

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ЯДЕРНЫЕ РАСЩЕПЛЕНИЯ, ВЫЗВАННЫЕ
КОСМИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ БОЛЬШОЙ ЭНЕРГИИ*****К. Ф. Поуэлл, У. Камерини и др. *)***

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних нескольких лет опыты с камерами Вильсона и счётчиками показали, что прохождение через вещество космических частиц большой энергии ведёт к образованию ливней проникающих частиц. Некоторые авторы считают, что эти случаи обусловлены прохождением через ядро быстрых протонов и нейтронов и взаимодействием этих «первичных» частиц с нуклонами, лежащими на их пути. Трудность определения массы покоя частиц, движущихся с релятивистскими скоростями, хорошо известна, и действительная природа ливневых частиц остаётся неясной. Далее, неясно, образуются ли ливневые частицы обычно поодиночке в последовательных взаимодействиях первичной частицы с ядрами вдоль её пути — так называемое «многоактное» образование — или несколько частиц могут быть образованы в результате одиночного ядерного столкновения — «многократное» образование.

В фотографических эмульсиях, подвергавшихся действию космических лучей, мы недавно наблюдали более двухсот ядерных взрывов, сопровождающихся эмиссией ливней быстрых частиц с малой удельной ионизацией. Повидимому, эти случаи идентичны с теми случаями, которые дают начало «проникающим» ливням, наблюдавшимся в опытах со счётчиками и камерой Вильсона. Благодаря известным преимуществам фотографического метода мы имели возможность подробно изучить некоторые черты таких случаев. Результаты наблюдений дают сведения об ядерных рас-

*) I. R. H. Brown, U. Camerini, P. H. Fowler, H. Heiter, D. T. King and C. F. Powell. *Phil. Mag.* **40**, № 307 (1949).

II. U. Camerini, T. Coor, J. H. Davies, P. H. Fowler, N. O. Lock, H. Muirhead and N. Tobin. *Phil. Mag.* **40**, № 309, 1073 (1949). Перевод А. Н. Горбунова.

щеплениях, вызванных частицами с энергией, превышающей более чем в 100 раз энергии, получаемые в настоящее время в больших ускорителях.

В первой части мы описываем результаты, полученные при просмотре пластинок, экспонированных на высотной станции, расположенной на высоте около 3300 м на Юнгфрау. В следующей части описаны подобные наблюдения, выполненные на больших высотах на шарах-зондах; наконец, в последней части экспериментальные результаты будут проанализированы и обсуждены *).

I. НАБЛЮДЕНИЯ НА ВЫСОТЕ 3300 м

Экспериментальная часть

Настоящие наблюдения выполнены на пластинках Kodak NT4 с эмульсиями толщиной 200 μ или 400 μ . Пластины были проявлены в проявителе Ilford ID19 при определённом температурном режиме, чтобы обеспечить равномерность проявления. Просмотр длинных прямолинейных следов, образованных частицами высокой энергии, показал, что даже в более толстых эмульсиях не возникает искажений следов, за исключением областей, расположенных на расстоянии менее 3 мм от краёв пластинки.

Таблица I

Подробности облучения

Серия	Место облучения	Продолжительность облучения	Плотность зёрен $g_{мин}$	Вещество над пластинками
E (1—35)	Юнгфрау	14 суток	420/мм	7,5 см Рб
F (1—24)	„	18 „	300/мм	1 см латуни
G (1—15)	„	42 „	—	Ничего

Сведения об облучении пластинок приведены в табл. I. Различные серии пластинок были проявлены в различных условиях проявления. В таблице I для пластинок каждой серии приведена также величина плотности зёрен в следах частиц заряда $|e|$ с минимальной ионизацией.

*) Третья статья, о которой упоминают авторы, ещё не опубликована. (Прим. переводчика)

«Быстрые» и «медленные» заряженные частицы

Среди «звёзд», образованных в эмульсиях, мы обнаружили 1200 «звёзд», с каждой из которых связана по крайней мере одна быстрая частица с удельной ионизацией, близкой к минимальной величине для заряда $|e|$. На рис. 1 показано распределение плотности зёрен в следах 300 частиц, связанных со «звёздами», из которых расходятся по крайней мере семь сильно ионизирующих частиц, главным образом протонов и α -частиц.

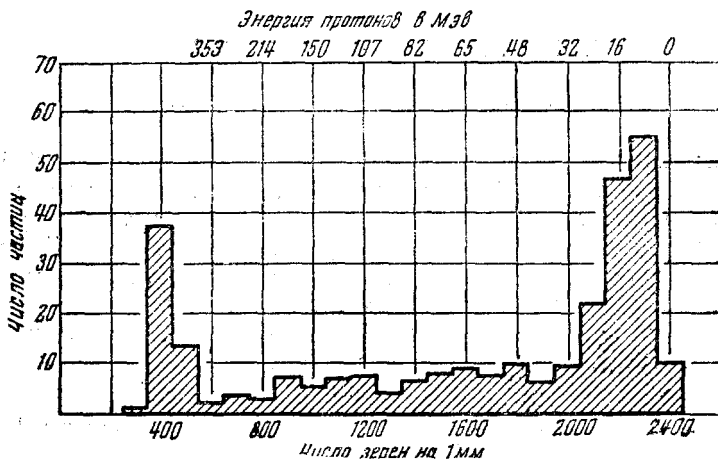


Рис. 1. Диаграмма, показывающая типичное распределение плотности зёрен следов, связанных со звёздами. Измерения ограничивались следами длиной больше чем 300 μ , входящими в состав звёзд с семью и большим числом частиц.

Наблюдения ограничивались следами с длиной, превышающей 300 μ . Кривая распределения имеет максимум при плотности 400 зёрен на 1 мм. Такая же плотность зёрен в следе зарегистрирована на этой же эмульсии для отдельных следов быстрых частиц. Будет удобно обозначить символом $i_{\min}$ минимальную величину удельной ионизации частицы с зарядом $|e|$ и $g_{\min}$ соответствующую ей величину плотности зёрен в следе.

На рис. 1 имеется второй максимум для следов с высокой плотностью зёрен, порядка 2400 зёрен на 1 мм. Эти следы, представляющие собой почти непрерывную последовательность зёрен, вызваны главным образом протонами с относительно невысокой энергией 15—40 Мэв. Остальные следы непрерывно распределены между двумя максимумами. (Следует отметить, что следы с плотностью зёрен, меньшей примерно 1200 зёрен на 1 мм, не регистрировались менее чувствительными эмульсиями, использовавшимися до недавнего времени.) Ниже мы будем называть «бы-

строй» частицей частицу, образующую след с плотностью зёрен, меньшей $1,5 g_{\text{мин}}$, а след такой частицы будем называть «тонким» следом. Величина отношения кинетической энергии таких частиц к mc^2 , где m — масса покоя, больше 2.

Обозначим число сильно ионизирующих частиц в звезде, следы которых имеют плотность зёрен, большую, чем $1,5 g_{\text{мин}}$, символом Λ_h . Будет удобно называть «серыми» следами следы с величиной плотности зёрен между $1,5$ и $5 g_{\text{мин}}$ и «чёрными» — следы с $g > 5 g_{\text{мин}}$. Почти все серые следы образованы частицами с зарядом $|e|$. Энергия таких частиц, если они протоны, лежит в интервале от 25 до 330 Мэв.

Эффективность регистрации быстрых частиц

При интерпретации результатов важно знать эффективность f , с которой следы «быстрых» частиц могут быть обнаружены в наших экспериментальных условиях. Количественная оценка эффективности может быть сделана следующим образом: подавляющее большинство π -мезонов, которые остаются в эмульсии, и, распадаясь, образуют μ -мезоны с энергией 4,25 Мэв, заряжены положительно. Примерно в 10% таких случаев пробег μ -мезона оканчивается в эмульсии. Мы можем предположить, что он затем наверняка распадется с испусканием быстрого электрона, след которого имеет плотность зёрен, равную минимальной величине $g_{\text{мин}}$. Сравнение числа случаев, в которых электрон распадается действительно наблюдается, с полным числом остановившихся в эмульсии μ -мезонов, позволяет определить величину эффективности f .

В исследованных пластинках мы нашли 52 случая распада π -мезона, причём μ -мезон оставался в эмульсии; в 42 из этих случаев след электрона распада может быть различен. Отсюда мы заключаем, что $f > 0,80$. Эта цифра относится к эффективности регистрации следов частиц, у которых как точка возникновения, так и направление движения распределены произвольно. Мы увидим, однако, что большинство быстрых частиц, связанных со звёздами, движутся в направлениях, образующих углы, меньшие, чем 50° , с плоскостью эмульсии. Так как величина f вычислена из наблюдения электронов распада, она представляет собой нижний предел величины эффективности для быстрых частиц, связанных со звёздами.

Энергия, освобождаемая в звёздах с различным числом частиц

Вторая величина, которая важна для интерпретации результатов — это средняя энергия, освобождаемая в звёздах, состоящих из различного числа «чёрных» и «серых» следов (следов, у которых плотность зёрен больше $1,5 g_{\text{мин}}$). Мы определили эту величину

методами, описанными в дополнении; результаты измерений представлены на рис. 2. Повидимому, эти результаты достаточно хорошо согласуются с результатами экспериментов в Беркли по расщеплениям, образованным искусственно ускоренными дейтронами и α -частицами известной энергии, и с наблюдениями расщеплений, образующихся при остановке π -мезонов в эмульсии (если предположить, что вся энергия, соответствующая массе покоя такой частицы, распределяется между нуклонами ядра, которое

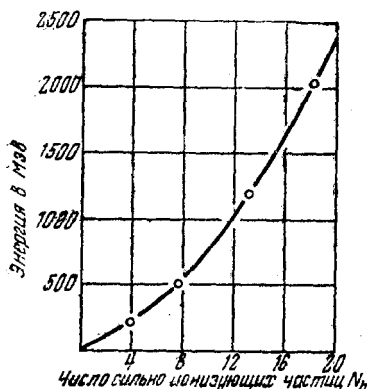


Рис. 2. Средняя энергия, освобожденная в «звездах», в которых образовано различное число сильно ионизирующих частиц. Величины энергии соответствуют энергии испущенных нуклонов и не включают энергию «ливневых» частиц.

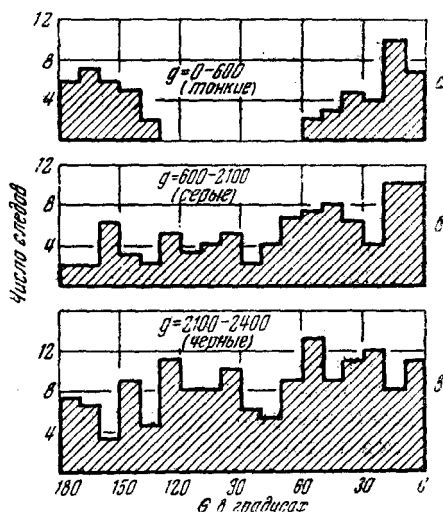


Рис. 3. Распределение величин θ для «тонких», «серых» и «чёрных» следов. В этом случае наблюдения ограничивались следами, длина которых была больше 300 μ , связанными со звёздами с семью или большим числом лучей ($N_h \geq 7$).

она расщепляет). Кривая, проведённая через точки на рис. 2, рассчитана из эмпирического соотношения

$$E \text{ (Мэв)} = 37 N + 4 N^2.$$

Ориентация следов быстрых частиц, связанных со звёздами

Пластины при облучении были установлены так, что эмульсия располагалась в вертикальной плоскости. Это давало возможность определить направление движения частиц относительно вертикали при их прохождении через эмульсию. Для простоты мы обычно предпочитали измерять только угол θ , образованный проекцией следа на плоскость эмульсии, относительно вертикали.

На рис. 3, *а* приведено распределение измеренных величин θ для всех «тонких» следов длиной более чем 300μ и образованных в звёздах, которые сопровождаются по крайней мере семью сильно ионизирующими частицами ($N_h \geq 7$). На рис. 3 и других диаграммах такого типа 0° соответствует направлению в надир от центра расщепления. Из рис. 3, *а* видно, что направления движения быстрых частиц в случаях этого класса наклонены к вертикали меньше чем на 40° . Эти результаты приводят к мысли, что подавляющее большинство следов над звёздами образовано частицами, которые движутся к ядру и вызывают его расщепление. Этот вывод подтверждается также другими наблюдениями, описанными в последующих параграфах.

Рис. 3, *в* показывает соответствующее распределение величин θ для сильно ионизирующих частиц, которые образуют «чёрные» следы ($g > 2100$ зёрен на 1 мм). Из рис. 3, *в* видно, что для этих частиц, в отличие от быстрых, наблюдается примерно изотропное распределение направлений испускания. Результаты подобных наблюдений для следов с промежуточными величинами плотности зёрен даны на рис. 3, *б*. Хорошо заметна тенденция испускания серых следов вниз; однако эти следы не так резко ориентированы, как следы быстрых частиц. На рис. 4 приведено угловое распределение всех тонких следов (независимо от их длины) звёзд, сопровождающихся по крайней мере тремя сильно ионизирующими частицами ($N_h \geq 3$).

Мы провели подобный анализ для всех звёзд, сопровождающихся одной или двумя быстрыми частицами. Найдено, что направления движения быстрых частиц в большинстве случаев ограничены направлениями, образующими только малые углы с вертикалью (рис. 5). Здесь снова результаты приводят к мысли, что след с верхней стороны звезды вызван «первичной» частицей.

В некоторых случаях, когда в состав звезды входят две быстрые частицы, они обе оказываются в верхней полусфере.

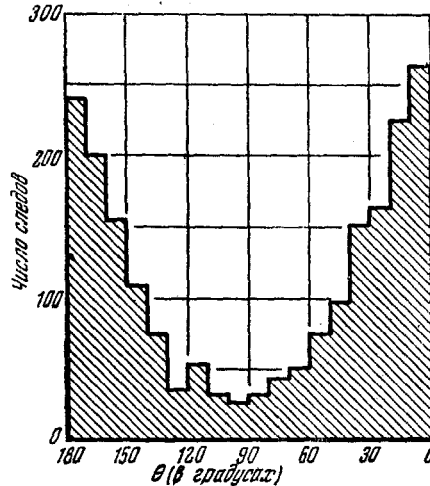


Рис. 4. Распределение величин θ для следов всех быстрых частиц, связанных со «звёздами». θ — угол между вертикалью и проекцией следа на плоскость эмульсии. 0° соответствует направлению вертикали, опущенной вниз из центра звезды.

Если мы предположим, что во всех случаях первичная частица образует след, составляющий наименьший угол с вертикалью, то мы можем определить угловое распределение вторичных быстрых частиц (рис. 5, б, III).

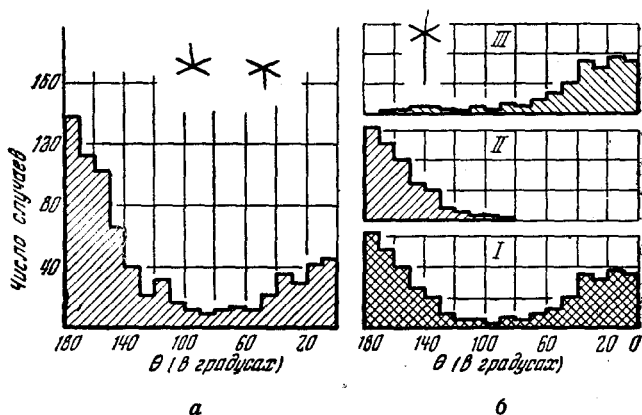


Рис. 5. Распределение величин θ для следов быстрых частиц; а — для звёзд с одной быстрой частицей; б — для звёзд с двумя быстрыми частицами. На рис. 5, б первоначальные наблюдения (I) были проанализированы, чтобы показать распределение величин θ для падающих частиц (II) и для вылетающих частиц (III).

Рис. 5, б, II показывает соответствующее распределение первичных частиц, которые, как это следует из вышеуказанного предположения, отсутствуют при $\theta \leq 90^\circ$. На рис. 6 приведено распределение наблюдавшихся величин разности направлений движения двух быстрых частиц, связанных со случаями этого класса.

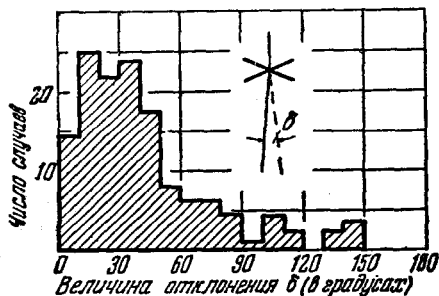


Рис. 6. Диаграмма, показывающая распределение углов между направлениями движения двух быстрых частиц в случаях типа I_p.

различие в направлении следов обычно меньше 50° . Однако в некоторых случаях обнаружены много большие величины отклонений.

Производя эти тщательные наблюдения, мы определяли уже не проекцию следа на плоскость эмульсии, а истинное направление каждого следа δ с учётом угла его наклона в эмульсии. Можно видеть, что

Классификация звёзд

На основе соображений, приведённых в предыдущих параграфах, представляется разумным классифицировать «звёзды», которые сопровождаются быстрыми частицами, следующим образом. Звезду характеризуют числом быстрых частиц n_s , образованных в ядерном взаимодействии, т. е. числом «ливневых» частиц. Если след быстрой частицы, также связанной со звездой, является следом частицы, вызвавшей расщепление, что мы можем предположить, судя по направлению её движения, то мы будем прибавлять индекс « p » к числу n_s . Если таких следов не видно, то мы предполагаем, что звезда образована некоторым нейтральным излучением. В этом случае мы прибавляем индекс « n » к числу n_s . Эта интерпретация будет неправильна, если частица, образующая расщепление, имеет заряд $2e$ или больше или если скорость первичной частицы заряда $|e|$ меньше скорости, соответствующей минимуму ионизации.

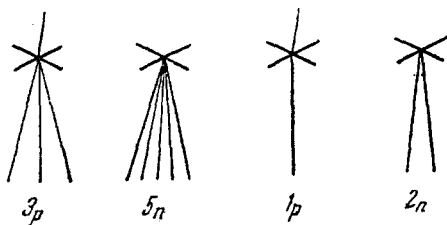


Рис. 7. Схематичное изображение звёзд различных типов.

Примеры этой классификации показаны на рис. 7, на котором схематично изображены различные классы звёзд. Для дальнейшего описания звезды иногда удобно определять число сильно ионизирующих частиц N_h ($z > 1,5 g_{\text{мин}}$), входящих в её состав.

Хотя мы будем иногда допускать ошибку, предполагая, что след является следом частицы, приближающейся к ядру, направленность следов генерирующих частиц на высоте 3300 м достаточно отчётливо выражена, чтобы быть уверенными, что влияние ошибок на результаты ничтожно.

Звёзды типа 1_p и 1_n

Рис. 8, а показывает относительную частоту случаев типа 1_n и 1_p , в которых образование одиночной быстрой частицы сопровождается испусканием различного числа N_h «медленных» заряженных частиц. На рисунке (вверху) приведены также значения средней энергии, освобождаемой нуклонами в звёздах с различным числом медленных частиц (использованы результаты, изображённые на рис. 2).

Примеры расщеплений типа 1_p показаны на микрофотографии I (см. в конце выпуска). Из рис. 8, а можно видеть, что распределения

для случаев типа 1_n и 1_p имеют одинаковую форму и что частота появления звёзд этих типов одинакова с точностью до статистических флуктуаций.

Этот поразительный результат показывает, что нейтральные и заряженные частицы, дающие начало расщеплениям этих типов, имеют одинаковую интенсивность в космическом излучении на высоте 3300 м над уровнем моря.

На рис. 8, б показано распределение величины энергии, освобождаемой в звёздах типа 0_p , аналогичное распределением для звёзд типа 1_n и 1_p , приведённым на рис. 8, а. Сравнение рисунков 8, а и 8, б показывает, что частота появления трёх типов звёзд (1_n , 1_p , 0_p) с большим числом испущенных заряженных частиц одинакова в пределах соответствующих статистических ошибок, но что число звёзд типа 0_p с небольшим числом заряженных частиц почти в два раза больше, чем число таких звёзд типов 1_n или 1_p . Звёзды класса 0_n более часты, чем звёзды любых других классов при любом числе N_h . Примеры звёзд этих классов см. на микрофотографиях II и III.

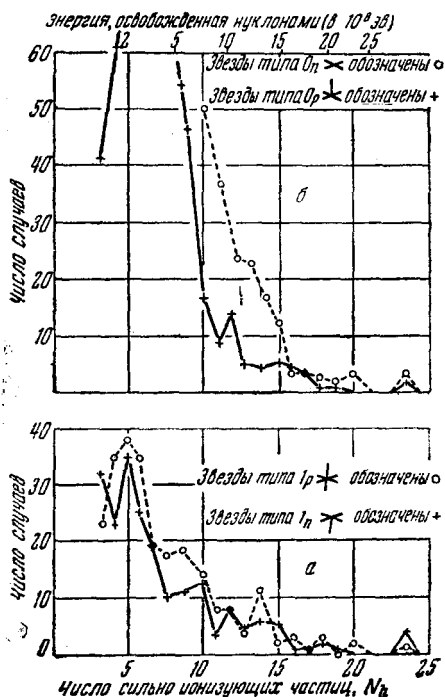


Рис. 8. Распределение звёзд типов 0_p , 1_n и 1_p по числу следов N_h . Звёзды типов 0_p , 1_n , 1_p с $N_h > 10$ встречаются одинаково часто. Типы 1_n и 1_p наблюдаются одинаково часто для всех величин N_h .

Ливни быстрых частиц

Наиболее удивительным явлением, обнаруженным в настоящей работе, являются ядерные расщепления, которые сопровождаются испусканием «ливней» быстрых частиц. На микрофотографиях IV и V изображены мозаики двух ливней. В таблице II показано отношение плотности зёрен в следах быстрых частиц, образованных в этих двух случаях, к величине, характеризующей минимальную ионизацию для частиц с зарядом e . Каждый из ливней быстрых частиц, изображённых на микрофотографиях IV

и V, сопровождается только четырьмя медленными тяжёлыми заряженными частицами, вылетевшими из начального ядра, повидимому, в произвольных направлениях. В других случаях подоб-

Таблица II

Анализ «ливней» быстрых частиц

Номер звезды	Номер следа	Длина проекции	Число зёрен	Косинус угла наклона следа	$g/g_{\text{мин.}}$
KE 25	1	130	58,5	0,836	0,96
	2	631	267,5	0,996	0,95
	3	223	104	0,934	1,09
	4	128	58	0,832	0,99
	5	1757	759,5	0,999	1,07
	6	174	71	0,897	0,92
	P	297	110,5	0,981	0,87
KE 8	1	375	137,5	0,988	0,86
	2	262	89,5	0,976	0,79
	3	545	224	0,996	0,97
	4	98	52	0,886	1,15
	5	252	137	0,974	1,27
	6	560	242,5	0,990	1,02
	7	81	31,5	0,811	0,79
	8	75	33,5	0,788	0,90
	9	74	75,5	0,822	1,16
	10	220	87	0,974	0,92

ного типа ливни сопровождаются испусканием большого количества тяжёлых частиц. Два типичных примера таких случаев представлены на микрофотографиях VI и VII. Микрофотография VIII воспроизводит репродукцию звезды, сделанную с помощью проекционного микроскопа.

На рис. 9. приведено распределение углов θ для быстрых частиц, связанных с ливнями из трёх и большего числа ливневых частиц.

Можно видеть, что форма распределения подобна распределению, приведённому на рис. 5, а. Следовательно, в этом случае наблюдения также подтверждают предположение о том, что по крайней мере большинство следов быстрых частиц «над» звёздами соответствует заряженным генерирующим частицам, вызывающим

расщепления. Чтобы получить ещё один аргумент, мы определили истинное направление следов всех быстрых частиц в случаях этого типа. Наглядные примеры приведены на рис. 10.

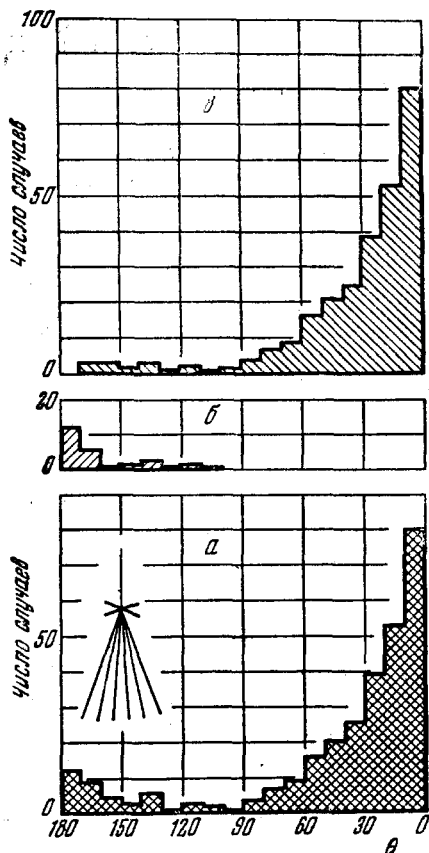


Рис. 9. Величина θ для следов быстрых частиц, связанных с «ливнями» с $n_s \geq 3$; а — показывает распределение для всех следов; б — для следов падающих частиц; в — для «ливневых» частиц.

центрированы в узком пучке. Мы видим в этом решительное доказательство того, что одиночная изолированная частица, по крайней мере в подавляющем большинстве случаев этого типа, действительно является первичной частицей, ответственной за расщепление. Диаграммы, подобные изображённым на рис. 10, дают нам возможность определить распределение направлений движения ливневых частиц относительно направления заряженной

Каждая мишень, показанная на рис. 10, изображает точки падения «ливневых» частиц на нижнюю полусферу. Сплошной кружок показывает направление движения «ливневой» частицы, а крест — направление падающей частицы, в предположении, что она приближается к ядру. В некоторых случаях ливневая частица испускается в направлении верхней полусферы. В этом случае направление её движения изображается светлым кружком. Положение этой точки на диаграмме соответствует положению частицы, движущейся по той же линии движения, по которой движутся все рассматриваемые частицы, но в обратном направлении.

Из рис. 10 видно, что в тех случаях, в которых след падающей частицы можно различить, направление её движения лежит близко к «центру тяжести» ливневых частиц, которые, повидимому, ею и образованы. Эта связь хорошо заметна в случае ливней из 10 — 12 частиц, особенно если ливневые частицы скон-

первичной частицы. Полученные таким образом результаты приведены на рис. 11.

График на рис. 11 даёт число ливневых частиц в единице телесного угла при различных отклонениях этих частиц от направления движения заряженной первичной частицы.

Почти в половине случаев, в которых были образованы ливни из пяти и более заряженных частиц, мы не могли обнаружить следы с величиной плотности зёрен, соответствующей мини-

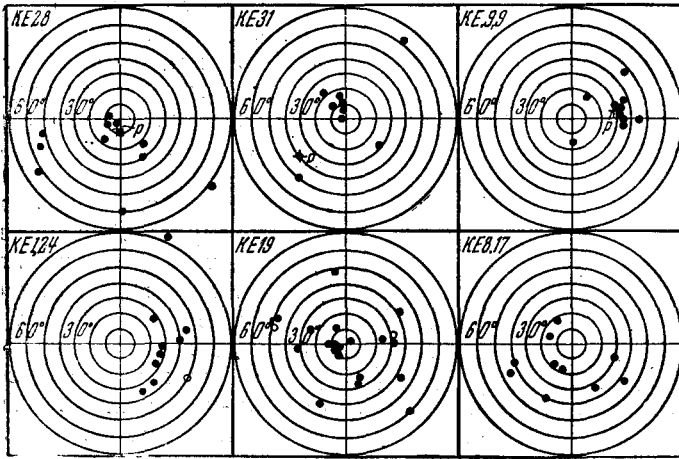


Рис. 10. «Мишени», изображающие характерные случаи ориентации следов «ливневых» частиц по отношению к вертикали. В случаях, представленных на трёх «мишенях» слева, заряженная первичная частица может быть обнаружена, и точка, соответствующая направлению её движения, обозначена так: $+p$.

муму ионизации (такие следы могли бы быть образованы генерирующими частицами). Исходя из этого, мы делаем вывод, что в таких случаях частица, образующая расщепление, электрически нейтральна.

Образование π -мезонов

Среди звёзд всех классов мы нашли примеры расщеплений, которые сопровождаются испусканием медленных мезонов. Типичные примеры таких случаев показаны на микрофотографии VI. В 70% случаев, когда такой мезон останавливается в эмульсии, он образует расщепления с испусканием тяжёлых заряженных частиц. Ни в одном случае мы не обнаружили распада таких мезонов с испусканием электронов. В предыдущих работах нашей лабора-

торни было показано, что по крайней мере 95% медленных

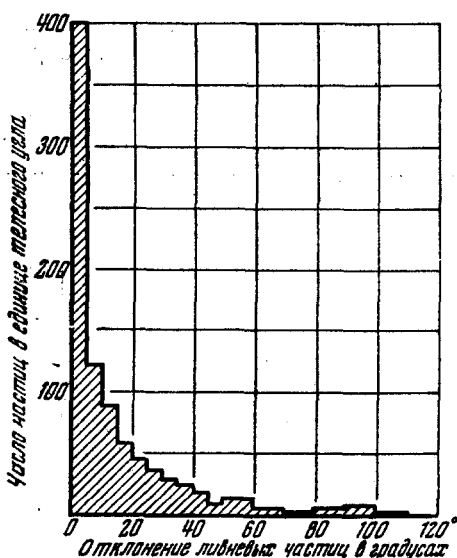


Рис. 11. Распределение направлений движения ливневых частиц относительно направления первичной частицы.

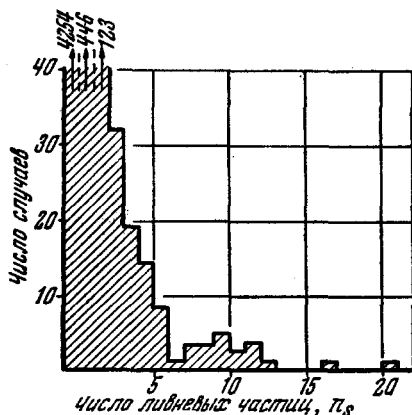


Рис. 12. Наблюдаемая частота ядерных взрывов, сопровождаемых различным числом ливневых частиц n_s .

быстрые ионизирующие первичные частицы, отмечены индексом p , нейтральные частицы — индексом n .

мезонов, образованных в звёздах и останавливающихся в эмульсии, отрицательно заряжены. Этот результат был отнесён к влиянию заряда ядра, под действием которого испускаемые положительные мезоны приобретают большую энергию, чем отрицательные. Таким образом, положительные мезоны останавливаются в эмульсии только в редких случаях.

Излагаемые наблюдения согласуются с предыдущими экспериментами в установлении того факта, что по крайней мере подавляющее большинство медленных мезонов, испущенных во время ядерных взрывов, является π -мезонами. Наблюдения согласуются с предположением, что все медленные мезоны принадлежат к этому типу.

Относительная частота образования ливней с различным числом ливневых частиц n_s

Таблица III даёт относительную частоту образования ядерных взрывов на высоте 3300 м, в которых испускание n_s ливневых частиц сопровождается испусканием N_h более сильно ионизирующих частиц (серые и чёрные следы). Случаи, с которыми связаны

Таблица III

Число звёзд с данными n_s и N_h

(Чтобы получить числа звёзд в 1 см² в день, нужно умножить наблюдавшиеся значения на $\kappa=2,2 \cdot 10^{-3}$. Полученные тогда числа дадут примерную интенсивность звёзд различных типов в отсутствие над пластинками поглотителя)

$n_s \backslash N_h$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	26	27	Всего
0_n	1030	1063	741	357	186	103	65	50	37	24	23	17	12	4	4	3	2	4	4	—	—	3729
0_p	41	61	92	91	71	54	46	16	9	13	6	5	6	5	4	1	1	0	2	—	—	525
1_n	24	33	37	33	19	17	18	14	8	8	4	11	2	3	1	3	—	2	1	—	—	238
1_p	32	24	34	26	19	10	11	13	4	8	5	6	5	1	1	2	1	—	4	2	—	208
2_n	5	8	8	6	5	4	5	5	3	2	—	2	1	—	1	1	—	—	—	—	—	54
2_p	2	7	6	6	7	6	5	3	4	5	5	2	—	1	1	3	1	—	—	—	—	69
3_n	1	2	2	1	1	—	3	2	—	—	—	—	—	1	—	2	1	—	—	—	—	16
3_p	1	2	4	—	4	—	—	—	—	4	1	1	1	1	1	1	—	—	—	—	—	21
4_n	—	—	—	2	1	—	—	1	—	2	—	—	—	1	1	1	1	—	—	—	1	11
4_p	1	—	1	1	1	1	—	1	—	1	1	2	—	—	1	1	2	—	—	—	—	13
5_n	—	—	—	—	1	—	—	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3
5_p	—	—	—	1	2	—	1	—	—	2	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7

$n_s \backslash N_h$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21—26	27	Всего
6_p^n	1	1	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	1	—	1	—	—	1	—	—	1 6
7_p^n	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0 1
8_p^n	—	1	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	2 1
9_p^n	—	—	—	—	—	—	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	2 2
10_p^n	—	—	—	1	—	—	1 2	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1 4
11_p^n	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	0 2
12_p^n	—	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	3 0
13_p^n	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	1 2
																		17_p	21_n		

На рис. 12 показана относительная частота образования звёзд с различным числом ливневых частиц, независимо от числа сопровождающих их сильно ионизирующих частиц, N_h . Кривая на рис. 12 свидетельствует о непрерывном уменьшении частоты появления звёзд с увеличением величины n_s . Тем не менее имеется указание на заметное уменьшение числа звёзд при $n_s = 6$ наряду с почти постоянной частотой образования звёзд с n_s между 7 и 12. Если такой эффект существует, то он, повидимому, должен быть связан с проблемой кратности образования «ливневых» частиц при столкновениях нуклона с нуклоном. Поэтому важно увеличить статистику наблюдений.

ДОПОЛНЕНИЕ

Энергия, освобождаемая в звёздах с различным числом частиц

Чтобы определить среднюю величину энергии, освобождаемой в результате ядерных расщеплений с испусканием различного числа частиц, мы сначала разделили наблюдавшиеся случаи на 4 группы, соответственно величине N_h : $N_h = 4$ или 5, $N_h = 7$ или 8, $N_h = 12-16$ включительно и $N_h = 16-25$ включительно. Для каждого из этих классов мы различали три типа следов:

а) короткие следы длиной $< 70 \mu$, образованные частицами, останавливающимися в эмульсии;

б) «чёрные» следы с $g > 2100$ зёрен на 1 мм, образованные частицами, выходящими из эмульсии или оканчивающимися после пробега в эмульсии, превышающего 70μ , и

в) «серые» следы с $2100 > g > 600$ зёрен на 1 мм.

Для каждого класса звёзд мы можем вычислить среднее число частиц в звезде, которые испущены с пробегом $< 70 \mu$. Многие из этих частиц покидают эмульсию, не останавливаясь в ней; однако мы можем ввести поправку на толщину эмульсии с помощью простого геометрического расчёта, т. е. наблюдаемое число следов, которые достигают конца пробега в эмульсии (следы класса а), позволяют нам рассчитать полное число следов, которое мы должны ожидать в эмульсии бесконечно большой толщины.

Мы предполагаем, что большинство этих следов образовано α -частицами, но некоторые из них могут быть образованы ядерными осколками большой массы и достаточно большой энергии или протонами с коротким пробегом. Мы оценили, что средняя величина энергии, требующейся для образования каждой из этих частиц, составляет 15 Мэв; 10 Мэв — кинетическая энергия частицы и 5 Мэв — энергия связи. При помощи подобных наблюдений следов типа б мы вычислили истинное число «чёрных» следов, образованных частицами с пробегом $> 70 \mu$. Мы предполагаем, что

подавляющее большинство этих следов образовано протонами и дейтонами и что образование каждого следа требует энергии 21 Мэв, независимо от класса звезды, в котором он образуется. Повидимому, это предположение оправдывается тем фактом, что

распределение плотности зёрен в «чёрных» следах не зависит от N_h и что кривые плотности зёрен для звёзд всех классов обнаруживают крутой спад для величин g , меньших, чем 2100 зёрен на 1 мм (рис. 1). Испущенные

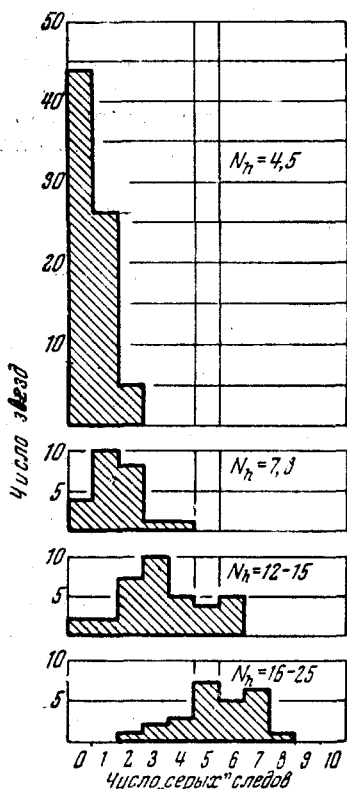


Рис. 13. Диаграмма, показывающая распределение числа «серых» следов в звёздах различных классов.

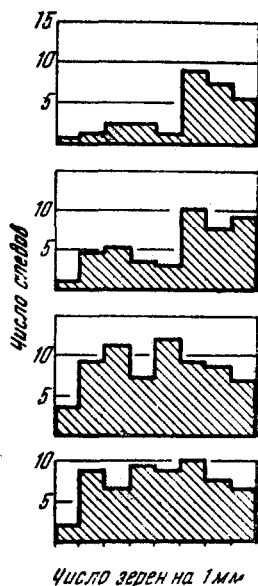


Рис. 14. Диаграмма, показывающая распределение плотности зёрен «серых» следов, связанных со «звёздами» различных классов.

протоны должны сопровождаться нейтронами, и мы предполагаем, что последние освобождают энергию, на 25% большую, чем протоны, соответственно отношению чисел нейтронов и протонов в ядрах брома и серебра.

Большая часть энергии, освобождённой в ядерных взрывах, уносится частицами, образующими «серые» следы. На рис. 13 показана относительная частота появления в звёздах четырёх указанных классов различного числа «серых» следов. Разброс в величинах для любого класса только немного больше разброса,

соответствующего пуассоновскому распределению. Так как большая часть энергии представлена «серыми» следами, этот результат приводит к мысли, что полная энергия, освобождённая в звезде с заданной величиной N_h , никогда сильно не отличается от средней величины энергии для звёзд её класса. Флуктуации зависят от того, являются ли испущенные быстрые нуклоны с энергией между 40 и 400 Мэв нейтронами или протонами.

Распределение плотности зёрен в «серых» следах для четырёх различных классов звёзд, которые мы рассматривали, показаны на рис. 14. Из этих наблюдений мы можем определить для каждого класса среднюю энергию частиц, образующих «серые» следы. Мы можем также определить среднее число «серых» следов в звёздах с различными величинами N_h (рис. 15). Объединяя все эти результаты, можно найти среднюю полную энергию, выделяющуюся в звезде, представленной «серыми» следами, для различных

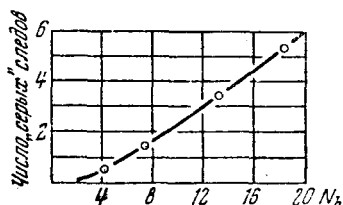


Рис. 15. Среднее число «серых» следов как функция полного числа сильно ионизующих частиц N_h в «звезде».

Таблица IV

Класс звезды	N_h (сред- нее)	Число следов в звезде	Коэффи- циент поправ- ки на ней- троны	Энергия на ча- стицу в Мэв		Полная энергия в Мэв
				кине- тиче- ская	связи	
$N_h=4,5$	4,1	(a) 1,3	1	10	5	20
		(b) 2,3	2,25	10	9	99
		(c) 0,5	2,25	73	9	92
		Полная: 211				
$N_h=7,8$	7,45	(a) 1,4	1	10	5	21
		(b) 4,7	2,25	10	9	201
		(c) 1,35	2,25	85	9	285
		Полная: 507				
$N_h=12-15$	13,1	(a) 2,0	1	10	5	28
		(b) 7,9	2,25	10	9	338
		(c) 3,2	2,25	105	9	817
		Полная: 1183				
$N_h=16-24$	18,3	(a) 2,7	1	10	5	40
		(b) 10,3	2,25	10	9	440
		(c) 5,3	2,25	121	9	1555
		Полная: 2035				

величин N_h . Мы ещё раз предполагаем, что энергия, уносимая нейтронами, в 1,25 раза больше энергии протонов. Результаты представлены в таблице IV и изображены на рис. 2.

II. НАБЛЮДЕНИЯ НА БОЛЬШИХ ВЫСОТАХ С ПОМОЩЬЮ ШАРОВ-ЗОНДОВ

Экспериментальная часть

При экспонировании на больших высотах пластинки были заключены в сосуде Дьюара, как показано на рис. 16, чтобы предохранить их от сильных изменений температуры. В нескольких случаях пластинки были помещены над или под свинцом (см. рисунок), чтобы наблюдать эффекты, связанные с генерацией вторичного излучения в свинце.

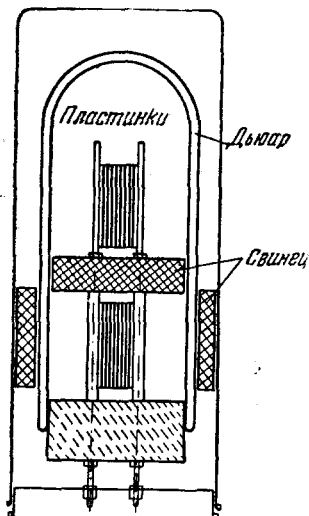


Рис. 16. Набор пластинок со свинцовыми блоками в сосуде Дьюара.

Гондола, прикреплявшаяся к шарам, была снабжена радиозондовым устройством, так что высота установки и её направление от станции могли наблюдаться в течение всего полёта. Три характерные кривые, иллюстрирующие изменение со временем высоты шаров, изображены на рис. 17. Полёт, соответствующий кривой *a* на этом рисунке, был сделан с двумя шарами весом по 4 кг, изготовленными из естественного латекса, каждый из которых после наполнения давал чистую подъёмную силу 5 кг; полная нагрузка составляла 6 кг. Из рисунка можно видеть, что шары поднимались со средней скоростью 270 м в минуту до

разрыва одного из них. Оставшийся шар после этого опускался со скоростью 210 м в минуту.

В полёте, соответствующем кривой *b* на рис. 17, использовались три 4-кг шара, два из которых были наполнены так, что на земле они были как раз в состоянии выдержать вес гондолы. Третий шар наполнялся сильнее, чтобы обеспечить подъёмную силу; было сделано приспособление для освобождения этого шара на высоте около 26 км. Это достигалось с помощью «барометрического выключателя», замыкающего электрическую цепь на этой высоте. Электрический ток протекал через проволочное сопротивление, которое нагревалось и пережигало верёвку, прикрепляющую шар к гондоле. Этот полёт был сделан в условиях хорошей видимости,

так что подъём шаров можно было наблюдать визуально. На высоте 26 100 м третий шар отделился от гондолы. Оставшиеся два шара после этого летели примерно на постоянной высоте, пока 40 минут спустя второй шар не разорвался. После этого началось быстрое падение.

В полёте, представленном кривой δ , использовались три 4-кг шара, которые были так наполнены, что на земле любые два из

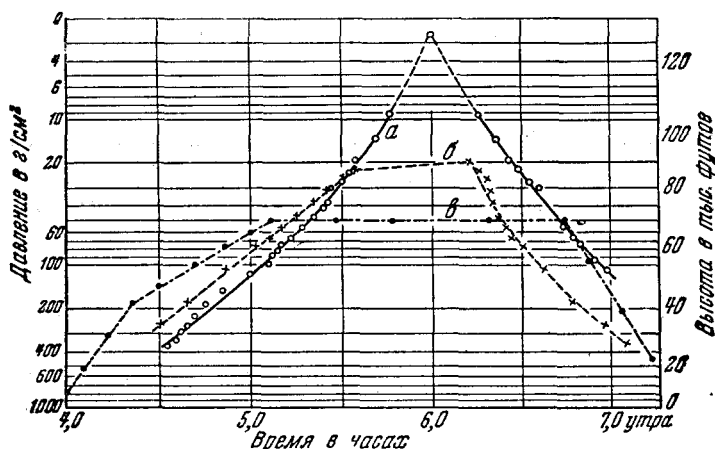


Рис. 17. Изменение высоты со временем в течение трёх характерных полётов. Высота определяется с помощью «барометрического выключателя», градуировка которого до и после каждого подъёма совпадает. Кажущееся увеличение скорости подъёма на больших высотах во время полёта «а», возможно, связано с изменением температуры прибора; однако большое число следов тяжёлых частиц, обнаруженных на пластинках, экспонированных во время этого полёта, делает разумным предположение о том, что пластинки находились на высоте, превышающей 30 км, в течение интервала времени, примерно равного указанному на рисунке.

них были способны как раз выдержать вес гондолы. Каждый из трёх шаров был снабжён устройством для автоматического освобождения, так что, если шар разрывался, его остатки падали вниз. Этот способ имел то преимущество, что горизонтальный полёт происходил на максимальной высоте, достигаемой наименее прочным шаром, и именно лопнувший шар сбрасывался вниз.

Выпуская шары-зонды при слабом ветре благоприятного направления и предусматривая, чтобы по крайней мере один из шаров оставался ещё наполненным, когда гондола достигнет земли, и выполнил роль сигнала для отыскания гондолы, нам удалось разыскать пластинки после 95% подъёмов. Чтобы оценить интенсивность излучения, генерирующего звёзды различных типов на дан-

ной высоте, мы предполагали, что интенсивность излучения, которое образует звёзды с данной величиной n_s , изменяется с глубиной атмосферы в соответствии с соотношением $I = I_0 e^{-\frac{x}{k}}$, где x — масса столба вышележащего воздуха, выраженная в $г/см^2$. С другой стороны, мы использовали формулу Гросса, которая учитывает эффекты, связанные с изотропным распределением направления движения падающих частиц на границе атмосферы:

$$I = I_0 \left\{ e^{-\frac{x}{k}} - \frac{x}{k} \int_{\frac{x}{k}}^{\infty} \frac{e^{-z}}{z} dz \right\}.$$

Далее мы можем вычислить число дней экспозиции на Юнгфрау, которому эквивалентен каждый полёт для любого предполагаемого значения k . Сравнивая число звёзд, образованных в $1 см^3$ пластинок, экспонированных на больших высотах, с числом звёзд, образованных при эквивалентной экспозиции на высоте 3300 м, мы можем определить k . При горизонтальных полётах (типа рис. 17, в) вклад в экспозицию за время подъёма и спуска составляет 20—30%.

Хорошо известно, что предположение об экспоненциальном законе поглощения «звёздообразующего» излучения, встречает серьёзные

Таблица V

Тип звезды	Величина k в $\frac{г}{см^2}$	
	Гросс	Экспоненциальный закон
$n_s \geq 0$	~ 170	~ 130
$n_s \geq 3$	~ 135	~ 105
$n_s \geq 6$	~ 120	~ 95

возражения, так как процесс поглощения обычно не одноактный *). Однако этот закон, повидимому, даёт достаточно близкое приближение, и поэтому его можно использовать для определения эквивалентного увеличения длительности горизонтального полёта на максимальной высоте за счёт времени подъёма и спуска. Далее, применение этого закона позволяет нам сравнить наши

результаты с результатами других исследователей, которые анализировали свои наблюдения в терминах экспоненциального закона поглощения.

В таблице V приведены коэффициенты поглощения частиц, генерирующих звёзды различных типов, полученные вышеуказанным методом в результате ряда полётов шаров.

*) Экспоненциальный закон, как известно, описывает одноактный процесс поглощения. (Прим. переводчика.)

Ориентация следов быстрых заряженных частиц, связанных со «звёздами»

В пластинках, экспонированных на больших высотах, мы определили угловое распределение направлений следов с минимальной плотностью зёрен $g_{\min}$, связанных со звёздами. Результаты приведены на рис. 18. Это распределение можно сравнить с соответствующим распределением, полученным из наблюдения на высоте 3300 м (см. рис. 4). Из сравнения видно, что на больших высотах вертикальная направленность следов менее резко выражена.

На больших высотах были обнаружены те же типы звёзд с «ливневыми» частицами и без них, что и на высоте 3300 м. Однако отношение числа «ливней» к числу звёзд с большим числом

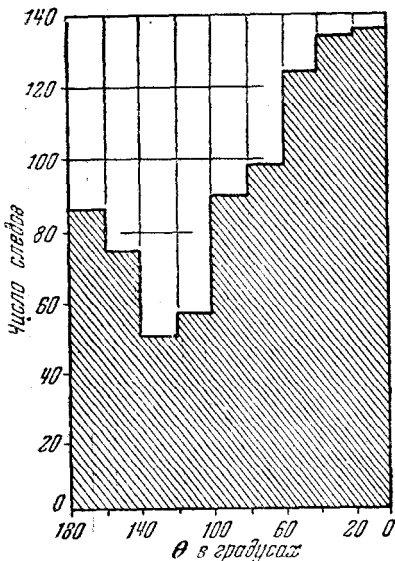


Рис. 18. Распределение величин θ для всех тонких следов, связанных со звёздами, наблюдавшихся на серии пластинок, экспонированных на большой высоте. θ — угол между вертикалью и проекцией следа на плоскость эмульсии.

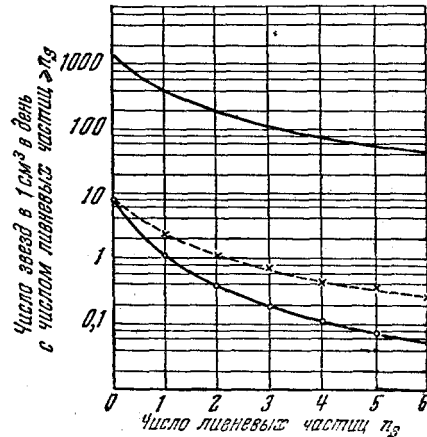


Рис. 19. Частота образования звёзд с различным числом n_s на высотах 21 200 м и 3300 м. Для сравнения приведена пунктирная кривая, иллюстрирующая результаты, относящиеся к высоте 21 200 м и нормированные так, чтобы полные частоты образования звёзд на высоте 21 200 м и 3300 м были равны.

лучей значительно больше на больших высотах. В таблице VI приведены числа звёзд различных классов, обнаруженных в настоящей работе.

На рис. 19 изображена частота образования звёзд с различным числом ливневых частиц, n_s , наблюдавшаяся на двух высотах: 3300

Число звезд с данными n_s и N_h ($\chi = 1,5$, см табл. III)

$n_s \backslash N_h$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	Всего
0_p^n	—	135	91	75	47	26	1	16	9	5	9	2	0	1	5	2	1	0	1	0	—	—	—	—	1	447
1_p^n	—	5	7	14	13	8	11	9	3	2	2	0	3	0	0	2	0	1	1	1	—	—	1	—	—	82
2_p^n	—	5	6	9	6	6	5	8	4	2	6	0	1	1	1	0	3	0	1	1	—	—	—	—	—	59
3_p^n	—	1	2	0	1	0	1	4	0	0	2	1	5	—	—	3	1	0	—	—	1	—	—	—	—	65
4_p^n	—	—	2	1	1	1	2	0	2	0	4	—	—	2	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9
5_p^n	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	22
6_p^n	—	—	1	1	1	1	—	—	2	1	1	2	1	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	3
7_p^n	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13
8_p^n	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
9_p^n	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4
10_p^n	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3
11_p^n	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6
12_p^n	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
13_p^n	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2

К. Ф. ПОУЭЛЛ, У. КАМЕРНИН И ДР.

и 21 200 м. Результаты ясно показывают, что на большей высоте большая часть звёзд образована частицами высокой энергии.

Вторая важная особенность результатов, полученных на больших высотах, связана с генерирующими частицами тех звёзд, в которых образуются ливни быстрых частиц. На высоте 3300 м заряженными и нейтральными первичными частицами образуются приблизительно равные числа «ливней», тогда как на больших высотах процент случаев образования «ливней» заряженными частицами заметно выше.

На рис. 20, а приведена для пластинок, экспонированных на больших высотах, относительная частота, с которой ядерные

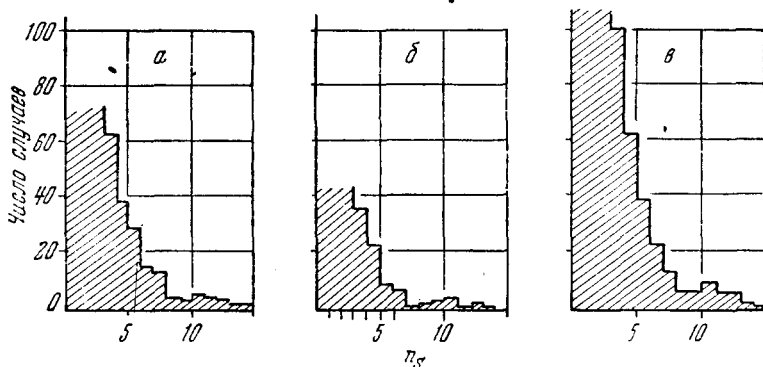


Рис. 20. Число наблюдавшихся звёзд с различной величиной n_s . а — на больших высотах; б — на высоте 3300 м; в — сумма а и б.

взрывы сопровождаются различным числом ливневых частиц, n_s , имеющих плотность зёрен $g < 1,5 g_{\text{мин}}$.

Форма распределения подобна соответствующей кривой, приведённой на рис. 12; для сравнения она воспроизведена на рис 20, б. Результаты этих двух групп наблюдений, объединённые вместе, показаны на рис. 20, в.

Энергия ливневых частиц

В некоторых случаях «ливневая» частица испускается в направлении, почти параллельном плоскости эмульсии, так что её след имеет наибольшую длину, в некоторых случаях превышающую 10 000 μ .

Оценка энергии такой частицы иногда может быть сделана с помощью наблюдений отклонений в её следе из-за кулоновского рассеяния. Мы исследовали десять таких длинных следов. Из них семь следов было образовано «ливневыми» частицами и три — первичными частицами, генерирующими «ливень». Нужно ожидать, что последние должны обладать столь большой энергией, что кулоновское рассеяние в их следах будет незаметным в условиях

наших опытов, а все заметные отклонения их следов будут обязаны искажениям эмульсии и ошибкам показаний приборов.

В таких случаях мы можем вычислить нижний предел энергии соответствующих частиц и оценить величину ошибок, которые можно допустить при наблюдении следов, образованных частицами с энергиями, меньшими энергии ливня.

На рис. 21 приведено характерное изображение элементов (по 200 μ) следа быстрой первичной частицы, полученное с помощью проекционного микроскопа. Мы определяли среднее направление

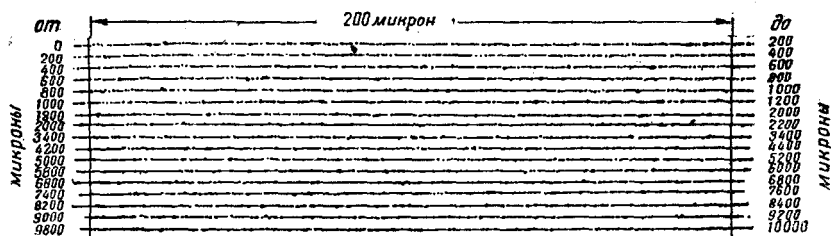


Рис. 21. Изображение последовательных элементов (каждый из которых длиной 200 μ) следа ливневой частицы с полной длиной 10 000 μ . След прямолинеен с точностью 0,03°, а энергия частицы, которая его образует, должна быть больше чем $1,5 \cdot 10^9$ эв.

следа в последовательных элементах длиной по 200 μ и среднюю величину различия в направлении элементов через промежутки 800 μ . Такие измерения дают нам возможность определить величину $\frac{m_0 \beta^2 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$, которая равна pv , где p — импульс частицы, а v — её скорость.

Таблица VII даёт средние величины отклонений, определённые этим методом и соответствующие значения энергии частиц, вычисленные в различных предположениях относительно их масс покоя. Очень малые отклонения, наблюдавшиеся в случае «первичных» частиц, убеждают нас в том, что большие величины отклонений, обнаруженные в следах ливневых частиц, реальны и что соответствующие значения энергии этих частиц не очень ошибочны. Следы, подробно описанные в таблице VII, выделены из общего числа только благодаря их очень большой длине, которая является следствием их благоприятного направления. Но можно возразить на это, что для следов с меньшей энергией рассеяние должно быть больше и, следовательно, вероятность остаться в эмульсии меньше, поэтому должна существовать тенденция выделять для измерений только следы частиц с наибольшей энергией. Однако, если ливневые частицы являются мезонами или более тяжёлыми частицами, они неизбежно должны иметь энергию по крайней мере $5 \cdot 10^7$ эв, если они образуют следы с плотностью зёрен,

Таблица VII

Сравнение наблюдавшейся величины плотности зёрен в следах «релятивистских» частиц, связанных со звездами, с теоретически вычисленными величинами при различных предположениях о величине массы покоя частиц

Номер пластинки	Тип звезды	Номер следа	Длина следа (в микронах)	Среднее отклонение в градусах ($t = 800 \mu$)	Наблюдавшаяся плот- ность зёрен $g/g_{\text{мин}}$	Вычисленные значения энергии и плотности зёрен при различных предположениях о величине массы покоя						Отклонение от направ- ления первичной ча- стицы в градусах	Природа частицы
						$m = m_e$		$m = 300 m_e$		$m = m_p$			
						энергия (Мэв)	$g/g_{\text{мин}}$	энергия (Мэв)	$g/g_{\text{мин}}$	энергия (Мэв)	$g/g_{\text{мин}}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
KE 28	$8_p (N_h = 15)$	P	5 400	0,005	0,98	2000	1 0	1850	1 0	1500	1,0	—	не известна
		S	10,000	0,006	0,98	1500	1,0	1350	1,0	1100	1,0	4°	не известна
		S	9 000	0 30	1,09	310	1,0	220	1,0	180	2,0	52°	$m < m_p$
KF 2	$5_p (N_h = 13)$	P	2,200	0,066	1,06	1400	1,0	1250	1 0	900	1,0	—	не известна
		S	5,000	0,15	1,06	600	1 0	500	1,0	360	1,4	26°	$m < m_p$
KF 19	$6_p (N_h = 8)$	P	5,400	0,032	0 98	2900	1,0	2750	1 0	2300	1 0	—	не известна
		S	7,600	0,11	0,86	850	1 0	740	1,0	550	1,1	1°	не известна

Номер пластины	Тип звезды	Номер следа	Длина следа (в микронах)	Среднее отклонение в градусах ($t = 800 \mu$)	Наблюдавшаяся плот- ность зёрен $g/g_{\text{мин.}}$	Вычисленные значения энергии и плотности зёрен при различных предположениях о величине массы покоя						Отклонение от направ- ления первичной ча- стицы в градусах	Природа частицы
						$m = m_e$		$m = 300 m_e$		$m = m_p$			
						энергия (Мэв)	$g/g_{\text{мин.}}$	энергия (Мэв)	$g/g_{\text{мин.}}$	энергия (Мэв)	$g/g_{\text{мин.}}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
KE 9	$10_p (N_h = 9)$	S	5,400	0,22	1,0	420	1,0	280	1,0	240	1,7	36°	$m < m_p$
KE 18	$3_h (N_h = 6)$	S	3,600	0,22	1,12	420	1,0	280	1,0	240	1,7	?	$m < m_p$
KF 15	$5_p (N_h = 9)$	S	13,000	0,12	1,0	760	1,0	610	1,0	450	1,2	28°	не известна
«Серые следы»													
KE 27	$2_h (N_h = 8)$	S	4000	0,36	1,7	260	1,0	180	1,0	150	2,1		вероятно, протон
KF 4	$6_p (N_h = 20)$	S	1000	0,13	1,6	230	1,0	160	1,06	130	2,1		вероятно, протон
KF 24	$5_p (N_h = 7)$	S	2350	0,126	1,7	240	1,0	170	1,13	130	2,1		вероятно, протон
KE 10	$4_h (N_h = 7)$	S	1200	0,6	1,75	50	1,0	30	2,0	20	5		$m < m_p$

близкой к минимальной величине. Углы рассеяния, которые можно ожидать для таких частиц, так малы, что отклонения следов из-за рассеяния не будут заметно влиять на число частиц, выходящих из эмульсии. Этот вывод неприменим к следам электронов с энергией, меньшей чем 40 Мэв; но есть основания думать, что электроны такой низкой энергии составляют только небольшую часть ливневых частиц.

Вышеизложенные соображения показывают, что следы, выбранные для измерения, представляют собой взятые наугад примеры ливневых частиц, которые испущены в направлениях, образующих малые углы с вертикалью. Это последнее ограничение следует из факта, что менее отвесно направленные частицы по чисто геометрическим причинам будут иметь малую вероятность образования следа очень большой длины.

Далее, на высоте 3300 м следы заряженных первичных частиц обычно образуют только малые углы с вертикалью. Отсюда следует, что длинные следы ливневых частиц обычно будут наклонены под малым углом к следу первичной образовавшей их частицы. Кроме того, разумно предположить, что средняя энергия таких ливневых частиц значительно превышает среднюю энергию ливневых частиц, направления движения которых распределены более широко.

Метод определения массы покоя ливневых частиц

Результаты, приведённые в таблице VII, показывают, что некоторые ливневые частицы имеют энергию порядка $\sim 3 \cdot 10^8$ эв. Эта величина ещё достаточно мала, поэтому мы можем решить, является ли такая частица мезоном или протоном. След протона только в том случае имеет плотность зёрен g , значительно превышающую $g_{\text{мин}}$, если его энергия меньше $5 \cdot 10^8$ эв, тогда как, например, π -мезон с энергией, превышающей 10^8 эв, будет уже образовывать след с плотностью зёрен $g = g_{\text{мин}}$. Отсюда следует, что если энергия частицы меньше $5 \cdot 10^8$ эв, наблюдение её рассеяния и плотности зёрен в её следе в благоприятных случаях позволит нам определить её массу покоя или оценить порядок этой массы.

Вышеуказанный метод аналогичен методу, обычно применяемому в опытах с камерами Вильсона, действующими в магнитном поле. В таких опытах скорость частицы вычисляется по её удельной ионизации, определённой с помощью счёта капель, а её импульс — по кривизне следа.

В фотографическом же методе измерение плотности зёрен позволяет определить скорость частицы, а исследование рассеяния — величину pv . Для четырёх ливневых частиц, которые подробно описаны в таблице VII, мы можем заключить, что их масса меньше

массы протона. В трёх других случаях какие-либо заключения сделать невозможно.

Этот метод особенно хорошо применим для изучения природы частиц, образующих «серые» следы, и мы использовали его в трёх случаях звёзд, пригодных для измерений. Было обнаружено, что соответствующие частицы являются протонами.

Образование π -мезонов на больших высотах

Хорошо известно, что медленные π -мезоны, наблюдающиеся на высотах гор, во многих случаях образуются локально (или в самом материале фотографических пластинок, или в другом веществе в непосредственной близости от пластинок). В случае высотных полётов шаров плотность вещества вокруг пластинок сильно уменьшена, и мы должны, следовательно, ожидать уменьшения числа π -мезонов относительно числа звёзд. Мы исследовали пластинки, экспонированные на двух высотах, чтобы проверить правильность этого мнения. Результаты исследования, приведённые в таблице VIII, дают число действительно зарегистрированных

Таблица VIII
Относительное количество мезонов и звёзд, наблюдаемых на различных высотах

	3300 м	~ 24 500 м	
		с Pb	без Pb
Наблюдаемое число π - (и σ -) мезонов	566	48	72
Наблюдаемое число звёзд ($N_h \geq 3$)	5904	892	2029
$\frac{N_\pi}{N_{зв.}}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{наблюдаемое} \\ \text{оценка истинного значения} \end{array} \right.$	0,096	0,054	0,035
	0,11	0,062	0,040

случаев, без введения поправок, связанных с учётом геометрического и других эффектов. Число мезонов, действительно останавливающихся в эмульсии, должно быть больше наблюдаемого числа. В последней строке таблицы дана оценка истинного значения этой величины.

Результаты, полученные на больших высотах, разделены на две группы в соответствии с тем, помещался ли вокруг пластинок свинцовый блок или нет (см. рис. 16).

Результаты, сведённые в таблицу VIII, показывают, что отношение числа $\pi^\pm$ -мезонов к числу звёзд почти в три раза меньше

для пластинок, экспонированных без свинца во время полётов шаров по сравнению с пластинками, экспонированными на высоте 3300 м. Результаты свидетельствуют также о быстром возрастании числа мезонов, образованных даже при небольших толщинах свинца.

Используя численные данные таблицы VIII, мы сделали оценку частоты образования мезонов с энергией, меньшей примерно 60 Мэв, в свинце на высоте $\sim 24\,500$ м. Мы предположили, что различие между числами наблюдавшихся π -мезонов в опытах со свинцом и без свинца обусловлено генерацией мезонов в свинце. Эти мезоны останутся в пластинках, если они испущены в подходящих направлениях и если их энергия меньше чем примерно 60 Мэв.

Расчёты приводят к выводу, что в определённом интервале энергий число мезонов, образованных в звезде в Pb, равно 0,06. Эта величина может быть сравнена с частотой образования ливневых частиц в эмульсии, а именно 0,05 частиц на звезду.

Наши результаты, следовательно, показывают, что большая часть мезонов, возникших при взаимодействии космического излучения с плотными материалами, испускается с энергией, меньшей 60 Мэв. Следует подчеркнуть, что точная величина максимальной энергии мезонов, регистрируемых в этих опытах, является несколько неопределённой. Дальнейшие опыты продолжаются, и более детальный анализ будет дан в последующих сообщениях.

Вторичные ядерные взаимодействия ливневых частиц

В настоящих опытах иногда наблюдалось, что заряженная частица, испускаемая в ядерном взрыве со скоростью, близкой к релятивистской, может взаимодействовать с ядрами и вызывать вторичные расщепления. На микрофотографиях IX и X показаны два случая этого типа. На микрофотографии IX первая звезда типа 2_n , а на микрофотографии X — типа 1_n . Подобный случай был описан Герцем, у которого первая «звезда» принадлежала к типу 1_n .

Такие наблюдения существенны для проблемы идентификации ливневых частиц. Действительно, измеряя среднюю длину пробега ливневых частиц в эмульсии до образования ими ядерного столкновения, мы можем получить некоторое представление о силах взаимодействия этих частиц с нуклонами. Эта оценка аналогична опытам с камерой Вильсона, в которых изучается проникающая способность ливневых частиц в свинцовых пластинках, помещённых внутри камеры.

Наши наблюдения пока недостаточно обширны, чтобы позволить нам сделать какие-либо выводы, но, может быть, интересно отметить, что полная наблюдавшаяся длина «тонких» следов, образованных в звёздах типа 1_n , 2_n , 1_p и 2_p в эмульсии, равна 60 см, что соответствует прохождению частиц через поглотитель

с массой 240 г/см^2 . Частицы, образующие эти следы, произвели три ядерных столкновения. С другой стороны, полная длина следов быстрых частиц, образованных в звёздах с большим значением n_s , равна 65 см , однако ни одна из них не произвела ядерного расщепления. Это обстоятельство будет более подробно обсуждено в части III.

Ливни быстрых протонов, образованные тяжёлыми первичными частицами космических лучей большой энергии

На пластинках, экспонированных на больших высотах, имеется много примеров следов тяжёлых ядер космического излучения. На микрофотографии XI изображён пример взаимодействия одной такой частицы с ядром серебра или брома. Этот случай, повидимому, является поразительным примером ядерного соударения типа, описанного Брэдом и Петерсом. Ясно видно, что след частицы 1 сопровождается большим количеством следов δ -электронов, характерных для тяжёлых ядерных осколков, движущихся с большой скоростью. След не обнаруживает отклонений в направлении, превышающих 1° , на протяжении эмульсии четырёх последовательных пластинок, соответствующих массе около 8 г/см^2 . Число δ -электронов на единицу длины следа примерно постоянно на всём наблюдавшемся пробеге частицы. Это означает, что частица двигалась со скоростью, близкой к скорости света. Определяя число

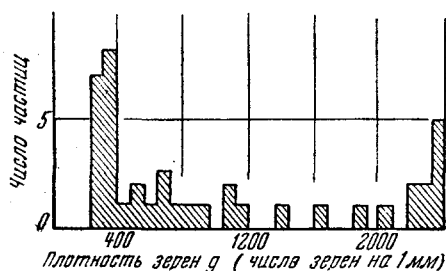


Рис. 22. Диаграмма, показывающая величину плотности зёрен в следах всех частиц, связанных со звездой, изображённой на микрофотографии XI.

расщеплений ядер серебра и брома. Однако в настоящем примере энергия тяжёлой частицы была больше 10^4 Мэв . Далее, так как эта частица приближалась к «звезде», то она двигалась вниз под углом $\sim 60^\circ$ к вертикали, и линия её движения была очень близка к «оси» конуса быстрых частиц, образовавшихся при расщеплении. Таким образом, установлено, что эта частица является одним из тяжёлых ядер «первичного» космического излучения и что она,

δ -электронов на единицу длины следа, можно вычислить заряд частицы. Для вышеупомянутой частицы полученная таким образом величина заряда равна $(17 \pm 2)e$, где e — заряд электрона. В настоящее время в нашей и других лабораториях найдено несколько примеров тяжёлых ядерных осколков с энергией порядка 200 Мэв , испущенных во время взрывных

сталкиваясь с ядром, образует ядерное расщепление, а не является одним из его продуктов.

На рис. 22 изображена диаграмма, показывающая распределение плотности зёрен g , для всех следов, связанных с этим случаем. Можно видеть, что четырнадцать вторичных частиц имеют удельную ионизацию меньше чем $1,3 g_{\text{мин}}$, где $g_{\text{мин}}$ — минимальная ионизация частиц с зарядом $|e|$. На рис. 23 мы показали распределение направлений движения вторичных частиц относительно на-

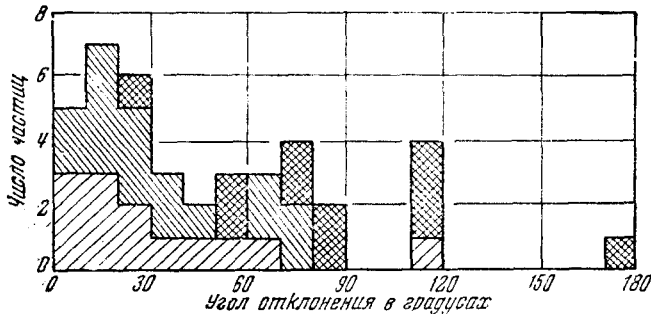


Рис. 23. Распределение отклонений направлений движения всех частиц, связанных со звездой, показанной на микрофотографии XI, от направления первичной частицы.

-  — величины отклонений для следов с минимальной ионизацией,
-  — для «серых» следов,
-  — для «чёрных» следов.

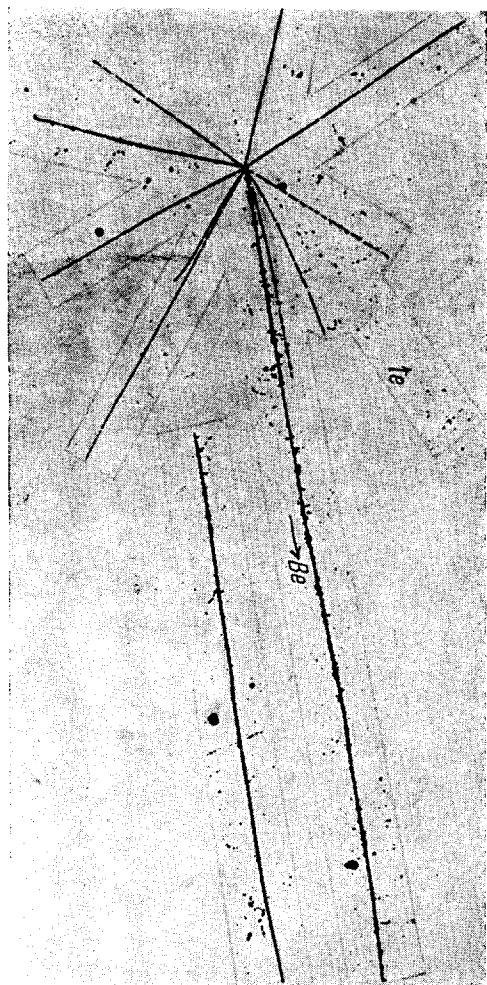
правления движения тяжёлого осколка, предполагая, что последний приближается к расщепляемому ядру. Большинство следов быстрых частиц испущено в направлениях, образующих углы меньше 30° с направлением предполагаемой «первичной» частицы. Арифметическая сумма зарядов, несомых этими частицами, равна $12e$.

Описанные наблюдения приводят к мысли, что этот случай соответствует взаимодействию быстрого ядра хлора с ядром брома или серебра и что в результате столкновения падающая частица почти полностью разрушается и её нуклоны испускаются в виде узкого пучка. Дальнейшее доказательство, подтверждающее этот вывод, будет дано в части III.

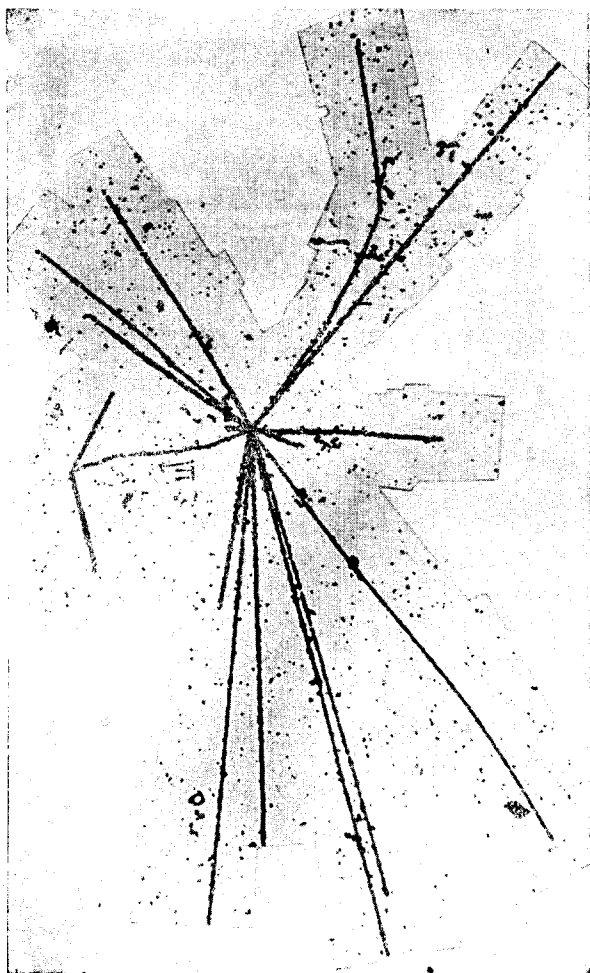


Микрофотография 1. Два примера расщеплений типа 1_p , в которых столкновение релятивистской частицы с ядром сопровождается эмиссией одиночной «быстрой» частицы.

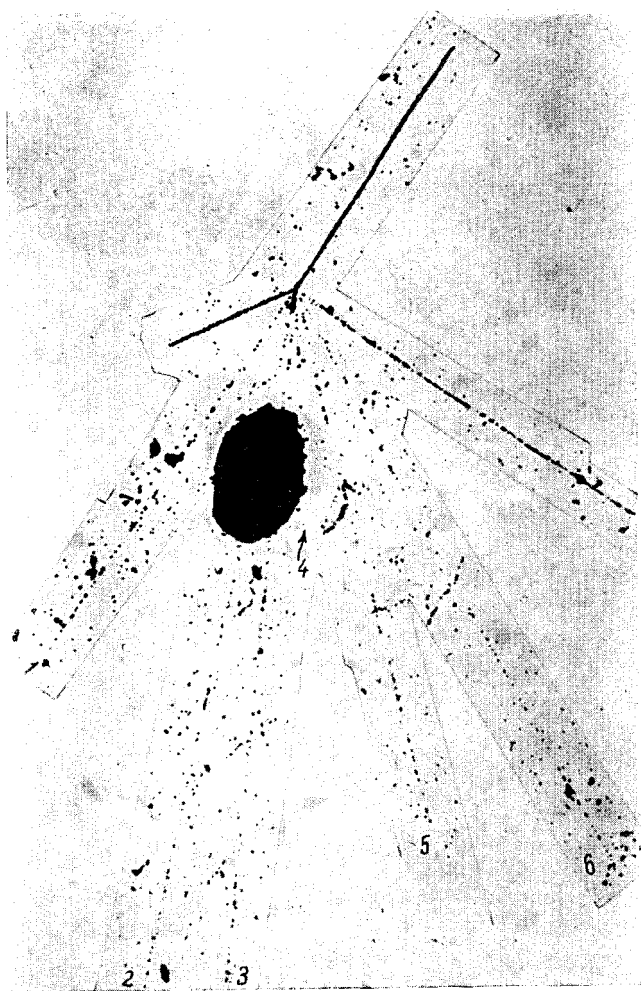
Небольшая разница в направлениях движения быстрых частиц в каждом из этих случаев характерна для большинства расщеплений этого класса. Оба случая исключительны в смысле демонстрации электронов с энергией в несколько $Mэв$ (следы « e »), которые расходятся из точек вблизи центров расщеплений. Изменения в направлении движения электронов благодаря рассеянию могут быть ясно различены. По крайней мере в некоторых случаях эти электроны образованы при β -распаде нестабильных ядерных осколков с коротким пробегом.



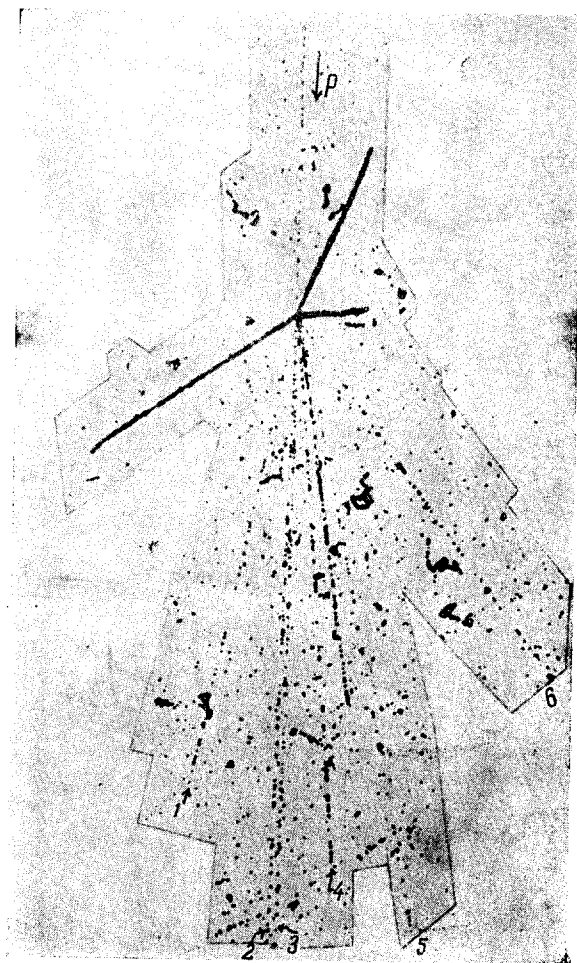
Микрофотография II. Звезда типа O_n , которая сопровождается испусканием ядра бериллия с энергией 150 Mev и электрона. Ядро бериллия, которое идентифицировано по наблюдению δ -электронов, не испускает электрола в конце своего пробега. Следовательно, оно имело массу, вероятно, 10, 11 или 12 массовых единиц. Можно ясно видеть рассеяние следа электрона.



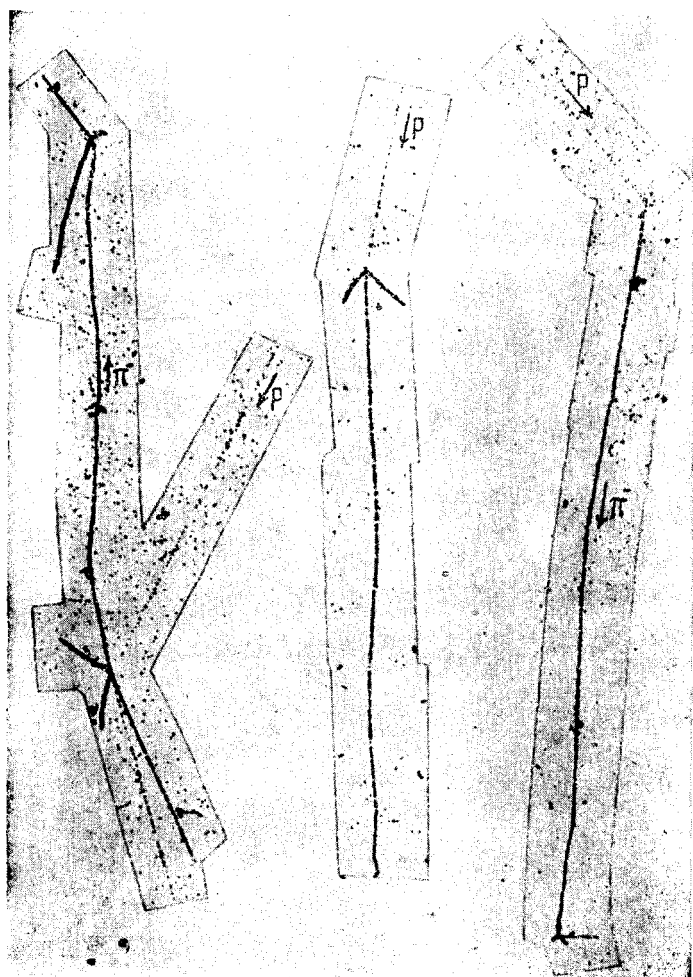
Микрофотография III. Звезда типа O_n сопровождается эмиссией отрицательного мезона короткого пробега, который образует вторичное расщепление. Несколько следов тяжёлых ядерных осколков имеют многочисленные δ -электроны и, позидимому, принадлежат частицам с зарядом 3 или больше.



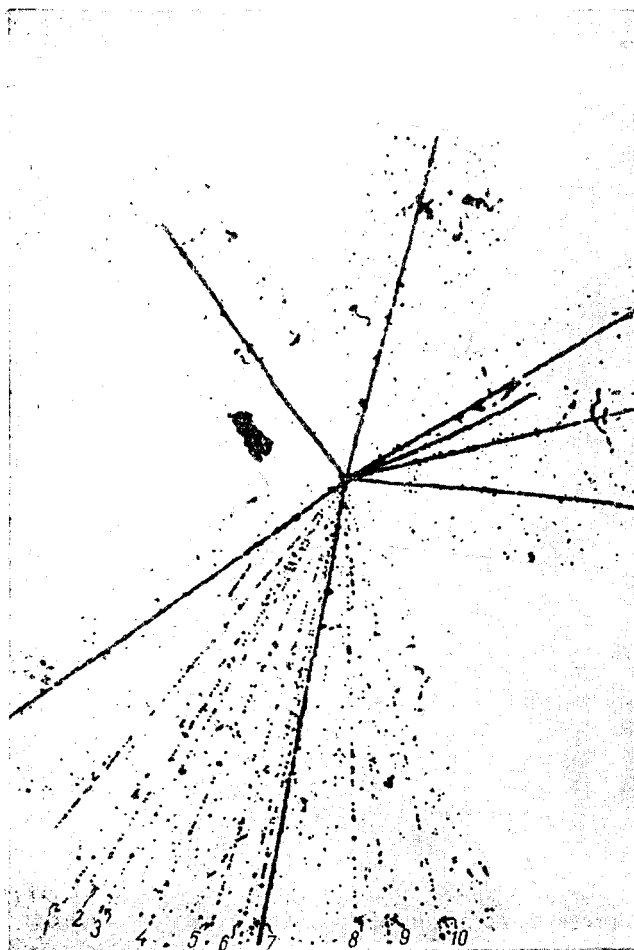
Микрофотография IV. Звезда типа 6_n ($N_h = 4$).



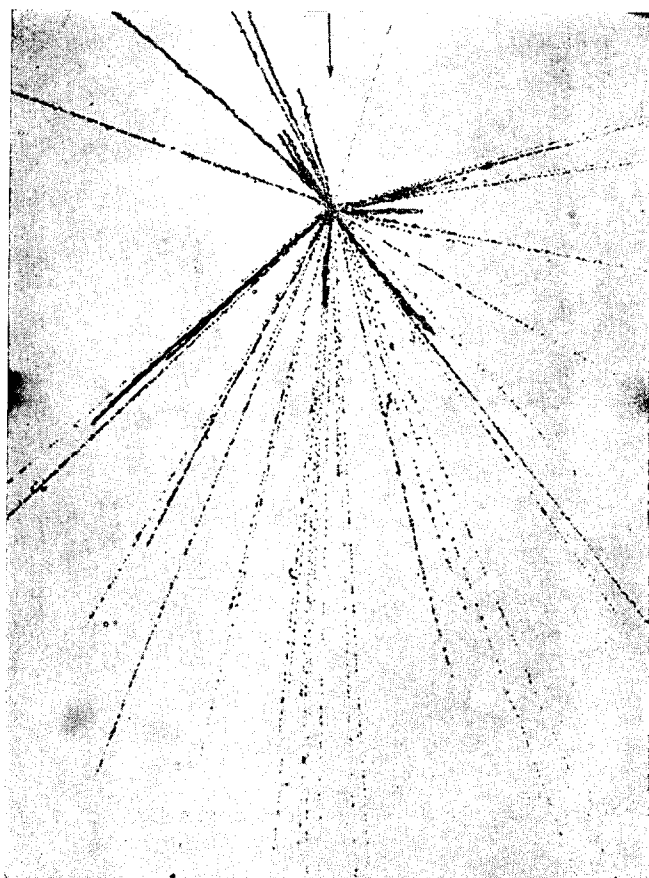
Микрофотография V. Звезда типа 6_p ($N_h = 4$).



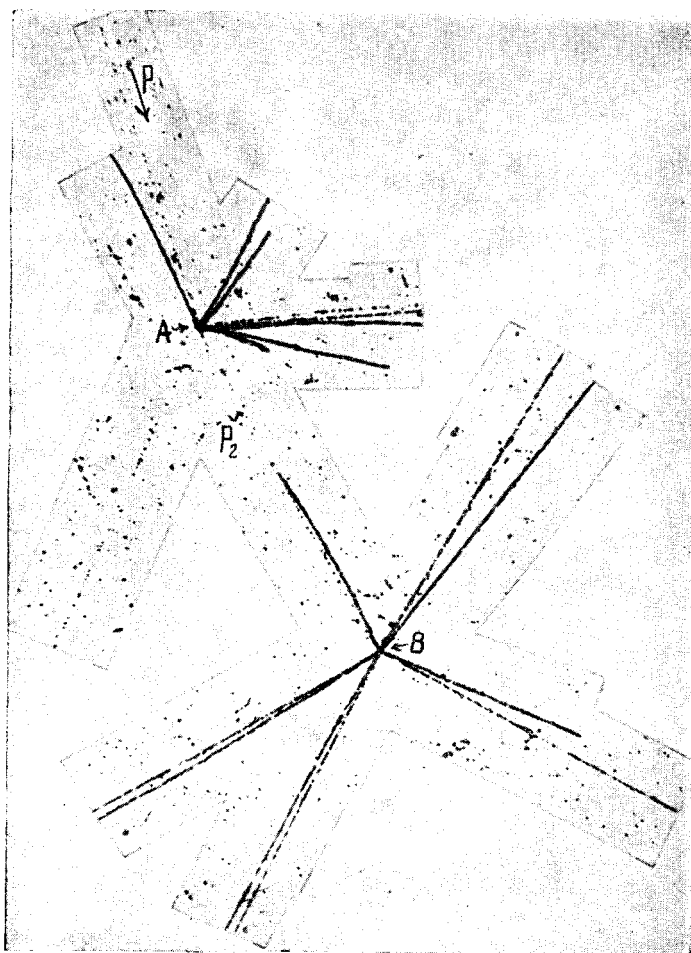
Микрофотография VI. Три примера звёзд типа O_p , которые сопровождаются эмиссией мезонов. В двух случаях мезоны образуют вторичные расщепления. Это согласуется с предположением, что медленные мезоны, образованные в звёздах этого типа, неизменно являются отрицательными π -мезонами.



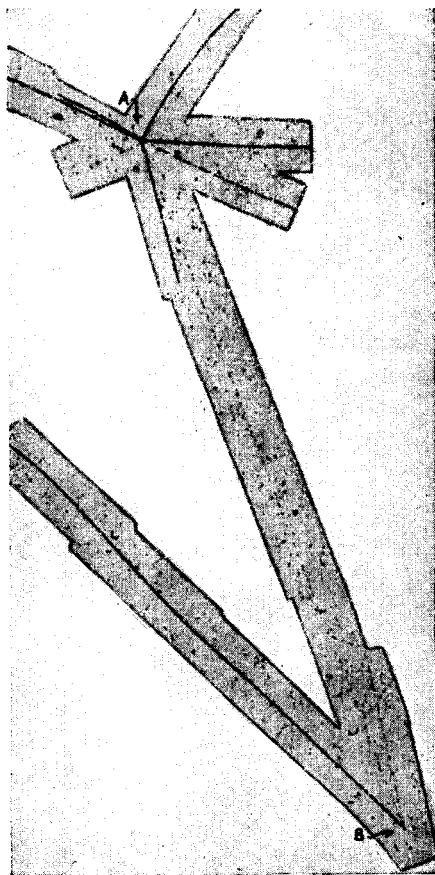
Микрофотография VII. Мозаика «ливня» типа 10_n ($N_h=9$).



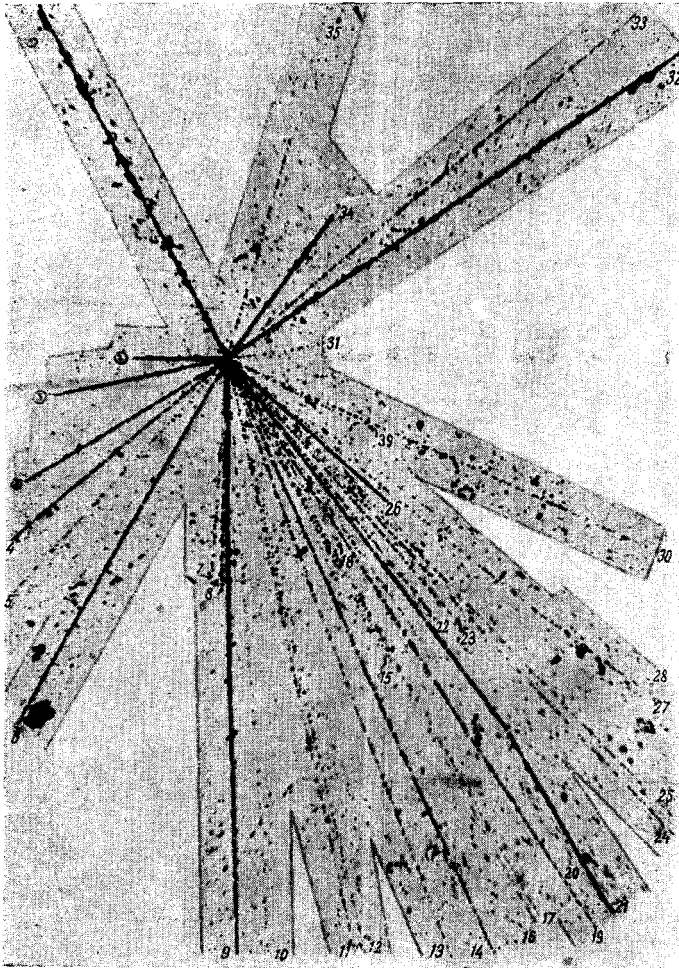
Микрофотография VIII. Репродукция *ливня типа $20_n(N_h = 23)$, сделанная с помощью проекционного микроскопа.



Микрофотография IX. Частица, образующая след P_1 , взаимодействует с ядром в точке A и производит ядерный взрыв типа 2_p ($N_h=8$), при котором возникают две «релятивистских» частицы с зарядом e . Одна из быстрых вторичных частиц, P_2 , появившихся из звезды A , производит вторичный ядерный взрыв в точке B типа 0_p ($N_h=9$). В части III настоящей серии статей будет показано, что случаи типа 2_p в 75% случаев соответствуют прохождению частицы через ядро и образованию одиночной заряженной «ливневой» частицы; а большинство случаев типа 0_p ($N_h \geq 9$) соответствуют прохождению через ядро падающего протона, который, изменяя заряд, превращается в нейтрон. Более вероятное объяснение данного случая состоит в том, что он соответствует прохождению быстрого нуклона последовательно через два ядра. При таком объяснении эта фотография — наглядный пример основного способа потери энергии первичных протонов с энергией в интервале от $3 \cdot 10^9$ до 10^{10} эв при их прохождении через атмосферу.



Микрофотография X. Случай, аналогичный изображённому на предыдущей микрофотографии. Мы считаем, что звезда типа 1_n ($N_n = 7$) образована в точке A нейтроном, который при этом приобретает заряд, испускается, как протон, и образует в точке B звезду типа 0_p ($N_n = 2$). Интерпретация этого случая связана с анализом, который будет дан в части III и который показывает, что 80% звезд типа 1_n образованы прохождением протона через ядро с изменением заряда.



Микрофотография XI. След 1 можно проследить в эмульсиях четырёх пластинок. Почти постоянное число электронов на единицу длины следа показывает, что заряд частицы равен $(17 \pm 2) e$. Этот случай, следовательно, интерпретируется как столкновение ядра хлора с ядром брома или серебра в эмульсии.

В результате столкновения падающее ядро почти полностью распадается, его нуклоны испускаются в виде протонов и нейтронов, движущихся в направлениях, заключённых в узком конусе. Большинство более сильно ионизующих частиц образовано при испарении ударяемого ядра. След 32 принадлежит ядру Li; след 9 — α -частице; след 4 — быстрой частице, которая образует второе расщепление в точке, лежащей вне поля зрения, изображённого на фотографии.