

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P13-85-137

Д. Бенце, Л. М. Сороко

**АЛГОРИТМЫ ПОИСКА СОБЫТИЙ
В МЕЗООПТИЧЕСКОМ ФУРЬЕ-МИКРОСКОПЕ
ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ФОТОЗМУЛЬСИИ**

1985

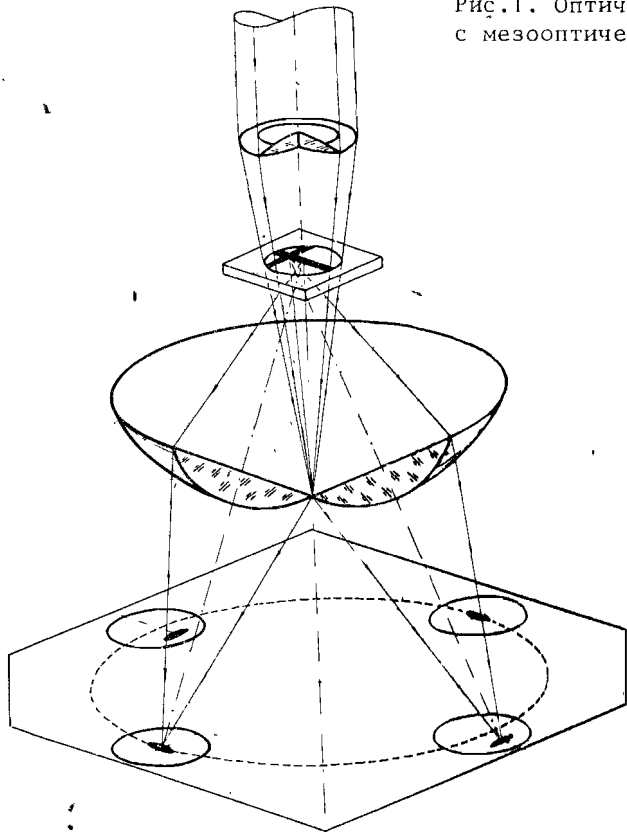
ВВЕДЕНИЕ

Конструкция и принцип действия мезооптического фурье-микроскопа /МФМ/ для ядерной фотоэмульсии изложены в ^{1/}. В ^{1-4/} описаны моделирующие эксперименты и компьютерные расчеты, которые дополнительно подтверждают реальную эффективность МФМ и преимущества МФМ над традиционным оптическим микроскопом. Эти исследования были использованы в ^{5/} для создания экспериментального прототипа МФМ. Прототип МФМ содержит оптическую часть, фотоэлектрическое устройство для считывания оптической информации, каретки с электромеханическим приводом для перемещения слоя ядерной фотоэмульсии и систему отсчета положения этого слоя. В ^{6/} приведены результаты первых исследований с тест-объектами и даны метрические характеристики этого прототипа МФМ. Детальный анализ оптической части и общая теория даны в ^{7/}, где была рассмотрена микроструктура оптических сигналов на выходе МФМ. В ^{7/} описаны также некоторые эксперименты по улучшению метрических характеристик и по наблюдению следов частиц в реальных ядерных фотоэмульсиях. В ^{7/} изложены электронная часть МФМ и алгоритмы программ управления и считывания выходной информации.

Мезооптический фурье-микроскоп /МФМ/ представляет собой один из примеров устройств, в которых используют мезооптические элементы. Термин "мезооптика", введенный в ^{8/}, охватывает класс оптических изображающих систем, преобразующих заданный объект в изображение более высокой пространственной размерности. В дан обзор возможных применений мезооптических устройств в экспериментальной физике высоких энергий и принцип построения алгоритмов поиска событий в МФМ. Концентрация геометрической информации о прямых следах частиц в малые световые пятна на выходе МФМ является тем свойством МФМ, которое открывает новые возможности увеличения скорости просмотра ядерной фотоэмульсии и поиска ядерных взаимодействий /"событий"/. Если следы частиц выходят из общего центра /апекса/, то выходные сигналы МФМ ложатся на синопграмму. Если этот апекс находится вне поля зрения МФМ, то соответствующие выходные сигналы лежат практически на прямой линии. В ^{9/} было отмечено, что в МФМ полностью решена проблема глубины фокуса, присущая традиционным оптическим микроскопам.

В данной работе подробно описана связь между положением прямого следа частицы в пространстве в ядерной фотоэмульсии и вы-

Рис.1. Оптическая схема МФМ с мезооптической линзой.



ходными сигналами МФМ, а также рассмотрен алгоритм поиска событий по выходным сигналам МФМ.

1. СВЯЗЬ МЕЖДУ ПОЛОЖЕНИЕМ СЛЕДА ЧАСТИЦЫ В ПРОСТРАНСТВЕ И ВЫХОДНЫМИ СИГНАЛАМИ МФМ

На рис.1 дана оптическая схема мезооптического фурье-микроскопа. Как было объяснено в ¹⁻⁷, прямой след частицы, находящейся в поле зрения МФМ, преобразуется в два световых пятна, которые находятся в выходной плоскости МФМ на линии, перпендикулярной направлению следа частицы. Эти два световых пятна являются выходными сигналами следа частицы в МФМ. В положениях выходных сигналов действительно содержится полная геометрическая информация об отрезке прямого следа частицы. Геометрическое место всех выходных сигналов имеет вид кольца шириной DM и сред-

него радиуса R , где D - диаметр поля зрения МФМ, M - коэффициент линейного увеличения МФМ, а R - радиус фокальной окружности, представляющей собой мезооптическое изображение точечного отверстия, помещенного на оптической оси МФМ в медианной плоскости слоя ядерной фотоэмульсии /плоскость $z=0$ /.

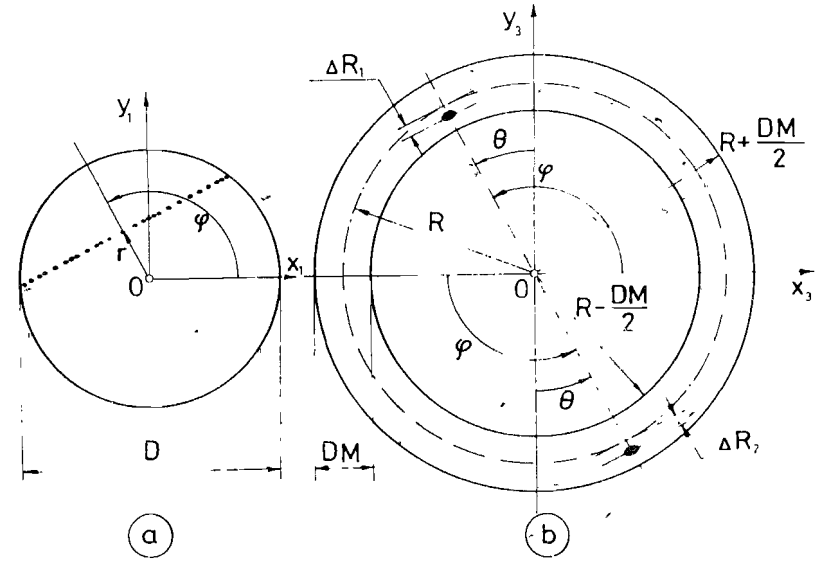


Рис.2. Система координат для входной /а/ и выходной /б/ плоскостей МФМ.

Чтобы найти связь между положением следа частицы и выходными сигналами МФМ, введем системы координат, показанные на рис.2. В соответствии с ⁷ используем декартовы системы координат входной (x_1, y_1) и выходной (x_3, y_3) плоскостей, которые перпендикулярны оптической оси МФМ, при этом оси Ox_1 и Ox_3 взаимно параллельны и имеют одно и то же направление. Для входной плоскости введем полярную систему координат (r, ϕ) /рис.2а/:

$$\left. \begin{aligned} r &= \sqrt{x_1^2 + y_1^2}, \\ \phi &= \arctg(y_1 / x_1) \end{aligned} \right\} \quad /1/$$

Фокальное кольцо и два выходных сигнала, которые соответствуют следу частицы, показанному на рис.2а, приведены на рис.2б. Введем собственную систему координат для двух полуплоскостей $y_3 > 0$ и $y_3 < 0$ и обозначения

$$\rho_1 = \Delta R_1 / M, \quad \rho_2 = \Delta R_2 / M, \quad /2/$$

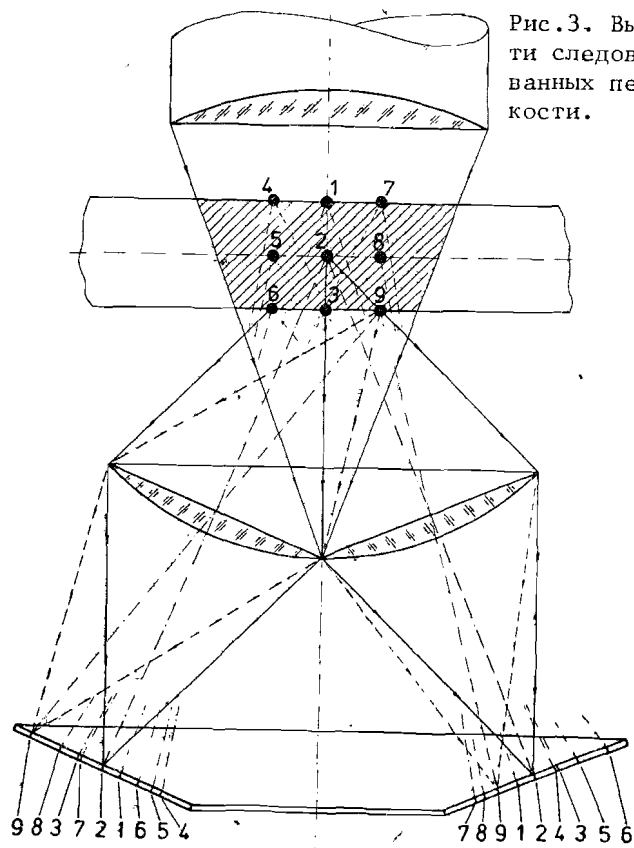


Рис.3. Выходные сигналы девяти следов частиц, ориентированных перпендикулярно плоскости.

где ΔR_1 и ΔR_2 положительны, если выходные сигналы находятся вне центральной фокальной окружности.

Поперечный разрез МФМ приведен на рис.3, где даны девять следов частиц, перпендикулярных плоскости рисунка. В нашей конструкции МФМ приемное фотозлектронное устройство расположено перпендикулярно падающему на него свету, и поэтому выходное кольцо не является плоским, а имеет форму усеченного конуса.

В меридиональном поперечном сечении МФМ можно рассматривать как оптическую изображающую систему с двойной дифракцией Фурье и полной угловой апертурой $2\alpha_{1/2}$. Пусть ось z направлена вниз вдоль главной оптической оси МФМ, а медианная плоскость в слое ядерной фотоэмульсии совпадает с плоскостью $z=0$. На рис.3 показаны также центры выходных сигналов, соответствующие следам частиц от "1" до "9".

След частицы "2" находится в плоскости $z=0$ и пересекает центр поля зрения при $r=0$. Выходные сигналы следа частицы "2" находятся на окружности радиуса R при $\rho_1=\rho_2=0$. Как видно из рис.3, вертикальное и/или горизонтальное смещения следов частиц создают смещение соответствующих пар выходных сигналов в плоскостях их регистрации по обе стороны от главной оптической оси МФМ. При трассировке лучей света необходимо учесть преломление лучей света, выходящих из слоя ядерной фотоэмульсии. Однако в этой статье мы пренебрегаем этими эффектами, так как они могут быть исключены или в значительной степени ослаблены при помощи большой иммерсионной ванны со сферической поверхностью, установленной под слоем эмульсии.

Из простых геометрических рассуждений можно построить связь между входной $/r, \phi, z/$ и выходной $/\rho_1, \rho_2, \theta/$ системами координат:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= z \sin \alpha_{1/2} - r \operatorname{sgn}(\pi - \phi) \cos \alpha_{1/2}, \\ \rho_2 &= z \sin \alpha_{1/2} + r \operatorname{sgn}(\pi - \phi) \cos \alpha_{1/2}, \\ \theta &= \begin{cases} \phi - \pi/2, & \phi < \pi, \\ \phi + \pi/2, & \phi > \pi, \end{cases} \quad -\pi/2 < \theta < \pi/2. \end{aligned} \right\} /3/$$

и

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{|\rho_2 - \rho_1|}{2 \cos \alpha_{1/2}}, \\ z &= \frac{\rho_1 + \rho_2}{2 \sin \alpha_{1/2}}, \\ \phi &= \begin{cases} \theta - \pi/2, & \rho_1 < \rho_2, \\ \theta + \pi/2, & \rho_1 > \rho_2, \end{cases} \quad 0 < \phi < 2\pi \end{aligned} \right\} /4/$$

где $\operatorname{sgn}(x)$ - знаковая функция, которая появляется в уравнении /3/ и /4/ из-за того, что для $\phi > \pi$ горизонтальное смещение в поперечном разрезе имеет отрицательный знак. Величины θ , ΔR_1 и ΔR_2 измеряются в МФМ непосредственно. Полная информация о положении следа частицы в пространстве может быть получена по этим величинам при помощи уравнений /3/ и /4/. Угол погружения следа частицы может быть оценен по двум или большим значениям z -координаты одного и того же следа частицы в соседних полях зрения. Следы частиц с очень большим углом погружения $/>60^\circ/$ не могут быть зарегистрированы в МФМ.

В случае, когда два или больше следов частиц взаимно параллельны, может возникнуть очевидная неоднозначность интерпретации данных. Чтобы различить реальные от ложных следов частиц на стадии реконструкции, необходимо использовать дополнительную информацию и произвести соответствующую обработку сигналов. Однако МФМ имеет высокое угловое разрешение и поэтому вероятность таких случаев весьма мала. Так как в нашей конструкции МФМ $\alpha_{1,2} \approx 15^\circ$, разрешение по глубине примерно в 4 раза хуже, чем разрешение в горизонтальном направлении /рис.3/. Важно отметить, что благодаря фундаментальным свойствам МФМ z-координата следа частицы оценивается непосредственно без какого-либо перемещения слоя ядерной фотоэмульсии по глубине, как это имеет место в традиционном оптическом микроскопе.

2. АЛГОРИТМ ПОИСКА СОБЫТИЙ ПО ВЫХОДНЫМ СИГНАЛАМ МФМ

Как было показано в § 1, положение следа частицы в пространстве может быть восстановлено непосредственно по выходным сигналам МФМ. Однако эти данные являются первичными, а сам процесс восстановления положения прямого следа в пространстве может быть опущен. Главная цель МФМ состоит в том, чтобы обнаружить ядерные взаимодействия /"события"/ из нескольких следов частиц, выходящих из общей вершины. Как будет доказано ниже, координаты этой вершины могут быть найдены непосредственно по выходным сигналам МФМ без какого-либо восстановления в трехмерном пространстве всех следов частиц, принадлежащих или не принадлежащих соответствующему событию. Чтобы объяснить это важное свойство МФМ, введем систему координат $\{\theta, \rho\}$, показанную на рис.4. При отображении выходных сигналов МФМ для ядерной фотоэмульсии, используется формат $\{\theta, \rho\}$, где

$$\rho = \frac{\rho_2 - \rho_1}{2 \cos \alpha_{1,2}} = r \operatorname{sgn}(\rho_2 - \rho_1). \quad (5)$$

Система координат $\{\theta, \rho\}$ содержит полную информацию о проекции следов частиц на плоскость $z=0$ в пределах поля зрения МФМ.

Топологическое свойство следов частиц, выходящих из одной вершины, сохраняется для любой проекции этого события. Вершина события, най-

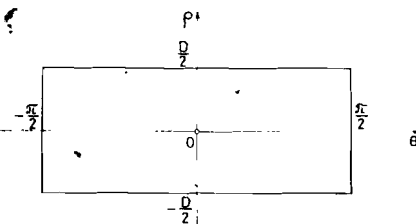


Рис.4. Декартова система координат $\{\theta, \rho\}$, используемая для отображения выходных сигналов МФМ.

денная для двух различных проекций, может рассматриваться как реальный кандидат события в трехмерном пространстве.

Это свойства МФМ станет более ясным, если мы рассмотрим некоторые примеры событий и конфигурации их выходных сигналов в формате $\{\theta, \rho\}$. Одна из таких конфигураций выходных сигналов для четырех следов частиц показана на рис.5а. Следы частиц "1" - "4" видны на традиционном изображении на рис.5б как взаимно параллельные. Поэтому их выходные сигналы имеют один и тот же угол ориентации θ . Радиальные координаты частиц "2" и "3" равны нулю, так как эти следы частиц пересекают центр поля зрения. Разрешения по θ и ρ координатам равны $\Delta\theta$ и $\Delta\rho$, соответственно.

Наглядное объяснение этого свойства МФМ может быть достигнуто, если мы рассмотрим четыре конфигурации следов частиц в поле зрения, показанные на рис.6. Первая /верхняя/ конфигурация содержит три следа частиц, которые можно рассматривать как следы первичного пучка частиц. Выходные сигналы имеют одну и ту же угловую координату, но различные радиальные координаты. Вторая конфигурация содержит четыре следа частиц, три из которых взаимно параллельны. Соответствующие выходные сигналы МФМ находятся при одной и той же угловой координате один над другим. На третьей конфигурации мы видим событие. След первичной частицы "1" взаимодействует в ядерной фотоэмульсии с испусканием двух

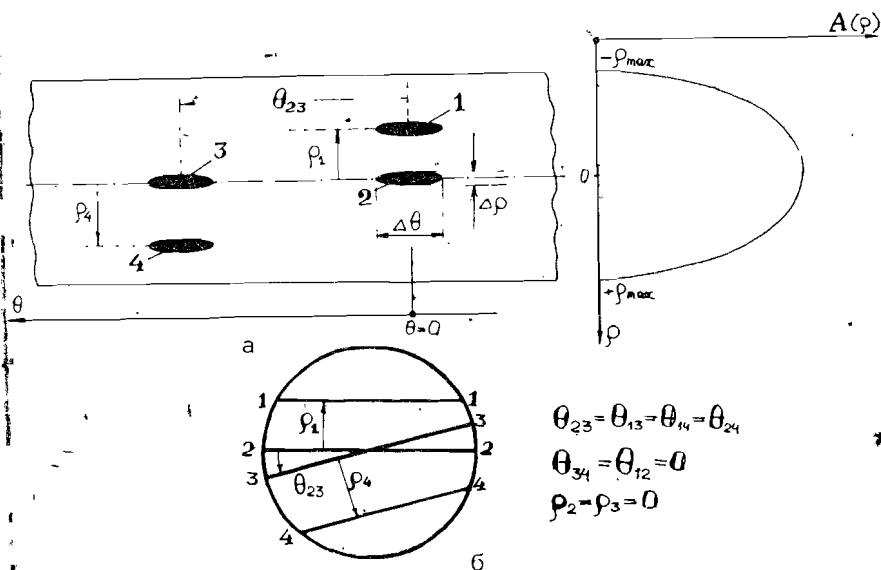


Рис 5. а - выходные сигналы МФМ в формате $\{\theta, \rho\}$, соответствующие четырем следам частиц, показанным на рисунке б.

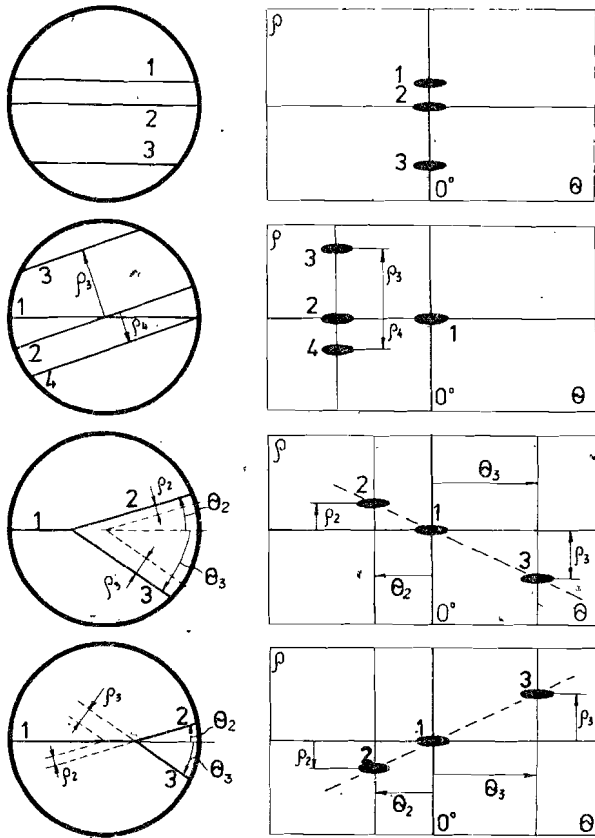


Рис.6. Четыре типичные конфигурации следов частиц /слева/ и их выходные сигналы в формате θ, ρ /справа/.

вторичных частиц. Такое событие называют "вилкой". Третья конфигурация переходит в четвертую после горизонтального смещения поля зрения в новое положение с новыми координатами ρ в формате (θ, ρ) .

Нетрудно доказать, что выходные сигналы следов частиц, образующих событие, ложатся на синограмму - кривую в форме синусоиды. Заключение это верно также в случае, когда вершина находится вне поля зрения или за пределами слоя ядерной фотоэмульсии. Для этого рассмотрим входную плоскость с декартовыми координатами x_1, y_1 или полярными координатами r, ϕ рис.7. Пусть координаты вершины равны x_0, y_0 или r_0, ϕ_0 . Вектор

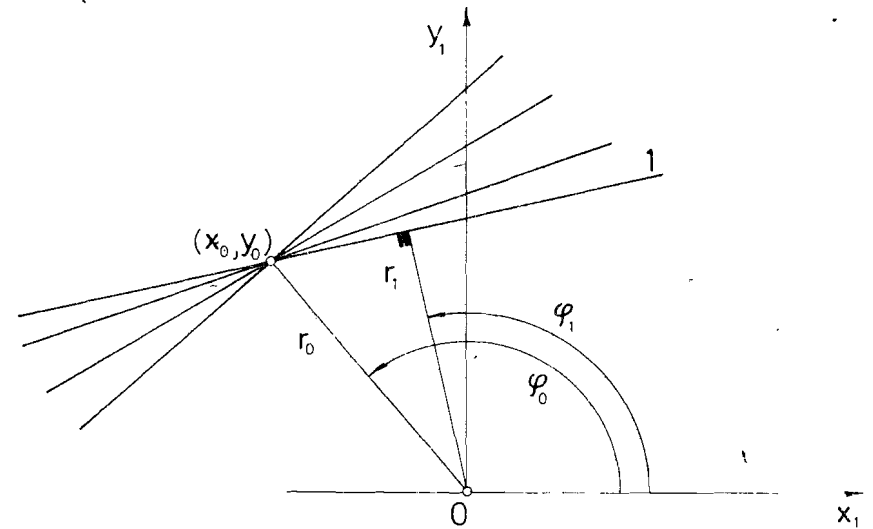


Рис.7. Вектор прямых линий в системе координат (x_1, y_1) или (r, ϕ) .

прямых линий, которые проходят через вершину (x_0, y_0) , может быть описан уравнением

$$x_0 \cos \phi + y_0 \sin \phi - r = 0, \quad /6/$$

или в иной форме, как

$$\left. \begin{aligned} r &= r_0 \cos(\phi_0 - \phi), \\ 0 \leq r_0 \leq \infty, \quad -\pi/2 \leq \phi_0 - \phi \leq \pi/2. \end{aligned} \right\} /7/$$

В формате (θ, ρ) соответствующее уравнение вектора прямых линий имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \rho_0 \cos(\theta_0 - \theta), \\ -\infty \leq \rho_0 \leq \infty, \quad 0 \leq \theta_0 \leq \pi, \end{aligned} \right\} /8/$$

где (θ_0, ρ_0) - координаты точки, общей для всех прямых линий вектора в формате (θ, ϕ) .

В определенных экспериментальных условиях следы вторичных частиц заполняют только часть всего углового интервала θ и

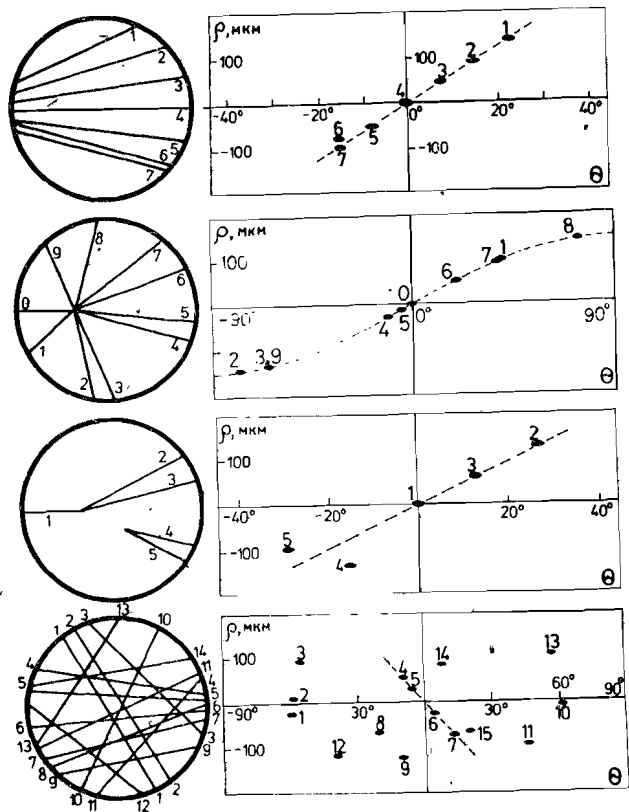


Рис.8. Четыре типичных случая, наблюдаемых в ядерной фото-эмульсии /слева/, и соответствующие им синогаммы /справа/.

сконцентрированы в малом угловом интервале вокруг угла $\theta = 0$. Благодаря этому расстояние между вершиной и центром поля зрения может быть большим по сравнению с диаметром поля зрения. В этом случае уравнение /8/ переходит в более простое.

Пусть событие содержит n следов частиц с углами рассеяния δ_i , $i = 1, 2, \dots, n$ и со средним углом $\bar{\theta}$. Тогда мы имеем

$$\begin{aligned} \rho_i &= \rho_0 \cos[\theta_0 - (\bar{\theta} - \delta_i)] = \\ &= \rho_0 [\cos(\theta_0 - \bar{\theta}) \cos \delta_i + \sin(\theta_0 - \bar{\theta}) \sin \delta_i]. \end{aligned} \quad /9/$$

Если выполняется условие

$$\max \{\delta_i\} < \Delta\theta \cdot 3!, \quad /10/$$

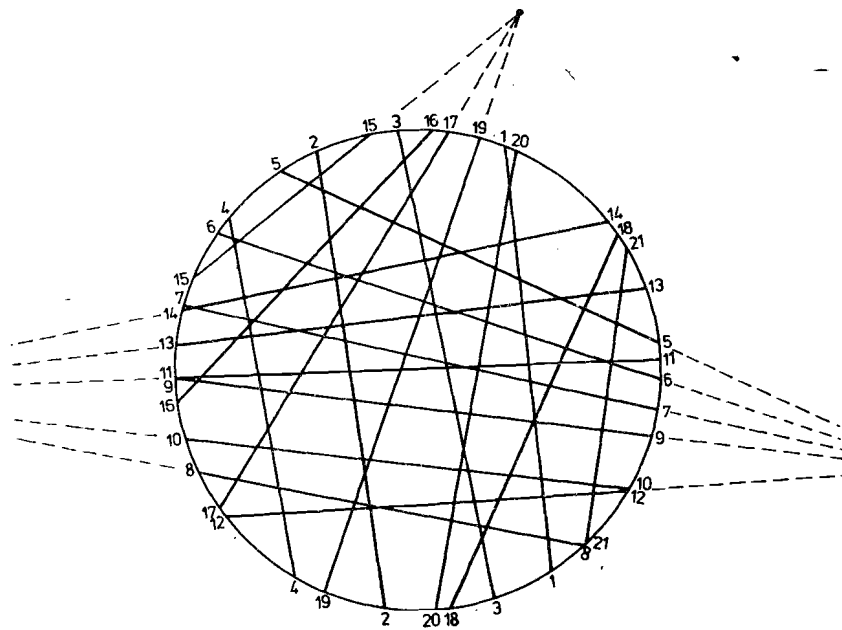


Рис.9. Сложная конфигурация из 20 следов частиц, где только 13 образуют события.

где $\Delta\theta$ - угловое разрешение МФМ, то

$$\rho_i \approx \rho_0 \cos(\theta_0 - \bar{\theta}) + \rho_0 \sin(\theta_0 - \bar{\theta}) \cdot \delta_i. \quad /11/$$

Из уравнения /11/ видно, что выходные сигналы следов частиц, выходящих из вершины под малыми углами, лежат на прямой линии. Для $\Delta\theta \approx 5^\circ$ уравнение /11/ будет справедливым в пределах углового конуса следов частиц порядка 20° .

Чтобы проиллюстрировать только что полученные уравнения /8/ и /11/, рассмотрим четыре события, представленные на рис.8. Первый /верхний/ пример содержит семь прямых следов частиц. Только шесть из них выходят из общей вершины, лежащей за пределами поля зрения. Седьмой след частицы не связан с событием. Все эти характеристики легко обнаруживаются на θ, ρ -графике. Сигналы следов частиц, которые образуют событие, лежат на прямой линии. Во втором примере вершина находится вблизи центра поля зрения. Выходные сигналы девяти следов вторичных частиц и одного следа первичной частицы лежат на синогамме. Третий пример является более сложным. Два события связаны нейтральной частицей. Выходные сигналы следов частиц события лежат практически на прямой линии, так как их углы рассеяния малы. Два сле-

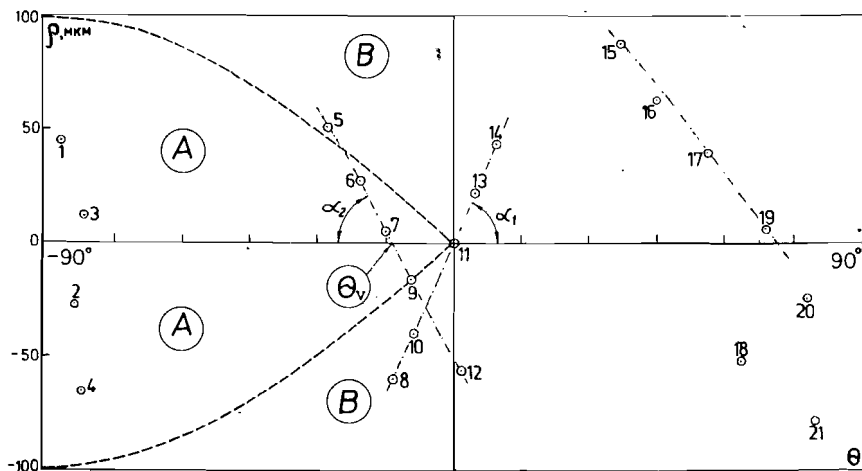


Рис.10. Выходные сигналы 20 следов частиц, показанных на рис.9, в формате (θ, ρ) .

да частицы, возникающие при распаде нейтральной частицы, располагаются вне этой прямой линии. Последний пример демонстрирует высокую помехоустойчивость МФМ к шумам. Событие из следов частиц "4", "5", "6", "7" может быть обнаружено на фоне из 15 следов частиц. Еще более сложная конфигурация из 20 следов частиц приведена на рис.9. Из них только 13 следов частиц образуют три события. Выходные сигналы для этого примера показаны на рис.10.

Используя это свойство выходных сигналов МФМ и учитывая специфические особенности ядерных взаимодействий, мы можем построить программы и аппаратуру для решения обратной задачи: по совокупности выходных сигналов найти события и определить координаты вершин (θ_0, ρ_0) . В случае малых углов рассеяния мы можем использовать алгоритм углового сканирования на основе собственных функций углового сканирования¹⁰.

Выходные сигналы, представленные в формате (θ, ρ) , соответствуют только одной проекции события на плоскость $z = 0$. Поэтому найденные таким образом координаты вершины следует рассматривать только как соответствующие кандидату события. Чтобы получить дополнительную информацию об этом событии, мы должны изменить направление линии проектирования и таким образом использовать стереоскопический мезооптический фурье-микроскоп с двумя ракурсами.

Авторы выражают благодарность С.А.Бунятову за постоянный интерес и поддержку, а также Ю.А.Батусову за полезные обсуждения данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сороко Л.М. ОИЯИ, Б1-13-81-229, Дубна, 1981.
2. Люков В.В., Сороко Л.М. ОИЯИ, Б1-13-81-312, Дубна, 1981.
3. Сороко Л.М. и др. ОИЯИ, Б1-10-82-808, Дубна, 1982.
4. Сороко Л.М. ОИЯИ, Б1-10-82-809, Дубна, 1982.
5. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, Р13-83-119, Дубна, 1983.
6. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, Р13-83-120, Дубна, 1983.
7. Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, Р13-84-277, Дубна, 1984.
8. Сороко Л.М. ОИЯИ, Д1-82-642, Дубна, 1982.
9. Bencze Ge.L., Soroko L.M. JINR preprint, E13-84-310, Dubna, 1984.
10. Сороко Л.М. ОИЯИ, Р10-83-77, Дубна, 1983.