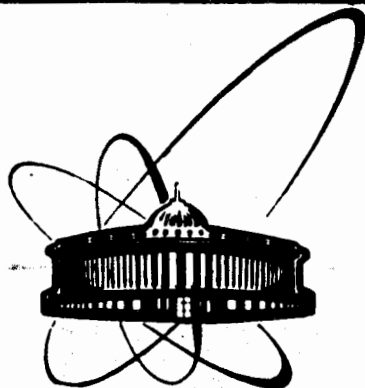


89-450



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

A 91

Д13-89-450

А.Я.Астахов, Д.Бенце, А.Кишварди,  
Л.Молнар, Л.М.Сороко

СРАВНЕНИЕ ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ  
В МЕЗООПТИЧЕСКОМ ФУРЬЕ-МИКРОСКОПЕ  
И В ТРАДИЦИОННОМ ОПТИЧЕСКОМ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ МИКРОСКОПЕ

Погрешности измерений

Направлено в Оргкомитет Конференции по оптике  
(Эрнст Аббе-конференция), Йена, ГДР, 1989 г.

1989

Сравнение выходных данных в мезооптическом фурье-микроскопе и в традиционном оптическом измерительном микроскопе.  
Погрешности измерений

Дан анализ погрешностей измерений следов частиц в мезооптическом фурье-микроскопе /МФМ/. Подробно рассмотрено поведение двух мезооптических изображений следа частицы на экране дисплея автоматизированной системы просмотра ядерной фотозумльсии на основе МФМ. Показано, что дисперсия измерений  $z$ -координаты следа частицы с помощью МФМ  $\sigma(z) = 4$  мкм,  $x$ -координаты  $\sigma(x) = 6$  мкм, угла ориентации  $\sigma(\theta_{xy}) = 0,6$  и угла погружения  $\sigma(\theta_z) = 7'$ . Кроме этого МФМ позволяет измерить искривление следа частицы в ядерной фотозумльсии радиусом  $\rho = 10$  м с погрешностью  $\pm 2$  м на длине обмеряемого следа частицы  $\Delta y = 6,5$  мм.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Перевод авторов

Comparison of the Output Data in Mesooptical Fourier-Transform Microscope and in Traditional Optical Microscope. Measurement Errors

The analysis of the measurement errors for the particle tracks in the mesooptical Fourier-Transform microscope (MFTM) is presented. The behaviour of the two mesooptical images of the particle track on the display screen of the automatic search system for nuclear emulsion on the basis of the MFTM is treated comprehensively. It is shown that the measurement variance for the  $Z$ -coordinate of the particle track in the MFTM is equal to  $\sigma(Z) = 4 \mu\text{m}$ ; for the  $X$ -coordinate,  $\sigma(X) = 6 \mu\text{m}$ ; for the orientation angle,  $\sigma(\theta_{xy}) = 0,6$ ; and for the deep angle,  $\sigma(\theta_z) = 7'$ . Besides the curvature radius of the particle track in the nuclear emulsion of the order of  $\rho = 10$  m with error  $\pm 2$  m over the length of the measurement particle track  $\Delta y = 6,5$  mm can be measured as well with MFTM.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1989

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является продолжением работы <sup>1</sup>, в которой на основании сопоставления выходных данных в мезооптическом фурье-микроскопе /МФМ/ и в традиционном оптическом измерительном микроскопе были сделаны оценки калибровочных коэффициентов, с помощью которых по положениям двух мезооптических изображений на телевизионном дисплее компьютера можно оценить координаты  $x$  и  $z$ , а также угол ориентации  $\theta_{xy}$  и угол погружения  $\theta_z$  обмеряемого следа частицы.

В данной работе произведен анализ погрешностей измерений следов частиц в МФМ. Подробно рассмотрено поведение двух мезооптических изображений следа частицы на экране дисплея автоматизированной системы просмотра ядерной фотоэмульсии на основе МФМ.

## 2. УСЛОВИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Условия измерения в данной работе полностью совпадают с описанными ранее <sup>1</sup>. Был использован тот же сводный массив и та же нумерация обмеряемых следов частиц, что и в <sup>1</sup>.

## 3. ДИСПЕРСИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Обработка данных, приведенных на рис. 3 работы <sup>1</sup>, позволяет найти дисперсию измерений координаты  $z$  с помощью МФМ:  $\sigma(z) = 4$  мкм. Эта оценка не противоречит данным о значениях  $z(y)$ , приведенных на рис. 1 и 2 данной работы для всех обмеренных следов частиц. На рис. 3 внизу показано расположение обмеренных следов частиц в поперечном сечении ядерной фотоэмульсии толщиной 200 мкм, а сверху - значения дисперсии  $\sigma(z)$  измерений  $z$ -координат в зависимости от  $z$ -координаты /темные кружки/ / а / и максимальные расхождения  $\Delta z_{\max}$  /темные треугольники/ / б /. Из рис. 3 видно, что никакой корреляции указанных величин с координатой  $z$  не имеется.

На рис. 4 приведены значения дисперсии  $\sigma(x_1)$  для измерений, выполненных на МФМ /а/ и на ДИП-1 /б/ для всех следов частиц.



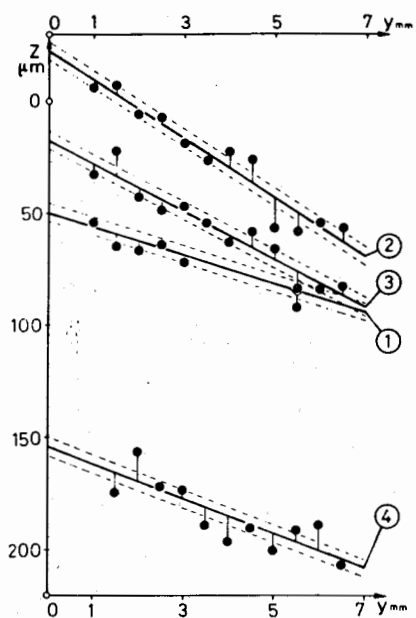


Рис. 1. Результаты измерений  $z$ -координаты следов частиц №2, 3, 1, 4 /МФМ/.

Рис. 2. Результаты измерений  $z$ -координаты следов частиц №7, 6, 10, 8 /МФМ/.

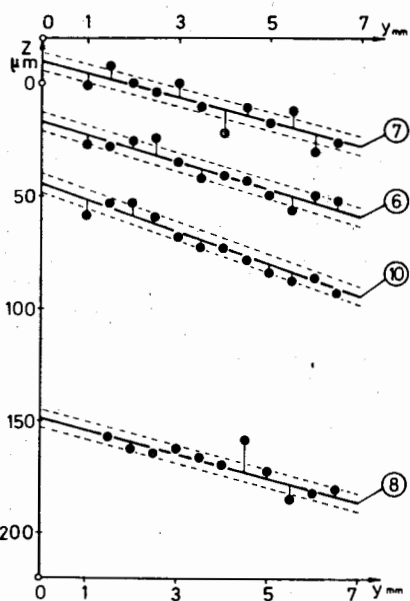


Рис. 3. Внизу: расположение следов частиц в одном из сечений ядерной фотозумльсии, найденное без сканирования по глубине /МФМ/. Вверху: дисперсия измерений  $z$ -координаты следов частиц /МФМ/ /о/, а также предельные значения отклонения от среднего значения /▲/.

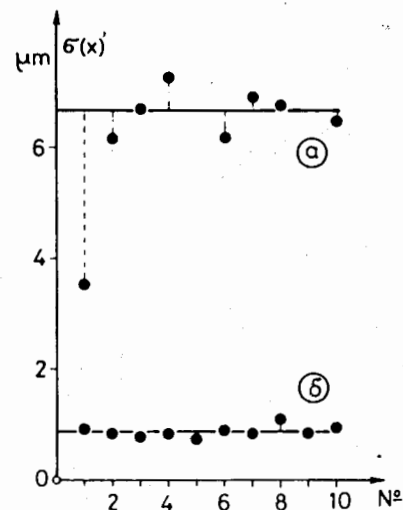
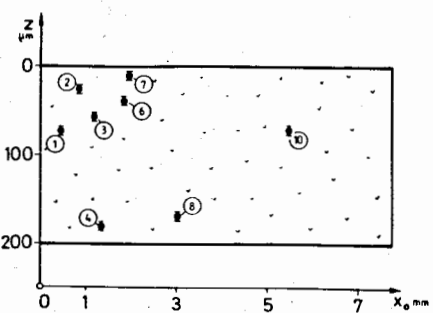
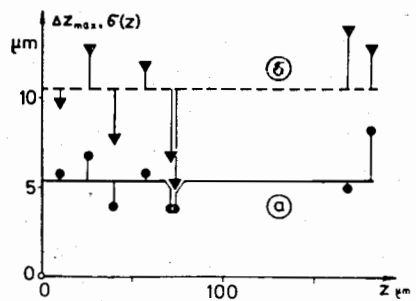


Рис. 4. Дисперсия  $\sigma(x)$  измерений  $x$ -координаты с помощью МФМ /а/ и ДИП-1 /б/.

Рис. 5. Дисперсия  $\sigma(\theta_z)$  измерений угла погружения  $\theta_z$  /вверху/ и дисперсия  $\sigma(\theta_{xy})$  измерений угла ориентации  $\theta_{xy}$  /внизу/.

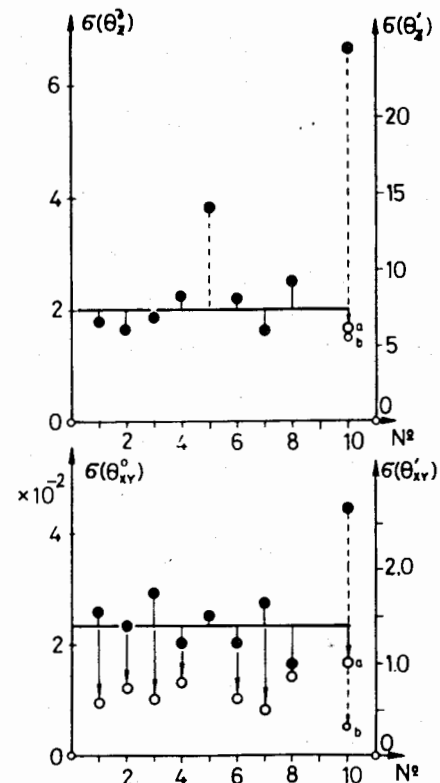
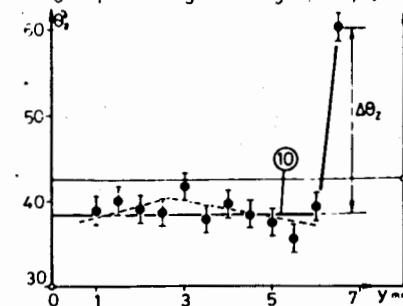
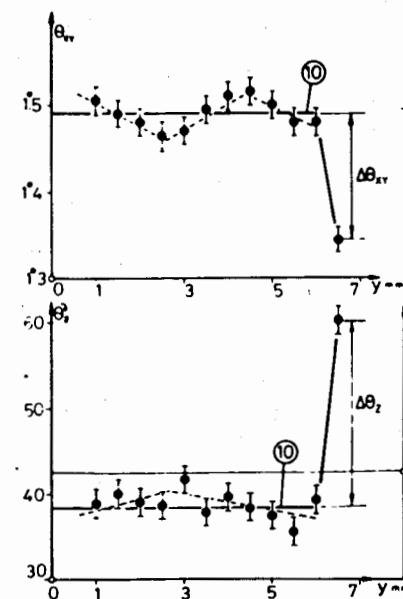


Рис. 6. Вверху: угол ориентации  $\theta_{xy}$ , измеренный вдоль следа частицы №10 /МФМ/. Внизу: угол погружения  $\theta_z$  для того же следа частицы.

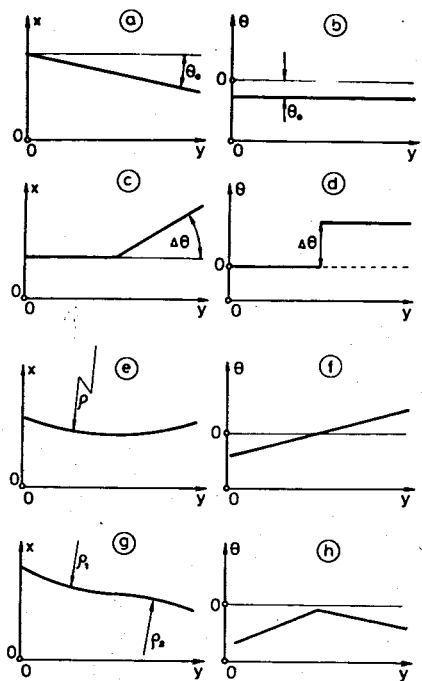


Рис. 7. Типичные ситуации с одиночным следом частицы в ядерной фотоэмульсии /слева/ и соответствующие им функции  $\theta(y)$  /справа/.

Рис. 8. Угол ориентации  $\theta_{xy}$  вдоль следов частиц №4, 7, 1 /МФМ/.

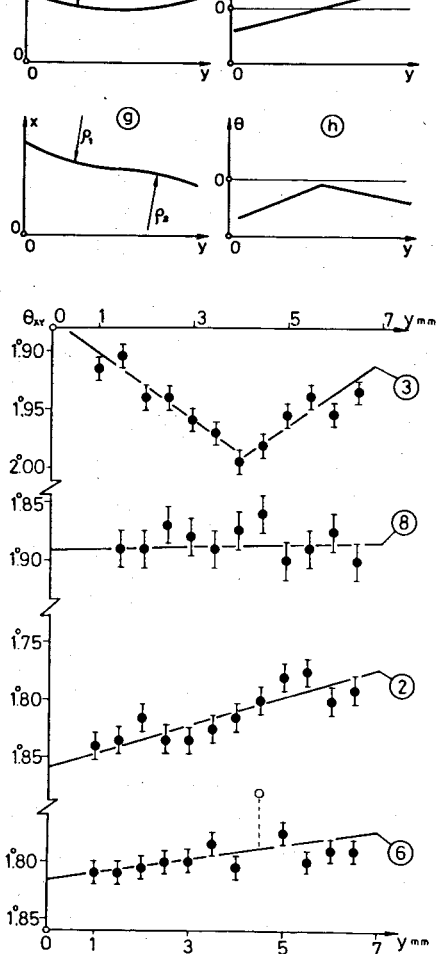
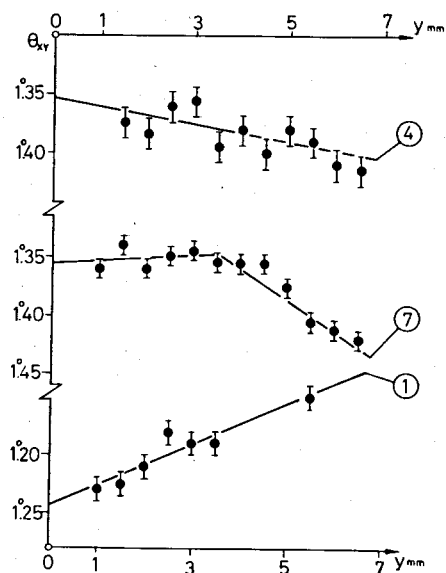
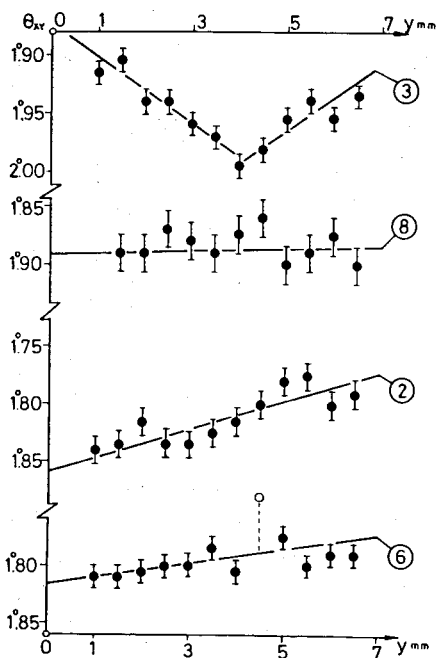


Рис. 9. Угол ориентации  $\theta_{xy}$  вдоль следов частиц №3, 8, 2, 6 /МФМ/.



Видно, что  $\bar{\sigma}(x_1) = 0,9$  мкм, а  $\bar{\sigma}(x_3) = 6,7$  мкм. Одна из причин существенного различия между  $\bar{\sigma}(x_1)$  и  $\bar{\sigma}(x_3)$  состоит в том, что измерения координат  $x_1$  на ДИП-1 велись с ценой отсчета  $\Delta x_1 = 0,5$  мкм, а координаты  $x_3$  на МФМ с ценой отсчета  $\Delta x_3 = 2,5$  мкм. Однако  $\bar{\sigma}(x_3)/\bar{\sigma}(x_1) = 7,45:1$ , а не  $5:1$ , и поэтому наблюдаемое различие между  $\bar{\sigma}(x_1)$  и  $\bar{\sigma}(x_3)$  не может быть объяснено только этой причиной.

На рис. 5 приведены значения дисперсий  $\sigma(\theta_z)$  и  $\sigma(\theta_{xy})$  для всех следов частиц, обмеренных в описываемых экспериментах. Аномально высокую дисперсию имеют следы №5 и №10. Наблюдаемый выброс  $\sigma(\theta_z)$  для следа частицы №5 можно объяснить тем, что он лежит частично под маркировочной сеткой. Напомним, что ширина маркировочной сетки равна 10 мкм, а шаг 1 мм. Поэтому вероятность затенения следа частицы маркировочной сеткой составляет не более 1%. Что касается выбросов дисперсий  $\sigma(\theta_z)$  и  $\sigma(\theta_{xy})$  для следа частицы №10, то их следует признать реальными, а исходная гипотеза о прямолинейности следов частиц в пределах обмеряемого участка неверна для следа частицы №10. Этот вывод подтверждается наличием скачкообразных измерений углов  $\theta_{xy}$  и  $\theta_z$  для следа частицы №10 в области  $y \approx 6$  мм /рис. 6/. При этом  $\Delta\theta_{xy} = 8',6 \pm 1',4 / \pm 15\%$ , а  $\Delta\theta_z = 80' \pm 9' / \pm 12\%$ . Таким образом, след частицы №10 здесь испытывает рассеяние с одновременным изменением углов  $\theta_{xy}$  и  $\theta_z$ . Заметим, что прецизионные измерения координаты  $x_1$  на ДИП-1 не позволяют заметить рассеяние частицы на столь малые углы, так как  $\Delta x_{\text{расс}} \approx 1,2$  мкм, а дисперсия отдельного измерения координаты  $x$  на ДИП-1 равна  $\sigma(x_1) = 0,9$  мкм.

На рис. 7 показаны типичные ситуации, которые могут наблюдаться в ядерной фотоэмульсии /слева/ и соответствующие им зависимости  $\theta(y)$  в МФМ /справа/. Рис. 7а соответствует прямому следу частицы, идущему под углом  $\theta_0$  к оси  $u$ . Соответствующая функция  $\theta(y)$  представляет собой прямую линию  $\theta(y) = \theta_0$ , идущую параллельно оси  $u$ . Процесс рассеяния частицы на угол  $\Delta\theta / \nu$  виден в МФМ как скачок функции  $\theta(y)$  на величину  $\Delta\theta / \nu$ . Если след частицы искривлен с постоянным радиусом кривизны  $\rho / d$ , то функция  $\theta(y)$  представляет собой прямую линию, наклонную к оси  $u$  /е/, при этом тангенс угла наклона  $\Delta\theta / \Delta y = 1 / \rho$ . В ядерной фотоэмульсии, которая испытывает сложные деформации в процессе фотохимической обработки, след частицы может быть искривлен так, что знак кривизны изменяется на обратный /ж/. В этом случае функция  $\theta(y)$  состоит из двух прямых линий /з/.

На рис. 8 и 9 приведены зависимости  $\theta_{xy}(y)$ , измеренные при помощи МФМ для следов частиц №4, 7, 1 и №3, 8, 2, 6 соответственно. Данные о следе частицы №10, которые соответствуют рис. 7в,г, были приведены ранее на рис. 9. Из рис. 8 и 9

можно сделать оценки радиуса кривизны следов частиц. Сильное искривление имеют следы частиц №3, 7, 10:  $\rho_1(3) = (-1,88 \pm 0,16) / \text{м}$ ,  $\rho_2(3) = /2,15 \pm 0,27 / \text{м}$ ,  $\rho(7) = /2,15 \pm 0,22 / \text{м}$ ,  $\rho_1(10) = /-2,4 \pm 0,8 / \text{м}$ ,  $\rho_2(10) = /3,8 \pm 1,5 / \text{м}$ ,  $\rho_3(10) = /-2,9 \pm 0,9 / \text{м}$ . Слабое искривление имеют следы частиц №4, 1, 8, 2, 6:  $\rho(4) = /-6,2 \pm 1,5 / \text{м}$ ,  $\rho(1) = /3,2 \pm 0,3 / \text{м}$ ,  $\rho(8) = 50 \text{ м} \pm \pm 200\%$ ,  $\rho(2) = /4,6 \pm 0,7 / \text{м}$ ,  $\rho(6) = /9,1 \pm 2,1 / \text{м}$ . Следы частиц №3 и 7 на рис. 8 и 9 соответствуют рис. 7ж,з.

Если отбросить гипотезу о прямолинейности следов частиц и признать реальным искривление следов частиц, как это было сделано выше, то дисперсия  $\sigma(\theta_{xy})$  уменьшится в два раза. На рис. 5 новые значения дисперсии  $\sigma(\theta_{xy})$  обозначены белыми кружками с индексом "а". Одновременно уменьшаются дисперсии  $\sigma(\theta_z)$  и  $\sigma(\theta_{xy})$  для следа частицы №10, с  $\sigma(\theta_z) = 6^{\circ},6$  до  $\sigma_a(\theta_z) = 1^{\circ},7$ , т.е. почти в 4 раза, и с  $\sigma(\theta_{xy}) = 2^{\circ},6$  до  $\sigma_a(\theta_{xy}) = 1^{\circ},0$ . Если далее предположить, что след частицы №10 подвергается сложному искривлению с переменной знака кривизны, то дисперсия измерений угла погружения  $\theta_z$  дополнительно уменьшится до  $\sigma_b(\theta_z) = 1^{\circ},5$  /белый кружок с индексом "б" на рис. 5/.

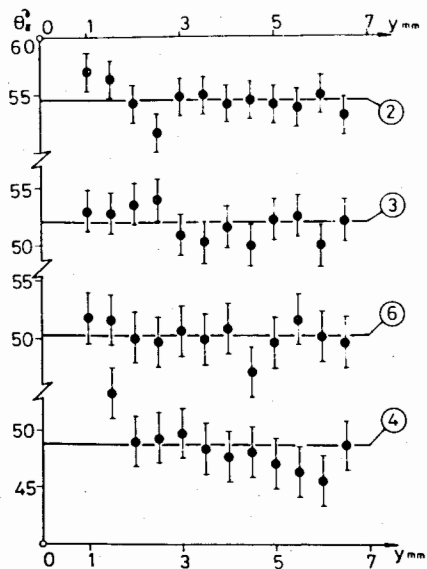


Рис. 10. Угол погружения  $\theta_z$  вдоль следов частиц №2, 3, 6, 4 /МФМ/.

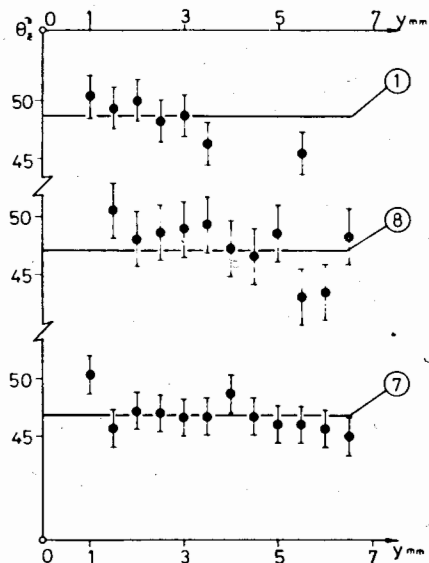


Рис. 11. Угол погружения  $\theta_z$  вдоль следов частиц №1, 8, 7 /МФМ/.

Так как дисперсия измерений угла  $\theta_z$  примерно в 6 раз больше, чем для угла  $\theta_{xy}$ , а толщина слоя фотоэмульсии в процессе фотохимической обработки уменьшается в 3 раза, то неудивительно, что гипотеза о прямолинейности следов частиц в вертикальной плоскости не может быть проверена. Это видно на рис. 10 и 11, где приведены зависимости  $\theta_z(y)$  для всех остальных следов частиц, кроме следа частицы №10.

#### 4. МЕЗООПТИЧЕСКИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ЭКРАНЕ ДИСПЛЕЯ

Чтобы дополнительно пояснить результаты анализа дисперсий измерений при помощи МФМ, рассмотрим поведение двух мезооптических изображений, левого и правого, на экране дисплея компьютера. На рис. 12 показан фрагмент матрицы ПЗС с координатными осями  $x_{TV}$  и  $y_{TV}$  и равномерной сеткой прямых линий, которые разделяют соседние элементы матрицы ПЗС. Последние имеют вид квадратов, хотя в действительности элемент матрицы ПЗС имеет вид прямоугольника со сторонами 21 и 27 мкм. Левое мезооптическое изображение (L) расположено над правым мезооптическим изображением (R).

На рис. 12 показаны три последовательных положения левого и правого мезооптических изображений для следа частицы №3 в

три различных момента времени, когда каретка МФМ находится соответственно в положениях с координатами  $x_0 = 1,24$ ,  $x_0 = 1,26$ ,  $x_0 = 1,28$  мм при  $y_0 = 2,0$  мм. Точки с индексами "а", "б" и "с" имеют координаты

$$\frac{x_{TV}^L + x_{TV}^R}{2} \quad \text{и} \quad \frac{y_{TV}^L + y_{TV}^R}{2} \quad //$$

для трех указанных выше положений каретки МФМ.

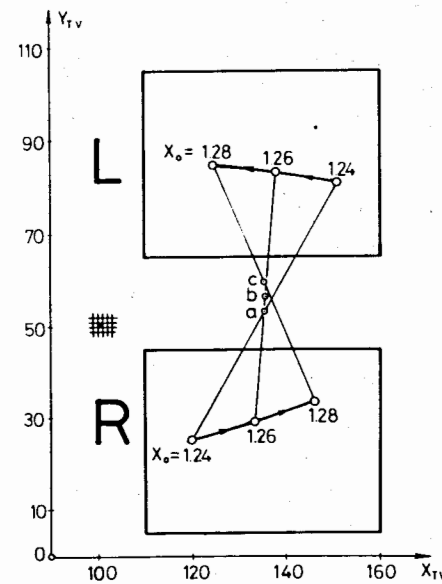


Рис. 12. Три последовательных положения двух мезооптических изображений следа частицы №3 для  $y = 2,0$  мм при различных положениях каретки МФМ:  $x_0 = 1,24$ ,  $1,26$ ,  $1,28$  мм.

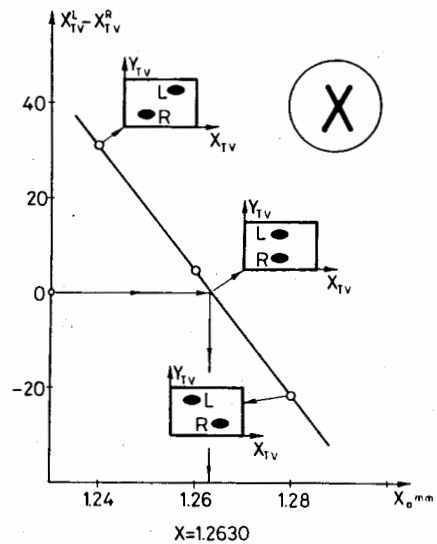


Рис. 13. Поведение разности  $x_{TV}^L - x_{TV}^R$  в зависимости от координаты каретки МФМ  $x_0$  для следа частицы №3 при  $y = 2,0$  мм.

Из рис. 13 видно, что разность  $x_{TV}^L - x_{TV}^R$  обращается в нуль, когда прямой след частицы пересекает оптическую ось МФМ. Там же показаны кадры с мезооптическими изображениями для трех положений каретки МФМ. Из рис. 13 видно, что разность  $x_{TV}^L - x_{TV}^R$  изменяется линейно с координатой  $x_0$ , и поэтому ее можно использовать в качестве независимой переменной. Таким образом, координаты центра тяжести мезооптических изображений на экране дисплея ( $x_{TV}^L, x_{TV}^R, y_{TV}^L, y_{TV}^R$ ) следует измерять в положении каретки МФМ, когда  $x_{TV}^L - x_{TV}^R = 0$ . Если это требование выполнить не удастся, то можно проводить линейную интерполяцию данных, как это показано на рис. 13.

На рис. 14 показана связь между полусуммой  $\frac{1}{2}(y_{TV}^L + y_{TV}^R)$ , которая определяет угол ориентации следа частицы  $\theta_{xy}$  при помощи уравнений /3/ в /1/, и разностью  $x_{TV}^L - x_{TV}^R$ . Здесь также наблюдается линейная зависимость. Поэтому, как и в случае координаты  $x$  /рис. 13/, здесь допустима линейная интерполяция данных. Иначе ведет себя полусумма  $\frac{1}{2}(x_{TV}^L + x_{TV}^R)$ , которая определяет координату  $z$  следа частицы при помощи уравнений /3/ в /1/

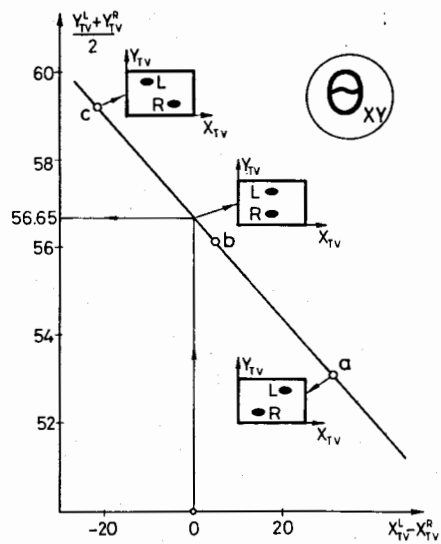


Рис. 14. Поведение полусуммы  $\frac{1}{2}(y_{TV}^L + y_{TV}^R)$  в зависимости от разности  $x_{TV}^L - x_{TV}^R$  для следа частицы №3 при  $y = 2,0$  мм.

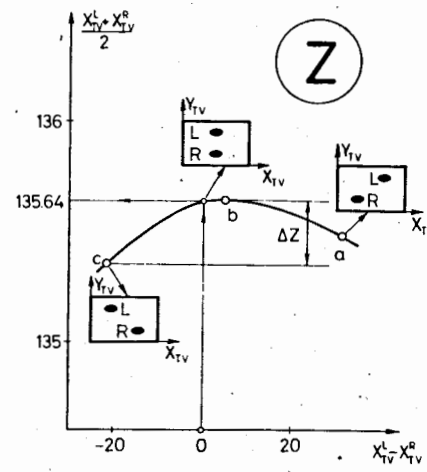
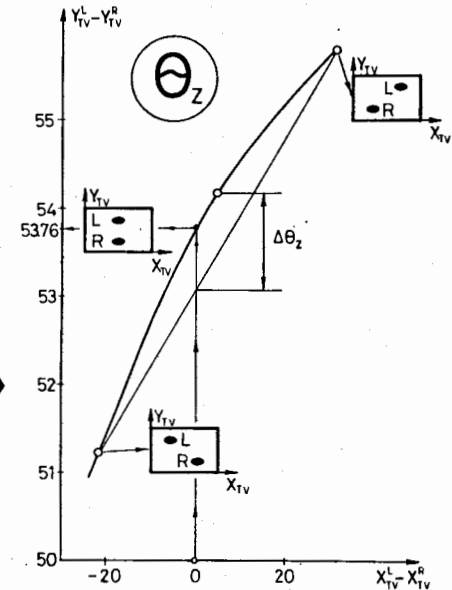


Рис. 16. Поведение разности  $y_{TV}^L - y_{TV}^R$  в зависимости от разности  $x_{TV}^L - x_{TV}^R$  для следа частицы №3 при  $y = 2,0$  мм.

Рис. 15. Поведение полусуммы  $\frac{1}{2}(x_{TV}^L + x_{TV}^R)$  в зависимости от разности  $x_{TV}^L - x_{TV}^R$  для следа частицы №3 при  $y = 2,0$  мм.



/рис. 15/, в зависимости от разности  $x_{TV}^L - x_{TV}^R$ . Заметим, что на рис. 15 показан сильно увеличенный участок телевизионного дисплея, внутри которого расположены точки "a", "b", "c" /см. рис. 12/. Из рис. 15 видно, что дисперсия измерений координаты равна  $\Delta z = 0,3$  элиз или  $\Delta z = 3$  мкм. Нелинейную зависимость проявляет также разность  $y_{TV}^L - y_{TV}^R$ , которая определяет угол погружения  $\theta_z$  при помощи уравнений /3/ в /1/, как функция разности  $x_{TV}^L - x_{TV}^R$  /рис. 16/. Видно, что дисперсия оценки угла погружения  $\theta_z$  по порядку величины равна  $\Delta \theta_z = 1,1$  элиз или  $\Delta \theta_z = 4',2$ . Степень нелинейности здесь невелика и естественно возникает вопрос о том, нельзя ли подобрать такие условия формирования мезооптических изображений, чтобы полностью убрать указанную нелинейность.

## 5. УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЛЕДОВ ЧАСТИЦ

На рис. 17 показана двухмерная картина ориентации обмеренных следов частиц в системе координат  $(\theta_z, \theta_{xy})$ . Видно, что общий

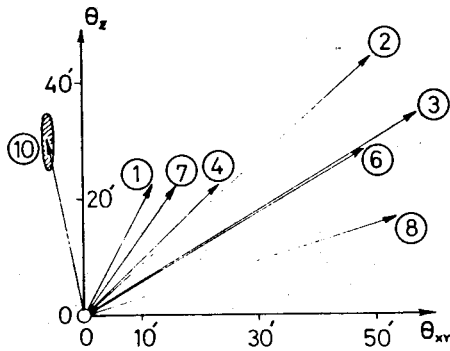


Рис. 17. Картина двумерной ориентации обмеренных следов частиц в системе координат  $\theta(\theta_{xy}, \theta_z)$ .

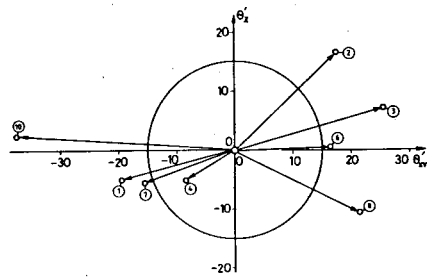


Рис. 18. Картина двумерной ориентации обмеренных следов частиц в системе координат, когда апекс углового распределения перенесен в точку  $\theta'_{xy} = \theta'_z = 0$ .

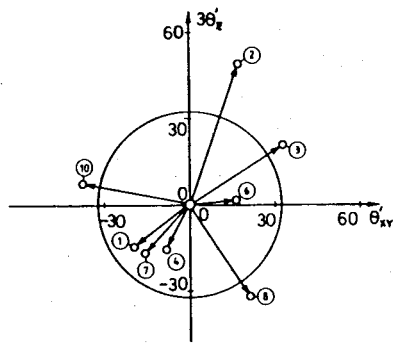


Рис. 19. Картина двумерной ориентации следов частиц в системе координат  $(\theta'_{xy}, \theta'_z)$ .

апекс следов частиц не совпадает с точкой  $\theta_z = \theta_{xy} = 0$ . Если ввести новые координаты

$$\begin{aligned} \theta'_{xy} &= \theta_{xy} - 31',5, \\ \theta'_z &= \theta_z - 27',6, \end{aligned} \quad /2/$$

то получится распределение, которое показано на рис. 18. Сплюснутость по вертикали этого распределения можно объяснить тем, что ядерная фотоэмульсия уменьшает свою толщину в 3 раза с 600 до 200 мкм в процессе фотохимической обработки. Чтобы учесть этот факт, необходимо перевести двумерное угловое рассеяние следов частиц в систему координат  $(\theta'_{xy}, \theta'_z)$ . Из рис. 19 видно, что в этом случае наблюдается практически однородное по азимуту распределение следов частиц. Радиус окружности на рис. 19 равен среднеквадратичной длине вектора  $\vec{\theta}(\theta'_{xy}, \theta'_z)$ .

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа данных, полученных двумя измерительными системами, МФМ и ДИП-1, были оценены уточнен-

ные значения погрешностей измерений на МФМ:  $\sigma(x) = 6$  мкм для  $x$ -координаты следа частицы,  $\sigma(z) = 4$  мкм для  $z$ -координаты,  $\sigma(\theta_{xy}) = 0',6$  для угла ориентации  $\theta_{xy}$  и  $\sigma(\theta_z) = 7'$  для угла погружения следа частицы  $\theta_z$ . Относительная погрешность оценки радиуса кривизны следа частицы на длине следа  $\Delta y = 6,5$  мм зависит от величины радиуса кривизны  $\rho$ :

$\rho, \text{ м}$	3	10	15
$\sigma(\rho)/\rho$	10%	20%	100%

Уточненные значения погрешностей измерений, полученные в данной работе, несколько лучше значений, приведенных в [2].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Астахов А.Я. и др. - Сообщение ОИЯИ P13-89-449, Дубна, 1989.
2. Astakhov A.Ya. et al. - JINR Preprint E13-88-892, Dubna, 1988.

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 июня 1989 года.