

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

C-655

P13-87-358

Л.М.Сороко

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ  
РАДИУСА КРИВИЗНЫ СЛЕДА ЧАСТИЦЫ  
ПРИ ПОМОЩИ МЕЗООПТИЧЕСКОГО  
ФУРЬЕ-МИКРОСКОПА

1987

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Как отмечалось во всех предыдущих публикациях, посвященных мезооптическому фурье-микроскопу /МФМ/ для ядерной фотоэмульсии /1-10/, МФМ предназначен для быстрого поиска прямых следов частиц заданной ориентации, измерения координат их точек останова, а также длины прямого следа частицы в пределах поля зрения МФМ. Указанная информация содержится в левом и правом мезооптических изображениях каждого прямого следа частицы. Так, например, видимые радиальные координаты  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , соответствующие левому и правому мезооптическим изображениям, позволяют найти расстояние до центра поля зрения МФМ, а также  $z$ -координату прямого следа частицы в пределах поля зрения МФМ /7/. Информация об ориентации прямого следа частицы и  $\phi$  его длине содержится в значениях видимых углов ориентации  $\theta_L$  и  $\theta_R$  на левом и правом мезооптических изображениях. Четыре координаты  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\theta_L$  и  $\theta_R$  определяются положением центра тяжести левого и правого мезооптических изображений в системе координат, жестко связанной с матрицей прибора с зарядовой связью /ПЗС/. Другие характеристики мезооптического изображения, такие как его длина и ширина вдоль координат  $\rho$  и  $\theta$ , не использовались, так как они не несут никакой дополнительной информации о прямых следах частиц в ядерной фотоэмульсии.

В данной работе показано, что МФМ /1,7/ позволяет измерять радиус кривизны искривленного следа частицы. При этом носителем этой информации является длина мезооптического изображения вдоль координаты  $\theta$ . Описан новый метод измерения радиуса кривизны следа частицы при помощи МФМ, заключающийся в измерении всего двух линейных величин: длины левого и правого мезооптических изображений этого следа частицы. Даны оценки погрешностей нового метода измерения радиуса кривизны. Описаны эксперименты, которые подтверждают правильность теоретических предпосылок метода. Показано, что МФМ можно использовать для измерения кривизны следов частиц на фотографиях, полученных в любой трековой камере с магнитным полем.

## 2. МЕЗООПТИЧЕСКИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО СЛЕДА ЧАСТИЦЫ

МФМ содержит мезооптическое зеркало с кольцевым откликом /1/ и точечный объект, находящийся в центре поля зрения МФМ, преобразуется этим зеркалом в окружность. Если в поле зрения МФМ имеются два точечных объекта, то их фокальные окружности пересекаются в двух точках /8/. Для трех точечных объектов, лежащих на прямой линии, возникнут три точки пересечения. Для  $N$  точечных объектов число точек пересечения равно

$$K = \frac{N(N-1)}{2} \quad /1/$$

На рис.1 показан пример для  $N = 5$  и  $K = 10$ . Если интенсивность света на единичной фокальной окружности равна 1, то в точках пересечения интенсивность света возрастает до  $2I$  /8/.

Массив точек пересечения фокальных окружностей имеет тонкую структуру вдоль радиальной координаты. Всего имеется  $(N-1)$  групп по  $n(x)$  точек пересечения в каждой группе, где

$$n(x) = N - x, \quad /2/$$

а  $x$  - индекс группы,  $x = 1, 2, \dots, N-1$ . Расстояние между группой с индексом  $x$  и общей касательной к фокальным окружностям равно

$$\rho(x) = x^2 \frac{a^2}{8R}, \quad /3/$$

где  $a$  - шаг между точками, которые образуют "след" частицы длиной

$$L = (N-1)a. \quad /4/$$

На рис.2 приведены распределения числа точек пересечения фокальных окружностей вдоль координат  $\rho(x)$  в единицах

$$b = \frac{a^2}{8R} \quad (a \ll R). \quad /5/$$

при заданной длине следа  $L$  для трех частных случаев:  $N = 5, 10$  и  $25$ . Видно, что наиболее интенсивный пик находится вблизи общей касательной. Полная ширина зоны, в которой расположены все точки пересечения фокальных окружностей при заданной длине следа частицы  $L$ , равна

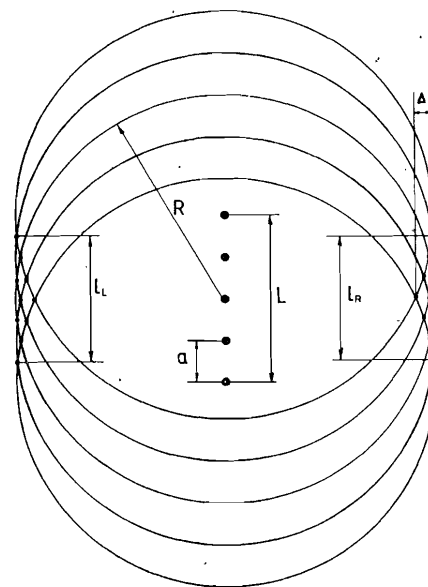


Рис.1 Формирование мезооптических изображений прямого следа частицы, состоящего из пяти зерен серебра.

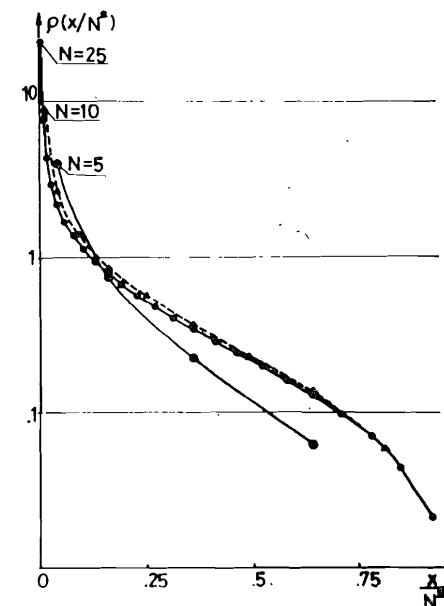


Рис.2. Распределение числа точек пересечения фокальных окружностей вдоль координаты  $\rho(x)$  в единицах "b" для трех частных случаев:  $N = 5, 10$  и  $25$ .

$$\rho(\max) = \frac{L^2}{8R} \quad (L \ll R). \quad /6/$$

Эффективная ширина кривой распределения точек пересечения фокальных окружностей вдоль радиальной координаты равна

$$\Gamma_{1/2} = \Delta_{1/2} b, \quad /7/$$

где

$$\Delta_{1/2} = \frac{2N-1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{2N^2 - 2N + 1} \quad /8/$$

или

$$\Delta_{1/2} (N \rightarrow \infty) = N \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right] = 0,292N. \quad /9/$$

Так, например, для  $N=10$   $\Delta_{1/2}(10) = 2,76$ , и тогда эффективная ширина мезооптического изображения следа частицы

$$\Gamma_{1/2} (N=10) = (2,76)^2 b = (2,76)^2 \frac{a^2}{8R} \approx \frac{a^2}{R} \quad /10/$$

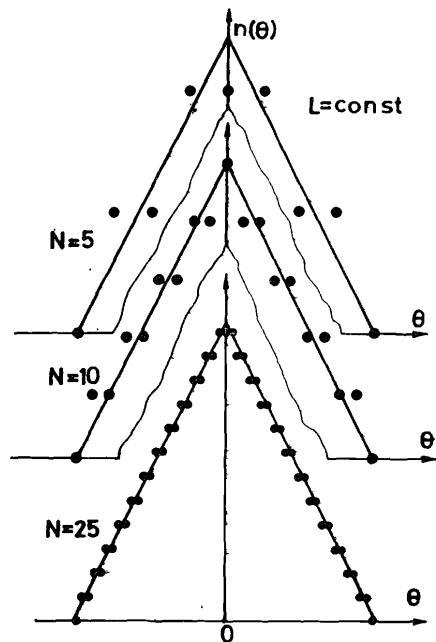
Если  $L = 1$  мм,  $R = 80$  мм,  $a = 0,1$  мм, то  $\Gamma_{1/2} = 0,125$  мкм. Для  $N = 100$   $\Delta_{1/2} (100) = 29$ ,  $a = 0,01$  мм и  $\Gamma_{1/2} (N=100) = 0,135$  мкм. Между тем полная ширина зоны, в которой лежат все точки пересечений фокальных окружностей в двух рассмотренных случаях, при  $N = 10$  и  $N = 100$ , равна  $\rho(\max) = 1,25$  мкм. Из приведенных выше оценок  $\Gamma_{1/2}$  для указанных двух случаев следует, что  $\Gamma_{1/2}$  примерно в 10 раз меньше, чем  $\rho(\max)$ .

На рис.1 видно, что вдоль угловой координаты точки пересечения фокальных окружностей расположены регулярно с шагом, равным  $\frac{a}{2}$ , при этом плотность точек пересечения вдоль указанной координаты имеет сгущения в виде частотола с огибающей в форме треугольника /рис.3/.

В реальных условиях имеет место дифракция света на конечной апертуре мезооптического зеркала, а зерна серебра, образующие след частицы, расположены нерегулярно. Так как ширина фокальной окружности в реальной конструкции МФМ составляет  $1,5$  мкм /10/, то тонкая структура расположения массива точек пересечения фокальных окружностей вдоль радиальной координаты не может быть видна в таких условиях. Регулярная структура

расположения массива точек пересечения фокальных окружностей вдоль угловой координаты нарушается из-за того, что расстояния между соседними зернами серебра следа частицы, состоящего из цепочки зерен серебра с линейной плотностью около 300 зерен/мм, имеют вид треугольника вдоль угловой координаты и узкого прямоугольного импульса шириной 2 мкм вдоль радиальной координаты.

Рис.3. Распределение числа точек пересечения фокальных окружностей вдоль угловой координаты для трех частных случаев:  $N = 5, 10$  и  $25$ .



### 3. МЕЗООПТИЧЕСКИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ИСКРИВЛЕННОГО СЛЕДА ЧАСТИЦЫ

На рис.4 показана схема формирования мезооптических изображений слабо искривленного следа частицы. Предполагается, что стрела прогиба дуги окружности, на которой лежат зерна серебра, меньше среднего шага между зернами серебра, то есть

$$s = \frac{L^2}{8\rho} < a_{\text{ср}}, \quad /11/$$

где  $\rho$  - радиус кривизны указанной окружности. Можно показать, что ширина левого мезооптического изображения уменьшится на  $0,3$  в, а ширина правого - увеличится на ту же величину. В пределе, при  $\rho = R$  / см.рис.5/, правое мезооптическое изображение превратится в точку. Так как дифракционное размытие вдоль радиальной координаты составляет 2 мкм, то эффектом изменения ширины мезооптического изображения вдоль радиальной координаты можно пренебречь, если только  $0,3 a < 2$  мкм, то есть если стрела прогиба  $a < 7$  мкм.

При переходе от прямого следа частицы к искривленному наиболее существенные изменения претерпевает длина мезооптических

Рис.4. Формирование мезооптических изображений искривленного следа частицы, когда  $\rho > R$ .

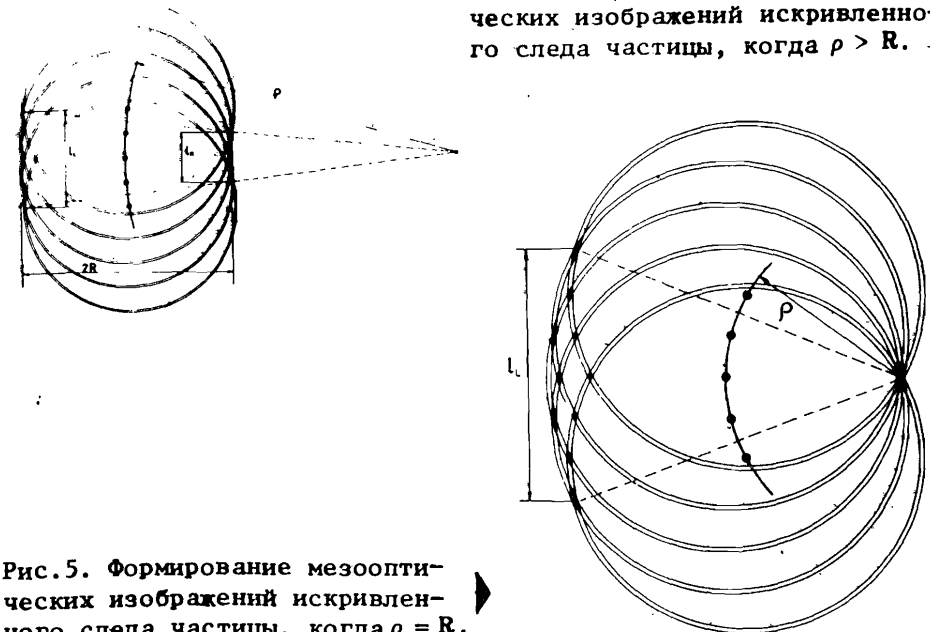


Рис.5. Формирование мезооптических изображений искривленного следа частицы, когда  $\rho = R$ .

изображений следа частицы. Как легко видеть из рис.4, имеет место соотношение

$$\frac{l_L}{\rho + R} = \frac{l_R}{\rho - R}, \quad /12/$$

из которого следует, что радиус кривизны искривленного следа частицы равен

$$\rho = R \frac{l_L + l_R}{l_L - l_R} \approx \frac{2RL}{l_L - l_R} = \frac{2RL}{\xi}, \quad /13/$$

где

$$\xi = l_L - l_R. \quad /14/$$

Из /13/ получаем

$$\left| \frac{d\rho}{\rho} \right| = \frac{d\xi}{\xi}. \quad /15/$$

Относительная погрешность измерений радиуса кривизны  $\rho$  равна относительной погрешности измерения величины  $\xi$ . Такое же соотношение вытекает из /11/ для стрелы прогиба  $s$  и радиуса кривизны искривленного следа частицы:

$$\left| \frac{d\rho}{\rho} \right| = \frac{ds}{s}. \quad /16/$$

Интересные соотношения получаются при сопоставлении абсолютных значений величины  $\xi$  и стрелы прогиба  $s$  для заданного радиуса кривизны следа частицы  $\rho$ . Из уравнения /11/ для  $s$  и уравнения /13/ для  $\xi$  получаем

$$\frac{L^2}{8s} = \frac{2RL}{\xi} = \rho \quad /17/$$

или

$$\xi = s \cdot \frac{16R}{L}. \quad /18/$$

Так как  $R = 80$  мм, а  $L = 1$  мм, то

$$\frac{\xi}{s} = 1,28 \cdot 10^3. \quad /19/$$

Таким образом, абсолютная величина  $\xi$  в  $10^3$  раз больше абсолютной величины стрелы прогиба  $s$  при заданном радиусе кривизны следа частицы. Так, например, если стрела прогиба  $s = 0,1$  мкм, то разность длин мезооптических изображений искривленного следа частицы равно  $\xi = 128$  мкм, что составляет около 13% средней длины мезооптических изображений данного следа частицы.

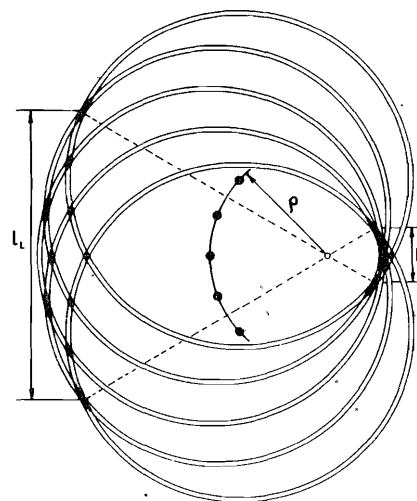


Рис.6. Формирование мезооптических изображений искривленного следа частицы, когда  $\rho < R$ .

*Вывод:* чтобы оценить радиус кривизны следа частицы, достаточно произвести измерения в одних и тех же условиях длин левого  $l_L$  и правого  $l_R$  мезооптических изображений искривленного следа частицы, формируемых на выходе МФМ.

Особого рассмотрения требует случай, когда  $\rho$  мало отличается от  $R$ . Так, например, на рис.6 показан пример, когда  $\rho < R$ . Здесь длина правого мезооптического

изображения имеет отрицательную величину,  $l_R < 0$ . Чтобы установить знак длины мезооптического изображения, необходимо тщательно исследовать микроструктуру мезооптического изображения. Однако это сделать невозможно в реальной системе, когда ширина каждой фокальной окружности из-за дифракции света больше размера элементов микроструктуры мезооптического изображения. Поэтому в ситуациях, когда  $\rho \sim R$ , следует поступить иначе. А именно, чтобы устранить неоднозначность в оценке знака длины одного из мезооптических изображений, производят измерения  $\rho$  при двух значениях  $R, R'$  и  $R''$ :

$$\rho_I^{\pm} = R' \frac{2L}{l_L' \pm l_R'}; \quad \rho_{II}^{\pm} = R'' \frac{2L}{l_L'' \pm l_R''}. \quad /20/$$

Из четырех возможных значений радиуса кривизны  $\rho_I^{\pm}$  и  $\rho_{II}^{\pm}$  два значения окажутся взаимно совместимыми.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТ

Чтобы проверить теоретические предпосылки, лежащие в основе нового метода измерения кривизны следа частицы, был выполнен моделирующий эксперимент, схема которого дана на рис.7. Сходящийся пучок света просвечивал фотопленку со следами частиц, которая была получена в пузырьковой камере с магнитным полем. Расстояние от фотопленки до киноформа с кольцевым откликом /11/ равнялось  $l_1 = 458$  мм. Два мезооптических изображения каждого

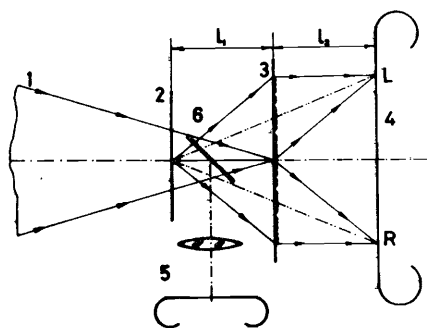


Рис.7. Схема моделирующего эксперимента: 1 - сходящийся пучок света, 2 - объект /фотошленка, полученная в пузырьковой камере с магнитным полем/, 3 - киноформ с кольцевым откликом, 4 - фотокамера "Киев-6С" без объектива, 5 - фотокамера "Зенит" с объективом  $f = 58$  мм и насадочными кольцами, 6 - плоское зеркало, которое убиралось во время наблюдения мезооптических изображений.

искривленного следа частицы формировались на расстоянии  $l_2 = 362$  мм за киноформом с кольцевым откликом, фокусное расстояние которого  $f_k = 202$  мм <sup>/11/</sup>. Диаметр поля зрения системы составлял  $L \approx 4$  мм. Так как расстояния  $l_1$  и  $l_2$  изменялись в процессе эксперимента, то на каждой фотографии измерялся радиус фокальной окружности  $R$ .

На рис.8 приведена фотография мезооптических изображений двух искривленных следов частиц, которые лежат на фокальных окружностях с радиусом  $R = 18,3$  мм. На рис.9 показан объект

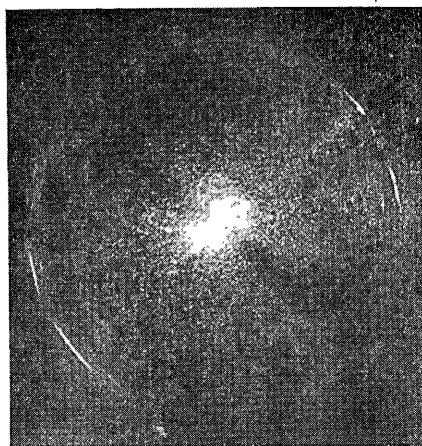


Рис.8. Мезооптическое изображение двух следов частиц, из которых первый искривлен сильно, а второй - очень слабо.

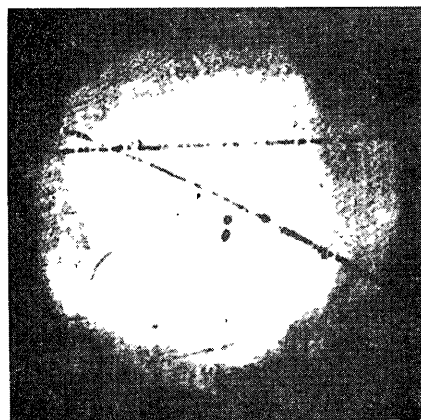


Рис.9. Объект наблюдения, состоящий из двух пересекающихся следов частиц на фотографии, полученной в трековой камере с магнитным полем.

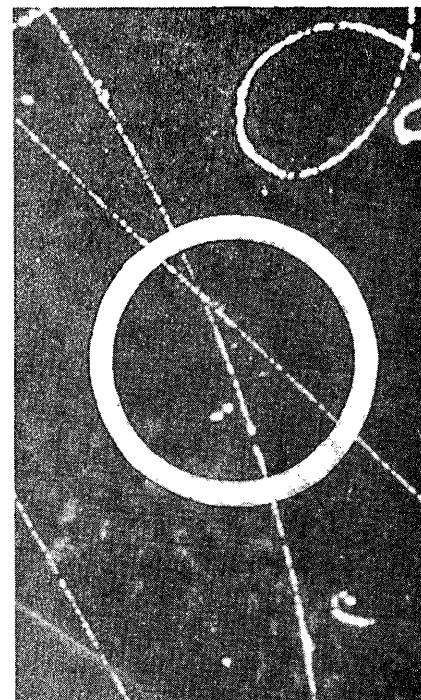


Рис.10. Область фотокадра, на которой находится объект наблюдения /см.рис.9/.

измерения, сфотографированный фотоаппаратом 5<sup>0</sup>/рис.7/, а на рис.10 - область фотопленки, где находился объект измерения, вместе с очертаниями поля зрения системы. Прямые измерения длин левого и правого мезооптических изображений сильно искривленного следа частицы дают:  $l_L = 6,2$  мм,  $l_R = 1,6$  мм,  $\xi = 4,6$  мм и  $\rho_1 = 31$  мм. Чтобы получить истинное значение радиуса кривизны следа частицы, необходимо учесть, что мезооптическая система, приведенная на рис.7, дает уменьшенные мезооптические изображения, причем коэффициент линейного уменьшения  $\kappa = (l_2/l_1) = 0,79$ . Поэто-

му  $\rho_1^0 = \rho_1 / \kappa = 39 \pm 4$  мм. Оценка радиуса кривизны сильно искривленного следа частицы, полученная графическим методом, равна  $\rho_{\text{трад}} = 36 \pm 4$  мм. Расчетное значение стрелы прогиба на длине следа частицы  $L = 4$  мм, уравнение /11/, составляет  $s_1 \approx 50$  мкм. Радиус кривизны второго, слабо искривленного следа частицы на рис.8 равен  $\rho_{\text{трад}} \approx 350$  мм. Этому значению соответствует разница в длинах  $l_L$  и  $l_R \sim 10\%$ , что находится за пределами возможностей описываемой мезооптической установки. Заметим, что расчетное значение стрелы прогиба у второго следа частицы на длине  $L = 4$  мм составляет  $s_2 \approx 5,8$  мкм при ширине следа частицы 70 мкм.

Результаты описываемого эксперимента подтверждают предсказанную закономерность: мезооптические изображения искривленного следа частицы отличаются друг от друга по длине, а мера этого различия описывается уравнением /13/. Новый метод измерения радиуса кривизны искривленного следа частицы может быть использован для обмера следов частиц как в ядерной фотозумьсии для оценки местных искажений типа дисторсии, так и в трековых камерах с магнитным полем для измерения радиуса кривизны следа частицы, а также угла его ориентации.

Заметим, что главной особенностью нового метода измерения радиуса кривизны искривленного следа частицы по его мезоопти-

ческим изображениям состоит в том, что непосредственно измеряемая величина  $\xi$  во много раз больше стрелы прогиба следа частицы в при заданном диаметре поля зрения  $L$ . Чем больше радиус кривизны  $\rho$ , тем большие значения  $\xi/v$  надо использовать. Это, в свою очередь, эквивалентно условию, чтобы радиус фокальной окружности, на которой формируются мезооптические изображения искривленного следа частицы, был во много раз больше размеров поля зрения системы. В действующей конструкции МФМ<sup>1/2, 10/</sup> диаметр поля зрения  $L = 1$  мм, а радиус фокальной окружности  $R = 80$  мм. В этих условиях параметр  $\xi/v = 1,28 \cdot 10^3$ , уравнение /19/. В экспериментальной установке, используемой в данной работе, этот параметр имеет существенно меньшие размеры. Диаметр поля зрения ее в 4 раза больше, чем в МФМ, а радиус фокальной окружности в 4,37 раза меньше, чем в МФМ. В результате  $\xi/v = 73$ .

Ситуация в трековых камерах с магнитным полем еще хуже. Здесь размер обмеряемой области составляет не меньше  $L = 20$  мм, и поэтому  $\xi/v = 14,6$ , то есть в 100 раз хуже, чем в МФМ. Чтобы дойти до возможностей МФМ, необходимо либо в 100 раз увеличить радиус фокальной окружности, либо во столько же раз уменьшить все размеры мезооптической системы, включая диаметр поля зрения. Последний путь является более реальным, чем первый, так как для сохранения  $\xi/v = 1,28 \cdot 10^3$  достаточно к МФМ добавить обратный микроскоп с коэффициентом уменьшения, равным отношению диаметров полей зрения  $L = 20$  мм и  $L_{\text{МФМ}} = 1$  мм.

## 5. ВЫВОДЫ

1. Предложен новый метод оценки радиуса кривизны следа частицы при помощи мезооптического фурье-микроскопа /МФМ/ путем измерения длин левого и правого мезооптических изображений данного следа частицы вдоль угловой координаты.
2. Выполнены моделирующие эксперименты, которые подтверждают правильность теоретических предпосылок нового метода.
3. Рассмотрены соотношения, связывающие погрешности измерения нового и традиционных методов измерения радиуса кривизны следа частицы.
4. Отмечено, что МФМ может быть использован для измерения радиуса кривизны следов частиц на фотографиях, полученных в любой трековой камере с магнитным полем.
5. Указано, что наиболее целесообразным является путь усовершенствования МФМ при помощи обратного микроскопа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сороко Л.М. А.с. 743424 /СССР/. Опубликовано в ОИ, 1981, № 21, с.262.
2. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, P13-83-119, Дубна, 1983.
3. Астахов А.Я., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-83-120, Дубна, 1983.
4. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, P13-84-277, Дубна, 1984.
5. Bencze Gy.L., Soroko L.M. JINR Preprint E13-84-310, Dubna, 1984.
6. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-85-136, Дубна, 1985.
7. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-85-137, Дубна, 1985.
8. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-85-138, Дубна, 1985.
9. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, P13-85-378, Дубна, 1985.
10. Бенце Д. и др. ОИЯИ, P13-86-630, Дубна, 1986.
11. Бенце Д. и др. ОИЯИ, P13-86-240, Дубна, 1986.
12. Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-87-170, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 мая 1987 года.