

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

С 655

P13-87-527

Л.М.Сороко

**МЕЗООПТИЧЕСКИЙ ФУРЬЕ-МИКРОСКОП:
СТРУКТУРА СИГНАЛОВ
В САГИТТАЛЬНОМ СЕЧЕНИИ**

1987

1. ВВЕДЕНИЕ

Мезооптический фурье-микроскоп (МФМ) предназначен для наблюдения и обмера прямых следов частиц в ядерной фотоэмульсии, идущих под небольшим углом к поверхности. Конструкция МФМ и принцип действия этого устройства даны в ^{1/}. В ^{2/} произведен анализ оптической части МФМ и получены фотографии мезооптических изображений прямых следов частиц, по которым были сделаны оценки разрешающей способности МФМ в меридиональном и сагиттальном сечениях. В экспериментах с МФМ, который содержал высококачественное мезооптическое зеркало, было показано ^{3/}, что пространственное разрешение в меридиональном сечении вдоль радиальной координаты составляет 1,5 мкм и близко к дифракционному пределу. В ^{4/} было отмечено, что в сагиттальном сечении МФМ представляет собой одномерную камеру обскура со щелью, ширина которой равна диаметру кроссовера сходящегося пучка света в месте расположения мезооптического зеркала МФМ. Однако структура мезооптических изображений прямых следов частиц на выходе МФМ в сагиттальном сечении еще не рассматривалась.

В настоящей работе дан анализ структуры мезооптических изображений прямых следов частиц в сагиттальном сечении МФМ. Доказано, что МФМ может рассматриваться в сагиттальном сечении как одномерная камера обскура. Приведены соотношения между разрешением МФМ в сагиттальном сечении вдоль угловой координаты и диаметром поля зрения системы. Описаны эксперименты, которые поясняют сущность процессов в МФМ, указывают на возможность при помощи МФМ локализовать конец прямого следа частицы, находящийся в пределах поля зрения системы, а также подтверждают соотношения, полученные в работе. В заключение приведены предельно возможные значения углового и пространственного разрешения МФМ, которые могут быть получены на действующей установке.

2. МЕЗООПТИЧЕСКОЕ ЗЕРКАЛО МФМ

На рис.1 дано аксонометрическое изображение мезооптического зеркала МФМ, которое представляет собой фигуру вращения с образующей в виде дуги эллипса ^{1/}. Один из фокусов эллипса находится на оптической оси системы, а второй лежит в плоскости ядерной фотоэмульсии. Геометрическое место вторых фокусов эллипса мезооптического зеркала МФМ представляет собой фокальную окружность ра-

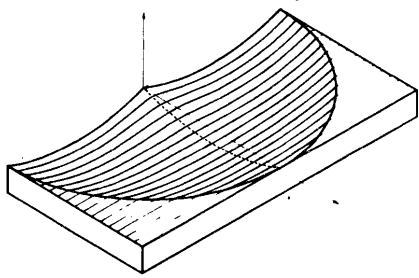


Рис.1. Аксонометрическое изображение поверхности мезооптического зеркала МФМ со следами эквидистантных плоскостей, которые идут параллельно оптической оси МФМ.

по величине, но и по знаку. На расстоянии $x = R/2$ радиус кривизны указанного сечения обращается в бесконечность.

На рис.3. приведена схема формирования частичных мезооптических изображений прямого следа частицы в сагиттальном сечении. Ход лучей показан для пяти различных участков мезооптического зеркала, при этом

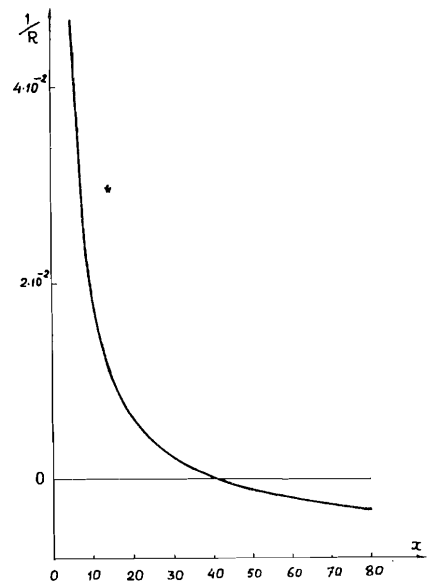


Рис.2. Кривизна мезооптического зеркала МФМ в сагиттальных сечениях в зависимости от расстояния до оптической оси.

диуса R . Если поверхность указанного мезооптического зеркала МФМ разрезать эквидистантными плоскостями, параллельными оптической оси МФМ, то получится совокупность кривых, которая показана на рис.1. Видно, что сечения мезооптического зеркала в меридиональном и в сагиттальном сечениях сильно отличаются друг от друга.

На рис.2. показана зависимость радиуса кривизны мезооптического зеркала МФМ в сагиттальном сечении от расстояния x до оптической оси. Видно, что радиус кривизны указанных сечений изменяется не только

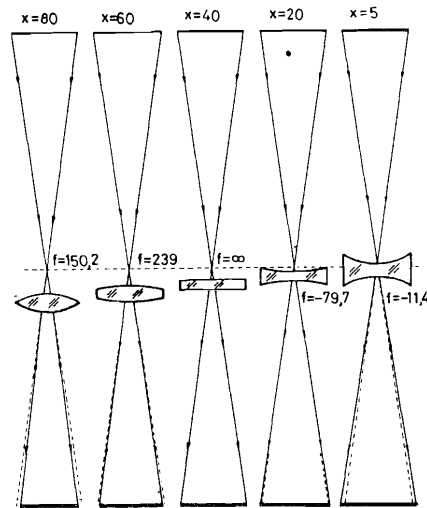


Рис.3. Схема формирования частичных мезооптических изображений прямого следа частицы в различных сагиттальных сечениях (см. текст).

для упрощения чертежа процесс отражения заменен условно на процесс эквивалентного преломления лучей света. Так, например, при $x = 5$ мм мезооптическое зеркало в сагиттальном сечении эквивалентно отрицательной цилиндрической линзе с фокусным расстоянием $f = -11,4$ мм, а при $x = 80$ мм — это положительная цилиндрическая линза с фокусным расстоянием $f = +150,2$ мм. Так как мезооптическое зеркало не является сферической поверхностью с центром в месте расположения прямого следа частицы, то дуга, на которой формируется фурье-образ прямого следа частицы, задается положением кроссовера сходящегося пучка света, показанного на рис.3 пунктирной линией. Это приводит к тому, что цилиндрические линзы мезооптического зеркала в сагиттальном сечении вносят различный вклад в формирование частичных мезооптических изображений прямых следов частиц в сагиттальном сечении. Так, например, при малых x наблюдается эффект увеличения длины частичного мезооптического изображения, а при больших x , наоборот, имеет место эффект уменьшения его длины. Однако указанный эффект вариации длин частичных мезооптических изображений прямого следа частицы не превышает 5% в реально действующей установке и поэтому в дальнейшем мы его не учитываем.

3. МЕЗООПТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПРЯМОГО СЛЕДА ЧАСТИЦЫ В САГИТАЛЬНОМ СЕЧЕНИИ. ТЕОРИЯ

На рис.4. показан ход лучей света в МФМ при формировании мезооптического изображения прямого следа частицы в сагиттальном сечении в предположении, что прямой след частицы освещается равномерно по длине, $I(x) = \text{const}$. Ось x лежит в плоскости ядерной фотоэмульсии, при этом след частицы освещен на длине l . Ось ω находится вблизи мезооптического зеркала, там, где сходящийся пучок света образует кроссовер диаметром $\Delta\omega$. Ось x' касается фокальной окружности в месте формирования мезооптического изображения прямого следа частицы. Функция $I(x')$, описывающая распределение интенсивности света в указанном мезооптическом изображении, может быть аппроксимирована трапецией.

Так как диаметр кроссовера сходящегося пучка света

$$\Delta\omega = \frac{\lambda}{\ell} H, \quad (1)$$

где λ — длина волны света, H — расстояние от ядерной фотоэмульсии до кроссовера сходящегося пучка света, изменяется обратно пропорционально ℓ , то при малых ℓ функция $I(x')$ имеет более плавные участки спада интенсивности света, чем в случае больших ℓ . Это есть результат того, что МФМ в сагиттальном сечении представляет собой одномерную камеру обскура со щелью, ширина которой задается соотношением (1). Эффектами боковых лепестков, окружающих основной

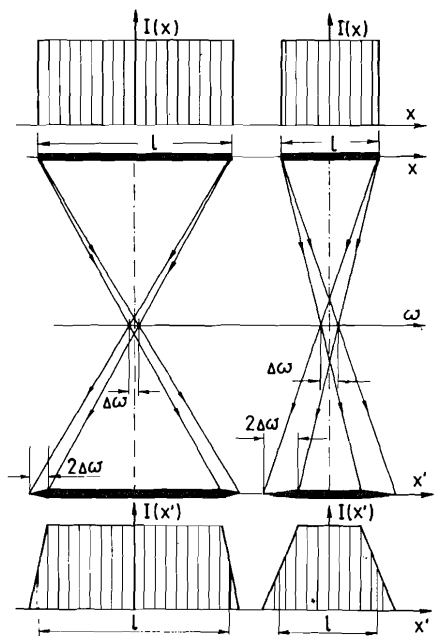


Рис.4. Схема формирования мезооптических изображений прямого следа частицы в сагиттальном сечении при $l > l_0$. Слева – случай большого поля зрения системы, справа – случай малого зрения системы. Вверху – графики распределения интенсивности света на входе системы. Внизу – то же на выходе системы.

кроссовер сходящегося пучка света, мы пренебрегаем, так как в реально действующей установке используется пучок света от лазера с гауссовой структурой, и соотношении (1) оказывается верным, если его перенести на эффективные размеры кроссовера сходящегося пучка света.

По мере уменьшения длины следа l или диаметра поля зрения D в случае, если прямой след частицы не заканчивается в пределах поля зрения системы, диаметр кроссовера пучка света $\Delta\omega$ увеличивается. Это продолжается до тех пор, пока $\Delta\omega$ не достигает значения

$$\Delta\omega_0 = \frac{l_0}{2} = \frac{\lambda N}{l_0} = \frac{\lambda N}{D}. \quad (2)$$

В этом положении, которое задается условием

$$l_0^2 = 2 \lambda N, \quad (3)$$

плоский участок функции $I(x')$ исчезает, а сама функция $I(x')$ превратится в треугольник. Это показано на рис.5 слева.

Рис.5. То же, что на рис.4, для $l = l_0$ (слева) и для $l < l_0$ (справа).

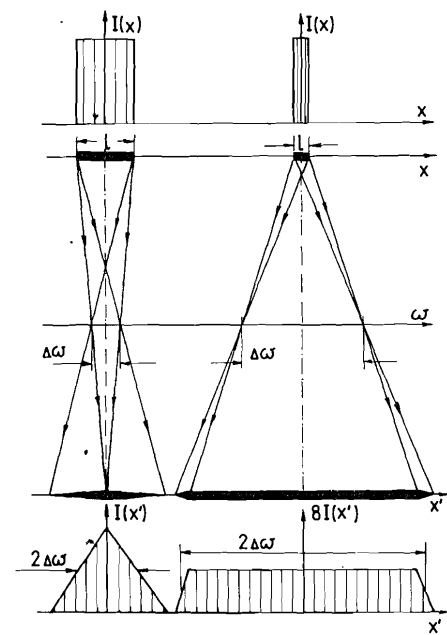


Рис.6. Структура мезооптических изображений штрихов двойного перекрестия для большого поля зрения (вверху) и для малого поля зрения (внизу) в условиях эксперимента, когда $l > l_0$.

Если $l < l_0$, то диаметр сходящегося пучка света начинает превышать длину следа частицы. Функция $I(x')$ расширяется до длины $2 \Delta\omega$, а ее интенсивность уменьшается до величины $l/2\Delta\omega$.

На рис.6 приведены ожидаемые мезооптические изображения объекта, имитирующего прямые следы частиц. Это – сетка от оптической скамьи ОСК-2 в виде двойного перекрестия. Всего в поле зрения видны четыре штриха шириной 20 мкм, а угол $\theta = 16^\circ \pm \pm 30'$. Слева приведен объект, справа – совокупность восьми мезооптических изображений. Числами 1, 2, 3, 4 пронумерованы четыре штриха сетки и соответствующие мезооптические изображения. Вверху показан случай с большим полем зрения, а внизу – с малым.

Иная картина наблюдается в эксперименте, когда $l < l_0$. На рис.7 показаны ожидаемые мезооптические изображения двух различных объектов: прямого перекрестия, совмещенного с центром поля зрения системы (вверху), и двух штрихов с углом раствора θ , расположенных так, что точка пересечения штрихов находится на краю поля зрения системы (внизу). Видно, что мезооптические изображения прямых штрихов перестают быть прямыми, они искривляются, ложатся на фокальную окружность и расширя-

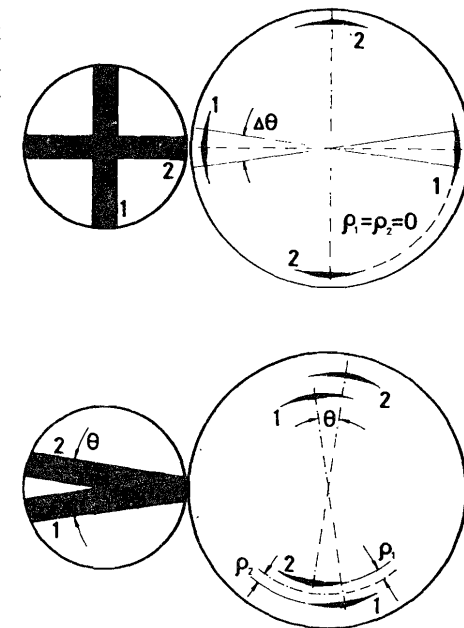
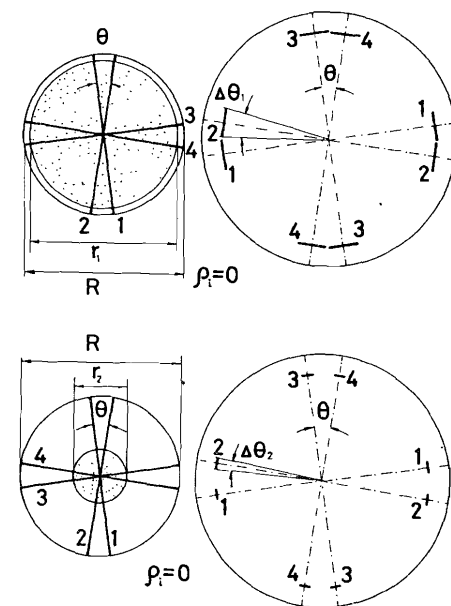


Рис.7. То же, что на рис.6, для $l < l_0$.

ются вдоль координаты θ так сильно, что разброс по углу мезооптического изображения $\Delta\theta$ становится больше самого угла θ : $\Delta\theta > \theta$. В то же время информация о радиальной координате штриха полностью сохраняется даже на таких мезооптических изображениях.

4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Чтобы проверить предсказания теории, изложенной выше, были выполнены моделирующие эксперименты. На рис.8 слева вверху показан объект исследования, внизу — схема эксперимента. Мезооптический элемент был выполнен в виде киноформа с кольцевым откликом^{5,6/}. Диаметр поля зрения в первом эксперименте был равен 9 мм. Справа вверху на рис.8 показаны мезооптические изображения двух штрихов, полученных в условиях $l > l_0$.

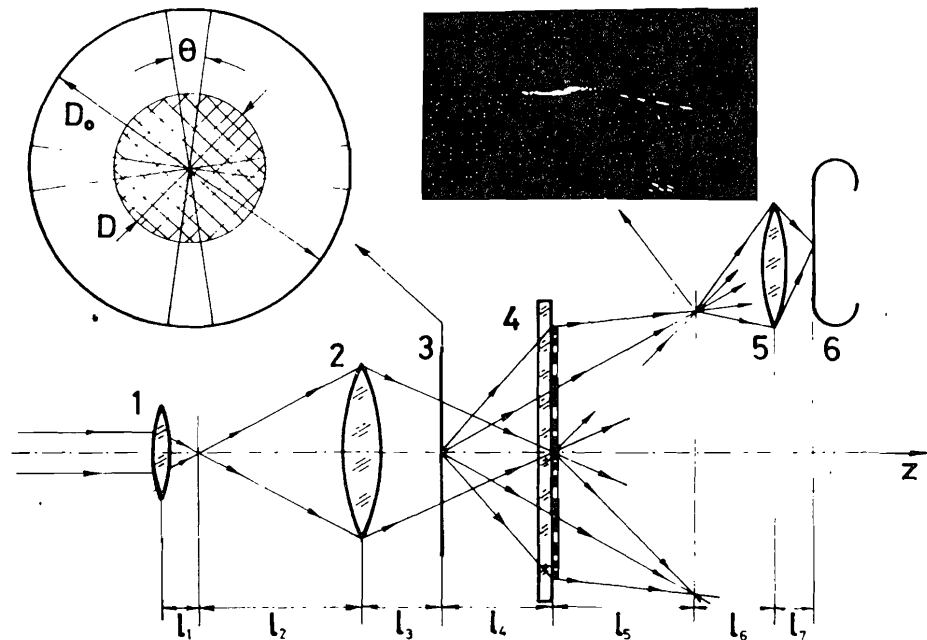


Рис.8. Схема эксперимента (внизу), объект исследования (слева вверху) и одно из мезооптических изображений двух штрихов (в центре) для $l > l_0$: 1 — линза, формирующая пучок света; 2 — линза преобразования Фурье; 3 — объект; 4 — киноформ с кольцевым откликом; 5 — объектив фотоаппарата; 6 — фотопленка.

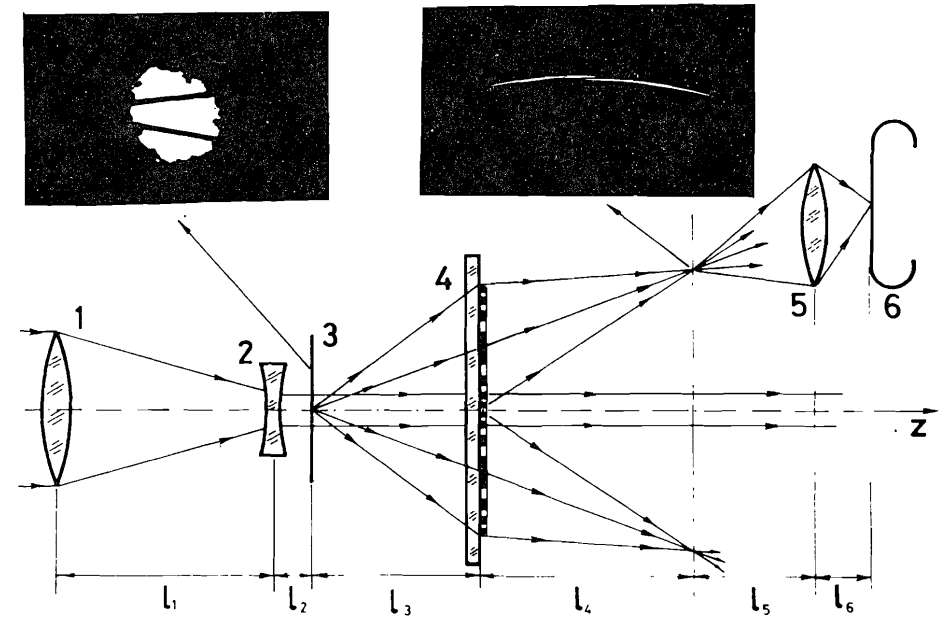


Рис.9. Схема эксперимента (внизу), объект исследования (слева вверху) и одно из мезооптических изображений объекта (в центре вверху) для $l \approx l_0$: 1 — линза преобразования Фурье, 2 — отрицательная линза, 3 — объект, 4 — киноформ с кольцевым откликом, 5 — объектив, 6 — фотопленка.

Для проведения экспериментов в условиях $l < l_0$ система освещения объекта была изменена таким образом, что диаметр пучка света в месте расположения объекта равнялся диаметру пучка света в месте расположения мезооптического киноформа. Для этого в систему освещения была введена отрицательная линза 2 (рис.9) так, что весь участок от объекта до мезооптического киноформа находился в области кроссовера пучка света диаметром $D_2 \approx 350$ мкм. Такой пучок света не выводит, строго говоря, двумерное преобразование Фурье. Объект наблюдения показан на рис.9 слева вверху, а его мезо-

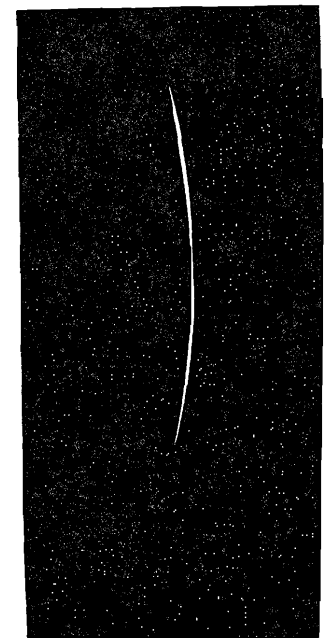


Рис.10. Мезооптические изображения двух штрихов с углом $\theta = 16^\circ \pm 30'$ в виде слившихся дуг, которые были получены в условиях $l \approx l_0$.

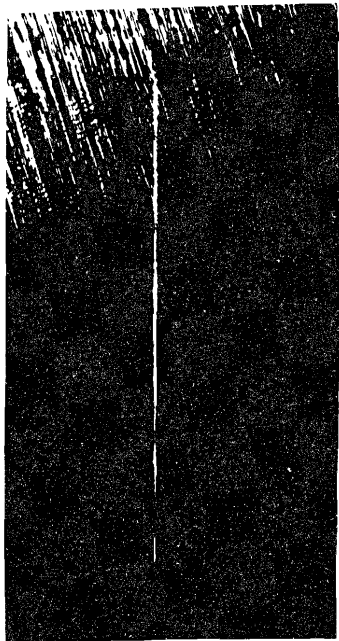


Рис.11. Мезооптическое изображение штриха, перед которым была установлена решетка из проволочек.

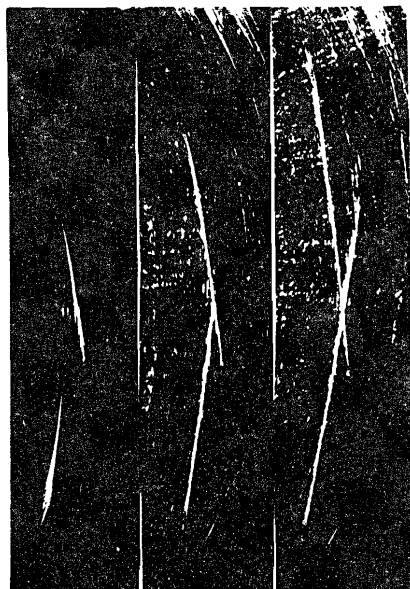


Рис.12. Мезооптические изображения штрихов, перед которыми была установлена полуплоская шторка для трех различных положений шторки.

оптические изображения — справа сверху. Последние имеют вид двух дуг, лежащих на соответствующих фокальных окружностях. Видно, что информация о радиальной координате, т.е. о расстоянии штриха до центра поля зрения системы, полностью сохраняется. Если точку пересечения двух штрихов переместить в центр поля зрения системы, то обе дуги мезооптических изображений сливаются вместе (рис.10).

Чтобы доказать, что эффект локализации в сагиттальном сечении определяется диаметром поля зрения, были выполнены следующие эксперименты. В первом из них перед двумя штрихами была установлена воздушная решетка из 6 проволочек диаметром 0,20 мм с шагом 0,5 мм. На рис.11 дано мезооптическое изображение затененного штриха, которое подвергалось периодической модуляции, несмотря на то, что диаметр проволочек был близок к значению $l_0 = D_2 = 0,35$ мм. Во втором эксперименте полуплоская шторка закрывала два штриха. На рис.12 показаны соответствующие изображения двух штрихов при различных положениях шторки. Видно, что шторка действует на каждое мезооптическое изображение штрихов независимо и что, по мере того,



Рис.13. Вид сетки из штрихов, для которой было получено мезооптическое изображение.



Рис.14. Мезооптическое изображение сетки из штрихов с размытыми краями.

как шторка закрывает все большую часть штрихов, размытие краев мезооптических изображений штрихов возрастает.

Наконец, был выполнен эксперимент по локализации конца штриха, который находится в центре поля зрения системы. В качестве объекта была взята сетка из штрихов, показанная на рис.13. Расстояние между двоянными штрихами равнялось $80 \text{ мкм} \pm 5 \text{ мкм}$, ширина каждого штриха 20 мкм. На рис.14 приведены мезооптические изображения двоянных штрихов, переходящих в одиночный штрих той же ориентации. Ширина размытой части краев мезооптических изображений около 30 мкм.

5. ПРЕДЕЛЬНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ МФМ

В заключение оценим предельные угловое и пространственное разрешения МФМ, которые могут быть получены на действующей установке^{1,2/} при наблюдении прямых следов частиц в ядерной фотоэмульсии. Эффективное угловое разрешение МФМ $\Delta\theta_{\text{эф}}$ определяется диаметром кроссовера пучка света $\Delta\omega$ и радиусом фокальной окружности R:

$$\Delta\theta_{\text{эф}} = \frac{\Delta\omega}{\sqrt{2} R} = \frac{\lambda H}{\sqrt{2} DR}, \quad (4)$$

где множитель $\sqrt{2}$ в знаменателе уравнения (4) связан с тем, что положение центра мезооптического изображения прямого следа частицы определяется как левым, так и правым концами. Поэтому для $\lambda = 0,63$ мкм, $D = 3$ мм, $H = 150$ мм, $R = 80$ мм, $\Delta\theta \approx \Phi = 1^\circ$. Эффективное пространственное разрешение вдоль радиальной координаты $\Delta\rho$ определяется апертурой половины мезооптического зеркала и равно

$$\Delta\rho = \frac{\lambda}{R} H = 1,2 \text{ мкм.} \quad (5)$$

Эффективная погрешность, с которой можно оценить координату конца следа частицы в центре поля зрения МФМ, равна $\sqrt{7}$

$$\Delta x = \Delta\omega = 30 \text{ мкм.} \quad (6)$$

Чтобы получить указанные предельные значения углового и пространственного разрешения МФМ, необходимо использовать оптический интерфейс в виде анаморфотной оптической системы. Такая система позволяет согласовать указанные пространственные разрешения с размерами отдельного элемента прибора с зарядовой связью (ПЗС). Так, например, увеличение оптического интерфейса вдоль радиальной координаты должно быть равно $M_\rho = 22 \text{ мкм} / 1,2 \text{ мкм} \approx 18$, а вдоль угловой координаты $M_\theta = 1$. В режиме поиска следов частиц заданной ориентации достаточно использовать систему переноса мезооптического изображения с $M_\rho^{\text{опт}} \approx 8 \div 12$.

В заключение автор выражает признательность Д. Бенце за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ P13-83-119, Дубна, 1983.
2. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ P13-84-277, Дубна, 1984.
3. Бенце Д. и др. ОИЯИ P13-86-630, Дубна, 1986.
4. Сороко Л.М. ОИЯИ P13-87-170, Дубна, 1987.
5. Коронкевич В.П. и др. Препринт ИАиЭ СО АН СССР, № 265, Новосибирск, 1985.
6. Бенце Д. и др. ОИЯИ, P13-86-240, Дубна, 1986.
7. Сороко Л.М. ОИЯИ P13-87-169, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 июля 1987 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р.55 к.
Д2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р.00 к.
Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р.50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р.30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р.50 к.
Д10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программирования и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983.	3 р.50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р.75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.00 к.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р.80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р.75 к.
Д3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986.	4 р.50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. /2 тома/	13 р.50 к.
Д1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. /2 тома/	7 р.35 к.
Д9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. /2 тома/	13 р.45 к.
Д7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986	7 р.10 к.
Д2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа-86". Дубна, 1986	4 р.45 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

P13-87-527

Сороко М.Л.
Мезооптический фурье-микроскоп: структура сигналов в сагиттальном сечении

Дан анализ структуры сигналов на выходе мезооптического фурье-микроскопа (МФМ) для ядерной фотоэмульсии в сагиттальном сечении. Показано, что МФМ в своем сагиттальном сечении может рассматриваться как одномерная камера обскура. Приведены соотношения между разрешением МФМ в сагиттальном сечении и диаметром поля зрения всей системы. Описаны эксперименты, которые иллюстрируют сущность процессов в МФМ, подтверждают способность МФМ локализовать пространственно конец прямого следа частицы в пределах поля зрения системы, а также поясняют наглядно соотношения, полученные в работе. В заключение приведены предельные значения углового и пространственного разрешения МФМ, которые могут быть получены на действующей установке.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

P13-87-527

Soroko L.M.
The Meso-optical Fourier-Transform Microscope: the structure of the Signals in the Sagittal Section

The structure of the signals at the output of the Meso-optical Fourier-Transform Microscope (MFTM) for nuclear research emulsion in the sagittal section is analyzed. It is shown that the MFTM in the sagittal section can be considered as one dimensional "pin-hole" chamber. The relations between the resolution of the MFTM in the sagittal section and the diameter of the field of view for the whole system are presented. There are described the experiments which illustrate the essence of the processes in the MFTM, support the ability of the MFTM to localize spatially the end of the straight line particle track in the field of view of the system, and also make more clearly the relations obtained in the paper. The extreme angular and spatial resolution of the MFTM which can be attained in the really working system are deduced finally.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987