

А Т Л А С
МИКРОФОТОГРАФИЙ

СПИСОК ФОТОГРАФИЙ

Фото 1 и 2. Микрофотографии кристаллов AgBr, полученные с помощью электронного микроскопа

См. также фото 15.

Фото 3—6. Первые микрофотографии следов α -частиц и „гало” (1914—1915 гг.)

Фото 7—10. Первые фотографии следов протонов и α -частиц (1927—1940 гг.)

Фото 11. Радиоактивное загрязнение в современной эмульсии (1947 г.)

Фото 12—14. Следы протонов и электронов в различных эмульсиях (1945—1948 гг.)

Фото 15. Электронные микрофотографии кристаллов AgBr в различных эмульсиях

Фото 16. Влияние разрешающей способности на качество микрофотографий

Фото 17 и 18. Следы α -частиц и осколков деления в загруженных эмульсиях

Фото 19. Рождение и распад K -мезона по схеме $K_{\pi 3}$

Фото 20. Последовательные взаимодействия тяжелого ядра

Фото 21—24. Влияние ионизации на форму и плотность следов

Фото 25—28. Фотометрирование следов

Фото 29 и 30. Измерение многократного рассеяния вдоль следа медленного π^- -мезона и релятивистской α -частицы

Фото 31. Фрагментация релятивистского ядра кальция

Фото 32 и 33. Упругие столкновения со свободными протонами

Фото 34 и 35. Следы электронов в конце пробега

Фото 36—44. Примеры следов однократно и двукратно заряженных частиц в конце пробега

Фото 45—49. Следы тяжелых ядер в конце пробега

Фото 50 и 51. Образование электронно-позитронных пар γ -квантами

Фото 52 и 53. Тройники и близкие пары

Фото 54—56. Каскад, вызванный γ -квантом с энергией 10^8 Бэв

См. также фото 161—168.

Фото 57. Распад остановившегося μ -мезона

Фото 58. Ядерный захват μ^- -мезона

См. также фото 136 и 137, где даны примеры взаимодействия быстрых μ -мезонов с ядрами.

Фото 59 и 60. Электроны Оже при захвате μ^- -мезона ядром

Фото 61 и 62. Возможные примеры π - β -распада

Фото 63 и 64. Первые наблюдения захвата π^- -мезонов ядрами (1947 г.)

Фото 65 и 66. Первые наблюдения π - μ -распада

Фото 67. Первые примеры $\pi \rightarrow \mu \rightarrow \beta$ -распада (1947 г.)

Фото 68. Короткопробежные μ -мезоны в π - μ -распаде

Фото 69. Природа нейтральной частицы в π - μ -распаде

Фото 70—74. Примеры захвата π^- -мезонов ядрами различных элементов

Фото 75—77. Образование и захват π^- -мезона

Фото 78. Образование и распад π^+ -мезона

Фото 79. Пример образования электронно-позитронной пары от γ -квантов, образующихся при распаде π^0 -мезона

См. также фото 153.

Фото 80. Альтернативная схема распада π^0 -мезона

Фото 81. Первое наблюдение распада тяжелого мезона по схеме $K_{\pi 3}$ (1949 г.)

Фото 82—87. Другие примеры распада остановившегося K^+ -мезона по схеме $K_{\pi 3}(\tau)$

Фото 86. Первое наблюдение последовательного распада $K^+ \rightarrow + \rightarrow \mu^+ \rightarrow \beta$

Фото 87 и 88. Наблюдения непосредственного образования K^+ -мезона, распадающегося по схеме $K'_{\pi 3}$

См. также фото 19.

Фото 89. Примеры распада по схеме $K'_{\pi 3}$

Фото 90. Распад на лету тяжелого мезона по схеме $K_{\pi 3}$

Фото 91—94. Первые наблюдения K^+ -мезонов, распадающихся по схемам $K_{\pi 2}$, $K_{\mu 2}$ и $K_{\mu 2}$

Фото 95 и 96. Первые примеры непосредственного образования K^+ -мезона

¹⁾ За исключением особо оговоренных случаев, увеличение указывается масштабной шкалой длиной 50 μ , которая разделена на интервалы по 10 μ каждый.

Фото 97 и 98. Первые примеры образования и захвата K^- -мезона

См. также фото 110.

Фото 99 и 100. Примеры захвата K^- -мезонов

См. также фото 107 и 114.

Фото 101. Гиперядро, образованное при захвате K^- -мезона

См. также фото 114.

Фото 102 и 107. Примеры распада Λ^0 -гиперона

Фото 103. Первый пример распада Σ -гиперона (1953 г.)

Фото 104. Образование и распад на лету Σ -гиперона

Фото 105 и 106. Ядерный захват Σ^- -гиперонов

Фото 107. Λ^0 -распад, связанный с захватом K^- -мезона

Фото 108 и 109. Образование и ядерные взаимодействия K^+ -мезона

Фото 110. Образование пары K -мезонов

Фото 111. Первое наблюдение гиперядра (1953 г.)

Фото 112—118. Дальнейшие примеры распада гиперядер на лету или в покое

Фото 113. Первое наблюдение ${}^4_{\Lambda}\text{He}^3$

Фото 116. Испускание π^0 -мезона из гиперядра

Фото 117. Распад на лету ${}^4_{\Lambda}\text{He}^4$

Фото 119. Первый пример аннигиляции искусственно образованного антипротона

Фото 120 и 121. Другие примеры ядерного захвата и аннигиляции антипротонов

Фото 122. Возможный пример аннигиляции антипротона, образованного в космическом излучении

Фото 123—131. Примеры расщеплений ядер протонами с кинетической энергией от 50 Мэв до 30 Бэв

Фото 132. Испускание тяжелого ядерного осколка при расщеплении ядра

Фото 133 и 134. Молоткообразные следы, образованные ядрами Li^8 и B^8

Фото 135. Испускание ядра Be^8

Фото 136 и 137. Взаимодействия быстрых μ -мезонов

Фото 138—144. Взаимодействия быстрых π -мезонов с кинетической энергией от 80 Мэв до 4 Бэв

Фото 145. Взаимодействия π^- -мезонов с энергией 4,5 Бэв

См. также фото 115.

Фото 146 и 147. Взаимодействия быстрых K -мезонов

Фото 148. Взаимодействия K^0 -мезонов

Фото 149—151 и 153—159. Примеры „струй“, образованных при ядерных столкновениях первичными частицами с энергией от 200 до 20 000 Бэв

См. также фото 187—189.

Фото 152—155, 160, 162, 163 и 167. Вторичные взаимодействия в „струях“

Фото 153, 162 и 165. Электронно-позитронные пары в „струях“

Фото 161—164. Первичное расщепление и каскад, вызванные взаимодействием протона с энергией 40 000 Бэв

Фото 165—167. Каскад и взаимодействие, следующие за взаимодействием α -частицы с энергией $\sim 10^6$ Бэв

Фото 168. Развитие каскада в свинцово-эмульсионном „сэндвиче“

Фото 169—175. Следы релятивистских ядер

Следы тяжелых ядер в конце их пробега см. на фото 35—49.

Фото 176—178. Фрагментация ядра углерода

Фото 179—184. Взаимодействие и фрагментация тяжелых первичных ядер

См. также фото 17, 21, 31.

Фото 185 и 186. Скользящие столкновения первичных ядер Li и He

Фото 187—189. „Струи“, вызванные α -частицами и первичными тяжелыми ядрами

См. также фото 151.

Фото 190. Примеры искажений „переменного“ типа («chopping»)

Фото 191 и 192. Контактные отпечатки эмульсий, экспонированных космическими лучами

Фото 193—195. Примеры расщеплений ядер протонами с энергией 10 Бэв

См. также фото 129—131.

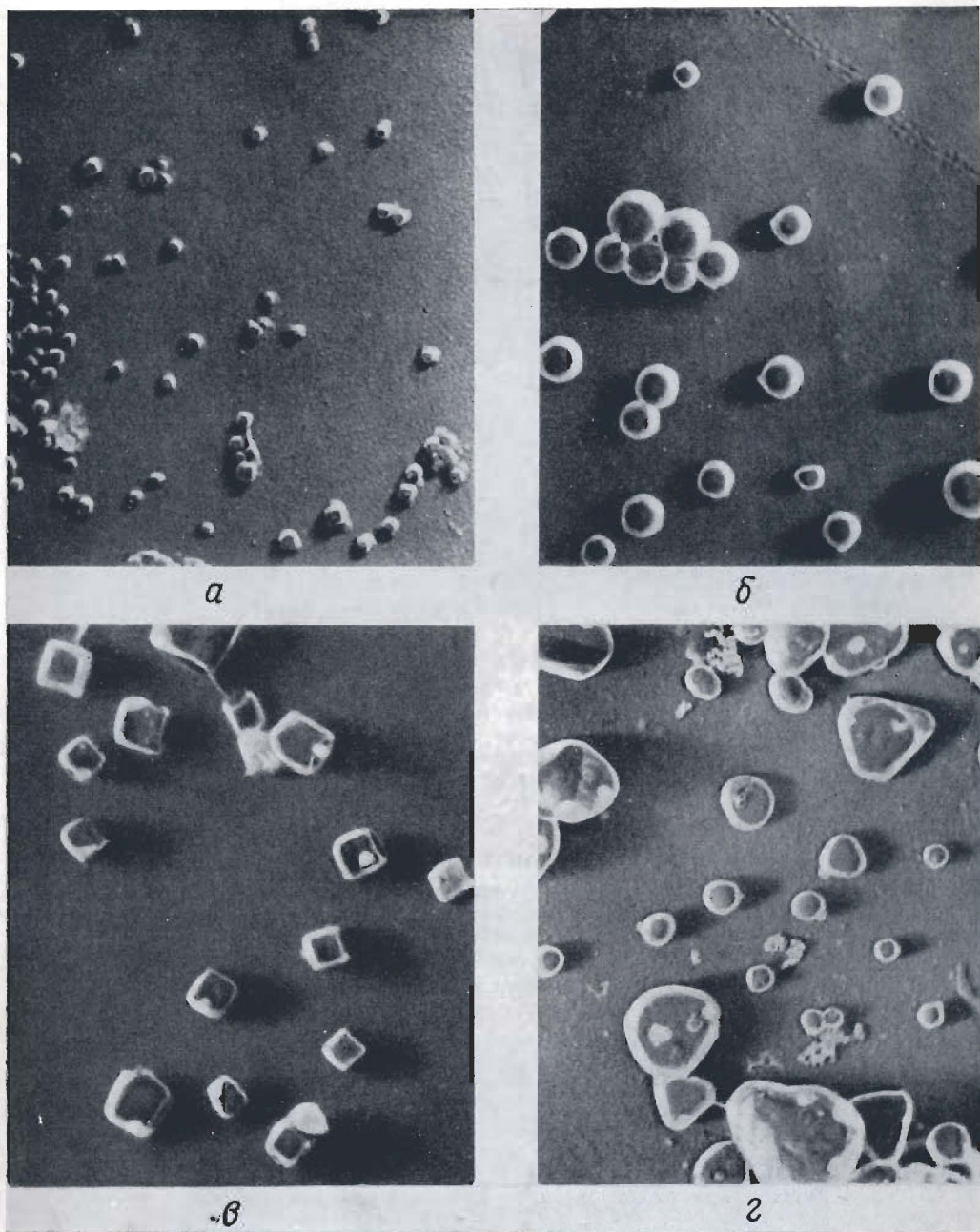


Фото 1. Микрофотографии зерен различных эмульсий, полученные с помощью электронного микроскопа (20 000 ×).

а — липмановская эмульсия; б — эмульсия Илфорд G5; в — эмульсии для фотомеханических работ; г — специальная диапозитивная эмульсия.

Обращает на себя внимание непостоянство размеров зерен в эмульсиях, предназначенных для передачи полутонов, а также больший средний диаметр зерен в более чувствительных эмульсиях. Микрофотография получена методом „угольных реплик“.

Найне, неопубликованная работа, 1954 г.

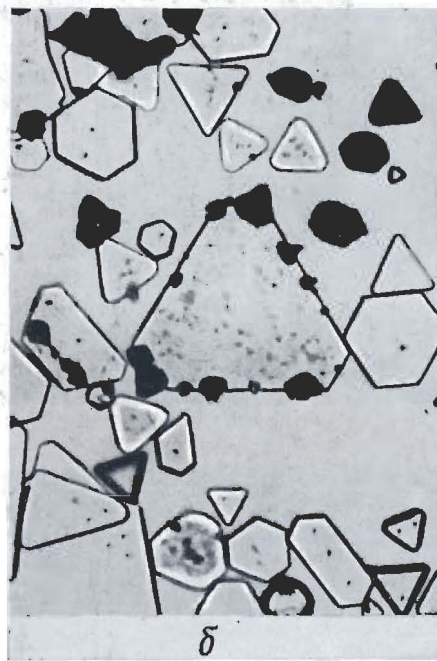
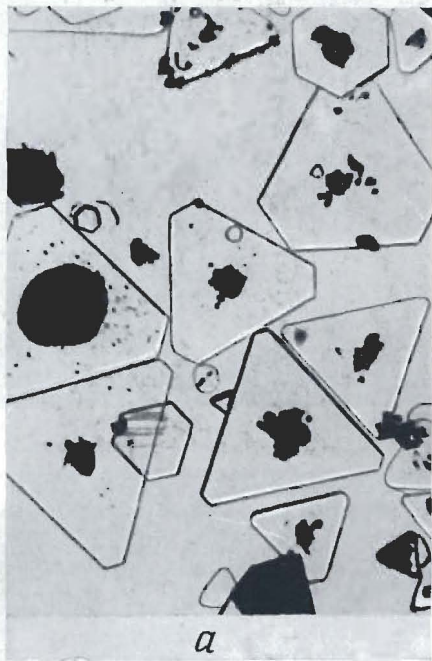


Фото 2. Центры проявления на больших кристаллах галоида серебра ($23\,000\times$).

a — большие кристаллы галогосеребряной эмульсии, облученные светом низкой интенсивности. Физическое проявление — метоловым кислым проявителем. Скрытое изображение образовалось на нерегулярностях кристалла вблизи оси симметрии треугольных пластинок. *b* — аналогичные кристаллы после облучения светом высокой интенсивности. Центры проявления расположены на краях кристаллов; „поверхностный” метол-гидрохиноновый проявитель.

Evans, Mitchell, Report on Conference on Defects in Crystalline Solids, 1955, p. 409.

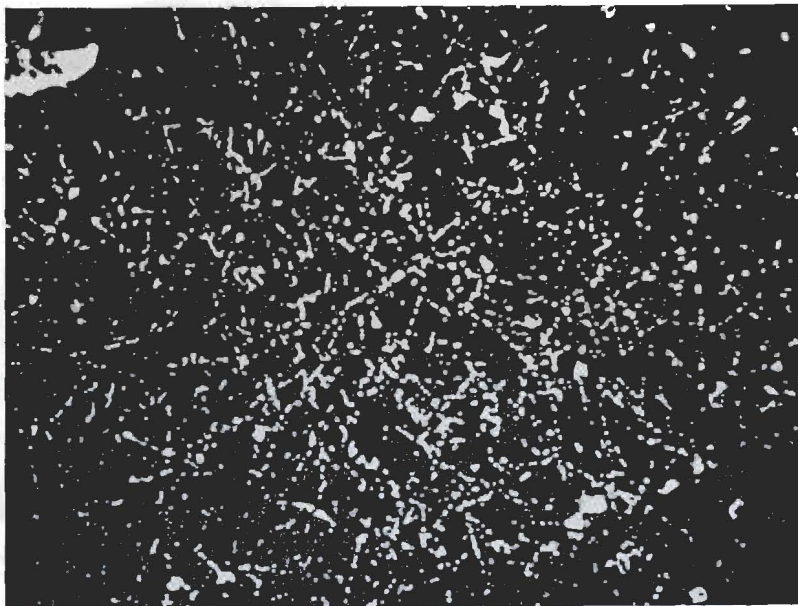


Фото 3. Первые микрофотографии следов α -частиц в фотографической эмульсии типа „Process“ фирмы Ильфорд.

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.

W a l m s l e y, M a k o w e r, Proc. Phys. Soc., 26, 261 (1914).

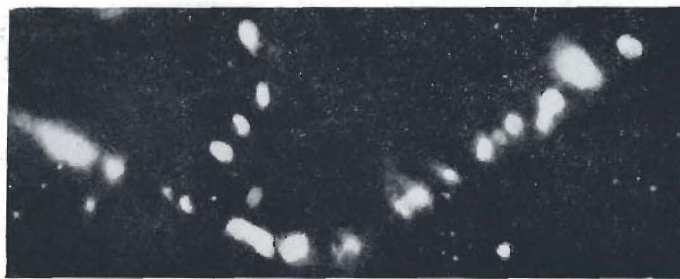


Фото 4. Следы отдельных α -частиц. Пластинки типа „Process“ фирмы Ильфорд.

Изломанный след первоначально приписывался рассеию α -частицы; теперь, однако, считают, что он принадлежит двум частицам, выходящим из одной (или почти из одной) точки.

W a l m s l e y, M a k o w e r, Proc. Phys. Soc., 26, 261 (1914).

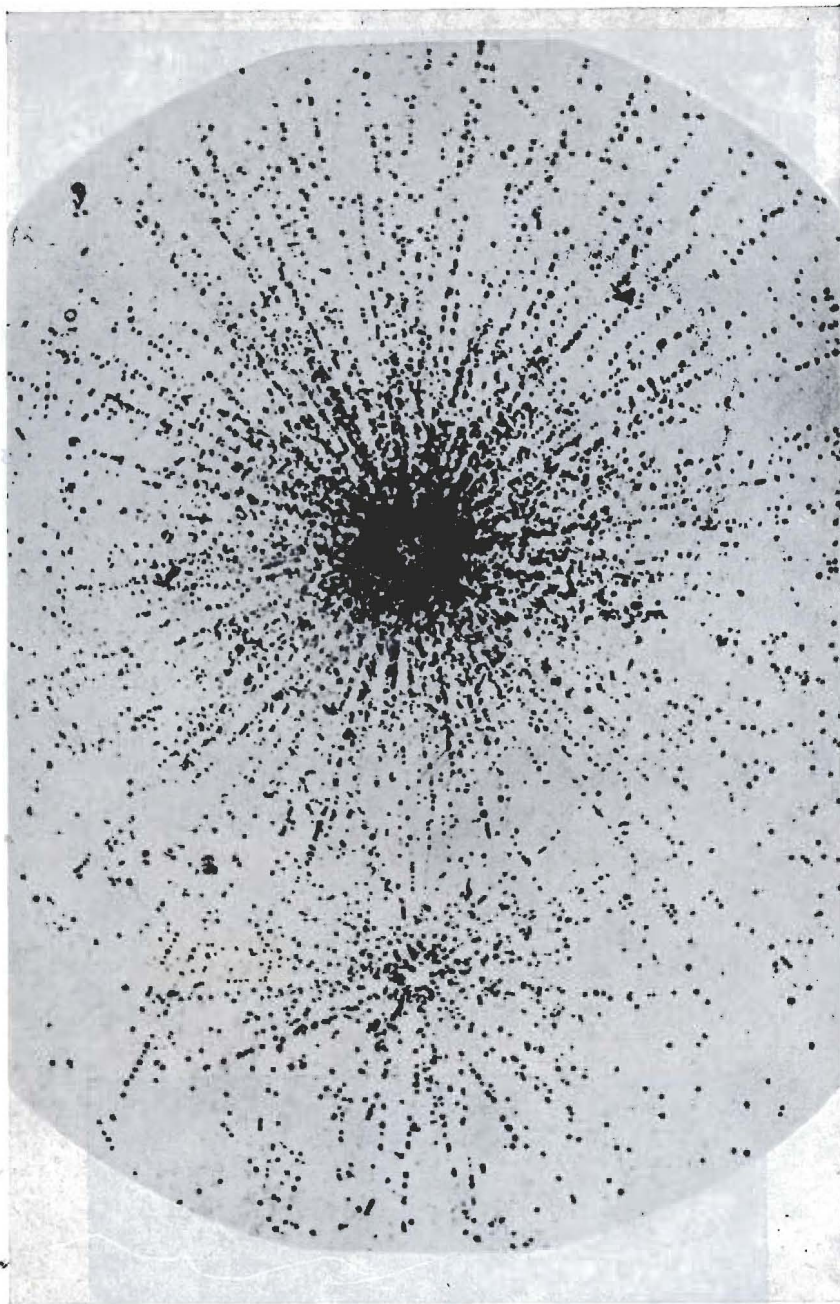


Фото 5. Радиоактивное загрязнение в эмульсии. Пластинки типа „Ordinary“ фирмы Рэтси.

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.

Kinoshita, Ikeuti, Phil. Mag., 29, 420 (1915).

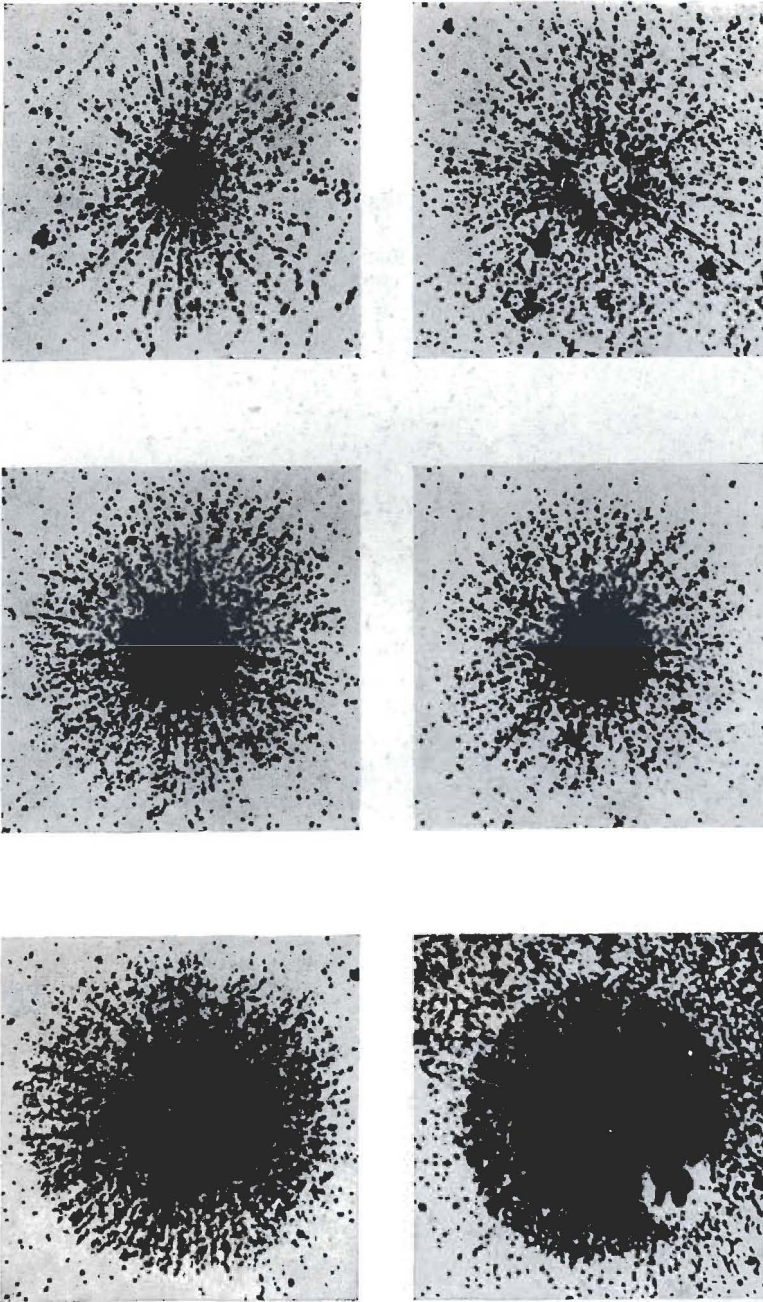


Фото 6. Гало, вызываемые радиоактивными загрязнениями эмульсии. Пластинки типа „Ordinary“ фирмы Рэттен.

Ряд облучений эмульсии источниками α -частиц постепенно возрастающей интенсивности; фотографии показывают постепенное образование гало, которые аналогичны встречающимся в минералах. Диаметр центрального участка со сплошным почернением зависит от продолжительности экспозиции и числа испущенных α -частиц. Внешняя граница, представляющая окружность среднего диаметра $\sim 108 \mu$, обусловлена одинаковыми пробегами α -частиц (испускаемых RaC'). Радиоактивное вещество было нанесено на эмульсию путем прикосновения острием иглы, обработанной радоном.

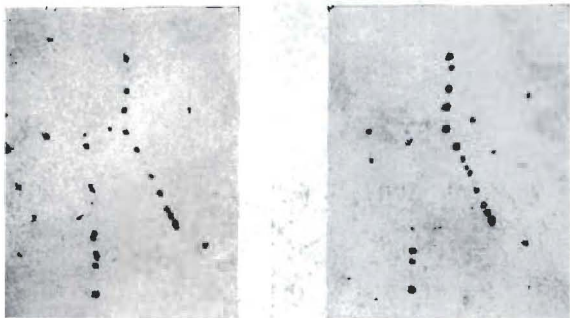


Фото 7. Пары стереоскопических микрофотографий следов α -частиц. Специальная эмульсия.

Пары стереоскопических микрофотографий следов α -частиц в диа-
 позитивной эмульсии. На снимках изображены несомненные случаи
 рассеяния α -частиц на углы порядка 20° .

Мысовский, Чижев, *Zs. Phys.*, **44**, 408 (1927).

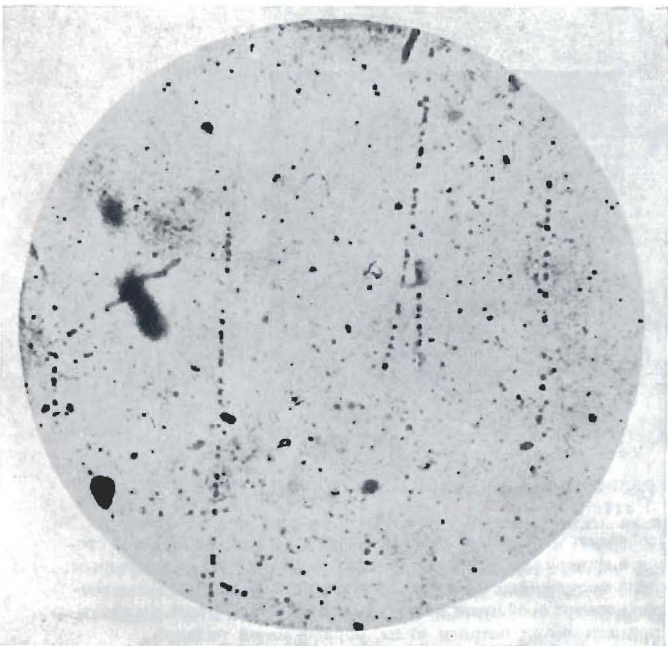
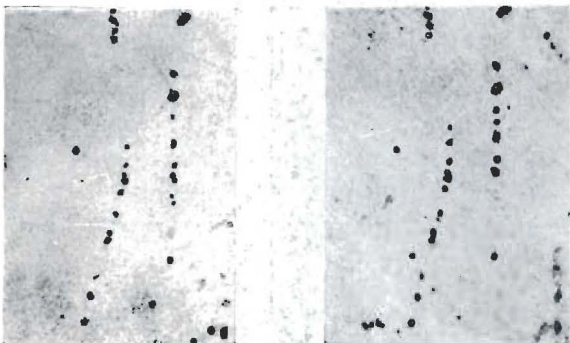
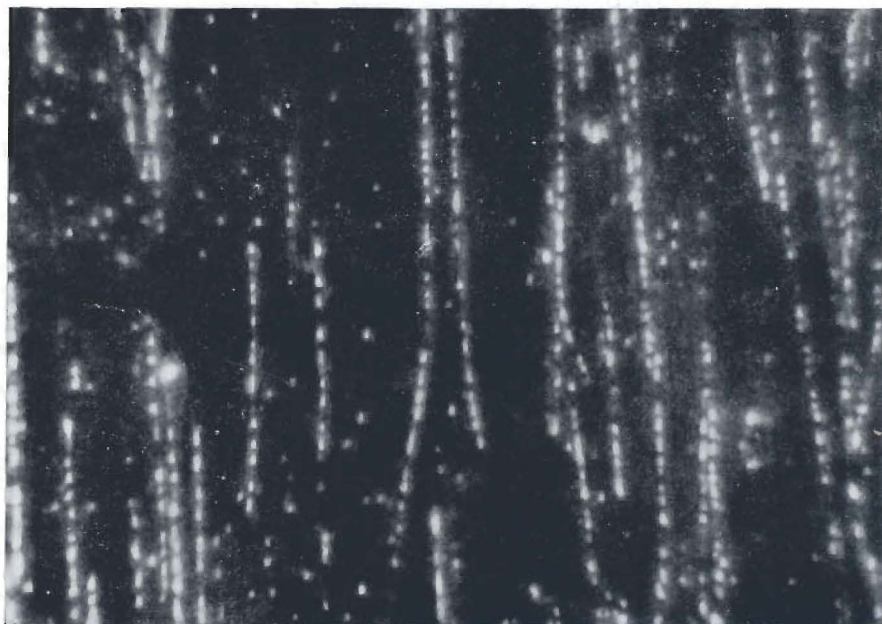


Фото 8. Следы протонов. Пластинки типа
 „Imperial Process“ фирмы Ильфорт.

Следы протонов в пластинках, обработанных в растворе
 желтого пинакриптола. В рассматриваемом опыте было
 обнаружено несколько следов длиной порядка 600 μ .
 Плотность зерен на следах была значительно выше, чем
 в отсутствие красителя (см. также фото 9).

Blau, Wambacher, *Acad. Wiss. Wien*, **141**, 616
 (1932).



Ф о т о 9. Следы искусственно ускоренных протонов. Эмульсия Илфорд R2.
Следы протонов, зарегистрированные в пластинке, сенсibilизированной желтым пинакриптолом. Снимки получены при
освещении по методу темного поля.
Wilkins, Journ. Appl. Phys., 1 35 (1940).

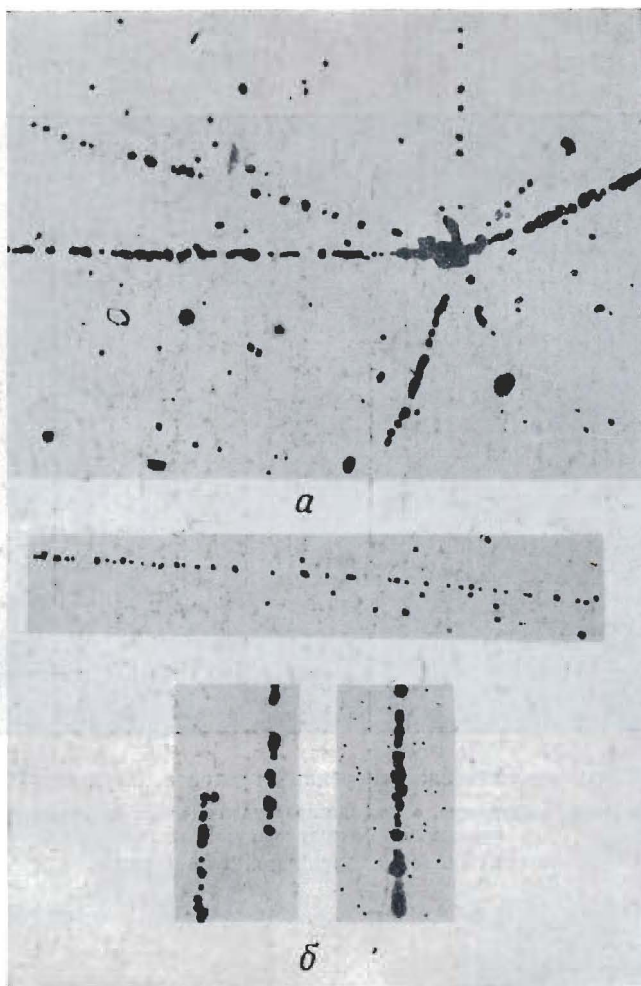


Фото 10. Следы протонов и α -частиц в эмульсиях Агфа К.

a — расщепление, вызванное космическим излучением. Замечна значительная степень дискриминации следов с большой и малой удельной ионизацией. Фон, состоящий из отдельных зерен, незначителен. Фотография представляет мозаику, составленную из двух снимков.

b — на фото также демонстрируется „дискриминационная способность“ эмульсии и отсутствие фона; вверху изображен след протона, внизу — три следа α -частиц.

Schopper, Schopper, Phys. Zs., 40, 22 (1939).

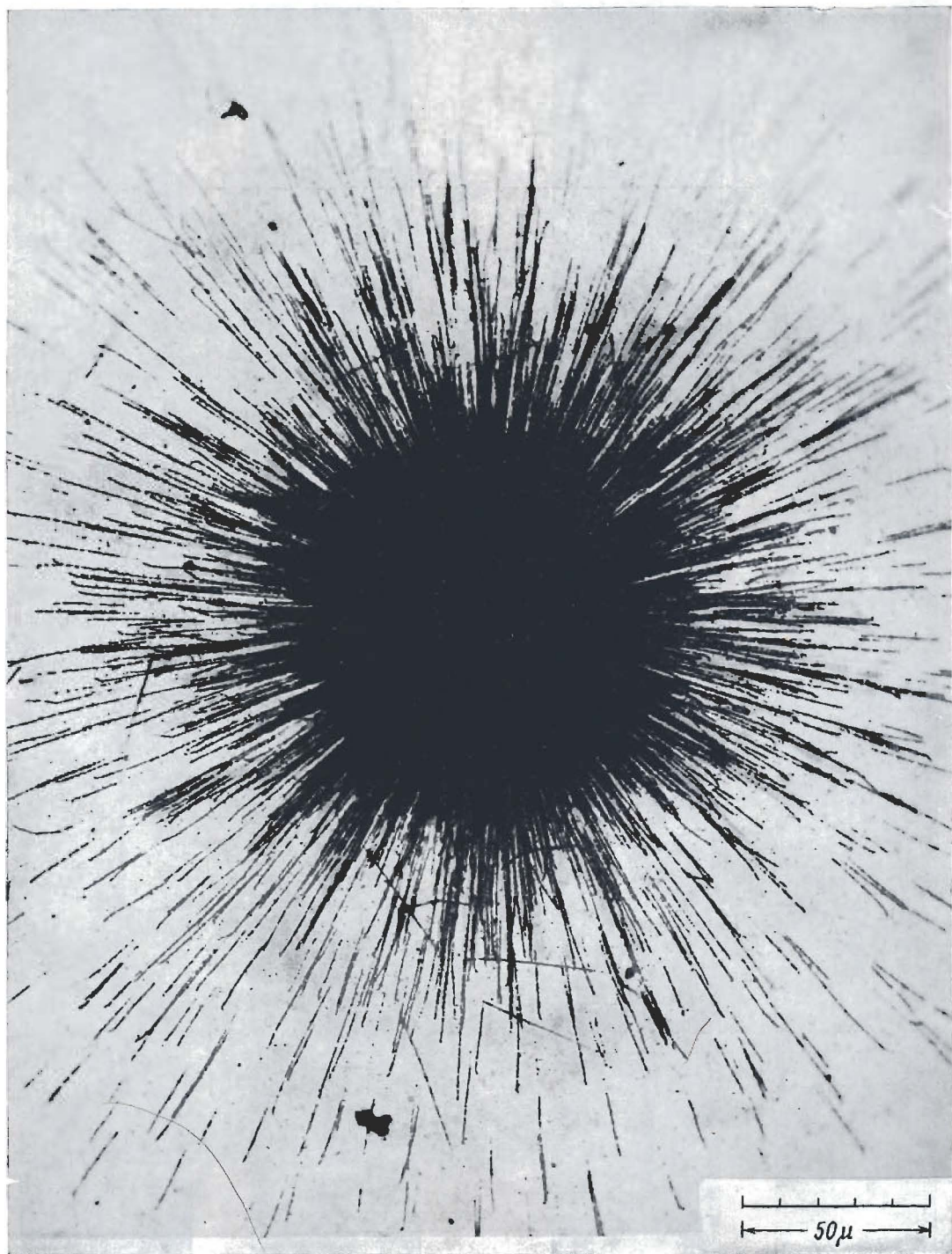


Фото 11. Радиоактивное загрязнение эмульсии крупинкой соли радия. Эмульсия Ильффорд В. α -частицы испускаются крупинкой радиевой соли, осажденной на поверхности. Те α -частицы, которые обладают большей ионизацией, дают в этой эмульсии сплошные следы.

Осchialini, Powell, Nature, 59, 186 (1947).

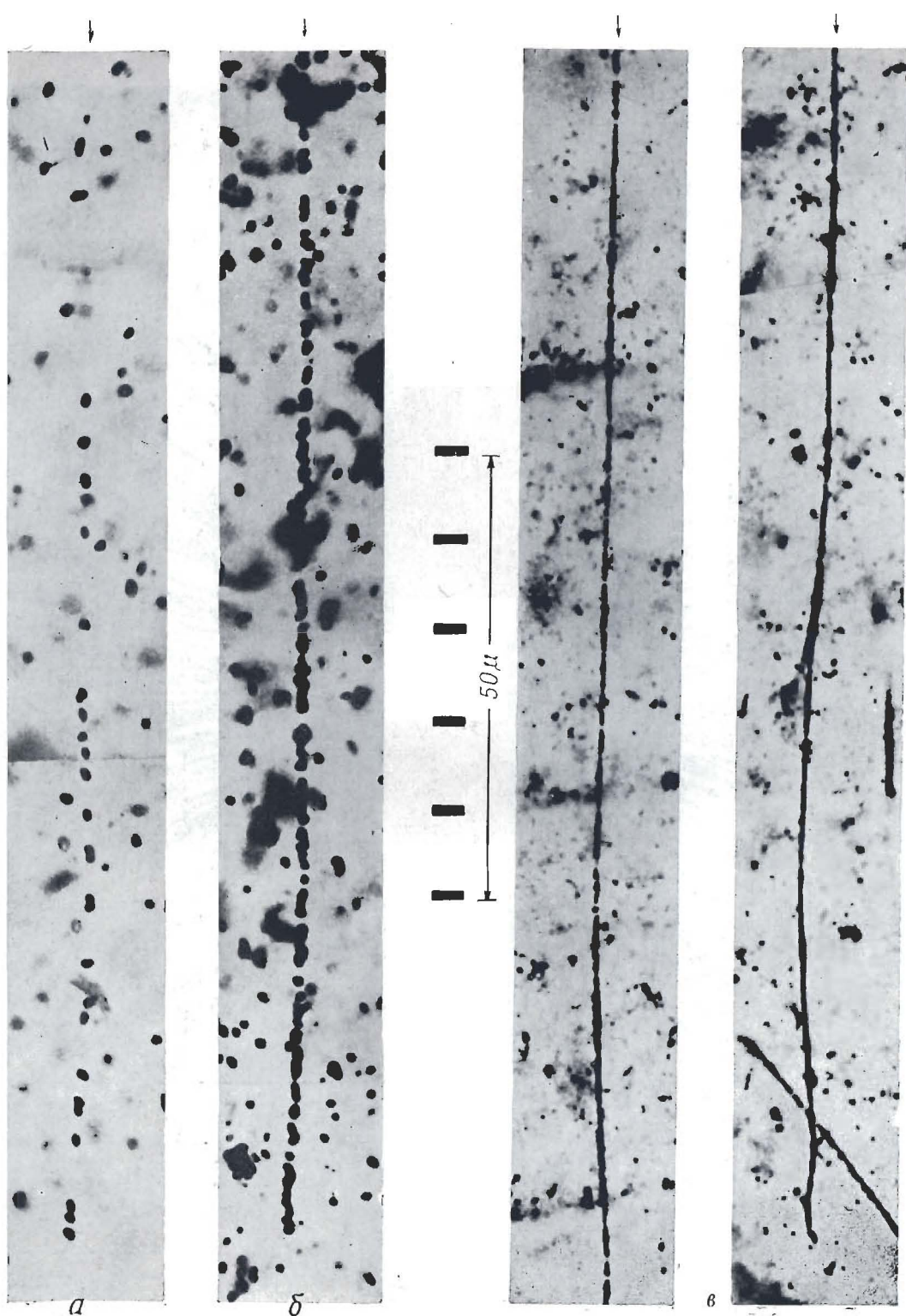


Фото 12. Получение „концентрированных” эмульсий.

Образцы следов протонов в эмульсиях, приготовленных Демерсом в 1945 г.

а — след протона в „а-эмульсии” фирмы Истмен, *б* — след протона в „а-эмульсии” фирмы Истмен с увеличенной концентрацией галоидного серебра. В процессе приготовления к этой эмульсии была добавлена вода, затем эмульсия была расплавлена и центрифугирована, после чего стекло было снова полено концентрированной фракцией. Бросается в глаза значительное улучшение следов.

в — след протона в специально приготовленной эмульсии Демерса, тип I. Эта эмульсия содержала от 70 до 85% бромистого серебра. Обращает на себя внимание чрезвычайно мелкое зерно по сравнению как с эмульсией фирмы Истмен (след *а*), так и с „ядерной” эмульсией фирмы Ильффорд (см. фото 13, *в*). На следе протона можно заметить короткие следы δ -частиц; видны также следы отдельных электронов на самом конце их пробегов.

Demers.

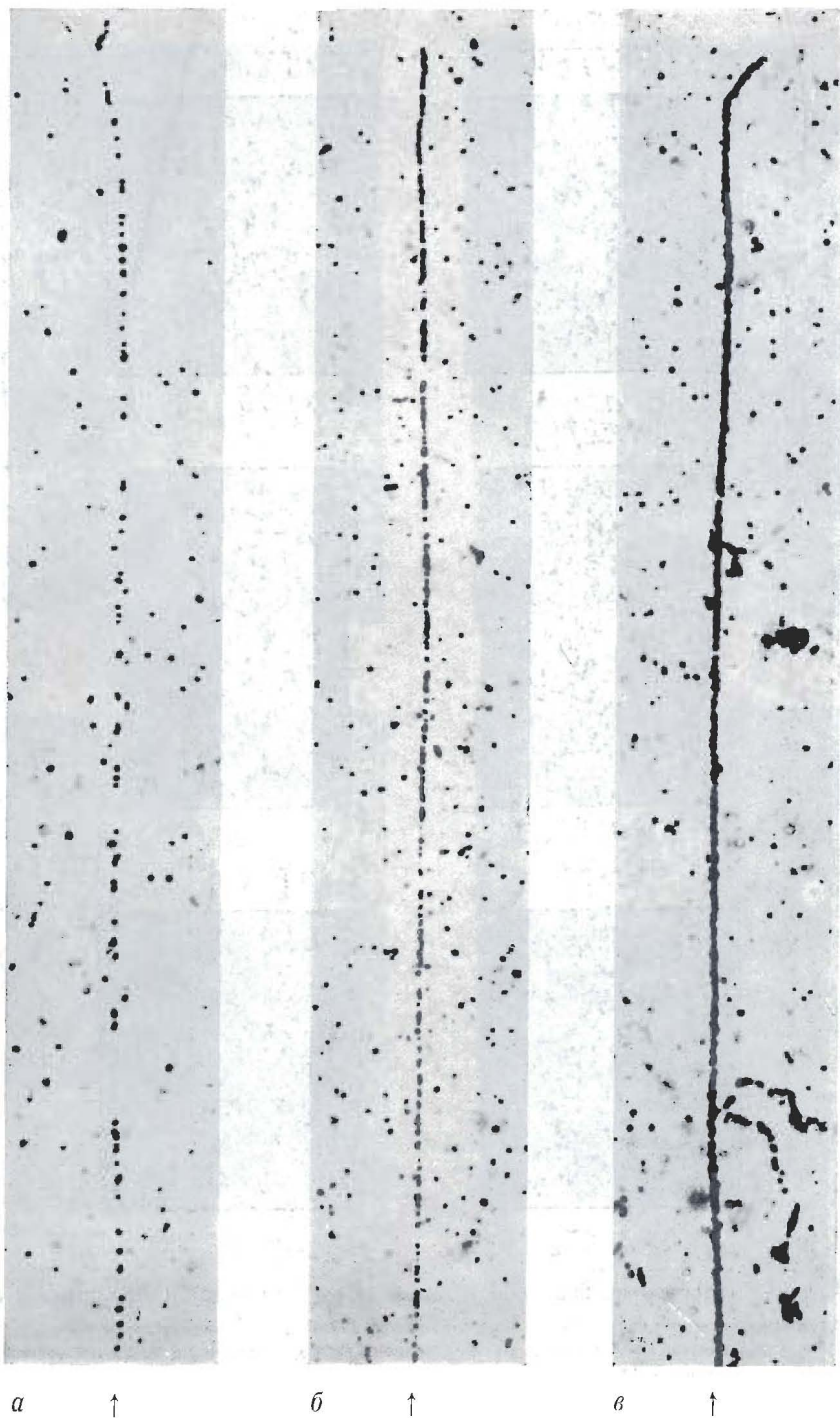


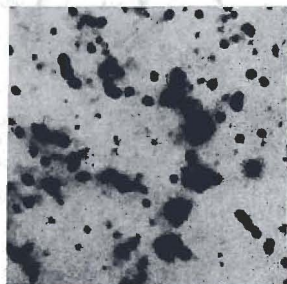
Фото 13. Следы протонов вблизи концов их пробегов, полученные в различных эмульсиях.

а — „полутоновая“ эмульсия фирмы Ильфорд (1939 г.); эмульсия этого типа изготовлялась для обычных фотографических работ.

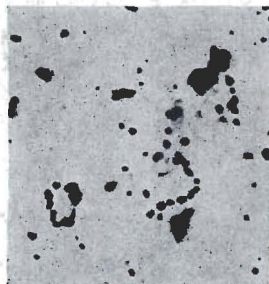
б — эмульсия Ильфорд С2, приготовленная Глассетом и Уолером (1946 г.). Отчетливо видно значительное увеличение плотности зерен на следе по сравнению со случаем *а*. В этой эмульсии могли быть различны следы частиц с удельной ионизацией, приблизительно вчетверо превышающей минимальное значение для частицы с зарядом e .

в — эмульсия Кодак NT4, разработанная Берриманом (1949 г.) и представляющая собой первую электронно-чувствительную эмульсию; она позволила получать распознаваемые следы заряженных частиц с любыми скоростями. Видно, что след протона в этой эмульсии получился почти сплошным. В нижней части снимка виден след медленного электрона, не связанного с протоном. Протон дал несколько медленных δ -электронов, следы которых заметны на основном следе протона в виде коротких отростков. Небольшое увеличение ширины следа протона по сравнению со следом *б* объясняется более крупным зерном эмульсии Кодак NT4.

Бристольская группа, неопубликованная работа.



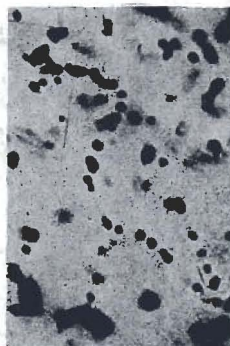
a



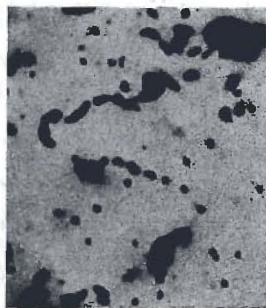
б



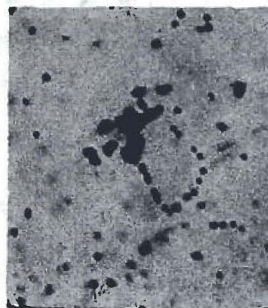
в



г



д



е

Фото 14. Следы электронов вблизи концов их пробегов, полученные в эмульсии Кодак NT2a.

Следы получены под действием рентгеновских лучей, возникших при бомбардировке платинового антикатада электронами разных энергий. Прежде чем попасть на пластинку, рентгеновские лучи проходили через поглотители различной толщины.

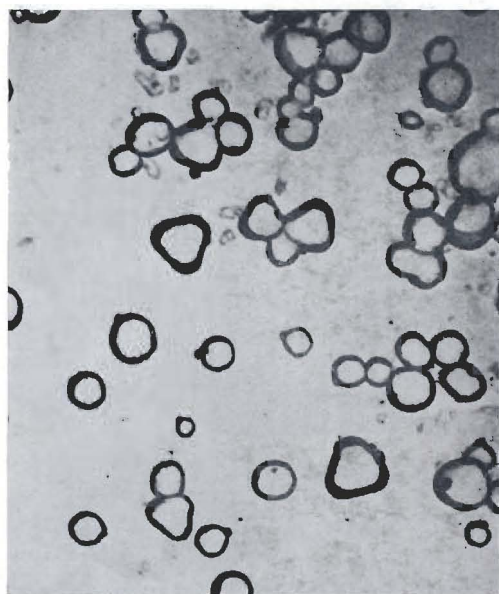
a — энергия квантов 35 кэ; без поглотителя;

б — энергия 65 кэ; медный поглотитель, толщина 0,2 мм;

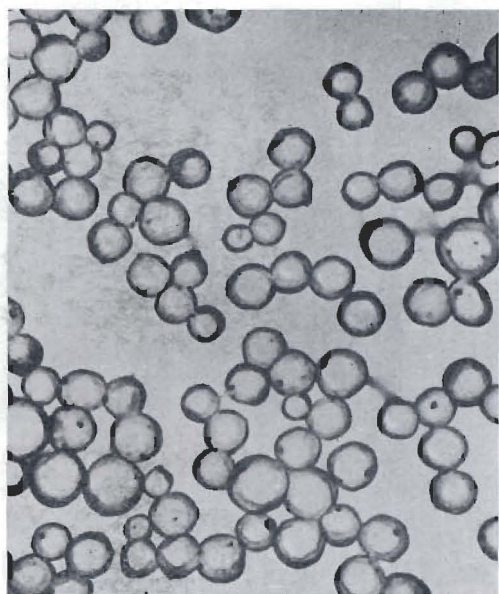
в, г, е — энергия 200 кэ; медный поглотитель, толщина 10 мм;

д — энергия 130 кэ; медный поглотитель, толщина 1,8 мм.

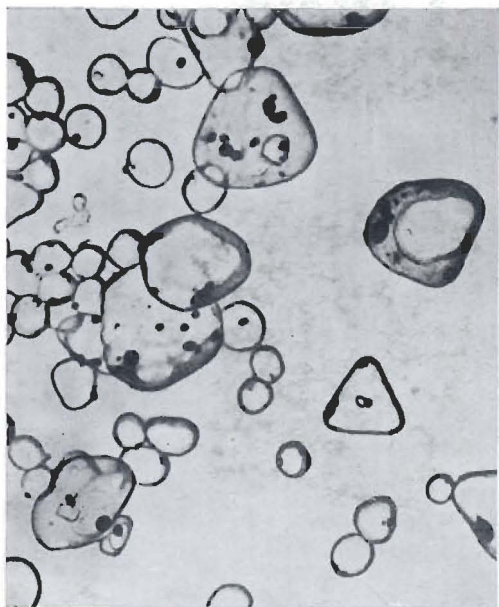
Заметно, что пробеги электронов возрастают по мере увеличения энергии квантов от 65 до 130 кэ; в дальнейшем не происходит каких-либо заметных изменений. Электроны с меньшей удельной ионизацией не дают в эмульсии NT2a легко различимых следов.



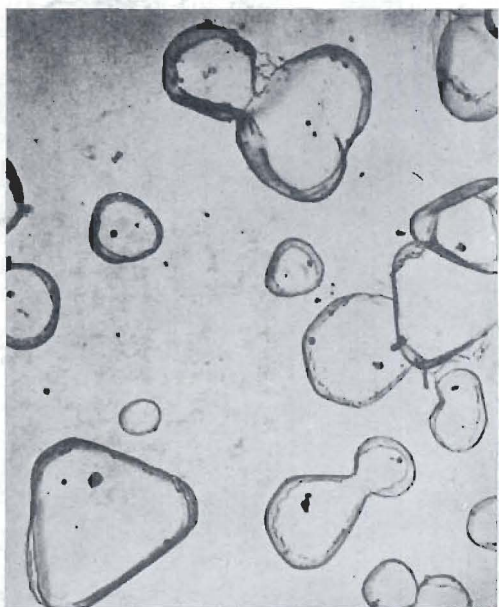
a



б



в



г

Фото 15. Электронные микрофотографии зерен различных эмульсий ($\times 20\,000$).

a — „полутонная“ эмульсия фирмы Ильфорт; *б* — „ядерная“ эмульсия типа Ильфорт G5; *в* — специальная диапозитивная эмульсия; *г* — эмульсия типа „Selochrome“.

На снимке *б* отчетливо заметна однородность размеров зерен эмульсии G5, а также их почти сферическая форма. Помимо этого, обращают на себя внимание следующие особенности: 1) значительные колебания размеров зерен в эмульсиях, предназначенных для передачи полутонов; 2) присутствие зерен, имеющих вид пластинок с формой, близкой к треугольной; 3) присутствие значительно более крупных зерен в высокочувствительных эмульсиях. Увеличение, при котором сделан снимок *г*, было несколько меньше, чем для трех первых снимков. Микрофотографии получены методом „угольных реплик“.

Найне, неопубликованная работа, 1954 г.

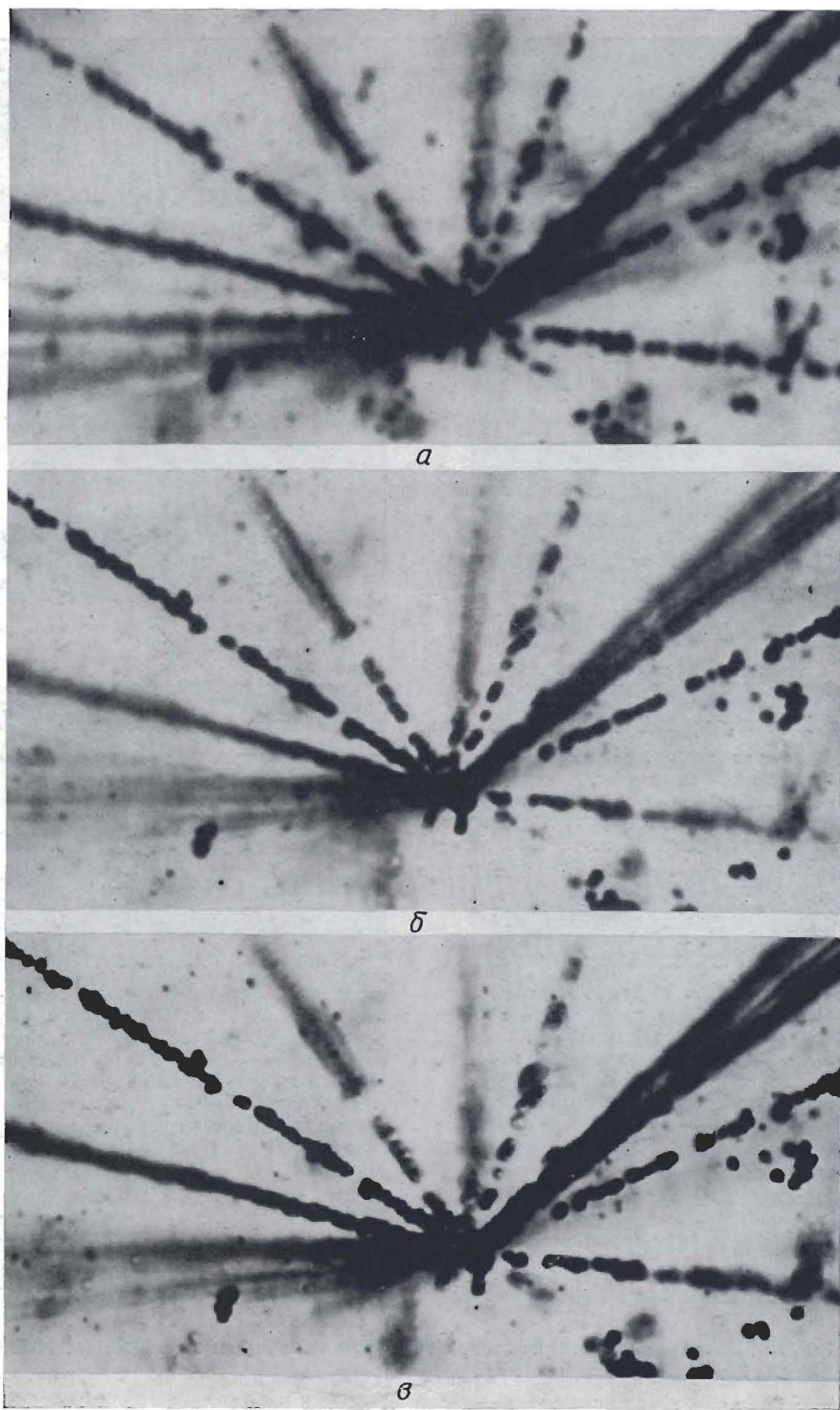


Фото 16. Микрофотографии, полученные при помощи объективов с различной разрешающей способностью. Эмульсия Ильфорд G5.

Один и тот же объект снят объективами с различными численными апертурами: a — 0,45; $б$ — 0,85 и $в$ — 1,3, при одинаковом увеличении. Повышение разрешающей способности, наблюдающееся при увеличении численной апертуры, сопровождается уменьшением глубины фокуса. На снимках $б$ и $в$ плоскости резкой наводки совпадают не вполне точно.

Бристольская группа, неопубликованная работа.



Фото 17. Следы α -частиц в эмульсии, „загруженной” солью тория. Эмульсия Ильфод А1.
Occhialini, Powell, 1947 г.

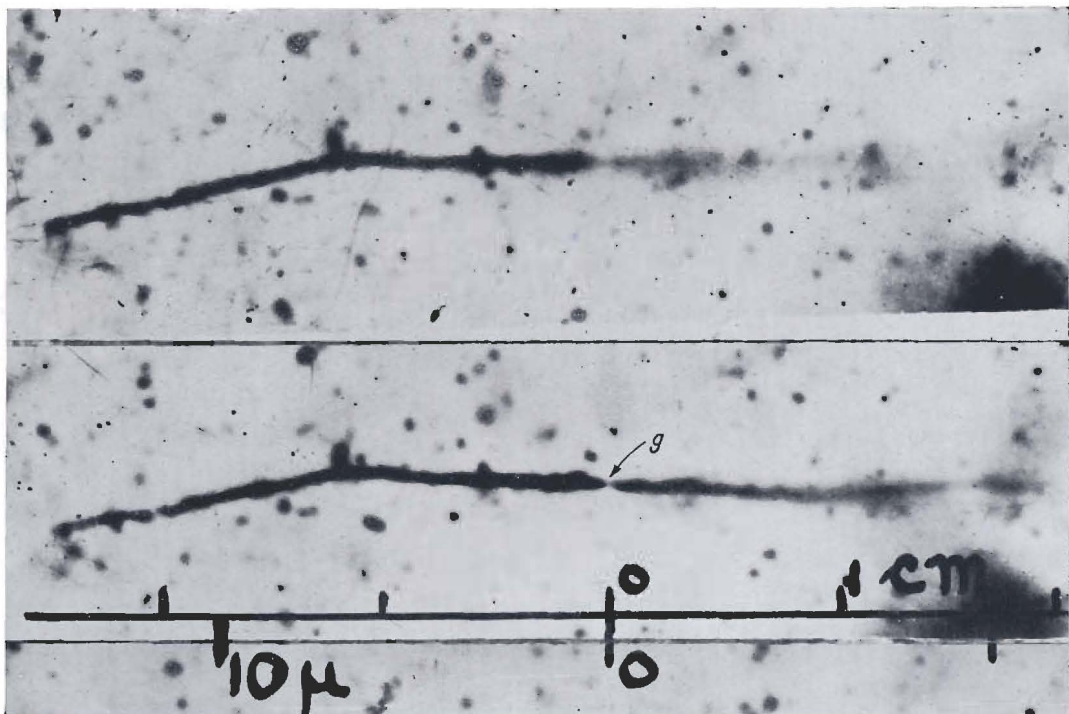


Фото 18. Следы осколков деления урана. Эмульсия Демерса, тип II.

Тонкий слой соли урана был заключен между двумя слоями эмульсии, вследствие чего точка, из которой разлетались осколки деления, могла быть определена по положению разрыва (точка *g*) на следе, и это позволило измерить пробеги отдельных осколков. Осколок, вылетевший влево, столкнулся с ядром эмульсии, вследствие чего образовался разветвленный след. На фотографиях следов можно обнаружить ряд деталей, заметных благодаря чрезвычайно мелкому зерну эмульсии Демерса. Верхняя шкала приблизительно соответствует пробегу в сантиметрах воздуха при нормальных условиях.

De Merse, 1946 г.

Фото 19. Рождение K -мезона и его распад по схеме τ . Эмульсия Ильффорд G5.

Микрофотографии иллюстрируют значительный прогресс в области методики, который оказался возможным благодаря использованию эмульсионных стоек. Изображенные на снимках следы были зарегистрированы в стойке, состоящей из 46 слоев размером $15 \times 15 \text{ см}^2$ и экспонированной в 1952 г. на большой высоте над Южной Англией. Номер слоя, в котором наблюдался данный случай, указан в кружочке. Первым обнаруженным случаем был распад в точке *A* μ -мезона, сопровождавшийся вылетом электрона. При просмотре следа μ -мезона в обратном направлении было установлено, что он появился в результате распада π -мезона в точке *B*, находящейся в том же эмульсионном слое (№ 6). В свою очередь прослеживание π -мезона показало, что он возник в результате распада τ -мезона в точке *C*, которая также находилась в слое № 6.

След одного (направлен вниз) из двух других π -мезонов, образовавшихся при распаде τ -мезона в слое № 6, был просмотрен на длине 21 мм до остановки этого мезона в точке *D* в слое № 21, где он вызвал ядерное расщепление. Среди следов вторичных частиц, возникших в результате этого расщепления, было обнаружено четыре однозарядные частицы и ядро Li^8 . Последнее после остановки испытало β -распад, в результате которого образовалось возбужденное ядро Be^8 . В дальнейшем произошел спонтанный распад этого ядра на две α -частицы. Заметные на фотографии „молоткообразные“ следы принадлежат α -частицам с равными и противоположно направленными импульсами. Характер расщепления, вызванного в точке *D* π -мезоном, говорит за то, что, по всей вероятности, имело место взаимодействие этого мезона с ядром одного из легких элементов (*C*, *N* или *O*), содержащихся в эмульсии (см. стр. 166). Поскольку суммарный заряд вторичных частиц равен по меньшей мере $(3 + 4)e = 7e$, то заряд первичного ядра должен был бы составлять $8e$, т. е. в данном случае наблюдалось расщепление ядра кислорода.

Третий π -мезон, образовавшийся в точке *C* (на снимке направлен в правый верхний угол), вылетел из стойки, пройдя в ней 7,6 мм; его остаточный пробег от точки вылета, согласно оценке, сделанной по плотности зерен на следе, должен был составить 3,3 мм. При прослеживании τ -мезона было установлено, что он возник в слое № 17 в „звезде“ типа $21 + 1\mu$, находящейся в точке *E*. Остальные 21 вторичная частица, возникшие в результате этого расщепления, были прослежены до конца их пробега в стойке или до точки вылета, причем ни в одном случае не было обнаружено каких-либо интересных явлений. Расстояние между точками *E* и *C* при использовании в данных фотографиях увеличения должно было бы составлять около 40 м.

Из измерений и оценки пробегов трех π -мезонов, образовавшихся при распаде τ -мезона, следует, что их энергии должны были составлять 12,2; 25,8 и 37,9 Мэв. Таким образом, полное энергосодержание было равно 75,9 Мэв. С точностью до ошибок измерения ($\sim 1^\circ$) следы трех вторичных π -мезонов были коллинеарными. Кроме того, при помощи теоремы Ламби было показано, что геометрическая сумма их импульсов, лежащих в одной плоскости, равна нулю.

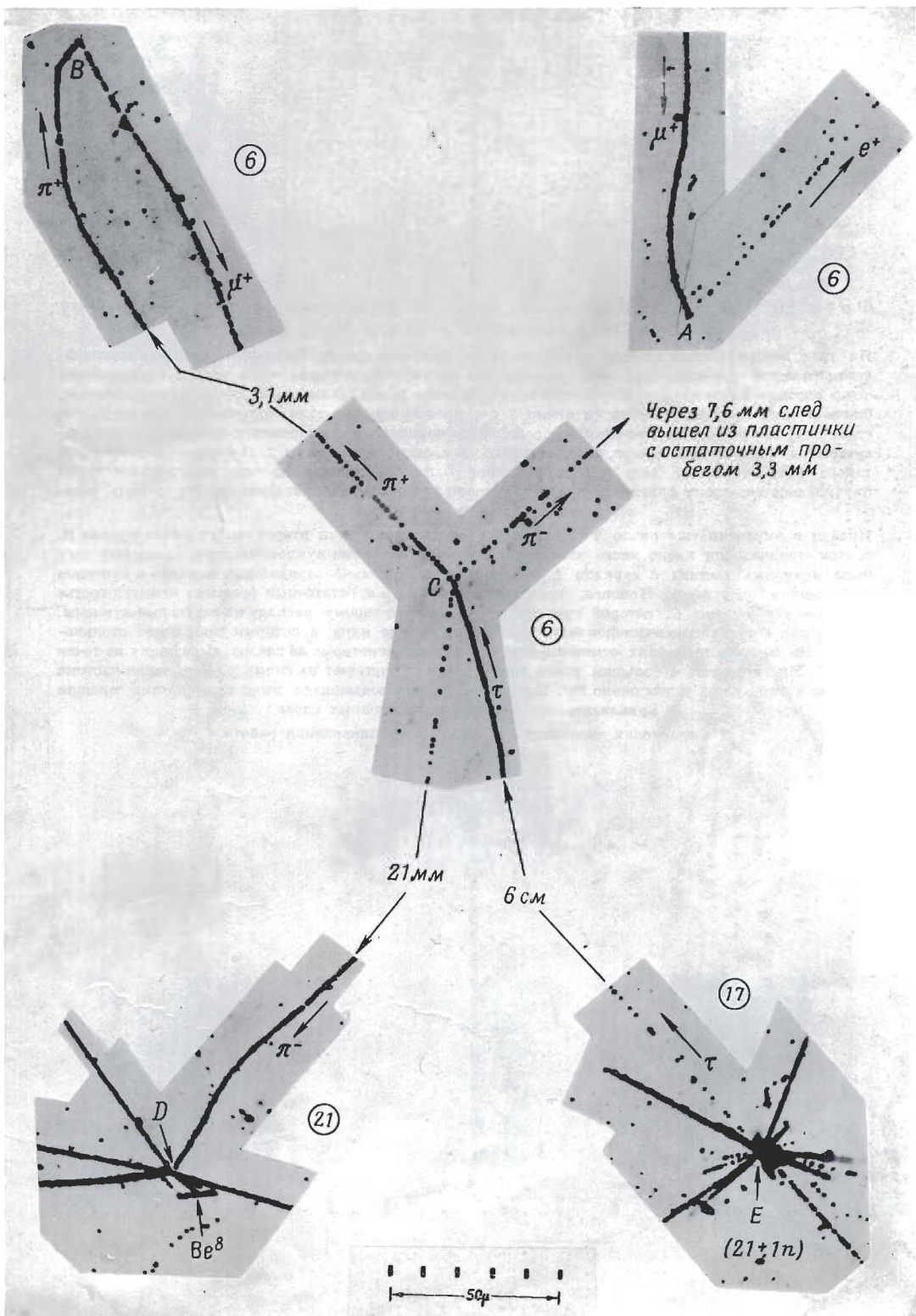


Фото 19

Фото 20. Последовательный распад тяжелого ядра, принадлежащего первичному космическому излучению. Эмульсия Ильфод Б5.

На трех изображенных на фотографии мозаиках показаны последовательные ядерные взаимодействия тяжелой частицы первичного космического излучения, имевшие место при ее прохождении через эмульсионную стопку. Первичное ядро с зарядом $Z \sim 13$ (алюминий), обладавшее скоростью, близкой к c , прошло в эмульсии около 3 см, прежде чем испытало столкновение в точке А. Это столкновение произошло, по-видимому, с большим параметром соударения и привело к испарению α -частицы из движущегося ядра, заряд которого уменьшился при этом на 2. Поскольку в результате такого взаимодействия была испущена всего одна заряженная частица движущаяся почти параллельно тяжелому фрагменту, точка, в которой произошло столкновение, не могла быть установлена достаточно определенно.

Пройдя в эмульсии еще около 2 см, тяжелый фрагмент испытал второе столкновение в точке В. В этом столкновении имело место взаимодействие с несколькими нуклонами ядра, вследствие чего была испущена частица с зарядом $Z \sim 5$, а также несколько заряженных мезонов и протонов с большими энергиями. Наконец, пройдя еще около 1 см, остаточный фрагмент испытал третье столкновение в точке С, которое привело к его окончательному распаду на отдельные нуклоны. Значительное количество нуклонов было также испущено из ядра, с которым произошло столкновение. На микрофотографиях отмечены стрелками лишь некоторые из следов, выходящих из точек В и С. Многие следы с большим углом погружения отсутствуют на снимках. Первичная частица влетела в стопку под углом около 20° . Некоторые из образовавшихся вторичных частиц прошли приблизительно через 30 эмульсионных слоев.

Сардинская экспедиция 1953 г., неопубликованная работа.

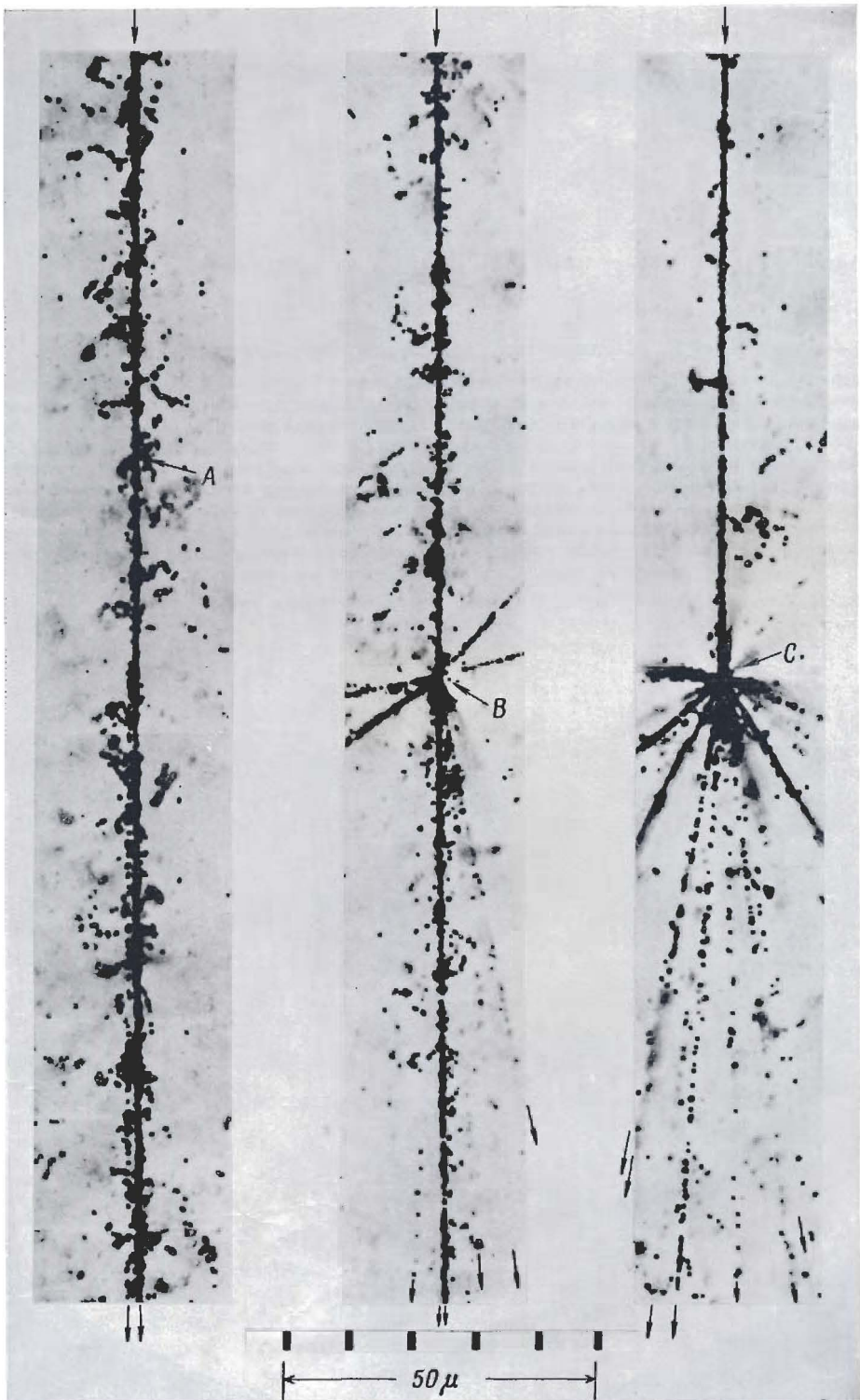
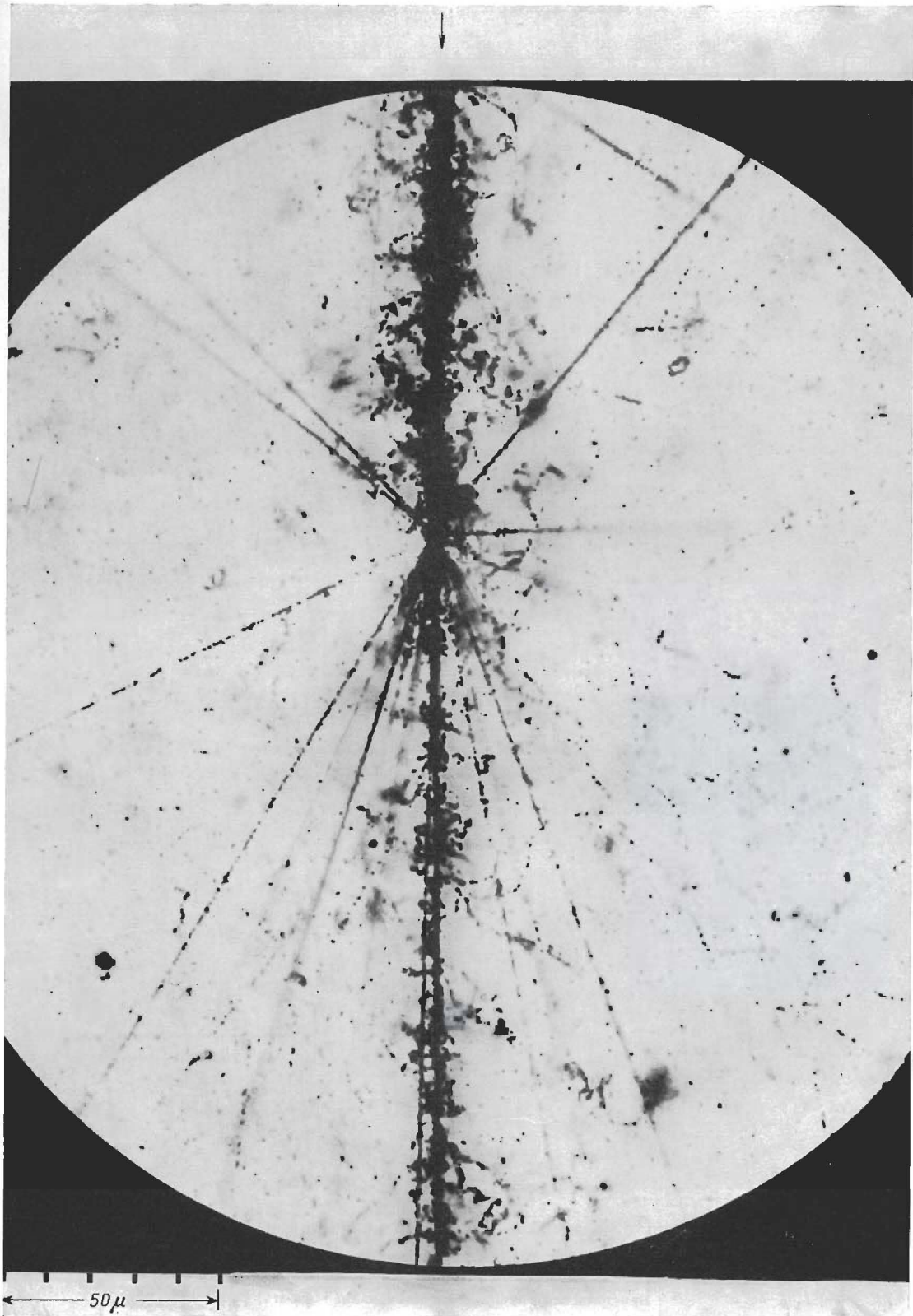


ФОТО 20

Фото 21. Столкновение ядра железа. Эмульсия Ильфторд G5.

Ядро с зарядом $Z \sim 26$, двигавшееся со скоростью порядка $0,35c$, испытало столкновение, в результате которого образовался ряд фрагментов. Среди последних удалось идентифицировать ядро с зарядом 14 ± 2 . След первичной частицы подобен тому, который можно было ожидать для ядра с $Z \sim 50$, движущегося со скоростью, приближающейся к скорости света. Микрофотография дает представление о весьма значительной разнице в количестве восстановленного серебра, происходящего на единицу длины следов частиц с различными удельными ионизациями. След тяжелого первичного ядра может быть сооставлен для сравнения со следами электронов фона (соответствующее отношение между удельными ионизациями составляет около $3000 : 1$). Вследствие сравнительно малой скорости первичной частицы отсутствуют быстрые вторичные частицы, подобные тем, которые видны на фото 20, сделанном при том же увеличении.

Dainton, Fowler, неопубликованная работа.



Φοτο 21

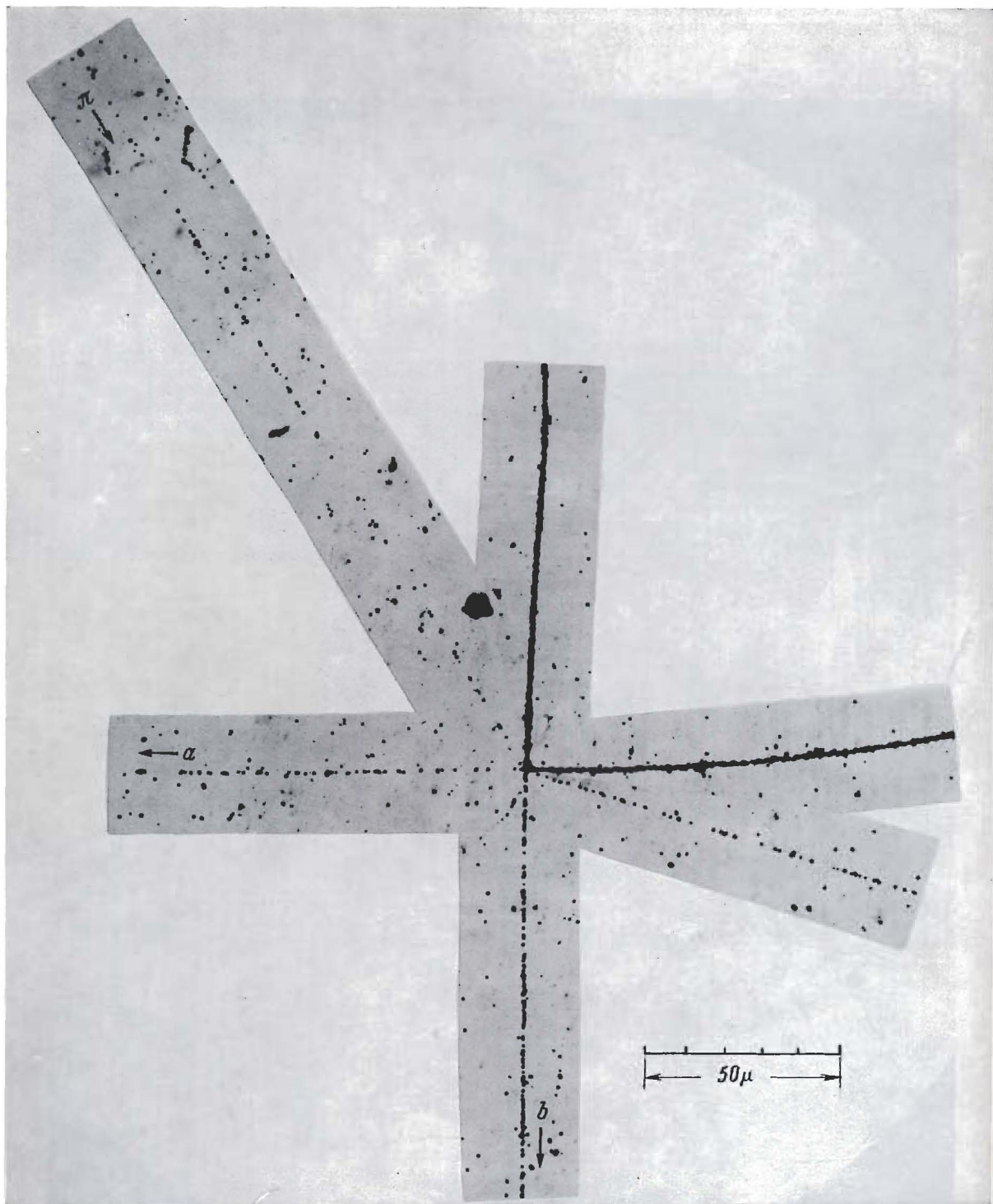


Фото 22. Следы частиц с различными удельными ионизациями. Эмульсия Ильфторд G5. Ядерное столкновение π -мезона при энергии 750 Мэв. Следы сильно ионизирующих вторичных частиц имеют большие углы погружения. На следе, идущем вправо, заметны „веточки” медленных δ -электронов. Бристольская группа, неопубликованная работа.

Фото 23 и 24. Плотность зерен на следе π -мезона (при различных значениях его скорости). Эмульсия Ильфорд G5.

$$\pi - \beta = 0,28; \quad \frac{dE}{dR} = 3,8 \text{ кэв}/\mu; \quad \pi - \beta = 0,51; \quad \frac{dE}{dR} = 1,45 \text{ кэв}/\mu;$$

$$\sigma - \beta = 0,34; \quad \frac{dE}{dR} = 2,1 \text{ кэв}/\mu; \quad \partial - \beta = 0,56; \quad \frac{dE}{dR} = 1,2 \text{ кэв}/\mu;$$

$$\sigma - \beta = 0,46; \quad \frac{dE}{dR} = 1,7 \text{ кэв}/\mu; \quad e - \beta = 0,59; \quad \frac{dE}{dR} = 1,1 \text{ кэв}/\mu.$$

Счет зерен на следах частиц, зарегистрированных в эмульсии G5, становится затруднительным при $\beta < 0,5$, поскольку в этом случае часто не удается разрешить отдельные зерна. Следы, изображенные на фото, принадлежат π -мезонам, однако изменение ионизации в зависимости от скорости оказывается в хорошем приближении независимым от массы частицы. Подобная зависимость плотности зерен (но не рассеяния!) от скорости имеет место для следов всех однократно заряженных частиц. Фактические значения плотности зерен зависят также от степени проявления эмульсии. В пластинках, с которых были сделаны микрофотографии, плотность зерен, соответствующая плато ионизационной кривой, составляла 22 зерна на 100μ (см. стр. 82).

На микрофотографиях могут быть идентифицированы следы отдельных δ -электронов с энергиями порядка 15 кэв. Такие δ -электроны чаще встречаются на участке следа, соответствующем малым скоростям ($\beta \sim 0,3$). В тех случаях когда эмульсия перед экспозицией на большой высоте находилась в течение нескольких недель у поверхности земли, на ней возникал фон, образованный следами медленных электронов. Вследствие испытываемого электронами большого рассеяния точное определение мест их возникновения затруднительно. Поэтому наличие электронного фона, не связанного с рассматриваемым следом, приводит к ошибкам при определении частоты возникновения δ -электронов на следах частиц с малым зарядом ($Z = 1$ или 2).

М е н о л, неопубликованная работа.

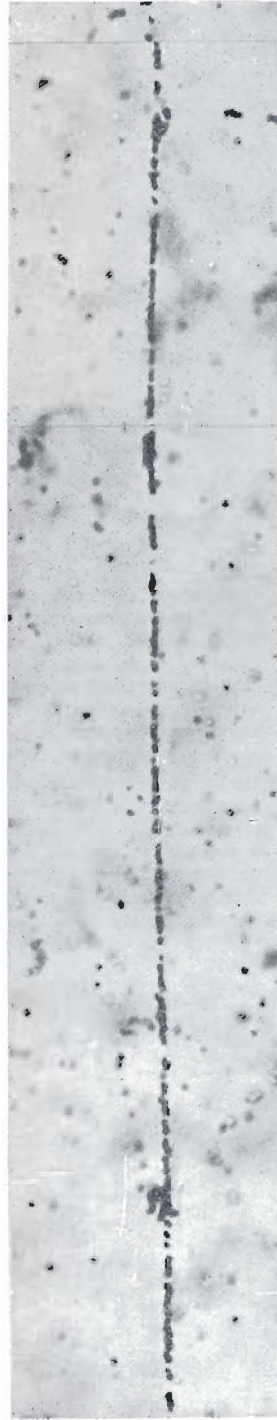
a



δ



θ



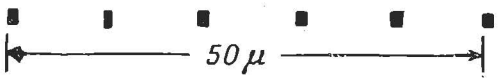
2



3



4



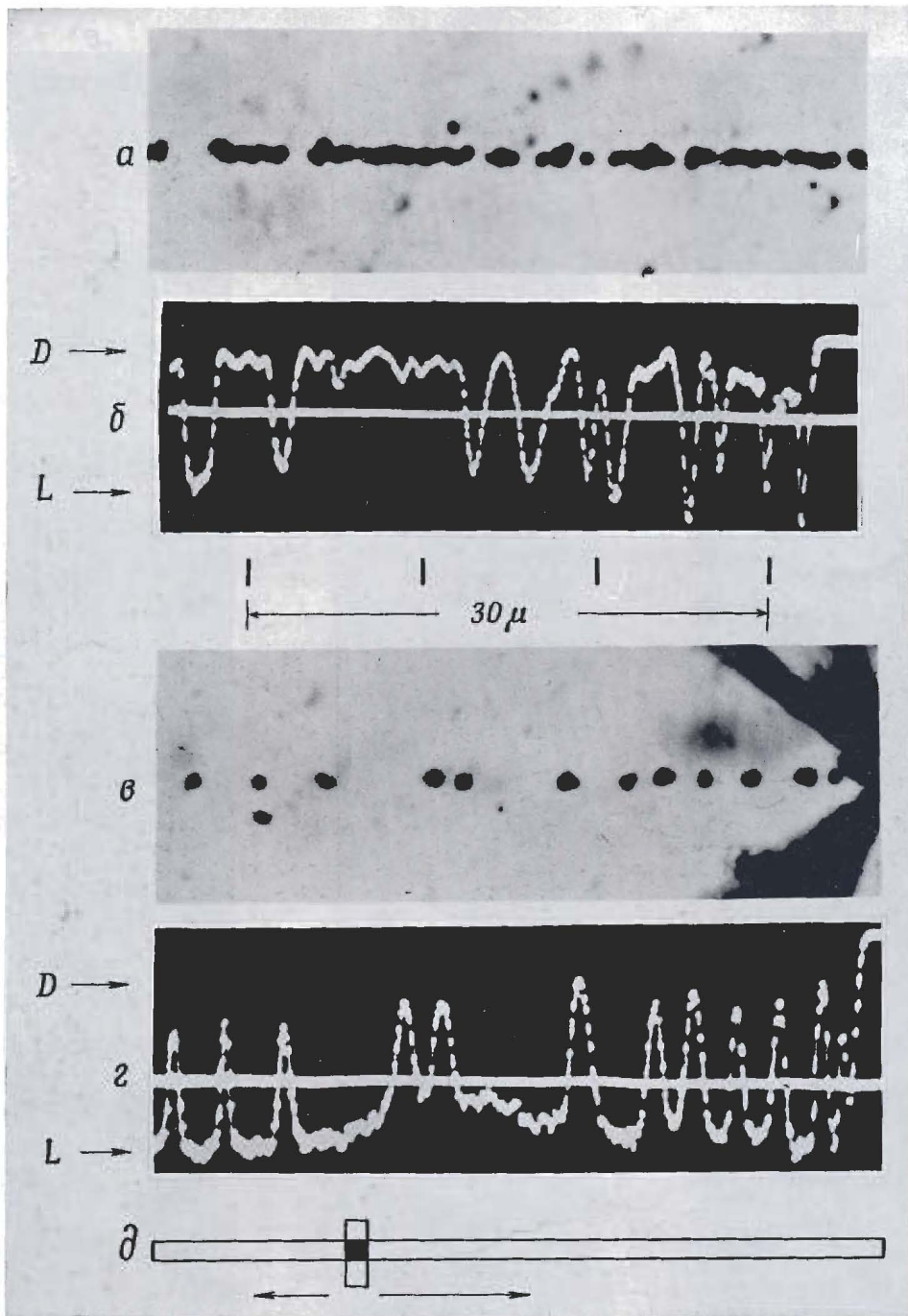
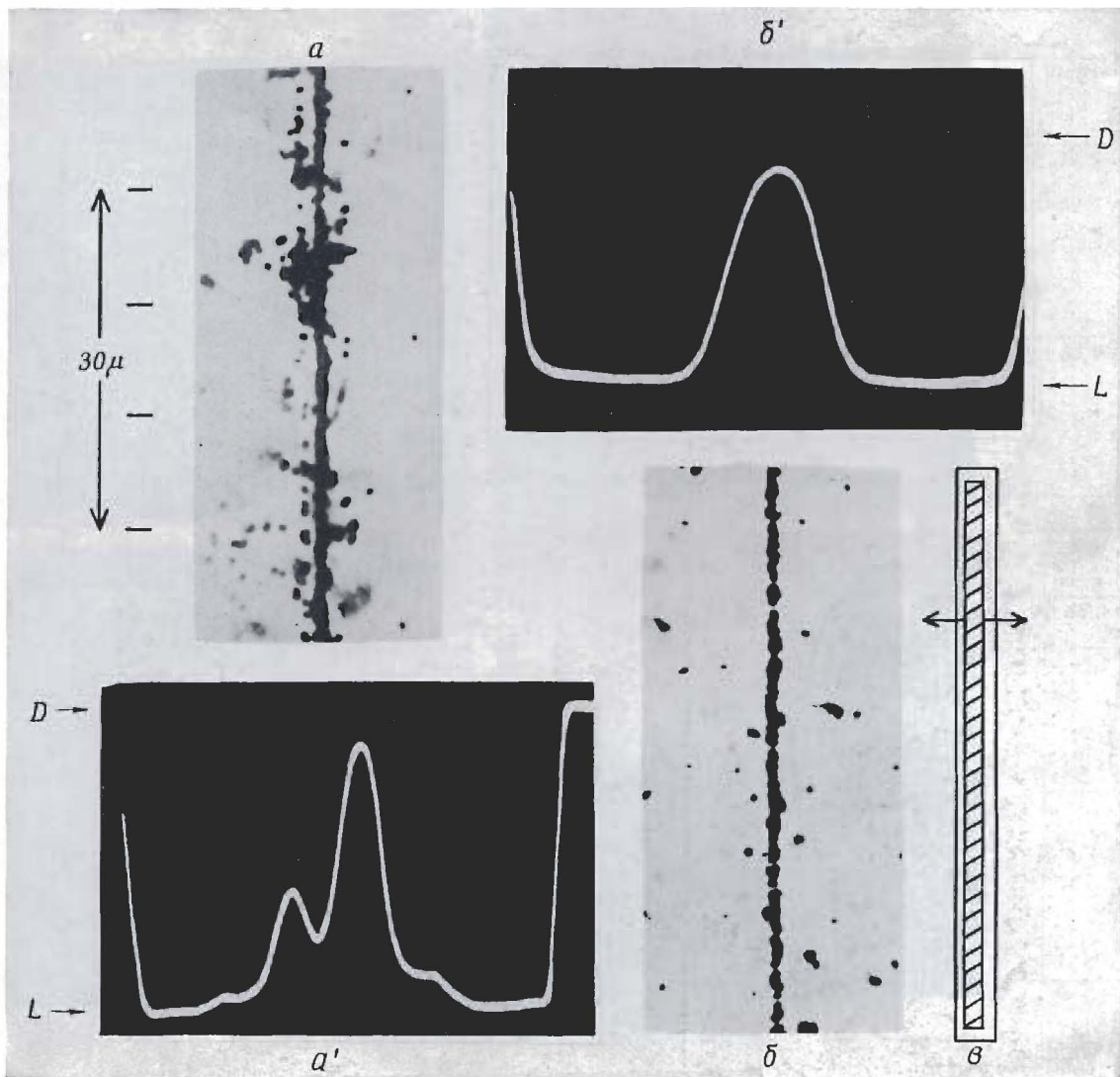


Фото 25. Фотометрирование следов.

На снимках *a* и *b* изображены микрофотографии двух следов с сильно отличающейся плотностью зерен; *b* и *z* — соответствующие фотограммы, полученные при помощи катодного осциллографа; буквами *D* и *L* обозначены на них уровни, отвечающие полному затемнению и максимальной освещенности соответственно. Сдвиги луча осциллографа по оси ординат не являются линейными, однако связь между основными особенностями следа и фотограммы обнаруживается вполне отчетливо. Верхняя фотограмма эквивалентна счету разрывов, нижняя — счету зерен. Для освещения использовался луч в виде узкой полоски, расположенной параллельно следу, который фактически „просматривался“ второй, перпендикулярной ему щелью (см. схему δ).



Фот 26 Фотометрирование следов тяжелых ядер.

Фото, изображенное слева, является частью фото 20; на нем видны следы α -частицы и ядра с $Z \sim 10$, появившихся в результате ядерного столкновения тяжелой частицы первичного космического излучения. Фотометрические кривые показывают изменение почернения в направлении, перпендикулярном следу, полученное при помощи длинной узкой щели. Уровни отсчетов по фотометру, отвечающие максимальной освещенности и полному затемнению, отмечены соответственно буквами L и D . Горизонтальный масштаб фотограмм a' и b' сильно увеличен по сравнению с микрофотографиями следов, показанными в снимках a и b . На фотограмме a' отчетливо заметно присутствие параллельного следа α -частицы, а также влияние δ -электронов, вызывающих появление „крыльев“ у основного максимума. Эффективная ширина применявшейся щели (относительная к плоскости предмета) составляла около $0,3 \mu$. Освещение пластины производилось через щелевую диафрагму, параллельную следу, который затем „просматривался“ узкой параллельной щелью (см. схему b'). Поперечный масштаб фотометрических кривых приблизительно в 4 раза превышает аналогичный масштаб следов, изображенных на микроснимках.



Фото 27. Фотометрирование следов.

Фотограмма следа тяжелого ядра, полученная при помощи узкой длинной щели (см. фото 26). Отчетливо видны „крылья“ основного максимума, обусловленные δ -электронами.

van Rossum, Nuovo Cimento, Suppl., 11, 212 (1954).

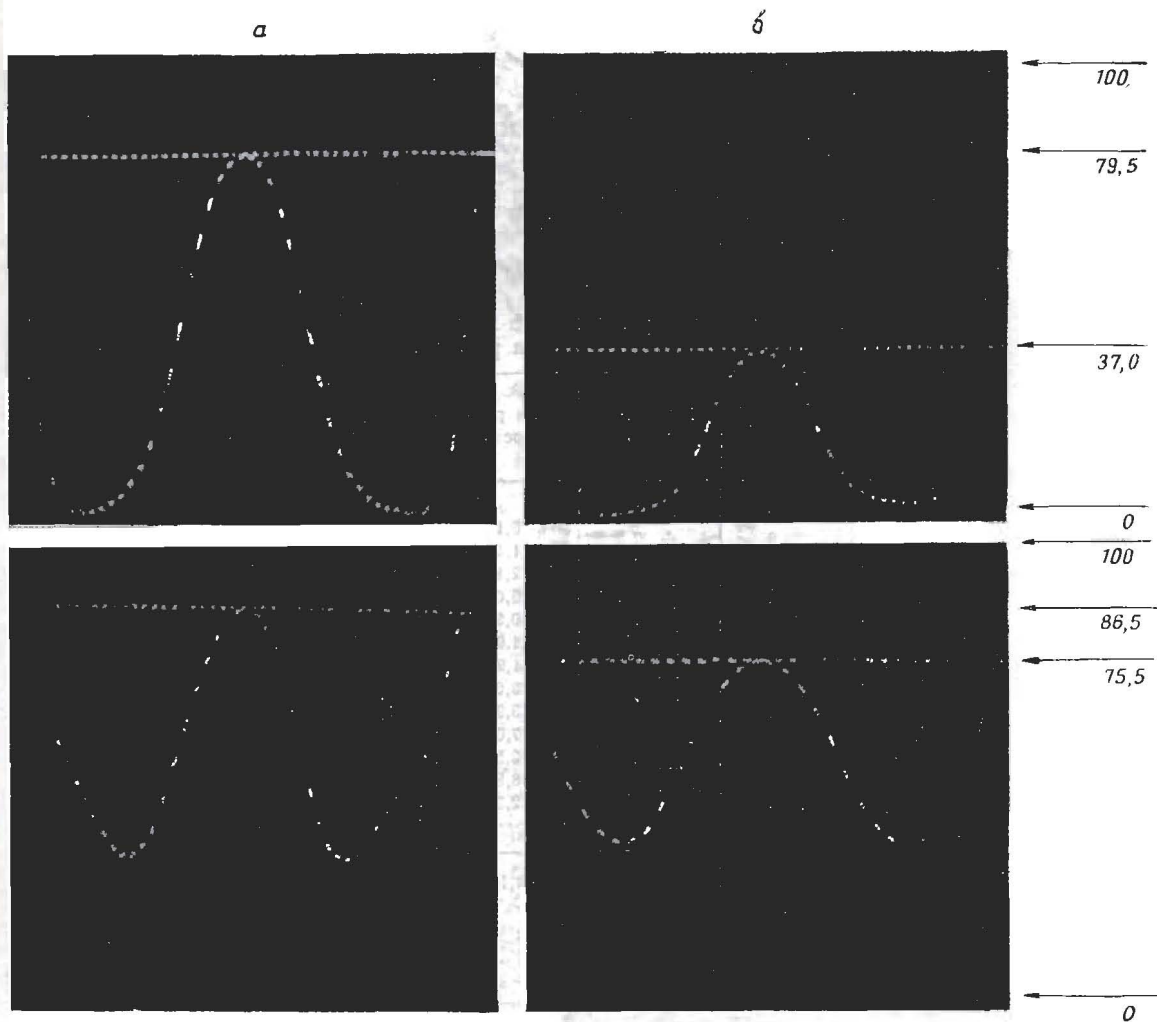


Фото 28. Фотометрирование следов.

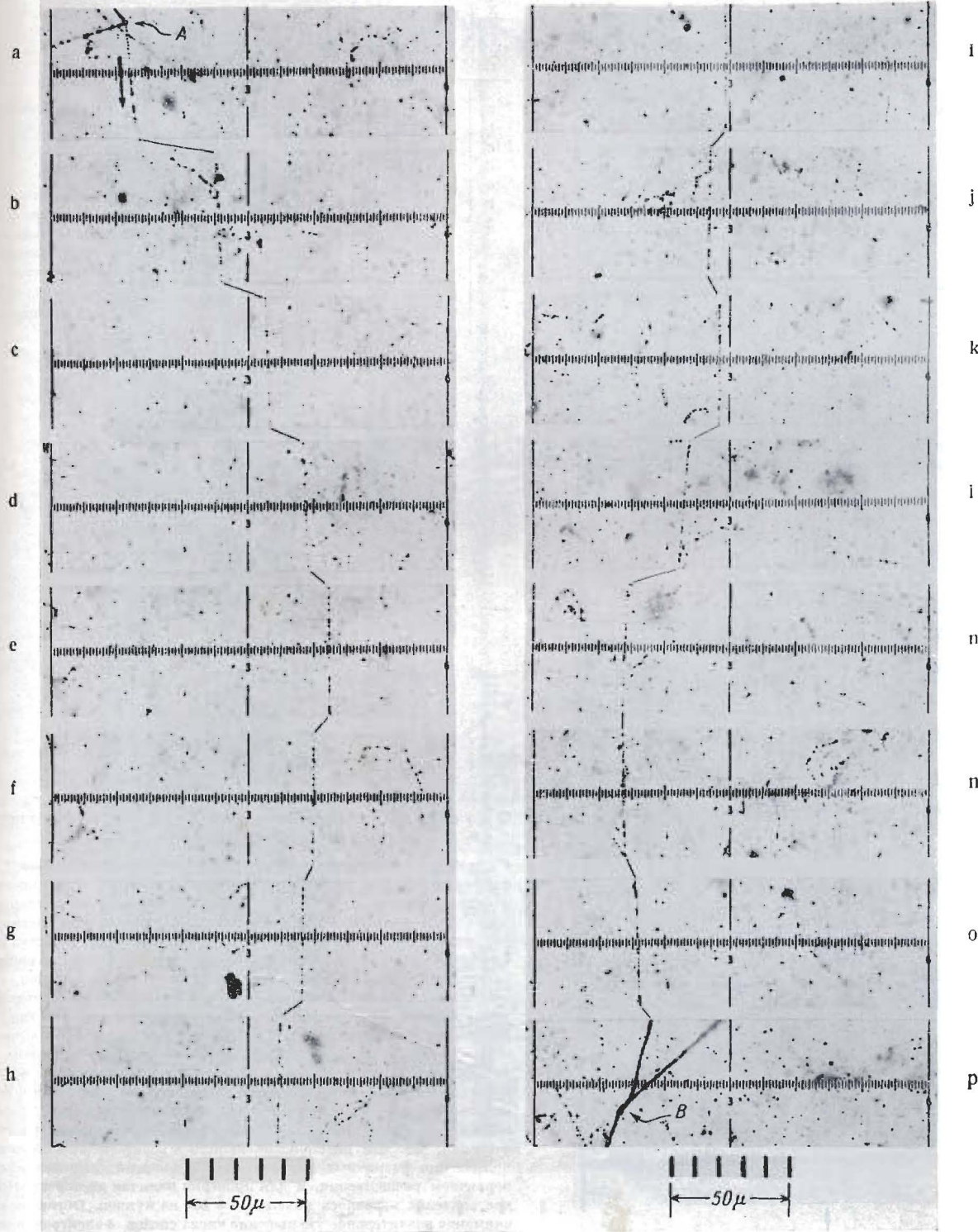
Эффект ограничения освещаемой площади. Измерения выполнены на следах двух протонов с одинаковой плотностью зерен около конца пробега: *a* — вблизи поверхности эмульсии; *б* — вблизи стекла. Измерения были сделаны с круглой (вверху) и со щелевидной (внизу) полевой диафрагмой. Отчетливо заметна большая потеря контраста, связанная с рассеянием света в эмульсии при использовании круглой полевой диафрагмы. Числа, приведенные с правой стороны снимков, дают величину затемнения, создаваемого следом, выраженную в процентах от полного затемнения.

При обычном методе освещения в измеренное значение затемнения, создаваемого следом, расположенным в нижнем слое эмульсии, должна быть внесена поправка на потерю контраста, которая в этом случае составляет 114%. При освещении через щель (шириной около 1μ) соответствующая поправка составляет всего около 15%.

van Rossum, Nuovo Cimento, Suppl., 11, 212 (1954).

Фото 29. Наблюдения над рассеянием π -мезона. Эмульсия Ильфорд G5 (неопубликованная работа).

Отсчеты	Координата точки пересечения	1-я разность	2-я разность	
a	12,2	+ 13,4	6,1	1 деление шкалы = 2,75 μ $S = 500 \mu$ Среднее угловое отклонение на 500 $\mu = \frac{3,78 \times 2,75}{500} \text{ рад} =$ $= \frac{3,78 \times 2,75 \times 57,4}{500} \text{ град} =$ $= 1,19^\circ$ $\bar{\sigma}_{100\mu} = \frac{1,19^\circ}{\sqrt{5}} = 0,57^\circ$ $\bar{D} = 3,78$ деления шкалы
b	25,6	+ 7,3	1,4	
c	32,9	+ 5,9	2,4	
d	38,8	+ 3,5	6,0	
e	42,3	- 2,5	0,9	
f	39,8	- 1,6	1,9	
g	38,2	- 3,5	1,9	
h	34,7	- 5,4	3,0	
i	29,3	- 2,4	3,9	
j	26,9	+ 1,5	7,0	
k	28,4	- 5,5	3,5	
l	22,9	- 9,0	8,8	
m	13,9	- 0,2	2,3	
n	13,7	+ 2,1		
o	15,8			
			Всего 49,1	



← 50μ →
| | | | |

Фото 30. Наблюдения над рассеянием быстрой α-частицы
Эмульсия Ильффорд G5.

Отсчеты	Координата точки пересечения	1-я разность	2-я разность	
a	24,2	— 0,4		$\bar{\alpha}_{100\mu} = \frac{0,18 \times 2,75 \times 57,4}{1000 \sqrt{10}} = 0,009^\circ$ <p>При $K = 26$ это соответствует энергии ~ 7 Бэ. Более обширные измерения, выполненные на большем отрезке следа, дали значение ~ 10 Бэ. $\bar{D} = 0,18$ деления шкалы.</p>
b	24,6	— 0,1	— 0,3	
c	24,7	+ 0,2	— 0,3	
d	24,5	+ 0,2	0	
e	24,3	+ 0,4	— 0,2	
f	23,9	+ 0,5	— 0,1	
g	23,4			
		Всего	0,9 деления шкалы	

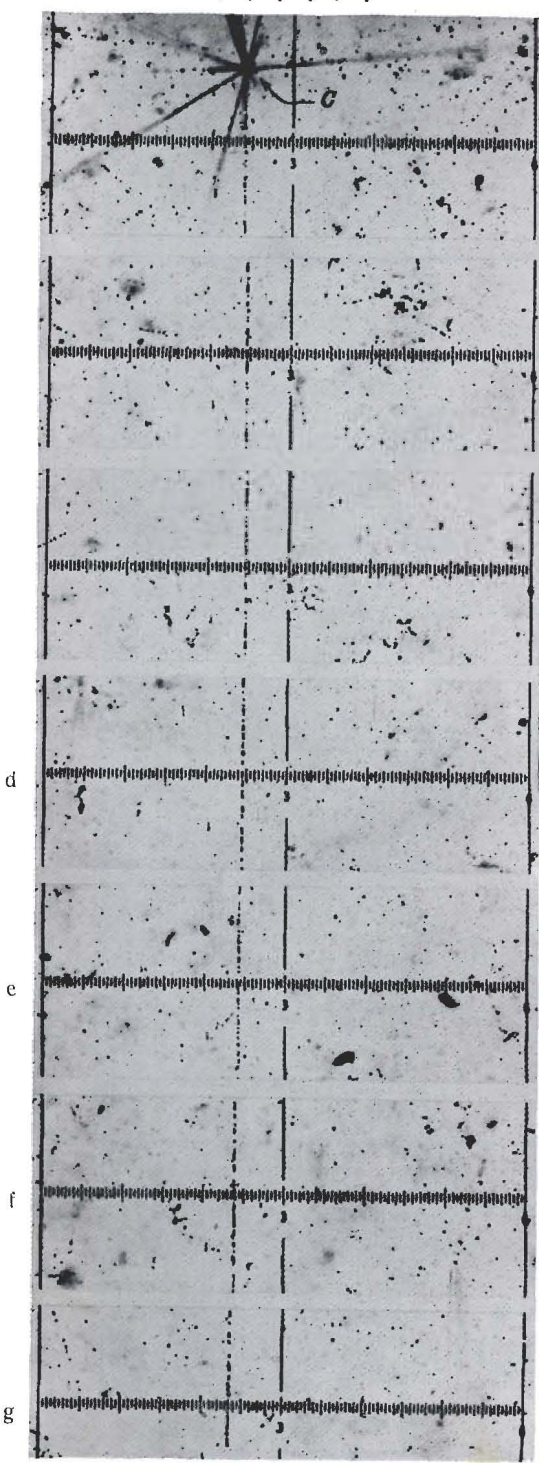
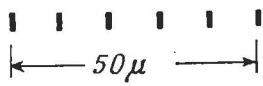
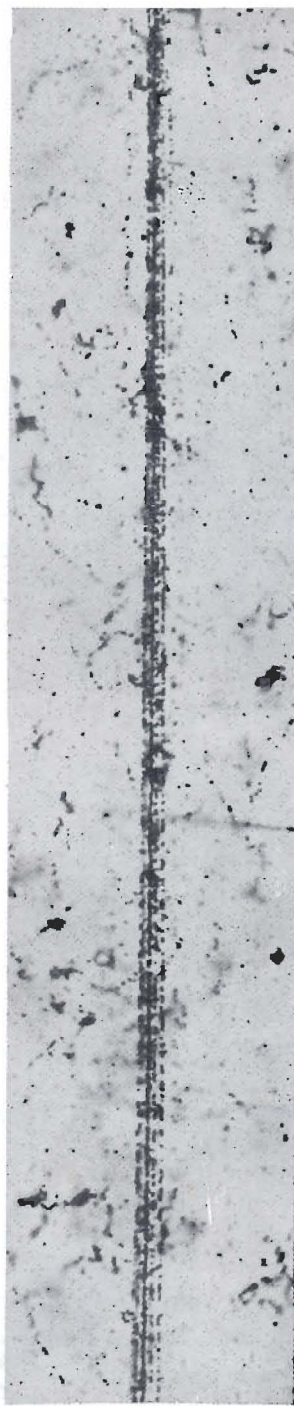
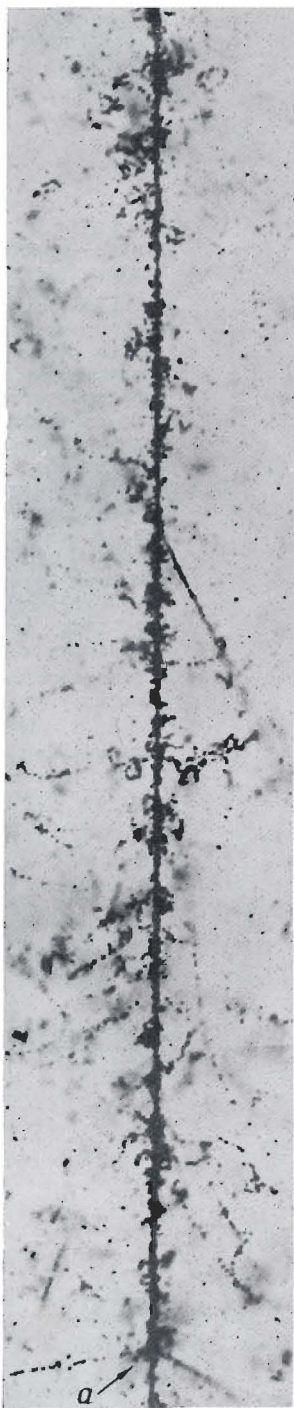


Фото 30

Фото 31. Фрагментация тяжелого ядра при столкновении.
Эмульсия Ильффорд G5.

На трех перекрывающихся фотографиях показано „скользящее“ столкновение ядра с $Z \sim 20$ (кальций) с ядром эмульсии, происшедшее в точке a (низ левого и верх среднего снимков). В результате столкновения появилось около 20 быстрых однократно заряженных частиц вместе со „струей“, состоящей из 4 или 5 релятивистских α -частиц и более тяжелого осколка. До того как перечисленные частицы разошлись на расстоянии, допускающие идентификацию отдельных следов, одна из них вызвала расщепление ядра серебра или брома, в результате которого образовалась отчетливо видимая звезда (точка b). Тщательное исследование показало, что расщепление в точке b было вызвано, по всей вероятности, α -частицей, а не более тяжелым осколком. После расщепления в точке b остальные частицы, возникшие в результате первого столкновения в точке a , разошлись на достаточно большие расстояния, что позволило идентифицировать их следы. Было установлено, что они принадлежат одному ядру кислорода и четырем α -частицам. Все эти пять следов являлись великолепным объектом для применения различных методов оценки энергии, выделившейся при первичном расщеплении, и для проверки наличия дисторсии. Полученное значение оказалось равным ~ 8 Бэ на нуклон. Обращает на себя внимание значительное уменьшение числа следов δ -электронов, связанных с неразрешенным участком „струи“ вторичных частиц (непосредственно за точкой a) по сравнению с числом δ -электронов на следе первичной частицы. Между тем суммарный заряд вторичных частиц не меньше заряда первичной частицы. Это явление служит хорошей иллюстрацией того, что величина N_δ пропорциональна Z^2 .

Dainton, Fowler, unpublished work.



Φ Ο Τ Ο 31

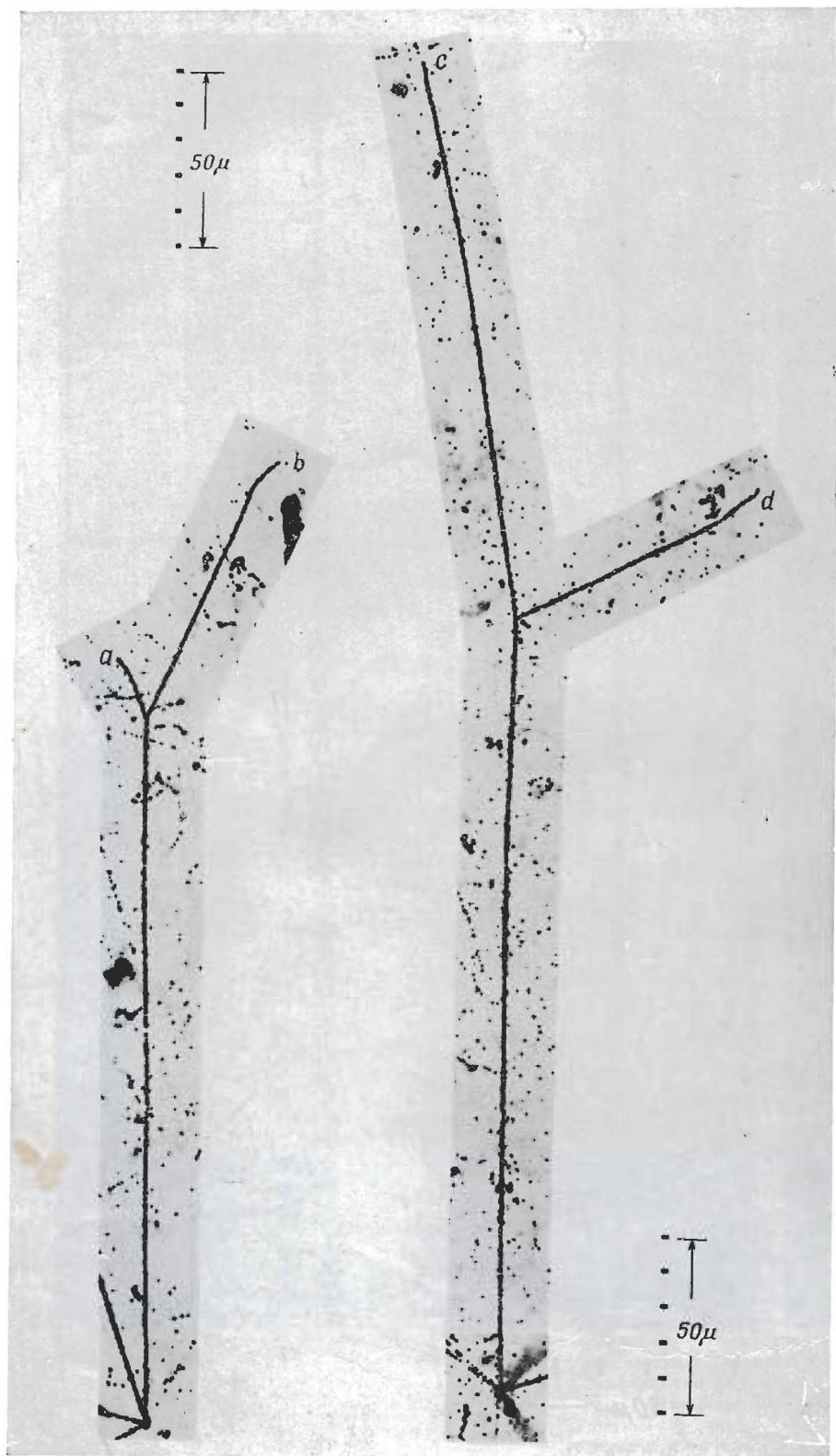


Фото 32. Столкновения тритон—протон и α -частица—протон. Эмульсия Иلفорд G5.

Слева изображено столкновение с протоном тритона, образовавшееся в результате ядерного расщепления. След *a* принадлежит рассеянному тритону, след *b* — протону отдачи. Интерпретация взаимодействия может быть выполнена из определений остаточных пробегов частиц после столкновения и начальных направлений их движения по отношению к первичной частице. Указанные измерения позволяют вычислить энергии и импульсы частиц. Характер взаимодействия устанавливается на основании законов сохранения.

Справа изображено столкновение α -частицы (след *c*) с протоном (след *d*).

Бристольская группа, неопубликованная работа.

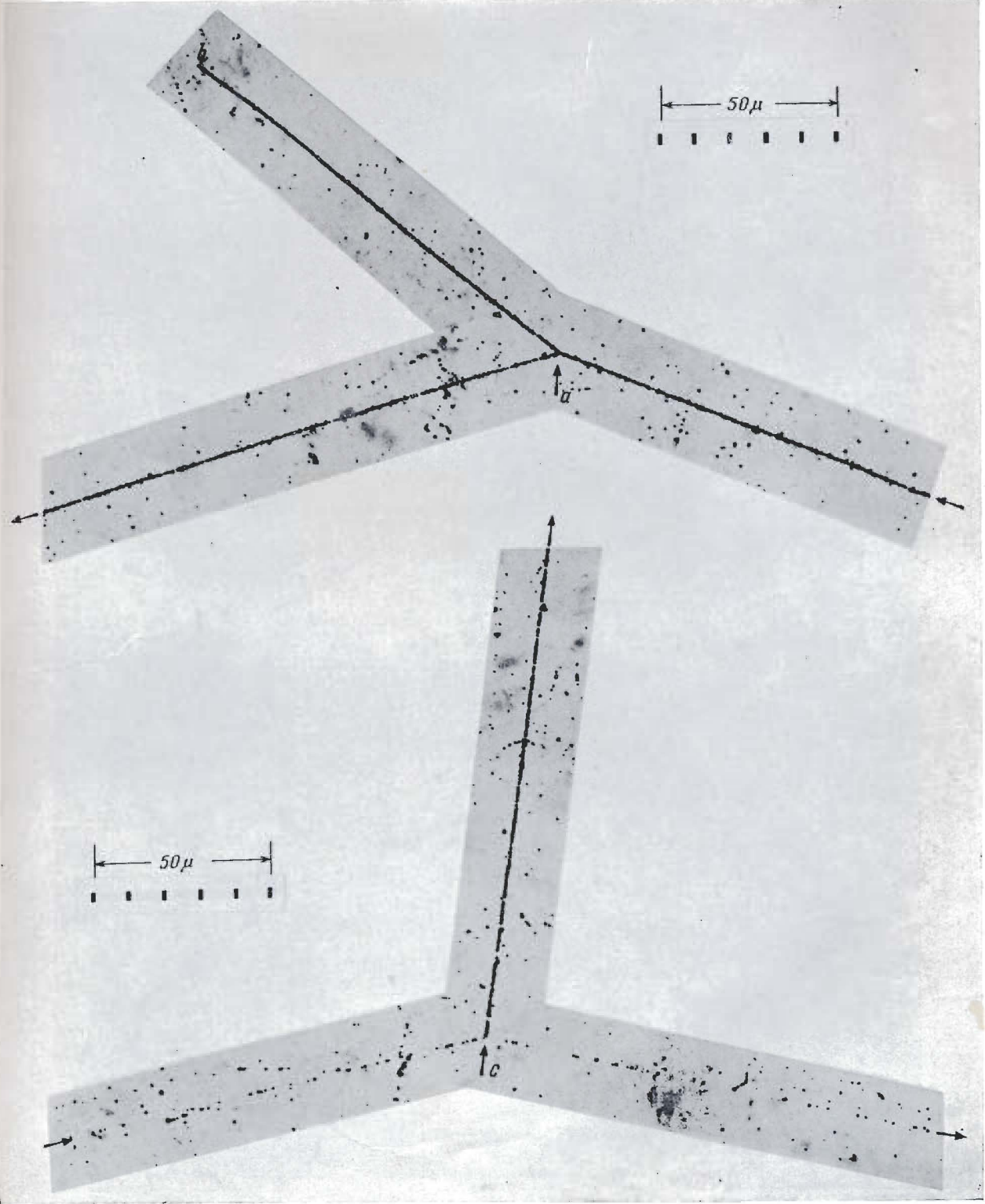


Фото 33. Упругие соударения с протонами. Эмульсия Ильфод Г5.

Вверху изображено столкновение дейтрона с протоном в точке a ; след b принадлежит протону отдачи.
Внизу показано столкновение быстрого π -мезона с протоном.

Бристольская группа, неопубликованная работа.



Фото 34. Следы электронов малой энергии в электронно-чувствительной эмульсии Кодак NT4. Частицы испытывают сильное рассеяние вследствие их малой массы. Вблизи самого конца пробега ионизирующая способность повышается и частицы дают в этой области следы с большой плотностью зерен. Подобный эффект бывает хорошо заметен на снимках (см. также фото 35).

Ноорег, King, неопубликованная работа, 1950 г.



Фото 35. Следы электронов малой энергии в электронно-чувствительной эмульсии Кодак NT4.

Пара электронов с низкими энергиями возникла, по всей вероятности, в точке, расположенной в левом нижнем углу снимка. Быстрое изменение рассеяния и плотности зерен вдоль следов представляет явный контраст со следами μ -мезонов. Частицы с промежуточными значениями масс неизвестны. Если электронно-позитронная пара действительно рождена фотоном в кулоновском поле ядра, то энергия этого кванта должна составлять около 1,5 Мэв.

King D. T., неопубликованная работа, 1950 г.

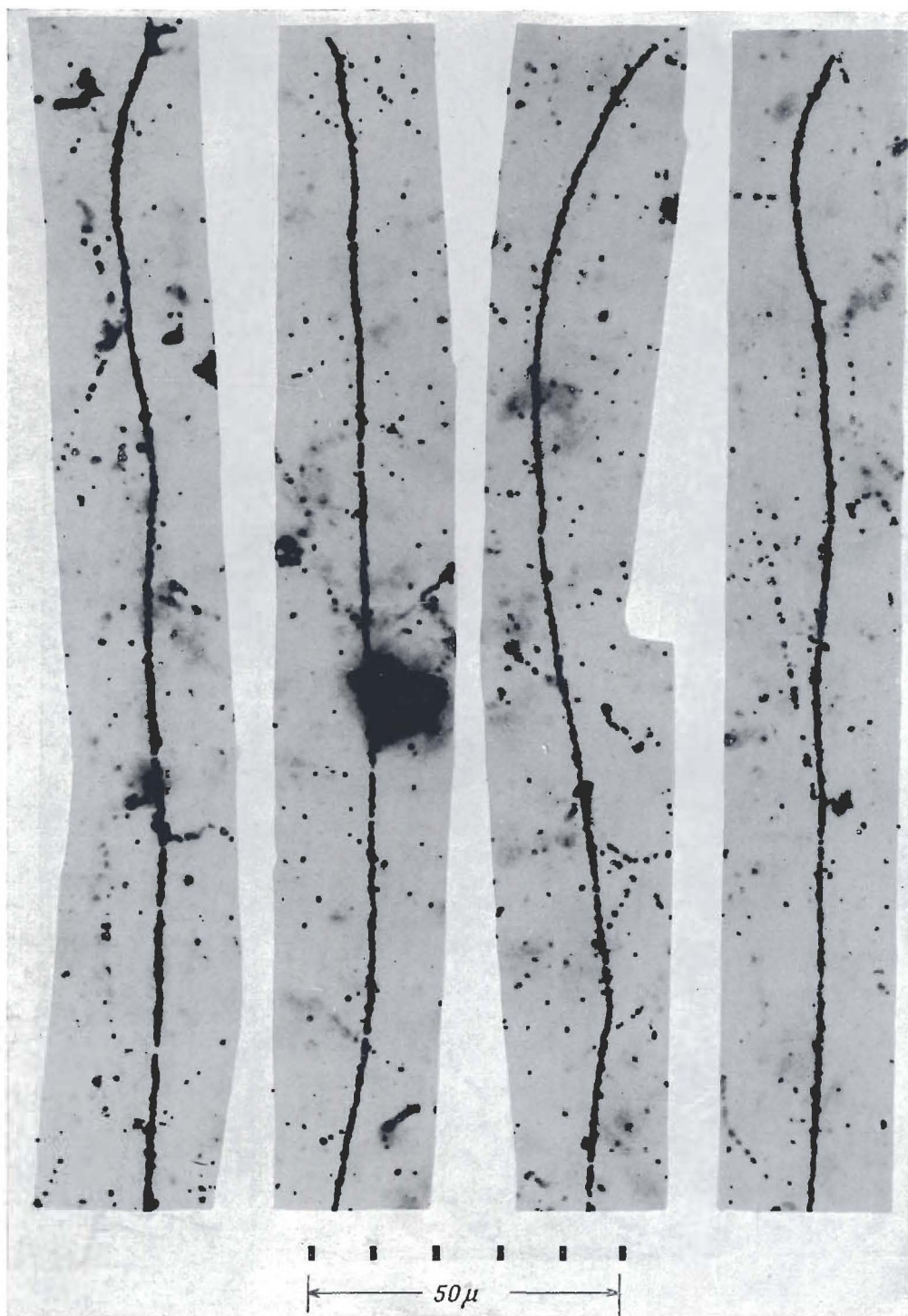


Фото 36. Следы μ -мезонов в конце пробега. Эмульсия Ильфорд G5.

Эти μ -мезоны были идентифицированы путем измерения масс (стр. 115), а также по наличию следов быстрых электронов, появляющихся в конце пробега [следы (б) и (г); см. также фото 59].

Ярко выраженное рассеяние частиц по сравнению с протонами позволяет с высокой степенью эффективности отличать их следы по внешнему виду. Потери энергии изменялись от $7 \text{ кэВ}/\mu$ (в той точке, где след входит в поле зрения) до $25 \text{ кэВ}/\mu$ (на расстоянии 10μ от конца пробега); при этом, однако, не возникало заметного изменения плотности зерен вдоль следа. Вместе с тем большие отклонения, обусловленные рассеянием, встречаются более часто по мере приближения к концу пробега.



Фото 37. Следы π -мезонов в конце пробега. Эмульсия Ильфорт G5.

Короткие следы π - и μ -мезонов не отличаются друг от друга по внешнему виду, однако явления на концах пробегов обычно достаточно для идентификации. Вместе с тем имеют место случаи, когда в конце пробега как π^- , так и μ^- -мезона не возникает никаких вторичных частиц (стр. 114).

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.



Фото 38. Следы K -мезонов в конце пробега. Эмульсии Ильфورد G5 и Кодак NT4.

K -мезоны, распадающиеся по типу τ , были идентифицированы путем установления компланарности следов трех вторичных частиц (см. также фото 81—85). След, изображенный на правом снимке, уходит в глубь эмульсии под большим углом, вследствие чего наблюдается некоторое увеличение его толщины (см. стр. 88).

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.



Фото 39. Следы K -мезонов в конце пробега. Эмульсия Ильфورد G5.

K -мезоны с различными типами распада были идентифицированы путем измерения энергии вторичных частиц, а также путем непосредственного определения масс при помощи метода $(\bar{\alpha}, R)$ (стр. 118).

Опытный микроскопист может отличить с высокой степенью эффективности следы K -мезонов от следов μ -мезонов.

Menon, O'Scailaigh, неопубликованная работа, 1952 г.



Фото 40. $\pi \rightarrow \mu \rightarrow \beta$ -распад в мелкозернистой эмульсии Демерса.

Распад π -мезона произошел в точке А (см. нижнюю часть левого снимка); на четырех следующих полосках показан след образовавшегося μ -мезона. Распад μ -мезона (в точке В) и след возникшего электрона изображены на двух правых полосках.

Плотность зерен на следе электрона составляет около 12 на 100 μ .

De m e r s.



Фото 41. Следы протонов в конце пробега. Эмульсия Ильффорд G5.

Из сравнения следов, изображенных на фото 40—42, видно медленное изменение рассеяния в зависимости от массы. При длине следа $\sim 200 \mu$ нельзя с уверенностью отличить след K -мезона от следа дейтрона. Применение метода постоянной стрелы прогиба для измерения рассеяния увеличивает вероятность идентификации частиц с различными массами. Подобные измерения сыграли важную роль в открытии заряженных гиперонов, поскольку необходимо было отличить их от K -мезонов, дававших внешне сходные явления в конце пробега. Как видно из приведенных снимков, зерна на следах слиты настолько сильно, что нельзя заметить никакого изменения плотности зерен вдоль отдельного следа. Это же замечание справедливо и для следов тритонов и α -частиц (см. фото 43 и 44).

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.



Фото 42. Следы дейтронов в конце пробега. Эмульсия Иильфорд G5.

Дейтроны были идентифицированы путем определения массы на очень длинных следах. Вследствие малого рассеяния протонов и дейтронов визуальная дискриминация их следов невозможна.

Брисгольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.



Фото 43. Следы тритонов в конце пробега. Эмульсия Ильфорт G5.

Из приведенных снимков следует, что на последних 200 μ пробега следы тритонов нельзя отличить от следов α -частиц по плотности зерен или рассеянию. Однако на следах тритонов обычно наблюдаются значительно меньшие отклонения вследствие рассеяния, чем на следах K -частиц и протонов.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.

Фото 44. Следы α -частиц в конце пробега. Эмульсия Ильффорд G5.

α -частицы с большими энергиями были идентифицированы путем измерения рассеяния и плотности δ -электронов на следах, случайно остановившихся в эмульсии. Потери энергии dE/dR изменились от 70 кэв/м для точки следа, которой соответствовал пробег $\sim 200 \mu$, до 200 кэв/м для точки, отстоящей приблизительно на 10 μ от конца пробега. В электронно-чувствительных эмульсионных следах ядер водорода трудно отличить от следов α -частиц, чем в эмульсии Ильффорд G2.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.

Фото 45. Следы ядер углерода и азота в конце пробега. Эмульсия Ильффорд G5.

На снимках показано по два участка каждого следа, совпадающих в точках, обозначенных буквой x или y . Частицы, которым принадлежат следы, изображенные на фото 45—49, были идентифицированы при помощи методов, описанных в гл. 16, причем соответствующие измерения производились только на очень длинных следах, оканчивающихся в стопке. При остаточных пробегах, превышающих 40 μ , ядра углерода и азота являются полностью ионизируемыми. Можно заметить, что сужающийся след ядра углерода обрывается прежде, чем его ширина становится равной ширине следа ядра азота в самом конце пробега. Последнее объясняется, по всей вероятности, столкновением с ядром.

Dainton, Fowler, неопубликованная работа.

Фото 46. Следы ядер с зарядами $Z = 10$ и $Z = 11$ или 12 в конце пробега. Эмульсия Ильффорд G5.

Сравнение фото 45 и 46 показывает, что необходимо соблюдать большую осторожность при попытках идентификации тяжелых частиц в том случае, если длина их следов не превышает 200 μ .

Рассматриваемые ядра начинают захватывать электроны, когда их остаточный пробег становится менее 10 μ .

Dainton, Fowler, неопубликованная работа.

Фото 47 и 48. Последние 2 мм следа ядра с зарядом $Z \sim 18$, приближающегося к концу пробега. Эмульсия Ильффорд G5.

След, начинающийся в верхней части левого снимка, показан в виде десяти перекрывающихся полосок. Точки, в которых они смыкаются, могут быть легко обнаружены на последовательных фотографиях. На первых семи фотографиях можно заметить увеличение толщины „ствола“ и уменьшение максимального пробега δ -электронов, соответствующее убыванию скорости частицы; в дальнейшем происходит сужение следа по мере приближения к концу пробега (точка e). Между 7-й и 8-й полосками частица прошла через узкий воздушный зазор между эмульсиями. Когда частица проникает через поверхность обеих эмульсий, то в последних регистрируется только часть δ -электронов, вследствие чего след в этой области кажется более тонким. Следы аналогичных частиц, движущихся с релятивистскими скоростями, показаны на фото 172 и 176.

Powell, Report in Progress of Physics, XIII, 1950, p. 350.

Фото 49. Следы частиц с зарядами $Z = 14 \pm 1$ и $Z = 24 \pm 2$, приближающихся к концу пробега. Эмульсия Ильффорд G5.

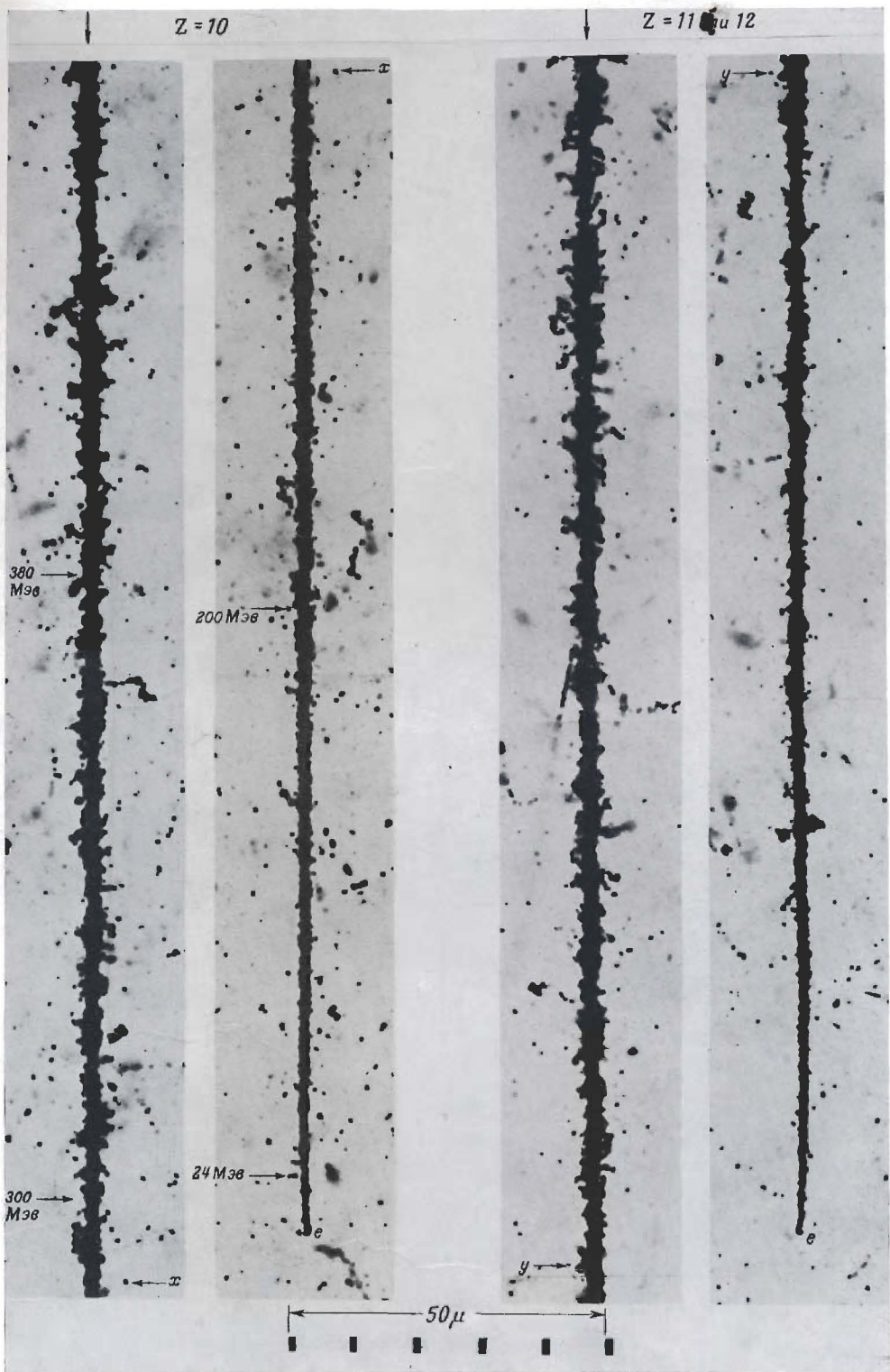
В случае тяжелого ядра с $Z = 22$ захват электронов на K -орбиту становится возможным при остаточном пробеге 80 μ , а на L -орбиту — при пробеге 15 μ . Перезарядка и связанное с этим уменьшение эффективного заряда подобного ядра увеличивает его пробег примерно на 40 μ .

Dainton, Fowler, неопубликованная работа.



50μ





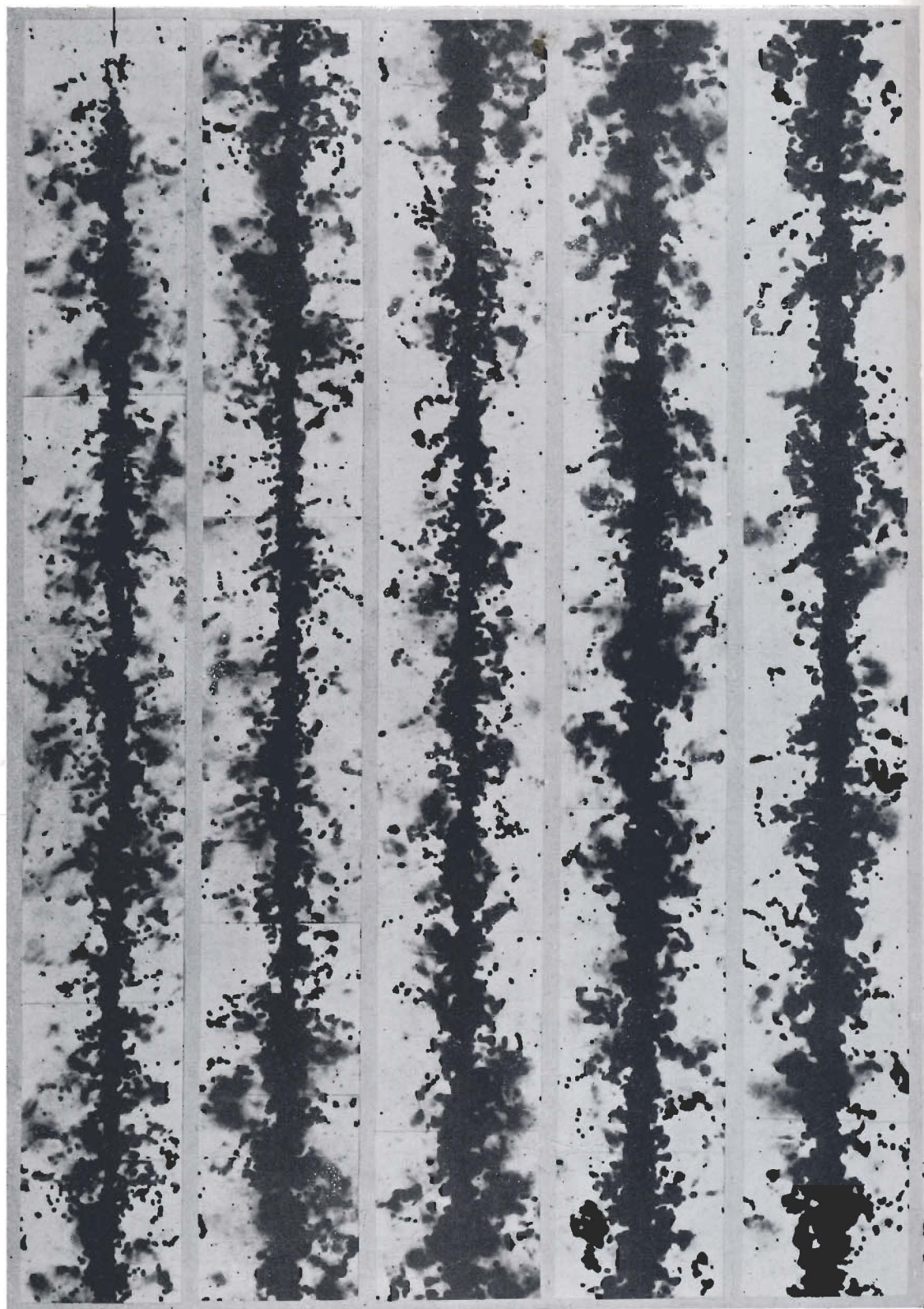
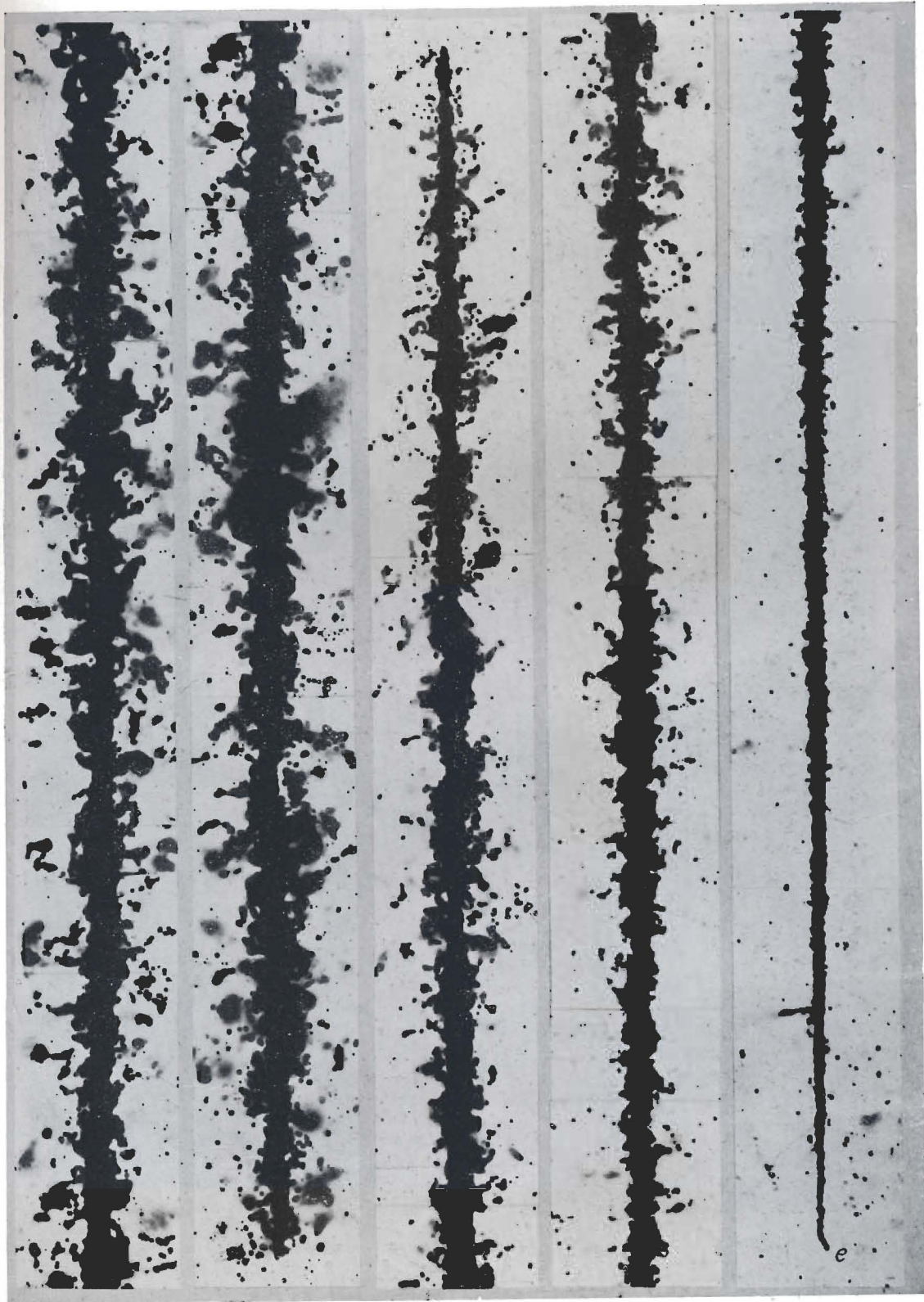
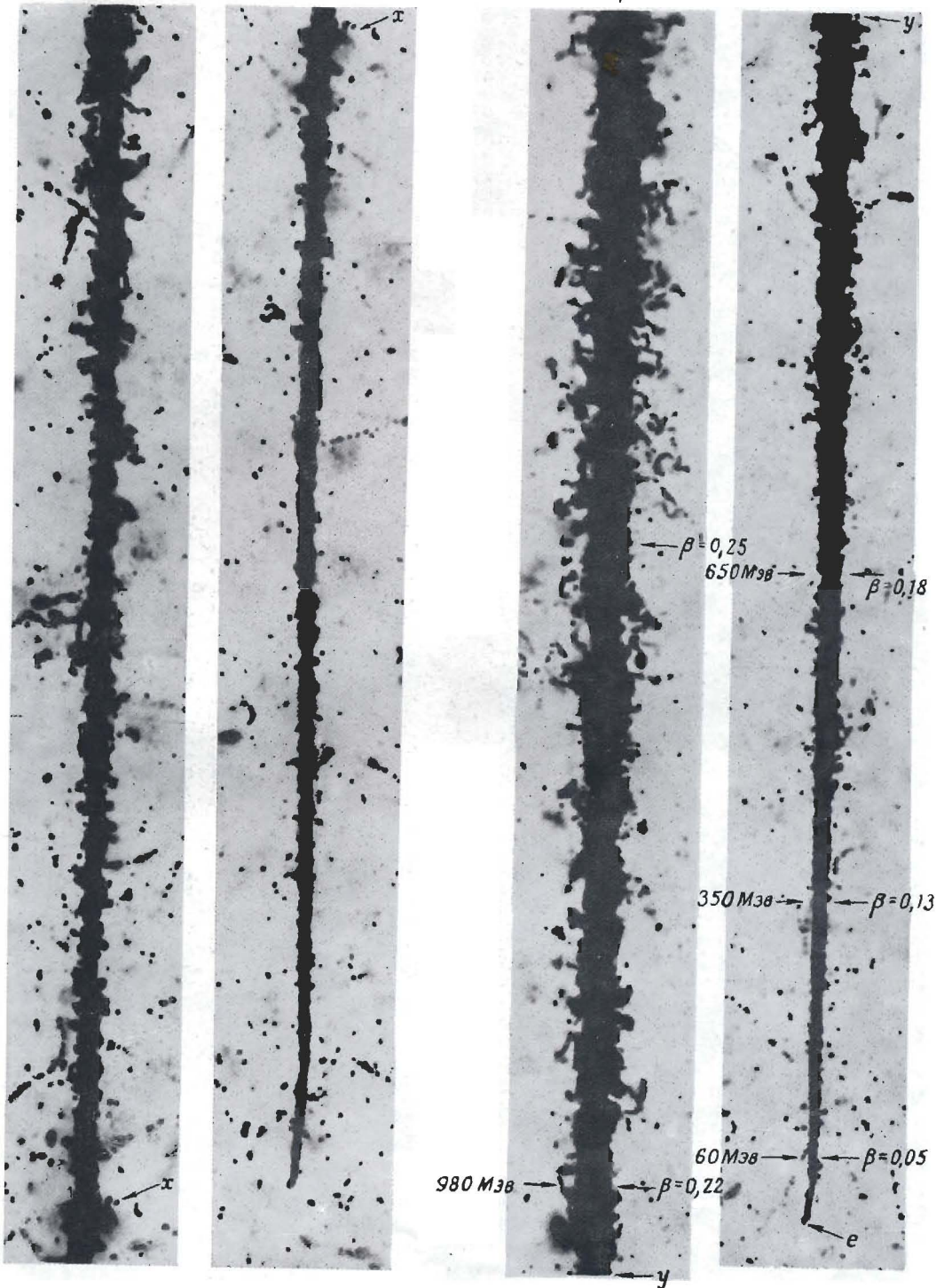


Фото 47



$Z = 14 \pm 1$

$Z = 24 \pm 2$



50μ

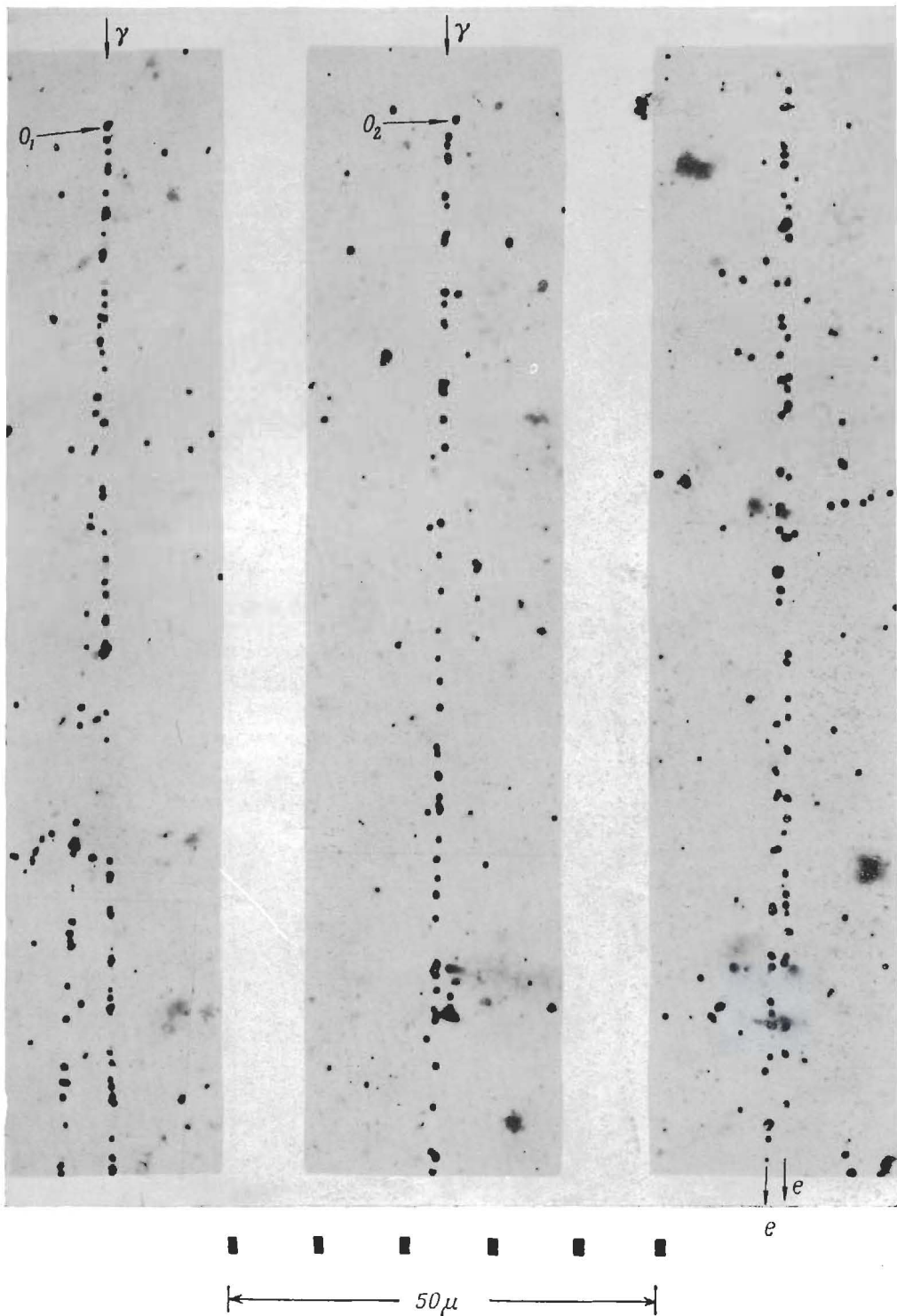


Фото 50. Образование пар γ -квантами. Эмульсия Ильфод G5.

На снимках изображены два случая образования пар γ -квантами в кулоновском поле ядер. Первые различные зерна следов частиц пар находятся в точках O_1 и O_2 . Пара, возникшая в точке O_2 , показана на двух снимках. На первом из них следы не разделяются; на втором (правом) снимке можно заметить два разделившихся следа. Углы расхождения пар, образованных γ -квантами с заданной энергией, могут колебаться в широких пределах и поэтому в каждом отдельном случае дают лишь весьма приблизительное представление об энергии кванта. Расхождение следов пары обусловлено не только разницей между начальными направлениями частиц, но также их рассеянием.

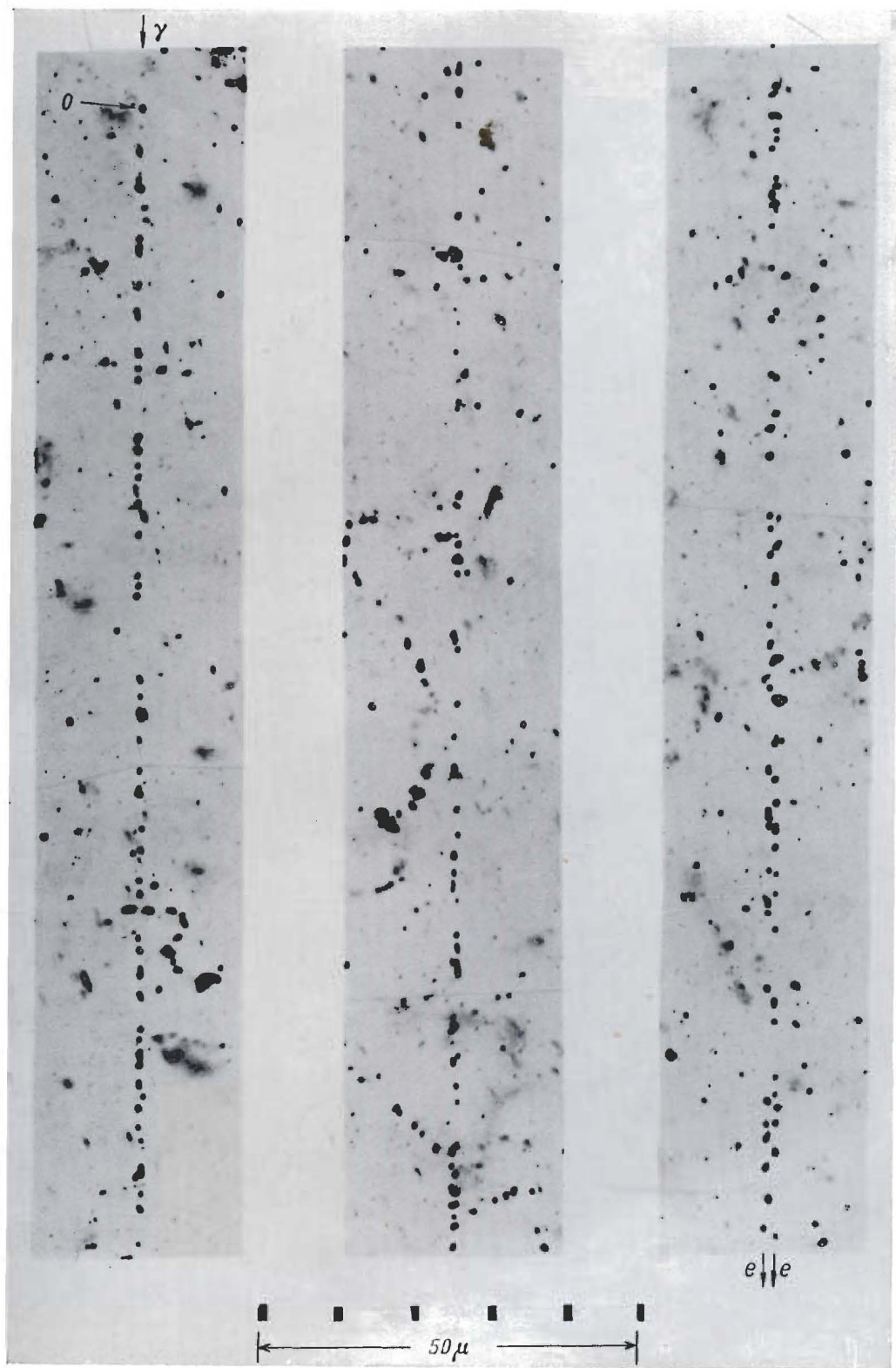


Фото 51. Образование пары γ -квантом. Эмульсия Ильфорд G5.

На трех последовательных снимках показаны следы электрона и позитрона, причем первое зерно находится в точке O . Разделение следов заметно только на последнем (правом) снимке. Неразделенные следы подобных пар были впервые идентифицированы на основании того факта, что след, казавшийся единичным, обладал плотностью зерен, приблизительно вдвое превышающей минимальное значение. В то же время рассеяние было настолько малым, что соответствующая частица безусловно должна была двигаться со скоростью, близкой к скорости света. Если приписать подобный след одной частице, то возникает затруднение, заключающееся в том, что минимальная ионизация частицы с $Z = 2$ в 4 раза превышает соответствующее значение для частицы с $Z = 1$. Поэтому такое предположение привело бы к заключению, что частица обладает немалым зарядом. Если же допустить, что след принадлежит паре, то подобное затруднение легко устраняется.

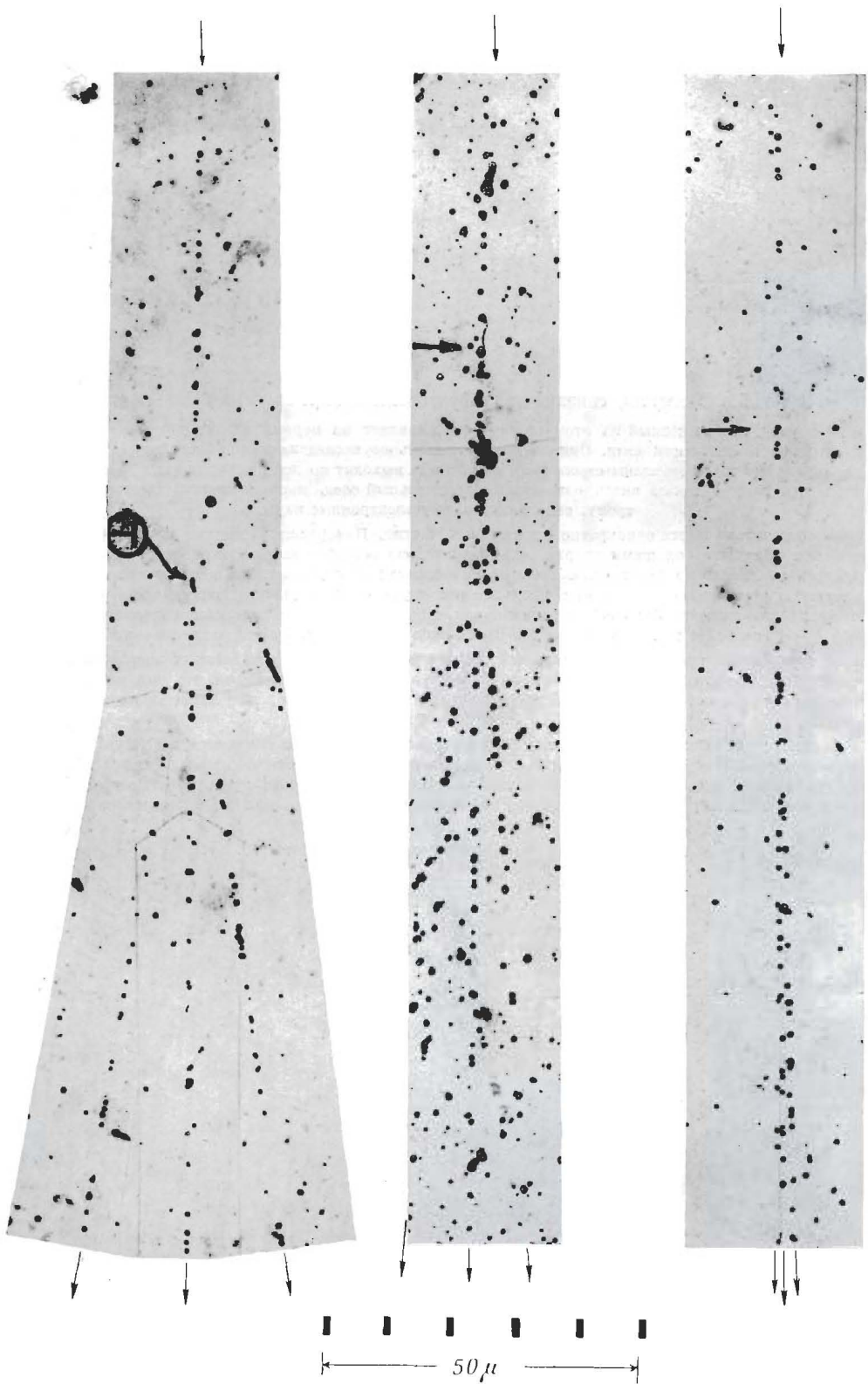


Фото 52. Образование „тройников” электронами. Эмульсия Ильффорд G5.

На снимках стрелками обозначены следы первичных электронов и точки рождения пар. Все три случая соответствуют сравнительно низким энергиям, вследствие чего углы расхождения следов оказываются достаточно большими. В этих условиях представляется весьма маловероятным, чтобы рассматриваемые пары были образованы квантом тормозного излучения в точках, лежащих строго на траектории первичного электрона.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.

Фото 53. Явления, связанные с образованием пар. Эмульсия Ильффорд G5.

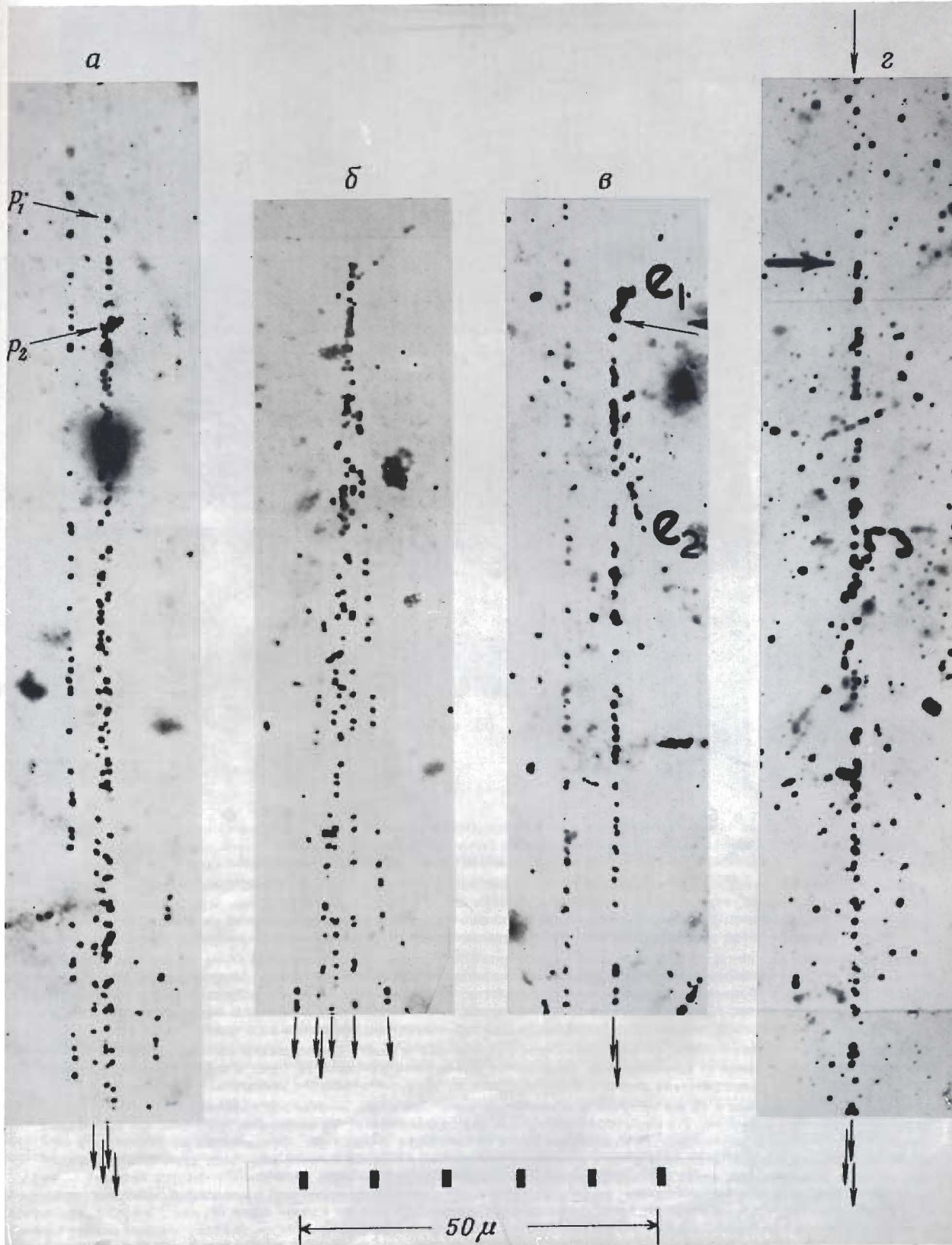
a — случай, изображенный на этом снимке, представляет на первый взгляд рождение четырех электронов в единичном акте. Однако более тщательное исследование показало, что существуют две отдельные точки (указаны стрелками), из которых выходит по два расходящихся электронных следа. На снимке также виден одиночный параллельный след, принадлежащий быстрому электрону, сопровождающему электронные пары.

b — образование шести однократно заряженных частиц. Измерения рассеяния частиц показали, что они обладают большими энергиями. Сравнительно большое расхождение следов при данной энергии указывает на то, что эти частицы не являются электронами. Это подтверждается также отсутствием их размножения при прохождении через стопку. Данный случай был приписан столкновению нейтрона большой энергии с ядром, сопровождавшемуся появлением мезонов или других более тяжелых частиц без каких-либо признаков ядерного расщепления.

в — образование пары γ -квантом, сопровождаемое испусканием двух медленных электронов, появляющихся, по-видимому, из одного и того же центра. Можно предположить, что они выходят из того же атома, в котором произошла конверсия γ -кванта, вероятно, вследствие ионизации или эффекта Оже.

г — следы пары возникли в точке, отмеченной стрелкой, и вначале они сливаются со следом первичного электрона. Направления движения всех частиц настолько близки, что их следы не разделяются на протяжении нескольких сотен микрон. В подобных случаях нельзя с уверенностью установить, имело ли место образование пары γ -квантом тормозного излучения или же наблюдалось возникновение „тройника“.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.



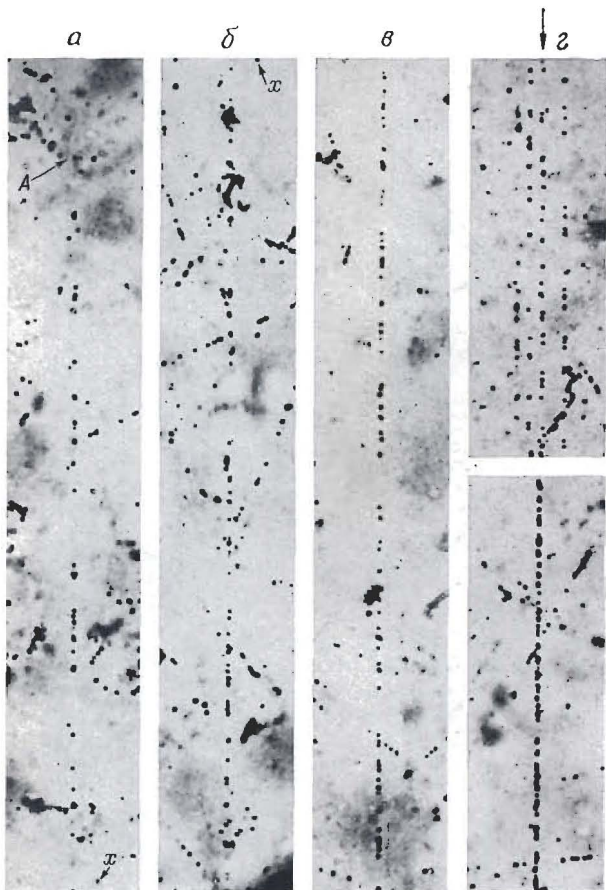


Фото 54

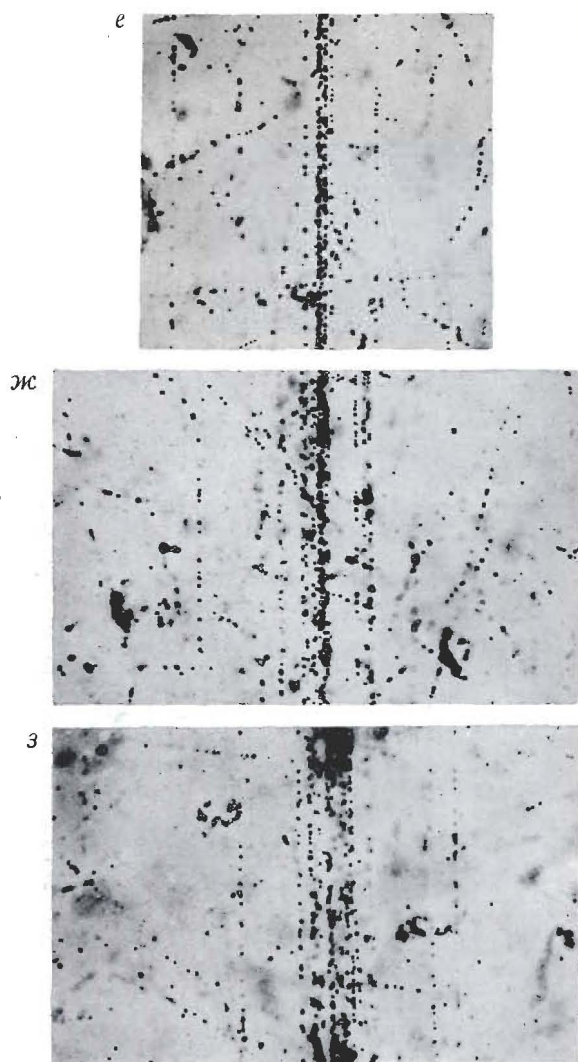


Фото 55

Фото 54 — 56. Электромагнитный каскад в эмульсии.

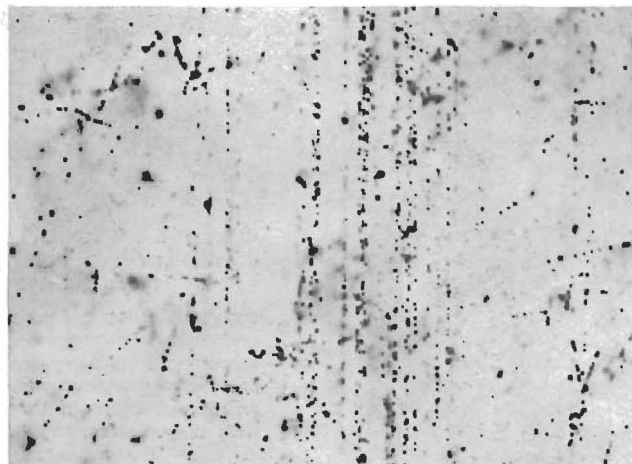
γ -квант с энергией порядка 10^3 Бэв, который вошел через контейнер в эмульсионную стопку и, по-видимому, не сопровождался другими частицами, образовал электронно-позитронную пару, пройдя в эмульсии 5 мм; первое зерно возникших следов находится в точке А. Угол расхождения пары настолько мал, а многократное рассеяние ее компонент настолько ничтожно, что они не могли быть разделены визуально на пути, превышающем 30 мм (см. снимок б).

Следы, показанные на снимках а и б, являются продолжением друг друга; соответствующие зерна обозначены буквой х. Из снимков следует, что имеет место заметное возрастание плотности зерен на следе пары на отрезке длиной 0,5 мм — от области, находящейся вблизи точки возникновения, до участка, изображенного на снимке в. Действительно, число зерен на следе изменяется таким образом: полоска а — ~ 30 зерен, б — ~ 54 зерен, в — ~ 68 зерен, причем последнее значение соответствует величине $2g_p$, где g_p — значение ионизации на плато.

Описанный эффект объясняется тем, что расстояние между компонентами пары в точках, находящихся в пределах нескольких сотен микрон от места ее возникновения, оказывается весьма малым (меньше 10^{-7} см), и эти компоненты образуют тесный дублет (электрический диполь), вследствие чего их удельная ионизация значительно уменьшается.

На участке г, находящемся в 15 мм от точки возникновения первичной пары, появляется несколько пар, образованных фотонами тормозного излучения; эти пары обладают, однако, значительно меньшими энергиями, чем первичная (указана стрелкой). На участке д, расположенном примерно в 30 мм от начальной точки, пары, образованные ранее фотонами тормозного излучения, отходит настолько далеко в стороны, что исчезают из поля зрения; первичная пара сопровождается здесь второй, коллинеарной, парой с большой энергией. Последняя могла быть либо образована γ -квантом большой энергии, либо возникла вследствие появления „тройника“. Общий след, который выглядит как одиночный, обладает плотностью зерен около $4g_p$.

и



к

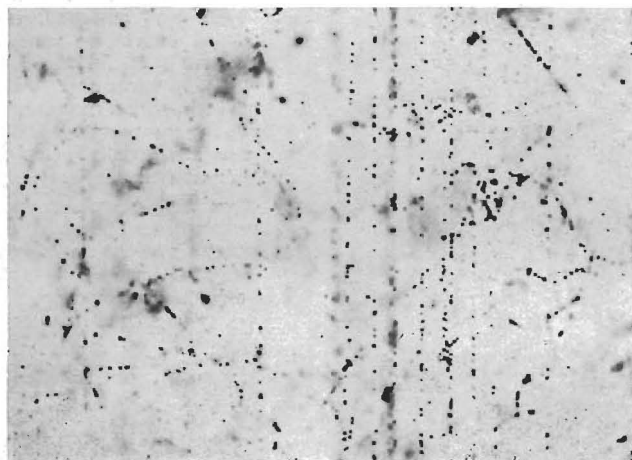


Фото 56

На участке *е*, находящемся в 40 мм от точки возникновения пары, наблюдается дальнейшее развитие каскада, в центральной части („ствол“) которого можно различить несколько отдельных пар. На участке *ж* (64 мм от начальной точки) „ствол“ все еще выделяется достаточно отчетливо, однако число следов, принадлежащих электронам и позитронам с более низкими энергиями, значительно возрастает. На участке *з* (78 мм от начальной точки) общее число электронов в каскаде, обладающих энергиями больше 200 Мэв, оказывается около 50.

На участках *и* и *к* (93 и 123 мм от начальной точки) имеет место значительное поперечное расхождение следов. На участке *и* количество следов достигает максимума; количество электронов с энергиями больше 200 Мэв составляет здесь около 100.

Полезно сравнить изображенный здесь каскад с тем, который показан на фото 162—164. На первый взгляд раннее развитие рассматриваемого каскада может навести на мысль, что энергии первичного кванта сравнима с той, которой обладал γ -квант и каскад, изображенный на фото 162. Действительно, в данном случае наблюдается сплошная неразделяющаяся центральная часть длиной около 30 мм (этот эффект сравним с тем, который имеет место на фото 162). Однако последующее развитие каскада отчетливо показывает, что он обладает более низкой энергией, поскольку полное число следов в стадии максимального развития оказывается значительно меньше (эта стадия наступает на расстоянии, равном всего лишь 10 см, т. е. 3—4 радиационным единицам).

Следует вообще заметить, что сохранение неразрешенной центральной части на длине в несколько сантиметров определенно указывает на то, что относительное рассеяние компонент пары является очень малым и, следовательно, они обладают энергией по меньшей мере порядка 300 Бэв. С другой стороны, расхождение следов может иметь место вследствие значительной потери энергии одной из частиц на испускание тормозного излучения вблизи точки рождения пары даже в том случае, если ее начальная энергия значительно превышает 10³ Бэв.

У каскадов, вызванных отдельными γ -квантами или электронами, вошедшими в эмульсию, не следует ожидать появления нескольких „стволов“, как это имеет место в случае, изображенном на фиг. 165. Действительно, рассматриваемый каскад обладает одним „стволом“, хотя время от времени рядом с ним возникают сопутствующие „стволы“, которые, однако, быстро рассеиваются вследствие более низкой энергии образующих их частиц. Пример подобного явления показан на снимке *е* фото 55, где правая компонента принадлежит паре, возникшей в эмульсии между полями зрения *д* и *е*.

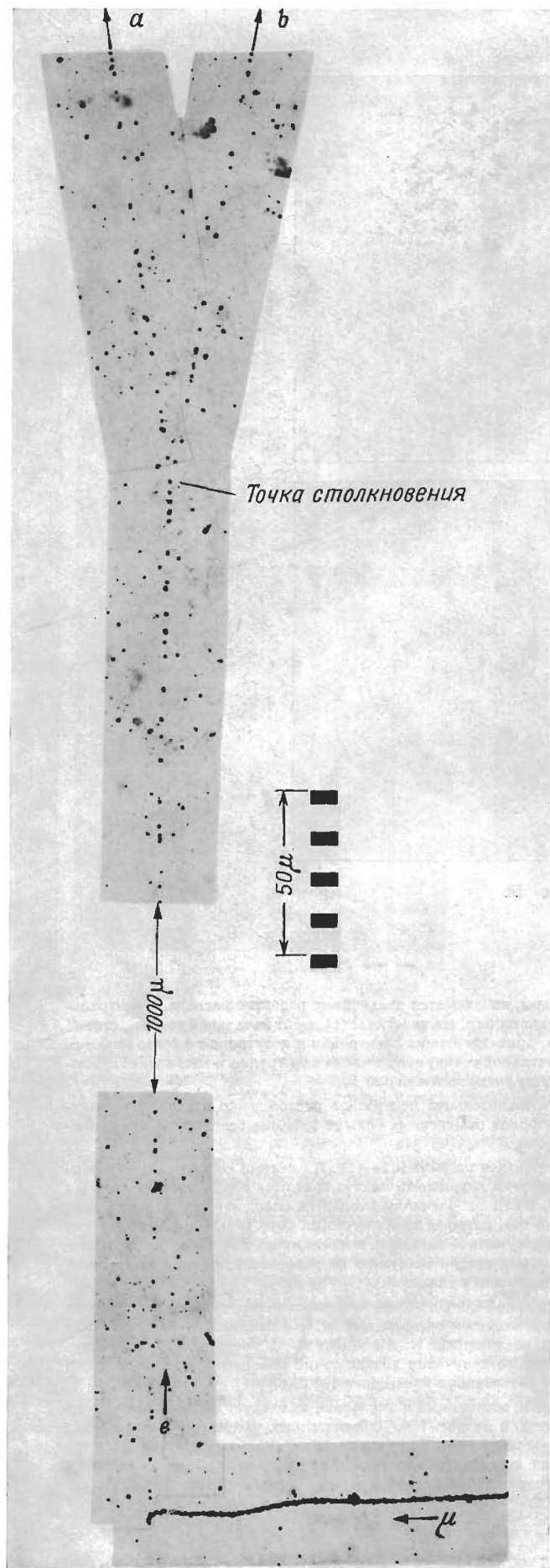


Фото 57. Столкновение заряженной частицы, образовавшейся при β -распаде μ -мезона, с электроном. Эмульсия Ильффорд G5.

Заряженная частица, испущенная при β -распаде μ -мезона, сталкивается с электроном в эмульсии. Следы частиц до и после столкновения достаточно длинны, что позволило определить импульсы частиц. Поэтому возможно провести анализ столкновения с использованием законов сохранения, предполагая, что столкновение является упругим, т. е. не сопровождается испусканием сколько-нибудь значительной энергии в виде фотонов. В результате может быть показано, что если след a образован электроном отдачи, то масса частицы, оставившей след b , равна $3 \pm 2m_e$. Если же след b является следом электрона, то масса другой частицы равна $1,5 \pm 1,0 m_e$. Таким образом, рассмотренный случай показывает, что частица, образующаяся при распаде μ -мезона, имеет малую массу покоя. Это является сильным доводом в пользу общепринятой точки зрения, что эта частица — электрон.

Хотя данное столкновение является почти наверняка столкновением двух частиц равной массы, из которых одна первоначально покоилась, угол между направлениями движения частиц после столкновения не равен прямому. Это происходит потому, что частицы обладают релятивистскими скоростями.

Camerini, Fowler.

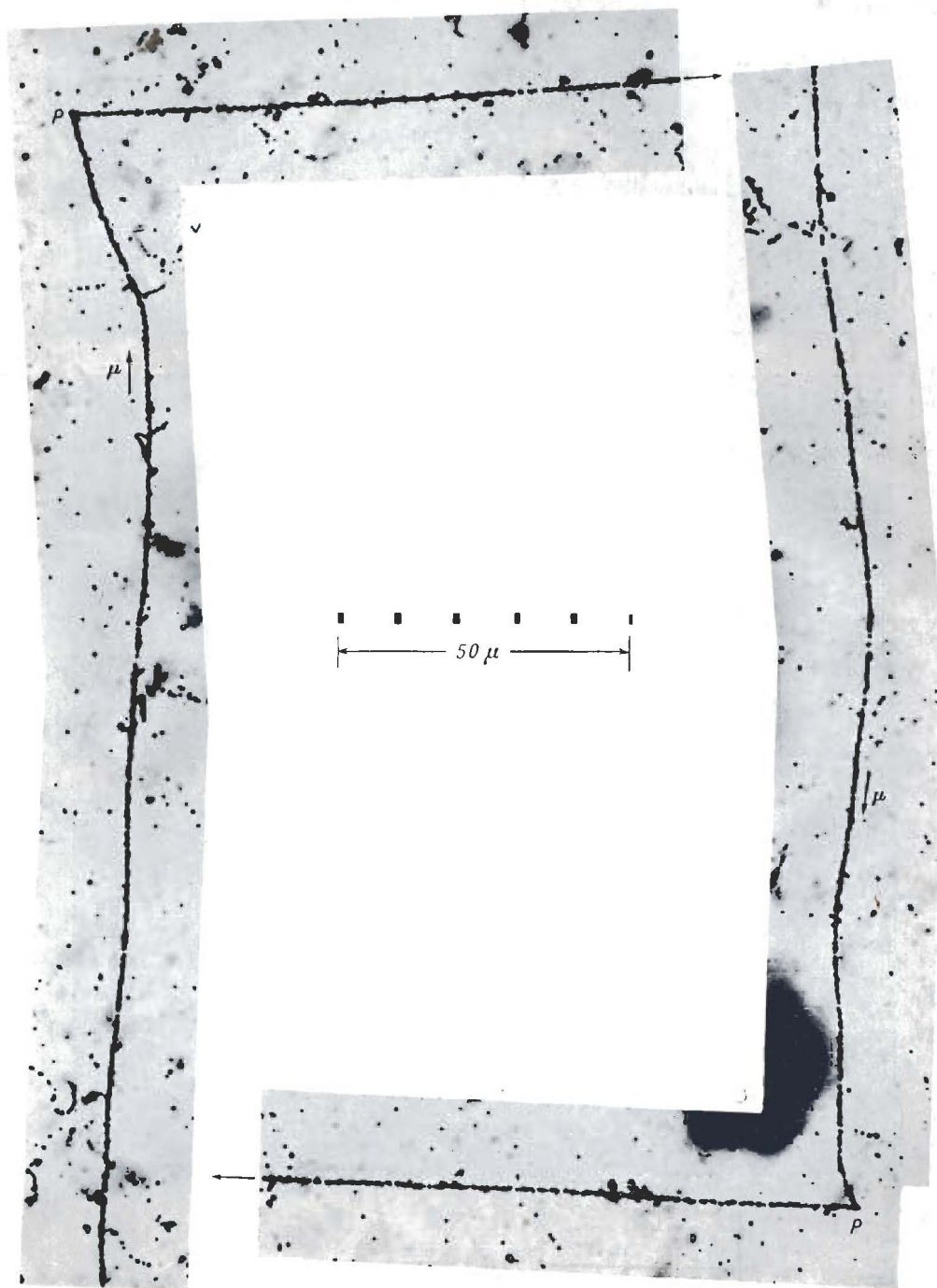
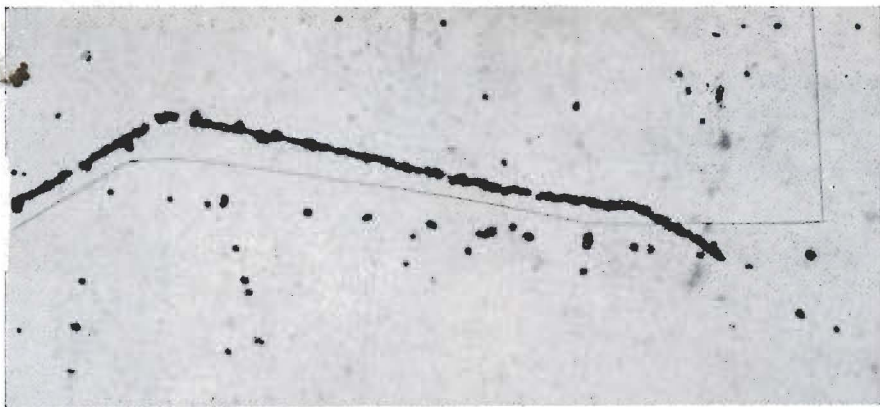


Фото 58. Расщепления в результате ядерного захвата отрицательных μ -мезонов. Эмульсия Ильфорт G5.

Эти случаи захвата отрицательных μ -мезонов были зарегистрированы в фотопластинах, изготовленных под землей на глубине около 40 м водного эквивалента (пластинки оставались на этой глубине в течение нескольких месяцев и там же обрабатывались). На фотографии представлены два типичных примера расщеплений с испусканием одной заряженной частицы. Большинство таких расщеплений образуется в результате ядерного захвата μ -мезонов тяжелыми ядрами эмульсии.

George, Evans, 1951 г.

a



б



в

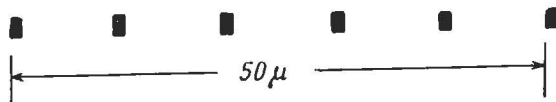
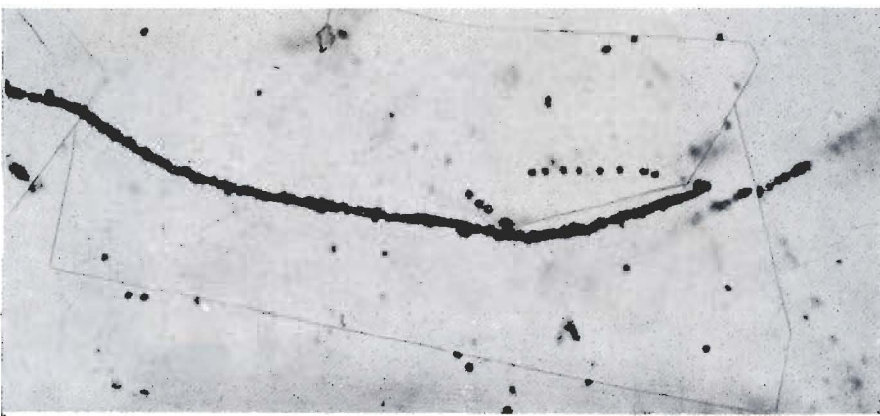


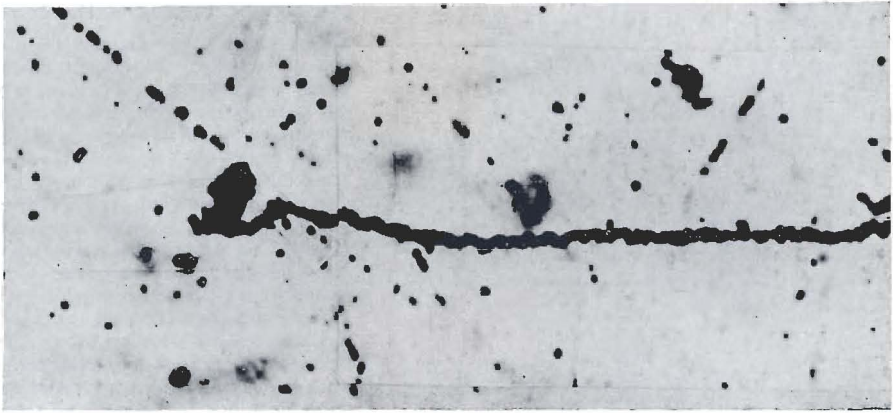
Фото 59

Фото 59 и 60. Электроны Оже при захвате μ^- -мезона ядром Ag или Br. Эмульсия Ильфорд G5.
a — типичный пример распада μ -мезона с неизвестным знаком заряда без видимых следов электронов Оже.
б — группа из двух, или трех зерен, вблизи конца пробега μ -мезона, образована, по-видимому, электроном Оже.
На фотографиях *в* — *е* можно ясно различить следы медленных электронов, возникающих в месте остановки μ -мезонов.
Примеры электронов Оже, образующихся при остановке в эмульсии других отрицательных частиц, см. на фото 70.

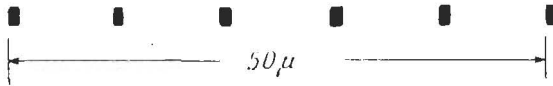
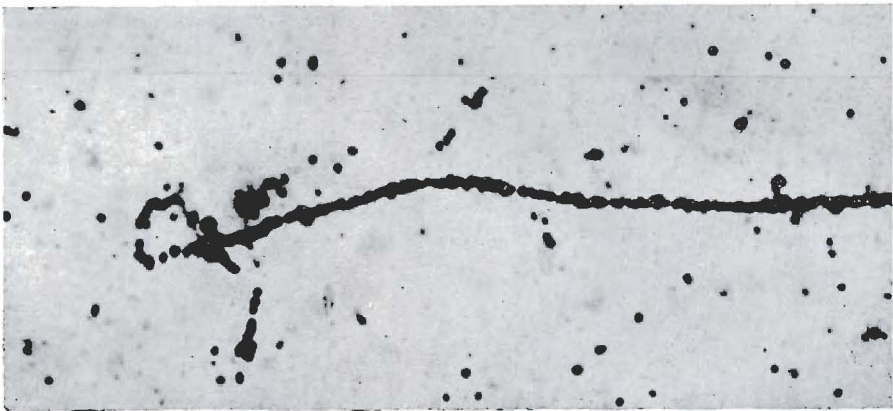
2



3



ε



Φ ο τ ο 60

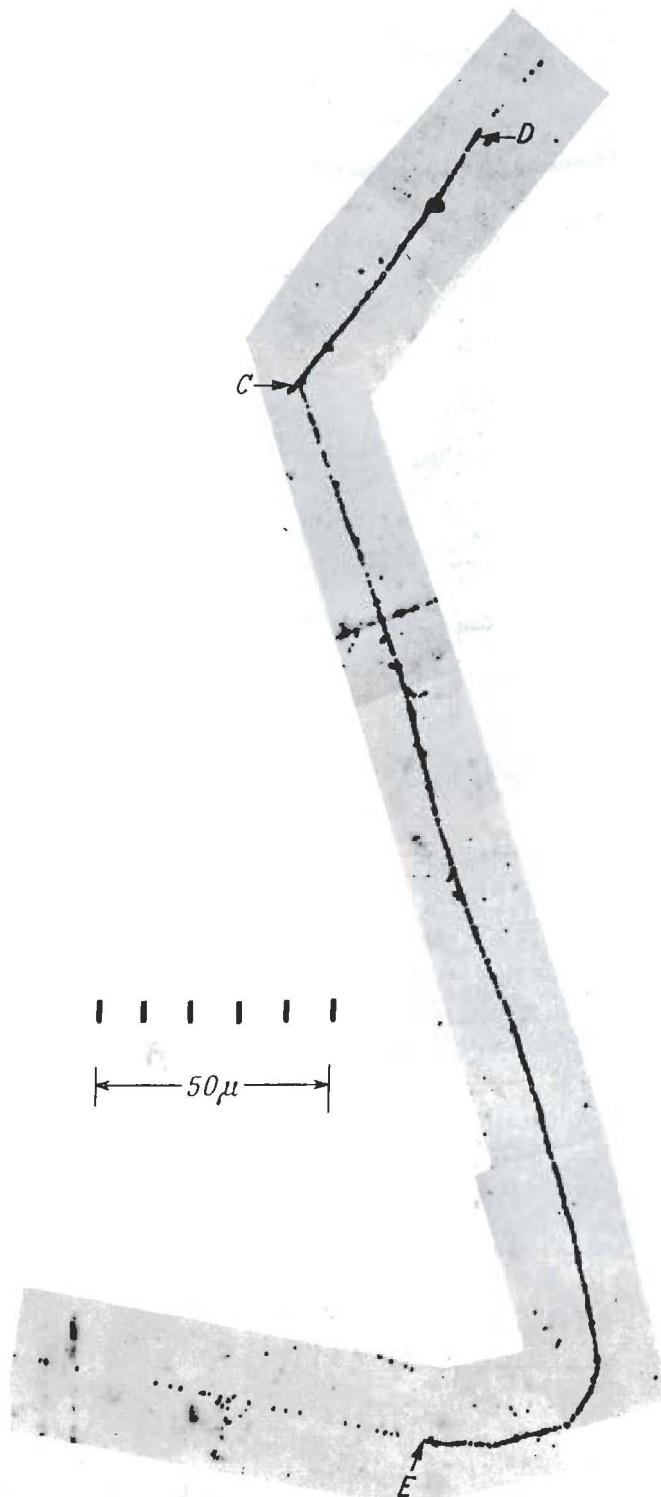


Фото 61. Непосредственное образование мезона типа L при ядерном взаимодействии. Эмульсия Ильффорд G5.

Мезон типа L с пробегом 270μ , по-видимому, образовался при взаимодействии в точке C и распался с испусканием электрона в точке E . След CD оканчивается у стекла пластинки в точке D ; тонкий след, проходящий рядом с точкой D , не имеет отношения к рассматриваемому случаю. След CD расположен под значительным углом к поверхности эмульсии, поэтому ионизация вдоль этого следа меньше ионизации, соответствующей видимой на фотографии плотности зерен в следе. Хотя направление движения частицы, образовавшей след CD , с определенностью установить нельзя, наличие короткого следа у точки C и величина пробега μ -мезона CE не позволяет объяснить рассматриваемый случай распадом π -мезона в точке C . Короткий след у точки C делает также маловероятным предположение о ядерном взаимодействии μ -мезона в точке C . Наиболее простое объяснение заключается в допущении, что мезон типа L образован при ядерном взаимодействии.

Менон, неопубликованная работа, 1952 г.

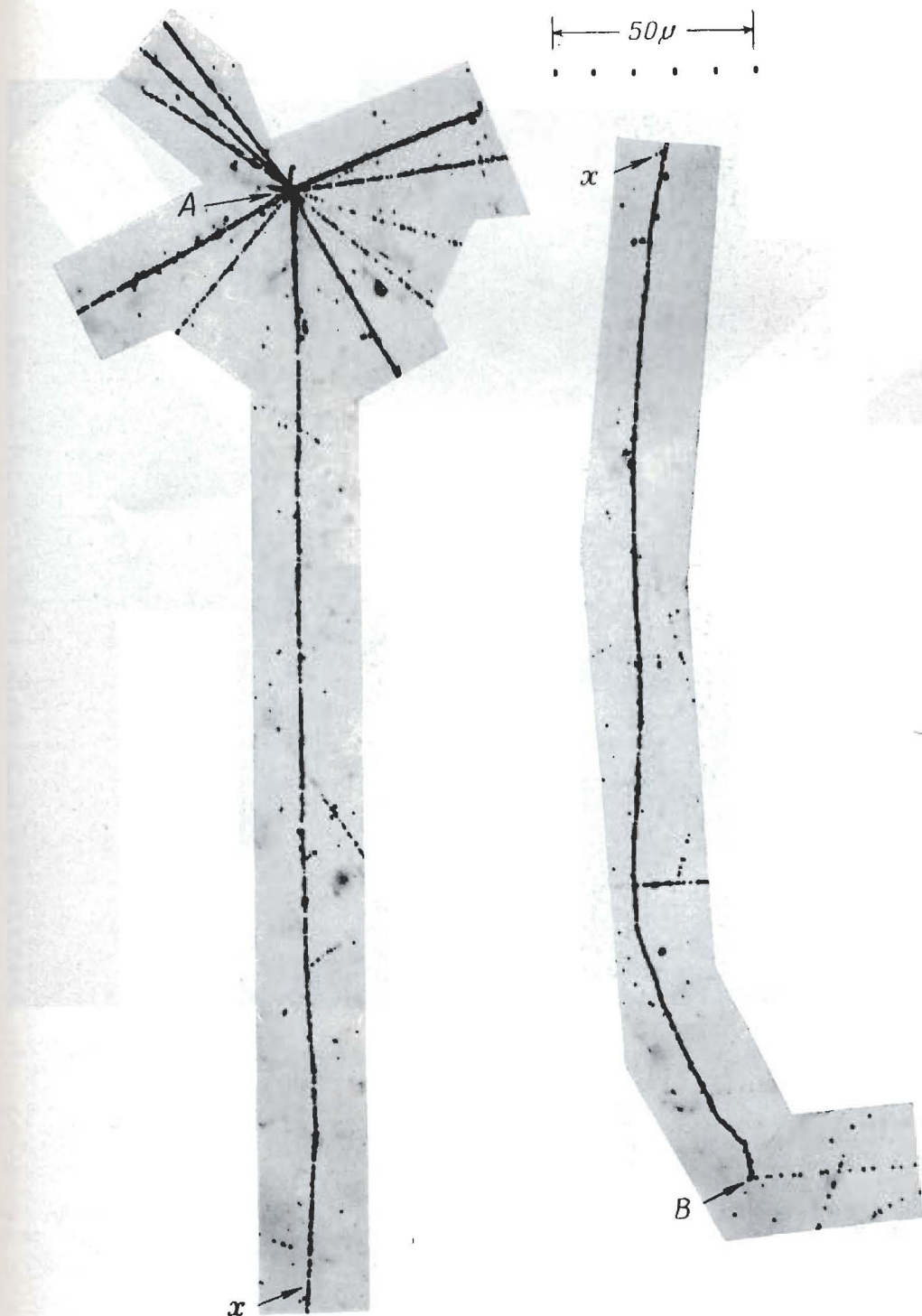


Фото 62. Свидетельство β -распада π -мезона. Эмульсия Ильфод G5.

Фотография выглядит так, как если бы в данном случае имело место образование мезона типа L непосредственно при ядерном расщеплении. Поскольку нет никакого следа π -мезона, приблизившегося к центру A , наблюдаемый случай нельзя объяснить случайным наложением двух событий: расщепления в точке A и $\pi \rightarrow \mu$ -распада. Представляется разумным либо сделать вывод о том, что в редких случаях μ -мезоны могут непосредственно образовываться при ядерных столкновениях высокой энергии, либо предположить, что данный случай является одним из первых примеров β -распада π -мезона, который не был идентифицирован в то время.

Менон, неопубликованная работа, 1952 г.

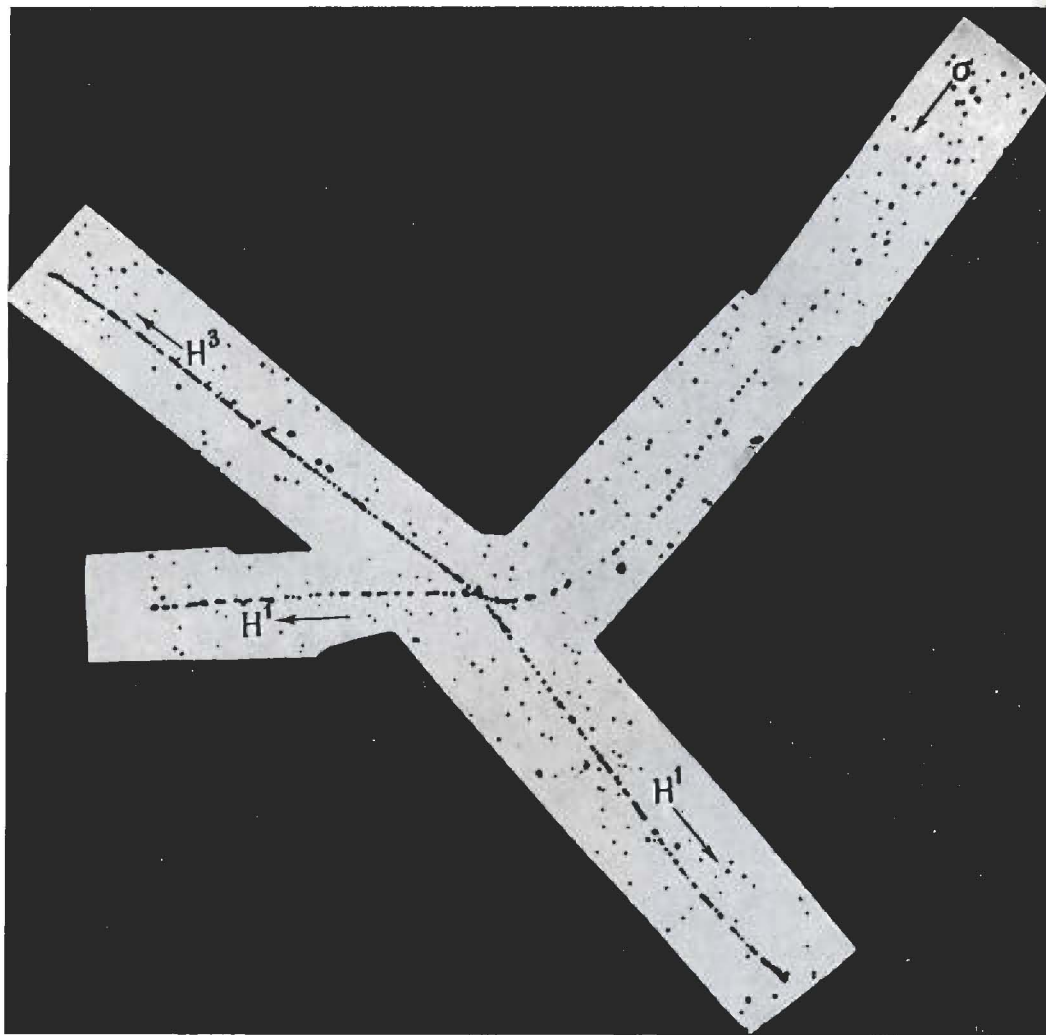


Фото 63. Первый зарегистрированный случай ядерного расщепления, вызванного отрицательным мезоном. Эмульсия Ильфорд В1.

Хорошо выражено изменение плотности зерен и возрастающее рассеяние по мере приближения мезона к концу его пробега. Это служит убедительным доказательством того, что частица действительно приближается к центру расщепления, а не удаляется от него; ясно, кроме того, что частица, которая должна была вызвать расщепление, при взаимодействии с ядром двигалась очень медленно. Отсюда следует, что энергия расщепления выделялась за счет энергии, соответствующей массе покоя налетающей частицы. Такой процесс ранее никогда не наблюдался.

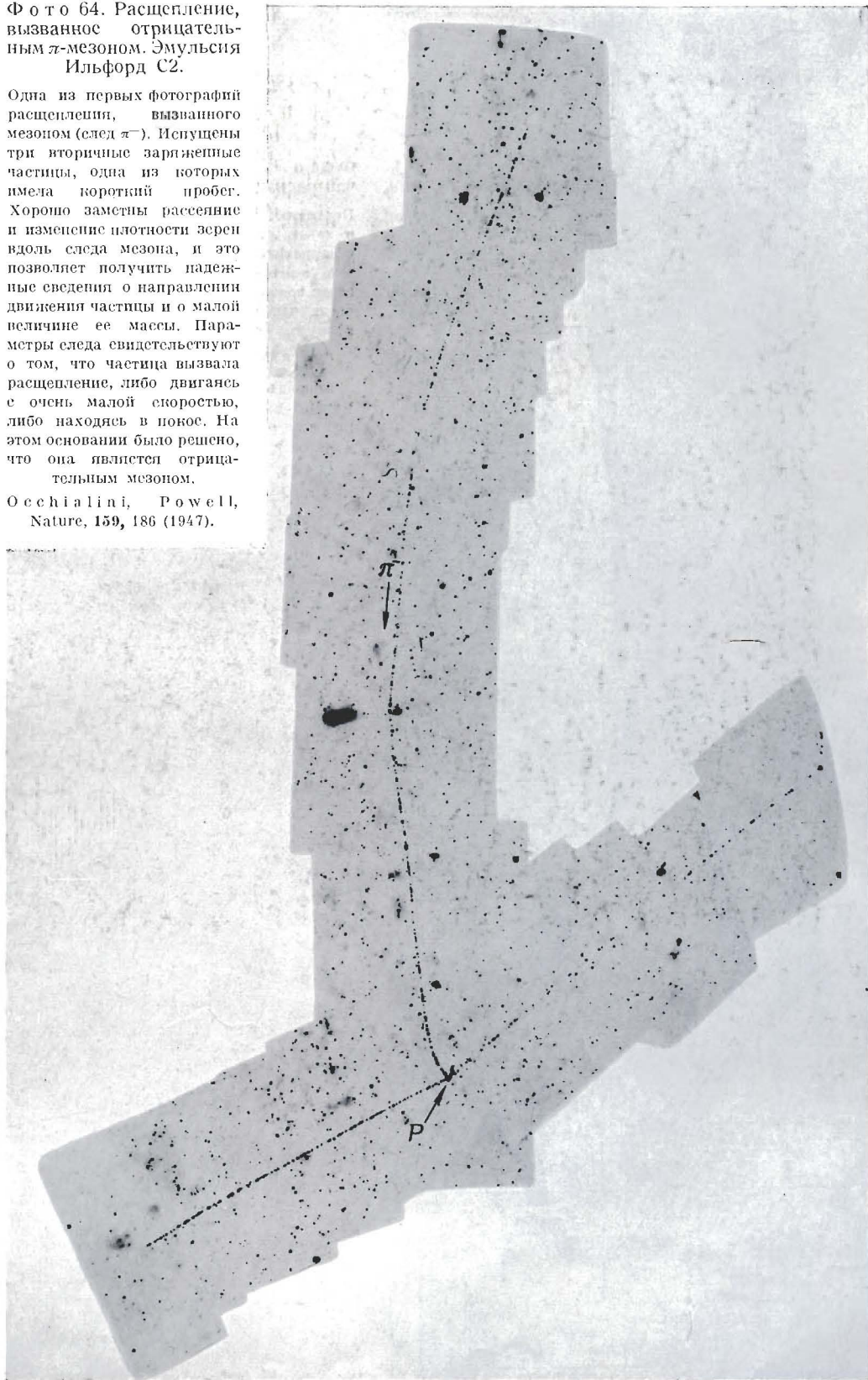
Уже эти первые эмульсии имели хорошие дискриминирующие свойства, поэтому разницу в скорости изменения плотности зерен в следах мезона и вторичного ядра водорода можно легко заметить. Идентификация одного следа как следа тритона основана на сравнении скорости изменения плотности зерен вдоль следов.

Perkins, Nature, 150, 126 (1947).

Фото 64. Расщепление, вызванное отрицательным π -мезоном. Эмульсия Ильфорт С2.

Одна из первых фотографий расщепления, вызванного мезоном (след π^-). Испущены три вторичные заряженные частицы, одна из которых имела короткий пробег. Хорошо заметны рассеяние и изменение плотности зерен вдоль следа мезона, и это позволяет получить надежные сведения о направлении движения частицы и о малой величине ее массы. Параметры следа свидетельствуют о том, что частица вызвала расщепление, либо двигаясь с очень малой скоростью, либо находясь в покое. На этом основании было решено, что она является отрицательным мезоном.

Occhialini, Powell, Nature, 159, 186 (1947).



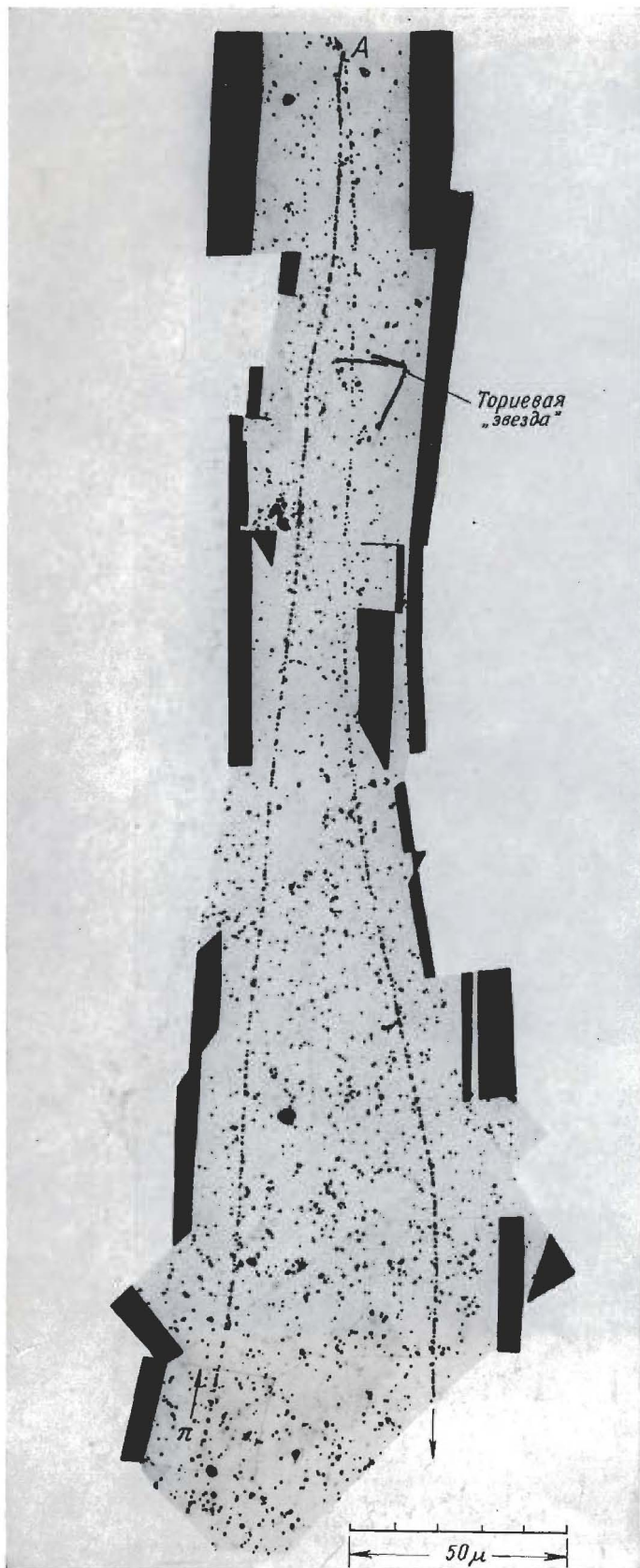


Фото 65. Первый зарегистрированный случай распада π -мезона. Эмульсия Ильффорд С2.

Первичная частица π достигает конца своего пробега в точке А, откуда испускается вторичный μ -мезон в направлении, почти обратном направлению движения π -мезона. Изменение рассеяния и плотности зерен вдоль следов свидетельствует о том, что массы обеих частиц были намного меньше массы протона, а также позволяет однозначно определить направление движения частиц. Сравнение плотности зерен в двух следах показывает, что в точке выхода μ -мезона из эмульсии его остаточный пробег был малым. Черные края оставлены для того, чтобы показать размеры отдельных фотографий, из которых составилась мозаика.

Lattes, Muirhead, Occhialini, Powell, Nature, 159, 694 (1947).

Фото 66. Одна из первых фотографий распада π -мезона. Эмульсия Ильфорд С2.

Это второй случай распада π -мезона, который был обнаружен вскоре после первого. Хотя след первичной частицы короткий, он тем не менее позволяет надежно определить направление ее движения и сделать вывод о ее малой массе. Вторичный μ -мезон остановился в эмульсии, пройдя путь 610 μ .

Lattes, Muirhead, Occhialini, Powell, Nature, 159, 694 (1947).

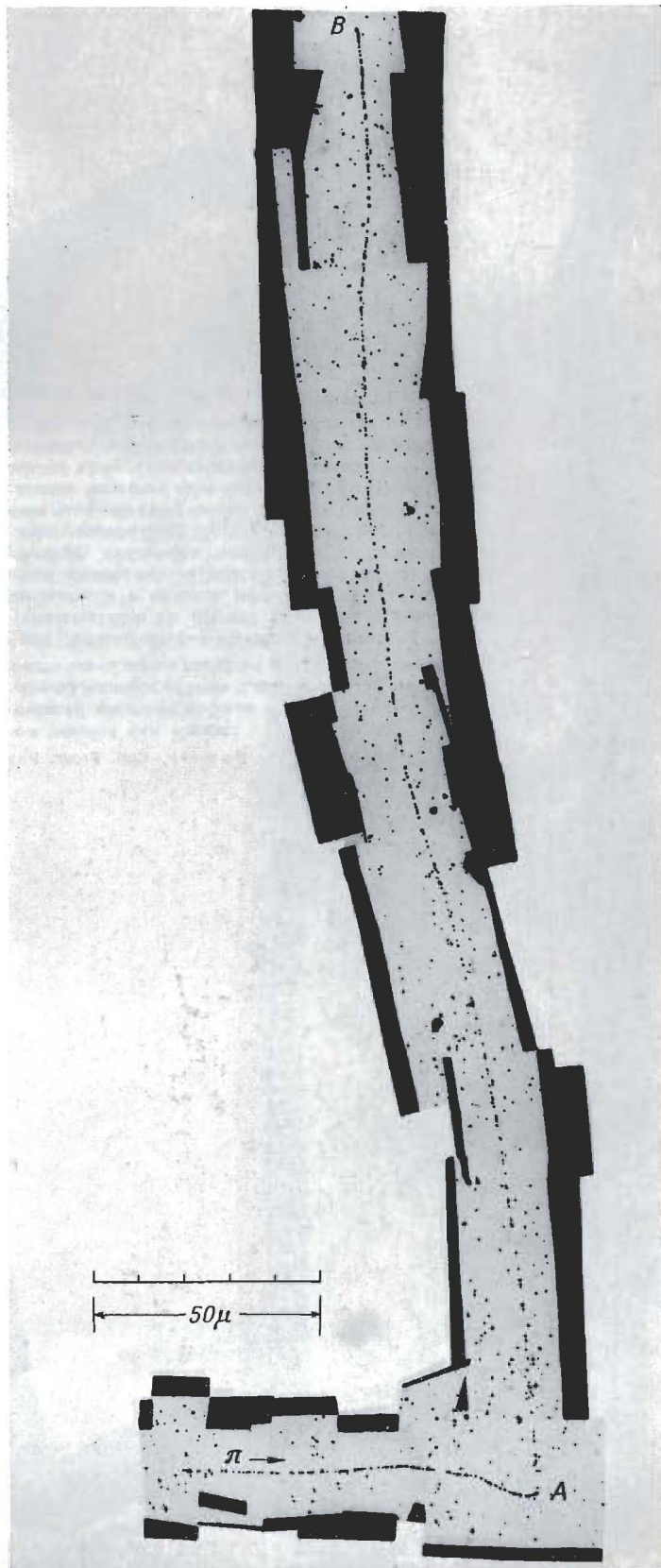


Фото 67. Последовательный распад π -мезона ($\pi \rightarrow \mu \rightarrow \beta$). Эмульсия Кодак NT4.

С развитием электронно-чувствительных эмульсий [Берриман, Nature, 162, 992 (1948)] стало возможным наблюдать следы электронов, движущихся с релятивистскими скоростями. Среди явлений, наблюдавшихся вскоре после этого, были случаи β -распада μ -мезона [Браун и др., Nature, 163, 47, 82 (1949)]. На данном фото показаны четыре примера последовательного распада $\pi \rightarrow \mu \rightarrow \beta$. В благоприятных случаях можно было измерить энергию электронов методом рассеяния [Дэвис и др., Phil. Mag., 40, 1250 (1949)]. Полученные таким образом энергии оказались такими же, как определенные по измерениям в камерах Вильсона, помещенных в магнитном поле, значения энергии электронов, образующихся при распаде мезонов космического излучения. Эти исследования показали, что проникающие частицы в космических лучах идентичны с μ -мезонами и что они образуются обычно при распаде на лету быстрых положительных и отрицательных π -мезонов.

Последние образуются непосредственно при ядерных столкновениях в атмосфере.

Во всех четырех случаях μ -мезоны имеют почти одинаковые пробеги. Колебания в величине пробега, вызываемые „страгглингем“, обычно намного больше, чем можно судить из представленных фотографий (см. фиг. 26, на которой показано распределение пробегов для 600 μ -мезонов, образующихся при распаде π -мезонов в покое).

Powell, Rep. Progr. Phys., 13, 384 (1950).



Фото 68. Кажущееся испускание короткопробежных μ -мезонов при π — μ -распаде. Эмульсия Ильфорд G5.

Эти фотографии иллюстрируют методические трудности идентификации радиационного распада π -мезонов в тех случаях, когда следы расположены под большими углами к плоскости эмульсии. С первого же взгляда создается впечатление, что μ -мезоны испускаются в направлении вперед по отношению к линии движения родительского π -мезона. Поэтому можно считать, что подобные распады сопровождаются испусканием фотонов, и что они не относятся к случаям распада родительской частицы на лету. В представленных случаях, однако, следы, приписываемые π -мезонам, расположены под большим углом к плоскости эмульсии, что приводит к возрастанию ширины их следов. В частности, вблизи точки P следы, обозначенные как следы π -мезонов, заметно толще, чем следы μ -мезонов в конце их пробега. Подобным образом может иногда выглядеть не π — μ -распад, а рассеяние μ -мезонов на большой угол, и хотя большая часть длины следа будет сильно наклонена к плоскости эмульсии, участок в конце пробега может быть расположен почти параллельно плоскости эмульсии. Именно таким способом можно объяснить приведенные фотографии, хотя бывают случаи несомненного радиационного распада. Фотографии показывают, насколько важным является учет влияния угла погружения на внешний вид следа, особенно при анализе редких событий.

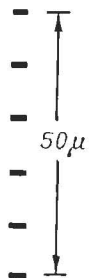
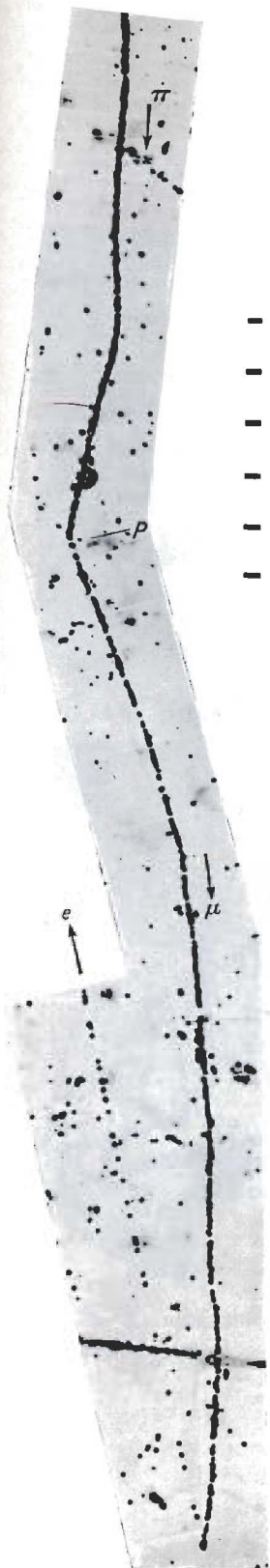




Фото 69. Генетически связанные процессы образования пары заряженных частиц и распада π -мезона.
Эмульсия Илфорд G5.

O'Ceallaigh, Phil. Mag., 41, 838 (1950).

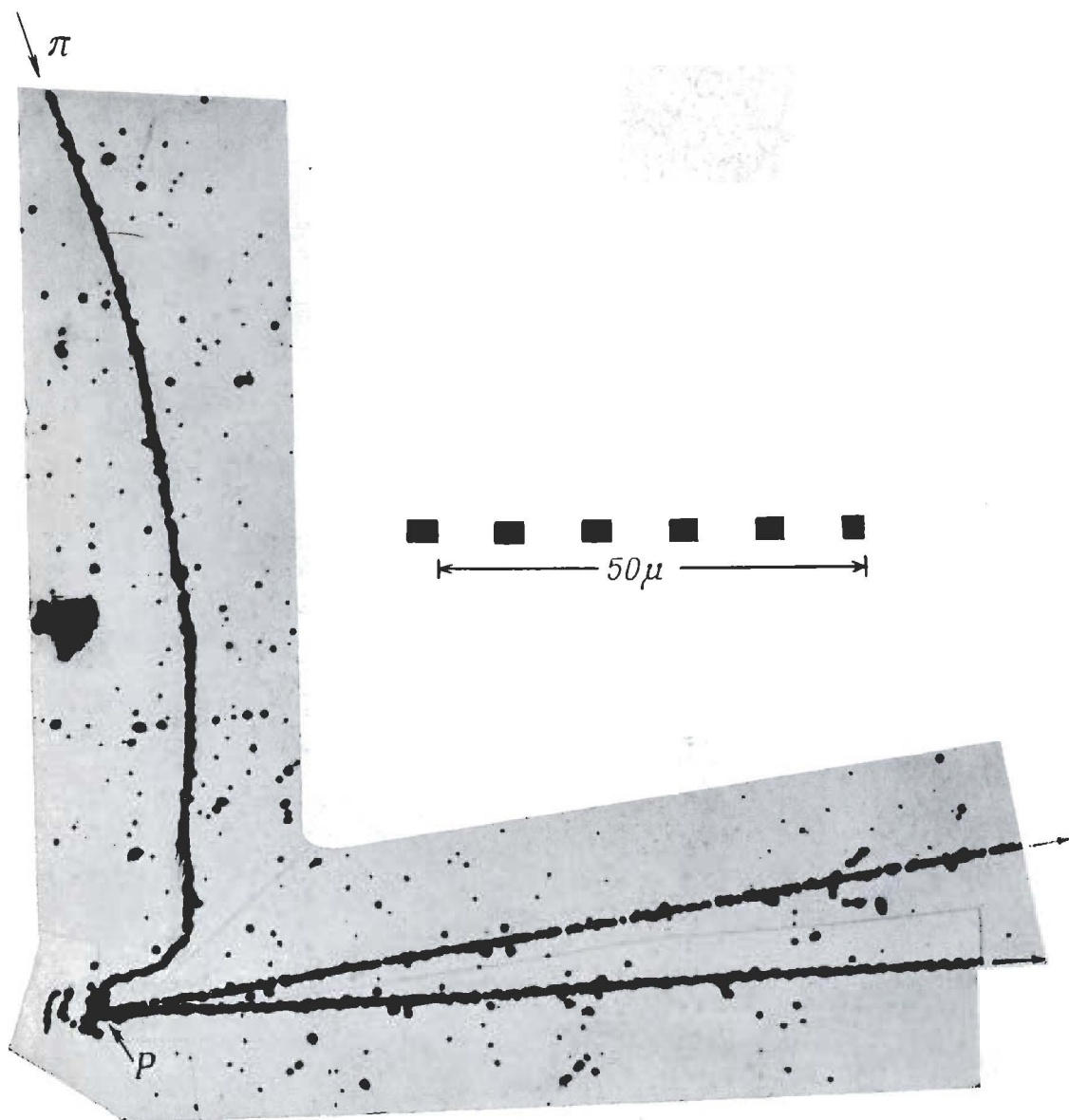


Фото 70. Расщепление ядра серебра или брома в результате захвата π^- -мезона. Эмульсия Ильфод G5. Присутствие как минимум одного следа электрона Озге является весьма убедительным доказательством того, что мезон был захвачен тяжелым элементом — вероятно серебром или бромом.

Menon, Muirhead, Rochat, Phil. Mag. 41, 588 (1950).



Фото 71. Расщепление ядер легких элементов при захвате π^- -мезонов. Эмульсия Иильфорд С2. π^- -мезоны достигают конца своего пробега в слое желатины толщиной 5 μ , помещенной между слоями эмульсии С2. Поскольку расщепление произошло в нечувствительном слое желатины, вершины „звезд“ не зарегистрированы. Эти случаи следует отнести к ядерным захватам мезонов углеродом, кислородом или азотом.

Menon, Muirhead, Rochat, Phil. Mag., 41, 583 (1950).

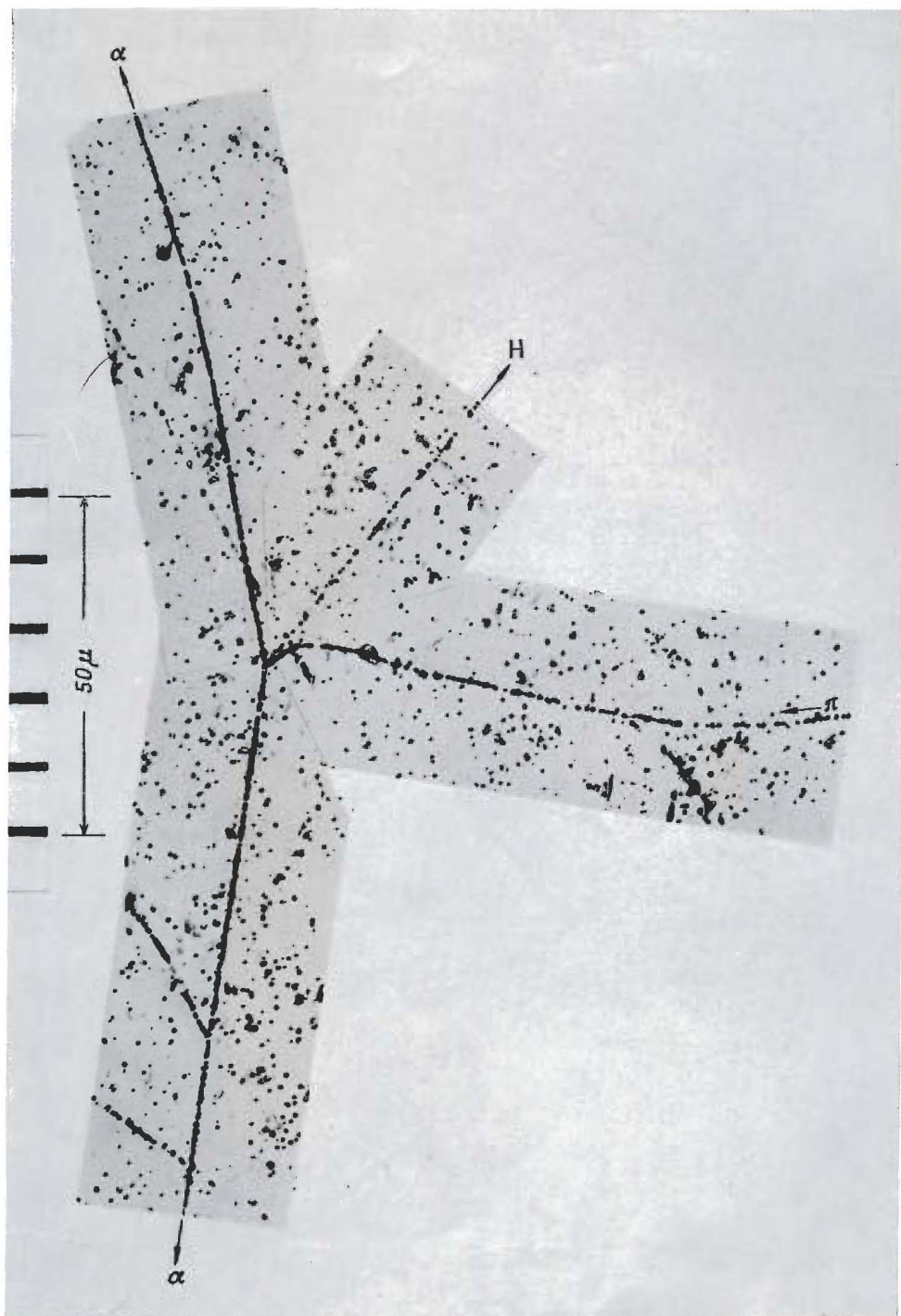
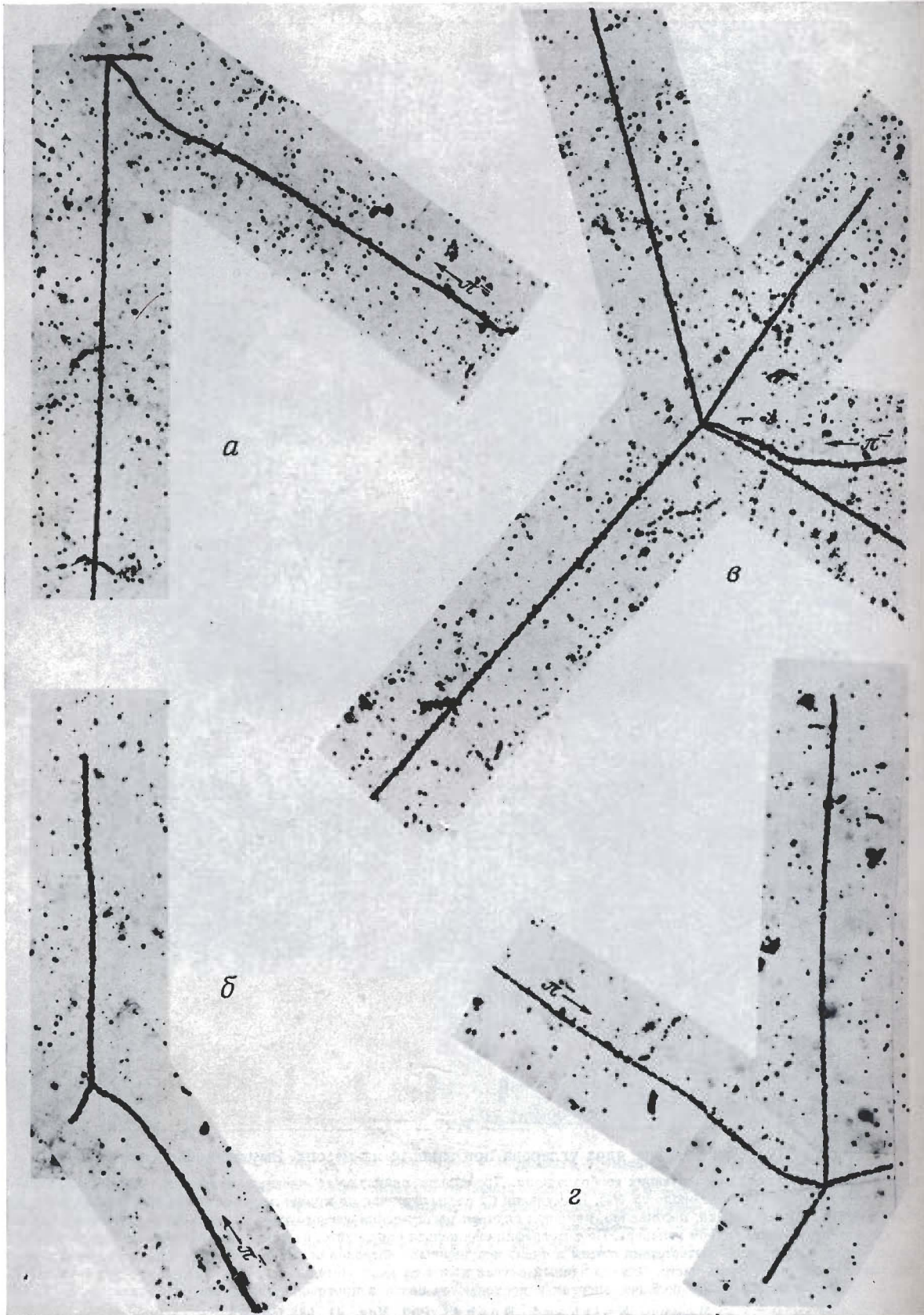


Фото 72. Расщепление ядра углерода при захвате π^- -мезона. Эмульсия Ильфорд С2.

Идентификация основана на следующих соображениях. Две сильно ионизирующие частицы являются α -частицами, энергия каждой из них составляет около 25 Мэв. В эмульсии С2 следы этих частиц можно легко отличить от следа ядра водорода (след Н). Данный случай, несомненно, является случаем расщепления легкого ядра. Из закона сохранения заряда следует, что оно является ядром углерода. По фотографии еще нельзя определить, является ли испущенное ядро водорода протоном или дейтроном. В соответствии с этим и число испущенных нейтронов остается неопределенным. Реакции этого типа могут встречаться очень часто. Однако данный случай является исключительным в том смысле, что две α -частицы имеют относительно большие энергии и испускаются почти в противоположных направлениях.

Menon, Muirhead, Rocha I, Phil. Mag., 41, 583 (1950).



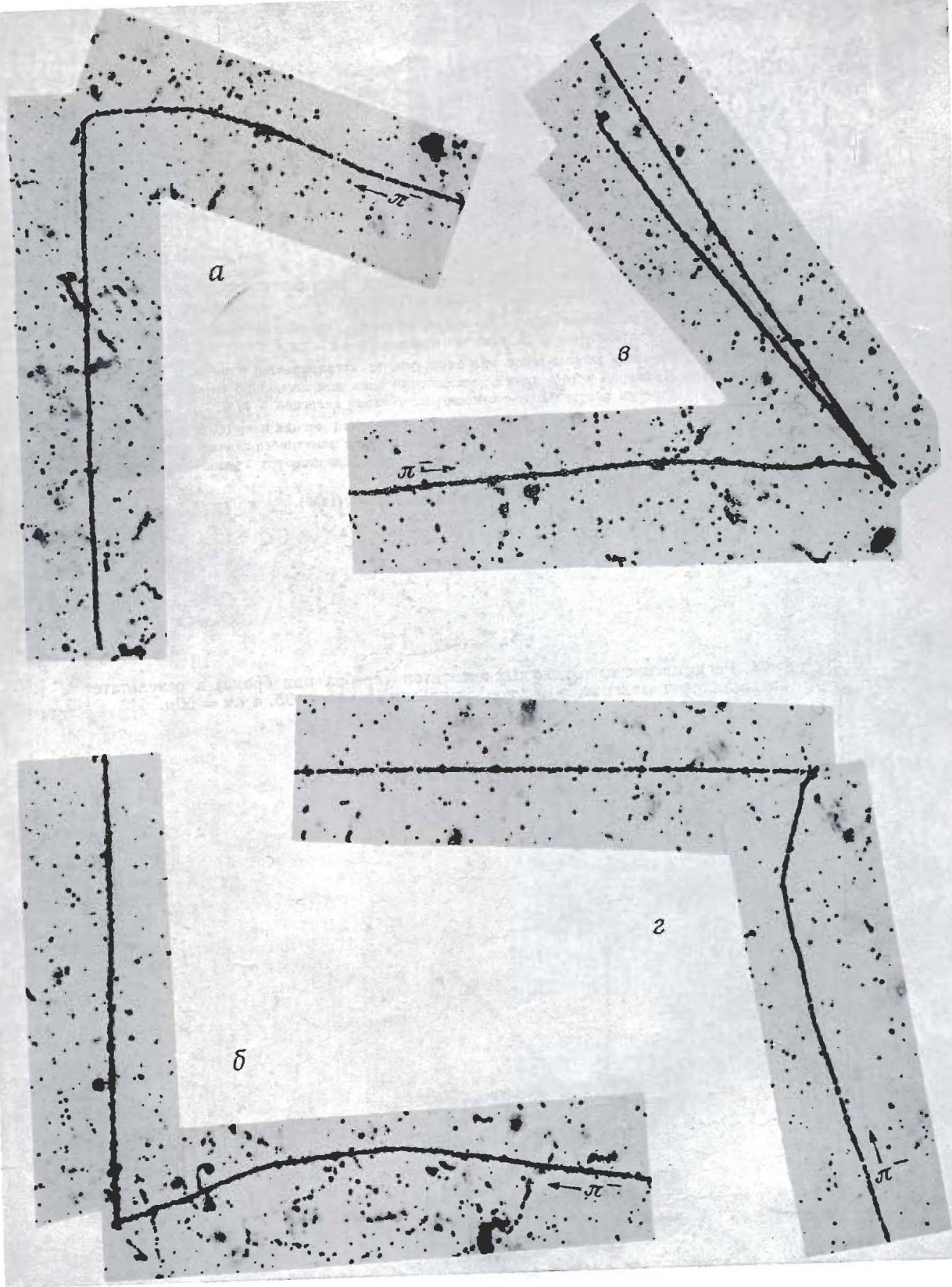


Фото 73. Расщепления ядер легких элементов в результате ядерного захвата π^- -мезонов. Эмульсия Ильфорд G5.

Фотографии ядерных расщеплений легких элементов (углерода, азота или кислорода) в результате ядерного захвата π^- -мезонов. $5 \text{ см} \approx 50 \mu$.

Когда отрицательный π -мезон останавливается в эмульсии, он захватывается атомом и взаимодействует с его ядром. Примерно в 70% таких расщеплений одна или несколько тяжелых заряженных частиц испускаются с относительно малой энергией 5 Мэв .

Менон и Рочат показали, что в некоторых случаях расщепления легких ядер (C, N или O) можно отличить от расщеплений тяжелых ядер (Ag или Br). Наиболее заметное отличие между этими типами расщеплений состоит в том, что легкие элементы расщепляются гораздо полнее, чем тяжелые. См. фото 74.

Powell, Rep. Progr. Phys., **13**, 384 (1950).

Фото 74. Расщепление ядер тяжелых элементов (серебра или брома) в результате захвата отрицательных π -мезонов. Эмульсия Ильфорд G5. $4 \text{ см} = 50 \mu$.

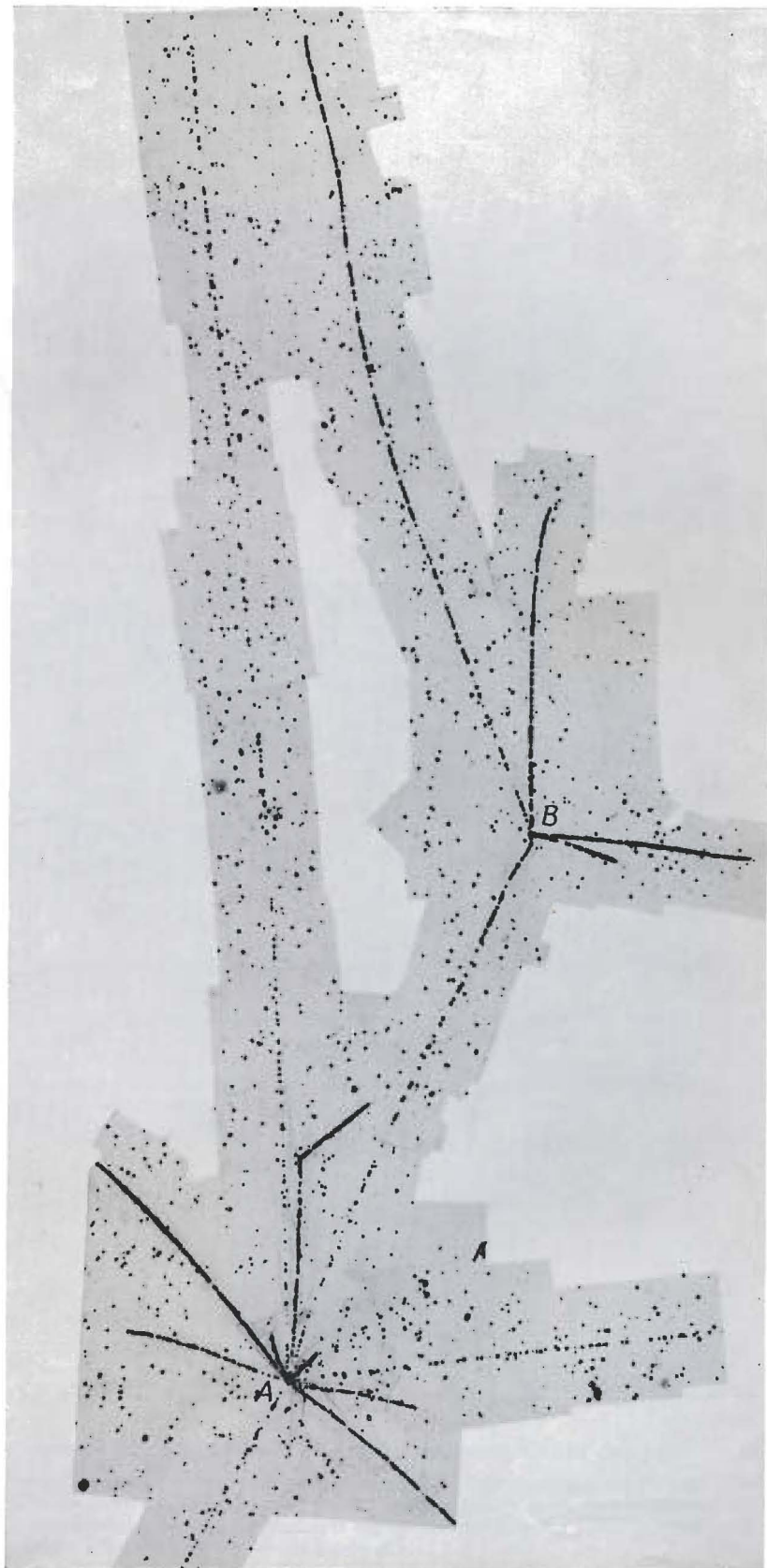
Powell, Rep. Progr. Phys., **13**, 384 (1950).

Фото 75. Образование отрицательного π -мезона при ядерном расщеплении. Эмульсия Иلفорд С2.

4 см = 50 μ .

Один из первых двух обнаруженных случаев образования π -мезона. Мезон вылетает из точки расщепления А и достигает конца своего пробега в точке В, где он захватывается ядром легкого элемента и расщепляет его. Распределение плотности зерен вдоль следа можно сравнить с плотностью зерен в следах двух ядер водорода, которые образуются при расщеплении в точке В и движутся в верхнем направлении.

Lattes, Occhialini, Powell,
Nature, 160, 486 (1947).



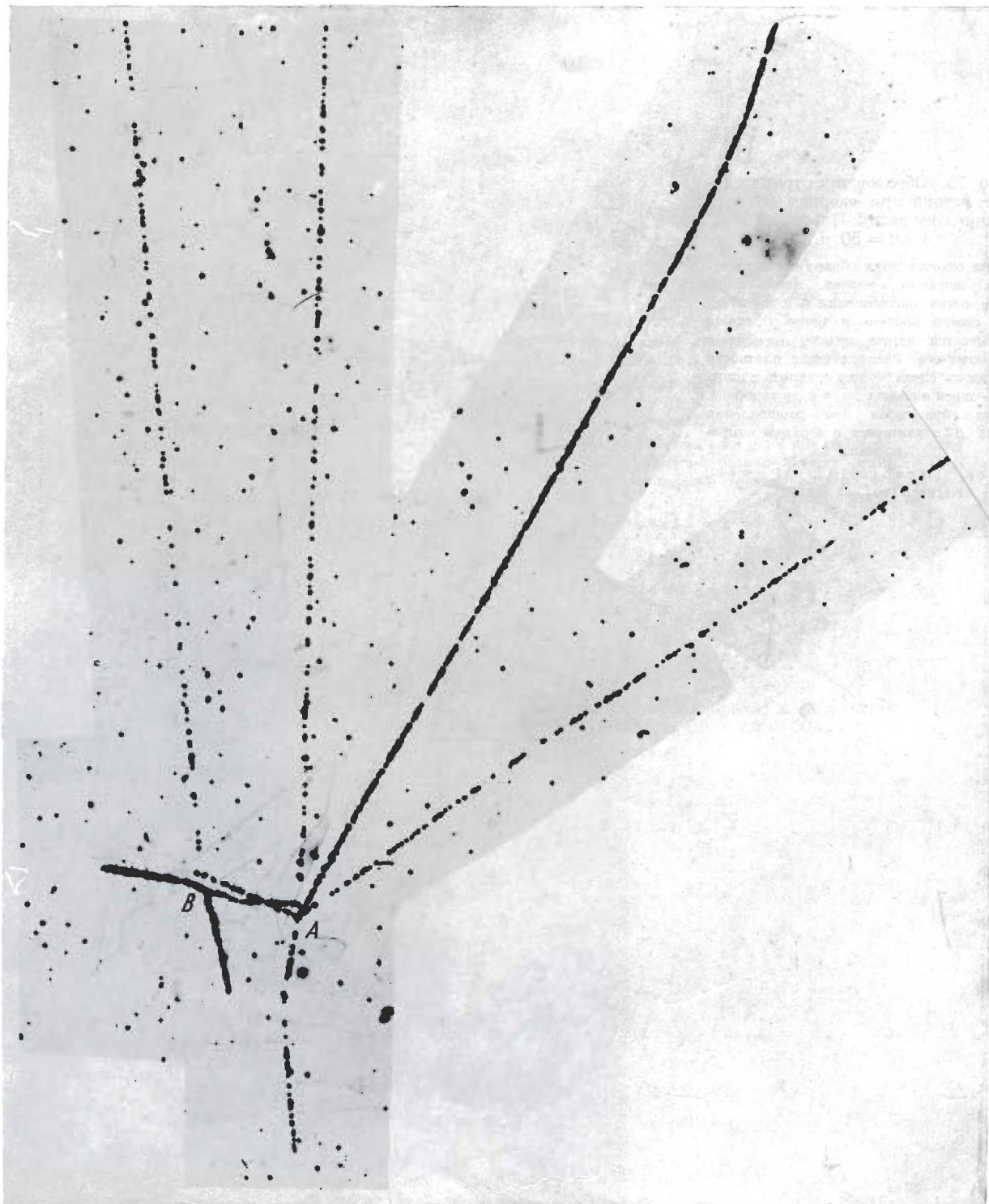


Фото 76. Образование π^- -мезона в ядерном расщеплении. Эмульсия Ильффорд С2. 5 см = 50 μ .

Два центра расщепления *A* и *B* связаны следом сильно рассеиваемой частицы с высокой плотностью зерен. След почти наверху является следом π -мезона. Направление движения мезона точно установить нельзя. Однако сильное рассеяние частицы около точки *A* дает основание полагать, что частица образовалась в расщеплении *B* и остановилась в точке *A*, где она вызвала расщепление ядра легкого элемента.

Oschialini, Powell, Nature, 162, 168 (1948).

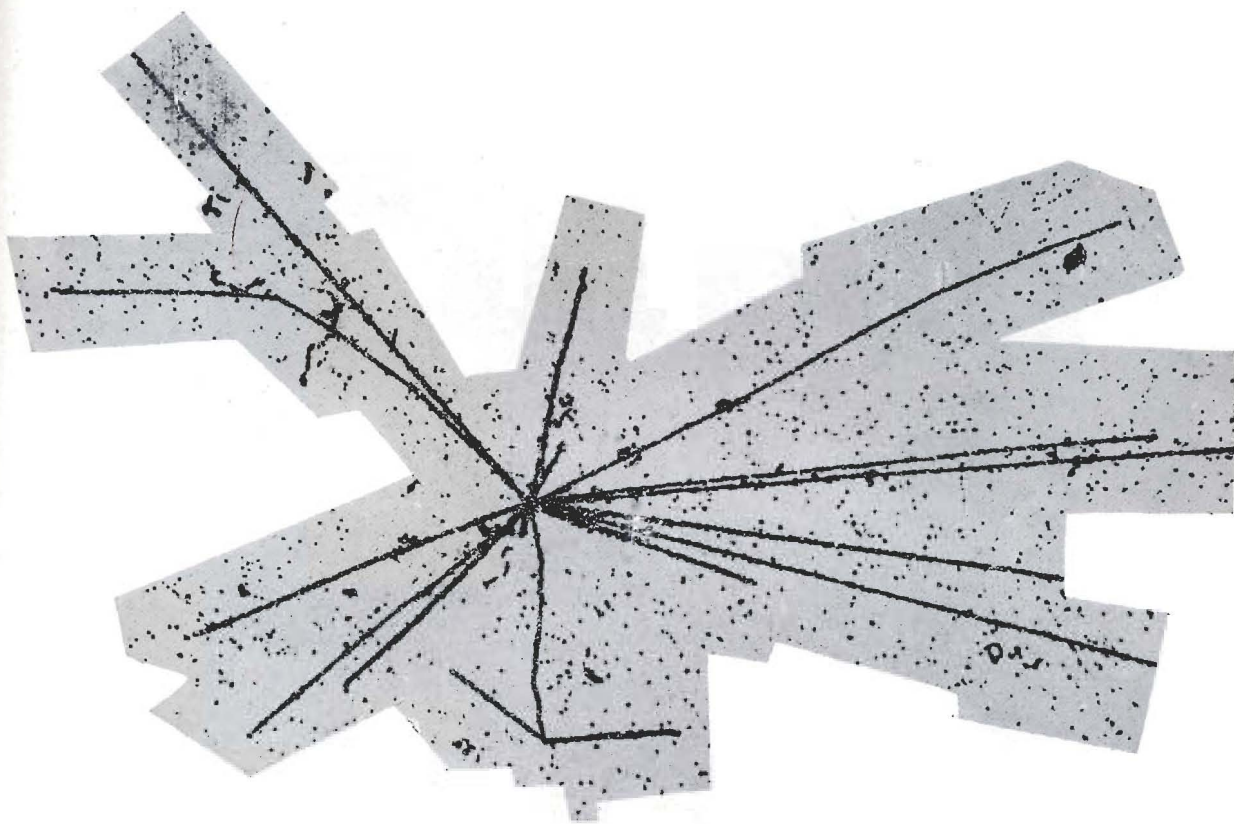


Фото 77. Одна из первых фотографий образования π -мезона в электронно-чувствительных эмульсиях. Эмульсия Кодак NT4.

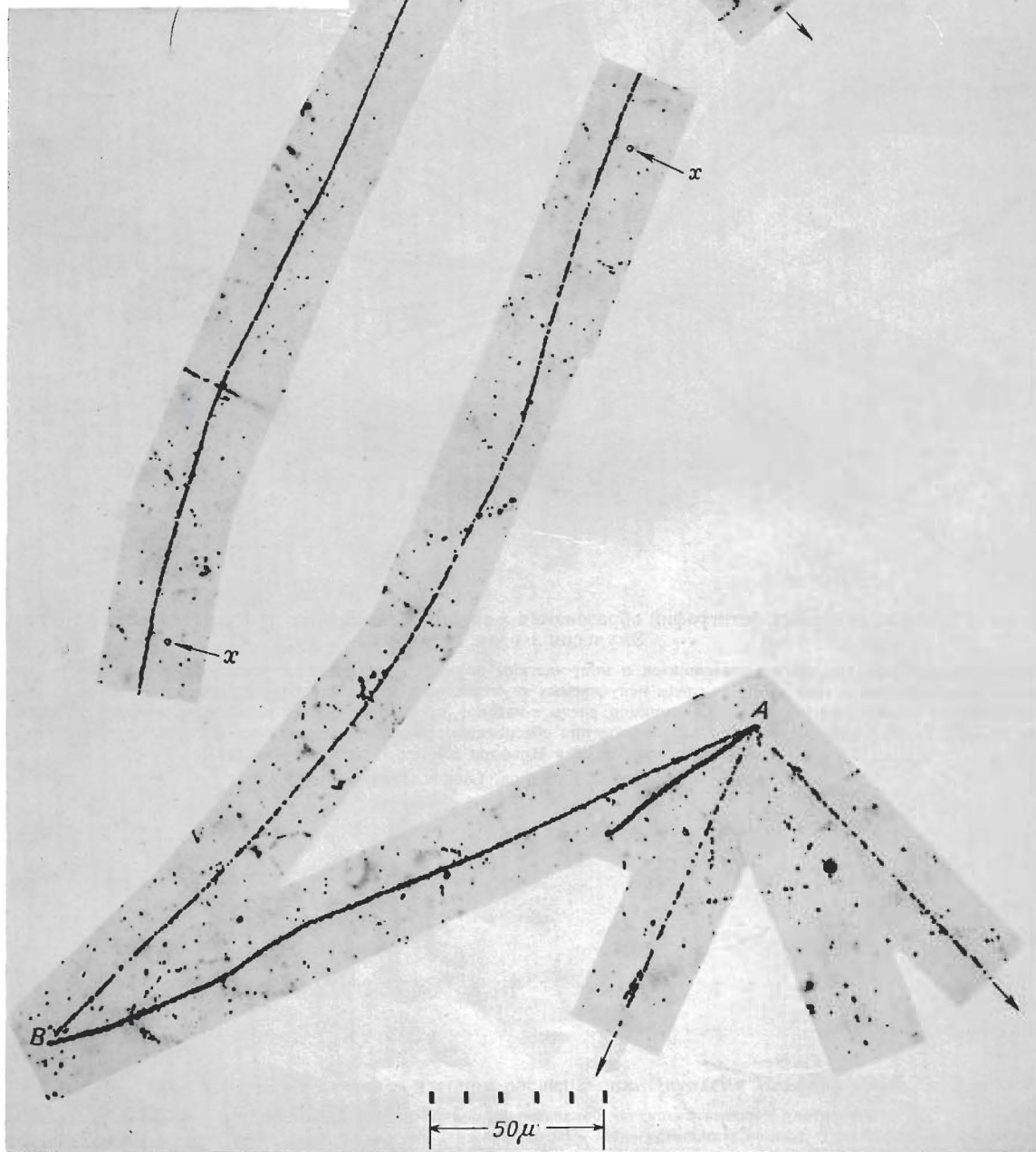
Расщепление необычно тем, что все относящиеся к нему частицы являются сильно ионизирующими. В случае короткопробежных следов иногда трудно отличить следы испускаемых π^- -мезонов от следов гиперонов и гиперфрагментов. Однако мезоны обычно больше рассеиваются (см., например, следы π -мезонов, протонов и других легких ядер в конце пробега на фото 34—49). Более благоприятные условия наблюдения обеспечиваются эмульсиями с более высокой дискриминирующей способностью, такими, как Ильфорт К5 (см., например, фото 114).

Powell, Cosmic Radiation, London, 1949, p. 89.

Фото 78. Испускание положительного π -мезона из ядерного расщепления. Эмульсия Ильффорд G5.

Положительный π -мезон, образующийся при расщеплении в точке A , распадается с испусканием μ -мезона в точке B . След μ -мезона разбит на две части. Ясно виден след электрона, начинающийся в конце пробега μ -мезона (в точке C).

Менон, неопубликованная работа.



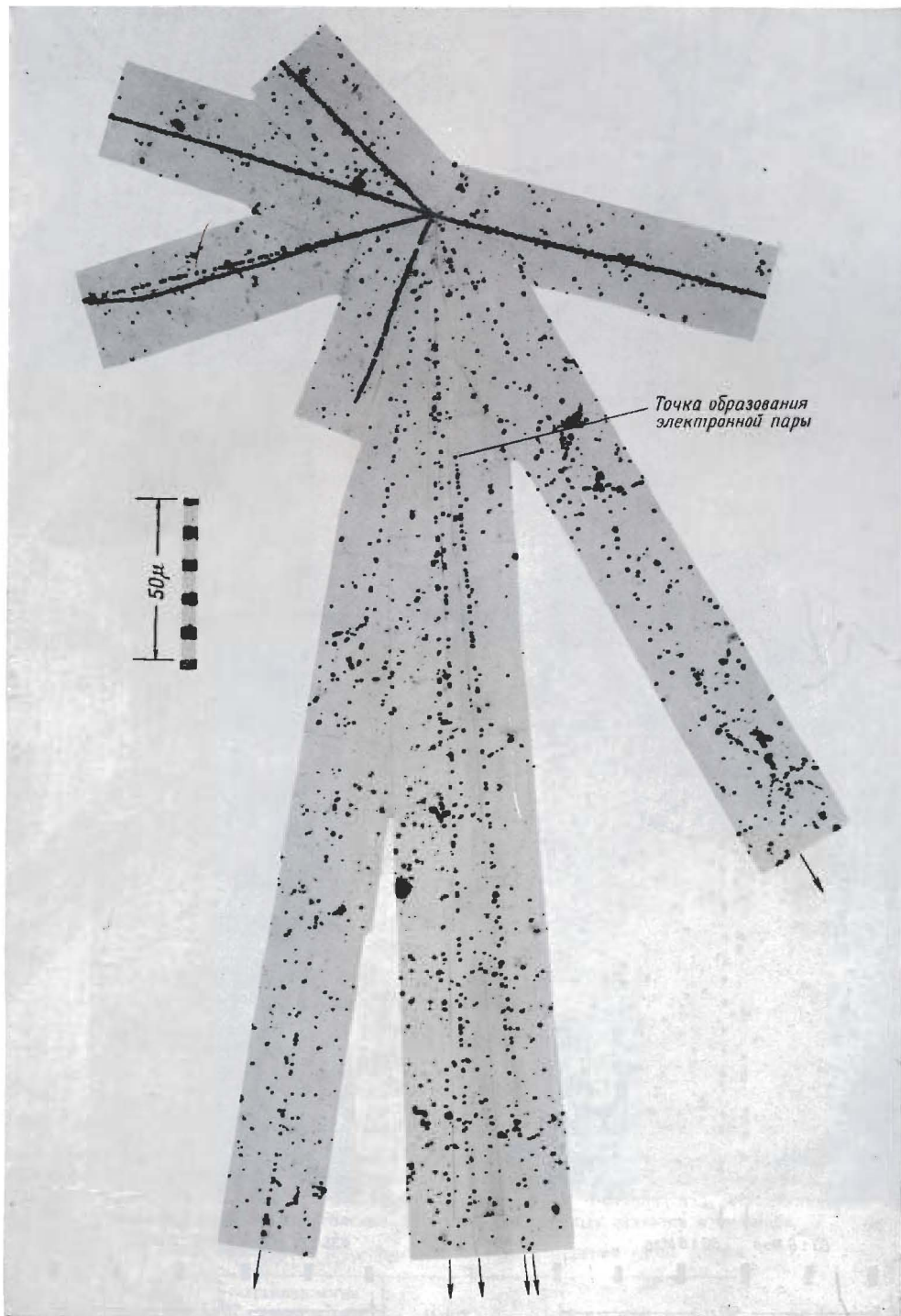


Фото 79. Электронно-позитронные пары от γ -квантов, образующихся при распаде π^0 -мезона. Эмульсия Ильффорд G5.

Биссектриса угла, образуемого следами электронно-позитронной пары, пересекает центр расщепления. На этом основании оба события можно почти с полной уверенностью считать связанными. Расщепление было вызвано нейтральной частицей, по-видимому, нейтроном. Такие пары были названы „близкими парами“ для того, чтобы можно было отличать их от пар, образующихся при альтернативном распаде π^0 -мезонов, следы которых выглядят так, как если бы пары образовались непосредственно в расщеплении (см. фото 80).

Carlson, Hooper, King, Phil. Mag., 41, 701 (1950).

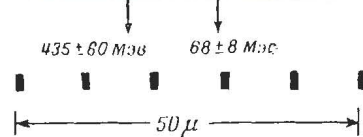
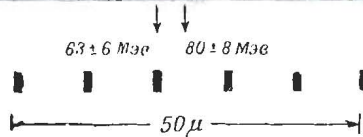
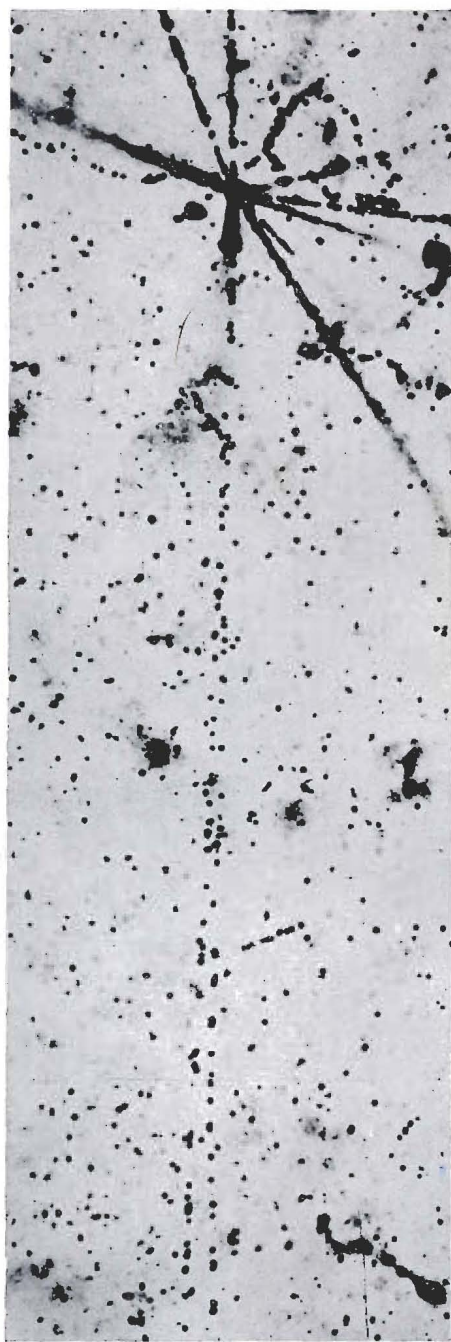


Фото 80. Электронно-позитронные пары, начало следов которых представляется совпадающим с точками ядерных расщеплений и которые приписываются маловероятной альтернативной схеме распада π^0 -мезона. Эмульсия Ильфорд G5.

На фото слева первые зерна в следе пары неразличимы из-за плотного следа медленного осколка. Отдельные следы электронов были идентифицированы по многократному рассеянию и плотности зерен, и их энергии указаны под фото. На фото справа может быть с определенностью идентифицирован только один след из двух, приписываемых электронно-позитронной паре. Другая частица с энергией 430 Мэв образует след с плотностью зерен, соответствующей плато ионизационной кривой (g_p), в то время как π - и μ -мезоны при том же рассеянии дали бы значения около 0,93 g_p .

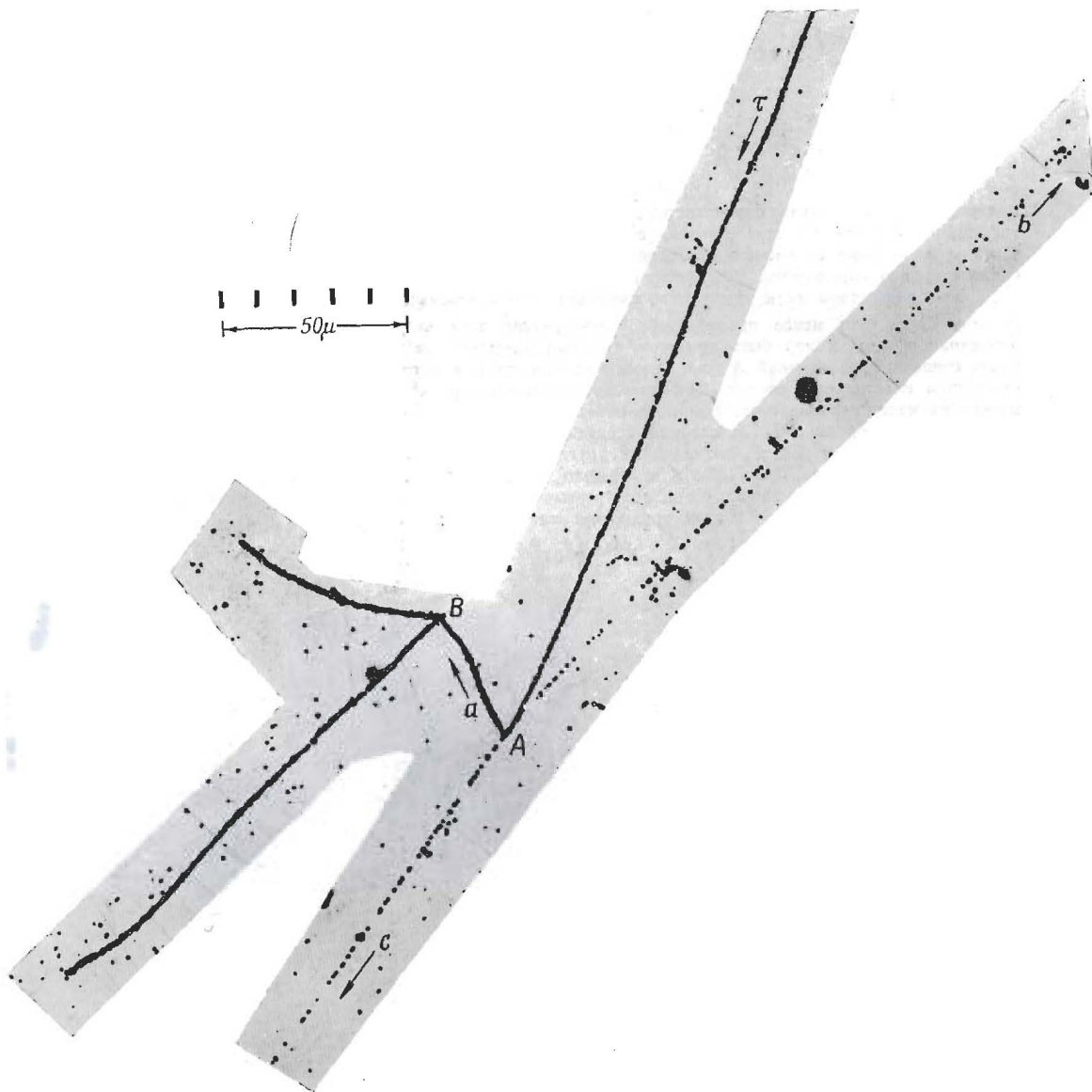


Фото 81. Первый зарегистрированный случай τ -распада. Эмульсия Кодак NT4.

Длина следа первичной частицы в эмульсии больше 3 мм, поэтому ее масса может быть определена по плотности зерен и многократному рассеянию (см. табл. 8, стр. 191). Внимание к этому случаю было привлечено благодаря следу медленной частицы *a*, которая вылетает из конечной точки пролета родительского τ -мезона *A* и останавливается в точке *B*, вызывая ядерное расщепление, типичное для ядерных захватов π^- -мезонов.

Ниже приводятся подробные результаты измерений вдоль следов:

След	Направление вылета в общей плоскости, град	Импульс, $M\text{эв}/c$	Энергия, $M\text{эв}$
<i>b</i>	$0 \pm 0,2$	101 ± 5	33 ± 3
<i>c</i>	$170,2 \pm 0,2$	98 ± 5	31 ± 3
<i>a</i>	$257 \pm 2,0$	$17,1 \pm 0,2$	$1,04 \pm 0,3$

Полное выделение энергии $65 \pm 6 M\text{эв}$

Наиболее точные значения импульсов частиц, образующих следы *b* и *c*, были получены с помощью теоремы Лами.

См. продолжение на обороте

Продолжение подписи к фото 81

Интерпретация этого случая определяется следующими факторами: во-первых, возможностью идентифицировать частицу a как π -мезон; во-вторых, измерениями плотности зерен и рассеяния частицы b , которые позволяют идентифицировать ее как мезон с массой $285 \pm 30 m_e$; в-третьих, однозначностью определения направления полета первичной частицы и ее массой; в-четвертых, равенством нулю суммарного импульса предполагаемых вторичных частиц.

Другое, более или менее правдоподобное объяснение заключается в том, что предполагаемая первичная частица может быть протоном, который достигает конца своего пробега в точке, случайно совпадающей с точкой A (что весьма маловероятно), и который, таким образом, не имеет отношения к остальным следам. При этом предположении трудно объяснить не только данные по измерению массы первичной частицы, но и некоторые особенности остальных следов, в частности тот факт, что с одним центром связаны 2 следа π -мезонов и след неидентифицированной частицы с единичным зарядом $|e|$, но нет никаких других видимых следов. Ни одного подобного случая еще не было найдено. Если они и могут быть, то, разумеется, чрезвычайно редко. Поэтому это объяснение было отклонено из-за его чрезвычайно малой вероятности и возникающих при этом трудностей интерпретации.

Brown, Camerini, Fowler, Muirhead, Powell, Ritson, *Nature*, **163**, 82 (1949).

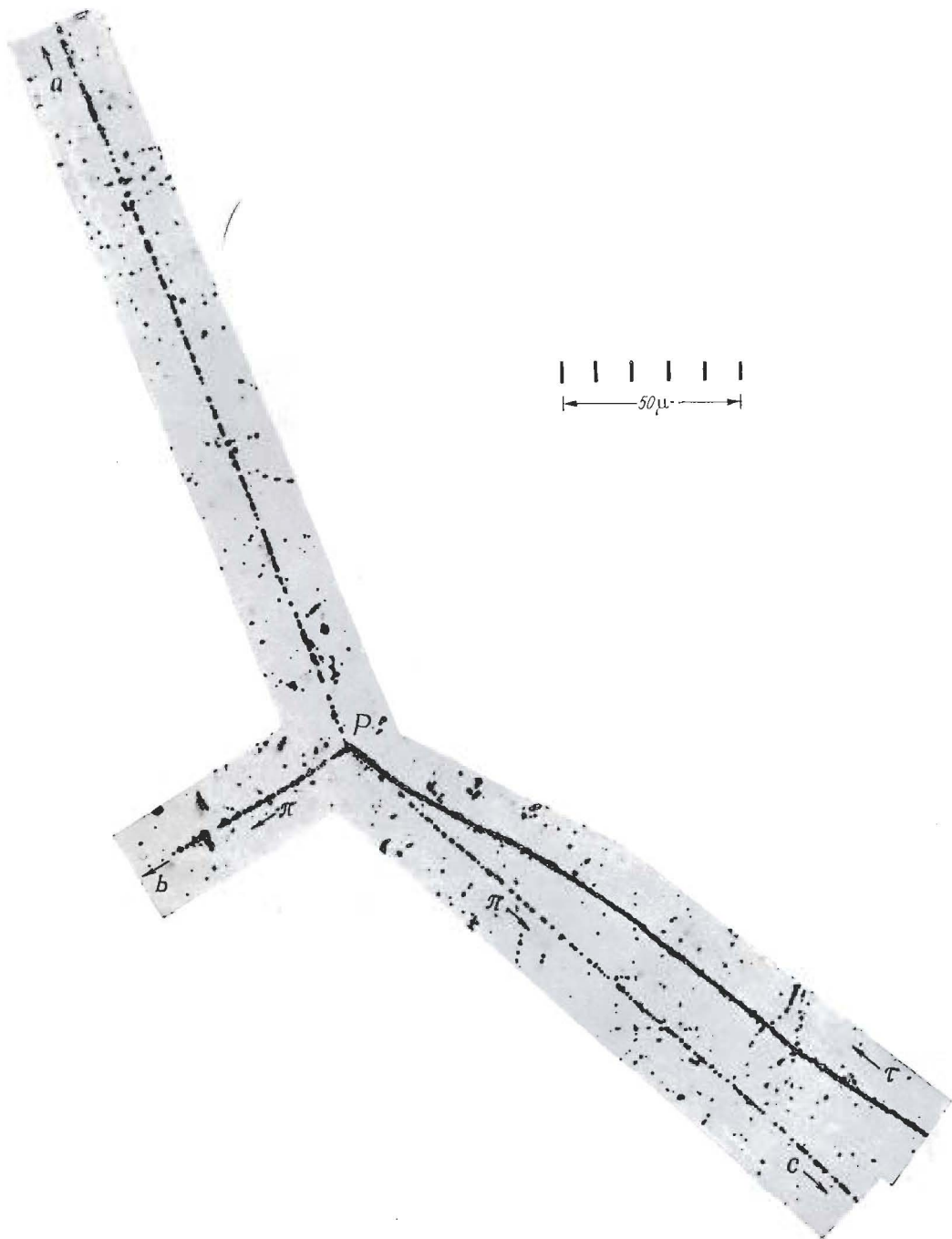


Фото 82. Один из первых обнаруженных случаев τ -распада. Эмульсия Ильфورد G5.

Длина следа первичной частицы (τ_1) равна в этом случае 2,1 мм. Измерения ее массы дали значение $960 \pm 190 m_e$. Три следа вторичных частиц компланарны с точностью $2 \pm 2^\circ$, длина одного из них в эмульсии равна 6,4 мм. В результате измерений массы частицы, давшей этот след, получено значение $285 \pm 20 m_e$. При выходе из эмульсии частица двигалась медленно и ее остаточный пробег, согласно проведенным оценкам, равен 0,4 м. Таким образом, соотношение пробег—энергия позволяет определить ее энергию и импульс с точностью, ограниченной лишь ошибками, вызываемыми „страглингом“. В результате тщательно проведенных измерений импульса частицы a и относительных направлений движения трех частиц в общей плоскости были обеспечены благоприятные условия для определения полной выделяющейся при распаде энергии Q , которая оказалась равной $75 \pm 4 \text{ Мэв}$.

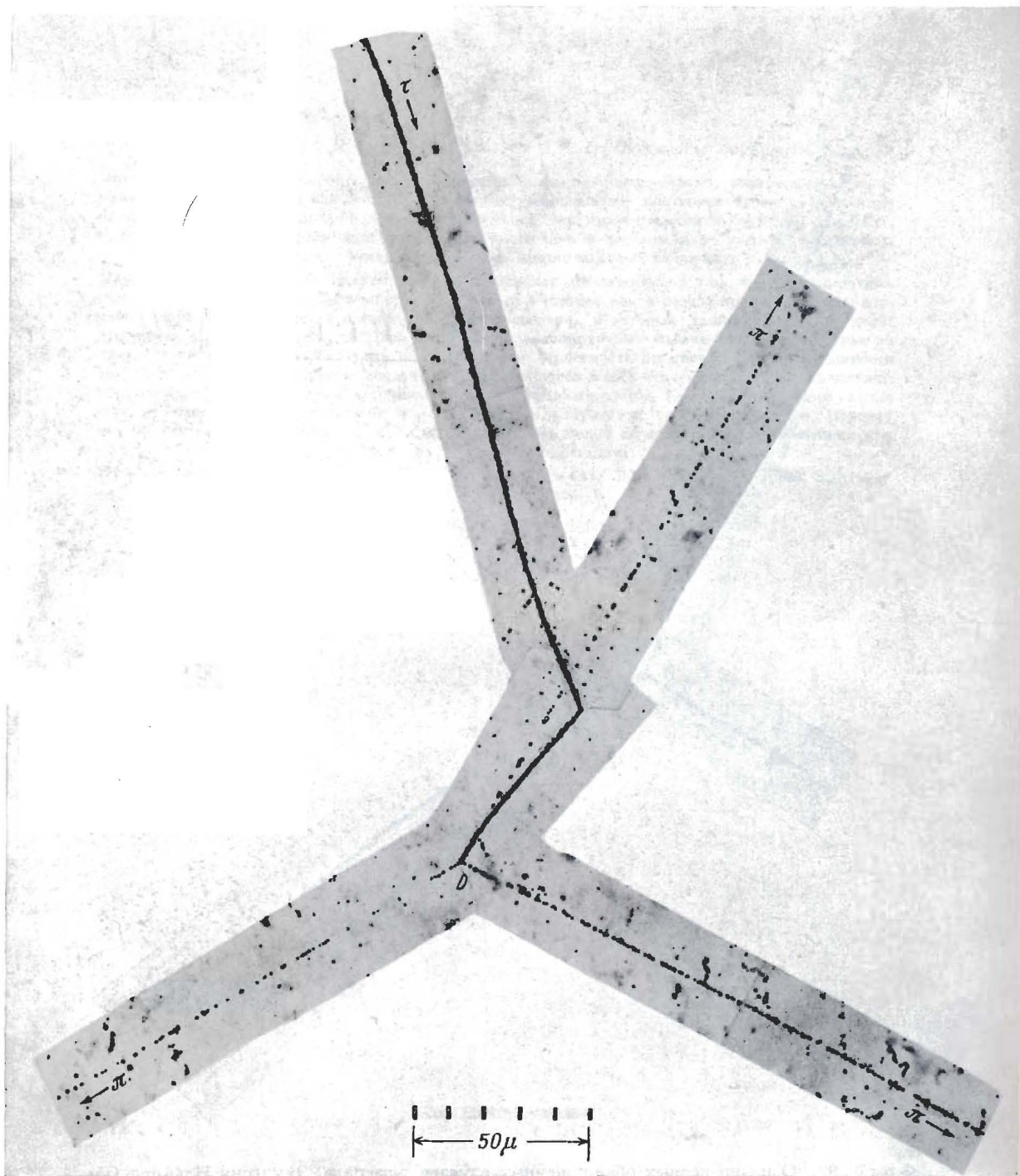


Фото 83. Распад τ -мезона. Эмульсия Ильффорд G5.

В этом случае (τ_3) все следы не превышают по длине 1 м.м. Имеющихся данных недостаточно для однозначного определения направления движения первичной частицы, однако расхождение частицы на большой угол вблизи точки распада уже служит указанием на направление движения. Идентификация этого случая основывается на следующих фактах. Три вторичные частицы коллинеарны с точностью $2 \pm 2^\circ$, а полное энергосодержание, определенное по плотности зерен в следах вторичных частиц в предположении, что они являются π -мезонами, равно 75 ± 14 Мэв.

Hodgson, Phil. Mag., 42. 1069 (1951).

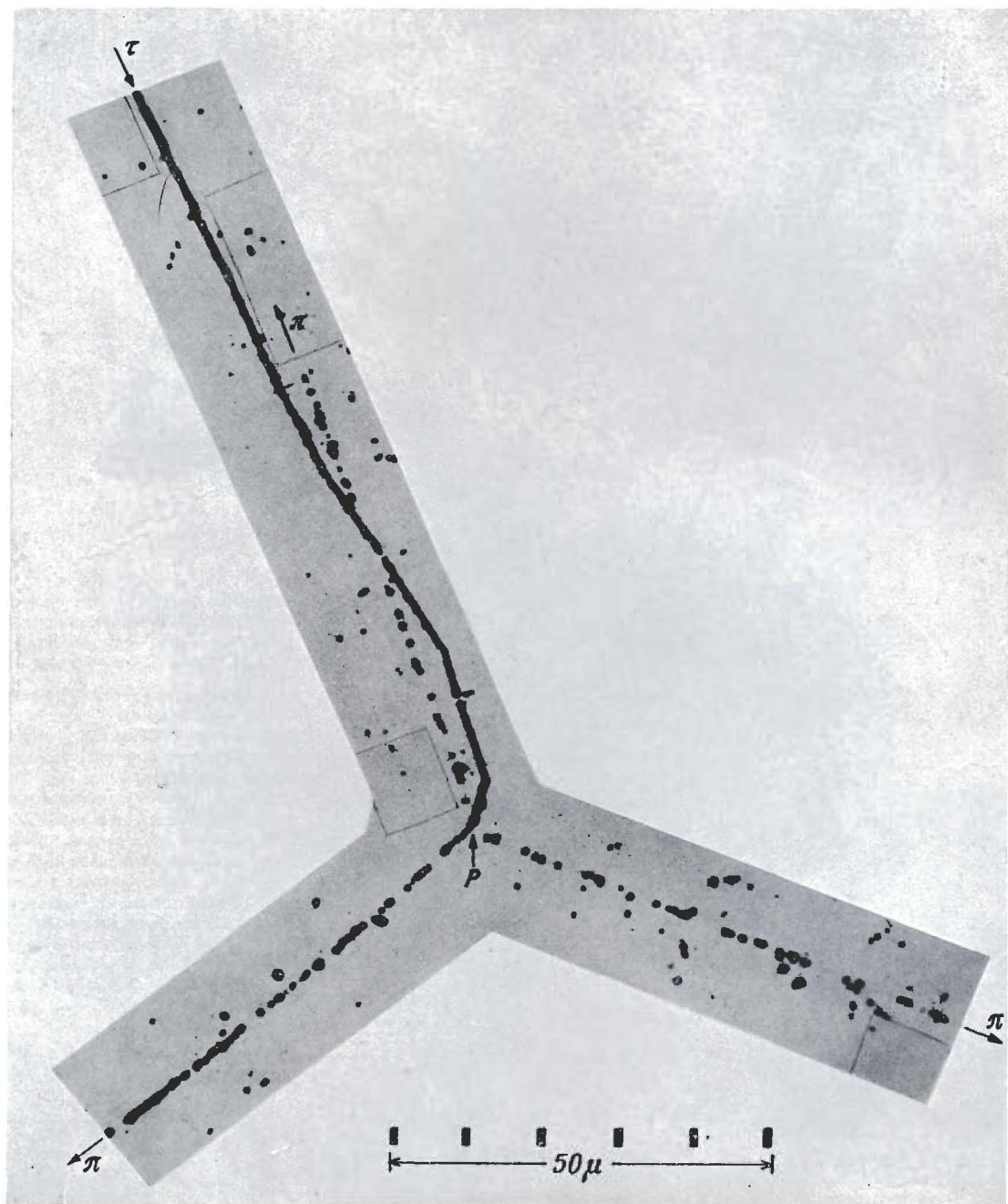


Фото 84. Распад τ -мезона. Эмульсия Ильффорд G5.

След первичной частицы (τ_0) по длине равен 8 мм, поэтому оказалось возможным однозначно определить направление движения и массу частицы. Среднее значение массы, полученное методами (g, R) и (\bar{a}, R), равно $965 \pm 100 m_e$. Три вторичных следа компланарны в пределах 2° , два из них имеют длину более 2 мм. Плотности зерен и относительные направления вылета вторичных частиц согласуются с предположением, что все три частицы имеют равные массы и являются при этом π -или μ -мезонами. Если предположить, что они являются μ -мезонами, то соответствующее значение массы τ -мезона, определяемое из законов сохранения, получается равным $774 \pm 12 m_e$, а в предположении, что они являются π -мезонами, равным $998 \pm 15 m_e$. Только второе предположение согласуется с результатом прямого измерения массы, а именно $965 \pm 100 m_e$.

Ceccarelli, Dallaporta, Merlin, Rostagni, Nature, 170, 454 (1952).

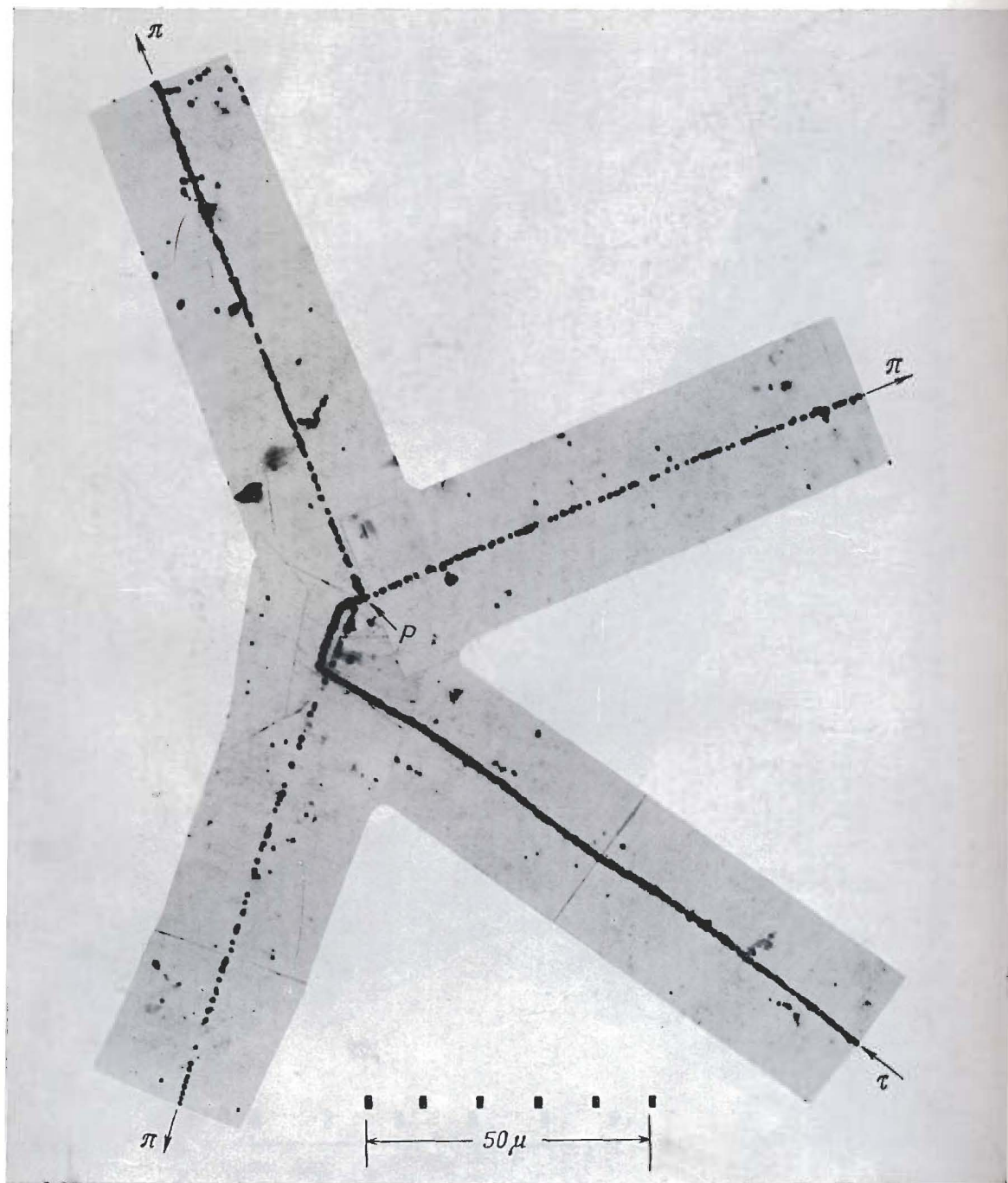


Фото 85. Распад τ -мезона. Эмульсия Ильффорд G5.

В этом случае распада (τ_2) все следы оказались короткими, и поэтому нельзя провести никаких подробных измерений. Идентификация этого случая как распада τ -мезона основывается на компланарности трех вторичных следов и наличии сильного рассеяния τ -мезона вблизи точки распада, что дает достаточное основание считать частицу приближающейся в конце своего пробега. В случае, подобном этому, единственно полезными являются данные об относительных направлениях движения вторичных частиц в их общей плоскости, что позволяет вычислить распределение энергии между ними.

Мелоп М. С. К., неопубликованная работа.

Фото 86. Первый обнаруженный случай последовательного распада $\tau \rightarrow \pi \rightarrow \mu \rightarrow e$.
Эмульсия Ильфорт G5.

τ -мезон достигает конца своего пробега в точке P и распадается на три частицы, начальные направления движения которых коллинеарны. Одна из трех вторичных частиц останавливается в точке Q , откуда испускается μ -мезон, который в свою очередь распадается в точке R с испусканием электрона. След μ -мезона составляет большой угол с плоскостью эмульсии, и это уменьшает видимый в проекции пробег. В другом аналогичном случае (τ_3), обнаруженном Варони и др. (Royal Society Conference, London, January 1953), μ -мезон вышел из эмульсии до своего распада.

Panetti, Scarsi, Nuovo Cimento, 10, 687 (1953).



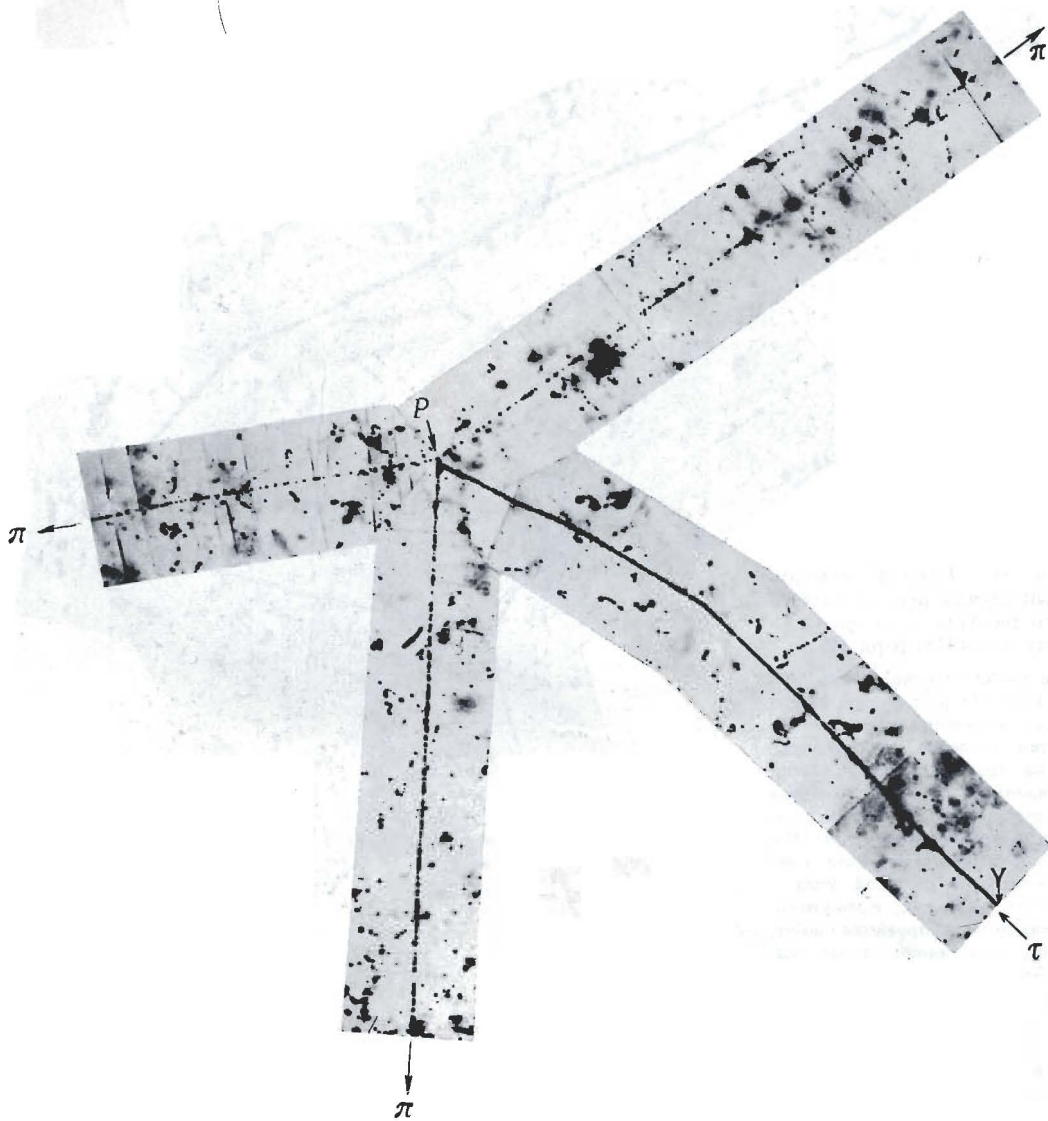
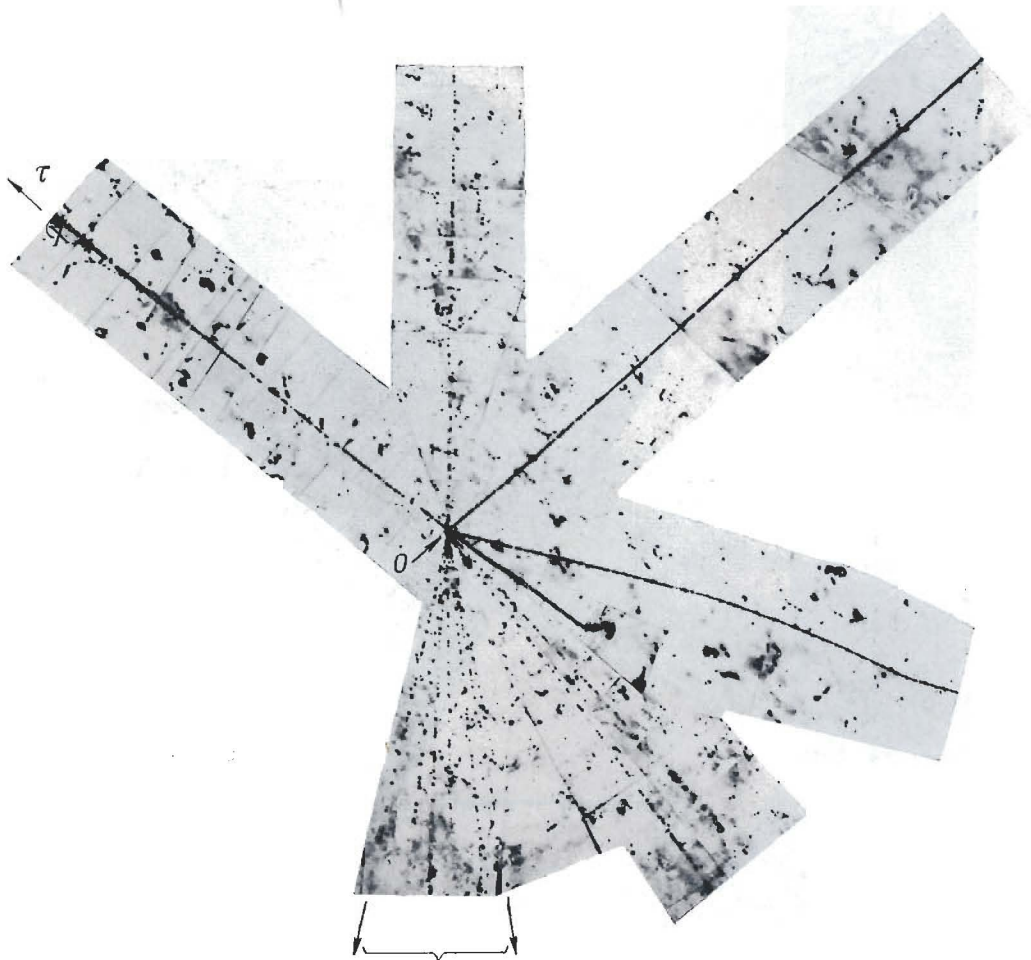


Фото 87 и 88. Образование мезона непосредственно при ядерном столкновении. Эмульсия Ильфорт G5. Этот случай явился первым доказательством непосредственного образования τ -мезонов при ядерных взаимодействиях. τ -мезон вылетает из точки O ядерного столкновения в эмульсии и останавливается в эмульсии в точке P . Полный пробег мезона составляет около 7 мм. Расстояние между точками X и Y равно 6 мм.

Ceccarelli, Dallaporta, Merlin, Quarenì, Zorn, Nuovo Cimento, 10, 681 (1953).



Φ ο τ ο 88

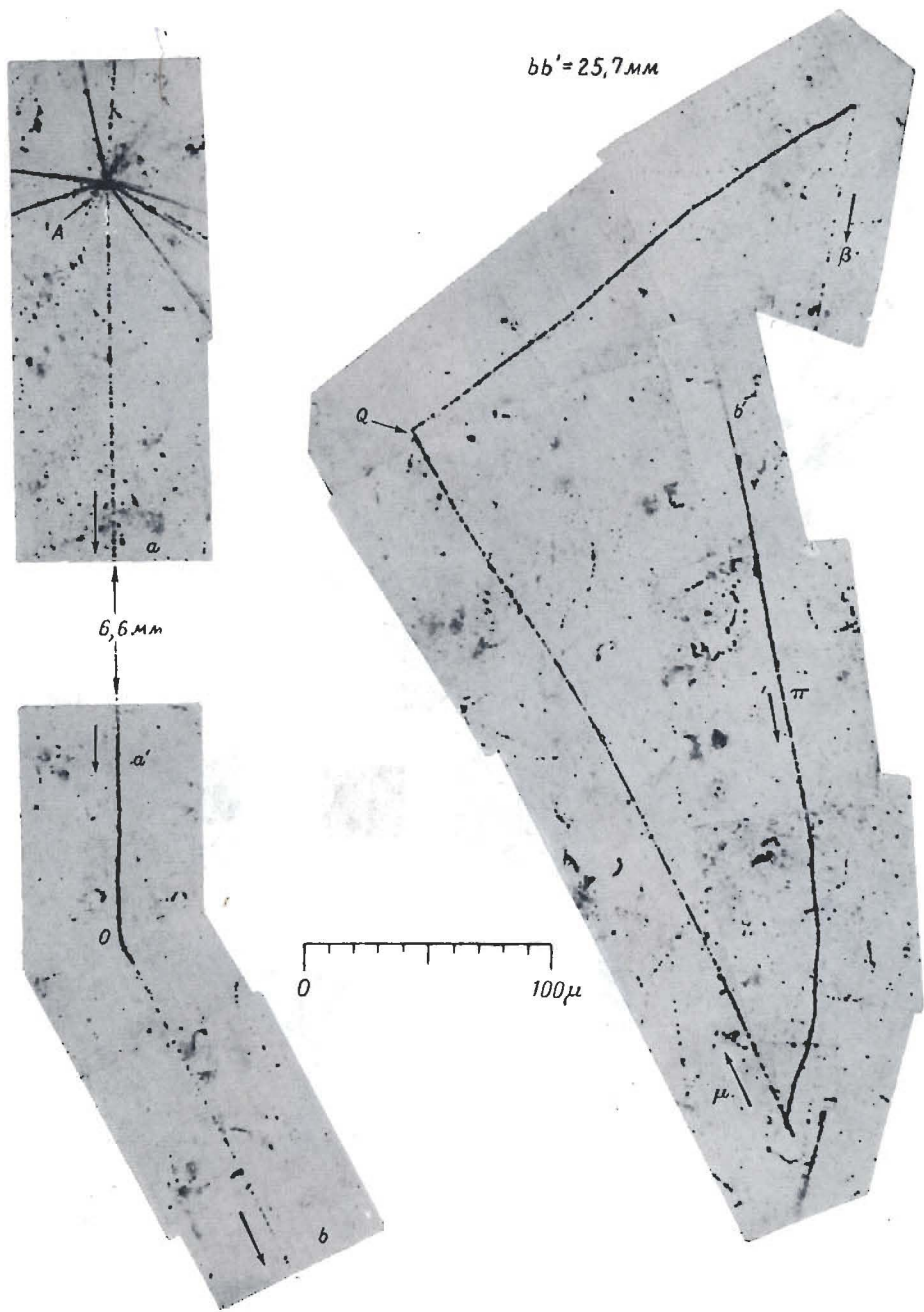


Фото 89. Распад K -частицы с испусканием вторичного π -мезона. Альтернативная схема распада τ -мезона. Эмульсия Ильффорд G5.

На фотографии показан один из первых обнаруженных случаев распада тяжелого мезона с испусканием вторичного π^+ -мезона низкой энергии. π -мезон с энергией 41,5 Мэв идентифицирован по распаду $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$. В результате нулоновского взаимодействия при столкновении с ядром μ -мезон сильно рассеивается в точке Q.

Обычно предполагается, что подобные случаи являются альтернативными распадами τ -мезона: $\tau^+ \rightarrow \pi^+ + 2\pi^0$; $Q = 84$ Мэв. Правильность этой интерпретации можно было бы проверить путем определения максимальной энергии π -мезонов $E_{\pi}(\text{макс.})$. Она должна быть равна 53 Мэв (см. фиг. 128), т. е. быть значительно большей, чем при обычном распаде, когда соответствующее значение максимальной энергии равно ~ 48 Мэв.

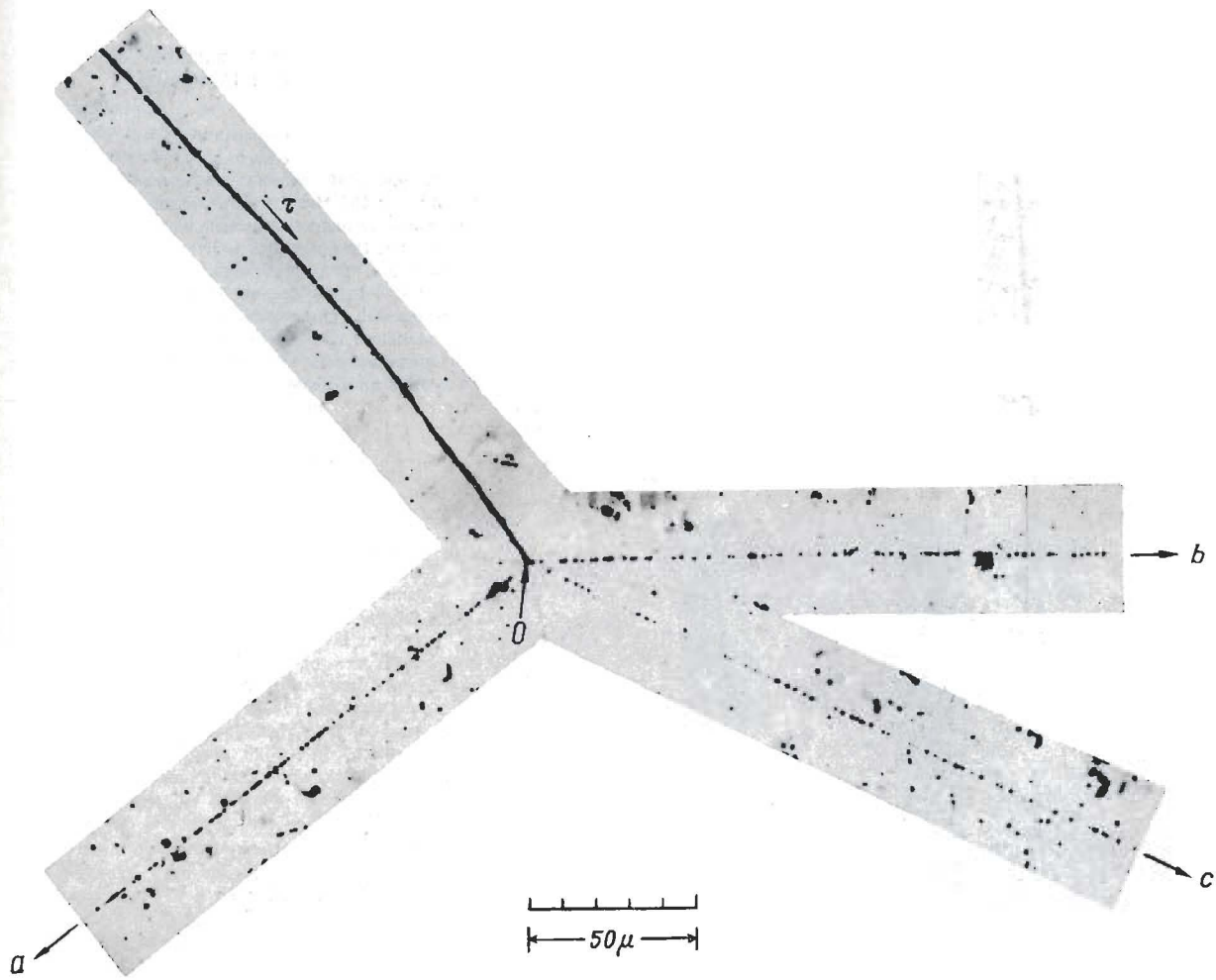


Фото 90. Распад K -мезона по схеме τ на легу. Эмульсия Ильфторд G5.

Фото 91. Первый зарегистрированный случай распада остановившегося заряженного K -мезона. Эмульсия Ильфорд G5.

Распад был обнаружен в эксперименте по определению энергетического распределения электронов, испускаемых при распаде μ -мезонов. Вторичная частица образует след длиной 2,2 м.м. Наблюдаемое значение параметра рассеяния \bar{a} соответствует импульсу 250 $M\beta/c$, т. е. величине в несколько раз большей, чем максимальное значение импульса электронов, образующихся при β -распаде μ -мезона. Поэтому был тщательно изучен след первичной частицы длиной ~ 4 м.м. В результате измерений для массы частицы получено значение $\sim 1320 \pm 250 m_e$. Природа вторичной частицы не могла быть определена. Однако, поскольку ее импульс больше, чем соответствующие значения импульсов π -мезонов, образующихся при распаде $K_{\pi 2}$, можно предположить, что этот случай представляет собой распад тяжелого мезона на μ -мезон или электрон. В настоящее время считается, что он скорее всего является примером распада по схеме $K_{\mu 2}$.

O' Ceallaigh, Phil. Mag., 42, 1032 (1951).

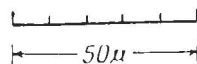


Фото 92. Распад K -мезона. Эмульсия
Ильфорд G5.

Это второй найденный в фотографической эмульсии случай распада тяжелого мезона. На первый взгляд он выглядит как последовательный распад $\pi \rightarrow \mu \rightarrow \beta$. Однако пробег μ -мезона составляет около 1100μ , что намного больше любого наблюдавшегося до сих пор значения пробега μ -мезона, образующегося при распаде π -мезона в покое. Измерения вдоль следа вторичной частицы показали, что ее масса заключена между значениями 200 и $300 m_e$. Этот результат наряду с фактом распада частицы, по-видимому, на электрон является, по всей вероятности, решающим доводом в пользу того, что вторичная частица была действительно μ -мезоном, поскольку прямой β -распад π -мезона в эмульсии никем до сих пор непосредственно не наблюдался.

Допустить, что этот случай представлял собой процесс $\pi \rightarrow \mu \rightarrow \beta$, было трудно по следующим причинам.

Как известно, имеется небольшая вероятность того, что π -мезон распадется до остановки в эмульсии. Такой „распад на лету“ мог привести к образованию μ -мезона с необычным значением пробега (см. стр. 164), но для того, чтобы пробег был больше нормального, μ -мезон должен был вылететь вперед, а не назад относительно направления движения родительской частицы. Однако вид и расположение следов убедительно показывают, что при распаде частица либо была „попящейся“, либо двигалась в направлении, почти противоположном тому, в котором был испущен μ -мезон.

Вывод о том, что этот случай представляет собой новый тип распада, был подтвержден измерениями вдоль следа первичной частицы, в результате которых для массы первичной частицы было получено значение $1125 \pm 200 m_e$.

O'Connell & Phil. Mag., 42, 1032 (1951).



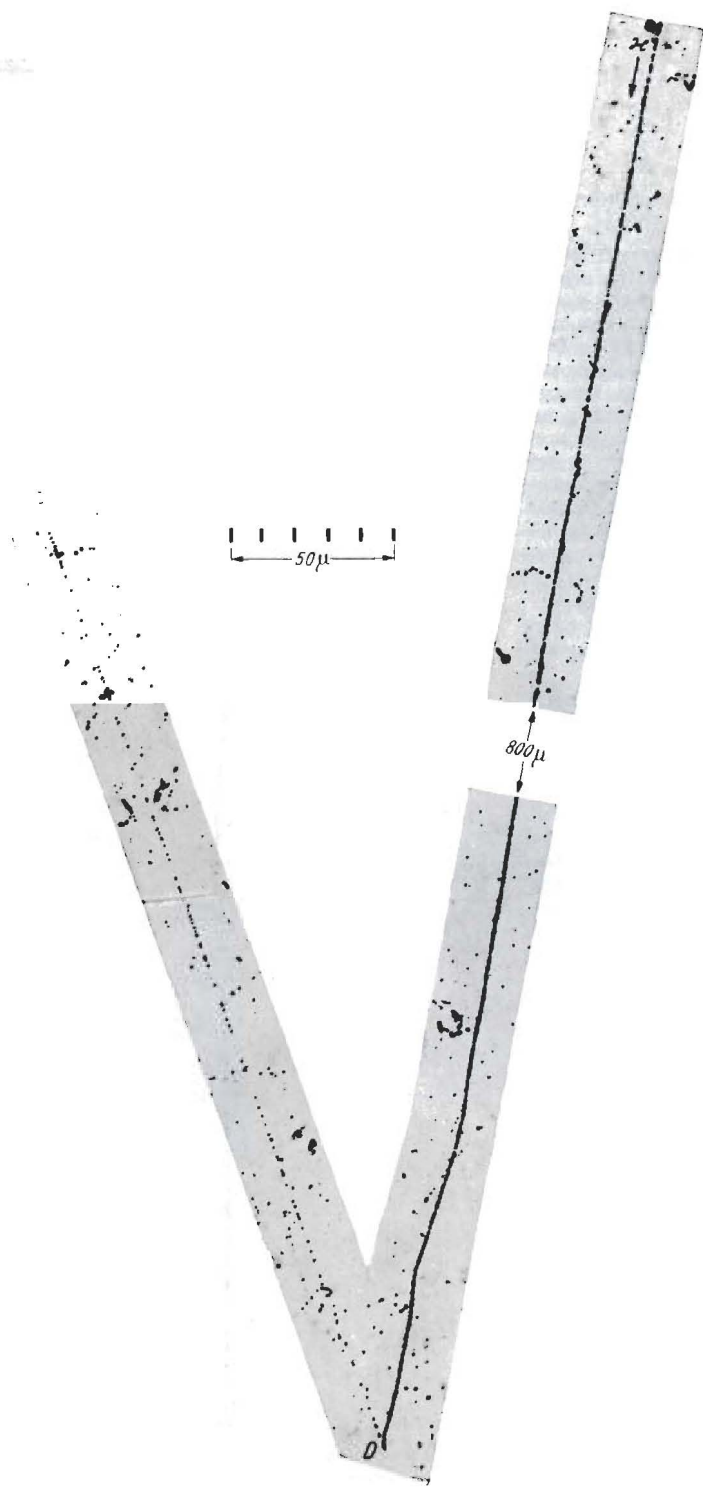


Фото 93. Распад тяжелого мезона по схеме $K_{\mu 3}$. Эмульсия Ильфод G5.

В этом случае длина следа вторичной частицы была равна 9 мм. Измерения рассеяния и плотности зерен показали, что частица являлась μ -мезоном, испущенным с энергией ~ 34 Мэв. След первичной частицы имел длину 1,5 мм, и в результате оценок ее массы получено значение $1000 \pm 400 m_{e\mu}$

Длина следа вторичной частицы была настолько большой, что можно было провести измерения массы тремя независимыми способами. Результаты можно было затем сравнить с данными, полученными для длинных следов μ -мезонов, зарегистрированных в той же эмульсии (см. фиг. 130).

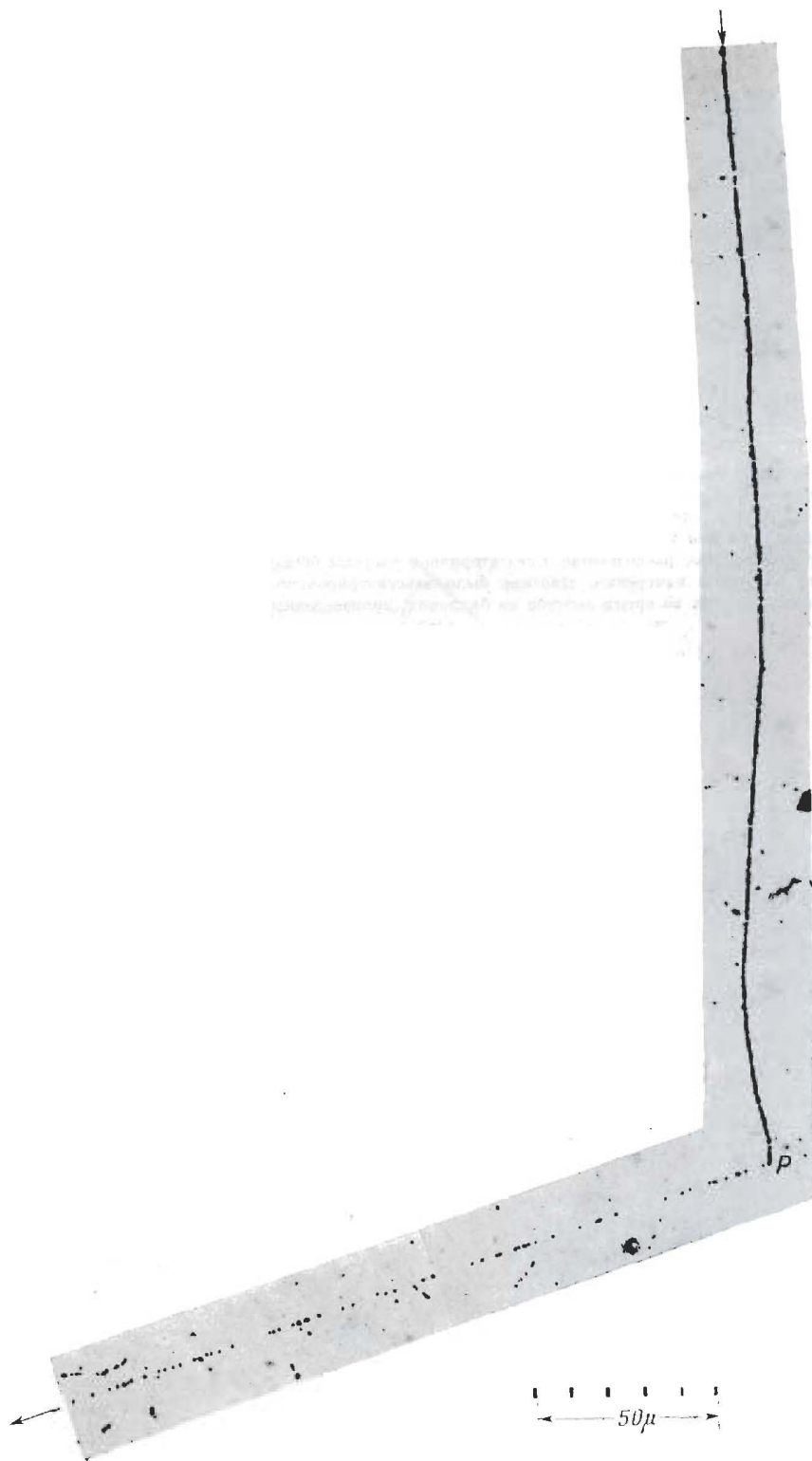


Фото 94. Первый зарегистрированный случай распада тяжелого мезона по схеме $K_{\pi 2}$. Эмульсия Ильффорд G5.

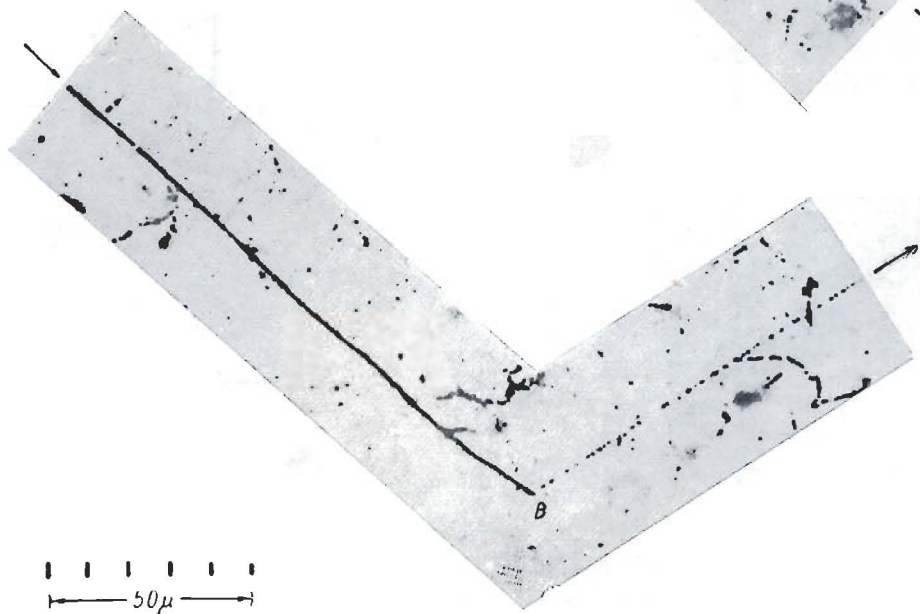
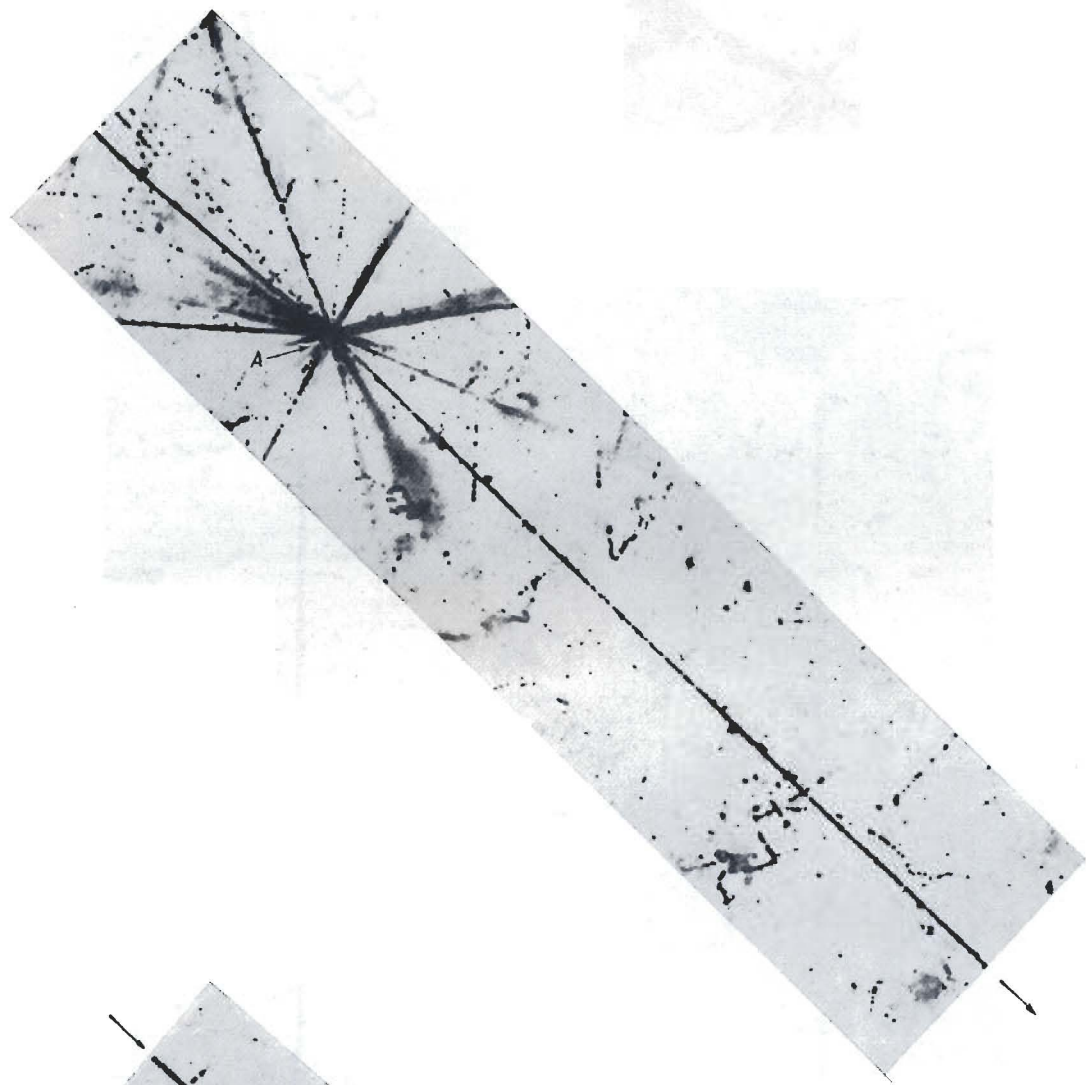
В этом случае след первичной частицы имел длину всего 630μ . Согласно проведенным оценкам, ее масса равна $1380 \pm 600 m_e$. Идентификация частицы как π -мезона основана на результатах измерения вдоль следа вторичной частицы, который имел длину $19,5$ мм. Результаты измерений \bar{q} и g^* показаны на фиг. 131.

Мероп, О'Селлаigh, Proc. Roy. Soc., A221, 292 (1954).

Фото 95. Первый зарегистрированный случай прямого образования медленного тяжелого мезона. Эмульсия Ильфорд G5.

Сильно поизующая частица испускается из расщепления в точке *A* и достигает конца своего пробега в точке *B*, где она и распадается. Согласно измерениям масса частицы была равна $1150 \pm \pm 200 m_p$, откуда следовало, что она является тяжелым мезоном. Вторичная частица вылетела с энергией $\sim 16 Mэв$ и под углом 160° по отношению к линии движения родительской частицы, вызвавшей первичное расщепление. След вторичной частицы был слишком коротким и не позволял провести надежные измерения. Явление было зарегистрировано в пластинках, экспонированных на больших высотах во время полетов на баллонах, произведенных в Кальри (Сардиния) в июне 1952 г.

Levi-Setti, Tomasini, Nuovo Cimento, 9, 1244 (1952).



50μ

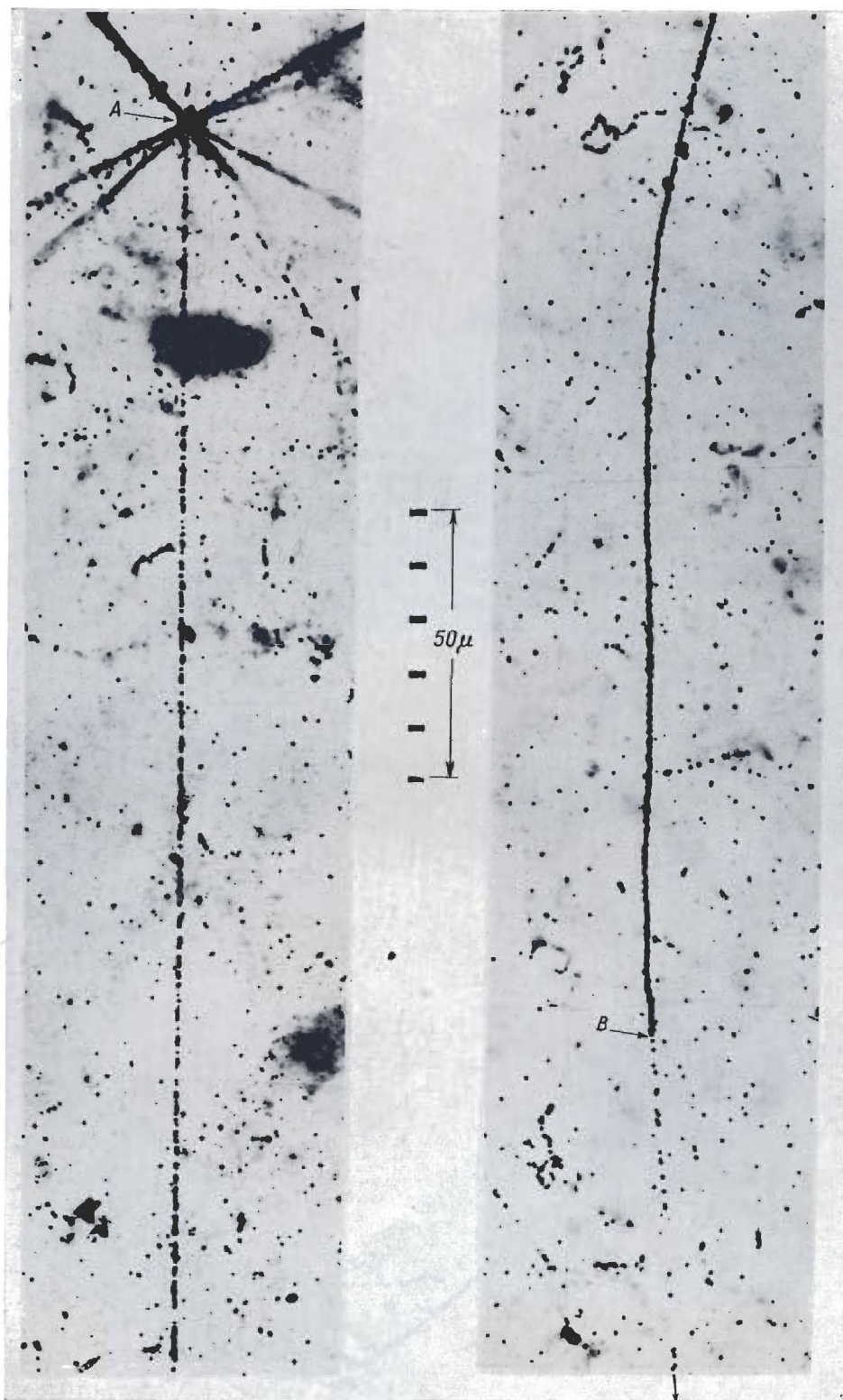


Фото 96. Непосредственное образование медленной K -частицы. Эмульсия Ильффорд G5.

Один из первых примеров прямого образования тяжелого мезона. K -мезон с пробегом 14 мм испустил при ядерном расщеплении в точке A и достиг конца своего пробега в точке B , где он и распался. Измеренная масса тяжелого мезона оказалась равной $1050 \pm 150 m_e$. Вторичная частица по измерениям \bar{a} и g была идентифицирована как μ -мезон с энергией $80 \pm 15 Mэв$. Это свидетельствовало о том, что родительская частица распалась по схеме κ -распада.

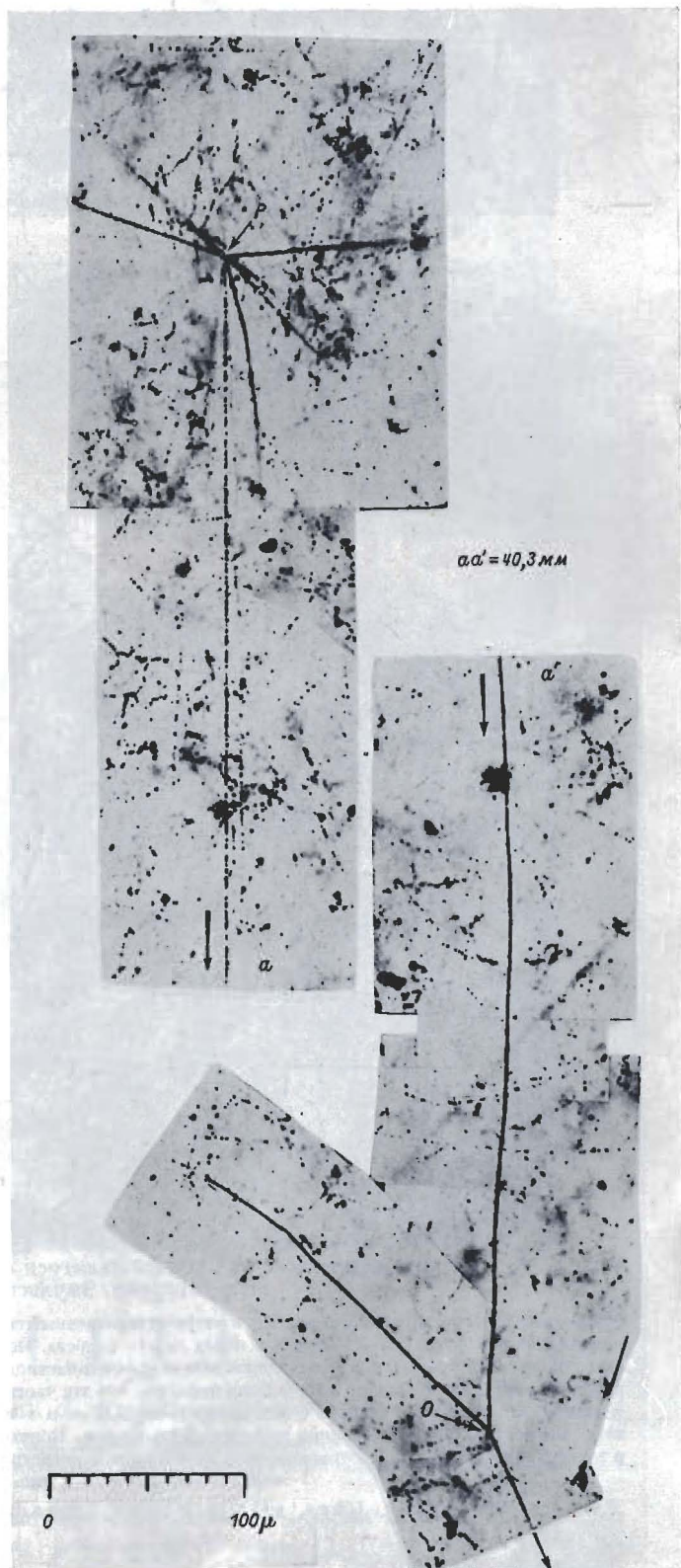
Случай был зарегистрирован в пластинках, поднятых в стратосферу на баллонах и экспонированных в течение 4 час на высоте 27 км.

Фото 97. Ядерное взаимодействие оставившего отрицательного K -мезона.
Эмульсия Ильффорд G5.

Этот случай был обнаружен во время пересмотра и внимательного обследования большого числа „звезд“. Он привлек к себе внимание тем, что частица α приближалась к точке расщепления O , а ее след рассеивался меньше, чем след π^- -мезона (ср. с фото 37—39). Частица была прослежена назад к родительской „звезде“ P , и ее масса была определена равной $970 \pm 90 m_e$.

Случай является типичным для ядерных захватов K^- -мезонов, в которых только небольшая часть освобождаемой энергии передается заряженным продуктам расщепления.

di Corato, Locatelli, Mignone,
Tomasi ni. Nuovo Cimento Suppl., 12, 270 (1954).



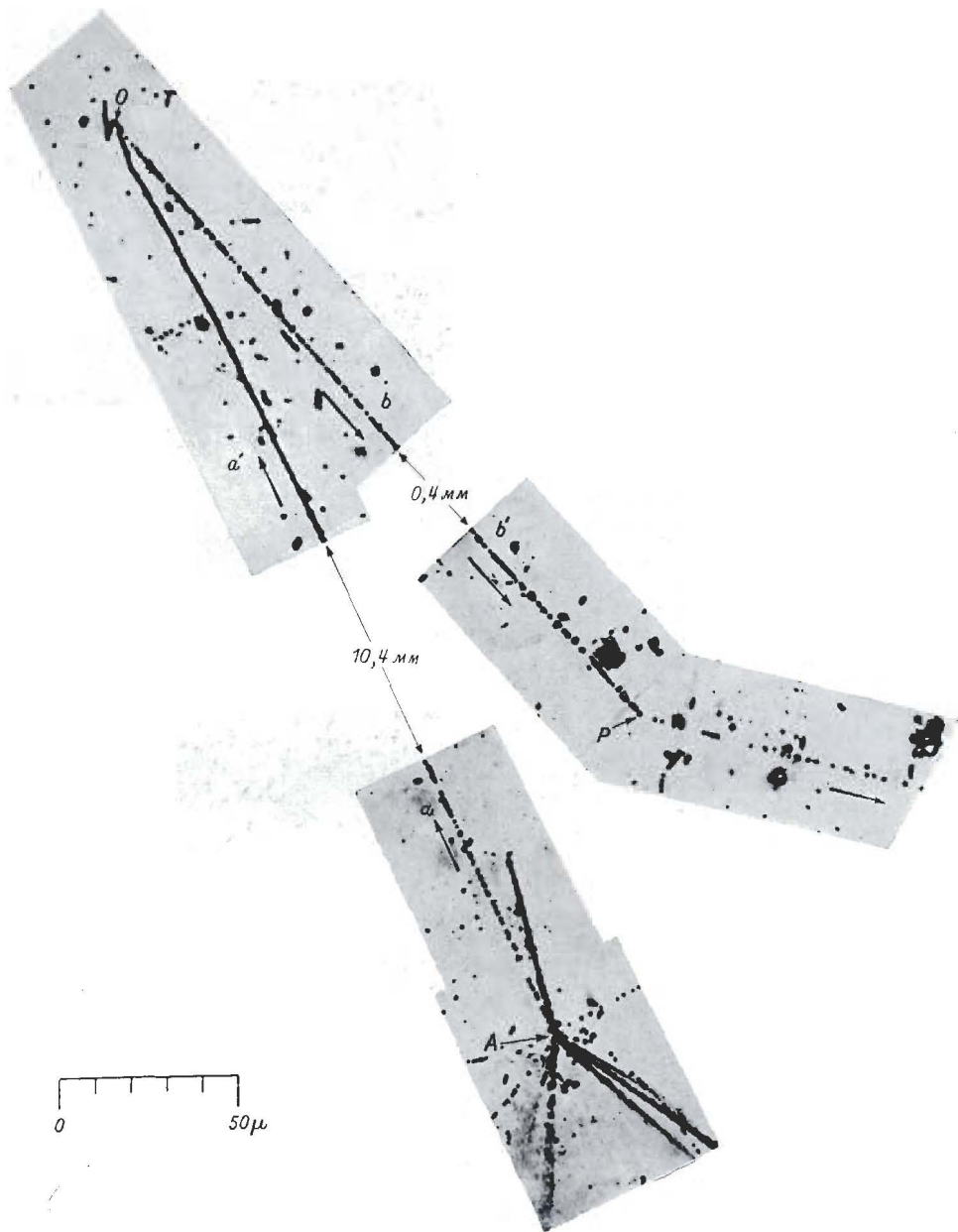


Фото 98. Ядерное взаимодействие остановившегося отрицательного K -мезона с испусканием вторичного гиперона. Эмульсия Ильффорд G5.

Это первый зарегистрированный случай, в котором заряженный гиперон испустился в результате расщепления, вызванного ядерным взаимодействием K^- -мезона в конце своего пробега. Измеренное значение массы K -мезона равно $1170 \pm 230 m_e$. Гиперон распадается в точке P с испусканием вторичной частицы, след которой очень короткий и не позволяет провести надежных измерений. Однако можно было показать, что эта частица легче K -мезона. Если предположить, что он является π -мезоном, то выделение энергии Q для схемы распада $Y \rightarrow n + \pi$ оказывается равным 95 ± 20 Мэв. Поэтому можно считать, что частица почти наверняка является Σ -гипероном. Короткий след сильно рассеиваемой частицы, берущий начало в точке O , не может быть идентифицирован. В результате регистрации этого случая были получены ценные данные о близкой связи K -мезонов и гиперонов (см. стр. 216).

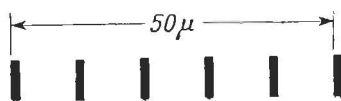


Фото 99. „Звезды”, обусловленные захватом K^- -мезонов ядрами эмульсии Ильфورد G5.

- a* — нельзя различить ни одного следа вторичной частицы. Такие случаи обозначаются иногда как K_e .
- б* — π -мезон и гиперон разлетаются в противоположных направлениях. Случай представляет собой взаимодействие со свободным протоном $K^- + p \rightarrow \Sigma^+ + \pi^-$.
- в* и *г* — типичные взаимодействия, сопровождаемые испусканием нескольких однозарядных частиц.

Бристольская группа, неопубликованная работа.

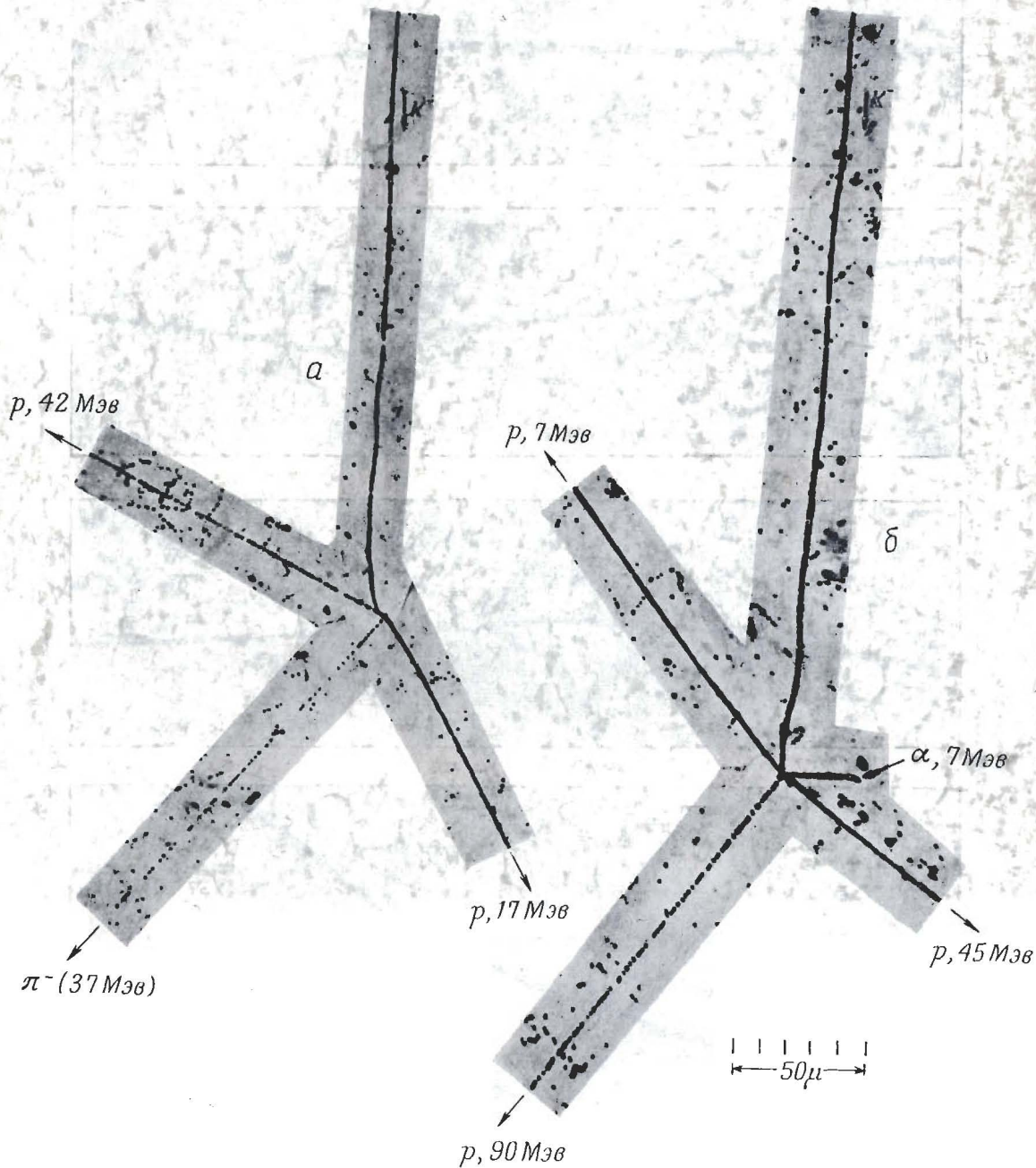


Фото 100. Расщепления в результате захвата K^- -мезонов ядрами эмульсии Иلفорд G5.
 Бристольская группа, неопубликованная работа.

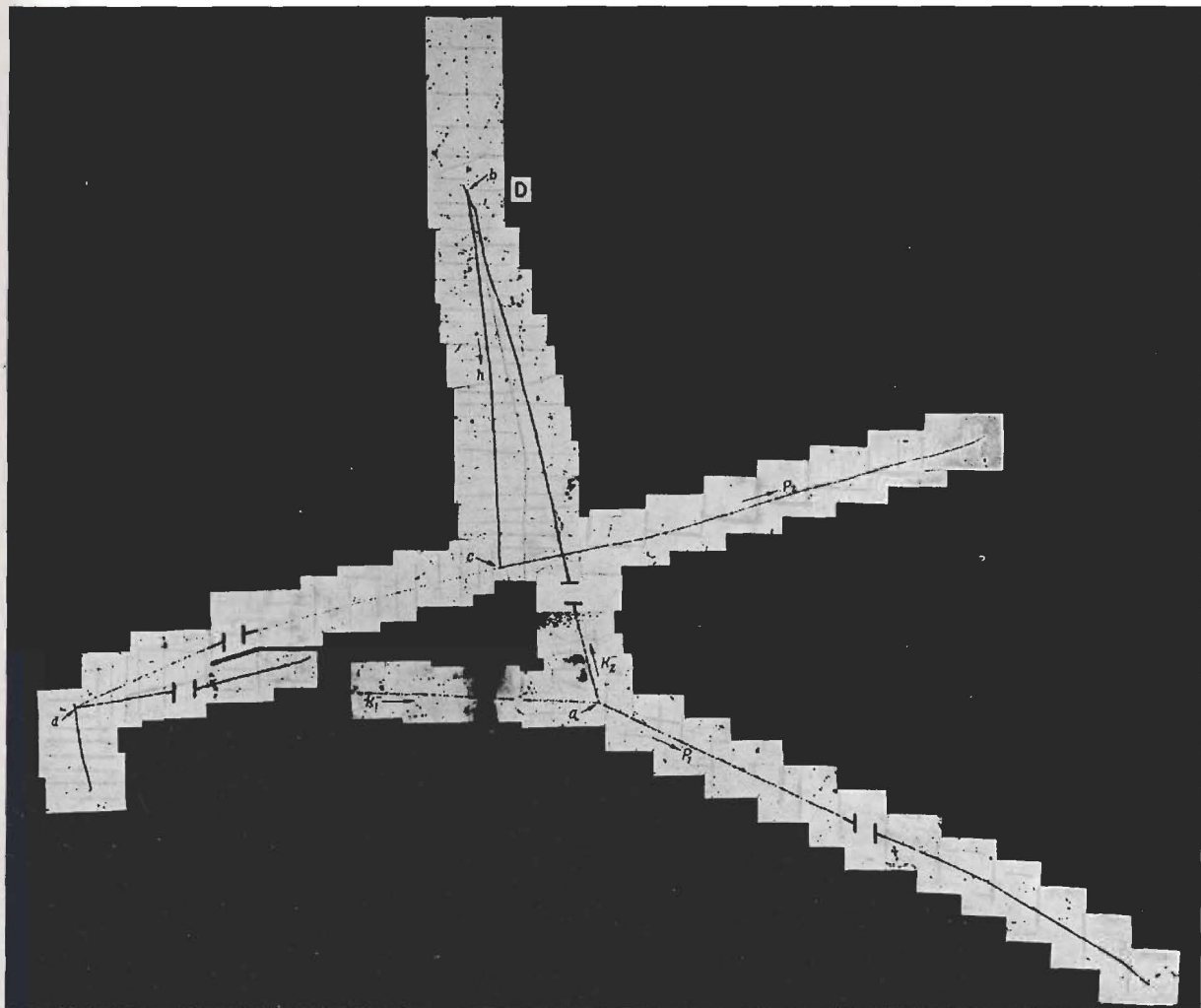


Фото 101. Последовательные процессы с участием отрицательного K -мезона. Эмульсия Ильфорт G5.

Отрицательный K -мезон сталкивается с протоном в точке a , рассеивается на нем и достигает конца своего пробега в точке b . Протон отдачи оставляет след p_1 . В результате захвата K^- -мезона ядром легкого элемента эмульсии испустились четыре вторичные заряженные частицы. Одна из них была гиперфрагментом (след h), который достиг конца своего пробега в точке c и там распался на протон, оставивший след p_2 , другой протон с очень коротким пробегом и отрицательный π -мезон, который в свою очередь захватился ядром в точке d . Гиперфрагмент был, вероятно, ${}^4\text{He}$ или ${}^5\text{Li}$.

Oliver, Leipelt.

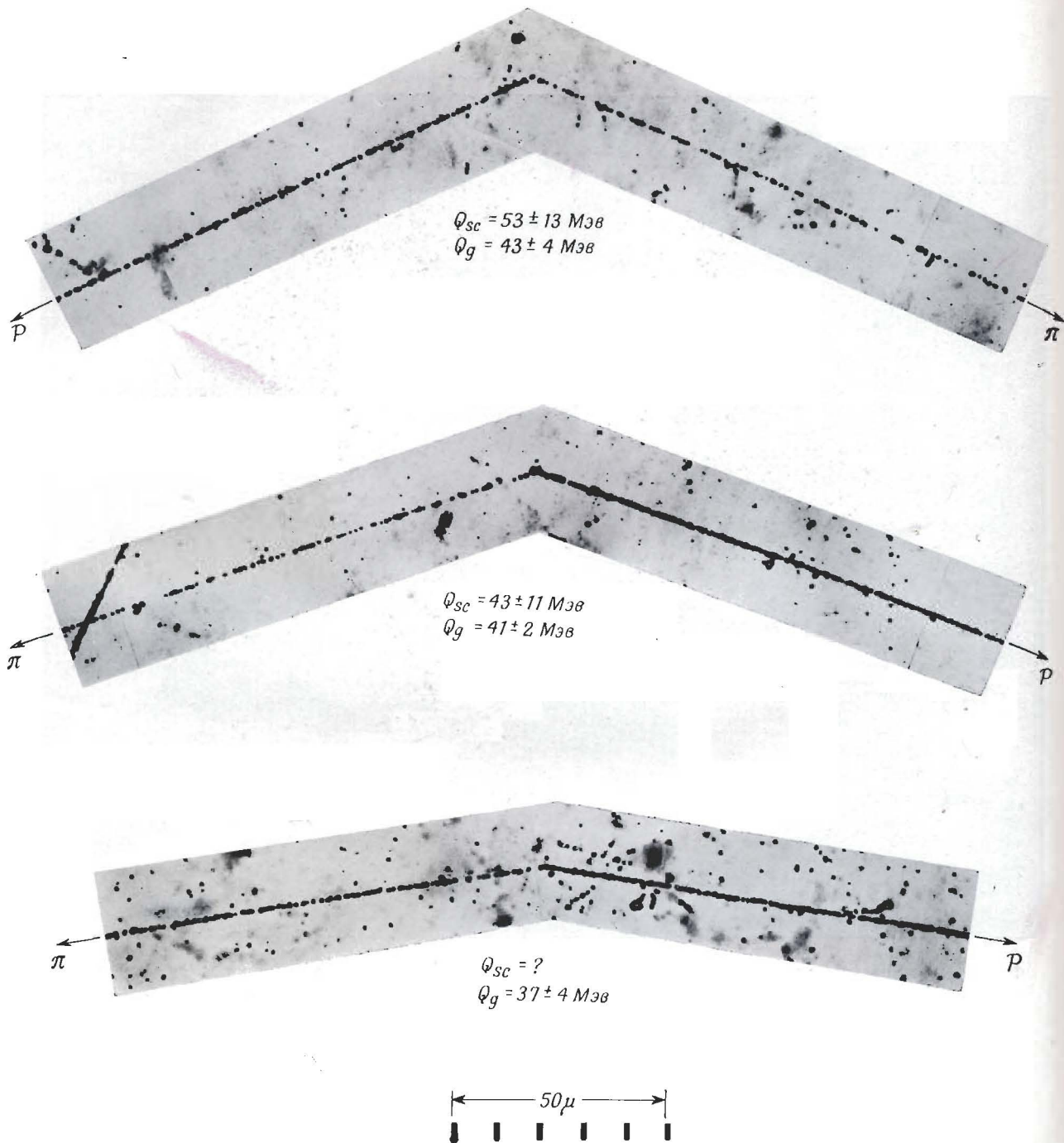


Фото 102. Следы частиц, связанных с распадом Λ^0 -частиц. Эмульсия Ильфторд G5.

Три из первых фотографий типичных V-случаев, соответствующих распаду Λ^0 -частиц малой энергии. Измерения были проведены в отдельных пластинках, протон и π -мезон в каждом из этих случаев были идентифицированы методом (g^*, \bar{a}) (см. стр. 119). Оценки значений Q были проведены исходя из значений энергий частиц, определенных по многократному рассеянию или по наблюдаемой плотности зерен; соответствующие значения Q обозначены как Q_{sc} и Q_g . Гораздо более точно значения Q могут быть определены с помощью стоек бесплодных эмульсий, так как при этом энергии частиц могут определяться по их пробегам (см. Фиг. 149, стр. 224).

Следует отметить, что в большинстве случаев распада Λ^0 -частиц, обнаруженных в эмульсионных стойках, углы между направлениями испускания протона и мезона велики. Это объясняется тем, что зарегистрированные Λ^0 -частицы имели малые энергии. При более высоких значениях их энергий вторичные π -мезоны имеют большую вероятность выйти из стойки. В результате при тех методах поиска Λ^0 -частиц, которые основаны на прослеживании π -мезонов в точке их образования, Λ^0 -частицы высокой энергии регистрируются только в редких случаях.

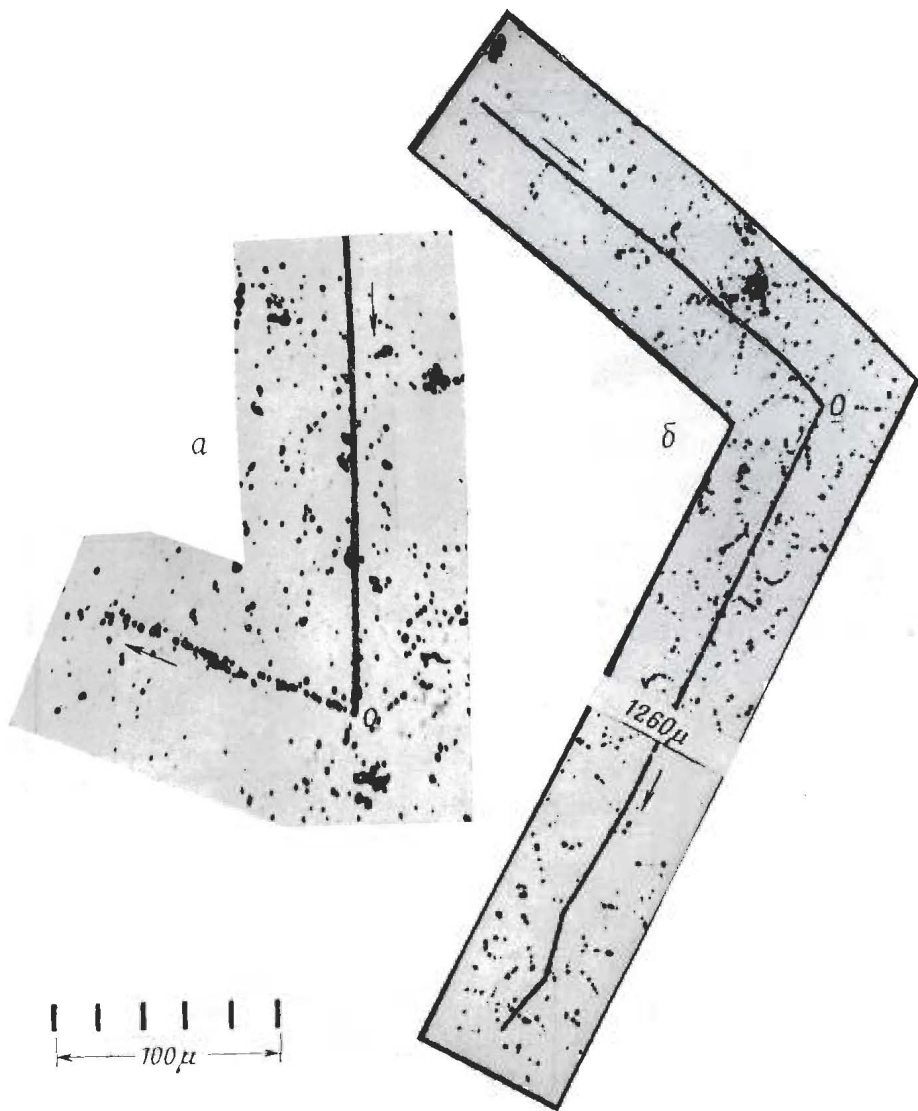


Фото 103. Первые наблюдения распада Σ -частиц. Эмульсия Ильфорд G5.

a — это первый случай, идентифицированный как распад гиперона. Частица останавливается в точке *O* и распадается с испусканием быстрой вторичной частицы. Этот случай был зарегистрирован до введения бесподложечных эмульсий, и след вторичной частицы был слишком коротким (120 μ), чтобы можно было ее идентифицировать определенным образом. Однако можно было показать, что частица минимальной ионизации не была электроном. Первичная частица была идентифицирована по результатам измерения массы при длине следа ~ 1 см. Полученное таким образом значение массы составило $2500 \pm 345 m_e$. Это давало основание исключить возможность того, что данный случай связан с распадом *K*-мезона. *b* — это первый пример распада Σ^+ -частицы по схеме $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$. Наблюдаемый пробег протона был равен $1,67 \pm 0,02$ м. В предположении, что распад произошел по приведенной выше схеме, для массы родительской частицы найдено значение $2320 \pm 6 m_e$. Величина массы, определенная по многократному рассеянию методом постоянной стрелы прогиба, равна $2500 \pm 620 m_e$.

Bonetti, Levi-Setti, Panetti, Tomasini, Nuovo Cimento, 10, 345, 1736 (1953).

Фото 104. Один из первых зарегистрированных случаев распада заряженного гиперона на лету. Эмульсия Ильфорд G5.

Заряженный гиперон (след *a*) вылетел из „звезды“ *A* и после прохождения 4,7 мм распался на лету в точке *B*. Масса гиперона, определенная методом (g^* , \bar{a}), равна $(2760 \pm 500) m_e$. Разница в плотности зерен двух следов с очевидностью свидетельствует о том, что скорость вторичной частицы (след *b*) существенно возросла по сравнению со скоростью первичной. След вторичной частицы расположен под большим углом к плоскости эмульсии, и поэтому нельзя было провести точные измерения рассеяния, однако удалось показать, что масса частицы меньше массы протона. Предполагая, что частица является π -мезоном, можно определить ее энергию из плотности зерен. Затем можно определить значение *Q* для реакции типа $\Sigma^\pm \rightarrow n + \pi^\pm$. Полученное таким образом значение *Q* оказалось равным ~ 100 Мэв.

Friedlander, Phil. Mag., 45, 418 (1954)

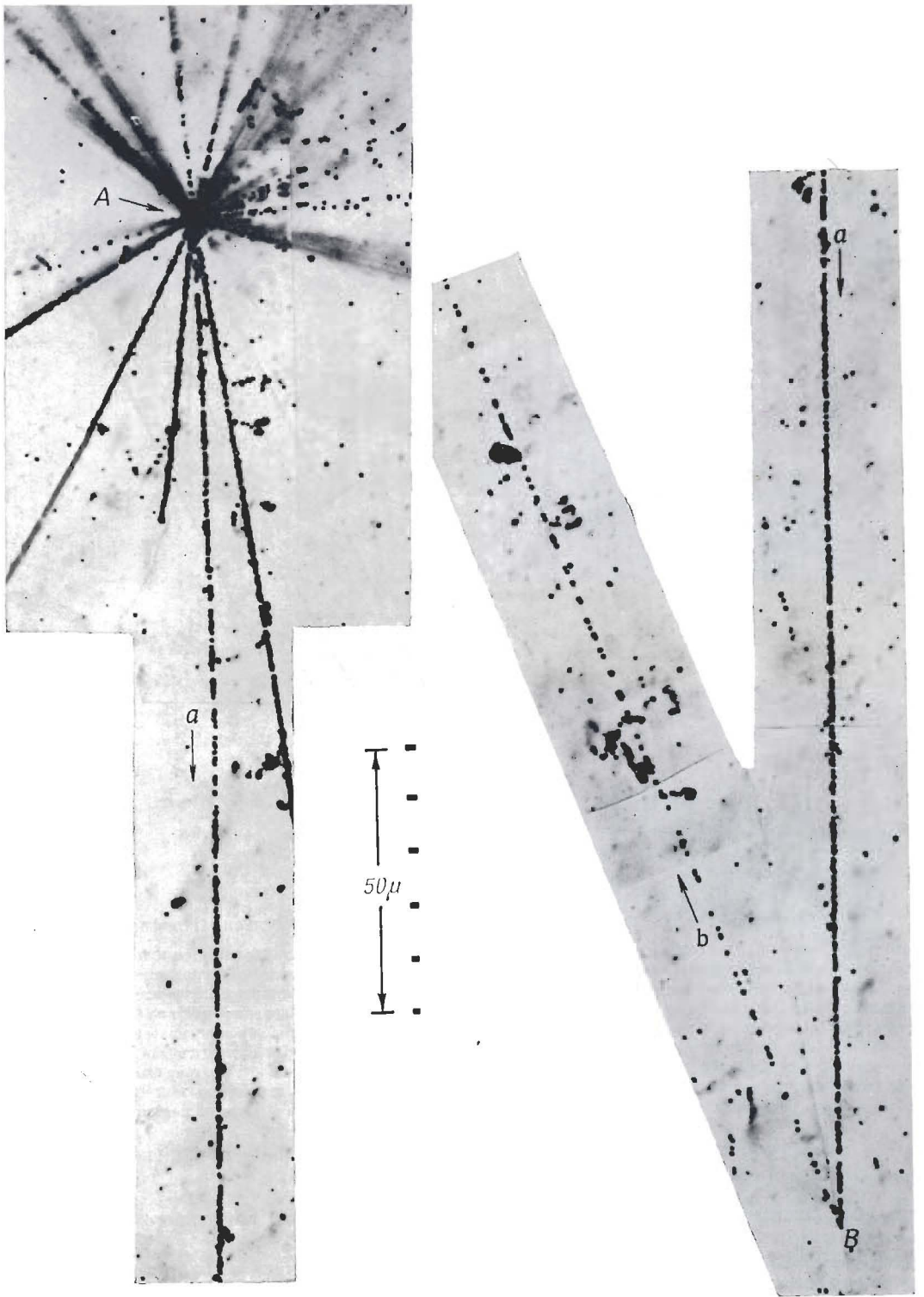


Фото 104

Фото 105. Первые зарегистрированные случаи ядерного захвата отрицательных гиперонов. Эмульсия Ильффорд G5.

Эти два случая были первыми, которые интерпретированы как ядерный захват отрицательных гиперонов Σ^- . Обе частицы испустились из „звезд“ и достигли конца своего пробега в эмульсии.

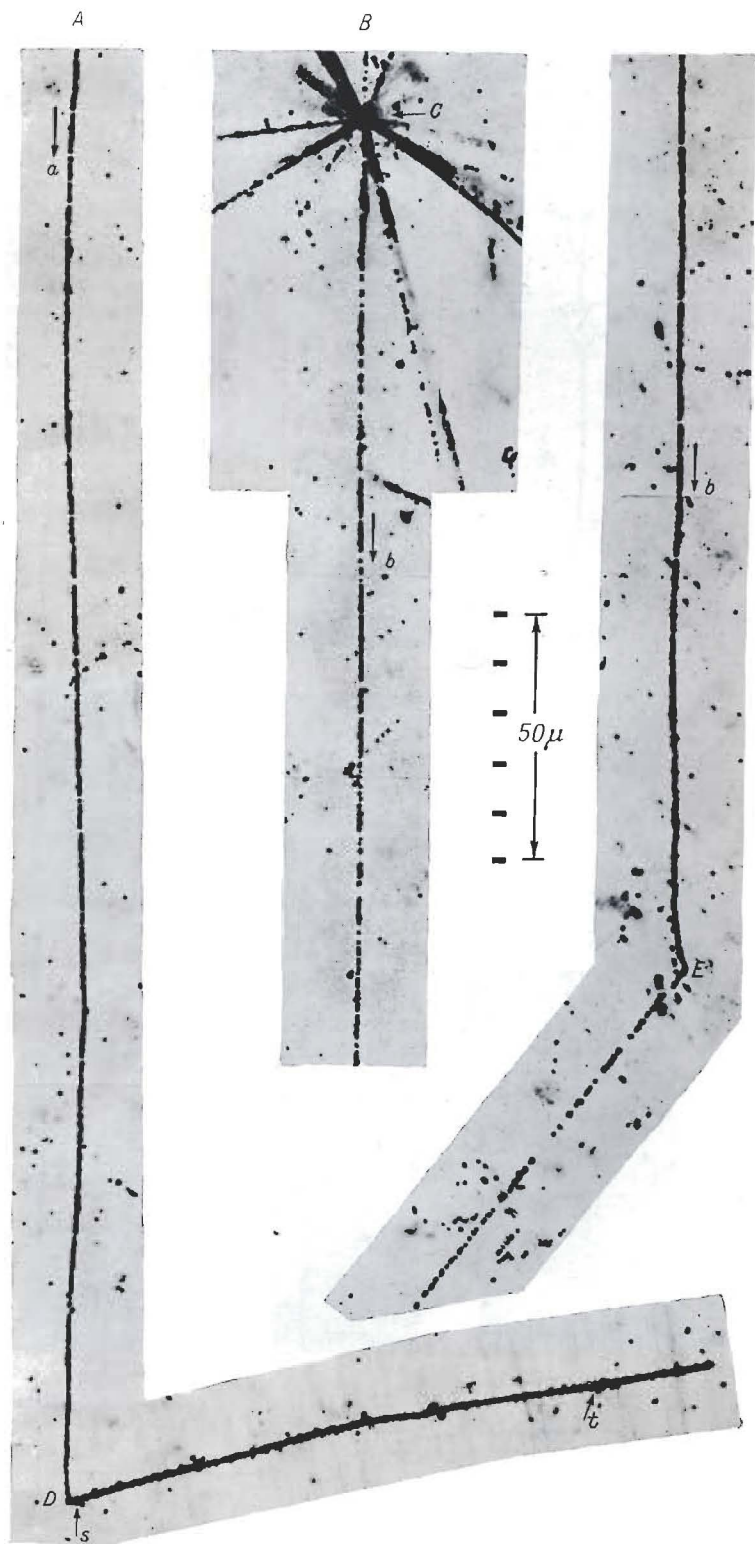
A — длина следа первичной частицы равна 7 мм, и, согласно проведенным оценкам, ее масса составляет $2250 \pm 400 m_p$. Следы двух вторичных заряженных частиц появляются в точке D. Один из них (s) очень короткий, другой (l) расположен под большим углом к плоскости эмульсии и, по видимому, принадлежит протону. Поэтому случай был приписан ядерному взаимодействию.

Johnston, O'Ceallaigh, Phil. Mag., 45, 424 (1954).

B — измеренное значение массы первичной частицы, которая образуется в „звезде“ и оставляет след b длиной 4,6 мм, оказалось равным $2440 \pm 300 m_p$. Масса вторичной частицы, испущенной из точки E, близка к массе протона или равна ей, а ее энергия определена больше 50 Мэв. Этот результат следует из измерений длины следа, рассеяния и плотности зерен вдоль следа у выхода его из стопки.

По причинам, обсуждавшимся на стр. 230, этот случай можно приписать скорее ядерному захвату отрицательного гиперона, чем спонтанному распаду частицы.

Friedlander, Phil. Mag., 45, 418 (1954).



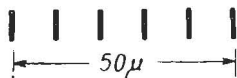


Фото 106. Явления, наблюдаемые в конце пробега Σ^- -гиперонов. Эмульсия Ильфторд G5.

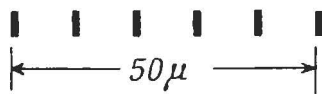
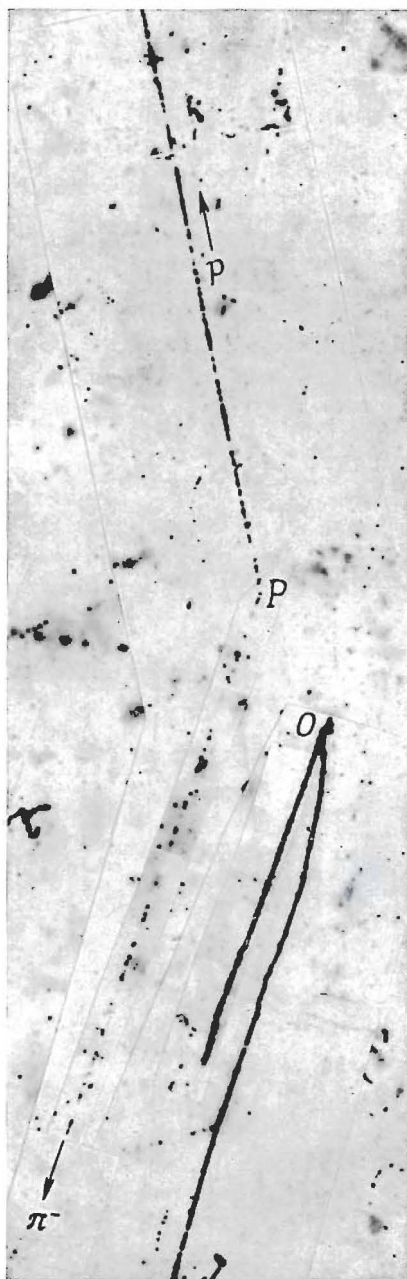
Характерные процессы, происходящие в конце пробега Σ^- -гиперонов, связаны с появлением электронов Оже и расщеплением ядра, захватывающего гиперон. *a* — редкий случай испускания трех заряженных частиц из расщепленного ядра; *b* — электроны Оже; *c* — случайное наложение следов электрона и протона; *d* — одна вторичная заряженная частица, *e* — две вторичные заряженные частицы.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1958 г.

Фото 107. Λ^0 -частица, возникающая в результате ядерного захвата K^- -мезона. Эмульсия Ильфорд К5.

Этот случай был обнаружен в стопке эмульсий К5, облученной пучком K^- -мезонов на беватроне в Беркли. K^- -мезон достигает конца своего пробега в точке O и захватывается ядром. При образующемся расщеплении испускается одна сильно ионизирующая частица. Можно различить также связанный короткий след, принадлежащий ядру отдача или электрону Оже. Кроме того, образовалась Λ^0 -частица, которая, пройдя 26μ , распалась в точке P на протон и π^- -мезон. В пределах ошибок измерений центр расщепления, вызванного захватом K^- -мезона, лежит в плоскости, определенной следами протона и π^- -мезона, образующихся при распаде Λ^0 -частицы. Кроме того, перпендикулярные составляющие импульсов π -мезона и протона по отношению к предполагаемой линии полета Λ^0 -частицы равны по величине и противоположны по знаку. Таким образом, данные о генетической связи этих двух событий являются очень вескими. Отрицательный π -мезон был четко идентифицирован по „звезде“, которую он образовал в конце своего пробега. Энергии π -мезона и протона, определенные по их пробегам, равны соответственно $28,4 \pm 0,5$ и $23,1 \pm 0,2$ Мэв, а угол между направлениями их движения равен $120 \pm 1^\circ$. Соответствующее значение Q для Λ^0 -распада было найдено равным $36,7 \pm 0,6$ Мэв, а кинетическая энергия Λ^0 -частицы оказалась лишь 15 Мэв.

Бристольская группа, неопубликованная работа.



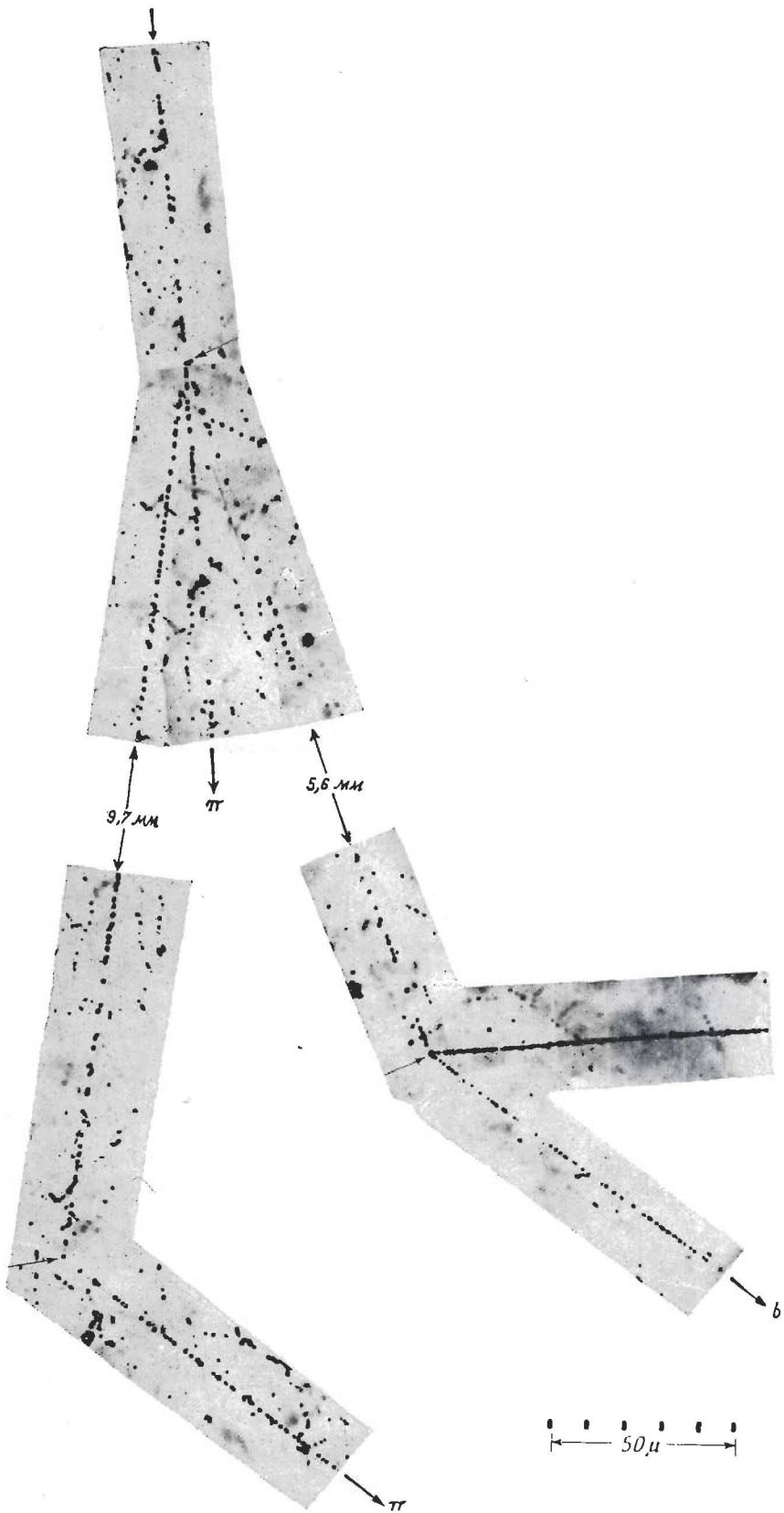


Фото 108

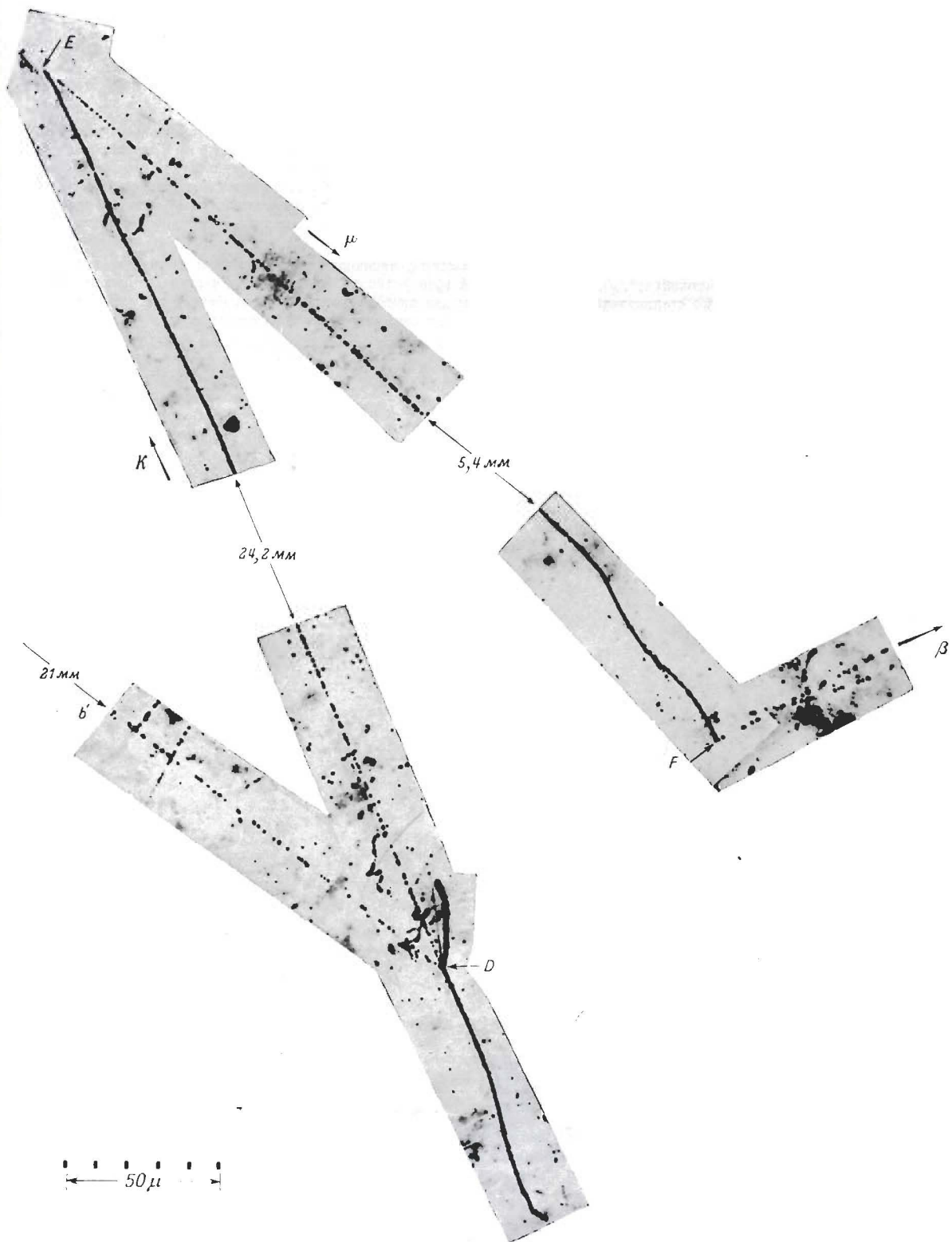


Фото 109

Фото 108 и 109. Совместное образование K -мезона и гиперона и ядерное взаимодействие быстрого K -мезона. Эмульсия Ильфорд G5.

Этот замечательный случай показывает, какое многообразие явлений можно регистрировать с помощью эмульсионных стоек. Случай был обнаружен в стойке размером $20 \times 15 \times 5$ см³, экранированной на высоте 28,5 км в течение 4 час. Выстрел частица, которая входит в стойку, испытывает ядерное столкновение в точке A . В результате расщепления вылетают три частицы, а именно: гиперон, который после ~ 1 см пробега распадается на лету в точке C с испусканием π -мезона, π -мезон, выходящий из стойки, и частица, о которой почти наверняка можно сказать, что она является K -мезоном, и которая испытывает ядерное столкновение в точке B . Таким образом, расщепление в точке A является примером совместного образования гиперона и K -мезона.

При расщеплении в точке B испустилась сильно ионизирующая частица, являющаяся протоном или дейтроном, и K -мезон, масса которого, определенная методом (g^* , \bar{a}), оказалась равной $1000 \pm 100 m_p$. В точке D эта частица испытала ядерное столкновение. В результате этого столкновения были испущены два протона с короткими пробегами и K -мезон, который распался в точке E на μ -мезон. Последний распадается в точке F на электрон.

Идентификация следа, соединяющего точки A и B , как K -мезона основана на измерениях величины $p\beta$ (1100 Мэв/с) и плотности зерен ($g^* < g_p$). Полученные результаты согласуются с предположением, что эта частица является K -мезоном, а не протоном или π -мезоном. Эти значения позволяют также сделать заключение о том, что первичное столкновение произошло между π -мезоном (или протоном) и слабо связанным нуклоном: $\pi + n \rightarrow \Sigma + K + \pi$. Предположение о такой схеме реакции согласуется с наблюдаемыми значениями энергии и импульсов. С другой стороны, может оказаться, что значения параметра рассеяния определены с ошибкой из-за малой длины следа, доступной для измерений ($\sim 2,5$ мм на одну пластинку).

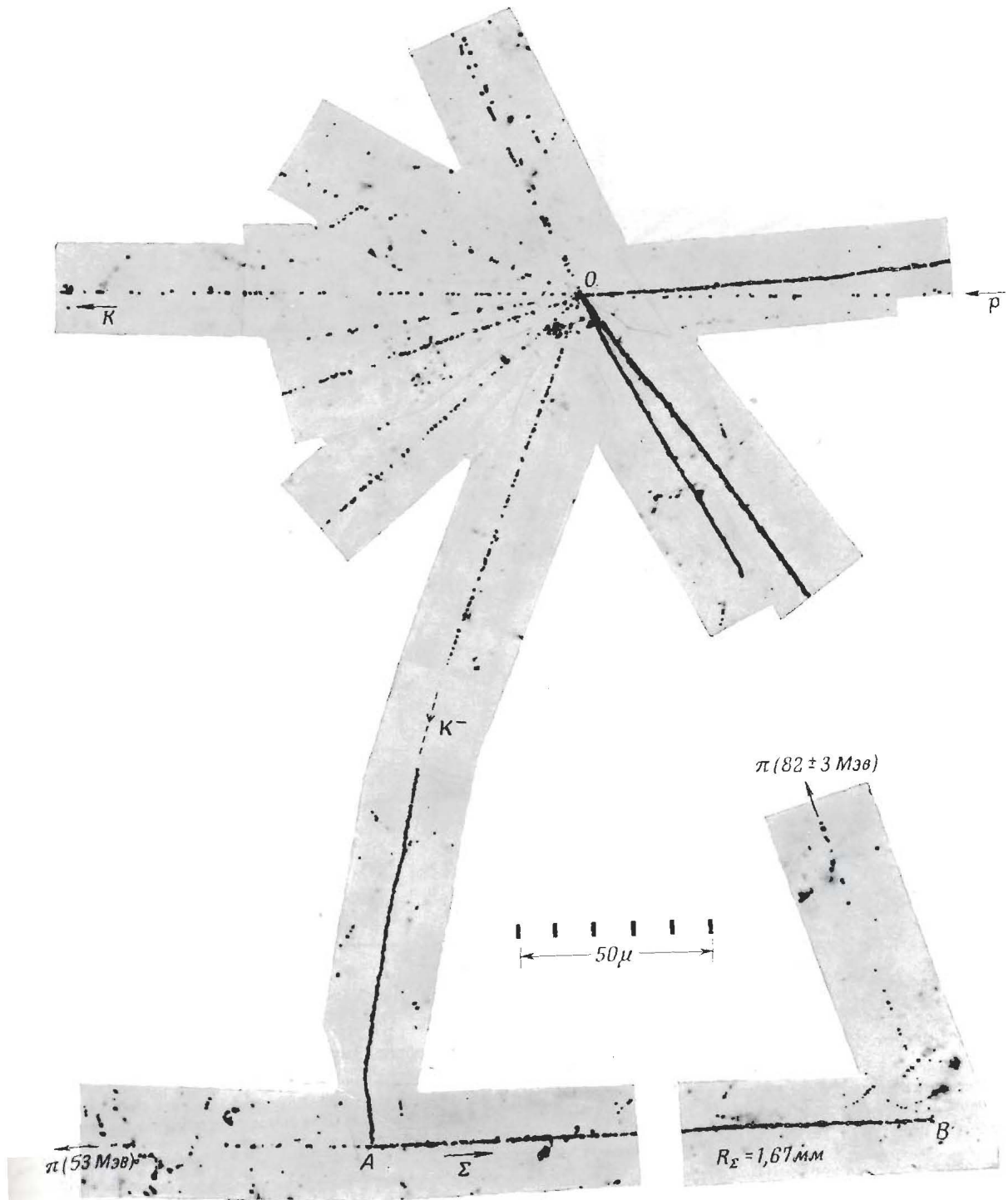
Friedlander, Keefe, Menon, Nuovo Cimento, 2, 694 (1955).

Фото 110. Первый зарегистрированный в эмульсии случай одновременного образования пары K -мезонов. Эмульсия Ильфорд G5.

Один из K -мезонов, отрицательно заряженный, достиг конца своего пробега в точке A , где он провзаимодействовал с нерифермическим протоном ядра, в результате чего образовались Σ -частица и π -мезон. Направлении вылета этих двух частиц составляют угол $\sim 160^\circ$. После 1,67 мм пробега Σ -частица распалась в точке B на π -мезон с энергией 82 ± 3 Мэв. Эта энергия значительно меньше той, которую следовало бы ожидать при распаде Σ -частицы в покое, поэтому был сделан вывод о том, что частица распалась на лету примерно за 260 а до конца пробега. Пробег Σ -частицы, равный 1,67 мм, а не 0,8 или 0,7 мм, как в случае взаимодействия с покоящимися протонами, а также несплошная волничатость следов двух вторичных частиц свидетельствуют о том, что протон, захвативший K^- -мезон, не был свободным и Σ -частица приобрела большее значение энергии за счет фермиевского импульса протона.

Благодаря этому и другим аналогичным случаям было получено важное подтверждение гипотезы Гейл-Манна и других о сохранении „странности“. Придавалось важное значение тому факту, что, хотя связанное образование K^+ -мезонов и гиперонов наблюдалось часто, первой зарегистрированной тяжелой частицей, которая была образована совместно с K^- -мезоном, был второй K -мезон. Знак заряда последнего в этом случае не был известен, но масса, определенная по измерениям рассеяния и плотности зерен вдоль следа, была найдена равной $875 \pm 65 m_p$. След этой частицы отходит от точки O на фотографии влево почти в горизонтальном направлении.

Friedlander, Keefe, Menon, Nuovo Cimento, 2, 666 (1955).



Φ ο τ ο 110

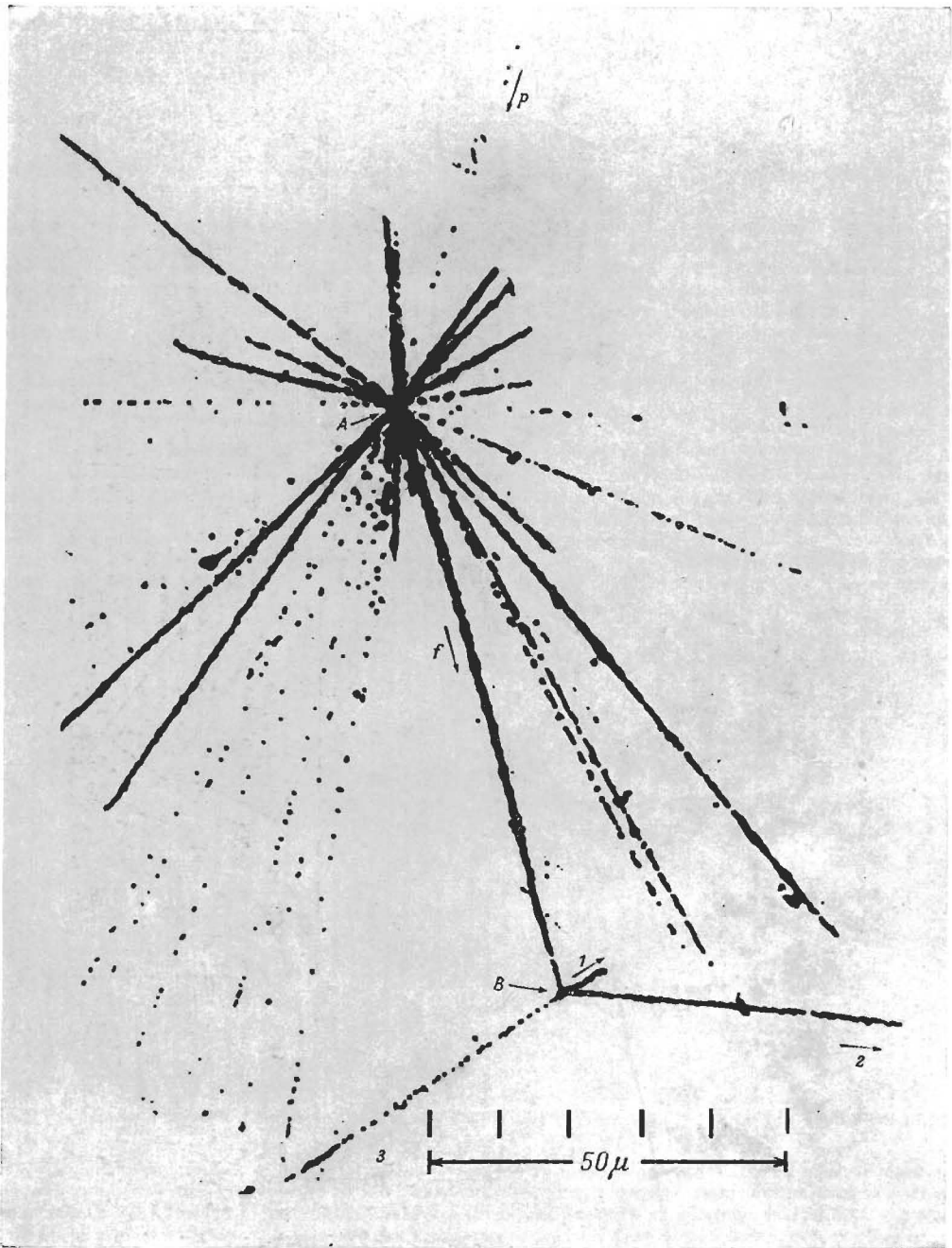


Фото 111. Замедленный распад ядра в конце его пробега. Эмульсия Ильфورد G5.

Первый зарегистрированный случай „замедленного“ распада ядра. Ядерный осколок f с зарядом $Z \sim 5$ достигает конца своего пробега в точке B и расщепляется с испусканием трех быстрых заряженных частиц. Возможно, что след z образован π -мезоном. В таком случае для полного выделения кинетической энергии при распаде получается значение, равное около 40 Мэв. Это находится в хорошем согласии с предположением, что внутри ядра в качестве его составной части находилась D^0 -частица.

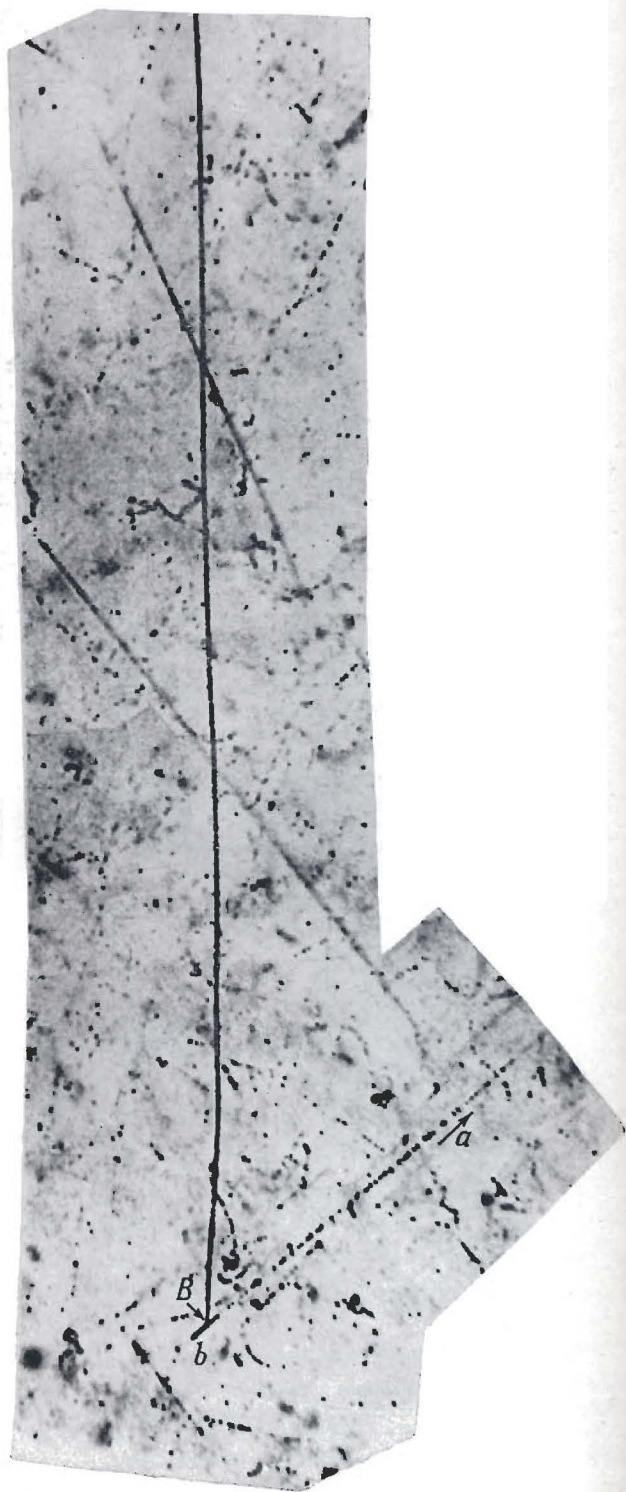
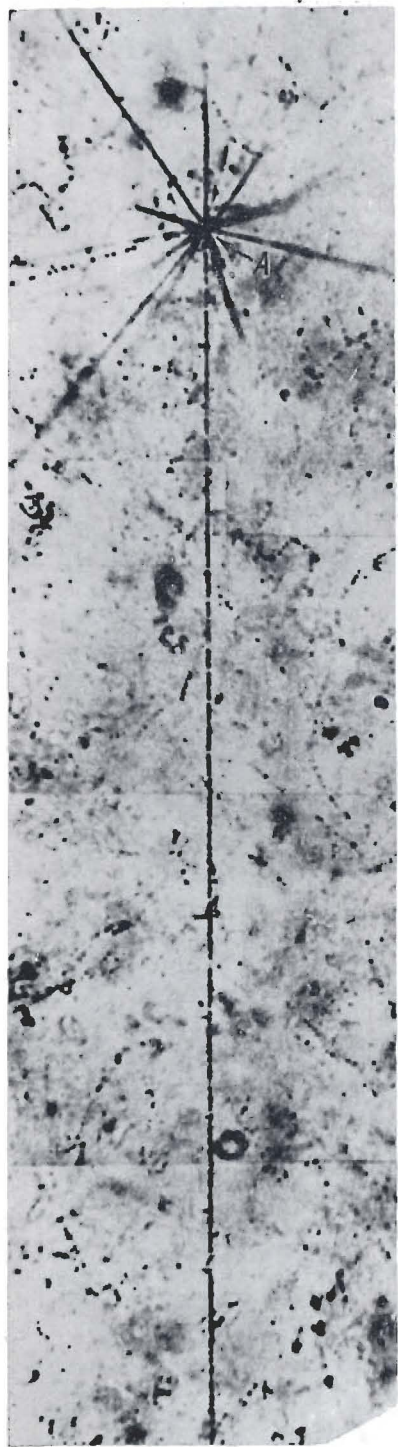
Аналогичные процессы, которые были обнаружены позже, происходили с осколками, имевшими меньшие значения заряда. Большинство осколков имело заряд 1 или 2. Более тяжелые гиперфрагменты с таким же зарядом, как и в рассмотренном выше случае, являются гораздо более редкими. Возможно, что на последовательность первого обнаружения осколков с разным зарядом повлиял тот факт, что направление движения частиц с зарядом $Z = 4$ или 5 очень легко устанавливается по четко выраженному сужению следа. Очевидно, и до этого наблюдались примеры нестабильных осколков с малыми зарядами, однако им не придавалось значения.

Фото 112. Замедленный распад
тяжелого ядерного осколка. Эмульсия
Ильфорд G5.

В этом случае явного замедленного распада
ядерного осколка испустившаяся частица
имеет по всем признакам эффективный
заряд $Z = 2$. С другой стороны, при вторич-
ном распаде в точке B испустились три
заряженные частицы. Если бы заряд ядер-
ного осколка был равен 2, то один из
следов должен был принадлежать отри-
цательной частице, а другой, сваяем след
 b , — частице с зарядом $Z = 2$. Однако не
было никаких данных, которые свидель-
ствовали бы о том, что одна из трех частиц
была π^- -мезоном. Вероятнее всего, ядер-
ный осколок имеет на самом деле заряд
 $Z = 3$. Кроме того, для выполнения закона
сохранения импульса во вторичном распаде
следует предположить, что были испущены
также нейтральные частицы, один или
несколько нейтронов.

Tidman, Davis, Herz, Tennent,
Phil. Mag., 44, 350 (1953).





100 μ

Фото 113

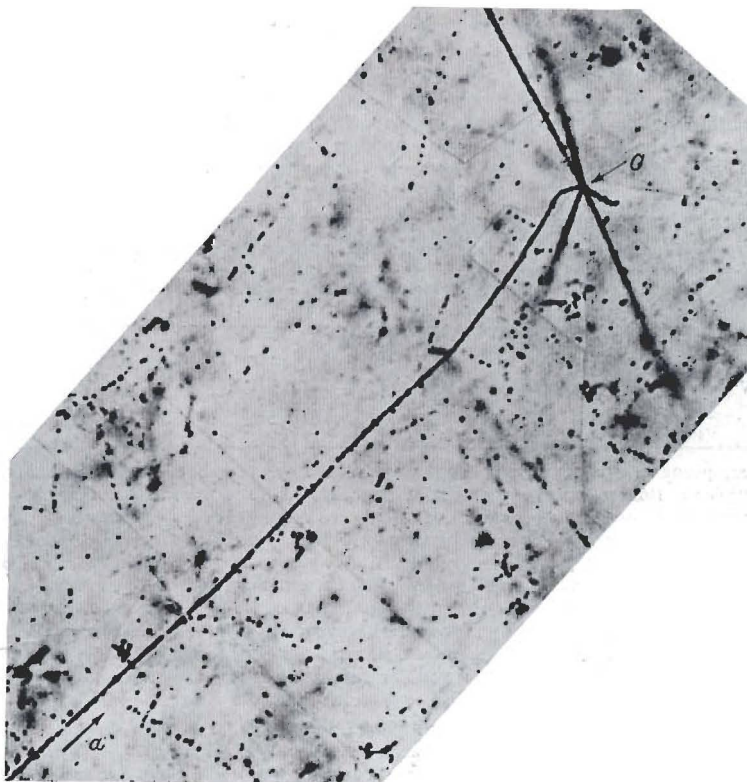


Фото 113

Фото 113. Первый зарегистрированный случай распада ΔH^3 . Эмульсия Ильффорд G5.

Этот случай замедленного распада ядра был обнаружен в эмульсионной стопке. Условия измерений позволяли провести весьма полный анализ случая. Ядерный осколок с зарядом e испустился при расщеплении в точке A и остановился в точке B , пройдя ~ 13 мм. Можно было измерить массу частицы, она равнялась $\sim 5500 m_e$, т. е. оказалась приблизительно равной массе тритона. В конце пробега осколок распался на две частицы, которые разлетелись в противоположных направлениях. Быстрая частица оказалась π^- -мезоном, который прошел 23,8 мм, остановился и вызвал вторичное расщепление. Из закона сохранения заряда и числа нуклонов следует, что сильно ионизирующая частица с коротким пробегом, вылетающая в направлении, противоположном вылету π^- -мезона, является ядром He^3 . При этом предположении наблюдаемый пробег частицы согласуется со значением импульса, равным по величине и противоположным по знаку импульсу π -мезона. Полное выделение энергии при этом равно $\sim 41,5$ Мэв. Таким образом, можно считать, что расщепление описывается схемой

$$\Delta H^3 \rightarrow He^3 + \pi^- + 41,5 \text{ Мэв.}$$

Исследование этого случая позволяет вычислить энергию связи Λ^0 -частицы в тритоне.

Исследование этого случая обнаруживает большие возможности фотографического метода для изучения гиперфрагментов и является прекрасной демонстрацией того, насколько подробные выводы могут быть получены при благоприятных условиях наблюдений в результате исследования отдельных случаев, зарегистрированных в фотографической эмульсии.

Отрицательно заряженный K^- -мезон из пучка беватрона в Беркли вошел в эмульсию извне (см. на фото слева сверху) и достиг конца своего пробега в точке А, где он захватился ядром кислорода. Это ядро расщепилось на гиперфрагмент ΔLi^7 , две α -частицы (следы I и II), протон (след III) и π^- -мезон. Гиперфрагмент достиг конца своего пробега в точке В, где он спонтанно распался по схеме $\Delta Li^7 \rightarrow \pi^- + He^4 + He^3$ с энергывыделением $Q = 35,9 \pm 0,5$ Мэв. Эти подробные данные были установлены следующим образом по результатам измерений, представленным в приводимой таблице.

След	Пробег, μ	Угол в общей плоскости, град	Энергия из данных о пробеге, Мэв	Импульс из данных о пробеге, Мэв/с
π^-	10060	$0 \pm 0,3$	$24,1 \pm 0,45$	$85,5 \pm 1$
IV	33,1	$144,5 \pm 1$	$6,9 \pm 0,1$	$227 \pm 1,5$
V	23	307 ± 1	$4,9 \pm 0,1$	165 ± 2

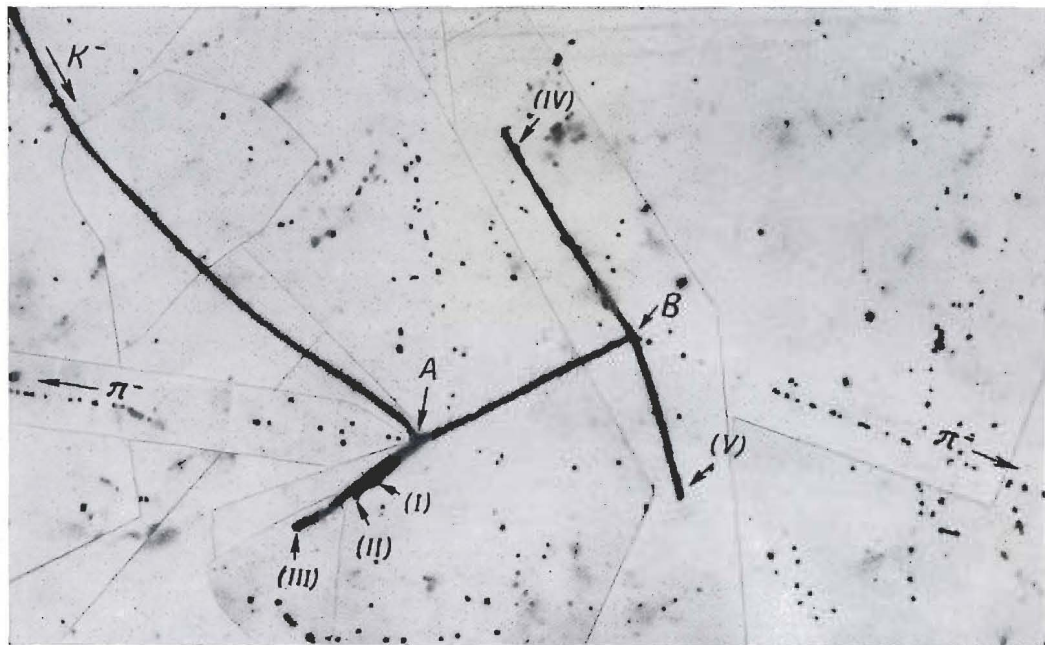
Рассмотрим, во-первых, распад гиперфрагмента. Направления движения трех вторичных частиц были компланарны в пределах ошибок измерений. Поэтому разумно предположить, что не было испущено ни одной нейтральной частицы и что гиперфрагмент распался в покое. Измеренный пробег π^- -мезона определяет его импульс. Импульсы двух частиц с короткими пробегами (следы IV и V) можно в этом случае определить путем применения теоремы Лами. Полученные таким образом значения импульсов частиц, образовавших следы IV и V, равны соответственно 227 ± 16 и 165 ± 16 Мэв/с. Если бы след IV был образован α -частицей, то ее пробег должен был иметь значение от 28 до 41 μ . Действительное значение этого пробега равно 33 μ . Если бы, с другой стороны, эта частица была He^3 , то ее пробег должен был быть заключен между 48 и 74 μ . Во всех случаях, когда частица предполагалась отличной от He^4 , получаемые значения пробегов сильно отличались от наблюдаемой величины. Аналогичный способ может быть использован для идентификации частицы, образовавшей след V. Таким образом можно показать, что эта частица является He^3 , хотя данные в этом случае не столь убедительны, как в случае следа IV.

Считая, что более длинный след был образован действительно α -частицей, можно из пробега оценить ее импульс более точно, чем было сделано раньше. Полученное таким образом значение было равно $227 \pm 1,5$ Мэв/с. Из закона сохранения импульса следует, что след V соответствует частице с импульсом 165 ± 2 Мэв/с. Если бы эта частица была действительно He^3 , то ее пробег должен был быть равным 23 ± 1 μ или соответственно $14 \pm 0,5$ μ , если бы она являлась He^4 , или 98 ± 3 μ , если бы она являлась H^3 . Измеренное значение пробега $22,8$ μ служит, таким образом, основанием для заключения о том, что следы IV и V были образованы соответственно He^4 и He^3 , как уже было указано. Отсюда следует, что гиперфрагментом являлся ΔLi^7 , который распался по приведенной выше схеме. Из значений энергий частиц, определенных по их пробегам, энергия α -частицы была найдена равной $5,2 \pm 0,5$ Мэв. Этот случай является, по-видимому, первым зарегистрированным случаем распада гиперфрагмента ΔLi^7 , когда можно было провести надежную идентификацию независимо от того, образуется ли одно из конечных ядер в возбужденном состоянии или не в возбужденном.

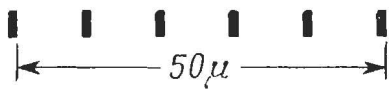
Перейдем теперь к рассмотрению первичного расщепления. Это расщепление интерпретировано как захват ядром O^{16} по схеме $K^- + O^{16} \rightarrow He^4 + He^4 + \Delta Li^7 + H^1 + \pi^-$. Интерпретация основана на следующем. Помимо вторичного π^- -мезона и гиперфрагмента, испущенных из точки А, были образованы также три сильно ионизующие частицы с короткими пробегами, линии движения которых составляют в проекции небольшие углы. Следы двух из этих трех частиц, которые описываются в точках, обозначенных как I и II, на фотографии почти неразличимы. Если следы I и II приписать α -частицам, а след III — протону, то векторная сумма импульсов четырех осколков оказывается равной 230 ± 10 Мэв/с, а компонента, перпендикулярная направлению движения связанного π^- -мезона, равна при этом всего лишь 8 ± 10 Мэв/с. Этот π^- -мезон в стопке не остановился, так что его энергию нельзя было точно определить по пробегу. Знак его заряда также не был известен. Однако если предположить, что при расщеплении не было испущено ни одной нейтральной частицы, то импульс π^- -мезона должен быть равен векторной сумме импульсов тяжелых заряженных частиц, т. е. 230 ± 10 Мэв/с. Соответствующее значение энергии π^- -мезона равно 124 ± 9 Мэв. В предположении, что расщепление правильно описывается приведенной выше схемой, полное энергывыделение получается равным 497 ± 9 Мэв. Поскольку значение выделенной энергии так хорошо согласуется с массой покоя K^- -мезона (которой соответствует энергии ~ 494 Мэв) и имеются надежные сведения о выполнении баланса импульсов, разумно предположить, что при данном расщеплении не было испущено ни одного нейтрона.

Предположения о природе заряженных частиц, отличные от указанных выше, приводит к нарушению баланса импульсов. Однако при такого рода анализе, вообще говоря, не может быть исключена возможность испускания нейтрона с подходящим значением импульса. Именно таким образом обстоит дело и в рассматриваемом случае. Эту неопределенность можно было бы разрешить, если бы пробег π^- -мезона был определен точно.

Как свидетельствуют приведенные выше данные, очень вероятно, что расщепление произошло действительно в результате захвата ядром O^{16} . Это служит дополнительным аргументом в пользу того, что гиперфрагмент был осколком типа ΔLi^7 . Если бы π^- -мезон, испущенный в точке А, остановился в стопке, то его энергию можно было бы определить с точностью ~ 2 Мэв, и это позволило бы точно оценить полное выделение энергии, из которого следовало бы значение массы K^- -мезона с точностью $\sim 4 m_e$. Не имея такой информации, мы можем принять некоторое значение для массы K^- -мезона и затем определить энергию π^- -мезона. Полученное таким образом значение равно 124 ± 1 Мэв. Этот результат указывает, по-видимому, на то, что α -частица была образована в этом случае непосредственным образом, а не путем, как это часто бывает, образования Σ^- -частицы и последующего взаимодействия с ядром по схеме: $\Sigma^- + p \rightarrow \Delta^0 + n$. В таких случаях π^- -мезон не может приобрести энергию больше ~ 90 Мэв, даже при взаимодействии с нуклонами, обладающими импульсами фермиевского движения. Такое высокое значение энергии π^- -мезона, как ~ 124 Мэв, находит объяснение лишь в случае непосредственного образования Δ^0 -частицы, если при этом не вводятся особые предположения.



DEKA



Φ ο τ ο 114

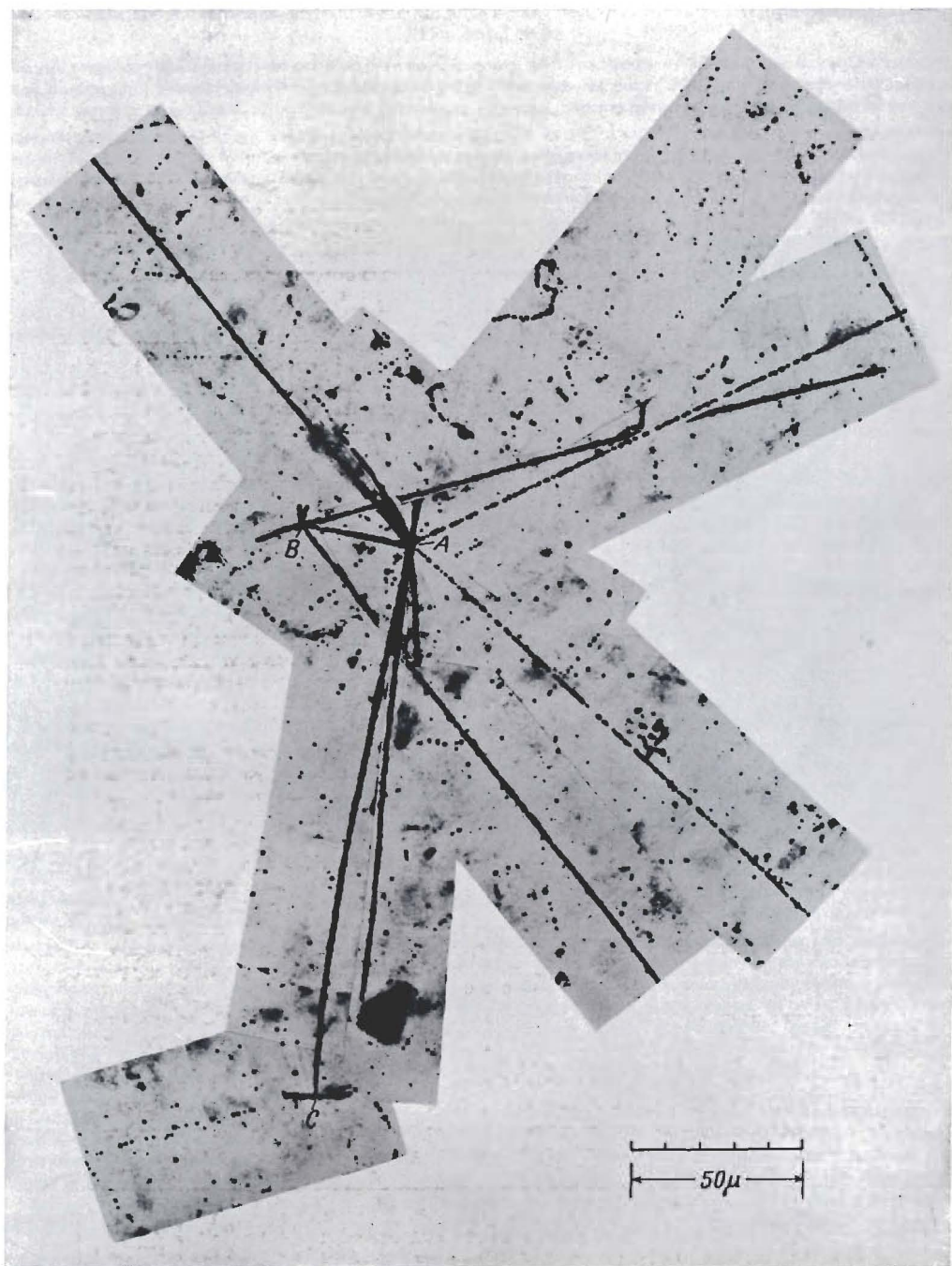


Фото 115. Безмезонный распад гиперфрагмента. Эмульсия Ильфорт G5.

Этот случай был обнаружен в эмульсионной пластине, облученной π -мезонами с энергией 4,5 *Бэв*, полученными на ускорителе в Беркли. При расщеплении в точке *A* испустился гиперфрагмент с зарядом $Z \sim 5$, который достиг конца пробега и распался без испускания мезона в точке *B*. Можно легко заметить сужение следа гиперфрагмента. При этом же расщеплении испустилось ядро Li^8 , которое распалось в точке *C*.

Фотография служит иллюстрацией тех преимуществ для изучения тяжелых гиперфрагментов, которые появляются при исследовании расщеплений высокой энергии. Хотя такие гиперфрагменты встречаются редко, они иногда испускаются при расщеплениях серебра и брома со значительной кинетической энергией. В результате распад происходит в точке, которая отстоит на заметном расстоянии от центра первичного расщепления. В то же время при образовании гиперфрагментов в результате ядерного захвата *K*-мезонов эти два центра часто оказываются практически совмещенными. (Ср. также фото 111.)

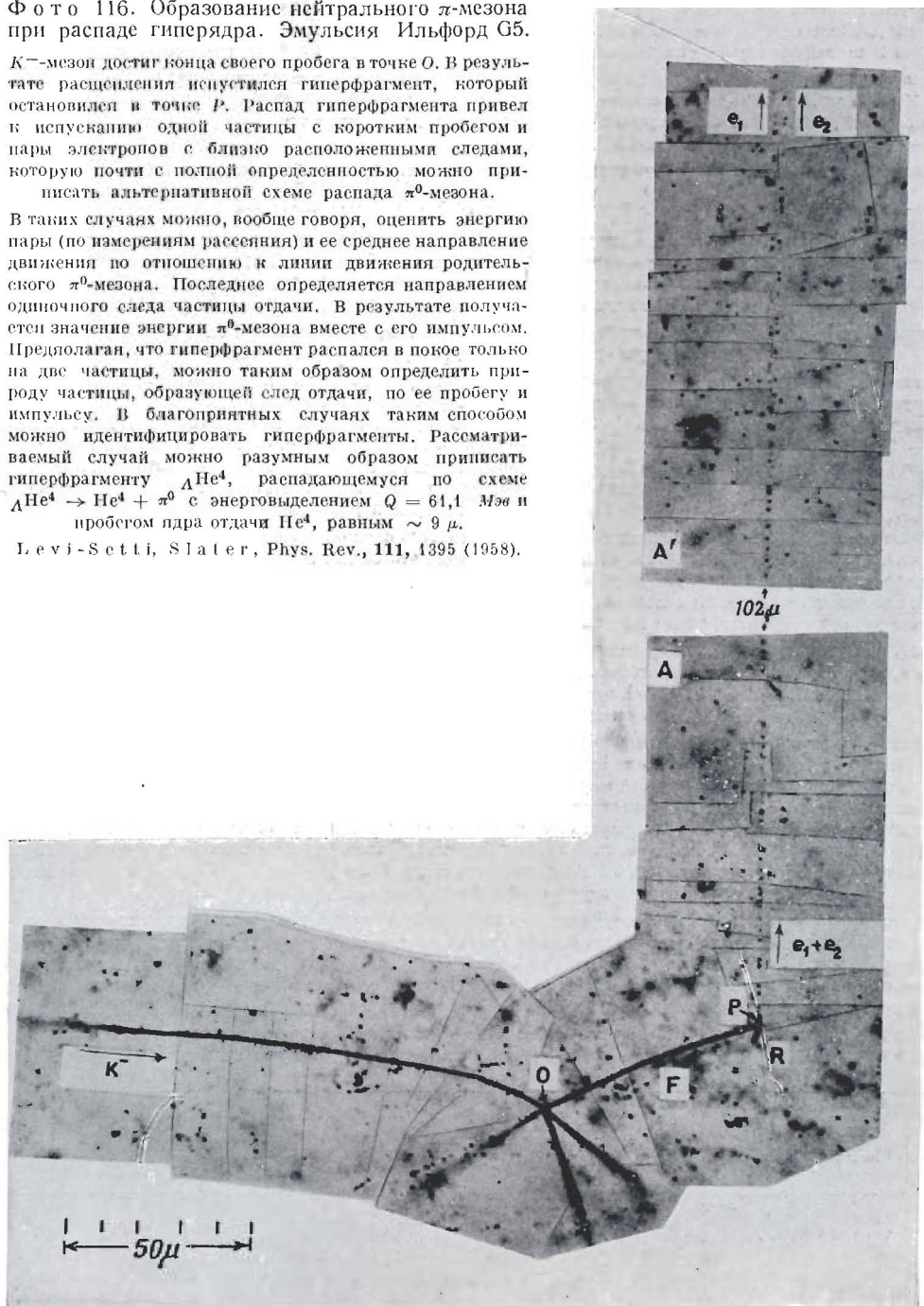
Бристольская группа, неопубликованная работа.

Фото 116. Образование нейтрального π -мезона при распаде гиперядра. Эмульсия Ильфорт G5.

K^- -мезон достиг конца своего пробега в точке O . В результате расщепления испустился гиперфрагмент, который остановился в точке P . Распад гиперфрагмента привел к испусканию одной частицы с коротким пробегом и пары электронов с близко расположенными следами, которую почти с полной определенностью можно приписать альтернативной схеме распада π^0 -мезона.

В таких случаях можно, вообще говоря, оценить энергию пары (по измерениям рассеяния) и ее среднее направление движения по отношению к линии движения родительского π^0 -мезона. Последнее определяется направлением одиночного следа частицы отдачи. В результате получается значение энергии π^0 -мезона вместе с его импульсом. Предполагая, что гиперфрагмент распался в покое только на две частицы, можно таким образом определить природу частицы, образующей след отдачи, по ее пробегу и импульсу. В благоприятных случаях таким способом можно идентифицировать гиперфрагменты. Рассматриваемый случай можно разумным образом приписать гиперфрагменту ΔHe^4 , распадающемуся по схеме $\Delta He^4 \rightarrow He^4 + \pi^0$ с энергovyделением $Q = 61,1$ Мэв и пробегом ядра отдачи He^4 , равным $\sim 9 \mu$.

Levi-Setti, Slater, Phys. Rev., 111, 4395 (1958).

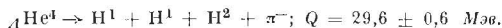


На этой фотографии показан один из первых обнаруженных случаев распада гиперфрагмента на лету. В эмульсии распад на лету осуществляется значительно реже, чем распад в покое, потому что большинство гиперфрагментов испускается с малыми скоростями $\sim 0,1 c$, особенно в тех случаях, когда они образуются в результате ядерного захвата K^- -мезонов.

В последнем случае они останавливаются за время порядка 10^{-11} сек (см. стр. 77).

Случай был обнаружен в Копенгагене при просмотре эмульсионной стопки, экспонированной на высоте 27 км над Южной Англией. Первичная „звезда“ (не показанная на фотографии) была небольшой, типа $4 + 2n$, но гиперфрагмент испустился с кинетической энергией ~ 120 Мэв и прошел ~ 5 мм прежде, чем распался в точке O примерно за 350μ до конца своего пробега.

Анализ, описываемый ниже, показал, что схема реакции расщепления может быть представлена в виде



а) Измерения многократного рассеяния и плотности δ -электронов показали, что заряд родительской частицы $Z = 2$ и что частица испытала взаимодействие (или распалась) вблизи конца своего пробега за $350 \pm 100 \mu$ до остановки. В частности, плотность δ -электронов N_δ достигла максимальной величины, соответствующей заряду $Z = 2$, и после этого стала спадать, что является верным признаком приближения частицы к концу пробега (см. фиг. 67, стр. 123).

б) Все вторичные заряженные частицы остановились в эмульсии, и их пробеги можно было точно измерить. π^- -мезон был идентифицирован по четырехлучевой „звезде“, которую он образовал в конце своего пробега.

в) Если сильно ионизирующие частицы приписать протонам и дейтронам, как это указано на фотографии, то векторная сумма импульсов вторичных частиц оказывается равной 429 ± 2 Мэв/c и направленной под углом $\sim 1^\circ$ к измеренному направлению первичной частицы. Небольшое отклонение траектории первичной частицы можно было бы объяснить ее рассеянием ($\sim 2^\circ$ на 100μ), которое не позволяет определить направление движения частицы с большой точностью. В предположении, что импульс родительской частицы ${}^4\text{He}^+$ в точке распада равен 429 ± 2 Мэв/c, ее остаточный пробег должен быть равным $240 \pm 5 \mu$. Этот результат находится в хорошем согласии со значением остаточного пробега, полученным из подсчета δ -электронов и измерений рассеяния.

Следует отметить, что предложенную схему распада нельзя считать окончательно установленной, однако полученные данные являются очень убедительными. Так, например, возможно, что следы, приписываемые протонам и дейтронам, были идентифицированы неверно; однако для того, чтобы удовлетворить закону сохранения заряда, все они должны быть теми или иными изотопами водорода. При этом любое предположение о природе частиц, отличное от принятого, не согласуется с равным нулю поперечным импульсом и значением остаточного импульса родительской частицы.

Другая возможность заключается в том, что наряду с тремя протонами мог испуститься нейтрон. Эту возможность полностью исключить нельзя, однако невероятно, чтобы в этом случае соблюдался бы баланс импульсов заряженных частиц. Следующее предположение, заключающееся в том, что первичной частицей мог бы быть осколок ${}^4\text{He}^6$, может быть отклонено, поскольку при распаде осколка выделилось явным образом слишком много энергии.

Аналогичные возражения могут быть выдвинуты против интерпретации данного случая как ядерного взаимодействия гиперфрагмента, потому что осуществление баланса импульсов в этом случае становится весьма маловероятным. Можно отметить, что вообще вероятность ядерного взаимодействия гиперфрагментов, имеющих также малые скорости и короткие времена жизни, намного меньше, чем вероятность распада на лету. И наконец, последний довод в пользу предложенной интерпретации заключается в том, что полученное в таком предположении значение массы гиперфрагмента ${}^4\text{He}^4$ согласуется с соответствующим значением, полученным при исследовании распада этих ядер в покое. Значение энергии связи Δ^0 -частицы, полученное при описанной выше интерпретации, было равно $1,9 \pm 0,6$ Мэв, что находится в хорошем согласии с результатами последующих измерений.

Следует заметить, что сам факт распада гиперфрагмента на лету облегчил анализ случая, так как при этом было обеспечено отсутствие коротких следов, по которым часто бывает трудно точно определить пробег и направление движения частиц. Хотя энергия π -мезона была меньше, чем обычно наблюдается при мезонном распаде гиперфрагментов, основной вклад в окончательные ошибки при определении энергии связи Δ^0 -частицы связан с разбросом пробегов частиц („страгглинг“).

Такое положение часто имеет место, когда для измерений масс гиперфрагментов имеются благоприятные условия.

Подробные данные измерений приведены ниже. Они позволяют определить значение энергии связи в качестве упражнения в методе вычислений.

	Предполагаемая природа частицы	Пробег, μ	Энергия, Мэв	Импульс, Мэв/c	Угол в проекции, град	Угол погружения, град
Первичная частица	${}^4\text{He}^4$	—	—	—	$0,0 \pm 0,6$	$0,0 \pm 1,0$
	H^2	136	$5,70 \pm 0,05$	$14,6 \pm 0,7$	$316,2 \pm 1$	$-8,1 \pm 1,5$
	π	10050	$23,6 \pm 0,5$	$84,5 \pm 0,8$	$12,9 \pm 0,3$	$+43,8 \pm 0,5$
	H^1	565	$10,2 \pm 0,1$	$139 \pm 0,7$	$16,1 \pm 0,5$	$-25,5 \pm 0,8$
	H^1	898	$13,4 \pm 0,1$	$158,7 \pm 0,8$	$22,7 \pm 0,5$	$+8,1 \pm 0,8$

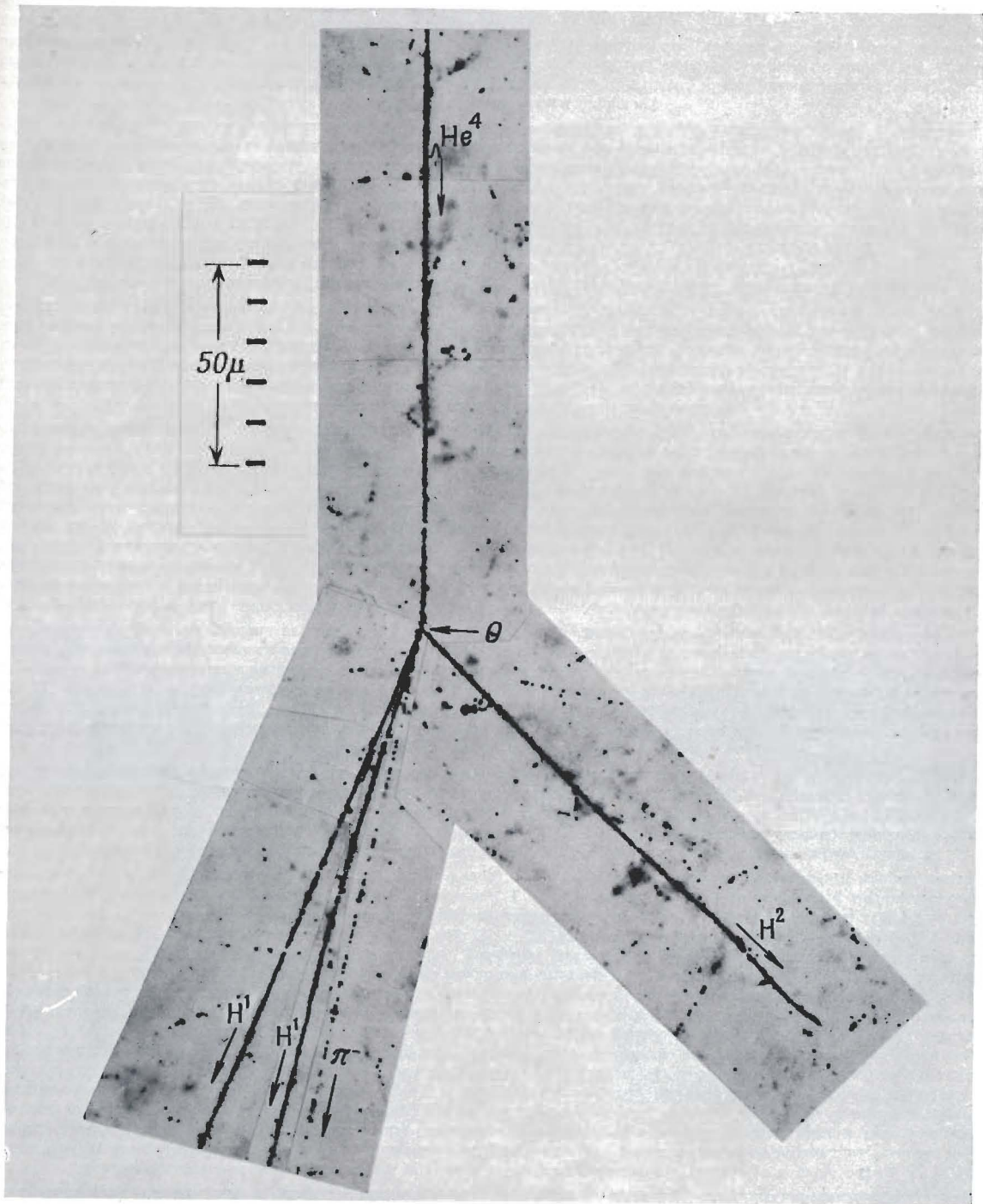


Фото 117

Четыре случая, представленные на этой фотографии, были выбраны для иллюстрации различных встречающихся при исследовании типов гиперфрагментов.

А. Распад в покое гиперфрагмента ΔH^4 . Эмульсия Илфорд G5. Этот случай был одним из самых первых зарегистрированных примеров распада ΔH^4 (см. табл. 24, стр. 241). Он был обнаружен в эмульсионной стопке, которая летала в Северной Италии на высоте 25,5 км в течение 7 час (группа G-Stack Collaboration). Гиперфрагмент испустил при расщеплении типа $21 + 3p$ одновременно с K -мезоном, который был идентифицирован по измеренным рассеянию и плотности зерен метод (g, \bar{v}). K -мезон достиг конца своего пробега в точке O , где он распался на две частицы, следы которых в пределах ошибок измерения коллинеарны.

Гиперфрагмент распался по схеме $\Delta\text{H}^4 \rightarrow \pi^- + \text{He}^4$ ($Q = 54,5 \pm 1,0 \text{ Мэв}$). Соответствующее значение энергии связи $B_{\Delta} = 2,4 \pm 1,0 \text{ Мэв}$. Энергия, освобождающаяся при распаде этой частицы по записанной схеме, значительно больше, чем в любом другом случае, когда образуются коллинеарные следы, вследствие того, что нуклоны в He^4 являются сильно связанными. Большая часть этой энергии уносится π^- -мезоном, пробег которого равен 38,2 мм. След α -частицы отдачи длиной около 8,5 μ иногда нельзя отличить от следа ядра отдачи He^3 , образующегося при распаде ΔH^3 по схеме $\Delta\text{H}^3 \rightarrow \pi^- + \text{He}^3$. Однако в последнем случае энергию, уносимой π^- -мезоном, равна лишь $40,4 \pm 0,4 \text{ Мэв}$, в то время как при распаде ΔH^4 энергия π^- -мезона равна $52,7 \pm 0,2 \text{ Мэв}$. Таким образом, эти два типа гиперфрагментов нельзя надежно различить до тех пор, пока не будут определены надежным образом энергии π^- -мезонов, сопровождающих распад. Коллинеарные случаи, соответствующие распаду ΔH^4 , встречаются более часто, чем аналогичные случаи, соответствующие распаду ΔH^3 .

Б. Распад в покое гиперфрагмента ΔHe^6 . Эмульсия Илфорд K5. Этот случай, так же как и случаи **В** и **Г**, был обнаружен в стопке из эмульсий K5, облученной пучком K^- -мезонов из синхрофазотрона на 6 Бэв в Беркли. Гиперидро, которое образовалось в результате птерного захвата K^- -мезона, достигло точки X , откуда вылетели три вторичные заряженные частицы (следы a , b , и c). Поскольку следы этих трех частиц коллинеарны, а их параметры определенным образом согласуются с внешним видом следа гиперфрагмента, можно предположить, что при распаде гиперидро находилось в покое и продуктами распада были только три вторичные заряженные частицы.

Испытуемый метод анализа является типичным для тех случаев, когда имеются три вторичные частицы, направления испускания которых коллинеарны. Одна из трех вторичных частиц была π^- -мезоном, который остановился в стопке, пройдя 15,4 мм. Направления следов в общей плоскости соответствовали следующим углам: $\angle a - 0 \pm 0,3^\circ$, $\angle b = 160 \pm 3^\circ$, $\angle c = 293 \pm 2^\circ$. Таким образом, по теореме Лами можно было определять импульсы частиц b и c и сравнить их с пробегами частиц. При этом было показано, что след c образован протоном. В результате импульс этой частицы можно определить более точно по ее измеренному пробегу (35 μ). Снова применив теорему Лами, можно из импульса частицы c найти импульс частицы b , который оказался равным $131 \pm 2 \text{ Мэв}/c$. Единственной частицей, у которой при таком значении импульса пробег приблизительно равен наблюдаемому значению (8,5 μ), является ядро He^4 . Пробег He^3 , например, должен был равняться 12,5 μ . Коллинеарность следов указывает на то, что при распаде не испустилось ни одной нейтральной частицы.

Отсюда следует, что родительское гиперядро было ядром ΔHe^6 , распавшимся по схеме $\Delta\text{He}^6 \rightarrow \text{He}^4 + \text{H}^1 + \pi^-$.

С наименьшими ошибками значение выделившейся энергии получено из кинетических энергий π^- -мезона и протона, определенных по их пробегам. Кинетическая энергия α -частицы была при этом определена из значения ее импульса в предположении, что он равен векторной сумме импульсов π^- -мезона и протона. Полная выделяющаяся энергия была таким образом найдена равной $34,1 \pm 0,6 \text{ Мэв}$, что соответствует энергии связи Δ^0 -частицы с нуклонами в ΔHe^3 $3,1 \pm 0,6 \text{ Мэв}$.

В. Распад гиперфрагмента, который не был интерпретирован определенным образом. Эмульсия Илфорд K5. Интерпретация этого случая как распада ΔBe^8 по схеме $\Delta\text{Be}^8 \rightarrow \pi^- + \text{H}^1 + \Delta\text{Be}^7$ является наиболее вероятной, однако достоверность в пользу этой схемы недостаточно велика.

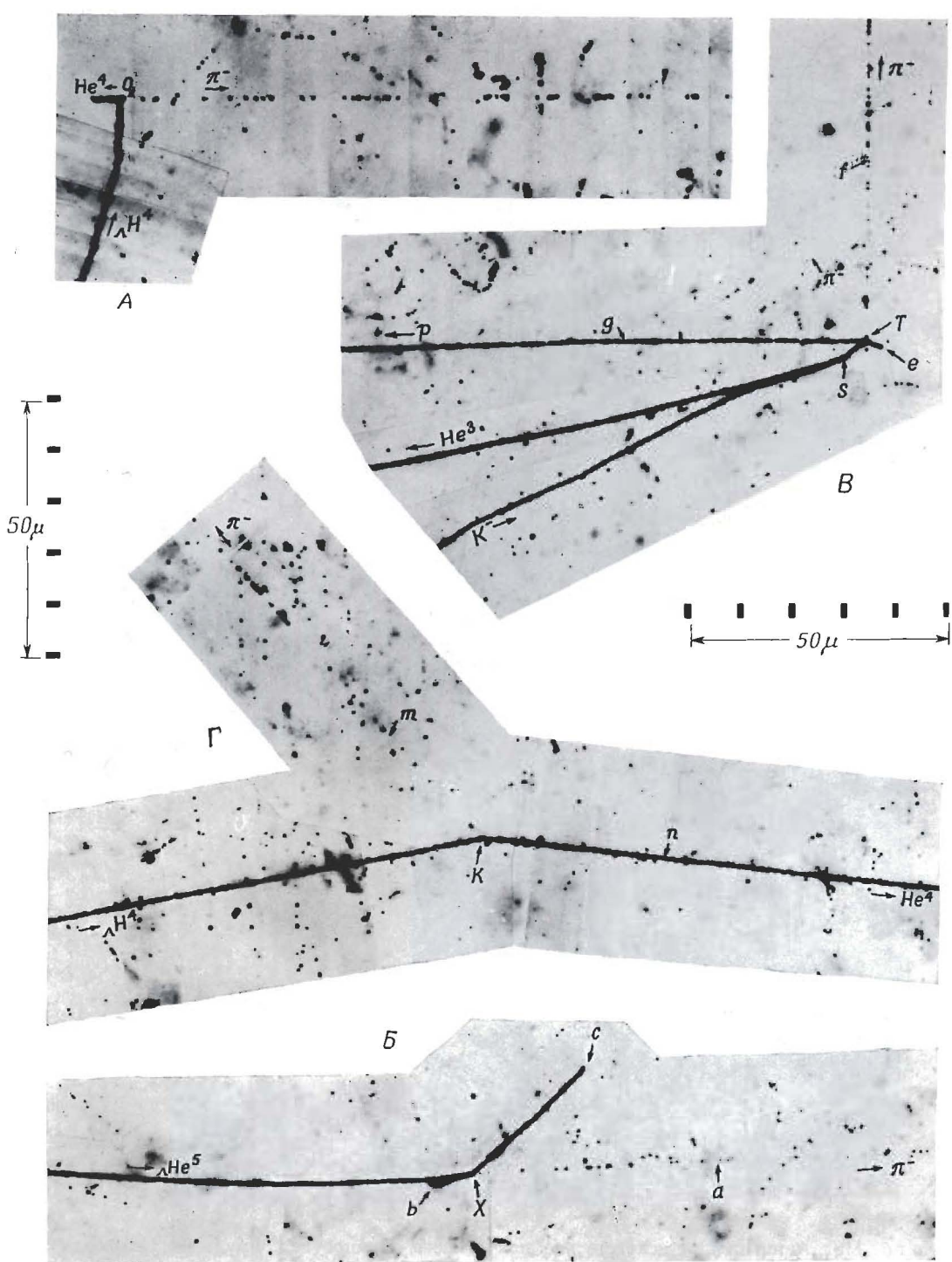
K^- -мезон достиг конца своего пробега в точке S и захватился ядром. В результате последующего расщепления наряду с другими частицами образовались быстрый π^- -мезон и частица с коротким пробегом, которая, по-видимому, остановилась в точке T , являющейся центром второго расщепления. Три следа, берущие начало в точке T , являются, по всей видимости, коллинеарными, однако точность измерений не очень высока из-за того, что след e короткий. Плоскость распада выкошена в плоскости эмульсии всего на 15° , поэтому условия были благоприятными для проведения точных измерений.

Анализ данных был проведен таким же способом, как это было в случае **Б**. Оказалось, что след f образован π^- -мезоном, энергии которого была равна 18,1 Мэв, а импульс $73,5 \pm 1 \text{ Мэв}/c$. След g был идентифицирован как след протона с энергией $11,2 \pm 0,1 \text{ Мэв}$ и импульсом $146 \pm 1 \text{ Мэв}/c$. Угол между направлениями испускания π^- -мезона и этого протона равен $90,2 \pm 0,5^\circ$. Векторная сумма их импульсов равна $163,0 \pm 1,5 \text{ Мэв}/c$. Было предположено, что этот суммарный импульс уравновешивается импульсом частицы, образующей короткий след ядра отдачи с длиной $3,3 \pm 0,2 \mu$. Средние значения пробегов ядер Li^6 , Li^7 , Be^7 и Be^8 с таким значением импульса равны соответственно 4,8; 4,4; 2,9 и 2,7 μ . Наилучшее согласие наблюдается для ядра Be^7 , однако, учитывая наличие «страгглинга» пробегов и то, что эти пробег мал, нельзя исключить также варианты с ядрами Li^7 и Be^9 . Если предположить, что первичной частицей действительно был осколок ΔBe^8 и что ядро Be^7 образовалось в основном состоянии, то для энергии связи Δ^0 -частицы ΔB получается значение $5,9 \pm 0,4 \text{ Мэв}$. Некоторые доводы в пользу того, что гиперфрагментом было действительно гиперидро ΔBe^8 , можно получить при исследовании первичного расщепления в точке S , которое, по-видимому, произошло в результате захвата K -мезона легким ядром. Если предположить, что схему реакции можно записать в виде $K^- + \text{C}^{12} \rightarrow \Delta\text{Be}^8 + \text{He}^3 + \pi^- + n$, то импульс нейтрона можно приравнять векторной сумме импульсов заряженных частиц. Таким образом можно определить энергию нейтрона. Значение полной выделившейся энергии в этом случае оказывается равным энергии покоя K^- -мезона. С другой стороны, если считать, что гиперфрагментом является ΔLi^8 или ΔBe^{10} , то в первичном взаимодействии должно было бы участвовать ядро серебра или брома. На основании имеющихся данных такую возможность исключить нельзя.

Окончательное выражение против предлагаемой интерпретации этого случая связано с тем, что короткий след, приписываемый гиперидру, выглядит тонким, и поэтому не похоже, чтобы заряд частицы $Z = 4$. вполне возможно было бы приписать частице заряд $Z = 1$, отождествив ее, например, с Σ^- -частицей. Однако до сих пор не было зарегистрировано ни одного расщепления, вызываемого Σ^- -частицей, при котором испускались бы быстрые π^- -мезоны (см. стр. 230).

Г. Распад на лету гиперфрагмента ΔH^4 . Эмульсия Илфорд K5. Этот случай принисан распаду частицы ΔH^4 на лету по схеме $\Delta\text{H}^4 \rightarrow \text{He}^4 + \pi^-$. Интерпретация основывается на следующих соображениях.

Три следа частиц, одна из которых приближалась к точке K , а две другие вылетели из этой точки, коллинеарны. Поскольку следы двух вторичных частиц являются неколлинеарными, а налетающая частица в точке K имеет отличную от нуля скорость, разумно предположить, что этот случай представляет собой распад на лету. Длинный след m принадлежит π^- -мезону с пробегом 33,2 мм и начальным импульсом $127 \pm 1 \text{ Мэв}/c$. Путем применения теоремы Лами импульс вторичной сильно



понижающей частицы (след n) найден равным 460 ± 20 Мэв/с. Отсюда из пробега частицы, который равен 298μ , следует, что она является ядром He^4 . Поэтому случай представляет собой распад $\Delta^0 \text{H}^4 \rightarrow \text{He}^4 + \pi^-$. Соответствующее энергвыделение $Q = 54,9 \pm 1,0$ Мэв, а значение $\Delta^0 B$ при этом оказывается равным $2,0 \pm 1,0$ Мэв, что находится в хорошем согласии с результатами для других аналогичных случаев, в которых частица $\Delta^0 \text{H}^4$ распадается в покое.

Помимо строгой внутренней согласованности данных наблюдений, которая свидетельствует о правильности предложенной интерпретации, следует отметить тот факт, что для следа α -частицы наблюдается заметное увеличение плотности δ -электронов по сравнению с плотностью δ -электронов, образуемых налетающим гиперядром. Кроме того, возможность обычного ядерного расщепления может быть исключена ввиду того, что при расщеплении был испущен π -мезон с большой скоростью, который вылетел в обратном направлении по отношению к направлению движения родительской частицы.

Бристольская группа, неопубликованная работа.

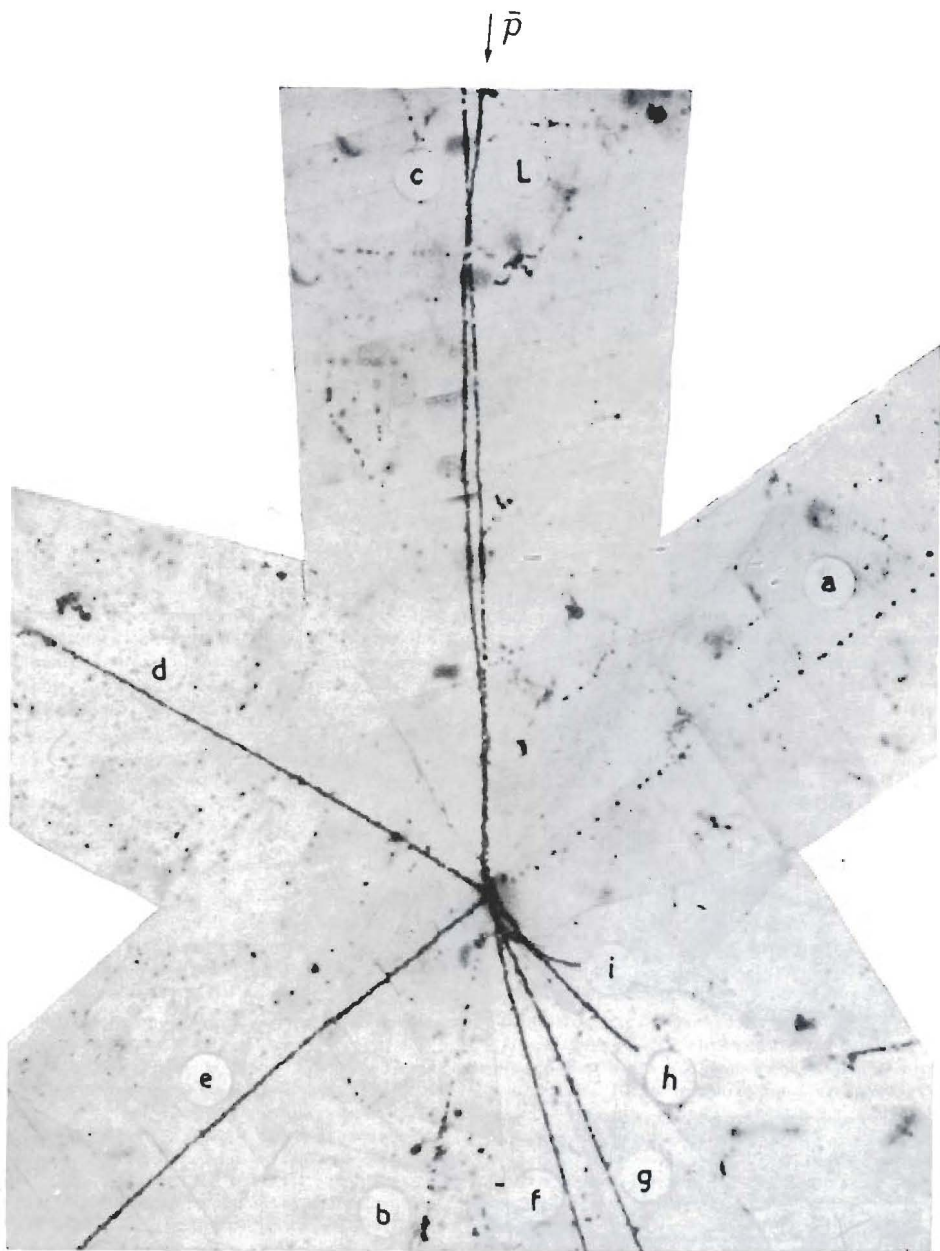


Фото 119. Аннигиляция искусственно полученного антипротона. Эмульсия Ильфорт G5.

На микрофотографии показан впервые обнаруженный в эмульсии случай аннигиляции искусственно полученного антипротона.

Chamberlain, Chupp, Goldhaber, Segré, Wiegand, Amaldi, Castagnoli, Franzinetti, Manfredini, Phys. Rev., **101**, 909 (1956).

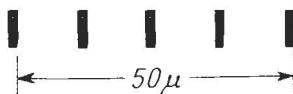
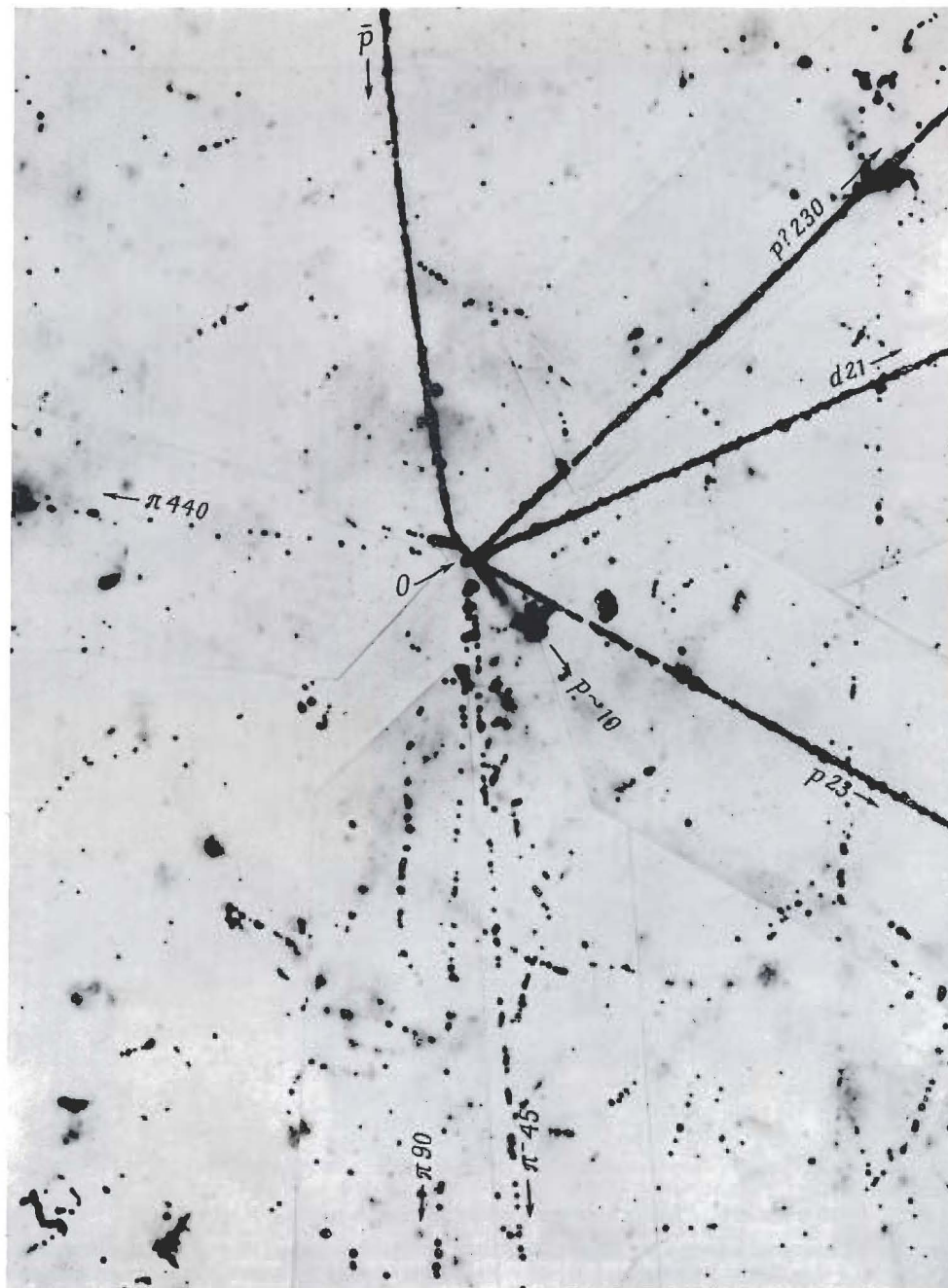


Фото 110. Расщепление, вызванное аннигиляцией антипротона. Эмульсия Ильффорд G5.

Антипротон \bar{p} , полученный на бетатроне в Беркли, входит в эмульсию и аннигилирует в конце своего пробега в точке O . Указаны природа вторичных частиц и их энергия в Mev . Полное видимое выделение энергии больше, чем энергия, соответствующая массе покоя одной падающей частицы.

Бристольская группа, неопубликованная работа.

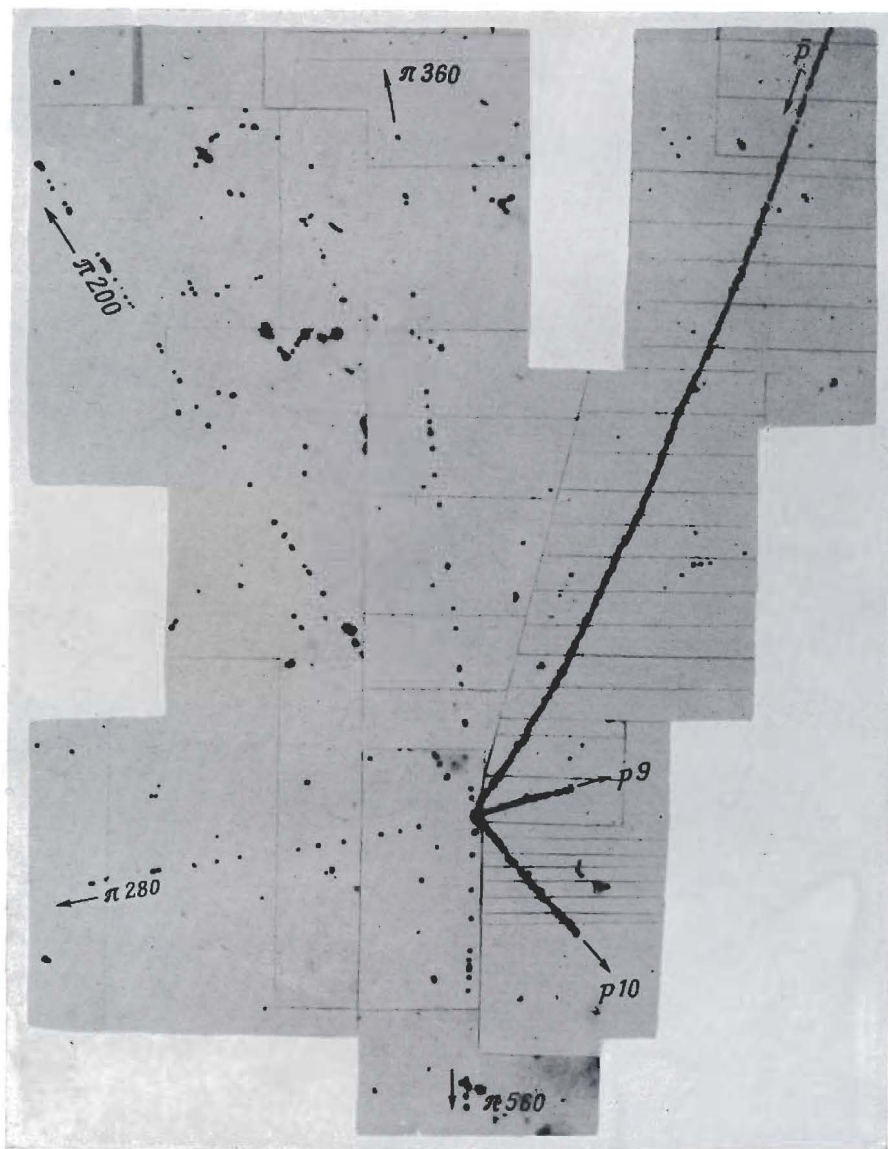


Фото 121. Аннигиляция антипротона. Эмульсия Ильффорд G5.

Указаны продукты расщепления и оценки их энергий. Испущено четыре заряженных π -мезона; полное видимое выделение энергии составляет 1,4 Бэв. Малая энергия последующего расщепления ядра указывает на то, что ни один из вторичных π -мезонов, образованных в результате акта аннигиляции, не поглотился. Цифрами у следов вторичных частиц указана их измеренная энергия в Мэв.

Birge, Haddock, Kerth, Peterson, Sandweiss, Stork, Whitehead, неопубликованная работа, 1956 г.

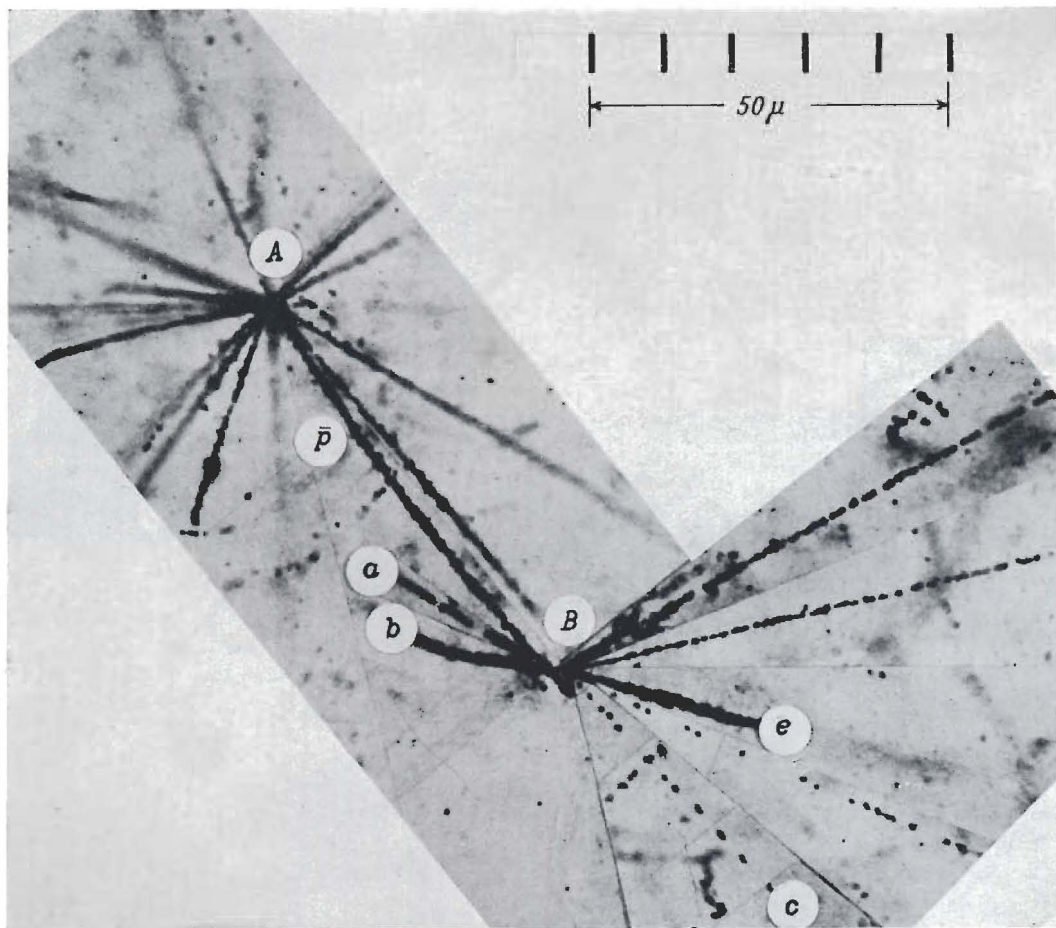


Фото 122. Первый случай наблюдения в ядерной эмульсии события, которое интерпретировалось как образование и аннигиляция антипротона. Эмульсия Ильфорд G5.

На микрофотографии показано первое из зарегистрированных в фотоэмульсии событий, приписываемых аннигиляции антипротона. Из расщепления в точке *A* выходит след, обозначенный \bar{p} . Он, по-видимому, рассеивается примерно на 90° вблизи конца пробега и останавливается в точке, которая не отличима от центра вторичного расщепления *B*. „Звезда“ в точке *B*, как теперь известно, аналогична по своему характеру тем „звездам“, которые, несомненно, обусловлены ядерным захватом антипротонов. Сомнение вызывает только вопрос о том, не является ли точка кажущегося рассеяния следа \bar{p} на самом деле местом остановки \bar{p} -частицы, в котором случайно закончился также и короткопробежный след из „звезды“ *B*.

A m a l d i et al., Report of CERN Symposium on High-energy Nuclear Physics, Vol. 2, 1956, p. 111.

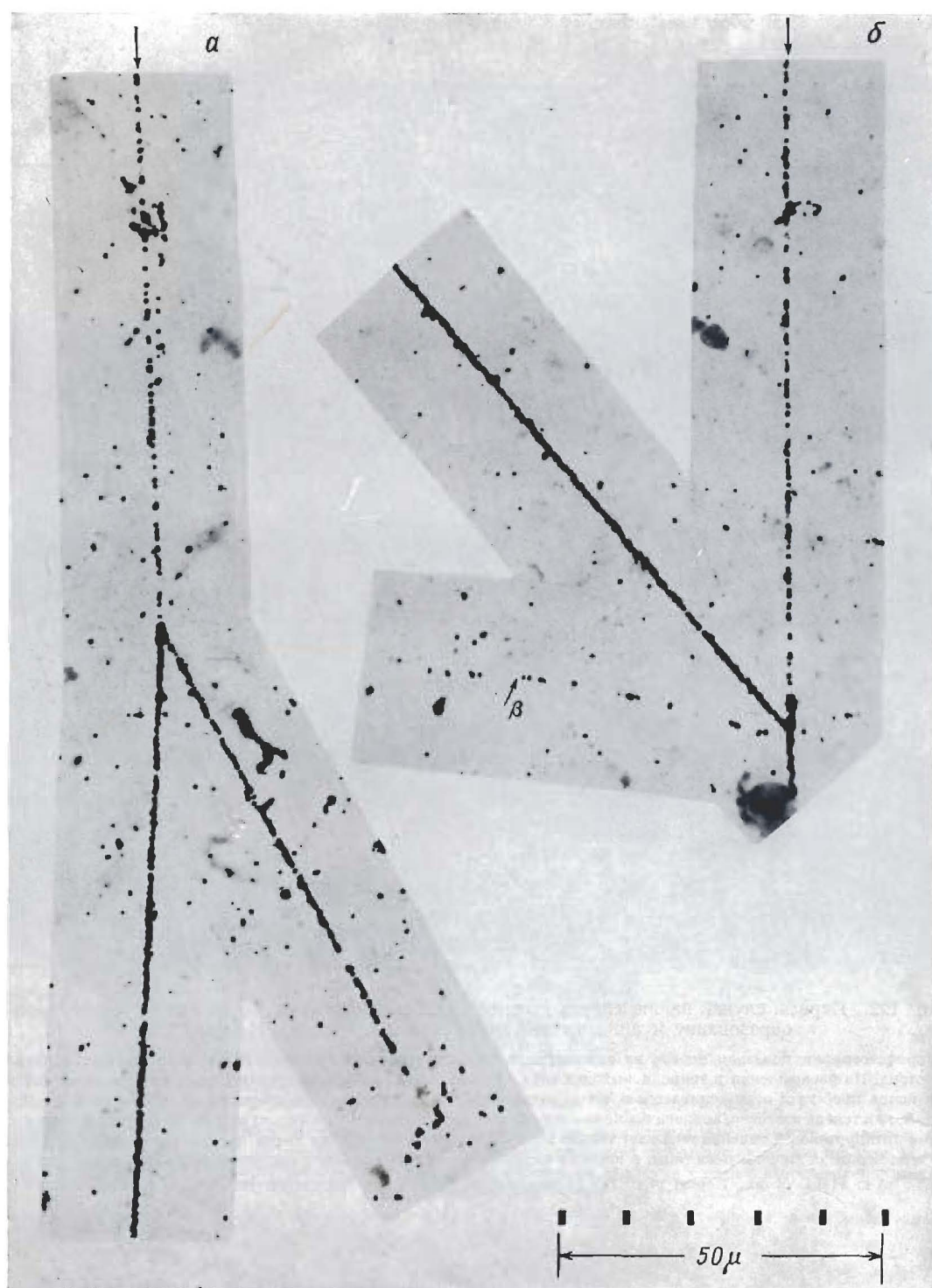


Фото 123. Столкновения протонов с ядрами при энергиях 52 и 145 Мэв. Эмульсия Ильффорд G5.

Зафиксированы вторичные расщепления, вызванные протонами с энергией 145 Мэв (а) и 52 Мэв (б), испущенными при других расщеплениях. След слабо ионизирующей частицы в расщеплении принадлежит электрону, вышедшему, вероятно, при β -распаде остаточного ядра. Обе „звезды“ принадлежат к типу $2 + 0p$. Бета-распад образовавшегося ядра встречается редко.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.

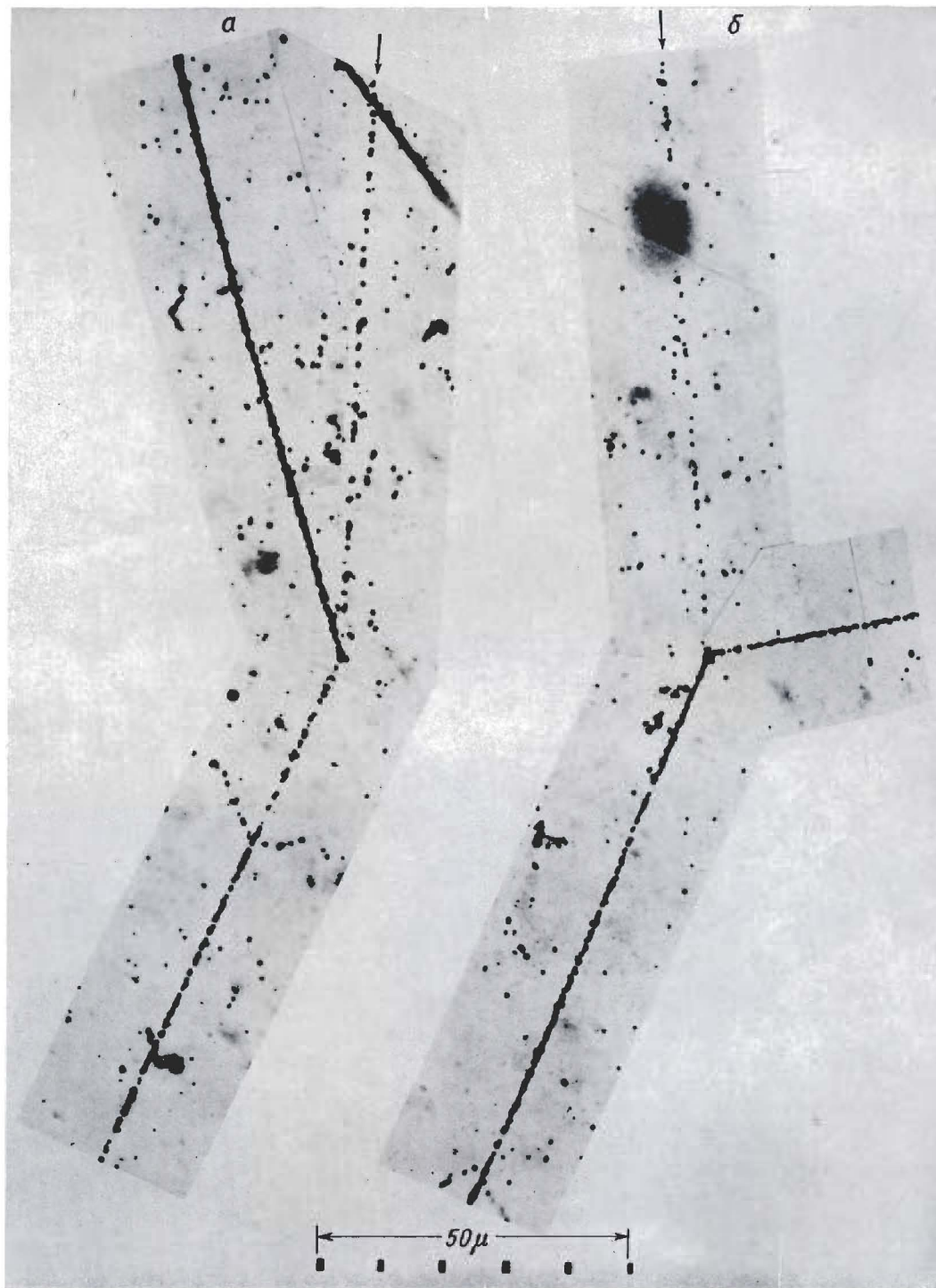


Фото 124. Взаимодействия протонов с ядрами при энергиях 90 и 270 Мэв. Эмульсия Ильфорт G5. Расщепления, вызванные протонами с энергией 90 Мэв (а) и 270 Мэв (б). Протоны были идентифицированы по результатам измерений $\bar{\alpha}$ и g . „Первичная“ их природа следует из того, что они вылетают из расщеплений с более высокой энергией; таким образом, направление движения этих протонов известно вполне определенно. Обе „звезды“ типа 2 + 0р.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.

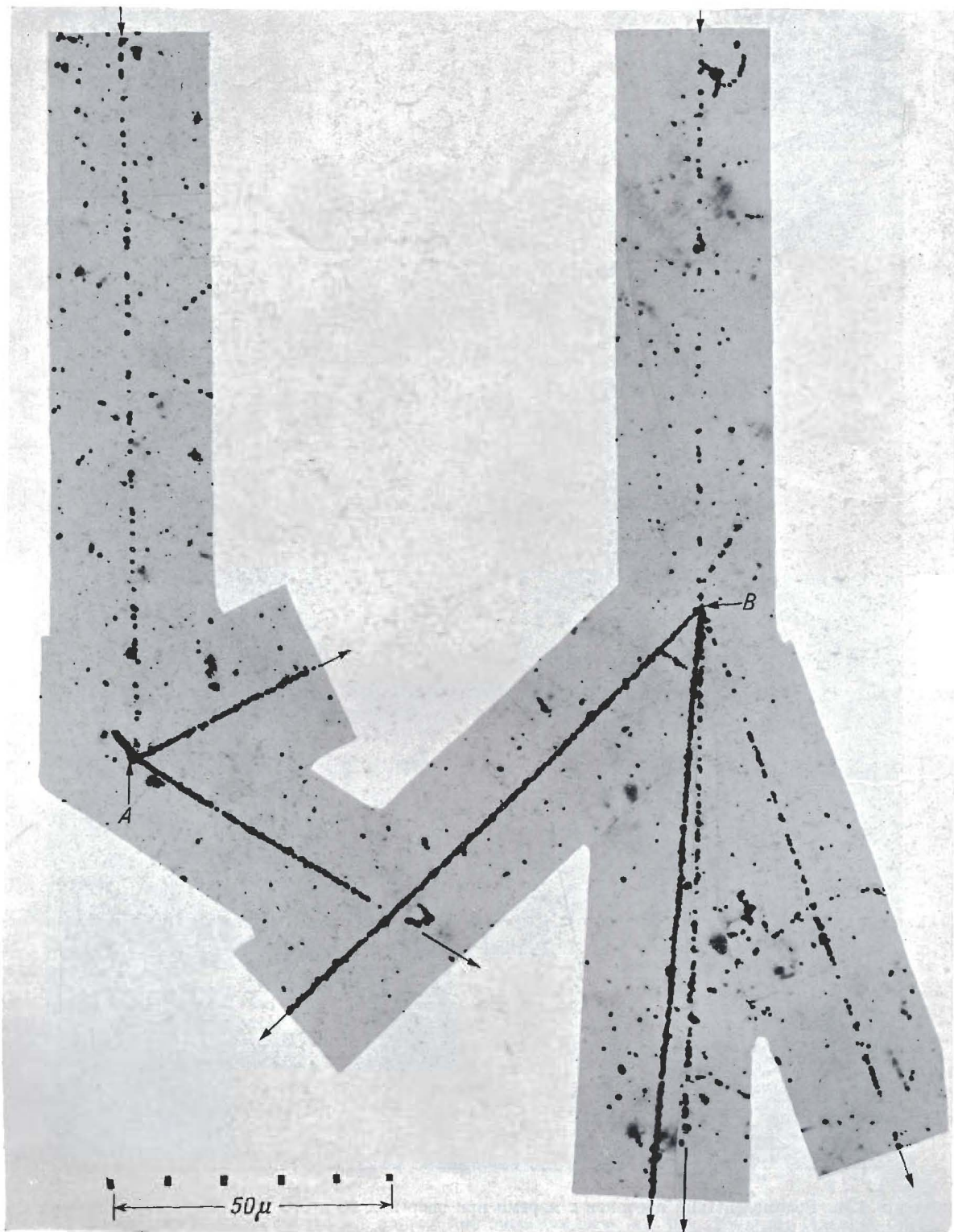


Фото 125. Взаимодействия протонов с ядрами при энергиях 255 и 600 Мэв. Эмульсия Ильфورد G5.

A — „звезда“ типа 3 + 0р, образованная протоном с энергией 255 Мэв;
 B — „звезда“ типа 4 + 0р, образованная протоном с энергией 600 Мэв.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.

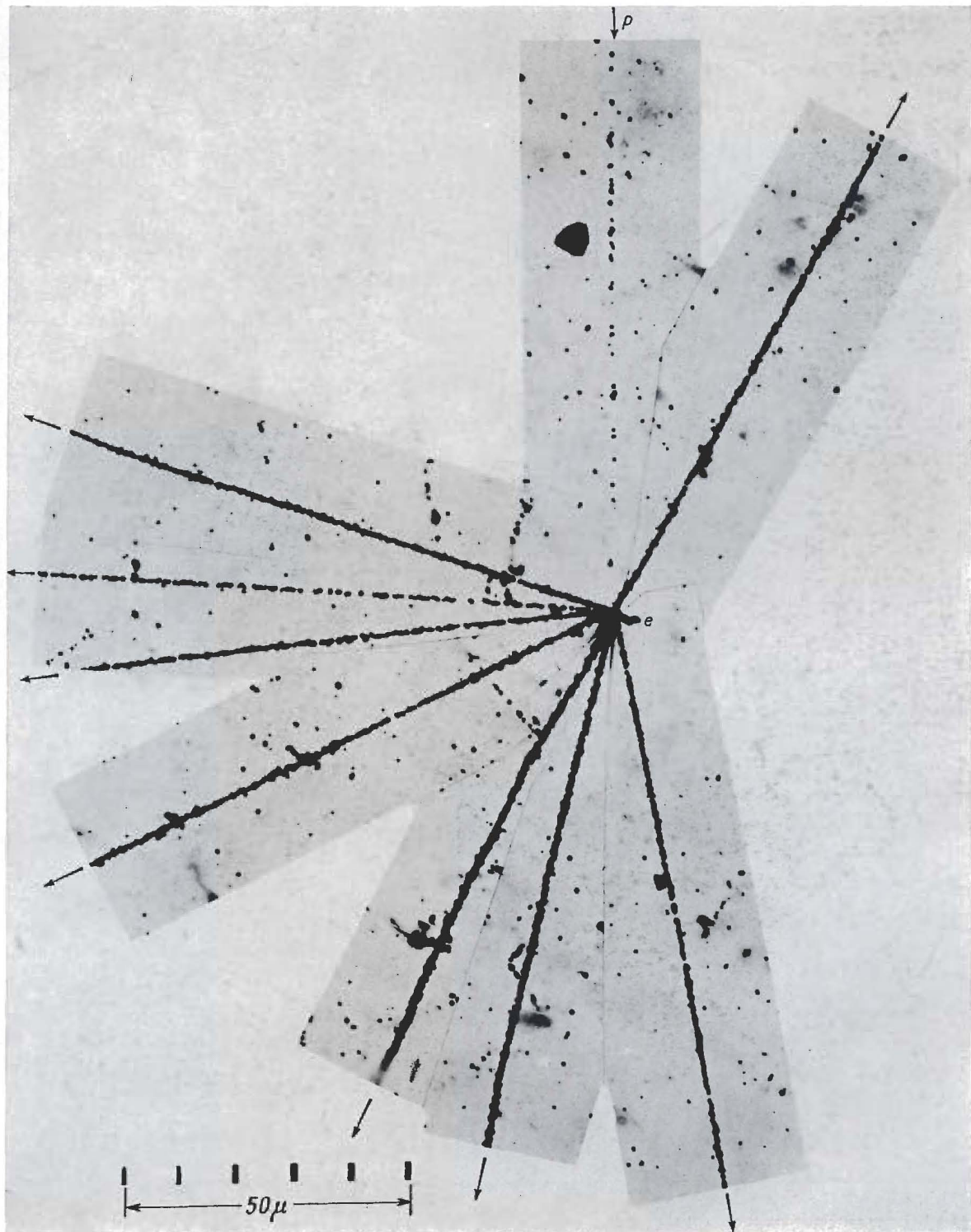


Фото 126. Ядерное взаимодействие протона с энергией 570 Мэв. Эмульсия Ильфорт G5.
Протон космических лучей с энергией 570 Мэв сталкивается с ядром и при этом образуется „звезда“ типа $9 + 0\rho$.
Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.

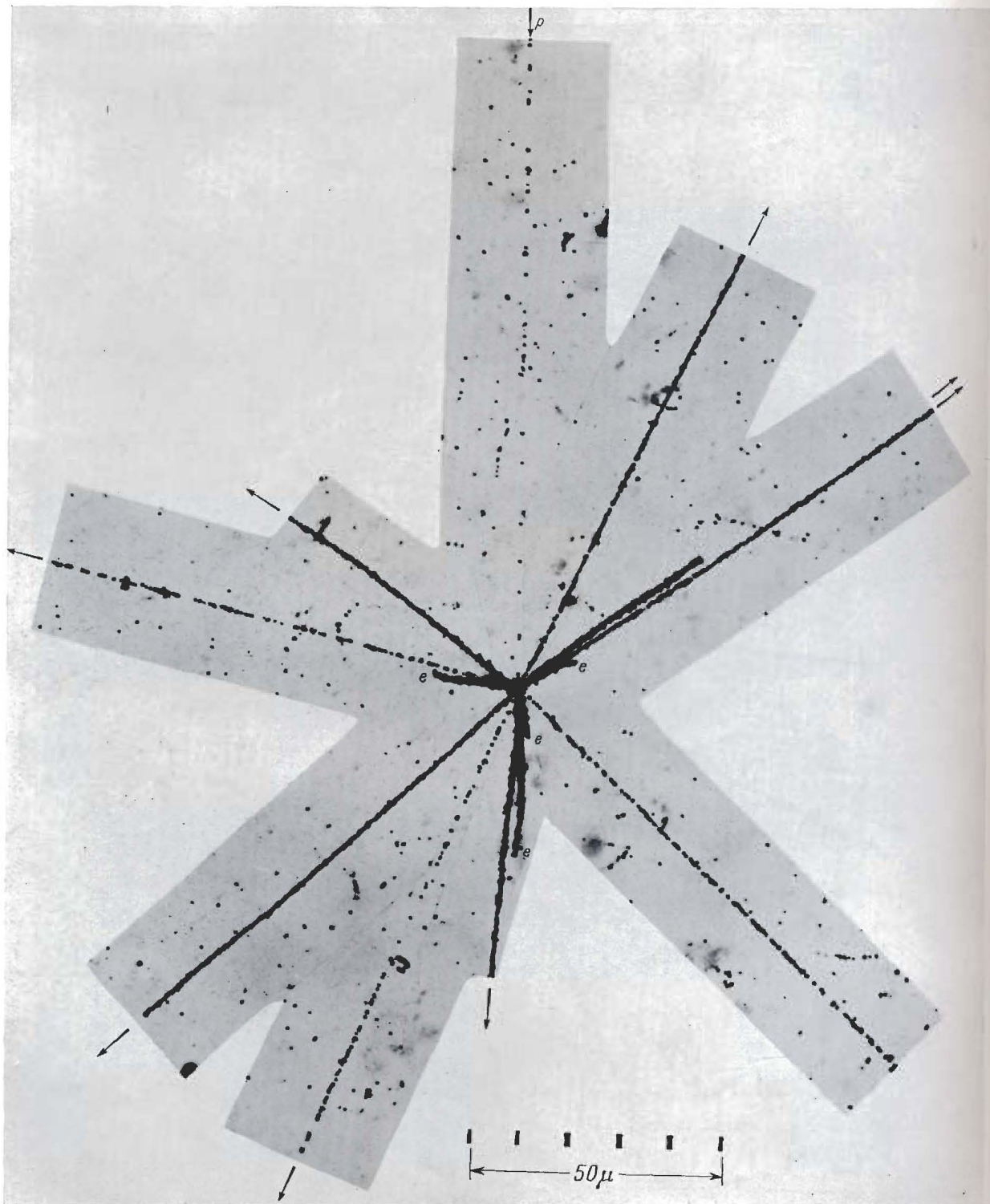


Фото 127. Ядерное взаимодействие протона с энергией 1 Бэв. Эмульсия Ильфорт G5.
Протон с энергией 1 Бэв образует „звезду“ типа 13 + 0р. Четыре вторичные заряженные частицы e имеют короткий пробег и останавливаются в эмульсии.
Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.

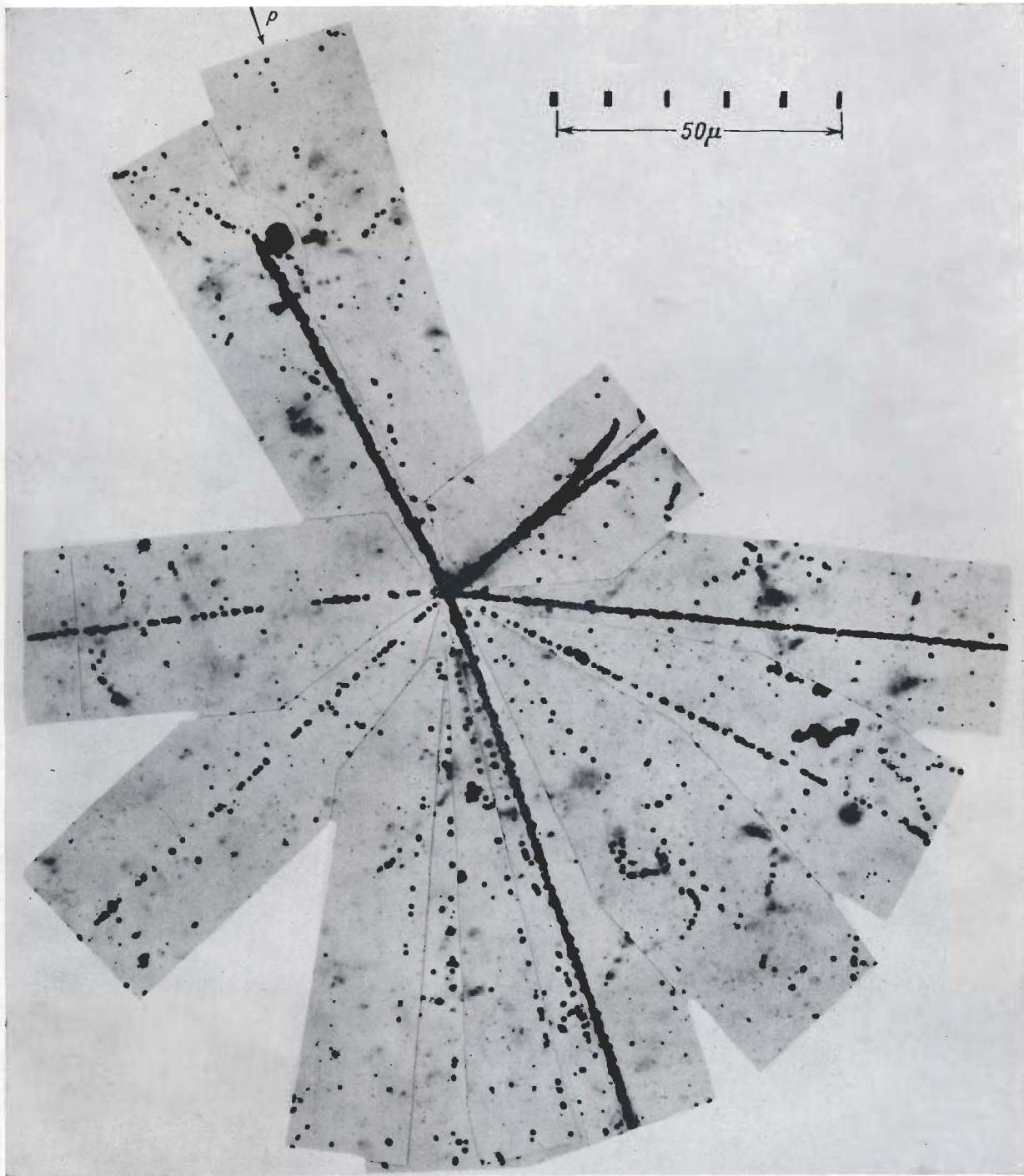


Фото 128. Ядерное взаимодействие протона с энергией 4 Бэв. Эмульсия Ильфорт G5.

Протон образует „звезду“ типа 8 + 5р.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.

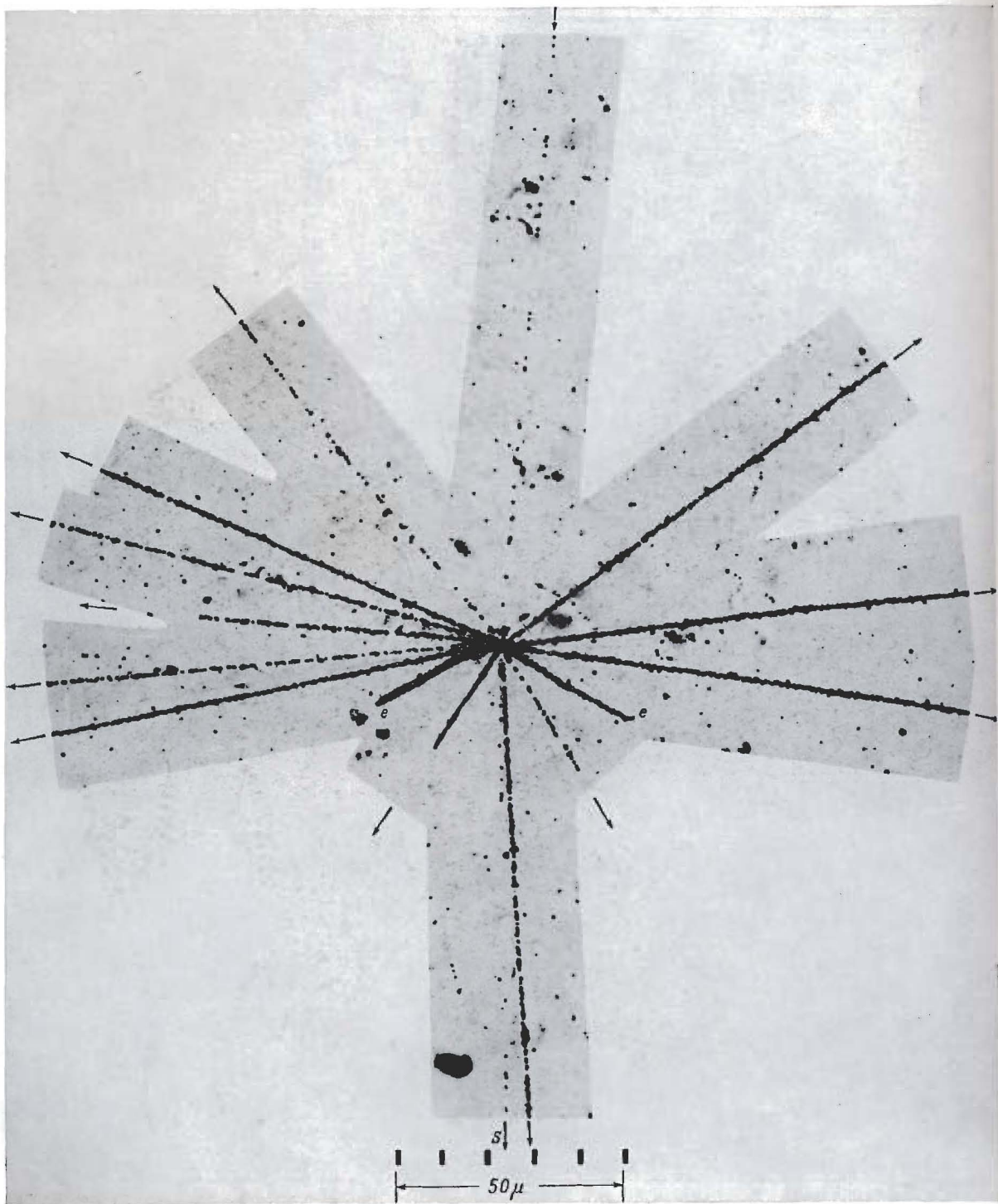


Фото 129. Ядерное расщепление, вызванное протоном с энергией 8 *Бэв*. Эмульсия Ильффорд G5.
Протон, столкнувшийся с ядром серебра или брома, образовал „звезду” типа 14 + 1р.
Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.

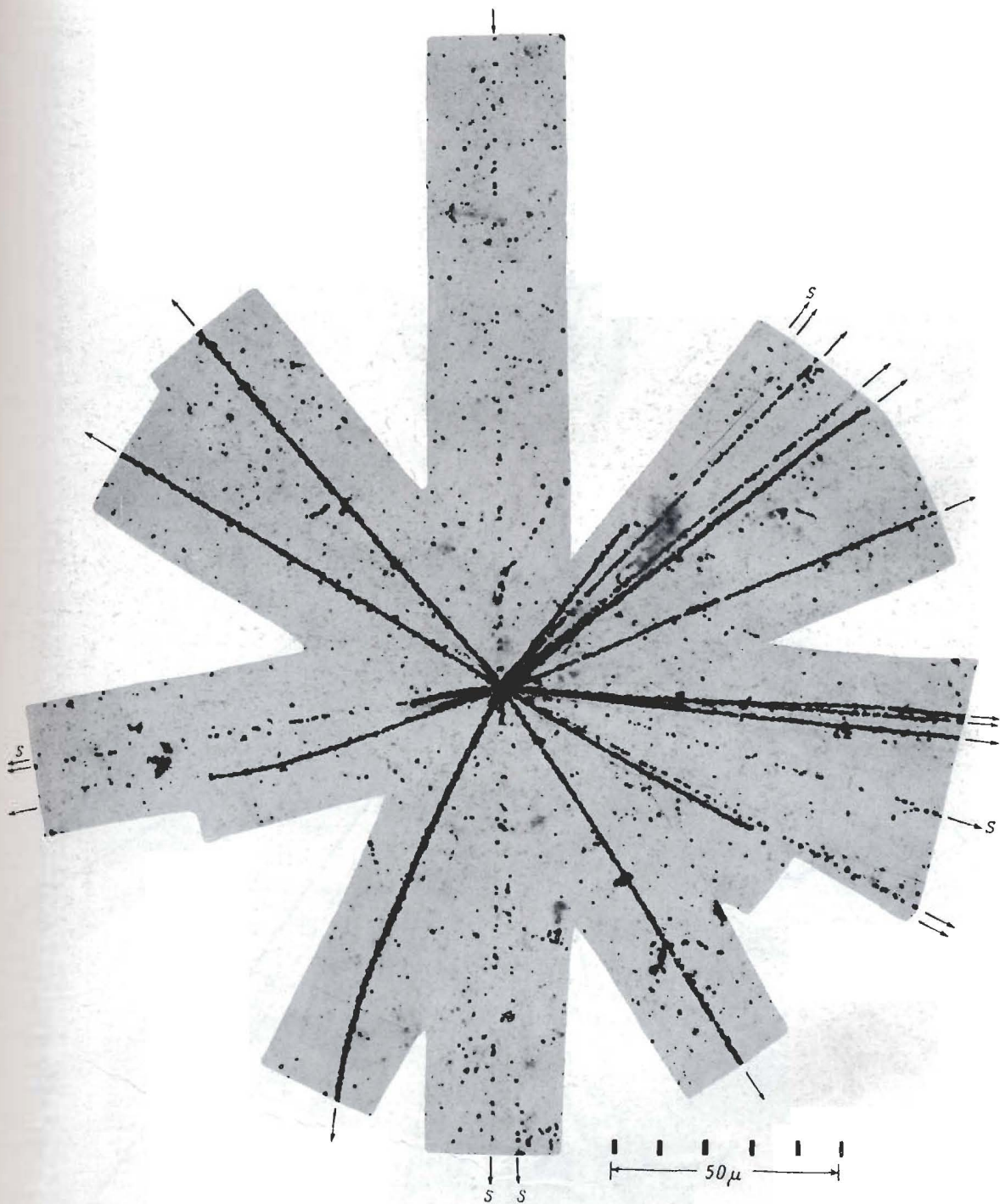


Фото 130. Ядерное взаимодействие протона с энергией 8 Бэв. Эмульсия Ильфторд G5.

Сталкиваясь с ядром серебра или брома, протон образует „звезду” типа $16 + 5p$. Большинство ливневых частиц и некоторые из частиц, образующих „серые” следы, вероятно, являются мезонами. Для протонов такой энергии К-частицы составляют менее одной десятой от общего числа мезонов.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.

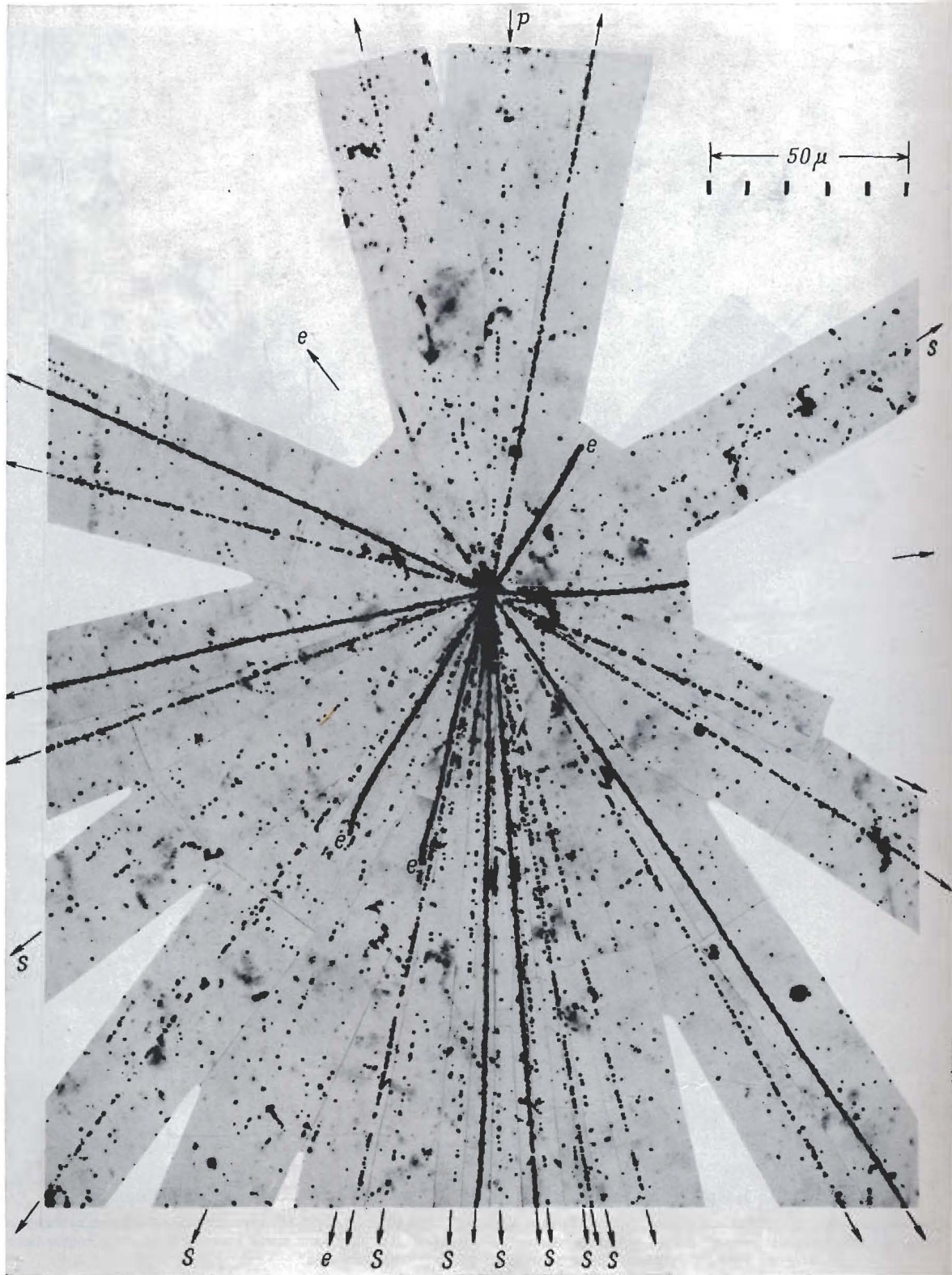


Фото 131. Расщепление ядра серебра или брома протоном с энергией 30 Бэв. Эмульсия Ильфорд G5. Протон вызывает образование „звезды“ типа 22 + 9р. Видно, что даже для протонов такой энергии направления вылета ливневых частиц еще не лежат в пределах узкого телесного угла. Ливневые частицы обозначены буквой S, частицы, достигшие конца своего пробега в эмульсии в пределах поля зрения, — буквой e.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.

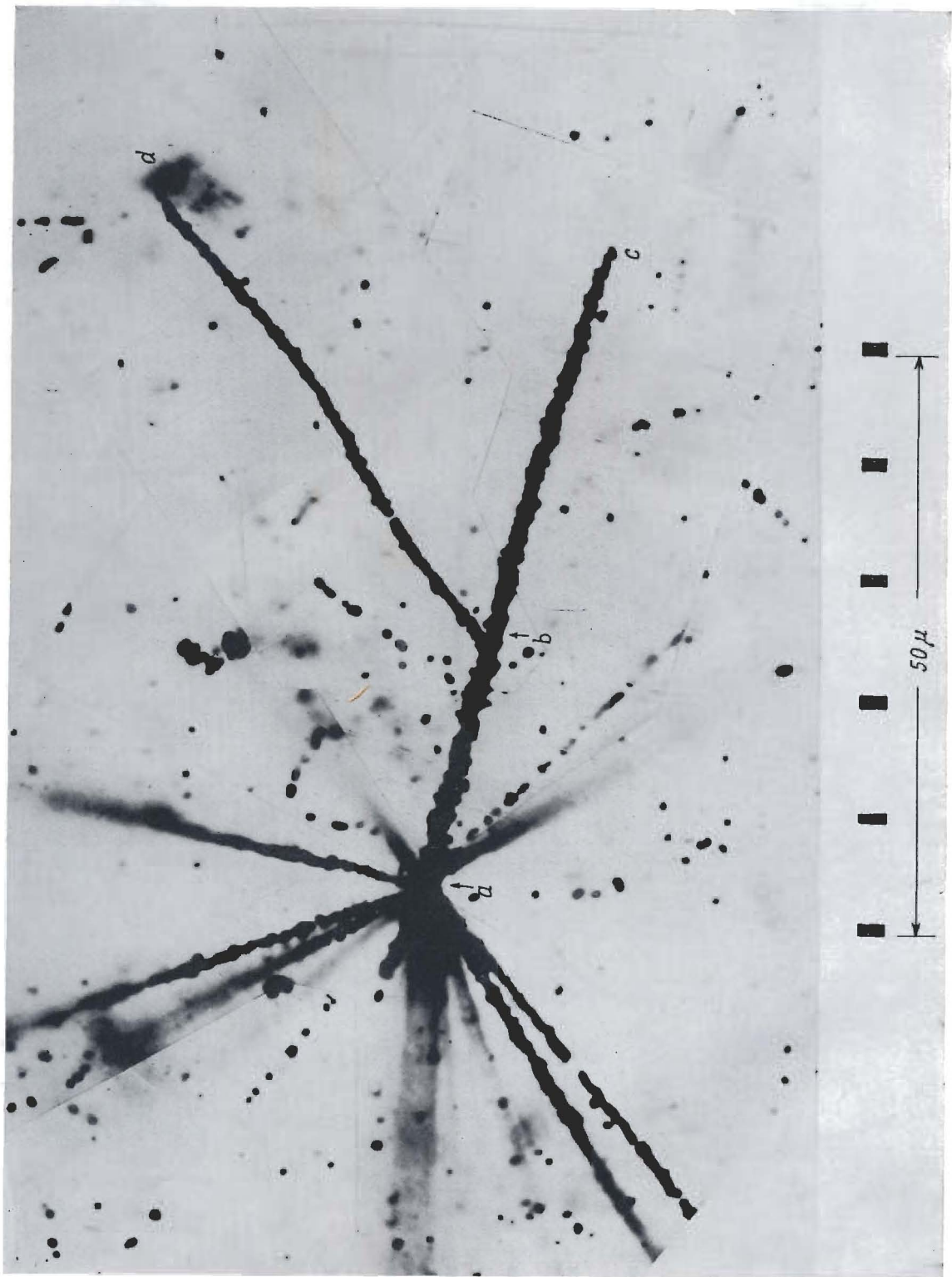


Фото 132. Испускание ядра углерода при расщеплении. Эмульсия Илфорд G5.

Тяжелый ядерный осколок вылетает при расщеплении в точке *a*. В точке *b* он сталкивается с протоном и достигает конца своего пробега в точке *c*.

Fowler, неопубликованная работа.



Фото 133. Молоткообразные следы. Эмульсия Ильфорд G5.
Неопубликованная работа.

На фото показаны примеры молоткообразных следов. Два из них, α и β , принадлежат ядрам V_8^8 , вылетающим из „звезд“, и один — ядру Li^8 ; последний след состоит из двух частей β и α , которые соединяются друг с другом в точке x . Все эти осколки достигают конца своего пробега и распадаются характерным образом на две α -частицы. В каждом случае наблюдается след электрона, вылетающего при β -распаде, однако не предпринималось никаких мер, чтобы воспроизвести эти следы на фотографиях. Ввиду достаточно большой длины следов (больше 250μ) оказалось возможным различить ядра Li^8 и V^8 ; при просмотре фотографии видно, что там, где остаточный пробег превышает 100μ , значения N_λ для двух типов следов сильно различаются.

В случае ядра V_8^8 , показанного на полоске β , возможен детальный анализ, поскольку частица столкнулась в эмульсии с протоном и выбила его. Отсюда можно показать, что массовое число тяжелой частицы приблизительно 8, а заряд $Z = 5$.

Если частица с массой M_1 упруго сталкивается с другой, покоящейся в эмульсии частицей, имеющей массу M_2 , и если ударная частица вылетает под углом φ относительно направления движения падающей частицы, тогда как сама падающая частица рассеивается на угол θ , то, как мы видели (стр. 112), для нерелятивистских скоростей справедливо следующее соотношение:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\sin 2\varphi}{\left(\frac{M_1}{M_2} - \cos 2\varphi\right)},$$

откуда

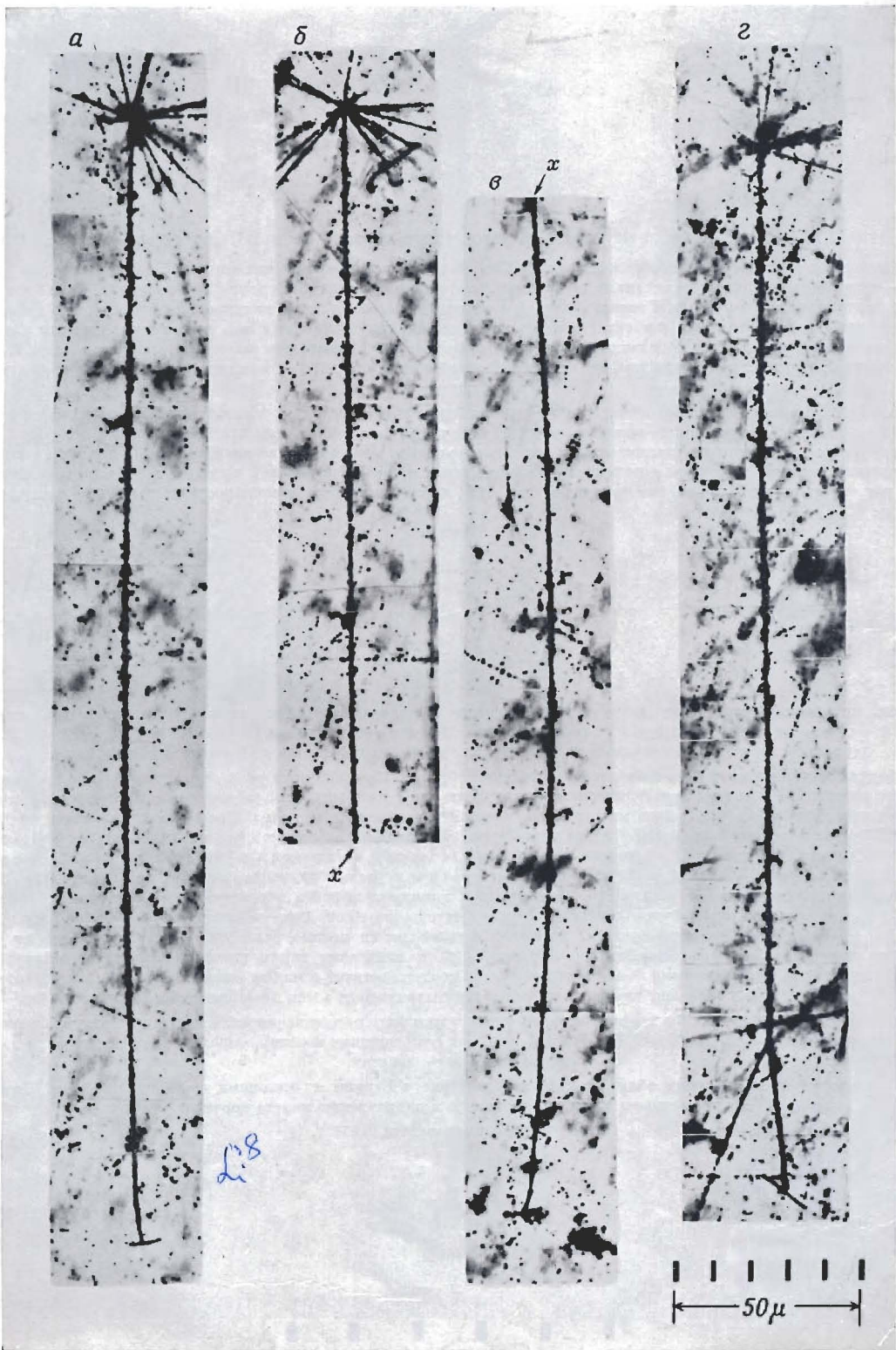
$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\sin(2\varphi + \theta)}{\sin \theta}.$$

Три следа, проходящие через одну точку внизу полоски β , находятся в одной плоскости и измеренные значения углов θ и φ равны $5,6 \pm 0,4^\circ$ и $22,1 \pm 0,3^\circ$ соответственно. Получающееся отсюда отношение $M_1/M_2 = 7,8 \pm 0,5$, и это хорошо согласуется со значением 8, вытекающим из факта образования молоткообразного следа.

Оценка заряда частицы может быть выполнена следующим образом. Предположим снова, что столкновение произошло со свободным протоном. Тогда перпендикулярные к направлению движения первичной частицы компоненты импульсов двух вторичных частиц должны быть равны между собой и противоположно направлены. Пробег протона отдачи составляет $1,3 \text{ мм}$, что соответствует энергии 16 Мэв . Отсюда следует, что энергия частицы с массой 8 равна $29,7 \text{ Мэв}$. Измеренная длина пробега этой частицы составляет 42μ и хорошо согласуется с величиной, ожидаемой для частицы с энергией 30 Мэв и зарядом $Z = 5$, которая равна $\sim 40 \mu$. Ядро Li^8 с такой же энергией имело бы пробег свыше 100μ (см. фиг. 29, стр. 74). Другой возможный подход заключается в следующем. Пренебрежем влиянием эффекта перезарядки на соотношение пробег — энергия для тяжелых частиц и будем считать, что для частицы с массой Mm_p и зарядом Z его можно представить в виде $R_{M,Z} = (M/Z^2)/v$. Энергия протона, летящего с такой же скоростью, равна $29,7/8 \text{ Мэв}$, а его пробег 114μ . Подставляя измеренное значение R_M , можно определить Z , и найденная таким способом величина составляет $4,7$. Согласно этому результату с данными более точных методов свидетельствует о малом влиянии перезарядки на соотношение пробег — энергия для тяжелых частиц в рассматриваемом здесь энергетическом диапазоне.

Событие, показанное на полосках β и α , примечательно тем, что из одного расщепления выходят два молоткообразных следа. Один из них с пробегом $\sim 800 \mu$ образован ядром Li^8 , а второй след слишком короток, чтобы по нему можно было надежно идентифицировать частицу.

Все эти следы получены в эмульсиях, облучавшихся на беватроне в Беркли π^- -мезонами с энергией $4,5 \text{ Бэв}$. На фото β тяжелый осколок испущен назад по отношению к направлению полета первичного π -мезона.



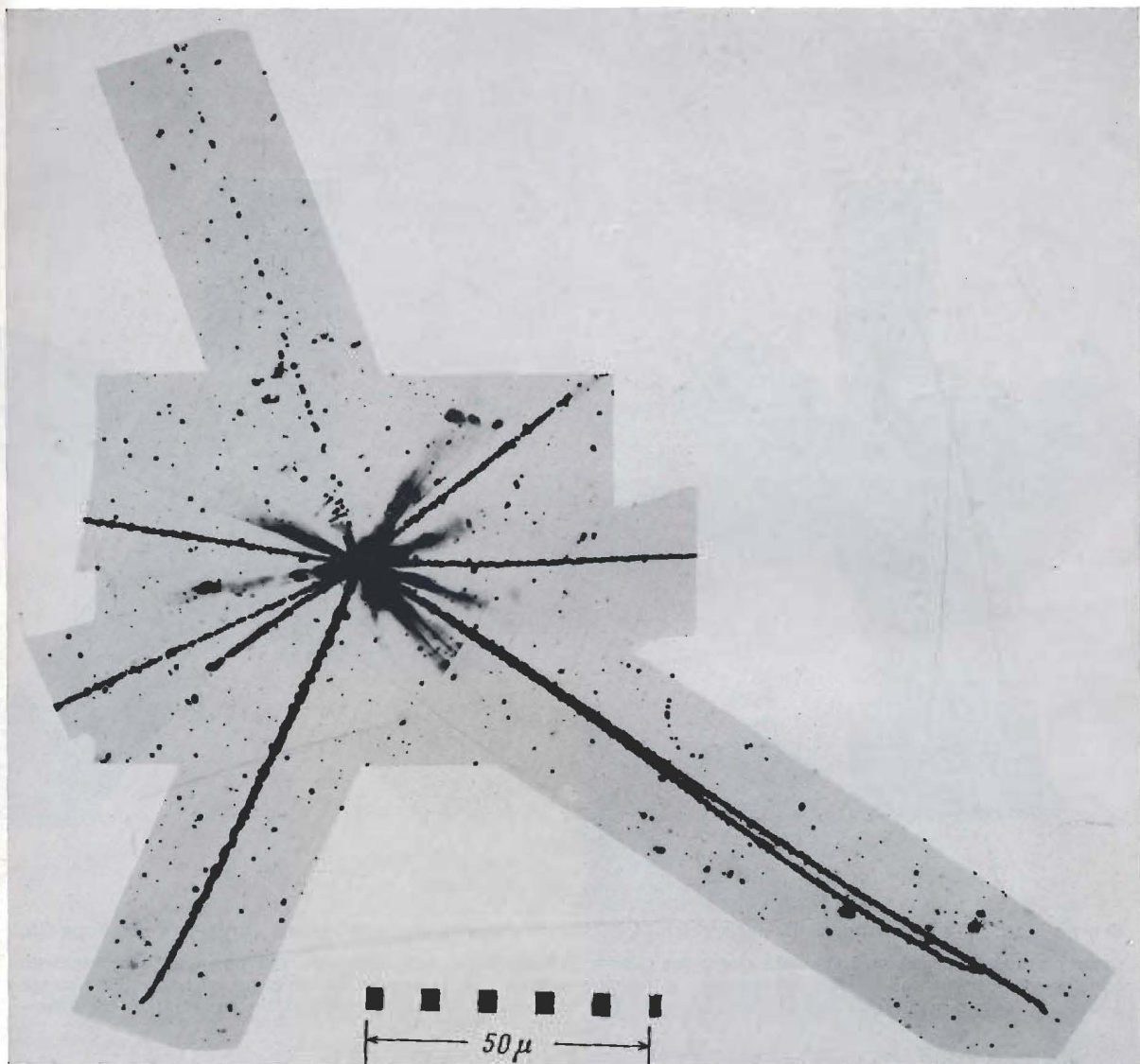


Фото 135. Испускание ядра Be^8 при расщеплении. Эмульсия Ильфорт G5.

Иногда при ядерных расщеплениях наблюдаются пары α -частиц с приблизительно одинаковыми пробегам, летящие почти в одном направлении. Каждая из этих пар испускается при распаде ядра Be^8 из основного состояния, характеризующегося очень коротким временем жизни. Ядро Be^8 распадается на две α -частицы с очень незначительным выделением энергии.

Perkins, неопубликованная работа.

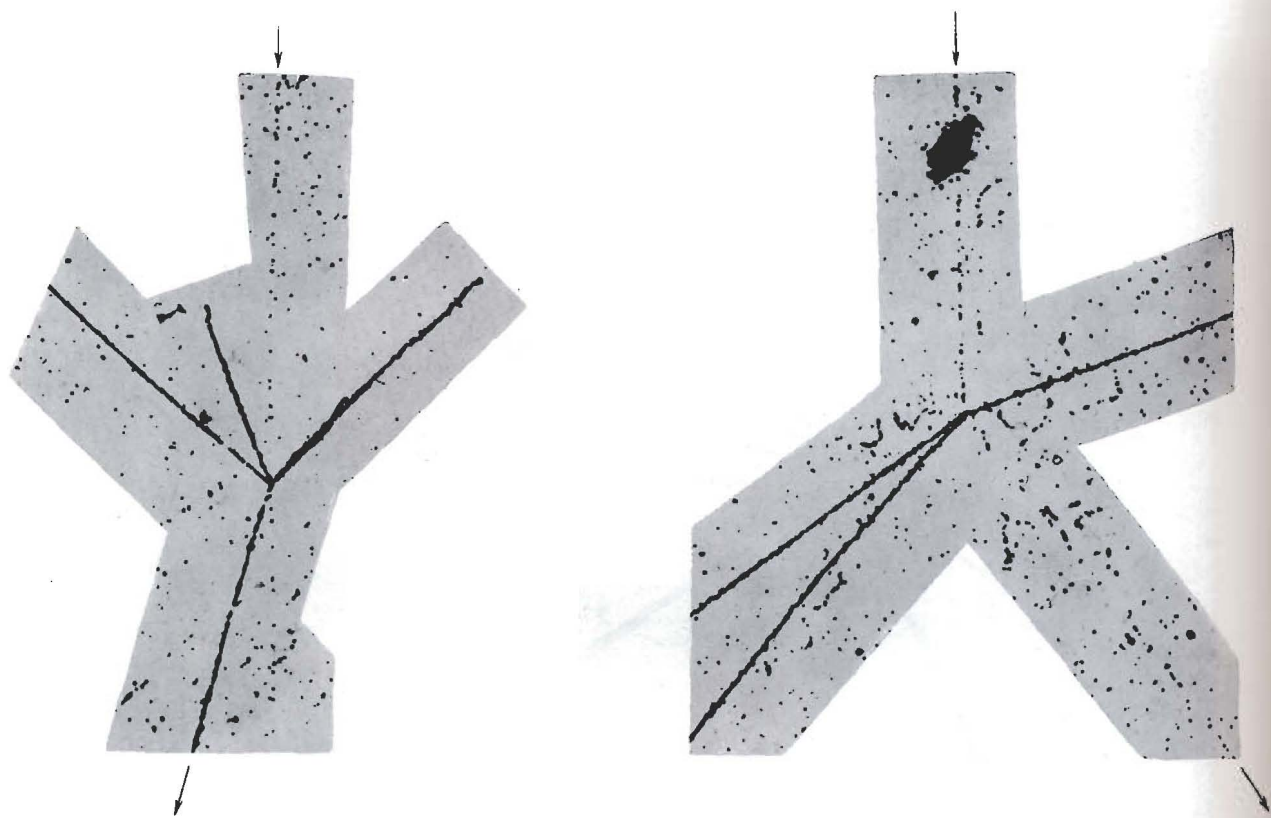


Фото 136. Типичные примеры расщеплений, вызванных быстрыми μ -мезонами. Эмульсия Ильфорт G5.

Среди результатов первых наблюдений имелось два события, которые могли быть приписаны быстрым μ -мезонам. Эмульсия была полита и проявлена в шахте глубиной 60 м водяного эквивалента. В каждом случае после столкновения вылетел μ -мезон. На фото справа необычным является значительное отклонение мезона от первоначального направления его движения.

George, Evans, Proc. Phys. Soc., 63, 1248 (1950).

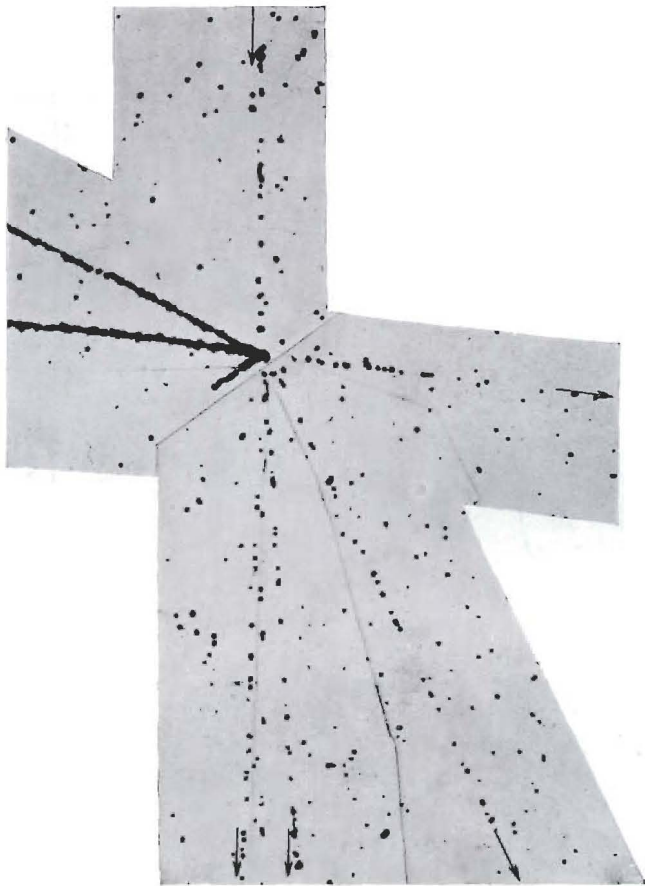
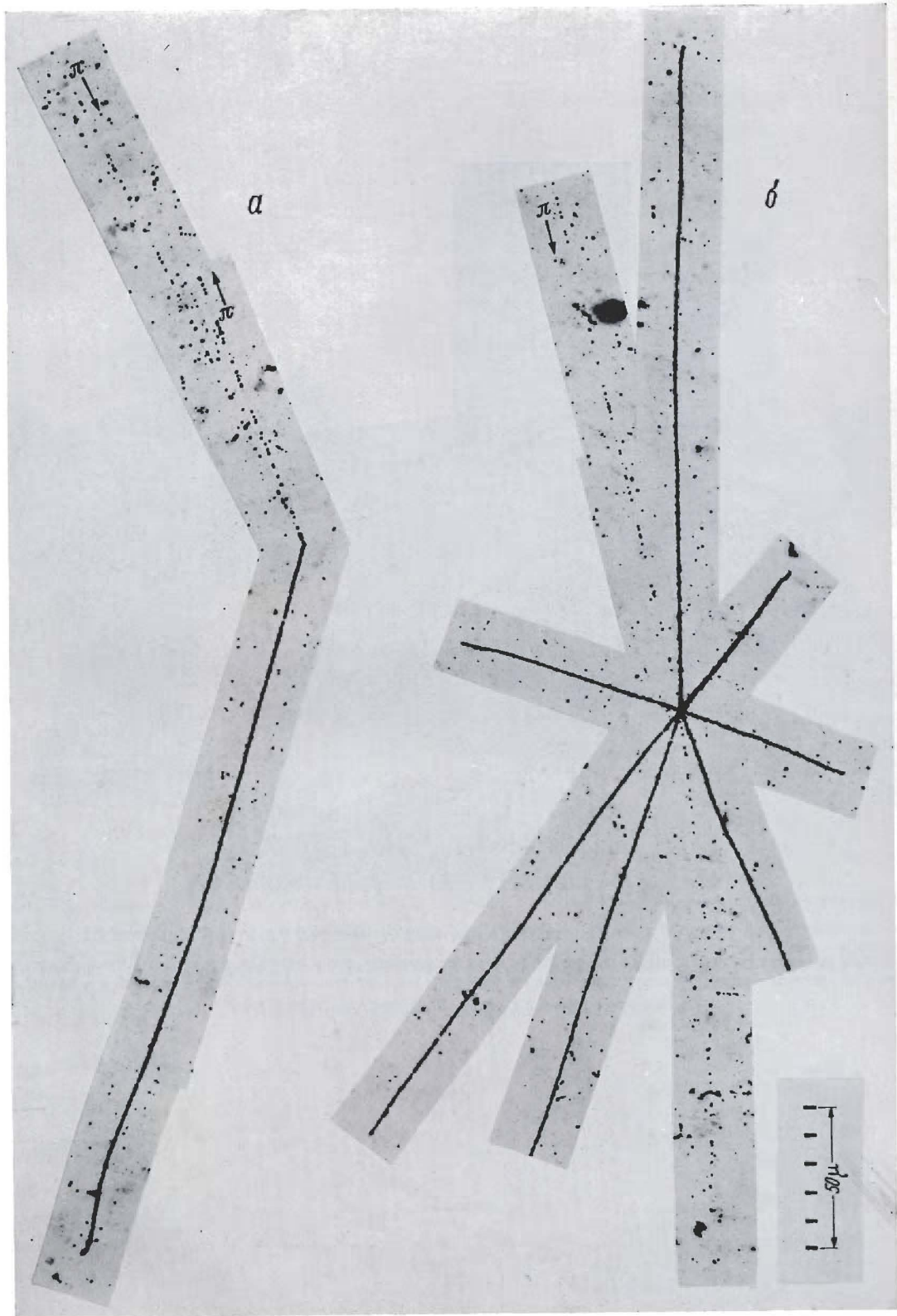


Фото 137. Образование мезонов быстрым μ -мезоном. Эмульсия Ильфод G5.

При подобных редких событиях, зарегистрированных в тех же условиях, что и фото 136, в результате взаимодействия первичной частицы с ядром образуется несколько быстрых частиц, которые, вероятнее всего, являются π -мезонами.

George, Evans, Proc. Phys. Soc., 63 1248 (1950).



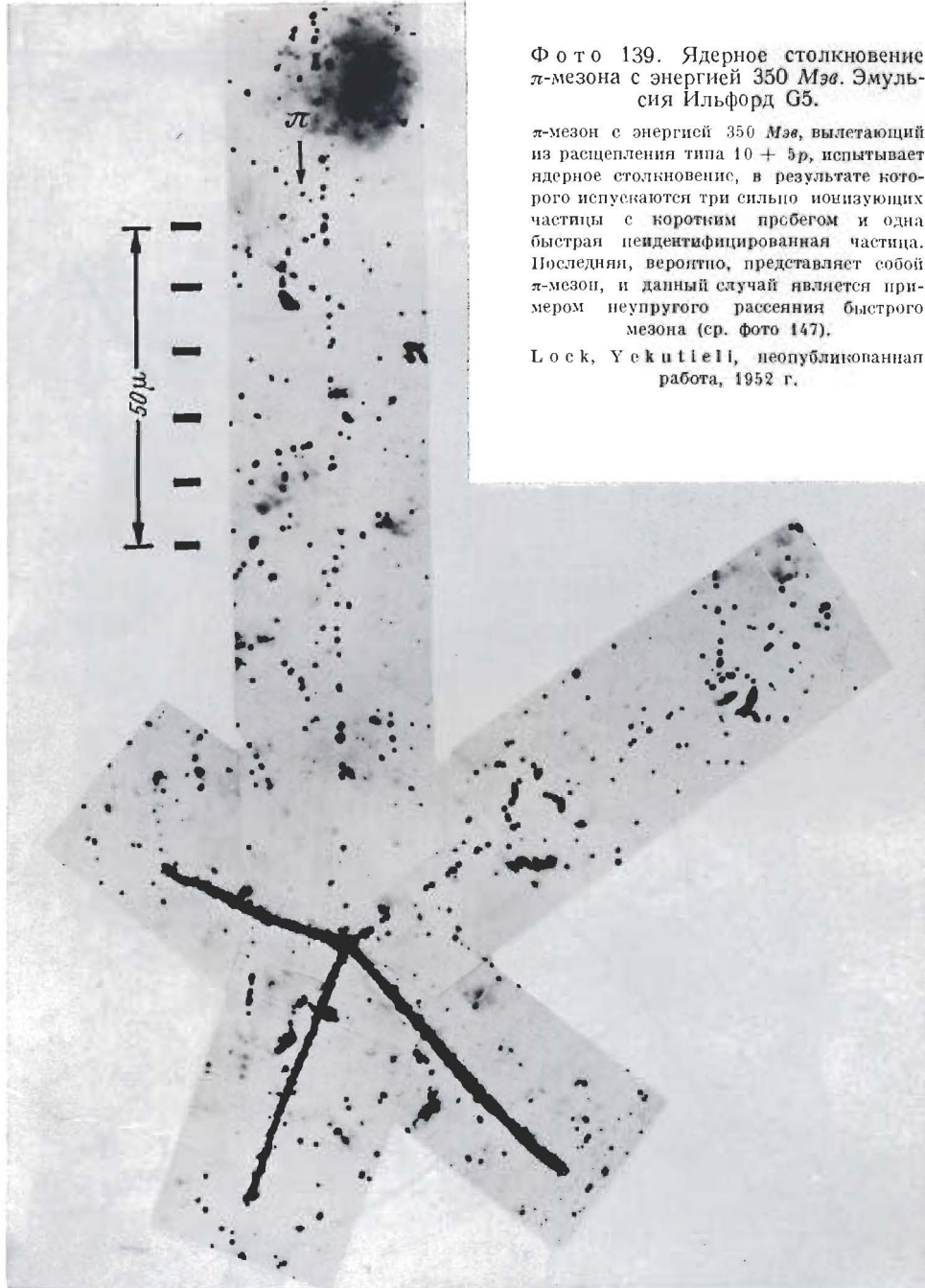


Фото 139. Ядерное столкновение π -мезона с энергией 350 Мэв. Эмульсия Ильффорд G5.

π -мезон с энергией 350 Мэв, вылетающий из расщепления типа $10 + 5p$, испытывает ядерное столкновение, в результате которого испускаются три сильно ионизирующих частицы с коротким пробегом и одна быстрая неидентифицированная частица. Последняя, вероятно, представляет собой π -мезон, и данный случай является примером неупругого рассеяния быстрого мезона (ср. фото 147).

Локк, Уекиттели, неопубликованная работа, 1952 г.

Фото 139

Фото 138. Образцы первых снимков ядерных столкновений π -мезонов с энергией 79 и 280 Мэв. Эмульсия Ильффорд G5.

В обоих случаях идентификация природы и энергии падающих π -мезонов является совершенно определенной, поскольку оба они были образованы космическими лучами при ядерных взаимодействиях в эмульсии. В случае *a* мезон является вторичной частицей, испущенной из расщепления типа $6 + 4p$. В результате ядерного столкновения мезон рассеивается под углом около 180° относительно первоначального направления своего движения и его энергия при этом равна ~ 67 Мэв. Это событие нельзя считать столкновением со свободным ядром водорода, так как совершенно очевидно, что протон отдачи не может сбалансировать изменение импульса мезона.

В случае *b* мезон с энергией 240 Мэв, вылетевший из расщепления типа $5 + 2p$, вызывает „вторичное“ расщепление. Вторичная частица, образовавшая след с большим рассеянием и слабой удельной ионизацией, имеет малую массу. По-видимому, она является электроном, образовавшимся в результате β -распада ядерного осколка, который остался после частичного „испарения“ ядра-мишени. При учете закона сохранения энергии маловероятно, чтобы в данном столкновении вылетел нейтральный π -мезон; по-видимому, в данном случае происходит ядерный захват быстрого π -мезона. Бета-распад остающегося после столкновения ядра наблюдается очень редко.

Локк, Уекиттели, неопубликованная работа, 1952 г.

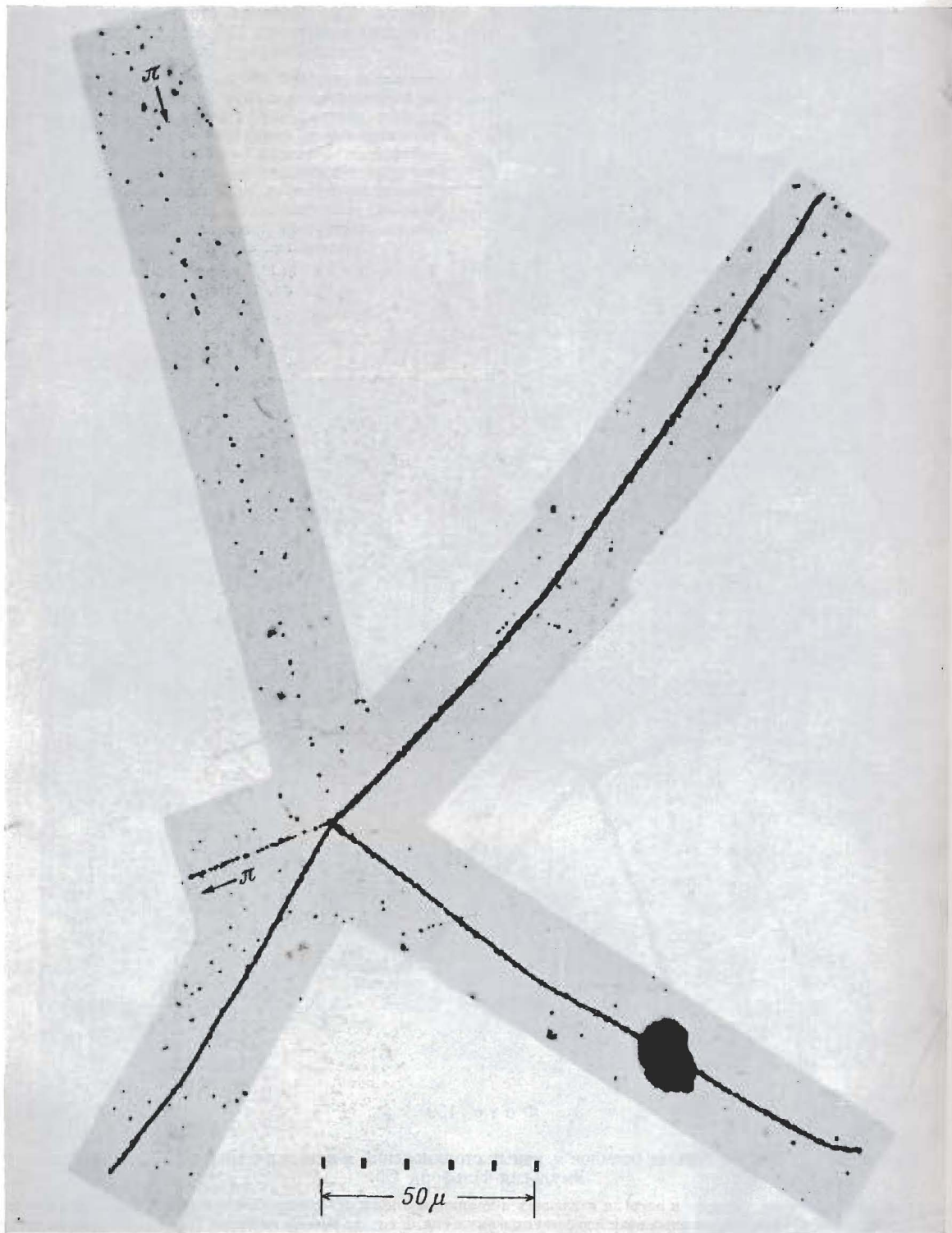


Фото 140. Один из первых снимков ядерного взаимодействия π -мезона с энергией 560 Мэв. Эмульсия Ильффорд G5.

π -мезон с энергией 560 Мэв вылетает из „первичного“ расщепления типа $5 + 1n$. Это событие, которое по внешнему виду весьма напоминает приведенное на фото 139, по-видимому, представляет собой упругое столкновение π -мезона с ядром, не сопровождающееся рождением мезонов.

Лоск, Уекитиели, неопубликованная работа, 1952 г.

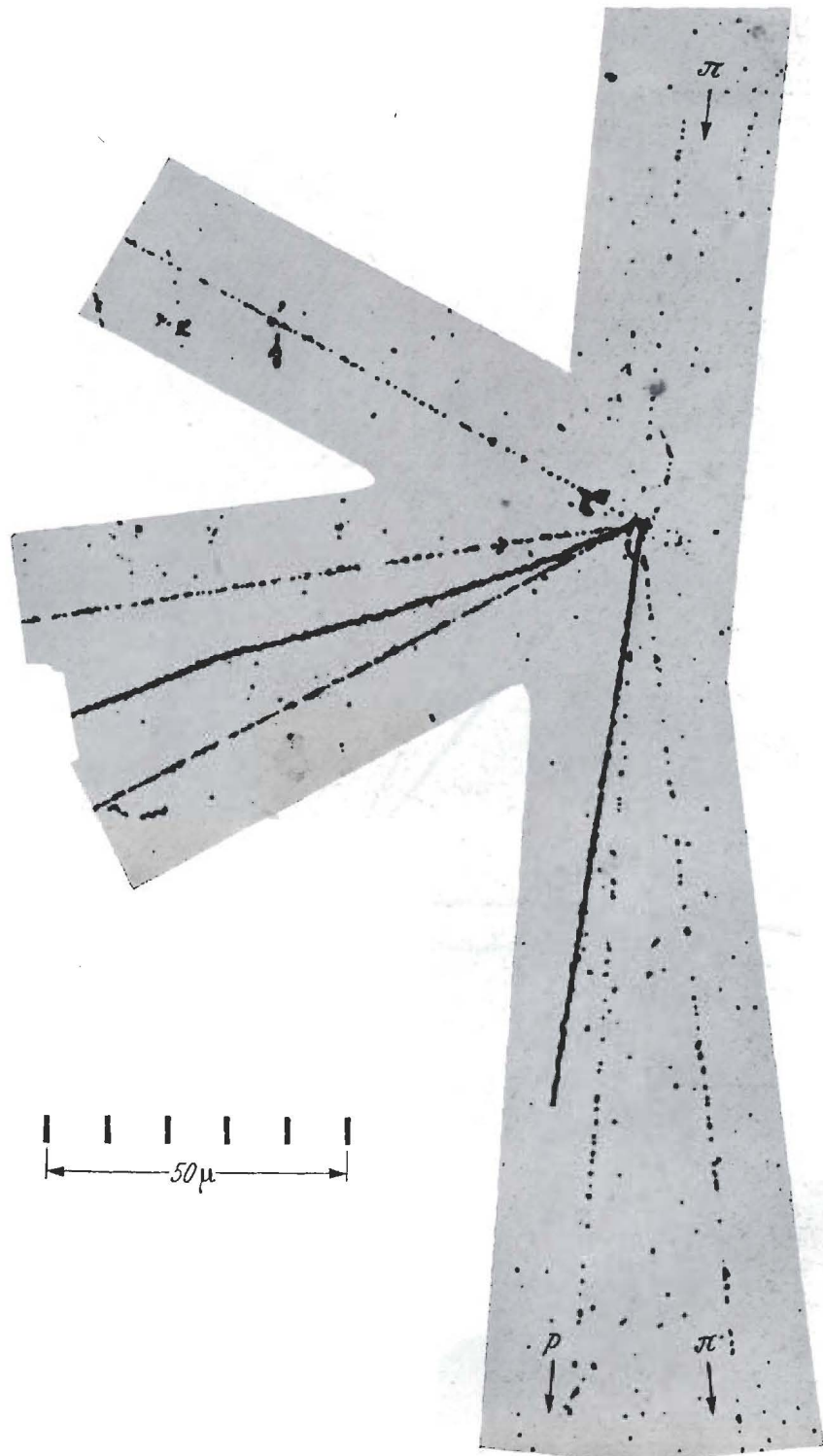


Фото 141. Один из первых зарегистрированных случаев ядерного столкновения π -мезона с энергией 640 Мэв. Эмульсия Ильфорд G5.

Падающий мезон выбивает из ядра мишени протон p с энергией 380 Мэв и π -мезон с энергией 40 Мэв. Другие следы слишком коротки, чтобы по ним можно было идентифицировать соответствующие частицы.

Локк, Уекителли.

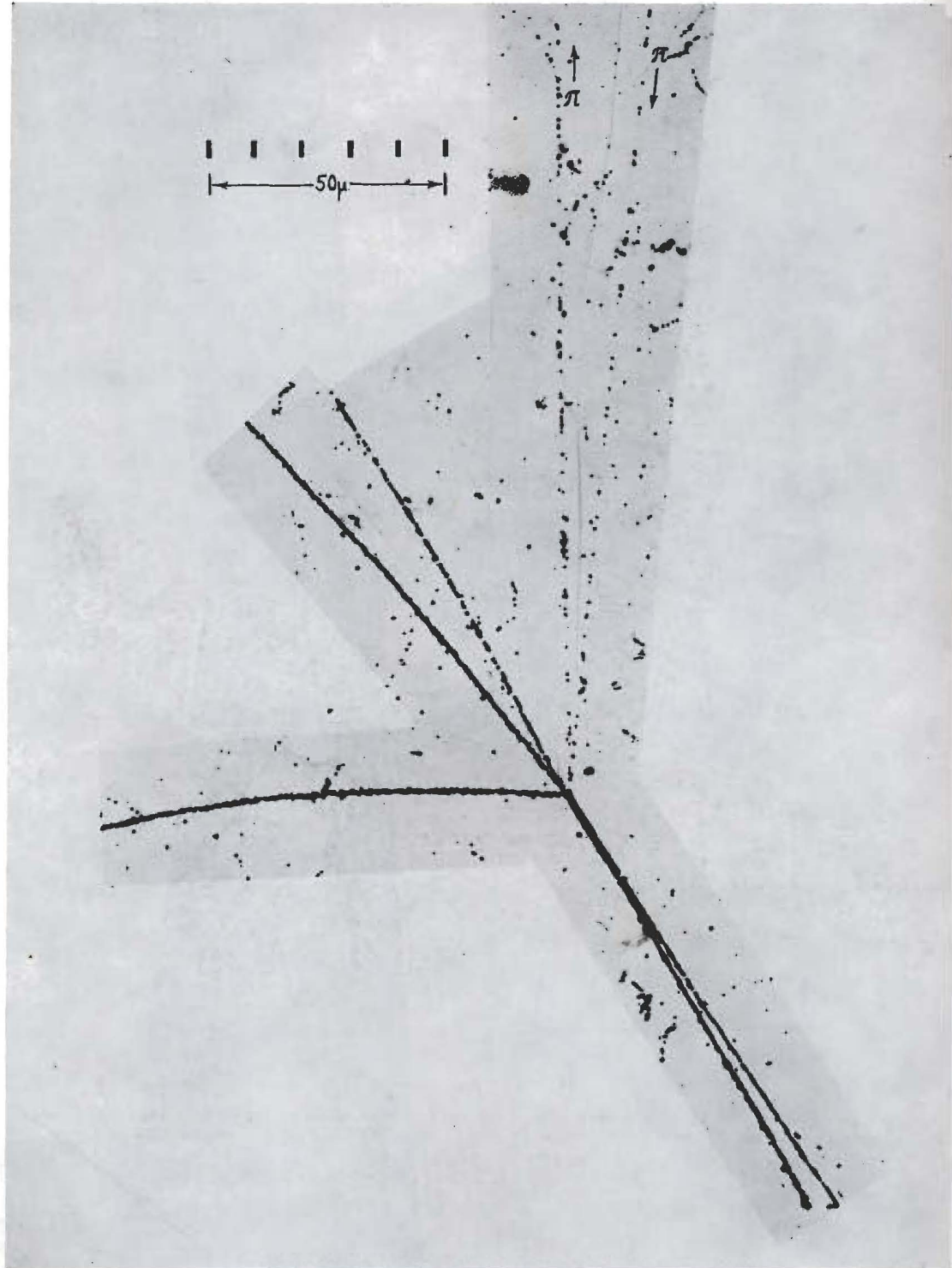


Фото 142. Один из первых примеров неупругого рассеяния π -мезона с энергией 750 Мэв. Эмульсия Ильфорт G5.

При расщеплении вылетает π -мезон с энергией ~ 70 Мэв, направленный под углом 167° к линии движения падающей частицы. По-видимому, вылетает также и нейтральный π -мезон.

Lock, Yekutieli.

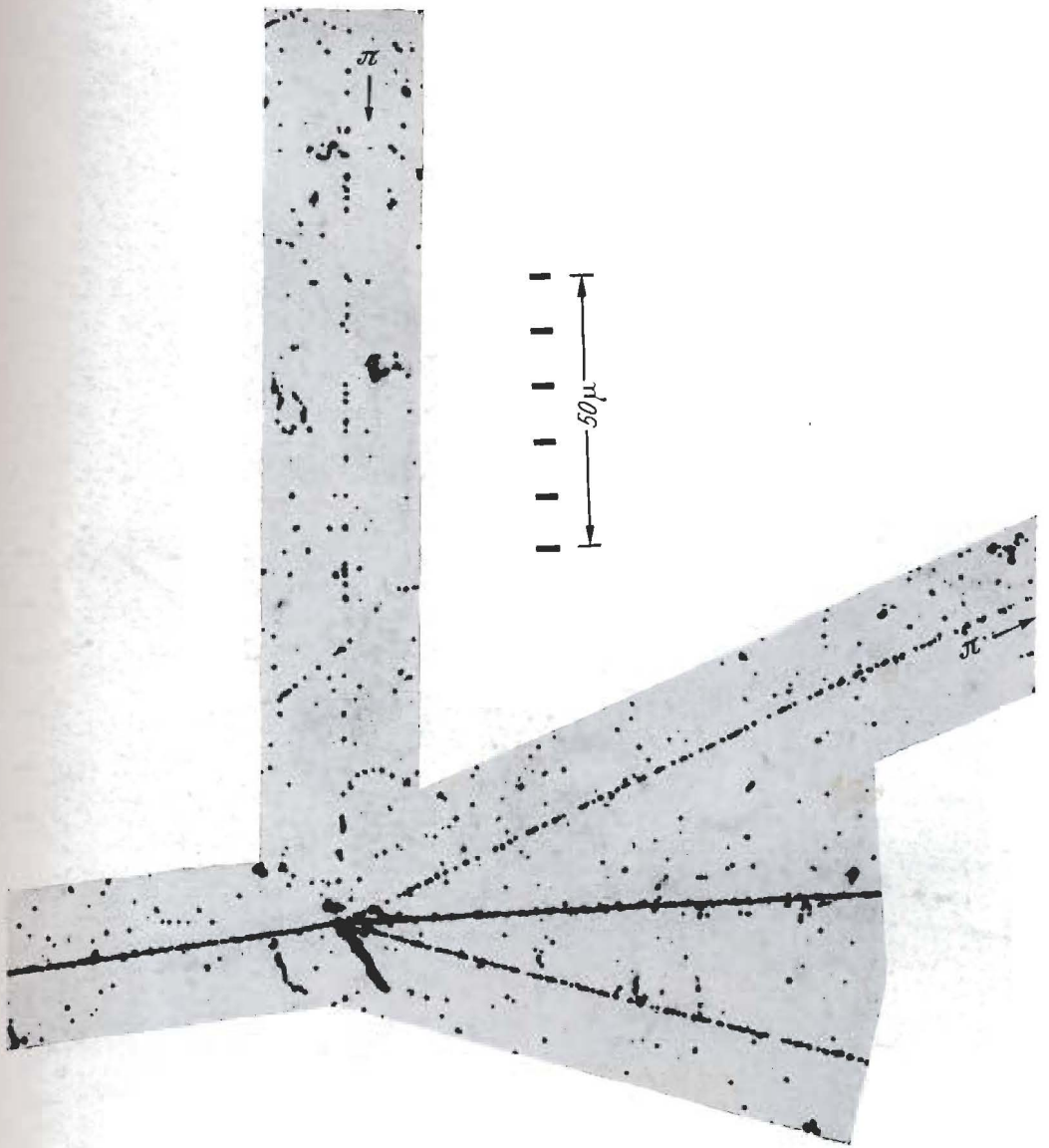


Фото 143. Упругое рассеяние π -мезона с энергией 825 Мэв. Эмульсия Ильффорд G5.

π -мезон, обладающий энергией 825 Мэв, сталкиваясь с ядром, вызывает его расщепление. Среди вторичных частиц имеется π -мезон с энергией 17 Мэв. Ввиду малой величины видимого выделения энергии при расщеплении разумно предположить, что испускается также π^0 -мезон.

Lock, Yekutieli, неопубликованная работа, 1952 г.

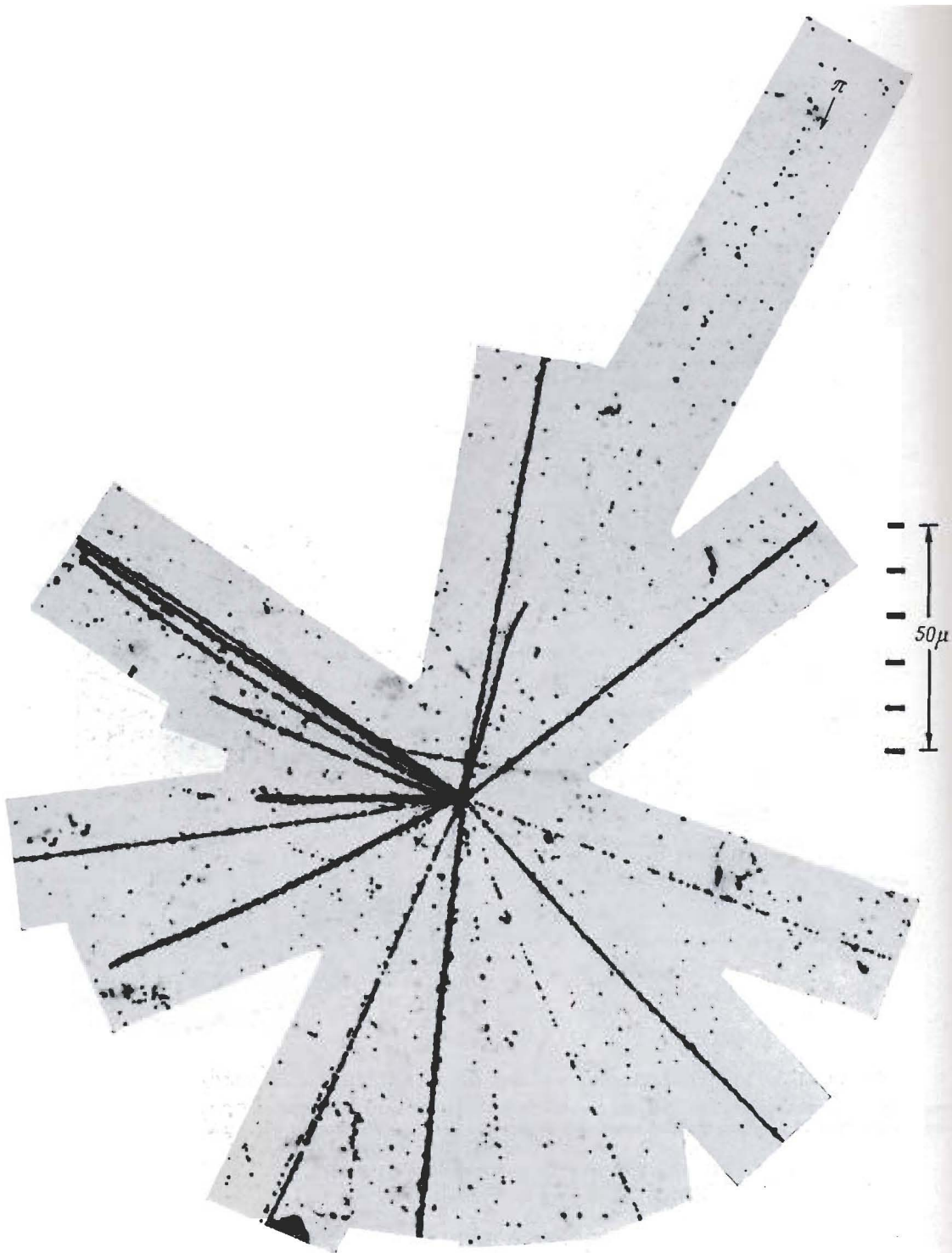
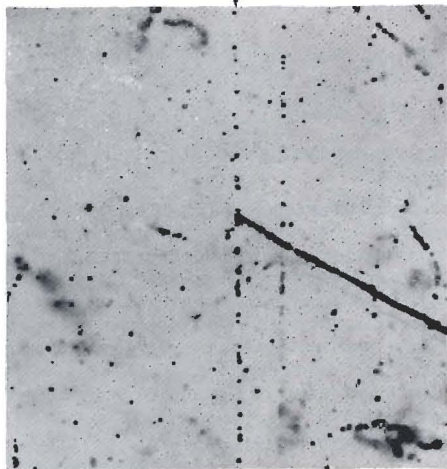


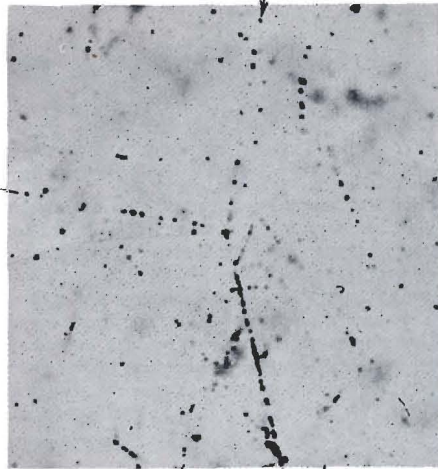
Фото 144. Один из первых примеров ядерного взаимодействия π -мезонов с энергией 3,8 Бэв. Эмульсия Ильфорт G5.

Вторичное расщепление типа $18 + 1\pi$ вызвано π -мезоном с энергией 3,8 Бэв, который в свою очередь вылетает из расщепления $7 + 10p$. Вероятно, хотя это и не установлено точно, некоторые слабо ионизирующие вторичные частицы являются π -мезонами.

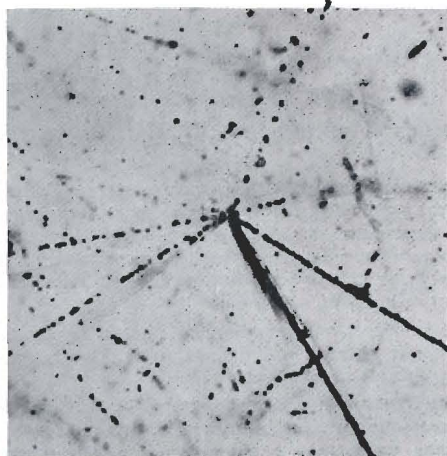
Лоск, Yekutieli, неопубликованная работа, 1952 г.



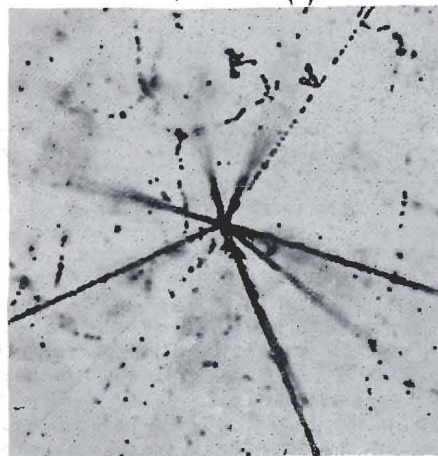
a



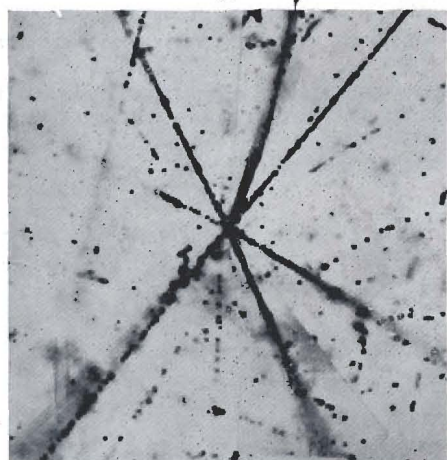
b



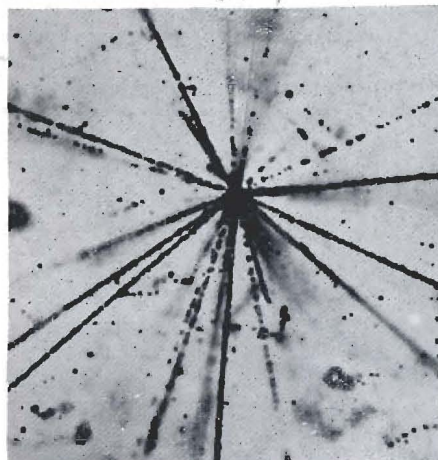
v



z



d



e

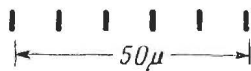


Фото 145

Фото 145. Типичные расщепления, вызванные π^- -мезонами с энергией 4,5 Бэв. Эмульсия Ильффорд G5.

Отчетливо видно широкое разнообразие в характере образующихся „звезд“. Оно обусловлено большим количеством определяющих особенности взаимодействия переменных, в число которых входит: параметр столкновения (является столкновение центральным или периферическим); природа расщепляемого ядра, которое может быть легким (C, N, O) или тяжелым (Ag, Br), и вторичные столкновения π -мезонов или других образовавшихся в результате „первичного“ взаимодействия частиц с нуклоном или нуклонами ядра-мишени. В некоторых случаях при взаимодействии с одним ядром наблюдается образование нескольких заряженных π -мезонов. Однако эти наблюдения не могут служить окончательным доказательством множественного рождения π -мезонов при отдельном столкновении двух нуклонов, так как нельзя заранее исключить возможность того, что в столкновении участвует несколько нуклонов ядра-мишени.

Бристольская группа, неопубликованная работа.

Фото 146. Ядерные столкновения K^+ -мезонов с энергией ~ 60 Мэв. Эмульсия Ильффорд G5.

На фотографиях приведены типичные примеры ядерных столкновений K^+ -мезонов средних энергий. В каждом случае след мезона указан стрелкой. Отличительной особенностью столкновений является очень малая величина среднего выделения энергии. Этот факт объясняется тем, что мезон либо рассеивается, либо испытывает перезарядку; в последнем случае после столкновения вылетает K^0 -мезон, однако никогда не происходит захвата мезона, и поэтому энергия, соответствующая его массе покоя, не добавляется к энергии расщепления.

a — упругое столкновение с ядром серебра или брома. Передача энергии ядру-мишени настолько мала, что не наблюдается заметного увеличения плотности зерен после столкновения. След ядра-мишени очень короткий (имеет вид конгломерата).

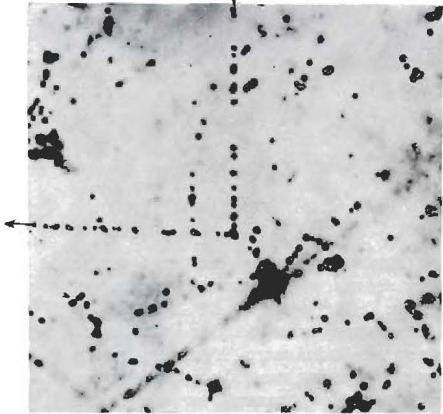
б — упругое столкновение с легким ядром (C, N или O). Отчетливо виден след (пробег $\sim 3 \mu$) ядра отдачи, и, таким образом, имеется возможность оценить его импульс. Можно построить диаграмму измеренных импульсов, предполагая, что столкновение произошло с ядром азота, углерода или кислорода. Случай гораздо большего пробега частицы отдачи относится к столкновению со свободным ядром водорода или со слабо связанным протоном ядра-мишени.

в — реакция перезарядки; след K -мезона внезапно обрывается, стрелка в центре фото указывает на последнее зерно.

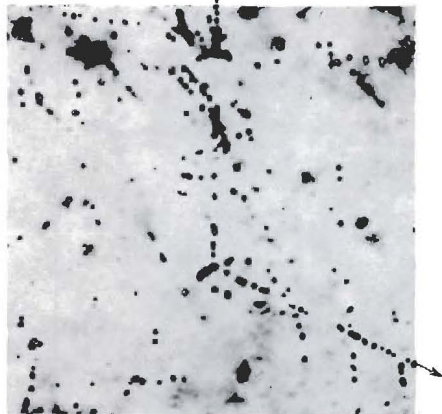
г — неупругое рассеяние K -мезона, приводящее к расщеплению с малым выделением энергии. След вторичного K -мезона идет под большим углом погружения, и это искусственно усиливает характер возрастания плотности зерен.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1956 г.

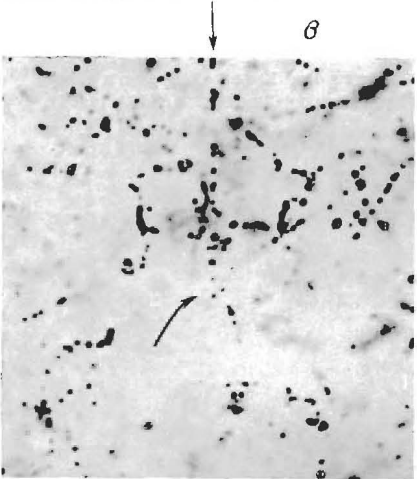
a



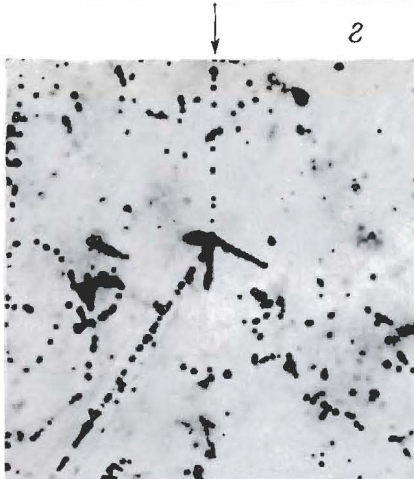
б



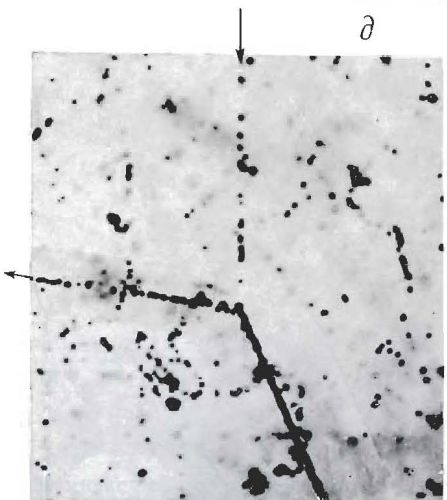
в



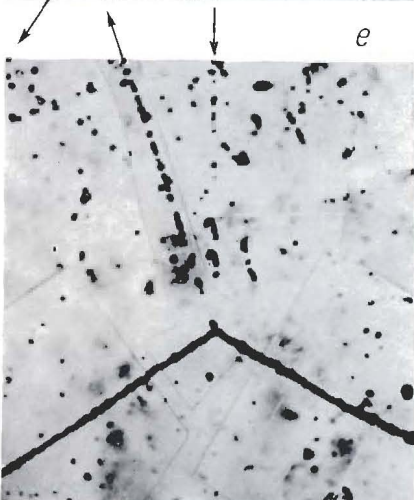
г



д



е



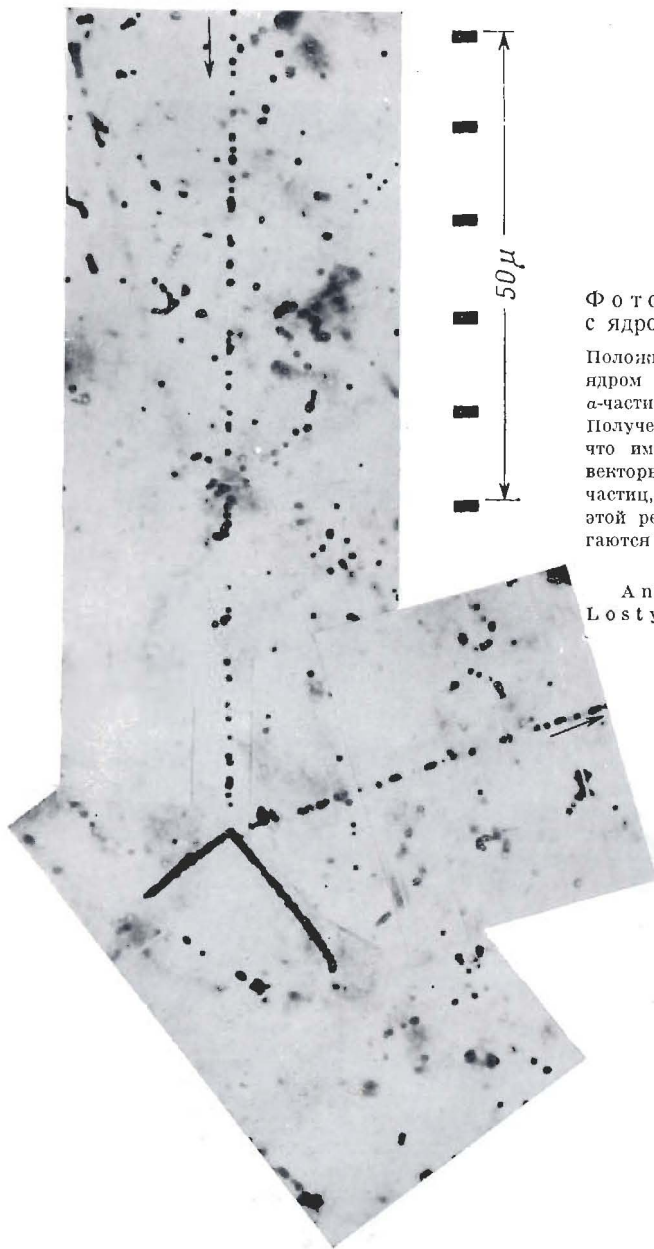


Фото 147. Столкновение K^+ -мезона с ядром C^{12} . Эмульсия Ильфод Г5.

Положительный K -мезон сталкивается с ядром углерода и расщепляет его на три α -частицы: $K^+ + C^{12} \rightarrow K^+ + 3He^4 + Q$. Полученные данные позволяют установить, что импульс падающего K -мезона равен векторной сумме импульсов вторичных частиц, а также определить значение Q для этой реакции. Следы двух α -частиц налагаются друг на друга и не могут быть различены в отдельности.

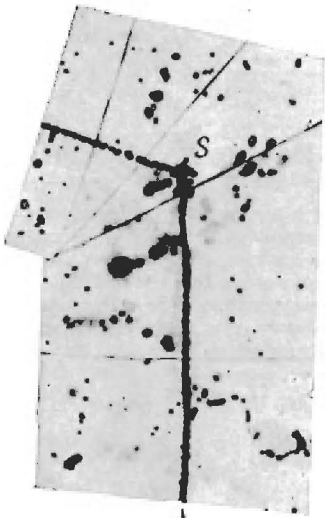
Anderson, Keefe, Kernan, Losty, Nuovo Cimento, 4, 1198 (1956).

Фото 147

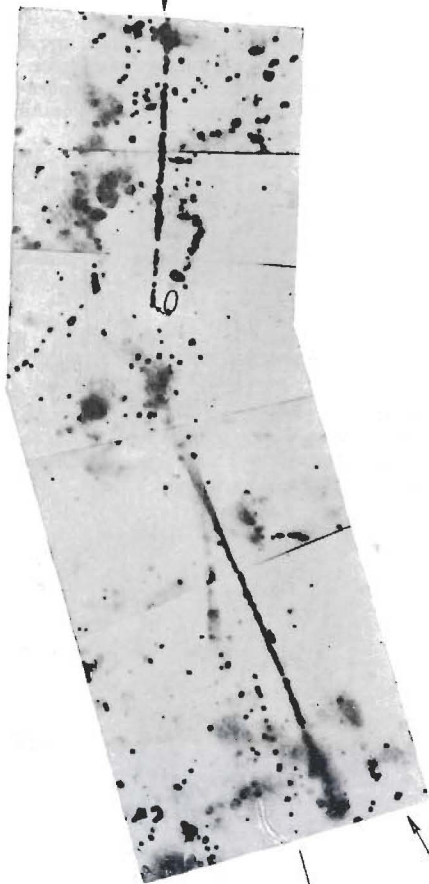
Фото 148. Расщепления, вызванные ядерным взаимодействием K^0 -мезонов. Эмульсия Ильфод Г5.

Два примера ядерного взаимодействия K^0 -мезонов, в результате которого образуются частицы со „странностью“ -1 . В каждом случае направление потока нейтральных частиц, вылетающих из мишени, которая „бомбардируется“ протонами с энергией $4,5 \text{ Bev}$, отмечено буквой N . В случае a взаимодействие произошло в точке O , при этом вылетел Σ^- -гиперон и заряженный π -мезон. Гиперон достиг конца своего пробега в точке S и вызвал характерное расщепление (см. стр. 230). Вторая частица являлась π -мезоном, и значение ее энергии было определено по рассеянию. Разумно предположить, что данное событие представляет собой взаимодействие нейтрального K -мезона с нейтроном по схеме $K^0 + n \rightarrow \Sigma^- + \pi^+$. В случае b Σ^+ -гиперон внезапно возникает в точке P и, достигнув конца своего пробега, распадается в точке T по схеме $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$. Это событие можно приписать взаимодействию со свободным протоном $K^0 + p \rightarrow \Sigma^+ + \pi^0$.

а



3 мм



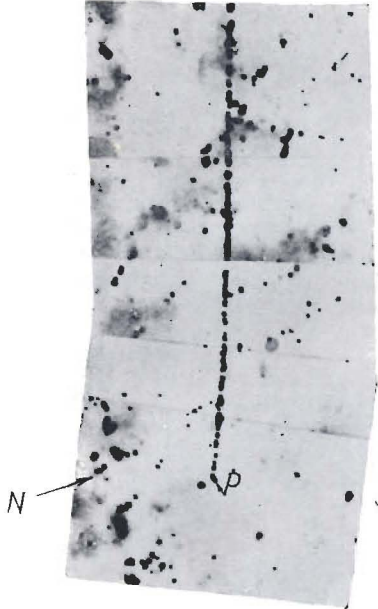
π

N

б



1 мм



N

P

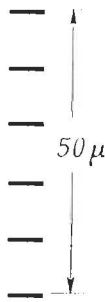


Фото 149. Ядерные взаимодействия частиц с энергиями 100 и 200 Бэв. Эмульсия Ильффорд G5.

В этих двух ливнях, вызванных быстрыми частицами с зарядом $|e|$ и энергиями соответственно ~ 100 Бэв и ~ 200 Бэв, не было образовано ни одной частицы с „черным” следом (образовались „звезды” типа $1 + 8p$ и $0 + 7p$ соответственно). Некоторые авторы предположили поэтому, что данные „струи” образованы при столкновениях с протонами или нейтронами на поверхности ядра. Ливень слева был вызван вторичной частицей, образованной при другом расщеплении, и ее природа неизвестна. По причине, указанной на стр. 321, событие, изображенное справа, обусловлено, по-видимому, протопом. Электронно-позитронная пара, которую можно видеть в левой части правого фото, была образована в результате конверсии γ -кванта от распада π^0 -мезона.

Daniel, Davies, Mulvey, Perkins, Phil. Mag., **43**, 753 (1952).

Фото 150. „Струи”, образованные при ядерных столкновениях протонов с энергиями 200 и 300 Бэв. Эмульсия Ильффорд G5.

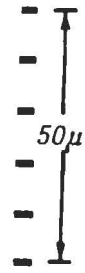
Представленные ливни относятся к случаям типа $1 + 18p$ и $2 + 36p$ соответственно. Малое число сильно ионизирующих частиц, связанных с каждым из них, свидетельствует о том, что они образовались скорее всего при периферических соударениях. Одну из вторичных частиц „струи”, показанной слева, удалось идентифицировать как π -мезон. На каждой из двух представленных мозаик воспроизведены лишь следы примерно половины всех вторичных частиц.

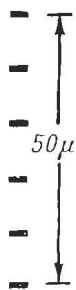
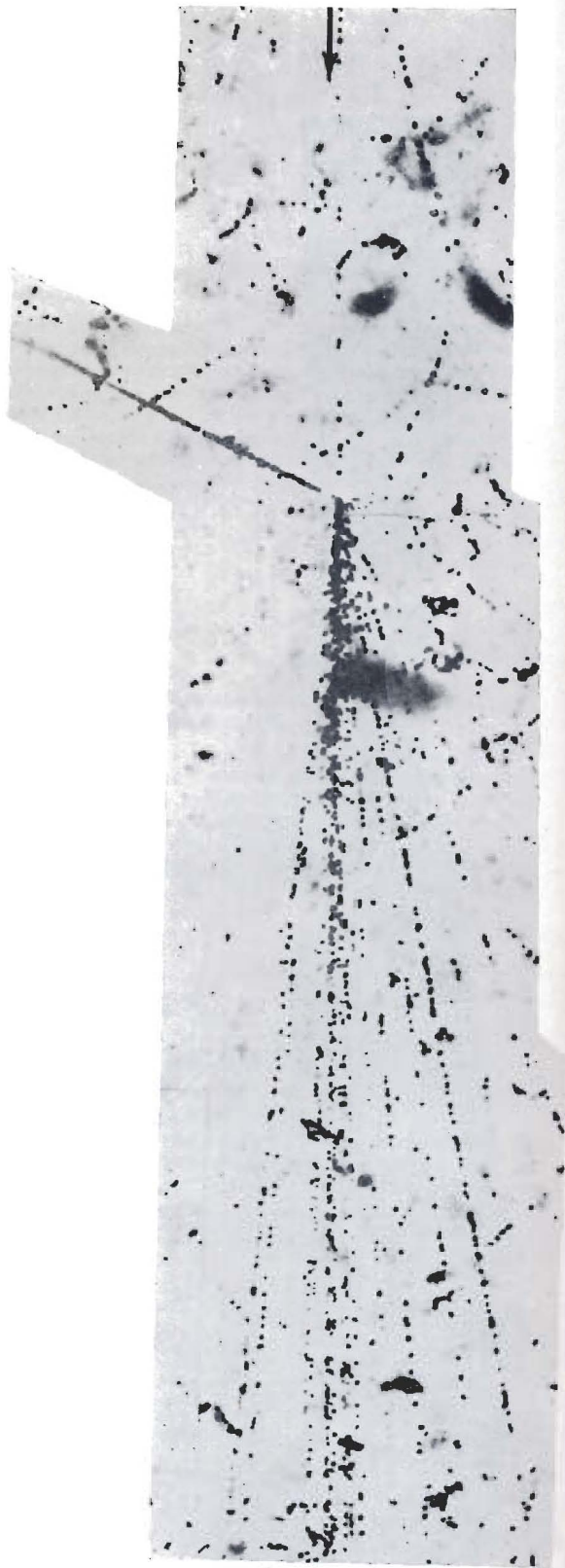
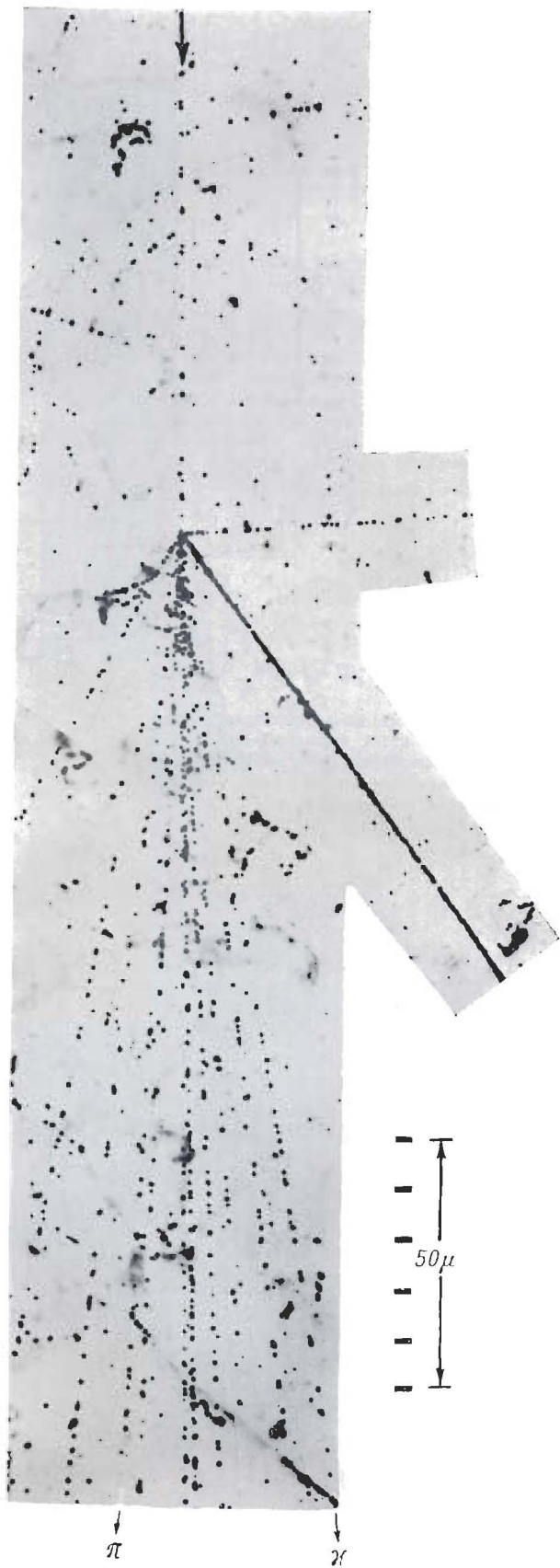
Daniel, Davies, Mulvey, Perkins, Phil. Mag., **43**, 753 (1952).

Фото 151. „Струи”, образованные при ядерных столкновениях высокой энергии. Эмульсия Ильффорд G5.

Слева изображена „струя” типа $4 + 50\alpha$, вызванная α -частицей с энергией ~ 3000 Бэв, т. е. ~ 800 Бэв на один нуклон. „Струи” справа образована частицей с зарядом e и энергией ~ 600 Бэв. В каждом из этих случаев центральные „стволы” ливней были сфотографированы при одном положении микроскопа, поэтому на фотографиях можно различить лишь часть всех следов.

Daniel, Davies, Mulvey, Perkins, Phil. Mag., **43**, 753 (1952).





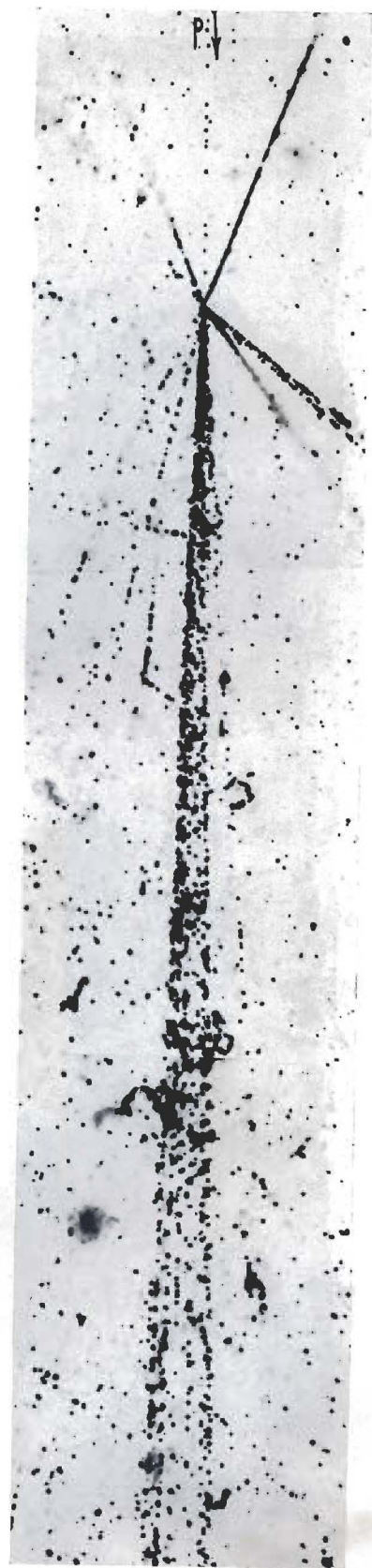
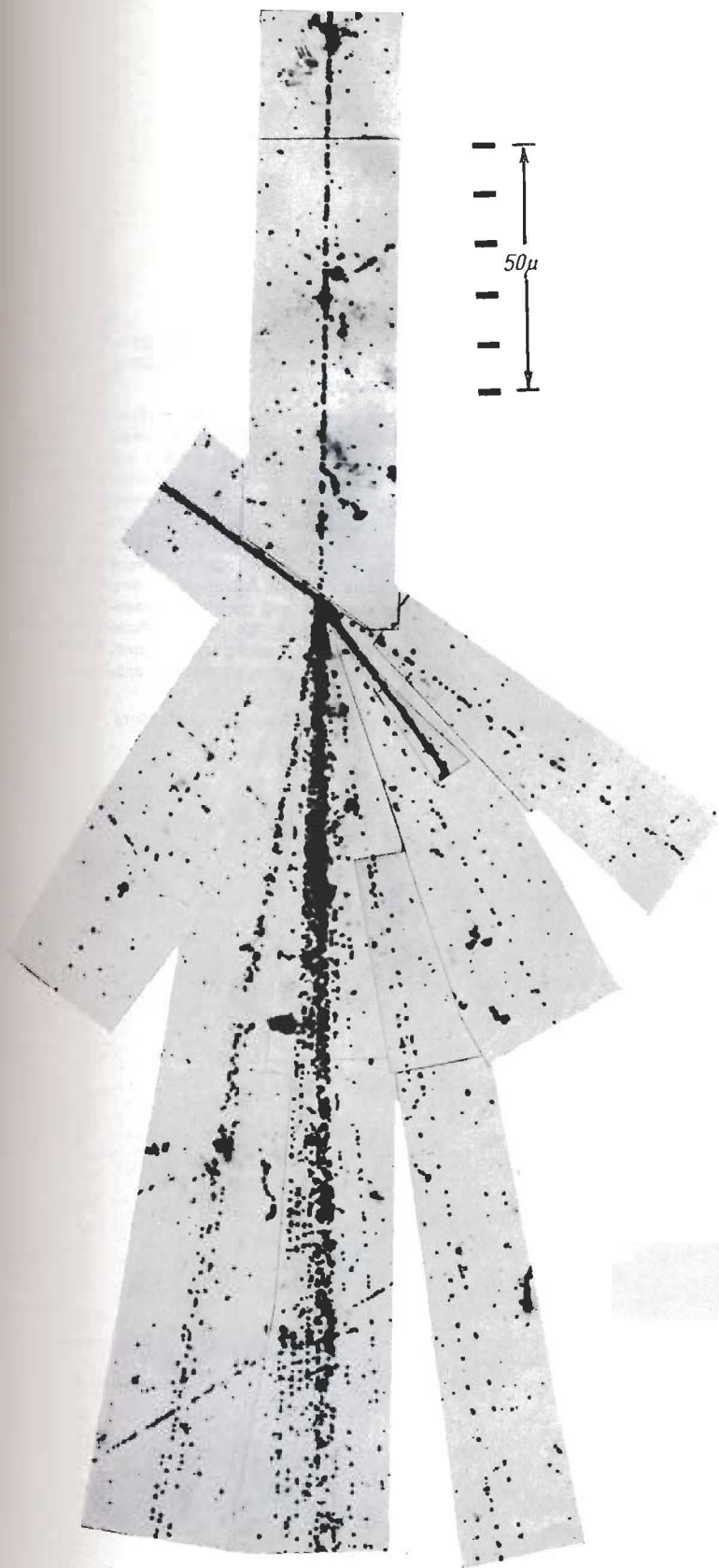




Фото 152. Ядерное взаимодействие вторичной частицы из „струи“. Эмульсия Ильфод G5.

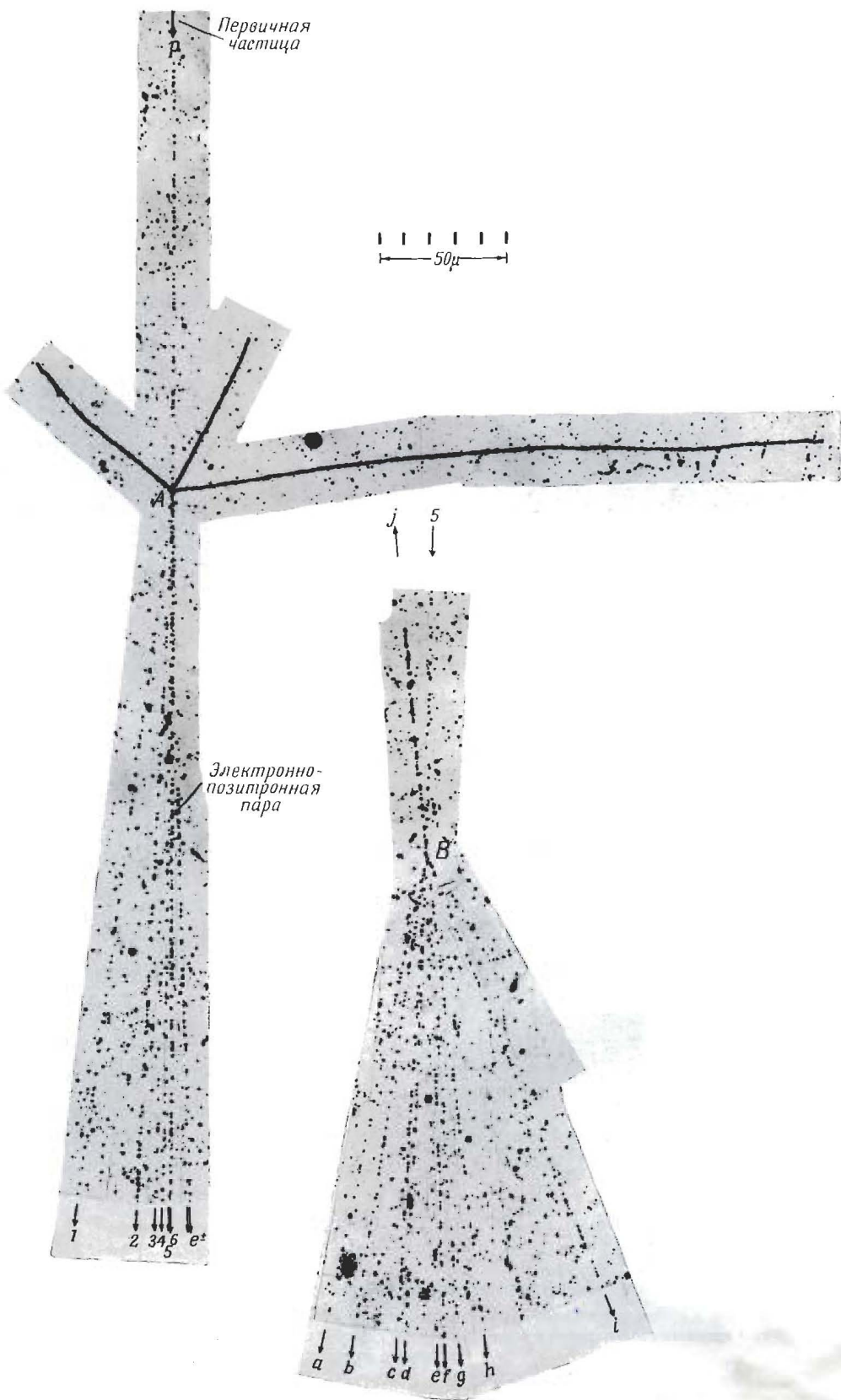
Нейтральная частица с энергией ~ 500 Бэв, образованная в ливне, показанном на фото 156, вызвала при вторичном взаимодействии „звезду“ $0 + 6n$. Предположение о генетической связи двух процессов основывалось на том факте, что вторичное взаимодействие произошло в области, где проходят следы, образующие основную „струю“, и что средняя линия вылета вторичных частиц совпадала с направлением соседних следов ливневых частиц. Природа нейтральной вторичной частицы, вызвавшей расщепление, неизвестна. Ее можно было бы приписать любой из следующих частиц: нейтрону, π^0 -мезону, γ -кванту или тяжелому нейтральному мезону.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.

Фото 153. „Струя”
с энергией 1000 Бэв.
Эмульсия Ильфорд
G5.

Микрофотографил
„струи” А, образованной
частицей с энергией
~1000 Бэв, и „звезды”
В, образованной при
ядерном столкновении
одной из вторичных
частиц. Виден след элек-
тронно-позитронной
пары, генетически свя-
занной с первичным взаи-
модействием.

Powell, 1950 г.



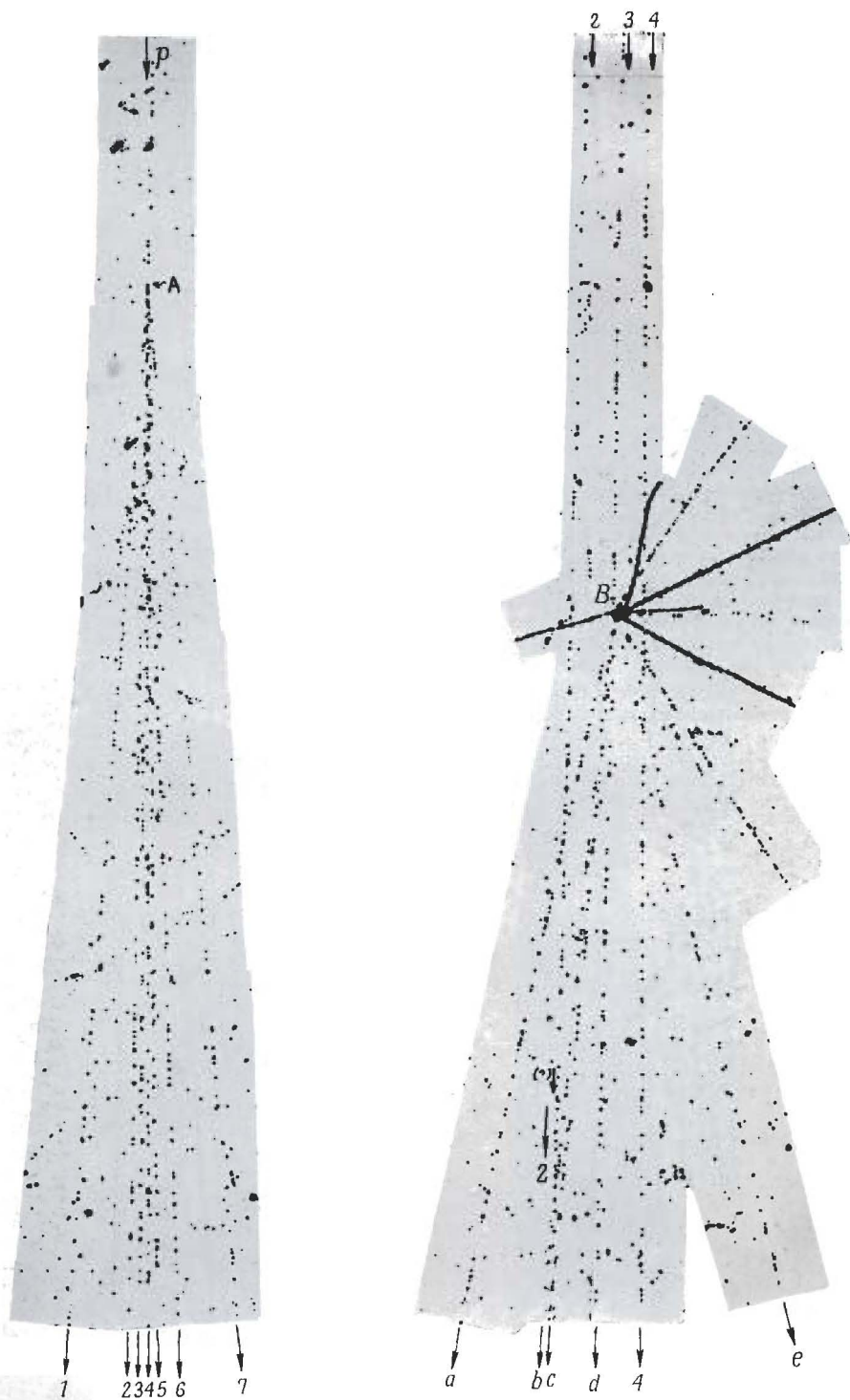


Фото 154. Взаимодействие вторичной частицы из „струи”. Эмульсия Ильфторд G5.

В точке А произошло ядерное взаимодействие первичной частицы с энергией 1000 Бэв. Одна из вторичных частиц 3 в результате ядерного столкновения в точке В образует „звезду” типа 7 + 5р. Хорошо видно более широкое угловое распределение в ливне с меньшей энергией (ср. фото 153).

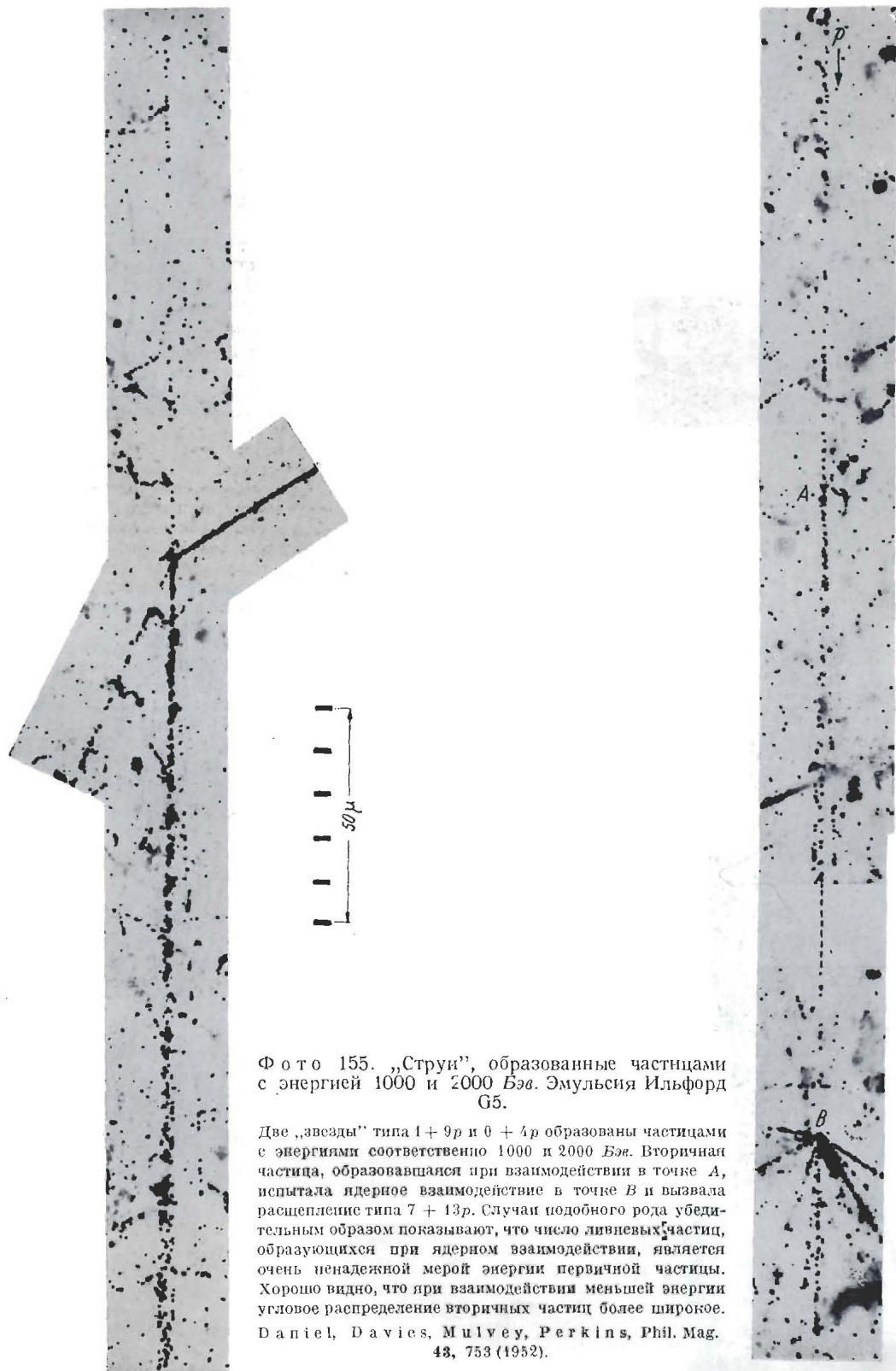


Фото 155. „Струи”, образованные частицами с энергией 1000 и 2000 *Бэв*. Эмульсия Ильфорд G5.

Две „звезды” типа $1 + 9p$ и $0 + 4p$ образованы частицами с энергиями соответственно 1000 и 2000 *Бэв*. Вторичная частица, образовавшаяся при взаимодействии в точке *A*, испытала ядерное взаимодействие в точке *B* и вызвала расщепление типа $7 + 13p$. Случаи подобного рода убедительным образом показывают, что число ливневых частиц, образующихся при ядерном взаимодействии, является очень ненадежной мерой энергии первичной частицы. Хорошо видно, что при взаимодействии меньшей энергии угловое распределение вторичных частиц более широкое.

Daniel, Davies, Mulvey, Perkins, *Phil. Mag.* 43, 753 (1952).

↓p

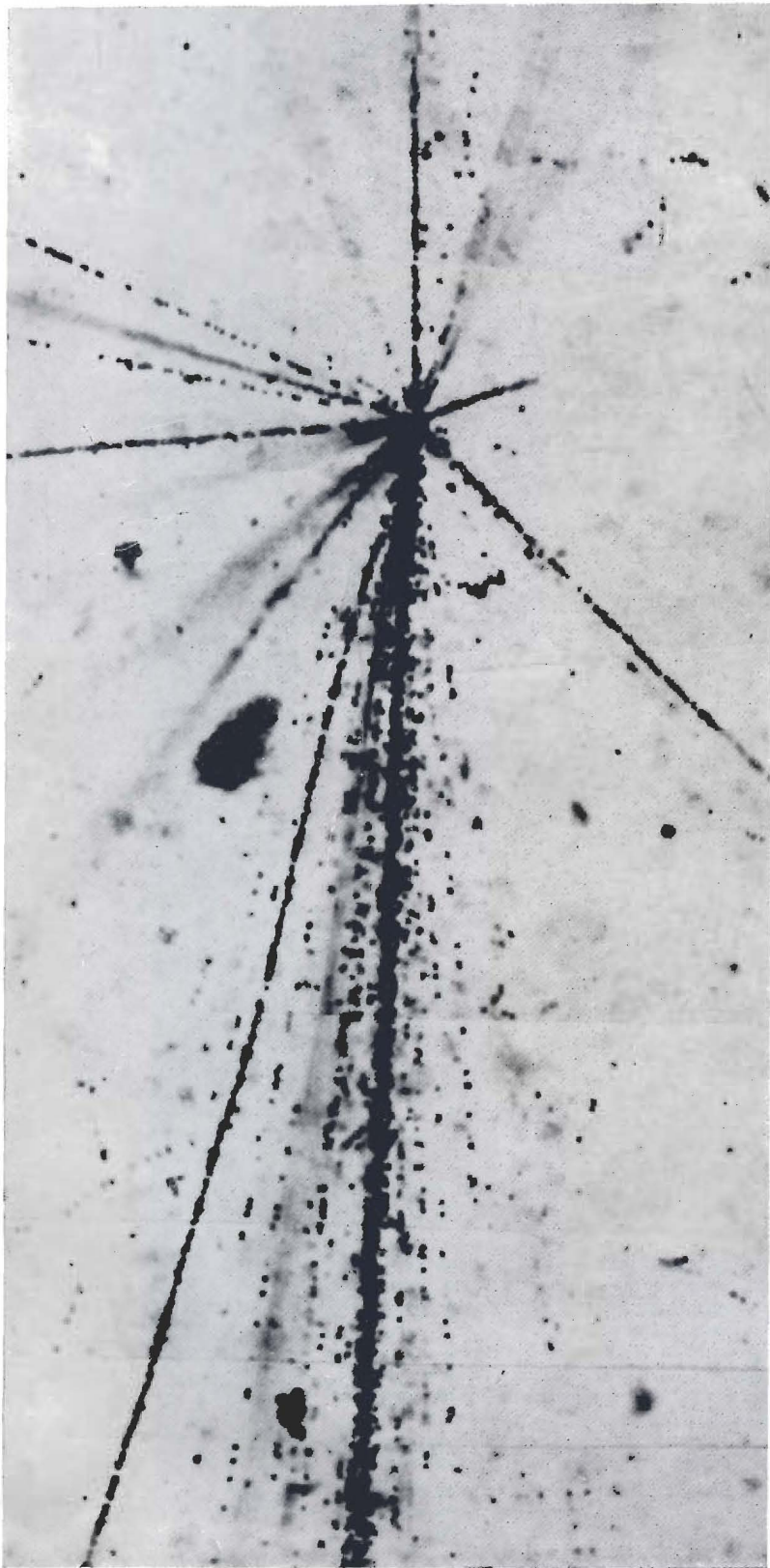


Фото 156 и 157. Ядерное взаимодействие первичного протона с энергией 30 000 Бэв. Эмульсия Илфорд G5.

В этом случае типа 22+76p, зафиксированном в стопке пластинок, экспонированной во время полета на баллонах на высоте 27 км, около половины дивергентных частиц сосредоточено в центральном стволе, и поэтому нельзя различить отдельные следы этих частиц. След первичной частицы p совпадает по направлению с осью основного „ствола“ вторичных частиц. След сильно ионизирующей частицы, расположенной непосредственно слева от первичной частицы, был образован вылетающим протоном, который остановился в эмульсии. „Ствол“ можно проследить через эмульсию и стекло 22 пластинок, и таким образом может быть исследовано развитие электромагнитных каскадов, образующихся в результате распада π^0 -мезонов.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.

Фото 156

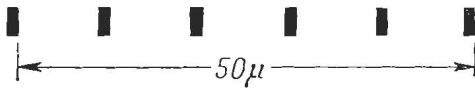
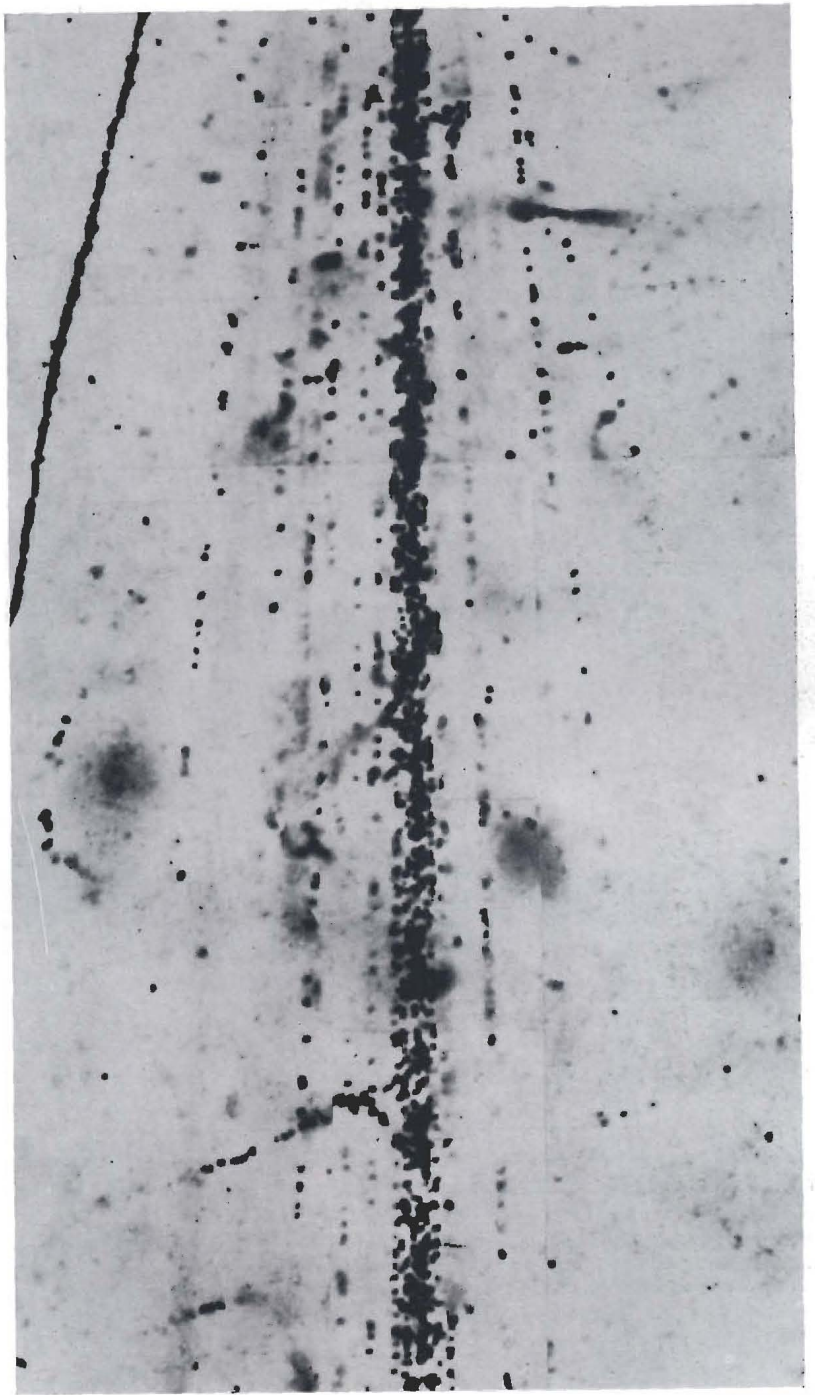


Фото 157

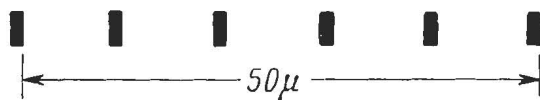
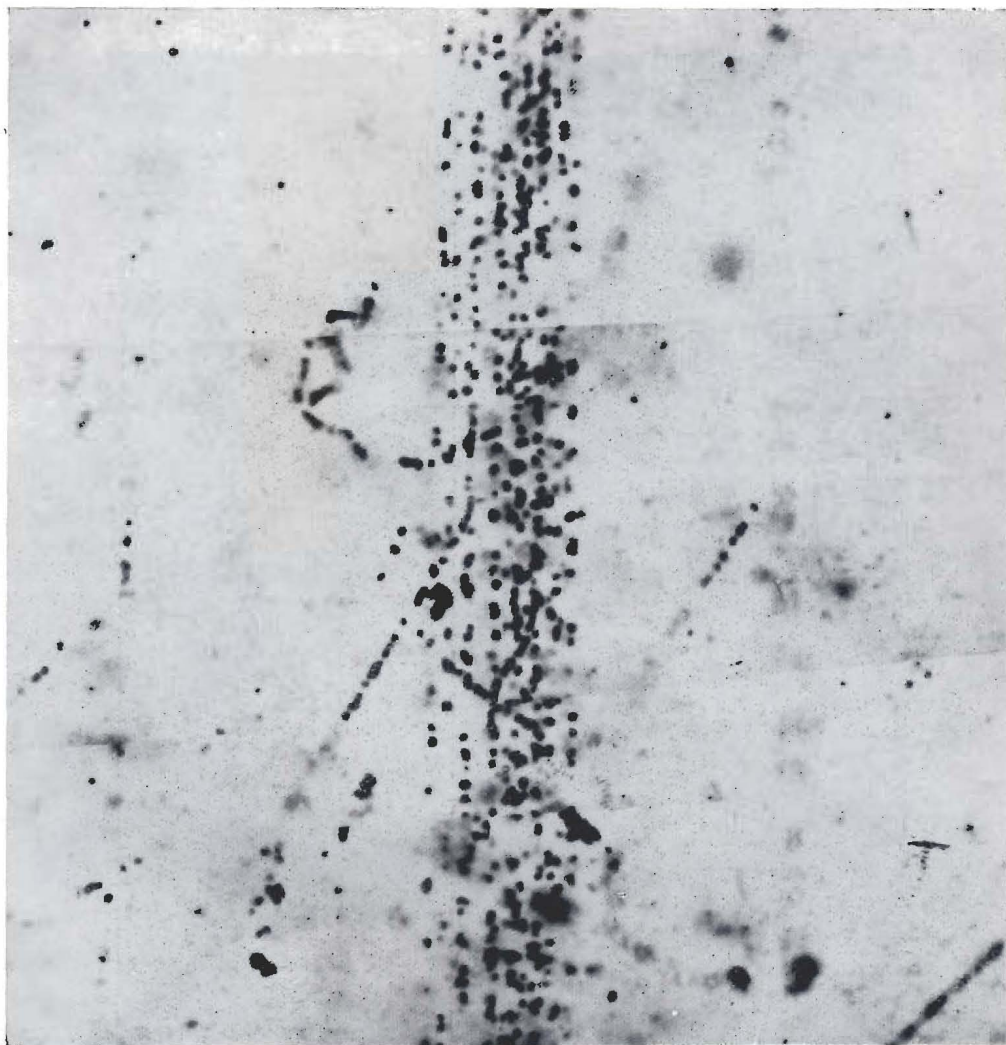


Фото 158. „Струя” мезонов, образованных при ядерном взаимодействии высокой энергии. Эмульсия Ильфорд G5.

Следы частиц центрального „ствола” из ливня, приведенного на фото 156 и 157, показаны здесь на расстоянии около 3 мм от центра расщепления. Можно различить отдельные следы. Подобные ливни обычно можно легко проследживать через пластинки стопки благодаря наличию плотного „ствола” и связанных с ним следов электронов мягкой компоненты.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.

Фото 159. „Струи” мезонов, образованные частицами с энергиями соответственно ~ 3000 и ~ 9000 Бэв. Эмульсия Ильфорд G5.

При ядерном взаимодействии, изображенном слева, образовалась „звезда” $0+28p$ и не было испущено ни одной сильно ионизирующей частицы. Поэтому можно предположить, что это взаимодействие является столкновением протон-протон в точке P. Можно различить плотный центральный „ствол”, сфотографированный при одном положении микроскопа, хотя четко видно лишь несколько следов из этого „ствола”.

На фотографии справа показана „струя” типа $0+32p$, вызванная первичной частицей с энергией около 9000 Бэв. Угловые распределения этих двух „струй”, преобразованные в систему центра инерции, показаны на фиг. 229, стр. 351.

Daniel, Davies, Mulvey, Perkins, Phil. Mag., 43, 753 (1952).

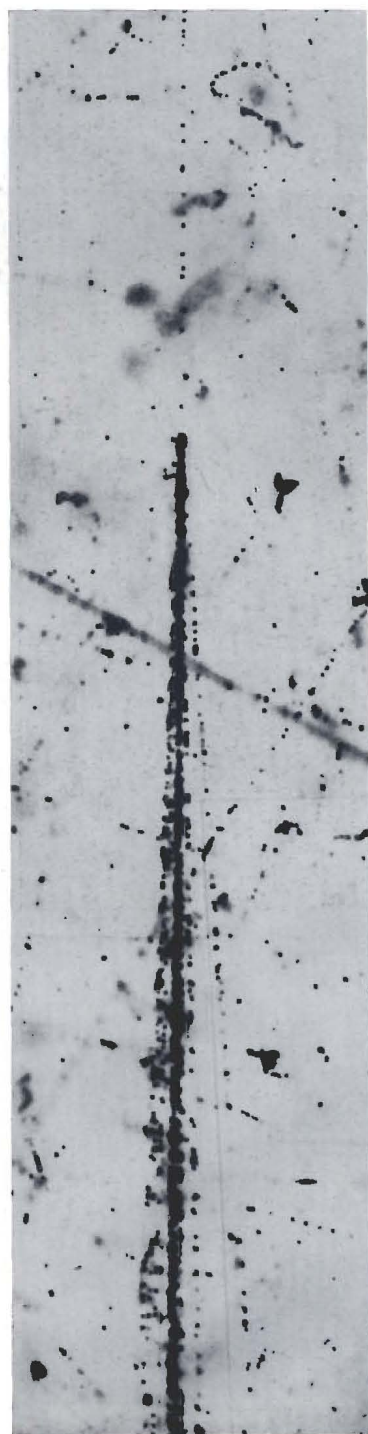
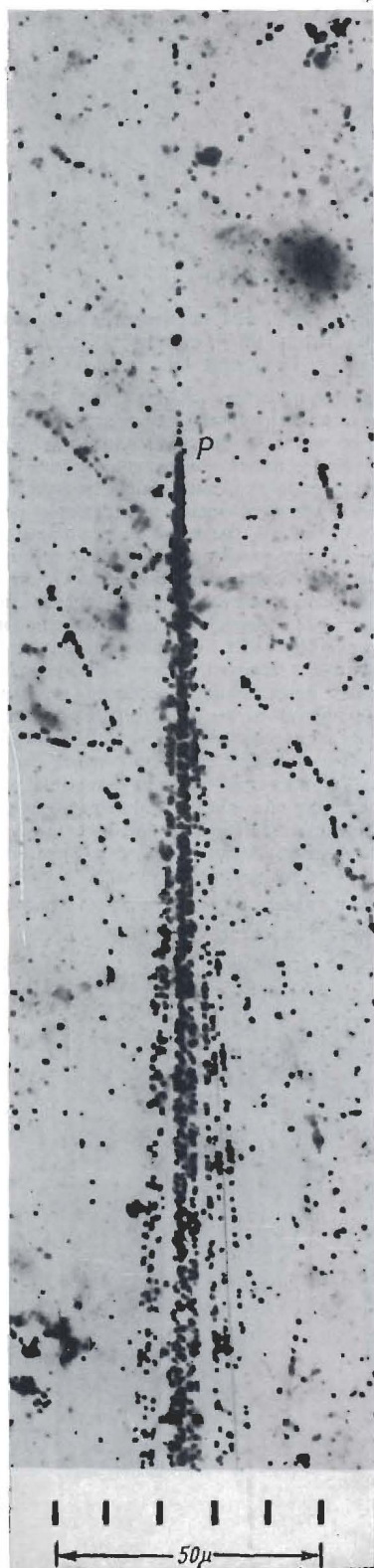


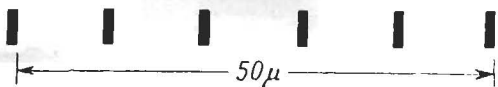
Фото 159



Фото 160. Ядерное взаимодействие вторичной частицы из „струи“. Эмульсия Ильфорт G5.

На фотографии показана „звезда“ типа $1 + 5p$, образованная во вторичном взаимодействии одной из ливневых частиц с энергией около 2000 Bev , образовавшейся в ливне, показанном на фото 156. Было зарегистрировано пять таких взаимодействий частиц, образовавшихся в первичном расщеплении. Подобные исследования вторичных взаимодействий позволяют определить средний пробег для взаимодействия ливневых частиц. Много подобных взаимодействий произошло, должно быть, в стекле, и поэтому они не были зарегистрированы. Стопки из бесподложечных эмульсий имеют большие преимущества для подобных исследований, особенно если их размеры (в длину) равны по порядку величины пробегу для взаимодействия, т. е. $\sim 33 \text{ см}$, так что регистрируется большая часть вторичных взаимодействий. Стопка наибольшего из применявшихся до сих пор объемов ($22,4 \text{ л}$) была экранирована с помощью баллонов на больших высотах в совместном опыте Миннесотского и Бристольского университетов.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1952 г.



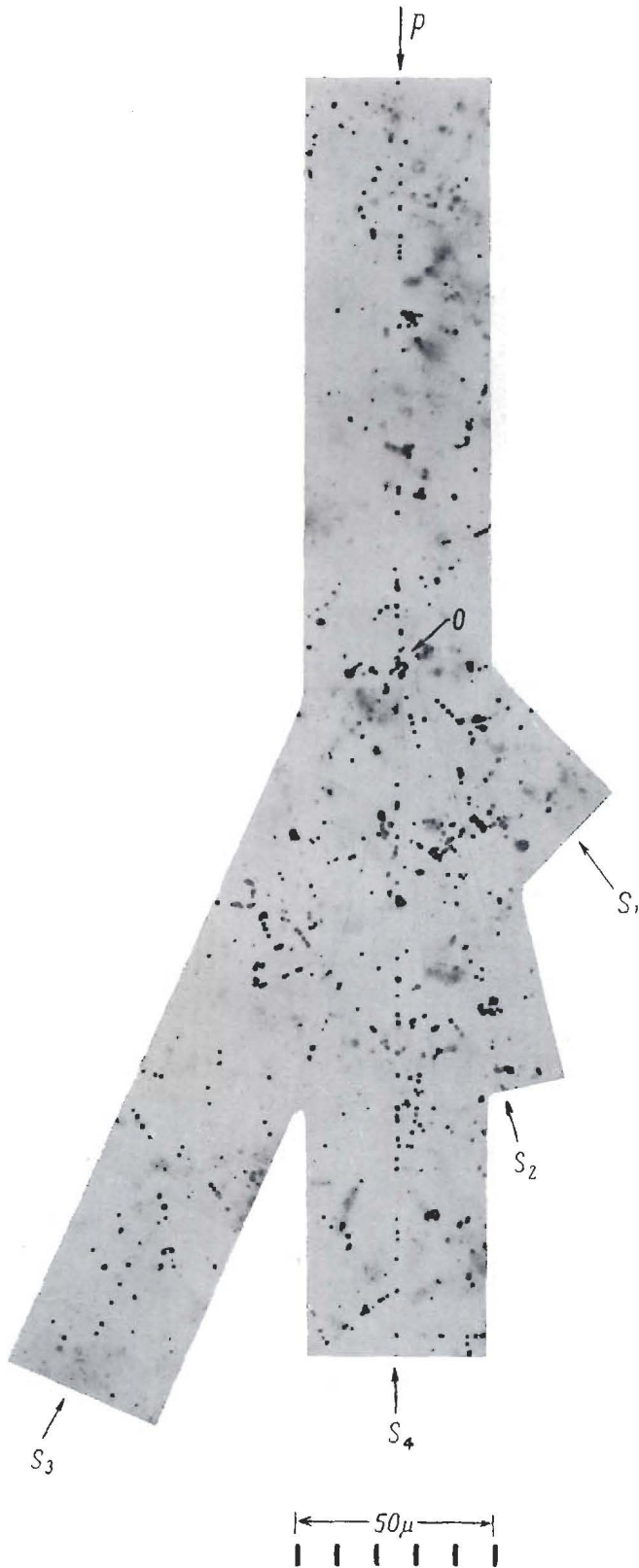


Фото 161. Ядерное взаимодействие протона с энергией $\sim 40\,000$ Бэв. Эмульсия Ильфорд G5. Этот случай подробно рассматривается на стр. 343 и далее. Случай примечателен видом углового распределения частиц и их малым числом. Частица, образующая след S_4 , в дальнейшем вызывает расщепление, показанное на фото 165.

Фото 162. Вторичные явления, связанные с первичным взаимодействием при энергии 40 000 Бэв. Эмульсия Ильфورد G5.

a — одиночный след S_4 и след электронно-позитронной пары с вершиной вблизи от точки *A*.

b — электронно-позитронные пары, образованные в результате конверсии γ -квантов.

v — расщепление, вызванное нейтральной частицей.

x — расстояние от вершины первичного расщепления в эмульсии.



P_1 S_4

P_1 и P_3 P_2 и S_4



50 μ

P_3 P_1 P_2 и S_4
Пары от фотонов тормозного излучения



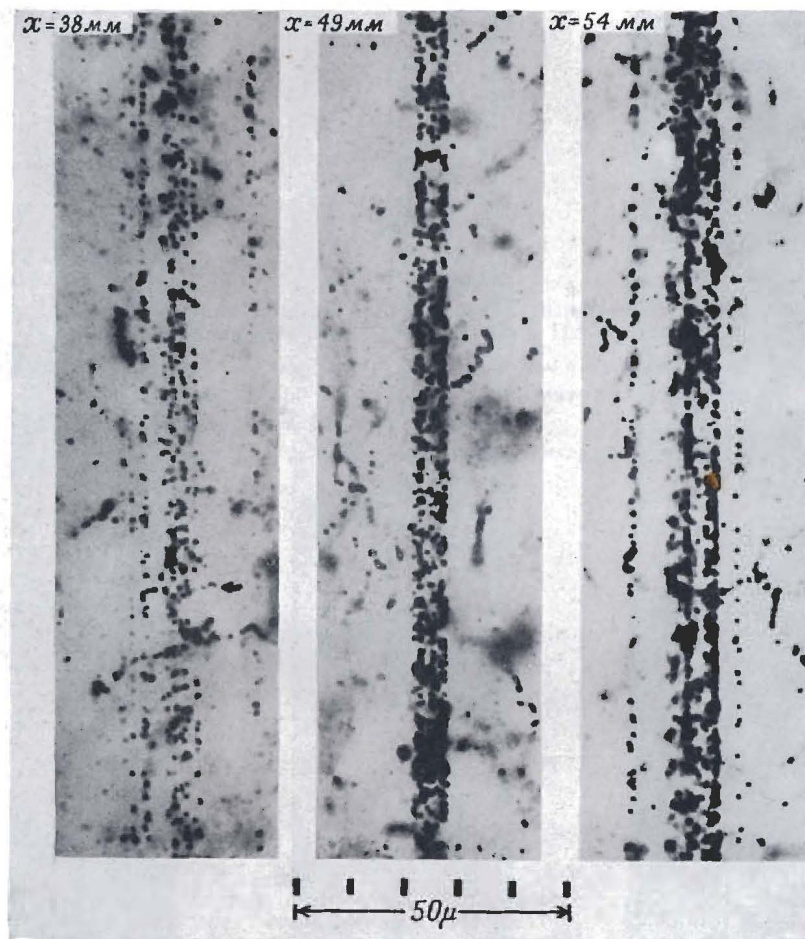


Фото 163. Развитие в эмульсии электронных каскадов, связанных с взаимодействием высокой энергии.
Эмульсия Ильфورد G5.

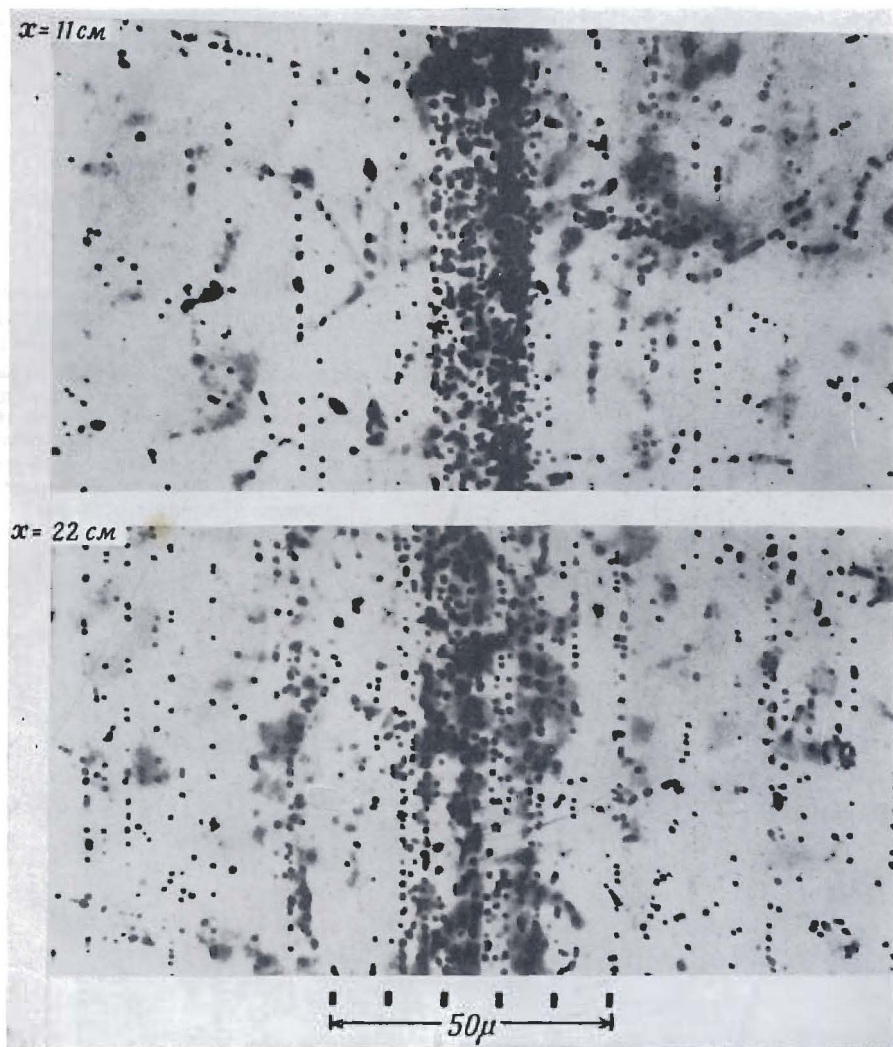


Фото 164. Развитие в эмульсии электронных каскадов, связанных с взаимодействием высокой энергии. Эмульсия Ильфорд G5.

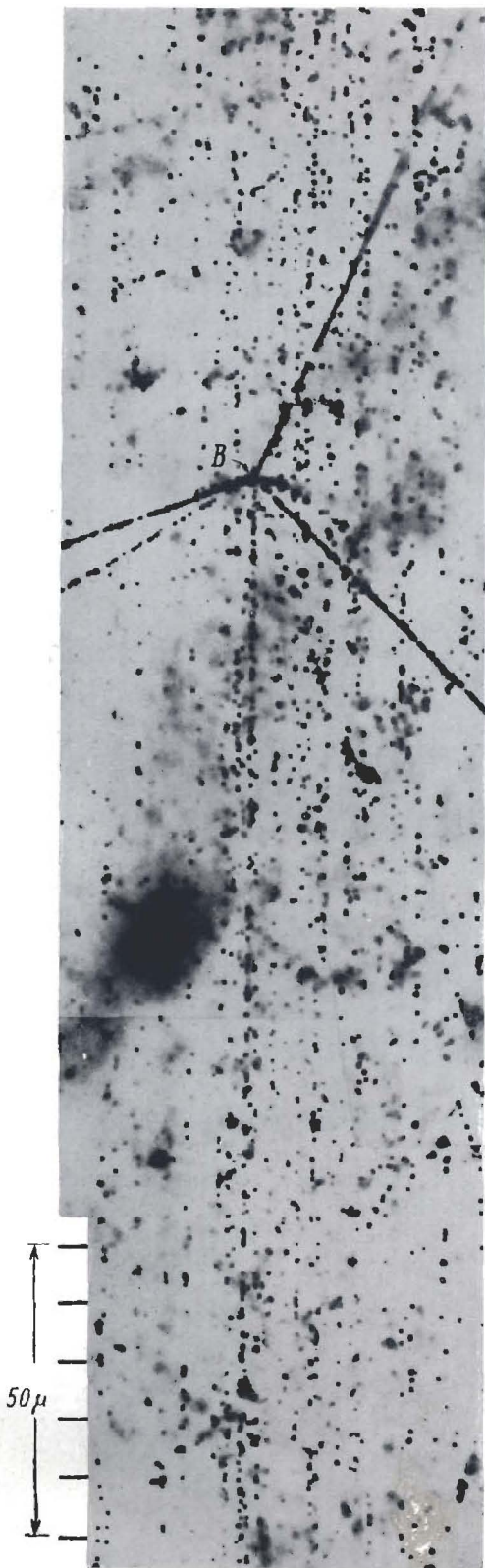


Фото 165. Расщепление, вызванное вторичной заряженной частицей из „струи”. Эмульсия Илфорд G5₄

Расщепление типа $5 + 7p$ вызвано вторичной частицей S_4 , образовавшейся при взаимодействии, показанном на фото 161. Угловое распределение ливневых частиц для этого ливня, представленное на фиг. 223, стр. 337, соответствует энергии частицы S_4 порядка 2200 *Бэв*.

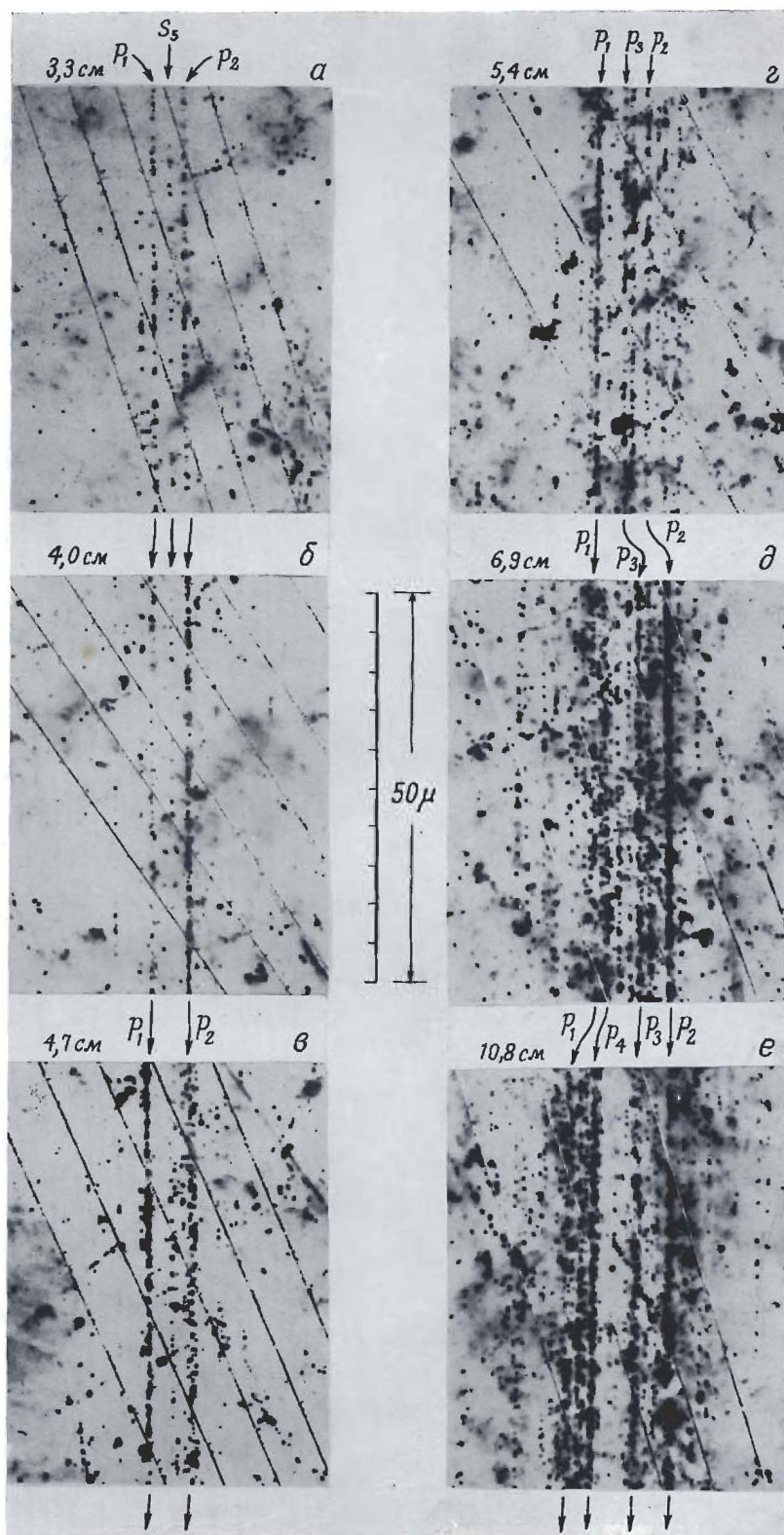


Фото 166. Электронные каскады, образовавшиеся после ядерного взаимодействия α -частицы с энергией $\sim 10^8$ Бэв. Эмульсия Илфорд G5.

Каскады развиваются в чистой эмульсии. Расстояния от вершины расщепления указаны на каждой из фотографий.

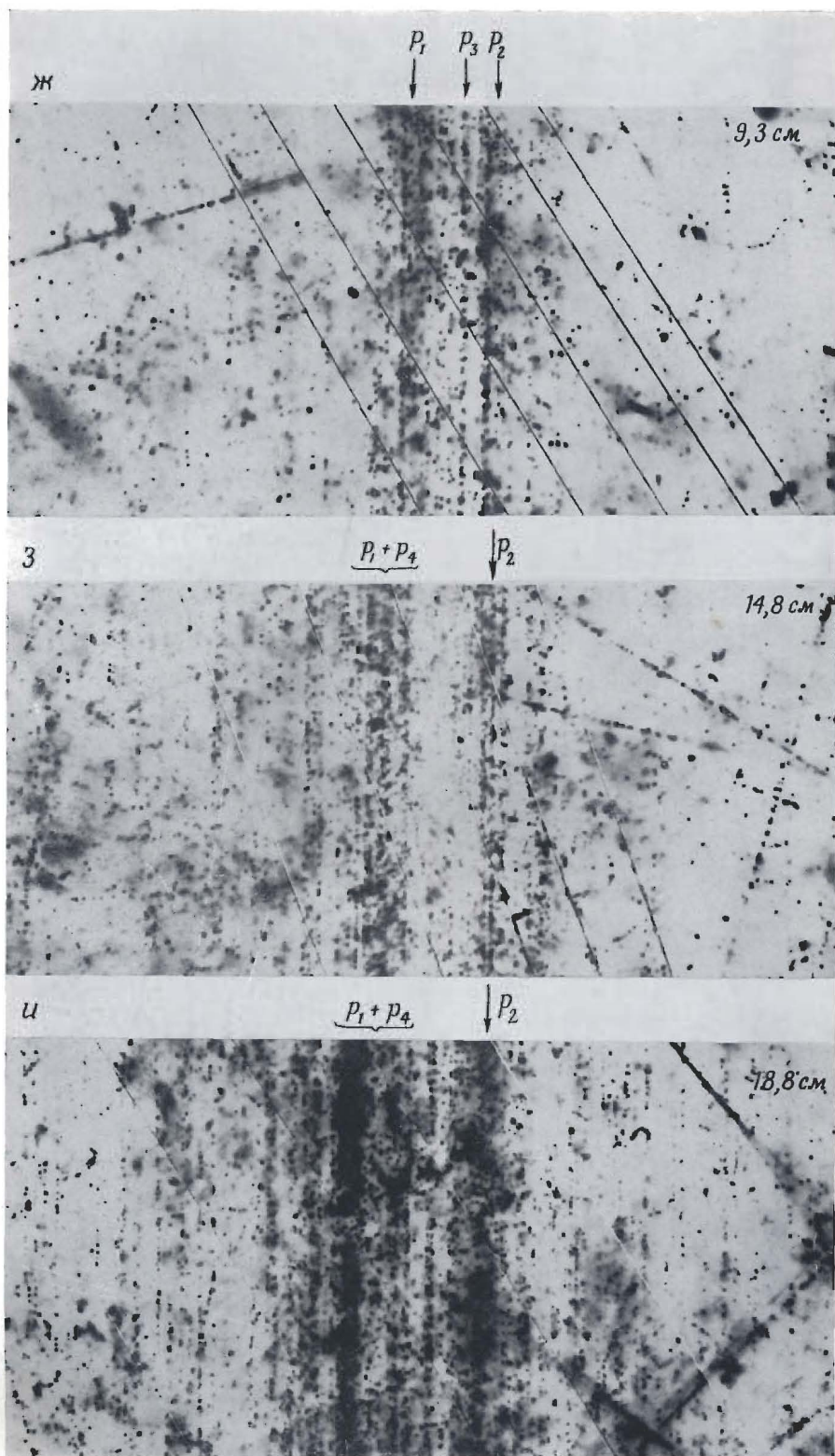


Фото 167. Электронные каскады, образовавшиеся после ядерного взаимодействия α -частицы с энергией $\sim 10^6$ Бэв. Эмульсия Илфорд G5.

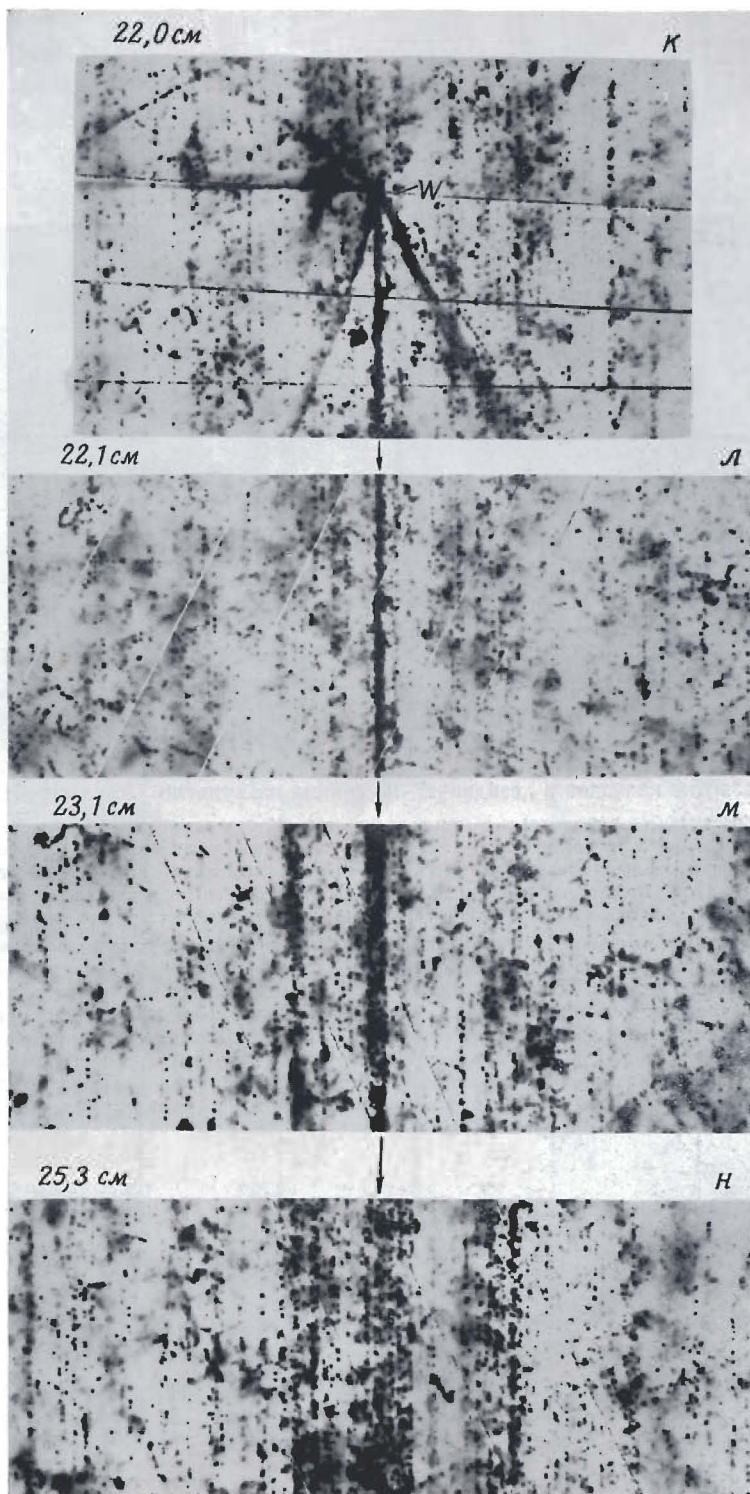


Фото 168. Ядерное столкновение вторичной частицы с энергией $\sim 10^6$ Бэв. Эмульсия Ильфорд G5.

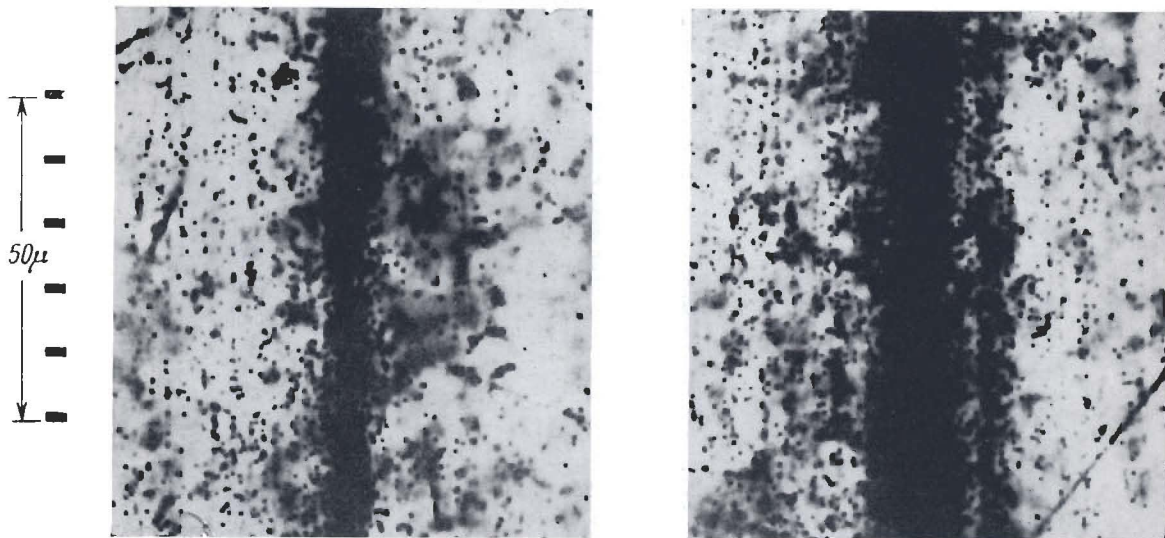


Фото 169. Развитие каскадов в „сэндвиче” из свинца и эмульсии. Эмульсия Ильфорд G5.

Электронные каскады, образующиеся в результате возникновения „струи” с энергией около 40 000 *Бэв*, зарегистрированной в блоке, состоящем из свинца и эмульсии (см. фиг. 221а, стр. 395). Каскады показаны на расстояниях соответственно 2 и 5 см от точки первоначального взаимодействия. Эффективное значение радиационной единицы длины для „сэндвича” составляло ~ 1 см. На фотографии видно, к какой сильной концентрации следов приводит уменьшение радиационной единицы длины по сравнению с величиной ~ 3 см, характерной для чистой эмульсии.

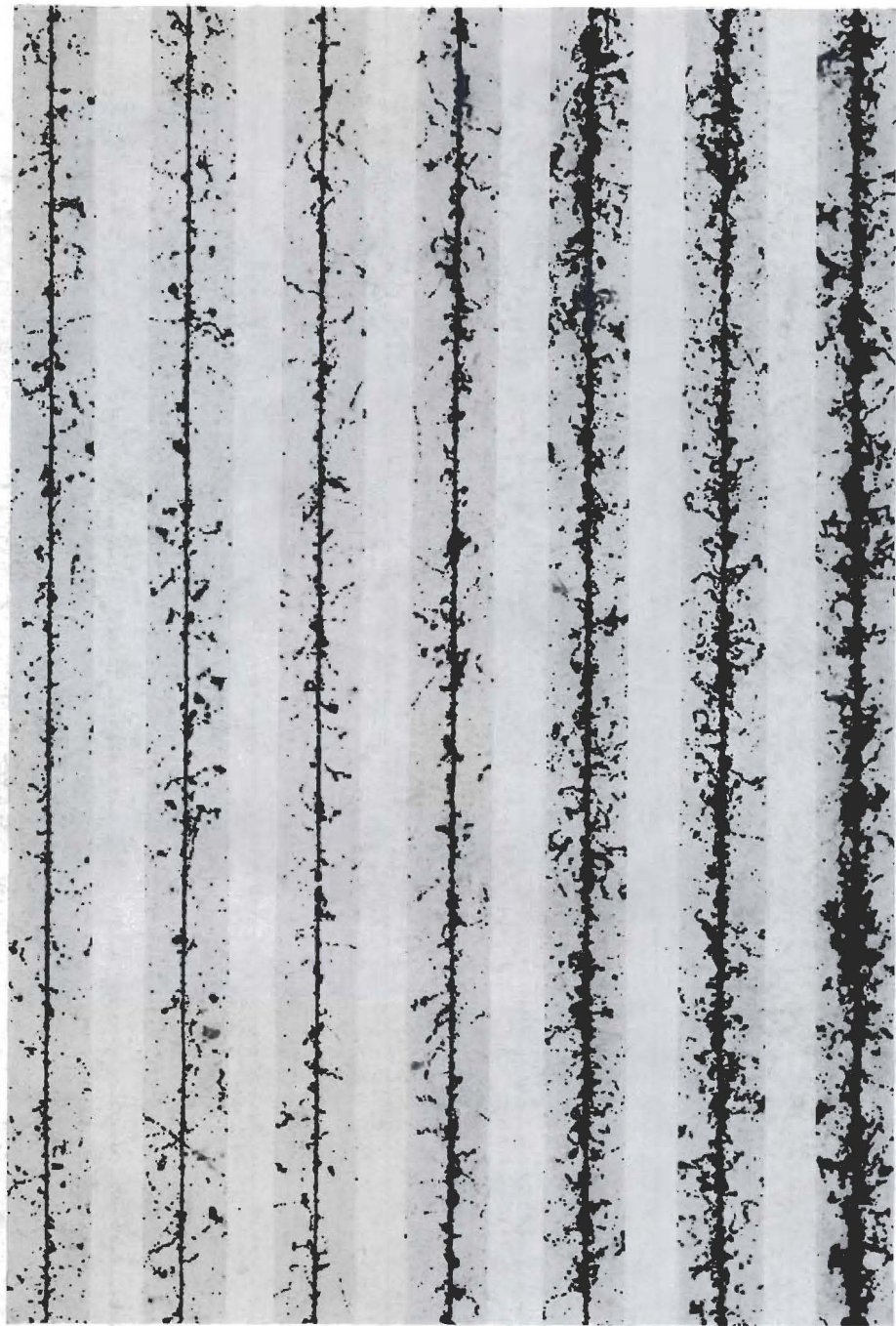
С точки зрения еще большей концентрации электромагнитных каскадов несколько лучше бы использовать вместо свинца тяжелые элементы с зарядом $Z > 82$. Так, например, в уране-238 с зарядом $Z = 92$ и плотностью ~ 21 г/см³ соответствующая длина взаимодействия была бы равна 3 мм вместо 5 мм для свинца. Однако имеется ряд возражений против использования урана, и, в частности, одно из них связано с остаточным γ -излучением, которое будет приводить к образованию фона в эмульсии при длительной экспозиции. Золото было бы предпочтительнее, чем свинец, потому что оно имеет большую плотность и его можно легко прокатывать в тонкие листы. Однако его большая стоимость и риск, связанный с полетами на баллонах или самолетах, препятствуют его использованию. В вольфраме с примесью 2% никеля радиационная единица длины была бы равна ~ 4 мм, и он представляет собой одну из подходящих возможностей.



Фото 170. Следы релятивистских ядер первичного космического излучения. Эмульсия Ильфорд G5.

Следы были идентифицированы путем измерений рассеяния и плотности δ -электронов.

Dainton, Fowler, Kent, Phil. Mag., 43, 729 (1952).



Ne	Na	Mg	Si	Ca	Ti	Fe
Z=10	Z=11	Z=12	Z=14	Z=20	Z=22	Z=26

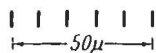


Фото 171. Следы тяжелых ядер первичного космического излучения. Эмульсия Ильфорт G5.
 Следы были идентифицированы по измерениям рассеяния (угла $\bar{\alpha}$) и плотности δ -электронов (N_{δ}).
 Dainton, Fowler, Kent, Phil. Mag., 43, 729 (1952).

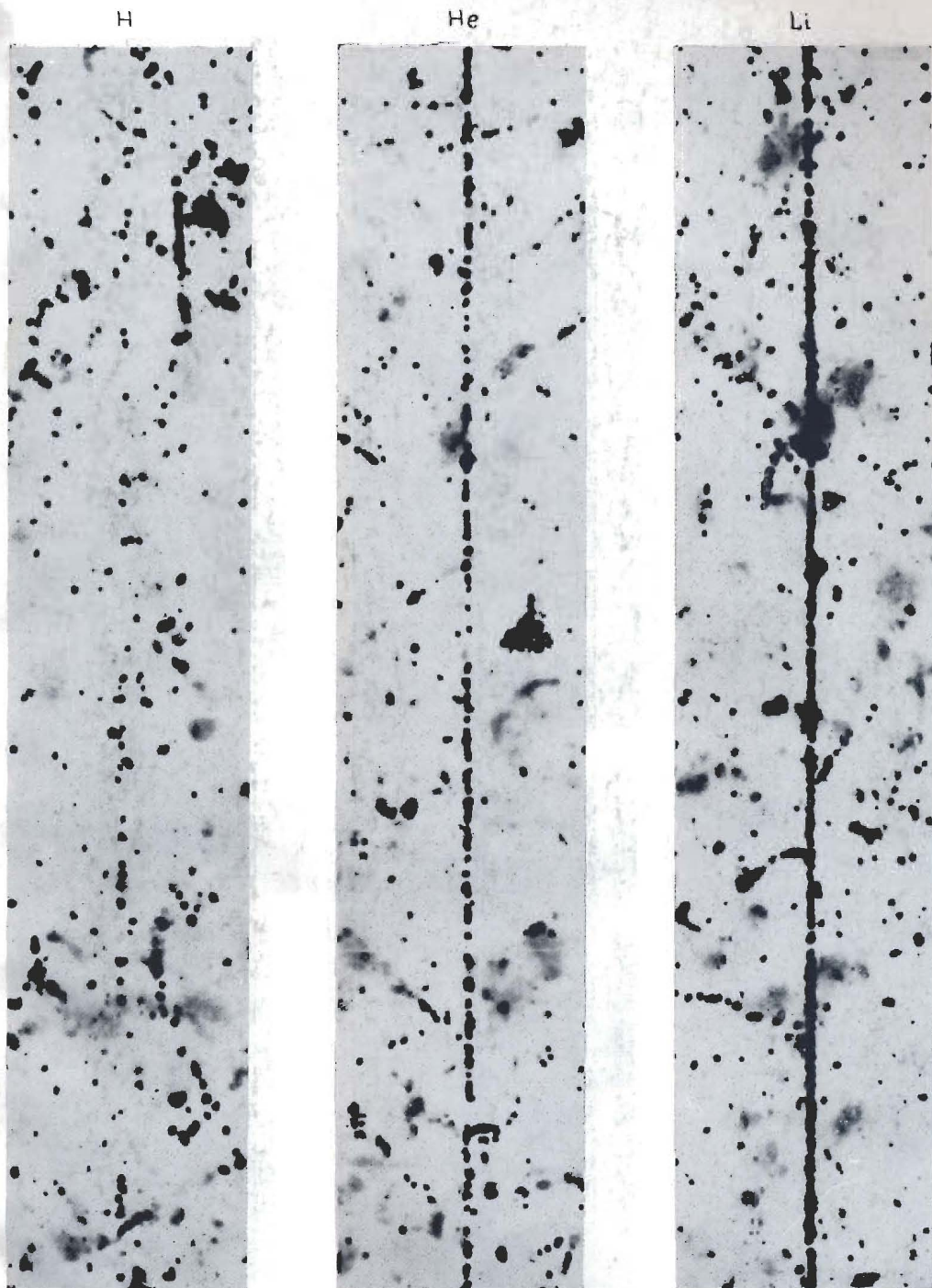


Фото 172. Следы релятивистских ядер H, He и Li первичного космического излучения.
Эмульсия Ильффорд G5.

Dainton, Fowler, Kent, *Phil. Mag.*, 43, 729 (1952).

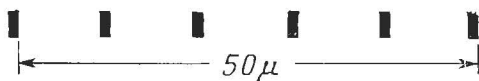
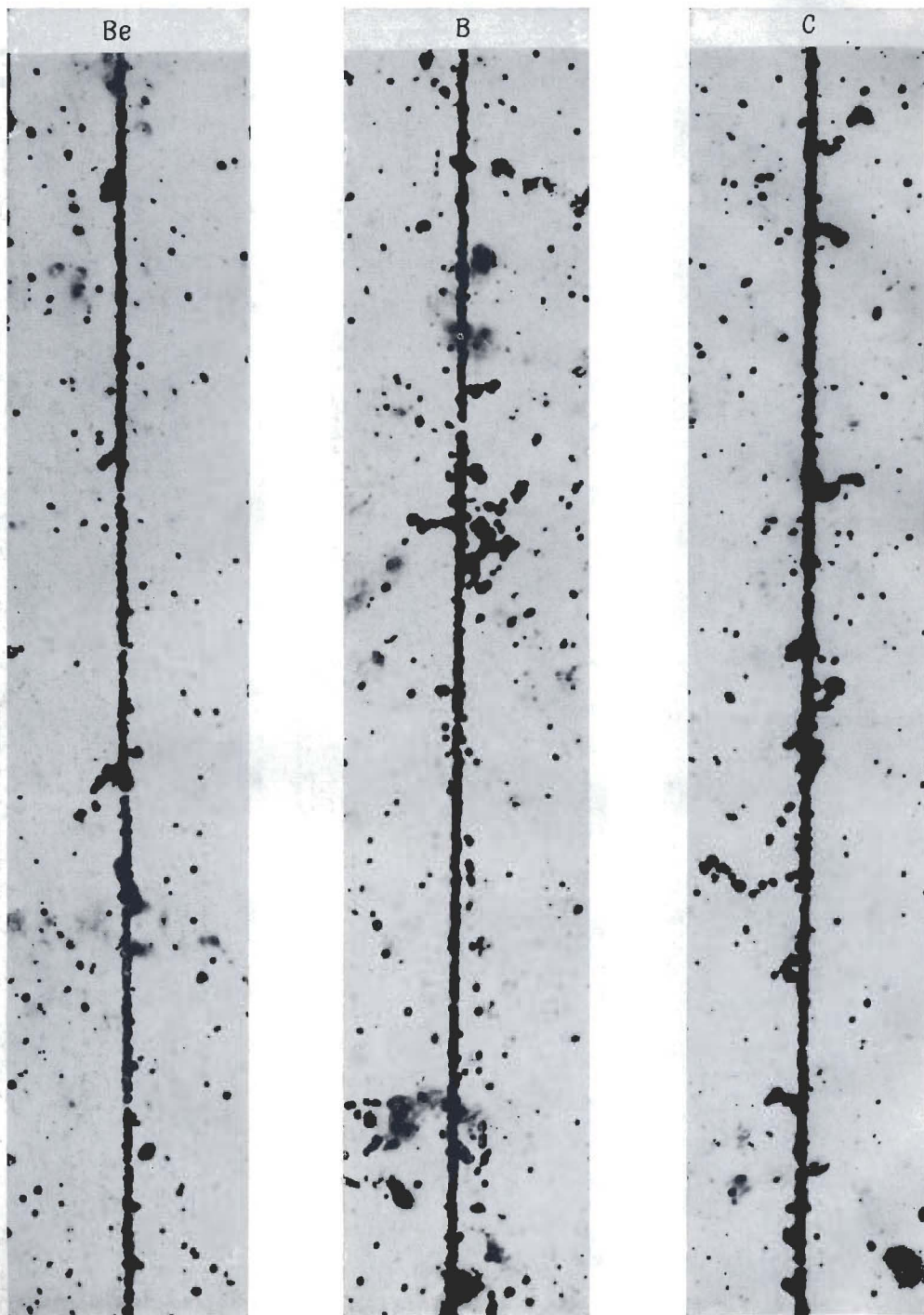


Фото 173. Следы релятивистских ядер Be, B и C первичного космического излучения.
Эмульсия Ильффорд G5.

Dainton, Fowler, Kent, Phil. Mag., 43, 729 (1952).

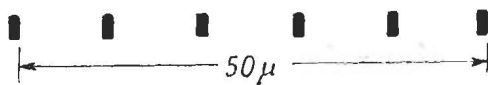
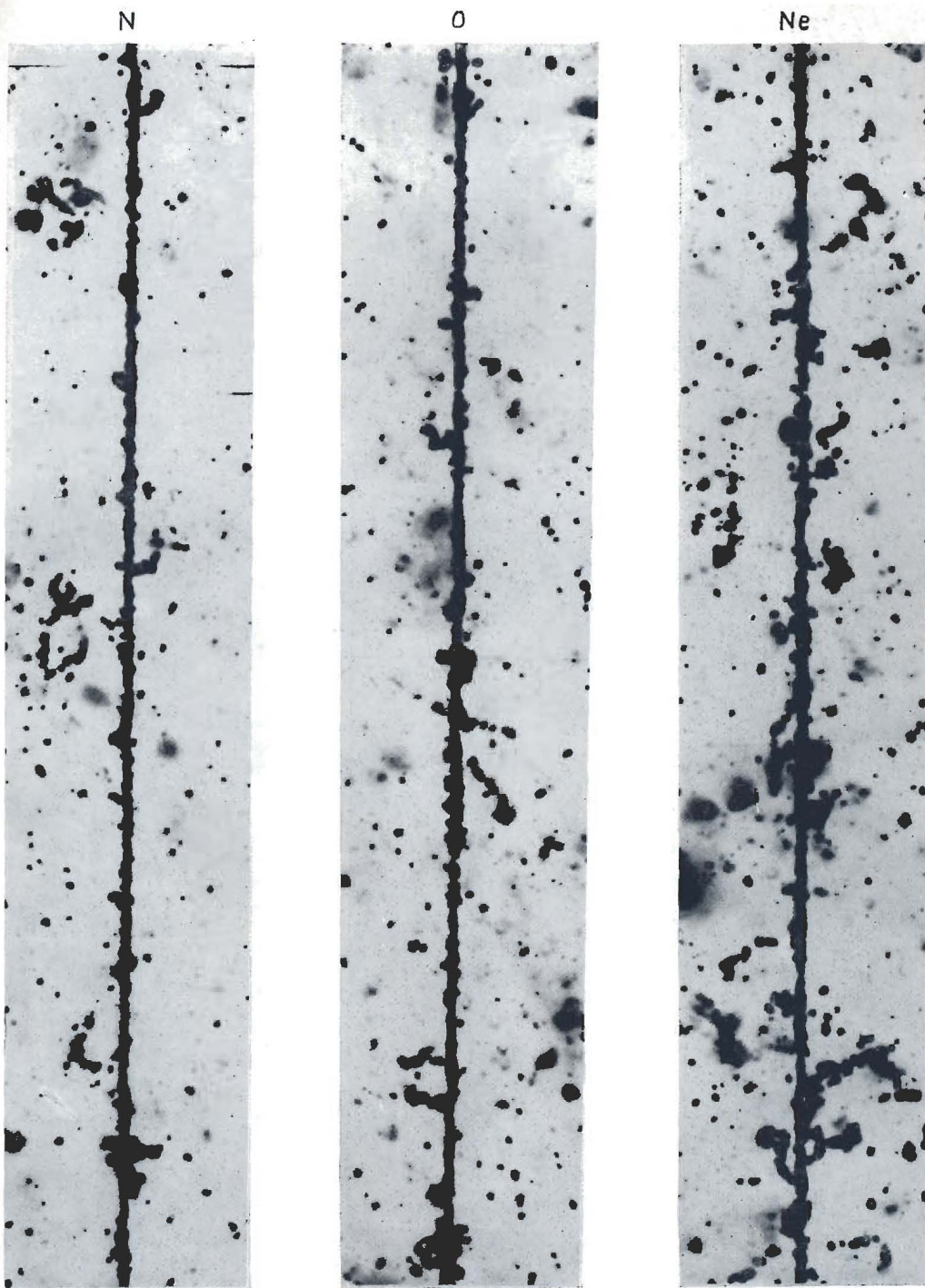


Фото 174. Следы релятивистских ядер N, O и Ne первичного космического излучения.
Эмульсия Илфорд G5.

Dainton, Fowler, Kent, *Phil. Mag.*, 43, 729 (1952).

$Z=12 \pm 1$

$Z=14 \pm 1$

$Z=20 \pm 1$

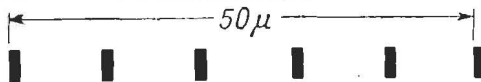
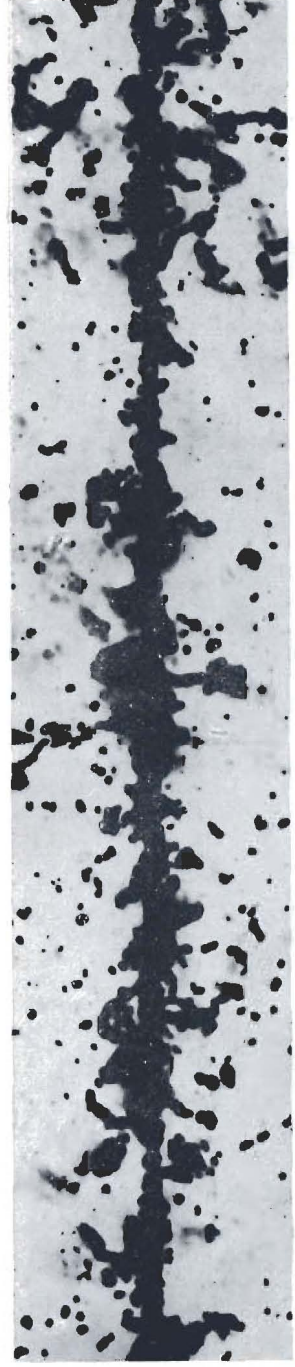


Фото 175. Следы релятивистских тяжелых ядер первичного космического излучения. Эмульсия Ильфод G5.

Dainton, Fowler, Kent, Phil. Mag., 43, 729 (1952).

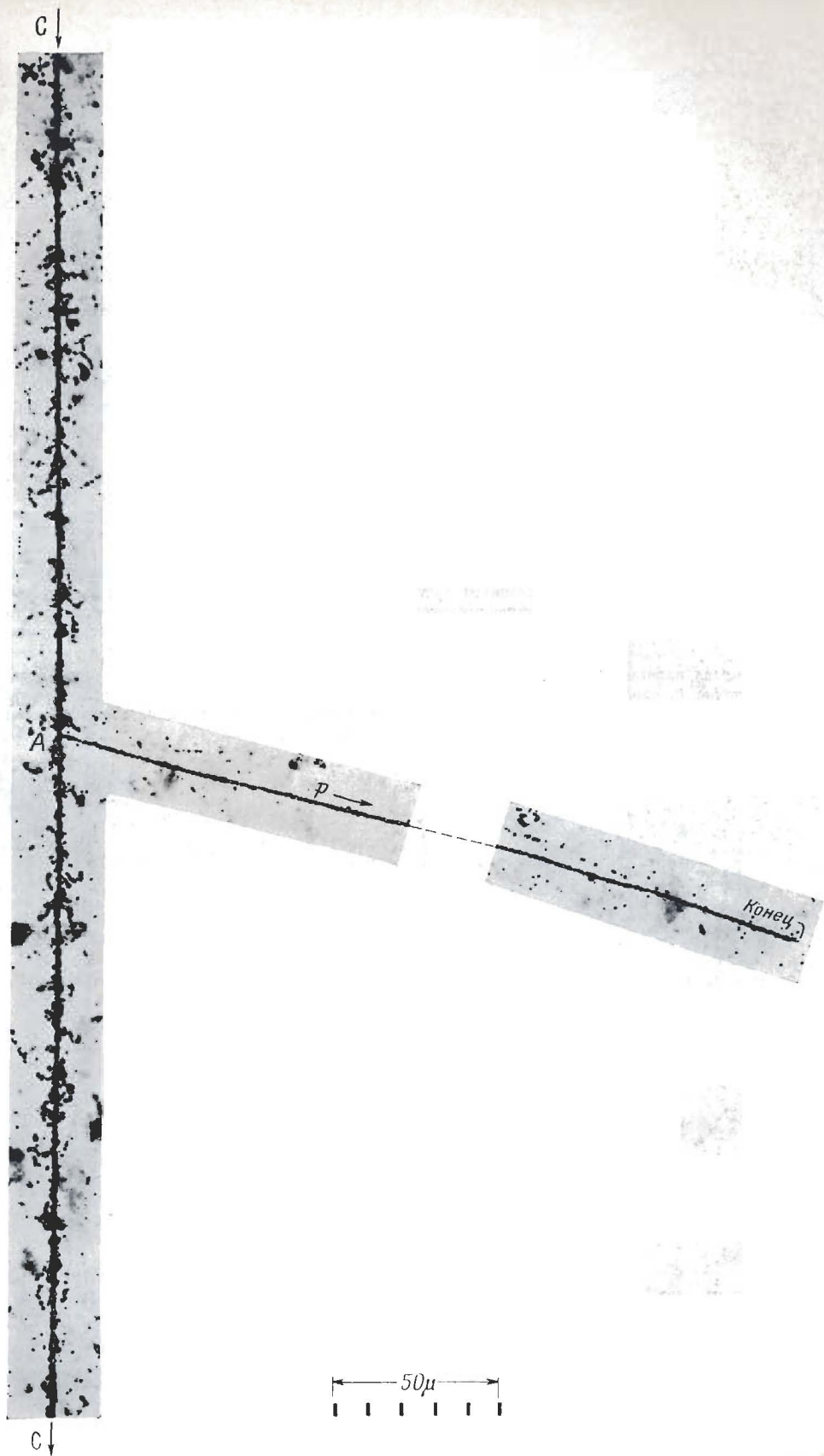


Фото 176. Столкновение ядра углерода со свободным протоном. Эмульсия Илфорд G^F
Dainton, Fowler, Kent, Phil. Mag., 43, 729 (1952).

Фото 177. Столкновение ядер углерода с ядрами фотоэмульсии. Эмульсия Ильфорд G5.

В случае А (фото слева) ядро углерода, идентифицированное по измерениям N_{δ} и \bar{a} , двигалось со скоростью, близкой к скорости света. В результате столкновения оно распалось на три α -частицы, движущиеся с почти одинаковыми скоростями. Эти частицы были идентифицированы по измерениям рассеяния и плотности зерен вдоль их следов. Эти данные, а также отсутствие следов, связанных с испарением ядра-мишени, позволяют интерпретировать этот случай как столкновение с протоном. Последний получил импульс отдачи и образовал след, отходящий влево. Если эта интерпретация правильна, то рассматриваемый случай аналогичен тому, который наблюдался бы в системе центра инерции сталкивающихся частиц при хорошо известной реакции расщепления углерода на три α -частицы под действием протонов. Однако нельзя исключить и другую возможность (хотя и менее вероятную), что рассматриваемый случай представляет собой периферическое столкновение с более тяжелым ядром.

На фото справа, падающее ядро углерода и ядра водорода, гелия и лития, на которые оно распадется в точке В, образуют следы достаточной длины, так что их можно было идентифицировать. Природа других вторичных частиц неизвестна, и, вероятно, они являются π -мезонами, образованными при столкновении.



Фото 177

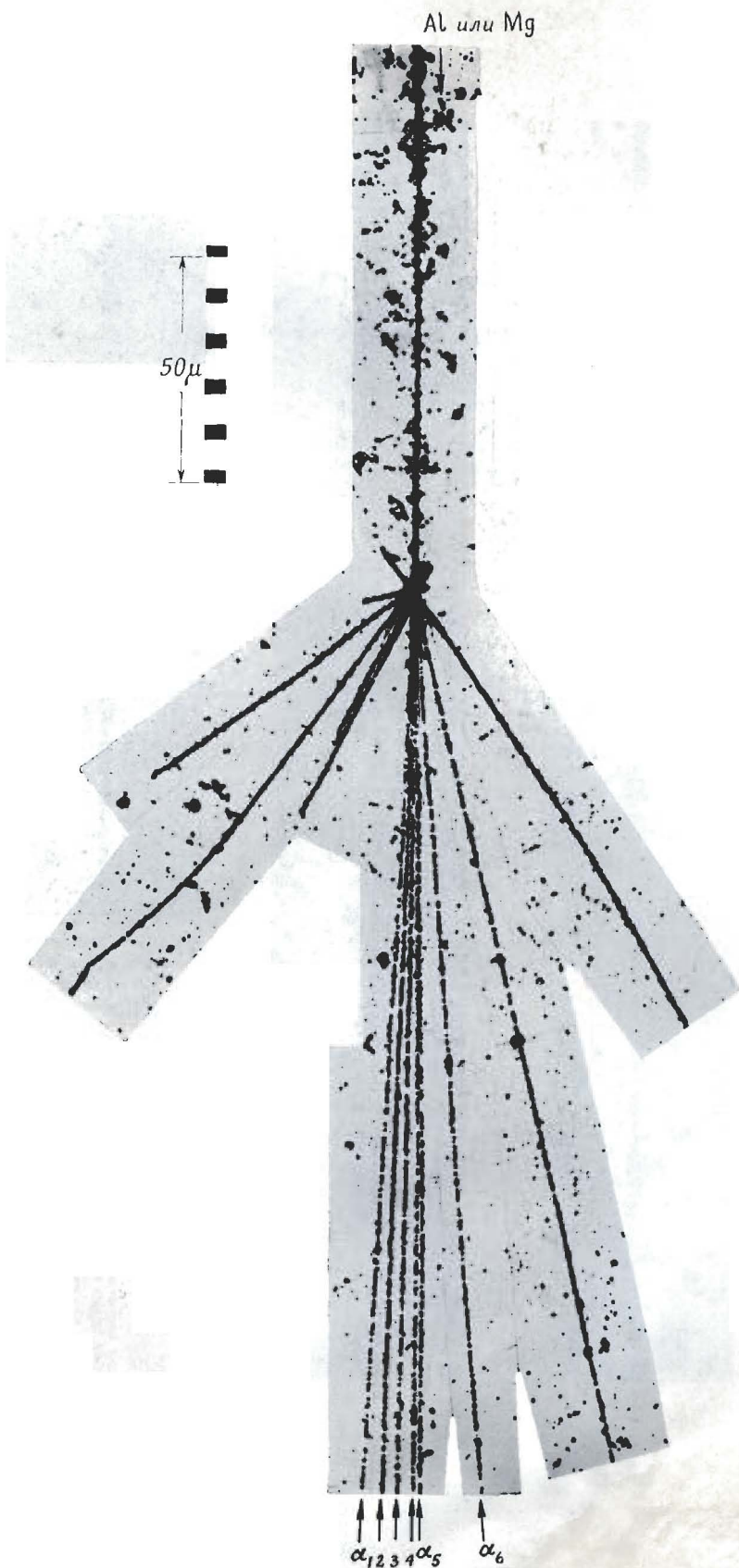


Фото 178. Фрагментация ядер углерода при столкновении. Эмульсия Ильфорт G5.

Фотографии иллюстрируют три различных типа расщеплений ядер углерода. Показаны те же самые случаи, что и на фото 176 и 177, но при большем увеличении. Исследования подобных случаев позволят иногда определить независимым способом заряд влетающей частицы. Особенно надежными по интерпретации являются случаи, когда не вылетает ни одной релятивистской однозарядной частицы, и поэтому не возникает никаких неопределенностей, связанных с образованием мезонов.

Фото 179. Фрагментация ядра магния на три α -частицы. Эмульсия Ильфورد G5.

Налетающее ядро, являющееся ядром магния ($Z = 12$) или алюминия ($Z = 13$), было идентифицировано по измерениям N_d и \bar{a} . В результате столкновения с ядром эмульсии оно расщепилось на 6 α -частиц. Как показывают измерения плотности зерен в следах α -частиц, все они вылетали с примерно одинаковыми скоростями. Седьмой след с такой же примерно плотностью зерен образован дейтроном низкой энергии.



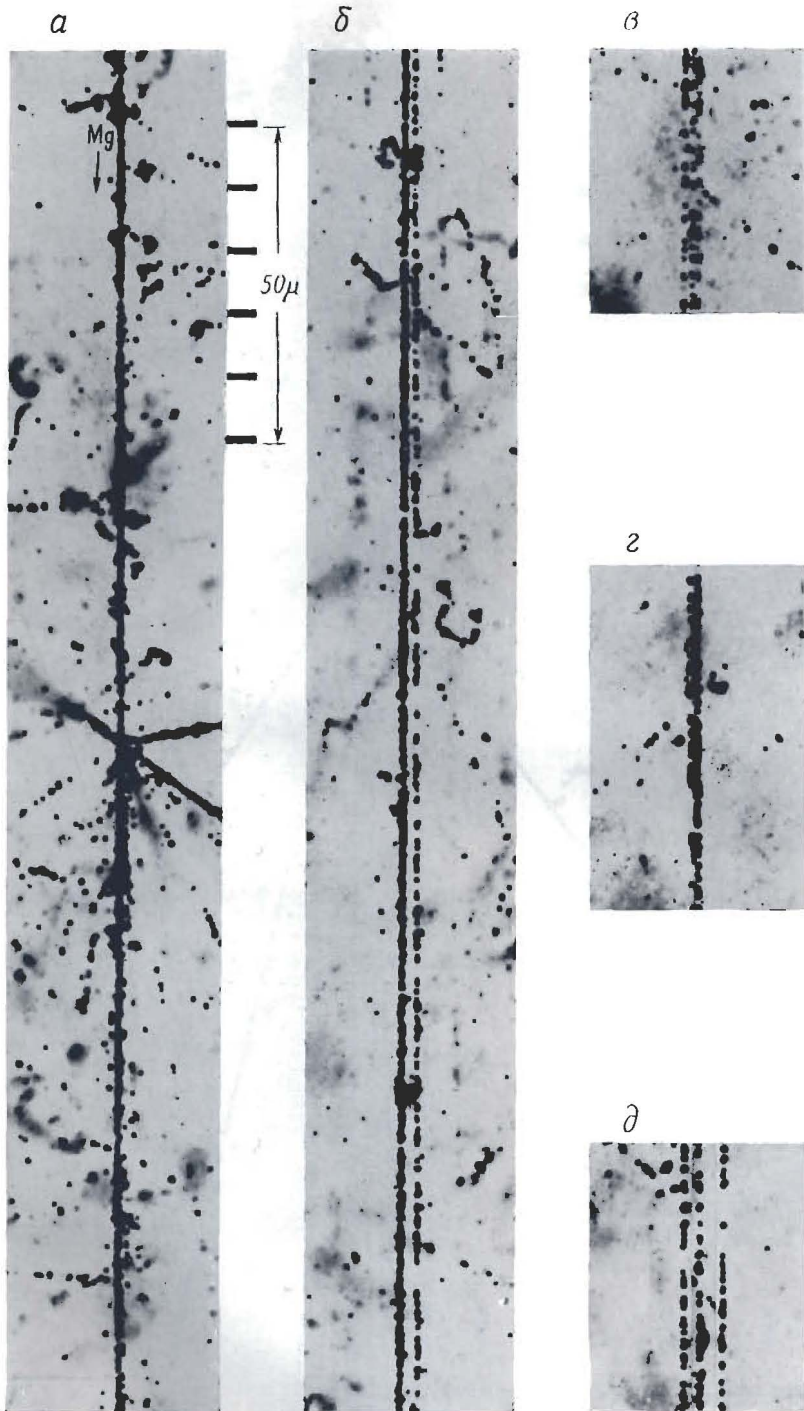


Фото 180. Образование мезонов при ядерном столкновении ядра магния. Эмульсия Ильффорд G5.

Релятивистское ядро магния сталкивается с ядром эмульсии и образует около 20 заряженных мезонов. Из точки столкновения вылетают также четыре α -частицы. На фотографии б, которая соответствует расстоянию $\sim 500 \mu$ от точки расщепления, следы трех α -частиц еще не отделяются друг от друга, что свидетельствует об очень малых значениях их относительных поперечных импульсов. Все три частицы образуют общий след с плотностью, промежуточной между соответствующими плотностями для релятивистских ядер Li и Be. На фотографии а (8 мм от точки расщепления) три следа уже могут быть разрешены, а четвертый находится справа, вне поля зрения. На фотографии г (15 мм от точки расщепления) три следа случайным образом в результате рассеяния сближаются, а на фотографии д (19 мм от точки расщепления) видно, как они после пересечения окончательно отходят друг от друга. В этом случае можно было достаточно точно измерить энергии α -частиц по их относительному рассеянию. Полученное значение было равно 2 Мэв/мезон .

Очень малые значения поперечных импульсов трех α -частиц ($\sim 8 \text{ Мэв/с}$) разумно объяснить тем, что ядро C^{12} возбудилось до энергии, несколько превышающей порог реакции $\text{C}^{12} \rightarrow 3 \alpha$, и затем спонтанно распалось. Аналогичное положение имело место, например, при возникновении пар α -частиц, образующихся при распаде ядер Be⁸, вылетающих в основном состоянии из ядер серебра и брома (см. фото 135).

Фото 181. Столкновение ядра азота, сопровождающееся образованием мезонов.
Эмульсия Ильфорт G5.

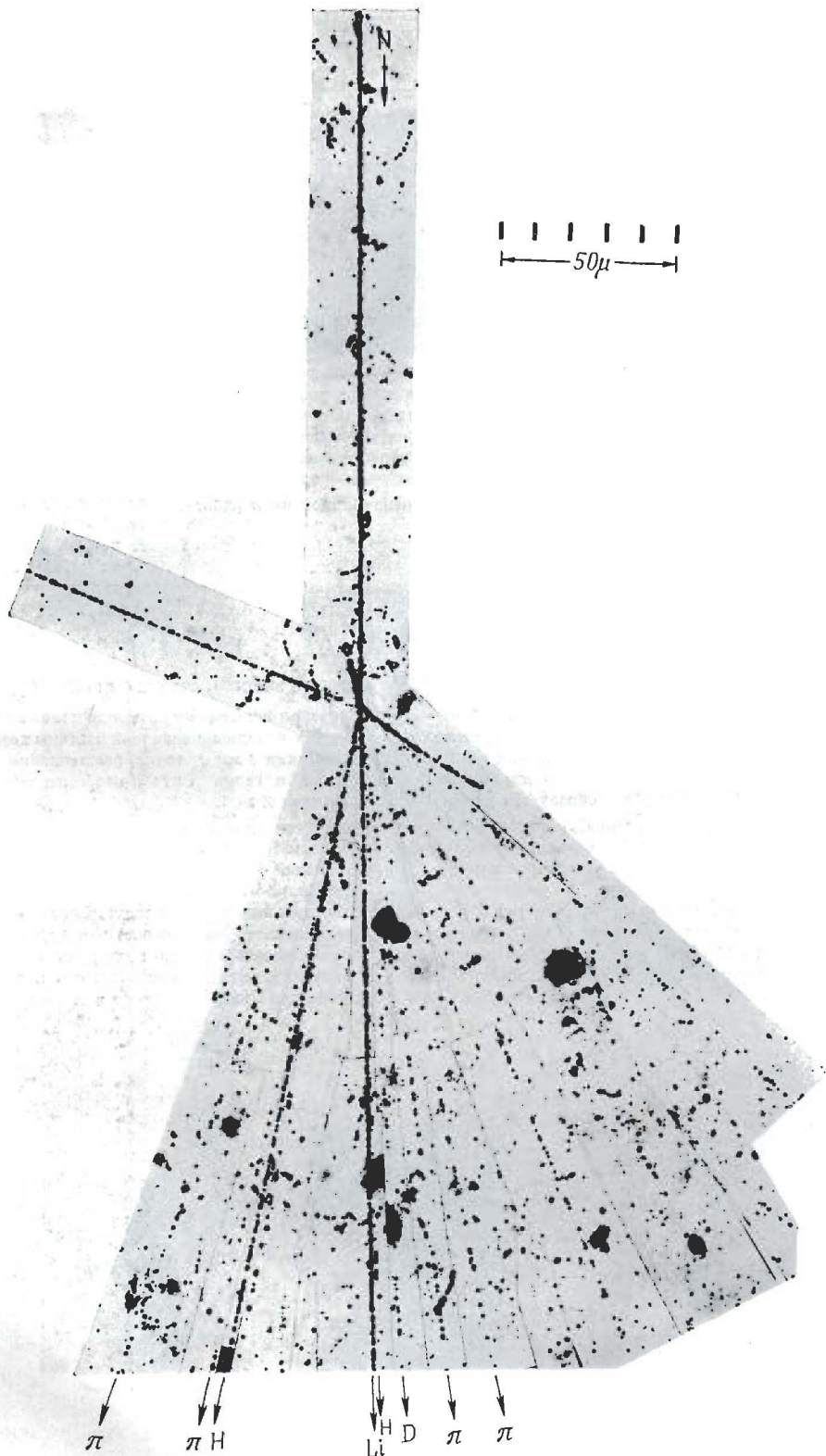
При столкновении ядра азота с ядром эмульсии образуется несколько π -мезонов. Случай характерен тем, что следы большинства частиц имеют длину, достаточную для идентификации. Родительское ядро распалось на ядро лития, дейтрон и несколько протонов. Как указано на фотографии, четыре вторичные частицы могут быть идентифицированы как π -мезоны. Три быстрые однозарядные частицы, следы которых отходят вправо, являются, по-видимому, тоже π -мезонами. Энергия первичного ядра составляла около 2 Бэв на нуклон.

Dainton, Fowler, неопубликованная работа.

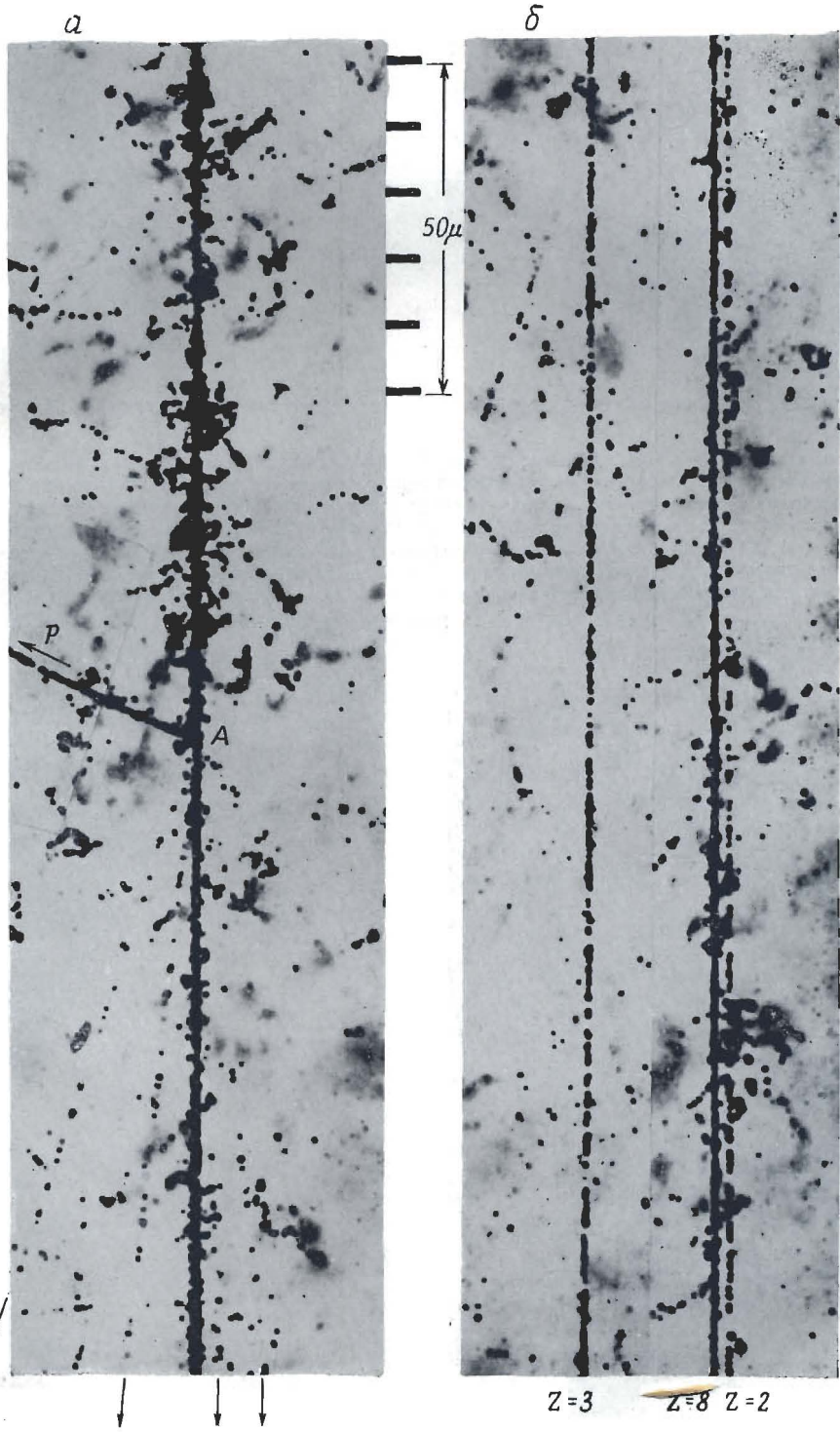
Фото 182. Фрагментация ядра железа при высокой энергии. Эмульсия Ильфорт G5.

Релятивистское ядро железа первичного космического излучения испытывает взаимодействие в точке А, образуя несколько мезонов. Следы релятивистских ядерных осколков первичной частицы хорошо разрешаются на фотографии б, где они показаны на расстоянии 3 мм от точки расщепления. Эти следы образованы соответственно ядрами лития, кислорода и гелия. Случай необычен тем, что образуется два осколка с зарядами $Z \geq 3$.

Сильно ионизирующая частица, образованная при расщеплении ядра-мишени, является протоном с коротким пробегом. Ядро-мишень не могло быть свободным протоном, потому что эта частица (след p) двигалась назад по отношению к направлению движения первичной частицы. Эта частица образовалась, по-видимому, в результате „испарения“ ядра-мишени. Следует заметить, что, вообще говоря, медленный протон мог с равной вероятностью вылететь и в направлении вперед. В результате этот случай мог быть ошибочно приписан столкновению со свободным ядром водорода. Таким образом, этот пример показывает, с какой осторожностью нужно подходить к идентификации столкновений со свободными протонами в тех случаях, когда в результате столкновения первичной частицы появляется отдельный протон.



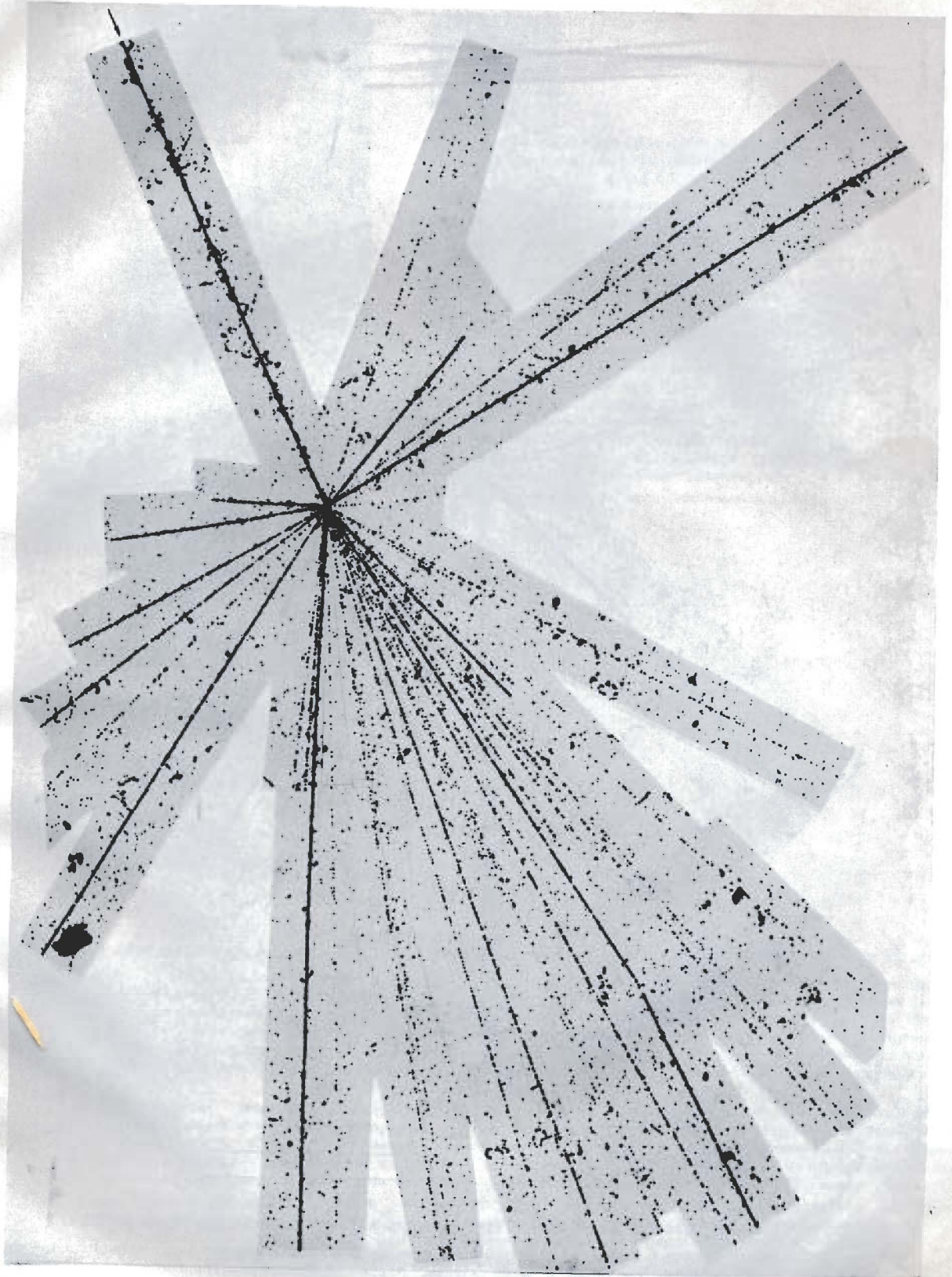
Φ ο τ ο 181



Ф о т о 183. Лобовое столкновение ядра магния с ядром брома. Эмульсия Ильфорд G5.

Ядро с зарядом $Z = 12 \pm 2$ испытывает ядерное столкновение и расщепляется на осколки. Налетающая частица почти полностью разбивается на составные нуклоны, при этом расщепляется и ядро-мишень. Поэтому событие относится к тем редким случаям, когда ядро-мишень может быть с определенностью идентифицировано. Полный заряд всех образовавшихся осколков от обоих ядер $Z \sim 47$. Поскольку энергия первичной частицы равна лишь ~ 700 Мэв/нуклон, образование большого числа мезонов очень маловероятно. Заряд первичной частицы равен $Z \sim 12$. Отсюда следует, что заряд ядра-мишени должен быть ~ 35 , т. е. это ядро было ядром брома.

D a i n t o n, K e n t, Phil. Mag., 41, 963 (1950).



Φ ο τ ο 183

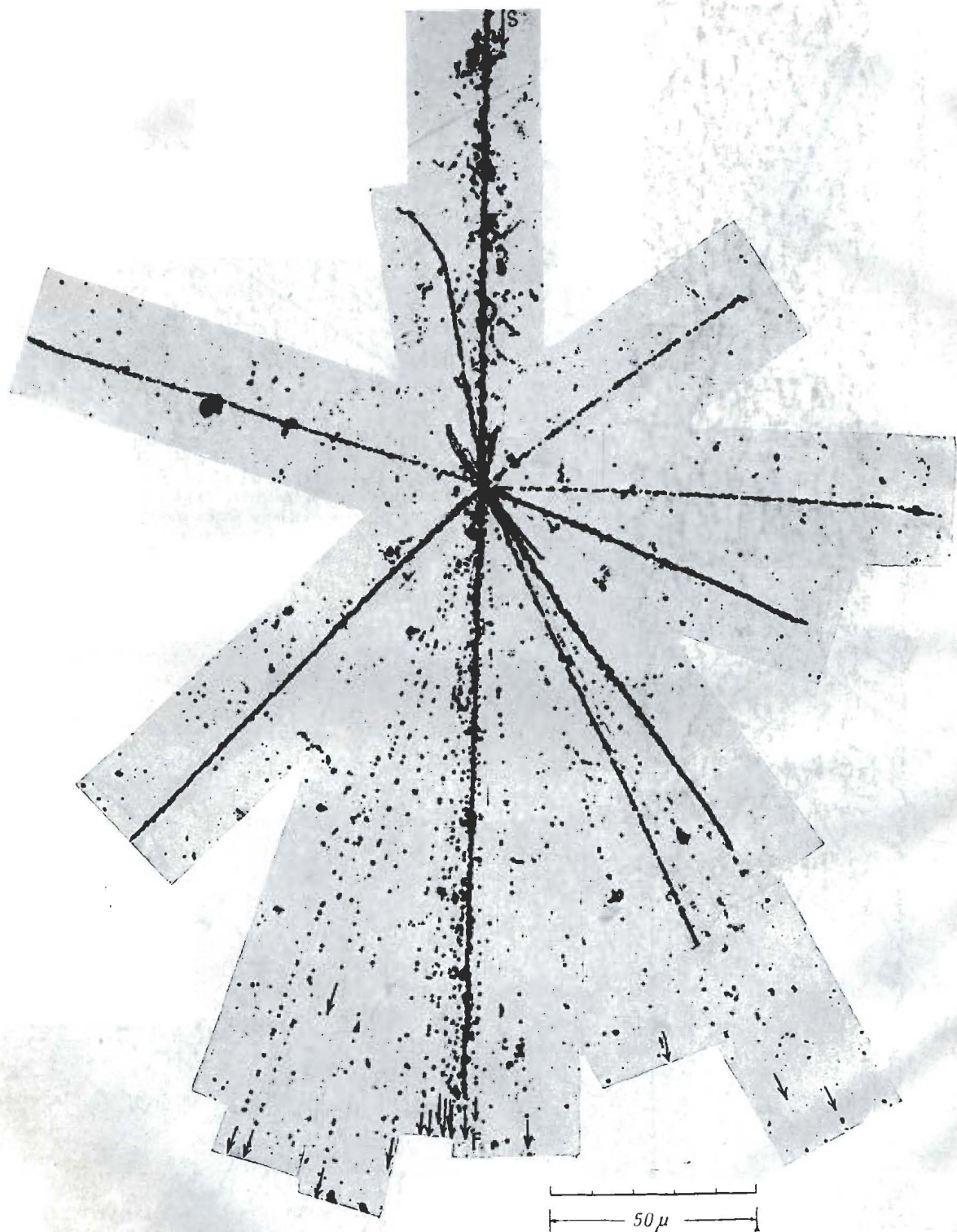


Фото 184. Образование мезонов при столкновении ядра серы. Эмульсия Ильфод G5.

Ядро серы ($Z = 16$) движущееся с релятивистской скоростью, испытывает ядерное столкновение, в результате которого образуется „струя“ из 25 мезонов. Некоторые следы из „ствола“ „струи“ на фотографии различить нельзя. Один из осколков первичной частицы образуется в виде ядра фтора ($Z = 9$).

Powell, 1950 г.

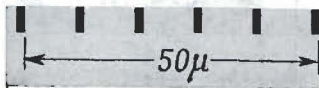


Фото 185

Фото 185. Расщепление ядра лития, двигавшегося с релятивистской скоростью. Эмульсия Ильффорд G5.

На фотографии показано расщепление, вызванное релятивистским ядром Li. В результате этого расщепления вылетели только две ливневые частицы. Первичная частица определенно является ядром лития, а не медленной α -частицей, поскольку оба следа *a* и *b* образованы релятивистскими частицами. Кроме того, облучение эмульсий было проведено на такой геомагнитной широте, что энергетический порог был равен $1,5 \text{ Бэв/нуклон}$. Это событие является наглядным примером взаимодействия, при котором полный заряд, уносимый вторичными релятивистскими частицами, меньше заряда первичной частицы (см. фиг. 241, стр. 376). Величина $\Delta Z = -1$. Наличие таких случаев указывает на необходимость осторожного подхода к предположению о том, что заряд, уносимый вторичными релятивистскими частицами, равен заряду первичной частицы или превышает его.

Бристольская группа, неопубликованная работа.

Фото 186. Взаимодействия высокой энергии с участием отдельного нуклона сложного ядра. Эмульсия Ильффорд G5.

a — первичное ядро Li, энергия которого, согласно измерениям рассеяния, составляет $\sim 2,5 \text{ Бэв/нуклон}$, расщепляет ядро-мишень серебра или брома примерно на 11 медленных осколков. При этом испустились также две ливневые частицы; след одной из них указан стрелкой, а след второй расположен под большим углом к плоскости эмульсии, и поэтому на фотографии его не видно. Ядро лития отклонилось в результате столкновения лишь на $\sim 0,02^\circ$, и его заряд не изменился. Скорее всего в этом случае с ядром-мишенью провзаимодействовал один из нейтронов ядра Li^7 , а основная часть в виде ядра Li^6 полетела дальше, не распадаясь. Если это действительно так, то отсюда следует, что нуклон с энергией $\sim 2,5 \text{ Бэв}$ может иногда при периферическом столкновении с ядром серебра или брома выбивать нуклоны из ядра-мишени.

б — расщепление образовано релятивистской α -частицей, которая кажется сохранившейся после столкновения. В результате расщепления ядра-мишени образовались четыре вторичные частицы, причем следы двух из них перекрываются. Вероятнее всего, α -частица столкнулась с ядром кислорода, которое в результате этого распалось на четыре медленные α -частицы. Первичная α -частица отклонилась в результате столкновения примерно на 1° . Расщепление можно приписать либо электромагнитному взаимодействию, либо взаимодействию одного из нейтронов первичной α -частицы, которая вылетает после столкновения в виде ядра He^3 .

в — на фотографии показано расщепление быстрой α -частицы, вызванное ядерным взаимодействием. Однако при этом не видно никаких признаков расщепления ядра-мишени. Два следа, образованные почти наверняка протонами или более тяжелыми ядрами изотопов водорода, берут начало в точке P, где внезапно уменьшается плотность зерен в следе первичной частицы. Такие случаи, в которых при столкновении не образуется никакой „звезды“, не столь уж редки и соответствуют $\sim 3\%$ полного сечения взаимодействия в эмульсии. Небольшая доля таких случаев может быть приписана расщеплению α -частиц в кулоновском поле ядер серебра или брома, однако большинство из них образуется при ядерных взаимодействиях, при которых продуктами ядра-мишени являются только нейтроны. Возможно, что в рассматриваемом случае во взаимодействии участвовал только один из нейтронов первичной α -частицы, а два протона и нейтрон полетели вперед с мало изменившейся скоростью.

Неопубликованная работа.

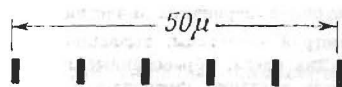
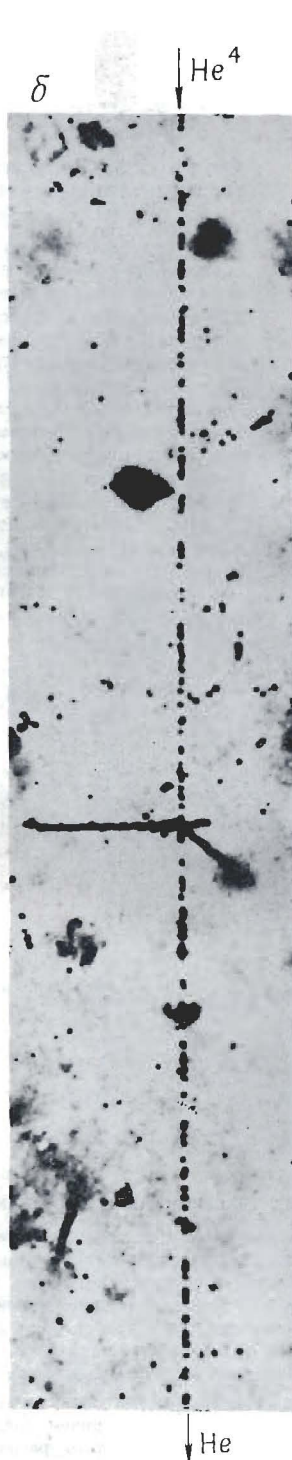
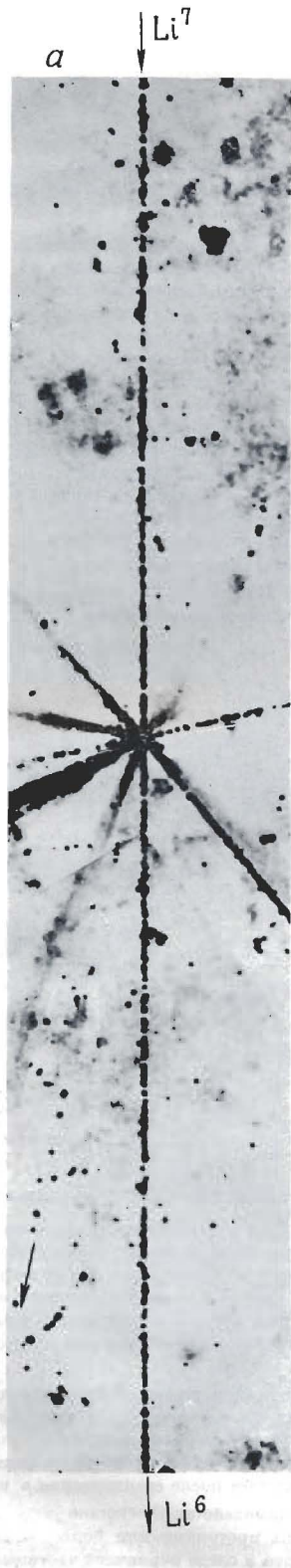


Фото 187. Ядерное расщепление, вызванное α -частицей с энергией ~ 3000 Бэв. Эмульсия Ильфорд G5.

α -частица высокой энергии образует при ядерном расщеплении „звезду“ типа $15+136$ α , состоящую из 15 следов с плотностью зерен больше $1,50 \rho$ и 136 „ливневых“ следов. Отсюда следует, что всего было образовано около 200 заряженных и нейтральных π -мезонов. Определенная по угловому распределению ливневых частиц энергия первичной частицы оказалась равной ~ 800 Бэв/нуклон.

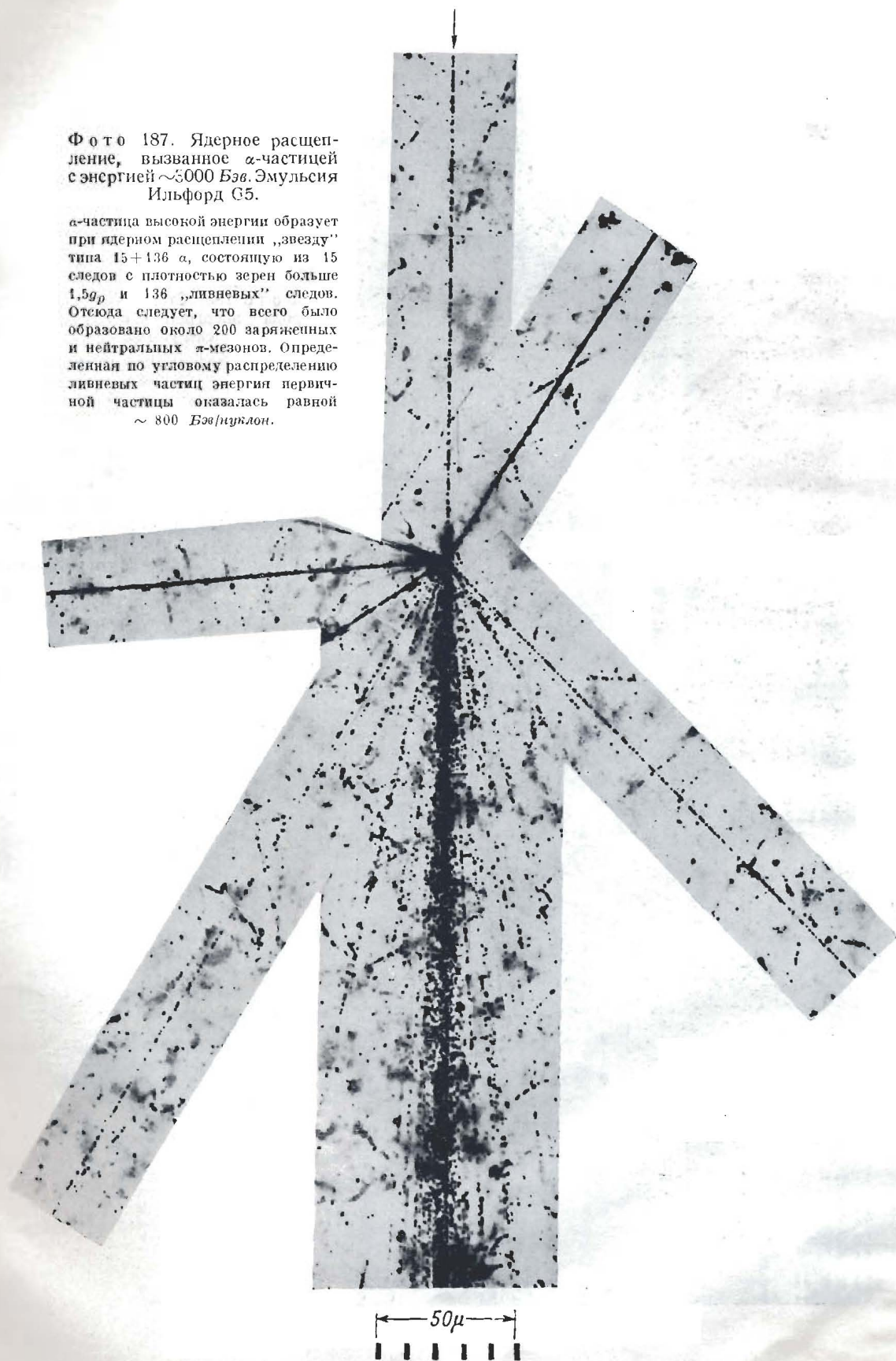




Фото 188. Столкновение ядра углерода с энергией $\sim 20\,000$ Бэв. Эмульсия Ильфورد G5.

Ядро углерода испытывает ядерное столкновение, в результате которого образуется более 100 заряженных мезонов. Около половины вторичных частиц сосредоточено в центральном „стволце”. Скорость падающего ядра была определена по углу при вершине конуса, внутри которого сосредоточена половина всех вторичных частиц. В результате столкновения падающее ядро распалось на составлявшие его нуклоны.

Daniel, Perkins, неопубликованная работа.

Фото 189. Ядерное взаимодействие ядра кислорода с энергией около 40 000 *Бэв*. Эмульсия Ильффорд G5.

Случай подобного типа имеют большое значение, так как они непосредственно свидетельствуют о наличии тяжелых ядер среди частиц первичного космического излучения наиболее высокой энергии.

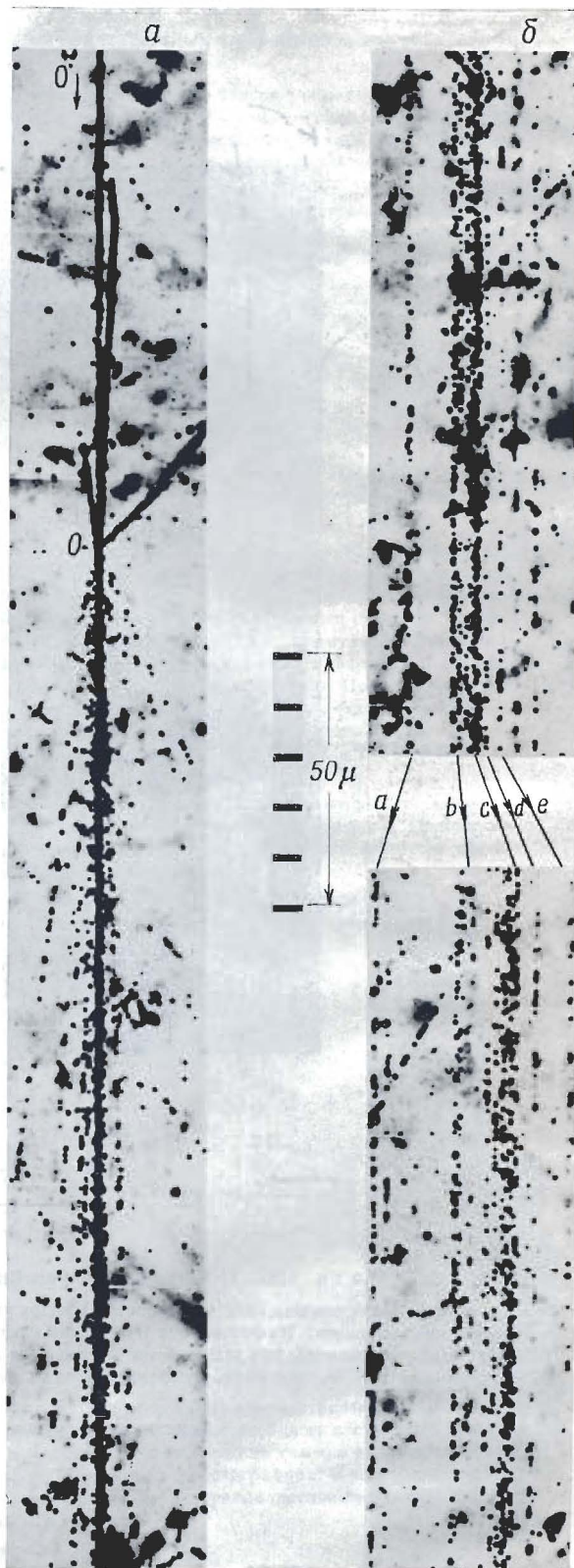
Ядро кислорода испытывает взаимодействие в точке *O*, где берут начало следы 54 ливневых частиц. Из ядра-мишени испускаются три медленные частицы, причем случайно все они оказались направленными в заднюю полусферу. Восемь ливневых частиц вылетели в пределах конуса с половинным углом при вершине $3 \cdot 10^{-2}^\circ$. Несомненно, что большинство из этих частиц внутреннего конуса является протонами, образовавшимися в результате развала первичного ядра.

На фотографии *a* следы внутреннего конуса неразличимы, на фотографиях *б* и *в* показан вид „струи“ на расстояниях соответственно ~ 5 и ~ 12 мм от точки *O*. На фотографии *б* видны следы электронно-позитронных пар, образованных в результате конверсии двух γ -квантов.

Энергию первичной частицы можно оценить различными способами: во-первых, по относительному рассеянию вторичных частиц на внутреннем конуса ливня на длине следов ~ 17 см; во-вторых, по угловому распределению протонов, вылетевших в виде осколков; и, в-третьих, по угловому распределению других ливневых частиц, большинство которых является мезонами. Первый метод приводит к величине 2500 ± 1000 *Бэв/нуклон*, второй ~ 2000 *Бэв/нуклон* и третий ~ 4000 *Бэв/нуклон*. Эти данные, полученные независимыми способами, имеют большое значение. В рассмотренном случае образовалась „струя“ моноэнергетичных протонов, сопровождаемая аналогичной „струей“ нейтронов, значения энергий которых заключены в узких пределах. Вообще говоря, такие „струи“ дают весьма ценный материал в виде набора ядерных расщеплений, образуемых в эмульсии нуклонами одинаковой энергии. В рассматриваемом случае произошло только одно столкновение быстрой нейтральной частицы, в результате которого образовалась „звезда“ типа $15 + 45 n^1$). Энергия этой частицы была определена по угловому распределению вторичных мезонов и оказалась равной 5000 *Бэв*. Большое число мезонов, образовавшихся при первичном столкновении, провзаимодействовали в стопке. Три из них, не из внутреннего конуса, вызвали расщепления с энергией ~ 1000 *Бэв*. Рассматриваемый случай был обнаружен в стопке, экспонированной группой G-Stack Collaboration в Северной Италии в 1953 г.

Неопубликованная работа.

¹⁾ Случай подобного типа, хотя и с более низкой энергией первичной частицы, но зато сопровождавшийся образованием 4 „звезд“ осколками одного и того же первичного ядра, был опубликован в работе: Жданов Г. Б., Замчалова Е. А., Третьякова М. И., Шербакова М. М., *Nuovo Cimento*, 8, Suppl. 10, 726 (1958). — *Прим. ред.*



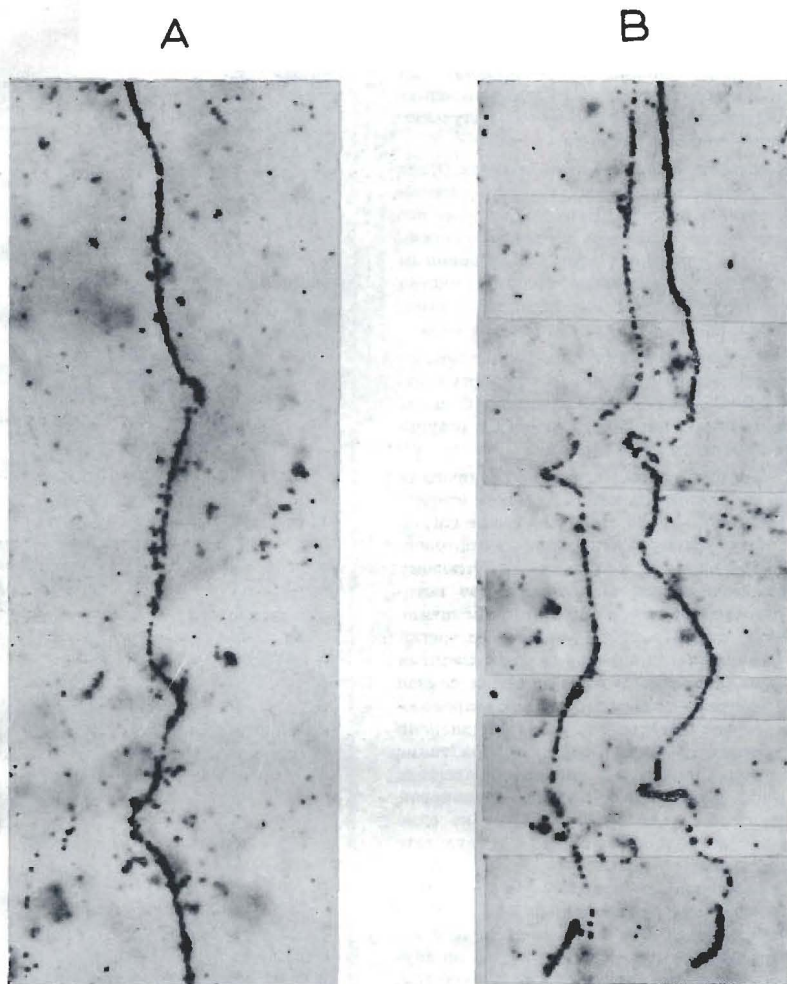


Фото 190. Искажения „переменного” типа в эмульсии. Эмульсия Ильфورد G5.

На фотографии А показан след релятивистского ядра углерода, расположенный под углом 2° к плоскости эмульсии (в необработанной эмульсии). На фотографии В показаны следы двух частиц, образовавшихся в результате ядерного расщепления. Оба следа расположены под углом $\sim 30^\circ$ к плоскости эмульсии. Обе фотографии сделаны с близко расположенных участков одного и того же слоя эмульсии, наклеенного на стекло. Они иллюстрируют случаи сильных искажений „переменного” типа.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1951 г.

Фото 191. Контактные отпечатки эмульсионных слоев, экспонированных на больших высотах с помощью баллонов. Эмульсия Ильфорт G5.

На фото А показан контактный отпечаток части эмульсионного слоя, экспонированного на большой высоте над шт. Миннесота. Ясно виден каскад, расположенный под очень малым углом к плоскости эмульсии. Несколько более коротких следов образовано следами тяжелых первичных ядер. Они помечены крестиками в местах входа и выхода из слоя. К сожалению, большинство черных меток является царапинами или отложениями серебра на поверхностях эмульсионного слоя.

Фото В, С и D являются контактными отпечатками соседних участков трех эмульсионных слоев, экспонированных на большой высоте над Северной Италией. Хорошо развившийся электромагнитный каскад пересекает все три слоя. На левой стороне каждого отпечатка видна одна из рентгеновских линий-меток. Отпечатки служат иллюстрацией того, насколько различный вид имеют следы тяжелых первичных ядер (довольно четкие линии) и следы, относящиеся к хорошо развившимся электромагнитным каскадам (относительно размытые линии).

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1956 г.

Фото 192. Контактные отпечатки эмульсионных слоев, экспонированных с помощью самолетов „Комета“. Эмульсия Ильфорт G5.

На фото А и В воспроизведены контактные отпечатки двух эмульсий, находившихся на расстоянии около 10 см друг от друга в первой стопке, установленной на самолете „Комета“ (экспозиция в течение 1200 час на высоте свыше 9 км). На них видны пять параллельных каскадов, что является иллюстрацией многоствольной структуры широкого атмосферного ливня относительно низкой энергии (10^{16} эв) на ранней стадии его развития. Наиболее слабый каскад (А3) отмечен стрелкой. Можно заметить, что плотность и размытость краев линий сильно меняются при прохождении каскада через эмульсию. Это объясняется переходным эффектом, поскольку до эмульсии каждый из каскадов развивался в слое свинца толщиной 2 см. Ширина каскада при этом была ненамного больше, чем ширина соответствующего каскада в чистом свинце. Поэтому при входе в эмульсию каскад довольно быстро расширяется. Для каскадов, которые имеют меньшую длину на один эмульсионный слой, таких, какие показаны на фото С, свинцово-эмульсионная стопка („сэндвич“) эквивалентна однородной среде с радиационной единицей длины 1 см. Длинные и плоско расположенные каскады (такие, как на фото 191 А и 192 А и В), хотя и легко регистрируются, но не являются самыми удобными для измерений.

На фото С показан контактный отпечаток участка одного из эмульсионных слоев из центральной части второй стопки, установленной на самолете „Комета“ (экспозиция 600 час). Невооруженным глазом видны 7 независимых каскадов. Положение каждого из каскадов указано двумя стрелками. Каскад С5, расположенный вблизи центра пластинки, является самым мощным из всех каскадов, зарегистрированных до сих пор в эмульсиях.

В помещаемой таблице приведены подробные данные о 12 каскадах, которые показаны на этих фотографиях.

Номер каскада	Возраст, рад. ед.	Прозрачность к свету, %	Энергия каскада, Бэв	Происхождение каскада
A1	6	12	15000	„Звезда“ в Рв
A2	6	40	8000	
A3	9	85	1500	
B1	9	50	6000	γ-квант
B2	12	30	12000	
C1	8	30	7000	„Звезда“ в Рв
C2	11	58	4000	
C3	7	63	4000	γ-квант
C4	9	40	5000	
C5	9	0,27	50000	19 + 45р
C6	7	55	3000	18 + 180п
C7	8	53	4000	„Звезда“ в Рв
				1 + 31р

Во втором столбце приведено число радиационных единиц, пересекаемых каскадом до входа в рассматриваемый слой эмульсии. В третьем столбце приведены отношения количества света, проходящего через центральную область каскада при использовании цели шириной 10 μ , к соответствующему количеству света, проходящего через соседние участки эмульсии, где нет следов каскада. Приведенные данные получены при измерениях в слоях, показанных на фотографиях. В четвертом столбце помещены результаты оценок энергий электромагнитных каскадов, полученные из измерений поглощения света в зависимости от расстояния вдоль оси каскада.

Бристольская группа, неопубликованная работа, 1958 г.

A



B



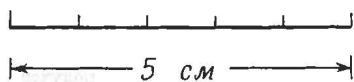
C



D



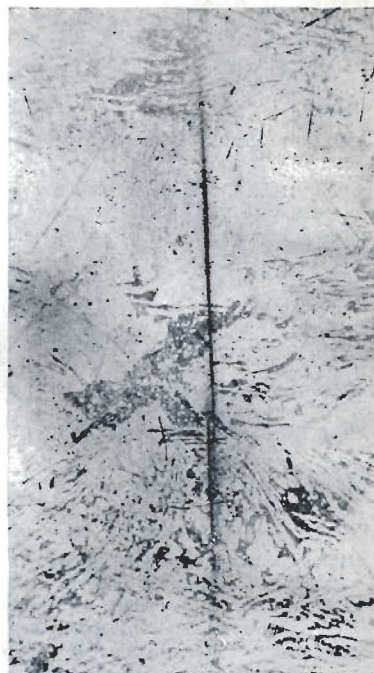
1248w



A



B



C

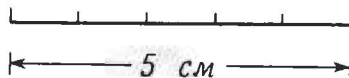
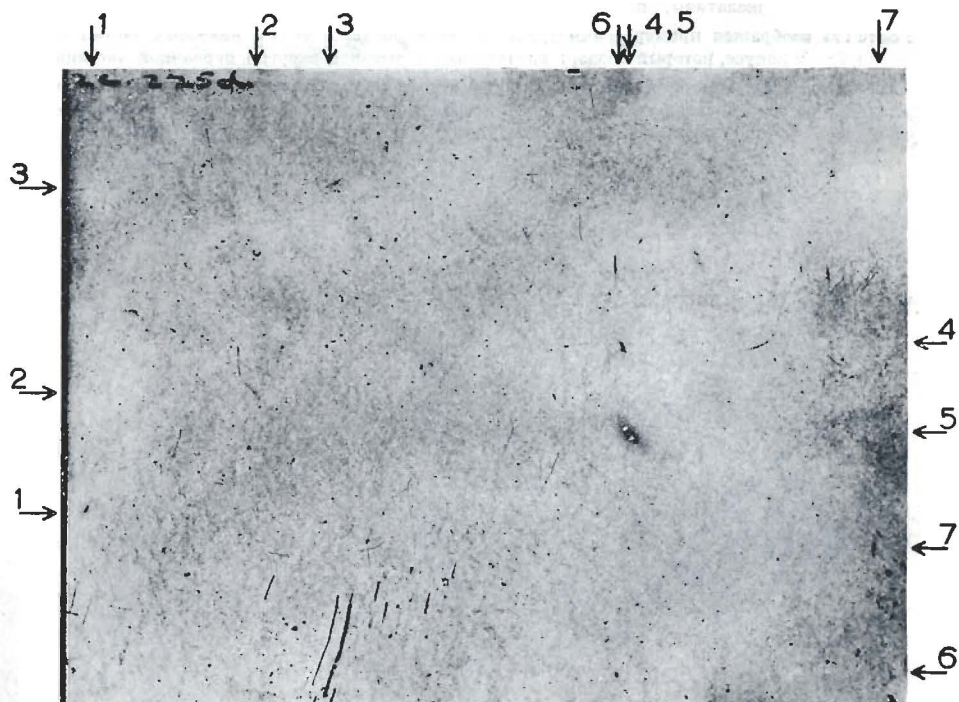


Фото 193—195. Ядерные взаимодействия протонов с энергией 10 Бэв. Эмульсия НИКФИ.

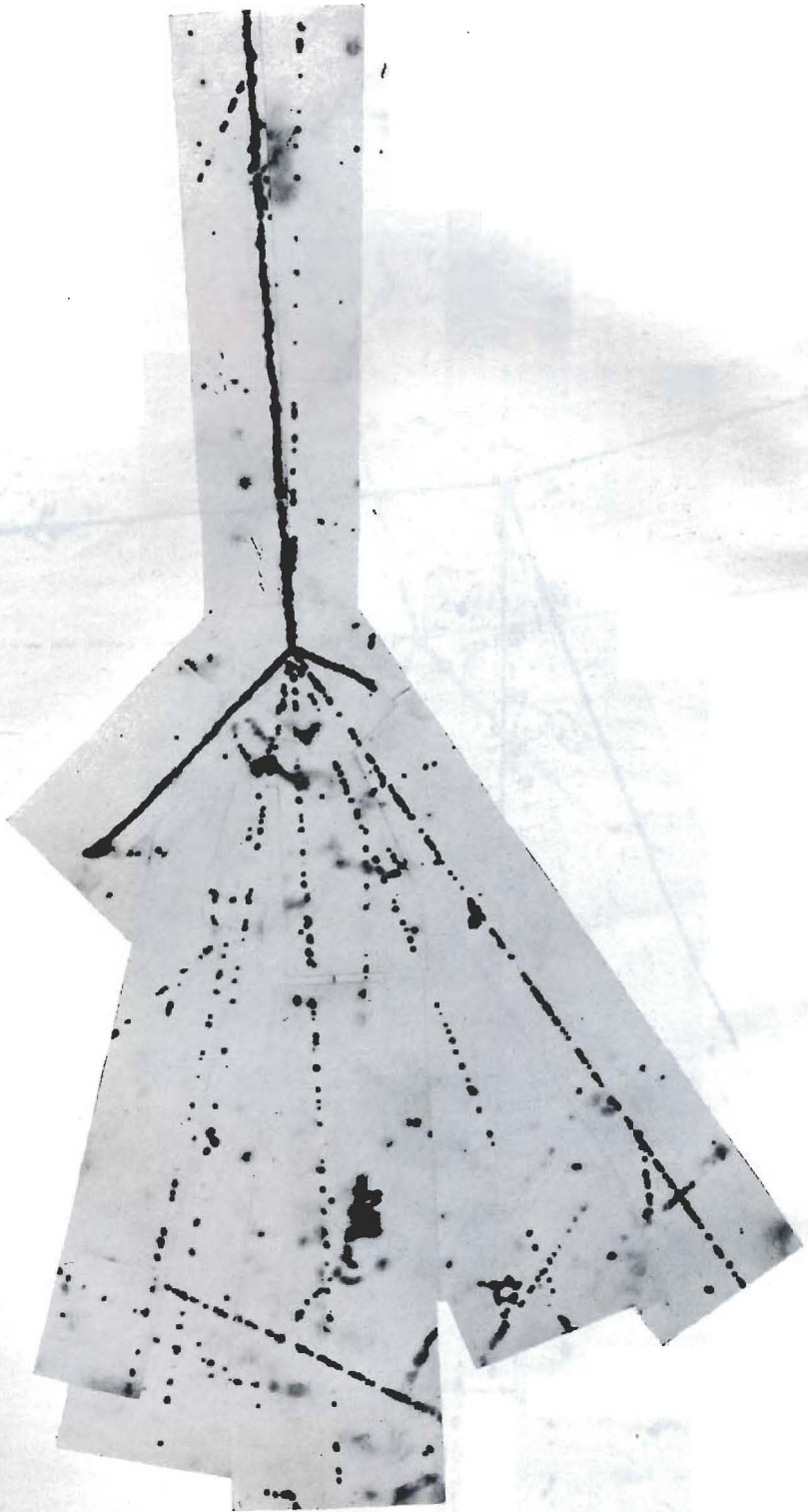
Ядерные взаимодействия в эмульсиях НИКФИ вызваны при облучении их протонами с энергией 10 Бэв от синхрофазотрона в Дубне. Три фотографии представляют собой типичные взаимодействия из общего числа 2000 случаев, детально исследованных Беляковым и др. (1958 г.)

Из сравнения с изображенными на фото 129—131 взаимодействиями, полученными при облучении эмульсий Ильффорд G5 протонами космического излучения аналогичной энергии, заметно увеличение плотности зерен (в следах частиц с минимальной ионизацией), а также уменьшение фона, характерное для малого времени облучения эмульсий на ускорителях. В результате обоих этих факторов „веточки” от δ -электронов вдоль следов становятся более четкими; это особенно хорошо видно, например, на следе α -частицы с энергией 70 Мэв, который на фото 194 направлен вправо.

На фото 193 почти наверняка запечатлено столкновение протона с ядром легкого элемента желатины, поскольку испускаются α -частицы малой энергии.

На фото 194 изображен пример асимметричного столкновения, когда 5 ливневых частиц движутся в узком конусе, который создает впечатление о высокой энергии первичной частицы.

Во взаимодействии, изображенном на фото 195, испускается только одна ливневая частица, причем отклонение ее от направления движения первичной частицы составляет около 10° по глубине. Слева можно заметить другой след протона с энергией 10 Бэв из пучка.



50μ

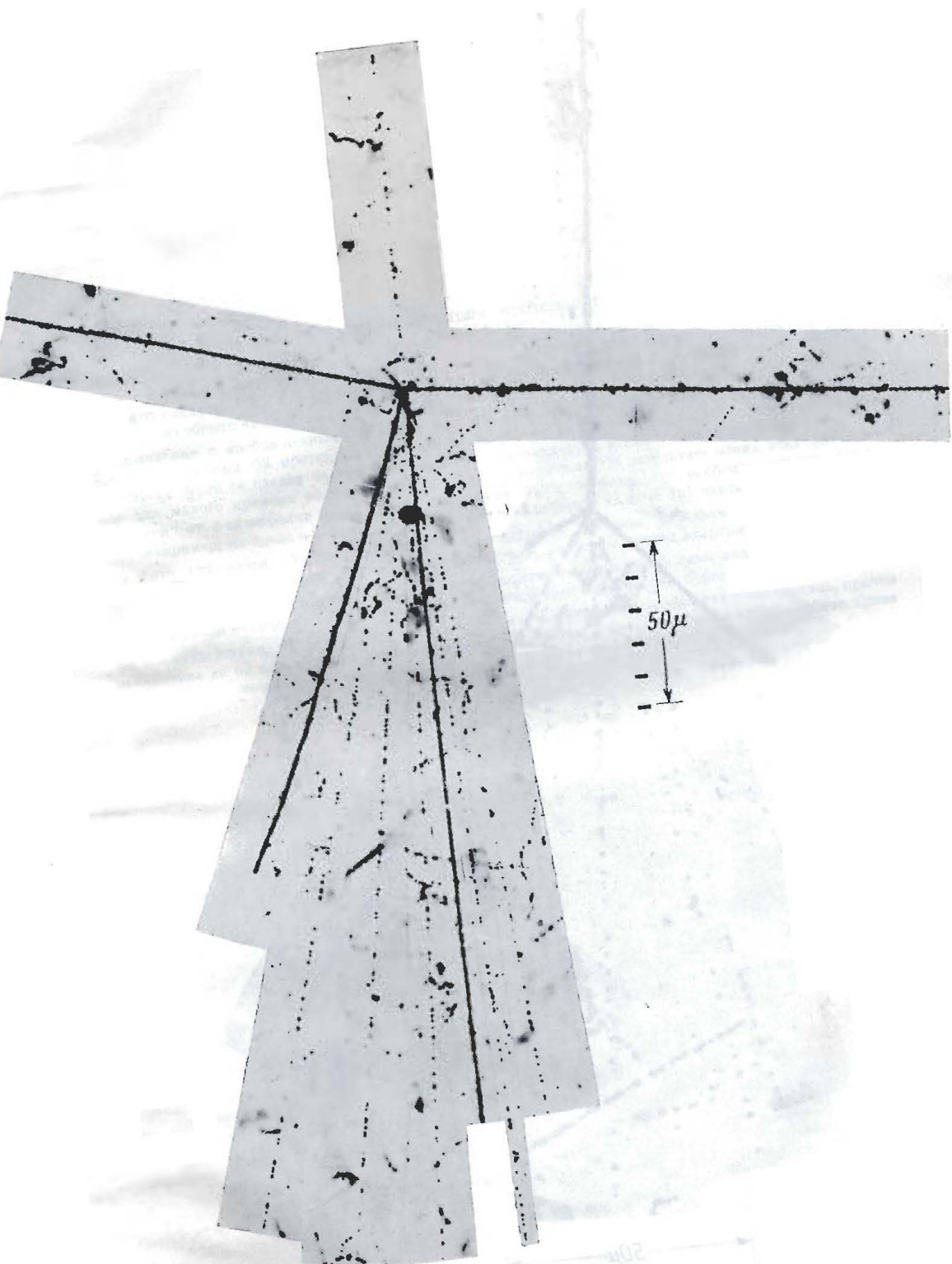


Фото 194

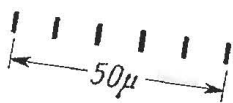
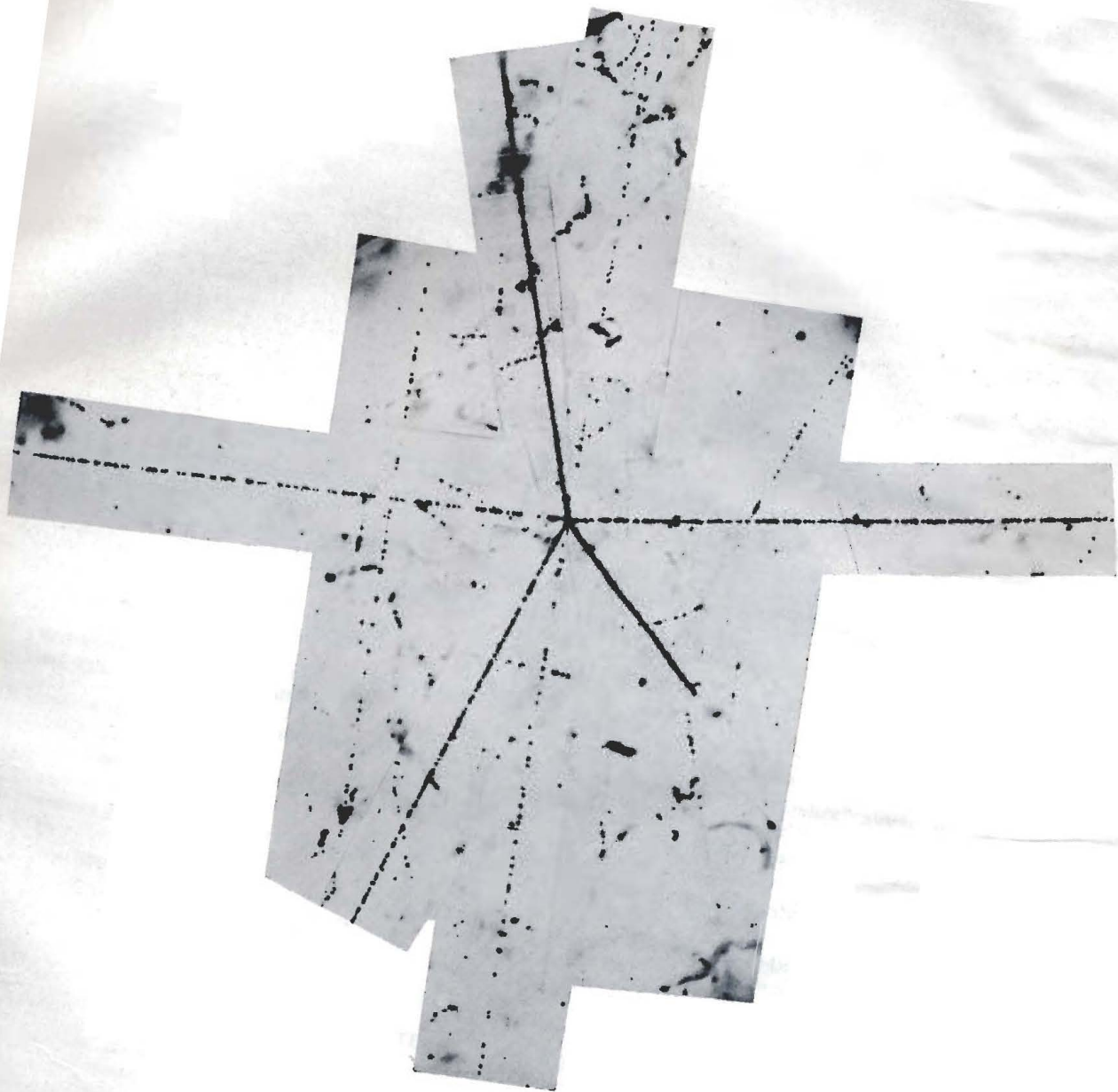


ФОТО 195