

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

**P13-87-169**

**Л.М.Сороко**

**МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ  
НАЧАЛА И КОНЦА СЛЕДА ЧАСТИЦЫ  
НА МЕЗООПТИЧЕСКОМ ФУРЬЕ-МИКРОСКОПЕ**

**1987**

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Мезооптический фурье-микроскоп /МФМ/ является специализированным изображающим устройством, предназначенным для селективного наблюдения и обмера прямых следов частиц в ядерной фотоэмульсии. Принцип действия МФМ описан в <sup>1,2</sup>. В <sup>3</sup> даны теоретический анализ и геометрическая интерпретация основных параметров МФМ, в <sup>4</sup> рассмотрены функция размытия точки и указаны погрешности измерений радиальной и угловой координат, а в <sup>5</sup> описана связь между положением прямого следа частицы в пространстве и мезооптическими изображениями на выходе МФМ. Во всех отмеченных работах предполагалось, что длина прямого следа частицы равна диаметру поля зрения и что его начало и конец находятся за пределами поля зрения.

Между тем существуют ситуации, когда прямой след частицы начинается или заканчивается в пределах данного поля зрения или когда длина его меньше диаметра поля зрения. В данной работе, посвященной анализу указанных ситуаций, показано, что информация о координатах начала или конца прямого следа частицы содержится в двух мезооптических изображениях, которые формируются на выходе МФМ. Сначала дан анализ мезооптических изображений прямого следа частицы, когда он начинается или заканчивается в пределах поля зрения МФМ. Приведены признаки мезооптических изображений прямого следа частицы в ядерной фотоэмульсии, длина которого меньше диаметра поля зрения МФМ. Описан новый алгоритм измерения координат начала или конца прямого следа частицы по его мезооптическим изображениям, а также проанализирована зависимость погрешности измерений от длины прямого следа частицы.

## 2. РАДИАЛЬНАЯ И УГЛОВАЯ КООРДИНАТЫ ПРЯМОГО СЛЕДА ЧАСТИЦЫ В ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ

Как показано в <sup>5</sup>, координаты положения прямого следа частицы, расстояние от центра поля зрения  $r$ , угол ориентации  $\phi$  и  $z$ -координата, которая отсчитывается от медианной плоскости ядерной фотоэмульсии, однозначно определяются видимыми расстоя-

ниями от центра поля зрения в левом ( $\rho_1$ ) и в правом ( $\rho_2$ ) мезооптических изображениях на выходе МФМ и углом  $\theta$ , который образует прямая линия, проходящая через центры тяжести двух мезооптических изображений:

$$r = \frac{|\rho_2 - \rho_1|}{2 \cos \alpha_{1/2}},$$

$$z = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2 \sin \alpha_{1/2}},$$

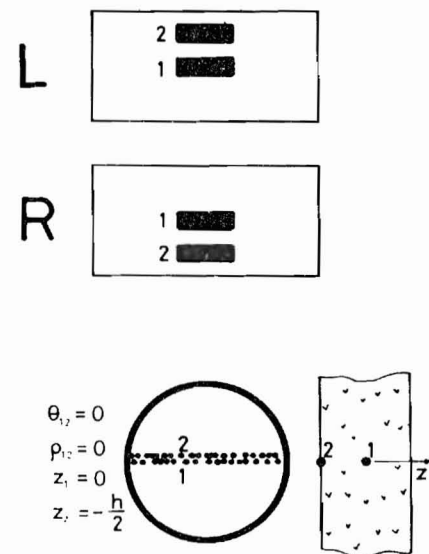
$$\phi = \begin{cases} \theta + \frac{\pi}{2}, & \rho_1 < \rho_2, \\ \theta - \frac{\pi}{2}, & \rho_1 > \rho_2, \end{cases}$$

где  $2\alpha_{1/2}$  - полная угловая апертура мезооптического зеркала МФМ. Если кроме этого требуется найти угол погружения прямого следа частицы, то его оценивают по двум значениям  $z$ -координаты одного и того же прямого следа частицы в двух, например соседних, полях зрения.

В [5] предполагалось, что начало и конец прямого следа частицы находятся за пределами данного поля зрения, и поэтому вопрос о локальных свойствах мезооптических изображений в МФМ отпадал сам собой. Чтобы показать, что два мезооптических изображения на выходе МФМ действительно содержат информацию о начале и конце прямого следа частицы относительно центра поля зрения МФМ, рассмотрим признаки, которые приобретают два мезооптических изображения на выходе МФМ в ситуациях, когда длина прямого следа частицы меньше диаметра поля зрения МФМ.

### 3. ПРИЗНАКИ ПРЯМОГО СЛЕДА ЧАСТИЦЫ, ДЛИНА КОТОРОГО МЕНЬШЕ ДИАМЕТРА ПОЛЯ ЗРЕНИЯ

Рассмотрим событие, когда два прямых следа частицы строго параллельны друг другу и проходят вблизи центра поля зрения МФМ /рис. 1/. В этом случае возникает принципиально неразрешимая неоднозначность в интерпретации двух мезооптических изображений рассматриваемого события. Действительно, как на левом (L), так и на правом (R) мезооптических изображениях видны два сигнала, которые параллельны друг другу и имеют одинаковые длины. Невозможно установить, какая пара сигналов принадлежит первому прямому следу частицы, а какая - второму. Это видно на рис. 2, где 1 и 2 обозначают истинные положения двух прямых



чтобы зафиксировать точку, где закончился прямой след частицы заданной ориентации, и измерить ее координаты. Между тем прямой след частицы может закончиться в поле зрения МФМ по двум причинам. Во-первых, прямой след частицы может выйти из данного слоя ядерной фотоземлюсии и войти в соседний слой ядерной фотоземлюсии. В этом случае  $z$ -координата конца прямого следа частицы равна  $\pm \frac{h}{2}$ , где  $h$  - толщина слоя ядерной фотоземлюсии. Во-вторых, прямой след частицы может закончиться в точке, где произошло ядерное взаимодействие /"звезда"/, и тогда  $z$ -координата этой точки удовлетворяет условию:  $|z| < \frac{h}{2}$ . Таким

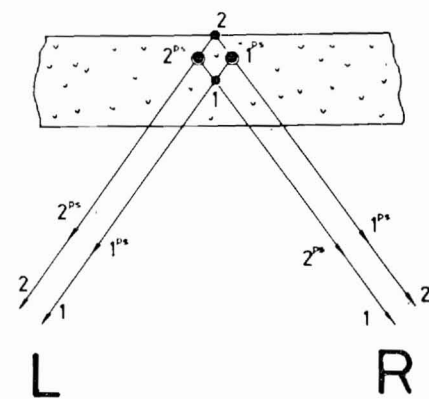


Рис. 1. Событие, состоящее из двух параллельных прямых следов частиц /внизу/, и два мезооптических изображения /вверху/.

следов частиц в перпендикулярном сечении, а  $1_{pse}$  и  $2_{pse}$  - их ложные положения. Без привлечения дополнительной информации указанную неоднозначность устранить невозможно.

В то же время могут спросить, а нужно ли вообще устранять такую неоднозначность? Напомним здесь, что МФМ предназначен для быстрого поиска прямых следов частиц заданной ориентации и для обнаружения ядерного взаимодействия /"звезды"/. Прямые следы частиц сами по себе непосредственного интереса не представляют. Цель просмотра ядерной фотоземлюсии на МФМ состоит в том,

Рис. 2. Сечение ядерной фотоземлюсии, перпендикулярное двум параллельным прямым следам частиц, и центральные лучи дифрагированного света, образующие левое (L) и правое (R) мезооптические изображения.

образом, и в первом, и во втором случаях наблюдатель должен знать  $z$ -координату точки остановки прямого следа частицы, прежде чем делать вывод о том, связана ли точка остановки прямого следа частицы с ядерным взаимодействием или это точка выхода его из просматриваемого слоя ядерной фотозумлусии.

На рис. 3 показано, как изменяются мезооптические изображения прямого следа частицы, когда его длина уменьшается в два раза. В центре рис. 3 след AOB простирается на все поле зрения МФМ, а длина следа AO /черное поле/ составляет половину диаметра поля зрения. Вверху и внизу показаны левое (L) и правое (R) мезооптические изображения двух этих следов. Видно, что если рассматривать только одно мезооптическое изображение, например левое, то эффект уменьшения длины мезооптического изображения прямого следа частицы можно интерпретировать как увеличение угла  $\theta$ . Между тем на правом мезооптическом изображении наблюдается обратный эффект. Уменьшение длины следа неотлично от уменьшения угла  $\theta$ . Только при совместном наблюдении левого и правого мезооптических изображений можно однозначно отделить эффект уменьшения длины прямого следа частицы от эффекта изменения угла  $\theta$ .

На рис. 4 приведены четыре события, на которых показаны как эффект поворота прямого следа частицы, так и эффект уменьшения его длины. Здесь через  $\theta_L$  и  $\theta_R$  обозначены видимые углы ориентации на левом и правом мезооптических изображениях соответственно. Видно, что сумма

$$\theta_L + \theta_R = 2\theta_0, \quad /2/$$

где  $\theta_0$  - истинный угол ориентации прямого следа частицы, инвариантна относительно процесса изменения длины прямого следа частицы. С другой стороны, разность

Рис. 3. Рисунок, поясняющий изменение мезооптических изображений прямого следа частицы, идущего под углом  $\theta$  к штрихпунктирной линии, при уменьшении длины следа в два раза. Направление отсчета видимых углов ориентации  $\theta_L$  и  $\theta_R$  идет по часовой стрелке.

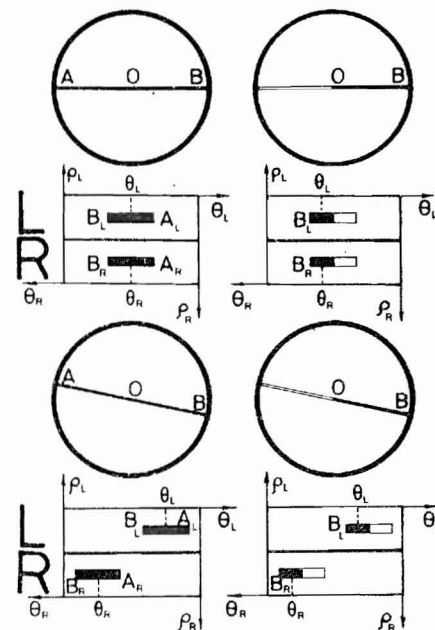
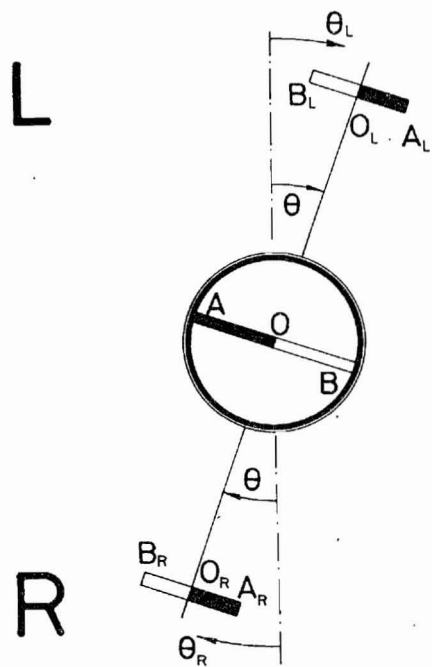


Рис. 4. Четыре события и их мезооптические изображения, поясняющие алгоритмы отделения истинной ориентации следа  $\theta_0$  от эффекта уменьшения его длины.

$$\theta_L - \theta_R = \frac{D - L}{R}, \quad /3/$$

где  $D$  - диаметр поля зрения МФМ,  $L$  - длина прямого следа частицы, а  $R$  - радиус фокальной окружности. Из /3/, в частности, видно, что при  $L = D$   $\theta_L = \theta_R$ . Заметим, что на рис. 4 направления отсчетов углов  $\theta_L$  и  $\theta_R$  противоположны друг другу, как это имеет место в реальной ситуации /см. рис. 3/. Возможна и другая система отсчета углов  $\theta'_L$  и  $\theta'_R$  в одном направлении. Но тогда в /2/ будет стоять разность  $\theta'_L - \theta'_R$ , а в /3/ - сумма  $\theta'_L + \theta'_R$ .

Теперь рассмотрим поведение видимых углов ориентации  $\theta_L$  и  $\theta_R$ , когда поле зрения МФМ последовательно перемещается вдоль прямого следа частицы конечной

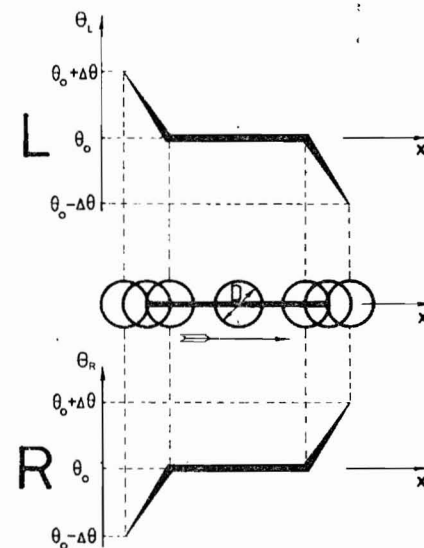


Рис. 5. Поведение видимых углов ориентации  $\theta_L$  и  $\theta_R$  при движении поля зрения МФМ вдоль прямого следа частицы конечной длины /см. текст/.

мент времени, когда правый конец прямого следа частицы окажется внутри поля зрения МФМ, угол  $\theta_L$  начнет уменьшаться, а угол  $\theta_R$  - возрастет. Одновременно суммарная яркость мезооптических изображений станет уменьшаться. Противоположная ситуация наблюдается, когда начало прямого следа частицы находится внутри поля зрения МФМ. Здесь  $\theta_L > \theta_0$ , а  $\theta_R < \theta_0$ . Видно, что интенсивность мезооптических изображений обращается в нуль в точках, где  $\theta_L = \theta_0 + \Delta\theta$ ,  $\theta_R = \theta_0 - \Delta\theta$  и

$$\Delta\theta = \frac{D}{R}. \quad /4/$$

Полная длина рассматриваемого прямого следа частицы  $L_t$  равна

$$L_t = X + D, \quad /5/$$

где  $X$  - длина участка, на котором видимые углы  $\theta_L$  и  $\theta_R$  не изменяются.

#### 4. АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ НАЧАЛА И КОНЦА ПРЯМОГО СЛЕДА ЧАСТИЦЫ НА МФМ

Теперь можно сформулировать алгоритм измерения координат начала или конца прямого следа частицы по мезооптическим изображениям, наблюдаемым на выходе МФМ. Они считываются при помощи матрицы прибора с зарядовой связью /ПЗС/, продольный размер которой равен  $b = 4,83$  мм и соответствует интервалу углов

$$\theta_L \text{ или } \theta_R \pm \frac{b}{2R} \text{ или } \pm 1/34 \text{ рад.}$$

В действующей конструкции МФМ поле зрения имеет вид вытянутого эллипса длиной 1 мм и шириной 0,05 мм. Считывание информации с матрицы ПЗС ведут в момент времени, когда интенсивность фотоэлектрического сигнала на экране дисплея близка к максимальной и когда прямой след частицы идет вдоль большой оси эллипса. В процессе движения поля зрения МФМ вдоль наблюдаемого прямого следа частицы последовательно измеряют координаты центра тяжести левого ( $\rho_1, \theta_L$ ) и правого ( $\rho_2, \theta_R$ ) мезооптических изображений. В тот момент времени, когда длина прямого следа частицы становится меньше диаметра поля зрения, длина сигнала на выходе ПЗС начнет уменьшаться. Этот признак можно рассматривать как указание на то, что конец прямого следа частицы вошел в поле зрения МФМ. При нескольких положениях замеряют углы  $\theta_L$  и  $\theta_R$  и при помощи уравнения /3/ находят длину прямого следа частицы  $L$  в поле зрения МФМ. Истинные координаты конца прямого следа частицы находят с учетом координат кареток  $X$  и  $Y$  в момент измерения углов  $\theta_L$  и

$\theta_R$ . Так как фотоэлектрические сигналы в процессе их квантования по уровню подвергаются дискриминации по амплитуде, то сигналы на выходе ПЗС обращаются в нуль раньше, чем это показано на рис. 5 для идеализированного случая.

Чтобы оценить погрешность измерений координат конца прямого следа частицы в МФМ с помощью описанного выше алгоритма, достаточно учесть то, что в сагитальном сечении МФМ представляет собой одномерную камеру обскура, ширина щели которой равна диаметру кроссовера сходящегося пучка света в месте расположения мезооптического зеркала с кольцевым откликом. Для  $D = 1,5$  мм диаметр кроссовера пучка света  $\delta = \frac{\lambda H}{D} \approx 60$  мкм, где  $H$  - расстояние от ядерной фотоэмульсии до мезооптического зеркала с кольцевым откликом,  $H = 145$  мм. Однако если длина прямого следа частицы  $L < D$ , то диаметр кроссовера пучка света станет равным

$$\delta_L = \frac{\lambda H}{L}. \quad /6/$$

С уменьшением длины прямого следа частицы  $L$  диаметр кроссовера увеличивается, пока не достигнет критического значения  $\delta_0 = L_0$ . Это имеет место при  $L_0 = \sqrt{\lambda H} = 0,30$  мм. В этой ситуации одновременно действуют два эффекта: уменьшение полной интенсивности мезооптического изображения пропорционально  $(L/D)$  и увеличение /!/ длины мезооптического изображения пропорционально  $(L/D)^{-1}$ . Поэтому интенсивность мезооптического изображения начинает здесь спадать как  $(L/D)^2$ . Это приводит к тому, что в МФМ данной конструкции невозможно точно измерить прямой след частицы, длина которого намного меньше  $L_0 = 0,30$  мм. При этом средняя погрешность измерения длины прямых следов частиц в пределах поля зрения МФМ составляет при  $L_0 < L < D$  около 0,1 мм.

#### 5. ВЫВОДЫ

Показано, что мезооптический фурье-микроскоп /МФМ/ для ядерной фотоэмульсии дает возможность вести измерение координаты начала или конца прямого следа частицы. Сформулированы признаки мезооптических изображений прямого следа частицы, длина которого меньше диаметра поля зрения МФМ. Изложен алгоритм измерения координат начала и конца прямого следа частицы по левому и правому мезооптическим изображениям на выходе МФМ. Показано, что погрешность измерений координат начала и конца прямого следа частицы при помощи этого алгоритма зависит от длины прямого следа частицы  $L$ . В данной конструкции МФМ невозможно измерить

длину прямого следа частицы, если  $L_0 \ll L = 300$  мкм. При этом средняя погрешность измерений длины прямого следа частицы по мезооптическим изображениям составляет при  $L_0 \ll L \ll D$  около 0,1 мм. Этой точности измерений достаточно, чтобы быстро обнаружить вершину ядерного взаимодействия на традиционном оптическом микроскопе с полем зрения диаметром 0,5-0,6 мм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bencze Gy.L., Soroko L.M. JINR Preprint E13-84-310, Dubna, 1984.
2. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, P13-85-378, Дубна, 1985.
3. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-85-138, Дубна, 1985.
4. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-85-136, Дубна, 1985.
5. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-85-137, Дубна, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 марта 1987 года.

Сороко Л.М.

P13-87-169

Метод измерения координат начала и конца следа частицы на мезооптическом фурье-микроскопе

Рассмотрены свойства мезооптических изображений прямого следа частицы, который начинается и /или/ заканчивается в пределах поля зрения мезооптического фурье-микроскопа /МФМ/ для ядерной фотоэмульсии. Приведены признаки мезооптических изображений прямого следа частицы, длина которого меньше диаметра поля зрения МФМ. Для оценки координат начала и конца прямого следа частицы по его левому и правому мезооптическим изображениям предложен новый алгоритм измерений. Проанализирована погрешность этих измерений, которая зависит от длины прямого следа частицы.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Винogradовой

Soroko L.M.

P13-87-169

Measuring Technique of Coordinates of the Origin and of the End of Particle Track in the Mesooptical Fourier Transform Microscope

The properties of the mesooptical images of the straight line particle track originated and (or) ended within the field of view of the Mesooptical Fourier-Transform Microscope (MFTM) are studied. The features of the mesooptical images of the particle track the length of which is smaller than the diameter of the field of view of the MFTM are presented. To evaluate the coordinates of the origin and of the end of the straight line particle track by means of its left and right mesooptical images, a new measuring algorithm is suggested. The error of these measurements which depends upon the straight line particle track length is analysed.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987