

**сообщения
Объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна**

P13-87-468

Л.М.Сороко

**МЕЗООПТИЧЕСКИЙ ФУРЬЕ-МИКРОСКОП
ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ СЛЕДОВ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР НЕОНА**

1987

1. ВВЕДЕНИЕ

Схема мезооптического фурье-микроскопа /МФМ/, предназначенного для быстрого поиска следов заряженных частиц заданной ориентации и для измерения координат точки их остановки внутри слоя ядерной фотозмульсии, приведена в ^{/1/}. В ^{/2/} рассмотрена система координат, принятая в МФМ, а в ^{/3/} показаны мезооптические изображения прямых следов частиц на выходе МФМ. В экспериментах ^{/4,5/} по полуавтоматической регистрации следов релятивистских ядер неона использовалось мезооптическое зеркало невысокого качества. Было показано, что для наблюдения следов релятивистских ядер неона достаточно иметь разрешение вдоль радиальной координаты ~ 60 мкм. Позднее качество мезооптического зеркала МФМ было улучшено и разрешение по радиальной координате достигло значения $1,5$ мкм ^{/6/}.

Результаты ^{/4/} означают, что для наблюдения следов релятивистских ядер неона достаточно использовать мезооптический элемент с апертурой $\sim 1/100$ рад. Это обстоятельство послужило основой для проведения экспериментов, которые описаны в данной работе. Важным фактором было также то, что разброс по углу ориентации первичных релятивистских ядер неона и угол их многократного рассеяния на длине ядерного взаимодействия были малы и составляли не более одного углового градуса. Поэтому релятивистские ядра неона образуют в ядерной фотозмульсии почти параллельные прямые следы. Это значит, что для их наблюдения в МФМ требуется очень малый участок фокальной окружности, вблизи которой формируются мезооптические изображения следов частиц. Остальная часть фокальной окружности не используется совсем. Ясно, что в этих условиях дугу фокальной окружности можно заменить на касательную и вместо мезооптического зеркала МФМ с тороидальной поверхностью использовать более простую цилиндрическую оптику.

В данной работе описаны эксперименты по наблюдению следов релятивистских ядер неона в ядерной фотозмульсии при помощи МФМ, в котором функцию мезооптического элемента выполняет цилиндрическая линза. В первой серии экспериментов использовалась традиционная схема МФМ, когда мезооптический элемент располагался в области кроссовера сходящегося пучка света, а длина мезооптического изображения определялась диаметром поля зрения МФМ. Во второй серии экспериментов для фокусировки мезооп-

тического изображения прямого следа частицы вдоль угловой координаты использовалась линза преобразования Фурье, формирующая сходящийся пучок света с фокусным расстоянием, которое было больше, чем в первой серии. Цилиндрическая линза создавала фокусировку мезооптического изображения прямого следа частицы вдоль радиальной координаты. В малом интервале углов ориентации следов релятивистских ядер неона их мезооптические изображения состоят из размытых точек. Размытие вдоль угловой координаты определяется поперечным размером кроссовера пучка света в месте формирования мезооптического изображения, а не диаметром поля зрения, как в первой серии экспериментов. Размытие вдоль радиальной координаты определяется апертурой цилиндрической линзы и коэффициентом ее линейного увеличения. Была получена серия мезооптических изображений следов релятивистских ядер неона, которая демонстрирует монокулярный стереоэффект /эффект оглядывания/. Проблема разрешающей способности и оптимальные условия наблюдения рассмотрены в терминах информационных степеней свободы МФМ. Отмечено, что такие же условия экспериментов могут быть использованы для наблюдения следов более тяжелых релятивистских ядер.

2. МЕЗООПТИЧЕСКИЙ ФУРЬЕ-МИКРОСКОП /МФМ/ ДЛЯ СЛЕДОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР НЕОНА

На рис.1 дана принципиальная схема МФМ. Сходящийся пучок света, формируемый линзой преобразования Фурье, просвечивает слой ядерной фотоэмульсии. Каждый прямой след частицы вызывает дифракцию света и образует узкую полоску света в области расположения мезооптического зеркала. Мезооптические изображения прямых следов частиц, как показано на рис.1, формируются в плоскости ядерной фотоэмульсии с двух противоположных сторон от оптической оси МФМ. В реальной конструкции МФМ используют плоские зеркала, которые переносят мезооптические изображения прямых следов частиц на фотоприемник. МФМ позволяет одновременно фиксировать три величины: угол ориентации прямого следа частицы, расстояние прямого следа частицы от оптической оси МФМ, а также z -координату прямого следа частицы в пределах поля зрения МФМ^{/2/}. Мезооптическое зеркало МФМ, которое имеет тороидальную поверхность с образующей в виде дуги эллипса, изготовлено из металла методом прецизионного алмазного точения^{/7/}.

Функцию мезооптического элемента МФМ с кольцевым откликом может выполнять система из трех аксиконных линз^{/8/} /рис.2/. Поверхность каждой аксиконной линзы, обращенная к ядерной фо-

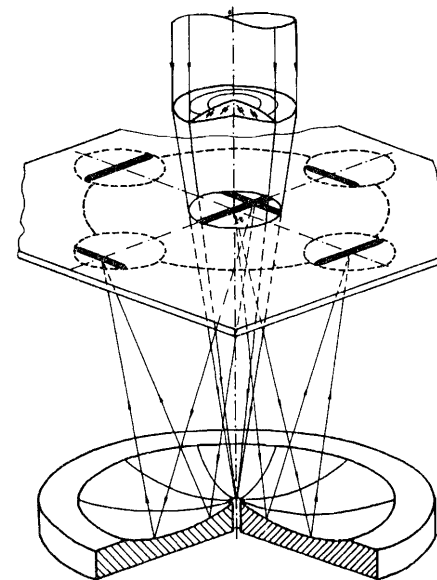


Рис.1. Схема "традиционного" мезооптического фурье-микроскопа с тороидальным зеркалом.

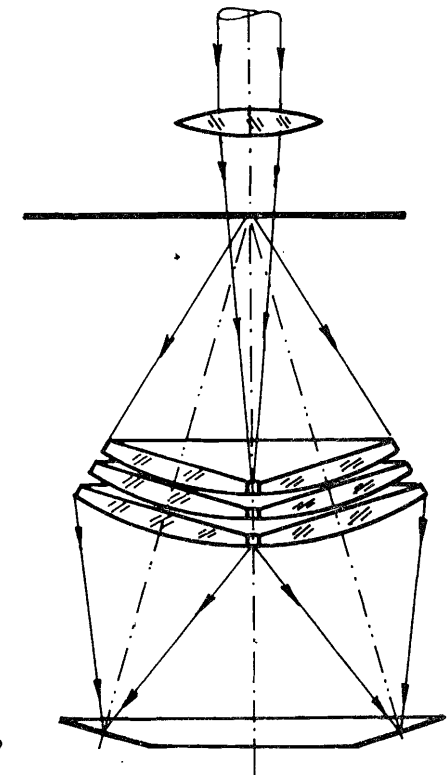


Рис.2. Мезооптический фурье-микроскоп с тремя аксиконными линзами.

тоэмульсии, имеет вид конуса, а вторая поверхность аксиконной линзы выполнена сферической. Образующая каждого конуса перпендикулярна биссектрисе угла захвата дифрагированных лучей по обе стороны от оптической оси МФМ, а центр кривизны каждой сферической поверхности находится в общей точке, где оптическая ось МФМ пересекает медианную плоскость ядерной фотоэмульсии. Сходящийся пучок света проходит через отверстия в аксиконных линзах на оптической оси МФМ. Число аксиконных линз в МФМ, который показан на рис.2, равно или больше трех. Это позволяет уменьшить не менее чем в 10 раз сферические aberrации при заданном фокусном расстоянии. Система из нескольких аксиконных линз^{/8/} является мезооптической, так как она преобразует точку в окружность. При этом здесь нет необходимости использовать плоские зеркала для переноса мезооптических изображений на фотоприемник.

В /4/ было показано, что для наблюдения следов релятивистских ядер неона достаточно иметь разрешение вдоль радиальной координаты ~ 60 мкм, которое соответствует апертуре $a \approx 10^{-2}$ для длины волны света $\lambda = 0,6$ мкм.

Существенной особенностью как зеркального, так и линзового вариантов МФМ, описанных выше, является то, что центральные лучи дифрагированного света, захватываемого мезооптическим элементом по одну сторону от оптической оси МФМ, образуют с оптической осью МФМ достаточно большой угол, который определяется полной апертурой мезооптического элемента $2\alpha_{1/2}$. При этом погрешность измерения z-координаты прямого следа частицы /2/:

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

где ρ_1 и ρ_2 - видимые расстояния от центра поля зрения до левого и, соответственно, до правого мезооптических изображений прямого следа частицы, определяется углом $\alpha_{1/2}$. Этот фактор необходимо учитывать в процессе уменьшения апертуры мезооптического

элемента при наблюдении следов релятивистских ядер неона. Чтобы сохранить возможность измерения z-координаты без операции перефокусировки по глубине, угол между центральным лучом дифрагированного света и оптической осью МФМ необходимо оставить без изменения. Тогда возникает конструкция аксиконных линз, напоминающая велосипедный трек /рис.3б/ с узкой дорожкой. Кроме того, при апертуре $a \approx 10^{-2}$ отпадает необходимость

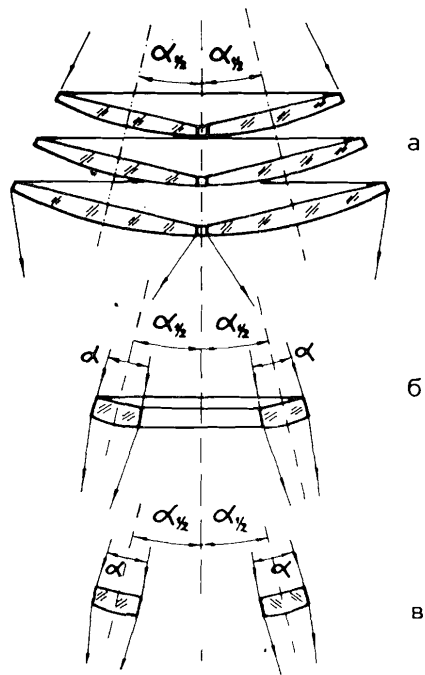


Рис.3. Схемы мезооптических фурье-микроскопов, отличающихся конструкцией мезооптического элемента: а - три кольцевые аксиконные линзы; б - одна узкая кольцевая аксиконная линза; в - две цилиндрические линзы.

в использовании трех аксиконных линз, так как в этих условиях сферические aberrации пренебрежимо малы. Получается система, показанная на рис.3б. Теперь необходимо принять во внимание то, что первичные следы релятивистских ядер неона практически параллельны друг другу и для их наблюдения требуется очень малый участок фокальной окружности, $\sim 1^\circ$, а остальная ее часть не используется. Так как малую часть фокальной окружности можно заменить на касательную к ней, то вместо мезооптического элемента с конусно-сферическими поверхностями /рис.3б/ можно использовать две цилиндрические линзы, расположенные на противоположных участках фокальной окружности /рис.3в/.

3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис.4 дана схема первой серии экспериментов по наблюдению следов релятивистских ядер неона при помощи МФМ, в котором функцию мезооптического элемента выполняет собирающая цилиндрическая линза с фокусным расстоянием $f_1 = 57$ мм. Она образует одномерную изображающую систему, при этом цилиндрическая линза находится на расстоянии l_1 от центра поля зрения МФМ и на расстоянии l_2 от мезооптического изображения. Центральный луч дифрагированного света, идущий вдоль осевой линии цилиндрической линзы, образует угол β с оптической осью МФМ. Угловая апер-

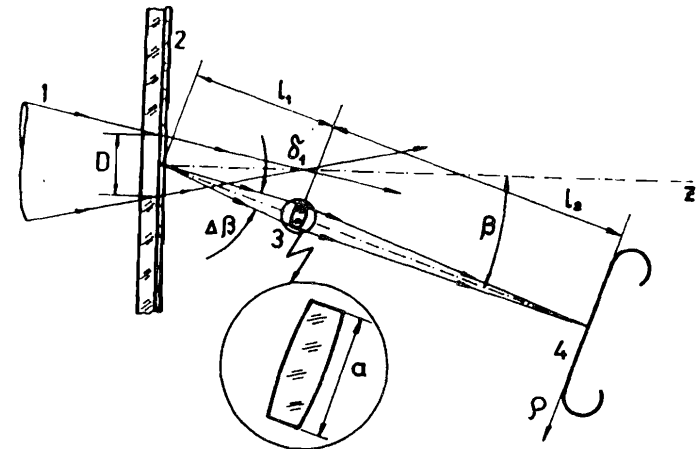


Рис.4. Схема первой серии экспериментов: 1 - сходящийся пучок света, 2 - объект - ядерная фотоэмульсия, 3 - цилиндрическая линза, 4 - мезооптическое изображение следа релятивистского ядра неона.

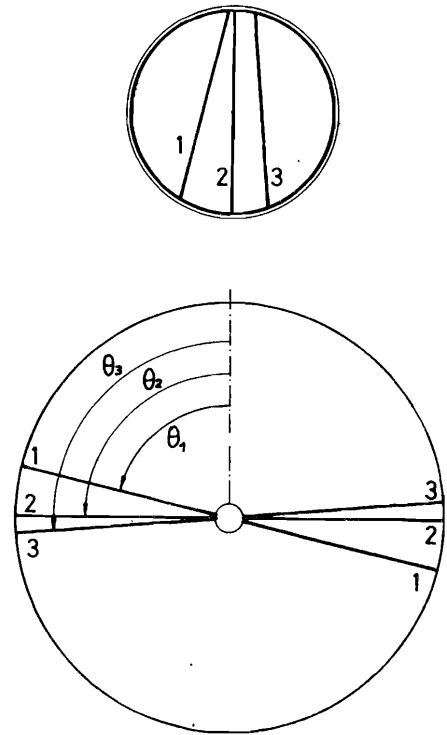


Рис.5. Картина дифракции далекого поля, формируемая сходящимся пучком света, для трех следов частиц, попавших в поле зрения системы.

тура цилиндрической линзы равна $\Delta\beta$. Мезооптические изображения следов релятивистских ядер неона отображают в системе координат (ρ, θ) , где θ - угол, который образует центральный луч наблюдаемого следа частицы с плоскостью чертежа на рис.4.

На рис.5 показана картина дифракции далекого поля в месте расположения кроссовера сходящегося пучка света. Каждый след частицы образует узкую полоску света, проходящую через оптическую ось системы. При наличии в поле зрения МФМ нескольких следов частиц на-

блюдается веер таких полосок. Так как ширина следа релятивистского ядра неона равна 1,5-2 мкм, то область дифракции далекого поля простирается вплоть до углов $\beta \sim 50^\circ$. Боковые лепестки дифракции далекого поля не наблюдаются, так как просвечиваемый пучок света представляет собой гауссовый пучок от одномодового гелий-неонового лазера.

Схема эксперимента, приведенная на рис.4, напоминает скорее опыты по исследованию углового распределения частиц, рассеянных на ядрах мишени¹⁹, чем изображающую оптическую систему. Существенной особенностью эксперимента является то, что разброс углов $\Delta\theta$ в наших условиях был мал, так как следы частиц шли практически параллельно друг другу, и поэтому дифрагированный свет под другими азимутальными углами отсутствовал.

Фокусировку вдоль радиальной координаты ρ создает цилиндрическая линза. Вдоль угловой координаты θ фокусировки нет. Причина в том, что МФМ в сагиттальном сечении представляет собой одномерную камеру обскуры, ширина щели которой равна диаметру кроссовера δ_1 сходящегося пучка света в месте расположения мезооптического элемента. При этом

$$\delta_1 = \frac{\lambda}{D} \ell_1,$$

/2/

где λ - длина волны света, D - диаметр поля зрения МФМ. В камере обскуры информация об углах θ при малом разбросе $\Delta\theta$ сохраняется, однако изображение прямого следа частицы вдоль угловой координаты θ получается размытым. Для того чтобы размытие не превышало длину следа частицы, равную диаметру поля зрения МФМ, достаточно, чтобы $D \gg \delta_1$.

Абсолютный геометрический размер мезооптического изображения прямого следа частицы в сагиттальном сечении вдоль угловой координаты θ равен $D \cdot M$, где $M = \ell_2 / \ell_1$ - коэффициент линейного увеличения цилиндрической линзы. На рис.6 дана фотография мезооптических изображений следов релятивистских ядер неона, полученная по схеме на рис.4 при $M = \ell_2 / \ell_1 = 3,5$. Диаметр поля зрения $D \approx 1,2$ мм, $\delta_1 \approx 60$ мкм.

Во второй серии экспериментов фокусное расстояние линзы преобразования Фурье было увеличено настолько, чтобы кроссовер сходящегося пучка света располагался на расстоянии $\ell_1 + \ell_2$ от центра поля зрения МФМ. Прежде всего заметим, что в МФМ с мезооптическим зеркалом¹¹ такой эксперимент выполнить принципиально невозможно. Причина этого в том, что в сагиттальном сечении мезооптическое зеркало МФМ имеет вид кривой, кривизна и знак которой изменяются от расстояния до оптической оси. Это приводит к тому, что мезооптическое изображение сильно размывается вдоль угловой координаты θ . В случае цилиндрической линзы, образующая которой не имеет кривизны, эффекты дефокусировки или перефокусировки отсутствуют, и кроссовер сходящегося пучка света можно располагать в любой точке оптической оси.

На рис.7 показаны мезооптические изображения следов релятивистских ядер неона, полученные во второй серии экспериментов, когда кроссовер сходящегося пучка света находился на расстоянии $\ell_1 + \ell_2$ от центра поля зрения. Фокусировку вдоль радиальной координаты

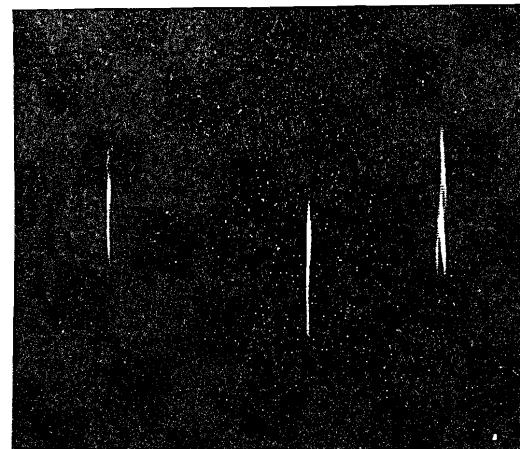


Рис.6. Фотография мезооптических изображений следов релятивистских ядер неона, полученная в первой серии экспериментов.

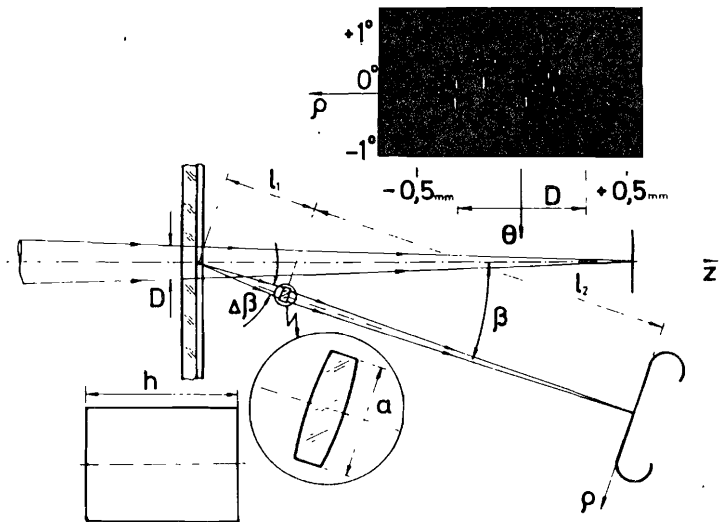


Рис. 7. Схема второй серии экспериментов и вид мезооптических изображений следов релятивистских ядер неона.

наты ρ создает, как и раньше, цилиндрическая линза с угловой апертурой $\Delta\beta$. Размытие вдоль радиальной координаты по предмету равно

$$\Delta\rho = \frac{\lambda}{\Delta\beta}. \quad /3/$$

Фокусировку вдоль угловой координаты θ создает линза преобразования Фурье, эффект камеры обскура отсутствует. С учетом того, что теперь диаметр кроссовера пучка света равен

$$\delta_2 = \frac{\lambda}{D}(l_1 + l_2), \quad /4/$$

размытие вдоль угловой координаты θ составит

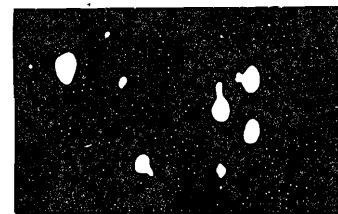
$$\Delta\theta = \frac{\delta_2}{(l_1 + l_2) \operatorname{tg} \beta} = \frac{\lambda(l_1 + l_2)}{D(l_1 + l_2) \operatorname{tg} \beta} = \frac{\lambda}{D \operatorname{tg} \beta}. \quad /5/$$

Из /5/ видно, что чем больше угол β , тем выше разрешение вдоль угловой координаты, которое для следов релятивистских ядер неона ограничено снизу значением

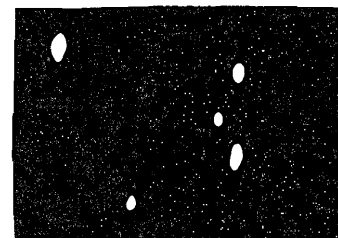
$$\Delta\theta^{\min} \sim \frac{2\lambda}{D}. \quad /6/$$

4. МОНОКУЛЯРНЫЙ СТЕРЕОЭФФЕКТ

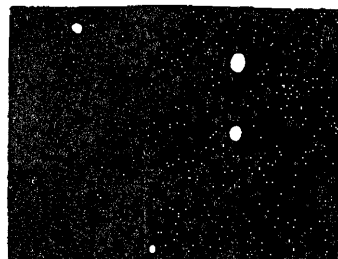
На рис. 8 показаны фотографии мезооптических изображений группы следов релятивистских ядер неона, полученные во второй



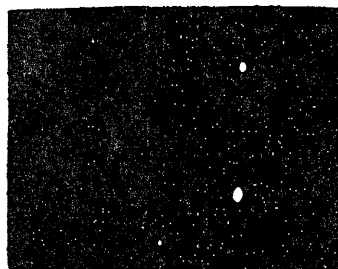
13°



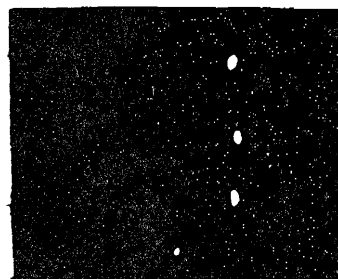
30°



39°



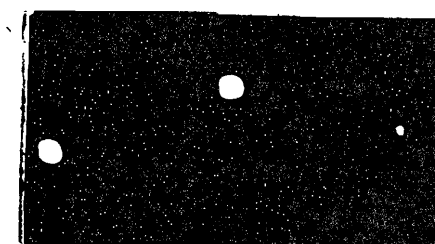
41°



46°

Рис. 8. Монокулярный стереоэффект, который наблюдается путем сравнения мезооптических изображений следов частиц, полученных при разных β .

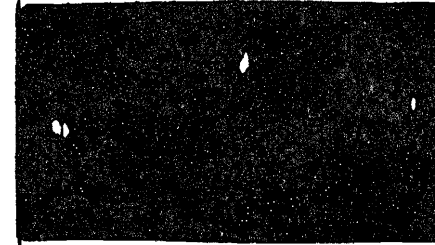
Рис. 9. Фотографии мезооптических изображений следов частиц, полученные при различных апертурах цилиндрической линзы: а/ 1,0 мм, б/ 2 мм, в/ 4 мм, г/ 6 мм.



а



б



в



г

серии экспериментов, при различных значениях угла β . Видно, как с изменением угла β изменяется взаимная конфигурация мезооптических изображений следов частиц. Это - монокулярный стереоэффект или эффект оглядывания ^{/10/}. По мере увеличения угла β изменяются масштаб и разрешение вдоль угловой координаты θ , хотя линейные размеры мезооптических изображений вдоль угловой координаты остаются неизменными и равны диаметру кроссовера пучка света δ_2 . Для того чтобы эффективно наблюдать монокулярный стереоэффект, желательно, чтобы глубина резкости вдоль координаты z была равна толщине слоя ядерной фотоэмульсии. Были получены фотографии мезооптических изображений следов частиц при различной апертуре цилиндрической линзы $\Delta\beta$ и, соответственно, при различной глубине фокуса. При $\ell_1 = 60$ мм линейные размеры апертуры цилиндрической линзы равнялись: 1,0; 2; 4 и 6 мм. Из рис.9 видно, что цилиндрическая линза имеет достаточную глубину резкости, только если $\Delta\beta \leq 0,12$ рад, когда разрешение вдоль радиальной координаты по предмету $\Delta\rho \geq 5$ мкм. Это - первый фактор, ограничивающий допустимую загрузку ядерной фотоэмульсии следами релятивистских ядер неона.

Вторым фактором, определяющим допустимую плотность следов частиц на мезооптических фотографиях, является форма и размеры просвечиваемой области в ядерной фотоэмульсии. Чтобы уменьшить загрузку следов частиц в кадре, необходимо уменьшить объем ядерной фотоэмульсии, просвечиваемый сходящимся пучком света. С этой целью была введена дополнительная цилиндрическая линза перед ядерной фотоэмульсией. Теперь ядерная фотоэмульсия просвечивалась в тонком слое высотой D вдоль оси y и шириной $\Delta x \ll D$ вдоль оси x . Для получения равномерного освещения длина кроссовера пучка света вдоль координаты z не должна быть меньше толщины слоя ядерной фотоэмульсии h . На рис.10 показан ход лучей в такой системе освещения. Пучок света диаметром D проходил через дополнительную цилиндрическую линзу с фокусным расстоянием f_0 , которая собирала свет в фокусе с длиной кроссовера $\Delta z \geq h$. Так как

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\gamma}, \quad \Delta z = 2 \frac{\lambda}{\gamma^2} \geq h, \quad /7/$$

то

$$\Delta x^{\min} = \sqrt{\frac{\lambda h}{2}}. \quad /8/$$

Для $h = 200$ мкм имеем $\Delta x^{\min} = 8$ мкм. Это значит, что ширину освещаемой области ядерной фотоэмульсии можно уменьшить при помощи дополнительной цилиндрической линзы в $D/\Delta x^{\min}$ раз.

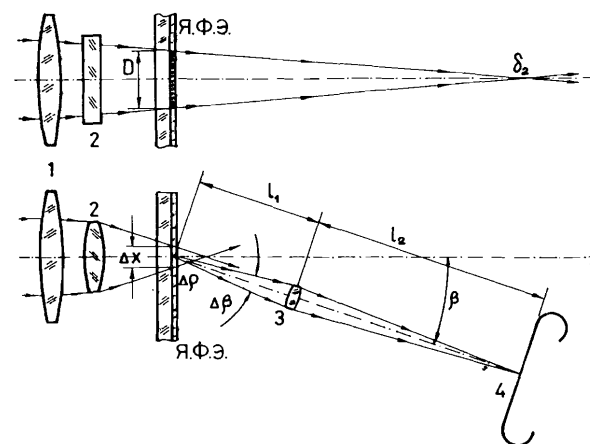


Рис.10. Ход лучей света в системе освещения с малой шириной поля зрения: 1 - линза, формирующая сходящийся пучок света; 2 - цилиндрическая линза - конденсор; 3 - изображающая цилиндрическая линза, 4 - экран наблюдения.

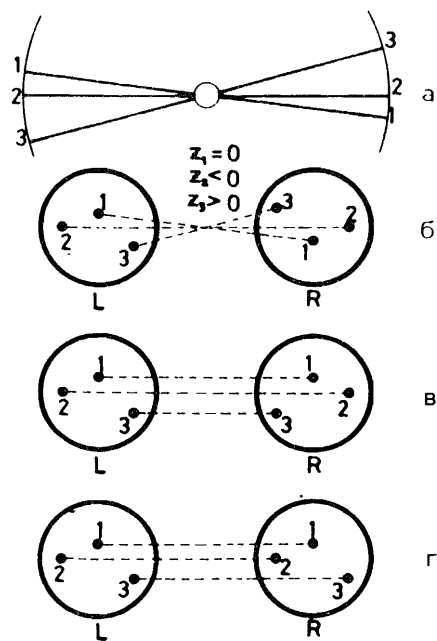
Приведенная на рис.10 мезооптическая система содержит две цилиндрические линзы и ее можно сопоставить с известными системами, которые также содержат две цилиндрические линзы. Отличие от анаморфотного объектива и от систем Фурье-оптики с анаморфотным преобразованием Фурье ^{/11,12/} состоит в том, что вторая цилиндрическая линза на рис.10 расположена не на оптической оси, как в ^{/11,12/}, а под углом β к последней. Кроме того, образующие двух цилиндрических линз на рис.10 взаимно параллельны, в то время как в основной схеме анаморфотного преобразования Фурье в когерентной оптической системе образующие цилиндрических линз взаимно перпендикулярны или их ориентации попеременно чередуются.

В ^{/13/} отбор прямых линий заданной ориентации ведется при помощи призмы, однако информация о прямых линиях не подвергается сжатию, как это имеет место в мезооптической системе на рис.10. Важная особенность этой системы в том, что в ней производится предельно возможное сжатие информации о прямых следах частиц в ядерной фотоэмульсии, которые расположены не на плоскости, как в ^{/11-13/}, а случайно распределены в трехмерном объеме микроскопических размеров.

5. БИНОКУЛЯРНЫЙ СТЕРЕОЭФФЕКТ

Мезооптическая система, показанная на рис.3в, позволяет видеть прямые следы в пространстве через бинокулярный стереоэф-

фект, создаваемый двумя цилиндрическими линзами. Однако в отличие от классической оптики мы наблюдаем не точки в пространстве, а прямые следы частиц, причем информация об ориентациях этих следов частиц отображается в мезооптической системе иначе, чем в традиционной оптике. А именно: здесь возникает дополнительный эффект, которого нет в традиционной стереоскопии. Причина его в том, что информация об ориентации прямого следа частицы своеобразным образом преобразуется в положение самого мезооптического изображения данного прямого следа частицы. Как отмечалось ранее, картина дифракции далекого поля прямых следов



частиц, имеющих несколько различные ориентации в пространстве, состоит из узких полосок, которые проходят через оптическую ось МФМ. На рис.11а показана схематически картина дифракции далекого поля для

Рис.11. а/ Картина дифракции далекого поля для трех следов частиц, имеющих различные углы ориентации и различные ρ . б/ Левое и правое мезооптические изображения тех же следов частиц, полученные по схеме рис.3в. в/ Левое и правое мезооптические изображения после устранения вертикального параллакса. г/ Левое и правое мезооптические изображения после устранения как вертикального параллакса, так и эффекта псевдоскопии.

трех прямых следов частиц, а на рис.11б - два мезооптических изображения этой конфигурации: левое (L) и правое (R). Видно, что когда левое мезооптическое изображение прямого следа частицы с углом ориентации $+\theta$ идет вверх по мере увеличения угла θ , соответствующее правое мезооптическое изображение идет вниз. Возникают как горизонтальный, так и вертикальный параллаксы. Так как двумя глазами мы не можем одновременно наблюдать бинокулярный стереоэффект от всех следов частиц одновременно, то необходимо убрать вертикальный параллакс. Для этого одно из двух мезооптических изображений, например правое (R), пово-

рачивают на угол 180° призмой Дове. Остается только горизонтальный параллакс одновременно для всех прямых следов частиц в пределах $|\theta| < \Delta\theta$ /рис.11в/. Однако изображение в пространстве видно псевдоскопическим. Чтобы псевдоскопический стереоэффект превратить в ортоскопический $\sim 10\%$, необходимо, так же как и в обычной двухобъективной стереоскопической камере, развернуть на угол 180° одно из двух мезооптических изображений при помощи второй призмы Дове, ориентированной перпендикулярно первой призме Дове. После указанных преобразований мы получим два мезооптических изображения такими, какими они показаны на рис.11г.

6. ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ НАБЛЮДЕНИЯ СЛЕДОВ РЕЛЯТИВИСТИЧЕСКИХ ЯДЕР НЕОНА

Оценим число информационных степеней свободы, которое характеризует МФМ с цилиндрической линзой /рис.3в/. Мезооптические изображения следов релятивистских ядер неона отображают в формате (θ, ρ) /рис.12/. Разрешение вдоль угловой координаты $\Delta\theta$ определяется выражением /6/ в угловом масштабе или выражением /4/ в линейном, реально наблюдаемом масштабе. Угловая апертура цилиндрической линзы $\Delta\beta$

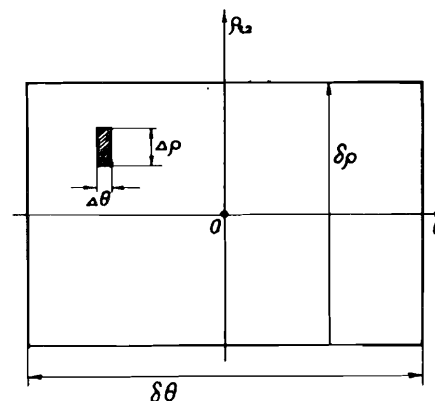


Рис.12. Формат $(\theta, \rho_{1,2})$, в котором отображают мезооптические изображения следов релятивистских ядер неона, где θ - угол ориентации следа частицы, $\rho_{1,2}$ - видимое расстояние от центра поля зрения системы для левого (ρ_1) и правого (ρ_2) мезооптических изображений.

определяется толщиной слоя ядерной фотозмульсии h . Преломление света в ядерной фотозмульсии приводит к тому, что видимая толщина ее в n раз меньше геометрической толщины h , $h' = h/n$, где n - показатель преломления света. Дополнительное сокращение видимой толщины ядерной фотозмульсии до h'' по лучу света, идущего в цилиндрическую линзу, возникает при больших углах β . Поэтому требуемая глубина резкости цилиндрической линзы и интервал значений радиальной координаты равны

$$\underline{h''} = \frac{h}{n} \cos \beta, \quad \delta \rho = \frac{h}{n} \sin \beta. \quad /9/$$

Для $\beta = 50^\circ$, $n = 1,51$, $h'' \cong 85$ мкм, $\delta \rho \cong 100$ мкм. При этом ядерная фотоэмульсия освещается в тонком слое высотой D и толщиной Δx /8/. Тогда получаем

$$\Delta \beta = \sqrt{\frac{2\lambda}{h''}}, \quad \Delta \rho = \sqrt{\frac{h''\lambda}{2}}. \quad /10/$$

Число информационных степеней свободы вдоль радиальной координаты ρ равно

$$N_\rho = \frac{\delta \rho}{\Delta \rho} = \sqrt{\frac{2h}{n\lambda \cos \beta}} \cdot \sin \beta. \quad /11/$$

Для $h = 200$ мкм, $\lambda = 0,6$ мкм, $\beta = 50^\circ$, $N_\rho = 20$, а $\Delta \beta = 0,12$ рад.

Число информационных степеней свободы вдоль угловой координаты θ для $\delta \theta = 0,02$ рад и $D = 2$ мм равно

$$N_\theta = \frac{\delta \theta}{\Delta \theta} = \frac{D}{50 \cdot 2\lambda} = 33. \quad /12/$$

Полное число информационных степеней свободы в наблюдаемом кадре равно

$$N_t = N_\theta \cdot N_\rho = 660 \quad /13/$$

для тонкого слоя $\Delta x \cong 10$ мкм и

$$N_t^\circ = N_t \cdot \frac{D}{2\Delta x} = 660 \cdot \frac{2}{2 \cdot 0,01} = 6,6 \cdot 10^4. \quad /14/$$

для поля зрения в виде круга диаметром D .

Линейные размеры кадра равны

$$L_\rho = N_\rho \cdot \Delta \rho \cdot M; \quad L_\theta = N_\theta \cdot \delta_2 \quad /15/$$

вдоль радиальной и угловой координат соответственно. Для

$l_1 + l_2 = 200$ мм размеры мезооптического изображения равны 60 мкм вдоль угловой координаты θ и 20 мкм вдоль радиальной координаты ρ при $M = 4$. Если взять $M = 12$, то мезооптическое изображение примет вид кружка диаметром 60 мкм, а размеры кадра будут составлять $L_\rho = 1,2$ мм и $L_\theta = 2$ мм.

Полное число информационных степеней свободы МФМ, уравнение /14/, в 160 раз больше числа информационных степеней свободы традиционного оптического микроскопа, равного

$$N_{\rho t}^{\text{трад}} = \frac{D}{\Delta \rho} = 4 \cdot 10^2 \quad /16/$$

для $\Delta \rho = 5$ мкм и глубины резкости $\Delta z = h/n$. Причина такого различия в том, что система наблюдения в МФМ расположена под углом $\beta \cong 50^\circ$ к оптической оси, а следы частиц анализируются в кадре не только по радиальной координате, но и по углу. Благодаря этому МФМ допускает более высокую плотность следов частиц, чем традиционный оптический микроскоп, с тем же разрешением по радиальной координате. Полное число информационных степеней свободы традиционного оптического микроскопа можно увеличить в 125 раз, если разрешение по радиальной координате сделать равным $\Delta \rho_0 = 1$ мкм и одновременно увеличить число степеней свободы вдоль z -координаты с $N_z^{\text{трад}} = 1$ до $N_z^\circ = 25$. Однако последний фактор с неизбежностью возвращает нас к проблеме глубины резкости и к необходимости вести сканирование ядерной фотоэмульсии по глубине.

Заметим, что разрешение вдоль z -координаты, которое можно получить в МФМ с двумя цилиндрическими линзами, определяется выражением

$$\Delta z = \frac{\sqrt{2} \cdot \Delta \rho}{2 \sin \beta} \quad /17/$$

и в рассматриваемом примере с $\beta = 50^\circ$ составляет около 5 мкм. Это значит, что число дополнительных степеней свободы у МФМ вдоль z -координаты, которое содержится неявно в левом и правом мезооптических изображениях прямого следа частицы, равно

$$N_z = \frac{h''}{\Delta z}, \quad /18/$$

или $N_z = 18$ для $h'' = 85$ мкм. В этом состоит важное дополнительное преимущество МФМ с двумя цилиндрическими линзами.

Между тем в традиционном оптическом микроскопе с $\Delta \rho = 5$ мкм глубина резкости равна видимой толщине ядерной фотоэмульсии $h' = h/n$ и $N_z^{\text{трад}} = 1$. Поэтому измерить z -координату прямого следа частицы в такой системе в принципе невозможно.

7. ВЫВОДЫ

Результаты экспериментов по наблюдению следов релятивистских ядер неона в ядерной фотоэмульсии при помощи мезооптического фурье-микроскопа /МФМ/ с цилиндрической линзой в качестве мезооптического элемента, а также анализ информационных степеней свободы у этой системы позволяют сделать следующие выводы:

1. МФМ с цилиндрической линзой является эффективной системой для наблюдения следов релятивистских ядер неона в ядерной фотоэмульсии.

2. Монокулярный стереоэффект в МФМ дает возможность наблюдателю выбирать наиболее оптимальный ракурс.

3. Полное число степеней свободы МФМ с одной цилиндрической линзой в 150 раз больше, чем у традиционного оптического микроскопа при том же разрешении вдоль радиальной координаты $\Delta r = 5$ мкм.

4. МФМ с двумя цилиндрическими линзами имеет дополнительные степени свободы вдоль z -координаты ($N_z \approx 18$).

5. Получены соотношения для оценки оптимальных условий наблюдения следов релятивистских ядер неона при помощи МФМ с цилиндрической линзой.

6. Отмечено, что МФМ с цилиндрической линзой может быть использован также для наблюдения следов более тяжелых релятивистских ядер.

Автор выражает благодарность Ш.Ф. Хамидову за помощь при проведении экспериментов, а также Ю.А. Батусову за полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, P13-83-119, Дубна, 1983.
2. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-85-137, Дубна, 1985.
3. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, P13-84-277, Дубна, 1984.
4. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, P13-85-378, Дубна, 1985.
5. Bencze Gy.L., Soroko L.M. JINR preprint, E13-84-310, Dubna, 1984.
6. Бенце Д. и др. ОИЯИ, P13-86-630, Дубна, 1986.
7. Цеснек Л.С., Сорокин О.В., Золотухин А.А. Металлические зеркала. М.: Машиностроение, 1983, с.231.
8. Сороко Л.М. А.с. 1.121.637 /СССР/ - Опубликовано в ОИ, 1984, № 40, с.138.
9. Акимов Ю.К., Савченко О.В., Сороко Л.М. - ЖЭТФ, 1958, т.35, 1/77, с.89.
10. Дудников Ю.А., Рожков Б.К. Растровые системы для получения объемных изображений. Л.: Машиностроение, 1986, 216 с.
11. Szoplik T., Arsenaull H.H. - Applied Optics, 1985, v.24, p.168.
12. Szoplik T. et al. - Applied Optics, 1986, v.25, p.188.
13. Debras S., Brannon M. - J. Optics (Paris), 1979, v.10, p.251.

Работа поступила в издательский отдел
24 июня 1987 года.

Сороко Л.М.

P13-87-468

Мезооптический фурье-микроскоп для наблюдения следов релятивистских ядер неона

Описаны эксперименты по наблюдению следов релятивистских ядер неона в ядерной фотозмульсии при помощи мезооптического фурье-микроскопа /МФМ/, в котором функцию мезооптического элемента выполняет цилиндрическая линза. Фокусировку мезооптического изображения прямого следа частицы вдоль угловой координаты создает линза преобразования Фурье, формирующая сходящийся пучок света, а вдоль радиальной координаты - цилиндрическая линза. В малом интервале углов ориентации следов релятивистских ядер неона их мезооптические изображения имеют вид размытых точек. При изменении угла между центральным лучом света и оптической осью МФМ наблюдается монокулярный стереоэффект. Проблема разрешающей способности и оптимальные условия наблюдения рассмотрены в терминах информационных степеней свободы. Отмечено, что МФМ с цилиндрической линзой можно использовать для наблюдения следов более тяжелых релятивистских ядер.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С. Виноградовой

Soroko L.M.

P13-87-468

Mesooptical Fourier-Transform Microscope for the Observation of Relativistic Neon Nuclei

Experiments on observation of relativistic neon nuclei in nuclear emulsion by means of the Mesooptical Fourier-Transform Microscope (MFTM) with a cylindrical lens as a mesooptical element are described. Mesooptical images of straight-line particle tracks are focused along the angular coordinate with a Fourier-Transform lens and along the radial coordinate with a cylindrical lens. In a small range of orientation angles the mesooptical images of relativistic neon nuclei have the form of blurred points. The monocular stereoeffect is observed if we vary the observation angle. The problem of resolving power and optimal conditions for observation are dealt with in terms of information degrees of freedom. The method described here can also be used to observe the particle tracks of heavier relativistic nuclei.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987