

с3(04)  
с-56

Эт. X

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Р-284

**МАТЕРИАЛЫ**  
**совещания по камерам Вильсона, диффузионным и**  
**пузырьковым камерам**

Выпуск V

ОБРАБОТКА СНИМКОВ

Дубна, 1959 год

P-284

C3(-04)  
C-56

**МАТЕРИАЛЫ**  
**совещания по камерам Вильсона, диффузионным и**  
**пузырьковым камерам**

Выпуск V

ОБРАБОТКА СНИМКОВ

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

4-39/86  
9

НАСТОЯЩИЙ ВЫПУСК ПОДГОТОВЛЕН К ПЕЧАТИ  
М.П. БАЛАНДИНЫМ

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
1. Кривизномер ИГ-22. Л.А.Самуров .....	5
2. Стереоскопический аппарат для работы с камерой Вильсона. А.Г.Новиков, С.А.Славатинский, Ю.А.Сморозин .....	20
3. Репроецирующая техника измерений, используемая для обработки стереофотографий. А.Т.Василенко, М.С.Козодаев, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, Ю.Л.Щербаков .....	29
4. Методика обработки стереофотографий, полученных при исследовании взаимодействия $\pi$ -мезонов с ядрами методом камеры Вильсона. В.Г.Иванов, Н.И.Петров, В.А.Русаков .....	45
5. Об измерениях импульса частиц космических лучей, генерирующих мезоны при больших энергиях. В.В.Гусева, В.М.Максименко, С.А.Славатинский .....	60
6. О точности измерений импульса частиц в небольшой вертикальной камере Вильсона. Л.Т.Барадзей, Ю.А.Сморозин, М.В.Соловьев, Б.В.Толкачев, З.И.Тулинова .....	67
7. Измерение ионизации частиц методом относительного фотометрирования фотографий следов. В.И.Волощук, В.В.Кузнецов, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, Ю.А.Щербаков .....	77
8. Измерение ионизации методом фотометрирования. С.В.Рябиков .....	85
9. Обработка стереофотографий следов ионизирующих частиц, полученных в небольшой пропановой камере. М.П.Баландин, В.А.Моисеенко .....	94
10. Обработка результатов, полученных при облучении пузырьковой пропановой камеры диаметром 110 мм в $\pi$ -мезонном пучке синхротрона Объединенного института ядерных исследований. Ван Ган-чан, Ван Цун-цзэн, Дин Да-цао, Е.Н.Кладницкая, М.И.Соловьев .....	101 ✓
11. Об измерении координат и углов в пузырьковой камере. Л.П.Котенко, Е.П.Кузнецов, А.В.Самойлов, Ф.М.Сергеев .....	119
12. О возможностях автоматизации отбора снимков. М.М.Русинов .....	135
13. Метод автоматического просмотра треков с помощью щелевого устройства. С.М.Коренченко .....	140

## КРИВИЗНОМЕР ИГ-22

Л.А.Самуров

(Государственный Оптический Институт СССР)

Если кривизна следов частиц, сфотографированных в камерах Вильсона велика, то она измеряется обычным координатным методом с помощью измерительного микроскопа. Однако этот способ измерения трудоемок, а для следов с большим радиусом кривизны оказывается весьма неточным.

Для измерения следов малой кривизны, английский физик Блекетт <sup>I)</sup> еще в 1936 году предложил новый метод, который значительно превосходил прежний как по скорости, так и по точности.

Замечено, что невооруженным глазом можно оценивать прямолинейность линий с большой точностью, если рассматривать эти линии вдоль их длины под малым углом. Известно, также, что оптические клинья или призмы обладают свойством искривлять прямые линии (например, изображение щели в спектрографах) и вследствие обратимости в обратном ходе лучей — выпрямлять кривые линии.

Кривизна изображения линии получаемой в фокальной плоскости объектива с фокусным расстоянием  $f$  для призмы, находящейся

в минимуме отклонения, хорошо определяется формулой Браве:

$$\frac{1}{R} = 2 \frac{n^2 - 1}{nf} \cdot \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}};$$

где  $n$  - коэффициент преломления материала призмы,  
 $\alpha$  - преломляющий угол призмы.

Блекетт использовал указанные свойства призм и глаза для измерения кривизны. Он предложил оптически проектировать специальным объективом с исправленной дисторсией фотографию следа с увеличением на белый экран, поместив после объектива ахроматический клин. Вращение клина вокруг оси объектива будет вызывать компенсирующее действие и кривой след на экране, при некотором определенном угле  $\theta$  между главным сечением клина и направлением следа, превратится в прямую линию.

Кривизна приблизительно оценивается по углу между клином и направлением следа из соотношения

$$\frac{1}{R} = C_0 \cdot \sin \theta$$

где  $C_0$  - постоянная величина с размерностью  $m^{-1}$ ,  
зависящая от параметров системы.

Спроектированный на экран след наблюдается под небольшим углом с плоскостью экрана в виде сжатой по высоте проекции, что в сочетании со способом компенсации кривизны вращающимся клином, дает тонкий и чувствительный метод измерения малой кривизны.

Прибор, построенный Блекеттом, позволял измерять кривизну в пределах от 0 до  $3 \text{ м}^{-1}$  с вероятной ошибкой измерения  $0,016 \text{ м}^{-1}$ .

Аналогичный по принципу действия прибор, но отличающийся в решениях конкретных узлов, был разработан в Государственном Оптическом институте и в 1953 году было построено два образца прибора ИГ22 для Физического института Академии наук СССР.

#### Схема оптики кривизномера ИГ22

На рис. I представлена оптическая схема кривизномера.

Осветительная часть прибора состоит из источника света 1 и трехлинзового конденсора 2. Светящееся тело лампы СИ62 изображается конденсором с некоторым увеличением на зрачке проектирующего объектива 3.

Измерительным устройством является сложный компенсатор 4, состоящий из двух ахроматизированных клиньев вращающихся навстречу один другому так, что суммарное и переменное по силе действие обоих клиньев проявляется всегда в одном меридиане, нормальном к направлению следа. Кроме того, в целях увеличения диапазона кривизны охватываемой измерением, имеется дополнительный сменный клин 5, который может быть включен в ход лучей системы так, что его главное сечение будет ориентировано в той же плоскости, в которой действует главное сечение основного компенсатора.

Для наблюдения проецируемого следа служит экран 6, представляющий собой толстую пластину органического стекла, нижняя поверхность которой имеет белое диффузно отражающее покрытие

и снабжена черными, параллельными между собой штрихами, направленными вдоль линии наблюдения. Эти штрихи служат для правильной ориентировки изображения следов на экране. Толщина экрана кривизномера берется такой же, какой была толщина фронтальных стекол в камерах Вильсона, что необходимо для компенсации камерной дисторсии, неизбежно возникающей при фотографировании через толстые стеклянные пластины. Передний край экрана, с призмной накладкой, имеет наклонную полированную грань, на которой происходит полное внутреннее отражение лучей, рассеянных плоскостью экрана и идущих внутри его под малыми углами в  $2/3^{\circ}$ , в то время как направление визирования, для удобства наблюдения, составляет угол  $60^{\circ}$  с горизонтом. Поперечный разрез экрана дан на рис.2.

Оптика прибора рассчитана для проекции круглого кадра диаметром 24 мм с пленки 8, (прижимаемой выравнивающим стеклом 7) на экран с двумя масштабами изображения: 8,33 и 12,5х для каждого из двух сменных проектирующих объективов. Эти объективы "Гелиос 42"  $f = 27$  мм,  $I : 2,8$  и "Зоннар"  $f = 50$ ,  $I : 1,5$  взяты однотипными с объективами, которыми производится съемка камер Вильсона, и проекция на экран выдерживается в тех же масштабах, какие были при съемке, для того, чтобы исключить влияние дисторсии имеющейся у объективов.

Оптика прибора рассчитана В.И.Линьковой под руководством проф.Г.Г.Слюсарева.



### Конструкция прибора

Общий вид прибора изображен на рис.3. В литое основание I вмонтированы экран и понижающий трансформатор для питания источника света. На колонке 2, жестко связанной с основанием, помещается измерительный блок 3. Для установки нужного масштаба изображения измерительный блок может перемещаться по колонке вверх или вниз с помощью рукоятки 4. Масштаб изображения отсчитывается по штрихам, нанесенным на колонке против соответствующих указателей для двух сменных объективов "Гелиос 42" и "Зоннар", которые крепятся в фокусирующем гнезде на байонетном замке.

Для затемнения экрана от паразитного света основание прибора и измерительный блок связаны мехом 5.

В верхней части измерительного блока, за откидным кожухом 6, помещается осветительное устройство.

Кадровое окно 7 представляет собой отдельно вынимающийся из прибора узел с каналом для прохода пленки, прижимным устройством и двумя бобинками под пленку.

Кадровое окно вынимается из прибора только при зарядке пленки; для перемещения же ее в фильмовом канале достаточно поворотом рычага приподнять прижимное стекло и вращать одну из бобинок.

Гнездо, куда вставляется кадровое окно, для ориентировки следа вдоль вспомогательных штрихов на экране, а также для правильного расположения центра кривизны измеряемого следа, имеет круговой поворот, осуществляемый двумя движениями: на большие углы этот поворот производится вручную, а тонкое движение осуществляется с помощью винта.

Оптические клинья компенсатора вращаются в противоположных направлениях от рукоятки 8, симметрично относительно меридиана нормального к направлению штрихов экрана. Углы поворота компенсатора отсчитываются по лимбу 9, а доли градуса в минутах по барабану 8. Наблюдение экрана производится через смотровую щель 10, открытие и закрытие которой управляется рукояткой 11.

Если требуется наблюдение экрана без большого его перспективного искажения (напр., для прочтения порядкового номера кадра), это можно сделать, используя застекленный открывающийся люк 12, расположенный выше основной смотровой щели.

Изготовленный прибор был испытан и показал точность измерения  $\pm 0,029 \text{ м}^{-1}$  и с добавочным клином для области большой кривизны  $\pm 0,111 \text{ м}^{-1}$ . Падение точности измерения во втором случае объясняется наличием больших аббераций, вносимых толстыми клиньями компенсатора, работающего в сходящемся пучке света.

#### Метод изготовления испытательных пластинок

Для градуировки прибора требовались испытательные пластинки с набором кривых линий большого радиуса, измеряемого величинами

От долей метра, до многих метров, при длине кривой не более 24 мм.

Испытательным кривым предъявляются высокие требования как к качеству самих линий, так и к точному знанию фактической величины этого радиуса. Вследствие чрезвычайной малости стрелки прогиба, последующий после изготовления контроль или измерение радиуса кривизны с хорошей точностью, практически невозможны, поэтому точность знания заданного радиуса кривизны определяется только точностью самого технологического процесса изготовления испытательных пластинок. Нами был предложен фотографический метод их изготовления. Если на вогнутой полированной поверхности линзы с большим и точно известным радиусом кривизны  $R_0$  (рис.4) провести штрих через ее середину и затем сфотографировать этот штрих в определенном масштабе  $M$ , установив камеру строго нормально ( $\alpha = 90^\circ$ ) к оси линзы, через которую проведен штрих, то независимо от величины  $R_0$ , на снимке будет получена прямая с радиусом кривизны равным бесконечности.

Если бы удалось произвести фотографирование штриха при  $\alpha = 0$ , то мы получили бы чистое сечение линзы с радиусом кривизны  $R_0$ , но измененное масштабом в  $M$  раз.

Во всех промежуточных положениях камеры при ее поворотах вокруг вершины линзы в плоскости перпендикулярной направлению штриха, будем получать промежуточные значения радиуса кривизны, лежащие в пределах от  $R_0$  до  $\infty$ , для масштаба изображения  $I : I$ .

Общая зависимость радиуса кривизны  $R$  испытательной пластинки в зависимости от  $R_0$  угла  $\alpha$  и масштаба изображения  $M$ , выражается приближенной формулой:

$$R = \frac{R_0}{\cos \alpha} M.$$

Строго говоря, вместо дуги окружности на проекции в плоскости снимка будет получаться дуга эллипса, но при выбранных параметрах системы ( $R_0 = 3000$  мм,  $\varnothing$  линзы = 400 мм,  $M = 0,06$ ), отступления дуги эллипса от окружности будут исчезающе малы.

Для получения набора испытательных кривых с точностью до  $\pm 0,5\%$ , требовалась установка угла  $\alpha$  с точностью от  $\pm 1'$  до  $\pm 10'$ .

### Выводы

Разработан и построен прибор для измерения кривизны следов частиц сфотографированных в камерах Вильсона, со следующими основными данными:

Размер проектируемого кадра	круг $\varnothing 24$ мм
Масштаб изображения на экране	от $8,33^X$ до $12,5^X$
Пределы измерения кривизны	от $1,74\text{м}^{-I}$ до $0,025\text{м}^{-I}$

### Точность измерения:

Для объективов "Зоннар" и "Гелиос 42" без добавочного клина	$\pm 0,029 \text{ м}^{-I}$
Для объектива "Гелиос 42" с добавочным клином	$\pm 0,111 \text{ м}^{-I}$

Резкое снижение точности измерения при включении добавочного клина, при измерении большой кривизны следует объяснить большими абберациями, вносимыми в систему сильными и толстыми оптическими клиньями компенсатора, стоящего в сходящемся пучке.

Для градуировки прибора применялись специально изготовленные фотографическим методом испытательные пластинки с набором кривых различной кривизны, для чего была разработана особая методика.

В настоящее время Государственный союзный завод разрабатывает по расчету ГОИ новую улучшенную конструкцию кривизномера с новыми параметрами системы и в 1958 году будет изготовлена серия этих приборов.

#### Л и т е р а т у р а

Blackett P.M.S. Proceedings of the Royal Society of London  
1937, vol. 159, 1-18.

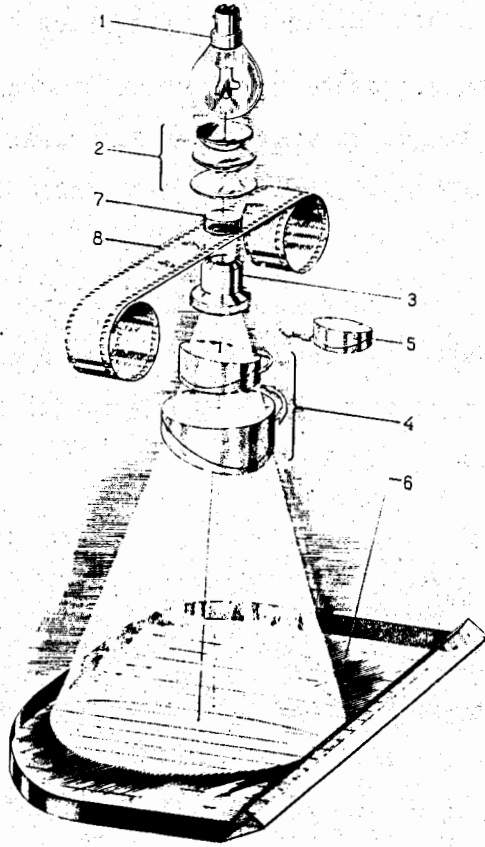


Рис. I. Оптическая схема кривизномера.

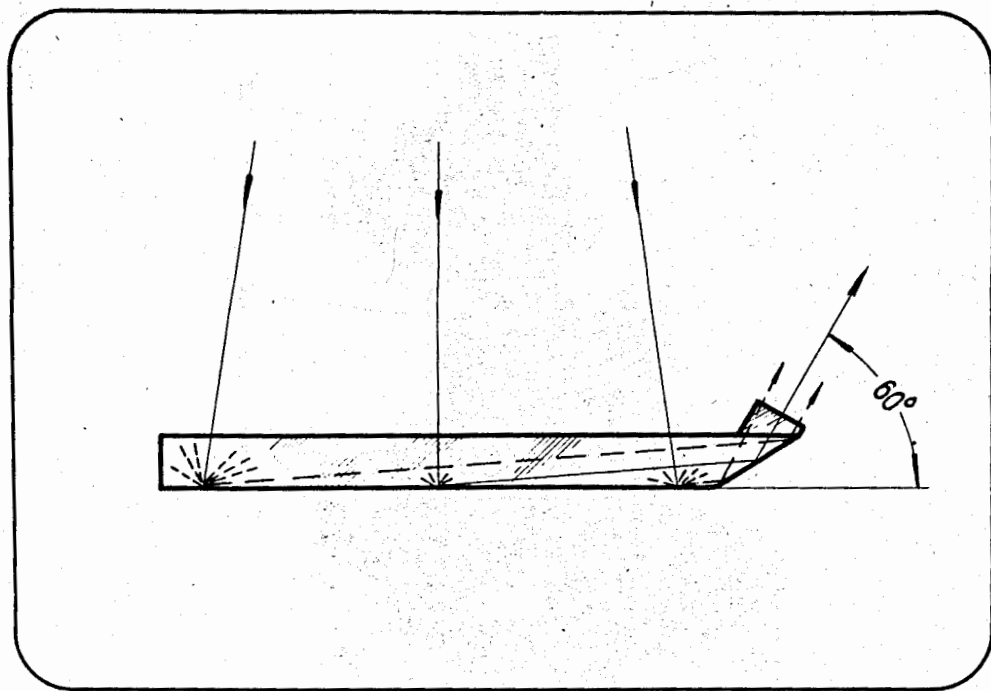


Рис. 2. Поперечный разрез экрана.

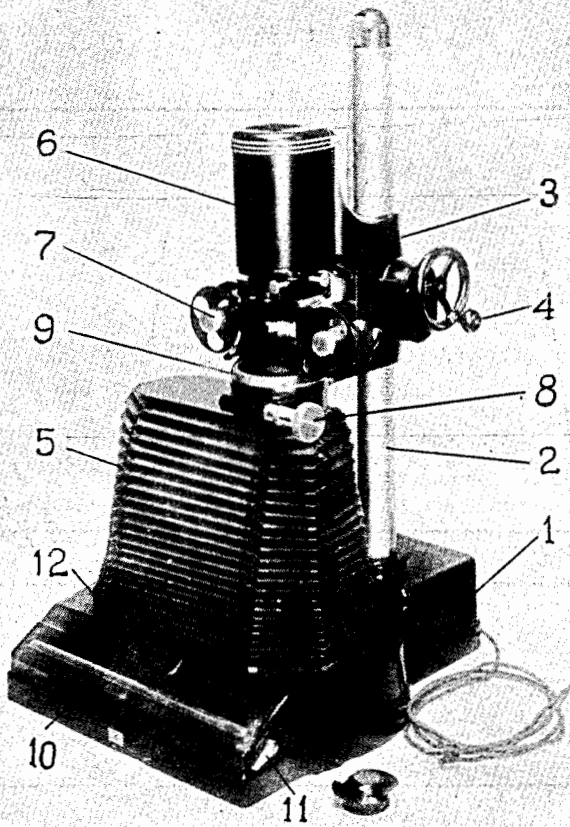


Рис.3. Общий вид кривизномера.



4-39186

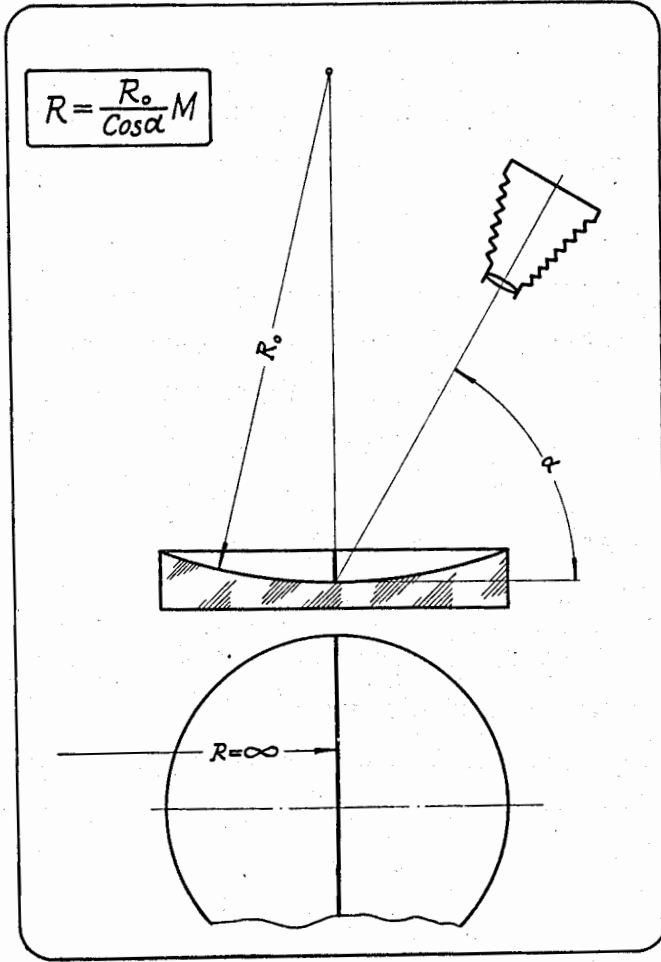


Рис.4. Схема получения различной кривизны испытательных пластинок.

Д и с к у с с и я

БИРГЕР

Почему в этом приборе получаются точности хуже, чем в названном вами английском приборе? В чем тут дело?

Г.Г.СЛЕСАРЕВ

Причины точно не известны. Может быть изготовление хуже. Да и точность, показанная Блекеттом, не проверена, она определена им самим. Самуров предполагает, что причина заключается в том, что здесь применены более сильные призмы, чем в системе Блекетта. Это подтверждается тем, что прибавление постоянной призмы ухудшает качество изображения и ухудшает в несколько раз точность.

Изображение хуже, потому что клин работает в сходящихся пучках. Когда клин работает в параллельных пучках, он не дает аберраций, кроме кривизны, но когда он работает в сходящихся пучках, несмотря на то, что сходимость небольшая, (апертура не превышает  $1/20 - 1/30$ ) пучки перестают быть гомоцентрическими. Они приходят сюда с астигматизмом, с комой, и качество изображения падает.

Одна из причин ухудшения также может заключаться в том, что наличие двух призм создает некоторое усложнение в механизме и имеется лишняя причина для ошибок, а именно люфт, который создается при вращении этих двух призм. Может быть, это привело к некоторому ухудшению, но зато это приводит к более удобному наблюдению.

БИРГЕР

У нас проверяли качество следов и получили приблизительно то же самое, что указано у Самурова.

Г.Г.СЛЮСАРЕВ

Измерения Самуровым делались с помощью пленки, на которую были нанесены окружности самым точным способом, таким образом его измерения должны быть точными. А как делались измерения Блекеттом, нам не известно.

ВОПРОС

Делалось ли что-нибудь, чтобы увеличить эту точность?

Г.Г.СЛЮСАРЕВ

Да, сейчас разрабатывается новая система в ГОИ. Расчет делается ГОИ, а изготовление производится на одном из заводов. Улучшение будет получаться потому что будут применяться более слабые призмы, следовательно, качество изображения будет лучше.

Кроме того, Самуров предполагает ввести некоторые усовершенствования в экране. Он будет более ярким и есть надежда, что изображение будет лучше.

ВОПРОС

Новый прибор будет выпускаться серийно?

Г.Г.СЛЮСАРЕВ

Да, будет выпускаться серийно.

СТЕРЕОКОМПАРАТОР ДЛЯ РАБОТЫ С КАМЕРОЙ  
ВИЛЬСОНА

А.Г.Новиков, С.А.Славатинский, Ю.А.Сморodin  
(Физический институт АН СССР )

Работающим с камерами Вильсона известны трудности, связанные с измерениями кривизны следов, их длин и углов между ними на стереофотоснимках, зафиксировавших события в камерах.

Выпускаемые нашей промышленностью стереокомпараторы (типов АК-15, СК-2 и СК-3 и др.) неудобны для обработки камерных снимков, так как приспособлены для измерения параллаксов. Координаты же глубины в пространстве приходится определять методом пересчета, на что затрачивается много времени. Описание подходящего стереокомпаратора нам не удалось найти и в иностранной литературе.

В лаборатории космических лучей Физического института АН СССР был смонтирован и изготовлен опытный образец специального стереокомпаратора под маркой "СК-Ф-1". На этом приборе можно получить при измерении фотоснимков камеры координаты следов по трем осям с непосредственным отсчетом линейной величины.

Наш прибор, в течение нескольких месяцев использовался при обработке камерных пленок и таким образом выявлены его характеристики. Прибор "СК-Ф-1" еще не является тем

совершенным прибором, который бы мы хотели иметь, но как нам кажется, он уже и теперь имеет некоторые преимущества перед ранее нам известными приборами, которые также применяются для обработки стереофотоснимков событий в камерах Вильсона.

Ради краткости нашего сообщения мы остановимся только на основных особенностях нашего прибора.

Оптическая схема (см.рис.1).

В основе нашего прибора "СК-Ф-1" лежит идея проецирования марки, перемещаемой в пространстве (в камере) в трех координатах ( $x$ ,  $y$  и  $z$ ) на стереофотоснимки (пленку)<sup>х</sup>). Марка проецируется на пленку теми же объективами, с которыми были получены фотоснимки, что обеспечивает одинаковые условия как при фотографировании событий в камере, так и при проецировании марки на фотоснимки при измерениях на пленке.

В целях сохранения тех же условий, что и при фотографировании камеры, между маркой и объективами устанавливается оптическая пластина такая же как и переднее стекло камеры Вильсона.

В приборе "СК-Ф-1" как и в фотоаппарате (с помощью которого фотографируется камера) пленка фиксируется путем прижима ее эмульсионной стороной к тонкой оптической пластине. Разница состоит только в том, что в фотоаппарате пластина оптически прозрачна, а в приборе "СК-Ф-1" она слабо заматована на плоскости

---

х/

Идея этого прибора была предложена впервые Грошевым, Добротиним, Франком, ДАН СССР 3, 287 (1936).

обращенной к пленке. Это несколько улучшает равномерность освещения кадра. За пленкой, в сторону оператора, размещается наблюдательная оптическая система, которая состоит из 2-х ромбических призм (по одной на каждый глаз), с помощью которых база между объективами (проецирующими марку на пленку) сводится к базе глаз оператора и 2-х объективов, которые оборачивают положение объекта на пленке и направляют его изображение в увеличенном масштабе в окуляр.

Из опыта работы на приборе "СК-Ф-1" выявлено, что при обмере следов на пленке, разброс показаний отсчетов при трехкратном повторении для сплошного следа не превышает по оси  $Z$  (глубине)  $\pm 0,5$  мм, по оси  $X$  и  $Y$  (горизонтали и вертикали) -  $\pm 0,3$  мм.

При обмеривании отдельных капель следа, показание точности отсчета улучшается в полтора раза.

Замечено, что полное необходимое время для измерения следов и определения угла между двумя следами равно 12-15 мин.

Для сравнения приведем таблицу (см. сопоставительную таблицу).

#### Краткое конструктивное описание прибора

##### "СК-Ф-1"

Прибор состоит из следующих основных узлов (см. фото):

а) станина с направляющими по оси  $Z$ ;

- б) экран с системой его освещения и координатными механизмами для перемещения марки по осям X и Y с отсчетными устройствами ;
- в) каретка для перемещения экрана по оси Z с системой отсчета величины перемещения ;
- г) оптический блок с пленочным каналом.

Сопоставительная таблица

Наименование операций	Тип стереокомпаратора			Примечание
	AK-15	СК-2	СК-Ф-1	
I. Величина разброса показаний на отсчетных шкалах прибора по осям				Для сплошного следа с хорошей резкостью следов
а) X и Y	$\pm 0,2$	$\pm 1,5$	$\pm 0,3$	
б) Z	$\pm 0,5$	$\pm 5$	$\pm 0,5$	
2. Необходимое время в мин. для:				
а) проведения измерения	25 + 35	8 + 10	8 + 10	Для СК-2 необходимо чтобы снимки стереопары были сделаны на отдельных пленках
б) подсчета углов по результатам измерений 2-х следов	60 + 90	3 + 5	3 + 5	

Из данной таблицы видно, что преимущество остается за прибором СК-Ф-І. К этому следует добавить, что СК-Ф-І еще только первый опытный образец.

Станина представляет собой жесткую, ребристую прямоугольную коробку с направляющими для перемещения каретки по оси  $Z$  (глубине).

На передней части станины имеется плато для установки оптического блока. В коробке плато смонтирована опора ходового винта для перемещения каретки по оси  $Z$ .

Экран - стеклянная панель с матовой поверхностью, освещаемой сзади люминесцентными лампами. По бокам экрана устроены механизмы для перемещения марки по плоскости экрана по осям  $X$  и  $Y$ .

Каретка представляет собой постамент под экран. Она перемещается по направляющим станины на шарикоподшипниках ходовым винтом путем его вращения в гайке, смонтированной на передней панели.

Оптический блок включает в себя оптические детали для проецирования изображения марки на пленку, пленочный канал, детали наблюдательной оптики за положением марки на кадрах пленки. Оптический блок может поворачиваться относительно вертикали экрана на некоторый угол.



Предусмотрено затемнение промежутка между экраном и оптическим блоком с целью устранения помех от других источников света.

В отсчетных механизмах имеется возможность производить измерения от нуля, а последние показания линейных величин считать окончательными.

### Недостатки первой модели прибора

1. Необходимость устанавливать в проецирующую систему те же объективы и другие оптические детали снижает универсальность в применении прибора.
2. В оптическом блоке не предусмотрено одновременное смещение обеих призм при настройке базы между окулярами по глазам наблюдателя.
3. Системы отсчетов величин по всем трем осям координат неодинаковы по линейным масштабам, что неудобно для ведения измерений.
4. Шкальные деления в системе отсчетов малы по масштабу, что затрудняет чтение показаний отсчетов.
5. Прибор имеет достаточно большие габариты, а штурвалы, которыми марка перемещается по экрану в направлении осей  $X$  и  $Y$ , иногда бывают удалены от наблюдателя и наблюдатель таким образом не может непрерывно следить за перемещением марки.

### Возможности улучшения прибора

После того, как определились положительные и отрицательные стороны в приборе "СК-Ф-Г", в последующей модели такого прибора отмеченные недостатки будут устраняться. Основная трудность в устранении недостатков в приборе заключается в отказе при проецировании марки на пленку от того же комплекта оптических деталей, с которыми производится фотографирование камеры.

Решение этого вопроса осложняется тем еще, что фотографирование больших камер в магнитном поле с большой глубиной освещенной зоны в камере, вынуждает применять для этой цели фоторегистраторы со многими объективами. Существующие приборы промышленного типа для обработки камерных снимков также не исключают этой трудности, поэтому задача создания более удобного прибора для этих целей остается актуальной.

### Д и с к у с с и я

ВОПРОС

Какова была база фотографирования?

А.Г.Новиков

80 мм.

ВОПРОС

А коэффициент увеличения?

А.Г.НОВИКОВ

В пределах от I0 до I4.

Точность оказалась независимой от коэффициента увеличения.

Что касается точек, относительно которых мы должны устанавливать пленку, их не было. У нас в камере была нить, относительно которой мы измеряли параллаксальную величину.

ГОРБУНОВ

Я могу дополнить следующее: я рассматривал камеру с помощью этого прибора спустя уже довольно большое время после того, как было произведено фотографирование и проявление пленки, и могу сказать, что расстояние между реперами, которые имелись в камере, отличалось от измеренных на 3%, но я не могу сказать, усадка это или дефект прибора, потому что слишком много времени прошло с момента фотографирования.

С МЕСТА

Мне кажется, что тот прибор, который в данном случае был использован для обработки стереофотографий, ничем не отличается от репроектора в смысле точности. Если вы имеете данную базу фотографирования, данное расстояние от предмета, который вы фотографируете, то точность здесь одинакова. Не в этом преимущество прибора. Преимущество заключается в том, что этот прибор позволяет одновременно при измерении координат точек следа в камере наблюдать стереоскопическую картину. Это является некоторым преимуществом по сравнению с методом репроекции, когда картина проецируется на экране.

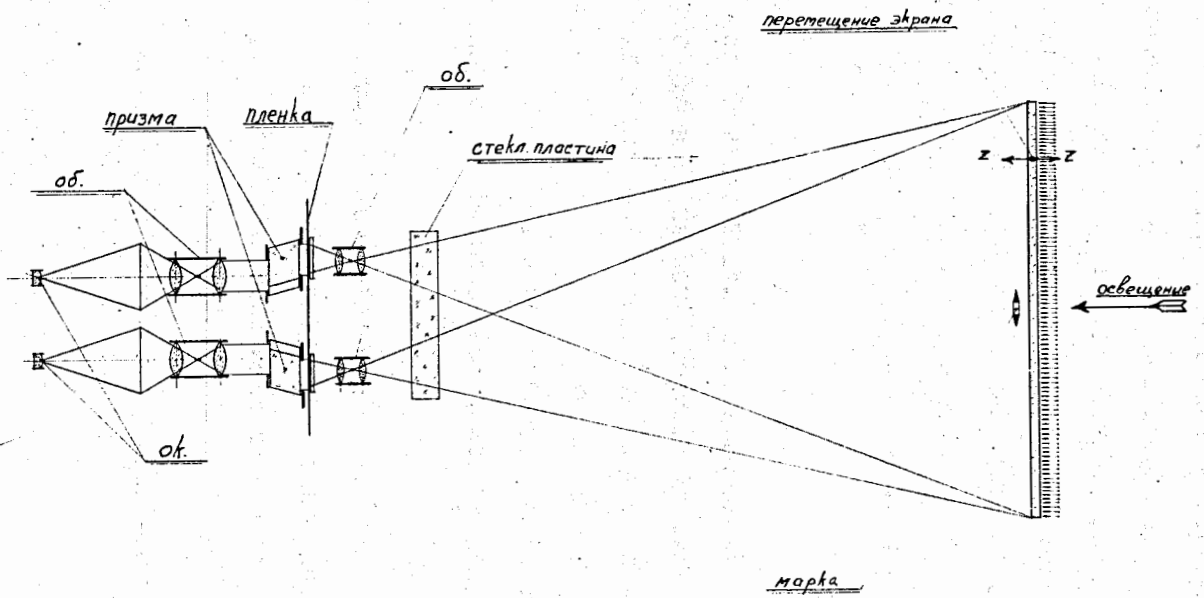
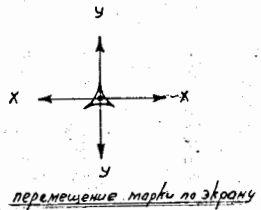


РИС. I.

РЕПРОЕКЦИОННАЯ ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМАЯ  
ДЛЯ ОБРАБОТКИ СТЕРЕОФОТОГРАФИЙ

А.Т. Василенко, М.С.Козодаев, Р.М.Суляев,  
А.И.Филиппов, Ю.Л.Щербаков

(Объединенный институт ядерных исследований)

В настоящее время получили широкое распространение диффузионные и пузырьковые камеры, которые позволяют получать за сравнительно небольшие промежутки времени значительное количество фотографий актов взаимодействия элементарных частиц с нуклонами и ядрами. Это ставит перед экспериментаторами задачу по выбору наиболее эффективных методов обработки стереофотографий.

Обычно по полученному стереоснимку необходимо найти кривизны следов частиц, пространственные углы между ними, координаты некоторых точек, компланарность следов и т.д. Для такой обработки могут быть использованы как методы, основанные на измерении координат с последующим аналитическим определением интересующих параметров, так и методы, позволяющие вести непосредственное измерение необходимых величин. Как правило, во втором случае измерение производится быстрее, а в некоторых случаях и точнее, чем в случае применения координатного метода.

Применение принципа репроекции стереоснимка через ту же оптическую систему, которая использовалась при съемке, позволяет избежать оптических искажений и дает возможность отказаться

от тщательной корректировки объективов. Таким образом в этом случае могут быть использованы более дешевые и доступные серийные объективы.

На использовании принципа репроекции изображения на подвижной экран основан построенный в Институте репроектор. На рис. I приведена кинематическая схема прибора. Проектирование изображения производится через фотоаппарат I, закрепленный на кронштейне 4. Фиксация пленки в фотоаппарате осуществляется с помощью стеклянной прижимной пластины 2. Для освещения каждого кадра используется осветитель с лампой накаливания мощностью 50 ватт, свет от которой фокусируется двухлинзовым конденсатором 3. Чтобы избежать нагрева пленки, осветитель снабжен жидкостным тепловым фильтром. Корпус осветителя охлаждается проточной водой. Перед объективами фотоаппарата помещены тубусы 7 с вложенными в них стеклами, назначение которых - компенсировать оптические искажения, связанные с тем, что фотографирование производилось через стеклянные окна камеры. Осветители с прижимным стеклом установлены на кронштейне 8, шарнирно связанном с кареткой 9, что позволяет быстро отводить его от фотоаппарата при замене пленки. Кронштейн может фиксироваться в отведенном состоянии.

Измерение  $\xi$  -координаты осуществляется путем перемещения фотоаппарата вверх и вниз по вертикальной трубе 5, которая служит направляющей для каретки 9. Перемещение каретки 9 в

пределах 900 мм осуществляется с помощью реверсивного электромотора 10 мощностью 0,1 квт, причем скорость вращения мотора регулируется ножным реостатом с выключателем. Легкость и плавность хода каретки достигается применением направляющих с трением качения, а также балансировкой ее веса. Точность отсчета  $X$ -координаты составляет  $\pm 0,1$  мм. Изображение точки (или нескольких точек) считается совмещенным в том случае, если ее проекции из обоих объективов фотоаппарата совпадают на экране 6. Точность совмещения проекций проверяется гашением и зажиганием лампы одного из осветителей. Если отсутствует колебание изображения следа, то совмещение произведено правильно.

Изображение следов частиц проектируется на подвижный экран 6 диаметром 360 мм, имеющий семь степеней свободы, используя которые можно производить необходимые для измерений пространственные перемещения. Экран выполнен в виде стеклянного диска покрытого матовым слоем белой краски. Он имеет возможность вращаться в оправе относительно оси, перпендикулярной к его плоскости. Вращение экрана производится с помощью двухскоростного верньерного механизма. Для обеспечения возможности угловых измерений на экране через центр его проведены две взаимно перпендикулярные отсчетные риски. Точность отсчета углового перемещения экрана составляет  $10'$ . Оправка, в которой вращается экран, может, в свою очередь, поворачиваться вокруг оси  $a-a$ , лежащей в плоскости экрана, что дает возможность наклонять экран в пределах  $\pm 75^\circ$ . Точность отсчета поворота вокруг оси  $a-a$  составляет  $1^\circ$ .

Случаи взаимодействия с разлетом частиц под углом  $75^{\circ}$  к горизонтальной плоскости должны измеряться координатным методом. Ось а-а может быть наклонена к горизонту в пределах  $\pm 15^{\circ}$  путем перекачивания вилки II, в которой закреплена ось а-а и экран. Перекачивание вилки осуществляется с помощью червячного механизма I2. Точность отсчета угла наклона оси а-а к горизонту составляет  $1^{\circ}$ . Лялька I3, в которой перекачивается вилка с экраном закреплена на поворотной площадке, вращающейся вокруг оси  $\xi$  в пределах от 0 до  $360^{\circ}$ . Точность отсчета этого поворота  $1^{\circ}$ . Вращение вилки с экраном вокруг оси  $\xi$  дает возможность ориентировать экран в любой плоскости и, следовательно, в любой плоскости вести измерения.

Вся эта система закреплена на каретке I4, перемещающейся в горизонтальной плоскости в пределах  $\pm 180$  мм. Направляющие I5 этой каретки, в свою очередь, закреплены на другой каретке I6, которая может перемещаться перпендикулярно к направлению перемещения первой каретки, в пределах  $\pm 180$  мм. Легкость и плавность хода кареток обеспечиваются применением направляющих на шариках и двухскоростного верньерного механизма I7. Точность отсчета перемещений по  $x$  и  $y$  составляет  $\pm 0,1$  мм. Направляющая нижней каретки имеет поворот вокруг оси  $\xi$ . Таким образом, с помощью верхней и нижней кареток центр экрана может быть совмещен с любой точкой в пределах площади  $360 \times 360$  мм.



Прибор позволяет измерять координаты  $x, y$  и  $z$  любой точки следа, что дает возможность рассчитать кривизну, углы между следами и т.д. Операция снятия координат точек следа является менее утомительной, чем такая же операция, проводимая на стереокомпараторе.

Описанная конструкция экрана позволяет существенно упростить и ускорить ряд операций по определению кривизн, углов между следами и других параметров взаимодействия и отказаться от громоздких математических вычислений. Угол между начальным следом и следом вторичной частицы может быть измерен непосредственно. Для этого, в случае прямых следов, точка взаимодействия совмещается с перекрестием на экране, а начальный след совмещается с осью  $a-a$ . Вращая экран вокруг оси  $a-a$ , мы имеем возможность легко найти плоскость рассеяния. Эта операция одновременно дает сведения о компланарности события. Угол между следом начальной частицы и следами вторичных частиц определяется вращением экрана в оправе. При измерении углов между пространственными кривыми необходимо пользоваться дополнительными приспособлениями. Измерение радиуса кривизны следов осуществляется путем совмещения их с окружностями известного радиуса на специально изготовленных для этой цели шаблонах. Кроме того прибор позволяет производить быстрое измерение кривизны следа по трем точкам. Для этого координатная система поворачивается таким образом, чтобы хорда следа располагалась вдоль одной из осей. Тогда по другой оси получаем значение стрелы прогиба и можно, зная длину хорды и стрелы прогиба, определить радиус кривизны следа.

На рис.2 и рис.3 приведены общий вид репроектора и поворотный экран в более крупном масштабе. Эти фотографии дают возможность судить о конструктивном выполнении отдельных узлов прибора и их компоновке. Прибор смонтирован на общей плите 19 /см.рис.1/, снабженной встирочными болтами 20. Операции включения и выключения осветителей, изменения направления вращения мотора и включения освещения шкал прибора выполняются с неозлого пульта 18, закрепленного под экраном со стороны расположения оператора. Во избежание поломки прибора перемещение каретки с фотоаппаратом ограничивается концевыми выключателями, при срабатывании которых выключается мотор и дается сигнал об этом.

Была произведена оценка погрешностей измерений /6/, возникающих при работе с репроектором, вследствие влияния различных факторов. В процессе химической обработки, сушки и последующего хранения фотопленка усыхает, причем для фотопленки типа "панхром X" величина усадки доходит до 0,7% / спустя ~ 3 месяца после проявления /. Это приводит к увеличению значения  $\xi$  -координаты до 10%. Изменение  $\xi$  - координаты и  $\chi\psi$  - координат вследствие усадки пленки происходит неодинаково, что приводит к искажению углов, плоскость которых наклонена к горизонтальной. Так при угле наклона  $\sim 60^\circ$  погрешность в измерении угла составляет  $\sim 1^\circ$ , а при наклоне  $0 + 10^\circ$  эта величина находится в пределах точности отсчетного устройства репроектора. Изменение  $\xi$  -координаты из-за усадки пленки приводит к изменению коэффициента увеличения фотоаппарата и, следовательно, к увеличению масштаба воспроизведения объекта, что необходимо учитывать при проведении

измерений на репроекторе. Это также может привести к тому, что плоскость изображения выйдет за пределы глубины резкости фотоаппарата, в результате чего изображение становится нерезким, следы размытыми. Поэтому необходимо выбирать нужную глубину резкости фотоаппарата, учитывая также и это обстоятельство. Погрешности вызываемые усадкой пленки могут быть сведены к минимуму в случае применения пленок на ацетатной основе.

Проведенное изучение погрешностей из-за неточности в установке компенсационных стекол показало, что наклон стекла на угол  $1,5^{\circ}$  приводит к изменению  $\xi$ -координаты на  $0,3\%$ , поэтому можно считать, что при наклоне осей компенсационных стекол друг относительно друга на  $1^{\circ}$  не вносит заметной ошибки в измерения. При существующей фиксации пленки в фотоаппарате погрешности, возникающие вследствие перекоса пленки и сдвига ее относительно нормального положения в кадровом окне незначительны. Эти погрешности в измерении  $\xi$ -координаты соответственно составляют  $\sim 0,2\%$  и  $0,3\%$ .

Точность обработки случаев взаимодействия зависит также от точности определения плоскости взаимодействия. При больших наклонах плоскости взаимодействия к горизонтальной совмещение ее с плоскостью экрана производится точнее, до тех пор пока не начинает становиться существенным уширение следа. Точность совмещения плоскости экрана с плоскостью взаимодействия характеризуется следующими данными: при длине следа отдачи 3 мм точность совмещения в плоскостях

близких к горизонтальным составляет  $\pm 8^\circ$  и в плоскостях наклоненных под углом  $\sim 70^\circ$  к горизонту —  $\pm 3^\circ$ ; для следа длиной 10 мм соответственно  $\pm 5^\circ$  и  $\pm 0,5^\circ$ .

Недостатком репроектора является то, что он не позволяет наблюдать стереоскопическую картину. Этот недостаток будет устранен с помощью стереотрубы, используемой совместно с репроектором. Стереотруба позволит наблюдать стереоизображение через лупу (рис.4).

Применение стереотрубы позволит проектировать на пленку плоскость образованную перекрестием на экране и производить те же самые непосредственные измерения при одновременном наблюдении стереокартин.

В лаборатории также спроектирован компаратор, изготовление которого заканчивается. Принцип действия компаратора основан на проектировании перемещающейся в пространстве марки на пленку. Проектирование марки осуществляется при той же оптической системе, которая использовалась при фотографировании.

Кинематическая схема прибора приведена на рис.5.

Экран с маркой, освещаемый лампами, по оси X и Y передвигается реверсивными электромоторами, по оси Z — вручную, рукояткой 2. Экран балансирован. Для облегчения хода направляющие выполнены с трением качения. Фотоаппарат со стереолупой может поворачиваться в пределах  $\pm 45^\circ$ . Поворот сделан для того, чтобы сократить в некоторых случаях аналитический расчет.

При обработке данных, полученных с пузырьковыми камерами, целесообразно марку поместить в сосуд с жидкостью, имеющей тот же коэффициент преломления, что и среда в камере. Это позволит избежать поправок на коэффициент преломления среды, введение которых аналитическим методом довольно громоздко. Применение такого прибора позволяет на наш взгляд упростить эту операцию.

В дальнейшем предполагается перемещение экрана связать с перфорационным устройством, что позволит легко производить запись координат, а при применении кодированной записи—непосредственно передавать данные в электронную счетную машину.

С места

Ваш репроектор совершенно не дает возможности учитывать коэффициент преломления жидкости.

А.И.Филиппов

В том виде, как выполнен репроектор он не дает возможности автоматически учитывать коэффициент преломления жидкости.

Вопрос

Тогда я не понимаю выгоды применения такого репроектора.

А.И.Филиппов

Он использовался для измерения фотографий, полученных на диффузионной камере. Для измерений фотографий, полученных на пузырьковой камере, судя по тем сведениям, которые у меня есть, он использовался, но поправка на коэффициент преломления среды вводилась аналитически.

Основное назначение репроектора - это непосредственные измерения. Вот в чем преимущество прибора.

Вопрос

Вы говорили относительно сложной стереоскопической системы для наблюдения. Там сколько колен?

А.И.Филиппов

Это не сложная система. Эти колена сделаны для того, чтобы оператор мог находиться около экрана и свободно им оперировать.

Вопрос

Сколько времени нужно для измерения одного пространственного угла?

А.И.Филиппов

В зависимости от трудности случая измерение одного пространственного угла занимает 5-15 минут.

Кладницкая

На репроекторе, о котором рассказывал тов.Филиппов, мы проводили обработку фотографий, полученных в маленькой пропановой пузырьковой камере. По соответствующей формуле можно внести необходимые поправки. Я считаю, что с помощью этого репроектора мерить гораздо быстрее, чем с помощью микроскопа УИМ-21, когда измеряются координаты отдельных точек и проводятся длительные вычисления координат и углов.

Вопрос

Сколько времени вы тратили на обработку?

Кладницкая

Это зависит от качества снимка. Обработка угла занимает минут 15-20.

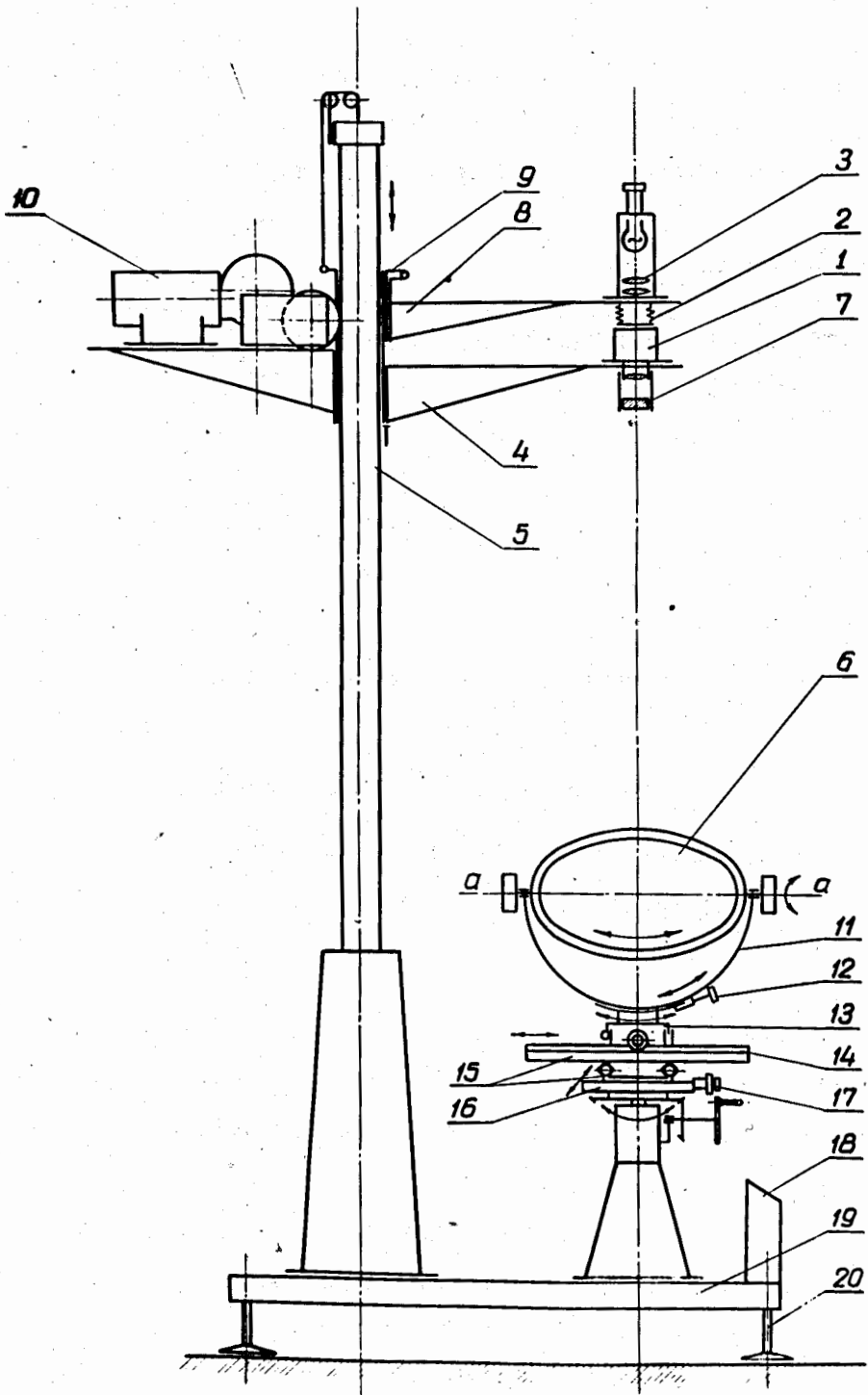


Рис. I



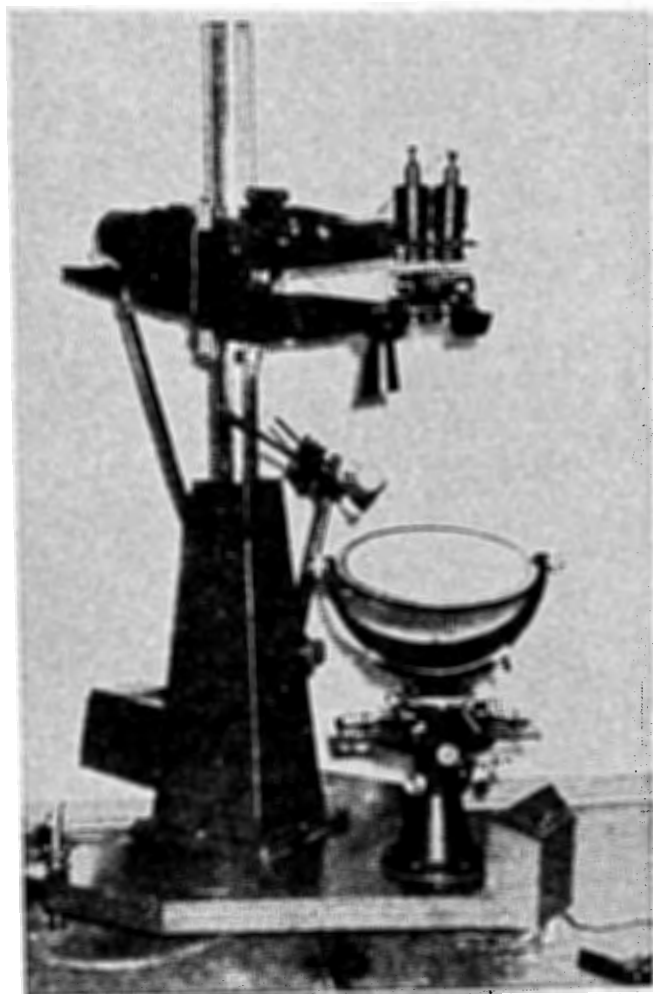


Рис.2.

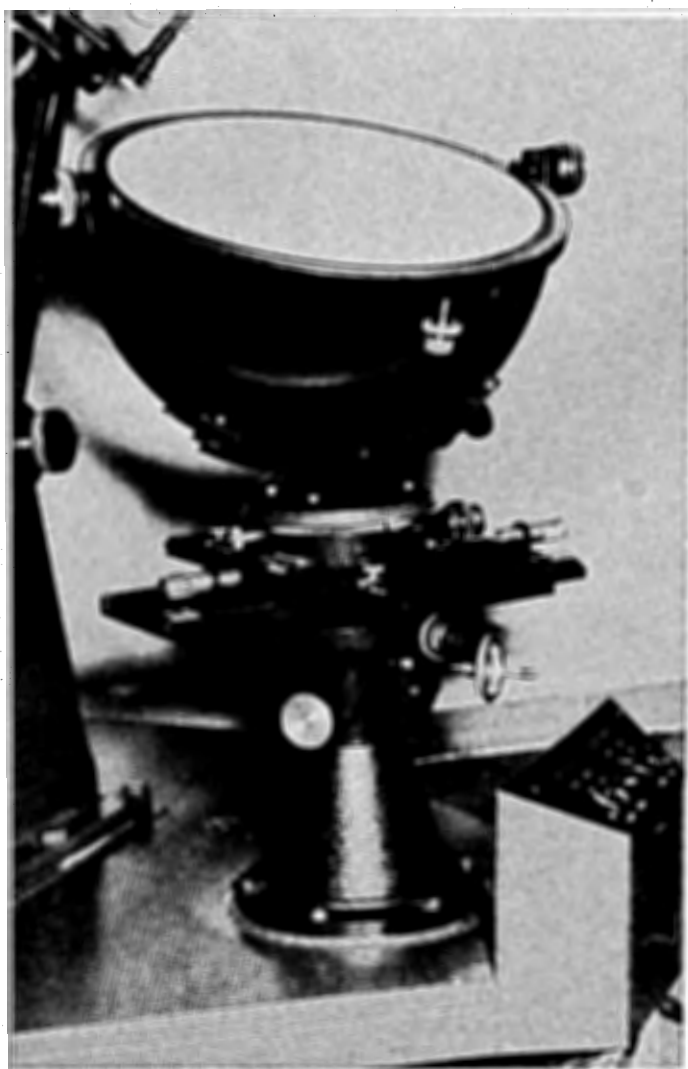


Рис. 3.

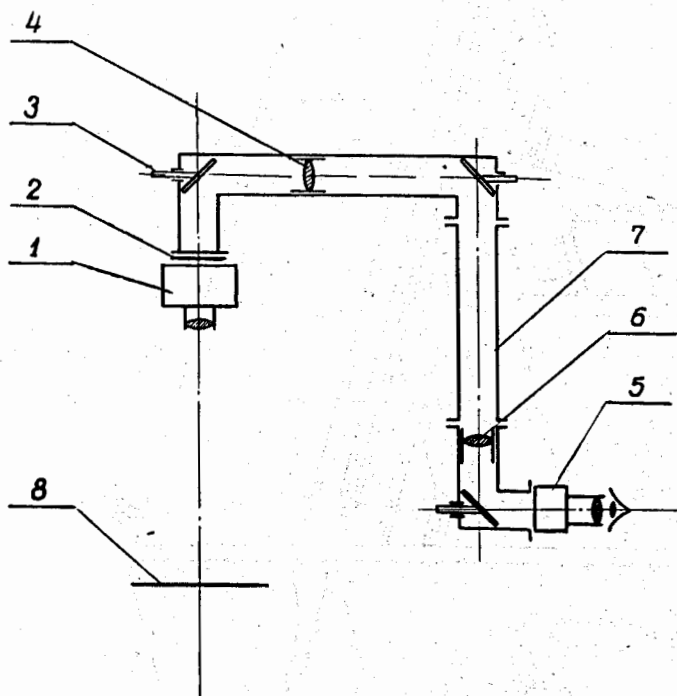


Рис. 4

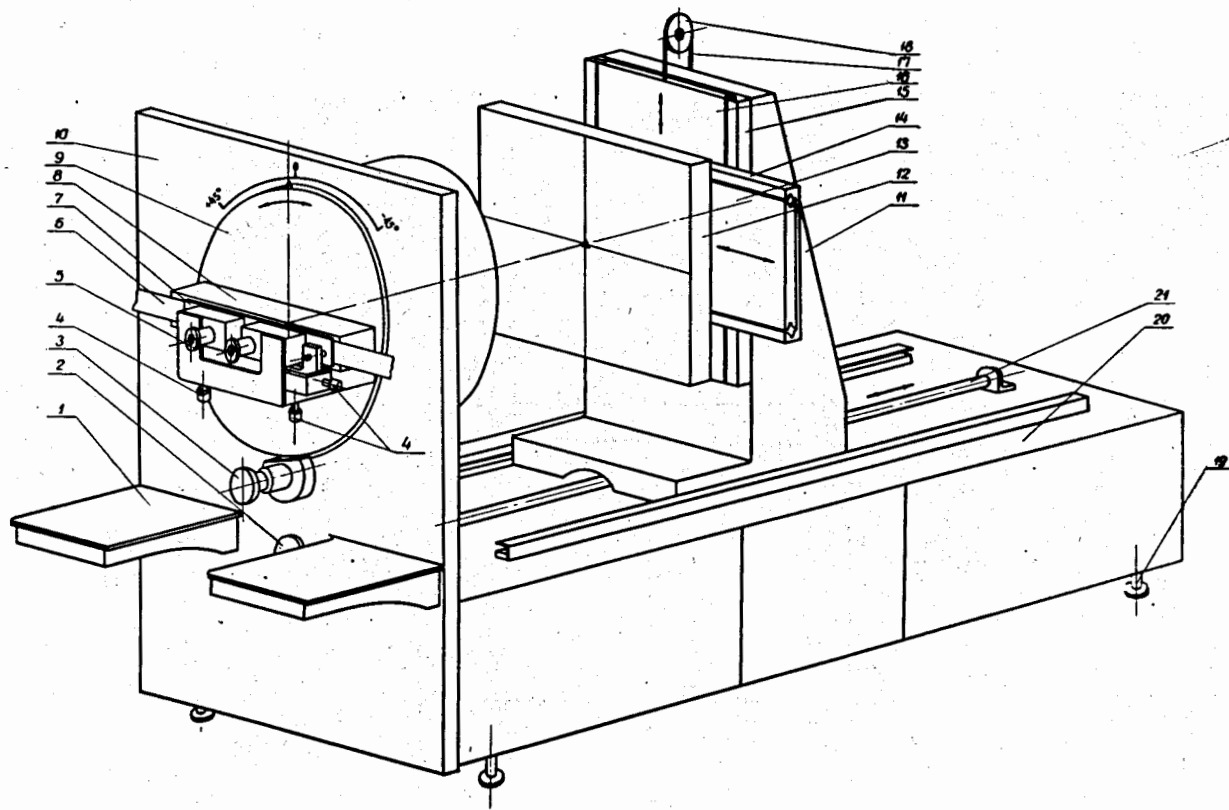


Рис. 5

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СТЕРЕОФОТОГРАФИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ  
ИССЛЕДОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ П-МЕЗОНОВ С ЯДРАМИ  
МЕТОДОМ КАМЕРЫ ВИЛЬСОНА

В.Г.Иванов, Н.И.Петров, В.А.Русаков  
(Объединенный институт ядерных исследований)

При обработке экспериментального материала, полученного с помощью камеры Вильсона, помещенной в пучок заряженных П-мезонов с энергией 200-250 Мэв, определялись полные и дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния, энергетические распределения неупруго рассеянных П-мезонов и протонов отдачи, а также полное сечение всех процессов неупругого взаимодействия.

Весь процесс обработки подразделялся на три этапа:

- 1) Просмотр фотоснимков, в ходе которого производились:
  - а) регистрация случаев ядерного взаимодействия;
  - б) определение полного числа мезонов, прошедших через мишень из исследуемого вещества (помещенную в рабочий объем камер).
- 2) Измерение случаев взаимодействия.
- 3) Определение полных сечений и угловых распределений, включая введение необходимых поправок.

I. ПРОСМОТР

Просмотр фотоснимков производился несколькими наблюдателями независимо друг от друга с помощью стереолупы и репроектора. При этом наблюдаемые случаи ядерного взаимодействия классифицировались следующим образом:

1. Рассеяния (упругие и неупругие).

Отдельно

учитывались неупругие рассеяния, сопровождаемые вылетом одного или нескольких протонов, для определения при дальнейшей обработке доли тех квазиупругих рассеяний, для которых и  $\pi$ -мезон, и протон отдачи вылетают из ядра без последующих соударений.

2. Поглощения  $\pi$ -мезонов, связанные с вылетом вторичных частиц. Здесь отдельно учитывались случаи поглощения  $\pi$ -мезонов, связанные с вылетом двух протонов для выяснения при детальных измерениях доли тех случаев, в которых поглощение обусловлено протон-нейтронной парой.

3. Остановки мезонов в мишени (без видимых лучей вторичных частиц).

4. Неопределенные случаи взаимодействия.

Уточнение идентификации (в частности, различение упругого и неупругого рассеяния) производилось при измерении случаев ядерного взаимодействия.

С целью уменьшения ошибок при подсчете полного потока  $\pi$ -мезонов через мишень при просмотре отбирались только фотоснимки с числом падающих частиц не более 20. При этом на отобранных снимках считались падающие следы, удовлетворяющие следующим требованиям отбора:

1. След имеет достаточную яркость для наблюдения и обработки на репроекторе и компараторе и находится от других следов на расстоянии не менее 3 мм.

2. След пересекает пластинку-мишень на расстоянии не менее 10 мм от ее краев.

3. След падает на пластинку под углом  $90^{\circ} \pm 10^{\circ}$  (при этом увеличение пути проходимогo частицей в мишени по сравнению со случаем нормального падения не превышает 1,5%).

## II. ИЗМЕРЕНИЯ СЛУЧАЕВ ЯДЕРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Для измерений использовались два прибора: стереокомпаратор типа ИЗР-20, изготовленный в Государственном оптическом институте в комплекте со стереофотокамерой, и репроектор. С помощью стереокомпаратора измерялись координаты следов, а затем аналитически определялись все характеристики ядерного взаимодействия.

Однако этому методу свойственны большие недостатки, заключающиеся в большой ошибке измерения кривизны следов (на следе длиной 12-15 см кривизна порядка  $\frac{1}{R} \approx 0,01 \text{ м}^{-1}$  измеряется с точностью 8-10%) и необходимости затраты большого количества времени на непосредственные измерения координат следов и последующие расчеты.

Поэтому основным прибором для обработки явился репроектор. В репроекторе в качестве проекционного устройства использовалась та же фотокамера, которая применялась при фотографировании следов. Экран репроектора имел возвратно-поступательные перемещения в вертикальном направлении, перемещение в горизонтальной плоскости и вращение вокруг оси, расположенной в горизонтальной плоскости.

Между фотокамерой и экраном помещалось толстое стекло, через которое производилось фотографирование следов в камере Вильсона. Отсчетные шкалы прибора позволяли производить измерение вертикального перемещения (координаты  $\lambda$ ) с точностью до 0,1 см и угла поворота экрана с точностью  $1^{\circ}$ .

С помощью репроектора непосредственно (без расчетов) измерялись:

1. Радиус кривизны первичного и вторичного следов  $R_1$  и  $R_2$ .
2. Проекция угла рассеяния (или вылета) на горизонтальную плоскость  $-\varphi$ .
3. Проекция угла рассеяния (или вылета) на вертикальную плоскость (проходящую через измеряемый след) - так называемый глубинный угол  $\alpha$ .
4. Координаты точки взаимодействия:  $l$  - расстояние от края пластинки-мишени, измеряемое по нормали к поверхности пластинки;  $h$  - расстояние точки взаимодействия (по высоте) от некоторой фиксированной точки в камере - репера.
5. Расстояние от фиксированной точки (репера) до фотоаппарата.

Измерение кривизны и углов между следами производились с помощью специально изготовленных шаблонов, на которых были нанесены дуги окружности с радиусами в пределах от 1 см до 5м.

Измерение указанных величин достаточно для определения всех характеристик ядерного взаимодействия:

- а) угла рассеяния (или вылета) -  $\theta$ . Так как падающие следы лежат близко к горизонтальной плоскости (составляя с



ней угол не более  $2-3^{\circ}$ ), то без большой ошибки угол рассеяния можно находить по формуле:

$$\cos \theta = \cos \psi \cdot \cos \alpha.$$

б) азимутального угла -  $\psi$  по формуле:

$$\sin \psi = \frac{\sin \alpha}{\sin \theta};$$

в) импульса частицы  $P$  по формуле:

$$Pc = \frac{300HR}{\cos \alpha};$$

(здесь  $H$ -напряженность магнитного поля).

С помощью данных, полученных на репроекторе, можно ввести поправки на изменение радиуса кривизны за счет усадки пленки и на изменение импульса частицы за счет ионизационного торможения в мишени, а также определить положение точки взаимодействия относительно краев освещенной области.

#### Точность измерения радиусов кривизны и углов

С помощью шаблонов на следе длиной 12-15 см кривизна радиусов 100-120 см и 70-80 см измерялась с точностью 4-5% и 3%, соответственно. Ошибка в определении радиуса кривизны, связанная с наличием небольшой неоднородности магнитного поля, не превышала 2%. Радиус "ложной" кривизны следов, обуславливаемой движением газа в камере, многократным рассеянием и оптическими искажениями, непосредственно измеренный для следов сфотографированных без магнитного поля составляет 25 метров.

Суммарная ошибка в измерении кривизны следов, взятая как средне квадратичная из перечисленных выше ошибок, равна 7%. Соответствующая ошибка в измерении энергии мезонов 230 Мэв равна  $\pm 10\%$ , т.е.  $\pm 23$  Мэв.

Приведенная точность измерения энергии определяла границы разделения случаев упругого и неупругого рассеяния: если сброс энергии при рассеянии был  $< 45$  Мэв, рассеяние считалось упругим; если сброс энергии был больше этой величины, рассеяние считалось неупругим.

Точность измерения горизонтальной проекции угла рассеяния составляла  $1-2^{\circ}$  во всей области углов от 0 до  $180^{\circ}$  и  $1-3^{\circ}$  для глубинного угла. Последняя ошибка возрастает с увеличением глубинного угла.

#### Учет усадки пленки

Пленка "панхром" - I000, применяемая нами для фотографирования, изготавливается на подложке, которая подвержена усадке. По данным наших измерений максимальная величина усадки пленки составляет 0,5%. Одновременно путем измерения диаметров специально сфотографированных кругов и колец было выяснено, что нет разницы в усадке пленки в продольном и поперечном направлениях. При наших условиях фотографирования усадка пленки величиной 0,5% приводила к увеличению расстояния между пленкой и изображением при репроецировании ( по сравнению с расстоянием между пленкой и объектом при фотографировании) на 8%. В такой же пропорции увеличивался размер изображения.

Соответственно этому введение поправки на усадку пленки состояло в умножении измеренных радиусов на величину отношения истинного расстояния от пленки до объекта к расстоянию между пленкой и изображением объекта при репроецировании.

Ввиду равномерной усадки пленки изменений углов между следами, естественно, не должно быть. И действительно, нами не наблюдалась (в пределах ошибок) разница между результатами измерений углов сразу после проявления пленки и спустя один или два года после первых измерений.

### Уточнение идентификации случаев ядерного взаимодействия

В условиях нашего опыта протоны от мезонов, вообще говоря, отличаются визуально по толщине следа и плотности почернения. Действительно, протон с импульсом около 300 Мэв/с имеет  $\beta \approx 0,3$ , для мезонов этого же импульса  $\beta \approx 0,9$ , и поэтому разница в величинах ионизации, производимой этими частицами, велика и доступна для визуального обнаружения.

В тех же случаях, когда по толщине следов и плотности почернения нельзя было определить род частицы (например, в случае очень быстрого протона, идущего на границе освещенной области), помогало измерение радиуса кривизны следа. Если измеренный радиус кривизны следа больше радиуса кривизны следа мезона, то естественно след мог быть только протоном (или другой тяжелой частицей).

### III. ВВЕДЕНИЕ ПОПРАВОК ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ АБСОЛЮТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СЕЧЕНИЙ

#### I. Поправка на примесь в пучке падающих $\bar{K}$ -мезонов $\mu$ -мезонов и электронов

Относительная доля  $\mu$ -мезонов и электронов в пучке определялась обычным методом по кривой поглощения падающих частиц в меди.

Отдельно примесь электронов определилась по числу ливней, наблюдаемых при прохождении пучка падающих частиц через свинцовую пластинку, поставленную в камере вместо мишени.

## 2. Поправка на эффективность наблюдения

Эффективность наблюдения различных случаев ядерного взаимодействия меньше единицы и зависит от глубины освещенной области и толщины пластинки. Часть случаев взаимодействия пропускается из-за того, что вторичные следы выходят из освещенной области еще внутри пластинки; а другая часть - из-за различной "наблюдаемости" взаимодействий с видимыми вторичными следами. Например, "наблюдаемость" рассеяний в плоскости камеры гораздо больше "наблюдаемости" рассеяний вверх и вниз (по отношению к этой плоскости).

Количество пропусков обуславливаемое первой причиной легко вычисляется по глубине освещенной области и толщине пластинки; количество же пропусков по второй причине может быть определено только экспериментально.

### Пример упругого рассеяния

На рис. I приведено распределение упругого рассеяния по азимутальному углу  $\varphi$ . Это распределение не изотропно и имеет провалы в районе углов  $\varphi = 90^\circ$  и  $\varphi = 270^\circ$ . Этот провал объясняется совокупным действием двух рассмотренных выше причин. То, что здесь действует и первая причина, показывает то обстоятельство, что для случаев рассеяния падающих  $\Pi$ -мезонов, расположенных в верхней половине освещенной области,

больше представлены углы  $\varphi$  в районе  $90^\circ$ , чем в районе  $270^\circ$ ; а для случаев рассеяния падающих  $\Pi$ -мезонов, расположенных в нижней половине освещенной области, наблюдается обратная картина. То, что действует и вторая причина, следует из того, что рассчитанная поправка на выход следов из освещенной области внутри пластинки составляет 10-12% и не объясняет всего наблюдаемого провала. Очевидно, что суммарная поправка может быть получена из найденного распределения путем приведения его к изотропному, как это показано на рисунке. Законность этой операции (не говоря об ошибках, могущих произойти из-за недостаточности статистики) не вызывает сомнений, так как не видно никаких физических причин, которые могли бы объяснить наблюдаемый провал при указанных азимутальных углах.

В таблице I приведены величины эффективности наблюдения, рассчитанные для освещенной области глубиной 40 мм при разной толщине пластинки-мишени.

Таблица I.

	5 мм	10 мм	25 мм
0-30°	1,00	0,99	0,94
30-60°	0,90	0,83	0,67
60-90°	0,54	0,43	0,24

Отдельные определения этой поправки необходимы для нахождения количества "мнимых" и истинных остановок.

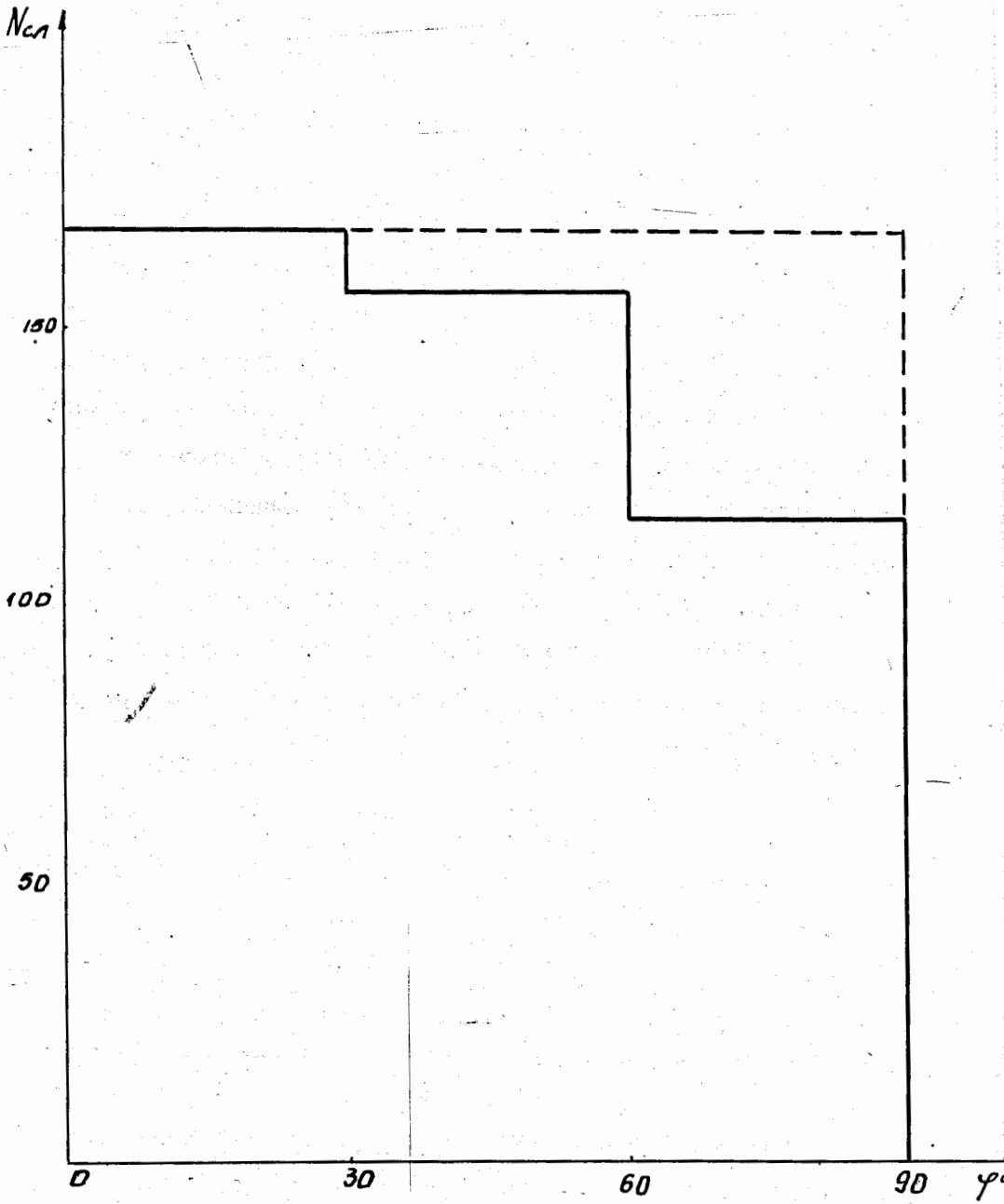


Рис. I

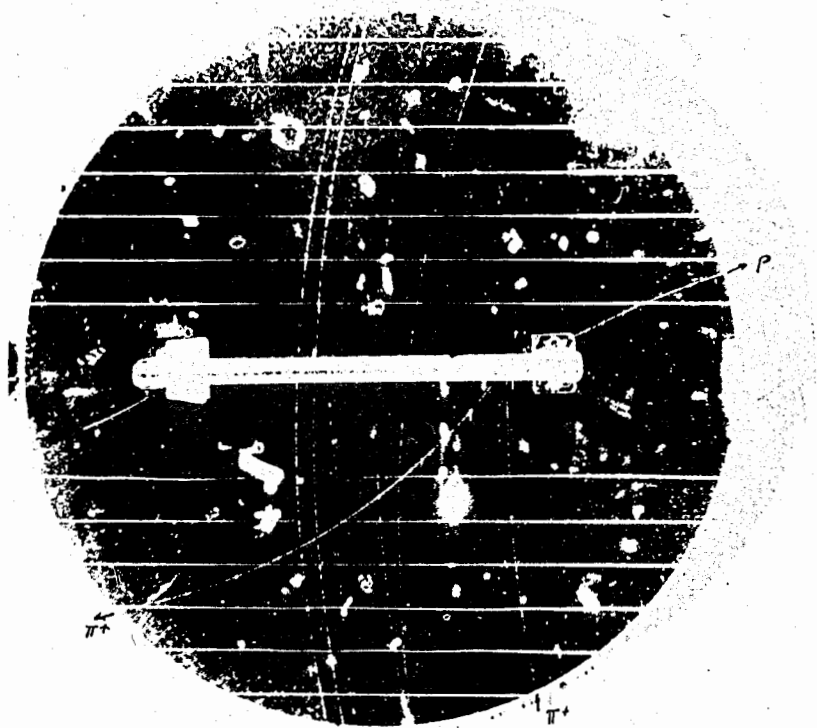


Рис. 2

Квазиупругое рассеяние  $K^+$ -мезона

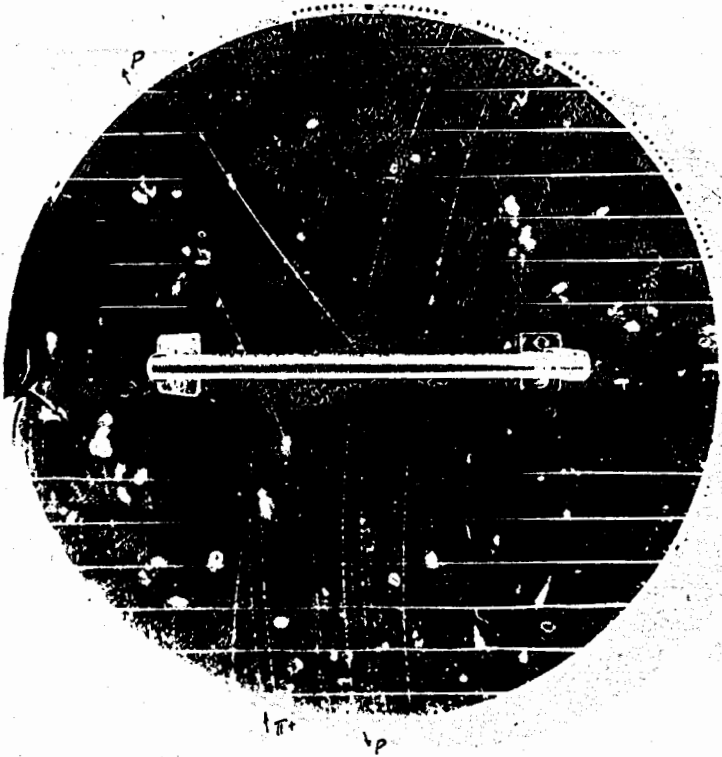


Рис. 3

Поглощение  $K^+$ -мезона дейтоной парой



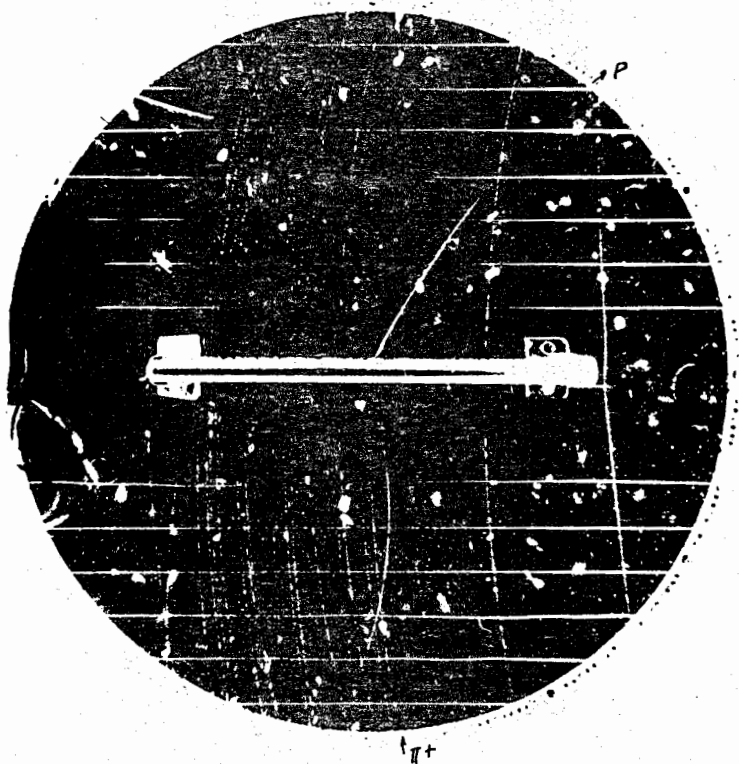


Рис. 4

Звезда с вылетом протона

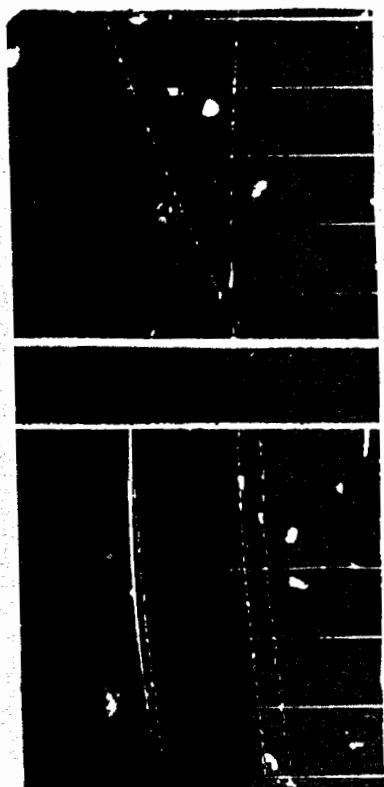


Рис. 5

Упругое рассеяние  $\bar{\kappa}^-$ -мезона. Звезда с вылетом назад протона.

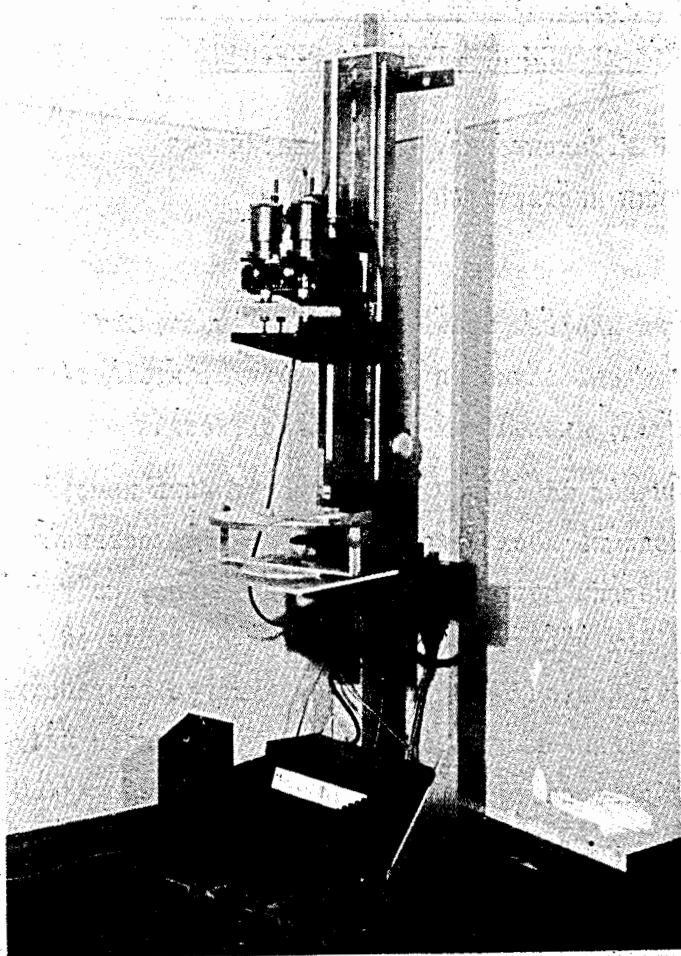


Рис. 6

Репроектор для обработки стереофотографий,  
полученных на камере Вильсона.

ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ ИМПУЛЬСА ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ,  
ГЕНЕРИРУЮЩИХ МЕЗОНЫ ПРИ БОЛЬШИХ ЭНЕРГИЯХ

В.В.Гусева, В.М.Максименко, С.А.Славатинский  
(Физический институт АН СССР)

При исследовании ядерных взаимодействий, вызываемых космическими лучами, очень важной и интересной характеристикой является импульс частиц, вызывающих эти взаимодействия.

Между тем, в обычных камерах Вильсона могут быть измерены импульсы, не превосходящие нескольких  $\text{BeV}/c$ , а косвенные методы определения энергии первичных частиц, например, по угловым распределениям вторичных частиц в силу ряда причин являются неудовлетворительными. Поэтому представляет интерес разработка методов прямого определения импульсов частиц космического излучения, вызывающих ядерные взаимодействия в интервале  $10 - 100 \text{ BeV}/c$

Такая установка, которая позволяла измерять импульсы первичных частиц в указанном интервале и одновременно измерять импульсы вторичных частиц и различные пространственные и угловые характеристики ядерных процессов, была создана на Памирской высокогорной научной станции Физического института АН СССР. Схема установки приведена на рис. I.

В установке имелись две цилиндрические камеры Вильсона диаметром 30 см с глубиной освещенной области 8 см, расположенные одна над другой на расстоянии 102 см. В нижней камере была помещена бериллиевая пластина толщиной  $9,8 \text{ г/см}^2$ . Нижняя камера и большая часть промежутка между камерами находились между полюсами электромагнита СП-29, создающего поле в 11000 эрстед. Камеры фотографировались стереофотоаппаратами. Количество вещества над установкой не превышало  $20 \text{ г/см}^2 \text{ Ae}$ . Поэтому ядерно-активные частицы, регистрируемые установкой были, в основном, протонами. Измерение их импульса определяло следовательно и энергию. Импульсы вторичных частиц, генерированных в мишени, могли быть определены обычным способом по кривизне их следов в нижней камере. Импульс первичных частиц мог быть измерен по углу поворота частицы в поле и по величине отклонения частицы от прямолинейной траектории<sup>x)</sup>. Мы использовали второй способ, так как точность измерения углов наклона следа вблизи мишени была недостаточно высокой из-за малой длины следов. Этот способ измерений импульса потребовал большой точности юстировки обеих камер друг относительно друга. Юстировка была произведена по фотографиям тонких капроновых нитей, проходящих через рабочие объемы обеих камер. Фотографирование камер было стереоскопическим. Пленка с фотографиями следов

---

x) Метод двух камер Вильсона был ранее использован в работе (I) для определения спектра импульсов  $\mu$ -мезонов. Максимально измеримый импульс в этой работе был равен  $100 \frac{\text{БэВ}}{c}$ .

частиц обрабатывалась на микроскопе УИМ-2Г. Координаты  $x, y$  капель следов в плоскости перпендикулярной направлению фотографирования определялись с ошибкой  $\pm 0,1$  мм. Ошибка в определении координаты  $z$  (по направлению фотографирования) составляла  $\pm 0,3$  мм и  $\pm 1$  мм для верхней и нижней камер соответственно.

Пользуясь методом наименьших квадратов по известным координатам капель следа мы определяли прямолинейную траекторию частицы в верхней камере и продолжали ее до входа в мишень. Разность между координатами точек пересеченного следа частицы и продолжением прямолинейного участка этого следа с мишенью в плоскости перпендикулярной направлению фотографирования определяла величину отклонения  $d$  - частицы магнитным полем. Аналогичная разность " $h$ ", взятая в направлении фотографирования, т.е. вдоль направления поля, позволяла однозначно судить, принадлежат ли исследуемые следы одной и той же частице.

Связь между величиной отклонения частицы магнитным полем  $d$  и ее импульсом была найдена аналитически путем интегрирования уравнения движения частицы при заданных начальных условиях. Для частиц с импульсом, большим 3 Бэв/с и имеющим угол наклона к вертикали, меньший  $20^\circ$ , была найдена следующая зависимость:

$$pc = \frac{78}{d} \quad (1) \quad \text{где } pc \text{ дано в Бэв и } d \text{ - в мм.}$$

Основным вопросом методической работы являлось определение точности измерений импульса. С этой целью мы фотографировали следы нескольких десятков  $\mu$ -мезонов, проходивших через обе

камеры. Группа счетчиков, управлявшая работой камер, регистрировала мезоны с пробегом, большим 60 см свинца.

По каждой фотографии следов мезонов были определены величины  $d$  и  $h$ . Измерения показали, что в величине  $h$  имеется небольшой разброс вокруг нулевого значения. К появлению этого разброса приводили две основные причины - кулоновское рассеяние частиц в стенках камер (главным образом в стенках верхней камеры) и погрешности измерений при определении положения следов в объеме камер. Искажения следов конвекционными токами в газе камер не могли вызвать этого разброса, так как, во-первых, искажения были невелики (радиус ложной кривизны равнялся 14 м), и, во-вторых, при аппроксимировании следа прямолинейной траекторией ее направление не могло заметно отличаться от направления движения частицы.

Величина средне-квадратичного разброса в  $h$  была равна 4,5 мм. Для  $\mu$ -мезонов, зарегистрированных в отсутствие магнитного поля, разброс в величине  $d$ , также оказался равным 4,5 мм. Это совпадение указывало на то, что основной причиной разброса является кулоновское рассеяние частиц.

Для того, чтобы определить величину ошибки в  $d$  и  $h$ , связанной только с погрешностями измерений, были обработаны фотографии следов  $\mu$ -мезонов, отклоненных магнитным полем. Величина импульса мезонов определялась по формуле ( I ) и независимо - из измерений кривизны их следов под мишенью в нижней камере. Сопоставить оба метода измерений оказалось возможным лишь для наиболее "медленных" мезонов (  $\rho c < 2B\beta$  ), так как предельно измеримый импульс, определенный по кривизне следов, был равен  $4 \frac{B\beta}{c}$ .

Сопоставление полученных значений импульсов  $\mu$ -мезонов показало, что оба метода в пределах ошибок измерений дали одинаковый результат.

Для мезонов с большими импульсами ( $pc \leq 2$  Бэв) был определен разброс величины  $h$ . Экспериментальные данные о величинах  $d$  и  $h$  приведены в табл. I

Таблица I.

$d$ в см.	Импульс в Бэв/с	Величина средне-квадрат. разброса в $h$ в мм			Максимально измеримый импульс в Бэв/с
		Эксперимент.	Рассеяние	Погрешн. измерения	
1,6 + 3,9	2, + 5	3,2	2,8	1,8	43

Величина средне-квадратичного разброса, обусловленного рассеянием, приведенная в табл. I, была вычислена по значениям импульсов мезонов и толщины вещества, в котором происходило рассеяние. Величина разброса, связанного с погрешностями измерений, была найдена как корень квадратный из разности квадратов величин "экспериментального разброса" и разброса, вызванного рассеянием. Наконец, значение максимально измеримого импульса получено по величине разброса в  $h$ . При этом предполагалось, что разброс в величинах  $d$  и  $h$ , обусловленный только погрешностями измерений, одинаков. В действительности, однако, точность в определении положения следа в плоскости камер приблизительно в 3 раза выше, чем точность в определении положения



по глубине камеры. Поэтому естественно ожидать, что величина средне-квадратичного разброса в  $d$  также приблизительно в 3 раза меньше, чем для  $h$ , т.е. равна 0,6 мм. Такая величина разброса соответствует максимально измеримому импульсу, равному 130 Бэв/с. Получение экспериментальных данных о разбросе в  $d$  для мезонов со столь большими импульсами затруднительно, так как потребовало бы большого количества времени.

Полученные нами значения максимально-измеримого импульса близки к тем, которые получены в работе (I), проведенной методом двух камер Вильсона. Они почти на порядок величины превышают предельно измеримые импульсы, измеряемые обычно с помощью одной камеры Вильсона в магнитном поле, и тем более, определяемые методом фотозмульсий.

Дальнейшее развитие этой методики с целью повышения точности измерений импульса возможно путем использования камер с большими размерами. Применение таких камер позволит увеличить длину наблюдаемых следов, а, следовательно, и точности измерений их положения в объеме камер.

Существенным недостатком нашей установки являлась небольшая "светосила" к регистрации протонов большой энергии. Эффективность регистрации таких протонов двумя камерами была почти в 10 раз ниже, чем одной нижней камерой. Проведенная работа показывает, что метод двух камер Вильсона может быть применен в исследованиях ядерных процессов большой энергии,

вызываемых космическими лучами. Иллюстрацией применения этого метода является анализ нескольких случаев генерации мезонов протонами, описанный нами в работе (2).

### Л и т е р а т у р а

1. D.A.Claser, В.Намерmesh and G.Safonov  
Phys. Rev., 80, 625, 1950.
2. Н.Г.Биргер, В.В.Гусева, К.А.Котельников, В.М.Максименко,  
С.В.Рябиков, С.А.Славатинский, Г.М.Стажков. ЖЭТФ, том 31,  
вып.6 (12), стр.982, 1956.

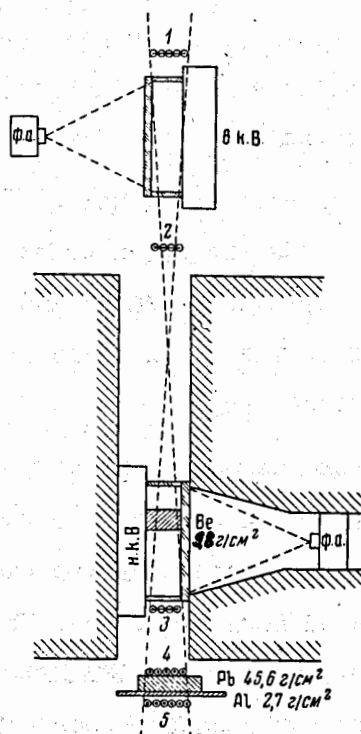


Рис. 1. Схема установки: в. к. В.— верхняя камера Вильсона; н. к. В.— нижняя камера Вильсона; ф. а.— фотоаппарат

О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ИМПУЛЬСА ЧАСТИЦ В НЕБОЛЬШОЙ  
ВЕРТИКАЛЬНОЙ КАМЕРЕ ВИЛЬСОНА

Л.Т.Барадзей, Д.А.Сморозин, М.В.Соловьев, Б.В.Толкачев,  
З.И.Тулинова

(Физический институт АН СССР)

Для определения импульса частицы определяется  $\frac{1}{\rho}$  - кривизна траектории в известном магнитном поле.

На рис. I. приведена конфигурация полюсных наконечников и распределение магнитного поля в зазоре электромагнита, где помещалась цилиндрическая камера диаметром 20 см и глубиной 6 см. Неоднородность поля в объеме камеры не превышала 3%. Магнитопровод находился в области насыщения, и колебания поля во времени не превышали 0,8%. Поэтому точность измерения импульса определялась точностью измерения кривизны траектории частицы по фотографии следа в камере.

Существенно различны по своему происхождению два основных вида погрешностей.

I) Диффузионная погрешность, обусловленная хаотическим смещением центров проявленных зерен следа от траектории частицы.

Практически основными причинами такого смещения являются:

- а) диффузия ионов до образования на них капель;
- б) конечный размер зерен фотоэмульсии;
- в) ошибки в измерении координат центров изображений капель.

2. Турбулентная погрешность, связанная со смещением участков следа от положения траектории частицы движениями газа в камере.

В наших опытах камера наполнялась смесью аргона (50%) и гелия (50%) до давления 2 атм. Время диффузии ионов ( $\tau$ ) составляло 0,005 сек.

Для уменьшения значения диффузионной погрешности кривизна траектории следа измерялась по координатам большого числа точек. При этом кривизна рассчитывалась по формуле:

$$\frac{1}{R} = 2 \frac{(\bar{x}^2 \bar{y} - \bar{x}^2 \bar{y}) + \alpha (\bar{x}^2 \bar{x} - \bar{x}^3)}{\bar{x}^4 - \bar{x}^2}, \quad (2) \text{ где}$$

член с коэффициентом  $\alpha$  учитывает неточность установки следа.

Найденное значение  $\frac{1}{R}$  имеет наименьшее значение дисперсии (I):

$$\sigma_d^2 = \frac{4}{n-3} \left[ \frac{\bar{y}^2 - \bar{y}^2}{\bar{x}^4 - \bar{x}^2} - \frac{1}{4R^2} \right] \quad (3)$$

Величина дисперсии связана со средне-квадратичным расстоянием точек от траектории следа  $d$  - соотношением:

$$\sigma_d^2 = \frac{d^2}{n-3} \cdot \left[ \frac{4}{\bar{x}^4 - \bar{x}^2} \right] \quad (4)$$

Определенное по этой формуле  $d$  для следов, зарегистрированных с данной камерой, оказалось равным 0,04 мм, что значительно меньше средне-квадратичного смещения ионов вследствие диффузии (0,2 мм)

Это различие свидетельствует о том, что в наших условиях фотографирования проявленные зерна не представляют собой изображения капель, выросших на отдельных ионах.

Применяемые высоко-чувствительные эмульсии И-10-800 и "панхром высшей чувствительности" имели размер зерна в наших условиях экспозиции и проявления контрастным проявителем около 20-30 микрон, что приводит к смещениям на пленке центров сфотографированных капель на  $5 - 10 \mu$  от действительного фотографического изображения их. Это смещение дает заметный вклад в величину средне-квадратичного смещения  $d$  и объясняет слабую зависимость  $d$  от времени диффузии ионов. (При изменении  $\tau_i$  от 5 до 15 миллисекунд  $d$  изменяется от  $0,040 \pm 0,002$  до  $0,047 \pm 0,003$ ).

Зависимость  $d$  от диаметра изображений капель показывает, что наименее смещенными оказались изображения капель с диаметром на пленке от 40 до 60 микрон.

Практически, на следе длиной около 16 см измерялись координаты примерно 20 точек, что приводило к величине  $\zeta_d = 0,013 \text{ м}^{-1}$ .

Расчет показывает, что если значение "ложной" кривизны следов в камере определяется диффузионной погрешностью и погрешностью вследствие рассеяния, то это значение для следов проникающих частиц с импульсом  $10^9$  эв/с, регистрируемых в нашей камере, составляет около  $0,01 \text{ м}^{-1}$ .

Экспериментально определенное значение кривизны следов проникающих частиц без магнитного поля превосходит это значение, что указывает на то, что в нашем случае значительную роль играет "турбулентная погрешность", связанная со смещением участков следа от положения траектории частицы движением газа в камере.

На рис.2 приведен схематический разрез камеры с резиновой диафрагмой (конструкция инженера ФИАН-Новикова А.Г.), применявшаяся в нашей лаборатории для исследования электронно-ядерных ливней. Однородность движения диафрагмы осуществлялась подбором сечений отверстий пластины, на которую падала диафрагма при расширении. Полное время расширения камеры составило 5-6 миллисекунд, время падения диафрагмы-3-4 миллисекунды; осциллограмма показывает движение (рис.3) различных участков диафрагмы. Время "затяжки" вспышки света импульсной ксеноновой лампы ( $\tau_2$ )= 60 млсек.

Промежуток времени между двумя последовательными расширениями камеры Вильсона составлял в среднем 75 сек.

Было найдено, что основные искажения следов происходят за время до завершения расширения камеры, что можно видеть из следующей таблицы, где приведено значение "ложной кривизны" для следов  $\mu$ -мезонов, полученных в различных условиях.

Так как дальнейшее уменьшение времени расширения представляло

	4	II	III
	$\tau_1=0,022$ сек	$\tau_1= 0,005$ сек	$\tau_1= 0,005$ сек
	$\tau_2=0,070$ сек	$\tau_2= 0,070$ сек	$\tau_2= 0,035$ сек
$\sqrt{\Delta \frac{z^2}{p}}$	$0,087 \pm 0,008$	$0,061 \pm 0,005$	$0,052 \pm 0,005$

значительные трудности, то было обращено большое внимание на уменьшение скоростей конвекционных движений газа в камере путем стабилизации температуры.

На рис. 4 приведена схема термостатирования аппаратуры.

В наших опытах электромагнит, в межполюсном пространстве которого помещалась камера, имел систему жидкостного охлаждения.

Камера была изолирована от влияния температуры наружного воздуха кожухом с малой теплопроводностью. Окончательная стабилизация температуры камеры достигалась прокачкой воды из термостата по каналам в металлических частях камеры. Термостат поддерживал температуру воды постоянной с точностью до  $0,1^{\circ}$ . Циркулирующая вода из термостата стабилизировала температуру железа в месте соприкосновения камеры с задним башмаком, а также температуру частично помещающегося в кожухе камеры переднего башмака, через отверстие в котором производилось фотографирование.

Испытания такой системы показали, что изменения температуры воздуха, окружающего камеру, на  $2-3^{\circ}$  практически не увеличивали значения "ложной" кривизны. С другой стороны, изменения температуры воды в термостате на  $0,3-0,5^{\circ}$  приводили к появлению заметных искажений, которые исчезали только после  $1,5-2$  часов работы.

Следует заметить, что в процессе работы в кожухе камеры по вертикали устанавливался положительный градиент температур (в нашем случае разница температур в кожухе непосредственно над камерой и под ней составляла около  $1^{\circ}$ ), что делало равновесие газа в камере более устойчивым.

На рис.5 приведено распределение "ложных" кривизн контрольных следов проникающих частиц, зарегистрированных

в камере без магнитного поля во время полетов самолета. Это распределение можно аппроксимировать распределением Гаусса со значением дисперсии  $\frac{T}{\rho} = 0,029 \text{ м}^{-1}$ . При уменьшении длины следа до 7 см значение  $\frac{T}{\rho}$  возрастает до  $0,054 \text{ м}^{-1}$  и полностью объясняется увеличением диффузионной погрешности при уменьшении длины.

Если определить максимально-измеримый импульс  $P_{\text{max}}$ , как такой импульс, для которого магнитная кривизна равна вероятной ошибке в измерении кривизны, то в нашей камере величина этого импульса составила  $\sim 12 \cdot 10^9 \text{ эв/с}$ .



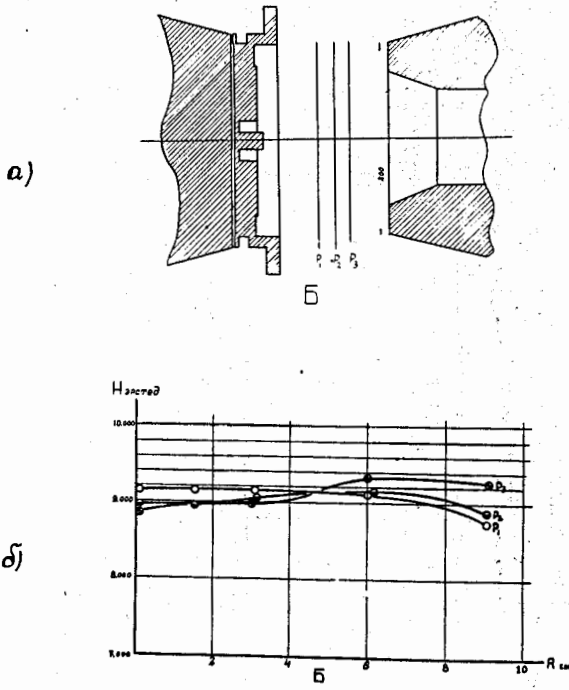


Рис. I. а) конфигурация зазора электромагнита  
б) распределение напряженности магнитного поля в зазоре электромагнита.

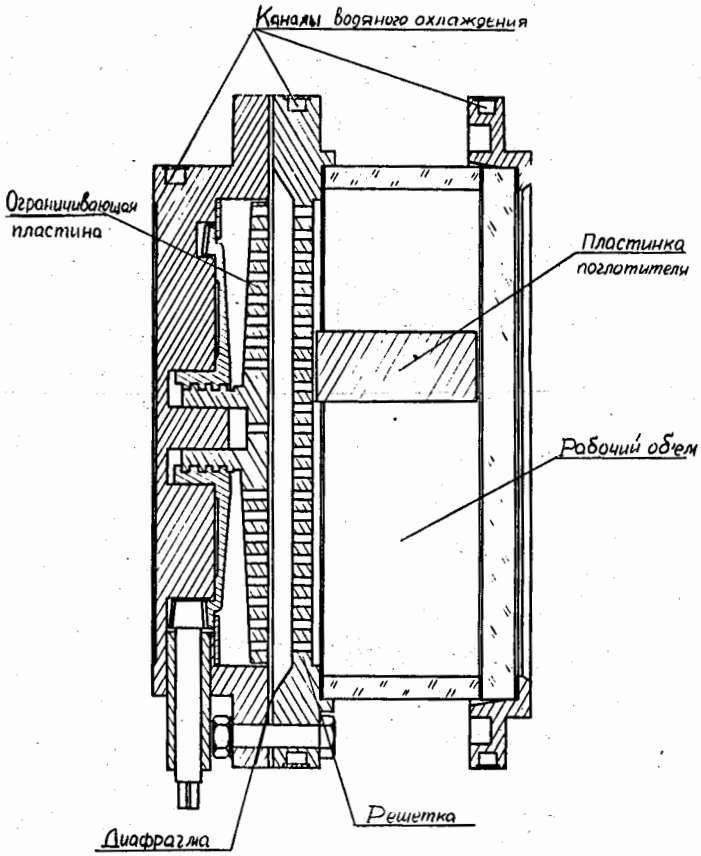


Рис.2. Схематический разрез камеры с резиновой диафрагмой.

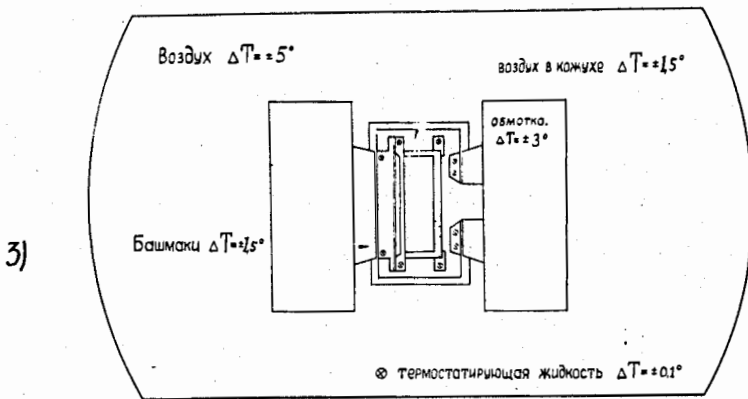
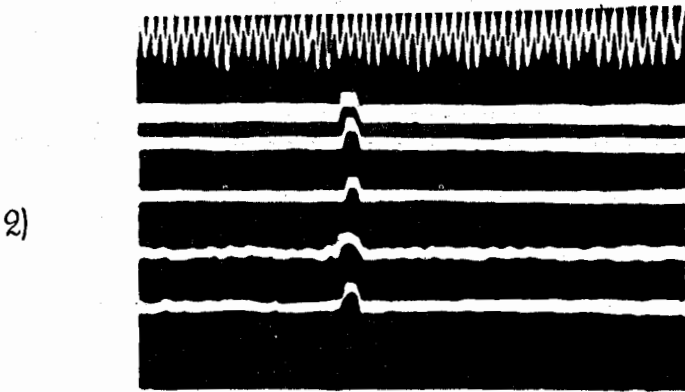


Рис.3. Осциллограмма движения диафрагмы камеры

Начало выброса соответствует отрыву диафрагмы от решетки камеры, конец - удару об ограничивающую пластину. Вверху - калибровочные метки.  
 $T = 2 \cdot 10^{-3}$  сек.

Рис.4. Схема системы термостатирования камеры.

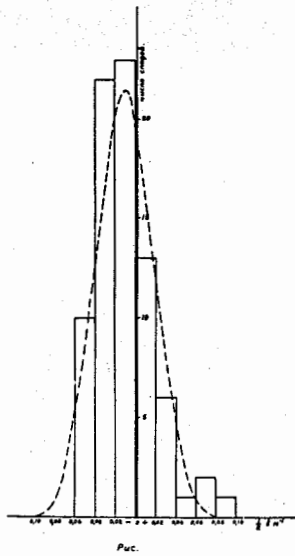


Рис.5. Распределение "ложных" кривизн следов проникающих частиц в камере Вильсона.

ИЗМЕРЕНИЕ ИОНИЗАЦИИ ЧАСТИЦ МЕТОДОМ  
ОТНОСИТЕЛЬНОГО ФОТОМЕТРИРОВАНИЯ ФОТОГРАФИЙ СЛЕДОВ

В.И.Володук, В.В.Кузнецов, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов  
и Ю.А.Щербаков

(Объединенный институт ядерных исследований)

В в е д е н и е

В конденсационных камерах, в которых идея самой регистрации следов частиц основана на наблюдении колонки ионов, образуемых на своем пути ионизирующей частицей, всегда имеется принципиальная возможность определения ионизации путем измерения тех или иных характеристик фотографии следа, являющихся функцией ионизации. и поэтому имеется дополнительная возможность получения информации о скорости частиц.

Существует несколько способов определения ионизации: счет абсолютного числа капелек, определение средней длины просветов и среднего числа просветов между сгустками капель, измерение ширины следа и, наконец, фотометрирование фотографий следов. Последний способ является, пожалуй, одним из

наиболее объективных и удобных. Однако следует заметить, что определение ионизации по абсолютному интегральному почернению, получаемому в результате фотометрирования, связано с необходимостью учета значительного числа различных факторов, что не всегда оказывается возможным. Положение сильно упрощается, когда наряду со следом частицы неизвестной ионизации на ту же самую пленку при тех же условиях освещения фотографируется след частицы, ионизация которой известна. Отношение интегральных почернений фотографий этих следов с хорошей точностью будет функцией только ионизации первой частицы. Вид этой зависимости может быть найден путем соответствующей градуировки. Такие условия реализуются при работе камер в достаточно монохроматичных пучках частиц, получаемых с помощью ускорителей. Из литературы (Бьёрнерудф, Буттерворт, Калдвел и др., Федоров) также известны попытки измерения ионизации частиц методом относительного фотометрирования в космических лучах, где для сравнения использовалось почернение следа проникающей релятивистской частицы.

Ниже описывается методика измерения ионизации частиц путем относительного фотометрирования фотографий следов, полученных в диффузионной камере, работающей в пучках частиц от синхротрона.

### 1. Аппаратура

Для фотометрирования применялся специально спроектированный прибор с подвижной целью и регистрацией при помощи фотоумножителя ФЭУ-19. Впоследствии для этой цели использовался микрофотометр МФ-4 с автоматической записью фотограмм.

Измерение почернения фотографии следа может производиться двумя способами: дифференциальным и интегральным. В первом случае для фотометрирования используется узкая щель, во втором случае - широкая щель. Интегральное почернение при работе с узкой щелью определяется площадью фотограммы; при работе с широкой щелью почернение определяется непосредственно амплитудой фотограммы и поэтому обработка фотограммы несколько проще. С этой точки зрения, казалось бы, удобнее пользоваться интегральным способом. Однако в условиях значительного капельного фона, который имеет место в диффузионных камерах, при работе с широкой щелью возникают значительные статистические погрешности в определении среднего уровня фона. Так, при ширине щели 1,4 мм среднеквадратичная ошибка в определении амплитуды фотограммы, связанная с флюктуациями фона составляет около 10%. Переход к узкой щели уменьшает эту ошибку в 2-3 раза.

При дифференциальном способе определения почернения для уменьшения указанной погрешности, а также для улучшения точности воспроизведения фотограммы желательно иметь наименьшую ширину щели. Предел уменьшения ширины щели возникает в связи с заметной ролью дифракции на краях щели, в силу чего показания прибора выходят из линейной области характеристики прибора. Принимая во внимание эти обстоятельства, ширина щели была выбрана равной 0,1 мм при 12-кратном увеличении изображения.

Длина щели выбиралась по возможности большей. Однако, в силу помех, создаваемых следами фоновых частиц и частиц из пучка, приходилось ограничиваться длиной 4-10 мм.

### III. Градуировка

В общем случае отношение почернений является некоторой функцией отношения ионизаций. Вид этой функции можно установить путем измерений почернения от частиц известной ионизации. В качестве таких частиц использовались протоны, вылетающие при упругом рассеянии  $\pi$ -мезонов ( $E_{\pi} = 330$  Мэв) и протонов ( $E_p = 660$  Мэв) на протонах. При этом отбирались те случаи, плоскости рассеяния которых были близкими к горизонтальным. Сравнение велось со следами частиц из первичного пучка. Как правило, можно было пользоваться следом частицы, претерпевшей рассеяние. Градуировочная кривая приведена на рис. I. В области ионизации от I до 3 (в единицах минимальной ионизации) экспериментальные точки хорошо аппроксимируются прямой с угловым коэффициентом  $n = 1$ . Начиная с трехкратной ионизации, кривая идет вверх и стремится к насыщению. Отступление от линейности в этой области объясняется прежде всего перекрытием изображений капелек, эффект от которых возрастает с ростом ионизации.

### IV. Ошибки измерения

Предполагая, что ошибка в измерении почернения пропорциональна корню квадратному из почернения и учитывая, что  $n = 1$  для области ионизации до трехкратной, можно показать справедливость следующего соотношения:

$$\delta Y = \delta T = \kappa \delta T_0 \sqrt{\frac{T}{T_0} + 1} \quad (1)$$

Здесь  $\delta Y$  - ошибка в измерении ионизации,  
 $\delta T$  - ошибка в измерении отношения почернений,  
 $T$  - отношение почернений,  
 $\kappa$  - коэффициент пропорциональности.



Ошибка в измерении отношения почернений эталонного следа вместе с коэффициентом  $k$  была найдена экспериментально. Для этой цели были использованы результаты около 100 измерений отношения почернений следов начальных частиц друг к другу. Кривая распределения ошибок показана на рис.2. Из нее видно, что для частиц с ионизацией близкой к минимальной, ошибки в измерении ионизации составляют примерно 15%. Ошибки, с которыми экспериментальные точки нанесены на рис.1, вычислены на основании этого результата и соотношения (1).

Описанная методика измерения ионизации успешно применялась нами в течение ряда лет при идентификации различных случаев взаимодействия  $\pi^+$ -мезонов и протонов с ядрами гелия.

#### Д и с к у с с и я

Ю.А.СМОРОДИН

Какова длина фотометрируемого участка следа и, в связи с этим, какую роль играла статистическая ошибка?

Р.М.СУЛЯЕВ

Длина фотометрируемого участка следа составляла 3-10 мм. Статистическая ошибка, связанная с флуктуациями первичной ионизации, для релятивистских частиц составляла 5%.

Ю.А.СМОРОДИН

Как изменяется почернение в зависимости от высоты, на которой проходит частица?

Р.М.СУЛЯЕВ

Следы частиц в середине чувствительного слоя в области, высотой около 3 см, дают приблизительно одинаковое почернение. Уменьшение почернения на краях, вероятно, связано с условиями освещения.

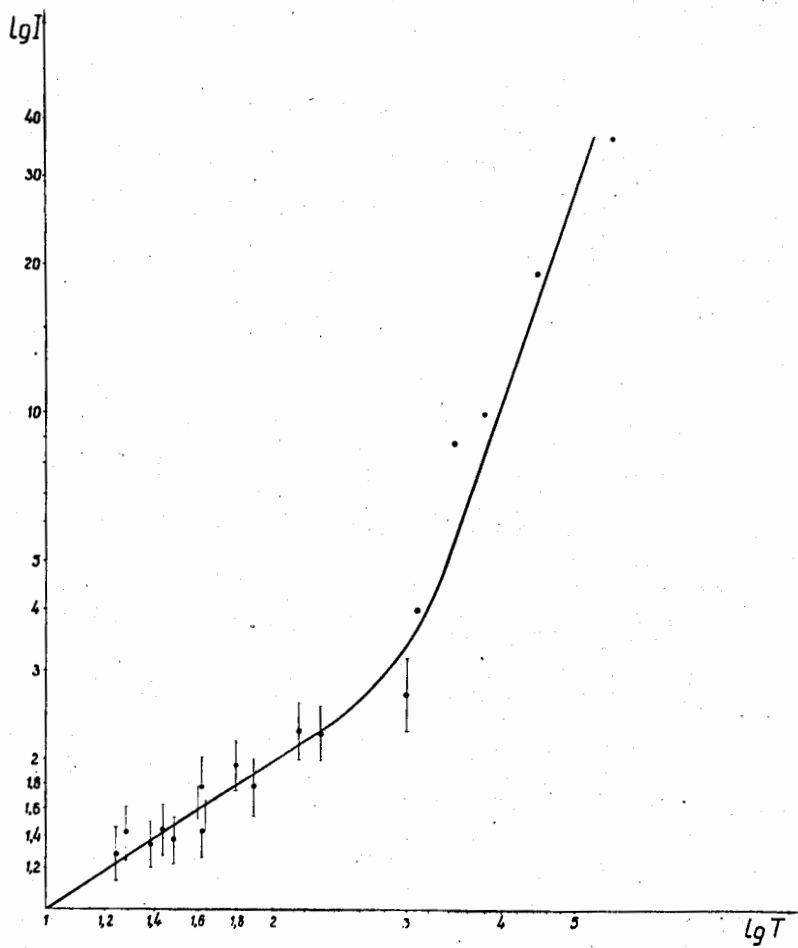


Рис. I

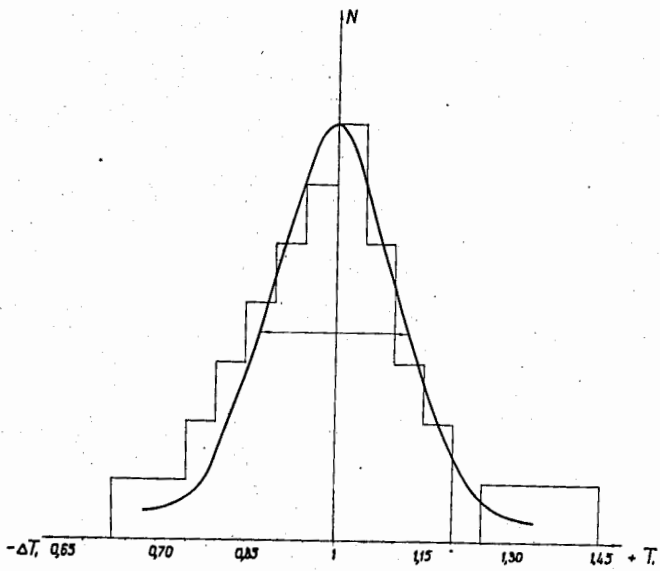


Рис. 2

ИЗМЕРЕНИЕ ИОНИЗАЦИИ МЕТОДОМ ФОТОМЕТРИРОВАНИЯ

Рябиков С.В.

(Физический институт АН СССР )

Одновременное измерение ионизации и импульса наталкивается на существенное затруднение, связанное с тем, что измерение ионизации требует диффузии ионов на достаточно большие расстояния, для того чтобы изображения капель на пленке надежно разрешались. Это делает невозможным точное измерение импульса.

Фотометрический метод позволяет разрешить это противоречие, так как он позволяет измерять ионизацию следов, состоящих из неразрешенных на пленке изображений капель. Сущность этого метода основана на том, что почернение  $F$  изображения следа на пленке однозначно связано с его ионизацией.

Нами была проведена методическая работа, целью которой являлось измерение ионизации фотометрическим методом с использованием отечественного микрофотометра и кинопленки.

Для измерения почернений использовался регистрирующий микрофотометр МФ-4, измерения на котором отличаются простотой и удобством.

Ниже приведены технические данные установки, на которой были получены фотографии, обрабатываемые в дальнейшем на микрофотометре.

I. Камера

Вильсона

- 1) Диаметр 300 мм
- 2) Глубина 100 мм

II. Объектив

"Гелиос - 42"

- 1) Фокусное расстояние 27 мм
- 2) Разрешающая способность 75  $\frac{\text{Лин}}{\text{мм}}$

III. Киноплёнка

Аэрофото Панхром  
10-800

- 1. Чувствительность 1100 ед.ГОСТ
- 2. Разрешающая способность 65  $\frac{\text{Лин}}{\text{мм}}$

IV. Наполнение

Аргон. Полное давление  
2 атм.

V. Конденсирующая смесь

$C_2H_5OH + H_2O$  в  
отношении 3 : 1

Измерения велись в 2-х направлениях:

1) Сравнение фотометрического метода с методом счета капель и изучение влияния масштаба фотографирования в том и другом случае.

2) Определение массы частиц с использованием фотометрического метода определения ионизации.

Метод подсчета капель на единице длины следа позволяет измерять как абсолютную так и относительную ионизации. Действительно, абсолютную ионизацию можно определить из соотношения

$$n = \varepsilon \cdot J$$

где  $J$  - абс. ионизация

$\varepsilon$  - эффективность конденсации

Величина  $\varepsilon$  может изменяться от расширения к расширению, что связано с утечкой газа из рабочего объема камеры, с изменением состава конденсирующей смеси (в основном - диффузия спирта), нестабильностью температуры. Если нет надежного контроля за режимом работы камеры, целесообразнее измерять относительную ионизацию

$$\frac{J}{J_{\min}} = V = \frac{n}{n_{\min}}$$

И в том и в другом случае мы имеем линейную зависимость  $n$  от  $J$ .

В случае неразрешенных на пленке изображений отдельных капель, когда применяется фотометрический метод, зависимость между почернением и ионизацией носит более сложный характер и, как уже упоминалось, имеет вид

$$\frac{J}{J_{\min}} = V = \left( \frac{f}{f_{\min}} \right)^K,$$

где  $K$  определяется из градуировочной кривой.

Для выбора масштаба фотографирования и метода измерения ионизации был проведен ряд измерений с переменным масштабом фотографирования. Один и тот же след релятивистской частицы

(практически это были  $\mu$ -мезоны) фотографировался одновременно 2 фотоаппаратами. Масштаб съемки одного фотоаппарата был постоянным и равнялся  $\frac{1}{14}$ , у другого фотоаппарата он изменялся от  $\frac{1}{3}$  до  $\frac{1}{9}$ . Каждый след обрабатывался и фотометрически и методом счета капель. Длина следа в камере была  $\sim 20$  см. В обоих методах при измерении использовалась полная длина следа. В методе счета капель считалось количество капель по всей длине следа и затем определялось  $n \frac{\text{кап}}{\text{см}}$ . В фотометрическом методе измерения величь по всей длине следа, причем длина щели микрофотометра укладывалась 9-12 раз на длине следа. Таким образом среднее значение почернения изображения следа определялось из 9-12 замеров почернения.

Результаты, представленные на рис.1 и рис.2 позволяют утверждать, что: 1) имеет место сильная зависимость числа капель  $n$ , считаемых на пленке, от масштаба фотографирования, что связано с ухудшением разрешения отдельных капель в связи с уменьшением масштаба съемки; зависимость почернения от масштаба съемки слабо выражена в фотометрическом методе. Это обстоятельство следует учитывать при выборе следов сравнения (требование к локализации по глубине в методе счета капель более жесткое); 2) относительная ошибка в фотометрическом методе измерения ионизаций остается постоянной при изменении масштаба фотографирования от  $\frac{1}{3}$  до  $\frac{1}{14}$  и равна 8 - 10%, тогда <sup>как</sup> в методе счета капель относительная ошибка резко возрастает, как мы видим, с уменьшением масштаба фотографирования, увеличиваясь с 3-5% для  $M = \frac{1}{3}$  до 60%



для  $M = \frac{I}{g}$ . При каждом фиксированном значении масштаба съемки фотографировалось 9 - 10 следов, по ним находилось среднее значение  $n$  и  $f$  и среднеквадратичный разброс вокруг среднего  $\Delta n$  и  $\Delta f$ , после чего и определялась относительная ошибка  $\frac{\Delta n}{n}$  и  $\frac{\Delta f}{f}$ .

Однако, эти измерения не "закрывают" метод счета капель для малых масштабов и имеются возможности для его развития при средних масштабах фотографирования  $\sim \frac{I}{10} - \frac{I}{12}$ .

Непосредственному измерению величины ионизации предшествуют 2 операции: а) выбор следов сравнения и б) построение градуировочной кривой.

Важно выяснить как выбирать след сравнения (след с минимальной ионизацией). Наиболее удобно в качестве почернения следа сравнения взять среднее значение почернения, определенное по многим следам с различных кадров, но это возможно лишь в том случае, если режим работы камеры, освещение, проявление пленки, место прохождения частицы в объеме камеры слабо влияют на величину почернения. Если это не так, то тогда такое усреднение почернения может внести большую ошибку и целесообразнее иметь след сравнения на том же кадре и в той же области, что и изучаемый след. Трудность в этом случае заключается в том, что не всегда такие следы имеются. Цикл измерений проведенный на 4I следе, показал, что при тех условиях, в которых были получены наши снимки следов,

желательно иметь "свой" след сравнения, а не "средний".

Для градуировки было выбрано 25 следов частиц, идентифицированных как протоны. Следы сравнения выбирались с того же кадра или с соседних, в той же области что и протоны.

Была построена зависимость  $\lg \left( \frac{I}{I_{min}} \right) - \lg V$ .

Точки с хорошим приближением легли на прямую линию.

Прямая проводилась методом наименьших квадратов, причем было получено  $K = 1,54 \pm 0,08$ .

Следует отметить, что  $K$  - величина не универсальная и имеет смысл лишь для определенного цикла измерений, когда размеры щели микрофотометра имеют постоянную величину, следы изучаемых частиц получены на одной и той же камере и фотографируются на пленку одного и того же типа.

В качестве примера использования фотометрического метода были измерены ионизация и импульсы нескольких частиц, что позволило определить их массы. Результаты измерений представлены в таблице I.

Таблица I

№№	$I/I_{min}$	$\rho c$ (св)	$M$ (мс)	ошибка $\Delta M$ при учете $\Delta V$	ошибка $\Delta M$ при учете $\Delta V$ и $\Delta(\rho c)$
1.	$3,80 \pm 0,90$ (23,5%)	$3,8 \begin{smallmatrix} -0,7 \\ +2,3 \end{smallmatrix} \cdot 10^8$	1740	$\pm 430$	$\pm 580$
2.	$3,54 \pm 0,57$ (16%)	$5,4 \begin{smallmatrix} -1,3 \\ +1,9 \end{smallmatrix} \cdot 10^8$	2100	$\pm 340$	$\pm 460$
3.	$1,60 \pm 0,27$ (17%)	$4,9 \begin{smallmatrix} -1,0 \\ +1,9 \end{smallmatrix} \cdot 10^8$	1010	$\pm 170$	$\pm 260$
4.	$2,33 \pm 0,40$ (17%)	$6,6 \begin{smallmatrix} -1,8 \\ +3,8 \end{smallmatrix} \cdot 10^8$	1930	$\pm 280$	$\begin{smallmatrix} + 510 \\ - 830 \end{smallmatrix}$

Из таблицы I видно, что точность в определении массы существенно ухудшается ошибками в определении импульса, однако, полученные значения масс согласуются в 1, 2, 4 случае с массой протона, в 3 случае - с массой K-мезона. Случайные (статистические) ошибки при измерении почернений связаны с флуктуациями почернения вдоль следа. Они обусловлены статистическими флуктуациями в величине ионизационных потерь и флуктуацией в почернении фона камеры. Для нашего цикла измерений было получено, что ошибки, связанные с этими флуктуациями, равны  $\frac{24}{\sqrt{\ell}}$  %, где  $\ell$  - длина следа в камере в см.

Систематические ошибки связаны с тем, что исследуемый след и след сравнения находятся не в одинаковых условиях.

Ошибку в величине измеренной ионизации можно оценить из соотношения

$$\frac{dY}{Y} = \lg \frac{f}{f} \cdot dk + k \cdot \left( \frac{df}{f} + \frac{df_{min}}{f_{min}} \right)$$

Оценка, полученная при помощи этого соотношения, показывает, что для  $J = (1 \div 5) J_{min}$  принципиально достижимая точность для нашей серии измерений составляет 16%.

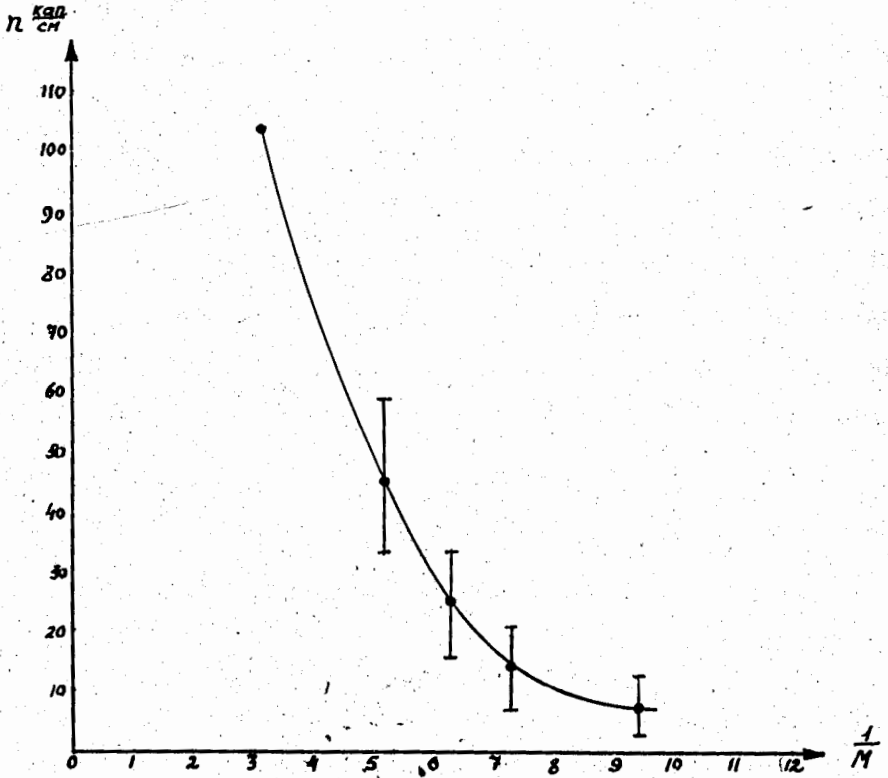


Рис. I

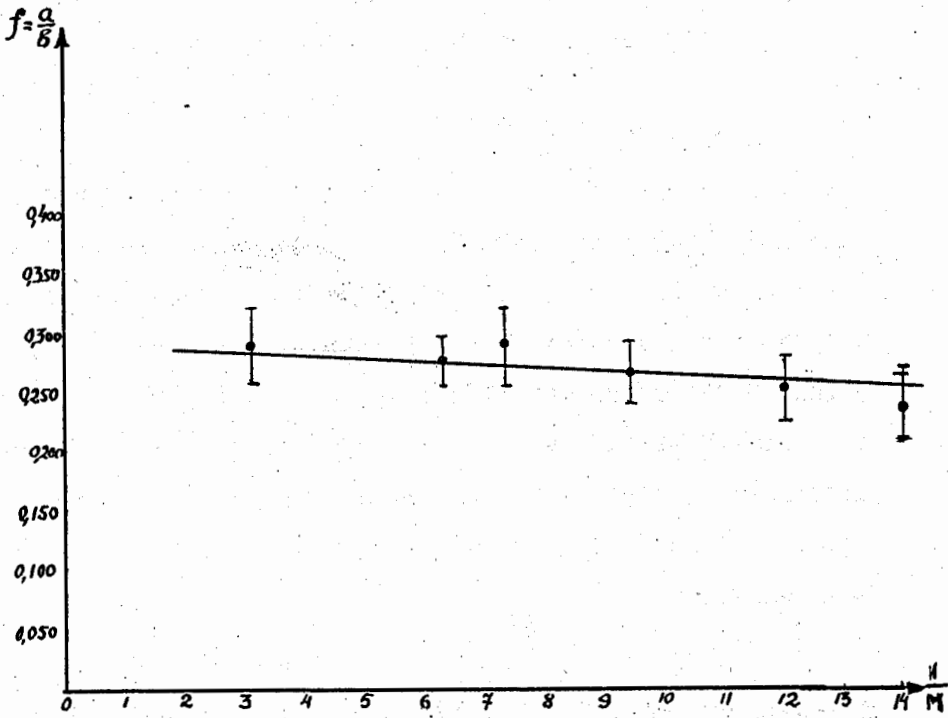


Рис. 2

ОБРАБОТКА СТЕРЕОФОТОГРАФИЙ СЛЕДОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ  
ЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ В НЕБОЛЬШОЙ ПРОПАНОВОЙ  
КАМЕРЕ

М.П.Баландин, В.А.Моисеенко

(Объединенный институт ядерных исследований)

В настоящее время в ядерной физике наряду с диффузионными камерами и камерами Вильсона все большее применение находят пузырьковые камеры. Обработка стереофотографий следов частиц в пузырьковых камерах сложнее, чем обработка стереофотографий следов частиц в диффузионных камерах и камерах Вильсона, вследствие того что в качестве рабочих жидкостей в пузырьковых камерах используются вещества с коэффициентом преломления большим единицы, но меньшим коэффициента преломления воды.

Для полного устранения всех искажений координат точек в пузырьковой камере при обработке стереофотографий методом репроекции необходимо в точности воспроизвести условия, при которых производилось фотографирование, то-есть вести репроекцию в среду с коэффициентом преломления, равным коэффициенту преломления рабочей жидкости пузырьковой камеры. Подобрать жидкость с коэффициентом преломления, лежащим в пределах между  $1,1 + 1,25$  очень трудно.

В тех случаях, когда максимальный угол между оптической осью объектива фотоаппарата и лучом, проходящим через фотографируемую точку, не превышает некоторого определенного значения при измерении углов между следами частиц, отпадает необходимость в точном воспроизведении условий фотографирования.

В настоящем сообщении предлагается приближенный метод определения углов между следами частиц в небольшой пузырьковой камере без магнитного поля при обработке стереофотографий методом репроекции в воздух.

Предположим, что оптическая ось объектива стереофотоаппарата совпадает с осью  $Z$  прямоугольной системы координат

$X, Y, Z$ .

При фотографировании рабочего объема пузырьковой камеры произойдет сокращение линейных размеров по оси  $Z$ , т.е. расстояние по оси  $Z$  между двумя любыми точками в камере сократится в  $n$  раз.

В основе предлагаемого метода определения углов между следами частиц в пузырьковой камере лежит предположение о том, что коэффициент сокращения линейных размеров по оси  $Z$   $n$  остается постоянным по всей камере (законность такого предположения обсуждается ниже.)

Угол, расположенный в камере в плоскости  $Xy$ , проектируется на экран репроектора в натуральную величину.

Углы, не лежащие в плоскости  $XU$ , искажаются при репроекции, причем максимальные искажения претерпевают углы, расположенные в плоскости, проходящей через ось  $Z$ .

Рассмотрим случай, когда падающая частица входит в камеру по оси  $X$ . Рассеившаяся частица образует с падающей угол  $\beta$ , причем плоскость "падающая-рассеившаяся" частицы составляет с плоскостью  $XU$  угол  $\alpha$ . Можно показать, что в этом случае угол  $\beta$  может быть вычислен по формуле

$$\operatorname{tg} \beta = \sqrt{n_0^2 - \cos^2 \alpha' (n^2 - 1)} \cdot \operatorname{tg} \beta',$$

(I)

где  $n_0$  - коэффициент сокращения линейных размеров по оси  $Z$ ;  
 $\alpha'$  - угол между плоскостью  $XU$  и плоскостью "падающая -  
рассеившаяся" частицы, измеряемый на репроекторе;

$\beta'$  - угол между частицами, измеряемый на репроекторе.

В том случае, когда входящая (падающая) частица не лежит в плоскости  $XU$ , угол между частицами определяется следующим образом:

1. Находится плоскость "падающая-рассеившаяся" частицы.

2. Определяется угол между падающей частицей и вспомогательной прямой, лежащей в этой плоскости и перпендикулярной оптической оси объектива (оси  $Z$ ).

3. Определяется угол между рассеившейся частицей и этой же вспомогательной прямой.

4. Каждый из полученных углов исправляется по формуле (I).

5. Вычисляется искомый угол



Рассмотрим более подробно коэффициент сокращения линейных размеров по оси  $Z$  „ $n_z$ “. Можно показать, что коэффициент сокращения линейных размеров по оси  $Z$  „ $n_z$ “ может быть вычислен по формуле

$$n_z \approx \frac{\sqrt{n_p^2 - \sin^2 \gamma}}{\cos \gamma} \quad (2)$$

где  $n_p$  - коэффициент преломления рабочей жидкости в пузырьковой камере,

$\gamma$  - угол между оптической осью объектива и лучом на фотографируемую точку в камере.

Если предположить, что максимальное значение угла  $\gamma$  не превышает  $15^\circ$  и коэффициент преломления рабочей жидкости в камере  $n_p = 1,2$ , то при изменении угла  $\gamma$  от  $0^\circ$  до  $15^\circ$  коэффициент сокращения линейных размеров по оси  $Z$  изменится от 1,20 до 1,21, т.е. меньше, чем на 1%.

Коэффициент сокращения линейных размеров по оси  $Z$  „ $n_z$ “ может быть вычислен по формуле (2); тогда для его расчета необходимо знать величину коэффициента преломления рабочей жидкости, его зависимость от температуры и т.д.

Более разумно определять коэффициент „ $n_z$ “ экспериментально. Для этого надо поместить в камеру две марки на определенном расстоянии  $l_0$  друг от друга (по оси  $Z$ ). Измерив затем сокращенное расстояние  $l_1$  между марками на репроекторе, можно получить значение „ $n_z$ “

$$n_z = \frac{l_0}{l_1}$$

Обсуждение ошибок в определении угла между следами частиц

На ошибку в определении угла  $\beta$  между следами частиц будут влиять три фактора:

1. Неточность в экспериментальном определении " $n_0$ " и изменение " $n_0$ " по длине камеры.
2. Неточность в определении угла между плоскостью  $xy$  и плоскостью "входящая-рассеившаяся" частицы  $\alpha'$ .
3. Неточность в определении угла  $\beta'$ .

Как указывалось выше, изменение коэффициента сокращения линейных размеров по оси  $z$  " $n_0$ " по длине камеры не превышает 1%, что приводит к ошибке в определении угла  $\beta$ :  $\Delta\beta_1 \approx 15'$ .

Неточность в экспериментальном определении коэффициента сокращения линейных размеров по оси  $z$  " $n_0$ " вносит ошибку в определение угла  $\beta$ :  $\Delta\beta_2 \approx 15'$ .

Точность в определении угла  $\alpha$  зависит от величины угла  $\beta$ . Если считать, что при  $\beta \sim (30-90^\circ)$  плоскость "падающая-рассеившаяся" частицы определяется с точностью не хуже  $\pm 4^\circ$ , а при меньших значениях угла  $\beta$  точность ухудшается, но не превышает  $\pm (6-10^\circ)$ , то ошибка в определении угла  $\beta$  из-за неточного определения угла  $\alpha$  будет составлять  $\Delta\beta_3 \approx 15'$ .

Так как угол  $\beta$  в общем случае представляет собой алгебраическую сумму двух углов, то ошибка в определении угла  $\beta$  между

частицами, возникающая из-за того, что коэффициент преломления рабочей жидкости в пузырьковой камере больше единицы, не будет превышать  $1,5^0$ .

Следует подчеркнуть, что указанная ошибка  $\Delta\beta = 1,5^0$  является максимально возможной. В большинстве случаев она не будет превышать  $1^0$ .

На основании формулы (I) составлены таблицы, которые значительно облегчают обработку экспериментальных данных.

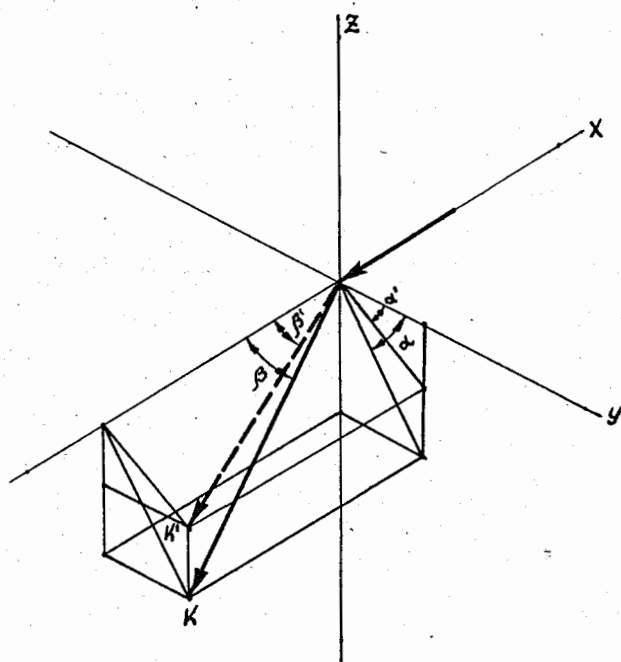


Рис. I

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ  
ПУЗЫРЬКОВОЙ ПРОПАНОВОЙ КАМЕРЫ ДИАМЕТРОМ 110 мм  
В  $\pi^+$ -МЕЗОННОМ ПУЧКЕ СИНХРОЦИКЛОТРОНА  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ван Ган-чан, Ван Цу-цзен, Дин Да-цао, Кладницкая Е.Н.,  
Соловьев М.И.

(Объединенный институт ядерных исследований)

Приводятся методы обработки результатов реакций при  $\pi^+$ -p и  $\pi^+$ -C взаимодействиях. Область энергий первичного пучка 250-270 MeV .

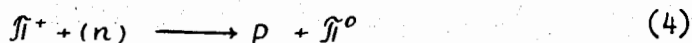
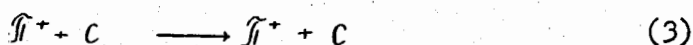
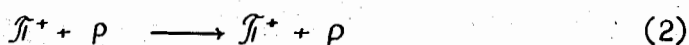
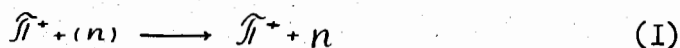
I. Просмотр пленки

Просмотр полученных фотографий производился на стереоскопе. При просмотре пленки с помощью стереоскопа прежде всего надо отличать  $\pi^+$  - мезоны от протонов. Это делалось путем сравнения относительных плотностей. Плотность пузырьков в следах  $\pi^+$  -мезонов - 7-9 на 1 см. Плотность пузырьков в следах протонов - 16-18 на 1 см.

Выделялись все случаи взаимодействия  $\pi^+$  -мезонов с водородом и углеродом. Рассматривались только взаимодействия, вызванные  $\pi^+$  -мезонами, прошедшими через тонкую часть стенки камеры и отклоненными от направления пучка на угол менее  $10^0$ . Все случаи взаимодействия были разделены на 3 группы: однолучевые звезды, двухлучевые звезды и звезды с числом лучей, больше 2 (многолучевые звезды).

Однолучевые звезды

При взаимодействии  $\pi^+$  мезонов с водородом и углеродом возможны следующие реакции, имеющие вид однолучевой звезды.



При угле  $\theta$  между направлениями движений первичной и вторичной частиц меньше  $15^\circ$  все вышенаписанные реакции не отличимы. При  $\theta > 15^\circ$  реакция (2) выглядит в пропановой камере как двухлучевая звезда.

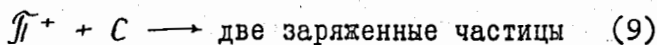
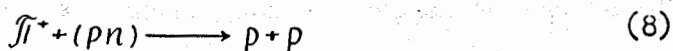
При  $\theta > 70^\circ$  большой вклад в однолучевые звезды вносит реакция (1). Реакция (3) выглядит как однолучевая звезда, так как след ядра отдачи C при вышеуказанных энергиях  $\pi^+$ -мезонов в пропане не виден.

Если  $\theta > 75^\circ$ , то имеет место реакция (5), так как в этом случае реакция (4) выглядит как остановка.

Если  $\theta < 75^\circ$ , то нужно знать пробег протона, чтобы сделать выбор между реакциями (4) и (5). (По пробегу протона определяется его энергия и далее по кинематическому расчету делается выбор реакции).

Двухлучевые звезды

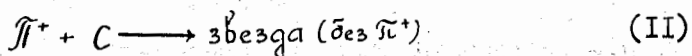
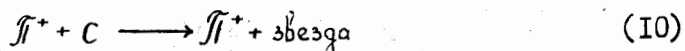
При взаимодействиях  $\pi^+$ -мезонов с водородом и углеродом возможны следующие реакции, имеющие вид двухлучевых звезд



Для разделения реакций (6) и (7) использовался кинематический расчет и условие компланарности, необходимое для реакции (6). Реакция (8) легко определяется по внешнему виду.

Многолучевые звезды

Образование всех многолучевых звезд может происходить по следующим двум типам реакций:



Реакции (10) и (11) трудно разделить, т.к. вторичные  $\pi^-$ -мезоны в (10) с энергией  $< 60$  Мэв имеют такую же ионизацию ( $g/g_0 \geq 2$ ) как и протоны энергией  $< 300$  Мэв.

Кроме отбора случаев взаимодействий, считалось число  $\mathcal{K}^+$  -мезонов, вошедших в камеру через тонкую часть стенки и имеющих отклонение от направления пучка не более  $10^0$ .

## II. Методы измерений и обсчет

I. Определение углов вылета вторичных частиц с помощью микроскопа УИМ-2I.

На микроскопе измерялись координаты „ $x$ ” и „ $y$ ” нескольких точек изображений интересующего нас взаимодействия, полученных на стереокадрах, а также координаты „ $x$ ” и „ $y$ ” реперной точки. Для однолучевых звезд измерялись координаты 3-х точек изображений на левом и правом стереокадрах. Одна точка бралась на первичном следе, вторая - точка взаимодействия и третья точка выбиралась на следе вторичной частицы. Пленка устанавливалась так, чтобы „ $y$ ”-выс координаты точки взаимодействия на левом и правом кадрах были одинаковы. В этом случае „ $y$ ”-выс координаты других выбранных точек на левом и правом кадрах также совпадут. Далее определялись координаты  $x$  и  $y$  изображения в системе координат, началом которой является оптический центр левого объектива.

$$x = x_n - x_{s_n} + a$$

$$y = y_n - y_{s_n} + b$$

$x_n$  и  $y_n$  - координаты точки на левом кадре.

$x_{s_n}$  и  $y_{s_n}$  - координаты реперной точки на левом кадре.

$a$  и  $b$  - координаты реперной точки в выбранной выше системе координат.

Зная координаты  $x$  и  $y$ , расстояние от оптического центра до пленки  $V$  и параллакс  $p = x_n - x_n$ , можно найти координаты точки в пространстве ( $x, y, z$ ).



Вычисление углов ведется по следующим формулам:

(I) Основные формулы для определения координат в пространстве по координатам соответствующих точек изображений на стереофотокартине.

Предполагаем, что в пространстве имеется только единственная среда, например, воздух, коэффициент преломления которого равен единице.

$SS_0, S'S'_0$  - оптические оси объективов, которые перпендикулярны плоскости  $\Pi$ , расстояние между ними  $SS' = B$  (рис. I).  $S, S'$  - оптические центры объективов.  $U$  - расстояние от оптического центра объектива до пленки

Пусть изображениями точки  $M$  на кадрах будут точки  $m$  (на левом) и  $m'$  (на правом) с координатами на плоскости кадров  $x, y$  и  $x', y'$ . В пространстве точка  $M$  имеет координаты  $X, Y, Z$  (начало координат в точке  $S$ )

$$Z = SS' \frac{\cos d_m \cos d'_m}{\sin(d_m - d'_m)} = B \frac{1}{\operatorname{tg} d_m - \operatorname{tg} d'_m} = \frac{BU}{x - x'} \quad (1)$$

обозначим  $\rho = x - x'$

$$X = Z \operatorname{tg} d_m = Z \frac{x}{\rho} = B \frac{x}{\rho} \quad (2)$$

$$Y = Z \operatorname{tg} \omega_m \operatorname{sec} d_m = Z \frac{y}{\rho} = B \frac{y}{\rho} \quad (3)$$

Наконец мы получили формулы для определения координат точки в пространстве из двух стереокартин:

$$X = \frac{B}{\rho} x \quad Y = \frac{B}{\rho} y \quad Z = \frac{B}{\rho} U \quad (1)$$

(2) Определение координат фиктивных точек  $M_1$  и  $M_2$ .

Если смотреть на точку  $M$ , находящуюся в пропане под стеклом, из левого объектива, то она кажется находящейся в точке  $M_1$ , а если смотреть на  $M$  из правого объектива, она кажется находящейся в  $M_2$ . Точки  $M_1$  и  $M_2$  мы будем называть фиктивными точками.

Точка  $m_1(x, y)$  (левый кадр) (рис.2) соответствует изображению точки  $M_1$ , точка  $m_2'(x', y')$  (правый кадр) соответствует изображению точки  $M_2$ . Нужно найти координаты точки  $m_2$ , соответствующей изображению  $M_2$  на левом кадре и координаты точки  $m_1'$ , соответствующей изображению  $M_1$  на правом кадре.

На плоскости  $\Phi$  ( $m \circ SS_0 \cdot M M_1$ )  $m_2$  соответствует точке  $M_2$  на левом кадре (рис.3)

$$\frac{a}{b} = \frac{V - \Delta V}{Z_1 - \Delta Z}, \quad \frac{\Delta V}{\Delta Z} = \frac{a}{b} = \frac{V - \Delta V}{Z_1 - \Delta Z} \quad \left. \begin{array}{l} \text{из подобия} \\ \Delta \end{array} \right\}$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta Z} = \frac{V}{Z_1}, \quad \frac{\Delta \gamma}{\Delta V} = \frac{\gamma + \Delta \gamma}{V}$$

$$\Delta \gamma = \gamma \frac{\Delta V}{V} : \left(1 - \frac{\Delta V}{V}\right) = \gamma \frac{\Delta Z}{Z_1 - \Delta Z} = \gamma \frac{\Delta Z}{Z_2}$$

$$Z_1 = \frac{R_1}{\gamma} V, \quad Z_2 = \frac{R_2}{\gamma'} V \quad (\text{см. рис. 2})$$

$$\Delta Z = Z_1 - Z_2 = V \left( \frac{R_1}{\gamma} - \frac{R_2}{\gamma'} \right); \quad \frac{\Delta Z}{Z_2} = \frac{R_1 \gamma'}{R_2 \gamma} - 1;$$

положение  $m_2$  от оптической оси на левом кадре

$$\gamma + \Delta \gamma = \left(1 + \frac{\Delta Z}{Z_2}\right) \gamma = \frac{R_1}{R_2} \sqrt{x'^2 + y'^2};$$

$$R_1 = \sqrt{x^2 + y^2} \quad R_2 = \sqrt{\eta^2 + y^2} \quad \frac{x}{y} = \frac{x'}{y'};$$

$$\frac{\eta}{y} = \frac{x'}{y'} \quad \gamma + \Delta \gamma = \sqrt{x^2 \left(\frac{y'}{y}\right)^2 + y'^2};$$

Следовательно, координаты точки  $m_2$ , соответствующей фиктивной точке  $M_2$  на левом кадре,  $-x \frac{y'}{y}$  и  $y'$ . Таким же путем можно получить на правом кадре для точки  $M_1$  изображение  $m_1'$  с координатами  $x' \frac{y}{y'}$  и  $y$ .

Берем точку  $S$  как начальную точку координатной системы, тогда координаты фиктивных точек  $M_1$  и  $M_2$  в пространстве определяются по формулам (1), где

$$\rho = x - x' \frac{y}{y'} \quad \text{для } M_1 \quad (4)$$

$$\text{и } \rho = x \frac{y'}{y} - x' \quad \text{для } M_2$$

Выражения для соответствующих координат имеют следующий вид:

$$X_1 = \frac{Bxy'}{xy' - x'y}, \quad Y_1 = \frac{Byy'}{xy' - x'y}, \quad Z_1 = \frac{Byy'}{xy' - x'y} \quad (II)$$

$$X_2 = \frac{Bx'y}{xy' - x'y}, \quad Y_2 = \frac{Byy'}{xy' - x'y}, \quad Z_2 = \frac{Byy'}{xy' - x'y}$$

(3) Определение координат точки  $M$ , находящейся в пузырьковой камере.

Для определения координат точки  $M$  достаточно знания координат либо  $M_1$ , либо  $M_2$  в зависимости от того, с какой из оптических осей - левой или правой мы связывали свою систему координат. Мы выбрали систему координат с центром в точке  $S$  (левая оптическая ось).

а) Точные формулы на плоскости  $\Phi$  (рис. 4)

$$R = H_0 \operatorname{tg} \psi_1 + d \operatorname{tg} \psi_2 + h \operatorname{tg} \psi_3 = Z_1 \operatorname{tg} \psi_1,$$

$$a \quad (h' + H_0 + d) = Z_1, \quad (5)$$

где

$d$  - толщина стекла;

$h$  - глубина точки  $M$  под поверхностью жидкости;

$h'$  - глубина фиктивной точки  $M_1$ , под поверхностью жидкости;

$H_0$  - расстояние от оптического центра объектива до стекла;

$f_1$  - угол падения на стекло;

$f_2$  - угол преломления в стекле;

$f_3$  - угол преломления в пропане;

$$h' + H_0 + d = H_0 + d \frac{\operatorname{tg} f_2}{\operatorname{tg} f_1} + h \frac{\operatorname{tg} f_3}{\operatorname{tg} f_1};$$

или

$$h' + d \left(1 - \frac{\operatorname{tg} f_2}{\operatorname{tg} f_1}\right) = h \frac{\operatorname{tg} f_3}{\operatorname{tg} f_1}$$

$$h = h' \frac{\operatorname{tg} f_1}{\operatorname{tg} f_3} + d \left( \frac{\operatorname{tg} f_1}{\operatorname{tg} f_3} - \frac{\operatorname{tg} f_1}{\operatorname{tg} f_3} \cdot \frac{\operatorname{tg} f_2}{\operatorname{tg} f_1} \right)$$

$$\frac{\operatorname{tg} f}{\operatorname{tg} f'} = \sqrt{n^2 + (n^2 - 1) \operatorname{tg}^2 f'}, \quad \text{где} \quad n = \frac{\sin \psi}{\sin f'}$$

$$h = h' \sqrt{n_3^2 + (n_3^2 - 1) \operatorname{tg}^2 f_1} + d \sqrt{n_3^2 + (n_3^2 - 1) \operatorname{tg}^2 f_1} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{n_2^2 + (n_2^2 - 1) \operatorname{tg}^2 f_1}}\right)$$

$$Z = H_0 + d + h$$

$$Z = H_0 + d + h' \sqrt{n_3^2 + (n_3^2 - 1) \operatorname{tg}^2 f_1} +$$

$$h' = Z_1 - (H_0 + d)$$

$$+ d \sqrt{n_3^2 + (n_3^2 - 1) \operatorname{tg}^2 f_1} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{n_2^2 + (n_2^2 - 1) \operatorname{tg}^2 f_1}}\right)$$

$n_1$  - показатель преломления воздуха

$n_2$  - показатель преломления стекла

$n_3$  - показатель преломления пропана

$$\operatorname{tg} f_1 = \frac{y}{V} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{V^2}$$

Наконец мы получили формулы для определения положения точки М в пространстве по координатам изображений на обоих кадрах  $|x, y|$ ;  $|x', y'|$

$$X = \frac{By'}{xy' - xy} x \quad Y = \frac{By'}{xy' - xy} y$$

$$Z = H_0 + d + \left[ \frac{By'V}{xy' - xy} - (H_0 + d) \right] \sqrt{n_3^2 + (n_3^2 - 1) \operatorname{tg}^2 f_1} + \quad (\text{III})$$

$$+ d \sqrt{n_3^2 + (n_3^2 - 1) \operatorname{tg}^2 f_1} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{n_2^2 + (n_2^2 - 1) \operatorname{tg}^2 f_1}} \right);$$

б/ Приближенные формулы.

Если  $f_1$  и  $f_2$  очень малы  $\operatorname{tg}^2 f_1 \approx \operatorname{tg}^2 f_2 \ll 1$  то

$$\left. \begin{array}{l} \Delta Z \rightarrow 0 \quad y' = y \\ (n^2 - 1) \operatorname{tg}^2 f_1 \ll n^2 \end{array} \right\} \quad (7)$$

Формулы (III) упрощаются и принимают следующий вид

$$X = \frac{B}{\rho} x \quad Y = \frac{B}{\rho} y \quad \rho = x - x' \quad (\text{IV})$$

$$Z = H_0 + d + n_3 \left[ \frac{By'}{\rho} - (H_0 + d) \right] + n_3 d \left( 1 - \frac{1}{n_2} \right)$$

(4) Определение направления прямой, угла между двумя прямыми и определение компланарности.

а) Направление прямой и угол между прямыми.

Получив координаты любых двух точек на одной прямой, можем определить направление этой прямой по следующим формулам:

$$\cos \alpha = \frac{X_{ab}}{L_{ab}}, \quad \cos \beta = \frac{Y_{ab}}{L_{ab}}, \quad \cos \gamma = \frac{Z_{ab}}{L_{ab}}$$
$$X_{ab} = X_a - X_b \quad Y_{ab} = Y_a - Y_b \quad Z_{ab} = Z_a - Z_b$$

$L_{ab}$  - расстояние между  $a$  и  $b$ .

Если известно направление двух прямых, то угол между ними будет

$$\cos \theta = \cos \alpha \cos \alpha' + \cos \beta \cos \beta' + \cos \gamma \cos \gamma' \quad (8)$$

б) Контроль компланарности.

Если три прямые 1, 2, 3 лежат на одной плоскости, то должно выполняться следующее условие:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \alpha_2 & \cos \alpha_3 \\ \cos \beta_1 & \cos \beta_2 & \cos \beta_3 \\ \cos \gamma_1 & \cos \gamma_2 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix} = 0 \quad (9)$$

Из-за ошибок измерения и аппаратуры даже при компланарности это условие не соблюдается. Поэтому более подходящим методом является метод сравнения углов между горизонтальной плоскостью  $H$  и плоскостями, на которых лежат две прямые из трех, скажем, "1, 2", "2, 3" (или "3, 1"). Если разница этих углов  $\Delta \neq$  не больше ошибки, определяемой измерением и аппаратурой, то можно считать, что 1, 2, 3 компланарны.

В случае нашего эксперимента контроль компланарности требуется

для того, чтобы выяснить, есть ли в составе вторичных частиц реакции невидимые частицы.

Если плоскость, в которой движется первичная частица, совпадает с горизонтальной ( X, Y ), то угол между ней и плоскостью вторичной частицы определится следующей простой формулой

$$\sin \varphi = \frac{z_{ob}}{L_{ob} \sin \theta} = \frac{h_{ob}}{L_{ob} \sin \theta} \quad (I0)$$

где  $\theta$  - угол между  $ao$  и  $ob$  (рис. 5)

Если же плоскость, в которой движется первичная частица, наклонена на угол  $\delta$  ( $\operatorname{tg} \delta = \frac{z_{ao}}{y_{ao}}$ ), то вращая координатную систему вокруг оси  $x$  на угол  $\delta$ , получим для  $\varphi$  следующую формулу

$$\sin \varphi = \frac{-y_{ob} \sin \delta + z_{ob} \cos \delta}{L_{ob} \sin \theta} \quad (II)$$

Если  $\delta \rightarrow 0$ , то (II) упрощается, и получим (I0).

При определении координат точек в пропановой камере по координатам их изображений на стереокадрах мы пользовались приближенными формулами (IУ).

Абсолютная ошибка для X и Y при этом около 1 мм, а для z - 2 мм.

При вычислении углов берется разность координат, поэтому ошибка мала (меньше ошибок измерений).

Полученная ошибка определения угла  $\theta$  около  $1^\circ$ , а угла  $\varphi$  - около  $3^\circ$ .

При выводе формул мы пользовались работой 2)

2. Определение углов вылета вторичных частиц с помощью репроектора

На репроекторе непосредственно можно измерить углы  $\theta'$  и  $\varphi'$  а также длину следа, если последний кончается в камере, но это не настоящие значения. Поправка на пропан вводится по следующим формулам ( $\alpha \approx 5^\circ$ ):

$$\operatorname{tg} \varphi = n \operatorname{tg} \varphi' \quad (12)$$

$$\sin \theta = \sqrt{\frac{1 + (n^2 - 1) \sin^2 \varphi'}{\cos^2 \theta' + (n^2 - 1) \sin^2 \varphi'}} \quad (13)$$

где  $\varphi$  и  $\theta$  - истинные углы (рис.6),

$n$  - показатель преломления пропана, мы взяли  $n = 1,233$ .

Репроектирование производилось через стекло такой же толщины, что и фотографирование, поэтому поправку на стекло вводить не нужно.

Формулы для  $\varphi$  и  $\theta$  получены при предположении, что направление движения  $\pi^+$ -мезонов совпадает с направлением пучка  $\pi^+$ . Значения со штрихом относятся к воздуху, без штриха - к пропану (рис.6).

$h_i$  - глубина под поверхностью стекла

$$h_i = n h_i' \quad \text{пусть} \quad \Delta h' = h_2' - h_1' = \overline{AB}$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \overline{AC} = n(h_2' - h_1') = n \Delta h' = n \overline{AB}$$

---

2) А.А.Пугин "Труды государственного гидрологического института", вып.018, стр.36, 1953 г.



$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{\overline{AB}}{\overline{AO}}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\overline{AC}}{\overline{AO}} = n \frac{\overline{AB}}{\overline{AO}} = n \operatorname{tg} \varphi'$$

$$a \quad \sin \varphi' = \frac{\overline{AB}}{\overline{OB}}; \quad OB = L' \sin \theta' \quad Oh' = \overline{AB} = L' \sin \theta' \sin \varphi'$$

$$b \quad \triangle CDO \quad \sin \theta = \frac{\overline{OC}}{\overline{CD}}$$

$$\overline{OC} = \sqrt{(\overline{AC})^2 + (\overline{AO})^2} = \sqrt{(\overline{AC})^2 + (\overline{BO})^2 - (\overline{AB})^2} =$$

$$= \sqrt{L'^2 \sin^2 \theta' + L'^2 \sin^2 \theta' \sin^2 \varphi' (n^2 - 1)};$$

$$\overline{CD} = \sqrt{(\overline{OD})^2 + (\overline{OC})^2} = \sqrt{L'^2 \cos^2 \theta' + L'^2 \sin^2 \theta' + \sin^2 \varphi' \sin^2 \theta' L'^2 (n^2 - 1)}$$

$$= \sqrt{L'^2 + L'^2 (n^2 - 1) \sin^2 \varphi' \cdot \sin^2 \theta'};$$

$$\sin \theta = \sqrt{\frac{\sin^2 \theta' + (n^2 - 1) \sin^2 \theta' \sin^2 \varphi'}{1 + (n^2 - 1) \sin^2 \theta' \sin^2 \varphi'}} = \sqrt{\frac{1 + (n^2 - 1) \sin^2 \varphi'}{\cos^2 \theta' + (n^2 - 1) \sin^2 \varphi'}}$$

Репроектор позволяет определять угол  $\theta$  с точностью до  $5'$ , а угол  $\varphi$  — с точностью до  $1^\circ$ .

В среднем время, затрачиваемое на определение одного угла  $\varphi$  и соответствующего угла  $\theta$  на репроекторе Лаборатории ядерных проблем<sup>1)</sup>, в два раза меньше, чем на микроскопе УИМ-2Г.

Значение угла  $\theta$ , определенное с помощью репроектора, совпадает со значением того же угла, определенного с помощью микроскопа, в пределах менее одного градуса.

### III. Статистика результатов

Составляется таблица, в которой обозначено число тех или других реакций. Зная полное число  $\mathcal{N}^+$ , вошедших в камеру, и число реакций,

<sup>1)</sup> А.Т.Василенко, М.С.Козодаев, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, Д.А.Щербаков (ЛЯП ОИЯИ) "Репроекционная техника измерений, используемая при обработке стереофотографий" — сообщение на совещании по камерам Вильсона, диффузионным и пузырьковым камерам.

можно для каждой из них определить сечение.

$$\sigma = \frac{1}{n\bar{e}}$$

$n$  - число атома в одном  $\text{см}^3$ .

Для пропана  $n_c = 1.77 \cdot 10^{22} / \text{см}^3$ ,  $d = 0,43 \text{ г/см}^3$ ,  $n_p = 8/3 \cdot 1.77 \cdot 10^{22} \text{ ат}^3$

$$\bar{e} = \frac{N\ell}{A}$$

$N$  - число  $\pi^+$

$A$  - число реакций

$\ell$  - эффективная длина камеры.

Строится распределение по  $\psi$  и  $\theta$  в СЦМ.

В заключение авторы приносят благодарность сотрудникам Лаборатории ядерных проблем Р.М.Суляеву, А.И.Филиппову, Ю.А.Щербакову за любезно предоставленные в их распоряжение стереофотоаппарат, стереоскоп и репроектор, а также Т.А.Харьковой, выполнившей большую часть измерений.

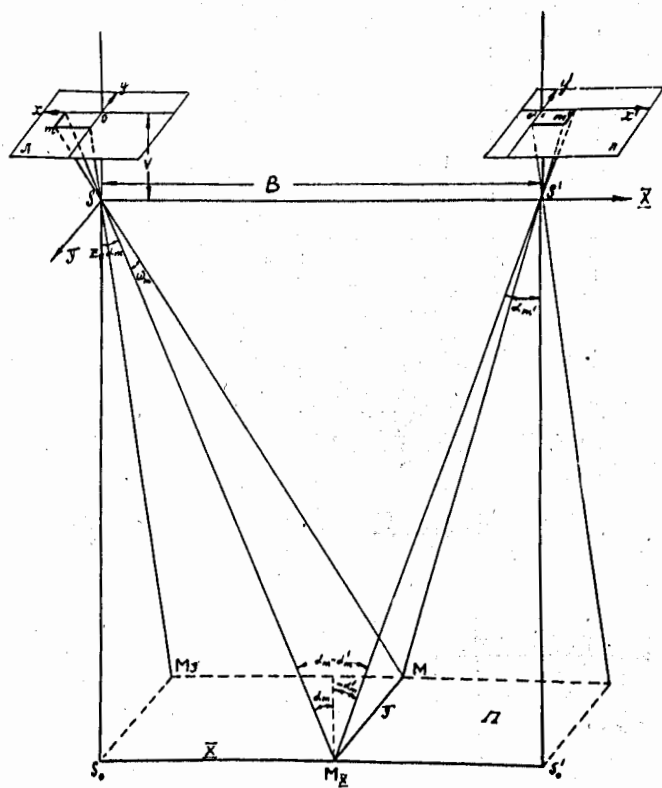


Рис. 1

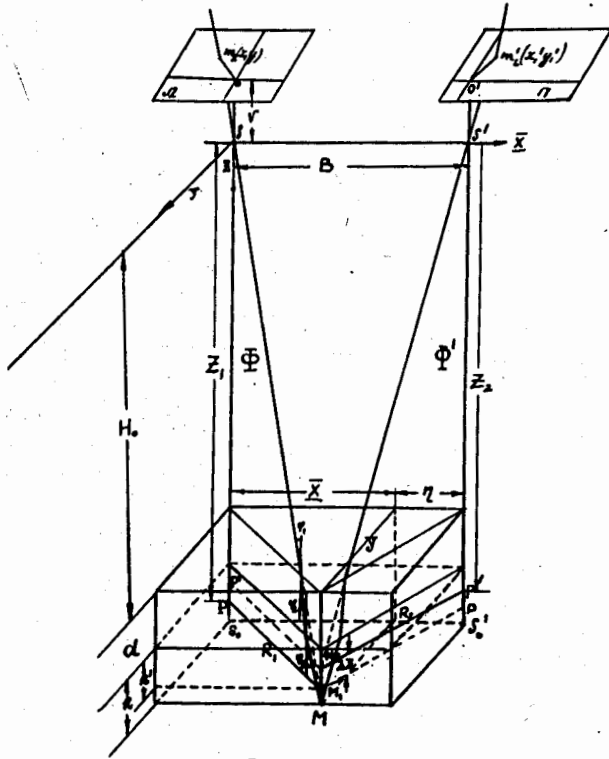


Рис. 2

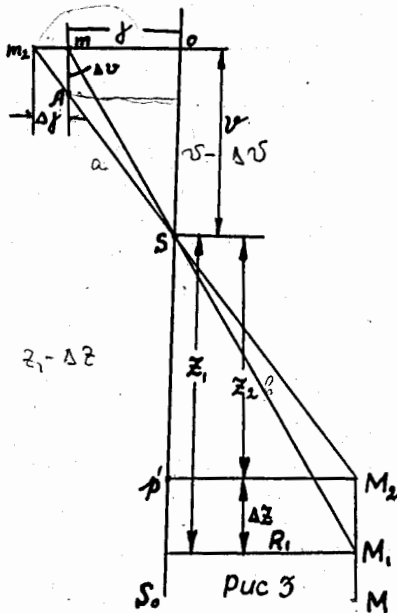


Рис. 3

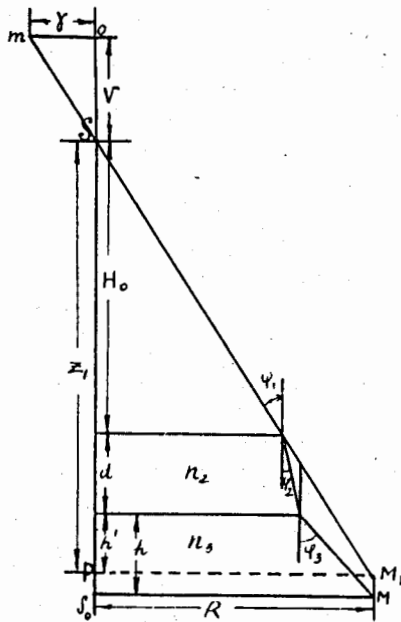


Рис. 4

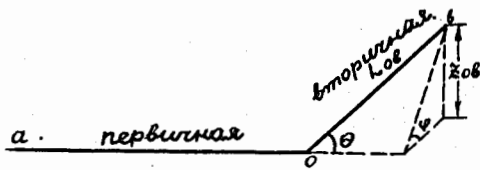


Рис. 5

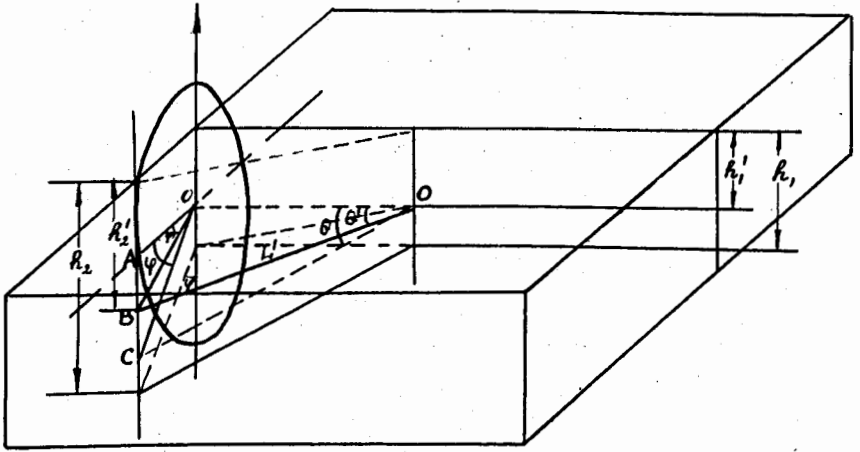


Рис. 6

ОБ ИЗМЕРЕНИИ КООРДИНАТ И УГЛОВ В ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЕ

Л.П.Котенко, Е.П.Кузнецов, А.В.Самойлов, Ф.М.Сергеев

(Физический институт АН СССР)

Для наиболее полного использования пузырьковой камеры как физического прибора, необходимо уметь с достаточной степенью точности определять координаты точек в камере, измерять пробеги частиц, пространственные углы и т.д.

Сложность заключается в том, что измеряемые объекты находятся в сильно преломляющей среде и обычная задача восстановления изображения в камерах Вильсона дополняется вопросом об учете искажений за счет преломления.

В общем случае задачу можно решить применяя следящие системы, снабженные вычислительными аппаратами или применяя систему репроектирования, учитывающую наличие преломляющей среды.

Мы поставили перед собой более скромную задачу - рассмотреть условия, при которых с точностью, достаточной для решения некоторых вопросов, можно вести измерения координат и углов в пузырьковой камере, не прибегая к репроектирующим установкам и следящим системам.

I. Определение координат точки в пузырьковой камере

а) Оптические оси объективов фотоаппарата параллельны

Отсутствие преломляющей среды

При фотографировании аппаратом с двумя объективами, оптические оси которых перпендикулярны переднему стеклу камеры (самое простое конструктивное решение), наиболее сложным является определение глубины точки (рис. 1).

Нетрудно показать, что в этом случае для определения глубины точки  $B$  имеет место следующее соотношение

$$\frac{\Delta}{\Delta m} = \frac{y}{b} \cdot \frac{\ell + b - \mathcal{F}}{\ell + y - \mathcal{F}}, \quad (1.1)$$

- где:
- $y$  - глубина измеряемой точки относительно внутренней поверхности переднего стекла с меткой  $\#$  (точка  $A$ );
  - $b$  - глубина камеры;
  - $\ell$  - расстояние от пленки до внутренней поверхности переднего стекла;
  - $\mathcal{F}$  - главное фокусное расстояние объективов;
  - $\Delta$  - разность расстояний между данной точкой и передней меткой на фотографиях из правого и левого объективов ( $A_2 B_2 - A_1 B_1$ );
  - $\Delta m$  - разность расстояний между передней и задней метками на фотографиях из правого и левого объективов.

б) Оси объективов не параллельны. На практике часто объективы фотоаппарата повернуты под некоторым углом к переднему стеклу камеры. В этом случае имеет место соотношение:

$$\frac{\Delta}{\Delta m} = \frac{y}{b} \cdot \frac{\ell - \mathcal{F} \cdot \cos \alpha + b}{\ell - \mathcal{F} \cdot \cos \alpha + y}. \quad (2.1)$$

---

$\#$  Под меткой подразумевается вертикальная линия на внутренней поверхности переднего и заднего стекол.



Здесь  $\alpha$  - угол между оптической осью объектива и перпендикуляром к переднему стеклу.

Если фотоаппарат расположен достаточно далеко от камеры, так что  $l \gg F \cos \alpha - b$ , то для определения глубины точки получим простое соотношение:

$$\frac{\Delta}{\Delta m} = \frac{y}{b}, \quad (3.1)$$

которое выполняется тем точнее, чем больше  $l$ .

### в) Преломляющая среда

Линейность в (3.1) выполняется с большой степенью точности и в пузырьковой камере при выполнении условия  $l \gg F \cos \alpha - b$ . Это было проверено на пропановой камере [1] с глубиной 70 мм и расстоянием  $l = 350$  мм. Пропорциональность между  $\Delta$  и  $y$  сохранялась на всей ширине камеры. На рис. 2 представлена зависимость  $y$  от  $\Delta$  при базе  $M = 140$  мм. Штриховая линия - выражение (2.1). Непрерывная прямая, совпадающая с (3.1) - экспериментальная зависимость между  $y$  и  $\Delta$ .

Благодаря преломляющему действию среды действительные расстояния между точками в пузырьковой камере искажены.

Для видимой, полученной по формуле (3.1), и истинной глубины точки имеет место соотношение (рис. 3):

$$y_{\text{вид}} + b = \cos^2 \mu \left[ \frac{y_{\text{ист}}}{n_2} \frac{1}{(1 - \frac{\sin^2 \mu}{n_2^2})^{3/2}} + \frac{b}{n_1} \frac{1}{(1 - \frac{\sin^2 \mu}{n_1^2})} \right] \quad (4.1)$$

где:  $y_{\text{вид}}$  - искаженная глубина измеряемой точки,  
 $y_{\text{ист}}$  - истинная глубина,  
 $b$  - истинная толщина переднего стекла,

$n_3$  - коэффициент преломления рабочей жидкости в камере,  
 $n_2$  - коэффициент преломления переднего стекла,  
 $\gamma$  - угол между перпендикуляром к стеклу камеры и направлением на измеряемую точку.

При  $\gamma = 0$  (4I) дает очевидный результат:  $y_{\text{виг}} + b = \frac{b}{n_2} + \frac{y_{\text{исг}}}{n_3}$ .

Если расстояние от фотоаппарата до камеры много больше ее поперечных размеров, то угол  $\gamma$  мал по всей длине камеры и выражение (4I) принимает вид:

$$y_{\text{виг}} + b = \left(1 - \frac{\gamma^2}{2}\right) \left(\frac{y_{\text{исг}}}{n_3} + \frac{b}{n_2}\right) \quad (5.I)$$

На практике необходимо знать расстояние по глубине между двумя точками  $\Delta y_{\text{исг}}$ . При малых  $\gamma$  и небольших расстояниях между точками, пользуясь (5.I), получаем:

$$\Delta y_{\text{исг}} \approx \Delta y_{\text{виг}} \cdot n_3 \quad (6.I)$$

Для поперечных размеров искажение учитывается формулой (рис.4):

$$\frac{x_{\text{виг}}}{x_{\text{исг}} - \sin \gamma \cdot N} = \frac{l + \cos^2 \gamma \cdot N}{l} \quad (7.I)$$

Здесь  $N = \frac{y_{\text{исг}}}{n_3} + \frac{b}{n_2}$ ,

$x_{\text{виг}}$  - искаженный видимый поперечный размер, отсчитываемый от перпендикуляра, восстановленного из центра объектива к переднему стеклу камеры.

$\chi_{ист}$  - истинный поперечный размер, отсчитываемый от той же оси.

Поперечное расстояние между двумя точками:

$$\Delta \chi_{вид} = \Delta \chi_{ист} \left(1 + \frac{N}{L}\right) - N \Delta \gamma \quad (8.1)$$

Для небольших отрезков

$$\Delta \chi_{вид} = \Delta \chi_{ист} \quad (9.1)$$

Из формул (5.1) и (8.1) видно, что для уменьшения искажений выгодно уменьшить угол  $\gamma$ , т.е. фотографирование производить с наибольшего расстояния и производить измерения в ближайший к измеряемому отрезку объектив.

Таким образом, пользуясь формулами (5.1), (6.1) и (7.1), (9.1) можно определять с точностью, зависящей от точности измерения, координаты точек в камере и расстояния между данными точками.

Для проверки формул был рассмотрен случай упругого рассеяния  $\pi^+$ - мезона на протоне.  $\pi^+$ - мезон и протон отдачи остановились в камере. Угол рассеяния  $\pi^+$ -мезона, вычисленный из кинематики процесса и определенный измерением координат характерных точек по формулам (6.1) и (9.1) совпали с точностью 4%. Плотность рассеяния наклонена к плоскости переднего стекла под углом  $40^\circ$ .

На рис. 5 приведена видимая из объектива, расположенного напротив точки  $A$ , форма камеры. Построение (линия с точками) сделано по точкам на внутренней стороне переднего и заднего стекла (по формулам (6.1) и (9.1)). Отклонение точки  $B$  от вертикали происходит за счет коничности проекции.

Так как все измерения велись в ближайшей к данному объективу половине, то ошибка в измерении расстояния между двумя точками целиком определялась точностью измерений.

## II. Искажения проекций углов

Решение многих физических задач можно упростить, рассматривая проекции углов на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения, вместо пространственных углов.

В этой связи интересно выяснить, как отличается центральная проекция угла, получающаяся в результате фотографирования, от ортогональной проекции на плоскость параллельную плоскости пленки, с учетом того, что угол находится в преломляющей среде.

На рис.6 изображены позитивные центральные проекции некоторого пространственного угла  $ADC$  и его ортогональной проекции  $ABC$  (соответственно  $A'D'C'$  и  $A'B'C'$ ). Плоскость  $P$  - плоскость пленки.

$SO = H$  - расстояние от объектива до плоскости ортогональной проекции  $a$  ( $SO$  совпадает с направлением оси объектива),

$SO = F$  - фокусное расстояние объектива,

$BD = \pm h$  - превышение.

$\theta = \angle ABC$  ортогональная проекция угла  $ADC$ ,

$\chi = \angle A'D'C'$  центральная проекция угла  $ADC$

Несложный расчет дает связь углов  $\theta$  и  $\chi$ :

$$\operatorname{ctg} \frac{\chi}{2} = \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} \pm \frac{2F \cdot h}{H \cdot a} \cdot \operatorname{tg} \gamma_2 \quad (I.2)$$

где  $\gamma_2$  - угол между осью объектива и направлением на вершину измеряемого угла;

$a$  - база фотографирования.

Знак  $\pm$  соответствует знаку превышения -  $h$ .

Положительный знак в формуле соответствует приводимому на чертеже случаю.

Из формулы (I.2) вытекают все требования к геометрии фотографирования и к оптике объективов, знакомые по методике камер Вильсона и диффузионных камер в смысле минимального искажения проекций углов.

Отличие пузырьковой камеры от этих камер заключается в том, что в (I.2) вместо превышения  $h$  следует подставить  $h'$  (см.6.I):

$$h' = \frac{h}{n_2}$$

т.е. рабочая жидкость как бы частично проектирует угол на плоскость  $a$  и тем уменьшает искажения.

Из формулы (I.2) видно, что при небольших  $\gamma_2$ , искажение, при данных  $F$  и  $H$ , определяется отношением  $h'/a$ , которое характеризует величину угла АДС.

Анализируя (I.2) можно для каждой конкретной задачи определить области углов  $\chi$  и  $\theta$ , при которых возможна замена угла

$\theta$  углом  $\chi$  с заданной степенью точности.

В частности, если частица движется приблизительно в плоскости перпендикулярной оси объектива фотоаппарата, испытывая отклонения на небольшие углы - многократное рассеяние, то точность замены угла

$\theta$  углом  $\chi$  достаточно велика.

Нами измерялось многократное рассеяние  $\mu^+$  и  $\mu^-$ -мезонов в пузырьковой камере [1]. Среднее расстояние  $H = 350$  мм,  $F = 50$  мм. При измерении рассеяния в области 45 Мэв, ошибка в замене угла  $\theta$  углом  $\chi$  не превышает 0,5%.

Для выяснения величины искажения проекций углов в пропане в пузырьковую камеру при рабочей температуре были помещены стеклянные пластинки с награвированными углами. Схема опыта показана на рис. 7.

Результаты измерений приведены в таблице I, из которой видно, что искажений проекций углов в пределах точности измерения ( $1^\circ$ ) нет.

#### Л и т е р а т у р а

Г. Л. П. Котенко, Ю. С. Попов, Е. П. Кузнецов.

Приборы и техника эксперимента, № I (1957).

Расположение пластины с углами	Истинное значение угла	левый объектив			правый объектив		
		$\gamma_2$	без пропана	с пропаном	$\gamma_2$	без пропана	с пропаном
Пластинка № I Вертикально	39° вертикаль- ный угол	8°	37	38	0°	37	36
	36° горизон- тальный угол	"	37	38	"	38	39
Пластинка № II Под углом 45°	40° вертикаль- ный угол	"	51	50	"	47	48
	36° горизон- тальный угол	"	27	26	"	28	28
Пластинка № III Вертикально	37° вертикаль- ный угол	0°	36	37	8°	37	38
	37° горизон- тальный угол	"	38	38	"	37	39
Пластинка № IV под углом 45°	37° вертикальный угол	"	48	48	"	47	48
	35° горизон- тальный угол	"	28	28	"	28	28

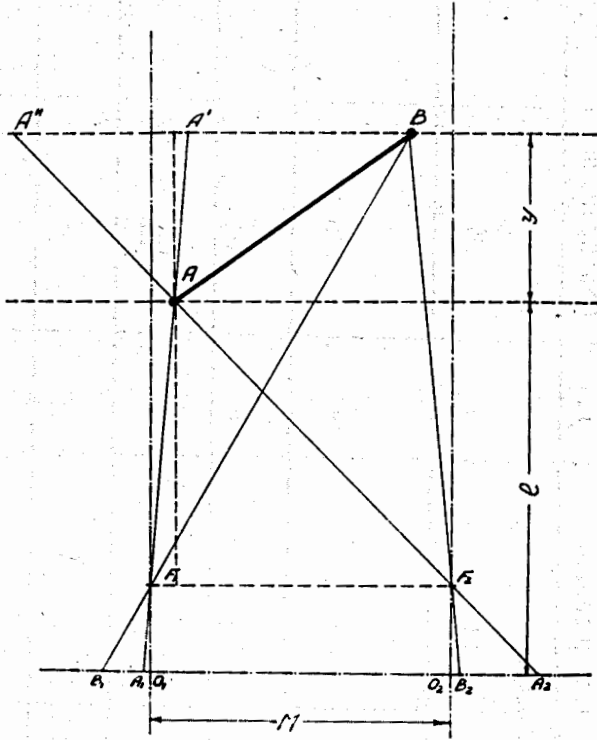


Рис. I

Схема фотографирования 2-мя объективами (точки  $O_1$  и  $O_2$ ), оптические оси которых перпендикулярны переднему стеклу камеры.



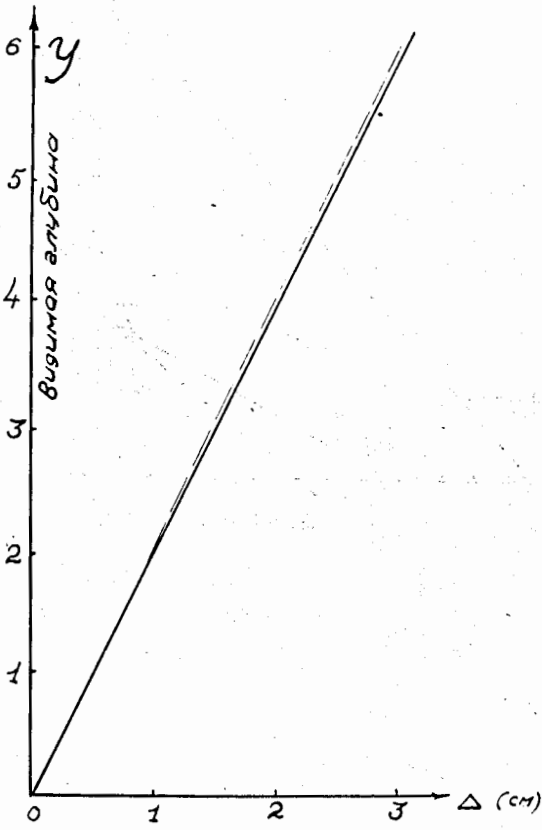


Рис. 2

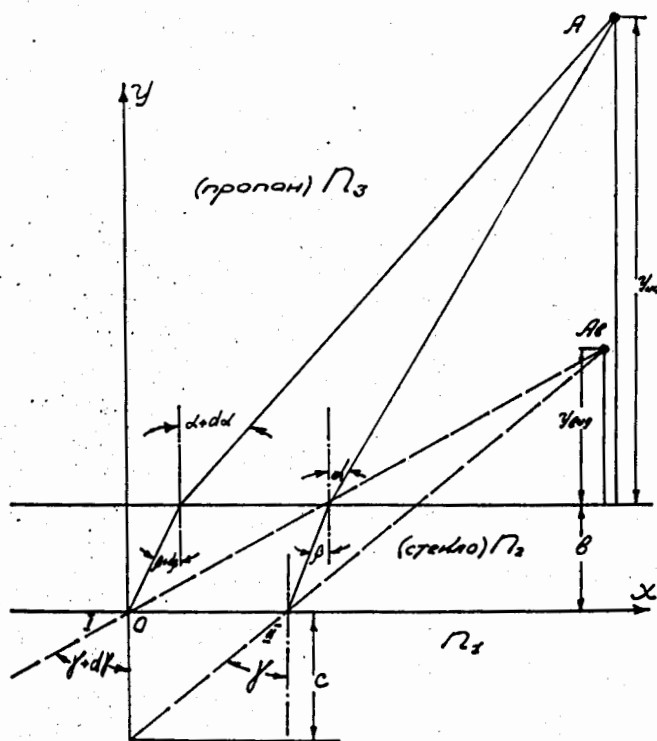


Рис. 3

К выводу соотношения между видимой и истинной глубиной точки в пропановой камере.

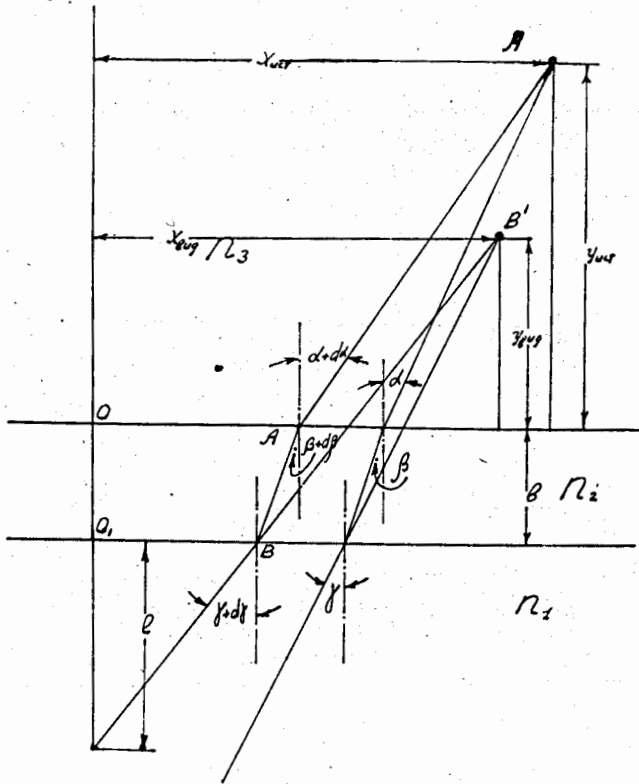


Рис. 4

К выводу соотношения между истинными и видимыми поперечными размерами в пузырьковой камере.

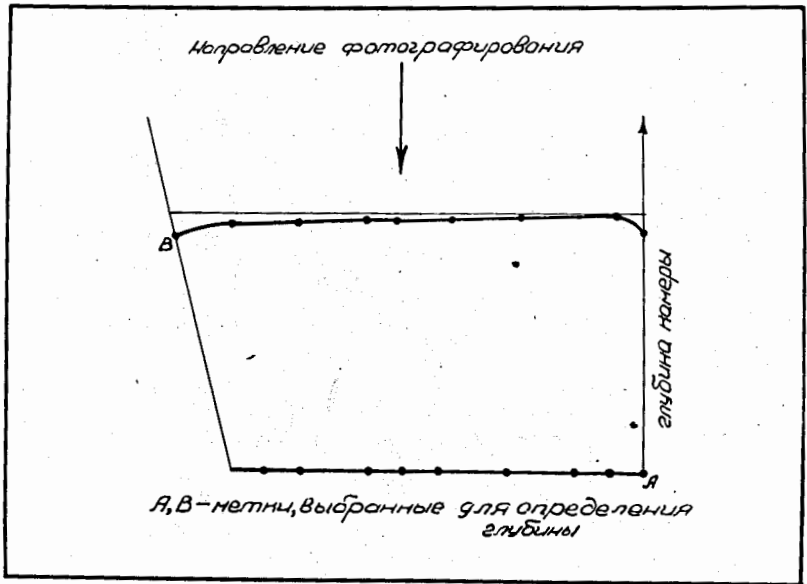


Рис. 5

Форма камеры

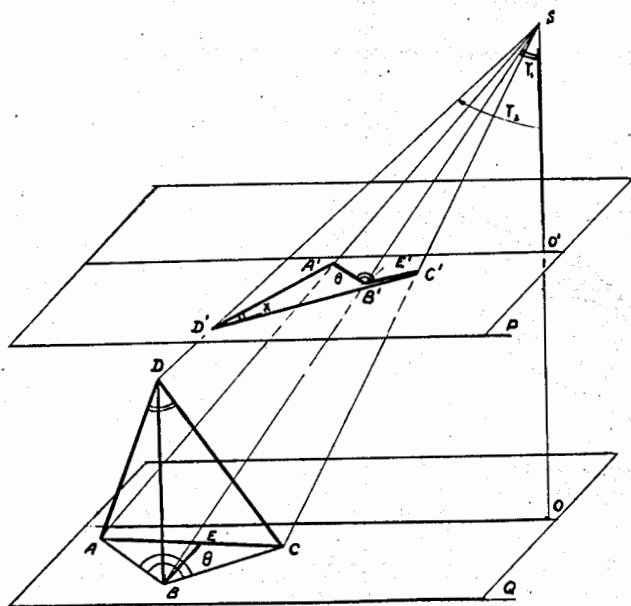


Рис. 6

Центральная и ортогональная проекции произвольного пространственного угла.

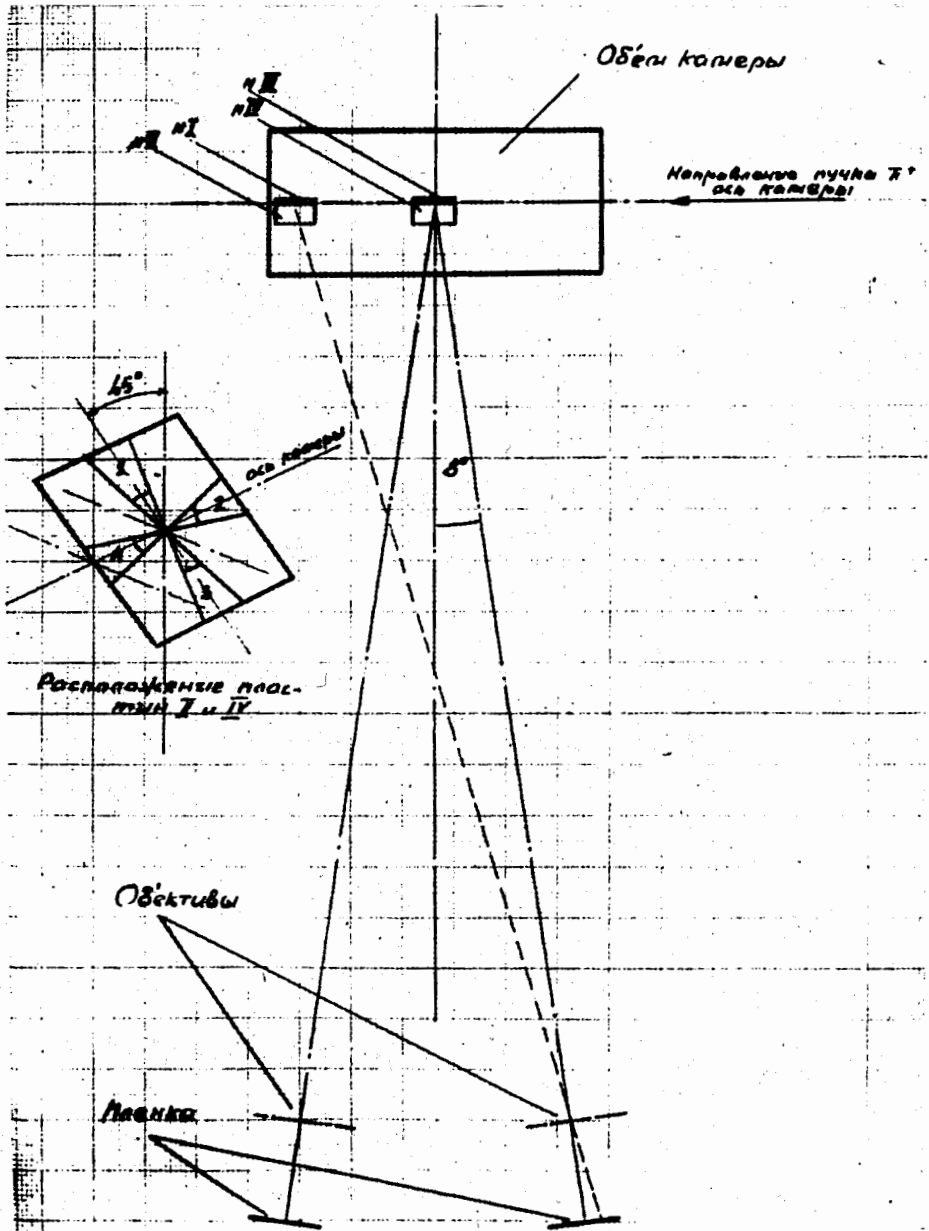


Рис. 7

Схема фотографирования стеклянных пластинок с выгравированными на них углами для определения искажений углов в пропане.

О ВОЗМОЖНОСТЯХ АВТОМАТИЗАЦИИ ОТБОРА СНИМКОВ

М.М. Русинов

(Ленинградский институт точной механики и оптики)

Одним из элементов процесса обработки снимков с изображениями следов исследуемых частиц является отбор тех снимков, на которых наблюдается то или иное событие, интересующее исследователя.

В связи с высокой производительностью съемочной аппаратуры возникает вопрос об ускорении отбора снимков, подлежащих дальнейшей, более детальной, обработке и соответственным измерениям, таким образом возникает задача автоматизации отбора снимков.

Согласно требованиям, предъявляемым исследователями, основными событиями, по которым должен осуществляться отбор, являются обрыв трека, "вилка" и "звезда".

Важно, чтобы при таком автоматическом отборе была бы исключена возможность ошибочного срабатывания прибора, например, в случае пересечения изображений двух непересекающихся в пространстве (скрещивающихся) треков, которые на отдельном снимке представляются подобными звезде.

Для устранения такого ошибочного срабатывания можно прибегнуть к использованию одного из свойств неискаженной стереопары изображений пространственного объекта - отсутствию так называемого вертикального параллакса.

Действительно, два изображения одной и той же точки пространства, получаемые на двух снимках стереофотоустановки, при параллельности их осей всегда будут лежать в плоскости, проходящей через снимаемую точку и базис установки и, находясь на линии пересечения этой плоскости с плоскостью обоих снимков, будут располагаться на равном расстоянии, от линии базиса на самих снимках. Это и называют отсутствием вертикального параллакса.

Поэтому, продвигая один и тот же датчик или два датчика, расположенных на линии, параллельной линии базиса, мы должны непременно встретить как первое, так и второе изображение нашей точки снимаемого пространства.

Отсюда нетрудно придти к выводу, что критерием отбора должно явиться повторение срабатывания правого и левого датчиков при прохождении ими одной и той же строчки на правом и левом снимках.

Перейдем к рассмотрению устройства самих датчиков.

Простейшим датчиком можно было бы представить себе датчик, срабатывающий при проходе через трек; его схема может быть представлена в виде отверстия, пропускающего световой импульс на фотозлемент.

Датчики, решающие более сложные задачи, должны, очевидно, иметь и более сложные схемы.

Так, например, датчик, срабатывающий при прохождении трека может быть осуществлен по схеме полукольца, окружающего отверстие, с таким расчетом, чтобы замыкание щели датчика происходило бы в тот момент, когда в отверстии проходит изоб-



ражение трека, а в полукольце, окружающем отверстие, изображение трека отсутствует.

Таким образом, отверстие в схеме датчика будет являться элементом, замыкающим цепь датчика, а полукольцо, окружающее отверстие - элементом размыкающим постоянно замкнутую цепь.

Датчик, предназначенный реагировать при прохождении его через вилку, может быть осуществлен в виде трех соприкасающихся отверстий, из которых два крайние работают на замыкание, а среднее - на размыкание цепи.

Такой датчик сможет срабатывать лишь в тот момент, когда он будет переходить через две линии, расстояние между которыми определится окном размыкающего датчика, т.е. тогда, когда строка будет подходить к точке пересечения двух треков.

Датчик, реагирующий на ту или иную звезду можно представить в виде отверстия, работающего на замыкание, и кольца из того или иного числа чередующихся замыкающих и размыкающих отверстий.

Перейдем к рассмотрению электрической схемы прибора.

Электрические импульсы от элементов правого и левого датчиков, соответственным образом усиленные, при срабатывании замыкают сначала цепь одного, затем - цепь другого датчика.

Каждая из этих двух цепей в свою очередь, воздействует на замыкание третьей цепи, которая будет замкнута лишь тогда, когда на одной и той же строке сработают как правый, так и левый датчики. В этом случае третья цепь дает сигнал отбора.

Нетрудно видеть, что рассмотренная схема работы допускает совместное размещение нескольких пар различных датчиков, работающих на одной и той же или на разных строках изображения и имеющих свои, совершенно самостоятельные цепи.

После прохождения каждой строки все цепи принудительно размыкаются.

Перейдем к рассмотрению измерительных возможностей устройства.

Плоские координаты той или иной точки легко могут быть определены по проходимой строке и по продвижению одного из датчиков в направлении базиса; третья координата может быть определена по разности моментов включения цепей правого и левого датчиков, которая, будет выражать собой величину горизонтального параллакса.

Используя датчик-счетчик на входной и выходной строках кадра, можно осуществить подсчет вошедших и вышедших из кадра частиц.

В Ленинградском институте точной механики и оптики в настоящее время создан макет датчика, срабатывающего на пересечение двух линий.

Конструктивно этот датчик осуществлен в виде микрообъектива с  $20\times$  увеличением и апертурой 0,65, в плоскости изображения которого размещены три окна для фотоспротивлений с диаметром отверстий в 6 мм., что обеспечивает срабатывание датчика при расстоянии линий в 0,3 мм.

Фотоспротивления с простыми усилительными устройствами и электромагнитными реле создают законченную цепь одного отдельного датчика; в настоящее время ведется работа по

оснащению двумя подобными датчиками обычного стереокомпа-  
ратора для окончательной проверки всей схемы с результи-  
рующей (выдающей сигнал отбора) цепью.

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОСМОТРА ТРЕКОВ

С ПОМОЩЬЮ ЦЕЛЕВОГО УСТРОЙСТВА

С.М.Коренченко

(Объединенный институт ядерных исследований)

Машина для просмотра и обмера треков - это в некотором смысле математическая машина. Известно, что математические машины делятся на машины непрерывного счета, построенные по принципу электрических аналогий ( *analogy computer* ) и машины дискретного счета ( *digital computer* ). Регулирующие и управляющие устройства машин для просмотра треков по принципу действия можно отнести к тому или иному виду математических машин. Управление движением некоторого фоточувствительного устройства вдоль трека может быть осуществлено различными путями. Одна возможность - фоточувствительное устройство (датчик) непрерывно движется по треку, непрерывно выдавая сигнал ошибки, связанной<sup>с</sup> величиной отклонения датчика от истинного положения трека. Преобразованный сигнал ошибки управляет движением датчика. Скорость и точность просмотра определяются здесь условиями устойчивого регулирования. Такая система регулирования описана в докладе С.Я.Никитина. Мне кажется, что эта система по своему устройству близка к машинам непрерывного счета.

Движение фоточувствительного устройства и управление его движением можно осуществить несколько иным способом. Пусть

имеется фоточувствительная щель, состоящая из трех частей (рис. I).

Наличие отдельных частей позволяет различать движение вперед и назад и поворот вправо - влево. Очевидно, что когда щель расположена вдоль трека, освещенность каждой ее части максимальна (предполагается, что трек белый на черном фоне). Щель движется дискретно, отдельными шагами в определенном заданном ритме (рабочая частота). Величина шага соответствует требуемой точности измерения.



Рис. I

Фоточувствительная щель

Движение щели складывается из вертикальных и горизонтальных шагов, совершаемых последовательно.

Помимо движения по вертикали и горизонтали

щель может поворачиваться относительно своего центра. Выбор вида движения (последовательность шагов) происходит в соответствии с углом поворота щели. Движение происходит до тех пор, пока освещенность щели остается постоянной в определенных пределах. Когда освещенность падает ниже определенного уровня движение прекращается и начинается операция поиска такого положения щели, при котором восстанавливается прежняя освещенность. При этом щель производит повороты в различные стороны и движение по горизонтали и вертикали. За каждый такт делается одна определенная операция поиска. Если в результате какой-либо операции поиска восстанавливается прежняя освещенность, то дальнейшее движение щели происходит в соответствии с ее новым положением. Если освещенность не восстанавливается, то

система автоматически приспосабливается к новой освещенности и продолжает движение по треку в соответствии со старым положением щели. Таким образом, в описанной системе следующий шаг движения делается лишь после того как произведена оценка результатов предыдущего. Такая система близка по природе к математическим машинам дискретного счета. Вместо проблемы устойчивости регулирования здесь возникает проблема правильной логики. На рис.2 приведена общая блок-схема системы управления. Назначение и последовательность работы отдельных блоков:

1. Блок грубой установки на трек 1 служит для регистрации факта прохождения щели через трек.

2. Промежуточное устройство 2, необходимое при работе с оператором, получая сигнал от блока 1, задерживает движение щели с той целью, чтобы оператор имел время решить нужно ли просматривать данный трек.

3. Блок точной установки на трек 3 начинает работать по сигналу, данному оператором через промежуточное устройство. Этот блок работает согласно сигналам, поступающим от фоточувствительного следящего устройства. Здесь происходит оценка освещенности щели и вырабатываются управляющие сигналы для движения по треку или на операции поиска.

4. Блок выбора вида движения 4 работает в соответствии с углом поворота щели. Через этот блок осуществляется непосредственная подача нужных сигналов (движение или поиск) на движущее устройство.

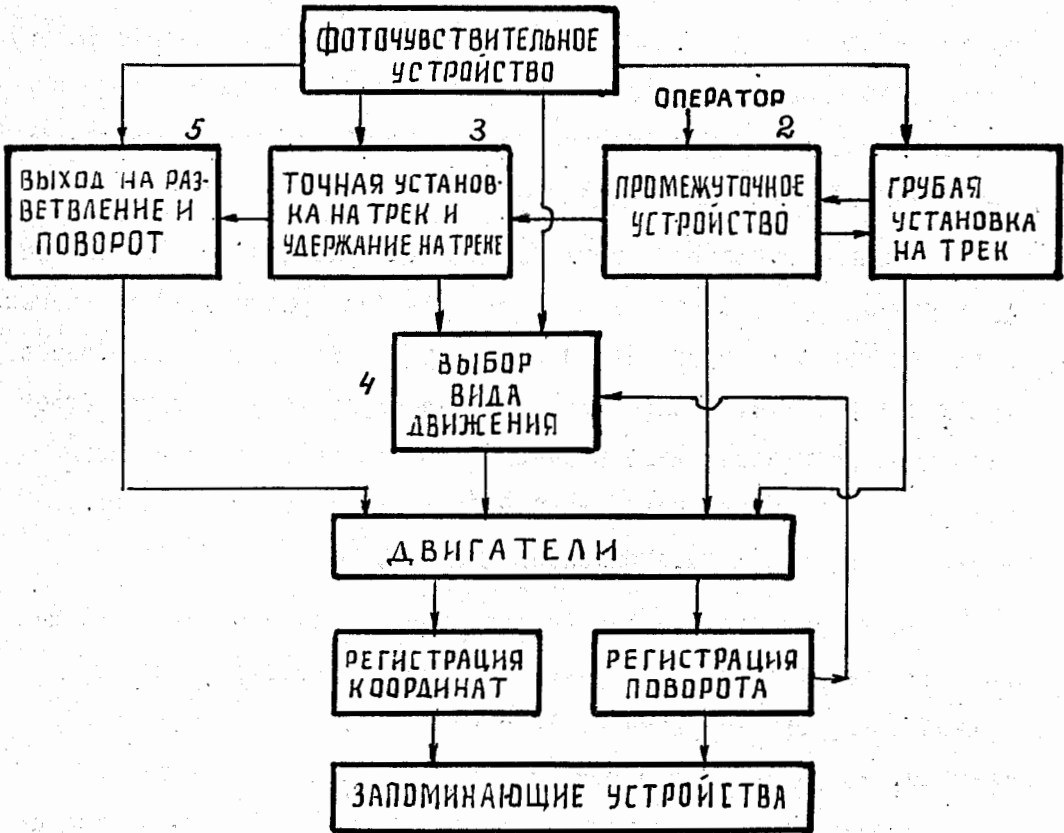


Рис.2.

5. Блок 5 выхода на разветвление трека и поворота на разветвлении служит для временного управления движением щели при выходе ее на разветвление трека (звезда). Блок начинает работать по сигналу от блока 3 и заканчивает работу как только один из концов щели попадает на какой-либо луч звезды. Во время работы блока 5 блок 3 не осуществляет управления.

С целью примерной оценки количества работы на изготовление подобной аппаратуры каждый блок системы был разработан до степени, когда он мог быть представлен в виде реле, триггеров, пересчетов, ворот и т.п., т.е. в виде известных электронных устройств. Общее потребное количество ламп примерно 100 двойных триодов. Возможно, что потребуется значительно большее количество ламп, однако часть из них может быть заменена диодами.

Необходимо особо остановиться на механике системы, т.е. на том, как осуществляется перемещение щели и регистрируются с нужной точностью координаты. Если учесть прогресс камерной техники, то задача, примерно, следующая - нужно измерять длины порядка 1 метра с точностью до  $\sim 0,1$  мм. Т.е. нужна относительная точность измерения координаты  $\sim 10^{-4}$ . Создание механических систем, обеспечивающих широкие пределы движения с такой точностью затруднительно. Далее, механический двигатель дискретного типа (например, реле) вряд ли сможет работать со скоростью больше 100 импульсов/сек. Может быть, применяя особым образом сервомоторы, можно было бы увеличить число шагов в секунду до 200, но это, по-видимому, предел. Таким



образом, максимальная скорость просмотра с помощью механического движения в данном методе составляет ~ 1-2 см/сек. Это в несколько раз медленнее по сравнению с системой непрерывного слежения.

В связи с этим применять дискретную систему регулирования механической системы, по-видимому, не имеет смысла. Очевидно, что механику надо попытаться заменить электроникой, а именно, электронно-лучевой трубкой. Создать на экране трубки целеобразный осветитель не представляет особой трудности. Разделение цели на части в пространстве заменяется разделением во времени. Значительно труднее получить требуемую точность, однако эта задача, по-видимому, может быть решена. Предположим, что диаметр светящегося пятна на трубке  $d \approx 0,5 \Delta \ell$ , где  $\Delta \ell$  - требуемая точность измерений. Для начала было бы вполне достаточно на трубке диаметром 13 см иметь неяркое пятно диаметром ~ 0,01 мм. По-видимому, это в пределах возможности современной техники. Тогда достаточно точное движение пятна при каждом шаге и соответственно измерение координаты по числу сделанных шагов может быть осуществлено следующим образом.

На пути пучка, идущего на освещение пленки, после линзы устанавливается полупрозрачное плоское зеркало и часть пучка отклоняется. В плоскости проекции светового пятна устанавливается решетка из непрозрачных полос типа довольно грубой дифракционной решетки. (Рис.3). Расстояние между полосами равно величине необходимой точности измерения. Ширина каждой полосы примерно равна диаметру светового пятна. На рис. 4 приведена примерная

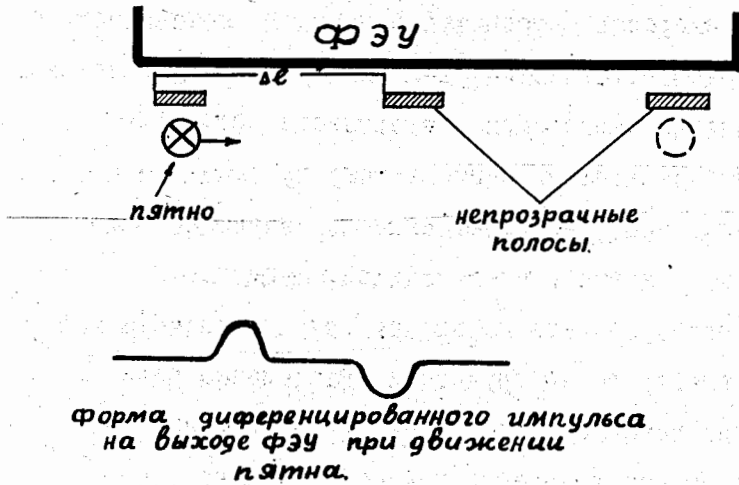


Рис. 3.

упрощенная блок-схема системы передвижения луча. Сигнал, поступающий на триггер от управляющей системы, переворачивает его в положение показанное на рис.4 (верхняя часть проводит). При этом открывается соответствующее устройство, заряжающее отклоняющие пластины

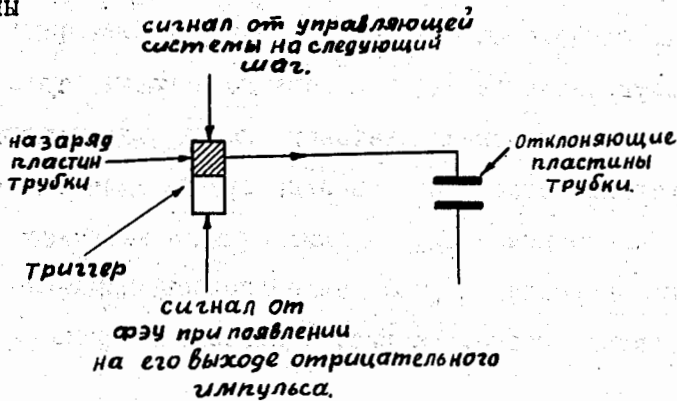


Рис.4

и, тем самым, передвигающее пятно поперек полос. В нижней части рис.3 показан примерный вид дифференцированного импульса с выхода ФЭУ при движении пятна поперек полос. Отрицательный импульс, сформированный соответствующим образом, подается на триггер, перебрасывает его и прекращает дальнейшее движение луча. Такого типа стабилизация должна быть сделана отдельно для вертикального и горизонтального передвижения. По-видимому, в состоянии покоя пятна (когда верхняя часть триггера не проводит) более предпочтительным будет не полное экранирование пятна полосой, а положение, показанное на рис.3 пунктиром. Такое положение позволяет легче осуществить компенсацию медленного сползания луча во времени.

Естественно попытаться хоть в какой-либо степени сравнить описанную "дискретную" систему с системой непрерывного слежения. В случае применения электронных трубок скорость просмотра будет определяться в основном уже не скоростью движения щели, а скоростью срабатывания логических и решающих элементов. Так как навряд ли система непрерывного слежения обойдется без логики, скорости просмотра становятся приблизительно равными. По-видимому, можно достичь скоростей просмотра порядка  $10^6$  шагов в секунду.

Помимо скорости просмотра важной характеристикой системы является сложность решаемых ею задач, ее устойчивость к фону. Система дискретного слежения в силу своего родства математическим машинам дискретного счета, подобно им, лучше, естественнее поддается логизации. Это, по-видимому, будет важным обстоятельством при переходе к полной автоматизации просмотра, без участия человека.