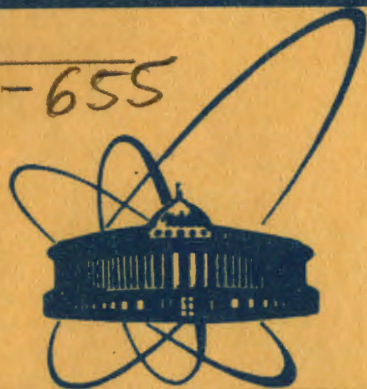


C-655



**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

58/83

Д1-82-642

**Л.М.Сороко**

**ОПТИКА, ГОЛОГРАФИЯ И МЕЗООПТИКА  
В ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЕ  
ВЕРШИННОГО ДЕТЕКТОРА**

**1982**

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема создания вершинного детектора на основе пузырьковой камеры с высоким пространственным разрешением возникла после открытия частиц с очень малым временем жизни  $\tau \sim 10^{-12} - 10^{-14}$  с. Чтобы зарегистрировать распад таких короткоживущих частиц с высокой эффективностью, пространственное разрешение  $\Delta x$  должно быть значительно меньше прицельного параметра  $B$  соответствующего распада:

$$\Delta x \ll B = c\tau, \quad /1/$$

где  $c$  - скорость света<sup>/1/</sup>. Для  $\tau \sim 10^{-13}$  с  $B \sim 30$  мкм и  $\Delta x \sim 5$  мкм. Вплоть до последнего времени этому условию удовлетворяла только ядерная фотоэмульсия, треки в которой наблюдают при помощи оптического микроскопа.

Глубина поля зрения, которую дает классическая изображающая оптика для длины волны света  $\lambda = 0,5$  мкм, равна

$$\Delta z \approx \frac{(\Delta x)^2}{\lambda} \sim 50 \text{ мкм} \quad /2/$$

и очень мала относительно глубины рабочего объема пузырьковой камеры вершинного детектора, составляющей  $H = 10$  см<sup>/1/</sup>. Чтобы зарегистрировать события по всей глубине пузырьковой камеры, вместо классической фотографии была использована голография<sup>/2/</sup>. Первые успешные эксперименты с пузырьковой камерой повышенного пространственного разрешения без ограничения по глубине поля зрения были выполнены в ЦЕРНе<sup>/3/</sup>. Методом импульсной голографии было получено пространственное разрешение в 8 мкм на глубине 10 см в малой пузырьковой камере, заполненной тяжелой жидкостью. Треки из пузырьков диаметром 25 мкм были зарегистрированы с пространственным разрешением вплоть до 2 мкм<sup>/4/</sup>. Во всех этих экспериментах была использована схема голографии Габора без опорного пучка<sup>/5/</sup>.

На стадии восстановления голограмма просвечивается когерентным светом от гелий-неонового лазера непрерывного действия. Восстановленное действительное изображение пузырьков рассматривают визуально или подают на экран дисплея<sup>/3/</sup>. В том и другом случае используют объектив оптического микроскопа, обладающий малой глубиной резкости<sup>/2/</sup>. При считывании информации, содер-

жащейся на голограмме, необходимо сканировать слой за слоем все трехмерное изображение. Число таких слоев равно примерно

$$10 \text{ см} / 50 \text{ мкм} = 2 \cdot 10^3.$$

## 2. ИЗОБРАЖАЮЩАЯ ОПТИКА

Рассмотрим геометрические преобразования, которые происходят в классической изображающей оптической системе, на примере простой линзы /рис. 1/. В приближении геометрической оптики каждая точка в предметном пространстве преобразуется линзой в точку, лежащую в пространстве изображений на прямой линии, проходящей через центр линзы. Расстояние  $l_2$  от центра линзы до изображения точки определяется выражением

$$l_2^{-1} = f^{-1} - l_1^{-1}, \quad /3/$$

где  $f$  - фокусное расстояние линзы, а  $l_1$  - расстояние от изображаемой точки в предметном пространстве до центра линзы. Это преобразование является взаимно однозначным для всех точек, координаты которых удовлетворяют неравенствам

$$\begin{aligned} |z| > f, \\ \left| \frac{x}{z} \right| < \Omega, \quad \left| \frac{y}{z} \right| < \Omega, \end{aligned} \quad /4/$$

где  $\Omega$  - угловое поле зрения линзы, которое ограничено наличием aberrаций линзы.

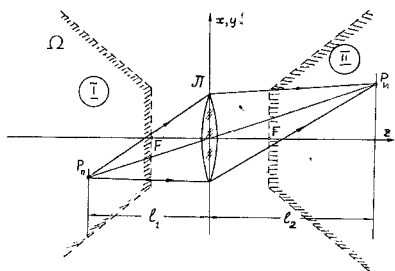


Рис. 1. Схема получения изображения точки при помощи линзы  $L$  в приближении геометрической оптики:  $I$  - предметное пространство;  $II$  - пространство изображений;  $P_I$  - одна из точек предметного пространства;  $P_{II}$  - ее изображение. Заштрихованная область - та часть пространства, точки которой преобразуются линзой без заметных искажений.

Геометрические преобразования, производимые простой оптической линзой, можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} 0D &\rightleftharpoons 0D, \\ 1D &\rightleftharpoons 1D, \\ 2D &\rightleftharpoons 2D, \\ 3D &\rightleftharpoons 3D. \end{aligned} \quad /5/$$

Любая точка /нульмерное многообразие/ преобразуется в точку /нульмерное многообразие/. Каждая линия, прямая или кривая /одномерное многообразие/, преобразуется в соответствующую линию /одномерное многообразие/ в пространстве изображений. Выпуклая, не затеняющая себя поверхность /двумерное многообразие/ переходит в соответствующую поверхность /двумерное многообразие/. При помощи плоского детектора, например фотопленки, невозможно зарегистрировать многообразие точек изображения, не лежащих на плоскости.

Взаимная однозначность геометрических преобразований /5/ теряется частично или полностью при учете дифракции света. Из-за конечности длины волны света каждая точка предметного пространства преобразуется линзой не в точку, а в малый элемент трехмерного пространства изображений. Его поперечные размеры равны

$$\Delta x \approx \Delta y \sim \frac{\lambda}{a}, \quad /6/$$

а продольные

$$\Delta z \sim \frac{\lambda}{a^2}, \quad /7/$$

где

$$\text{tga} \approx a \approx \frac{R}{2f}, \quad a < 1, \quad /8/$$

а  $R$  - радиус линзы. Из /6/ и /7/ при  $f = \text{const}$  получаем

$$\sqrt{\lambda \Delta z} = \Delta x. \quad /9/$$

Если величину  $a = R/2f$  уменьшить настолько, что радиус пятна дифракции станет равным радиусу линзы, то линзу можно убрать без заметного ухудшения качества изображения. Получившаяся оптическая система называется камерой обскуры.

## 3. МЕЗООПТИКА

Изображающая система называется мезооптической, если в приближении геометрической оптики каждая точка из предметного пространства преобразуется мезооптической системой в отрезок прямой линии конечной или бесконечной длины в пространстве изображений. Геометрические преобразования, которые выполняет мезооптическая изображающая система, могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} 0D &\rightarrow 1D, \\ 1D &\rightarrow 2D, \\ 2D &\rightarrow 3D. \end{aligned} \quad /10/$$

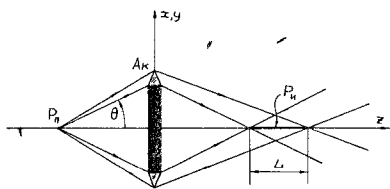


Рис.2. Схема получения изображения точки при помощи кольцевого конического аксикона  $A_K$ ;  $P_0$  — одна из точек предметного пространства;  $P_И$  — отрезок на оптической оси, где расположено мезооптическое изображение точки  $P_И$ . Среднее фокусное расстояние аксикона зависит от угла  $\theta$ .

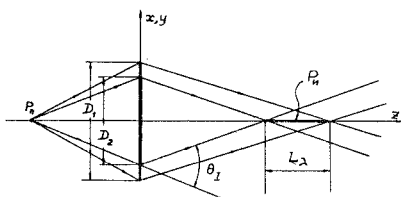
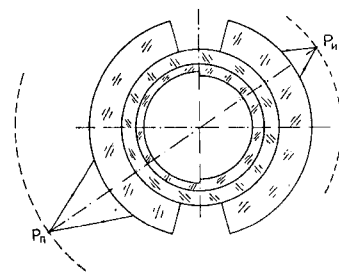


Рис.3. Схема получения изображения точки при помощи кольцевой дифракционной решетки в первом порядке дифракции монохроматического света с длиной волны  $\lambda$ .

Рис.4. Разрез концентрического объектива с четырьмя сферическими концентрическими поверхностями<sup>/8/</sup>.



Точка переходит в отрезок линии, линия переходит в поверхность, а поверхность после преобразования заполняет трехмерное многообразие.

Типичным примером мезооптической изображающей системы является аксикон<sup>/8/</sup> /рис.2/, имеющий конические поверхности. Точка на оптической оси аксикона в предметном пространстве преобразуется в отрезок прямой линии длиной  $L$ . Существенной особенностью аксикона является то, что величина  $L$  может принимать практически любые значения, в то время как в классической изображающей системе в приближении геометрической оптики всегда  $L=0$ , если пренебречь aberrациями линзы. Кольцевой аксикон используют не только в оптике, но и в акустоскопии<sup>/7/</sup>.

Дифракция света в мезооптических системах приводит к локальному размыванию каждой точки преобразованного многообразия. Например, концы отрезка прямой линии конечной длины  $L$  размываются на отрезке  $\Delta z$  /7/, а сам отрезок переходит в фигуру вращения, поперечные размеры которой по порядку величины равны  $\Delta x$  и  $\Delta y$  из /6/.

Вторым примером мезооптической системы является кольцевая дифракционная решетка<sup>/8/</sup> /рис.3/. Расположение и длина отрезка

прямой линии  $L$  изменяется в зависимости от длины волны света  $\lambda$ ; шага решетки  $a$ , а также наружного  $D_1$  и внутреннего  $D_2$  диаметров кольцевой диафрагмы, располагаемой в плоскости кольцевой дифракционной решетки. Длина отрезка  $L$  определяется простыми тригонометрическими соотношениями между величинами  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $\lambda$  и  $a$ .

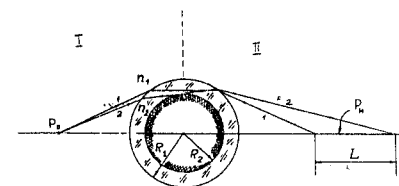
Недостаток аксикона и других осесимметричных мезооптических изображающих систем состоит в том, что из-за сильных aberrаций аксикона угловое поле зрения оказывается очень малым. Поэтому такие системы можно использовать только в качестве сканирующих изображающих устройств с детектором малого размера, расположенным на оптической оси. Иными свойствами обладают концентрические мезооптические объективы, у которых нет ограничений на угловое поле зрения. Напомним, что концентрическим объективом называют оптическую систему, состоящую из сферических поверхностей с общим центром кривизны<sup>/8/</sup>. В соответствии с фундаментальной теоремой геометрической оптики<sup>/9/</sup> концентрический объектив, пример которого дан на рис.4, может содержать только три или более сферических концентрических поверхности и не может иметь одну или две сферические поверхности.

Иначе обстоит дело в мезооптике. Мезооптический концентрический объектив может иметь всего одну или две концентрические сферические поверхности. Ход лучей в простейшем мезооптическом объективе с одной сферической поверхностью и непрозрачным ядром показан на рис.5. Классический концентрический объектив, который был предложен Суттоном еще в 1859 г., не нашел широкого практического применения из-за своего принципиально неустранимого недостатка: изображения точек, равно удаленных от центра концентрического объектива, расположены на сферической поверхности и их невозможно зарегистрировать на плоской фотопленке. В случае мезооптического концентрического объектива изображение с высоким пространственным разрешением заполняет пространство изображений на большую глубину и поэтому может быть зарегистрировано на фотопленке без помощи диафрагм.

Недостаток любого мезооптического концентрического объектива состоит в том, что он дает низкую освещенность и низкий контраст изображений. Поэтому мезооптический объектив можно использовать эффективно только для точечных и точечноподобных объектов. В класс таких объектов входит цепочка пузырьков или стримеров вдоль траектории заряженной частицы в трековых камерах.

Рис.5. Простейший мезооптический концентрический объектив с одной сферической поверхностью и непрозрачным сферическим ядром:

$n_1$  — показатель преломления окружающей среды,  $n_2$  — показатель преломления сферического слоя наружным радиусом  $R_1$  и внутренним радиусом  $R_2$ .



#### 4. МЕЗООПТИКА В ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЕ ВЕРШИННОГО ДЕТЕКТОРА

Пусть регистрация событий в пузырьковой камере вершинного детектора произведена при помощи метода импульсной голографии<sup>/1,4/</sup>. На стадии восстановления наблюдают мнимое изображение одного из пузырьков  $P_M$  и считывают его при помощи мезооптического объектива по схеме, приведенной на рис.6. При помощи этой схемы формируют две или больше центральные проекции трехмерных изображений треков на плоскости, перпендикулярные направлениям проектирования. Двумерные проекции считывают традиционными методами и обрабатывают при помощи тех же алгоритмов, которые используют в настоящее время для обработки стереоизображений в современных трековых камерах. Глубина сканирования  $L$  мезооптического объектива может быть сделана равной полной глубине камеры  $H$ , либо, если плотность треков на голограмме очень велика, глубину сканирования уменьшают в несколько раз до получения хороших условий наблюдений.

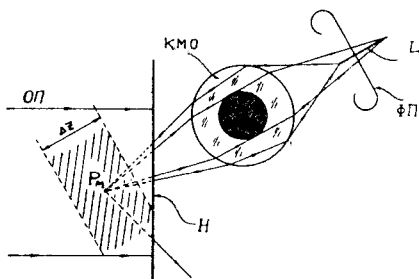


Рис.6. Схема мезооптической системы формирования и регистрации одной из центральных проекций мнимого изображения треков, восстановленного по голограмме, при помощи концентрического мезооптического объектива /KMO/: ОП - освещающий пучок когерентного света, Н - голограмма, ФП - фотопленка.

Информация, накапливаемая на малом участке фотопленки при помощи мезооптического объектива, представляет собой сумму интенсивностей элементов объекта, которые лежат внутри конической трубки со средним диаметром  $\Delta x$  и длиной  $L$ . Аналогичное суммирование вдоль линии распространения выполняет просвечивающее излучение в реконструктивной томографии, рентгеновской<sup>/10/</sup> или акустоскопической<sup>/11/</sup>. Принципиальное отличие мезооптики от реконструктивной томографии заключается в том, что лучевая сумма в мезооптике может быть сформирована на конечной длине, причем длину и расположение отрезка в предметном пространстве можно варьировать, меняя параметры мезооптической системы. В случае кольцевой дифракционной решетки эта цель достигается путем изменения длины волны освещающего света или смены кольцевых диафрагм.

#### 5. МЕЗООПТИКА В ПРИРОДЕ

Типичный пример мезооптики в природе - гравитационная линза<sup>/12,13/</sup>. Луч света, идущий на расстоянии прицельного параметра  $\rho$

вблизи звезды с массой  $M$ , отклоняется гравитационным полем на угол

$$\phi(\rho) = \frac{4GM}{c^2 \rho}, \quad /11/$$

где  $G$  - гравитационная постоянная<sup>/14/</sup>. Здесь предполагается, что гравитационный радиус ближайшей звезды

$$r_g = \frac{2GM}{c^2} \quad /12/$$

мал по сравнению с ее геометрическим радиусом  $R$ <sup>/15/</sup>. Наименьшее фокусное расстояние такой естественной мезооптической системы равно

$$f_{\min}(R, M) \approx \frac{R}{\phi(R)}. \quad /13/$$

Наблюдатель, находящийся на прямой линии, которая проходит через центры двух звезд, на расстоянии  $r > f_{\min}(R, M)$  от ближайшей звезды, увидит дальнюю звезду в форме кольца с центром, совпадающим с центром ближайшей звезды<sup>/12/</sup>. Гравитационная линза/мезолинза/, создаваемая далекой галактикой, была действительно обнаружена<sup>/16/</sup>.

В заключение автор выражает благодарность А.Ф.Писареву и Я.А.Сморозинскому за полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Fisher C. In: Workshop on Holographic Track Chambers. Fermilab, November 11-12, 1980.
2. Eisler F.R. Nucl. Instr. and Meth., 1979, vol.163, p.105.
3. Dykes M. et al. CERN/ET-80-2, Geneva, 1980.
4. Royer H. J. Optics (Paris), 1981, vol.12, p.347.
5. Gabor D. Nature, 1948, vol.161, p.777.
6. McLeod J.H. Journ. Opt. Soc. Amer., 1954, vol.44, p.592.
7. Collins H.D. In: Acoustical Holography (ed. N.Booth). Plenum Press, 1975, vol.6, p.597.
8. Бегунов Б.Н., Заказов Н.П. Теория оптических систем. "Машиностроение", М., 1973, с.299.
9. Герцбергер М. Современная геометрическая оптика. ИЛ, М., 1962.
10. Herman G. Image Reconstruction from Projection. The Fundamentals of Computerized Tomography. Academic Press, New York, 1980.
11. Труды ТИИЭР, 1979, т.67, №4.
12. Liebes S. Phys. Rev., 1964, vol.133, No.3, p.В835.
13. Климов Ю.Г. ДАН СССР, 1963, т.148, №4, с.789.

14. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. "Наука", М., 1973, с.19.
15. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Релятивистская астрофизика. "Наука", М., 1967.
16. Chafee F.H. Scient.Amer., 1980, vol.243, No.5, p.61.

Сороко Л.М. Д1-82-642  
Оптика, голография и мезооптика  
в пузырьковой камере вершинного детектора

Показано, что проблема съема информации, возникшая при создании пузырьковой камеры вершинного детектора с высоким пространственным разрешением, может быть решена при помощи элементов мезооптики. Проведен анализ возможностей классической изображающей оптики и голографических систем в технике пузырьковых камер. Рассмотрены типичные примеры мезооптических изображающих систем. Описана схема применения мезооптики в системе съема информации с голограмм, регистрируемых в пузырьковой камере вершинного детектора с высоким пространственным разрешением. Отмечено, что гравитационная линза /мезолинза/ является типичной мезооптической системой.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Soroko L.M. D1-82-642  
Optics, Holography and Mesooptics  
in Bubble Chamber of Vertex Detector

It is shown that data acquisition problem in bubble chamber vertex detector of high spatial resolution can be solved by introducing the mesooptical elements. There are treated the limitations of classical imaging optics and the new scopes of holographic systems in bubble chamber technique. The typical examples of mesooptical imaging systems are presented. The application of mesooptics in the system of scanning of holograms in bubble chamber vertex detector of high spatial resolution is described. The gravitational lens (mesolens) can be considered as a typical mesooptical system.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Рукопись поступила в издательский отдел  
1 сентября 1982 года.