

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ МЕЗООПТИКИ

Ю. А. Батусов, Л. М. Сороко

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	457
МЕТОД ЩЕЛИ	459
ФУРЬЕ-ОБРАЗ ПРЯМОГО СЛЕДА ЧАСТИЦЫ	460
МАСКИ УОЛША	462
ПЗС-СКАНЕР	464
ФУРЬЕ-МИКРОСКОПИЯ	465
ПРОТОТИП МЕЗООПТИЧЕСКОГО ФУРЬЕ-МИКРОСКОПА	471
ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА МФМ	473
МФМ С ПРЕЦИЗИОННЫМ МЕЗООПТИЧЕСКИМ ЗЕРКАЛОМ	474
МФМ С ДВОЙНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ	479
О ВЕРТИКАЛЬНЫХ И НАКЛОННЫХ СЛЕДАХ ЧАСТИЦ	485
ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА	488
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	491
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	493

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ МЕЗООПТИКИ

Ю. А. Батусов, Л. М. Сороко

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Подробно изложена история научно-методических разработок, выполненных в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ (1982–1996 гг.) с целью создания мезооптического фурье-микроскопа для прямых следов заряженных частиц с малым углом погружения. Как по международному приоритету, так и по достоверности результатов полученные данные свидетельствуют о том, что мезооптическая группа ЛЯП ОИЯИ создала теоретический и экспериментальный фундамент, необходимый и достаточный для дальнейшего продолжения научных исследований и разработок по мезооптике. Отмечено, что еще до возникновения мезооптики в ЛЯП ОИЯИ велись поиски принципиально новых систем обработки трехмерной трековой информации без традиционного алгоритма разбиения следа частицы на составляющие элементы. Детально описаны исследования, основанные на использовании интегрального образа исходного изображения. Показано, что только при помощи мезооптики впервые удалось полностью убрать операцию перефокусировки по глубине без потери информации о z -координате и угле погружения следа частицы θ_z .

This paper is devoted to the creation history of the Mesooptical Fourier-Transform Microscope (MFTM) for nuclear photoemulsion in the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR (1982–1996). The aim of the accomplished scientific methodological studies was to construct a working MFTM for straight line particle tracks with small dip angle. Both international priority and the results obtained allow the conclusion that the mesooptical section in the LNP JINR has indeed constructed the theoretical and experimental background needed for scientific research and practical realization of new mesooptical devices in the future. It has been found out that just before the mesooptics creation some scientists from LNP JINR built fundamentally new automatic treatment systems for 3D-information by rejecting the traditional algorithm of subdivision of the particle track image into its constituent components. Some proposals for using integral transforms of the whole input images were made as well. Meanwhile we must stress that only mesooptics made it possible for the first time to remove completely operations of refocusing in depth without any loss of information about the z -coordinate and the dip angle θ_z of the particle track in the nuclear photoemulsion.

PACS: 01.65.+g; 07.79.Fc

ВВЕДЕНИЕ

Характерная особенность информации, поступающей с трековых детекторов, состоит в том, что она имеет вид прямолинейных или почти прямолинейных объектов. Даже неопытный глаз без труда различит отдельные следы частиц в виде цепочки точек, которые образуют прямые линии, дуги окружностей или кривые третьего порядка. Там, где произошло событие, следы частиц выходят из одной точки и образуют «звезду». Поэтому число независимых

компонент информации на фотографиях в трековых камерах относительно невелико. Так, в кадре с 10^7 ячеек только 10^5 из них оказываются информационно значимыми.

Особое место в технике физического эксперимента занимает метод ядерных фотоэмульсий — один из самых долгоживущих в ядерной физике. В современных слоях ядерной фотоэмульсии размеры проявленных зерен серебра в следах заряженных частиц с минимальной ионизацией составляют $\sim 0,5$ мкм. Поэтому этот метод остается до сих пор самым прецизионным.

Без применения оптического микроскопа увидеть след частицы невозможно. Для наблюдения в трехмерном объеме требуется стереоскопический микроскоп. Однако из-за того, что глубина резкости обычного оптического микроскопа составляет всего 2–5 мкм, сделать такой стереомикроскоп практически невозможно. Это сильно затрудняет создание автоматизированных систем просмотра и обмера следов частиц в ядерной фотоэмульсии.

В обзоре показано, каким образом с помощью мезооптики удается решить эти главные проблемы автоматизации.

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в ходе совместных научно-методических разработок, проведенных с участием сотрудников ОИЯИ из СССР и Венгерской Народной Республики (ВНР), впервые был создан мезооптический фурье-микроскоп (МФМ) (1988).

Активными участниками этих разработок были:

— от Венгерской Народной Республики: Д. Бенце, Д. Вэг, А. Кишвареди, И. Молнар, Л. Молнар, Т. П. Нидермайер, Г. Нитраи, И. Торма и И. Фараго;

— от Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения АН СССР: И. Г. Пальчикова и А. Г. Полещук;

— от Лаборатории информационных технологий ОИЯИ: А. Я. Астахов, Г. М. Комов, В. И. Краснослободцев, И. И. Скрыль;

— от Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ: Ю. А. Батусов, В. П. Румянцев, В. И. Сидорова, Л. М. Сороко, В. В. Терещенко, С. В. Терещенко;

— от завода «Красный пролетарий»: В. С. Горохов, Е. М. Захаревич, Г. В. Маринин.

Впервые в истории оптического микроскопа было экспериментально показано, что:

1) прямой след частицы в поле зрения микроскопа воспринимается в МФМ как *единое целое*, минуя процесс разбиения изображения следа частицы на его составляющие элементы;

2) информация о положении в пространстве следа частицы сжимается в МФМ до *двух* точечноподобных сигналов без какого-либо участия вычислительных средств;

3) полностью убрана операция перефокусировки по глубине залегания следа частицы с сохранением информации о z -координате и угле погружения θ_z ;

4) впервые в истории метода ядерной фотоэмульсии был изготовлен действующий прототип МФМ для селективного наблюдения и обмера прямых следов частиц с малым углом погружения.

1. МЕТОД ЩЕЛИ

Еще в 1958–1961 гг. были начаты разработки автоматизированных систем обработки трековой информации. До этого повсеместно использовали ручной метод на основе измерительного оптического микроскопа.

Главной особенностью всех автоматизированных систем обработки было то, что изображение следа частицы разбивали на составляющие элементы, измеряли их координаты, а полученные данные вводили в компьютер для нахождения искомым кинематических характеристик следов частиц. Такой подход стал со временем традиционным.

Первым, кто нарушил эту традицию, был С. М. Коренченко [1, 2], разработавший принципиально новый метод автоматического просмотра и обмера следов частиц при помощи щелевого устройства.

На рис. 1 показана узкая пропускающая щель, которая состоит из нескольких частей. Ее можно перемещать поступательно или вращать вокруг центра.

Щель передвигают в пределах кадра до тех пор, пока ее освещенность не уменьшится ниже определенного уровня. Затем ищут такое положение, при котором освещенность щели не станет первоначальной.

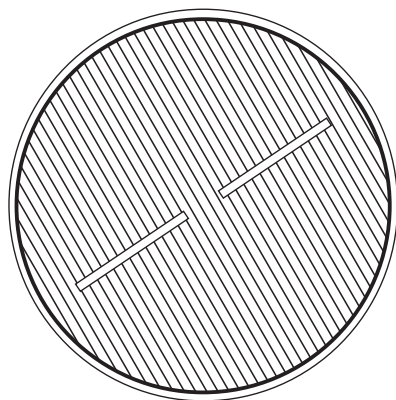


Рис. 1. Вид узкой пропускающей щели, состоящей из двух частей

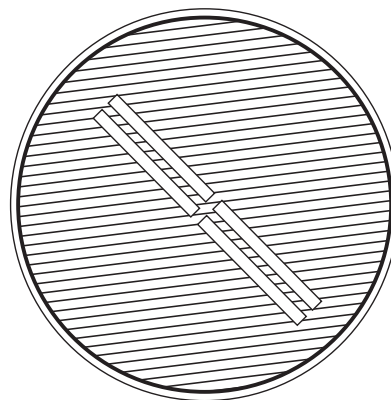


Рис. 2. Второй вариант щелевого устройства, состоящий из четырех фотодетекторов

Во втором варианте система со щелью была заменена прибором из четырех фотодетекторов (рис. 2). Сигналы от фотодетекторов сравниваются между собой и формируют два сигнала рассогласования. По этим сигналам следящая система устанавливает прибор на след частицы. Было показано, что время, затраченное на обработку четырехлучевой звезды таким прибором, составляет 10–15 мин, что в 20 раз меньше времени, которое затрачивалось бы на обработку такого же события на измерительном микроскопе с использованием алгоритма поэлементного считывания информации.

2. ФУРЬЕ-ОБРАЗ ПРЯМОГО СЛЕДА ЧАСТИЦЫ

Чтобы радикально ускорить процесс автоматической обработки трековой информации, в [3] было предложено обрабатывать кадр со следами частиц не по частям, как, например, в методе щели, а *целиком*. Для этого получают оптически интегральный образ исходного кадра. Используют точечный источник света и положительную линзу (рис. 3) [6].

Важное преимущество такого метода состоит в том, что фурье-образ прямого следа частицы остается неподвижным, если мы поступательно перемещаем весь кадр. Фурье-образы нескольких прямых следов частиц пересекаются в одной точке, которая лежит на оптической оси. Благодаря этому считывание выходной информации можно вести системой из радиально расположенных щелей и фотоприемников, установленных за каждой щелью.

Чем больше число радиальных щелей, тем выше угловое разрешение системы. Однако одновременно с этим ухудшается отношение сигнала к шуму. Чтобы ослабить этот эффект, систему радиальных щелей заменяют голограммами декад, которые расположены последовательно вдоль оптической оси системы.

Проблема разрешающей способности по глубине решается, если трековую камеру освещать по двум взаимно перпендикулярным направлениям [4].

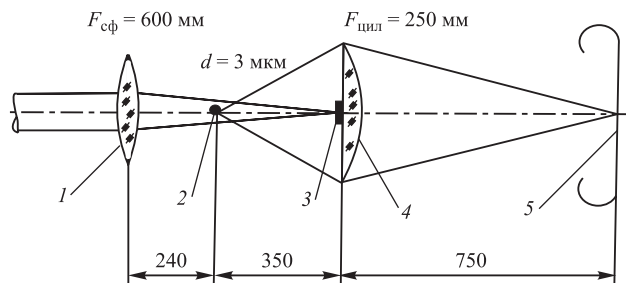


Рис. 3. Схема формирования фурье-образа: 1 — линза преобразования Фурье; 2 — объект; 3 — щорка; 4 — изображающая линза; 5 — экран наблюдения

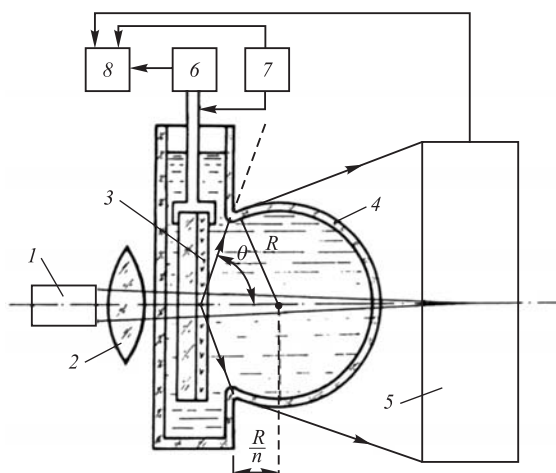


Рис. 4. Система формирования фурье-образа прямого следа частицы с иммерсионной ванной, выходная поверхность которой является полусферой: 1 — лазер; 2 — линза преобразования Фурье; 3 — слой ядерной фотоэмульсии; 4 — стенка иммерсионной ванны; 5 — экран наблюдения; 6 — система перемещения ядерной фотоэмульсии; 7 — указатель положения; 8 — блок памяти

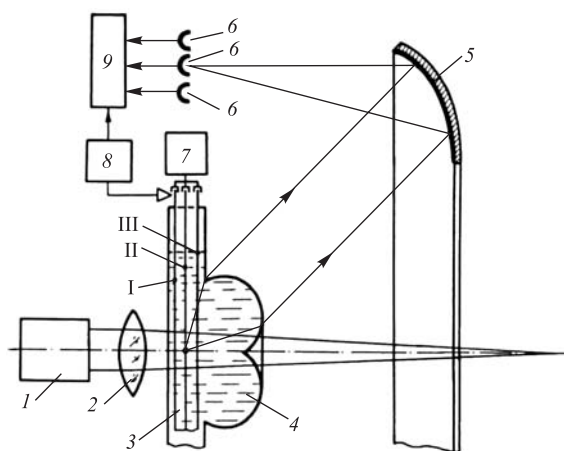


Рис. 5. Схема фурье-микроскопа для селективного просмотра трех слоев ядерной фотоэмульсии: 1 — лазер; 2 — линза преобразования Фурье; 3 — слои ядерной фотоэмульсии; 4 — стенка иммерсионной ванны с двумя осями симметрии; 5 — экран наблюдения; 6 — три системы регистрации; 7 — система перемещения слоев ядерной фотоэмульсии; 8 — указатель положения; 9 — блок памяти

Аналогичным образом можно автоматизировать поиск и обмер события в виде излома, а также измерять кривизну следов [5].

Чтобы улучшить эффективность светосбора, вводят иммерсионную ванну [7], выходная поверхность которой выполняется в виде полусферы (рис. 4). Для одновременного просмотра нескольких слоев ядерной фотоэмульсии выходную поверхность ванны выполняют в виде фигуры вращения с двумя осями симметрии [8]. В результате лучи дифрагированного света на выходе такой иммерсионной ванны становятся взаимно параллельными.

На рис. 5 дана схема фурье-микроскопа, которая позволяет селективно вести просмотр одновременно трех слоев фотоэмульсии.

Совершенно курьезно звучит рекомендация выбрать число фотоприемников нечетным [9], что дает улучшение точности измерения угла ориентации следа частицы в $\sqrt{2}$ раз! Для измерения длины следа частицы в плоскости, оптически сопряженной с плоскостью, в которой находится горизонтальный след частицы, вводят шторку с острым краем [10].

3. МАСКИ УОЛША

Кроме оптической системы формирования интегрального образа прямого следа частицы существует альтернативный вариант. В нем исходные данные с плавными изменениями интенсивности света в кадре заменены бинарным эквивалентом, в котором интенсивность света принимает только два значения: 0 или 1. Тогда и ядро интегрального преобразования должно принимать только два значения: 0 или 1.

Щелевую маску заменяют масками Уолша, которые образуют полную ортогональную систему [11]. В работе [12] был разработан быстрый алгоритм поиска инвариантных компонент уолш-образа прямого следа частицы, который может быть реализован непосредственно на стадии считывания информации.

В ранее выполненных работах был успешно использован метод формирования интегрального образа [13], при помощи которого исходное изображение было передано на большие расстояния [14]. По каналу связи передавали только те компоненты уолш-образа, значения которых превышали средний уровень шумов. Было получено эффективное сжатие информации [15].

Так как информация на выходе трековых детекторов существенно беднее информации в полутоновых изображениях, используемых в работах [13–15], то можно ожидать, что выигрыш от использования масок Уолша для считывания следов частиц будет намного выше.

На равномерной последовательности N точек, где $N = 2^n$, а n — целое число, можно построить N дискретных ортогональных функций Уолша [11, 16]. Расположенные одна под другой, они образуют $N \times N$ матрицу.

Вместо термина «частота» для синусоидальных функций упорядоченность функций Уолша проводят по «секвенте», которая равна числу изменения знака функций Уолша в строке или столбце*.

Уолш-образом $F(j)$ исходной функции $f(i)$ называют функцию

$$F(j) = \sum_{i=0}^{N-1} f(i)H(i, j), \quad (1)$$

которая возникает после прямого преобразования Уолша. Обратное преобразование Уолша возвращает нас к исходной функции

$$f(i) = \frac{1}{2^n} \sum_{j=0}^{N-1} F(j)H(i, j), \quad (2)$$

где $H(i, j)$ — матрица Уолша.

Дискретный эквивалент фотографии со следами частиц размером $N \times N$ содержит информацию о $4(N - 1)$ различных ориентациях следа частицы.

Уолш-образ одиночного следа частицы имеет следующие свойства [12, 17].

1. (0,0)-компонента уолш-образа равна полной интенсивности следа частицы.
2. Уолш-образ имеет компоненту, положение которой и ее абсолютная интенсивность не меняются при поступательном перемещении входного объекта.
3. Эта компонента уолш-образа находится на последней строке или на последнем столбце матрицы.

Если на вход поступают два взаимно параллельных следа частицы, то положение инвариантной компоненты определяется их углами наклона с точностью до операции отражения $\theta \leftrightarrow \theta + 180^\circ$. Абсолютная интенсивность инвариантной компоненты уолш-образа равна интенсивности его (0,0)-компоненты, которая принимает значение от $2N$ до 0 в зависимости от четности числа элементов матрицы между двумя параллельными следами частиц.

4. (0,0)-компонента уолш-образа двух пересекающихся следов частиц равна $(2N - k)$, где k — число общих элементов у двух пересекающихся следов частиц.

Для того чтобы ускорить поиск инвариантной компоненты уолш-образа, был построен быстрый алгоритм. Соответствующие ему модифицированные

*По просьбе академика П.Л. Капицы один из авторов обзора (Л.М.С.) в 1976 г. провел семинар, посвященный функциям Уолша, в Институте физических проблем АН СССР.

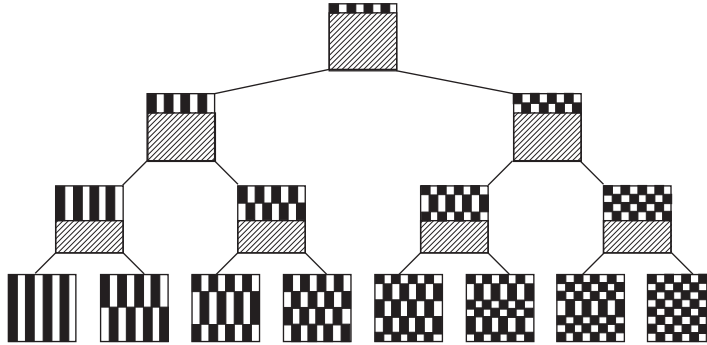


Рис. 6. Модифицированные функции Уолша в быстром алгоритме поиска инвариантной компоненты уолш-образа для $N = 8$

функции Уолша приведены на рис. 6 [17]. Последний ряд модифицированных масок Уолша совпадает с масками Уолша, которые соответствуют ячейкам последнего столбца матрицы-образа.

Поиск производят непосредственно в исходном пространстве, минуя процесс формирования всех компонент уолш-образа на последнем столбце матрицы-образа. Если в кадре имеется два следа частицы, то в поиске возникает раздвоение и дальнейший процесс проводят по двум ветвям.

4. ПЗС-СКАНЕР

Быстрый алгоритм считывания трековой информации при помощи модифицированных масок Уолша можно реализовать в реальном времени при помощи ПЗС-матриц [17–20].

Используя функции Уолша, упорядоченные по секвентам, можно было построить собственные функции секторного сканирования. С этой целью равномерное сканирование в шкале углов заменяют сканированием в шкале тангенсов углов.

На рис. 7 приведены собственные функции секторного сканирования прямых следов частиц с апексом в точке $(0,0)$ [12]. В логику считывания информации при помощи ПЗС-матрицы вводят соответствующие изменения [20, 21].

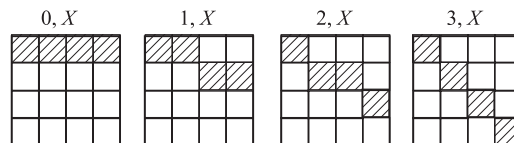


Рис. 7. Собственные функции секторного сканирования прямых следов частиц с апексом в точке $(0,0)$ для $N = 4$

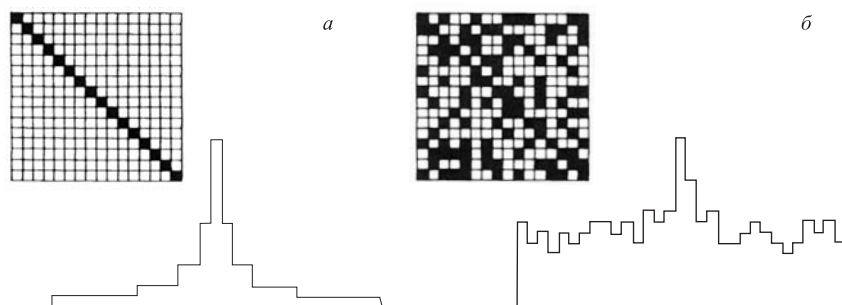


Рис. 8. *а)* Исходный след частицы по диагонали кадра для $N = 16$ и его собственная функция секторного сканирования. *б)* Исходный след частицы по диагонали кадра на случайном фоне, интенсивность которого в 6 раз больше интенсивности исходного сигнала, и суммарный сигнал на выходе

Результаты опробования алгоритма секторного сканирования при помощи ПЗС-матрицы показали, что данный алгоритм обладает высокой помехоустойчивостью.

На рис. 8 приведен пример обнаружения прямого следа частицы, идущего по диагонали кадра, в условиях, когда интенсивность фоновой засветки была в 6 раз (!) больше его интенсивности. Чтобы на выходе получить отношение сигнала к шуму $S/N \approx 2 : 1$, достаточно установить уровень дискриминации по амплитуде, равный $0,6N$.

В работе [21] описан спецпроцессор углового сканирования, алгоритм работы которого задается собственными функциями углового сканирования [17, 19]. Данный спецпроцессор является быстродействующим устройством, и его можно использовать при обработке бинарных изображений, в частности, для определения угла ориентации прямых следов частиц в любом трековом детекторе.

5. ФУРЬЕ-МИКРОСКОПИЯ

Описанные в предыдущих разделах системы автоматического поиска и обмера прямых следов частиц без разбиения их на составляющие элементы обладают общим недостатком. Ни в одной из этих систем не устранена операция перефокусировки по глубине! Между тем именно эта операция является самой трудоемкой как в «ручном» просмотре ядерной фотоэмульсии, так и при разработке автоматизированных систем. Поэтому для повышения быстродействия эту операцию необходимо полностью убрать, сохранив свойство систем воспринимать след частицы как единое целое.

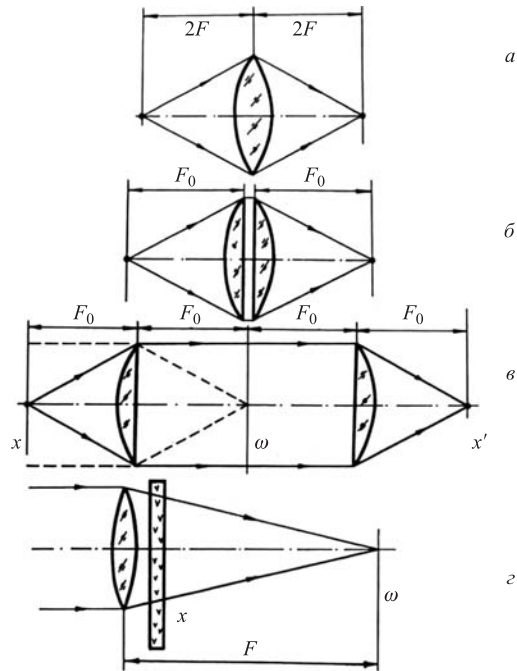


Рис. 9. Переход от традиционной изображающей линзы (а) к фурье-линзе (z)

Решение этой проблемы стало возможным после создания лазеров как источников когерентного света. Начала развиваться фурье-микроскопия [22]. На рис. 9 показан переход от традиционной изображающей линзы (а) к фурье-линзе (z), на выходе которой формируется картина пространственных частот исследуемого объекта.

Оптические свойства изображающей линзы не изменятся, если ее разрезать на две части (б). Получатся две плосковыпуклые положительные линзы, фокусное расстояние каждой из них равно $2f$, где f — фокусное расстояние исходной линзы.

Теперь раздвинем эти две линзы на расстояние $2f$ (в). В плоскости пространственных частот ω возникнет картина пространственных частот объекта, или его фурье-образ.

Схема фурье-микроскопа при когерентном освещении, когда исследуемый объект установлен непосредственно после линзы преобразования Фурье, показана на рис. 10 [23–25]. При поступательном перемещении объекта вдоль оптической оси вид спектра пространственных частот не меняется, а меняется только масштаб спектра.

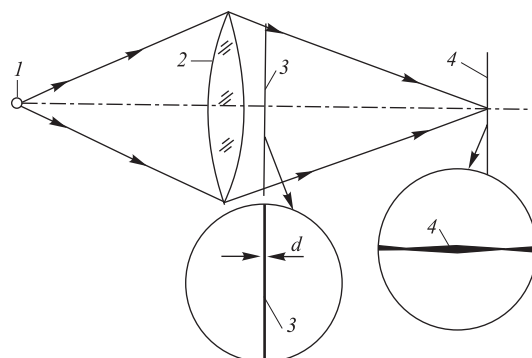


Рис. 10. Схема фурье-микроскопа при когерентном освещении, когда объект устанавливается непосредственно после линзы преобразования Фурье

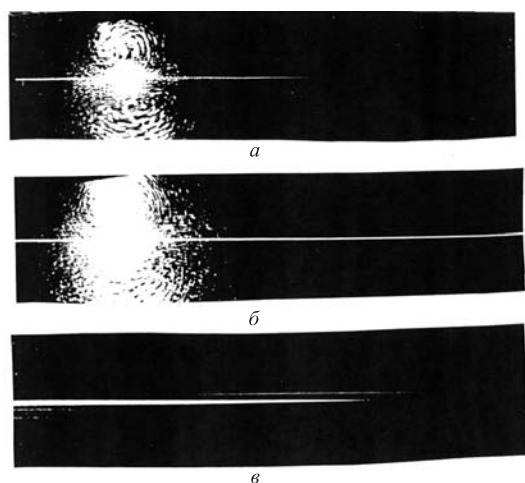


Рис. 11. Фурье-образ паутины диаметром 3 мкм при различных временах экспозиции: $t = 1/500$ с (а), $t = 1/1000$ с (б) и $t = 4$ с (в) (когда прямой пучок света в кадр не попадал)

Принцип действия такого фурье-микроскопа был опробован экспериментально. Объектом наблюдения была паутина диаметром около 3 мкм. На рис. 11 показана фотография фурье-образа паутины при различных временах экспозиции. На рис. 12 приведены замеры вдоль оси ω_y фурье-образа прерывистого следа частицы с полным числом зерен серебра $N_3 = 64$. Видно, что зернистая структура следа не ухудшает заметно отношение сигнала к шуму, которое остается равным $S/N = 40 : 1$.

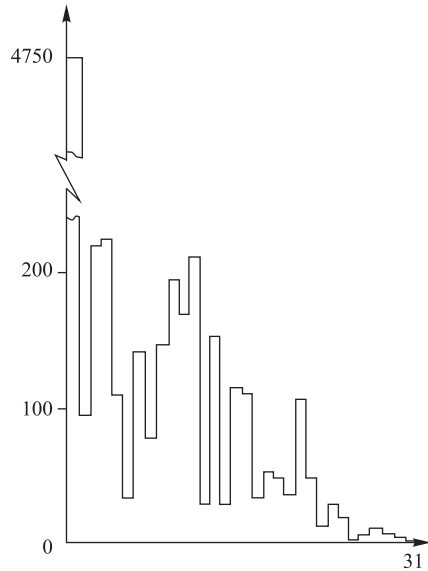


Рис. 12. Распределение интенсивности фурье-образа следа частицы с разрывом при полном числе зерен серебра $N = 64$. Отношение сигнала к шуму $S/N = 40 : 1$

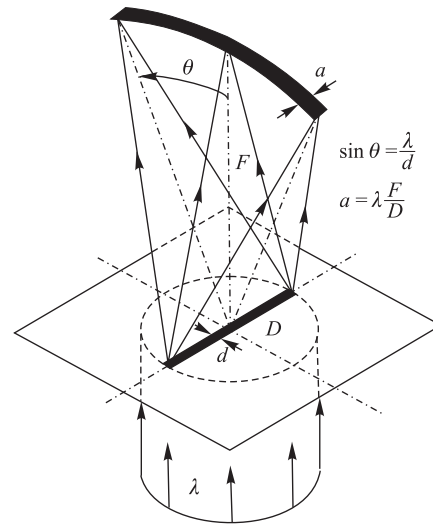


Рис. 13. Фурье-образ узких следов частиц ($\sim \lambda$) отображается на цилиндрической поверхности

Если же ширина объекта становится близкой к длине волны света λ , то угол дифракции далекого поля приближается к 90° , а сама картина фурье-образа оказывается сфокусированной на цилиндрической поверхности, а не на плоскости (рис. 13). В этом случае возникает трудность, так как обычная оптика со сферическими поверхностями не сможет сфокусировать такой фурье-образ в точку. Проблему решает оптика с конусно-тороидальными поверхностями.

Такой проблемы нет в фурье-микроскопе, который содержит мезооптическое зеркало с кольцевым откликом [26] (рис. 14) и систему щелевого сканирования с одновременной фокусировкой всех выходных сигналов.

Мезооптическое зеркало с кольцевым откликом представляет собой фигуру вращения, ось симметрии которой идет вдоль оптической оси фурье-микроскопа, а образующая ее имеет вид эллипса. Один из фокусов эллипса находится на оптической оси в медианной плоскости ядерной фотоэмульсии, а второй, находясь также в медианной плоскости, расположен на расстоянии R от оптической оси фурье-микроскопа.

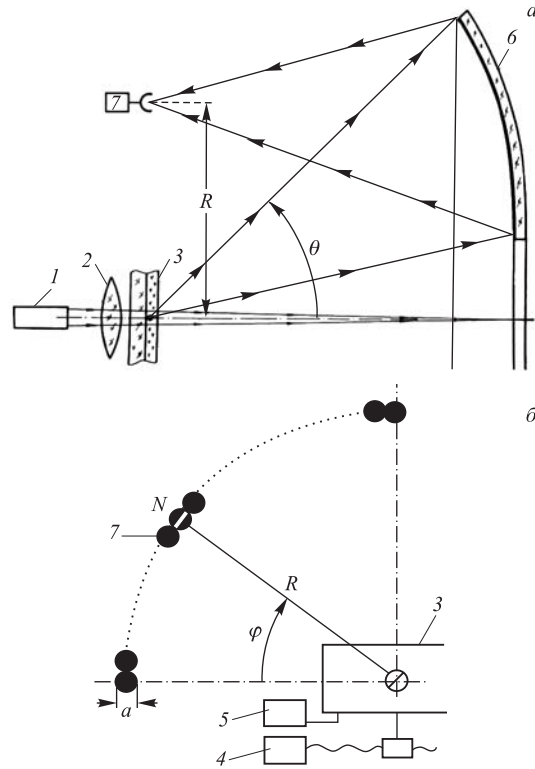


Рис. 14. Полная схема фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии: 1 — лазер; 2 — линза преобразования Фурье; 3 — ядерная фотоэмульсия; 4 — система перемещения ядерной фотоэмульсии; 5 — датчик положения; 6 — мезооптическое зеркало с кольцевым откликом; 7 — световоды системы считывания выходных данных

Размер фотоприемников a на окружности второго фокуса, их полное число N и расстояние R связаны соотношением

$$Na \leq 2\pi R. \quad (3)$$

Прямой пучок света и свет, дифрагированный на широких объектах, проходят через вырез в мезооптическом зеркале с кольцевым откликом.

Для экспериментальной проверки работы мезооптического зеркала с кольцевым откликом была изготовлена его гибкая модель (рис. 15). Зеркальная пленка из терилена толщиной 5 мкм зажималась вакуумно между кольцом и корпусом модели. Образующийся объем откачивался водоструйным насосом. Объектом наблюдения была проволока из вольфрама диаметром 10 мкм.

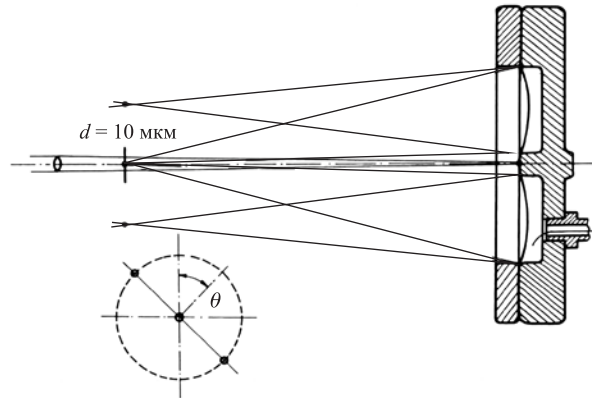


Рис. 15. Гибкая модель мезооптического зеркала с кольцевым откликом

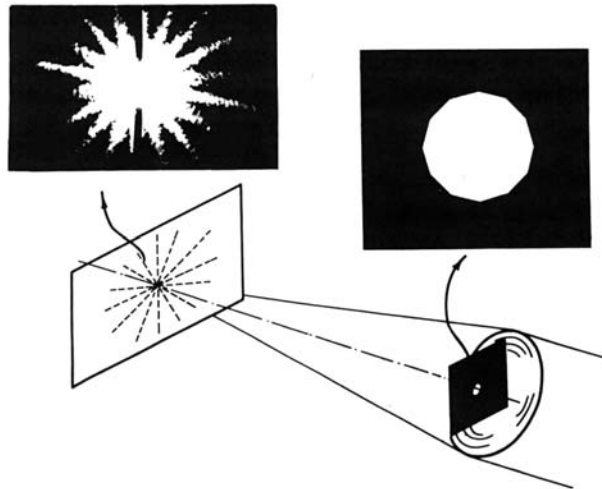


Рис. 16. Схема эксперимента, иллюстрирующая способность фурье-линзы видеть прямолинейные участки ирисовой диафрагмы фотообъектива

Откачку объема вели постепенно до тех пор, пока в плоскости наблюдения не появлялись два ярких пятна. При повороте объекта в плоскости, перпендикулярной оптической оси модели, эти два пятна перемещались по окружности. Таким образом, было показано, что используемая нами модель мезооптического зеркала с кольцевым откликом имеет свойства, необходимые для МФМ.

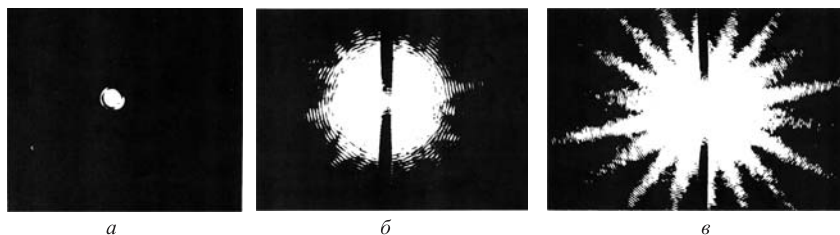


Рис. 17. *а)* Картина дифракции далекого поля ирисовой диафрагмы, диск Эйри. *б)* Картина дифракции в условиях, когда прямой пучок света был перекрыт. *в)* При временах экспозиции больше, чем в случае *б)*

В эксперименте, схема которого приведена на рис. 16, исследовалась способность МФМ фиксировать информацию о прямолинейных контурах объекта. Сходящийся пучок света от лазера просвечивал ирисовую диафрагму объектива Индустар-23 с фокусным расстоянием $f = 300$ мм и девятью парами лепестков.

Традиционная фотография картины дифракции далекого поля, диск Эйри, от ирисовой диафрагмы приведена на рис. 17. Никакой информации о лепестках ирисовой диафрагмы мы не видим. Если же перекрыть прямой пучок света и увеличить время экспозиции, то возникнут радиальные лучи, которые можно проследить до порядка дифракции № 70.

6. ПРОТОТИП МЕЗООПТИЧЕСКОГО ФУРЬЕ-МИКРОСКОПА

Первый действующий прототип мезооптического фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии был создан в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в 1983 г. [24–28]. На рис. 18 дан аксонометрический вид оптической части фурье-микроскопа. Формируемый фурье-объективом 2 сходящийся пучок света просвечивает слой ядерной фотоэмульсии 3 толщиной 200 мкм. Кроссовер этого пучка света расположен вблизи мезооптического зеркала с кольцевым откликом 4. Плоское кольцевое зеркало 6 переносит дифракционное изображение прямого следа частицы на входные торцы световодов 5. При этом окружность, на которой находятся входные торцы световодов 5, совпадает с окружностью, на которой формируются мезооптические изображения следов частиц. Число световодов диаметром 1 мм и длиной 300 мм равно $N_0 = 343$. Второй фокус эллипса образующей мезооптического зеркала с кольцевым откликом 4 расположен на расстоянии 80 мм от оптической оси. Диаметр кроссовера сходящегося пучка света равен 0,3 мм.

В первом эксперименте [27] световоды заполняли только часть всех ячеек с порядковыми номерами $26 \leq N \leq 144$ (рис. 19). Выходные торцы свето-

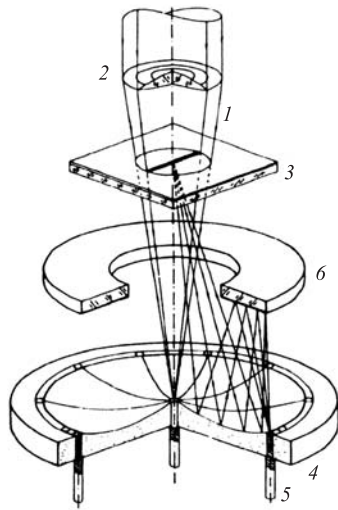


Рис. 18. Аксонометрический вид оптической части первого прототипа мезооптического фурье-микроскопа (МФМ): 1 — сходящийся пучок света, формируемый линзой Фурье 2; 3 — слой ядерной фотоэмульсии; 4 — мезооптическое зеркало с кольцевым откликом; 5 — световоды; 6 — плоское кольцевое зеркало

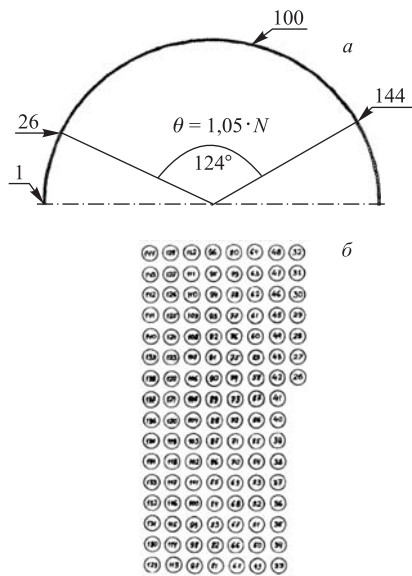


Рис. 19. Расположение входных (а) и выходных (б) торцов световодов

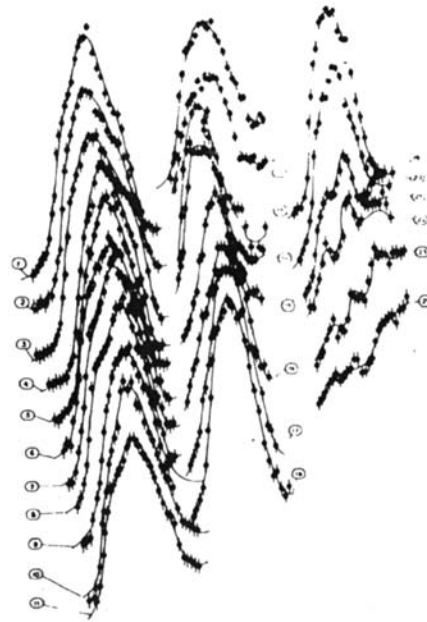


Рис. 20. Результаты измерения интенсивности выходных сигналов (ось y) в различных световодах (ось x) при 24 положениях полосок сканирования, отстоящих друг от друга на $(150 \pm 2,5)$ мкм

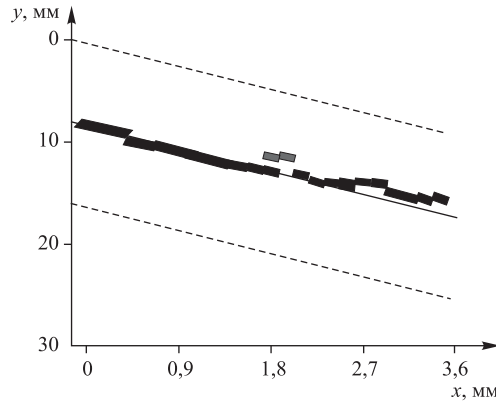


Рис. 21. Результирующее синтезированное изображение следа протона

водов образуют матрицу 16×22 площадью 23×33 мм. Изображение этой матрицы световодов переносилось на ПЗС-матрицу при помощи фотообъектива с фокусным расстоянием 35 мм. Вилка, к которой прикреплен слой ядерной фотоэмульсии размером 100×200 мм, перемещается с шагом 2,5 мкм, контролируемым двумя прецизионными каретками.

Впервые в технике физического эксперимента было получено синтезированное изображение следа частицы без стадии формирования изображения в традиционном оптическом микроскопе.

Объектом наблюдения были следы протонов с импульсом 4,5 ГэВ/с от ускорителя FNAL.

Результаты измерений выходных сигналов показаны на рис. 20, а синтезированное изображение следа протона, измеренного с шагом $(150 \pm 2,5)$ мкм, — на рис. 21.

В [26] была исследована микроструктура оптического сигнала на выходе МФМ. Ширина фокального кольца, формируемого *всей* поверхностью мезооптического зеркала, изготовленного из металла, равнялась ≈ 800 мкм, для узкой кольцевой зоны ≈ 40 мкм, а требовалась $\sim 1,5$ –2 мкм.

Также были исследованы свойства варианта МФМ с зеркальным конденсором, образующая которого имела вид дуги окружности с центром вне оптической оси. В этом варианте МФМ ширина фокального кольца равнялась ≈ 300 мкм.

7. ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА МФМ

В 1985 г. были проведены полуавтоматические измерения прямых следов частиц при помощи описанного в разд. 6 первого прототипа МФМ [27].

Поперечный разрез экспериментальной установки показан на рис. 22. Вручную проводилась установка ядерной фотоэмульсии относительно сходящегося

пучка света. Разрешение по радиальной координате равнялось $\Delta\rho = \pm 50$ мкм, а по углу $\Delta\theta_{xy} = \pm 8'$.

Никаких перемещений слоя ядерной фотоэмульсии вдоль z -координаты не велось.

Чтобы оценить z -координату прямого следа частицы на МФМ, сравнивали положения двух мезооптических сигналов одного и того же следа частицы на противоположных участках фокального кольца. Измеряли угол ориентации и положение семи следов частиц, которые были найдены на участке ядерной фотоэмульсии объемом $6,0 \times 0,2 \times 0,7$ мм и с углом ориентации в заданном интервале.

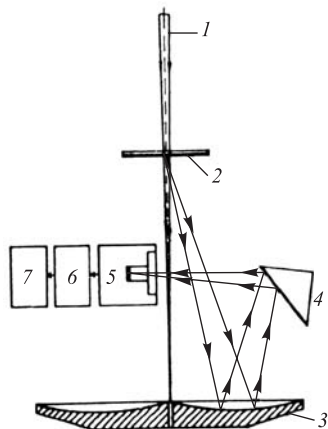


Рис. 22. Схема эксперимента при полуавтоматическом измерении прямых следов частиц

Несмотря на высокую погрешность измерений вдоль радиальной координаты, МФМ дает четкие мезооптические сигналы от следов частиц шириной 1,5 мкм. Этот оптический параметр МФМ соответствует традиционному оптическому микроскопу с входной апертурой 1:100. Ясно, что такой микроскоп не может дать четкие изображения релятивистского следа протона!

8. МФМ С ПРЕЦИЗИОННЫМ МЕЗООПТИЧЕСКИМ ЗЕРКАЛОМ

Термин **мезооптика** впервые был введен в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в 1982 г. [22]. В 1984 г. этот термин был принят на XIII Конгрессе международной комиссии по оптике в Саппоро (Япония) [23].

Цитата из журнала «CERN Courier»*:

«В рамках программы научного сотрудничества СССР–Венгрия исследователи, работающие в ОИЯИ, Дубна, недалеко от Москвы, сконструировали и построили «мезооптический фурье-микроскоп (МФМ)» для наблюдения следов частиц в блоке из слоев ядерной фотоэмульсии.

Традиционно наблюдение следов частиц, зарегистрированных в экспонированной ядерной фотоэмульсии, ведут путем длительного просмотра большого числа соседних слоев. Однако метод ядерной фотоэмульсии нашел новое

*CERN Courier. 1990. V. 30, No. 4. P. 13–14.

развитие в гибридных системах, и процесс поиска вершины взаимодействия удалось существенно сократить во времени.

Другой путь, который упорно разрабатывается в Дубне, связан с использованием в изображающем микроскопе явления дифракции света для получения по другой схеме геометрической информации о следах частиц в ядерной фотоэмульсии. Эта схема позволяет получить трехмерную информацию о следе частицы без перефокусировки по глубине, что существенно ускоряет просмотр и анализ всего объема ядерной фотоэмульсии.

Было показано, что при помощи кольцевого стереоэффекта искомая информация о следах частиц может быть получена без перефокусировки по глубине.

Первые результаты обнадеживают, и теперь усилия исследователей будут сосредоточены на том, чтобы МФМ смог видеть следы частиц с минимальной ионизацией на интенсивном фоне случайно распределенных зерен серебра.»

Цитата из местной прессы*.

«Академик Ю. Е. Нестерихин в отзыве на докторскую диссертацию Л. М. Сороко «Мезооптика и прямолинейные объекты в микроскопии», защищенную в Самарском государственном университете, написал: "Я восхищен стойкостью и хладнокровием соискателя на самой ответственной стадии своих исследований, когда против него выступала вся традиционная оптика, которая утверждала, что прецизионный мезооптический элемент изготовить невозможно. Однако тактика неустанный поиска у соискателя оказалась плодотворной, и невозможное стало возможным"».

Ни один из оптических институтов СССР не брался за изготовление прецизионного мезооптического зеркала с кольцевым откликом. Как в ГОИ**, так и в ЛОМО*** утверждали, что ни за какие деньги невозможно получить кольцо шириной даже в 10 мкм.

Однако на заводе «Красный пролетарий» в Москве думали иначе. Там была освоена технология прецизионного алмазного точения с управлением от многолучевого интерферометра, когда положение алмазного резца удавалось фиксировать с погрешностью до 0,03 мкм. Именно на этом заводе впервые в мире было изготовлено прецизионное мезооптическое зеркало с кольцевым откликом. Ширина мезооптического кольца, измеренная экспериментально, оказалась равной 1,5 мкм при ожидаемом значении в 1,4 мкм.

Схема измерения мезооптического кольца, образованного прецизионным мезооптическим зеркалом, приведена на рис. 23 [28]. Пучок света 1 от гелий-неонового лазера мощностью 5 мВт проходил через объектив микроскопа 2

*Кавалерова Н. // Дубна: наука, содружество, прогресс. 2003. 31 окт. №43.

**Государственный оптический институт.

***Ленинградское оптико-механическое объединение.

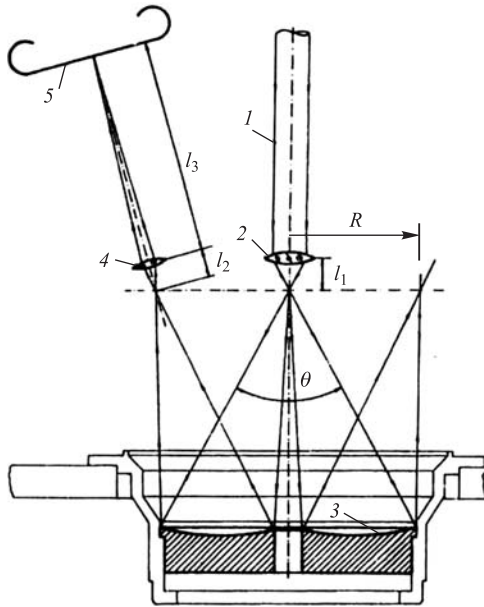


Рис. 23. Схема системы измерения ширины мезооптического кольца, образованного прецизионным мезооптическим зеркалом с кольцевым откликом: 1 — коллимированный пучок света; 2 — светосильный объект в микроскопе $\times 90$; 3 — прецизионное мезооптическое зеркало с кольцевым откликом; 4 — изображающий объектив микроскопа; 5 — фото-пленка

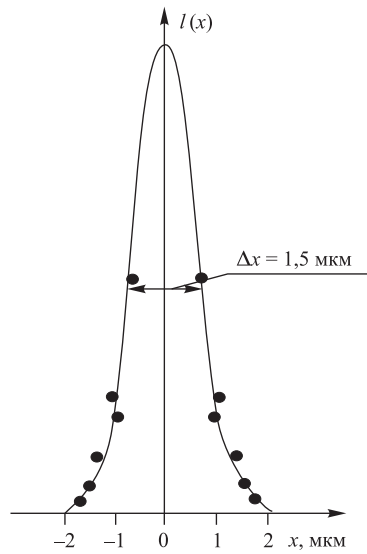


Рис. 24. Результаты измерения ширины мезооптического кольца, формируемого прецизионным мезооптическим зеркалом с кольцевым откликом

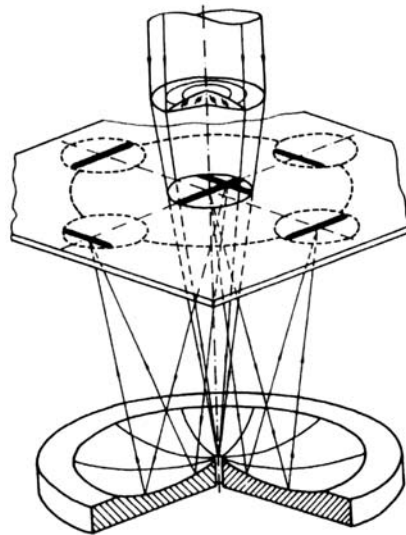


Рис. 25. Общая схема МФМ с прецизионным мезооптическим зеркалом с кольцевым откликом

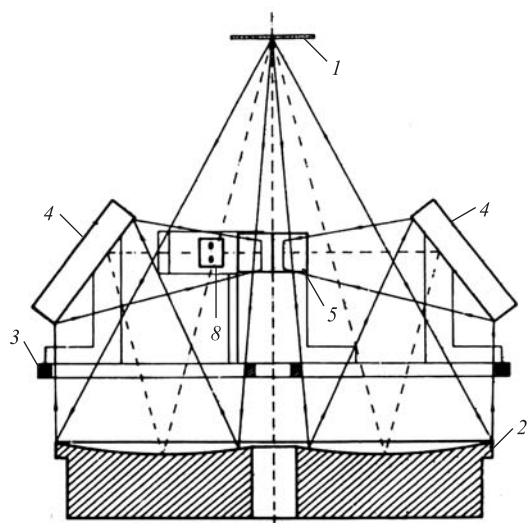


Рис. 26. Двухплечный оптический интерфейс МФМ: 1 — слой ядерной фотоэмульсии; 2 — мезооптическое зеркало с кольцевым откликом; 3 — поворотная платформа; 4 — плоское зеркало; 5 — угловое зеркало; 8 — ПЗС-камера (меридиональное сечение)

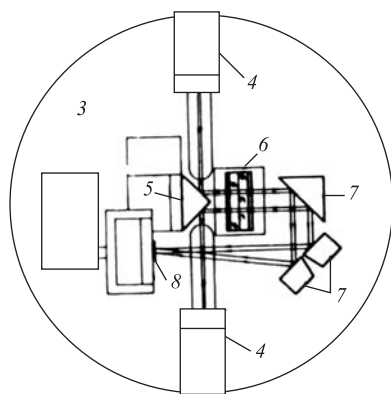


Рис. 27. Двухплечный оптический интерфейс МФМ (вид сверху): 3 — поворотная платформа; 4 — плоское зеркало; 5 — угловое зеркало; 6 — цилиндрическая линза; 7 — плоское зеркало; 8 — ПЗС-камера

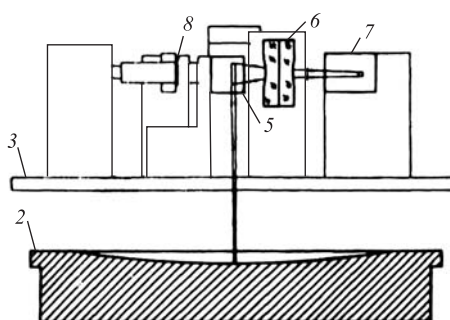


Рис. 28. Двухплечный оптический интерфейс МФМ (сагиттальное сечение): 2 — мезооптическое зеркало с кольцевым откликом; 3 — поворотная платформа; 5 — угловое зеркало; 6 — цилиндрическая линза; 7 — плоское зеркало; 8 — ПЗС-камера

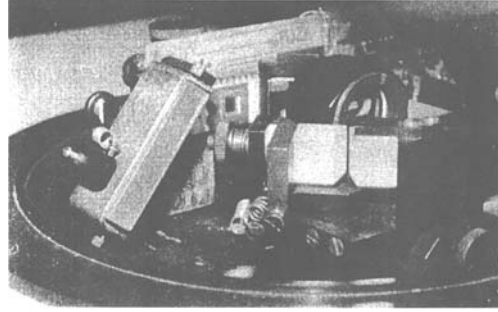


Рис. 29. Фото двухплечного оптического интерфейса МФМ

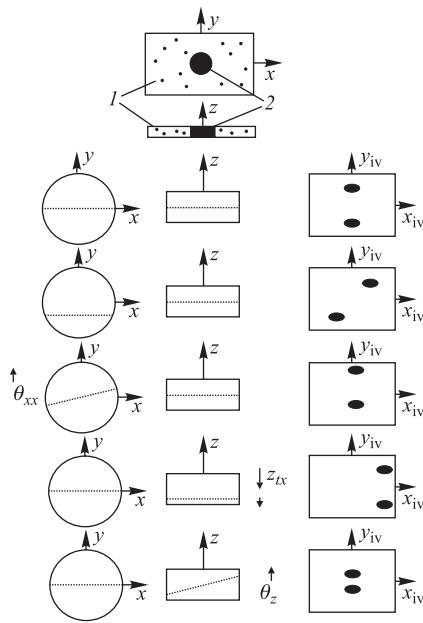


Рис. 30. Типичные конфигурации мезооптических сигналов на выходном мониторе МФМ для различных положений следа частицы

с увеличением $\times 90$ и числовой апертурой 1,3 и освещал всю рабочую часть мезооптического зеркала с кольцевым откликом 3 диаметром 160 мм. Часть дуги мезооптического кольца фотографировалась объективом 4 с увеличением $\times 60$ и числовой апертурой 1,0 на фотопленке 5 типа «Микрат-300». Размер точечного источника света равнялся 0,48 мкм, ширина пика на полувысоте равнялась 1,5 мкм (рис. 24).

Общая схема МФМ с прецизионным мезооптическим зеркалом приведена на рис. 25 [30]. Сходящийся пучок света, образованный линзой Фурье 1, просвечивал слой ядерной фотоземлюльсии 2, образуя кроссовер вблизи мезооптического зеркала с кольцевым откликом 3. Каждый прямой след частицы с малым углом погружения θ_z образовывал два мезооптических сигнала, левый L и правый R . При помощи двухплечного оптического интерфейса оба мезооптических сигнала, отстоящих друг от друга на расстоянии

160 мм, переносили на одну ПЗС-матрицу. Оптический интерфейс (рис. 27) состоит из плоских зеркал 4, уголкового зеркала 5, отрицательной цилиндрической линзы 6, плоских зеркал 7 и ПЗС-матрицы 8.

На рис. 26 дано меридиональное сечение двухплечного оптического интерфейса МФМ: 1 — слой ядерной фотоэмульсии, 2 — мезооптическое зеркало с кольцевым откликом, 3 — поворотная платформа, 4 — плоское зеркало, 5 — угловое зеркало, 8 — ПЗС-камера. Сагиттальное сечение двухплечного оптического интерфейса показано на рис. 28, а его фотография — на рис. 29.

На рис. 30 показаны типичные конфигурации мезооптических сигналов на выходном мониторе МФМ. Координаты обмеряемого следа частицы x, z, θ_{xy} и θ_z однозначно определяются координатами двух мезооптических сигналов x_L, y_L, x_R, y_R . Опробование МФМ с оптическим интерфейсом проводили на следах ядер неона с импульсом 4,5 ГэВ/с на нуклон.

На площади 6×6 мм были обмерены 162 следа заряженных частиц. Погрешности измерений на МФМ оказались равными $\Delta\theta_{xy} = \pm 1'$, $\Delta z = \pm 7$ мкм, $\Delta\theta_z = \pm 10'$. Время, затрачиваемое на одно измерение, равно 0,03 с.

9. МФМ С ДВОЙНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

В традиционной конструкции МФМ мезооптическое зеркало с кольцевым откликом образует два мезооптических изображения на противоположных участках фокального кольца. Фокусировка дифрагированного света происходит только в меридиональном сечении, а в сагиттальном сечении МФМ фокусировки нет. Поэтому в сагиттальном сечении МФМ можно рассматривать как одномерную камеру-обскуру [31]. Там же было показано, что длина мезооптического изображения в сагиттальном сечении МФМ равна диаметру поля зрения МФМ.

Необходимость в двойной фокусировке в МФМ возникает потому, что такой прибор дает более высокое отношение сигнала к шуму.

Первый эксперимент [29] был выполнен в условиях, когда альтернативным мезооптическим элементом была положительная цилиндрическая линза, выполнявшая фокусировку вдоль радиальной координаты. Фокусировку вдоль угловой координаты в сагиттальном сечении МФМ выполняла линза преобразования Фурье.

Радиус кривизны поверхности мезооптического зеркала с кольцевым откликом в сагиттальном сечении изменяется не только по величине, но и по знаку кривизны. На расстоянии $R/2$ от оптической оси МФМ указанный радиус кривизны обращается в бесконечность. В точке на расстоянии $x = 5$ мм от оптической оси указанное мезооптическое зеркало является отрицательной цилиндрической линзой с фокусным расстоянием $f = -11,4$ мм, а в точке $x = 80$ мм — это положительная цилиндрическая линза с фокусным расстоянием $f = +150,2$ мм.

В результате этого дуга, на которой формируется фурье-образ прямого следа частицы, определяется положением кроссовера сходящегося пучка све-

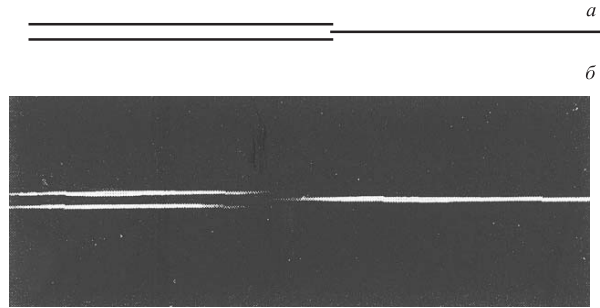


Рис. 31. *а)* Объект — визир; *б)* его мезооптическое изображение, полученное при помощи МФМ

та. Структура мезооптического изображения прямого следа частицы в сагитальном сечении МФМ зависит от длины освещенной части следа частицы l .

Если $l < l_0 = \sqrt{2\lambda H}$, то мезооптические изображения прямых следов частиц искривляются и размываются вдоль угла θ на фокальной окружности. Интересно было посмотреть, как выглядит изображение конца прямого объекта, если он находится в центре поля зрения. На рис.31 показано мезооптическое (!) изображение объекта в виде «визира». Ширина каждого штриха равнялась 20 мкм, а зазор между штрихами — 80 мкм.

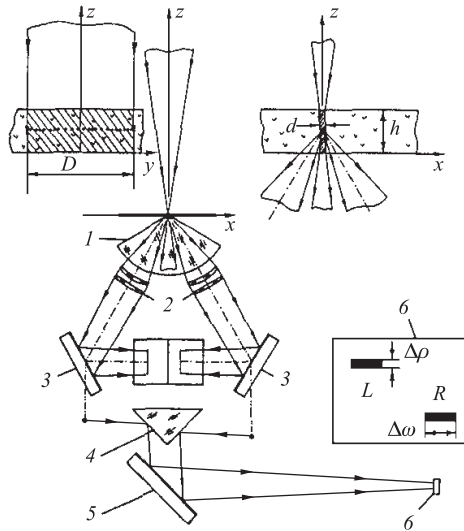


Рис. 32. МФМ с двойной фокусировкой: 1 — сферический иммерсионный конденсор; 2 — цилиндрические объективы; 3 — плоское зеркало; 4 — угловое зеркало; 5 — плоское зеркало; 6 — ПЗС-матрица

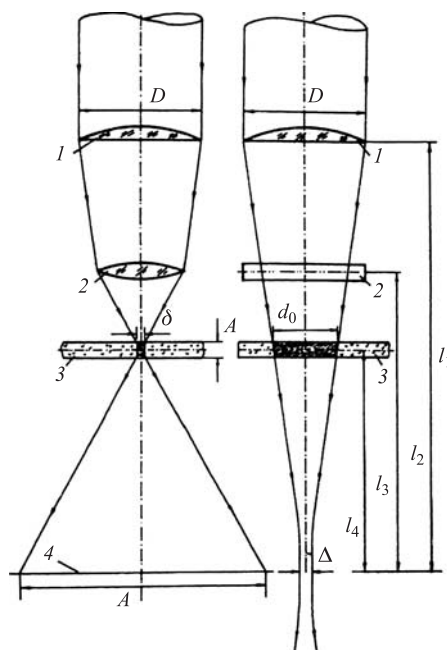


Рис. 33. Анаморфтная система освещения в МФМ с двойной фокусировкой: 1 — линза преобразования Фурье; 2 — цилиндрическая линза; 3 — слой ядерной фотоэмульсии; 4 — мезооптическое зеркало с кольцевым откликом

Главным недостатком первого эксперимента с цилиндрической линзой [29] была низкая апертура одиночной линзы, ограниченная сферическими и кома абберациями. Поэтому в работе [35] был использован объектив, состоящий из двух цилиндрических линз, параметры которых выбраны такими, чтобы подавить указанные абберации. Угловое разрешение в результате было улучшено в 120 раз.

Полное число степеней свободы МФМ с цилиндрическим объективом равно $N_t = 6,6 \cdot 10^6$, в то время как в традиционном оптическом микроскопе $N_t^{\text{рад}} = 4 \cdot 10^4$, т. е. в 160 раз меньше, чем в МФМ.

На рис. 32 дано сечение МФМ с двойной фокусировкой [35], а на рис. 33 — схема анаморфтной системы освещения [24].

На этом МФМ с двойной фокусировкой были выполнены следующие прецизионные измерения:

- 1) одиночного следа частицы на длине 10 мм;
- 2) процесса рассеяния частицы на малый угол;
- 3) процесса ядерного взаимодействия с вылетом вторичных частиц.

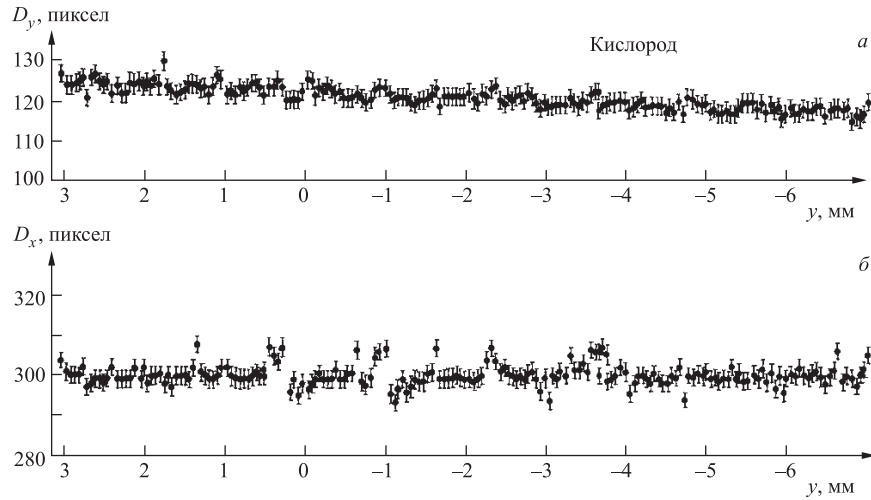


Рис. 34. Результаты измерения угла ориентации $\theta_{xy}(D_x)$ и угла погружения $\theta_z(D_y)$ следа ядра кислорода с импульсом 65,6 ГэВ/с

На рис. 34 показаны результаты измерения угла ориентации θ_{xy} и угла погружения θ_z следа ядра кислорода с импульсом 65,6 ГэВ/с.

Видно, что угол ориентации следа частицы θ_{xy} не изменяется вдоль продольной координаты y , а угол погружения θ_z изменяется линейно со скоростью

$$\frac{d\theta_z}{dy} = (2,0 \pm 0,1)'/\text{мм}. \quad (4)$$

Наблюдаемый эффект был объяснен вынужденным изгибом стеклянной подложки при высыхании слоя ядерной фотоэмульсии, направленным вдоль длинной грани стеклянной пластинки.

Такие же вариации угла погружения θ_z наблюдались у вторичных α -частиц, следы которых были найдены в соседних участках слоя ядерной фотоэмульсии.

На рис. 35 приведен график угла ориентации θ_{xy} , на котором наблюдается локальный скачок угла ориентации θ_{xy} от одного значения к другому [36]. Это было интерпретировано как рассеяние частицы на угол $\Delta\theta_{xy} = (42 \pm 2)'$.

Процесс рассеяния частицы на малый угол можно также наблюдать на экране монитора МФМ с двойной фокусировкой. На рис. 36 показаны эти картины при трех продольных координатах положения МФМ: $y_1 = 4,314$ мм; $y_2 = 4,593$ мм; $y_3 = 4,842$ мм [32].

На первом кадре видны два мезооптических сигнала, L и R , следа частицы «А», на втором — две пары мезооптических сигналов, одна пара от

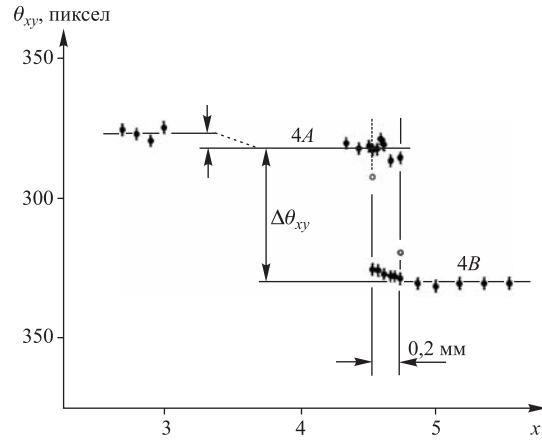


Рис. 35. Скачкообразное изменение угла θ_{xy} вдоль следа частицы, которое можно интерпретировать как процесс рассеяния частицы «4» на угол $\Delta\theta_{xy} = (42 \pm 2)^\circ$

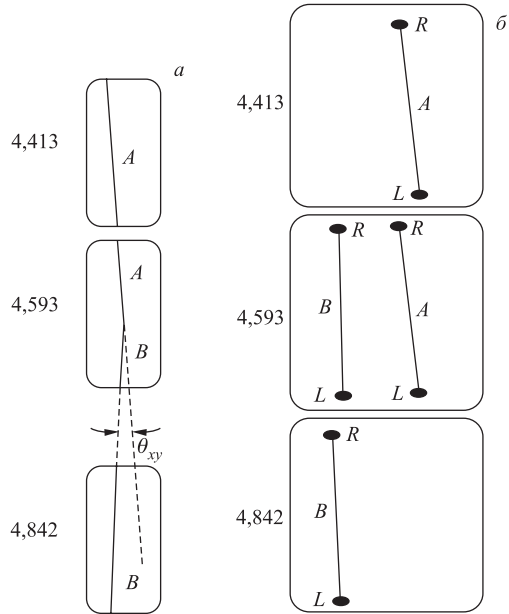


Рис. 36. *a*) Процесс рассеяния частицы на малый угол θ_{xy} . *б*) Сигналы на мониторе МФМ для трех продольных координат у положения столика МФМ

следа частицы «А» и другая — от следа частицы «В». На третьем кадре видны только сигналы от следа частицы «В».

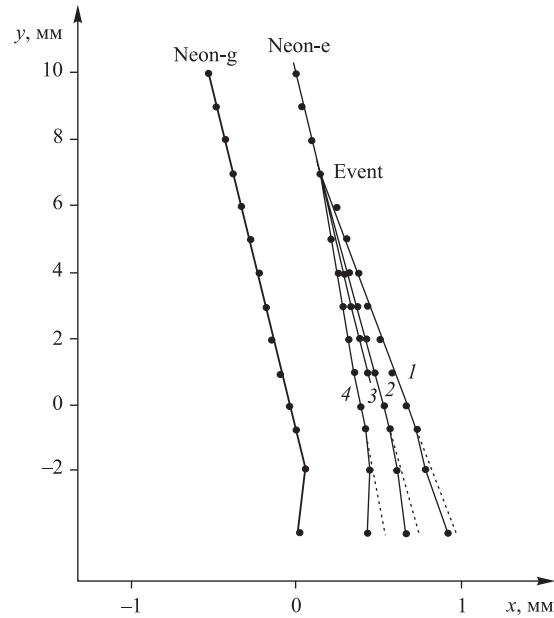


Рис. 37. Типичное ядерное взаимодействие с вылетом четырех вторичных частиц

Был испытан алгоритм поиска вершины ядерного взаимодействия [32, 33], согласно которому мезооптические сигналы следов частиц, выходящих из вершин ядерного взаимодействия, лежат на синограмме в системе координат (x, θ_{xy}) . На рис. 37 показано типичное ядерное взаимодействие при высоких энергиях с вылетом четырех вторичных частиц. Ожидаемая зона положения вершины события имеет вид малого прямоугольника с поперечной координатой $(0,13 \pm 0,01)$ мм [36].

В заключение опишем необычные стереоскопические эффекты, которые наблюдают в МФМ с цилиндрическими линзами.

В работе [29] было найдено, что при изменении угла ориентации оптической оси цилиндрической линзы β от $\beta = 13^\circ$ до $\beta = 45^\circ$ взаимное расположение мезооптических сигналов изменяется! Это явление называют монокулярным стереоэффектом или эффектом оглядывания [37].

При помощи МФМ с двумя цилиндрическими линзами, установленными под постоянным углом β , прямые следы частиц в пространстве мы видим при помощи бинокулярного стереоэффекта, который в МФМ имеет свои особенности.

А именно, в расположении двух мезооптических сигналов в пространстве возникают два параллакса: горизонтальный и вертикальный. Двумя глазами невозможно воспринять одновременно оба указанных параллакса. Один

из них надо убрать, например, повернув на угол 180° правое мезооптическое изображение при помощи призмы Дове. Тогда для всех следов частиц останется только горизонтальный параллакс.

Однако исправленное таким образом изображение в пространстве окажется псевдоскопическим. Чтобы сделать его ортоскопическим, одно из двух мезооптических изображений надо повернуть на угол 180° второй призмой Дове, ориентированной перпендикулярно первой призме Дове.

10. О ВЕРТИКАЛЬНЫХ И НАКЛОННЫХ СЛЕДАХ ЧАСТИЦ

Актуальной задачей фотоэмульсионного метода является проблема поиска и обмера следов заряженных частиц, которые входят в фотоэмульсионную камеру перпендикулярно ее слоям.

В первом варианте мезооптического микроскопа для наблюдения вертикальных следов частиц традиционный объектив микроскопа был заменен аксиконом с заданной глубиной фокуса [39]. Свет от точечного источника освещает в слое ядерной фотоэмульсии зону в форме «столбика», высота которого равна толщине слоя ядерной фотоэмульсии. Если вертикальный след частицы попадает в такой световой столбик, то на выходе точечного фотоприемника возникает импульс фототока, вклад в который сделали все зерна серебра вертикального следа частицы.

Чтобы убрать интенсивные боковые лепестки в импульсном выходном сигнале, ухудшающие разрешающую способность такого микроскопа, используют объектив в виде двойного аксикона. Возникающую в этом случае продольную модуляцию света можно сгладить при помощи фазовой пластинки (рис. 38).

Быстродействие системы поиска и обмера вертикальных следов частиц можно повысить, если создать зону освещения в форме узкого «забора», который ориентирован перпендикулярно слою ядерной фотоэмульсии. Ска-

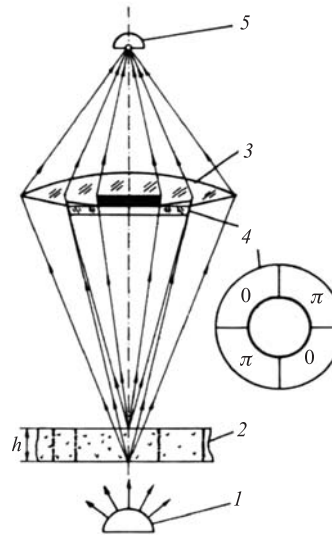


Рис. 38. Мезооптический микроскоп для вертикальных следов частиц с двойным аксиконом и фазовой пластины: 1 — источник света; 2 — слой ядерной фотоэмульсии; 3 — двойной аксикон; 4 — фазовая пластина со ступеньками в 180° ; 5 — точечный фотоприемник

нирование заданного участка слоя ядерной фотоэмульсии ведут дважды, при различных ориентациях такого «забора» [39].

Наконец, экспериментально было обнаружено, что зону освещения в виде узкого «забора» можно создать при помощи явления «каустики» [40].

На завершающем этапе разработок мезооптического микроскопа для вертикальных следов частиц в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ был создан «Темнопольный сканирующий конфокальный микроскоп», схема которого показана на рис. 39.

Экспериментально были обмерены 16 «вертикальных» следов частиц, которые шли параллельно друг другу под углом $4,5^\circ$ к оптической оси микроскопа. Приведенное к полной глубине слоя ядерной фотоэмульсии отношение сигнала к шуму оказалось равным $250 : 1$ (рис. 40).

В дальнейшем интересные результаты были получены в ходе разработок конфокального сканера для наклонных следов частиц. В этом сканере был введен новый оптический элемент — ортогонализатор изображения, при по-

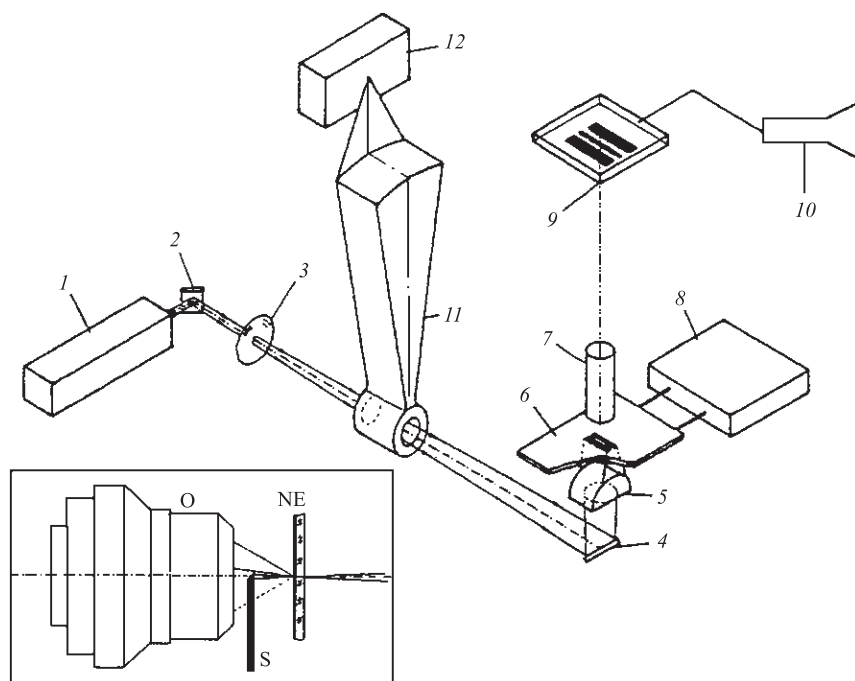


Рис. 39. Темнопольный сканирующий конфокальный микроскоп: 1 — лазер; 2 — плоское зеркало; 3 — отрицательная линза; 4 — плоское зеркало; 5 — цилиндрическая положительная линза; 6 — слой ядерной фотоэмульсии; 7 — объектив микроскопа; 8 — система перемещения и контроля положения ядерной фотоэмульсии; 9 — ПЗС-матрица; 10 — монитор; 11 — система поворота; 12 — указатель угла поворота

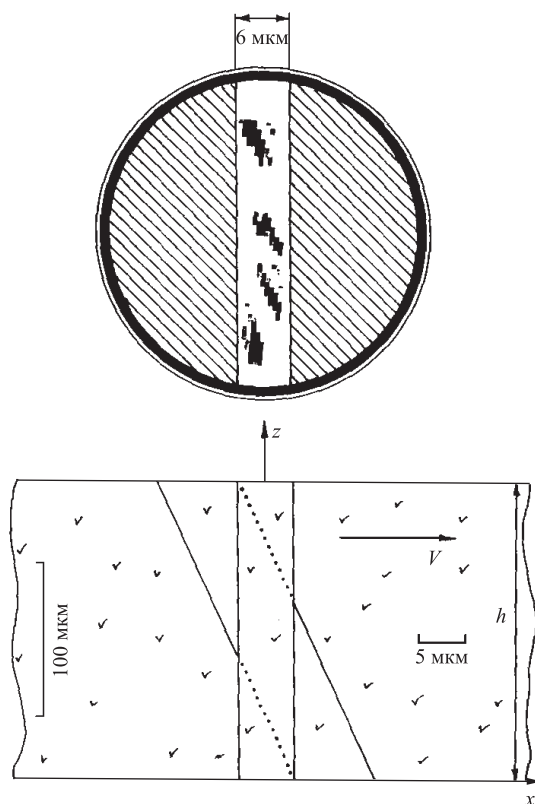


Рис. 40. Изображение четырех вертикальных следов частиц в проекции на (x, y) -плоскости

мощи которого протяженное изображение наклонного следа частиц, полученное при помощи традиционного объектива микроскопа, поэлементно поворачивалось на угол 90° . Положительная цилиндрическая линза фокусировала в точку новый фронт волны, не потерявший пространственной когерентности. Положение этого точечноподобного сигнала на выходном мониторе конфокального сканера определяется положением и ориентацией искомого наклонного следа частицы.

Был изготовлен стеклянный эквивалент ортогонализатора изображения. С его помощью выполнены эксперименты по фокусировке в точку протяженного изображения длиной 40 мм, образованного паутинкой, наклоненной под углом 45° к оптической оси конфокального сканера. Полуширина пика в фокальной плоскости цилиндрической линзы равнялась 0,8 мм, а угловое разрешение — $20'$. Низкое угловое разрешение было вызвано непараллельностью стеклянных ламелей в стеклянном ортогонализаторе изображений.

Анализ структуры двумерного поля сигналов на выходе конфокального сканера показал, что поворот наклонного следа частиц сопровождается соответствующим перемещением сигнала в фокальной плоскости цилиндрической линзы. При этом интенсивность пика линейно связана с длиной наклонного следа частиц [43–45]. Это свойство конфокального сканера позволяет построить автоматический быстродействующий измеритель длин наклонных следов частиц одновременно для многих (10–40) наклонных следов частиц.

11. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Мезооптика — это раздел оптики, в котором изучают и используют физические свойства и информационные характеристики конических волновых полей.

В традиционной оптике точечный объект превращается в точечное изображение. Эту функцию выполняет положительная линза, которая расходящуюся сферическую волну превращает в сходящуюся. Поэтому сферическую волну, сходящуюся или расходящуюся, можно рассматривать как своеобразную собственную функцию оптического оператора, воздействующую на массив точечных объектов. Дуализм между точечным объектом и сферической волной света в традиционной оптике надо дополнить дуализмом в мезооптике между прямолинейным отрезком и соответствующей ему конической волной света. В этом смысле мезооптический фурье-микроскоп может служить примером реализации принципа дуализма в мезооптике.

Акт зарождения мезооптики — это диалектический скачок. Его нельзя предсказать логическими рассуждениями, которые опираются на свойства традиционной изображающей оптики, когда точка в предметном пространстве превращается в точку в пространстве изображений.

Мезооптика, при помощи которой прямолинейный отрезок в поле зрения микроскопа воспринимается как единое целое и в которой полностью устранена операция перефокусировки по глубине, а информация о прямолинейном объекте может быть сжата до двух точечноподобных сигналов, не могла быть предсказана никакими логическими правилами ведения доказательств.

В доисторические времена конические волны существовали в природе благодаря эффекту гравитационных линз, а также благодаря черенковскому излучению заряженных частиц в газах и в воде.

Цилиндрические и седлообразные зеркала изучал Клаудиус Птоломей (90–168). В 1713 г. цилиндрические и конические зеркала рассматривал Дж. Ленпольд. Кольцевую линзу в телескопе впервые использовал Вильям Гершель в 1790 г. при наблюдении тесных двойных звезд. В 1826 г. цилиндрические и несферические поверхности анализировал Дж. Эри, а в 1894 г. — Г. Эмсман. Теорию цилиндрических линз создал Э. Ройш в 1869 г. В 1897 г.

К. Цейсс и Э. Аббе начали применять в микроскопии анаморфотные объективы.

В 1904 г. Ч. Шабриэ построил оптический микроскоп из двух аксиконов. Фокальную линию, которая образуется цилиндрической линзой, изучал А. Уайтвелл в 1910 г.

В 1915 г. А. Эйнштейн опубликовал первое замечание о гравитационных линзах. В 1928 г. Д. Г. Стюард использовал в микроскопии линзы с кольцевой апертурой. Детальную теорию гравитационной линзы разработал А. Эйнштейн в 1936 г. В 1937 г. Ф. Цвике предложил наблюдать на небесном своде явление гравитационной линзы.

Теорию аксиконов создает Дж. Маклеод в 1954 г. В 1958 г. Дж. Дайсон изучает кольцевую дифракционную решетку и решетку в виде спирали Архимеда.

В 1967 г. А. Ломанн создает первый синтезированный голографический транслятор, а в 1971 г. Г. Грох разрабатывает голографическую томографию с синтезированной кольцевой апертурой.

В 1976 г. Л. Чанг создает аксиальную томографию с восстановлением в 3-мерном пространстве.

В 1977 г. Ч. Шеппард и А. Чоудхари создают конфокальный сканирующий оптический микроскоп. В 1978 г. Дж. Огланд изготавливает W-аксикон, Д. Кэмбэлл и Д. Свику создают голографический сканер, а С. Кавата и др. разрабатывают теорию косоугольного освещения в оптическом томографическом микроскопе.

В 1981 г. И. Н. Сисакян и др. создают фокусатор с произвольной линией фокуса, возникает компьютерная оптика.

В 1982 г. Л. М. Сороко изобретает мезооптический фурье-микроскоп, а в 1983 г. А. В. Кончарский, И. Н. Сисакян и др. создают CO₂-фокусатор.

В 1984 г. В. П. Коронкевич и др., а также И. С. Солдатенков и др. создают киноформ, в частности, киноформ с кольцевым откликом.

В 1985 г. Л. М. Сороко изобретает мезооптический конфокальный микроскоп для вертикальных следов частиц в ядерной фотоэмульсии.

В 1987 г. Дж. Дарнин и др. вводят понятие волновых полей, свободных от дифракции. В 1989 г. С. Читри и В. Саслоу разрабатывают теорию движущейся гравитационной линзы.

В 1990 г. Л. М. Сороко анализирует теоретически и наблюдает экспериментально продольную интерференцию волновых полей, свободных от дифракции, а также изобретает мезооптический измеритель угла конусности у внешних конических поверхностей.

В 1991 г. Л. М. Сороко изобретает мезооптический конфокальный кератометр, который обладает высоким иммунитетом к шумам. Его можно использовать для измерения выпуклого профиля, например, глаза.

Для оперативного тестирования сходящихся конических волновых фронтов и выявления в них азимутальных неоднородностей был разработан в 1991 г. Л. М. Сороко мезооптический многолучевой интерферометр Фабри–Перо.

Мезооптический дифференциальный газовый черенковский счетчик (Л. М. Сороко, 1991 г.) обладает минимально возможными хроматическими аберрациями.

В 1991 г. Л. М. Сороко изобретает самофокусирующий ондулятор, в котором период продольного магнитного поля является медленно спадающей линейной функцией продольной z -координаты ондулятора. Такая система позволяет сфокусировать синхротронное излучение в кольцо без каких-либо оптических фокусирующих элементов. Полностью решает проблему сема тепла в диафрагме.

В 1992 г. Ю. А. Батусов, Л. М. Сороко и В. В. Терещенко создают МФМ с двойной фокусировкой. В 1993 г. Л. М. Сороко изобретает кератометр с центральным пучком света, в котором эффект боковых лепестков в функции размытия точки подавлен до 1 % от максимума на оптической оси.

В 1994 г. Л. М. Сороко экспериментально исследует информационную роль высоких порядков дифракции далекого поля и создает прецизионный бесконтактный измеритель диаметра движущейся проволоки с относительной погрешностью измерений в 0,03 %.

В 1995 г. Л. М. Сороко строит теорию изопланатического МФМ для следов частиц в ядерной фотоэмульсии.

В 1996 г. издается монография Л. М. Сороко «Мезооптика. Основы и применение» на английском языке, Сингапур.

В 2005 г. Л. М. Сороко изобретает конфокальный сканер для вертикальных и наклонных следов частиц в ядерной фотоэмульсии.

В 2005 г. Ю. А. Батусов, Ю. С. Ковалев и Л. М. Сороко впервые регистрируют микротомограммы одиночного зерна в ядерной фотоэмульсии с шагом 66 нм и с зазором между соседними микротомограммами в 100 нм.

В декабре 2004 г. в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ была организована выставка, посвященная методу ядерной фотоэмульсии и 20-летию мезооптики в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Ученый секретарь Физического института Академии наук (ФИАН) Н. Г. Полухина записала в книге отзывов: «Большое спасибо за организацию интересной и необычной выставки. Поражает обилие идей, творческой активности, грандиозности замыслов»*.

*Дубна: наука, содружество, прогресс. 2005. 28 янв. № 3–4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обзоре описана история создания мезооптического фурье-микроскопа (МФМ) для ядерной фотоэмульсии. Фактически МФМ является принципиально новым прибором, предназначенным для проведения исследований в области физики атомного ядра и элементарных частиц.

В основе этого прибора лежит оптика конических волновых полей (мезооптика), специфические особенности которой идеально подходят для регистрации света, рассеянного на прямых или почти прямых следах частиц.

Определяющая характеристика мезооптики состоит в том, что информация о положении прямого следа частицы в трехмерном пространстве сжимается мезооптикой до положения двух мезооптических сигналов на двухмерном выходном мониторе МФМ. Благодаря своеобразному стереоскопическому мезооптическому эффекту указанное сжатие информации происходит мгновенно и без каких-либо вычислительных операций (рис. 41).

Эксперименты, проведенные на МФМ, убедительно демонстрируют, что такое сжатие информации дает высокое пространственное и угловое разрешение, а также быстродействие, которое абсолютно недоступно для традиционной оптики с поэлементным считыванием информации.

В этом состоит основа для дальнейшего усовершенствования метода ядерной фотоэмульсии и применения мезооптики в физике элементарных частиц и атомного ядра.

Приведем примеры первоочередных актуальных задач физики частиц, которые могут быть эффективно решены при помощи мезооптики.

Первая задача — это создание системы автоматического измерения длины следа частицы без каких-либо перемещений измерительного устройства или объекта.

При создании такой системы будет использован новый оптический элемент — ортогонализатор изображений, который был успешно опробован экспериментально при решении проблемы фокусировки в точку протяженного изображения наклонного следа частицы.

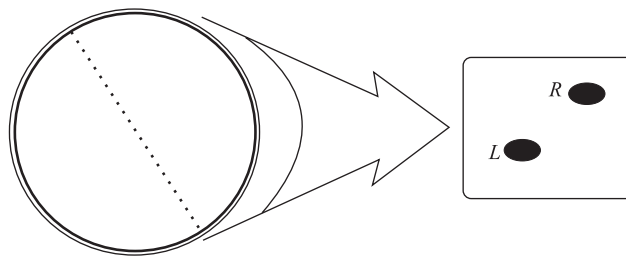


Рис. 41. Процесс мгновенного перехода исходного изображения прямого следа частицы в два мезооптических сигнала R и L на выходном мониторе

Вторая задача — это создание системы регистрации с высоким разрешением, до 1 мкм вдоль z -координаты, следов частиц с малым углом погружения на основе МФМ. Мезооптические сигналы, подлежащие регистрации, уже сейчас формируются на выходе МФМ, и дополнительных технологических трудностей здесь не возникает.

Третья задача — это создание зеркального объектива в конфокальном сканирующем микроскопе с кольцевой апертурой и глубиной рабочего объема в 10 мм.

При глубине рабочего объема в 10 мм такой объектив может подавить теневой эффект, который наблюдается в традиционном оптическом микроскопе вблизи вершины звезды ядерного взаимодействия с большим числом вторичных частиц (~ 150). И тогда при помощи конфокального сканирующего микроскопа с кольцевой апертурой и глубиной рабочего объема в 10 мм можно будет наблюдать в чистых условиях распада, например, суперъядер ${}^A\text{Я}_{\Lambda_c^+}$ и ${}^A\text{Я}_{\Lambda_b^+}$ на расстоянии 5–7 мкм от вершины ядерного взаимодействия.

Благодарности. Авторы благодарны ушедшим из жизни В. П. Джелепову, члену-корреспонденту АН СССР, директору Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, за поддержку исследований по мезооптике, профессору Д. Д. Кишу, директору Объединенного института ядерных исследований, за поддержку работ по мезооптике, М. Г. Мещерякову, члену-корреспонденту АН СССР, директору Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ, за интерес к мезооптике и поддержку работ на начальной стадии.

Авторы выражают благодарность профессору А. Г. Ольшевскому, директору Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова ОИЯИ, за интерес к мезооптике и поддержку работ по созданию конфокального сканера вертикальных следов частиц в ядерной фотоэмульсии.

Авторы выражают искреннюю признательность А. Н. Сисакяну, академику РАН, директору Объединенного института ядерных исследований, за интерес к мезооптике и за поддержку одного из авторов, Л. М. Сороко, на крутых поворотах его судьбы.

Авторы выражают признательность профессору С. А. Бунятову за интерес и поддержку работ по мезооптике.

Авторы выражают признательность профессору В. Л. Аксену из Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ за поддержку исследований на конфокальном микроскопе.

Авторы благодарят доктора физико-математических наук В. И. Комарова и доктора физико-математических наук О. В. Савченко за высокую оценку работ авторов по мезооптике.

Один из авторов, Л. М. Сороко, благодарен профессору Я. А. Смородинскому из Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова ОИЯИ за многочисленные обсуждения проблемы волновых полей, свободных от ди-

фракции, и за интерес к экспериментам по продольной интерференции ко-
нических волновых полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коренченко С. М.* Метод автоматического просмотра треков с помощью щелевого устройства // *Материалы совещ. по камерам Вильсона, диффузионным и пузырьковым камерам.* Дубна: ОИЯИ, 1959. Вып. 5, P-284. С. 140–147.
2. *Андреев Е. М. и др.* Автоматическая обработка снимков пузырьковых камер // *ПТЭ.* 1961. № 3. С. 52–60.
3. *Сороко Л. М.* Устройство для автоматического измерения угловых распределений следов частиц в трековых камерах. А. с. № 200.023. 1966. Оpubл. 1967. Бюл. № 16.
4. *Сороко Л. М.* Способ фотографирования и обработки явлений в трековых камерах. А. с. № 377.721. 1970. Оpubл. 1975. Бюл. № 33. С. 183.
5. *Сороко Л. М.* Способ автоматического измерения излома прямолинейного трека. А. с. № 324.598. 1970. Оpubл. 1972. Бюл. № 32.
6. *Гудман Дж.* Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
7. *Сороко Л. М., Сороко Е. Л.* Устройство для автоматического сканирования ядерной фотоэмульсии. А. с. № 774.403. 1979. Оpubл. 1982. Бюл. № 25.
8. *Сороко Л. М., Сороко Е. Л.* Устройство для автоматического сканирования следов частиц в ядерной эмульсии. А. с. № 782.522. 1979. Оpubл. 1982. Бюл. № 25.
9. *Сороко Л. М.* Устройство для автоматического измерения угловых распределений следов частиц. А. с. № 795.204. 1979. Оpubл. 1983. Бюл. № 20.
10. *Сороко Л. М.* Устройство для измерения следов в ядерной фотоэмульсии. А. с. № 897.019. 1980. Оpubл. 1983. Бюл. № 29. С. 233.
11. *Harmuth H.* Transmission of Information by Orthogonal Functions. Berlin: Springer, 1972.
12. *Кожевникова С. О., Сороко Л. М.* Об алгоритмах считывания прямолинейных треков с помощью масок Уолша. Сообщ. ОИЯИ P10-7757. Дубна, 1974.
13. *Huang T. S. et al.* Image Processing // *Proc. of IEEE.* 1971. V. 59, No. 11. P. 1586–1609.
14. *Wintz P. A.* Transform Picture Coding // *Proc. of IEEE.* 1972. V. 60, No. 7. P. 809–820.
15. *Davissou L. D.* Rate-Distortion Theory and Application // *Proc. of IEEE.* 1972. V. 60, No. 7. P. 800–809.
16. *Хармут Х.* Теория секвентного анализа. Основы и применения. М.: Мир, 1980.
17. *Сороко Л. М.* Собственные функции секторного сканирования при помощи ПЗС-матрицы. Сообщ. ОИЯИ P10-83-77. Дубна, 1983.
18. *Сороко Л. М.* Приборы с переносом заряда и их применение в физике // *ЭЧАЯ.* 1979. Т. 10, вып. 5. С. 1029–1074.

19. *Комов Г. М., Сороко Л. М.* Секторное сканирование при помощи ПЗС-матрицы. Сообщ. ОИЯИ P13-83-527. Дубна, 1983.
20. *Сороко Л. М.* Топологические преобразования на стадии считывания изображений треков при помощи приборов с переносом заряда. Сообщ. ОИЯИ P10-11515. Дубна, 1978.
21. *Комов Г. М., Сороко Л. М.* Спецпроцессор углового сканирования в реальном времени. Сообщ. ОИЯИ P13-85-242. Дубна, 1985.
22. *Soroko L. M.* Optics, Holography and Mesooptics in Bubble Chamber of Vertex Detector. JINR Commun. D1-82-642. Dubna, 1982.
23. *Vencze Gy. L., Soroko L. M.* Mesooptics and High Energy Physics. JINR Preprint E13-84-310. Dubna, 1984.
24. *Астахов А. Я. и др.* Конструкция фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии. Сообщ. ОИЯИ P13-83-119. Дубна, 1983.
25. *Астахов А. Я., Сороко Л. М.* Метрические характеристики фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии. Сообщ. ОИЯИ P13-83-120. Дубна, 1983.
26. *Астахов А. Я. и др.* Полуавтоматические измерения следов частиц при помощи мезооптического фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии. Сообщ. ОИЯИ P13-85-378. Дубна, 1985.
27. *Бенце Д. и др.* Наблюдение следов релятивистских протонов при помощи мезооптического фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии. Сообщ. ОИЯИ P13-86-630. Дубна, 1986.
28. *Сороко Л. М.* Мезооптический фурье-микроскоп для наблюдения следов релятивистских ядер неона. Сообщ. ОИЯИ P13-87-468. Дубна, 1987.
29. *Astakhov A. Ya. et al.* Mesooptical Fourier-Transform Microscope — A New Device for High Energy Physics // Nucl. Instr. Meth. A. 1989. V. 289. P. 13–23; JINR Preprint E13-88-892. Dubna, 1988.
30. *Сороко Л. М.* Мезооптический фурье-микроскоп: структура сигналов в сагитальном сечении. Сообщ. ОИЯИ P13-87-527. Дубна, 1987.
31. *Бенце Д., Сороко Л. М.* Алгоритм поиска событий в мезооптическом фурье-микроскопе для ядерной фотоэмульсии. Сообщ. ОИЯИ P13-85-137. Дубна, 1985.
32. *Бенце Д., Сороко Л. М.* Тангенсный алгоритм поиска событий в мезооптическом фурье-микроскопе для ядерной фотоэмульсии. Сообщ. ОИЯИ P13-85-502. Дубна, 1985.
33. *Soroko L. M.* Mesooptical Fourier-Transform Microscope: Principles and Main Features // Nucl. Tracks Radiat. Meas. 1991. V. 18. P. 391–402.
34. *Batusov Yu. A. et al.* Mesooptical Fourier-Transform Microscope with Double Focusing. JINR Commun. E13-92-179. Dubna, 1992.
35. *Батусов Ю. А. и др.* Стереоскопический мезооптический фурье-микроскоп с двойной фокусировкой. Сообщ. ОИЯИ D13-94-478. Дубна, 1994.

36. Дудников Ю. А., Рожков Б. К. Растровые системы для получения объемных изображений. Л.: Машиностроение, 1986.
37. *Batusov Yu. A. et al.* Investigation of the Geometrical Distortions in the Nuclear Emulsion. JINR Commun. E13-94-502. Dubna, 1994.
38. *Сороко Л. М.* Мезооптические микроскопы для наблюдения вертикальных следов частиц в ядерной фотоэмульсии. Сообщ. ОИЯИ P13-87-576. Дубна, 1987.
39. *Soroko L. M.* Caustical Meso-Optical Confocal Microscope for Vertical Particle Tracks. JINR Commun. E13-95-546. Dubna, 1995.
40. *Astakhov A. Ya. et al.* Dark-Field Scanning Confocal Microscope for Vertical Particle Tracks in Nuclear Emulsion. JINR Commun. E13-99-342. Dubna, 1999.
41. *Soroko L. M.* 3D Inspection by Conical Wavefronts // Proc. of SPIE. 2002. 4900, P. 220–223; JINR Preprint E13-2002-43. Dubna, 2002.
42. *Soroko L. M.* Confocal Scanner for Vertical Particle Tracks in the Nuclear Photoemulsion // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3, № 2(131). С. 111–112.
43. *Сороко Л. М.* Эксперименты по фокусировке протяженных изображений наклонных линейных объектов // Там же. № 6(135). С. 23–32.
44. *Сороко Л. М.* Новые оптические микроскопы. Сообщ. ОИЯИ P13-2006-12. Дубна, 2006.