

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР**

РЕФЕРАТ

по истории и философии науки

на тему:

ИСТОРИЯ ЭМУЛЬСИОННОГО МЕТОДА

Выполнил:

Кривенков Д.О.

Научный руководитель:

канд. физ.-мат. наук Зарубин П.И.

Дубна, 2009

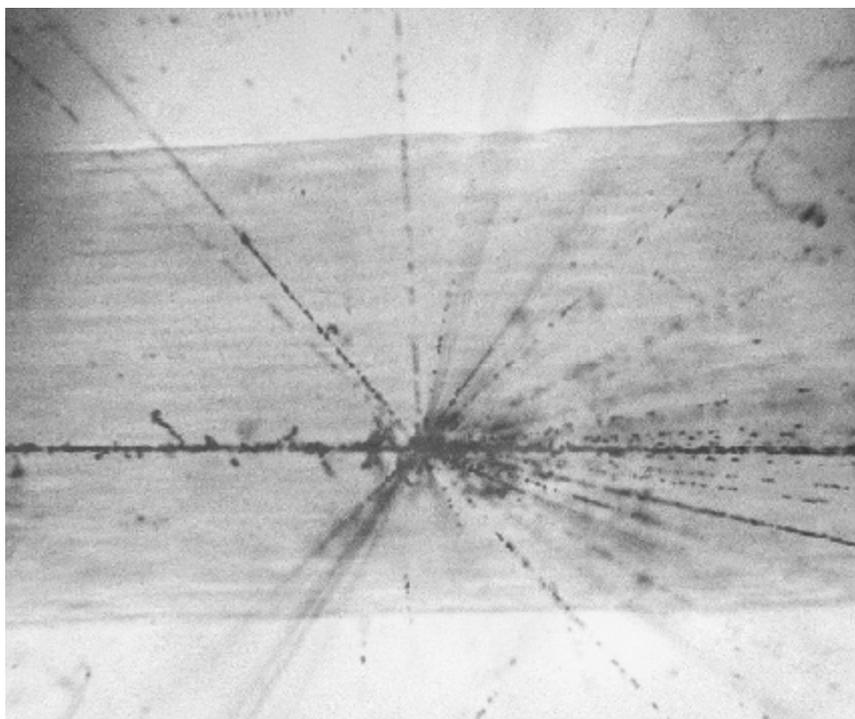
Оглавление

Введение	3
Глава 1. Ранний этап истории разработки фотографической эмульсии.....	5
§ 1. Фотографическое действие α -частиц.....	9
§ 2. Следы отдельных α -частиц.....	10
§ 3. Следы протонов	13
§ 4. Следы частиц космического излучения.....	14
§ 5. Разработка «ядерных» эмульсий.....	16
Глава 2. Исторические открытия	19
§ 1. Открытие π -мезона.	19
§ 2. Тяжелые, или K -мезоны в фотографической эмульсии.....	22
§ 3. Открытие Σ -гиперона	26
§ 4. Первые указания на существование антипротона	28
§ 5. Тяжелые ядра в космическом излучении	31
§ 6. Современный этап развития эмульсионной методики	33
Заключение	35
Литература	36

Введение

Многие достижения современной физики элементарных частиц связаны в той или иной степени с разработкой одного из основных экспериментальных методов ядерной физики – метода ядерной фотографической эмульсии. За последние десятилетия ядерные фотоэмульсии получили широкое распространение в физическом эксперименте, и на сегодня они являются одним из популярнейших средств регистрации, пригодным для получения точной информации о многих характеристиках частиц, таких, как масса, энергия, заряд, угловое и энергетическое распределение и т.д.

Метод регистрации следов заряженных частиц в эмульсии опирается на достижения современной технологии в изготовлении высококачественных



Совмещение двух микрофотографий: следы взаимодействия релятивистского ядра серы с тяжелым ядром эмульсии и фотографии человеческого волоса.

эмульсий и микроскопов, которые являются плодами столетнего исследовательского и промышленного опыта. Для иллюстрации на снимке представлена микрофотография взаимодействия ядра серы, мчавшегося почти со скоростью света, с ядром эмульсии. Этот кадр совмещен с фотографией

человеческого волоса. Ядро-снаряд двигалось слева до взаимодействия, оставляя кроме основного следа короткие следы атомных электронов отдачи. Из вершины взаимодействия расходятся следы вторичных частиц. Размеры физических объектов, оставивших следы, в миллиард раз меньше. Оба кадра получены в одинаковых условиях на микроскопе с 60-кратным увеличением, а их ширина соответствует 100 мкм. На сайте <http://becquerel.lhe.jinr.ru> собрана богатая коллекция видеоматериалов на эту тему.

В ядерной физике эмульсии обычно используют в виде слоев, нанесённых на стеклянные подложки. Положение слоев точно маркируется, благодаря чему траекторию частиц легко прослеживать по всей стопке, переходя от слоя к слою. Каждая частица, проникающая в слой эмульсии, вследствие своей ионизирующей способности оставляет за собой более или менее толстый след засвеченных зерен бромистого серебра. После проявления пластины этот след виден под микроскопом как цепочка отдельных точек или как сплошная линия. Следы или треки, расходящиеся из точки, где произошла реакция, различимы под микроскопом в виде звезд. Таким образом, в ядерной фотоэмульсии можно увидеть следы частиц и изучить частицы, которые образуются в результате реакции ядер фотоэмульсии с излучением, выяснить, куда, под какими углами, с какой энергией полетели эти частицы, и что произошло с ними в дальнейшем.

История эмульсионного метода насчитывает более ста лет, начиная с момента, когда в 1896г., исследуя действие люминесцирующих минералов на фотопластинку, Анри Беккерель случайно обнаружил, что некоторые соли урана вызывают почернение фотопластинок, завернутых в светонепроницаемую черную бумагу или металлическую фольгу. Эту дату можно считать отправной в истории эмульсионного метода. Но по настоящему в практику субатомных исследований этот метод вошёл в конце сороковых годов прошлого века после создания С. Пауэллом специальных фотопластинок с толстым эмульсионным слоем (эта работа была отмечена Нобелевской премией в 1950 г.).

Глава 1. Ранний этап истории разработки фотографической эмульсии.

Наиболее раннее сообщение (1727 г.) о действии света на соли серебра принадлежит, по всей вероятности, немецкому химику Шульце, который производил опыты с пастообразной массой, приготовленной путем обработки мела азотной кислотой. Случайно в азотной кислоте, применявшейся для одного из таких опытов, оказалось растворенное серебро, и Шульце обнаружил, что та часть пасты, которая облучалась солнечным светом, быстро потемнела, в то время как другая часть, находившаяся в тени, осталась без видимых изменений. Шульце был поражен, обнаружив, что в его опыте «свет породил темноту» [1].

Причина изменения цвета галоида была выяснена шведским химиком Шееле, который доказал в 1777 г., что это явление обусловлено разложением соли и выделением металлического серебра. Шееле показал, что если облучать подобную соль под водой, то одновременно с серебром выделяется соляная кислота; кроме того, он показал, что фиолетовая часть видимого спектра является более эффективной, чем красная. Шееле также установил, что металлическое серебро не растворяется в аммиаке, в то время как хлористое растворяется в нем, открыв, таким образом «фиксирующее» вещество [1]. Первое опубликованное сообщение (1827 г.) об успешной попытке фиксации устойчивого изображения методом, сходным с тем, который применяется в современной фотографии, принадлежит Нисефору Ньепсу [2]. Открытие Ньепса послужило основой метода, играющего важную роль в репродукционной печати.

Однако приблизительно до 1885 г. не было оценено по достоинству важное свойство фотографической пластинки, которая (если даже отвлечься от преимущества объективной регистрации изображения) при достаточной чувствительности позволяет фотографировать при помощи телескопа светила, невидимые невооруженным глазом; последнее объясняется тем, что фотографическая пластинка обладает «интегрирующими» свойствами, которые

отсутствуют у глаза. Сто лет спустя были оценены подобные же преимущества фотографической пластинки перед камерой Вильсона при регистрации следов заряженных частиц [1].

Следующий решающий шаг был сделан в 1847 г. Ньепсом де Сен-Виктором [3], который получил первые эмульсии галоидных солей серебра. Последние готовились путем полива пластинки тонким слоем раствора, содержавшего йодистый калий, альбумин и крахмал. Этот слой после частичной просушки очуствлялся путем погружения в раствор азотнокислого серебра, в результате чего в нем выпадали мельчайшие кристаллы йодистого серебра. После экспозиции в камере пластинка проявлялась галловой кислотой и фиксировалась в растворе бромистого калия. Ньепс де Сен-Виктор готовил эмульсионные слои на стекле, а не на бумаге или серебряных пластинках. Описанные эмульсии отличались очень малой стабильностью и обычно проявлялись немедленно после экспозиции.

В дальнейшем представляется целесообразным упомянуть лишь о некоторых из наиболее существенных достижений, сделанных в последующие годы. Важное усовершенствование, осуществленное в основном после 1920 г., состояло в стандартизации исходных продуктов и технологических процессов в связи с введением научных методов в фотографической промышленности. Еще на ранней стадии разработки эмульсий, предназначенных для специальных целей, стало ясно, что характер распределения размеров зерен микрокристаллов играет существенную роль в определении свойств данной эмульсии и что это распределение может контролироваться путем изменения условий осаждения серебра [1].

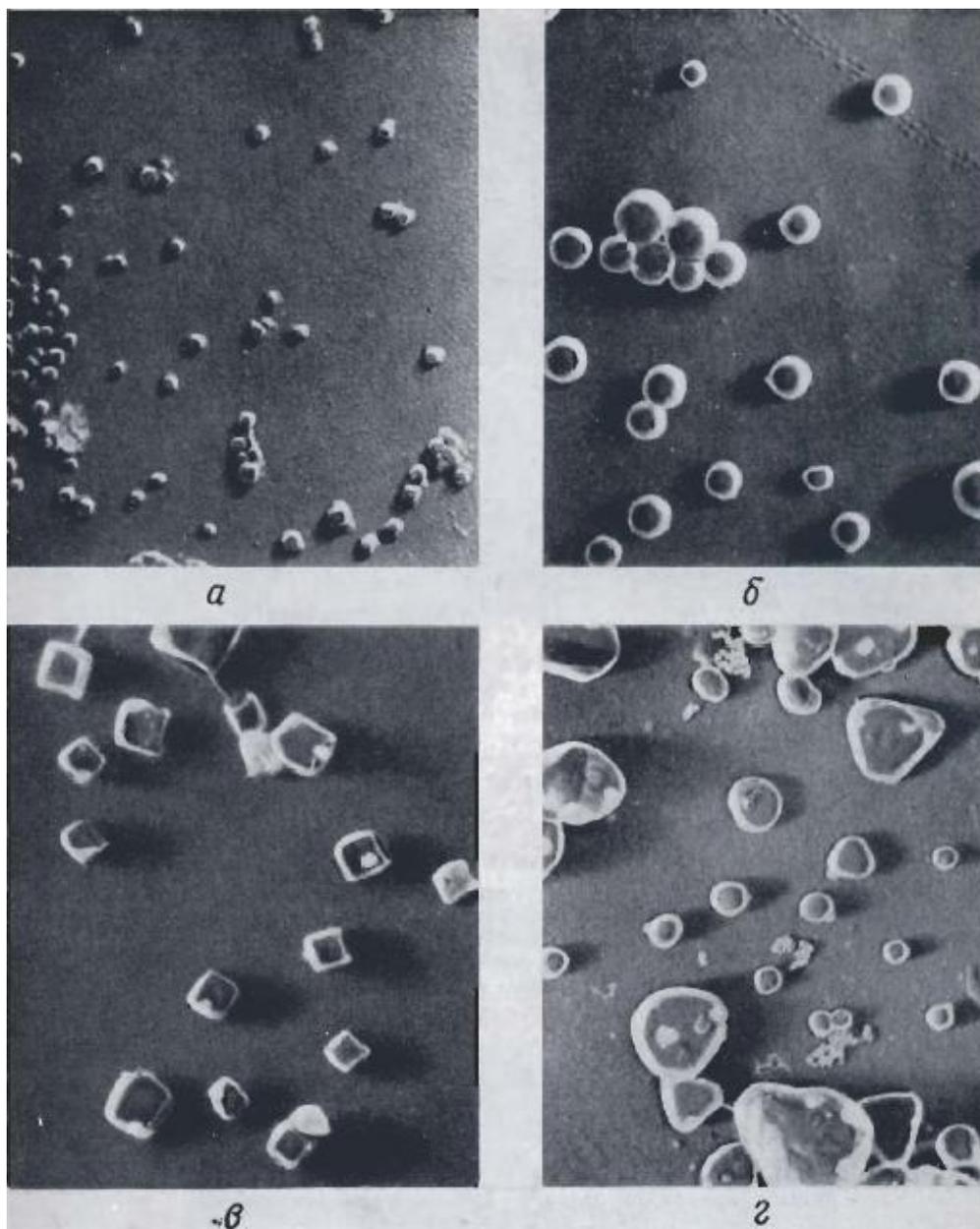


Рис. 1. Микрофотографии зерен различных эмульсий, полученные с помощью электронного микроскопа (20000 Å); а – липмановская эмульсия; б - эмульсия Ильфорд G5; в – эмульсия для фотометрических работ; г – специальная диапозитивная эмульсия.

Чрезвычайно существенно отметить то обстоятельство, что в эмульсиях, приготовленных при незначительном избытке галоида щелочного металла, зерна имеют, как правило, кубическую форму (рис. 1.). С другой стороны, при наличии значительного избытка галоида получаются обычно плоские зерна, состоящие из треугольных или шестиугольных пластинок. Подобные эмульсии склонны обнаруживать анизотропные свойства, поскольку если даже зерна и

были беспорядочно ориентированы в мокрой эмульсии, то при высыхании последней они стремятся расположиться параллельно поверхности стекла или какой-либо другой подложки, на которой находится эмульсия. Такая анизотропия ухудшает эмульсии, предназначенные для регистрации следов заряженных частиц.

Во всех способах приготовления на одной из окончательных стадий процесса к эмульсии для ее застуденения добавляется требуемое количество желатины. После этого эмульсия охлаждается, измельчается и затем промывается для удаления растворимых солей. Затем измельченная эмульсия снова расплавляется и выдерживается для повышения чувствительности при определенной температуре, зависящей от конкретных свойств применяемой желатины [1].

В 1925 г. Шеппард установил важную роль серы в процессе сенсibilизации эмульсии. Ему удалось выделить повышающие чувствительность соединения серы из тех сортов желатины, которые оказывались пригодными для производства «быстрых» эмульсий; впоследствии он готовил подобные же эмульсии путем добавления синтетических сернистых сенсibilизаторов в эмульсии, приготовленные на «инертной» желатине. Указанное открытие Шеппарда имело фундаментальное значение.

Дальнейшие успехи в развитии фотографических эмульсий были связаны с работами Козловского, проводившимися в 1936 г. в лаборатории фирмы Агфа в Вольфене. Козловский показал, что чувствительность эмульсий многих типов можно увеличить примерно вдвое, вводя в них на стадии созревания сложные соли одновалентного золота, как, например, тиоцианат или тиосульфат комплексной соли натрия и золота [1].

Технологические успехи, достигнутые благодаря упомянутым открытиям, имели решающее значение для ряда специальных проблем, связанных с разработкой эмульсий, пригодных для регистрации следов заряженных частиц.

§ 1. Фотографическое действие α -частиц.

Вскоре после открытия действия света на галоидные соли серебра появились сообщения о том, что под влиянием некоторых веществ, помещенных вблизи подобных солей, в последних образуется «скрытое изображение». Так, например, Мозер в 1842 г. нашел, что упомянутый эффект могут вызывать мел, мрамор, хлопковое волокно и перья; Ньепс де Сен-Виктор [3] в 1867 г. обнаружил, что под влиянием солей урана на фотографической пластинке появляется вуаль даже в тех случаях, когда между ними было помещено несколько листов бумаги. Ньепс приписал этот эффект люминесценции солей урана. Как заметил Ягода, если бы описанное явление было исследовано более тщательно, то открытие радиоактивности могло бы произойти на тридцать лет раньше.

В 1896 г. после открытия рентгеновских лучей вопрос о фотографическом действии солей урана был повторно рассмотрен Беккерелем. Было хорошо известно, что при прохождении тока через разрядную трубку при низком давлении заключенного в ней газа испускание рентгеновских лучей сопровождается флуоресценцией стеклянных стенок трубки. Однако в то время природа вновь открытого излучения и его происхождение не были достаточно поняты, и представлялось возможным, что оно тесно связано с наблюдавшейся флуоресценцией. Но в таком случае следовало заключить, что и флуоресцирующие урановые соли также могут испускать рентгеновские лучи и вследствие этого вызывать почернение фотографической пластинки. Беккерель наблюдал подобный эффект, пропуская излучение урана через несколько слоев черной бумаги; однако при этом он обнаружил, что урановые соли вызывают почернение независимо от того, флуоресцируют они или нет. Таким образом он и пришел к открытию радиоактивности урана [1].

Еще до того, как появилось сообщение о возможности регистрации следов заряженных частиц в газе с помощью камеры Вильсона, Мюгге обнаружил, что если рассыпать мелкие кристаллы циркония по поверхности

фотографической пластинки, на последней после проявления появляются маленькие черные пятна. Исследование этих пятен под микроскопом показало, что по крайней мере некоторые из них состоят из рядов черных зерен. Мюгге правильно приписывал почернение пластинок влиянию радиоактивных веществ, содержащихся в цирконии, однако он не догадался, что наблюдавшиеся им цепочки зерен представляют собой следы отдельных α -частиц. Несколько позднее Киношита [1] показал, что α -частицы вызывают почернение фотографической эмульсии. Однако опыты с прохождением α -частиц в плоскости пластинки, которые позволили легко отождествлять отдельные следы, были выполнены только после появления работы Вильсона (1911 г.). Киношита был знаком также с трудностями получения однородного проявления по глубине эмульсионного слоя и пользовался тонкими эмульсиями, поскольку, по его словам, оказалось «невозможным, даже в течение нескольких часов, равномерно проявить толстый слой».

§ 2. Следы отдельных α -частиц

Следы, принадлежащие отдельным α -частицам, впервые были отождествлены Рейнганумом, который опубликовал в 1911 г. зарисовки цепочек зерен, получившихся в результате прохождения частиц сквозь эмульсию. Наблюдения Рейнганума были подтверждены и продолжены Милем, определившим число зерен на следах различной длины. Миль установил линейную зависимость между средним числом зерен и длиной следов. Это совпадало с данными Киношита, показавшего, что каждое зерно, через которое прошла α -частица, становится способным к проявлению независимо от скорости этой частицы. Миль справедливо отметил, что искривление многих следов, наблюдавшихся Рейнганумом, обусловлено явлениями, происходящими в эмульсии при ее обработке; таким образом, Миль впервые обратил внимание на явление «дисторсии» [1].

Первые микрофотографии отдельных следов были получены Уолмсли и Маковером в 1914 г. (рис. 2.).

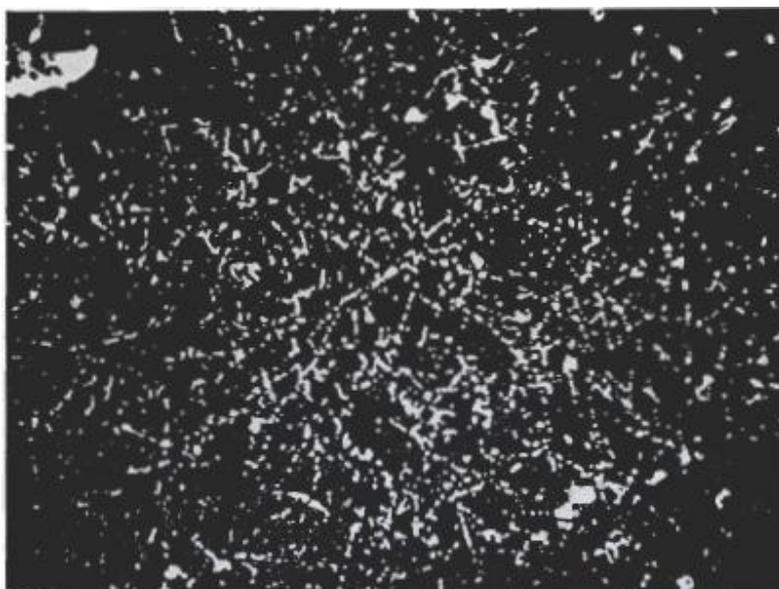


Рис.2. Первые микрофотографии следов α -частиц в фотографической эмульсии типа «Process» фирмы Ильфورد.

Следы принадлежат α -частицам, вылетающим из металлической пластинки, обработанной в течение нескольких секунд небольшим количеством радона, α -частицы вылетают в произвольных направлениях, однако можно легко различить цепочки зерен на траекториях отдельных частиц.



Рис. 3. Следы отдельных α -частиц. Пластика типа «Process» фирмы Ильфورد. Изломанный след приписывался рассеянию α -частицы; теперь, однако, считают, что он принадлежит двум частицам, выходящим из одной (или почти из одной) точки.

Они наблюдали видимое почернение пластинок типа «Process» фирмы Ильфورد, на которых помещалась металлическая пластинка, предварительно обработанная в течение нескольких секунд небольшим количеством радона. Почернение фотографической эмульсии вызывалось α -частицами, испускаемыми осажденными на пластинке атомами RaA и продуктами их распада. При исследовании эмульсионного слоя под микроскопом можно было заметить, что видимое почернение обусловлено наличием множества отдельных, беспорядочно расположенных следов. Вблизи границ области

потемнения, т. е. там, где α -частицы входили в эмульсию под малым углом к ее поверхности, можно было различить и сфотографировать отдельные цепочки зерен (рис. 2.). Уолмсли и Маковер обнаружили в отдельных случаях также следы с кажущимися изломами (рис. 3.).

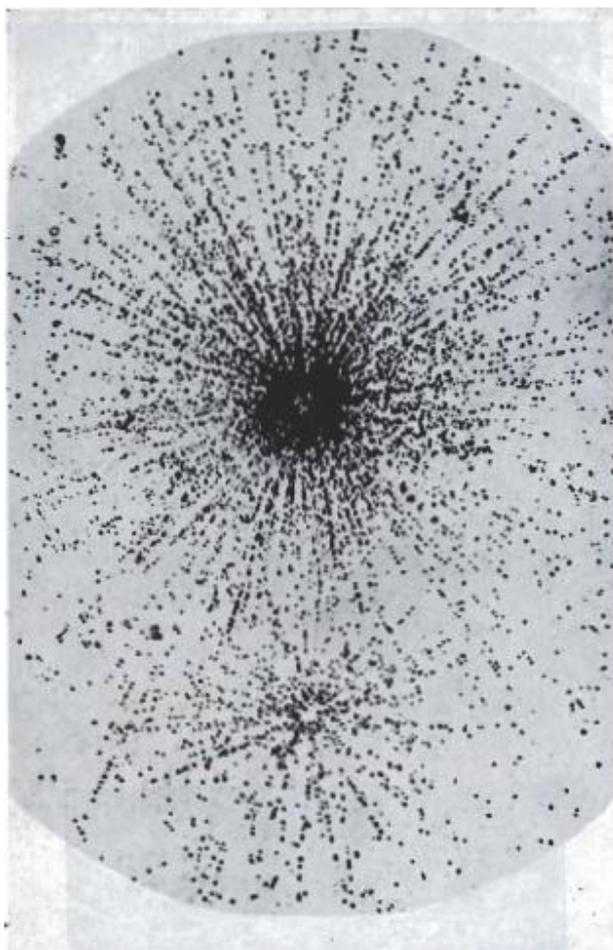


Рис. 4. Радиоактивное загрязнение в эмульсии. Пластинки типа «Ordinary» фирмы Рэтген.

Следы α -частиц, испускаемых концом швейной иглы, который предварительно был приведен в соприкосновение с металлической пластинкой, обработанной радоном. Лунка, оставленная концом иглы видна в виде светлого пятна в центре, из которого расходятся все лучи. Большинство следов принадлежит α -частицам RaC' , пробег которых в эмульсии составляет 54 μ , а среднее число зерен на следе равно 16. Многие из α -частиц приходят из точек иглы, находящихся над поверхностью эмульсии, вследствие чего получившееся гало не имеет резких границ. Обращает на себя внимание отсутствие рассеяния α -частиц на большие углы.

Они рассмотрели возможность того, что подобный случай представляет совокупность двух независимых следов, и указали допустимую величину

глубины резкости объектива микроскопа, при которой можно было решить, имеют ли эти следы общую точку. Уолмсли и Маковер приписали многие из найденных ими изломанных следов, типа изображенных на рис. 3, рассеянию α -частиц на большие углы; однако в настоящее время такое заключение представляется неверным.

На более поздних микрофотографиях, полученных Киношитой и Икеути, Сахни и Икеути в 1915 г., также можно заметить следы отдельных α -частиц, выходящих во все стороны из крупинки радиоактивного вещества, находящейся на поверхности эмульсии (рис. 4.).

§ 3. Следы протонов

После работ, выполненных в период 1910 — 1915 гг., существенные успехи в развитии метода были достигнуты лишь через 10 лет, когда в 1925 г. Блау [1] удалось получить следы «естественных протонов», т. е. частиц, испускаемых в результате упругого столкновения α -частиц с ядрами водорода. Позднее Блау наблюдала подобные же следы, принадлежавшие протонам из (α , p)-реакций, возникавших при бомбардировке легких элементов α -частицами, и, наконец, протоны, появлявшиеся в результате столкновений с быстрыми нейтронами.

Существовали, по-видимому, две основные причины, которые препятствовали широкому применению фотографического метода в рассматриваемый период. Во-первых, эффективность желтого пинакриптола, который действует как десенсибилизатор на облученные видимым светом эмульсии, а также характеристики существовавших эмульсий не вызывали достаточного доверия. Уилкинс (1940 г.) обнаружил, что средняя длина следов, принадлежащих однородной группе протонов, выпущенных из циклотрона и входивших в эмульсию под малым углом к ее поверхности, увеличивалась в несколько раз в том случае, если пластинка была предварительно обработана в слабом растворе красителя (рис. 5.).

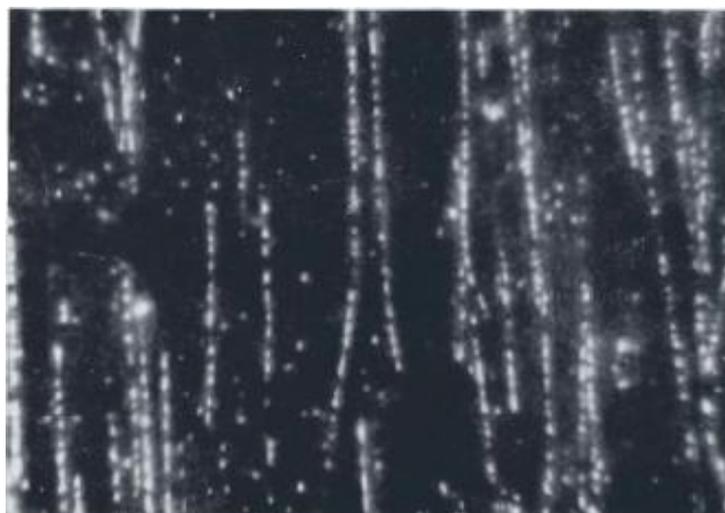


Рис. 5. Следы искусственно ускоренных протонов. Эмульсия Ильффорд R2. Следы протонов, зарегистрированные в пластинке, sensibilizированной желтым пинакриптолом. Снимки при освещении по методу темного поля.

Второе обстоятельство, препятствовавшее широкому применению фотографического метода, было связано с тем, что четкая демонстрация точности, с которой могли быть измерены пробеги протонов, оказывалась затруднительной.

§ 4. Следы частиц космического излучения

Первая попытка применения фотографического метода для регистрации следов, вызываемых космическим излучением, была, по-видимому, сделана во время подъема стратостата «Эксплорер II» в 1935 г.¹. Этот стратостат, запуск которого был организован совместно Американским национальным географическим обществом и вооруженными силами США, достиг высоты в 22 300 м, причем находился более двух часов на высоте свыше 21 300 м.

На стратостате вместе с прочим оборудованием находились фотографические пластинки Румбауха и Лохера, а также Уилкинса и Сен-Геленса. Румбаух и Лохер не обнаружили в своих пластинках никаких других следов, кроме тех, которые принадлежали α -частицам от радиоактивных загрязнений. В то же время Уилкинс нашел некоторое количество длинных

¹ Наряду с этим надо иметь в виду также опыты А. П. Жданова, который в 1938 г. обнаружил резкое возрастание числа следов при облучении фотоэмульсий на самолете.

следов, причем некоторые из них были, по-видимому, связаны с ядерными расщеплениями [1].

Следует заметить, что высота, достигнутая стратостатом, продолжительность его полета, а также объем эмульсии, использованной в упомянутом выше опыте, заставляли предположить, что некоторое количество тяжелых ядер первичного излучения должно было пройти через пластинки; однако если это и имело место, то следы подобных частиц остались незамеченными при просмотре пластинок.

Длинные следы протонов с эквивалентным пробегом в воздухе порядка 90 см наблюдались также Такеуки, который экспонировал пластинки в течение двух недель на горе Хуци, на высоте 3700 м. В подобных же экспериментах Блау и Вамбахер с «новыми полутонными» эмульсиями, которые облучались на горе Хафелекар в течение 5 месяцев, были обнаружены первые случаи расщеплений ядер в эмульсии, вызванных космическими частицами высоких энергий. Впоследствии аналогичные расщепления нашли Е. М. Шоппер и Е. Шоппер, которые пользовались специальными пластинками Агфа К с регистрационными свойствами, весьма близкими к свойствам «новых полутонных» пластинок фирмы Ильфорд. Снимки, опубликованные авторами, принадлежали к числу лучших микрофотографий «звезд», полученных до введения в практику так называемых «ядерных» эмульсий (рис. 9.).

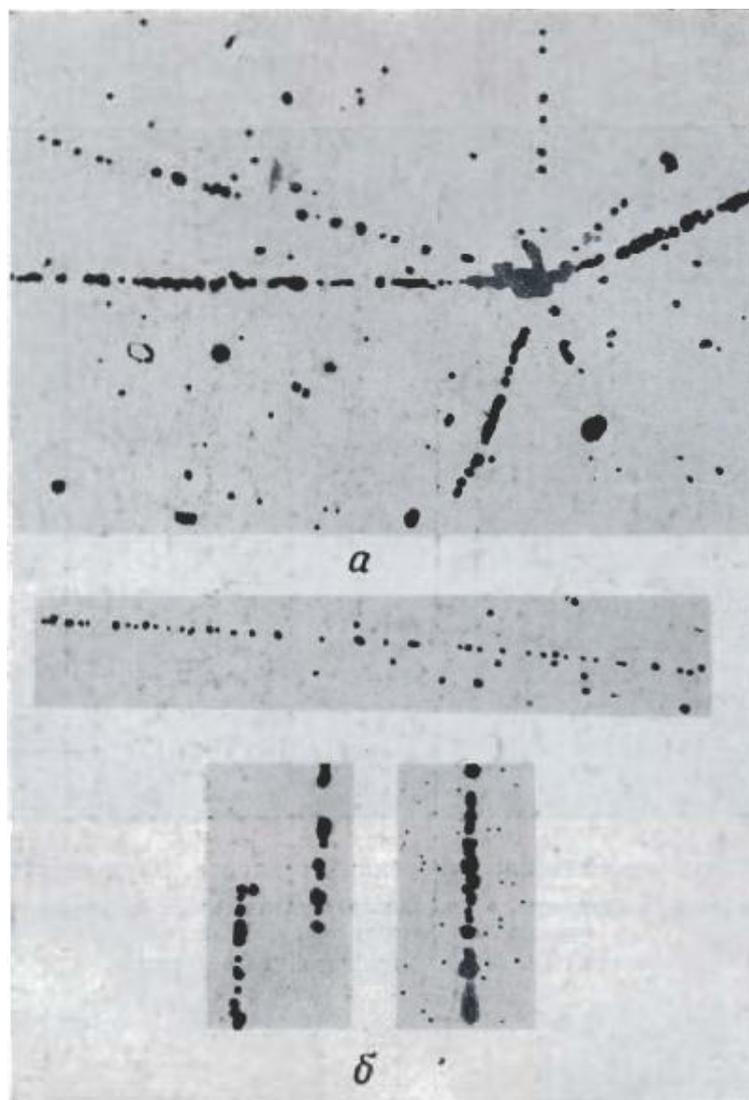


Рис. 9. Следы протонов и α -частиц в эмульсиях Агфа К.

Обзор работ, появившихся в рассмотренный период, был сделан в 1941 г. Шапиро.

§ 5. Разработка «ядерных» эмульсий

К 1945 г. определилась более или менее скромная область применения фотографического метода, причем обычно предполагалось, что с его помощью могут быть получены лишь ограниченные результаты и что этот метод имеет второстепенное значение по сравнению с методами счетчиков и камеры Вильсона. Подобный взгляд определялся, конечно, начальной стадией развития метода. В течение тридцати лет его возможности были достаточно хорошо выяснены, но, несмотря на усилия многих экспериментаторов, он не привел к

важным открытиям. Фотографические эмульсии применялись для демонстрации явлений, обнаруженных другими методами, причем казалось, что они не обладают какими-либо специфическими особенностями, которые могли бы сделать их чем-то большим, чем полезный вспомогательный метод. Быстрое изменение точки зрения на фото метод произошло после того, как в 1945 г. появились эмульсии с повышенным содержанием бромистого серебра.

Жданов высказал предположение о возможности получения следов с большей плотностью зерен в том случае, если удастся увеличить концентрацию бромистого серебра в эмульсии без уменьшения чувствительности отдельных зерен; однако получение подобной эмульсии являлось в то время невозможным. В 1945 г. появились новые «концентрированные» эмульсии, полученные различными методами, которые были независимо разработаны Демерсом и сотрудниками фирмы Ильфорд Доддом и Уолером (см. Пауэлл и др. [1]).

Первые образцы «ядерных» эмульсий («Nuclear Research»), выпущенных фирмой Ильфорд (тип А1), имели зерна диаметром около 0,3 μ , а размер зерен эмульсии С2, выпущенной несколько позднее, составлял около 0,15 μ . Вместе с тем отношение количеств бромистого серебра и желатины было приблизительно в 8 раз больше, чем у обычных эмульсий.

Значительное улучшение качества следов, наблюдаемых в новых эмульсиях, вызвало повышение интереса к методу. Поскольку эмульсии фирмы Ильфорд имелись в продаже в большом количестве и оказались достаточно стабильными и однородными по своим свойствам, то они стали чаще применяться, в частности, при различных экспериментах в ядерной физике, сходных с выполненными ранее при помощи эмульсий старого типа, но отличавшихся от них большей точностью в связи с увеличением плотности зерен на следах (см. Пауэлл и др. [1]). Были поставлены опыты по определению зависимости пробег—энергия для концентрированных эмульсий.

Одновременно с применением в экспериментах по ядерной физике новые пластинки экспонировались также в космических лучах. В последних

опытах сразу же выяснилась возможность обнаружения целого ряда неизвестных раньше явлений. В течение нескольких последующих месяцев многим стало ясно, что метод обладает некоторыми существенными преимуществами, которые играют исключительно важную роль при исследовании нестабильных частиц со средними временами жизни порядка 10^{-8} — 10^{-10} сек.

Глава 2. Исторические открытия

§ 1. Открытие π -мезона.

В 1941 г. Бозе и Чоудхури указали, что в эмульсии в принципе возможно отличить следы протонов от следов мезонов. Предложенный ими метод был основан на том, что при заданном значении остаточного пробега существует определенная разница в импульсах частиц с различными массами. Вследствие этого рассеяние частиц также должно быть различным: чем меньше масса частицы, тем больше ее след отклоняется от прямой линии по мере приближения к концу пробега. Бозе и Чоудхури облучали в горах «полутонные» пластинки и изучали рассеяние наблюдавшихся в них следов. При этом они пришли к заключению, что многие из заряженных частиц, остановившихся в их пластинках, были легче протонов и обладали средней массой $\sim 200 m_e$.

В начале 1947 г., вскоре после того как «ядерные» эмульсии фирмы Ильфорд были экспонированы на больших высотах, были обнаружены расщепления, которые, по-видимому, происходили на концах пробегов частиц с массой порядка 200—300 m_e (см. Перкинс [1], см. также рис. 10.).

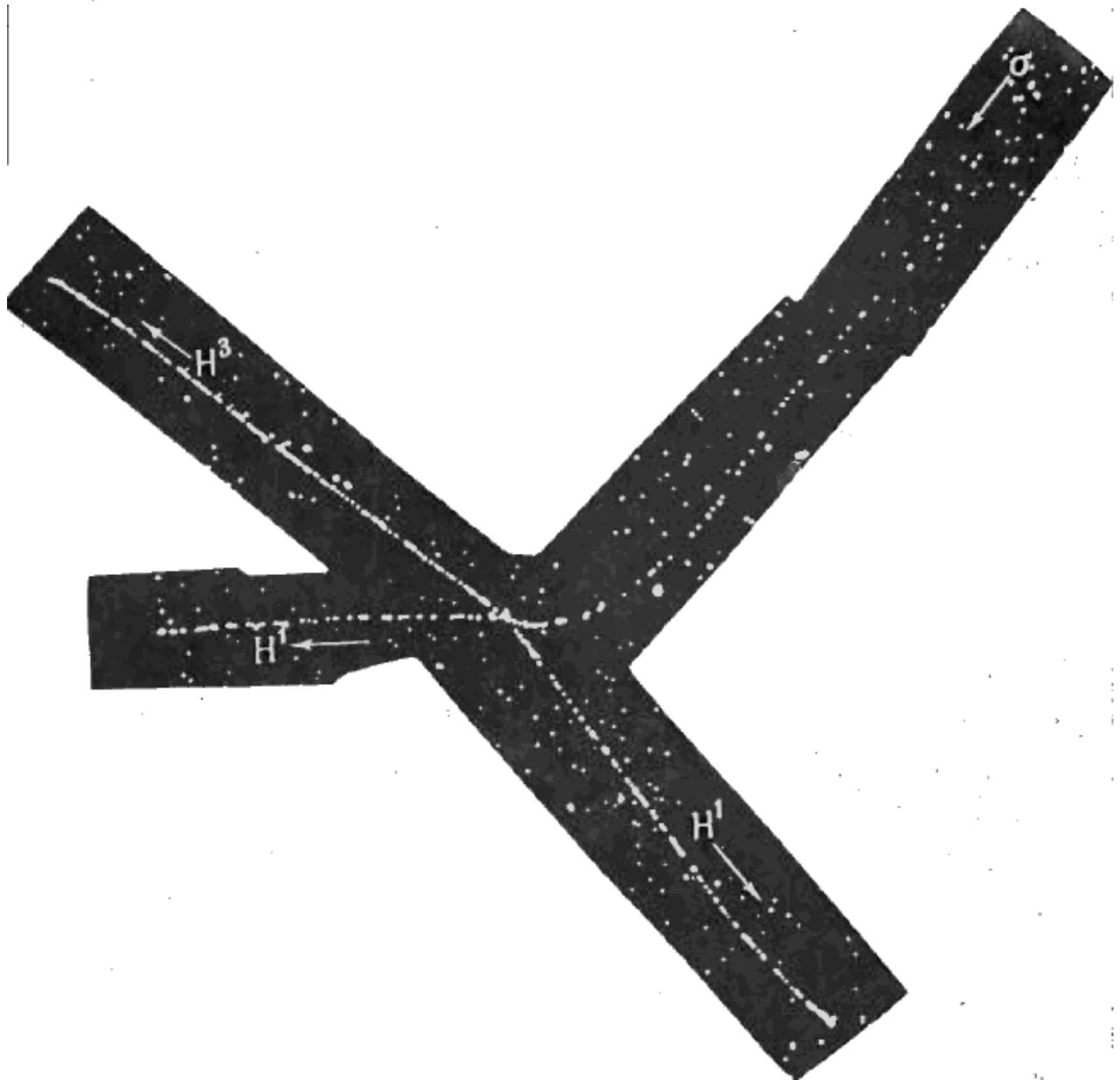


Рис. 10. Первый зарегистрированный случай ядерного расщепления, вызванного отрицательным мезоном. Эмульсия Ильфорд В1 (1947 г.).

Оценка соответствующих масс была сделана путем определения изменений плотности зерен и рассеяния вдоль следов по мере приближения частиц к концу пробега. Были также найдены частицы с близкими по величине массами, у которых на концах пробегов не наблюдалось никаких вторичных явлений. В то время предполагалось, что мезоны, вызывающие расщепления, являются отрицательными частицами проникающей компоненты космического излучения, которые сейчас обозначаются как μ^- -мезоны. Однако эта точка

зрения изменилась после того, как через несколько месяцев был открыт π -мезон с его характерным превращением в μ -мезон, (см. рис. 11.).

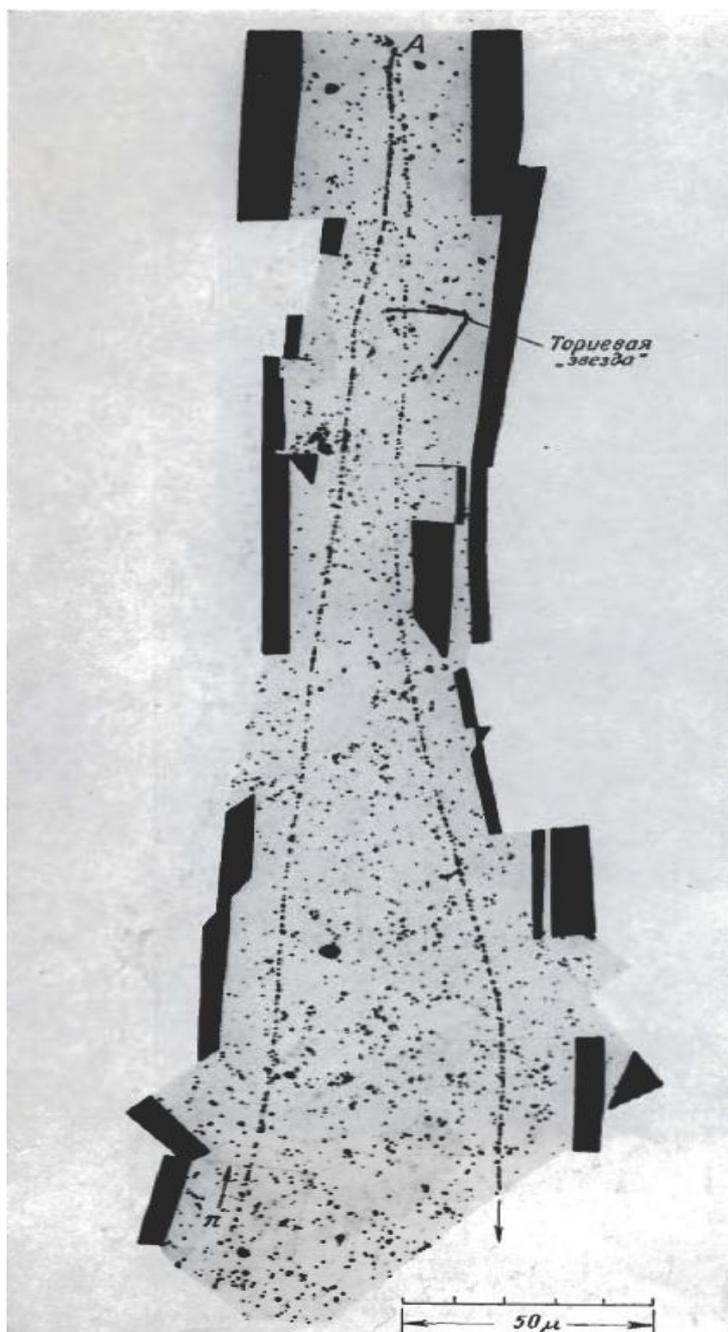


Рис. 11. Первый зарегистрированный случай распада π -мезона. Эмульсия Иلفорд С2 (1947 г.).

Поэтому было сделано подтвердившееся впоследствии предположение, что если не все, то по крайней мере большая часть наблюдаемых расщеплений связана с захватом π -мезонов ядрами.

Открытие π -мезона, выяснение механизма его распада и наблюдение рождения мезонов этого типа в ядерных взаимодействиях при высоких энергиях явились убедительной демонстрацией одной из наиболее сильных сторон фотографического метода. При работе с камерами Вильсона через них должны проходить или испытывать распад «на лету» многие π -мезоны, не будучи при этом идентифицированными. С другой стороны, для π -мезонов, движущихся с такими же начальными скоростями, время, проходящее до их остановки в эмульсии, приблизительно в 2000 раз меньше, чем в газе при нормальном давлении. Поскольку мезоны в твердом веществе распадаются обычно в состоянии покоя, то при этом непосредственно обнаруживаются характерные черты их превращения, например, такие, как постоянство пробегов вторичных μ -мезонов. Указанное преимущество фотометода играет решающую роль при изучении заряженных частиц с временами жизни в интервале от 10^{-7} до 10^{-10} сек, поскольку оно гарантирует с высокой степенью вероятности, что импульс первичной частицы в момент ее остановки будет равен нулю. Вследствие этого должен выполняться также баланс импульсов вторичных частиц, образовавшихся при распаде.

Открытие π -мезона привело к всеобщему признанию ценности фотографического метода и к его широкому использованию в ядерной физике и физике космических лучей. Среди большого количества последовавших за этим работ, представляющих значительный интерес, следует упомянуть обнаружение в 1948 г. тяжелых ядер в составе первичного космического излучения [1].

§ 2. Тяжелые, или К-мезоны в фотографической эмульсии

Первое указание на существование частиц, называемых теперь К-мезонами, было получено Лепренс-Ринге и Леритье [1], которые наблюдали в камере Вильсона след заряженной частицы, столкнувшейся с электроном (1944 г.). Проведя анализ динамики столкновения, авторы пришли к выводу, что масса налетающей частицы равна $\sim 1000 m_e$. Существование тяжелых нестабильных частиц было установлено в 1947 г. Рочестером и Батлером [1], которые

обнаружили два разветвленных следа в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле.

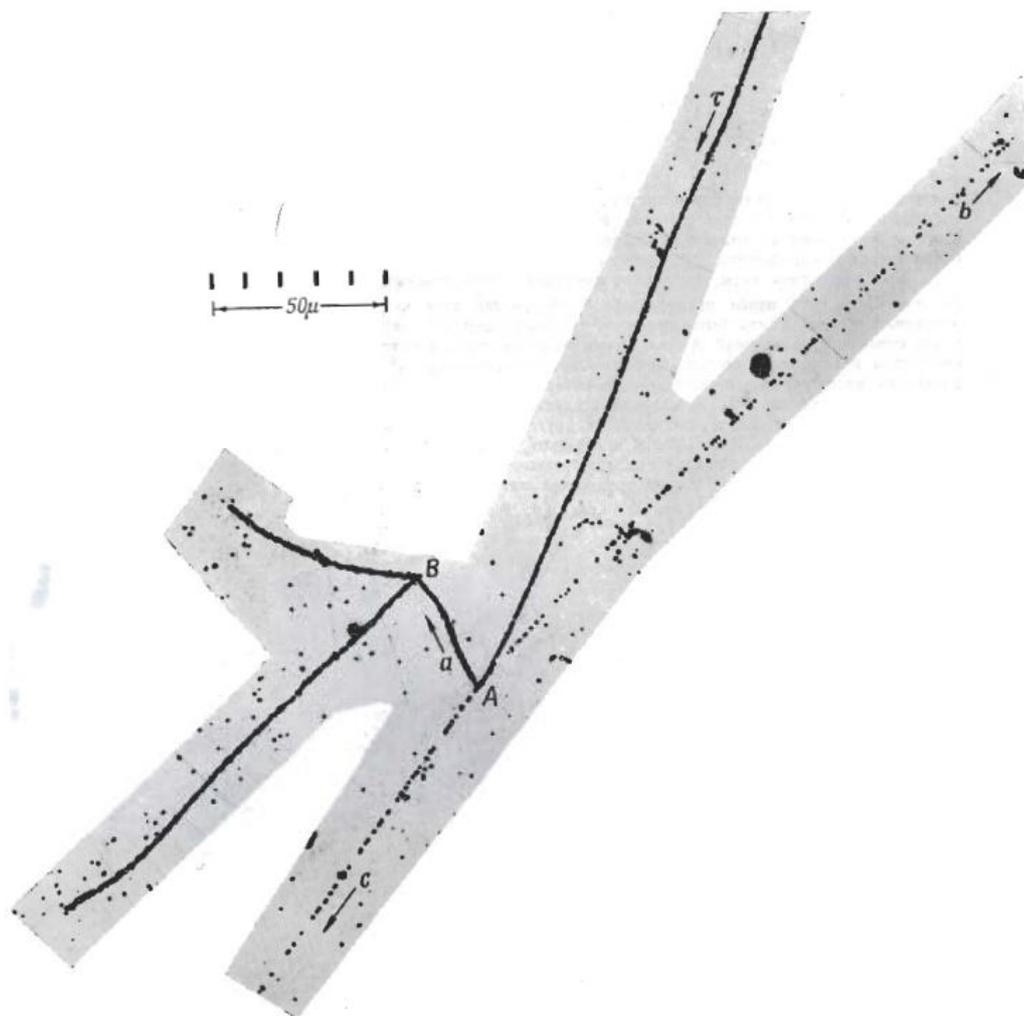


Рис. 12. Первый зарегистрированный случай τ -распада. Эмульсия Кодак NT4.

Они интерпретировали эти случаи как распады на лету двух частиц с массами около $\sim 1000 m_e$, одна из которых была нейтральной, а другая – заряженной. Первое указание на существование тяжелых мезонов в экспериментах с фотографическими эмульсиями было получено Лепренс-Ринге и др. в 1948 г. С помощью закона сохранения энергии была оценена масса частицы. Она оказалась равной $\sim 1000 m_e$.

Вслед за этими результатами последовало открытие τ -распада в 1949 г. Брауном и др., которые наблюдали случай, показанный на рисунке 12. Они

интерпретировали его как спонтанный распад частиц с массой $\sim 970 m_e$ в конце своего пробега на три вторичных мезона, по-видимому, на π -мезоны [1].

Поиск медленных K-мезонов как в камерах Вильсона, так и в пластинках, экспонированных в космическом излучении, оказался очень трудным. Тем не менее, с 1951 г. по 1953 г. в фотографических эмульсиях было обнаружено около шестидесяти примеров распада.

Дальнейшие успехи были достигнуты в экспериментах с пучками протонов с энергией 3 и 6 ГэВ на синхрофазотронах в соответственно Брукхэйвене и Беркли, когда было обнаружено искусственное образование тяжелых мезонов. Так же как и в случае π -мезонов, стало возможным более детальное изучение свойств частиц. Эти работы привели, в частности, к открытию совместного образования K-мезонов и гиперонов.

И, наконец, были преодолены технические трудности, связанные с обработкой очень больших эмульсионных стопок. В октябре 1954 г. в результате сотрудничества университетов Бристоля, Милана и Падуи была успешно экспонирована в Северной Италии эмульсионная стопка размером 36 x 25 x 15 см³. Стопка, весившая 63 кг, была поднята на баллонах на высоту около 26 км и экспонировалась там в течение 6 час (см. [4], см. также рис. 13.).

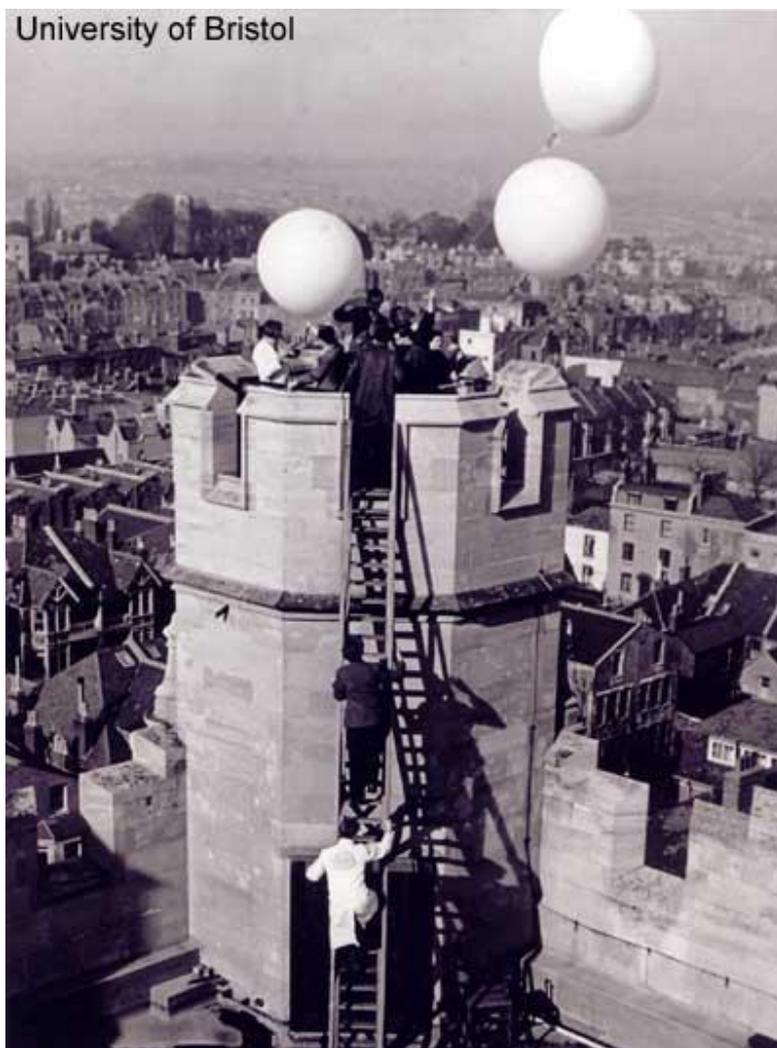


Рис. 13. Запуск эмульсии на баллонах. Башня Бристольского университета.

Хотя стопка в некоторой степени пострадала из-за порчи парашюта при спуске, она была успешно обработана и явилась хорошим экспериментальным материалом для сотрудничества многих европейских лабораторий.

Работы с большими эмульсионными стопками сразу показали все преимущества использования их в экспериментах по элементарным частицам и по исследованию космических лучей. Было найдено, что количество нестабильных частиц, останавливающихся на единицу объема эмульсии, сильно возросло в результате большого объема вещества самой стопки. Кроме того, благодаря большим линейным размерам стопки значительно увеличиваются возможности для установления деталей схемы распада любого исследуемого тяжелого мезона, так как возрастает вероятность остановки вторичных частиц

внутри эмульсии и определения вследствие этого их природы и начальной энергии. Эти преимущества быстро привели к широкому распространению таких стопок как при использовании в экспериментах по космическим лучам, так и в работах на ускорителях.

В частности, они были использованы при исследовании, предпринятом для разрешения проблемы — являются ли все K -мезоны частицами одного типа или имеются два или более типов частиц, каждая из которых распадается по одной или нескольким схемам распада. Работы с коллимированными пучками тяжелых мезонов, образуемых на ускорителях и направляемых на эмульсионные стопки, позволили провести точные сравнения масс тяжелых мезонов, распадающихся по различным схемам. Было показано, что любое различие масс меньше, чем экспериментальные ошибки, которые в 1955 г. были доведены до значений $\pm 10 m_e$ и даже до еще меньших значений для наиболее вероятных распадов. $K_{\mu 2}$ и $K_{\pi 2}$.

§ 3. Открытие Σ -гиперона

Первые убедительные данные о существовании заряженных гиперонов были получены в экспериментах с фотографическими пластинками, описанных Бонетти и др. Эти авторы зарегистрировали частицу, которая остановилась в эмульсии, пройдя путь, равный 15.8 мм. В конце ее пробега была испущена вторичная заряженная частица. Масса первичной частицы была найдена равной $2210 \pm 250 m_e$, (см. рис. 14.). Вдоль следа вторичной частицы нельзя было провести никаких существенных измерений.

Одновременно с фотографическими работами и независимо от них Йорк и др. [1] пришли к аналогичным заключениям из экспериментов с камерами Вильсона. Эти исследователи обнаружили среди заряженных V -случаев признаки двух типов частиц. Один из этих типов соответствовал частицам со значительно меньшим временем жизни, чем другой. В двух случаях положительно заряженная частица, возникающая в свинцовой пластине внутри камеры, распадалась на лету в газе камеры. Полученные в результате измерений

значения масс вторичной частицы незначительно отличались от массы протона. При этом нельзя было провести никаких измерений выделяющейся энергии Q .

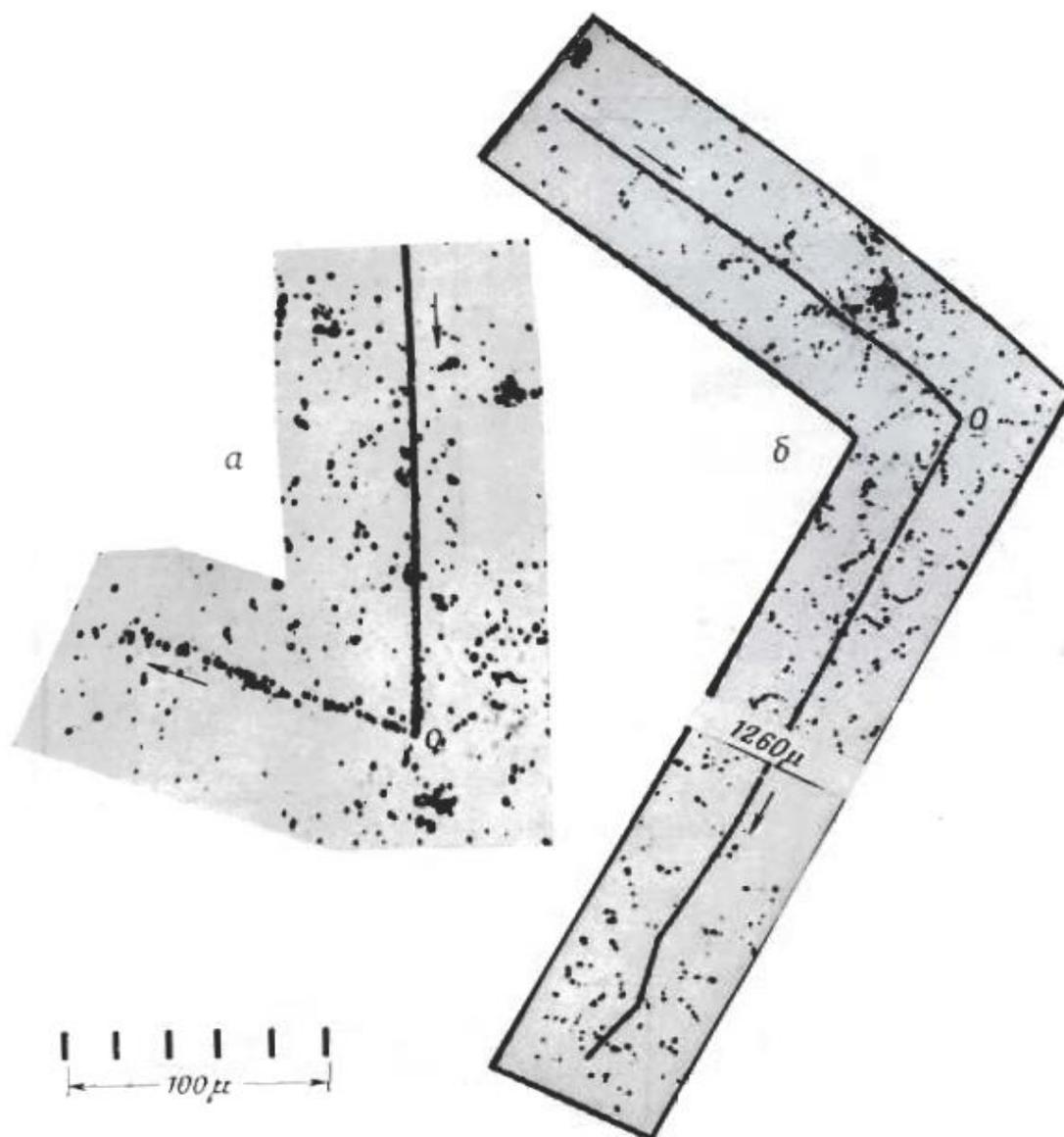


Рис. 14. Первые наблюдения распада Σ -частиц. Эмульсия Илфорд G5. а – первый случай, идентифицированный, как распад гиперона. б – первый пример распада Σ^+ -частицы по схеме $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$. 1953 г.

Случаи были ориентировочно приписаны превращениям, которые в современных обозначениях следовало бы записать как $\Upsilon \rightarrow p + \pi^0$. Теперь известно, что долгоживущие заряженные V -частицы были на самом деле K -мезонами, а короткоживущие — заряженными Σ -частицами. Средние времена жизни этих двух типов частиц равны соответственно $1,3 \cdot 10^{-8}$ и $\sim 10^{-10}$ сек.

В то время как в первых экспериментах был установлен факт существования нестабильных заряженных частиц тяжелее протона, несколько важных проблем оставалось все еще неразрешенными. В частности, не были установлены точные значения массы и времени жизни частиц. Кроме того, по-прежнему важно было определить характер взаимодействия частиц с ядрами.

Данные, свидетельствовавшие о существовании Σ -гиперонов, получались в различных экспериментах. Фаулер и др. [1] зарегистрировали в водородной диффузионной камере распад на лету отрицательного гиперона с испусканием L-мезона. Значение Q для предполагаемой двухчастичной схемы распада на π -мезон и нейтрон было найдено равным 130 ± 20 МэВ. Представлялось маловероятным, чтобы этот случай можно было бы приписать Ξ -части, существование которой к тому времени было уже установлено. И наконец, Дебенедетти и др. получили убедительные данные о том, что легкий мезон, образующийся при распаде Σ^- -гиперона на лету, является отрицательным π -мезоном. В предположении, что распад произошел по приведенной выше схеме, значение Q составило 107 ± 15 МэВ.

§ 4. Первые указания на существование антипротона

Развитая Дираком теория электрона оказалась справедливой в самом общем случае; из этой теории следует, что для каждой элементарной частицы со спином $\frac{1}{2}$ должна существовать соответствующая ей античастица и столкновение между частицами любой такой пары должно приводить к их взаимной аннигиляции. В течение многих лет на основе этих соображений строились различные теории, относящиеся к антинуклонам, и велись поиски данных, подтверждающих их существование. До постройки больших ускорителей эти исследования были по необходимости ограничены опытами с космическими лучами. Энергия, необходимая для образования пары нуклонов (частицы и античастицы), равна приблизительно 2 ГэВ для получения такой энергии в системе центра инерции взаимодействующих частиц минимальная

кинетическая энергия протона, сталкивающегося с другим покоящимся протоном, должна составлять около 6 ГэВ.

До того как существование протона было окончательно установлено, в опытах с космическими лучами были обнаружены два важных случая, относящихся к рассматриваемому вопросу. Бридж и др. [1], проводя в 1954 г. на высоте около 1500 м опыты с камерой Вильсона, перегороженной латунными пластинами, наблюдали событие со следующими характеристиками. В результате ядерного расщепления, произошедшего вне камеры, была испущена заряженная частица, которая оказалась захваченной в одной из пластин. Из точки захвата частицы, или из близлежащих точек, вылетели три γ -кванта, которые, проходя через металлические пластины, образовали небольшие электронные каскады.

Масса первичной частицы, остановившейся в пластине, не могла быть измерена, и при отсутствии магнитного поля нельзя было определить знак ее заряда. Разумно отнести происхождение трех γ -квантов к распаду двух, или нескольких π^0 -мезонов, причем полная «видимая» энергия превышала 1 ГэВ. Никакого другого видимого источника γ -квантов, кроме медленной заряженной частицы, из конца следа которой они вылетели, не было и поэтому была выдвинута рабочая гипотеза о том, что данный акт представляет собой захват и аннигиляцию отрицательного протона. При этом большая часть энергии покоя должна была быть затрачена на образование двух или трех π^0 -мезонов. Естественно было предположить, что если в процессе аннигиляции! участвует протон ядра, находящегося в толще металлической пластины, то получающиеся при соответствующем расщеплении частицы с малой энергией не попадут в газ камеры и поэтому не будут зарегистрированы.

Второй случай распада, также приписанного антипротону, наблюдался Амальди и др. в 1955 г. в эмульсиях, облученных во время экспедиции на Сардинию в 1953 г. Микрофотография этого события показана на рис. 15. Из расщепления большой энергии в эмульсии вылетает частица с пробегом 150 μ . В

самом конце своего пробега частица рассеялась на угол 91° и в точке, совпадающей с точкой захвата, произошло второе расщепление. При этом расщеплении вылетели две быстрых заряженных частицы, по всей вероятности два π -мезона, причем полное выделение энергий, приходящееся на заряженные частицы, составляло от 1,5 до 2 ГэВ. Поэтому авторы высказали предположение, что наблюдаемое ими событие представляло собой рождение антипротона при расщеплении и его аннигиляцию с нуклоном другого ядра [1].

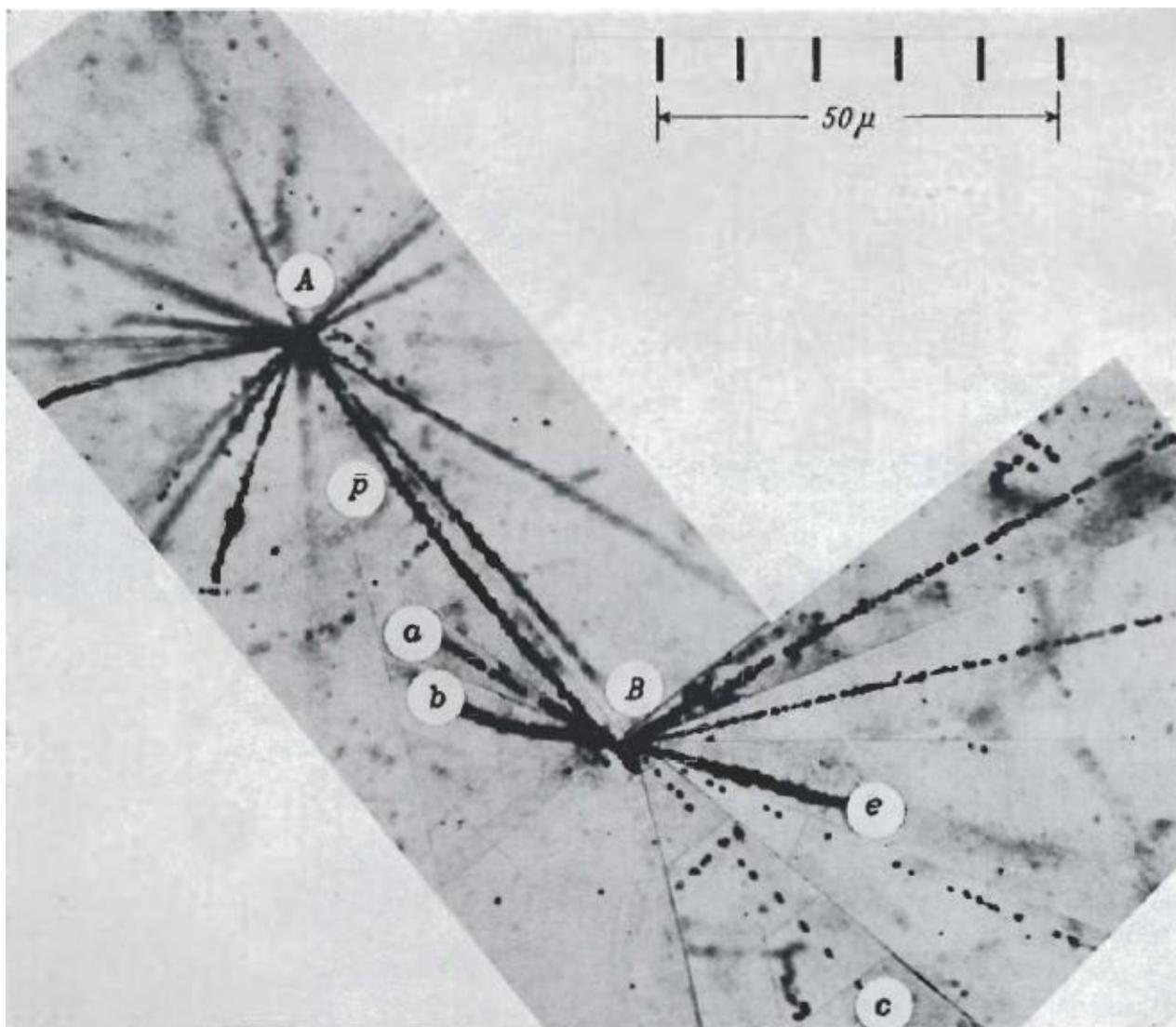


Рис. 15. Первый случай наблюдения в ядерной эмульсии события, которое интерпретировалось как образование и аннигиляция антипротона.
Эмульсия Ильфорд G5.

После сообщения Амальди и др. появилось сообщение Тойхера и др. о наблюдении в эмульсии, облученной космическими лучами, второго аналогичного события. В этом случае длина следа, соединяющего два расщепления, составляла $\sim 300 \mu$.

Другое возможное объяснение описанных выше событий заключается в том, что каждое из них представляет собой два независимых процесса. Вероятность такого совпадения в опытах с камерой Вильсона гораздо меньше, чем в опытах с эмульсиями, поскольку в первом случае, кроме их пространственной связи, два явления должны произойти в течение очень короткого временного интервала; это обстоятельство делает случайное совпадение еще более невероятным. С другой стороны, в опытах с эмульсиями каждое из двух событий, которые кажутся взаимосвязанными, могло произойти в любой момент на протяжении эффективного времени облучения; благодаря этому вероятность случайного наложения значительно возрастает. Оценка значимости первых данных о существовании антипротона зависит от этих соображений.

§ 5. Тяжелые ядра в космическом излучении

Хотя этот вопрос изучался еще со времен первых экспериментов Кулона в 1785 г., лишь в 1900 г., когда были поставлены эксперименты Вильсона, а также Эльстера и Гайтеля, было окончательно установлено, что потеря заряда хорошо изолированным телом в воздухе по крайней мере частично обуславливается электрической проводимостью газа. Вопрос о природе излучения, вызывающего остаточную ионизацию, ответственную за эту проводимость, был предметом обсуждения в течение многих лет. Только после исследований Гесса и Кольхёрстера с помощью шаров-зондов были получены убедительные данные, свидетельствовавшие о том, что, помимо эффектов, связанных с наличием естественных радиоактивных веществ в составе горных пород, некоторая ионизация вызывается и проникающим излучением, проходящим сверху через земную атмосферу [4].

Однако вплоть до 1927 г. не было общепринятого мнения о том, что это излучение приходит из космического пространства. Большая проникающая способность этого излучения свидетельствовала о том, что оно состоит из частиц или квантов очень большой энергии и поэтому оно было названо «ультраизлучением», или космическим излучением. Тот факт, что, по крайней мере частично, это излучение состоит из заряженных частиц, был доказан при исследовании изменений ионизации, производимой излучением на уровне моря, в зависимости от геомагнитной широты. В течение многих лет большинство физиков предполагало, что первичное космическое излучение состоит в основном из электронов. Однако когда была открыта восточно-западная асимметрия, то было обнаружено, что с Запада поступает больше частиц, чем с Востока. Это показывало, что основная доля излучения должна быть положительно заряженной.

Вопрос о природе первичного космического излучения обсуждался еще в 1947 г., и некоторые авторы придерживались того взгляда, что в первичном излучении присутствуют и протоны и электроны. То, что электроны высокой энергии среди первичных частиц встречаются редко, было убедительно показано в экспериментах Шайна и др. и в более поздних экспериментах Хулсицера и др., а также Критчфильда и др. [1], которые показали, что электроны составляют менее 1% первичных частиц с энергией выше 1 ГэВ.

Наличие гелия и более тяжелых ядер среди частиц первичного космического излучения было окончательно установлено в 1948 г. Фрайером и др. Они провели эксперименты на высоте ~ 27 км с помощью свободно летающих баллонов, регистрируя первичные частицы двумя методами: с камерами Вильсона и фотографическими эмульсиями. Такие высоты необходимы для исследования тяжелых частиц потому, что при прохождении атмосферы они быстро поглощаются в результате потерь энергии на ионизацию и взаимодействий с ядрами атомов воздуха.

Первым шагом в исследовании космического излучения было определение зарядового спектра и энергетического распределения частиц, достигающих верхних слоев атмосферы. При этом приходилось идентифицировать различные типы ядер. Зарядовый спектр простирается вплоть до $Z = 26$ или $Z = 28$, что говорит о наличии в космическом излучении тяжелых ядер вплоть до железа или никеля.

§ 6. Современный этап развития эмульсионной методики

Изучая треки регистрируемых в фотоэмульсии частиц, можно наблюдать всю историю частиц от их возникновения до их распада, взаимодействия или остановки. При этом ядерная фотоэмульсия служит одновременно как мишенью, так и детектором излучения, а большая плотность эмульсии и контролируемый размер зерна от 10 до 100 нм позволяют получать характеристики частиц практически любой энергии.

Изготовление высококачественных эмульсий с контролируемым размером зерна от 10 до 100 нм, высокое разрешение ядерной фотографической эмульсии и развитие новых методов высокоскоростного сканирования открывают новые возможности использования данного трекового детектора, как для фундаментальных исследований, так и для целого ряда прикладных задач.

Одним из ярких примеров фундаментальных исследований с применением эмульсии как трекового детектора является международный эксперимент OPERA, целью которого является прямое наблюдение осцилляций нейтрино $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$. Поскольку распад таона в условиях эксперимента очень короток (порядка 1 мм), требуется детектор с очень высоким разрешением, которым и является ядерная эмульсия [5].

Исследованиям целого ряда фундаментальных задач с использованием методики ядерной фотографической эмульсии посвящен международный проект БЕККЕРЕЛЬ, экспериментальная программа которого ориентирована на

создание систематических представлений о картине фрагментации стабильных и радиоактивных ядер [5].

Другой задачей, при решении которой создание высокочувствительной нано-эмульсии может сыграть решающую роль, является прямое детектирование, так называемой, тёмной материи. При этом необходима длительная экспозиция фотоэмульсионных трековых детекторов с регулируемым размером зерна, начиная с 10 нм. Уместно подчеркнуть, что в планируемом эксперименте нет ограничения сверху на доступную детектированию массу частиц темной материи и что он значительно дешевле, чем аналогичные эксперименты на спутниках.

К прикладным задачам с использованием ядерной фотоэмульсии можно отнести целый ряд систем контроля за процессами амортизации промышленных и строительных конструкций посредством применения мюонной радиографии. Например, мониторинг вулканов. В Японии, стране вулканов и землетрясений, решили применить мюонную радиографию для слежения за вулканической активностью [6]. Так, используя эмульсионный детектор, в Японии было предсказано извержение вулкана Асама. А одним из ярких примеров фундаментальных исследований с применением эмульсии как трекового детектора является международный эксперимент OPERA, целью которого является прямое наблюдение осцилляций нейтрино [7].

Заключение

С 1945 г. по 1955 г. методом ядерной фотографической эмульсии были сделаны важные открытия: зарегистрированы π -мезоны (пионы) и последовательности распадов $\pi \rightarrow \mu + \nu$, $\mu \rightarrow e + \nu + \nu$ в ядерных фотоэмульсиях, экспонированных космическим излучением, а также обнаружены ядерные взаимодействия π^- - и K^- -мезонов. Существование π -мезона было установлено в 1947 г. Латтесом, Мюирхедом, Оллиалини и Пауэллом. С помощью ядерной фотографической эмульсии удалось оценить время жизни π^0 -мезона (10-16 сек). Обнаружен распад K -мезона на 3 пиона, открыт Σ -гиперон и обнаружено существование гиперядра, открыт антилямбдагиперон. Методом ядерной фотографической эмульсии был исследован состав первичного космического излучения; кроме протонов, в нём были обнаружены ядра He и более тяжёлых элементов, вплоть до Fe и Ni. На сегодняшний день метод используется в различных фундаментальных исследованиях, находит прикладное применение и получает новое развитие на стыке разных областей физики.

Литература

1. С. Пауэлл, П. Фаулер, Д. Перкинс. Исследование элементарных частиц фотографическим методом. ИИЛ, Москва 1962 г.
2. Нисефор Ньепс. Документы по истории фотографии, АН СССР, 1949 г.
3. Ньепс де Сен-Виктор. Документы по истории фотографии, АН СССР, 1949 г.
4. Peter Harper. Records of Bristol University's Cosmic Rays and Solid State Research Preserved: www.aip.org/history/newsletter/fall2004/bristol.htm
5. Сайт проекта БЕККЕРЕЛЬ <http://becquerel.lhe.jinr.ru/>
6. Сайт <http://worldday.ru/science/638-prosvechivanie-piramidy-prodolzhaetsja.html>
7. <http://lvd.ras.ru/exper/opera.html>