

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P13-86-630

Д.Бенце, А.Кишваради, Г.Нитраи, Л.М.Сороко

**НАБЛЮДЕНИЕ
СЛЕДОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПРОТОНОВ
ПРИ ПОМОЩИ
МЕЗООПТИЧЕСКОГО ФУРЬЕ-МИКРОСКОПА
ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ФОТОЗМУЛЬСИИ**

1986

1. ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты по наблюдению следов частиц, образованных ускоренными релятивистскими ядрами неона в ядерной фотоэмульсии, при помощи мезооптического фурье-микроскопа (МФМ), описаны в^{1/}. Там же приведены улучшенные метрические характеристики МФМ, введена система координат, в которой отображается геометрическая информация о прямых следах частиц. Информация о прямом следе частицы концентрируется при помощи МФМ в малое пятно света (мезооптический сигнал) без помощи операции сканирования по глубине. Фотоэлектрическая система и компьютер требуются для того, чтобы произвести считывание сформированной геометрической информации о прямых следах частиц: угла ориентации прямого следа частицы, расстояния от центра поля зрения и z-координаты. Процесс формирования мезооптического сигнала в МФМ рассмотрен в терминах фурье-оптики^{2/}. В^{2/} прослежен непрерывный переход от традиционного оптического микроскопа к мезооптическому фурье-микроскопу, найдена функция размытия точки в МФМ и приведен вид мезооптического сигнала в МФМ от прямой линии. Связь между расположением прямых следов частиц в ядерной фотоэмульсии и мезооптическими сигналами на выходе МФМ проанализирована в^{3/}. Показано, что сигналы на выходе МФМ содержат информацию о z-координате прямого следа частицы, а также описаны алгоритмы поиска ядерных взаимодействий ("звезд") по сигналам на выходе МФМ. В^{4/} рассмотрен эффект конечного числа зерен в прямом следе частицы в ядерной фотоэмульсии, проведен теоретический анализ основных параметров МФМ: точности измерений, разрешения по пространственным координатам, отношения сигнала к шуму, глубины фокуса и фактора быстродействия. Преимущества МФМ над традиционным оптическим микроскопом представлены в количественном виде. В^{5/} описаны результаты полуавтоматических измерений прямых следов частиц при помощи МФМ для ядерной фотоэмульсии с разрешением по радиальной координате около 60 мкм. При помощи МФМ были обнаружены и обмерены все прямые следы частиц с большой ионизацией, которые находились в объеме ядерной фотоэмульсии на заданной площадке и которые попадали в заданный интервал углов ориентации. Положение прямых следов частиц в пространстве было зафиксировано при помощи МФМ в пределах ожидаемой погрешности измерений как по радиальной, так и по угловой координатам.

Как было отмечено в^{5/}, главной причиной низкой точности измерений по радиальной координате было недостаточно высокое качество мезооптического зеркала, изготовленного на обычном токарном станке. Полученное в этих условиях низкое отношение сигнала к шуму не позволяло надежно регистрировать следы релятивистских протонов с минимальной ионизацией в ядерной фотоэмульсии. В настоящей работе описаны опыты по определению качества мезооптического зеркала, изготовленного из металла методом прецизионного алмазного точения. Экспериментально показано, что ширина мезооптического кольца, формируемого указанным зеркалом для точечного источника света, равна 1,5 мкм. Описаны также опыты по регистрации мезооптических изображений и сигналов от следов релятивистских протонов с минимальной ионизацией при помощи МФМ для ядерной фотоэмульсии, оснащенного указанным выше мезооптическим зеркалом.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕЦИЗИОННОГО МЕЗООПТИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА МФМ

Новое мезооптическое зеркало было изготовлено из сплава АМГ-3 методом прецизионного алмазного точения^{6/} и имело характеристики, существенно более высокие, чем мезооптическое зеркало, используемое в^{1, 5/}. На рис.1 дана схема эксперимента по измерению качества нового мезооптического зеркала. Пучок света 1 от гелий-неонового лазера мощностью около 5 мВт проходил через объектив 2 от оптического микроскопа 02АМ-90 с увеличением 90X и числовой апертурой 1,30 и освещал рабочую часть мезооптического зеркала 3. Если точечный источник света, формируемый объективом 2, совпадал с положением первого (внутреннего) фокуса эллипса, являющегося образующей мезооптического зеркала 3, то в области внешней фокальной окружности мезооптического зеркала 3 во втором (внешнем) фокусе указанного эллипса образовывалось яркое мезооптическое кольцо, ширина и структура которого определялись качеством мезооптического зеркала 3. Мезооптическое кольцо фотографировалось при помощи объектива 4 от микроскопа 06АМ-60 с увеличением 60X и числовой апертурой 1,0 на фотопленке 5 типа "Микрат 300". На рис.2 даны фотографии небольшой дуги мезооптического кольца при различных временах экспозиции. На рис.3 дан профиль распределения интенсивности света в мезооптическом кольце вдоль радиальной координаты. Ширина на полувысоте равна $\Delta x_{\text{экс.}} = 1,5$ мкм. Если учесть, что угловая апертура одной половины мезооптического зеркала 3 равна $25,7^\circ$ или 0,446 рад и дает апертурное разрешение $\Delta x_{\text{ап.}} = 1,4$ мкм, а размер точечного источника света, создаваемого объективом 2, равен $\Delta x_{\text{об.}} = \lambda/A = 0,628/1,3 = 0,48$ мкм, то полученный нами экспериментальный результат свидетельству-

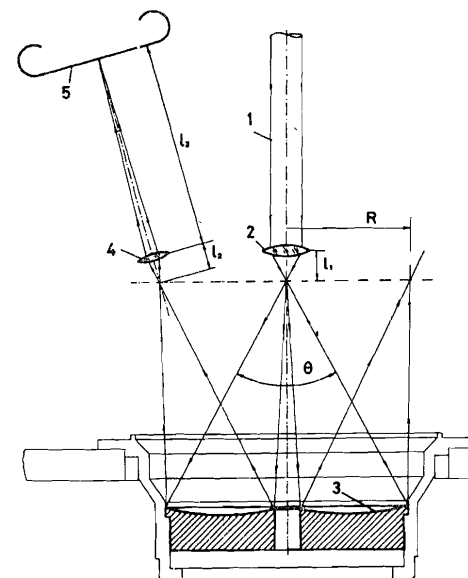


Рис. 1. Схема измерения характеристик мезооптического зеркала, изготовленного из сплава АМГ-3 методом прецизионного алмазного точения: 1 - коллимированный пучок света от лазера, 2 - объектив микроскопа, 3 - мезооптическое зеркало, 4 - объектив микроскопа, 5 - фотопленка.

Рис. 2. Фотографии небольшой дуги мезооптического кольца при временах экспозиции: а - 1/8 с, б - 1/4 с, в - 1/2 с, г - 1 с.

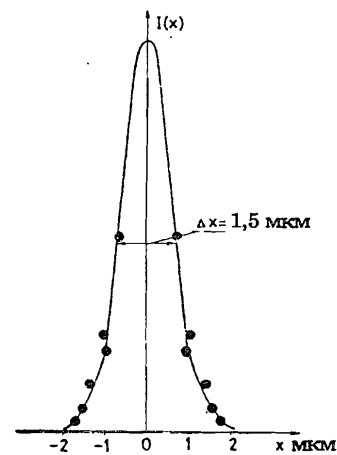
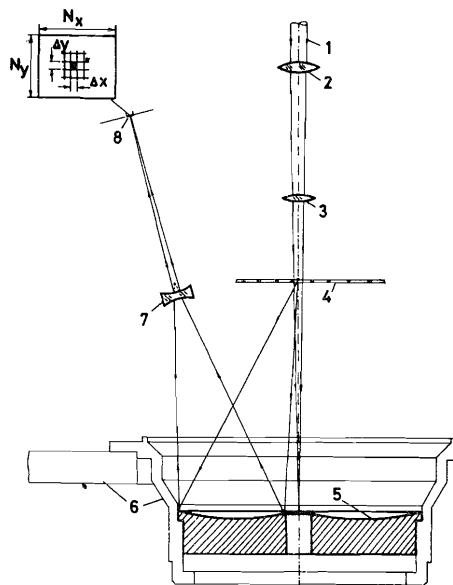


Рис. 3. Профиль распределения интенсивности в мезооптическом кольце вдоль радиальной координаты.

ет о том, что сложный тороидальный профиль мезооптического зеркала с образующей в форме эллипса был изготовлен с высокой точностью. Если сопоставить полученную в данной работе ширину мезооптического кольца $\Delta x_{\text{экс.}} = 1,5$ мкм с характеристиками мезооптического зеркала, используемого в^{5/1}, где $\Delta x_{\text{экс.}} \approx 60$ мкм, то можно утверждать, что качество нового мезооптического зеркала дает фундаментальное (~300:1) улучшение метрических характеристик МФМ.

3. МЕЗООПТИЧЕСКИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ СЛЕДОВ

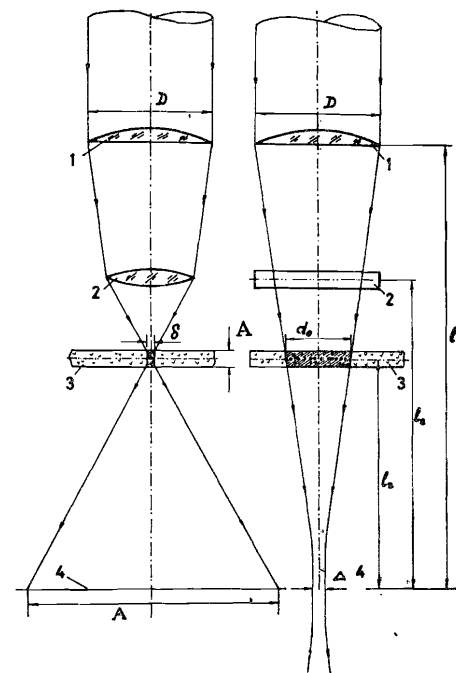
На рис. 4 дана схема регистрации мезооптических изображений и мезооптических сигналов на выходе МФМ от прямых следов частиц заданной ориентации в ядерной фотоэмульсии. Пучок света 1 от гелий-неонового лазера проходит через линзу преобразования Фурье 2, через собирающую цилиндрическую линзу 3 и просвечивает слой ядерной фотоэмульсии 4. Свет, дифрагированный на прямых следах частиц, идущих перпендикулярно плоскости чертежа, попадает на мезооптическое зеркало 5, установленное в МФМ 6, отражается от зеркала 5 и попадает на рассеивающую цилиндрическую линзу 7, при помощи которой на матрице 8 прибора с зарядовой связью (ПЗС) формируется мезооптический сигнал.



В первой серии измерений система из рассеивающей цилиндрической линзы 7 и матрицы ПЗС 8 была убрана. Мезооптические изображения прямых следов частиц фотографировались при помощи объектива 4, показанного на рис. 1. На рис. 5 показан в соответствующих масштабах сходящийся пучок света в поперечном (слева) и продольном (справа) относительно прямого следа

Рис. 4. Схема формирования и регистрации мезооптических изображений и мезооптических сигналов на выходе МФМ от прямых следов частиц заданной ориентации в ядерной фотоэмульсии: 1 - пучок света от лазера, 2 - линза преобразования Фурье, 3 - собирающая цилиндрическая линза, 4 - слой ядерной фотоэмульсии, 5 - мезооптическое зеркало, 6 - МФМ, 7 - рассеивающая цилиндрическая линза, 8 - матрица ПЗС.

Рис. 5. Структура сходящегося пучка света в поперечном (слева) и продольном (справа) относительно прямого следа частицы сечениях: 1 - линза преобразования Фурье, 2 - собирающая цилиндрическая линза, 3 - слой ядерной фотоэмульсии, 4 - мезооптическое зеркало. Размеры в поперечном направлении относительно оптической оси увеличены для наглядности: $D = 1,9$ мм, $d_0 = 1,0$ мм, $l_1 = 280$ мм, $l_2 = 197$ мм, $l_3 = 146$ мм, $\delta = 0,05$ мм, $\Delta = 0,09$ мм, $A = 1,85$ мм, $f_1 = 330$ мм, $f_2 = 57$ мм.



частицы сечениях. Собирающая цилиндрическая линза 2 на рис. 5 или линза 3 на рис. 4 уменьшала ширину поля зрения МФМ и компенсировала потери интенсивности света, которые возникали в рассеивающей цилиндрической линзе 7 при формировании мезооптических сигналов.

На рис. 6 даны мезооптические изображения следов, образованных в ядерной фотоэмульсии протонами с энергией 250 ГэВ. Фотография на рис. 6а получена при помощи объектива от микроскопа ОМ-21 с увеличением 20X и числовой апертурой 0,65, а на рис. 6б - при помощи объектива М-42 с увеличением 8X и числовой апертурой 0,20. Глубина резкости в первом случае (рис. 6а) составляла около 20 мкм, а во втором (рис. 6б) - около 200 мкм. На рис. 7 дан профиль распределения интенсивности света в мезооптическом изображении релятивистского следа протона с минимальной ионизацией, которое проведено на рис. 6а вдоль радиальной координаты. Ширина пика на полувысоте равна $\Delta x_{p.c.} = 1,8$ мкм. Это значение хорошо согласуется с ожидаемой шириной, если учесть, что ширина мезооптического кольца на полувысоте для точечного источника света равна 1,5 мкм, размытие от объектива 20X; $N.A. = 0,65$ составляет ~0,5 мкм, а реальная ширина следа частицы 0,6-0,7 мкм. При этом ширина мнимого изображения следа частицы вследствие преломления света на границе слоя ядерной фотоэмульсии равна 0,4-0,5 мкм. Ширина мезооптических изображений следов релятивистских протонов на рис. 6б, полученных при помощи малоапертурного объектива 8X; $N.A. = 0,20$, равна 6-7 мкм.

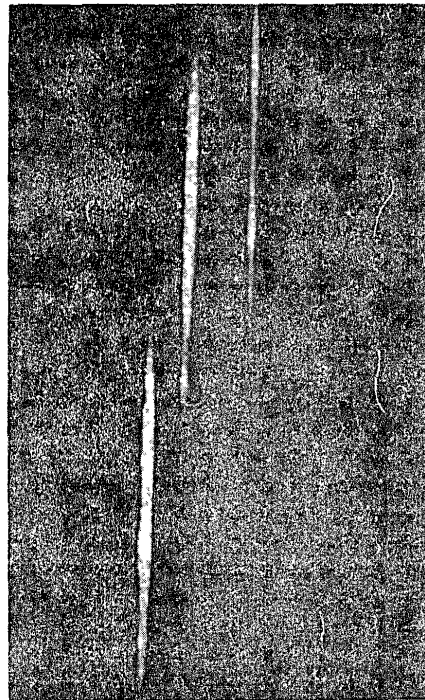
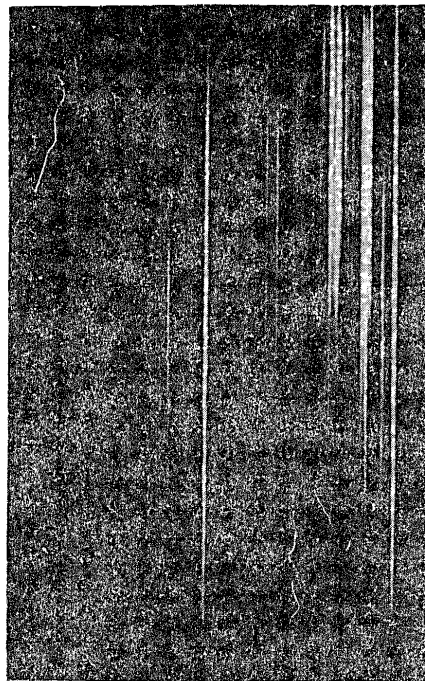


Рис. 6. Мезооптические изображения следов, образованных протонами с энергией 250 ГэВ в ядерной фотоэмульсии: а — при помощи объектива 20 X; N.A. = 0,65; б — при помощи объектива 8 X; N.A. = 0, 20.

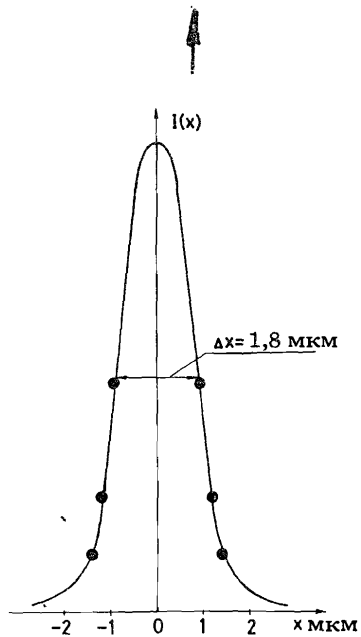


Рис. 7. Профиль распределения интенсивности света в мезооптическом изображении релятивистского следа протона с минимальной ионизацией в ядерной фотоэмульсии, которое приведено на рис. 6а, вдоль радиальной координаты.

4. МЕЗООПТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ РЕЛЯТИВИСТСКИХ СЛЕДОВ

Для получения фотоэлектрических, а затем телевизионных сигналов от релятивистских следов протонов с ионизацией, близкой к минимальной, была использована схема эксперимента, показанная на рис.4. Фотоэлектрические сигналы, формируемые на выходе ПЗС-матрицы после дискриминации по амплитуде, поступали на телевизионный дисплей. На рис. 8 показан мезооптический сигнал релятивистского следа протона на экране телевизионного дисплея. Видно, что мезооптический сигнал от релятивистских следов, сформированный при помощи нового мезооптического зеркала, имеет контраст, достаточный для регистрации и последующей обработки мезооптических сигналов при помощи ЭВМ.

Рис. 8. Мезооптический сигнал релятивистского следа протона в ядерной фотоэмульсии на экране телевизионного дисплея. Ширина сигнала в плоскости матрицы ПЗС равна 90 мкм, длина сигнала — 160 мкм.

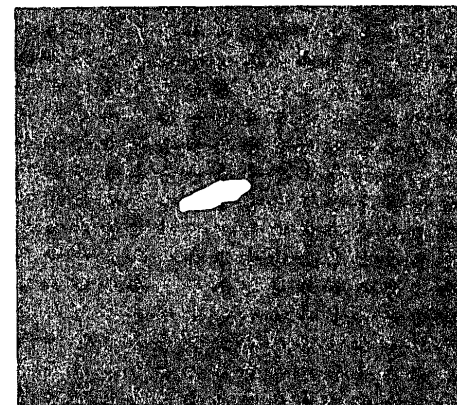


Рис. 9. Мезооптический сигнал от сплошного следа неона шириной ~1,5 мкм. Масштаб вдоль двух координат равен 1:2 по отношению к масштабу на рис.8.

Для сравнения на рис. 9 в уменьшенном масштабе 1:2 показан мезооптический сигнал от сплошного следа неона шириной около 1,5 мкм, который был исследован^{5,7/} при той же интенсивности света и при том же пороге дискриминации по амплитуде, что и для релятивистского следа протона на рис. 8. Сложная форма этого сигнала и наличие лепестков в мезооптическом сигнале обусловлены шумами от дискретной струк-



Рис. 10. Тот же сигнал, что и на рис.9, но при интенсивности света, уменьшенной в 10 раз.

туры профиля нового мезооптического зеркала при управлении от ЭВМ процессом прецизионного алмазного точения. Мезооптический сигнал от того же следа неона, полученный в тех же условиях при интенсивности света, уменьшенной в 10 раз, показан на рис.10.

5. ВЫВОДЫ

На основе полученных результатов можно утверждать следующее: 1) используемая технология изготовления мезооптического зеркала из металла методом прецизионного алмазного точения позволяет получить мезооптическое кольцо шириной 1,5 мкм, которая близка к теоретическому пределу 1,4 мкм, обусловленному дифракцией света на половине мезооптического зеркала; 2) новое мезооптическое зеркало формирует контрастные мезооптические сигналы от релятивистских следов протонов с минимальной ионизацией в ядерной фотоэмульсии и тем самым открывает возможность использования МФМ в экспериментах по исследованию свойств короткоживущих элементарных частиц.

Авторы выражают глубокую благодарность Г.В.Маринину и Е.М.Захаревич, взявшим на себя труд по изготовлению нового мезооптического зеркала, а также А.Я.Астахову и Я.И.Розенберг за помощь при составлении управляющих программ для ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астахов А.Я. и др. В кн.: Нейтринный детектор. ИФЗ-ОИЯИ, Д1,2,13-84-332, Дубна, 1984, с. 142-146.
2. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-85-136, Дубна, 1985.
3. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-85-137, Дубна, 1985.
4. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-85-138, Дубна, 1985.
5. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, P13-85-378, Дубна, 1985.
6. Цеснек Л.С. и др. Металлические зеркала, "Машиностроение", М., 1983, с.86.
7. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, P13-84-277, Дубна, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 сентября 1986 года.

Бенце Д. и др.

P13-86-630

Наблюдение следов релятивистских протонов при помощи мезооптического фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии

Описаны опыты по определению качества мезооптического зеркала, изготовленного из металла методом прецизионного алмазного точения. Экспериментально показано, что ширина мезооптического кольца, формируемого указанным зеркалом для точечного источника света, равна 1,5 мкм. Описаны опыты по регистрации мезооптических изображений и сигналов от следов релятивистских протонов с минимальной ионизацией в ядерной фотоэмульсии при помощи мезооптического фурье-микроскопа (МФМ).

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Bencze Gy.L. et al.

P13-86-630

Observation of Relativistic Proton Tracks By Means of Meso-optical Fourier-Transform Microscope for Nuclear Emulsion

Quality control experiments on the meso-optical mirror made from metal by precision diamond turning are described. It is shown experimentally that the width of the meso-optical ring produced by this mirror for the point source of light is equal to 1.5 μm . Experiments to obtain meso-optical images and signals of tracks of relativistic protons giving minimal ionization in the nuclear emulsion by means of meso-optical Fourier-Transform Microscope (MFTM) are described.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986