

С 344.1e + С 344.1z

Л-942

3912/81
ЛЮКОВ В.В.



БІ-13-81-312.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

БІ-13-81-312

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

• Дубна 1981

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

51 - 13 - 81 - 312

В.В.Люков, Л.М.Сороко.

ФУРЬЕ-МИКРОСКОП ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ

II. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РАСЧЕТЫ

Дубликат поступил
в библиотеку
№ 03 81

Дубна, 1980

Аннотация

Описываются эксперименты, подтверждающие принцип действия фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии. Излагаются моделирующие расчеты на ЭВМ работы фурье-микроскопа для сплошных следов заряженных частиц в фотоэмульсии, а также для следов релятивистских частиц с просветами между отдельными зернами.

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе^{/1/}, освещающей принцип действия фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии, было показано, что при помощи фурье-микроскопа можно существенно повысить скорость просмотра слабо загруженной ядерной фотоэмульсии. Там же был описан один из вариантов автоматизированной системы просмотра ядерной фотоэмульсии на основе фурье-микроскопа, в котором полностью устранена операция сканирования слоя фотоэмульсии по глубине. Было также отмечено, что из-за малых размеров проявленных зерен серебра, диаметр которых соизмерим с длиной волны света, система щелевого опроса, разработанная в работах^{/2,3/}, использована быть не может. Ее необходимо заменить широкозахватным согласованным фильтром типа киноформа на сферической подложке или зеркалом на конической поверхности^{/1/}.

В данной работе описаны эксперименты, подтверждающие принцип действия фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии, а также приведены результаты моделирования на ЭММ фурье-микроскопа для реальных следов, имеющих просветы между отдельными зернами серебра. Эксперименты проводились на сплошных следах в ядерной фотоэмульсии, а также на тонких паутинках диаметром около 3 мкм, имитирующих сплошные следы в фотоэмульсии.

2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА СПЛОШНЫХ СЛЕДАХ

В качестве модели сплошного следа частицы в ядерной фотоэмульсии была взята темная полоска шириной d , которая идет через все поле зрения диаметром D , пересекая центр поля зрения. При этом всегда $d \ll D$. В силу принципа Бабинне^{/1/}, такая темная полоска может быть заменена эквивалентной ей узкой щелью тех же размеров.

На Рис.1 приведена схема эксперимента. Шторка с узкой щелью указанных выше размеров просвечивается сходящимся пучком света. Возникающая при этом картина дифракции далекого поля показана спра-

ва внизу на Рис.1. Чтобы пояснить структуру картины дифракции далекого поля, воспользуемся упрощенной моделью процесса дифракции света, которая изображена на Рис.2. Коллимированный пучок света падает на собирающую линзу, за которой установлена шторка с узкой щелью. На Рис.2а показан ход лучей в плоскости Oy , на Рис.2б - в плоскости Ox , а на Рис.2в дано расположение осей xOy относительно щели в шторке.

Лучи света, попадающие в точку O_I в плоскости Oy на расстоянии $OO_I = a$ от оптической оси, формируются плоским волновым фронтом BC' ; амплитуда волнового поля на котором имеет положительную полярность электрического вектора на половине длины фронта BC' и отрицательную полярность на остальной половине. Это условие выполняется, если $CC' = \lambda$. Тогда суммарная амплитуда волнового поля в точке O_I обращается в нуль. Из подобия треугольников на Рис.2а получаем

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{a}{f} \quad (1)$$

или

$$a = \lambda \frac{f}{2}$$

где f - фокусное расстояние собирающей линзы. В точке O_I находится первый минимум картины дифракции далекого поля от узкой щели. Аналогично находится положение первого минимума в плоскости Ox

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{A}{f} \quad (2)$$

или

$$A = \lambda \frac{f}{2}$$

Например, если $a = 5$ мкм, $\lambda = 0,7$ мкм, $2 = 1$ мм, $f = 300$ мм, то $a = 0,21$ мм и $A = 42$ мм.

В первых экспериментах был использован объектив Гелиос 44 с фокусным расстоянием 85 мм. Вместе щели устанавливалась "воздушная"

дифракционная решетка из проволоки диаметром 0,3 мм с шагом 1 мм, а также слой ядерной фотоэмульсии. Картина дифракции света на следах в ядерной фотоэмульсии фотографировалась на пленке Панхром 15. Было установлено, что изображение фурье-образа воздушной дифракционной решетки является очень мелкомасштабным и неудобным для наблюдения. В последующих экспериментах был использован фурье-объектив с фокусным расстоянием 300 мм и 600 мм.

На Рис.3 показана микрофотография поверхностного слоя ядерной фотоэмульсии, полученная в лазерном пучке света при малых значениях коэффициента увеличения биологического микроскопа. Видна сетка маркировки фотоэмульсии в виде полосок шириной около 15 мкм, которые разделяют поле зрения на четыре квадранта; царапина на поверхности фотоэмульсии; дефекты слоя в квадрате 52-24, а также прямой след заряженной частицы, идущий под углом $\sim 60^\circ$ к горизонтальной линии маркировки. Положение этого следа указывается стрелками, которые находятся за пределами кадра. Поле засветки неравномерное. Следы, находящиеся в глубине слоя фотоэмульсии, на микрофотографии не видны.

На Рис.4 показана картина фурье-образа слоя фотоэмульсии, структура приповерхностного слоя которой дана на Рис.3. Центральная сильно засвеченная часть картины фурье-образа создана прямым сходящимся пучком света от лазера. На Рис.4 видны также расходящиеся от центра узкие полоски. Это — картина дифракции далекого поля, образованная дефектами фотоэмульсии, часть из которых видна на Рис.3. Фурье-образ сетки маркировки сосредоточен также вблизи центра и сливается с ореолом. Царапина с изломом на поверхности фотоэмульсии видна на Рис.4 в виде дублета лучей. Фурье-образ прямолинейных деталей обладает следующим свойством: чем больше длина полоски, тем меньше ширина ее фурье-образа, а чем меньше ширина полоски, тем больше длина ее фурье-образа. На Рис.5 приведена фотография, полученная в тех же условиях, что и на Рис.4, но с временем экспозиции

в четыре раза меньше.

Математическая модель сплошного следа шириной d и длиной L характеризуется коэффициентом пропускания вида

$$f(x, y) = \Pi_d(x) \cdot \Pi_L(y) \quad (3)$$

где

$$\Pi_d(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq d/2 \\ 0, & |x| > d/2 \end{cases} \quad (4)$$

а

$$\Pi_L(y) = \begin{cases} 1, & |y| \leq L/2 \\ 0, & |y| > L/2 \end{cases} \quad (5)$$

Двумерный фурье-образ сплошного следа $f(x, y)$ определяется распределением амплитуды в плоскости пространственных частот

$$F(\omega_x, \omega_y) = \frac{\sin d\omega_x}{d\omega_x} \cdot \frac{\sin L\omega_y}{L\omega_y} \quad (6)$$

На Рис. 6 ^{А и Б} показана функция $f(x, y)$ вида (3), ее двумерный фурье-образ $F(\omega_x, \omega_y)$ вида (6), разрезы функции $F(\omega_x, \omega_y)$ вдоль осей $0\omega_x$ и $0\omega_y$, а также схематическая картина распределения интенсивности света в фурье-образе в плоскости пространственных частот за вычетом постоянной засветки.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ЭВМ

На Рис. 7 показана микрофотография реального следа с разрывами между отдельными зернами проявленного серебра или их конгломератами. Видно, что модель сплошного следа, рассмотренная выше, не может быть применена к такому следу и должна быть видоизменена. В качестве следующего приближения к реальности была взята модель следа с разрывами, в которой зерна серебра имеют одинаковую форму в виде диска диаметром d , а центры зерен лежат в узлах эквидистантной последовательности точек. Чередование зерен и просветов на этой последовательности

точек было определено непосредственно из микрофотографии следа частицы на Рис.7. В качестве вариации этой модели была использована псевдослучайная картина чередования зерен и просветов, которую используют в оптических адамаровских спектрометрах^{/4/} и в других мультиплексных системах измерений^{/5/}.

На Рис.8а показан след частицы с просветами на цепочке из $N=256$ точек, на Рис.8б - след, составленный из зерен, расположенных по псевдослучайному закону с коэффициентом заполнения, равным 0,5 для $N=128$, а на Рис.8в - для $N=64$ точек.

На Рис.9 приведен разрез вдоль оси ω_y двумерного дискретного фурье-образа следа частицы с просветами. Аналогичный разрез для модели сплошного следа показан на Рис.6. Видно, что кроме основного максимума на частоте $\omega_y=0$ наблюдается частокол, вызванный просветами между зернами серебра. Однако амплитуда этого частокولا составляет всего $1/22$ часть от основного максимума для реального следа и $1/14$ - для модели следа с просветами, составленной по псевдослучайному закону (Рис.10).

Разрез двумерного дискретного фурье-образа вдоль оси ω_x показан на Рис.11 для $N=64$. Видно, что наличие разрывов в следе не проявляется на этом разрезе.

Вывод: Результаты моделирования на ЭВМ различных моделей следа частицы с просветами показывает, что при коэффициенте заполнения следа, равном 0,5, обусловленный разрывами фон в плоскости пространственных частот относительно мал и может быть легко отделен от полезного сигнала.

4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ТОНКИХ ПАУТИНКАХ

На Рис.12 приведена схема установки, на которой были проведены имитирующие эксперименты на тонких паутинках диаметром около 3 мкм, которые были взяты в качестве модели сплошного следа частицы в ядер-

ной фотоэмульсии. Коллимированный пучок света от лазера диаметром поперечного сечения в 2,5 мм фокусировался фурье-объективом I с фокусным расстоянием 600 мм. Паутинка 2 располагалась на расстоянии 240 мм за объективом I. В плоскости пространственных частот, которая располагалась на расстоянии 350 мм за паутинкой, пучок света фокусировался в дифракционное пятно диаметром около 0,3 мм. За поглощающей маской 3 располагалась цилиндрическая линза 4 с фокусным расстоянием 250 мм и высотой 120 мм. Картина дифракции далекого поля от паутинки от центра до первого минимума полностью захватывалась такой цилиндрической линзой. Ту же функцию мог выполнить объектив с фокусным расстоянием 250 мм и диаметром не менее 150 мм. В плоскости 5, расположенной на расстоянии 750 мм за плоскостью пространственных частот, находился зеркальный фотоаппарат со снятым объективом.

На Рис.13 показаны фотографии картины дифракции далекого поля от паутинки диаметром около 3 мкм в плоскости 3 на Рис.12. Времена экспозиции фотопленки Микрат 300 составляли соответственно 1/500 с, 1/100 с и ~4 с на Рис.13а, б и в. На Рис.13в прямой пучок света от лазера в кадр не попадал. Четко виден минимум, описываемый функцией $\sin \alpha x / \alpha x$

Приведенные на Рис.13 фотографии демонстрируют принцип Бабиня в оптике: картина дифракции далекого поля от объекта с коэффициентом пропускания $f(x)$, $0 \leq f(x) \leq 1$, имеет такой же вид, как от объекта с коэффициентом пропускания $1 - f(x)$. Функция $f(x)$ соответствует узкой щели, а функция $1 - f(x)$ - тонкой паутинке или сплошному следу в ядерной фотоэмульсии.

Изображения, сфотографированные в плоскости 5, показаны на Рис.14, когда паутинка находится в центре пучка света при времени экспозиции 1/500 с (Рис.14а), а также 1/2 с (Рис.14б), или в 250 раз больше, чем на Рис.14а. Изображение, полученное при времени экспози-

ции $I/4$ с в положении, когда паутинка находилась на краю пучка света, показано на Рис. I4в и в положении, когда паутинка была полностью выведена из пучка света – на Рис. I4г. Белые пятна на Рис. I4в и г обусловлены дефектами системы формирования пучка света. Они не мешают наблюдениям за обращенным отфильтрованным изображением паутинки и могут быть полностью устранены.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирующие эксперименты на сплошных следах в ядерной фотоэмульсии, на паутинках диаметром около 3 мкм, а также результаты моделирующих расчетов на ЭВМ процесса формирования картины дифракции далекого поля от следа частицы с разрывами между зернами показывают, что принцип Фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии является правильно обоснованным, а просветы в следе частицы и малые размеры зерен серебра создают эффекты второго порядка и не снижают заметным образом расчетные характеристики Фурье-микроскопа.



Литература.

1. Л.М.Сороко. Фурье-микроскоп для просмотра ядерной фотоэмульсии.
I. Принцип действия. ОИЯИ Б-1-13-80,-229
Дубна, 1980.
2. Л.М.Сороко. Устройство для автоматической обработки трековых снимков. А.С.У №211682, Бюлл. №8, 1968, с. 66.
СССР от 01.10.65 ОИПОТЗ
3. Л.М.Сороко. Устройство для автоматического измерения угловых распределений следов частиц в трековых камерах.
А.С.У №200023, Бюлл. №16, 1967, с. 58.
СССР от 11.04.66 ОИПОТЗ
4. J.A.Decker. Hadamard - Transform Spectrometer for Analitical Spectrochemistry. In Proc. Appl. Walsh Functions, 1973, p. 101-107.
5. Л.М.Сороко. Мультиплексные системы измерений в физике.
Атомиздат, М., 1980.

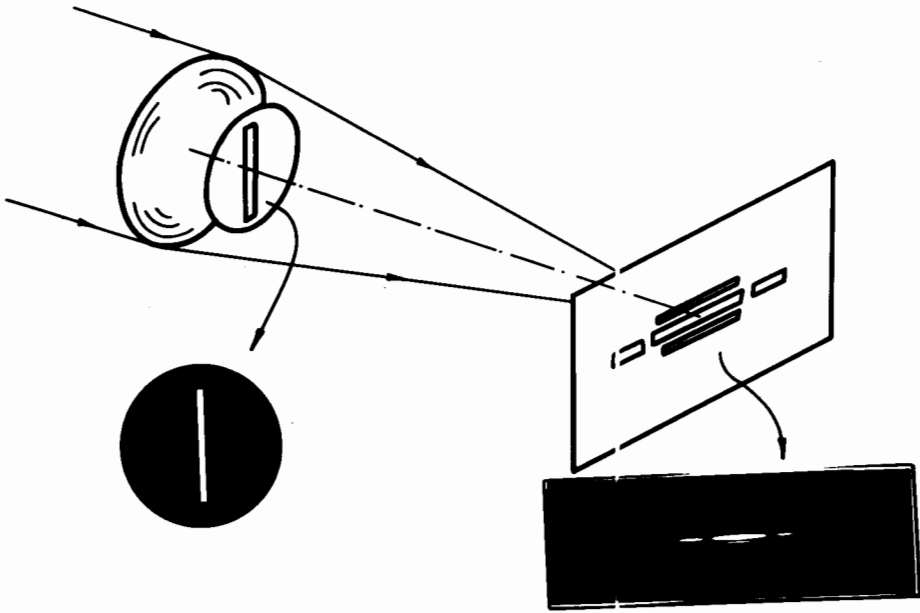


Рис. I. Схема формирования фурье-образа транспаранта при помощи сходящегося пучка света. Слева показана шторка с узкой щелью, справа - фотография фурье-образа узкой щели.

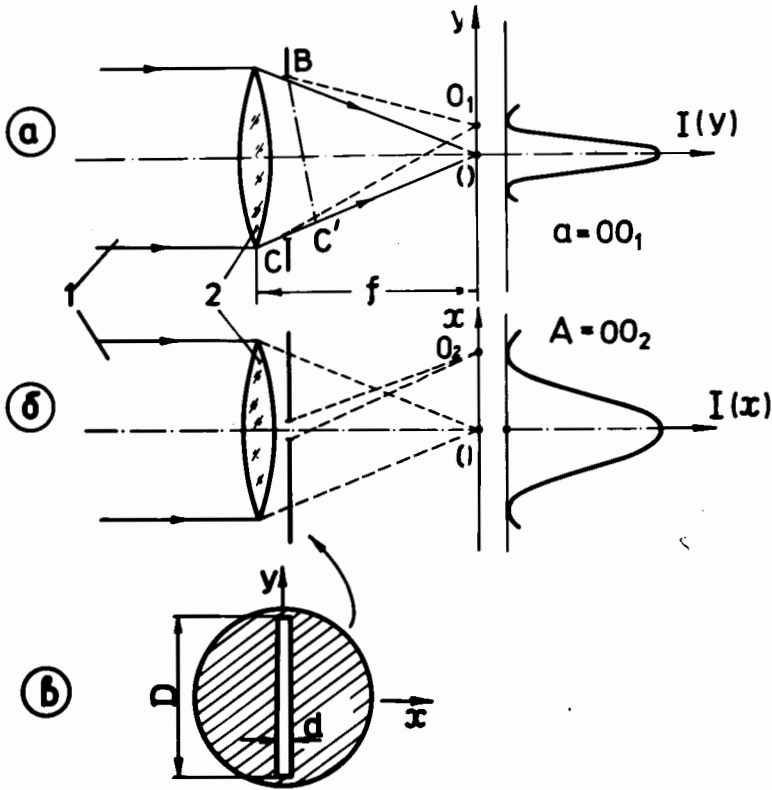


Рис.2. Объяснение структуры картины дифракции далекого поля объекта в виде узкой щели: а – ход лучей в плоскости Oy , б – ход лучей в плоскости Ox , в – расположение координатных осей xOy относительно щели в шторке.

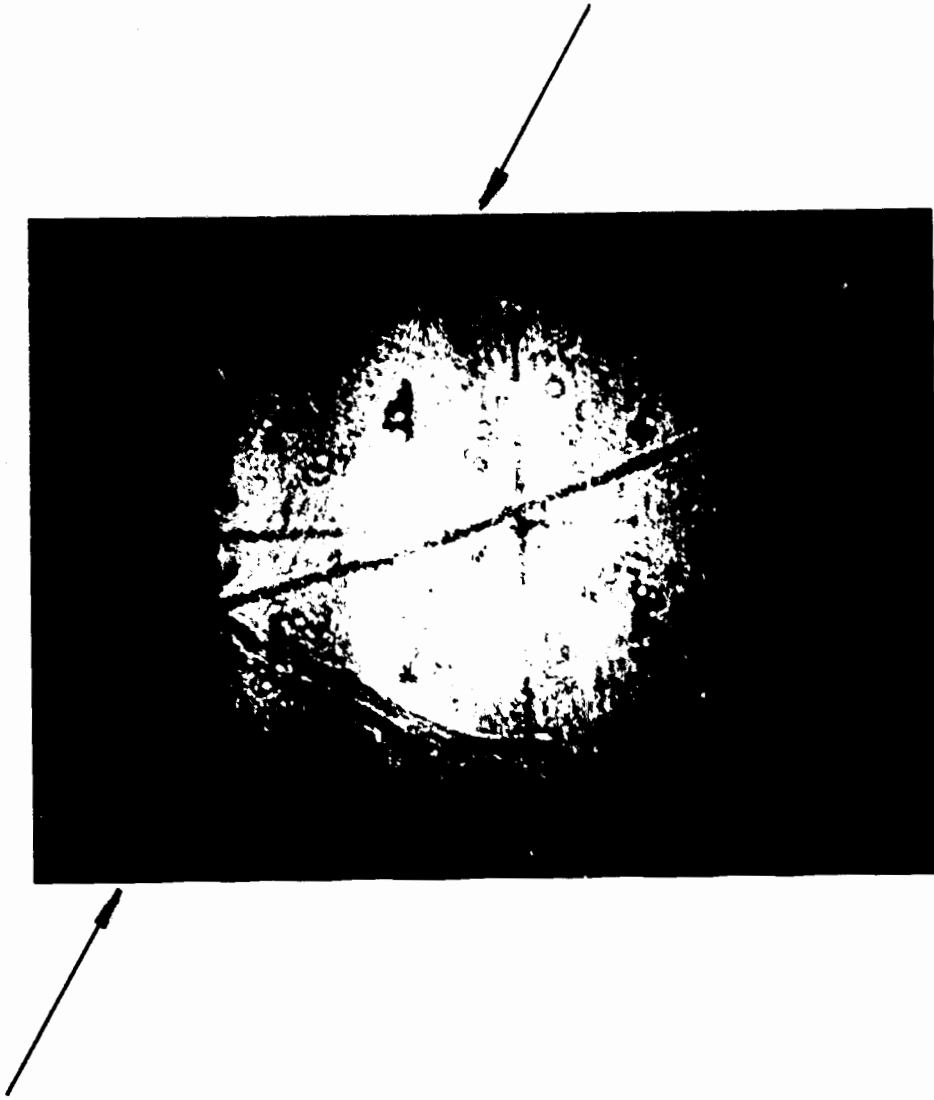


Рис.3. Микрофотография поверхности ядерной фотозэмульсии, полученная при малом увеличении микроскопа в лазерном пучке света. Видна сетка маркировки, разделяющая четыре квадрата, царапина на поверхности фотозэмульсии, дефекты в квадрате 52-24, а также след, идущий под углом $\sim 60^\circ$ к горизонтальной линии маркировки. Положение этого следа помечено стрелками, вынесенными за пределы кадра. Следы, находящиеся в глубине фотозэмульсии, на фотографии не видны.



Рис.4. Фурье-образ участка фотозэмульсии, поверхностный слой которой показан на Рис.3. В центре - ореол от прямого пучка света, сфокусированного в точку. Расходящиеся из центра лучи образованы различными деталями в фотозэмульсии, часть из которых видна на Рис.3. Фурье-образ сетки маркировки имеет небольшую длину и сливается с ореолом от прямого пучка. След, помеченный на Рис.3 стрелками и ориентированный под углом $\sim 60^\circ$ к горизонтальной линии маркировки, "превратился" в фурье-образ в виде тонкой линии, которая ориентирована к горизонтальной линии маркировки под углом $60^\circ + 90^\circ = 150^\circ$. Такой поворот на 90° испытывают все прямые следы, расположенные как на поверхности, так и на глубине фотозэмульсии. Фурье-образ следа, помеченного на Рис.3 стрелками, помечен аналогичными стрелками на Рис.4. Царапина с изломом на поверхности фотозэмульсии образует на Рис.4 "дублет" коротких лучей в соответствии с общим правилом: чем больше длина отрезка прямой, тем тоньше его фурье-образ, а чем меньше ширина отрезка, тем длиннее его фурье-образ.

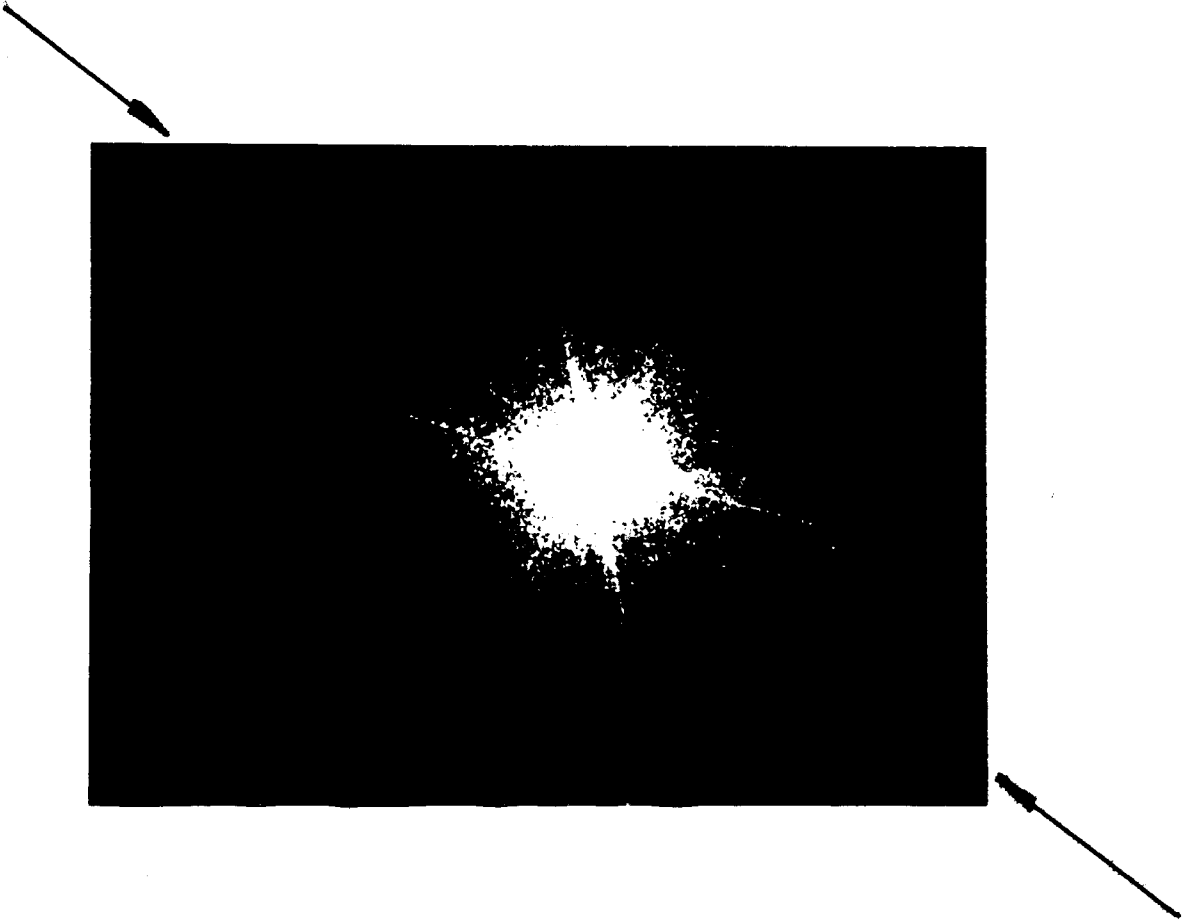


Рис.5. То же, что и на Рис.4, но с временем экспозиции в 4 раза меньше.

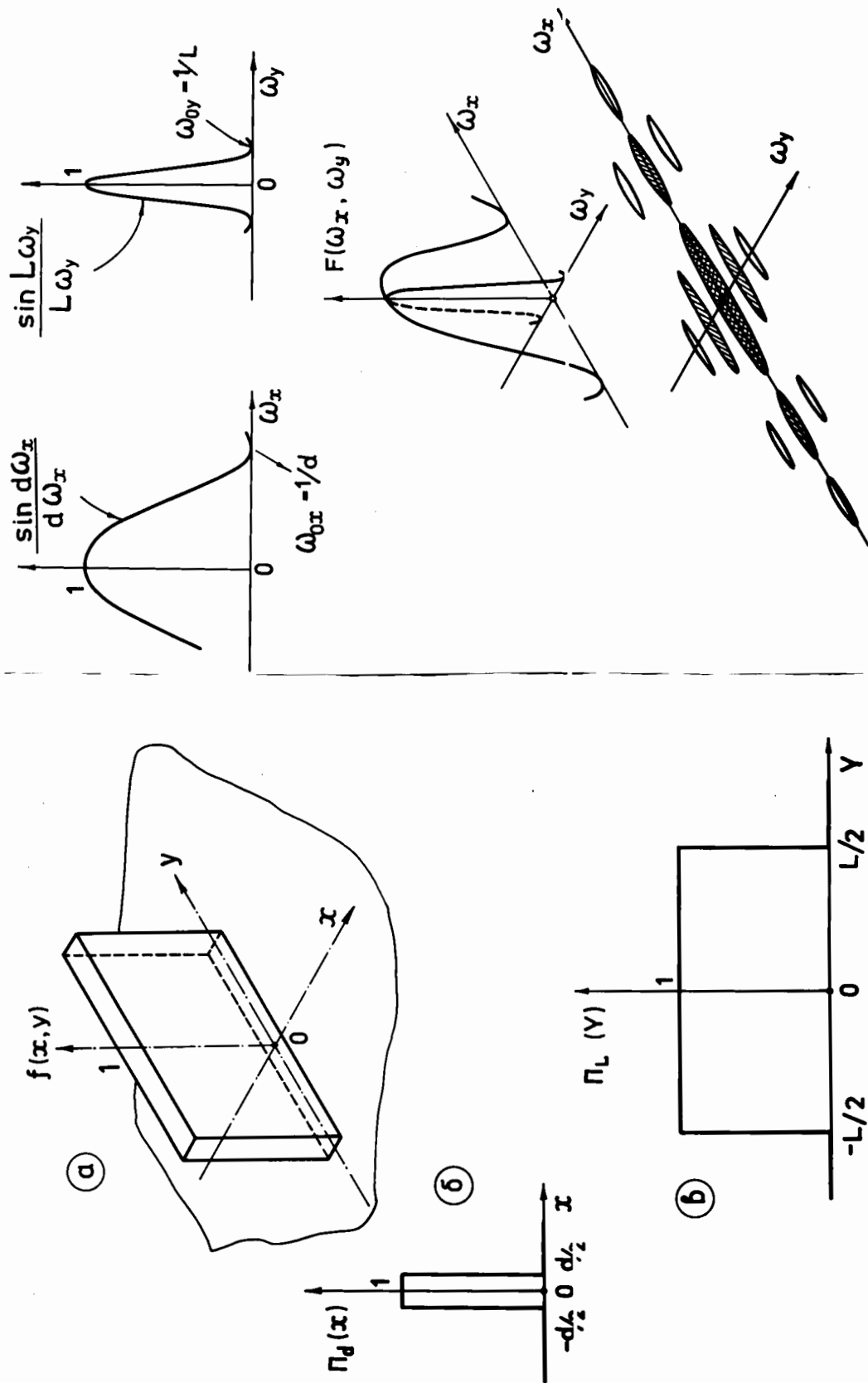


Рис.6. Модель сплошного следа шириной d и длиной L . Слева показана исходная функция $f(x,y)$ и ее разрезы вдоль осей Ox и Oy . Справа – двумерный фурье-образ $F(\omega_x, \omega_y)$, разрезы его вдоль осей $O\omega_x$ и $O\omega_y$, а также распределение интенсивности света в плоскости пространственных частот.

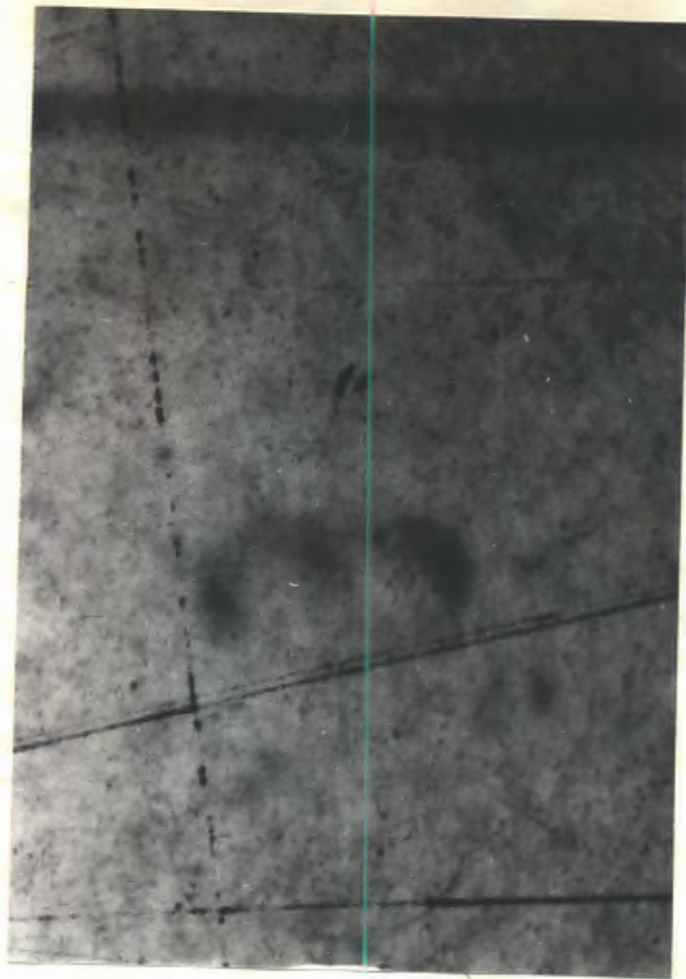


Рис.7. Микрофотография следа быстрой частицы в ядерной фотозмульсии на фоне помех. След имеет разрывы между отдельными зернами серебра и их конгломератами.

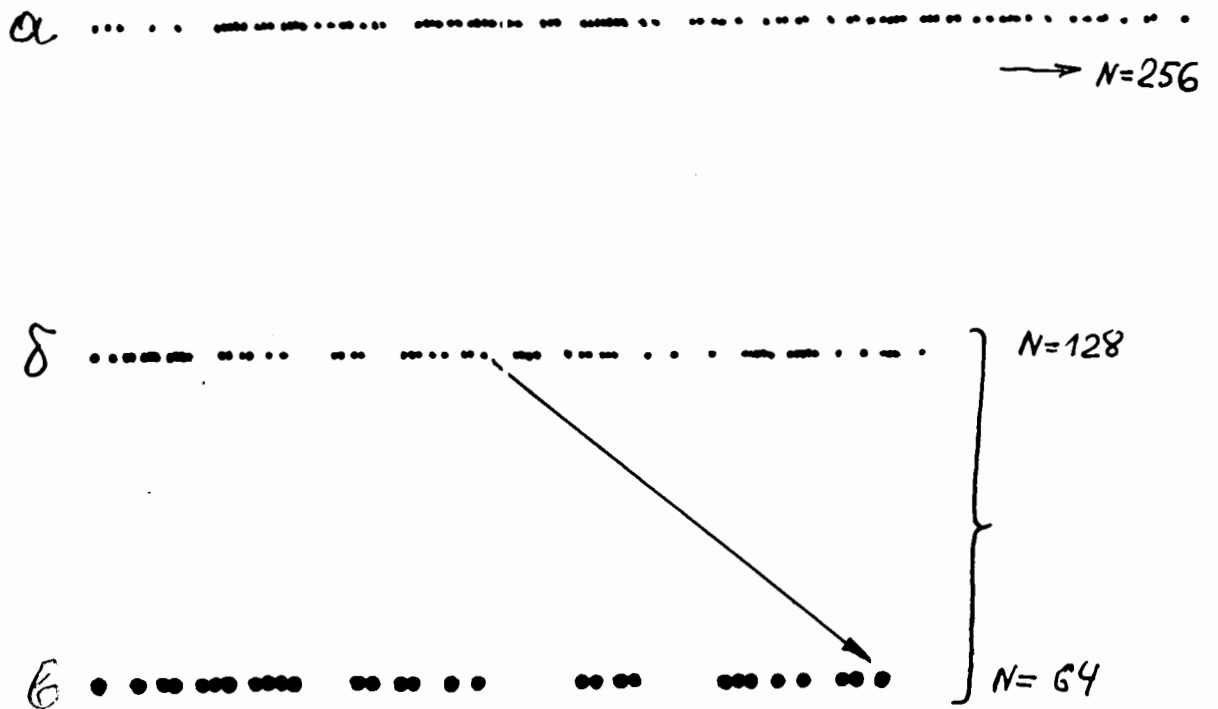


Рис.8. Модель следа частицы с просветами: реальный след (а), псевдослучайное расположение зерен с коэффициентом заполнения 0,5 для $N = 128$ (б) и $N = 64$ (в).

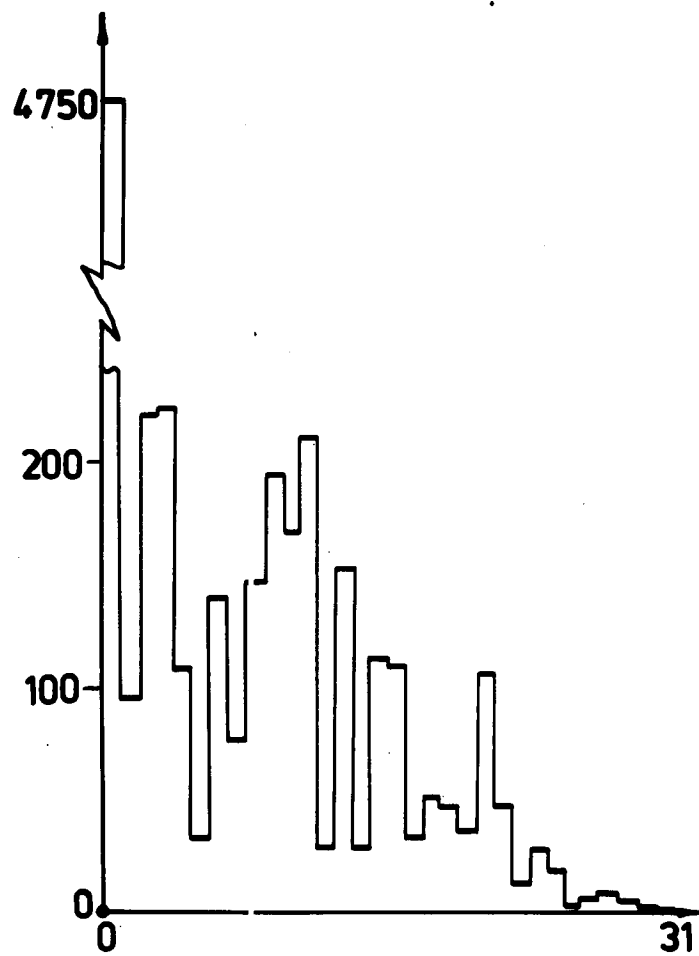


Рис.9. Разрез вдоль оси ω_y двумерного дискретного фурье-образа реального следа частицы с просветами для $N = 64$.

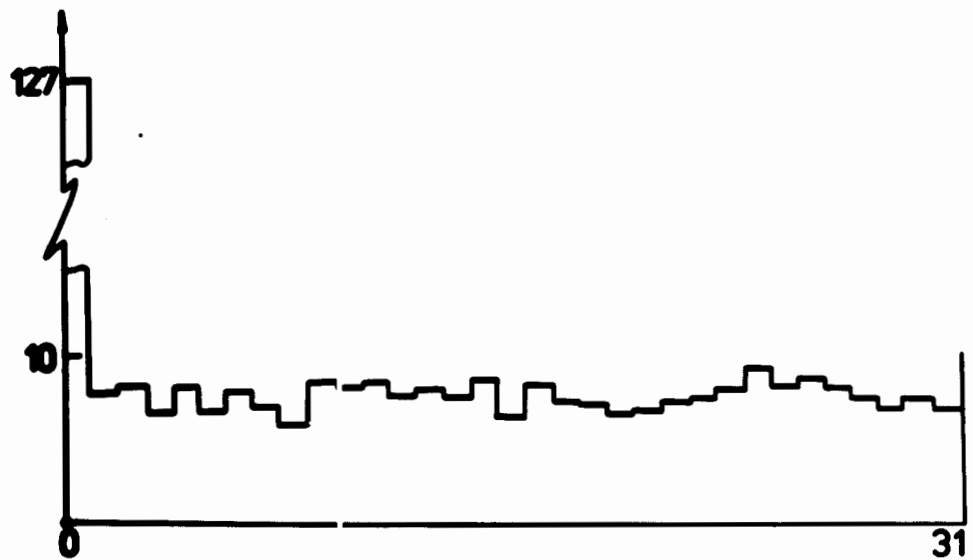


Рис.10. То же, что и на Рис.9, но для зерен следа, расположенных по псевдослучайному закону.

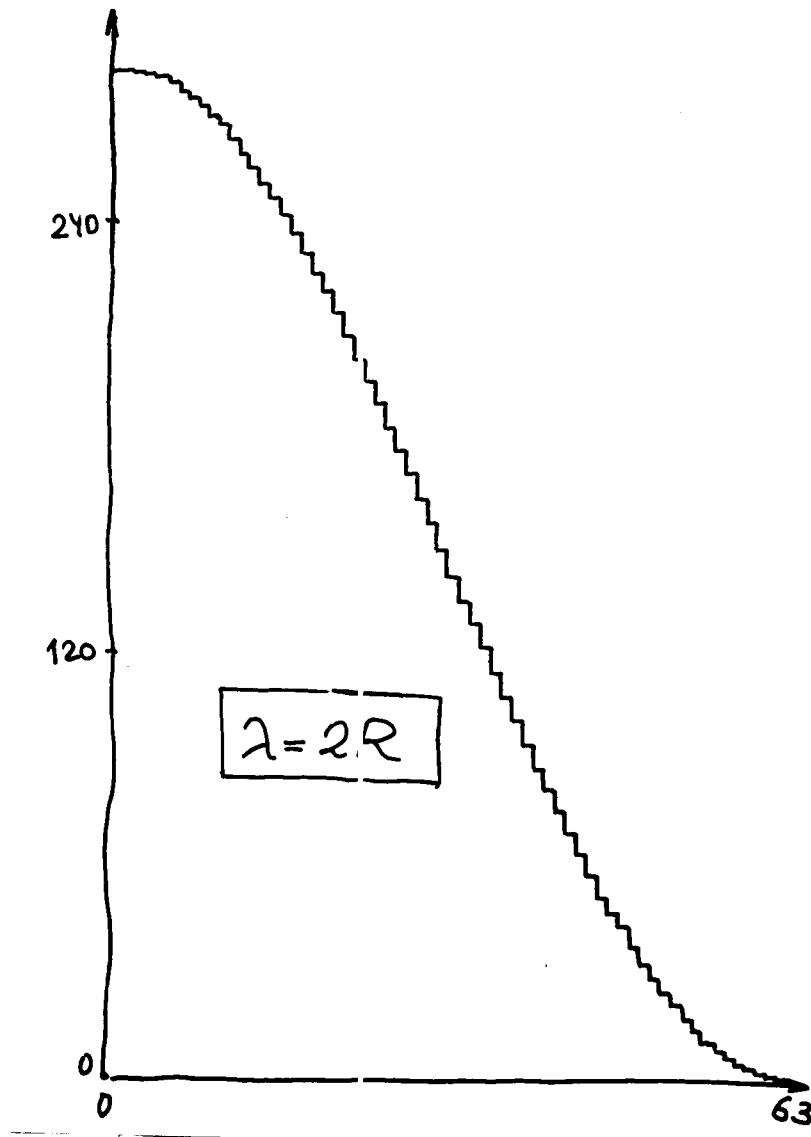
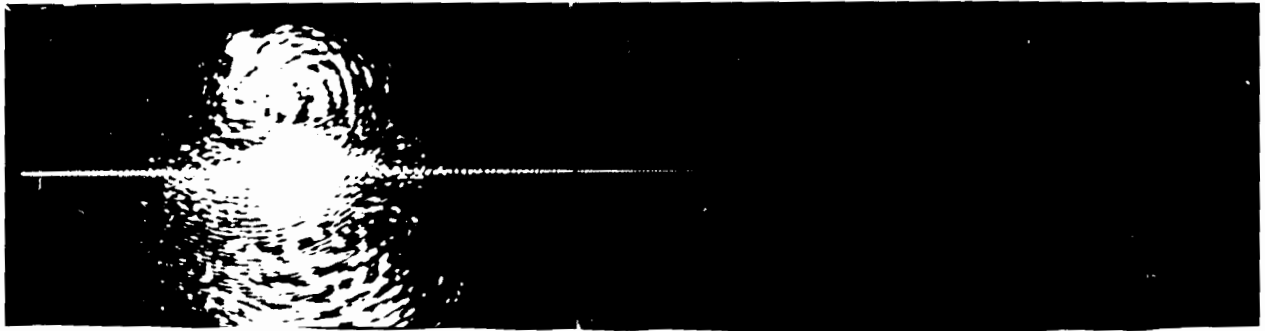
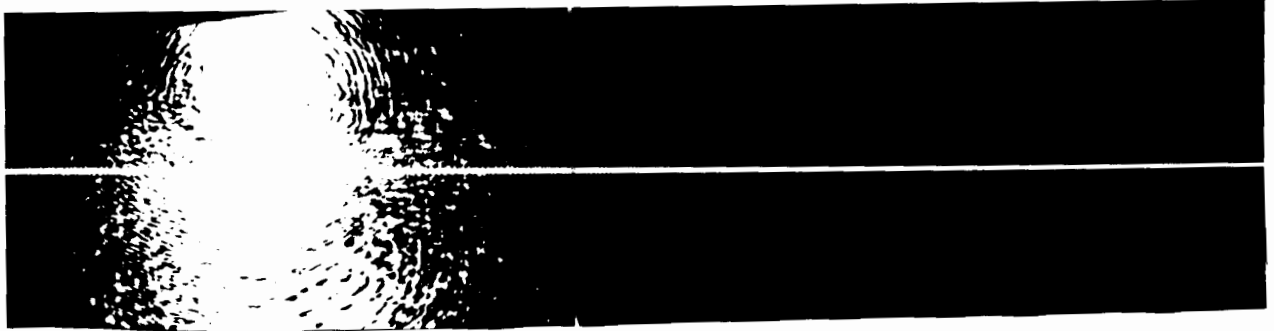


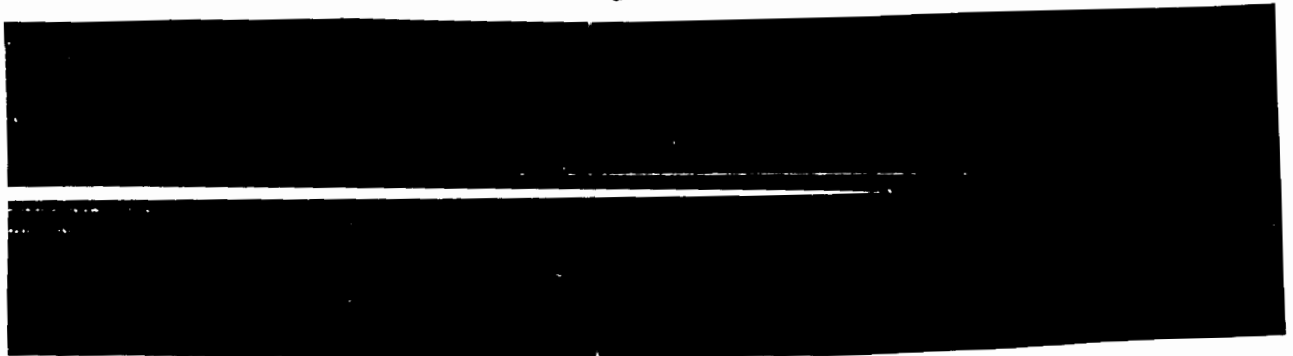
Рис. II. Разрез вдоль оси ω_x двумерного дискретного фурье-образа реального следа частицы с просветами для $N = 64$.



а



б



в

Рис.13. Фотографии фурье-образа паутинки диаметром 3 мкм, полученные в плоскости 3 на Рис.12 на фотопленке Микрат 300:
 а - $t = 1/500$ с, б - $t = 1/100$ с, в - $t = 4$ с. Во время экспозиции (в) прямой пучок света от лазера в кадр не попадал. Паутинка расположена вертикально. Линия фурье-образа - горизонтально. Эти фотографии демонстрируют практическую значимость принципа Бабине в оптике (см. текст).

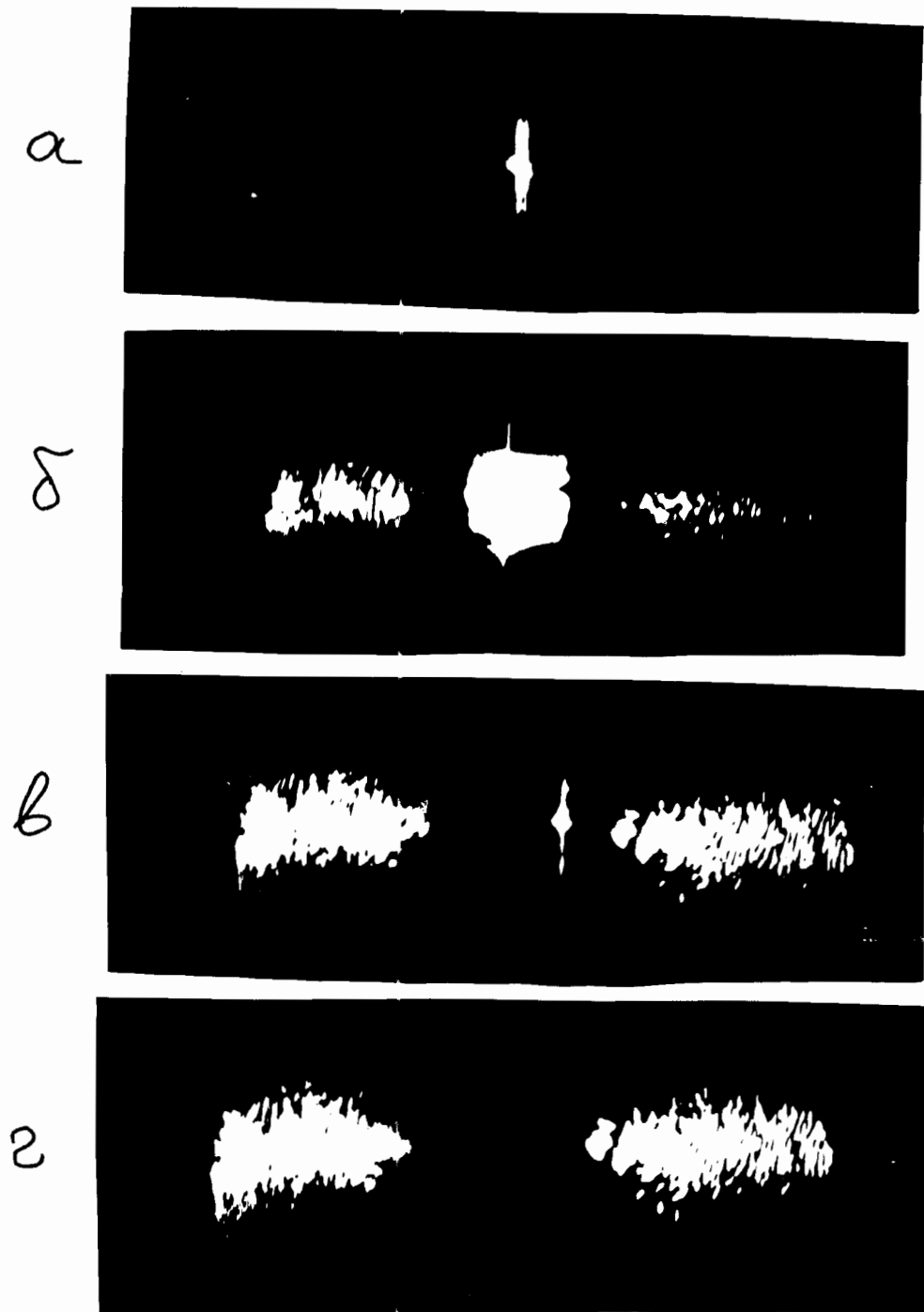


Рис.14. Фотографии, полученные в плоскости 5 на Рис.12:

а - паутинка проходит через центр сечения пучка света, время экспозиции $1/500$ с; б - то же самое, но время экспозиции в 125 раз больше; в - паутинка находится на краю сечения пучка света, время экспозиции $1/4$ с; г - паутинка введена из пучка света полностью, время экспозиции равно $1/4$ с.