНИЕ

Мезооптический фурье-микроскоп /МФМ/ для ядерной фотоэмульсии представляет собой специализированное устройство, предназначенное для быстрого поиска прямых следов частиц заданной ориентации в ядерной фотоэмульсии и ядерных взаимодействий /"звезд"/. Конструкция МФМ, содержащего мезооптическое зеркало с кольцевым откликом и высокой числовой апертурой, описана в/1/. В/2-5/ изложены результаты измерений метрических характеристик МФМ, которые в последнее время достигли значения 1,5 мкм, равного дифракционному разрешению мезооптического зеркала. Координаты сигналов на выходе МФМ однозначно определяют положения прямого следа в пространстве/6/, а данные об угле ориентации, расстоянии до центра поля зрения и о z-координате прямого следа частицы могут быть использованы, чтобы при помощи простых алгоритмов/6,7/ обнаружить ядерное взаимодействие /событие или "звезду"/ и найти координаты его вершины.

В МФМ, описанном в упомянутых работах, используют мезооптическое зеркало с кольцевым откликом, которое было изготовлено из металла. Чтобы решить проблему тиражирования мезооптического элемента с кольцевым откликом для МФМ, было предложено использовать мезооптический киноформ, изготавливаемый хорошо разработанными в настоящее время методами/8,9/. В/10/ были исследованы изображающие свойства киноформа с кольцевым откликом для объектов в виде круглого отверстия, прямоугольной щели, полуплоской шторки, а также для линейной цепочки из нескольких круглых отверстий. Было показано, что при освещении киноформа с кольцевым откликом сходящимся пучком света происходит оконтуривание кольцевого изображения объектов с резкими краями. Полученные результаты были интерпретированы в терминах одномерного преобразования Фуко - Гильберта.

В данной работе экспериментально промоделирован прямой метод регистрации "звезд" в ядерной фотоэмульсии при помощи МФМ, содержащего киноформ с кольцевым откликом в плоскости пространственных частот и систему концентрических пропускающих колец в плоскости формирования мезооптического изображения. Исследованы эффекты, возникающие при несовпадении вершины "звезды" с центром системы концентрических пропускающих колец. Оце-

нена погрешность, с которой могут быть зафиксированы координаты вершины "звезды". Даны расчетные характеристики реальной системы прямой регистрации "звезд" в ядерной фотоэмульсии на основе МФМ с числовой апертурой мезооптического элемента 0,53 рад.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В/6/ был рассмотрен алгоритм поиска ядерных взаимодействий /"звезд"/ по мезооптическим сигналам от прямых следов частиц, образующих звезду, на выходе МФМ для ядерной фотоэмульсии. В основе этого алгоритма лежит то, что прямой след частицы, попавший в поле зрения МФМ, преобразуется в два световых пятна /мезооптические сигналы/, которые лежат в выходной плоскости МФМ на линии, перпендикулярной ориентации прямого следа частицы. Эти два световых пятна содержат всю необходимую информацию, которая регистрируется в МФМ. Их положение задает полную информацию об отрезке прямого следа частицы, который попал в поле зрения МФМ. Область, в которой могут появиться мезооптические сигналы на выходе МФМ, имеют вид кольца шириной $D \cdot M$ и средним радиусом R , где D - диаметр поля зрения МФМ, M - коэффициент линейного увеличения МФМ, а R - радиус фокальной окружности. Последняя представляет собой мезооптическое изображение точечного объекта, находящегося на оптической оси МФМ в медианной плоскости слоя ядерной фотоэмульсии /плоскость $Z = 0$ /.

Чтобы пояснить связь между положением прямого следа частицы в пространстве и мезооптическими сигналами на выходе МФМ, рассмотрим систему координат /рис.1/ для входной /а/ и выходной /б/ плоскостей МФМ. Прямоугольные системы входной $/x_1, y_1/$ и выходной $/x_2, y_2/$ плоскостей МФМ перпендикулярны оптической оси, так что оси Ox_1 и Ox_2 взаимно параллельны и направлены в

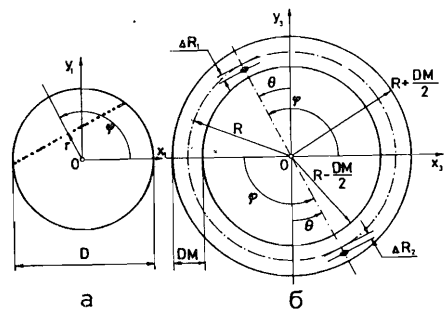


Рис.1. Прямоугольные и полярные системы координат для входной /а/ и выходной /б/ плоскостей МФМ.

одну сторону. На рис.1 даны полярная система координат $/r, \phi/$ входной плоскости МФМ, а также собственные системы координат для двух выходных полуплоскостей с $u_2 < 0$ и $u_2 > 0$ и радиальными координатами

$$\rho_1 = \Delta R_1 / M, \quad \rho_2 = \Delta R_2 / M, \quad /1/$$

где ΔR_1 и ΔR_2 - расстояния между фокальной окружностью и двумя мезооптическими сигналами, а смысл углов θ и ϕ ясен из рис.1б.

Чтобы построить алгоритм поиска ядерного взаимодействия /события/, которое содержит несколько прямых следов частиц, выходящих из общей вершины, достаточно использовать двухмерный формат отображения выходных сигналов $/\rho, \theta/$, где

$$\rho = \frac{\rho_2 - \rho_1}{2 \cos \alpha_{1/2}} = r \operatorname{Sgn}(\rho_2 - \rho_1), \quad /2/$$

$2\alpha_{1/2}$ - полная угловая апертура мезооптического элемента с кольцевым откликом, а r - расстояние от прямого следа частицы до центра поля зрения. В/6/ показано, что сигналы на выходе МФМ от прямых следов частиц, образующих событие, лежат в формате $/\rho, \theta/$ на синопграмме - кривой в форме синусоиды, причем это справедливо независимо от того, находится ли вершина события в поле зрения МФМ или нет. Уравнение веера прямых линий, проходящих через общую вершину $/x_0, y_0/$ во входной плоскости МФМ /рис.1а/, имеет в формате $/\rho, \theta/$ вид

$$\rho = \rho_0 \cos(\theta_0 - \theta), \quad /3/$$

где (θ_0, ρ_0) - координаты точки, общей для всех прямых линий веера в формате (θ, ρ) . Из /3/ видно, что если общая вершина веера прямых линий находится в центре поля зрения, $x_0 = y_0 = 0$, то мезооптические сигналы лежат на одной из фокальных окружностей с центром на оптической оси.

На этом свойстве основан алгоритм прямого наблюдения событий в МФМ/7/. Здесь отсутствует промежуточная стадия регистрации мезооптических сигналов от отдельных прямых следов частиц, и, как результат этого, отпадает необходимость их обработки. В общем случае для обнаружения события с помощью указанного алгоритма вершина события должна лежать вблизи оптической оси МФМ. Координата вершины события z регистрируется с неопределенностью Δz , равной толщине частичного слоя ядерной фотоэмульсии:

$$\Delta z = \Delta \rho / n \sin \frac{\alpha_{1/2}}{2}, \quad /4/$$

где $\Delta\rho$ - ширина кольца, внутри которого лежит фокальная окружность, при этом радиус фокальной окружности однозначно связан с координатой z вершины события, а n - показатель преломления слоя ядерной фотоэмульсии. Если h - толщина этого слоя, то число независимых мезооптических колец, достаточное для того, чтобы охватить всю толщину ядерной фотоэмульсии, равно

$$N_z = n h \sin \frac{\alpha_z}{2} / \Delta\rho. \quad /5/$$

3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

Чтобы экспериментально промоделировать прямой метод регистрации событий /"звезд"/ в ядерной фотоэмульсии, описанный выше, был смонтирован макет мезооптического фурье-микроскопа, в кото-

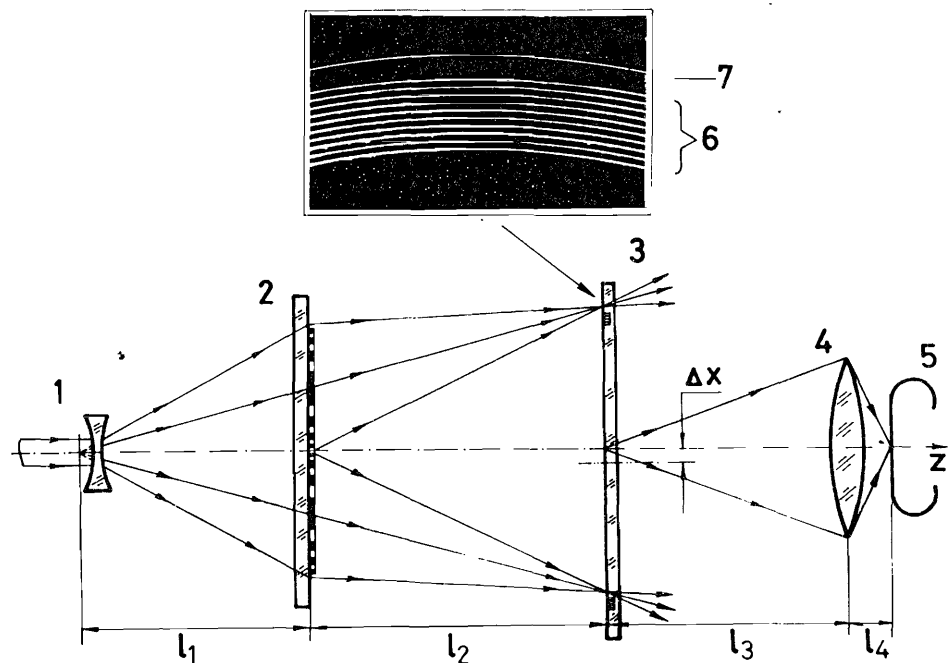


Рис.2. Схема эксперимента по совмещению фокальной окружности от киноформа с кольцевым откликом с одним из десяти concentрических пропускающих колец: 1 - рассеивающая линза, 2 - киноформ с кольцевым откликом, 3 - пластина с десятью concentрическими пропускающими кольцами, 4 - объектив, 5 - фотопленка, $l_1 = 517$ мм, $l_2 = 317$ мм, $l_3 = 385$ мм, $l_4 = 68$ мм.

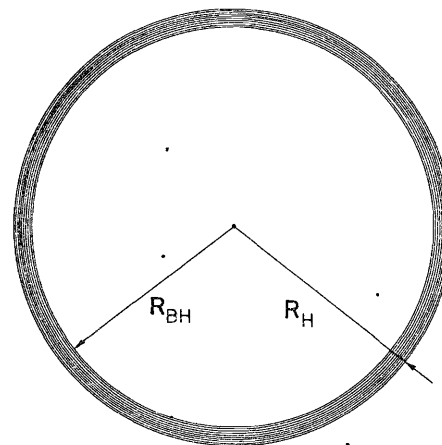
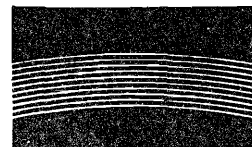


Рис.3. Вид системы из десяти concentрических пропускающих колец и микрофотография не-большой ее части. $R_{ВН} = 22,02$ мм, $R_Н = 23,89$ мм, $R_{ср} = 22,955$ мм.

ром использовался киноформ с кольцевым откликом /10/ и система concentрических пропускающих колец. В качестве объекта была использована сетка от оптической скамьи ОСК-2 с двойным перекрестием под углом 16° . Диаметр киноформа с кольцевым откликом равен 40,8 мм, фокусное расстояние $f = 202$ мм, разрешение по радиальной координате равно 10 мкм, а угловая апертура $\alpha_z = 0,05 \approx 3^\circ$. Система concentрических колец была изготовлена на стеклянной подложке методом травления. Ширина пропускающего кольца

равна 20 мкм, шаг 200 мкм, а число колец равно 10.

На рис.2 дана схема эксперимента, в котором производилось совмещение фокальной окружности, образованной киноформом с кольцевым откликом, и одного из concentрических пропускающих колец. В верхней части рис.2 дана фотография десяти concentрических пропускающих колец в поле рассеянного света 6 и фокальной окружности 7. На рис.3 даны чертеж системы из десяти concentрических пропускающих колец и их фотография.

На рис.4 последовательно показаны: а - увеличенная микрофотография фокальной окружности, образованной киноформом с кольцевым откликом, б - взаимное расположение системы concentрических пропускающих колец и фокальной окружности от киноформа в положении, когда их центры не совпадают, в - то же, что и "б", но в положении, когда фокальная окружность совпадает с третьим пропускающим кольцом.

На рис.5 центры фокальной окружности киноформа и системы concentрических колец не совпадают /б, в, г, д, е/. Для сравнения в тех же условиях показано положение, в котором эксцентриситет $\Delta x = 0$ /а/ и фокальная окружность видна полностью через соответствующее пропускающее кольцо. Раздвоение изображения фокальной окружности или его частей на рис.5 вызвано тем, что фотоаппарат, который располагался на оптической оси на

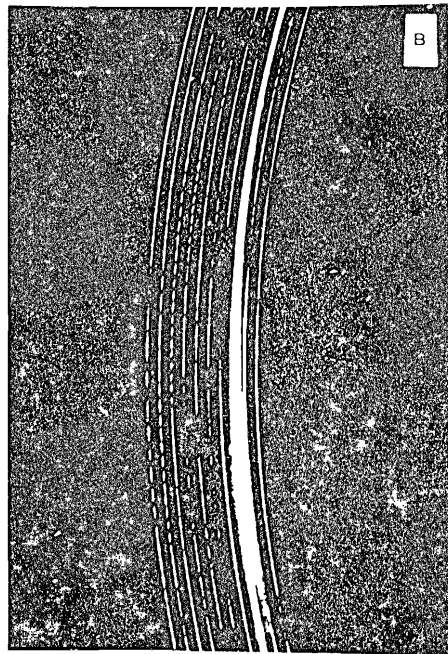
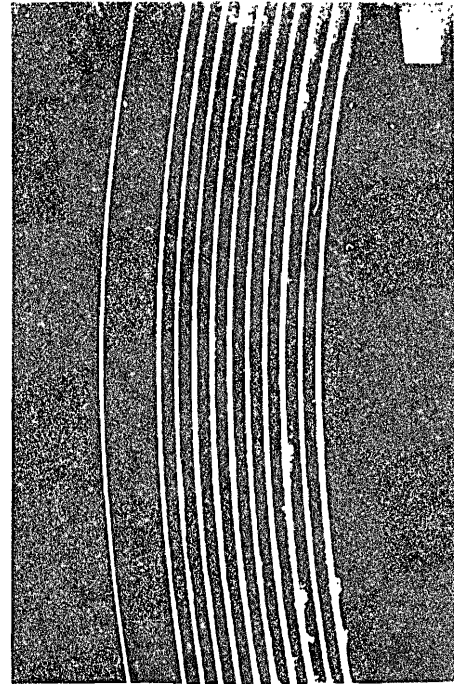
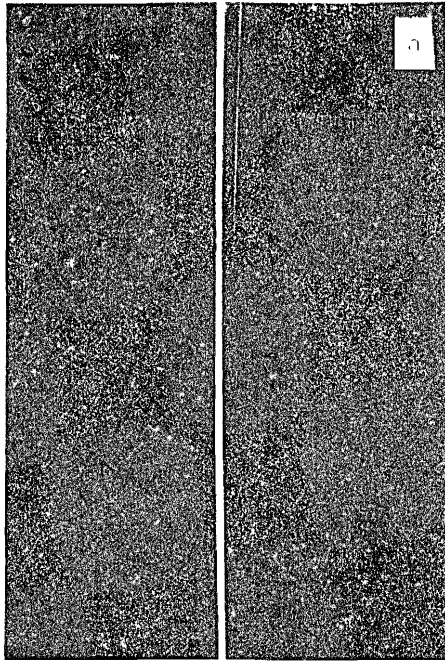
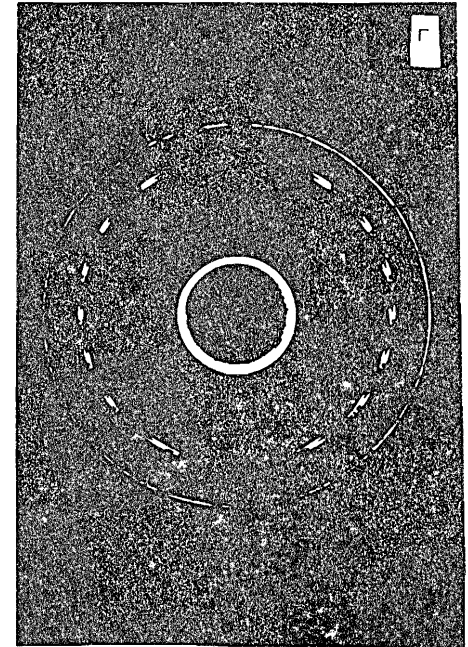
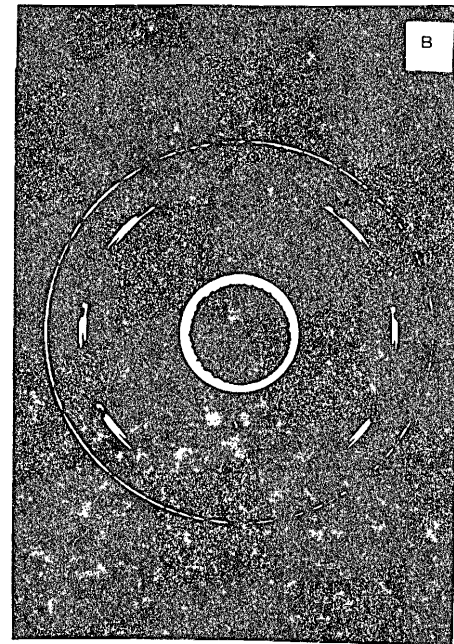
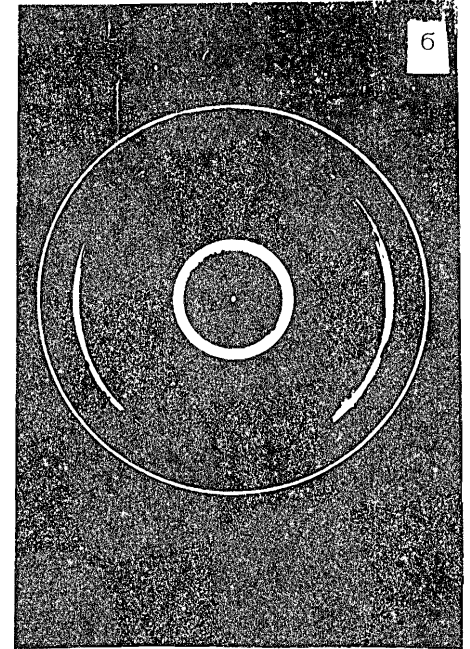
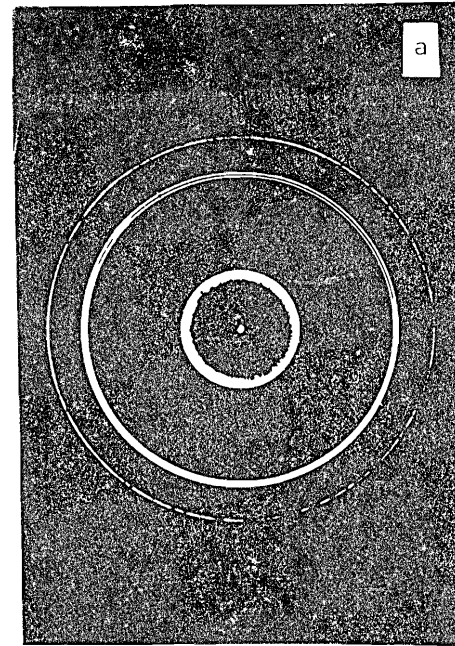


Рис.4. Фотографии: а - фокальной окружности шириной 10 мкм, б - взаимное расположение фокальной окружности относительно системы концентрических пропускающих колец при эксцентриситете $\Delta x \neq 0$, в - в положении, когда $\Delta x = 0$, а радиус фокального кольца совпадает с радиусом третьего пропускающего кольца.



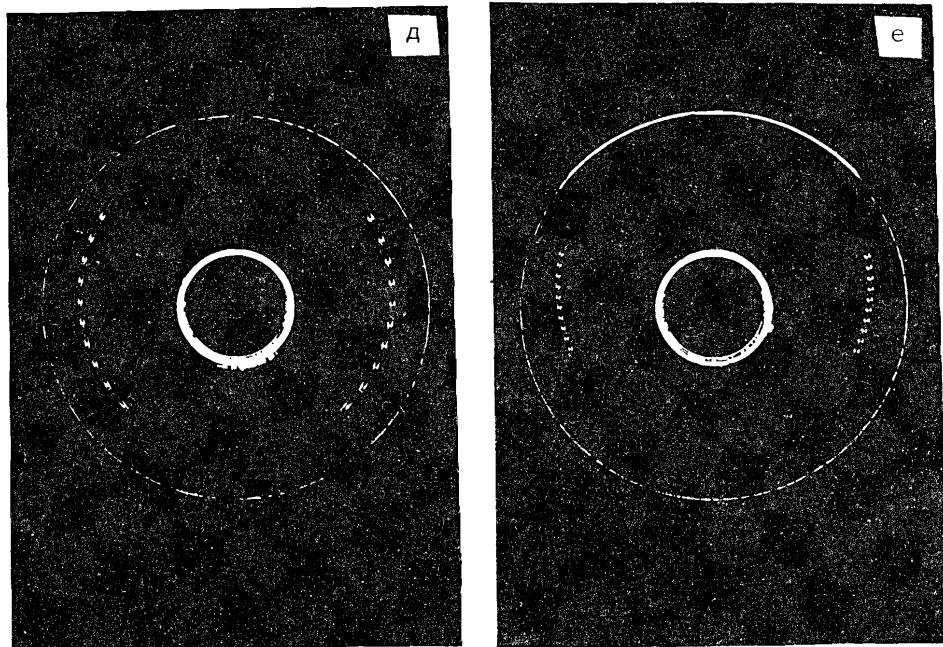


Рис.5. Фотографии фокальной окружности при различных значениях эксцентриситета: $\Delta x = 0,115$ /б/, $0,325$ /в/, $0,745$ /г/, $1,552$ /д/ и $2,09$ мм /е/, или соответственно $0,575$; $1,63$; $3,62$; $7,77$ и $10,45$ шага между соседними пропускающими кольцами.

расстоянии 385 мм от пропускаемых колец, не мог захватить весь свет от объекта, в результате чего возникло своеобразное пространственное дифференцирование. С увеличением эксцентриситета Δx число пар серпиков m возрастает, пока не достигнет значения 10 /рис.6/. На рис.7 дано распределение полной интенсивности света, прошедшего через пропускающие кольца, при различных значениях эксцентриситета Δx для двух крайних случаев. В первом случае /сплошная кривая/ радиус фокальной окружности равен радиусу пропускающего кольца. Во втором случае /пунктир/ радиус фокальной окружности равен полусумме радиусов двух соседних пропускающих колец, так что при $\Delta x = 0$ интенсивность прошедшего света равна нулю. Видно, что при уровне дискриминации интенсивности света, равном $0,5$, ширина пика в первом случае $\Gamma_0 = 0,1$ мм или $0,5$ шага между пропускающими кольцами, а при уровне дискриминации интенсивности света, равном $0,3$, ширина пика в первом случае $\Gamma_1 = 0,2$ мм или 1 шаг, а во втором $\Gamma_2 = 0,3$ мм или $1,5$ шага. Таким образом, средняя ширина

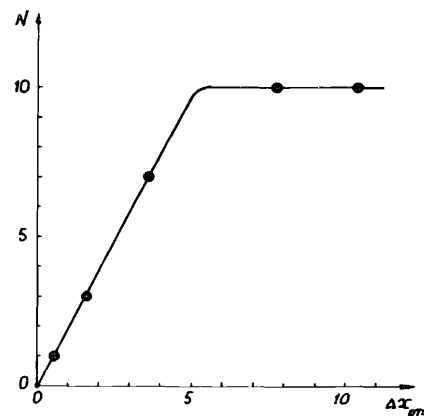
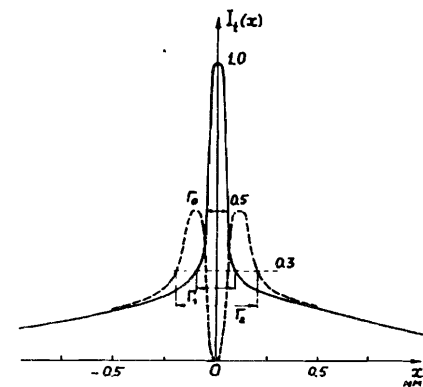


Рис.6. Число серпиков m в зависимости от эксцентриситета Δx , выраженного в единицах шага между соседними пропускающими кольцами.

Рис.7. Зависимость полной интенсивности света, пропущенного системой концентрических пропускающих колец, от эксцентриситета Δx в мм.



пика для указанных двух случаев равна $\Gamma_{ср} = 0,25$ мм или $1,25$ шага. Это свойство кривых $I_t(\Delta x)$ может быть использовано в прямом методе обнаружения ядерных взаимодействий /"звезд"/ в ядерной фотоземлюсии. Однако, чтобы оценить z -координату вершины события, необходимо анализировать компоненты света, проходящие через отдельные пропускающие кольца. Номер пропускающего кольца, имеющего наибольшую освещенность, однозначно определяет z -координату вершины события. Из рис.7 видно, что расстояние между пропускающими кольцами определяет разрешение вдоль z -координаты, в то время как ширина отдельного кольца может составлять малую долю указанного шага.

Схема эксперимента с макетным объектом в виде сетки из набора для оптической скамьи ОСК-2 совпадает со схемой, приведенной на рис.1 работы /10/. На рис.8 дан общий вид макетного объекта, а на рис.9 - картина четырех пар мезооптических изображений, по два от каждого прямолинейного штриха объекта, которая спроецирована на матовое стекло. На рис.10 показан фрагмент аналогичной картины, которую мог захватить фотоаппарат "Зенит-Е" с объективом "Гелиос-44". На рис.11 приведены последовательно: а - мезооптические изображения двух штрихов макетного объекта, формируемые по одну сторону от оптической оси, б - то же, что и в "а", но через затемненную часть си-

Рис.8. Общий вид макетного объекта: $D = 16$ мм, $a = 20$ мкм.

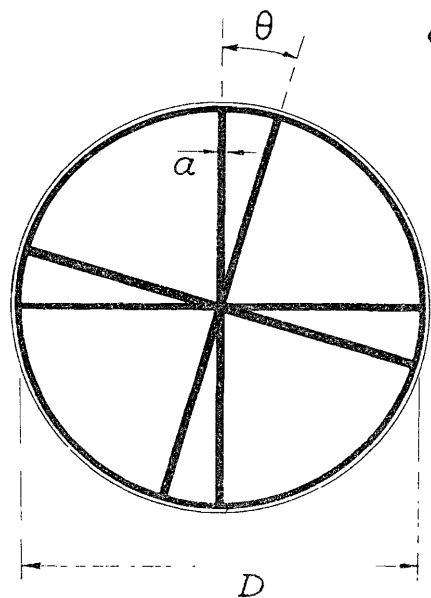
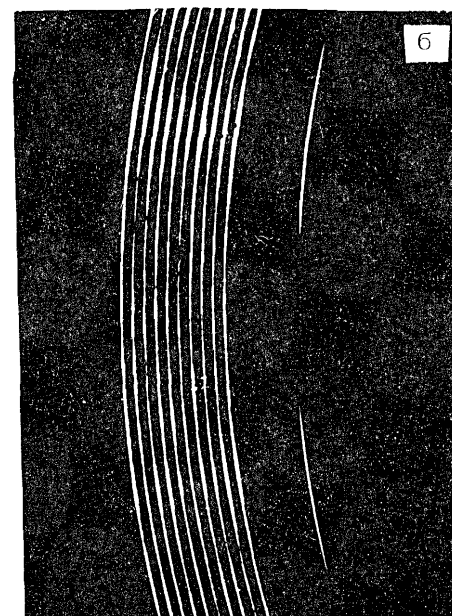
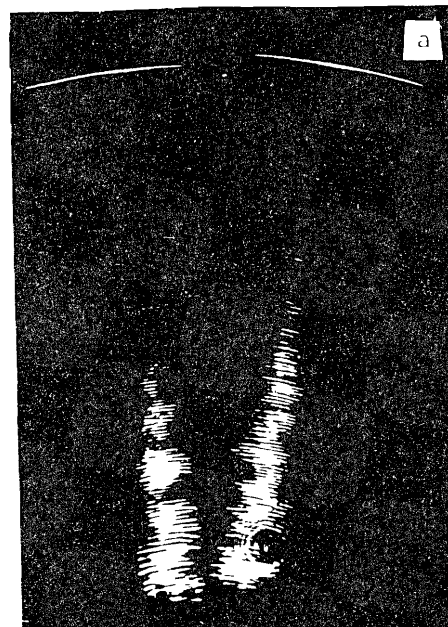


Рис.9. Вид четырех пар мезооптических сигналов макетного объекта, спроецированных на матовом стекле, вместе с фоновыми лучами, обусловленными невысокой дифракционной эффективностью киноформа $\approx 0,2/$.



стемы concentрических полос, а "в" - в положении, когда указанные мезооптические изображения проходят через первое /внутреннее/ пропускающее кольцо. Аналогичная картина наблюдается для остальных трех пар мезооптических изображений трех штрихов макетного объекта.

Рис.10. Фрагмент картины, приведенной на рис.9, которая была получена при помощи фотоаппарата.



Оценим теперь конструкцию реальной системы прямой регистрации событий, минуя стадию регистрации мезооптических сигналов от отдельных прямых следов частиц. Напомним ^{/7/}, что ширина полосы сканирования системы, рассмотренной в ^{/7/} с $\Delta\rho = 5$ мкм, $\alpha_{1/2} = 30^\circ$ /0,53/, $h = 200$ мкм, $N_z = 20$, равна $2\Delta\rho$ или 10 мкм.

Рис.11. Мезооптические изображения двух штрихов макетного объекта по одну сторону от оптической оси /а/; б - то же, что и в "а", но через затемненную часть пластинки с concentрическими пропускающими кольцами; в - в положении, когда два мезооптических изображения проходят через первое /внутреннее/ пропускающее кольцо.

Это значит, что шаг между соседними пропускающими кольцами может быть взят равным 10 мкм, а ширина отдельного кольца равна 5 мкм. Чтобы обеспечить надежную регистрацию событий, уровень дискриминации по амплитуде суммарной интенсивности света можно понизить до значения $0,3 I_{\max}$, а шаг между соседними полосами сканирования взять равным 5 мкм вместо 10 мкм.

4. ВЫВОДЫ

Результаты моделирования прямого метода регистрации "звезд" в ядерной фотоэмульсии при помощи мезооптического фурье-микроскопа /МФМ/, который содержит киноформ с кольцевым откликом в плоскости пространственных частот и систему концентрических пропускающих колец в плоскости формирования мезооптических изображений прямых следов частиц, подтверждают целесообразность разработки реальной системы для быстрого поиска событий в ядерной фотоэмульсии. Важная особенность рассматриваемого метода состоит в том, что он дает многоканальную развертку вершин "звезд" по глубине слоя ядерной фотоэмульсии вдоль z-координаты. Погрешности, с которыми можно фиксировать координаты вершины события в ядерной фотоэмульсии, составляют в реальной системе около 10 мкм вдоль каждой из трех координатных осей.

Авторы выражают благодарность Ш.Ф.Хамидову за активное участие в экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, P13-83-119, Дубна, 1983.
2. Астахов А.Я., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-83-120, Дубна, 1983.
3. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, P13-84-277, Дубна, 1984.
4. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, P13-85-378, Дубна, 1985.
5. Бенце Д. и др. ОИЯИ, P13-86-630, Дубна, 1986.
6. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-85-137, Дубна, 1985.
7. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-85-502, Дубна, 1985.
8. Коронкевич В.П. и др. - Автометрия, 1985, № 1, с.4.
9. Koronkevich V.P. et al. - Optik, 1984, v.67, No.2, p.257.
10. Бенце Д. и др. ОИЯИ, P13-86-240, Дубна, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 июня 1987 года.

Бенце Д. и др.

P13-87-474

Моделирование прямого метода регистрации "звезд" в ядерной фотоэмульсии при помощи киноформа с кольцевым откликом

Экспериментально промоделирован прямой метод регистрации "звезд" в ядерной фотоэмульсии при помощи мезооптического фурье-микроскопа /МФМ/, содержащего киноформ с кольцевым откликом и систему концентрических пропускающих колец. Исследованы эффекты, возникающие при несовпадении вершины "звезды" с центром системы концентрических пропускающих колец. Оценена погрешность, с которой могут быть зафиксированы координаты вершины "звезды". Даны расчетные характеристики реальной системы прямой регистрации "звезд" в ядерной фотоэмульсии на основе МФМ с числовой апертурой мезооптического элемента 0,53.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Bencze Gy.L. et al.

P13-87-474

Simulation of Direct Technique of "Star" Registration in Nuclear Emulsion by Means of the Kinoform with a Ring Response

The direct technique of "star" registration in nuclear emulsion was experimentally simulated by means of the Meso-optical Fourier Transform Microscope (MFTM) involving the kinoform with a ring response and the system of concentric transparent circles. The effects induced by the mismatching of the star vertex with the centre of the system of concentric transparent circles are investigated. The error with which the coordinates of the star vertex can be estimated is treated. The predicted performances of the real system of star registration in nuclear emulsion by means of the meso-optical element of the MFTM with numerical of 0.53 are given.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987