

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

С 655

P13-87-576

Л.М.Сороко

**МЕЗООПТИЧЕСКИЕ МИКРОСКОПЫ
ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СЛЕДОВ
ЧАСТИЦ В ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ**

1987

1. ВВЕДЕНИЕ

Стопки из многих слоев ядерной фотоэмульсии без подложки широко используют в качестве мишени-детектора совместно с гибридными спектрометрами при изучении процессов распада короткоживущих элементарных частиц, образующихся в пучках нейтрино высоких энергий от ускорителя. Чтобы повысить эффективность поиска и достоверность интерпретации событий, происходящих в мишенях-детекторах объемом около 100 литров, были введены дополнительные контрольные пластины [1]. Это - сэндвич, в котором центральная пластина, изготовленная из органики толщиной 1 мм, покрыта с двух сторон слоями ядерной фотоэмульсии толщиной ~ 100 мкм. Контрольные пластины устанавливают между мишенью-детектором из слоев ядерной фотоэмульсии без подложки и системой целеуказаний. Вторичные заряженные частицы, выходящие из мишени-детектора, пронизывают контрольную пластину в направлении, перпендикулярном ее плоскости, и образуют в слоях ядерной фотоэмульсии следы частиц, которые называют вертикальными, так как они идут вдоль оптической оси традиционного микроскопа. Такой след никогда не виден на всю свою длину. Чтобы обнаружить вертикальный след частицы, наблюдатель постоянно вращает микровинт наводки изображения на фокус. Навык ощущения в пространстве вертикального следа частиц быстро вырабатывается у оператора. Однако поиск вертикальных следов частиц ведут по площади, и поэтому скорость просмотра получается очень низкой, всего около 1 см² за рабочий день.

На пути к автоматизации операции поиска вертикальных следов при помощи компьютера возникают трудности, обусловленные особенностями процесса распознавания вертикальных следов частиц по совокупности частичных сфокусированных изображений, которые не отличаются от изображений случайных скоплений зерен серебра, разбросанных по всему слою ядерной фотоэмульсии. Чтобы обнаружить вертикальный след частицы, сначала необходимо ввести в память компьютера три или четыре соседних частичных изображения, а затем подвергнуть эту информацию обработке с целью поиска пространственных корреляций в направлении, параллельном оптической оси микроскопа. В слое ядерной фото-

эмульсии содержится около 20 частичных изображений. На контрольной пластинке площадью $40 \times 80 \text{ см}^2$ умещается $3 \cdot 10^5$ полей зрения диаметром 1 мм или $6 \cdot 10^6$ частичных изображений. Так как элемент разрешения в оптическом микроскопе равен 1 мкм^2 , то на одной контрольной пластинке в двух слоях ядерной фотоэмульсии содержится $1,2 \cdot 10^{13}$ элементов изображения. Ясно, что поиск пространственных корреляций, являющихся признаками вертикальных следов частиц, в этих условиях представляет весьма сложную проблему.

В данной работе показано, что при помощи мезооптического микроскопа ^{/4/} с высоким пространственным разрешением можно наблюдать вертикальный след частицы на всю толщину слоя ядерной фотоэмульсии без операции перефокусировки по глубине. Сканирование контрольной пластинки ведут только вдоль x - и y -координат. Сканирование вдоль координаты z отсутствует. В системе ^{/5/} быстродействие повышено дополнительно благодаря тому, что сканирование контрольной пластинки ведут одновременно на 10^2 площадках. Чтобы уменьшить интенсивность боковых лепестков, мезооптический микроскоп выполняют в виде конфокального микроскопа ^{/11/}. В мезооптической системе ^{/16/} поиск вертикальных следов частиц и измерение их координат ведут при помощи мезооптического конденсора, который формирует область освещения в виде узкого "забора", который простирается в направлении, перпендикулярном оптической оси системы, хотя сам содержит оптическую ось в своей плоскости. Алгоритм измерения координат вертикальных следов частиц, который можно использовать в мезооптической системе ^{/16/}, основан на принципах реконструктивной томографии ^{/17/}. Большинство из описанных мезооптических микроскопов могут быть приспособлены для одновременного просмотра двух слоев ядерной фотоэмульсии, политых с противоположных сторон контрольной пластины. Показано, что быстродействие описанных мезооптических систем, предназначенных для наблюдения вертикальных следов частиц в контрольных пластинах, в $10^2 \div 10^4$ раз выше, чем в традиционных оптических системах.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объект наблюдения - след релятивистского протона - имеет вид цепочки зерен серебра, ориентированной перпендикулярно плоскости ядерной фотоэмульсии, с линейной плотностью 75 зерен серебра на 100 мкм длины следа частицы. Это в 3 раза больше, чем у горизонтальных следов частиц, так как после фотохимической обработки толщина слоя ядерной фотоэмульсии уменьшается в 3 раза. Обычно для наблюдения вертикальных следов час-

тиц используют традиционный оптический микроскоп с объективом X90 и числовой апертурой 1,3. Глубина резкости такой системы равна 3 мкм, и поэтому сфокусированными оказываются всего $5 \div 7$ зерен серебра. Чтобы убедиться в том, что наблюдаемые зерна серебра действительно принадлежат вертикальному следу частицы, а не являются случайным скоплением зерен серебра, наводку на фокус постоянно меняют. Все операции ведут вручную, и поэтому скорость просмотра ядерной фотоэмульсии при поиске вертикальных следов частиц очень низка - около 1 см^2 за рабочий день. Чтобы повысить степень надежности такого просмотра, его повторяют несколько раз.

Скорость просмотра ядерной фотоэмульсии при поиске вертикальных следов частиц можно повысить, если вместо универсального традиционного микроскопа использовать специализированные мезооптические устройства, в которых вертикальный след частицы виден на всю толщину слоя ядерной фотоэмульсии с высоким пространственным разрешением.

3. МЕЗООПТИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СЛЕДОВ ЧАСТИЦ

На рис. 1 дана схема оптического аксикона, который является прообразом мезооптического микроскопа для вертикальных следов частиц ^{/4/}. Каждая точка объекта, расположенная на оптической оси на расстоянии l_1 перед аксиконом, преобразуется в отрезок прямой линии длиной L , центр которого расположен на расстоянии l_2 за аксиконом. Если точечный объект сдвинуть вдоль оптической оси на малую величину $\Delta l_1 \ll l_2$, то мезооптическое изображение длиной L сместится на величину

$$\Delta l_2 = - M^2 \cdot \Delta l_1. \quad /1/$$

где $M = l_2 / l_1$ - коэффициент линейного увеличения аксикона. На рис. 2 приведены распределения интенсивности света вдоль оси z в мезооптическом изображении точечного объекта ^{/A/} и отрезка прямой линии длиной $h \ll l_1$ ^{/Б/} для $M = 1$ в пренебрежении эффектами дифракции света. Видно, что минимальное значение L , достаточное для получения однородного эффекта продольной мезооптичности на глубине h , равно $L_{\min} = h$. При $L > L_{\min}$ тот же эффект будет достигнут ценой неоправданной потери интенсивности света. Таким образом, минимальная глубина резкости аксикона равна толщине слоя ядерной фотоэмульсии или в общем случае

$$L_{\min} = M^2 \cdot h. \quad /2/$$

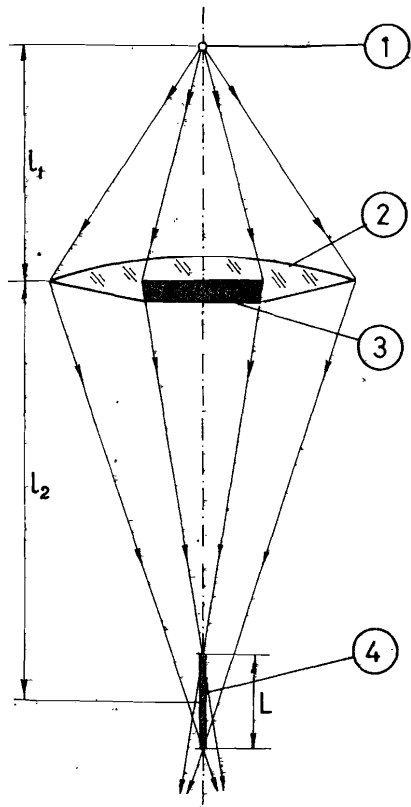


Рис. 1. Схема линзового аксикона: 1 - точечный источник света, 2 - линза-аксикон, 3 - центральная шторка, 4 - мезооптическое изображение точечного источника света.

Принципиальная схема просмотра слоя ядерной фотоэмульсии при помощи аксикона для поиска вертикальных следов частиц дана на рис. 3. Слой ядерной фотоэмульсии освещается равномерно на всю глубину, а наблюдение ведут при помощи мезооптического микроскопа, в котором традиционный объектив заменен на мезооптический аксикон с глубиной резкости h . Фотоприемник с точечным отверстием расположен на оптической оси системы. В процессе сканирования ядерная фотоэмульсия перемещается последовательно вдоль оси x с шагом вдоль оси y , равным пространственному разрешению системы.

Чтобы дополнительно увеличить скорость просмотра ядерной фотоэмульсии, вместо одного аксикона используют матрицу аксиконов в виде раstra дифракционных линз, аналогичного растру изображающих дифракционных линз ^{/2/} /рис. 4/, а вместо одного фотоприемника - соответствующую матрицу фотоприемников. Как отмечено в ^{/2/}, пространственное разрешение дифракционной

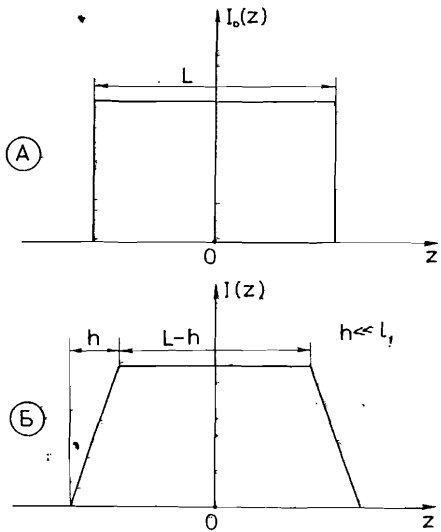


Рис. 2. Распределение интенсивности света в мезооптических изображениях точечного объектива /А/ и линейного объекта длиной $h \ll l_1$ /Б/.

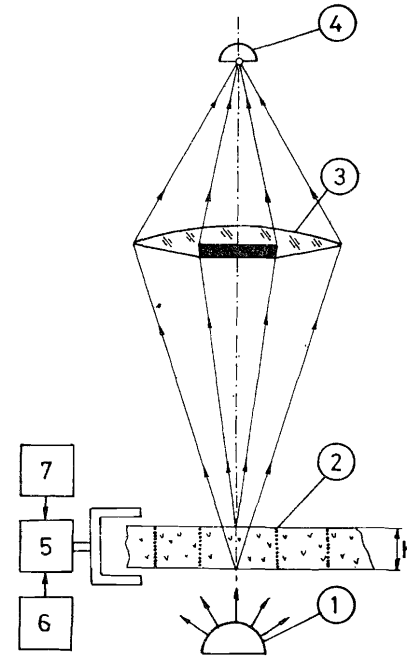
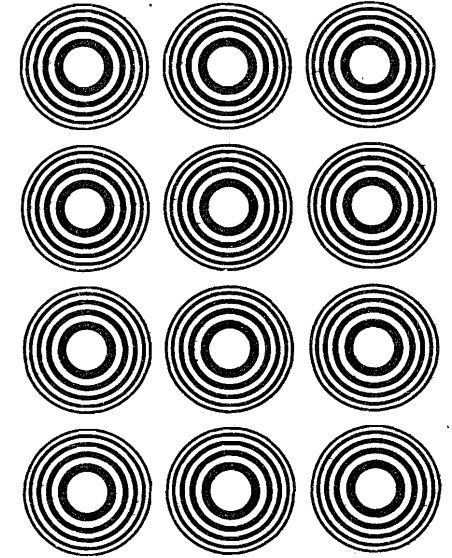


Рис. 4. Растр изображающих дифракционных линз ^{/2/}.

Рис. 3. Схема просмотра ядерной фотоэмульсии при помощи аксикона: 1 - источник света, 2 - ядерная фотоэмульсия, 3 - аксикон, 4 - точечный фотоприемник, 5 - вилка, 6 - привод вилки вдоль оси x , 7 - привод вилки вдоль оси y .



линзы близко к дифракционному пределу. Аксикон можно выполнить также в виде кварцевого аксикона ^{/3/}, дифракционная эффективность которого в +1 порядке дифракции близка к 80%.

Эффект многих каналов просмотра может быть достигнут при помощи системы ^{/5/} /рис. 5/, в которой используются общий для всех каналов шаровой мезооптический объектив ^{/6,7/}, иммерсионный растр и шторка со сквозными отверстиями перед фотоприемником. Для наблюдения вертикальных следов частиц требуется многоканальная мезооптическая система, при помощи которой объект рассматривается в параллельных лучах света, как это имеет место в растре из аксиконов. Между тем шаровой мезооптический объектив формирует центральную проекцию элементов трехмерного объекта. При помощи иммерсионного раstra лучи света центрального проектирования преобразуются в совокупность параллельных лучей света. Иммерсионный растр содержит N^2 призм с

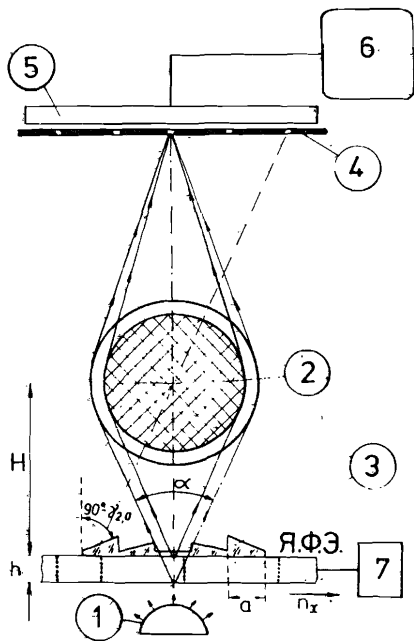


Рис. 5. Система наблюдения вертикальных следов частиц при помощи шарового мезооптического объектива: 1 - источник света, 2 - шаровой мезооптический объектив, 3 - иммерсионный растр, 4 - шторка с точечными отверстиями, 5 - фотоприемник, 6 - дисплей, 7 - система перемещения ядерной фотоэмульсии.

квадратными основаниями, где N - нечетное число, не меньше трех, а размеры квадратного основания каждой призмы выбраны равными

$$a = 2h \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad /3/$$

где α - угловая апертура шарового мезооптического объектива. Наружная грань каждой призмы

образует с оптической осью системы угол $90^\circ - \gamma$, где γ удовлетворяет уравнению

$$\sin [\operatorname{arc} \sin (n \sin \gamma) - \gamma] = \frac{a \sqrt{m_x^2 + m_y^2}}{\sqrt{a^2(m_x^2 + m_y^2) + H^2}} \quad /4/$$

n - показатель преломления материала призмы, H - расстояние от ядерной фотоэмульсии до центра шарового мезооптического объектива, а m_x и m_y - индексы нумерации отдельных призм иммерсионного растра вдоль осей x и y .

В тонкой шторке имеются сквозные отверстия, которые расположены в точках с координатами

$$\xi(m_x) = -\frac{L a m_x}{H}, \quad \eta(m_y) = -\frac{L a m_y}{H} \quad /5/$$

а L - расстояние от центра шарового мезооптического объектива до плоскости шторки. Диаметр d сквозных отверстий в тонкой шторке выбран из условия

$$d \geq \frac{L}{H} b, \quad /6/$$

где b - эффективный поперечный диаметр миниатюрного цилиндра, внутри которого находится вертикальный след частицы $/b = 2 \text{ мкм}/$. На рис. 6 показано взаимное расположение точечных отверстий в тонкой шторке, шарового мезооптического объектива и призмы иммерсионного растра. Система в целом является сканирующей, а не изображающей. При этом операцию сканирования ведут только в пределах площадки, занимаемой одной призмой иммерсионного растра. Координаты вертикального следа частицы определяют

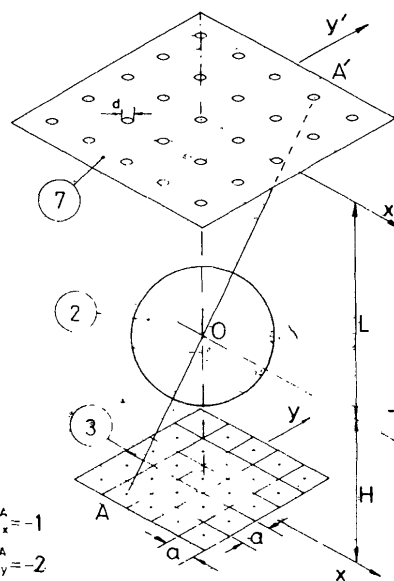


Рис. 6. Взаимное расположение призмы иммерсионного растра, шарового мезооптического объектива и шторки с точечными отверстиями.

ся координатами положения вилки, в которой укреплена контрольная пластинка, а также индексами сквозного отверстия в тонкой шторке, через которое прошли лучи света мезооптического изображения вертикального следа частицы. При сканировании площадки размером a^2 фактически выполняется сканирование участка контрольной пластины площадью $N^2 a^2$. Для $N = 9$ скорость просмотра в 81 раз больше, чем в одноканальной

системе. Описанный гнездовой алгоритм просмотра ядерной фотоэмульсии требует перемещения вилки в каждое новое положение с шагом Na . Ожидаемое быстродействие системы $/5/$ в 10^2 раз больше, чем в одноканальной мезооптической системе без сканирования по глубине, и в 10^3 раз больше, чем в традиционном оптическом микроскопе с перефокусировкой по глубине.

4. БОКОВЫЕ ЛЕПЕСТКИ ФУНКЦИИ РАЗМЫТИЯ ТОЧКИ В АКСИКОНЕ

Известно, что функция размытия точки оптической изображающей системы с кольцевой апертурой равна

$$h_1(r) = J_0(r), \quad /7/$$

где r - безразмерная радиальная координата - расстояние между точкой наблюдения и оптической осью системы, а J_0 - функция Бесселя нулевого порядка. Таким же свойством обладает оптический аксикон^{/4/}. Чтобы ослабить интенсивность боковых лепестков функции размытия точки и тем самым увеличить допустимую плотность следов в ядерной фотоэмульсии, используют двойной аксикон с двумя различными коническими поверхностями и двумя кольцевыми вырезами в шторке^{/8/} /рис. 7/. Два кольцевых аксикона формируют в области фокуса волновое поле, амплитуда которого равна

$$h_2(r) = J_0(r) + J_0(\gamma r), \quad /8/$$

где $\gamma < 1$. Если, например, $\gamma = 0,7$, то интенсивность боковых лепестков в функции размытия точки такой системы уменьшается в два раза по сравнению с одиночным аксиконом. При этом огибающая функции

$$I_2(r) = |h_2(r)|^2 \quad /9/$$

спадает с r быстрее, чем $1/r$. Это приводит к повышению динамического диапазона системы. Чтобы создать когерентное наложение полей от двух кольцевых аксиконов в системе^{/8/}, достаточно выполнить простые геометрические соотношения между углами $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, радиусами R_1, R_2, r_1, r_2 , а также расстояниями H и L .

Недостаток системы^{/8/} состоит в том, что при наложении двух волновых полей в области фокуса возникает продольная модуляция интенсивности света вдоль оси z . Это не является существенным препятствием для наблюдения верти-

Рис. 7. Мезооптический микроскоп с двойным аксиконом: 1 - система освещения, 2 - ядерная фотоэмульсия, 3 - двойной аксикон, 4 - точечный фотоприемник.

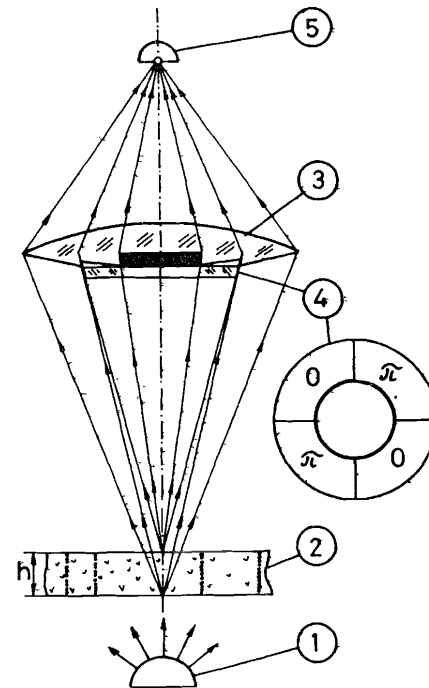
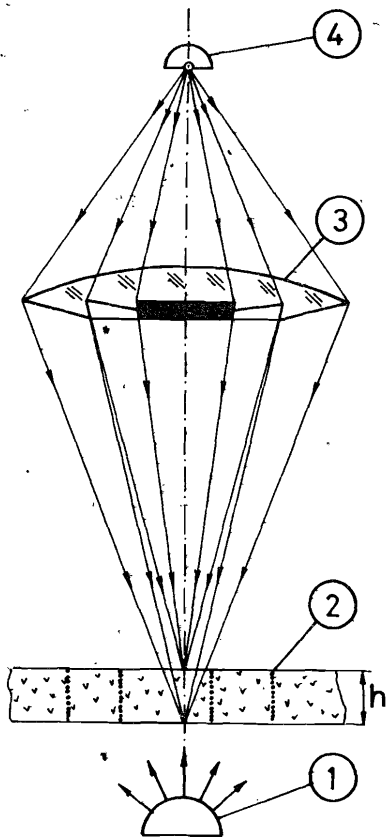


Рис. 8. Мезооптический микроскоп с фазовой пластиной: 1 - система освещения, 2 - ядерная фотоэмульсия, 3 - двойной аксикон, 4 - фазовая пластина, 5 - точечный фотоприемник.

кальных следов частиц, состоящих из 150 зерен серебра. Указанный недостаток можно тем не менее устранить и получить равномерную освещенность по глубине, если использовать фазовую пластину-диск^{/9/} /рис. 8/, которая состоит из нескольких равных секторов. Сдвиг фазы световой волны в каждом секторе равен $\frac{360^\circ}{N}(k-1)$, где N - полное число секторов, а k - порядковый номер сектора. Размер фазовой пластины таков, что лучи света, идущие от внешнего аксикона, ее не пересекают.

Таким методом равномерная модуляция интенсивности света по глубине в мезооптической изображающей системе, состоящей из двух аксиконов, полностью устраняется.

Чтобы дополнительно ослабить интенсивность боковых лепестков функции размытия точки в области фокуса, необходимо убрать резкие обрывы на краях апертуры каждого аксикона. Для этого вводят еще один, третий, аксикон и перед системой аксиконов устанавливают нейтральный фильтр с тремя кольцевыми зонами^{/10/} /рис. 9/. Изменение коэффициента пропускания света по кольце-

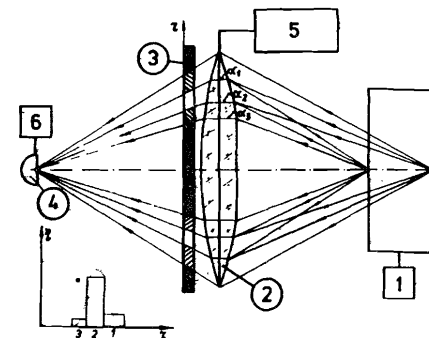


Рис. 9. Мезооптический микроскоп с тройным аксиконом и системой кольцевой аподизации: 1 - система освещения, 2 - ядерная фотоэмульсия, 3 - тройной аксикон, 4 - система кольцевой аподизации, 5 - точечный фотоприемник.

вым зонам соответствует дискретной версии функции Гаусса с максимумом на центральной зоне. При помощи такой кольцевой аподизации получают одновременно два положительных эффекта:

1/ огибающая боковых лепестков быстрее совпадает с радиусом и

2/ ослабляется контраст модуляции интенсивности света вдоль z -координаты, вызванный многолучевым распространением света.

Система приобретает высокий динамический диапазон.

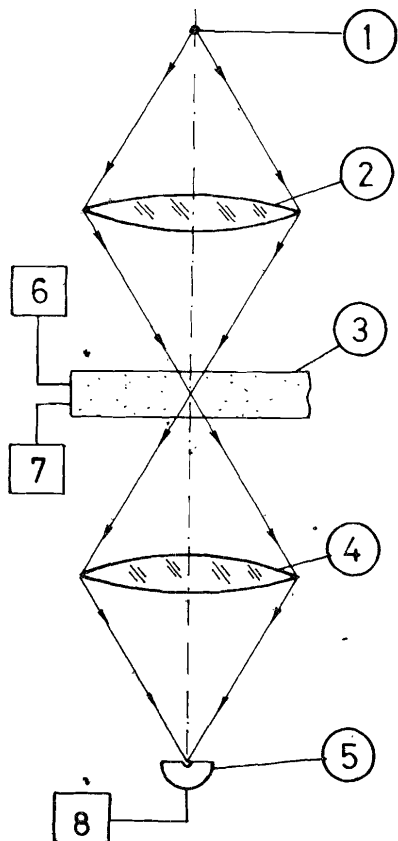
5. МЕЗООПТИЧЕСКИЙ КОНФОКАЛЬНЫЙ МИКРОСКОП

Традиционный оптический конфокальный микроскоп^{/11-14/} содержит два объектива: освещающий и изображающий, а также точечный фотоприемник /рис. 10/. Аксиальное сканирование вдоль оси z ведут на ультразвуковых частотах, а сканирование вдоль осей x и y - механическим перемещением объекта в плоскости, перпендикулярной оси конфокального микроскопа. Изображение-проекцию трехмерного объекта, например неплоского крыла насекомого, формируют на экране телевизионного монитора.

Функция размытия точки в конфокальном микроскопе равна произведению функций размытия точки каждого из двух объективов^{/12/}. Поэтому поперечные и продольные боковые лепестки

Функция размытия точки в конфокальном микроскопе равна произведению функций размытия точки каждого из двух объективов^{/12/}. Поэтому поперечные и продольные боковые лепестки

Рис. 10. Схема традиционного конфокального оптического микроскопа с трехмерным сканированием: 1 - точечный источник света, 2 - освещающий объектив, 3 - трехмерный объект, 4 - изображающий объектив, 5 - точечный фотоприемник, 6 - система аксиального сканирования, 7 - система поперечного сканирования, 8 - телевизионный монитор.



функции размытия точки конфокального микроскопа настолько слабы, что наложение многих частичных изображений с разными z можно производить в процессе аксиального сканирования.

В мезооптическом конфокальном микроскопе^{/15/} аксиальное сканирование вдоль оси z полностью устранено /рис. 11/. Каждый из двух объективов системы^{/15/} содержит традиционную линзу-коллиматор и систему из нескольких, например трех, аксиальных линз. Система^{/15/} имеет большую глубину резкости и достаточно слабые боковые лепестки в функции размытия точки. Чтобы сохранить топологию хода лучей света, характерную для конфокального микроскопа, необходимо выполнить условие конфокальности: лучи света, выходящие из каждого аксикона, должны быть взаимно параллельными в плоскости чертежа /см. рис. 11/.

Для того, чтобы внутри слоя ядерной фотоэмульсии толщиной h не возникала модуляция от многолучевого распространения света, геометрические размеры мезооптических линз должны быть достаточно большими, а ширина кольца отдельного кольцевого аксикона достаточно малой. На рис. 12 показан ход лучей света,

выходящих из точки, где соприкасаются два соседних кольцевых аксикона. Сущность процессов, которые здесь происходят, можно свести к двум леммам.

Лемма 1. Лучи света FO и GO, идущие из центров отрезков AB и BC к центру отрезка ED, являются таутохронными. Это следует из того факта, что в точке O интерференционная картина имеет максимум, а оптическая разность хода между указанными лучами света равна нулю.

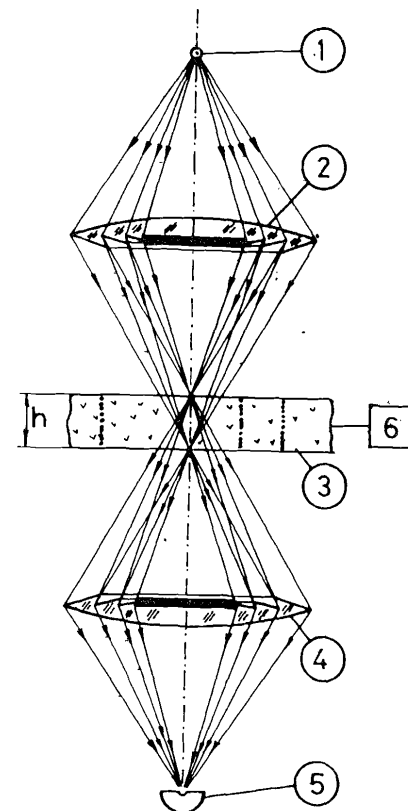


Рис. 11. Схема мезооптического конфокального микроскопа: 1 - точечный источник света, 2 - освещающий мезооптический объектив, 3 - ядерная фотоэмульсия, 4 - изображающий мезооптический объектив, 5 - точечный фотоприемник, 6 - система перемещения ядерной фотоэмульсии вдоль осей x и y /сканирование вдоль оси z отсутствует/.

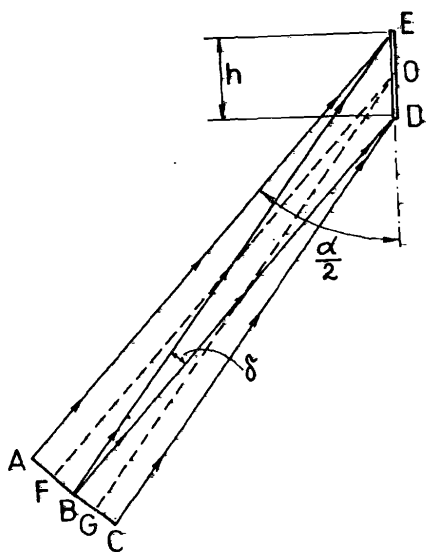


Рис. 12. Ход лучей света, выходящих из области соприкосновения двух соседних кольцевых аксиконов.

Лемма 2. Точки F и G лежат на общем сферическом волновом фронте. Это следует из того факта, что сферический волновой фронт представляет собой таутохронную поверхность, а точки F и G являются взаимно таутохронными.

Размеры образующих двух смежных аксиконов AB и BC, расположенных под углом $\alpha/2$ к оптической оси системы, равны:

$$AB \cong BC \cong h \sin \frac{\alpha}{2}. \quad /10/$$

В области слоя ядерной фотоэмульсии ED толщиной h два волновых фронта, идущие от аксиконов AB и BC, пересекаются под углом

$$\delta = \frac{AB}{BD} \cong \frac{h \sin \frac{\alpha}{2}}{BD}. \quad /11/$$

Для $h = 0,2$ мм, $\sin \frac{\alpha}{2} \approx 0,5$, $BD = 100$ мм, $\delta \approx 10^{-3}$ радиан. Шаг интерференционной картины в области полного пересечения рассматриваемых волновых фронтов равен

$$a = \frac{\lambda}{\delta} = \frac{0,63 \text{ мкм}}{10^{-3}} = 630 \text{ мкм}. \quad /12/$$

Это значит, что период картины модуляции от многолучевого пространства света в этих условиях превышает толщину ядерной фотоэмульсии. Требование на величину BD в общем случае сводится к неравенству

$$BD \cdot \lambda > h^2 \sin \frac{\alpha}{2}. \quad /13/$$

6. МЕЗООПТИЧЕСКИЙ КОНДЕНСОР

Эффективность наблюдения вертикальных следов частиц в ядерной фотоэмульсии можно дополнительно повысить, если устранить перемещение ядерной фотоэмульсии вдоль одного из направлений, например вдоль оси Y. Для этого в оптический микроскоп достаточно ввести мезооптический конденсор /рис. 13/. Основным его элементом является цилиндрическая линза с направляющей в виде многоугольника. Это - одномерный аналог аксиконной линзы со многими коническими поверхностями /см. рис. 11/.

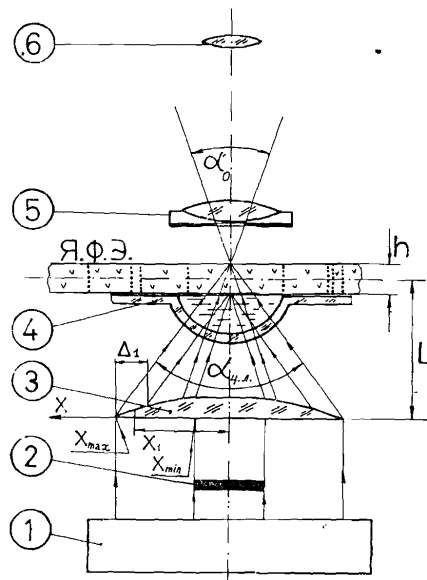


Рис. 13. Схема мезооптического конденсора: 1 - коллимированный пучок света, 2 - центральная шторка, 3 - мезооптическая цилиндрическая линза, 4 - иммерсионная ванна, Я.Ф.Э. - ядерная фотоэмульсия, 5 - объектив, 6 - окуляр.

Чтобы пояснить принцип действия мезооптического конденсора, который формирует узкую сильно освещенную область на всю глубину ядерной фотоэмульсии, рассмотрим сначала традиционную безаберрационную цилиндрическую линзу. Разобьем поверхность волнового фронта на выходе такой линзы на систему узких взаимно параллельных плоскостей, попарно расположенных по обе стороны от плоскости симметрии цилиндрической линзы. В области пересечения двух узких плоских пучков света возникнет интерференционная картина, участки с максимальной интенсивностью света в которой образуют эквидистантные плоскости с шагом

$$d = \frac{\lambda}{\theta}, \quad /14/$$

где θ - угол между указанными двумя узкими плоскими пучками света. Каждая пара плоских пучков света образует свою систему интерференционных картин со своим шагом, однако центральные плоскости всех интерференционных картин совпадают, образуя ярко освещенную линию.

Иначе обстоит дело в мезооптическом конденсоре. Здесь каждый плоский пучок света, имеющий макроскопическую ширину, касается цилиндрического волнового фронта безабберационной цилиндрической линзы. Если высота каждого элементарного плоского пучка света Δ на расстоянии x от плоскости симметрии мезооптического конденсора равна

$$\Delta = x \frac{h}{L}, \quad /15/$$

где h - толщина слоя ядерной фотозмульсии, а L - расстояние от ядерной фотозмульсии до мезооптического конденсора, то поперечный размер сильно освещенной области, имеющей вид параллелепипеда "забора", равен по порядку величины $\lambda/a_{\text{эф}}$, где $a_{\text{эф}}$ - эффективная апертура мезооптического конденсора /рис.14/. Оценим величину $a_{\text{эф}}$ для системы со следующими характеристиками: ширина мезооптического конденсора 60 мм, фокусное расстояние 100 мм, полная апертура $a_t = 0,58$ радиан. Пространственное разрешение традиционной цилиндрической линзы с такими геометрическими параметрами:

$$\Delta x_{\text{трад}} = \frac{\lambda}{a_t} = \frac{0,63 \text{ мкм}}{0,58} \approx 1 \text{ мкм}, \quad /16/$$

а глубина резкости

$$\Delta z_{\text{трад}} = 2 \frac{\lambda}{a_t^2} \approx 4 \text{ мкм}. \quad /17/$$

Между тем требуемая глубина резкости $L = h = 200$ мкм в 50 раз больше $\Delta z_{\text{трад}}$. Чтобы получить глубину резкости 200 мкм в традиционной цилиндрической линзе, ее апертуру необходимо уменьшить до

$$a_1 = \sqrt{\frac{2\lambda}{h}} = 0,08 \text{ радиан}. \quad /18/$$

Это приведет к ухудшению пространственного разрешения традиционной цилиндрической линзы до

$$\Delta x_1 = \frac{0,63 \text{ мкм}}{0,08} = 8 \text{ мкм}. \quad /19/$$

Покажем, что эффективная апертура мезооптического конденсора равна $a_{\text{эф}} = 0,33$ радиана, а пространственное разрешение $\Delta x_{\text{эф}} = 2$ мкм. Различие между a_t и $a_{\text{эф}}$ в мезооптическом конденсоре вызвано тем, что свет, идущий от крайнего плоского пучка света, фокусируется на толщине 200 мкм, а не 4 мкм, как в традиционной цилиндрической линзе. Это приводит к неэффективному использованию света на крайних участках мезооптического конденсора.

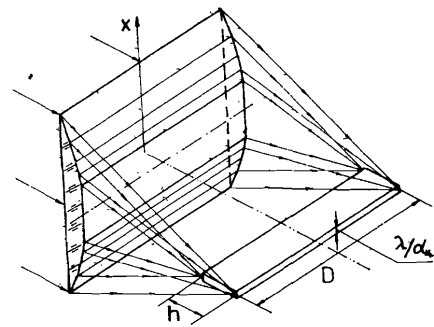


Рис. 14. Вид ярко освещенной области, формируемой мезооптическим конденсором.

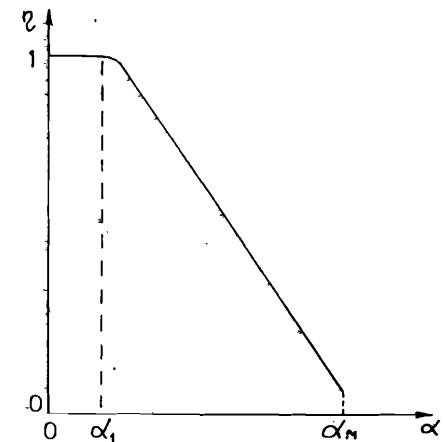


Рис. 15. Зависимость коэффициента использования света η в мезооптическом конденсоре в зависимости от апертуры.

На рис. 15 приведена зависимость коэффициента использования света η в мезооптическом конденсоре с образующей в форме многоугольника от апертуры a . В интервале $0 < a < a_1 = 0,08$ радиан указанная эффективность принята за единицу, а при $a = a_t = 0,58$ радиан $\eta = 4 \text{ мкм}/200 \text{ мкм} = 1/50$. Поэтому эффективная апертура мезооптического конденсора

$$a_{\text{эф}} = a_1 + \frac{a_t - a_1}{2} = 0,08 + \frac{0,58 - 0,08}{2} = 0,33 \text{ радиан}, \quad /20/$$

а пространственное разрешение мезооптического конденсора с образующей в форме многоугольника

$$\Delta x_{\text{эф}} = \frac{\lambda}{a_{\text{эф}}} = \frac{0,63}{0,33} \approx 2 \text{ мкм}. \quad /21/$$

Когда вертикальный след частицы попадает в сильно освещенную область сканирования шириной 2 мкм, он освещается равномерно на всю длину, равную толщине слоя ядерной фотозмульсии. Рассеянный свет собирается со всей толщины ядерной фотозмульсии, если апертура микроскопа равна или меньше a_1 из уравнения /18/. Несмотря на то, что разрешение объектива с такой апертурой равно или больше 5 мкм, эффективная разрешающая способность всей системы в целом определяется $\Delta x_{\text{эф}}$ из уравнения /21/. Чтобы оценить координату вертикального следа частицы вдоль ярко освещенной области, ее изображение, формируемое микроскопом, сканируют при помощи одномерного фотоприем-

ника, например линейки прибора с зарядовой связью /ПЗС/ с числом элементов $N \approx 250$. Погрешность в оценке указанной координаты составит около 5 мкм.

Оценку координат x , y вертикального следа частицы можно сделать также при помощи алгоритма, заимствованного из реконструктивной томографии^{/17/}. С этой целью сканирование ядерной фотоэмульсии при помощи мезооптического конденсора ведут дважды, оба раза вдоль оси x , но при различных положениях ярко освещенной области относительно направления сканирования /оси x /. Если указанные углы равны $+45^\circ$ при первом сканировании и -45° при втором, то координаты вертикального следа частицы x и y определяют из соотношений

$$2x = x_1 + x_2,$$

$$2y = x_1 - x_2,$$

/22/

где x_1 и x_2 - координаты положения ядерной фотоэмульсии в моменты времени, когда вертикальный след частицы попал в сильно освещенную область. Если в поле зрения системы одновременно попадают несколько вертикальных следов частиц, например $N > 2$, то число различных ориентаций сильно освещенной области необходимо увеличить с 2 до $2N$ либо соответствующим образом уменьшить диаметр поля зрения системы, равный ширине полосы сканирования.

Оценим ожидаемое быстродействие системы, работающей по томографическому алгоритму. Когда вертикальный след частицы попадает в ярко освещенную область, в фотоприемнике возникает импульс фототока длительностью

$$\tau = \frac{2 \text{ мкм}}{v},$$

/23/

где v - скорость сканирования. Если постоянную времени RC цепочки на выходе одноканального фотоприемника согласовать с тактовой частотой считывания данных ν :

$$\nu = \frac{1}{RC} = 0,5 \text{ MHz},$$

/24/

то предельная скорость безостановочного перемещения ядерной фотоэмульсии составит $v_{\text{пред}} = 10^8$ мм/с. В реальном устройстве скорость v может быть сделана в $10 \div 20$ раз меньше, например $v = 50$ мм/с. Поэтому ожидаемая скорость просмотра ядерной фотоэмульсии с целью поиска вертикальных следов частиц и измерения их координат составит 50 мм²/с при ширине области сканирования $D = 2$ мм с учетом двухкратного прохождения каждого учас-

тка ядерной фотоэмульсии. Это в $1,4 \cdot 10^4$ раз больше скорости ручного просмотра, не превышающей $3,5 \cdot 10^{-3}$ мм²/с.

7. ВЫВОД

Показано, что быстродействие мезооптических систем, специально предназначенных для поиска и измерения координат вертикальных следов релятивистских частиц в ядерной фотоэмульсии контрольной пластины, в $10^2 - 10^4$ раз превышает быстродействие традиционных оптических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fujioka G. et al. - Mem.Grad.School Sci. and Technol., Kobe Univ., 1984, Vol.2-B, p.1-14.
2. Котлецов Б.Н. Микроизображения: оптические методы получения и контроля. Л.: Машиностроение, 1985. - 240 с. /см. с. 68/.
3. Mikhaltsova I.A. et al. - Optik, 1984, Vol.67, p.267-278.
4. Сороко Л.М., Суетин В.А. А.с. 960719 /СССР/. - Опубликовано в ОИ, 1982, № 35, с.182.
5. Сороко Л.М. А.с. 1234796 /СССР/. - Опубликовано в ОИ, 1986, № 20, с.203.
6. Сороко Л.М. - В кн.: Методы и устройства оптической голографии. Л.: ЛИЯФ, 1983, с.189-205.
7. Сороко Л.М. Сообщение ОИЯИ, Д1-82-642, Дубна, 1982.
8. Сороко Л.М. А.с. 1116864 /СССР/. - Опубликовано в ОИ, 1985, № 19, с.243.
9. Сороко Л.М. А.с. 1251015 /СССР/. - Опубликовано в ОИ, 1986, № 30, с.182.
10. Сороко Л.М. А.с. 1155092 /СССР/. - Опубликовано в ОИ, 1986, № 15, с.280.
11. Sheppard C.J.R., Choundhury A. - Optica Acta, 1977, Vol.24, p.1051-1073.
12. Sheppard C.J.R., Hamilton D.K., Cox I.J. - Proc.Roy.Soc., London, 1983, Vol.A387, p.171-186.
13. Wilson T., Sheppard C.J.R. Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy, London, Academic Press, 1984.
14. Wilson T. - Applied Optics, 1981, Vol.20, p.3238-3244.

15. Сороко Л.М. А.с. 1183934 /СССР/. - Опубликовано в ОИ, 1985, № 37, с.191.
 16. Сороко Л.М. А.с. 1273861 /СССР/. - Опубликовано в ОИ, 1986, № 44, с.180.
 17. Сороко Л.М. Интроскопия. М.: Энергоатомиздат, 1983.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р.55 к.
Д2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р.00 к.
Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р.50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р.30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р.50 к.
Д10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983.	3 р.50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р.75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.00 к.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р.80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р.75 к.
Д3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986.	4 р.50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. /2 тома/	13 р.50 к.
Д1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. /2 тома/	7 р.35 к.
Д9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. /2 тома/	13 р.45 к.
Д7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986	7 р.10 к.
Д2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа-86". Дубна, 1986	4 р.45 к.

Рукопись поступила в издательский отдел
 23 июля 1987 года.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного
 института ядерных исследований.

ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Сороко Л.М.

P13-87-576

Мезооптические микроскопы для наблюдения вертикальных следов частиц в ядерной фотоэмульсии

Изложены конструкция и принцип действия мезооптических микроскопов, предназначенных для наблюдения вертикальных следов частиц в ядерной фотоэмульсии. Сопоставлены эффективности традиционного оптического микроскопа, традиционного конфокального микроскопа, мезооптического конфокального микроскопа, а также мезооптического конденсора при поиске и определении координат вертикальных следов частиц в ядерной фотоэмульсии. Показано, что мезооптические системы обладают быстродействием, которое на несколько порядков величин выше, чем у традиционных оптических систем.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод автора

Soroko L.M.

P13-87-576

Mesoptical Microscopes for Observation of the Vertical Particle Tracks in Nuclear Emulsion

The design and the operation principle of the mesoptical microscopes intended for observation of the vertical particle tracks in nuclear emulsion are described. Efficiencies of a traditional optical microscope, a traditional confocal microscope, a mesoptical confocal microscope as well as of a mesoptical condensor in finding and estimating coordinates of vertical particle tracks in nuclear emulsion are compared. The mesoptical systems are shown to be several orders of magnitude faster than the traditional optical systems.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987