

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКНОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ**ДЕТЕКТОРЫ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ИЗ БЕСПОДЛОЖЕЧНЫХ ЭМУЛЬСИЙ****А. А. Варфоломеев**

## ВВЕДЕНИЕ

Метод толстослойных фотопластинок стал использоваться в ядерной физике особенно широко в последние годы, когда были получены пластинки, способные регистрировать заряженные частицы с минимальной ионизирующей способностью и позволяющие измерять угол многократного рассеяния частиц. Использование фотометода позволило сделать ряд важных открытий в ядерной физике, в особенности при изучении различных явлений в космических лучах.

Однако этот метод имеет тот основной недостаток, что толщина эмульсионного слоя не превышает обычно одного миллиметра. Такое ограничение толщины фотозэмульсионного слоя пластинки вызывается спецификой фотографической обработки пластинок и просмотра их под микроскопом.

При использовании любого способа изучения следов заряженных частиц (счёт зёрен, измерение угла многократного рассеяния, измерение плотности  $\delta$ -электронов и др.) результат получается тем точнее, чем больший участок следа доступен измерению. Последний же прямо пропорционален толщине эмульсионного слоя пластинки, если следы распределены более или менее изотропно. (Вероятность того, что след длиной  $R$  уложится в тонком слое толщиной  $T$  равна  $\sim \frac{T}{2R}$ .)

Очень важно иметь эмульсионные слои большой толщины при изучении нестабильных частиц, так как полные сведения о природе распадающейся частицы (о её массе, схеме распада, времени жизни и т. п.) можно получить лишь в том случае, если зарегистрирован весь её след, вплоть до остановки или до места распада на лету. Число остановок в пластинке вторичных частиц, образуемых первичным излучением, и третичных, возникающих при

распаде нестабильных вторичных частиц, будет пропорционально их среднему пробегу в эмульсии, а следовательно, и толщине эмульсионного слоя, так как распределение таких частиц можно считать изотропным. Число рождений частиц внутри эмульсионного слоя пропорционально объёму этого слоя, а следовательно, и толщине  $T$ . Таким образом, общее число остановок частиц, образовавшихся в эмульсии, будет пропорционально квадрату толщины эмульсионного слоя.

Уже из этих примеров ясно, что за исключением тех случаев, когда изучаются направленные потоки быстрых частиц (например, пучки заряженных частиц из ускорителей), необходимы эмульсионные слои с большой толщиной. Так как средний свободный пробег быстрых частиц в эмульсии, определяемый ядерным взаимодействием, равен приблизительно  $25 \text{ см}$  ( $\sim 100 \text{ г/см}^2$ ), целесообразно иметь слои с толщиной во всяком случае не меньше, чем в несколько сантиметров.

Наиболее выгодной формой эмульсионного детектора для изучения нестабильных частиц, образуемых космическими лучами, является сферическая или кубическая форма \*).

## 1. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЭМУЛЬСИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ С БОЛЬШОЙ РАБОЧЕЙ ТОЛЩИНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИОННОГО СЛОЯ

Есть несколько путей увеличения рабочей толщины эмульсионных слоёв. Первый способ заключается в изготовлении ещё более толстослойных фотопластинок. Однако этот способ связан с большими трудностями фотографической обработки пластинок и просмотра их под микроскопом. С увеличением толщины эмульсионного слоя пластинки значительно труднее добиться её равномерного проявления по глубине и обеспечить малые искажения эмульсионного слоя при обработке. При этом возрастает и продолжительность фотообработки \*\*). Для просмотра пластинок с эмульсионным слоем большой толщины необходимы особые микроскопы с большим рабочим расстоянием объектива. Рассеяние света в слое эмульсии при просмотре пластинок, ухудшающее качество изображения в микроскопе, вообще ставит принципиальный предел увеличению толщины эмульсионного слоя пластинок.

Всё это привело к тому, что пластинки с эмульсионным слоем толщиной  $1200 \mu$  используются очень редко, и в литературе имеются лишь отдельные сообщения<sup>2</sup> об изготовлении слоёв эмульсии в  $2 \text{ мм}$ .

\*) Средний пробег быстрых изотропно распределённых частиц в детекторе, имеющем форму выпуклого многогранника, равен  $4V/S$  для частиц, попадающих в детектор извне, и  $2V/S$  для частиц, образующихся в эмульсии ( $V$  — объём эмульсионного детектора,  $S$  — его поверхность).

\*\*\*) По данным Дэйтона<sup>1</sup> обработка пластинок с эмульсионным слоем толщиной в  $1 \text{ мм}$  занимает  $\sim 15$  суток.

Складывание двух пластинок эмульсией друг к другу позволило расширить пределы рабочей толщины эмульсионного слоя лишь в 2 раза по сравнению с фотопластинками, т. е. лишь до 2—3 мм.

Способ набора отдельных пластинок в пачку<sup>3</sup> оказался целесообразным при исследовании таких явлений в космических лучах как «струи» и тяжёлые (многозарядные) частицы первичной компоненты, так как в этих случаях частицы могли быть прослежены через несколько пластинок, несмотря на то, что один эмульсионный слой был отделён от другого стеклом. При исследовании же отдельных лёгких частиц, имеющих значительную вероятность рассеяться в стекле, этот способ увеличения объёма эмульсионного детектора заряженных частиц, конечно неприменим.

Единственным результативным способом увеличения рабочей толщины эмульсионного детектора до практически необходимой оказался способ, получивший в последнее время название эмульсионной камеры.

Из отдельных эмульсионных бесподложечных слоёв составляется пачка. После облучения пачки она разбирается и слои обрабатываются и просматриваются отдельно. Толщина слоёв выбирается такой, чтобы их обработка и просмотр были бы несложными (200—600 м).

В настоящее время в периодической литературе имеется описание нескольких вариантов эмульсионных камер<sup>4—10</sup>.

Использование пачки бесподложечных фотоэмульсионных слоёв в качестве детектора заряженных частиц стало возможным после того, как были разрешены две основные экспериментальные задачи:

1. Разработка методов изготовления слоёв и методов их обработки, не вносящих больших искажений.
2. Разработка эффективных способов прослеживания следов заряженных частиц через несколько слоёв.

Конкретным способом решения этих задач и отличаются друг от друга различные варианты эмульсионной камеры. В связи с интересом, который представляет собой способ эмульсионной камеры, кажется целесообразным сделать краткий обзор некоторых методических подробностей, связанных с изготовлением, обработкой и просмотром таких пачек эмульсионных слоёв.

## 2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПАЧЕК ФОТОЭМУЛЬСИОННЫХ БЕСПОДЛОЖЕЧНЫХ СЛОЁВ

Бесподложечные фотоэмульсионные слои изготавливаются из такой же эмульсии, что и фотопластинки. Для улучшения её механических свойств в неё могут вводиться специальные добавки.

Большинство зарубежных исследователей пользуются готовыми эмульсионными слоями, поставляемыми фирмой Ильффорд. Конкретных

описаний способов полива таких эмульсионных слоёв в опубликованной литературе нет.

Вполне оправдал себя метод полива эмульсионных слоёв, предложенный и разработанный в Советском Союзе В. В. Алперсом в 1948 г. Полив эмульсии производится на тщательно установленные в горизонтальном положении и охлаждённые кюветы с бортиками, изготовленные из органического стекла. После застуденения эмульсия переставляется в сушильный шкаф, в котором циркулирует воздух при температуре  $\sim 25^\circ\text{C}$ . Высушенная эмульсия снимается с кювет (после надреза краёв) и нарезается при помощи штампа в виде кругов. Принятый в последнее время диаметр кругов равен 10 см при толщине слоёв в 300—400  $\mu$ .

Аналогичный способ полива эмульсионных слоёв описан Дэмером<sup>5</sup>. Расплавленная эмульсия поливалась на горизонтально установленную кювету, которая представляла собой лист стекла (размером  $78 \times 53 \text{ см}^2$ ) с наклеенными по краям бортиками из люцита. При этом принимались все меры предосторожности против образования в эмульсии воздушных пузырьков, так как последние приводят к искажению слоёв. Сушилась эмульсия в слабом токе воздуха при температуре  $25^\circ\text{C}$  и влажности  $67 \pm 3\%$ . (При толщине сухого эмульсионного слоя 300  $\mu$  сушка занимала 2 дня.) Высохшая эмульсия снималась со стекла и из полученного эмульсионного листа нарезались отдельные куски необходимых размеров.

Наиболее распространённый размер слоёв в эмульсионной камере  $15 \times 15 \text{ см}^2$  при толщине 600  $\mu$ . Встречаются описания эмульсионных камер со слоями размером  $5 \times 10 \text{ см}^2$  и  $10 \times 15 \text{ см}^2$  при толщине от 300  $\mu$  до 600  $\mu$ .

Для собирания эмульсионных слоёв в пачку применялись обычно два способа. При одном способе слои прокладывались тонкими листами бумаги, предохраняющими их от слипания друг с другом<sup>6,8</sup>. Это приводило к тому, что даже тогда, когда пачка была плотно сжата, слои отстояли друг от друга<sup>8</sup> на расстояние до 100—150  $\mu$ . Такие промежутки между слоями очень нежелательны, так как они в значительной степени затрудняют процесс прослеживания следов через пачку.

В тех случаях, когда эмульсия была достаточно сухой и нелипкой, слои накладывались друг на друга без прокладок<sup>5,7,10</sup>. Для того чтобы по возможности уменьшить воздушные промежутки между слоями и облегчить разъединение слоёв после экспозиции Орир<sup>11</sup> предлагает заострять края эмульсионных слоёв.

Собранная пачка зажималась обычно между двумя пластинками из твёрдого материала (металла, бакелита и т. п.) и либо обматывалась липкой тесьмой, либо стягивалась болтами. При этом можно было добиться того, чтобы воздушные промежутки между слоями в пачке без прокладок<sup>5,10</sup> были бы  $\sim 10 \mu$ . При круглой форме слоёв можно использовать заворачивающиеся кассеты.

### 3. СПОСОБЫ ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ФОТОЭМУЛЬСИОННЫХ СЛОЁВ

В настоящее время применяются два способа фотографической обработки эмульсионных слоёв.

Один из способов заключается в том, что слои после разборки пачки наклеиваются на специально подготовленные стёкла\*) и обрабатываются как обычные фотопластины<sup>6-9</sup>.

При другом способе слои обрабатываются в свободном, не наклеенном на подложку, состоянии<sup>4, 5, 8, 10</sup>. Пользуясь вторым способом, бомбейская группа физиков вела обработку слоёв в стеклянных кюветах<sup>8</sup>. Дно кювет устилалось фильтровальной бумагой, что предотвращало прилипание слоёв к стеклу. В теплой стадии проявления под бумагу осторожно подводилось стекло, которое затем вместе с находившимся на нём эмульсионным слоем помещалось на тёплую металлическую поверхность. В течение всей обработки к слоям руками не прикасались.

При обработке вторым способом неплохие результаты были получены, когда слои на время обработки помещались в специально изготовленные из органического стекла «гнезда» с дном из сетчатой ткани (канвы).

Во время обработки стопка таких гнезд покачивалась вверх — вниз (вручную или механически) так, что значительную часть времени слои находились в растворе во взвешенном состоянии. Слои вынимались из гнезд лишь на время тёплой стадии проявления.

Орир<sup>10</sup> для обработки бесподложечных слоёв вторым способом помещал их в особые кюветы с дном из тефлоновой ткани. Для равномерности проявления слои в холодной стадии время от времени поворачивались и переворачивались. (Вся обработка, за исключением тёплой стадии проявления, велась при температуре 5°С, поэтому слои были твёрдыми, упругими.)

Менее удачным следует считать способ проявления эмульсионных слоёв без подложки в условиях подвешивания их за края<sup>5</sup>, так как этот способ вносит относительно большие искажения слоёв. Слои вытягиваются даже при очень низкой температуре (0—2°С) во время всей обработки.

При обработке слоёв в свободном состоянии диффузия растворов в слой происходит с двух сторон, поэтому режимы обработки в этом случае могут быть такими же, какие приняты для пластинок с толщиной эмульсионного слоя, в 1,5—2 раза меньшей.

---

\*) Во всех описанных случаях использовались стёкла, приготовленные фирмой Ильффорд. О способах наклейки слоёв на стёкла см. <sup>6-9, 11</sup>.

#### 4. ИСКАЖЕНИЯ ФОТОЭМУЛЬСИОННЫХ СЛОЁВ, ВНОСИМЫЕ ОБРАБОТКОЙ, И СПОСОБЫ ИХ УМЕНЬШЕНИЯ

После высыхания обработанных эмульсионных слоёв может оказаться, что, помимо усадки эмульсии вследствие удаления из неё бромистого серебра при фиксировании, в слоях при обработке произошли деформации сдвига, слои изменили свою форму или линейные размеры, другими словами, произошли искажения слоёв, дисторсии.

Ко всякой фотографической обработке эмульсионных слоёв предъявляется требование — внести наименьшие искажения (при качественном проявлении), так как лишь при достаточно малых искажениях можно производить надёжные измерения вдоль следов частиц и эффективно прослеживать следы через пачку.

В литературе имеется описание ряда мер, так или иначе уменьшающих дисторсии (деформации) слоёв, возникающие в результате их обработки. Некоторые из этих мер непременно надо иметь в виду при обработке эмульсионной камеры, чтобы обеспечить малость деформации слоёв.

а) При обработке слоёв, наклеенных на стёкла, большие искажения могут вызываться пузырями, которые образуются в процессе обработки пластинок (обычно в конечной стадии фиксирования). Причиной возникновения пузырей являются, повидимому, мелкие пузырьки воздуха, застревающие между эмульсионным слоем и стеклом.

В качестве мер против образования пузырей Поуэлл<sup>6</sup> рекомендует обезгаживать кипячением раствор глицерина, используемый для наклейки слоёв; Стиллер<sup>7</sup> советует тщательно смачивать поверхность стекла и слоя при наклейке и быстрее производить наклейку; Даниэл<sup>9</sup> предлагает использовать для наклейки свежеприготовленные, мало находившиеся на воздухе стёкла. Число пузырей при этом может быть снижено до приемлемой цифры: 1 пузырь на  $\sim 75 \text{ см}^2$  эмульсии<sup>9</sup> или даже<sup>6, 7</sup> на  $\sim 800 \text{ см}^2$ .

б) При первом способе обработки необходимо предусмотреть, чтобы в процессе наклеивания слоёв они не изменили своих размеров. Для этого, например, необходимо свести к минимуму отрезок времени, на который слои погружаются в раствор глицерина в воде перед наклеиванием<sup>6</sup>, а температура раствора при этом не должна быть высокой ( $< 10^\circ \text{C}$ ). В противном случае слои станут мягкими и, прижимая их к стеклу, можно значительно изменить их размеры.

Есть возможность вообще операцию погружения слоёв в воду заменить смачиванием поверхностей слоя и стекла при помощи ваты, пропитанной соответствующими растворами<sup>7, 8</sup>.

в) Для уменьшения дисторсий, вносимых обработкой слоёв, рекомендуется избегать резких изменений концентрации солей, температуры и  $pH$  растворов<sup>7</sup>.

г) Рядом авторов отмечается, что дисторсии слоёв заведомо меньше, если вся их обработка ведётся при низкой температуре<sup>5, 6, 10</sup>. В особенности это касается второго способа обработки слоёв (без подложки). Неслучайно поэтому Орир<sup>10</sup> всю обработку (за исключением теплой стадии проявления) ведёт при температуре  $\sim 5^\circ\text{C}$ , а Дэмер<sup>5</sup> — даже при  $0-2^\circ\text{C}$  (в том числе и проявление).

д) Бомбейская группа<sup>8, 9</sup> пришла к выводу, что искажения слоёв могут быть уменьшены, если пластинки во время обработки располагать строго горизонтально и не трогать их руками.

е) Наибольшие искажения слоёв возникают при фиксировании, промывке и сушке слоёв. Это связано с тем, что в этих стадиях обработки эмульсионный слой претерпевает большие объёмные изменения.

Искажения, вызываемые процессом фиксирования, могут быть уменьшены, во-первых, как уже отмечалось выше, снижением температуры фиксирования до  $\sim 5^\circ\text{C}$ <sup>7, 10</sup> или даже до  $0-2^\circ\text{C}$ <sup>8</sup> и, во-вторых, использованием дубящих фиксирующих растворов<sup>5, 8</sup>.

ж) Сушка бесподложечных слоёв представляет собой целую проблему. Наиболее удачной следует считать сушку в водном растворе спирта<sup>2, 8, 10</sup>.

В растворе обычно поддерживается 3—6-процентная концентрация глицерина. Через каждые примерно 4 часа концентрация спирта увеличивается на 10—20% до полной замены воды спиртом. (Слои при этом могут стать по размерам меньше, чем до обработки.) Для окончательного высушивания слои вынимаются из спирта и либо наклеиваются на стекло, либо зажимаются между двумя слоями гладкого картона<sup>8, 10</sup>. В последнем случае высушенные слои упруги и эластичны. Для удобства просматривания они могут быть наклеены на стекло тем или иным способом<sup>8, 10</sup>.

Дэмер<sup>5</sup> применяет несколько другой способ высушивания бесподложечных слоёв. После промывки в воде слои помещаются на 10 минут в 10-процентный водный раствор спирта с примесью глицерина в количестве  $\sim 8\%$  по весу. Затем слои накладываются на стекло и прижимаются к нему валиком. Окончательно слои высушиваются в слабом токе воздуха в течение дня. При этом способе сушки линейные размеры высушенных слоёв оказываются на несколько процентов больше первоначальных.

з) Пластинки (слои, наклеенные на стёкла) можно сушить так же, как и бесподложечные слои, в спирте<sup>8, 9</sup>. Стиллер<sup>7</sup> сушил пластинки в сушильном шкафу, окружив их охранным кольцом из других пластинок. Влажность воздуха в шкафу изменялась постепенно от 100 до 50%. Результаты при этом оказались весьма удовлетворительными (см. ниже).

Разумеется, что всё перечисленное выше не исчерпывает ещё всех возможностей уменьшения деформации эмульсионных слоёв, вносимых обработкой. В вопросе о причинах деформаций слоёв остаётся пока ещё много невыясненного. Однако уже сейчас можно сделать некоторые заключения о способах и результатах обработки эмульсионных слоёв.

При обработке в наклеенном на стёкла состоянии эмульсионные слои по форме и по площади остаются неизменными. Число пузырей, вносящих большие искажения слоёв, может быть уменьшено настолько, что они не будут практически мешать работе. Как отмечает Стиллер<sup>7</sup>, при всех принятых им мерах предосторожности обработанные наклеенные на стёкла слои имеют местные деформации сдвига несколько большие, чем в обычных пластинках, и лишь в отдельных случаях деформации такие же, как в пластинках ( $\sim 50$  кованс\*), обработанных при тех же условиях.

Бомбейской группе удалось уменьшить деформации слоёв при первом способе обработки сначала со 110 кованс<sup>8</sup> до 80, а затем даже до 30 кованс<sup>9</sup>.

Таким образом, эмульсионные слои могут быть обработаны по первому способу так, что деформации в этих слоях (порядка 30—50 кованс) будут мало отличаться по величине от деформации в обычных толстослойных фотопластинках. Такие результаты обработки позволяют пользоваться всеми методами изучения следов заряженных частиц (счёт зёрен, счёт  $\delta$ -электронов, измерение пробегов и т. п.), за исключением, быть может, метода многократного рассеяния для очень быстрых частиц ( $p\beta > 10^{10}$  эв/с).

При втором способе обработки эмульсионных слоёв (без подложки) местные искажения, как правило, значительно меньше, чем в первом случае, и равны приблизительно 10 ковансам. Объясняется это, по видимому, тем, что при первом способе обработки при набухании эмульсии в слое возникают напряжения, так как одна из поверхностей слоя закреплена, тогда как другая — свободна. При втором же способе обработки такие напряжения не возникают, потому что обе поверхности свободны.

Такие малые искажения в слое ( $\sim 10$  кованс) позволяют пользоваться методом многократного рассеяния и для весьма быстрых частиц. Однако, как уже было отмечено выше, при сушке бесподложечные слои обычно сильно сжимаются, и поэтому окончательные размеры слоёв по площади могут значительно отличаться от первоначальных. Так, при тщательной сушке в спирте у бомбей-

\*) Деформации сдвига эмульсионных слоёв можно измерять независимо от толщины слоя  $T$  коэффициентом  $k = K/T^2$ , где  $K$  — вектор деформации сдвига точек на поверхности этого слоя. Если величина  $K$  выражена в микронах, а  $T$  — в миллиметрах, то коэффициент  $k$  будет выражен в условных единицах — ковансах, названных так по имени двух авторов, предложивших этот способ измерения деформации<sup>12</sup>.



ской группы<sup>8</sup> окончательные линейные размеры слоёв были на 2 мм меньше, чем первоначальные —  $10 \times 15$  см<sup>2</sup>.

Если даже пытаться изменять размеры слоёв при сушке, меняя концентрацию спирта (для увеличения размеров слоя добавлять воду), то всё же трудно получить нужный размер слоёв с большей точностью, чем 0,1 мм.

Наличие таких больших изменений в линейных размерах слоёв в значительной степени осложняет работу при прослеживании следов от слоя к слою и делает мало применимым второй способ обработки эмульсионных слоёв в случаях, когда число слоёв в пачке велико.

#### 5. ПРОСЛЕЖИВАНИЕ СЛЕДОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ НЕСКОЛЬКО СЛОЁВ

Преимущества пачки бесподложечных фотоэмульсионных слоёв как детектора заряженных частиц лишь тогда могут полностью использоваться, когда существует эффективный способ прослеживания следов через пачку, в том числе и следов минимальной ионизации.

Для облегчения перехода от одного слоя к другому при изучении следов на слои обычно наносятся (перед обработкой) метки, по которым можно было бы судить об относительном положении слоёв в пачке при её экспонировании. Так, в эмульсионной камере Орир<sup>10</sup> при составлении пачки между слоями зажимались мелкие обрезки тонкой проволоки, оставлявшие в слоях вмятины, заметные и после обработки.

Представляется более удобным для перехода от слоя к слою иметь в качестве меток на слоях координатную сетку из тонких линий с размерами клетки в несколько миллиметров. Такую сетку можно нанести, например, облучая пачку рентгеновскими лучами через узкую (15—30 м) щель между двумя толстыми слоями свинцового стекла.

Как уже указывалось выше, при обработке слоёв без подложки (вторым способом) возникают большие объёмные искажения, поэтому в этом случае при поиске продолжения следа пользуются обычно координатами этого следа относительно какой-нибудь ближайшей метки на прилегающих поверхностях слоёв. Для более точного определения места входа следа в соседний слой можно пользоваться его координатами относительно какого-либо следа тяжёлой частицы, проходящей через оба слоя недалеко от исследуемого места. Координаты продолжения исследуемого следа можно определить при этом с точностью<sup>10</sup> до  $\sim 10$  м. Если ориентироваться по нескольким близлежащим следам, то вероятность ложного перехода станет много меньше 1%. При облучении пачек космическими лучами можно, вообще, в качестве меток

пользоваться следами тяжёлых частиц, если таких следов достаточно много<sup>8</sup>.

Однако способ перехода от слоя к слою по координатам относительно какой-либо метки занимает сравнительно много времени.

При обработке слоёв в наклеенном на стёкла состоянии их общие размеры, как уже было отмечено выше, сохраняются, поэтому имеет смысл добиться такого положения эмульсионных слоёв относительно краёв пластинок, при котором слои располагались бы на столике микроскопа идентичным образом. Соприкасающиеся во время облучения участки соседних слоёв будут иметь при этом одинаковые координаты (с точностью, определяемой юстировкой пластинок и искажениями слоёв). Переход от слоя к слою в этом случае будет осуществляться простой заменой пластинок на столике микроскопа и поиском исследуемого следа в поле зрения микроскопа.

Для облегчения юстировки пластинок имеет смысл нанести на слои, когда они находятся в пачке, ряд меток. Поуэлл<sup>6</sup> рекомендует наносить сразу на все слои ряд линий, облучая пачку рентгеновскими лучами со стороны боковых граней слоёв. Ориентируясь по полученным меткам (шириной  $\sim 200 \mu$ ), можно обрезать края пластинок так, чтобы относительное расположение пластинок на столике микроскопа было таким же, как в пачке с точностью до  $\sim 100 \mu$ . Стиллер<sup>7</sup> для нанесения меток облучал рентгеновскими лучами пачку, прикрытую свинцовой пластинкой, в которой были небольшие отверстия. На всех слоях (если рентгеновские лучи были достаточной жёсткости) получались метки в виде круглых точек, по которым можно было ориентироваться при обрезании краёв пластинок.

Бомбейская группа<sup>8</sup> после обработки пластинок (слоёв, закреплённых на стёклах) наклеивала их на прямоугольные прозрачные рамки медленно высыхающим клеем. Пластинку можно было сдвигать относительно рамки в течение  $\sim 30$  мин. За это время рамка с пластинкой помешалась на столик микроскопа, и подбиралось нужное положение пластинки на рамке. При некотором навыке удавалось, ориентируясь по следам тяжёлых частиц, расположить пластинки так, чтобы относительное положение пластинок на столике микроскопа отличалось от их относительного положения в пачке не больше, чем на  $10 \mu$ . С учётом искажений слоёв и промежутков между ними в пачке ( $\sim 100-150 \mu$ ) это означало, что координаты входа и выхода следов из соседних слоёв могли отличаться на  $50 \mu$ . При таких условиях ещё затруднено прослеживание следов минимальной ионизации.

При переходе к большому количеству слоёв в пачке (к 125, а затем и к 200) бомбейской группе пришлось несколько усовершенствовать конструкцию камеры и юстировку пластинок<sup>9</sup>, чтобы не тратить слишком много времени на прослеживание следов через

пачку. Вместо применявшихся ранее бумажных прослоек между слоями были помещены сетки из тонких (диаметром  $18 \mu$ ) нейлоновых нитей. Промежутки между слоями были уменьшены таким образом до  $25-35 \mu$ . Нити предварительно пропитывались  $\alpha$ -активным (полониевым) раствором и поэтому на слоях оставались следы от нитей (координатная сетка). Пробеги  $\alpha$ -частиц были при этом достаточно большими, чтобы сетка была хорошо видна, и достаточно короткими, чтобы их следы не ухудшали видимости внутри слоя.

После обработки пластинки наклеивались, как и в предыдущем случае<sup>8</sup>, на рамки; ориентиром теперь служила координатная сетка. Какое-либо перекрестие на поверхности слоя фиксировалось объективом микроскопа, на столике которого располагалась пластинка, другое перекрестие на той же поверхности, — другим, переносным микроскопом, подставляемым вплотную к первому. Соседняя пластинка наклеивалась на рамку так, чтобы в поле зрения микроскопов оказались перекрестия координатной сетки от тех же участков нитей, что и в первом случае. Такой контроль положения пластинки двумя микроскопами позволял наклеивать пластинки в одинаковом положении с точностью до  $5 \mu$ .

Благодаря уменьшению искажений слоёв при обработке (см. выше), уменьшению промежутков между слоями до  $25-30 \mu$  и более точной установке пластинок (с помощью двух микроскопов) координаты выхода следа из слоя отличались от координат его входа в соседний слой, в среднем, не больше, чем на  $20-30 \mu$ . Это в значительной степени ускорило процесс перехода от слоя к слою и позволило надёжно проследить и следы минимальной ионизации. Без этих условий детектор с таким большим количеством эмульсионных слоёв был бы мало эффективным.

## 6. ВОЗМОЖНОСТИ ЭМУЛЬСИОННОЙ КАМЕРЫ

В настоящее время технические трудности, которые встречаются при использовании пачки бесподложечных фотоэмульсионных слоёв в качестве детектора заряженных частиц, в значительной степени преодолены. Разработаны такие способы фотографической обработки пачки, которые вносят искажения эмульсионных слоёв, почти столь же малые, как и в случае обработки обычных фотопластинок с эмульсионным слоем такой же толщины. Во всяком случае, при работе с эмульсионной камерой, обработанной соответствующим образом, можно пользоваться всеми используемыми обычно при работе с фотопластинками методами исследований следов заряженных частиц, вплоть до измерения угла многократного рассеяния не очень быстрых частиц [ $p\beta < (5-10) 10^9$  эв/с].

При изучении нестабильных частиц такое ограничение для измерения угла многократного рассеяния не является большой помехой,

так как всё равно надёжные сведения о новых частицах получаются лишь тогда, когда удаётся зарегистрировать остановку частицы в эмульсии (на что и рассчитана эмульсионная камера), а, с другой стороны, частицы, возникающие при распаде нестабильных частиц, из-за сравнительно небольшого энергосвечения при распаде не будут обладать столь большой энергией, чтобы сказывалось это ограничение.

При уже разработанной методике эмульсионной камеры можно набирать пачки любой толщины. В настоящее время ограничение толщины эмульсионной камеры может вызываться по сути дела такими причинами, как невозможность просмотра чрезмерно больших объёмов эмульсии, ограниченное количество эмульсии, допустимый вес эмульсионной камеры, конечные объёмы аппаратуры, применяемой при изготовлении и обработке эмульсионной камеры, и т. п., но не принципиальными обстоятельствами, как это было в случае фотопластинок.

Показательным примером преимуществ и практических возможностей увеличения толщины эмульсионного детектора в виде пачки слоёв служит последний вариант эмульсионной камеры бомбейской группы<sup>9</sup>. Камера состояла из 200 эмульсионных слоёв размером  $15 \times 15 \text{ см}^2$  и толщиной 600  $\mu$  каждый. Таким образом, эмульсионный детектор представлял собой блок размером  $15 \times 15 \times 12 \text{ см}^3$  и весил около 11 кг. Средний возможный пробег  $\bar{L}$  в эмульсии для частиц, рождённых в такой камере, равен 4,60 см, в то время как в случае фотопластинок он был равен толщине эмульсионного слоя. По сравнению с первым блоком<sup>8</sup> из 24 слоёв, толщиной по 600  $\mu$  и размером  $10 \times 15 \text{ см}^2$ , в последнем случае<sup>6</sup> объём был увеличен в 12,5 раз, а пробег  $\bar{L}$  в 4 раза.

Учитывая, что число остановок или распадов частиц в эмульсии пропорционально среднему возможному пробегу частиц в камере (до тех пор, пока последний не делается больше максимально возможного пробега частиц, определяемого их энергией или временем жизни), а число рождений таких частиц в эмульсии — объёму блока, можно считать, что в последнем блоке может быть зафиксировано приблизительно в 50 раз больше остановок (распадов), образованных в эмульсии нестабильных частиц, чем в первом блоке. Другими словами, это означает, что таких нестабильных частиц, как тяжёлые мезоны и гипероны, может быть зафиксировано в 2—3 раза больше, чем их зафиксировано до сих пор вообще\*).

При тех незначительных осложнениях, которые вызываются необходимостью перехода от слоя к слою, метод эмульсионной камеры имеет большие преимущества по сравнению с фотопластин-

---

\*) В последнее время стало известно, что бристольская группа изготовила и обработала эмульсионную камеру весом около 60 кг.

ками, особенно там, где необходимы большие рабочие толщины эмульсии. Не случайно поэтому, что хотя первые сообщения об изготовлении пачки эмульсионных слоёв в иностранной литературе появились только в 1950 г.<sup>4</sup>, уже в 1953 г. большинство институтов, занимающихся изучением нестабильных частиц, вместо фотопластинок использовало пачки бесподложечных слоёв. Метод эмульсионных камер позволил впервые зафиксировать два<sup>13, 14</sup>, а затем и три<sup>15, 16</sup> остановившихся  $\pi$ -мезона, возникших при распаде  $\tau$ -мезонов и, таким образом, определить знак распадающегося в покое  $\tau$ -мезона и, с хорошей точностью, значение энергии, выделяющейся при его распаде. Эмульсионной камерой были впервые зафиксированы<sup>17</sup> схема распада  $\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ ;  $\tau$ -мезон, рождённый в лабораторных условиях<sup>18</sup>, парное рождение заряженной  $K$ -частицы с гипероном<sup>13, 14</sup> и ряд других интересных явлений, которые не удавалось обнаружить методом фотопластинок.

Принимая во внимание всё вышеизложенное, можно с уверенностью сказать, что метод эмульсионной камеры будет получать с каждым днём все большее распространение, в особенности там, где необходимы большие рабочие толщины эмульсионных слоёв.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A. D. Dainton, A. R. Cattiker, W. O. Lock, *Phil. Mag.* **42**, 396 (1951).
2. H. Yagoda, *Phys. Rev.* **79**, 207 (1950).
3. H. L. Bradt, B. Peters, *Phys. Rev.* **74**, 1828 (1948).
4. P. Demers, *Canad. Journ. of Phys.* **A28**, 628 (1950).
5. P. Demers, *Canad. Journ. of Phys.* **32**, 538 (1954).
6. C. F. Powell, *Phil. Mag.* **44**, 219 (1953); Fowler, Bagneres Conference (1953).
7. B. Stiller, M. M. Shapiro, F. W. O'Dell, *Rev. Sci. Instr.* **25**, 340 (1954).
8. D. Lal, Jash Pal, B. Peters, *Proc. Ind. Ac. Sci.* **A38**, 277 (1953).
9. R. R. Daniel, G. Friedman, Jash Pal, B. Peters, *Proc. Ind. Ac. Sci.* **A40**, 151 (1954).
10. J. Orear, *Rev. Sci. Instrum.* **25**, 1023 (1954).
11. Georges Kayas, *Journ. phys. rad.* **14**, 621 (1953).
12. M. G. E. Cosyns, G. Vanderhaegne, *Bull. Centre Phys. Nucleaire* № 15, (апрель 1953).
13. D. Lal, Jash Pal, B. Peters, *Phys. Rev.* **92**, 438 (1953).
14. D. Lal, Jash Pal, B. Peters, *Proc. Ind. Ac. Sci.* **A38** 398 (1953).
15. G. Belliboni, B. Sechi, G. T. Lorn, *Nature* **173**, № 4415 Suppl. VIII (1954).
16. A. Debenedetti, C. M. Garelli, G. Lovera, L. Tallone M. Vigone, *Nuovo Cim.* **11**, 420 (1954).
17. J. Crussard, M. F. Hapion, J. Klarman, J. H. Noon, *Phys. Rev.* **93**, 253 (1954).
18. R. D. Hill, E. O. Salant, M. Widgoff, *Phys. Rev.* **95**, 1699 (1954).