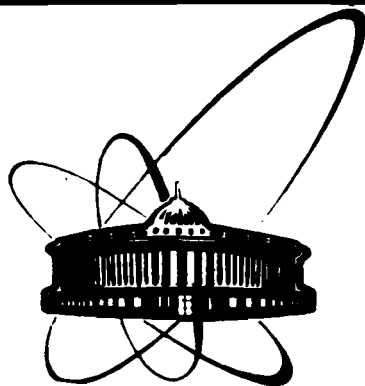


89-548



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

С 655

Д13-89-548

Л.М. Сороко

МЕЗООПТИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП
КАК ТОМОГРАФИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО

Направлено на Оптическую конференцию
(Эрнст Аббе-конференцию), Иена, ГДР, 1989г.

1989

1. ВВЕДЕНИЕ

Томограммой называют изображение внутренней структуры трехмерного объекта в плоском срезе, полученное без разрушения самого объекта. На томограмме отображают: плотность электронов или атомных ядер, упругие характеристики среды, анатомические или биохимические параметры, а также поле скоростей жидкости в заданном участке гетерогенного объекта. Принцип реконструктивной томографии используют, в частности, при получении плоского изображения плоского объекта по двумерному массиву лучевых сумм, измеренных при различных положениях и ориентациях линий суммирования в плоскости изображения относительно исходного плоского изображения.

В работе показано, что существует по крайней мере четыре области, которые являются общими как для реконструктивной томографии, так и для мезооптических микроскопов, используемых при наблюдении прямолинейных объектов, произвольно или определенным образом ориентированных в пространстве. Сначала излагается принцип реконструктивной томографии и свойства синограммы. Далее описывается фурье-микроскоп для автоматического измерения ориентаций прямых следов частиц, выходящих из общей вершины, мезооптический фурье-микроскоп для прямых следов частиц, идущих под малым углом к медианной плоскости ядерной фотоэмульсии, а также мезооптический конденсор, используемый в микроскопе для быстрого поиска следов частиц, идущих параллельно оптической оси микроскопа. Дается анализ свойств выходных сигналов перечисленных выше микроскопов и прослеживается связь с синограммой, которая является неотъемлемым элементом реконструктивной томографии. Отмечено, что применение в мезооптике принципов, заимствованных из реконструктивной томографии, приводит к существенному повышению быстродействия мезооптических систем поиска и обмера прямолинейных объектов в трехмерном пространстве.

2. СИНОГРАММА

На рис.1 показана схема освещения точечного объекта в процессе формирования лучевых сумм, являющихся промежуточными данными в реконструктивной томографии. Если точечный объект

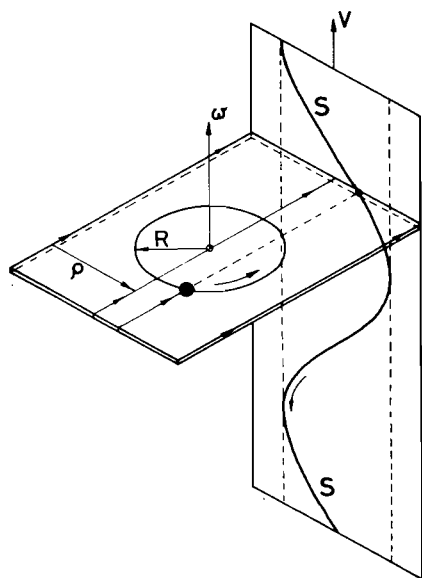


Рис.1. Схема формирования лучевых сумм в реконструктивной томографии для точечного объекта и синограмма точечного объекта.

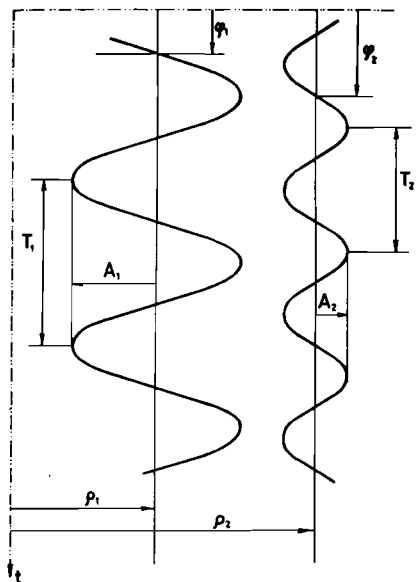
находится от оси вращения на расстоянии ρ , то совокупность лучевых сумм для такого объекта представляет собой синусоиду /"синограмму"/

$$g(\rho, \theta) = \rho \sin(\theta - \theta_0) \quad /1/$$

на плоскости (ρ, θ) , где θ - угол, характеризующий взаимное расположение радиуса-вектора $\vec{\rho}(\rho, \theta)$ точечного объекта относительно направления освещающих лучей света, а θ_0 - угол θ ,

с которого начинают регистрацию лучевых сумм. Чтобы восстановить положение точечного объекта на плоскости (ρ, θ) , достаточно определить амплитуду синограммы /1/, а также положение экстремумов лучевой суммы $g(\rho, \theta)$ как функции угла θ .

Если исследуемый объект состоит из нескольких точечных объектов /1/, то на плоскости (ρ, θ) возникает соответствующее



число синограмм вида /1/ с различными ρ и θ_0 . Характеристики каждой синограммы находят при помощи компьютера и по полученным данным строят изображение объекта в заданном томографическом сечении.

Можно представить себе и более общую схему регистрации лучевых сумм, когда точечные объекты вращаются в исходной плоскости относительно разных точек, при этом частоты вращения точечных объектов могут быть различ-

Рис.2. Синограмма двух точечных объектов, вращающихся с различными угловыми скоростями.

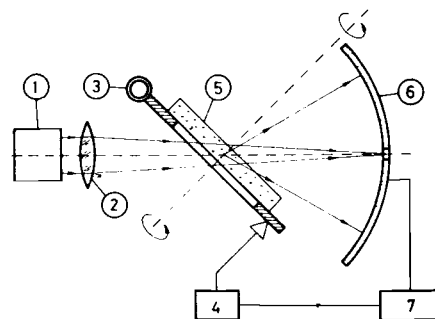
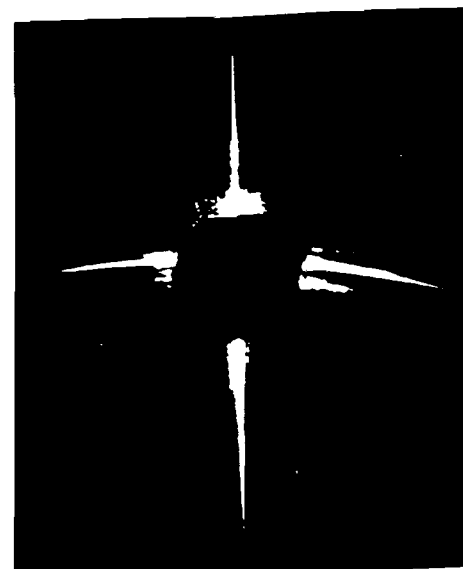


Рис.3. Схема фурье-микроскопа для измерения ориентаций в пространстве прямых следов частиц, выходящих из общей вершины: 1 - источник коллимированного пучка света, 2 - линза преобразования Фурье, 3 - поворотный стол, 4 - система поворота и контроля положения поворотного стола, 5 - слой ядерной фотоэмульсии, 6 - система сканирования фурье-образа прямого следа частицы, 7 - фотоприемник, 8 - блок записи данных.

ными. В этом случае имеет место наложение синограмм с разными периодами /рис.2/.

Рассмотрим теперь структуру промежуточных данных на выходе фурье-микроскопа для измерения углов ориентации прямых следов частиц, выходящих из общей вершины. Схема этого микроскопа показана на рис.3 /2/. Слой ядерной фотоэмульсии в этом устройстве располагают под углом к оптической оси фурье-микроскопа, например 45° , и крепят на поворотном столе так, чтобы вершина ядерного взаимодействия /"звезды"/ совпадала с точкой пересечения оптической оси фурье-микроскопа и оси поворотного стола. В процессе измерения ядерная фотоэмульсия равномерно вращается



вокруг своей оси на угол 360° с инкрементом по углу поворота, равным $\Delta\phi$. В плоскости пространственных частот, где находится кроссовер сходящегося пучка света, возникает фурье-образ прямого следа частицы. Напомним, что фурье-образ прямого следа частицы, идущего перпендикулярно оптической оси фурье-микроскопа, имеет вид узкой прямолинейной полоски, проходящей

Рис.4. Фурье-образ двух прямолинейных объектов в виде крестовины; один из прямолинейных объектов наклонен к оптической оси под углом 90° , а второй - под углом $<90^\circ$.

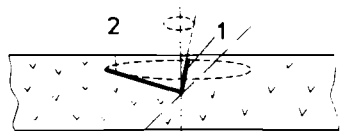
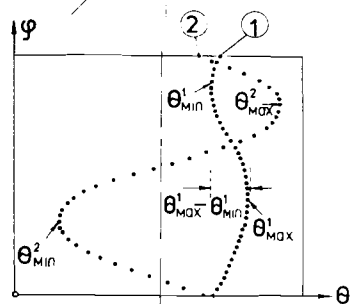


Рис.5. Событие из двух следов частиц с общей вершиной /вверху/ и соответствующие ему две синогаммы, наблюдаемые при помощи фурье-микроскопа /см. рис.3/ /внизу/.



через оптическую ось фурье-микроскопа. Если первый след частицы образует с оптической осью фурье-микроскопа угол, отличный от 90° , то его фурье-образ искривляется, однако касательная к кривой, проведенная в точке $\omega_x = \omega_y = 0$, сохраняет исходную ориентацию /3,4/ /рис.4/, т.е. совпадает с фурье-образом следа частицы, образующего с оптической осью фурье-микроскопа угол 90° .

На рис.5 показан пример простейшего события из двух следов частиц 1 и 2, выходящих из общей вершины, а также соответствующие синогаммы в плоскости (ϕ, θ) /2/. Амплитуда и фаза каждой синогаммы на плоскости (ϕ, θ) однозначно связаны с углами ориентации каждого следа частицы в пространстве. Чем больше угол между следом частицы и осью вращения поворотного стола фурье-микроскопа, тем больше амплитуда соответствующей синогаммы. Фазой синогаммы называется такое положение поворотного стола фурье-микроскопа, при котором угол между проекцией следа частицы на плоскость, перпендикулярную оптической оси фурье-микроскопа, и осью вращения поворотного стола фурье-микроскопа достигает максимального значения. Считывание синогаммы сложного события, состоящего из произвольного числа следов частиц, производится всегда за один полный поворот стола.

3. МЕЗООПТИЧЕСКИЙ ФУРЬЕ-МИКРОСКОП

Томограмма, которую получают при помощи мезооптического фурье-микроскопа /МФМ/, имеет свои особенности /5/. Во-первых, МФМ "видит" только прямолинейные объекты, которые имеют малый угол с нормалью к томографическому сечению и малый угол погружения относительно горизонтальной плоскости, идущей перпендикулярно оптической оси МФМ. Во-вторых, исходная информация, по которой строят томограмму МФМ, состоит из двух мезооптических изображений. Наконец, данные, отображаемые на томограмме МФМ, являются векторными по своей природе, в отличие от большинства традиционных томограмм, на которых представлена скалярная величина.

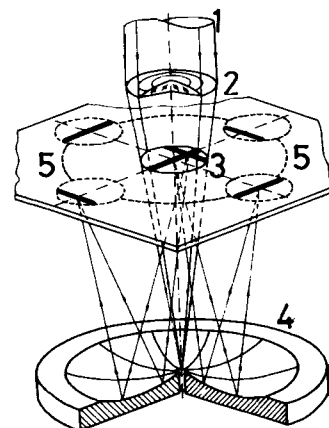


Рис.6. Принципиальная схема мезооптического фурье-микроскопа: 1 - коллимированный пучок света, 2 - линза преобразования Фурье, 3 - два следа частицы в ядерной фотоэмульсии, 4 - мезооптическое зеркало с кольцевым откликом, 5 - мезооптические изображения двух следов частиц.

На рис.6 дана принципиальная схема МФМ, который основан на фурье-оптике и мезооптическом принципе получения изображений /6,7/. Исследуемый объем, содержащий искривленные прямолинейные объекты, просвечивают сходящимся пучком света. Фурье-образ прямолинейных объектов, находящихся в поле зрения МФМ, формируется вблизи мезооптического зеркала с кольцевым откликом, которое преобразует свет, дифрагированный на каждом прямолинейном объекте, в два мезооптических изображения. Оба они расположены в пределах фокального кольца и параллельны исходному прямолинейному объекту /рис.7/. Чтобы видеть только те прямолинейные объекты, которые идут почти перпендикулярно заданной плоскости томограммы МФМ, достаточно считать мезооптические изображения на небольшом участке фокального кольца, например, вблизи двух мезооптических изображений А' объекта А. В /5/ подробно описана связь между положениями двух мезооптических изображений в пределах фокального кольца и четырьмя геометрическими характеристиками прямолинейного объекта, которые отображаются на томограмме МФМ: координата x , координата z , угол θ_x и угол θ_z /рис.8/. Чтобы получить

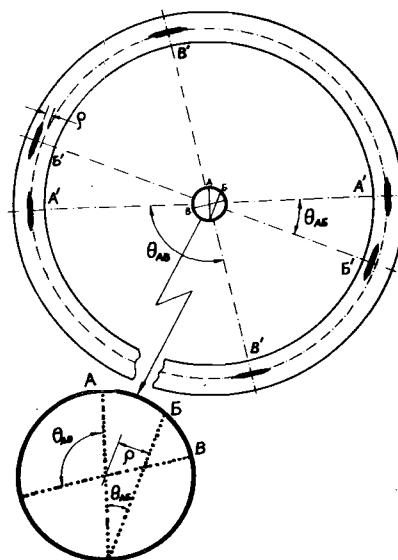


Рис.7. Взаимное расположение поля зрения МФМ, фокального кольца и мезооптических изображений трех прямых следов частиц.

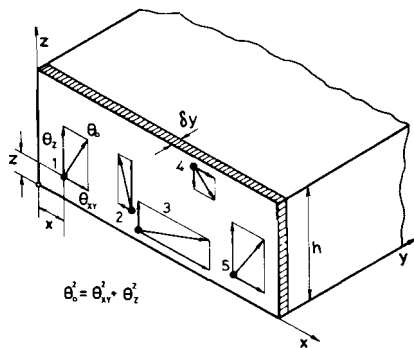


Рис.8. Вид томограммы МФМ, на которой отображены четыре параметра: координаты точек x и z , компоненты вектора θ θ_{xy} и θ_z в точке (x, z) томограммы МФМ.

данные, необходимые для построения векторной томограммы МФМ, исследуемый объем сканируют вдоль линии, на которой расположены мезооптические изображения искомых прямолинейных объектов. При этом четыре параметра x, z, θ_{xy} и θ_z , которые задают точку на томограмме (x, z) и вектор (θ_{xy}, θ_z) в указанной точке, находится без проведения каких-либо обратных интегральных преобразований, как это делают в традиционной реконструктивной томографии.

МФМ как специализированное томографическое устройство обладает высоким быстродействием, хорошо подходит для селективного наблюдения микроскопических прямолинейных объектов шириной 0,5-1 мкм и не требует операции сканирования вдоль z -координаты, значение которой в МФМ находится другим приемом в статическом положении МФМ относительно объекта.

МФМ используют в физике элементарных частиц высоких энергий при селективном наблюдении следов частиц в виде цепочки зерен серебра диаметром 0,5 мкм в ядерной фотоэмульсии^{/5/}. Разрешение по z -координате составляет 4 мкм, разрешение по углу θ_{xy} равно $0',5$ и $7'$ для угла θ_z . Полное число элементов разрешения только в одной фотопластинке размером $200 \times 100 \times 0,2$ мм равно $1,5 \cdot 10^{12}$, что эквивалентно $2 \cdot 10^7$ томограммам размером 256×256 элементов изображения^{/6/}. МФМ может выполнять также и другие операции^{/8/}.

4. МЕЗООПТИЧЕСКИЙ КОНДЕНСОР

Микроскоп^{/7/}, предназначенный для поиска следов частиц, идущих параллельно оптической оси микроскопа, содержит мезооптический конденсор /рис.9/. Коллимированный пучок света проходит через мезооптическую цилиндрическую линзу 3 и создает в месте расположения слоя ядерной фотоэмульсии 4 ярко освещенную область в виде невысокого "забора". Направляющая мезооптической цилиндрической линзы 3 имеет вид многоугольника, при этом каждый отрезок многоугольника касается направляющей

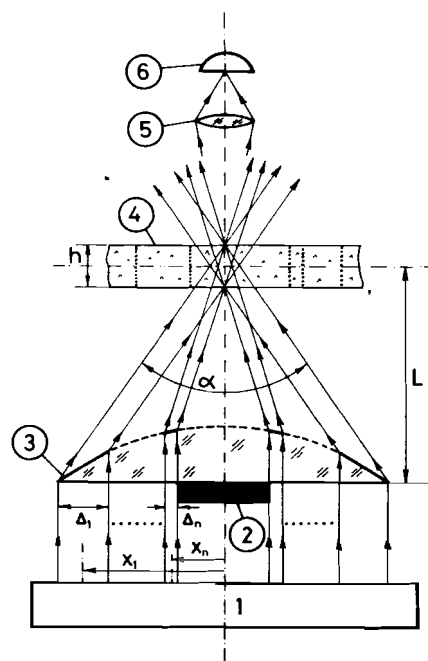


Рис.9. Схема микроскопа с мезооптическим цилиндрическим конденсором: 1 - источник коллимированного пучка света, 2 - центральная шторка, 3 - мезооптическое цилиндрическое зеркало, 4 - слой ядерной фотоэмульсии, 5 - объектив, 6 - ФЭУ.

цилиндрической линзы, а длина отрезка многоугольника Δ на расстоянии x от плоскости симметрии мезооптической цилиндрической линзы определяется соотношением

$$\Delta = h \frac{x}{L}, \quad /2/$$

где h - толщина слоя ядерной фотоэмульсии, а L - расстояние от мезооптической цилиндрической линзы до слоя ядерной фотоэмульсии. Последнее должно быть выбрано достаточно большим, чтобы не возникло продольной модуляции интенсивности света в ядерной фотоэмульсии. Обычно $L \approx 100$ мм.

Регистрацию рассеянного света в микроскопе^{/7/} ведут при помощи фотоумножителя /ФЭУ/, который откликается только на переменную составляющую рассеянного света. На рис.10 показана картина интерференции света, образованная только одной парой плоских пучков света,

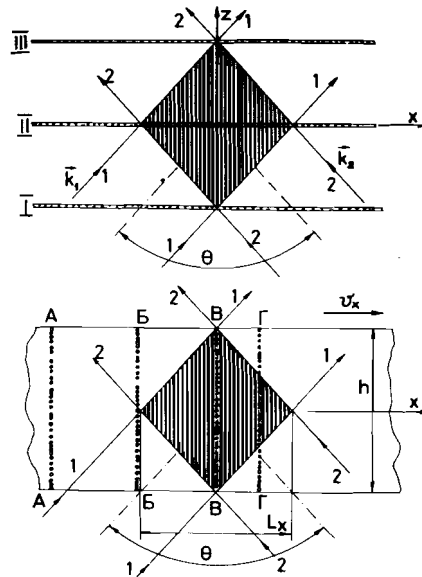


Рис.10. Картина интерференции света двух ограниченных плоских пучков света, волновые векторы которых образуют между собой угол θ .

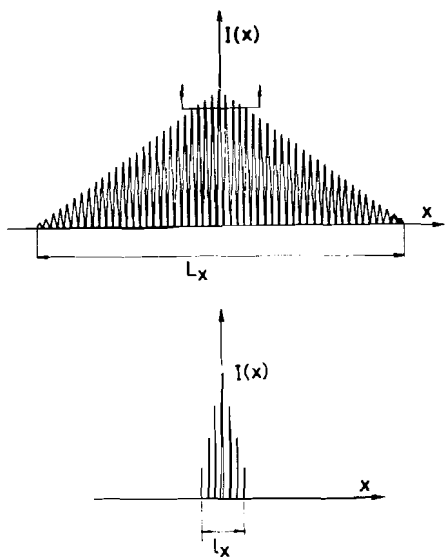


Рис.11. Переменная составляющая сигнала фототока для двух ограниченных плоских пучков света /вверху/ и дискриминированный сигнал, поступающий в блок памяти /внизу/.

волновые векторы которых образуют угол θ . При перемещении слоя ядерной фотоэмульсии с вертикальными следами частиц относительно области, где интерферируют два плоских пучка света, каждый вертикальный след частицы последовательно попадает в максимумы интерференционной

картины. При этом длина следа частицы, на которой он освещается переменной составляющей интерференционной картины, сначала равна нулю, затем достигает максимального значения и, наконец, снова уменьшается до нуля. Регистрируемая в этих условиях переменная составляющая сигнала фототока имеет вид частотокола из многих пиков /рис.11/. С повышением уровня дискриминации по амплитуде число пиков уменьшается.

В микроскопе /7/ формируется большое число плоских пучков света, ~500, которые пересекаются взаимно в области расположения слоя ядерной фотоэмульсии и образуют узкую, сильно освещенную область на всю толщину слоя ядерной фотоэмульсии /рис.12/. На рис.13 показаны одномерные апертуры мезооптического конденсора при различных относительных поперечных размерах центральной шторки 2 мезооптического цилиндрического конденсора 3 /см. рис.9/. На рис.14 приведены распределения интенсивности

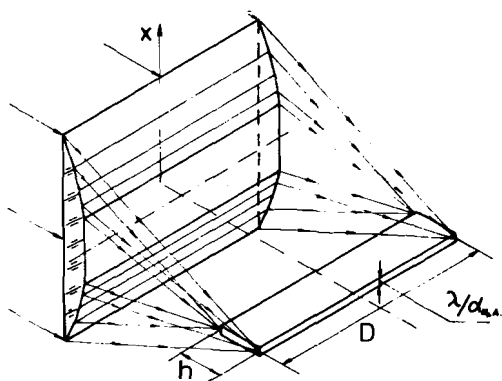


Рис.12. Схема формирования узкой, сильно освещенной области в месте расположения слоя ядерной фотоэмульсии.

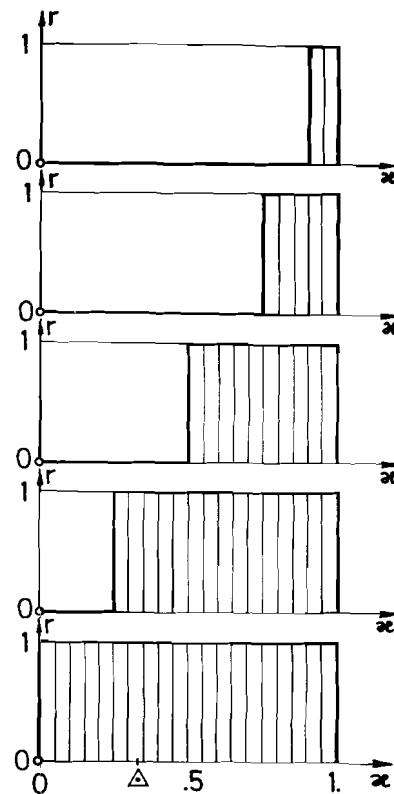


Рис.13. Одномерная апертура мезооптического цилиндрического конденсора с центральной шторкой разных относительных размеров: $b/a = 0,9; 0,75; 0,50; 0,25$ и $b/a = 0$ /сверху вниз/.

света в пределах освещенной области /см.рис.12/ при различных значениях b/a . Видно, что интенсивность боковых лепестков картины интерференции света уменьшается с увеличением числа плоских волн, участвующих в образовании интерференционной картины. В реальной конструкции микроскопа /7/ ширина центрального лепестка равна 0,3 мкм при уровне дискриминации $I_d = 0,5 I_{max}$. Это примерно в 20 раз меньше ширины одномерного кроссовера, который можно создать на глубину 200 мкм при помощи традиционного оптического микроскопа.

Следы частиц, которые идут под большим углом к оптической оси микроскопа /7/, пересекают ярко освещенную область на длине, которая существенно меньше толщины слоя ядерной фотоэмульсии. Так как освещенная часть следа частицы находится в пределах центрального максимума в течение длительного времени, то переменная составляющая сигнала фототока дополнительно уменьшится /рис.15/. Благодаря этому сигнал фототока от следов частиц, не идущих параллельно оптической оси микроскопа, будет уменьшаться примерно как квадрат освещенной части следа частицы. Все это создает высокую селективность микроскопа вертикальных следов частиц и позволяет увеличить длину ярко освещенной области с 1 мм до 5 ÷ 10 мм. Тем самым создаются благоприятные условия для использования томографического алгоритма поиска вертикальных следов частиц.

С этой целью слой ядерной фотоэмульсии с вертикальными следами частиц сканируют при помощи микроскопа /7/ с мезооптическим цилиндрическим конденсором вдоль оси x при двух различных ориентациях освещенной области относительно оси x. Если указан-

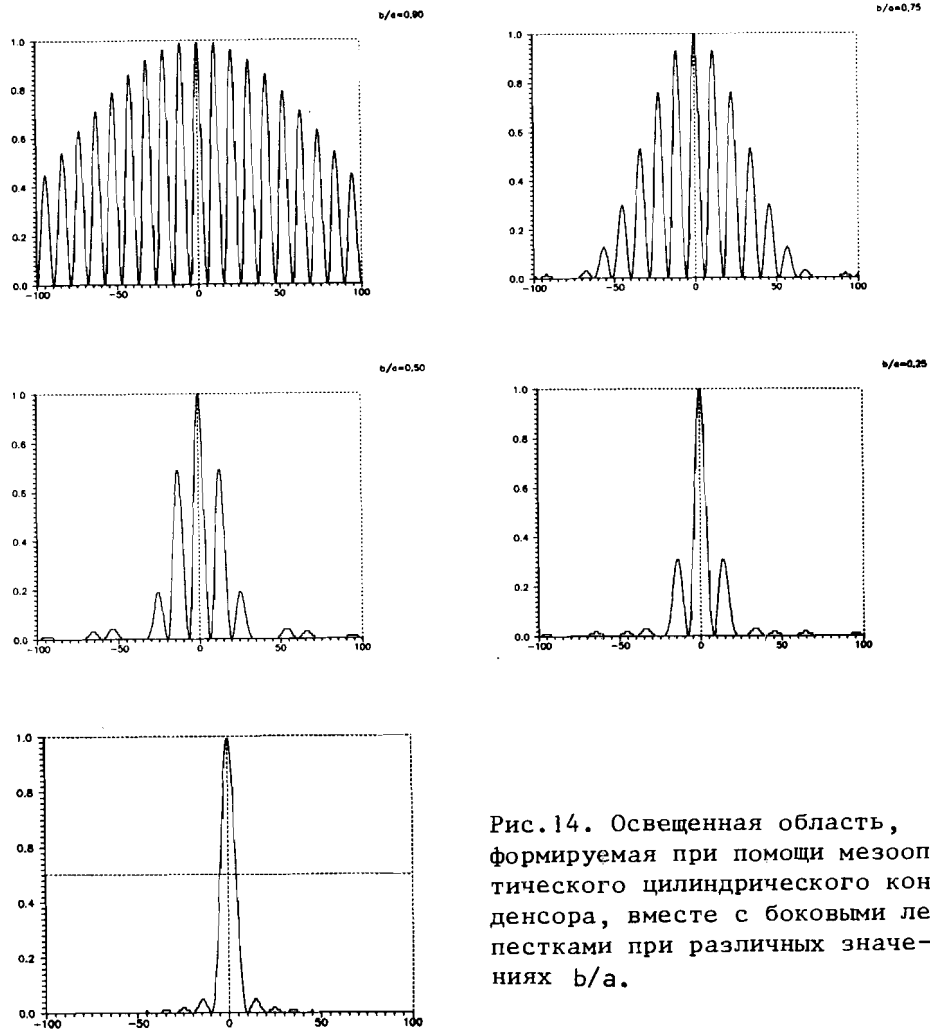


Рис.14. Освещенная область, формируемая при помощи мезооптического цилиндрического конденсора, вместе с боковыми лепестками при различных значениях b/a .

ные углы ориентации равны $+45^\circ$ при первом сканировании и -45° при втором /рис.16/, то координаты искомого вертикального следа частицы x_0 и y_0 определяются из простых соотношений:

$$x_0 = \frac{1}{2} (x_1 + x_2),$$

$$y_0 = \frac{1}{2} (x_1 - x_2),$$

где x_1 и x_2 - координаты положения слоя ядерной фотоэмульсии относительно оптической оси микроскопа в те моменты времени,

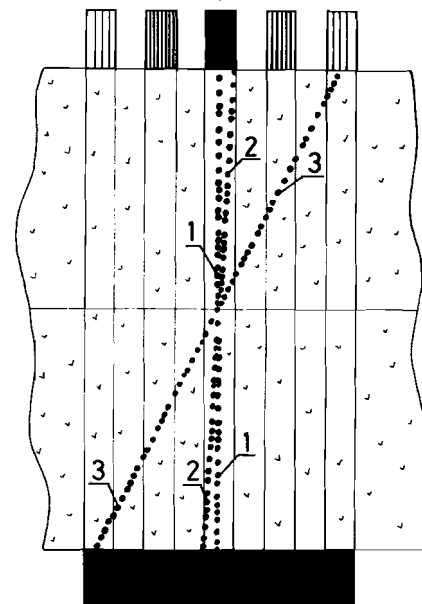


Рис.15. Расположение центральной освещающей области и боковых лепестков в пределах слоя ядерной фотоэмульсии толщиной h и следы частиц разной ориентации: 1 и 2 - вертикальные следы частиц, 3 - наклонный след частицы, который не регистрируется микроскопом с мезооптическим цилиндрическим конденсором. Черная полоса в нижней части рисунка показывает ширину освещающей области в традиционном микроскопе.

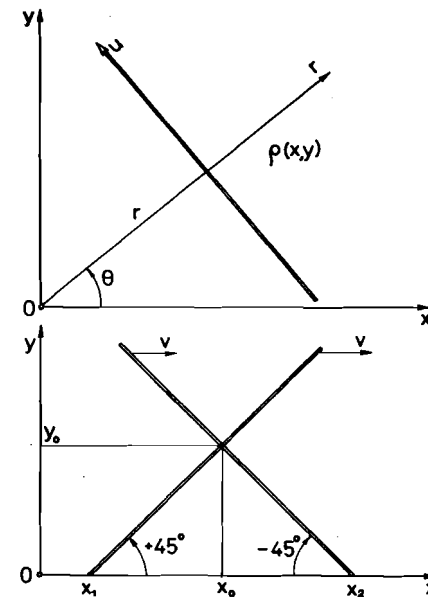


Рис.16. Расположение линий суммирования, идущих параллельно оси "u", при формировании лучевых сумм в реконструктивной томографии /вверху/ и положения освещенной области в виде узкого "забора" относительно ядерной фотоэмульсии при поиске вертикального следа частицы, идущего перпендикулярно плоскости чертежа в точке (x_0, y_0) , в два различных момента времени /внизу/.

когда искомым вертикальным следом частицы попадает в узкую освещенную область. Обычно поверхностная плотность вертикальных следов частиц такова, что в поле зрения микроскопа с мезооптическим цилиндрическим конденсором попадает не больше одного вертикального следа частицы. Если же плотность вертикальных следов частиц велика, то число различных ориентаций освещенной области относительно оси должно быть увеличено до $2N$, где N - число вертикальных следов частиц в пределах поля зрения микроскопа.

5. И СНОВА СИНОГРАММА

В^{9/} было показано, что мезооптические изображения прямых следов частиц, которые имеют общую вершину, лежат на синограмме как для левых, так и для правых мезооптических изображений прямых следов частиц. Это правило можно использовать в МФМ только для тех следов частиц, которые идут под небольшими углами к плоскости ядерной фотозмульсии, так как при больших углах погружения мезооптические изображения вообще возникнуть не могут. На практике в физике высоких энергий указанное выше условие обычно хорошо соблюдается. Поэтому критерий синограммы, сформулированный в^{9/}, может быть эффективно использован для поиска вершин ядерных взаимодействий, которые либо находятся за пределами поля зрения МФМ, либо лежат в соседних слоях ядерной фотозмульсии.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что некоторые характеристики мезооптических микроскопов имеют томографические свойства, которые приводят к новым быстрым алгоритмам сканирования и отображения данных при поиске следов частиц в ядерной фотозмульсии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Херман Г.-Восстановление изображений по проекциям. М.: Мир, 1983.
2. Сороко Л.М.-Авторское свидетельство 782523, /СССР/, МКИ^{3G} 01 Т 5/10. Устройство для обмера событий в ядерной фотозмульсии. ОИ, 1982, № 15, с.313.
3. Patorski K. - Optica acta, 1983, v.30, No.5, p.673.
4. Ganci S. - Eur. J. Phys., 1981, v.2, No.3, p.158.
5. Astakhov A.Ya. et al.-Preprint JINR, E13-88-892, Dubna, 1988.
6. Сороко Л.М. - В кн.: Оптическая томография, Таллин, изд-во АН ЭССР, 1988, с.145.
7. Сороко Л.М.-Авторское свидетельство 1273861, /СССР/, МКИ^{4G} 02 В 21/00. Микроскоп. ОИ, 1986, № 44, с.180.
8. Сороко Л.М. - ЭЧАЯ, 1989, т.20, вып.1, с.155.
9. Бенце Д., Сороко Л.М.-Сообщение ОИЯИ, P13-85-137, Дубна, 1985.
10. Бенце Д., Сороко Л.М.-Сообщение ОИЯИ, P13-85-502, Дубна, 1985.
11. Сороко Л.М.-Сообщение ОИЯИ, P13-87-576, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 июля 1989 года.

Сороко Л.М.

D13-89-548

Мезооптический микроскоп как томографическое устройство

Показано, что существует по крайней мере четыре области, которые являются общими для мезооптических микроскопов, с одной стороны, и для реконструктивной томографии, с другой. Томографические свойства имеют следующие характеристики мезооптических микроскопов: 1/ структура выходных данных об ориентации и положении в пространстве прямолинейных объектов, идущих под малыми углами относительно перпендикуляра к заданной томографической плоскости; 2/ поведение двухмерного фурье-образа прямолинейного объекта при вращении указанного объекта относительно фиксированной оси в пространстве; 3/ алгоритм сканирования объема ядерной фотозмульсии ленточным пучком света в мезооптическом микроскопе для поиска прямых следов частиц, идущих параллельно оптической оси микроскопа, и, наконец, 4/ тот факт, что мезооптические изображения прямых следов частиц в ядерной фотозмульсии с общей вершиной лежат на синограмме.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Перевод автора

Soroko L.M.

D13-89-548

Mesooptical Microscope as a Tomographical Device

It is shown that there are at least four regions which are common for the mesooptical microscopes, on the one hand, and for the reconstructed tomography, on the other hand. The following characteristics of the mesooptical microscope show the tomographical properties: 1) the structure of the output data concerning the orientation and the position in space of the straight-line objects going at small angles with the perpendicular to the given tomographic plane, 2) the behaviour of the two-dimensional Fourier-Transform of the straight-line object in the course of the rotation of this object with respect to the specified axis in space, 3) the scanning algorithm of the nuclear emulsion volume by the fence-like illuminated region in the mesooptical microscope for searching for particle tracks going parallel to the optical axis of the microscope, and, finally, 4) the fact that the mesooptical images of the straight-line particle tracks with a common vertex in the nuclear emulsion lie on the sinogram.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1989