

Б · РОССИ
Восмические
ЛУЧИ



АТОМИЗДАТ · 1966

М. Н. Ходяков
Б. РОССИ

ЛХ 83

Росмические ЛУЧИ

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО
Н. Г. ЗЕЛЕВИНСКОЙ И В. М. МАКСИМЕНКО



Атомиздат Москва
1966

Cosmic Rays

Copyright 1964 by McGraw-Hill

Книга Б. Росси «Космические лучи» — популярное изложение физики космических лучей. Ее смело можно отнести одновременно и к литературе научно-исторической, и к литературе, излагающей большие современные научные проблемы. Чтение этой книги доставит истинное удовольствие, особенно тем читателям, которые хотят познать живую развивающуюся науку, творцов ее, ученых, в динамике их творческих усилий, пророческих гипотез и гениальных открытий.

Высокий научный уровень книги и популярное изложение сложных явлений современной физики делают ее интересной и доступной для самого широкого круга читателей.

Предисловие переводчиков

Новая книга Б. Росси рассказывает о полувековой истории открытия и изучения удивительного явления природы — космических лучей. Космические лучи — это потоки частиц, несущихся на Землю из глубин Космоса и претерпевающих на своем пути сложную цепь превращений.

Характерная особенность современной физики космических лучей — ее органическая связь с другими разделами науки, порой довольно далекими друг от друга. Происхождение космических лучей, процессы, в которых они приобретают свою колоссальную энергию, их роль в эволюции Вселенной — все эти проблемы немислимо решить без тесного контакта с астрофизикой, радиоастрономией, космологией. Особенно бурное развитие этого «космофизического» направления в физике космических лучей началось после запуска искусственных спутников Земли и ракет, которые позволили ученым отправить свои приборы непосредственно в космос.

Но в физике космических лучей есть и другая сторона. Среди космических пришельцев есть частицы с энергиями, в миллионы и миллиарды раз превосходящими те энергии, которые могут сообщать частицам самые мощные современные ускорители. Исследование взаимодействия таких частиц с атомными ядрами привело к созданию физики элементарных частиц и физики высоких энергий, тесную связь с которыми физика космических лучей сохраняет и по сей день.

Таким образом, космические лучи представляют собой своеобразный «мост» между космосом с его грандиозными процессами гигантских масштабов пространства и времени и микромиром, где процессы протекают на чрезвычайно малых расстояниях и в ничтожные доли секунды.

Сказанного достаточно, чтобы понять, почему физика космических лучей до сих пор остается одним из боевых

Участков современной науки, интерес к которому среди широких кругов читателей все возрастает. Удовлетворению запросов любознательного читателя-неспециалиста и служит предлагаемая книга.

Автор ее — крупнейший американский ученый профессор Массачусетского технологического института Бруно Росси — сам непосредственный и активный участник и руководитель многих исследований в области космических лучей. Его монографии «Взаимодействие космических лучей с веществом» (написанная совместно с К. Грейзенем) и «Частицы больших энергий» переведены на русский язык и стали настольными книгами специалистов по космическим лучам. Теперь Б. Росси выступил в роли популяризатора. Глубокая эрудиция и большой личный опыт позволили ему ввести читателя в творческую лабораторию ученого, показать, каким путем — порой через неудачи и заблуждения — ученые раскрывают тайны природы.

Многие страницы книги приобретают характер научных мемуаров — и в этом особая ценность книги. Но в то же время такой характер книги, как об этом пишет сам Б. Росси в своем предисловии, привел к некоторой субъективности в выборе материала, автор невольно уделил больше внимания тем работам, в которых он сам принимал участие. При переводе этот пробел был отчасти восполнен краткими примечаниями, в основном ссылками на работы советских ученых. Читателю можно рекомендовать научно-популярные книги советских авторов на ту же тему: Н. А. Добротина «Космические лучи» (Издательство АН СССР, 1963 г.) и Г. Б. Жданова «Частицы высоких энергий» (Издательство «Наука», 1965 г.). Все количественные характеристики пересчитаны в метрическую систему мер, исправлены замеченные в оригинале опечатки, а таблица свойств элементарных частиц уточнена в соответствии с последними данными.

Книга Б. Росси написана живо и увлекательно, автор удачно обошел подводные камни популяризации, не поступившись научной строгостью изложения и в то же время не сбиваясь на вульгаризацию. Книга найдет широкий круг читателей, интересующихся современной наукой.

*Н. Г. Зелевинская,
В. М. Максименко*

Предисловие автора

На нашу планету по всем направлениям из мирового пространства льется непрерывный поток заряженных частиц, движущихся со скоростями, близкими к скорости света. Эти частицы, известные под названием космических лучей, представляют собой ядра обычных атомов, лишенных всех своих электронов, — большей частью ядра водорода.

Основное свойство космических лучей, которое отличает их от всех других типов излучения и которое определяет их чрезвычайную важность для современной физики, — это очень большая энергия индивидуальных частиц космического излучения. До открытия космических лучей наибольшей известной физикам энергией обладали частицы, испускаемые при самопроизвольном распаде радиоактивных атомов. Позднее, стремясь повторить опыты с космическими лучами в контролируемых лабораторных условиях, физики начали сооружать ускорители, способные давать частицы со все большими и большими энергиями. В настоящее время такие машины позволяют достичь энергий, в 10 000 раз превышающих характерные энергии естественного радиоактивного распада, что уже близко к «средней» энергии космической частицы. Но космические лучи захватывают очень широкий интервал энергий, и небольшая их доля обладает энергиями в миллиарды раз больше энергии, которую можно получить от самых мощных ускорителей.

В этой книге я попытаюсь рассказать, как, начав, казалось бы, с тривиальных наблюдений, физики открыли космические лучи; как они за полстолетия напряженной работы установили, наконец, что представляют собой космические лучи; как в процессе этой работы было открыто множество новых частиц, возникающих за счет энергии других частиц и живущих ничтожные доли секунды, и тем самым положено начало физике элемен-

тарных частиц; и как физики, в награду за все свои труды, оказались перед лицом еще более сложной и увлекательной проблемы — проблемы происхождения космических лучей.

Мне кажется, что такой рассказ может представлять некоторый интерес не только для физика-профессионала, но и для любого человека, который интересуется современной наукой и тем, как делаются научные открытия. Поэтому я старался придерживаться языка настолько простого, насколько это возможно без нарушения научной точности, и опустил все технические детали и математические выкладки, которые вовсе не нужны для понимания существа дела. Я знаю, что, поступив так, я не смог должным образом отметить многих физиков, которые внесли существенный вклад в развитие физики космических лучей. Было бы бесполезно приносить им извинения; вместо этого выражаю уверенность, что они поймут ограничения, вытекающие из характера этой книги.

Должен также предупредить читателя, что своими личными научными интересами я глубоко связан с физикой космических лучей, поэтому от меня трудно ожидать бесстрастного рассказа, как если бы я был лишь посторонним наблюдателем. В действительности то, что написано в этой книге, — в значительной степени рассказ о многолетней эволюции моего собственного понимания явлений в космических лучах. Вполне возможно поэтому, что мои работы и работы моих сотрудников излишне подчеркнуты в этой книге.

Многие друзья великодушно помогли мне своими советами и замечаниями. Глубоко благодарен им и особенно Дж. Оккиалини и покойному Ф. Ф. Фридману, которые не пожалели времени, чтобы прочесть всю рукопись, и не щадили меня в своей критике. Мне хотелось бы также выразить признательность А. Виггенхорну за добросовестную и компетентную редакторскую работу.

Бруно Росси

Глава 1

ИЗЛУЧЕНИЕ ИЗ МИРОВОГО ПРОСТРАНСТВА

В шесть часов утра 7 августа 1912 г. вблизи австрийского города Ауссига поднялся воздушный шар, в гондоле которого было три человека: пилот, метеоролог и физик. За два с половиной часа воздушный шар, быстро сносимый к северу, поднялся на четыре километра, а затем в течение часа летел на высоте между четырьмя и пятью километрами. В полдень он приземлился недалеко от немецкого города Пискова, в 50 километрах восточнее Берлина, пролетев около 200 километров.

Полетом руководил физик Виктор Гесс. Он брал с собой в полет три электроскопа, при помощи которых обычно исследовались излучения радия и других радиоактивных веществ. Пока его спутники следили за полетом, измеряли давление и температуру, Гесс наблюдал за своими приборами и записывал их показания. Спустя несколько месяцев, после тщательного изучения полученных данных, Гесс представил научной общественности свои далеко идущие выводы. В ноябрьском номере журнала «Физикалише Цейтшрифт» за 1912 г. он так сформулировал основной итог своей работы: «Результаты моих наблюдений лучше всего объясняются предположением, что из мирового пространства на границу атмосферы падает излучение очень большой проникающей способности».

Этим экспериментом было положено начало одной из самых увлекательных глав в истории науки. Дальнейшие исследования «излучения из мирового пространства» открыли новый и сложный мир физики высоких энергий. Здесь ученые обнаружили частицы, размеры которых меньше размеров атомов, а энергия в тысячи, миллионы,

миллиарды, триллионы раз больше энергии частиц, испускаемых радиоактивными веществами на Земле. Здесь же впервые наблюдались процессы образования элементарных частиц и их быстрых распадов с переходом одних частиц в другие, процессы, в которых происходят пред-

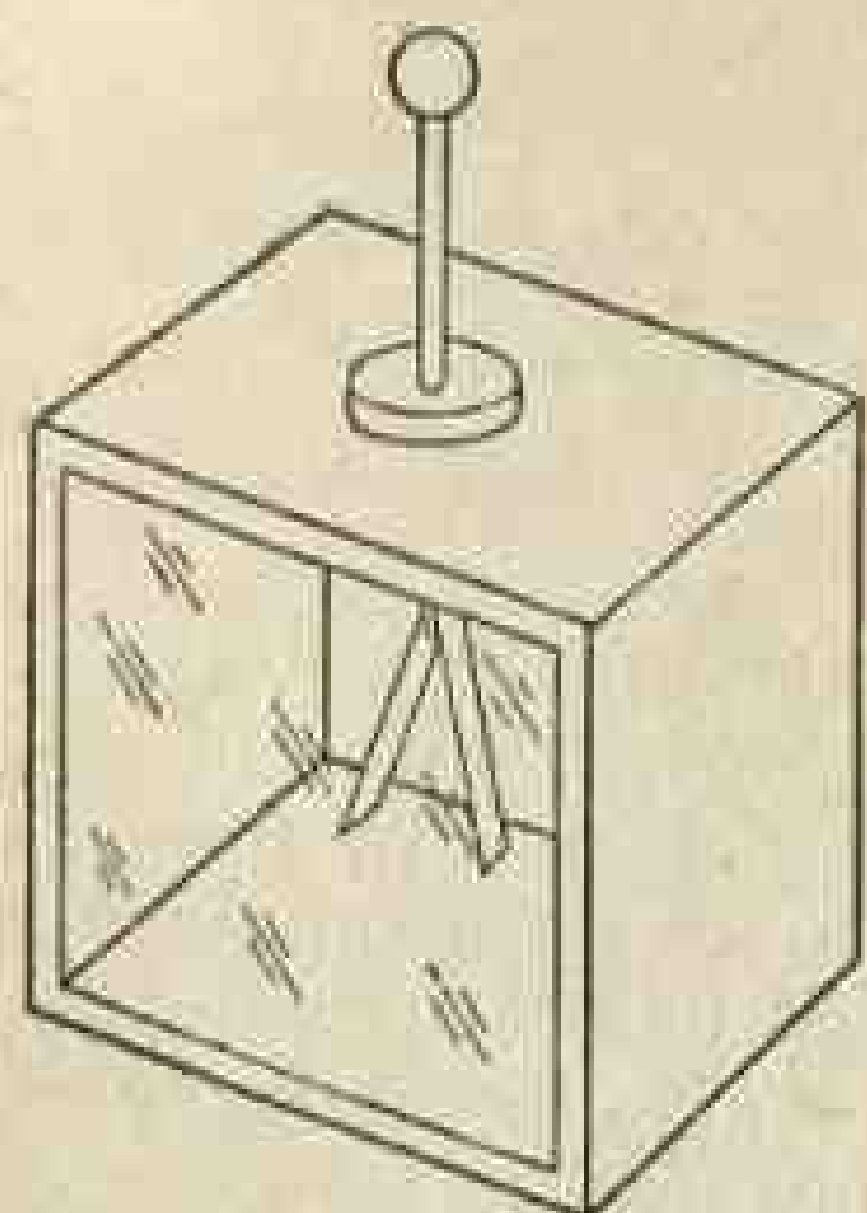


Рис. 1. Электроскоп с золотыми листочками.

сказанные теорией относительно взаимные превращения массы и энергии. Кроме того, открытие Гесса послужило толчком к дальнейшему развитию астрофизики и космологии. Оказалось, что таинственное излучение несет важную информацию о физических условиях в далеких областях мирового пространства, которые оно пересекает на своем пути к Земле. И, наконец, пытаясь объяснить происхождение этого излучения, физики выдвинули ряд новых идей о процессах, происходящих в звездах и в разреженном газе, запол-

няющем межзвездное пространство.

Однако в августе 1912 г. никто, включая и самого Гесса, не подозревал обо всем этом. Что же в таком случае побудило Гесса выполнить свои опыты? И какие факты легли в основу его вывода?

Большинство научных открытий, образно говоря, произрастает из тех семян, которые долгое время лежат незамеченными на виду у всех. Открытие Гесса не составляет исключения. Более чем за столетие до него физикам уже было известно, что электроскоп с золотыми листочками (рис. 1) или аналогичный прибор не сохраняет электрический заряд бесконечно долгое время. Это явление утечки заряда известно всем, кто знакомился с элементарным курсом физики. Если к металлическому стержню электроскопа, к которому подвешены золотые листочки, прикоснуться, например, заряженной стеклянной палочкой, то листочки сразу же разойдутся на некоторый угол. Оба листочка приобрели заряд одного знака

(положительного в данном случае) и оттолкнулись друг от друга. В таком положении листочки остаются еще некоторое время после удаления стеклянной палочки, но затем, по мере исчезновения заряда, листочки постепенно опадают.

В обычном электроскопе заряд стекает по изолятору, отделяющему стержень от металлического корпуса прибора. Специальные меры предосторожности позволяют уменьшить эту утечку практически до нуля, но даже и тогда электроскоп не сохраняет полученный заряд бесконечно долго. Не помогает и замена воздуха в герметизированном корпусе электроскопа каким-нибудь другим газом.

К концу прошлого столетия физики уже накопили достаточно сведений о структуре вещества, чтобы объяснить явление самопроизвольного разряда электроскопа. Было известно, что вещество состоит из атомов, что каждому химическому элементу соответствует определенный сорт атомов, что комбинации атомов одного или нескольких элементов образуют молекулы различных химических соединений. И хотя представления о структуре атома были еще очень неточны, физики уже знали, что атомы обычно содержат одинаковые количества положительного и отрицательного заряда. Благодаря этому суммарному балансу зарядов противоположных знаков атомы и молекулы в целом нейтральны. Кроме того, было известно, что сами заряды имеют «корпускулярную структуру», т. е., другими словами, они всегда кратны некоторому неделимому элементарному заряду. И действительно, в 1897 г. английский физик Дж. Дж. Томсон обнаружил частицу очень малой массы — *электрон*, которую он отождествил с элементарным носителем отрицательного заряда.

Разряд электроскопа в соответствии с этой картиной можно было объяснить тем, что под действием каких-то причин молекулы газа перестают быть нейтральными. Молекула может потерять электрон и остаться с избытком положительного заряда. Электрон при этом или остается свободным, или присоединяется к нейтральной молекуле. Как убедительно показали многочисленные опыты, воздух или другой газ, окружающий листочки электроскопа, всегда слегка *ионизован*, т. е. всегда содержит небольшое количество «свободных» электронов

и заряженных молекул, или, как их называют, *ионов*. Таким образом, если листочки положительно заряжены, то они притягивают отрицательные ионы и отталкивают положительные (рис. 2). Положительный заряд, под действием которого листочки отталкиваются друг от друга, постепенно нейтрализуется отрицательными ионами, и листочки опадают. Таков же результат притяжения положительных ионов будет и отрицательно заряженными листочками.

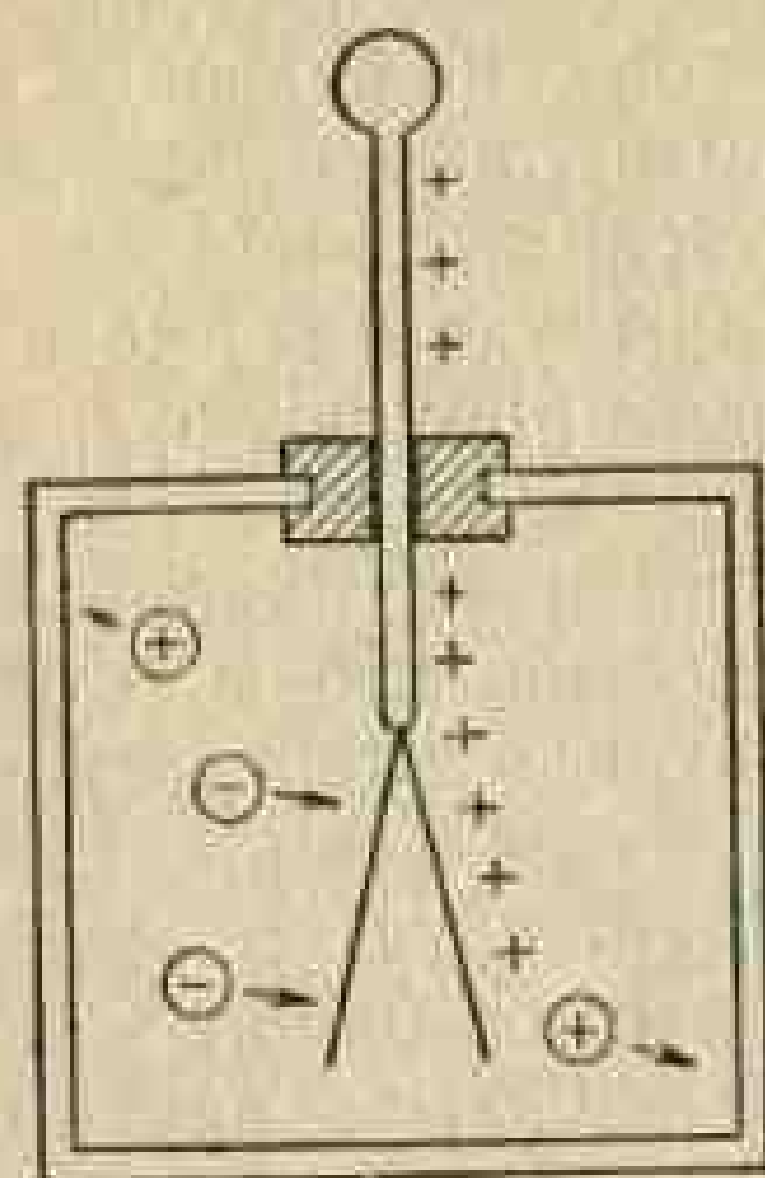


Рис. 2. Ионы газа разряжают электроскоп.

Анри Беккерель открыл явление радиоактивности, а в 1898 г. Мария и Пьер Кюри выделили радий. Ионизирующее излучение радия и других радиоактивных веществ также приводило к разряду электроскопа. Большинство физиков в свете этих фактов было склонно считать, что наблюдаемую ионизацию вызывает какое-то слабое излучение, а не самопроизвольный распад молекул газа.

Прежде всего напрашивалось предположение, что ионизирующее излучение испускают примеси радиоактивных веществ в материале, из которого сделан электроскоп. Оказалось, что некоторая доля ионизации действительно вызвана примесями. Однако весь эффект нельзя было объяснить радиоактивным загрязнением прибора. Окружая электроскоп свинцом или водой, экспериментаторы сумели снизить скорость его разрядки. Это значит, что часть ионизирующего излучения попадала в прибор извне. Для того чтобы заметно снизить скорость разрядки, приходилось брать толстые слои ве-

щества, т. е. неизвестное излучение обладало значительной проникающей способностью.

Долгое время источником этого проникающего излучения считали незначительные количества радиоактивных веществ, находящихся в земной коре. Это предположение можно проверить, сравнивая измерения на различных высотах. Если излучение, вызывающее разряд электроскопа, исходит от земли, то оно должно быть интенсивнее всего у ее поверхности и постепенно ослабевать с ростом высоты.

Экспериментальной проверкой этой гипотезы занялись несколько ученых, в том числе Т. Вульф в Германии и А. Гоккель в Швейцарии. К тому времени уже появились приборы более точные и надежные, чем старомодные электроскопы с золотыми листочками. Для измерения излучения особенно удобным оказался прибор, сконструированный в 1909 г. Вульфom. Он заменил золотые листочки двумя очень тонкими металлическими проволочками, натянутыми при помощи легкой кварцевой нити (рис. 3). Будучи заряженными, проволочки расходились друг от друга, и по расстоянию между ними, которое измерялось микроскопом, можно было судить о величине заряда. В 1910 г. Вульф поднял один из своих электроскопов на Эйфелеву башню. В 1912 г. Гоккель использовал подобный прибор для измерений на воздушном шаре. Но исследователь не обнаружил ожидаемых эффектов. Скорость разряда не уменьшалась с высотой или, по крайней мере, не уменьшалась так быстро, как следовало ожидать. Таково было положение, когда Гесс заинтересовался этой проблемой и предпринял серию полетов на воздушном шаре, завершившуюся знаменитым полетом в августе 1912 г.

Гесс использовал электроскопы Вульфа, изготовленные с возможной тогда тщательностью. Два из трех при-

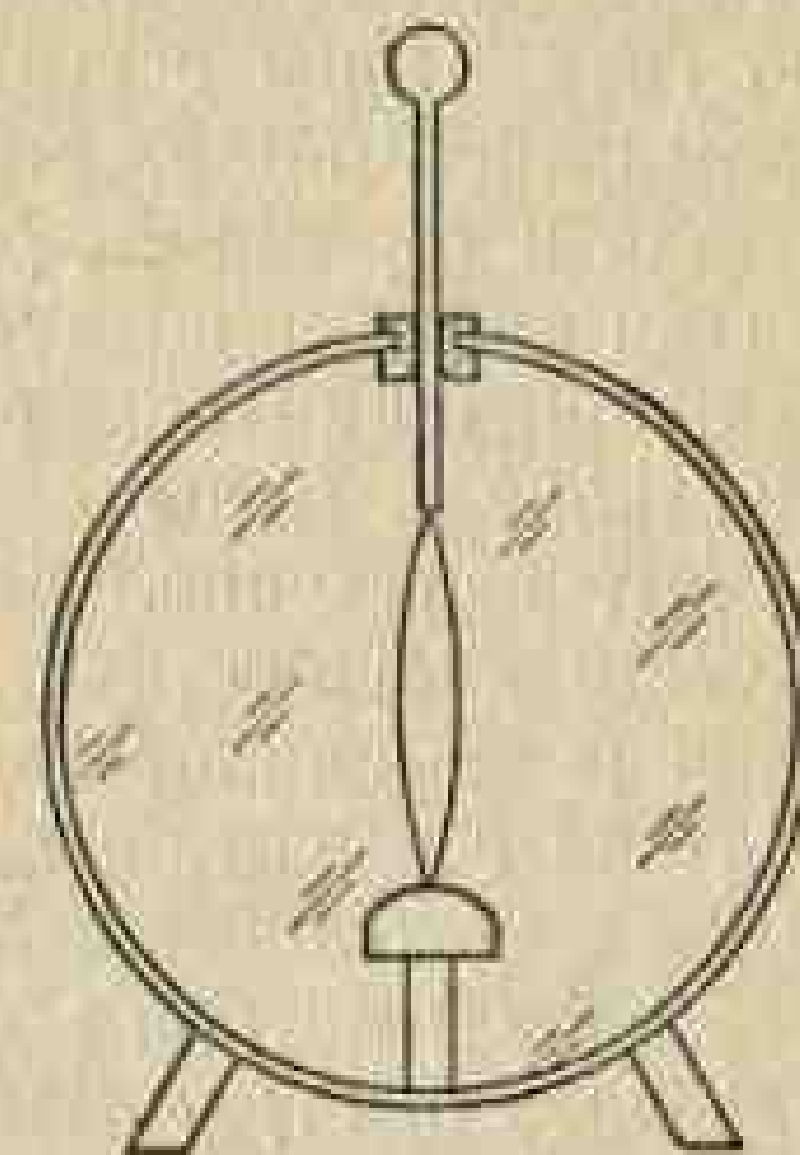


Рис. 3. Электроскоп, разработанный Вульфom, в 1909 г. и использованный во многих ранних экспериментах по космическим лучам.

боров имели герметичные корпуса, так что давление воздуха в них оставалось постоянным на всех высотах. Следовательно, чувствительность этих приборов не зависела от высоты. (В негерметичном приборе чувствительность падала бы с ростом высоты, поскольку число пар ионов, образуемых в данном объеме газа излучением определенной интенсивности, пропорционально давлению газа. Ионы всегда образуются и нейтрализуются парами: один положительный ион и один отрицательный. Отсюда и термин «пара ионов».)

При подъеме воздушного шара Гесс заметил, что сначала ионизация немного уменьшилась — об этом свидетельствовала меньшая скорость разрядки электроскопа. Значит, излучение, испускаемое земной поверхностью, безусловно существует. Однако на высоте 600 метров положение изменилось: ионизация стала постепенно увеличиваться с высотой, как будто воздушный шар приближался к источнику излучения, а не удалялся от него. На высоте 4800 метров электроскопы разряжались *уже в четыре раза быстрее*, чем на уровне моря. Для объяснения этого неожиданного возрастания Гесс и выдвинул гипотезу об излучении, падающем на Землю из космического пространства.

Это предположение было очень смелым, и прошло немало лет, прежде чем оно стало общепринятым. Во-первых, результаты Гесса должны были быть повторены и проверены другими учеными. Последовавшие опыты обнаружили, что возрастание интенсивности излучения продолжается и на высотах, превышающих 4800 метров.

За время с 1913 по 1919 г. немало отважных полетов совершил немецкий ученый В. Кольхёрстер. Он обнаружил, что на высоте около 8400 метров — максимальной высоте, на которую ему удалось подняться, — интенсивность ионизирующего излучения значительно выше зарегистрированной Гессом.

Во-вторых, прежде чем принимать гипотезу Гесса, необходимо было попытаться найти и другие возможные, но менее революционные объяснения. Ч. Вильсон, изобретатель камеры, носящей его имя, и один из ведущих ученых в области ионизационных явлений, предположил, что излучение возникает во время гроз в верхних слоях атмосферы. Другие физики считали, что в атмосфере мо-

гут быть следы радиоактивных газов (некоторые радиоактивные вещества, например радон, 86-й элемент периодической таблицы, существуют в газообразном состоянии). Если по каким-то причинам эти радиоактивные газы концентрируются в верхних слоях атмосферы, то этим можно объяснить увеличение ионизации с высотой.

Из обоих предположений следует, что интенсивность таинственного излучения должна сильно зависеть от погоды и должны существовать ее часовые, суточные и сезонные изменения, поскольку грозы, очевидно, не могут происходить непрерывно и трудно представить себе, чтобы гипотетический радиоактивный газ был распределен в атмосфере совершенно одинаково в любое время дня или года и при любых изменениях погоды. Отсутствие таких вариаций интенсивности отмечал еще Гесс, а последующие исследования подтвердили его выводы. Несмотря на некоторый разброс данных и неопределенности, обусловленные несовершенством аппаратуры, в целом по всем исследованиям отмечалось замечательное постоянство излучения. Оно приходит к нам днем и ночью, летом и зимой, в ясную и дождливую погоду, почти не изменяясь день ото дня и от места к месту на одной и той же высоте.

Работы Милликена и Регенера

И все же еще были физики, сомневающиеся в правильности новой идеи. Наиболее скептически был настроен профессор физики Калифорнийского технологического института Роберт Милликен. Он и его сотрудники решили непосредственно убедиться в правильности экспериментальных результатов Гесса и в том, что эти данные вынуждают принять гипотезу о существовании излучения из мирового пространства. За время с 1923 по 1926 г. этой группой исследователей были выполнены блестящие эксперименты как на больших высотах, так и на больших глубинах под водой. Опыты Милликена убедили его самого, а также и остальных сомневающихся ученых в том, что источник обнаруженного Гессом излучения действительно находится где-то вне земной атмосферы. Именно Милликен назвал это излучение *космическими лучами*. Опыты, выполненные в Южной Ка-

лифорнии и на озерах Мюр и Эрроухед*, рассеяли последние сомнения Милликена в существовании космических лучей. Озера расположены на высоте 3500 и 1500

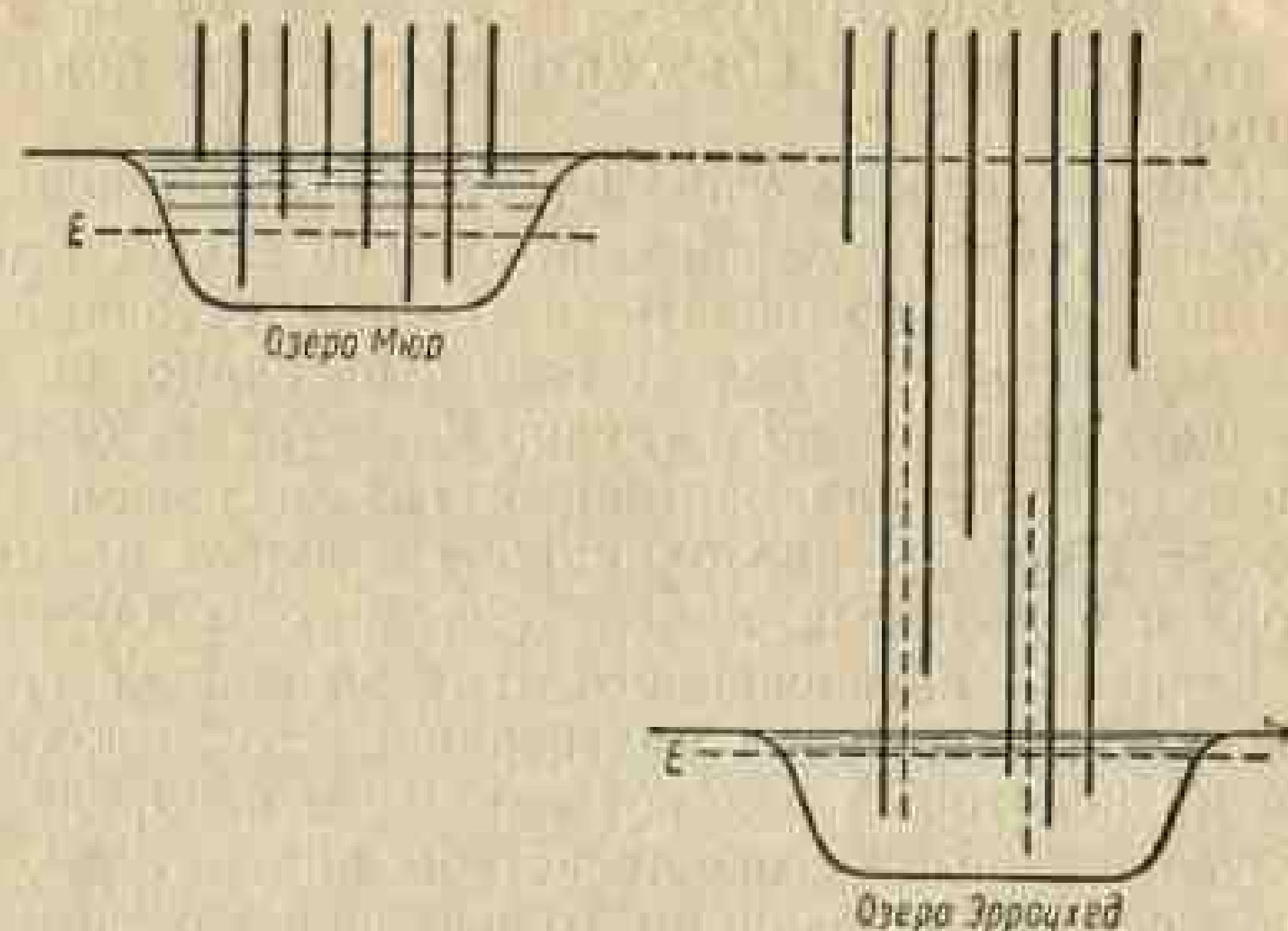


Рис. 4. Принцип экспериментов Милликена на озерах Мюр и Эрроухед в Южной Калифорнии. Электроскоп (на уровне E) погружается в озеро Мюр на 1,8 м глубже, чем в озере Эрроухед. Так как слой воздуха между уровнями обоих озер весит столько же,* сколько 1,8 м воды, то космические лучи, падающие сверху на оба озера, должны пройти одинаковую суммарную массу, приходящуюся на единицу площади поглотителя (воздух плюс вода), прежде чем попадут в электроскоп. Милликен предположил, что равные массы (на единицу площади) воздуха или воды одинаково поглощают космические лучи. Если космические частицы не образуются в слое воздуха между двумя озерами, то число частиц, попадающих в оба электроскопа, должно быть одинаковым. Но если новые частицы (пунктирные линии) создаются в этом слое воздуха, тогда электроскоп на озере Эрроухед покажет большее число частиц, чем электроскоп на озере Мюр.

метров соответственно. Для любого излучения, проходящего вертикально через атмосферу, добавочные 2000 метров воздуха над озером Эрроухед соответствуют поглощающей массе вещества, приходящейся на едини-

* Аналогичные опыты с погружением ионизационных камер в воду были выполнены в 1925 г. советским физиком Л. В. Мысовским на Онежском озере. — Прим. перев.

цу поверхности озера, эквивалентной 1,8 метра воды. Погружая электроскопы на различные глубины в оба озера, Милликен обнаружил, что в пределах экспериментальных ошибок измерению на какой-либо глубине в озе-

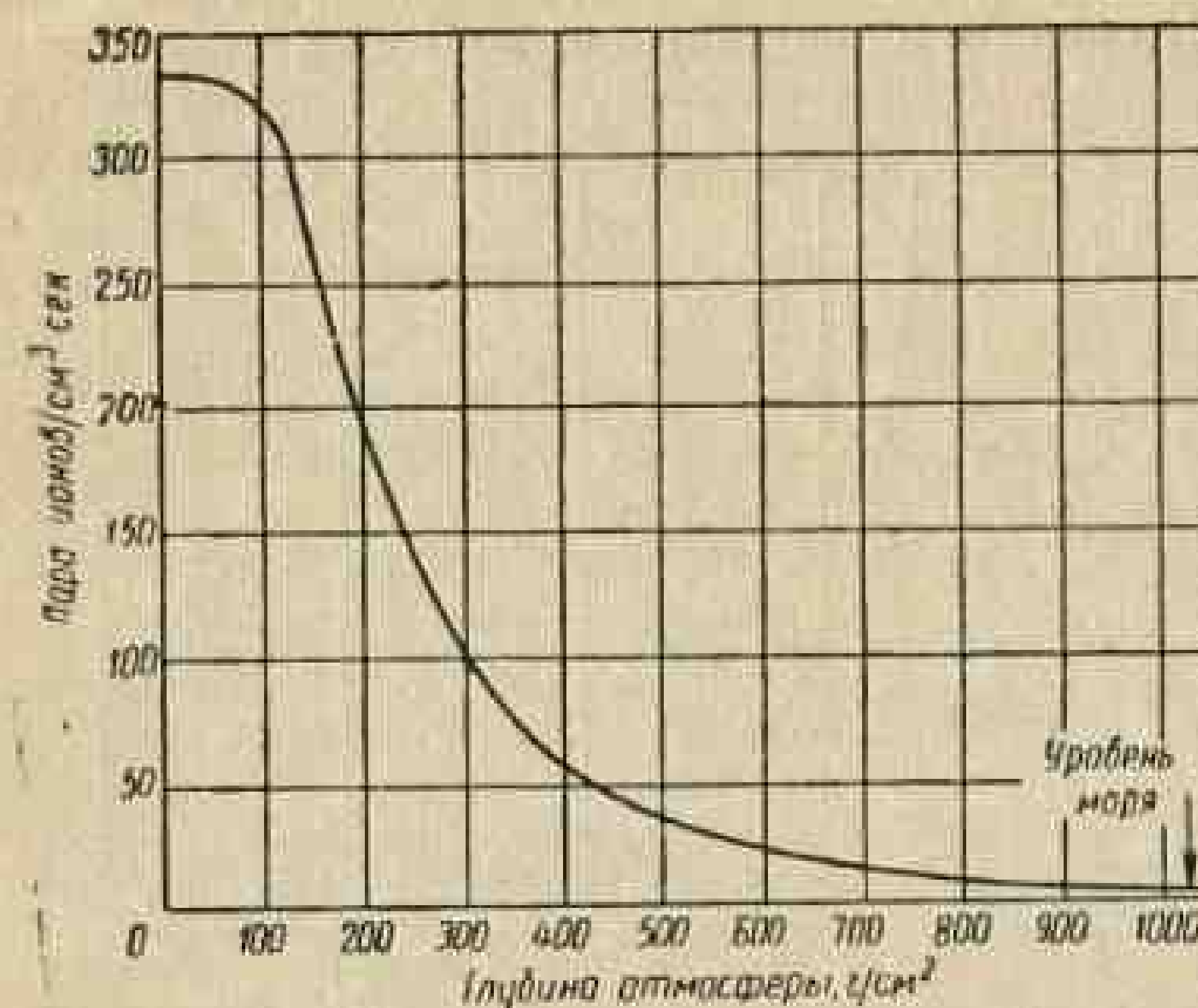


Рис. 5. Зависимость интенсивности космических лучей от глубины атмосферы, полученная группой Регенера с помощью электроскопов, поднимаемых на воздушных шарах. По горизонтальной оси отложена глубина атмосферы — масса на единицу площади слоя воздуха над электроскопом. По вертикальной оси отложено число пар ионов, образуемых за секунду космическими лучами в 1 см³ воздуха при нормальных температуре и давлении. В таких единицах интенсивность космических лучей на уровне моря приблизительно равна 2.

ре Эрроухед соответствовало измерению в озере Мюр, но выполненное глубже на 1,8 метра. Этот результат указывал на то, что излучение определенно приходит сверху и что его источник во всяком случае расположен вне слоя атмосферы между уровнями обоих озер.

На рис. 4 более подробно объясняется опыт Милликена и ход его рассуждений. Отметим между прочим, что основной аргумент Милликена был не совсем правилен. Равные массы воздуха и воды на единицу площади* по-

* См. Приложение 1.

глощают не совсем одну и ту же долю космических лучей. Если бы экспериментальная техника того времени позволяла получать более точные данные, то Милликен обнаружил бы разницу между соответствующими показаниями прибора в обоих озерах. И это могло бы помешать ему сделать правильный вывод!

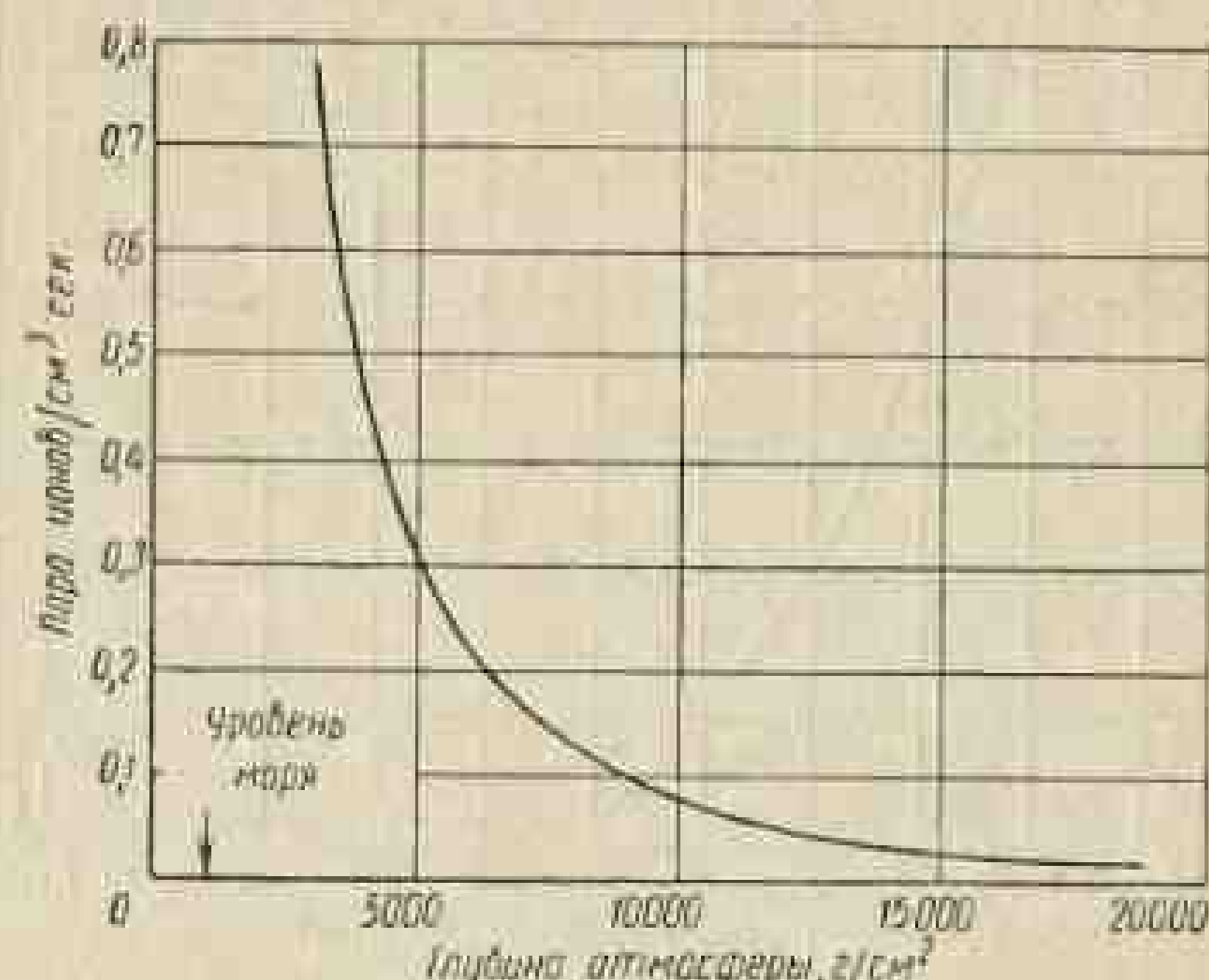


Рис. 6. Интенсивность космических лучей под водой, измеренная Регенером и его группой. По горизонтальной оси отложена суммарная масса воздуха и воды, приходящаяся на единицу площади. Уровень моря соответствует глубине $1,033 \text{ г/см}^2$. По вертикальной оси отложено число пар ионов, образуемых за секунду в 1 см^3 воздуха при нормальных температуре и давлении.

Работы группы Милликена стали классическими не только потому, что они дали важные научные результаты, но и потому, что они были выполнены при помощи новой оригинальной аппаратуры. Для физики космических лучей очень ценным нововведением оказалось использование воздушных шаров-зондов. Гесс и Кольхёрстер вынуждены были сами сопровождать в полете свои приборы, чтобы записывать их показания*.

* Несколько полетов в стратосферу для исследования космических лучей совершили и советские ученые. Наиболее известны полеты на стратостате «СССР 1-бис» под руководством А. Б. Верного (высота 19 км) и полет стратостата «Осоавиахим-1», на котором физик И. Д. Усыский и пилоты П. Ф. Федосеенко и А. Б. Васенко

Использование шаров-зондов без человека исключило опасность и удешевило проведение экспериментов. Электроскопы Милликена, замечательные по своей прочности и чувствительности, поднимались двумя шарами. На определенной высоте один из шаров разрывался, а второй плавно спускал аппаратуру на Землю. Во время полета простое устройство непрерывно регистрировало показания электроскопа на фотопленку, которая затем проявлялась и анализировалась.

Методика самопишущих электроскопов, которые поднимались на воздушных шарах в верхние слои атмосферы или погружались на большие глубины, была доведена до непревзойденной степени совершенства немецким физиком Эрихом Регенером и его сотрудниками в конце 20-х и начале 30-х годов*. Этой группе ученых мы обязаны самыми точными измерениями зависимости ионизации под действием космических лучей от высоты и глубины (рис. 5 и 6).

достигли рекордной по тем временам высоты — 22 км. К сожалению, стратостат «Осоавиахим-1» при спуске потерпел катастрофу и смелые исследователи погибли. — Прим. перев.

* Под руководством видного советского ученого С. Н. Вернова в СССР в 1933—1934 гг. были разработаны и успешно применялись шары-зонды, снабженные портативным радиопередатчиком, с помощью которого показания приборов передавались на Землю во время полета, так что удачный исход эксперимента не зависел от того, насколько благополучно приборы вернулись на Землю. В дальнейшем метод С. Н. Вернова получил очень широкое развитие. — Прим. перев.

Глава 2

АТОМЫ И ИЗЛУЧЕНИЯ

Сейчас это может показаться странным, но в течение 16 лет после открытия Гесса* не было предпринято серьезных попыток выяснить, что же в действительности представляют собой космические лучи. Конечно, при помощи довольно грубой экспериментальной техники того времени трудно было решить вопрос о природе космических лучей. Те методы, которые успешно применялись при исследовании рентгеновских лучей и радиоактивности, для космических лучей были непригодны. В лаборатории рентгеновское и радиоактивное излучения получают от хорошо известных локализованных источников в контролируемых условиях. В то же время космические лучи приходят отовсюду, их нельзя включить и выключить, как рентгеновские лучи. В отличие от образца радиоактивного вещества источник космических лучей недоступен и даже неизвестен. Существенно и то, что на поверхности Земли, где космические лучи проще всего изучать, ионизация, вызванная космическими лучами, гораздо меньше той, которая вызвана земными источниками.

Кроме этих технических трудностей было еще одно препятствие на пути исследования природы космических лучей — в то время большинство ученых считало, что они уже знают ответ на этот вопрос. Каковы же были причины распространения неправильных представлений о космических лучах? И какие идеи были положены в основу экспериментов, начатых в 1929 г. и приведших постепенно к нашему современному пониманию физической

природы космических лучей? Чтобы ответить на эти вопросы, вспомним, что было известно в 1929 г. об атомах и излучениях.

Атомы

За 16 лет, прошедших после открытия Гесса, физики существенно продвинулись в изучении структуры атомов. Они уже знали, что атом состоит из тяжелого, положительно заряженного ядра, окруженного облаком отрицательно заряженных электронов, масса которых пренебрежимо мала по сравнению с массой ядра. Было установлено также, что классическая механика не может удовлетворительно описать поведение электронов в атомах, и была создана новая теория для описания атомных явлений — *квантовая механика*.

Что касается атомных ядер, то здесь дело обстояло хуже. Физики измерили массы ядер, их электрические заряды и приблизительные размеры. Однако о структуре ядра было известно еще очень мало. После открытия радиоактивности стало ясно, что, по крайней мере, ядра тяжелых элементов имеют сложную структуру и состоят из «строительных кирпичиков» меньших размеров. Например, ядро радия иногда самопроизвольно, или, как обычно говорят физики, спонтанно, распадается на ядро радона и ядро гелия (его принято называть *альфа-частицей* и обозначать символом α). Следовательно, ядро радия — не «простая» частица. Кроме того, уже в течение 10 лет было известно, что ядра некоторых элементов, например азота, при облучении быстрыми α -частицами испускают положительные частицы — *протоны*, представляющие собой ядра атома водорода.

Высказывались соображения, что все ядра образованы из одинаковых строительных кирпичиков. Действительно, было известно, что массы ядер близки к целому числу масс протона. Поэтому можно было думать, что кирпичиками, из которых построены все ядра, служат протон и электрон (масса которого не вносит существенного вклада).

Ученые, однако, не приняли безоговорочно эту гипотезу и отнеслись к ней довольно сдержанно, так как хорошо понимали, что она несет с собой и ряд серьезных затруднений. Загадку строения ядра удалось разрешить

* Лишь 24 года спустя, в 1936 г., Гесс получил за свое открытие Нобелевскую премию по физике.

лишь спустя несколько лет, когда английский физик Джеймс Чедвик открыл *нейтрон*. Тогда стало ясно, что ядра состоят из протонов и нейтронов (см. Приложение VII).

Излучения

В описываемое время, так же как и теперь, словом «излучение» обозначали различные физические явления, имеющие некоторые общие свойства. Одной из наиболее важных характеристик любого излучения служит его энергия. Все виды излучения переносят энергию, причем они могут передавать часть этой энергии или всю ее подходящему поглотителю. Во многих случаях передаваемая энергия может быть обнаружена непосредственно по нагреву поглотителя. Простейший пример — нагрев тела, освещаемого солнечным светом.

Физики обычно делят излучения на две большие группы: *корпускулярные* излучения и *электромагнитные*. К первым относятся β -лучи — быстрые электроны, испускаемые при спонтанном распаде некоторых радиоактивных атомов; α -лучи — ядра гелия, также возникающие при радиоактивном распаде атомов, искусственно ускоренные частицы, например *катодные лучи*, т. е. пучок электронов, испускаемых отрицательно заряженным электродом — катодом в вакуумной разрядной трубке. К электромагнитным излучениям относится видимый свет, инфракрасное и ультрафиолетовое излучения, рентгеновские лучи и гамма-лучи (символ γ). Гамма-лучи — это один из продуктов радиоактивного распада, они испускаются вместе с β - и α -лучами.

Прежде считали, что основное различие между двумя группами излучений состоит в том, что корпускулярные лучи — это частицы, а электромагнитные — волны. Однако в конце 20-х годов развитие квантовой механики привело к решительному пересмотру этой точки зрения. Оказалось, что все лучи в одних аспектах выступают как волны, а в других — как частицы. (Частицы электромагнитного излучения стали называться *фотонами*.) Наглядно, конечно, трудно представить себе объекты, которые ведут себя и как волны, и как частицы. К счастью, для нас это несущественно. Космические лучи состоят из фотонов и других частиц таких больших энергий, при которых их

волновые свойства практически не проявляются. Поэтому в дальнейшем можно забыть о волнах и считать, что и корпускулярное, и электромагнитное излучения состоят из отдельных частиц, или *квантов*. Хотя существенного различия между волнами и частицами нет, по традиционное разделение излучений на корпускулярные и электромагнитные ради удобства классификации сохранилось и сейчас.

Все корпускулярные лучи — это частицы, которым может быть приписана определенная масса ($9,11 \cdot 10^{-28}$ г — электрону в β -излучении; $6,64 \cdot 10^{-24}$ г — ядру гелия в α -излучении)*. Кинетическая энергия, или энергия движения**, каждой частицы зависит как от ее скорости, так и, конечно, от ее массы, причем скорость изменяется в широких пределах. Частицы многих корпускулярных излучений движутся с «релятивистскими» скоростями, т. е. со скоростями, сравнимыми со скоростью света***.

Согласно законам релятивистской механики и в отличие от классической механики, материальная частица никогда не может достигнуть скорости света в вакууме ($300\,000$ км/сек), хотя при возрастании кинетической энергии скорость частицы приближается к скорости света сколь угодно близко.

С другой стороны, фотоны электромагнитного излучения не обладают конечной массой покоя. Фотоны различных энергий движутся всегда с одной и той же скоростью — скоростью света. Кроме того, частицы с конечной массой, останавливаясь в поглотителе, продолжают существовать как частицы; фотон же в этом случае полностью исчезает, передавая свою энергию электронам или атомным ядрам.

Общим свойством всех электромагнитных излучений является их происхождение: они возникают при ускоренном движении электрических зарядов. Различаются фотоны только величиной энергии. У фотонов видимого света энергия больше, чем у инфракрасных, и меньше, чем у ультрафиолетовых фотонов. Последние, в свою очередь, менее энергичны, чем рентгеновские фотоны. Еще более энергичны фотоны γ -лучей. До открытия космических

* О различных степенях числа 10 см. Приложение II.

** См. Приложение IV.

*** Там же.

лучей в качестве наиболее энергичных были известны излучения, испускаемые радиоактивными веществами. Действительно, энергия α -частиц, β -частиц и фотонов γ -лучей может достигать миллионов электронвольт. Для сравнения укажем, что энергия фотонов видимого света составляет всего около 10 электронвольт. (Один электронвольт, сокращенно эв, — это кинетическая энергия электрона, ускоренного разностью потенциалов в один вольт*.) Физика космических лучей имеет дело с гораздо большими энергиями, которые измеряются миллионами (сокращенно Мэв) и миллиардами электронвольт (сокращенно Гэв).

Ионизация, вызываемая корпускулярным излучением

Для регистрации различных излучений физики еще с конца прошлого века пользовались обычно их свойством ионизовать газы. Механизм ионизации газов под действием излучений разных типов был хорошо известен еще в конце 20-х годов. Для физики космических лучей этот вопрос особенно важен потому, что долгое время практически единственная экспериментальная возможность изучения космических лучей была основана на вызываемых ими ионизационных явлениях в газах. Поэтому я должен просить моих читателей, уже знакомых с процессами ионизации в газах, набраться терпения и вспомнить основные свойства этих процессов.

Рассмотрим сначала пучок заряженных частиц, например β -частиц, проходящих сквозь газ. Когда частица проходит вблизи молекулы газа, ее электрическое поле возмущает электронную оболочку молекулы. Если возмущение достаточно велико, один из электронов может быть выбит из молекулы. Молекула превращается в положительный ион, а сам электрон или движется в газе в свободном состоянии, образуя легкий отрицательный ион, или присоединяется к нейтральной молекуле, создавая тяжелый отрицательный ион. В любом случае заряженная частица оставляет на своем пути цепочку ионов. Эту цепочку ионов можно наблюдать в камере Вильсона, остроумном приборе, изобретенном в 1911 г. Ч. Вильсоном.

* См. Приложение V.

Прибор, сконструированный самим Вильсоном (камера расширения), состоял из стеклянного сосуда с подвижной стенкой—поршнем (рис. 7). Камера наполнялась смесью паров спирта с воздухом или другим газом, например аргоном. Если резким движением поршня внезапно увеличить объем камеры, то газ расширится, а его температура упадет. При определенном падении температуры пары спирта конденсируются в капельки, образуя в камере туман. Регулируя степень расширения, можно получить несколько меньшее изменение температуры и создать такие условия, при которых пары спирта будут конденсироваться только на ионах. Таким образом, заряженная частица, пересекающая камеру в момент, предшествующий расширению, оставит после себя видимый след из капелек, образованных на цепочке ионов.

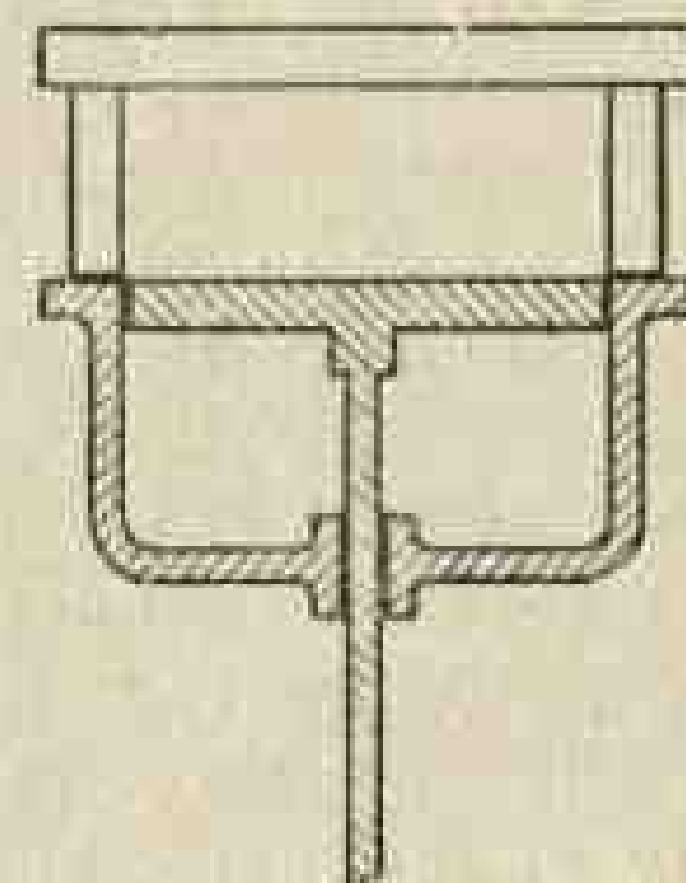


Рис. 7. Схема камеры Вильсона.

Чтобы быть зарегистрированной, частица должна пересечь камеру в определенный момент времени. Если частица пройдет камеру слишком рано — более чем за несколько миллисекунд до расширения, то ионы диффундируют далеко от места образования прежде, чем температура газа упадет. Если же частица пройдет слишком поздно — спустя несколько миллисекунд после расширения, то температура газа повысится прежде, чем образуется цепочка ионов. Таким образом, при каждом расширении камера чувствительна всего лишь примерно одну сотую долю секунды. Быстрые частицы, имеющие различные электрические заряды и движущиеся с разными скоростями, создают в газе колонку ионов различной плотности. При данной скорости плотность или число пар ионов, приходящееся на единицу длины колонки, увеличивается с ростом заряда. Это объясняется очень просто. Электрические силы, которые действуют на электроны в молекулах при пролетании частицы вблизи них, пропорциональны заряду этой частицы. Поэтому частицы с большим зарядом вызывают большее возмущение, чем частицы с меньшим зарядом. Следовательно, чем

больше заряд частицы, тем большее число молекул она ионизует на одном и том же пути в газе.

При заданном заряде плотность ионов *уменьшается с увеличением скорости частицы*. Чтобы понять эту зависимость, рассмотрим частицу, проходящую вблизи молекулы.

Частица может ионизовать молекулу, только находясь от нее на каком-то минимальном расстоянии. Следовательно, время взаимодействия больше для медленной частицы, чем для быстрой частицы. Очевидно, чем больше время взаимодействия, тем эффективнее силы, разрушающие молекулу. Поэтому медленные частицы сильнее ионизуют, чем быстрые. Как уже упоминалось, с ростом кинетической энергии частицы ее скорость приближается к скорости света. Плотность следа, оставленного такой частицей, сначала уменьшается при возрастании энергии, но затем стремится к практически постоянному значению, характерному для частиц, движущихся со скоростями, близкими к скорости света (рис. 8). Следовательно, для любой заряженной частицы существует область минимальной ионизации. След наименьшей возможной плотности оставляет однократно заряженная частица (например, электрон или протон), движущаяся почти со скоростью света. Такие частицы физики называют *минимально ионизирующими*. Примером минимально ионизирующих частиц могут служить однократно заряженные β -частицы с кинетической энергией порядка 1 Мэв. Они движутся со скоростью, соответствующей 94% скорости света. В воздухе при нормальных температуре и давлении они создают около 50 пар ионов на сантиметре пути.

С другой стороны, α -частицы, испускаемые при радиоактивном распаде полония, обладают энергией в 5,3 Мэв и скоростью всего в 5,4% скорости света, их заряд равен двум единицам элементарного заряда, и они создают около 24 000 пар ионов на сантиметре пути в воздухе*.

* Электроны, выбиваемые из молекул движущимися заряженными частицами, часто обладают достаточной энергией и, в свою очередь, создают одну или несколько пар ионов. Плотность ионизации, о которой идет речь, включает в себя пары ионов, как образованные непосредственно «первичной» частицей, так и те, которые образованы «вторичными» электронами. Ионизация от первичной частицы составляет меньше половины суммарной ионизации.

При прохождении заряженных частиц через жидкости или твердые тела происходят те же ионизационные процессы, что и в газах. В одном «акте» ионизации в любом веществе — в твердом, жидком или газообразном — частица теряет очень малую долю своей энергии (порядка

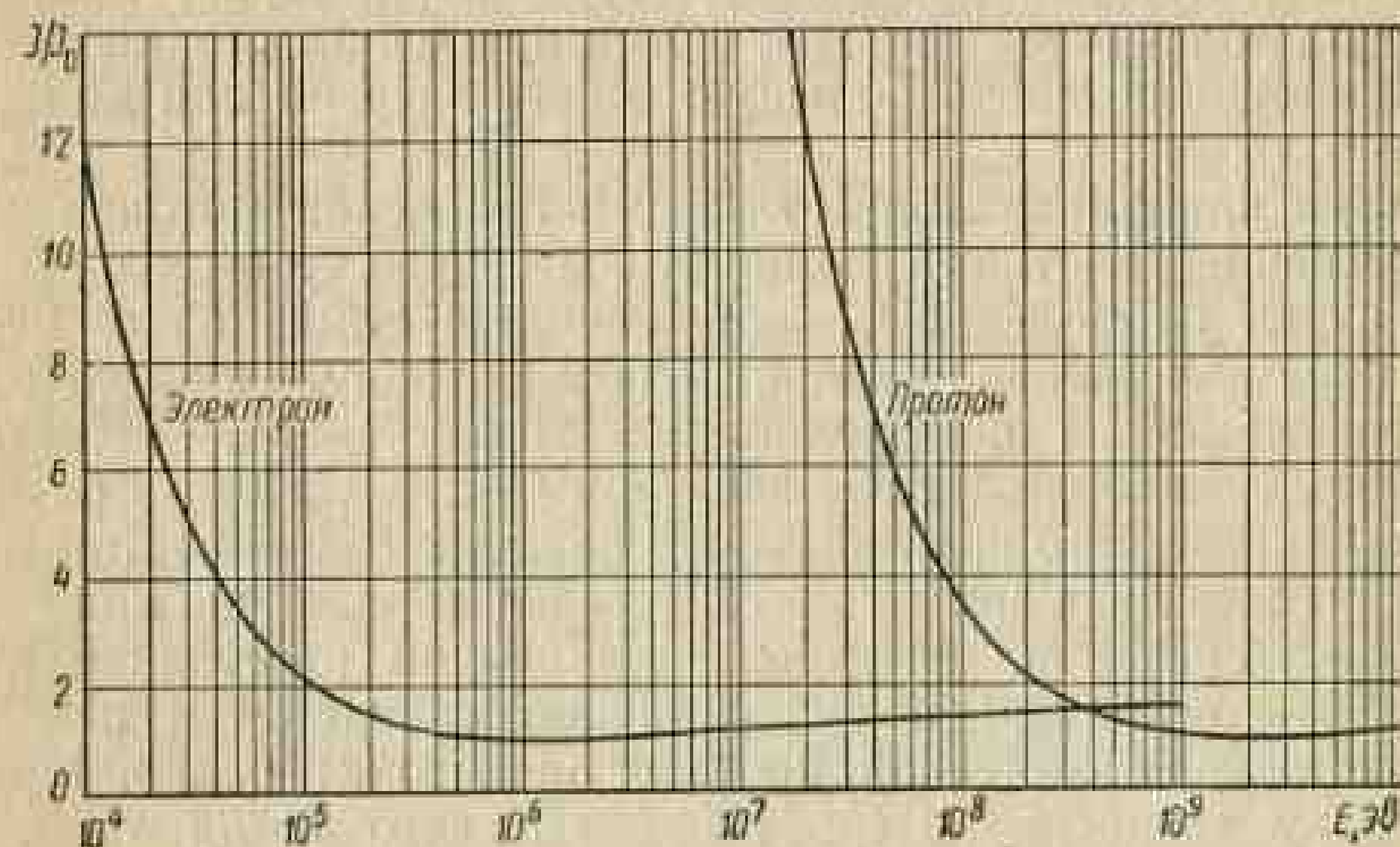


Рис. 8. Зависимость плотности ионов вдоль следа от кинетической энергии для электрона или протона. Энергия E , измеряемая в электронвольтах, откладывается по горизонтальной оси в логарифмическом масштабе (см. Приложение III). По вертикальной оси отложено отношение плотности ионов I к минимальной плотности I_0 .

30 эв в воздухе). Однако в результате большого количества таких актов она постепенно замедляется и останавливается. В конце 20-х годов физики думали, что все заряженные частицы, проходящие через вещество, теряют свою энергию почти исключительно путем ионизации. Как увидим дальше, это оказалось ошибкой.

Ионизация, вызываемая фотонами

До сих пор рассматривали ионизационные процессы, вызываемые быстрыми заряженными частицами. Что же можно сказать о фотонах, которые не несут электрического заряда? Фотоны тоже ионизуют газы, но этот процесс происходит значительно реже, чем процесс ионизации с участием заряженных частиц. Так, электрон с энер-

гией в 2 Мэв ионизует около 50 молекул на каждом сантиметре пути в воздухе при нормальных температуре и давлении, а фотон такой же энергии проходит в среднем расстояние в 170 метров, прежде чем он выбивает электрон из молекулы. Кроме того, в отличие от заряженной частицы, которая при каждом соударении теряет очень малую долю своей энергии, фотон при одном столкновении может потерять большую часть энергии или даже всю.

Это принципиальное отличие в поведении фотонов и заряженных частиц легко понять. Для того чтобы выбить электрон из молекулы, заряженная частица вовсе не должна обязательно «ударить» по электрону. Силы электростатического притяжения или отталкивания, за счет которых освобождаются электроны, действуют на расстоянии, намного превышающем размеры самой частицы. Фотон же, лишенный электрического заряда, не может воздействовать на электрон на большом расстоянии и для этого должен непосредственно «попасть» в него. Естественно, что такой процесс происходит редко, поскольку «мишень» очень мала. Но зато когда такое столкновение происходит, то и результат его оказывается гораздо более значительным, чем при взаимодействии на расстоянии.

В космических лучах большей частью имеем дело с фотонами, энергия которых намного превышает минимальную энергию, необходимую для выбивания электрона из атома или молекулы. По отношению к таким фотонам электроны можно считать свободными частицами. Другими словами, в этом случае совершенно несущественно то, что электроны входят в состав атомов или молекул, имеющих сложную структуру.

Столкновение фотона с электроном очень напоминает соударение двух бильярдных шаров, движущегося и покоящегося. После соударения фотон (движущийся шар) отскакивает под некоторым углом к первоначальному направлению с меньшей энергией, а электрон (покоящийся шар) вылетает в другом направлении (рис. 9). Такое взаимодействие между фотоном и электроном носит название *эффекта Комптона*, по имени физика, открывшего его в 1923 г. Когда пучок быстрых фотонов проходит через газ, то число молекул, ионизованных в результате самого эффекта Комптона, чрезвычайно мало.

Однако электроны отдачи, возникающие в этих столкновениях, уносят заметную долю энергии фотона, и поэтому они могут, прежде чем остановятся, образовать большое число пар ионов. Следовательно, фотоны ионизуют газы косвенным образом, посредством небольшого коли-

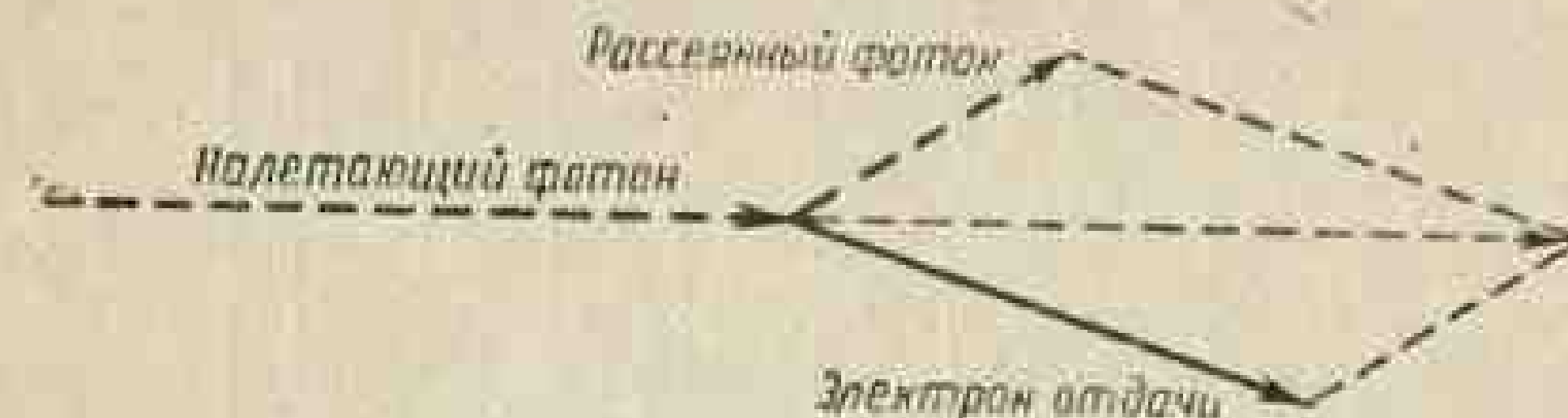


Рис. 9. Эффект Комптона.

чества быстрых электронов, выбиваемых ими из молекул газа.

Поглощение и потеря энергии

Выше уже шла речь о поглощении корпускулярного излучения и фотонов в веществе. Отметим, насколько различны в этом отношении эти два типа излучения.

Заряженные частицы теряют свою энергию малыми порциями в большом числе актов ионизации. Если на вещество направить пучок частиц, имеющих одинаковые массу, заряд и начальную кинетическую энергию, то по мере прохождения вещества эти частицы будут замедляться практически одинаково. Таким образом, все частицы остановятся, пройдя одно и то же расстояние в веществе. Это расстояние, называемое *пробегом*, зависит как от природы и начальной энергии частиц, так и от материала поглотителя. Пробег часто измеряется не в сантиметрах, а в граммах на квадратный сантиметр. Причины такого выбора единиц рассмотрены в Приложении I.

Если же на поглотитель падает пучок фотонов, то судьбу каждого отдельного фотона предсказать трудно. Это в значительной степени дело случая. Фотон может испытать комптоновское рассеяние как немедленно, так и пройдя значительное расстояние в веществе. Вследствие этого, пройдя некоторое расстояние в поглотителе, одни фотоны из пучка еще сохраняют свою начальную

энергию, а другие уже потеряли большую ее часть в комптоновских столкновениях. Кроме того, рассеянные фотоны отклоняются от направления движения начального пучка. Поэтому в случае пучка фотонов можно лишь предсказать их поведение *в среднем*. Можно сказать,

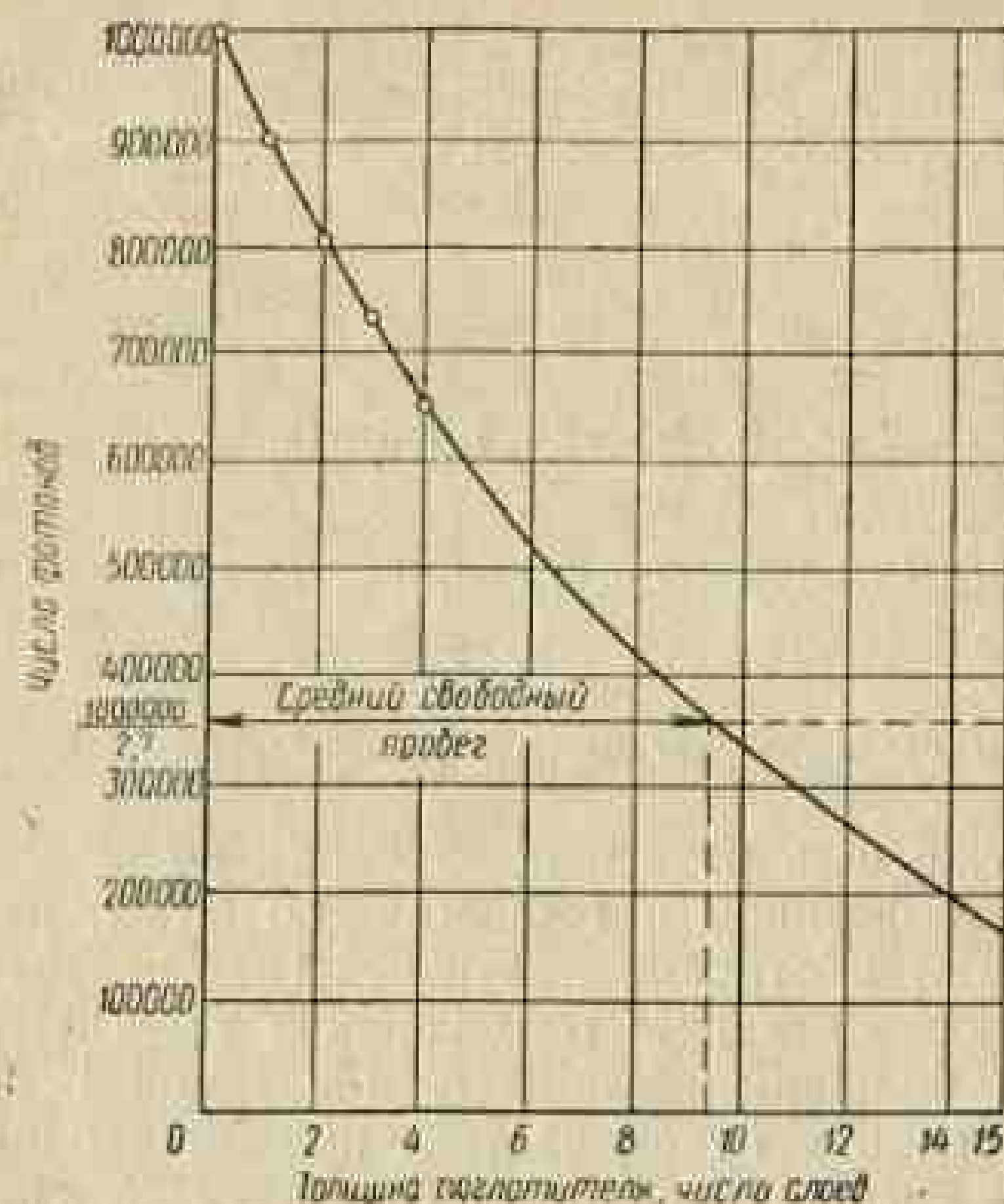


Рис. 10. Экспоненциальная кривая поглощения (см. текст). Пересечение кривой с горизонтальной линией, проходящей через точку $1\,000\,000/2,7$ на вертикальной оси, определяет средний свободный пробег.

что из пучка, прошедшего данное расстояние в поглотителе, выбывает некоторая определенная доля всех фотонов. Эта доля зависит от толщины поглотителя, от вещества поглотителя и, если все фотоны имеют одинаковую энергию, величины этой энергии.

Если можно было бы поглотитель разделить на слои равной толщины, то в каждом слое поглощалась бы одинаковая доля падающих фотонов. Предположим, например, что эта доля составляет 10%. Тогда из миллиона фотонов после первого слоя в пучке останется 900 000

фотонов ($1\,000\,000 - 100\,000$), после второго — 810 000 ($900\,000 - 90\,000$) и так далее. Если изобразить графически зависимость числа фотонов в пучке от толщины поглотителя, то получится *кривая поглощения*. Пример такой кривой приведен на рис. 10. В математике подобная кривая называется экспоненциальной.

Как уже видели, фотоны одинаковой энергии проходят в веществе до первого столкновения разные расстояния. Среднее расстояние до первого столкновения называют *средним свободным пробегом*, так же как пробег частиц, его часто выражают в граммах на квадратный сантиметр. Можно показать (но не будем здесь этого делать), что средний свободный пробег равен толщине поглотителя, необходимой для уменьшения начального числа фотонов в 2,7 раза. (Число 2,7 — это основание натуральных логарифмов.) Поэтому чем короче средний свободный пробег, тем более крутой будет кривая поглощения.

Таково было общее представление о поглощении корпускулярных лучей и фотонов к 1929 г. Подчеркнем, что это представление опирается на два важных предположения: первое — заряженные частицы тратят свою энергию только на ионизацию; второе — фотоны теряют энергию только в процессе комптоновского рассеяния. Более поздние исследования показали, что при больших энергиях в игру вступают и другие процессы поглощения. Высокоэнергетичные частицы и фотоны поглощаются гораздо интенсивней, чем полагали физики в 1929 г.

Поглощение частиц и фотонов высокой энергии рассмотрим в главах 7 и 10.

Глава 3

ПРИРОДА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Гамма-лучевая гипотеза

На первом этапе исследования космических лучей большинство ученых было убеждено, что эти лучи представляют собой фотоны колоссальной энергии, не встречавшейся в прежних экспериментах. Например, в немецкой научной литературе до 1929 г. космические лучи обычно назывались «ультра-гамма»-излучением. Причина этого совершенно ясна. Наиболее проникающим излучением, известным в то время, были, помимо космических лучей, γ -лучи, испускаемые радиоактивными веществами. Средний свободный пробег фотонов в воздухе составляет сотни метров, тогда как пробег β -частиц тех же энергий равен всего нескольким метрам, а пробег α -частиц еще меньше.

Теоретические расчеты того времени, основанные на предположении о том, что энергичное γ -излучение поглощается преимущественно за счет комптоновского рассеяния, предсказывали увеличение среднего свободного пробега с ростом энергии фотонов. Предсказание о том, что энергичные фотоны в то же время будут наиболее проникающими, получило подтверждение*.

Далее, опыты по поглощению в атмосфере и в воде, выполненные Гессом, Кольхёрстером, Милликеном, Регенером и другими, показали (см. рис. 5 и 6), что космические лучи — самое проникающее из всех известных излучений. Отсюда был сделан естественный вывод: косми-

ческие лучи обладают большей энергией, чем наиболее энергичные γ -лучи. Некоторые физики для проверки теории эффекта Комптона в той области энергий, где он не проверялся экспериментально, оценили энергию гипотетических фотонов космических лучей по виду кривой поглощения. По их оценкам, космические лучи представляют собой смесь фотонов с энергиями от 20—30 до нескольких сотен Мэв. Эта оценка легла в основу идеи, выдвинутой в 1928 г. Милликеном и вызвавшей в свое время многочисленные толки и обсуждения. Милликен предположил, что космические лучи возникают за счет энергии, освобождаемой при синтезе тяжелых элементов из первоначального водорода, распределенного во Вселенной.

Гипотеза Милликена

Как мы видели в главе 2, пучок высокоэнергичных фотонов, обладающих одной и той же энергией и движущихся в одном и том же направлении через вещество, поглощается экспоненциально (см. рис. 10). Кривая поглощения характеризуется средним свободным пробегом, величина которого для данного поглотителя зависит от энергии фотонов. Но даже если допустить, что фотоны космических лучей обладают одной и той же энергией, то их кривая поглощения все равно не описывалась бы простой экспоненциальной зависимостью. Дело в том, что космические лучи идут не параллельным пучком, а падают на атмосферу по всем направлениям. Учесть этот эффект несложно, и были получены кривые поглощения для фотонов, приходящих по всем направлениям, для различных частных значений среднего свободного пробега.

Милликен заметил, что реальная кривая поглощения космических лучей не соответствует ни одной из этих кривых. Однако сумма кривых поглощения для трех групп фотонов со средним свободным пробегом соответственно в 300, 1250 и 2500 г/см² довольно хорошо согласуется с реальной кривой. Пользуясь теорией эффекта Комптона, данной Дираком (работы Клейна, Нишины и Тамма к тому времени еще не были опубликованы), Милликен получил для этих групп фотонов значения энергии, равные соответственно 26, 110 и 220 Мэв. На основании

* Теория эффекта Комптона была опубликована в 1929 г. О. Клейном и И. Нишиной. Предварительная и менее точная теория была предложена П. Дираком в 1926 г. (Англия). — Прим. автора. Теория эффекта Комптона была разработана также и советским ученым И. Е. Таммом. — Прим. перев.

этих расчетов Милликен сделал вывод, что космические лучи представляют собой в основном смесь фотонов указанных энергий.

Для того чтобы объяснить, откуда берутся фотоны именно таких энергий, приходящие из любой области неба в одинаковых количествах, Милликен выдвинул следующую гипотезу. Межзвездное пространство заполнено сильно разреженным газообразным водородом. В этом газе происходит спонтанный процесс синтеза атомов более тяжелых элементов. Например, четыре атома водорода могут соединиться и образовать атом гелия. Атом гелия весит немного меньше четырех атомов водорода (около $4,8 \cdot 10^{-26}$ грамма). В соответствии с принципом Эйнштейна о взаимосвязи массы и энергии это означает, что при образовании атома гелия из четырех атомов водорода освобождается энергия, равная произведению величины $4,8 \cdot 10^{-26}$ на квадрат скорости света *. Это количество освобожденной энергии в обычных единицах энергии составляет 27 Мэв. Величина 27 Мэв в пределах экспериментальных ошибок как раз совпадает с энергией первой из трех групп фотонов, обнаруженных в космическом излучении. На этом основании Милликен заключил, что эти фотоны возникают в процессе синтеза гелия в межзвездном пространстве.

Воодушевленный успехом, Милликен попытался аналогично объяснить происхождение и двух других групп фотонов. Эти попытки оказались удивительно успешными. К наиболее распространенным элементам во Вселенной относятся азот и кислород. Один атом азота легче четырнадцати атомов водорода на величину около $1,8 \cdot 10^{-25}$ грамма. Используя этот дефект массы, можно вычислить, что при слиянии четырнадцати атомов водорода в один атом азота освобождается энергия в 100 Мэв. Аналогично при синтезе атома кислорода из шестнадцати атомов водорода освобождается около 120 Мэв энергии. Эти значения близки между собой и довольно хорошо согласуются с величиной энергии фотонов второй группы. Совершенно естественно, Милликен пришел к выводу, что фотоны этой группы есть результат синтеза более тяжелых элементов, а именно азота и кислорода. Но и это еще не все. Оказалось, что при синтезе

из двадцати восьми атомов водорода одного атома другого распространенного элемента, кремния, освобождается энергия, очень близкая к энергии фотонов третьей группы. Эти совпадения, оказавшиеся совершенно случайными, убедили Милликена в том, что космические лучи — это «первый крик» атомов, которые непрерывно рождаются в мировом пространстве.

Эксперименты Боте и Кольхёрстера

После работ Милликена на некоторое время преобладающим стало мнение о том, что космические лучи — это фотоны очень больших энергий. Хотя время от времени физики выражали сомнение в этом, но серьезных возражений такой точке зрения не было до 1929 г., когда немецкие физики Боте и Кольхёрстер опубликовали свою работу «О природе излучения из мирового пространства». В этой статье ученые представили свои эксперименты и полученные на их основе выводы. Результаты Боте и Кольхёрстера стали поворотным пунктом в истории изучения космических лучей.

Такие эксперименты стали возможны благодаря изобретению прибора для счета отдельных частиц космического излучения. Электроскопы, которые использовались в ранних работах по космическим лучам, регистрировали только суммарную ионизацию, создаваемую большим числом частиц за сравнительно длительное время. Они не позволяли регистрировать отдельные частицы, поскольку прохождение одной частицы через электроскоп вызывает слишком малое смещение листочков электроскопа. Были уже, конечно, и приборы для регистрации отдельных ионизирующих частиц. В течение многих лет физики применяли камеру Вильсона, о которой уже шла речь, и «считали» α -частицы по крохотным вспышкам, или *сцинтилляциям*, возникающим при попадании α -частиц на флюоресцирующий экран.

Кроме того, Ганс Гейгер из Германии во время работы в лаборатории Резерфорда в Манчестерском университете принял участие в разработке электрического счетного устройства, известного под названием *острийного счетчика*. Основной деталью этого счетчика служит тонкий заостренный стержень, окруженный металлическим корпусом (рис. 11). Батарея или другой источник напря-

* См. Приложение IV.

жения поддерживает стержень под некоторым электрическим потенциалом относительно корпуса. Пока разность потенциалов меньше определенного критического значения (обычно около 1000 вольт, эта величина зави-

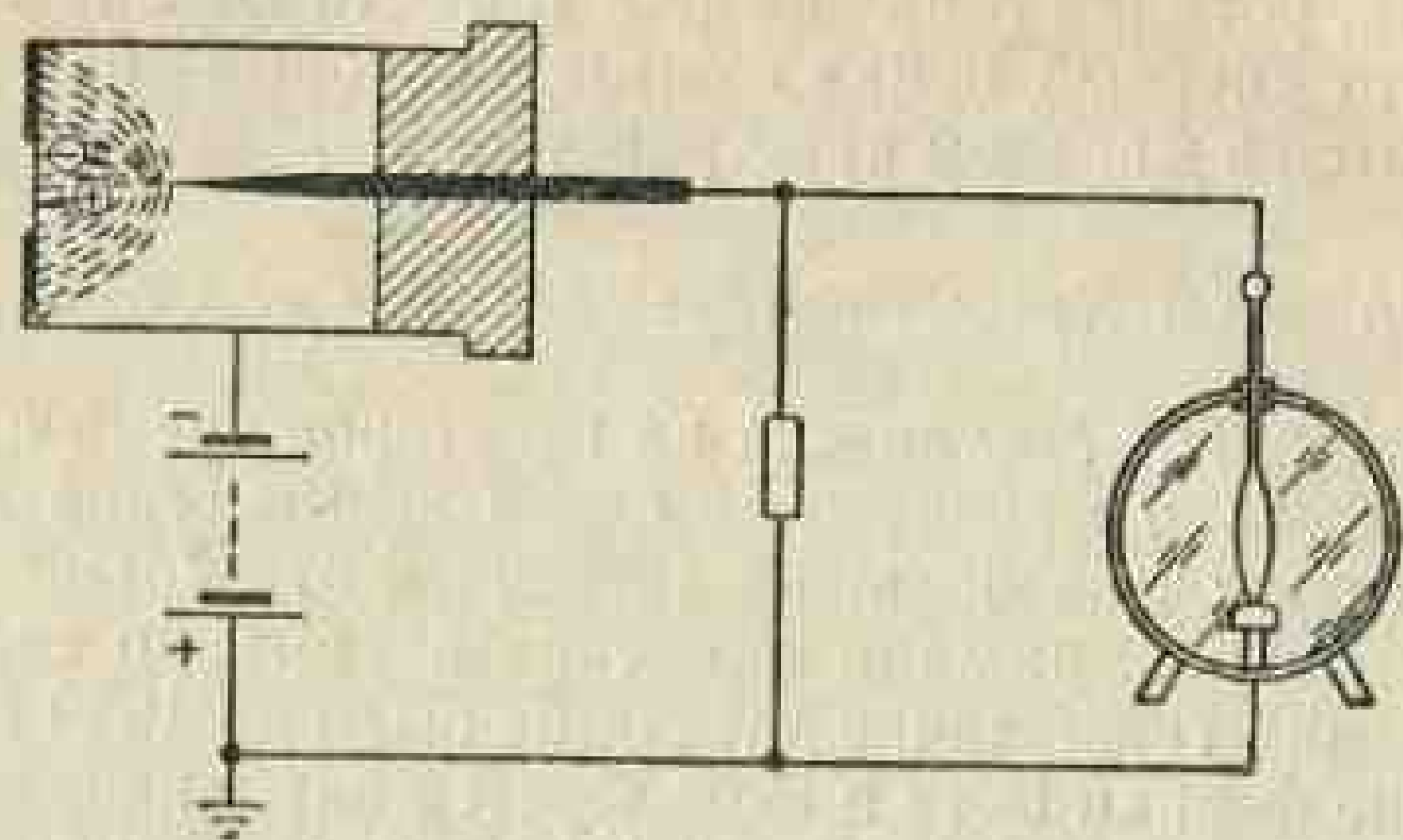


Рис. 11. Счетчик частиц, применявшийся в ранних опытах по радиоактивности. Счетчик состоит из металлического корпуса, в котором на изоляторе укреплен заостренный стержень. Ионизирующие частицы попадают внутрь корпуса через окошко перед острием. Окошко закрыто тонкой фольгой для того, чтобы счетчик мог работать с разными газами и при разных давлениях. Корпус счетчика соединяется с отрицательным полюсом батареи высокого напряжения. Положительный полюс батареи заземляется. Стержень, соединенный с электроскопом, заземляется через большое сопротивление. Таким образом, стержень относительно корпуса заряжен положительно. Когда в счетнике происходит разряд, то проволочки электроскопа внезапно расходятся. Затем проволочки довольно быстро возвращаются в исходное положение по мере стекания заряда через сопротивление в землю.

сит от конструкции счетчика и от давления газа), электрическое поле просто увлекает положительные ионы к отрицательно заряженным стенкам, а отрицательные ионы (электроны) к положительно заряженному острию, точно так же, как это происходит в обычном электроскопе.

Положительные и отрицательные ионы движутся — или, как говорят, дрейфуют — довольно медленно, поскольку на своем пути они сталкиваются с молекулами газа. Но при увеличении разности потенциалов выше критического значения вблизи острия, где напряженность электрического поля наибольшая, возникает совершенно новое явление. За короткие интервалы времени между

двумя соударениями некоторые электроны приобретают здесь кинетическую энергию, достаточную для ионизации молекул газа. При этом возникают новые электроны, которые в свою очередь, ускоряясь на пути к острию, ионизуют встречные молекулы газа. Таким образом, создается лавина ионов. Газ внезапно приобретает большую электрическую проводимость, в нем возникает разряд. Этот процесс умножения числа электронов и составляет основную ценность такого счетчика. Небольшое количество ионов, образованное одной ионизирующей частицей, приводит к разряду в счетчике. А разряд уже можно легко зарегистрировать, например, при помощи электроскопа Вульфа, включенного так, как показано на рис. 11.

Однако ни один из перечисленных приборов не был приспособлен для исследования космических лучей. Камера Вильсона сложна в эксплуатации и чувствительна только в течение малой доли секунды во время каждого расширения.

Сцинтилляционные счетчики регистрируют только частицы с гораздо большей ионизирующей способностью, чем большинство частиц в космических лучах. Острийный счетчик обладал малой стабильностью. Кроме того, его нельзя сделать большего размера, поэтому он не получил широкого применения в исследованиях излучения такой малой интенсивности, как космические лучи.

Наконец в 1929 г. был изобретен прибор, который стал одним из основных орудий экспериментальной физики двадцатого столетия. Это счетчик, который стал называться по имени своих изобретателей — Гейгера и его ученика Мюллера — счетчиком Гейгера—Мюллера (или сокращенно «Г—М-счетчик»). Г—М-счетчик состоит из металлической трубки, вдоль оси которой натянута тонкая металлическая нить (рис. 12). Трубка откачивается и наполняется газом под давлением около одной десятой доли атмосферы. Во время работы на нити поддерживается положительный потенциал относительно стенок трубки. Принцип работы Г—М-счетчика такой же, как острийного счетчика, т. е. в нем происходит *каскадный процесс*, в котором даже образование одной пары ионов вызывает разряд. Рабочее напряжение счетчика обычно выбирается в интервале от 1000 до 1500 вольт. Счетчик чувствителен практически во всем объеме, его просто из-

готовить; он гораздо более надежен в работе, чем острый счетчик. Г—М-счетчик может иметь самые раз-

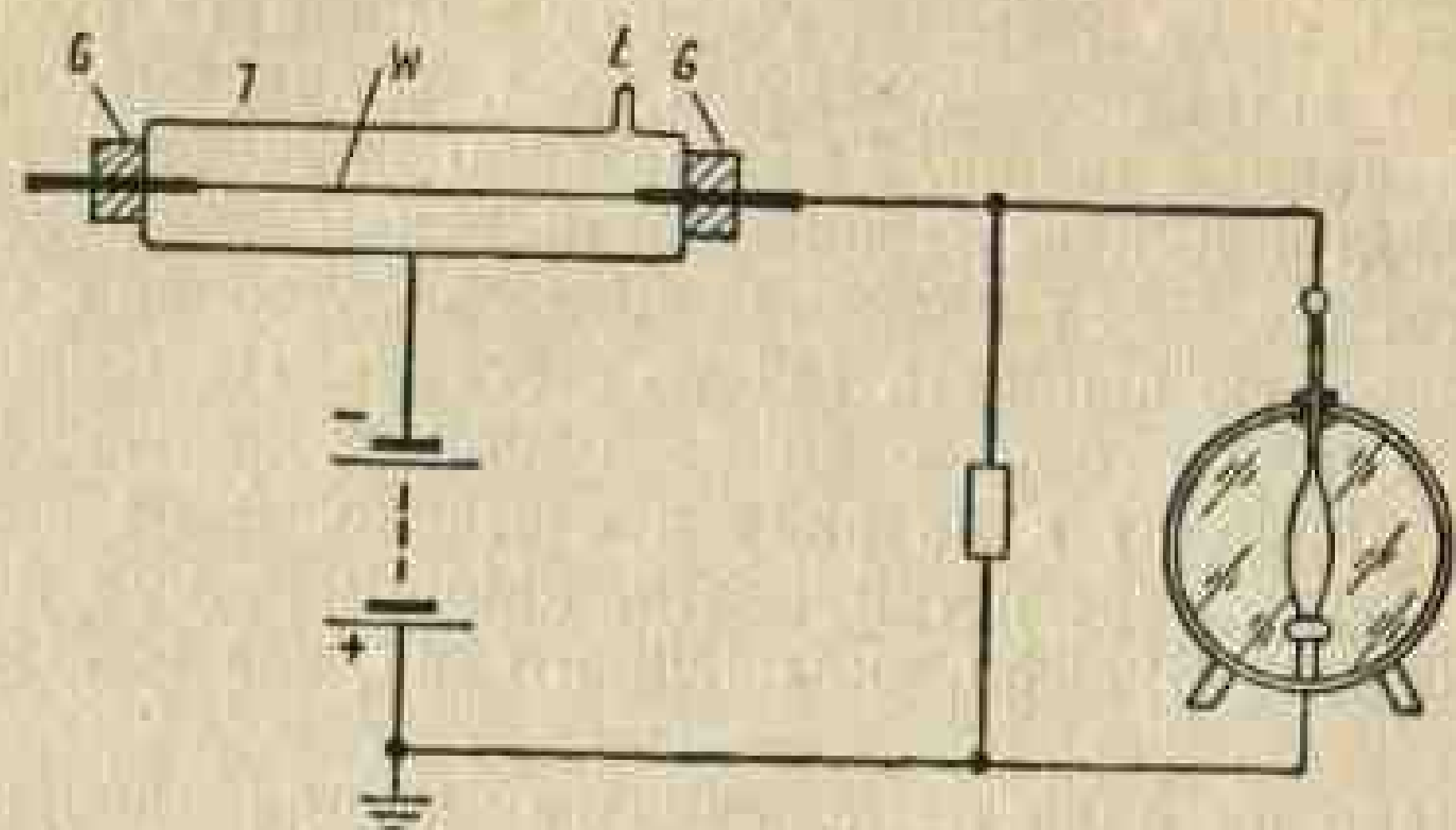


Рис. 12. Счетчик Гейгера — Мюллера. *T* — металлическая трубка; *G* — стеклянные изоляторы; *W* — тонкая проволока; *E* — отросток для откачивания и наполнения трубки. Электрическая схема включения счетчика подобна схеме, приведенной на рис. 11.

личные размеры: вплоть до десятка сантиметров в диаметре и нескольких метров в длину.

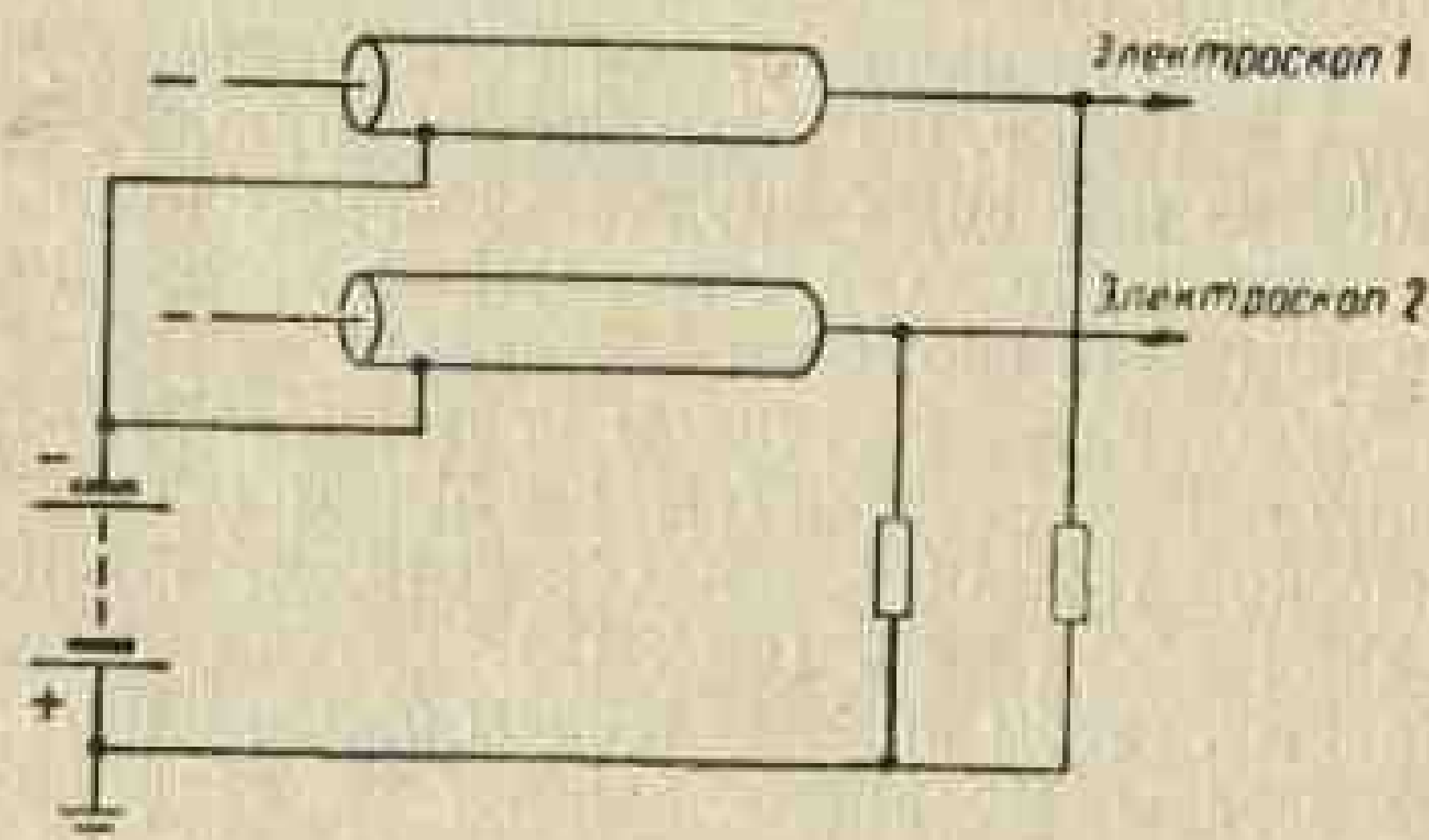


Рис. 13. Схема опытов Боте и Кольхёрстера.

В своих опытах по изучению космических лучей Боте и Кольхёрстер использовали два Г—М-счетчика, каждый из которых был соединен с электроскопом. Они заметили, что в счетчиках, помещенных один над другим

на небольшом расстоянии (рис. 13), разряды часто происходят одновременно. Эти одновременные *разряды* или *совпадения* не могли быть случайными или не всегда были случайными, поскольку при увеличении расстояния между счетчиками частота совпадений уменьшалась.

В принципе совпадение в счетчиках мог вызвать фотон, испытавший дважды комптоновский эффект (рис. 14, *a*). Вероятность одного комптоновского рассеяния в стенке или газе счетчика очень мала, вероятность же испытать дважды комптоновское рассеяние исчезающе мала. Боте и Кольхёрстер пришли к совершенно правильному выводу о том, что наблюдаемые совпадения вызваны прохождением одной и той же заряженной частицы через оба счетчика (рис. 14, *b*). Кроме того, этими частицами не могли быть обычные α - или β -лучи, потому что они поглотились бы в стенках счетчика (1 мм цинка).

Этот результат сам по себе еще не противоречит точке зрения о том, что *первичное излучение*, т. е. космическое излучение, падающее на атмосферу из мирового пространства, состоит из высокоэнергичных фотонов. Поскольку фотоны испытывают эффект Комптона в атмосфере, то наблюдаемые ионизирующие частицы могут быть электронами отдачи в этом процессе. Считалось, что энергия гипотетических первичных фотонов лежит, как уже упоминалось, в пределах от 20—30 до нескольких сот

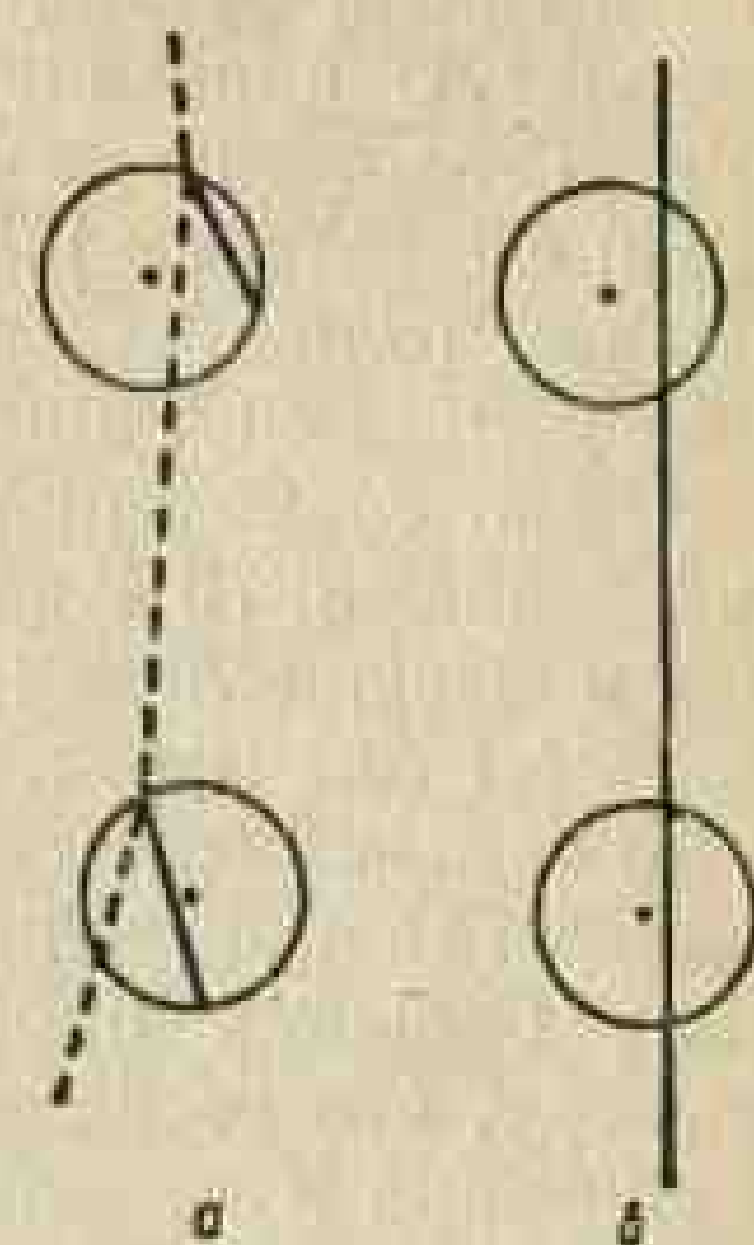


Рис. 14. Совпадения, вызываемые фотонами и заряженными частицами: *a* — фотон создает один комптоновский электрон в верхнем счетчике, другой — в нижнем счетчике. Обычно вероятность каждого комптоновского соударения порядка 5%. Это означает, что число импульсов, соответствующих комптоновским электронам, в каждом счетчике равно примерно одной двадцатой числа фотонов, пересекающих счетчик. Поэтому число совпадений составляет приблизительно

$$0,25\% \left(\frac{1}{20} \times \frac{1}{20} = \frac{1}{400} \right)$$

числа фотонов, пересекающих оба счетчика; каждая частица *b*, — пересекающая оба счетчика, вызывает совпадения.

Мэв. Электроны отдачи, созданные такими фотонами, могли иметь энергию, более чем достаточную для проникновения сквозь стенки Г—М-счетчика. Чтобы проверить такую возможность, Боте и Кольхёрстер поместили золотую пластинку толщиной 4,1 см между счетчиками. (Золото из-за большой плотности является хорошим поглотителем.) Теперь только частицы с пробегом, большим толщины золотой пластины 4,1 см, могли пройти через оба счетчика и вызвать совпадение. Оказалось, что число совпадений уменьшилось лишь на 24%. Другими словами, 76% заряженных частиц, присутствующих в космических лучах на уровне моря, способны пройти сквозь 4,1 см золота. Результат был поразительный. Даже по самым щедрым оценкам, только малая доля электронов отдачи в любой точке атмосферы могла бы иметь такой большой пробег. Боте и Кольхёрстер пришли к выводу, что господствующие представления о природе космических лучей ошибочны и что *первичное космическое излучение состоит скорее всего не из фотонов, а из заряженных частиц.*

Фотоны или заряженные частицы?

Таким образом, кроме общепринятой в то время точки зрения о том, что космические лучи — это фотоны сверхвысоких энергий, появилось предположение Боте и Кольхёрстера о том, что космические лучи — это заряженные частицы. Рассмотрим, какие следствия вытекают из этих двух взаимно исключающих гипотез. Вспомним также, что в 1929 г. физики считали, что фотоны поглощаются только в результате комптоновского рассеяния, а заряженные частицы тратят свою энергию лишь на ионизацию. (Для простоты будем считать, что космические лучи идут вертикально вниз, хотя в действительности они приходят со всех направлений.)

1. Вблизи уровня моря кривая поглощения космических лучей напоминает кривую поглощения фотонов, имеющих средний свободный пробег около 300 г/см^2 воздуха или воды. Поэтому для простоты можно допустить, что космические фотоны на уровне моря обладают одинаковой энергией, соответствующей этому пробегу. Для фотонов со средним свободным пробегом 300 г/см^2 воздуха или воды расчеты на основе теории комптон-эффек-

та* дают энергию приблизительно 60 Мэв. Предположим для дальнейшего упрощения, что при комптоновском рассеянии фотон исчезает, передавая всю свою энергию электрону. Тогда каждый электрон отдачи имел бы энергию 60 Мэв. Такой энергии, по расчету, соответствует пробег 30 г/см^2 воздуха или воды.

В любой точке атмосферы (или другого поглотителя) излучение представляет собой смесь из фотонов и электронов. Это показано на рис. 15, а, где пунктирные линии изображают фотоны, а сплошные — электроны отдачи. (Предполагается, что электрон отдачи движется в том же направлении, что и фотон, передавший ему свою энергию.)

Допустим далее, что горизонтальная линия с отметкой «0» соответствует уровню моря; линия «100» — глубине 100 г/см^2 (около 1 километра) ниже уровня моря и линия с отметкой «200» — глубине 200 г/см^2 (2 километра) ниже уровня моря. Посмотрим теперь, каковы должны быть относительные интенсивности предполагаемых космических лучей на этих трех уровнях. Как видно из рисунка, на уровне моря есть 6 электронов отдачи, на глубине 100 г/см^2 — 4 и на глубине 200 г/см^2 ниже уровня моря — 3. Таким образом, интенсивности на трех уровнях, измеренные электроскопом или отдельным счетчиком, относятся как 6:4:3. Эти числа приближенные, поскольку выбранное число исходных фотонов (60) слишком мало.

Для большего начального числа фотонов, скажем 6000, получается отношение, равное 600:430:336. Эти значения отмечены точками на кривой поглощения, показанной на рис. 16. Заметим, что на самом деле эта «кривая поглощения космических лучей» дает не число первичных фотонов на разных глубинах, а число электронов отдачи. Скорость счета Г—М-счетчика зависит только от числа *заряженных частиц*, проходящих через прибор.

2. Если же первичное космическое излучение состоит из заряженных частиц, то эти частицы должны иметь разные начальные энергии. Если бы энергия была одинаковой, то они имели бы почти одинаковые пробеги и

* Здесь имеется в виду теория, развитая Клейном и Нишиной. Это важно помнить, сравнивая оценку энергии, приведенную здесь, с оценками, использованными Милликенем (стр. 31).

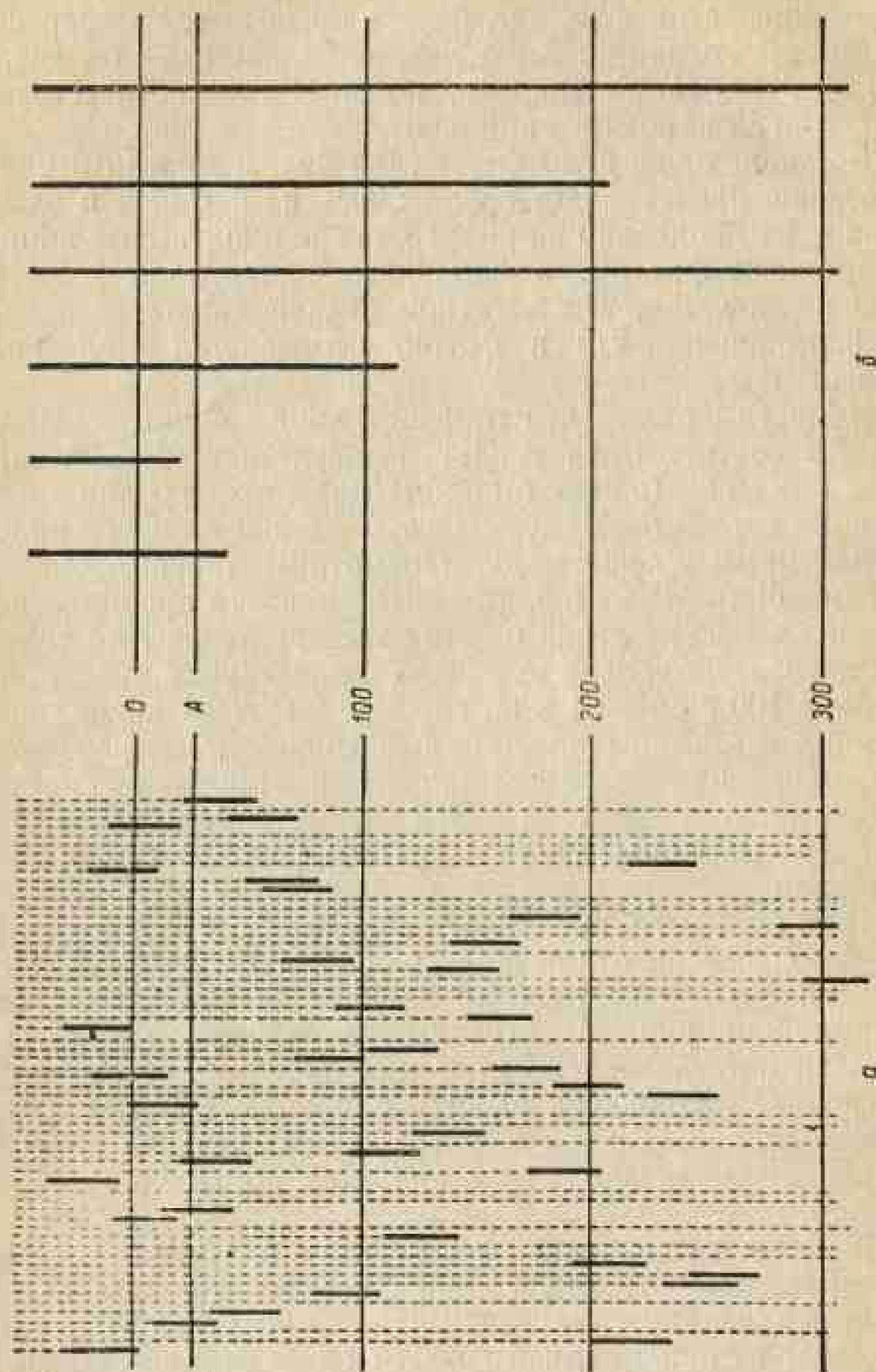


Рис. 15. Поведение фотонов (а) и заряженных частиц (б) в веществе (см. текст).

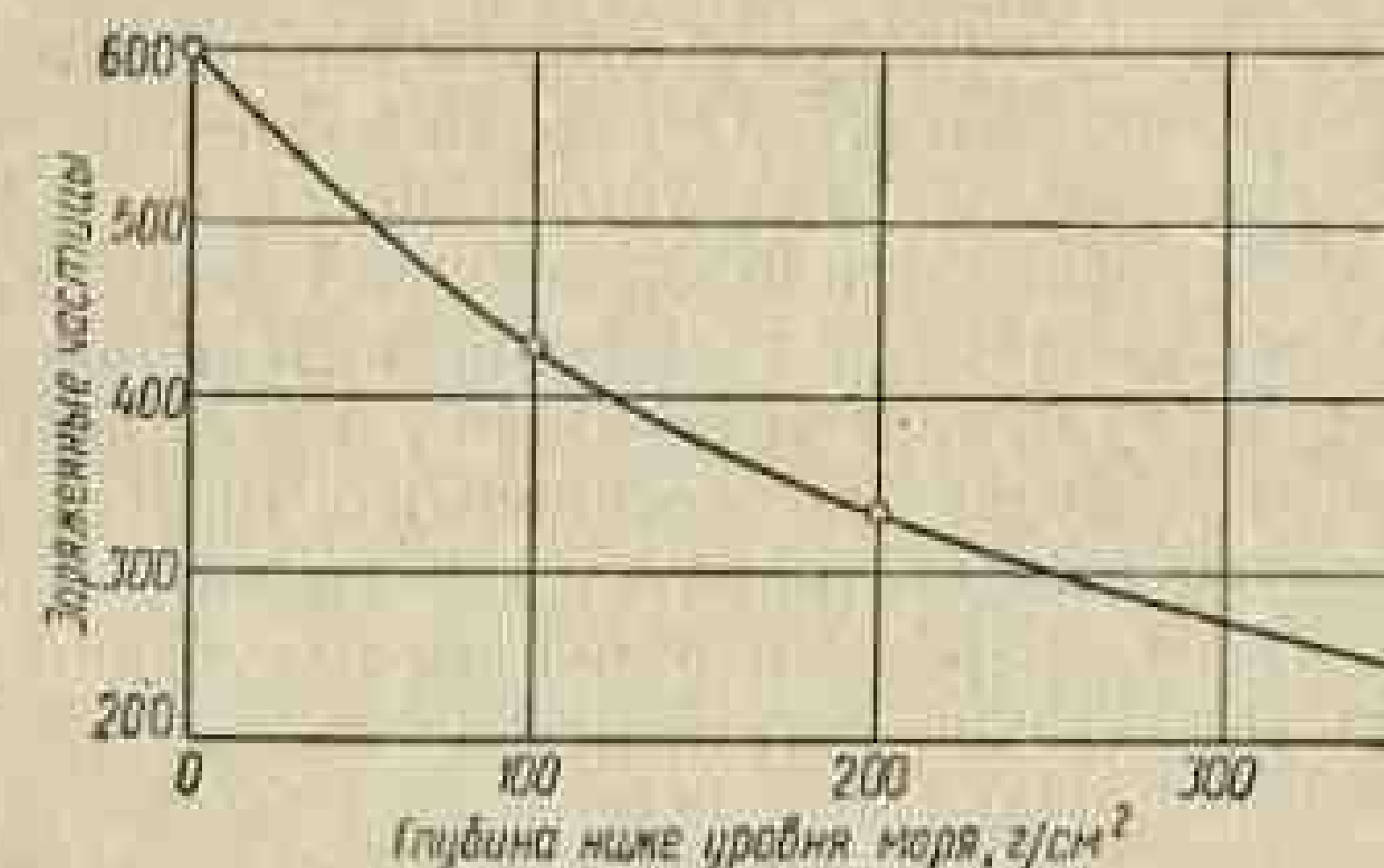


Рис. 16. Число заряженных частиц на разных глубинах ниже уровня моря. Как объясняется в тексте и иллюстрируется рис. 15, это число может быть при соответствующем энергетическом распределении одинаковым для излучения, состоящего из фотонов, и для излучения, состоящего из заряженных частиц.

отдельного Г—М-счетчика совпадают на любом заданном уровне с показаниями в первом случае. Другими словами, кривая поглощения корпускулярного излучения совпадает с кривой поглощения фотонов. Состав космического излучения, прошедшего некоторый слой вещества, по двум гипотезам о природе первичных космических лучей должен быть совершенно различен (см. рис. 15, а и б). Однако опыты по поглощению космических лучей, выполненные до 1929 г., не позволяли сделать выбор между двумя гипотезами. Большое значение опытов Боте и Кольхёрстера как раз и состояло в том, что тогда впервые такой выбор стал возможен. Если все первичные космические лучи — это фотоны с энергией 60 Мэв, то при наличии между счетчиками пластинки золота толщиной 4,1 см совпадений не должно быть; электроны с энергией 60 Мэв не могут пройти такой слой золота. Если же первичные космические лучи — заряженные частицы, то, для того чтобы проникать сквозь атмосферу и воду, они

должны обладать энергией, гораздо большей, чем 60 Мэв. А тогда они способны пройти и сквозь 4,1 см золота и вызвать наблюдаемые совпадения в счетчике.

Правда, сторонники фотонной гипотезы считали, что космические лучи — это смесь фотонов разных энергий, в том числе и фотонов с энергией около 60 Мэв. Поэтому какая-то доля электронов отдачи могла бы пройти сквозь золотую пластинку. Основная идея рассуждений была следующая. Если некоторый поглотитель разместить над электроскопом или одиночным Г—М-счетчиком, то это вызовет небольшое изменение интенсивности при любом составе первичных частиц. Но тот же поглотитель, помещенный между двумя счетчиками в опытах на совпадения, будет уже действовать совершенно по-разному в зависимости от природы первичного излучения. В случае первичных фотонов поглотитель снижает число совпадений очень сильно (хотя некоторое количество комптоновских электронов и обладает достаточной энергией, чтобы пройти сквозь него). В случае же заряженных частиц изменение числа совпадений будет небольшим.

Для иллюстрации вернемся опять к рис. 15. Допустим, что два тонкостенных счетчика помещены один над другим на уровне моря, без всякого поглотителя между ними. Из рис. 15, а, б видно, что на уровне моря (уровень «0») имеется по шесть ионизирующих частиц, способных пройти через оба счетчика и вызвать совпадение. Посмотрим теперь, что произойдет, если между счетчиками поместить поглотитель, эквивалентный, например, 25 г/см² воды. Это значит, что один из счетчиков будет находиться на уровне «А», и совпадение вызовут лишь те частицы, которые проходят через оба уровня — «0» и «А». Сначала предположим, что первичные космические лучи — это заряженные частицы. Тогда из шести частиц, наблюдавшихся на уровне «0», пять достигнут уровня «А» (см. рис. 15, б), т. е. число совпадений уменьшится лишь на одну шестую. Теперь допустим, что первичные космические лучи — фотоны. Из шести электронов отдачи только один дойдет от уровня моря до уровня «А» (см. рис. 15, а). Другими словами, поскольку ни остановившиеся в поглотителе электроны, ни появившиеся в нем комптоновские электроны не могут вызвать совпадений в счетчике, то в этом случае поглотитель уменьшит число совпадений в шесть раз.

Конечно, это предельно упрощенная картина, но она правильно отражает качественный характер явления. Имеется одно серьезное возражение против выводов Боте и Кольхёрстера. Истолкование их экспериментов основано на совершенно произвольном предположении, что хорошо известные свойства электронов и фотонов низких энергий справедливы и в области больших энергий. Сами экспериментаторы отлично понимали, что на таком пути могут встретиться подводные камни. Например, фотоны космических лучей могли бы иметь гораздо большие энергии, чем те, которые были вычислены по их среднему свободному пробегу на основании уравнения Клейна и Нишины. Ведь правильность этого уравнения была установлена лишь для области энергий порядка 1 Мэв. В таком случае и вторичные электроны могли бы иметь большие пробеги, и большинство из них могло бы пройти сквозь золотую пластинку между счетчиками. Тогда число совпадений было бы практически тем же, что и для первичного корпускулярного излучения.

По этой причине было бы ошибкой считать опыты Боте и Кольхёрстера доказательством корпускулярной природы космических лучей. Оказалось, что обе рассмотренные гипотезы одинаково далеки от истины. Космические лучи — действительно поток заряженных частиц, но ведут себя эти частицы совершенно не так, как считали в то время.

Тем не менее опыты Боте и Кольхёрстера стали важнейшей вехой в истории изучения космических лучей. Не так уж важно, как они интерпретировали свои экспериментальные результаты. Гораздо важнее то, что это была первая попытка экспериментального изучения природы космических лучей. Результаты их опытов не подтвердили общепринятых тогда представлений о фотонной природе космических лучей и оставили этот вопрос открытым.

Глава 4

ОЗАДАЧИВАЮЩИЕ ПОХОДКИ

Моя собственная научная жизнь в течение многих лет настолько тесно связана с историей изучения космических лучей, что в моем дальнейшем рассказе неизбежно будет много личного.

Когда я прочел статью Боте и Кольхёрстера, мне было 24 года и я уже в течение года работал ассистентом у профессора Антонио Гарбассо, директора физической лаборатории Флорентийского университета в Италии. Среди моих коллег были Джильберто БернардINI и Джузеппе Оккиалини, о которых еще пойдет речь в этой книге.

Ни у кого из нас тогда еще не было области постоянных научных интересов. Статья Боте и Кольхёрстера стала для нас как бы вспышкой света, осветившей новый мир, мир неожиданный, полный таинственности, никем еще не изученный.

За несколько месяцев я изготовил мои первые Г—М-счетчики, разработал новый метод регистрации совпадений (с использованием электронных ламп, рис. 17) и начал некоторые опыты.

Лето 1930 г. застало меня в Германии, в Шарлоттенбурге, где я работал в лаборатории Боте в Физико-техническом институте.

Здесь с большей точностью и некоторыми усовершенствованиями я повторил опыты Боте и Кольхёрстера. Основное усовершенствование состояло в том, что я проводил прямое сравнение числа совпадений для двух положений поглотителя. Сначала поглотитель помещался над счетчиками, а потом между ними.

По возвращении в Италию я продолжал опыты в том же направлении. Эти мои ранние эксперименты только усилили мое чувство удивления, почти благоговения пе-

ред новыми явлениями, которые только начинали вырисовываться перед нами. Я был убежден, что космические

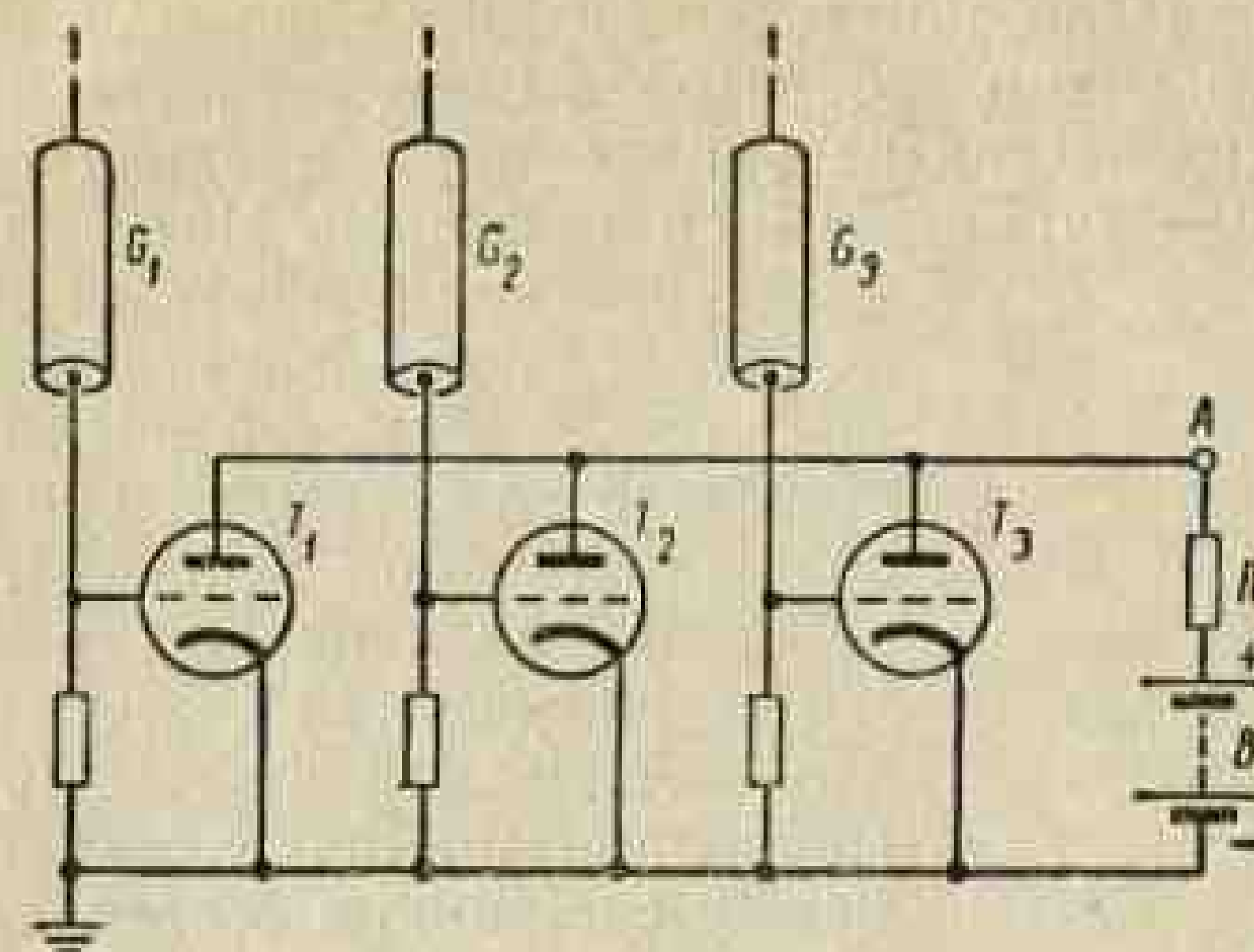


Рис. 17. Схема совпадений на электронных лампах сильно снижает число случайных совпадений, регистрируемых Г—М-счетчиками (см. текст). Во время работы ток протекает от положительного полюса батареи В через сопротивление R и три лампы T_1 , T_2 и T_3 к земле. Этот ток создает большое падение напряжения на сопротивлении, а в точке А потенциал близок к потенциалу земли. Когда в одном из счетчиков, скажем в G_1 , происходит разряд, то на сетку соответствующей лампы T_1 приходит отрицательный импульс, и лампа перестает проводить ток, который, однако, продолжает течь через лампы T_1 и T_3 . Если сопротивление R достаточно велико, то результирующий ток изменится лишь на очень малую величину. Одновременный разряд в двух счетчиках тоже не вызовет заметного изменения результирующего тока. Но если разряд произойдет во всех трех счетчиках одновременно, то все три лампы перестанут проводить ток, и ток через сопротивление R сразу же перестанет течь. Потенциал точки А скачком изменится до величины положительного потенциала батареи. Таким образом, скачок напряжения в точке А сигнализирует о том, что произошло тройное совпадение. Этот скачок можно измерить вольтметром, или он может вызвать срабатывание механического счетчика. Схема может быть приспособлена для регистрации совпадений в любом числе счетчиков.

лучи могут оказаться принципиально новым видом излучения, если только свойства фотонов и заряженных частиц не изменяются коренным образом при увеличении их энергии. Это и побудило меня провести два эксперимента, к описанию которых я перехожу.

Проникновение космических лучей сквозь свинец

Как показали опыты Боте и Кольхёрстера и подтвердили мои опыты в лаборатории Боте, значительная доля космических частиц на уровне моря проникает сквозь золотую пластинку в 4,1 см толщиной. Интересно было

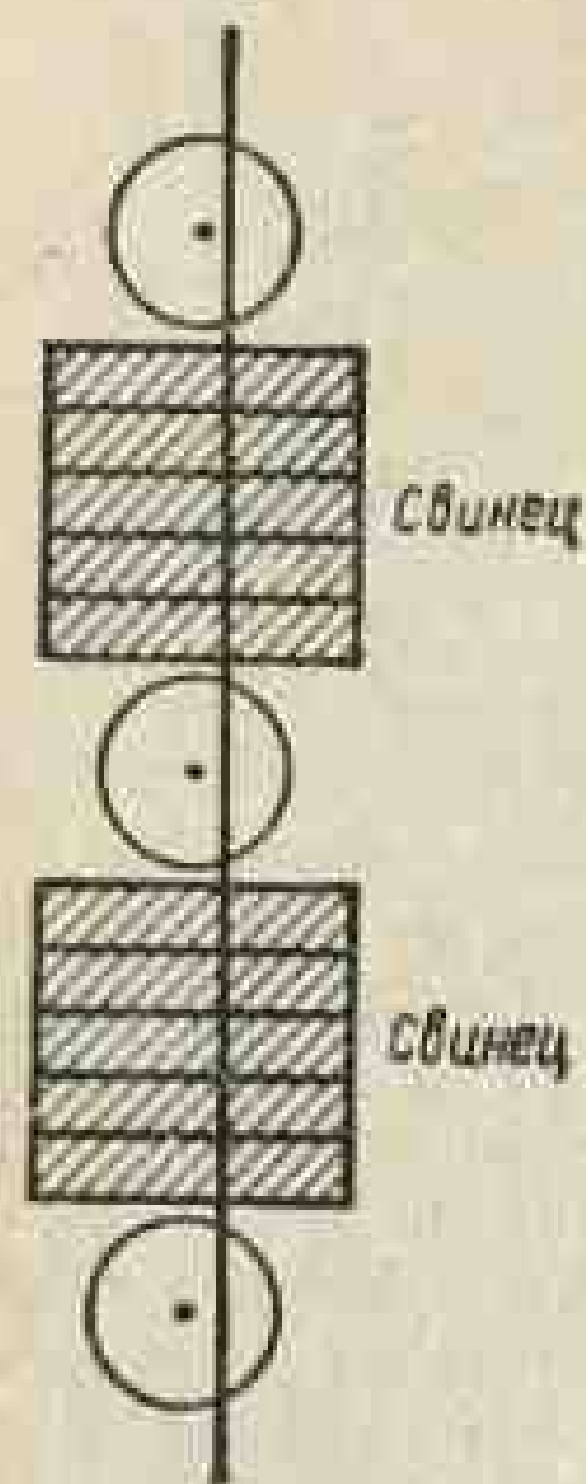


Рис. 18. Схема установки для демонстрации проникающей способности космических лучей. Число свинцовых блоков между счетчиками можно менять. Совпадения вызывают только те заряженные частицы, которые пересекают весь поглотитель.

проверить, не обладает ли случайно хоть небольшая доля этих частиц значительно большей энергией, достаточной для прохождения гораздо больших толщин вещества, например свинца толщиной в 1 метр. Я расположил три счетчика вертикально один над другим (рис. 18). Сначала суммарная толщина свинца между счетчиками составляла 25 см. Добавляя свинцовые кирпичи, я мог увеличить суммарную толщину поглотителя до 1 метра. Оказалось, что 60% космических частиц проникает через 25 см свинца, проходят и сквозь 1 метр свинца.

Это означало, что 25 см свинца поглощают меньше половины космических частиц, т. е. совсем не малая (как думали вначале), а довольно большая доля космических частиц на уровне моря имеет пробег, превышающий 1 метр свинца.

Можно представить себе, какое удивление вызвал этот результат, если вспомнить, что максимальный пробег в свинце β -лучей радиоактивных веществ составлял лишь доли миллиметра. Прежде всего независимо от своей природы частицы

космических лучей должны были обладать энергией на много порядков большей, чем β -лучи. Энергия космических частиц должна была составлять миллиарды электронвольт. Такая колоссальная энергия не могла выделяться при синтезе тяжелых элементов. Неопровержимые эксперименты заставили многих физиков с огорче-

нием отказаться от красивой теории происхождения космических лучей, предложенной Милликеном. Да и сама гипотеза о фотонной природе космических лучей, уже поколебленная опытами Боте и Кольхёрстера, получила еще более серьезный удар.

Кстати, хочу объяснить, почему я использовал в своих опытах три счетчика, а не два, как делали раньше. Третий счетчик должен был уменьшить число случайных совпадений, т. е. таких совпадений, которые вызываются одновременным прохождением через счетчики различных частиц. Применявшаяся электронная схема (см. рис. 17) позволяла отсеять значительную часть таких случайных совпадений. Но даже при работе с этой схемой число случайных совпадений в счетчиках, разнесенных на 1 метр друг от друга, могло превышать число истинных совпадений. Вспомним, что истинное совпадение происходит тогда, когда одна и та же космическая частица пересекает оба счетчика. Если поместить между двумя счетчиками третий, то число истинных совпадений не изменится, а число случайных совпадений сильно упадет.

Вторичные эффекты космических лучей

Идея второго эксперимента возникла следующим образом. Результаты некоторых опытов как будто указывали на то, что космические частицы иногда создают вторичные ионизирующие частицы. Наиболее значительные эксперименты в этой области провел в 1929 г. советский физик Д. В. Скобельцын. Работая с камерой Вильсона, помещенной в магнитное поле, Скобельцын сфотографировал следы отрицательных частиц с необычно большой энергией. Энергия этих частиц, вычисленная по кривизне следов в магнитном поле (см. главу 5), оказалась значительно больше энергии обычных β -лучей. Скобельцын предположил, что эти следы, вероятно, оставлены электронами отдачи, образованными при комптоновском рассеянии космических фотонов.

Скобельцын обратил внимание также и на то, что на его фотографиях встречаются два, а в одном случае даже три следа высокоэнергичных частиц. Этот факт можно было бы объяснить тем, что электрон отдачи испытывает одно или несколько соударений вблизи камеры Вильсо-

на, причем в этих соударениях испускаются вторичные частицы достаточно высокой энергии, способные проникнуть в камеру.

Я решил исследовать, действительно ли космические лучи образуют вторичные частицы в веществе. Для этого

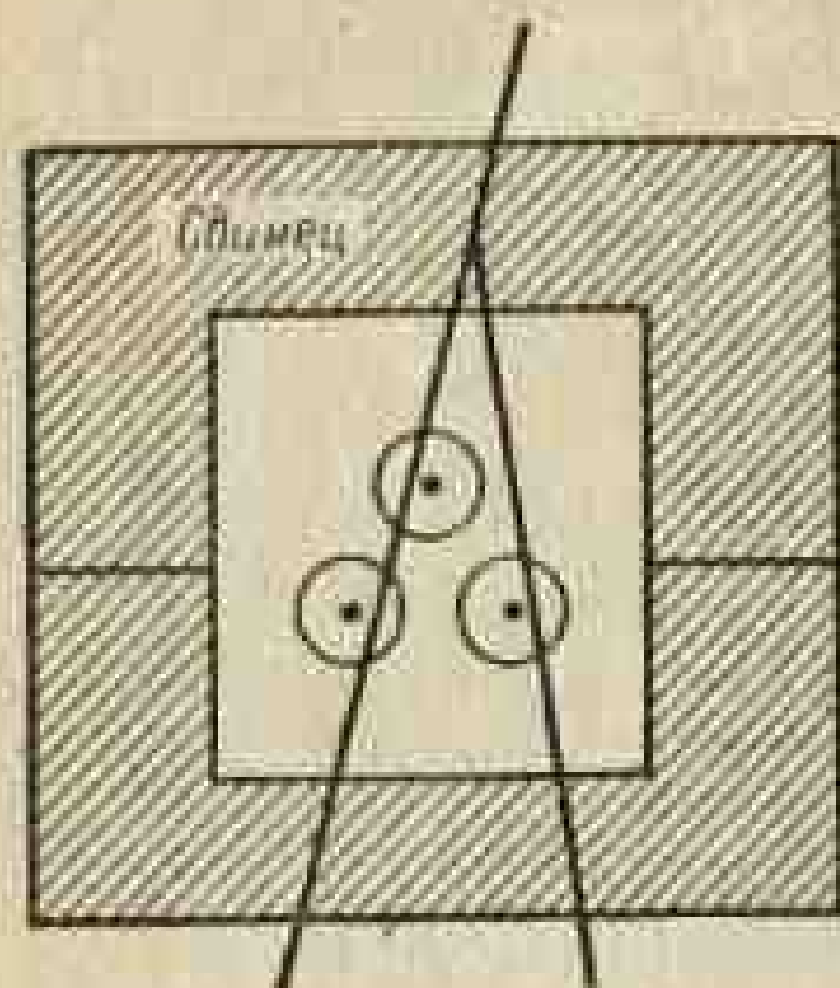


Рис. 19. Схема установки из Г-М-счетчиков, расположенных по углам треугольника. Эта установка применялась в первых опытах, показавших образование космическими лучами вторичных частиц.

три Г-М-счетчика были расположены треугольником (рис. 19). Одновременное срабатывание трех счетчиков не могло быть вызвано одной частицей, движущейся по прямой линии. Тем не менее эта установка, окруженная со всех сторон свинцом, регистрировала довольно большое число совпадений (около 35 совпадений в час). При удалении верхней части свинцового экрана число совпадений падало почти до нуля. Совпадения могли возникать только тогда, когда две или более ионизирующие частицы одновременно вылетали из свинца. Этот опыт самым прямым образом доказывал, что под действием космических лучей в веществе образуется вторичное ионизирующее излучение. Однако и в том случае, когда верхняя часть свинца удалялась, наблюдался небольшой остаточный эффект (примерно два совпадения в час), который я не мог тогда полностью объяснить. Позднее стало ясно, что этот эффект обусловлен образованием вторичного излучения в атмосфере (см. главу 12).

Большое число совпадений свидетельствовало об обилии вторичных частиц. Это было полной неожиданностью. Причина такого удивления среди физиков станет понятна, если вспомнить, насколько новым было тогда это явление. До того времени единственным известным процессом взаимодействия фотонов высокой энергии с веществом считался эффект Комптона. В этом процессе образуется только один электрон отдачи, поэтому эффект Комптона не может объяснить одновременного появления группы частиц в поглотителе. Два быстрых элек-

трона могли появиться, если один фотон испытал бы подряд два раза комптоновское рассеяние, но это настолько редкое событие, что им можно пренебречь. Правда, заряженные частицы выбивают электроны из атомов (в этом и состоит процесс ионизации), но эти электроны обычно обладают небольшой энергией. Только в редких случаях электрон может получить энергию, достаточную для выхода из поглотителя.

Таким образом, на основании теоретических представлений того времени нельзя было объяснить появление большого числа вторичных частиц — оно наблюдалось экспериментально. Результаты моего эксперимента показались настолько неправдоподобными редакторам научного журнала, куда я представил вначале свою статью, что они отказались ее печатать. Позже статья была принята другим журналом.

Ливни космических лучей

Дальнейшие исследования показали, что взаимодействие космических лучей с веществом сопровождается гораздо более сложными и необычными явлениями, чем можно было полагать по результатам моих опытов со счетчиками. Открытие этих явлений прежде всего было обусловлено использованием новой экспериментальной методики, которой принадлежит важнейшая роль в истории космических лучей. Речь идет об управляемой камере Вильсона.

Камера Вильсона (рис. 20) позволяет видеть следы заряженных частиц, и поэтому она служит идеальным средством детального изучения процессов взаимодействия высокоэнергичных частиц. Однако в применении к космическим лучам камера Вильсона имеет серьезный недостаток. Чтобы камера стала чувствительной к прохождению заряженной частицы, в ней необходимо произвести расширение*. Как уже упоминалось, камера Вильсона обладает чувствительностью лишь в течение

* Спустя несколько лет, в конце 30-х годов, были разработаны камеры непрерывного действия (диффузионные камеры). Однако в исследованиях космических лучей они нашли лишь очень ограниченное применение.

приблизительно 0,01 секунды во время каждого расширения. С другой стороны, космические частицы приходят сравнительно редко, около одной частицы в минуту на один квадратный сантиметр площади на уровне моря.

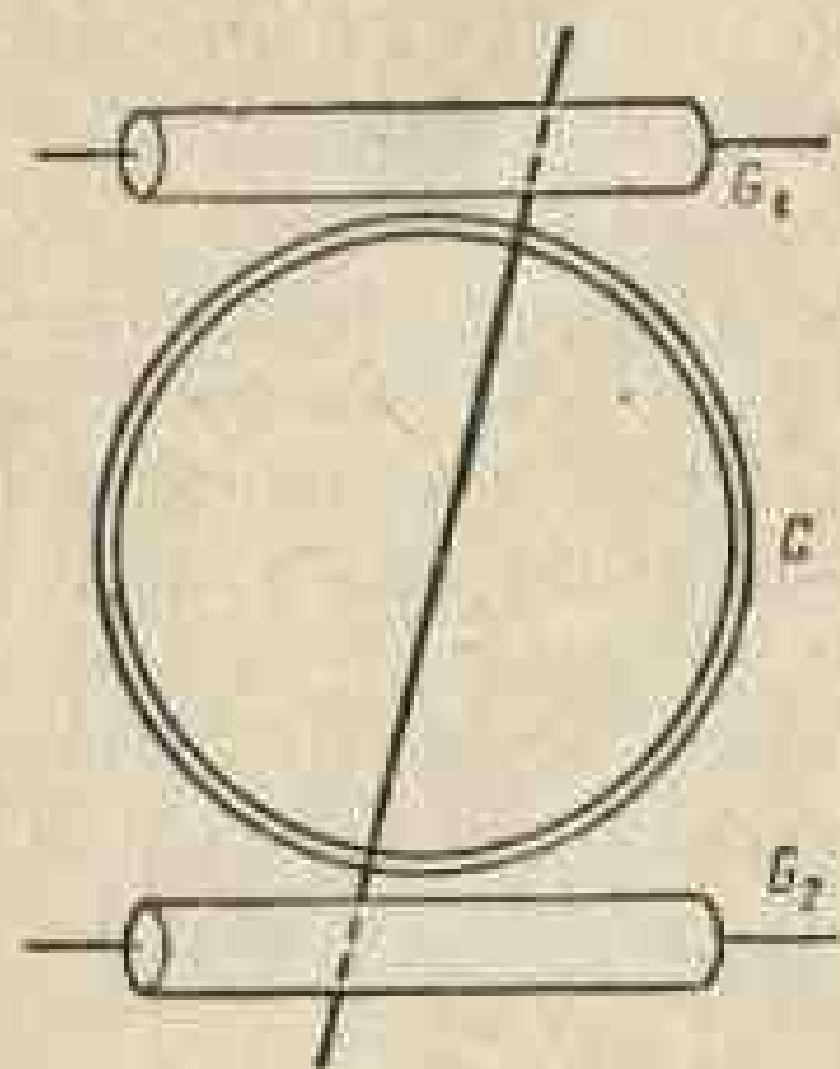


Рис. 20. Камера Вильсона, управляемая счетчиками. Совпадение вызывает космическая частица, прошедшая через два Г—М-счетчика G_1 и G_2 и камеру Вильсона C . Импульс от схемы совпадений запускает механизм расширения камеры прежде, чем пары ионов, образованные частицей, успевают диффундировать от места своего возникновения. Пар конденсируется на ионах, создавая вдоль следа частицы видимую глазом колонку капелек.

Следовательно, вероятность попадания космической частицы в течение стадии расширения очень мала. Еще меньше вероятность того, что эта частица испытает интересное нас взаимодействие как раз в тот момент, когда камера Вильсона позволит увидеть результаты этого взаимодействия.

Очевидно, если бы расширение камеры Вильсона происходило в нужное время, а именно немедленно после прохождения частицы, то число полезных срабатываний камеры резко бы возросло. Оказалось, что своевременное расширение можно осуществить при помощи схемы совпадений. Можно, например, поместить один Г—М-счетчик над камерой, а другой — под ней, включить их в схему совпадений и использовать сигнал на выходе схемы для запуска быстрого механизма расширения (см. рис. 20).

Конечно, это гораздо легче сказать, чем сделать! Первая камера, управляемая счетчиками, стала крупным техническим достижением. Она была сконструирована в 1932—1933 гг. в лаборатории Кавендиша Кембриджского университета П. Блеккетом и Д. Оккиалини. Блеккет к тому времени был уже хорошо известен своими исследованиями радиоактивности с помощью камеры Вильсона. Оккиалини, который во время работы в Италии

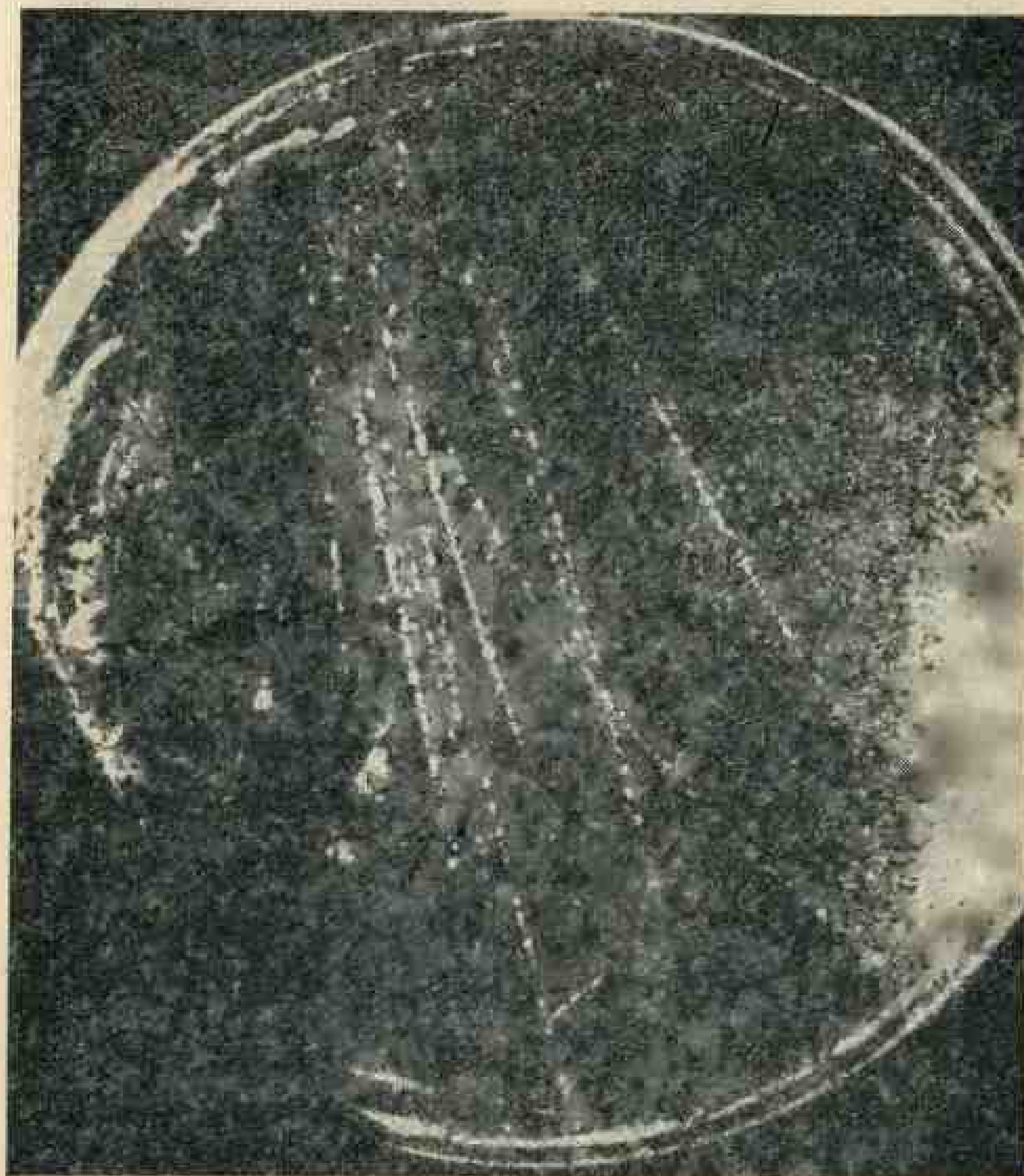


Рис. 21. Фотография камеры Вильсона, управляемой счетчиками, полученная Блеккетом и Оккиалини. Камера расположена между полюсами электромагнита. Видны шестнадцать отдельных следов вторичных частиц, одновременно попадающих в камеру. Эти частицы образовались над камерой, по-видимому, в медной обмотке магнита (не показанного на снимке). Кривизна следов вызвана наличием магнитного поля. Следы положительных частиц искривлены вправо, следы отрицательных частиц — влево. [Р. П. Блеккет и Дж. Оккиалини. *Proceedings of the Royal Society (London)*. Том A 139, 1933, стр. 699.]

познакомился с методикой Г—М-счетчиков, только начинал свою научную карьеру.

Статья Блеккета и Оккиалини (1933 г.), содержащая описание их первых наблюдений с управляемой счетчиками камерой Вильсона, стала еще одной крупнейшей вехой в истории физики космических лучей. Я вернусь к этой работе в следующих главах. Здесь я хочу упомянуть только об одном результате. На многих фотографиях видны следы группы частиц, созданных, очевидно, одной высокоэнергичной космической частицей, испытавшей взаимодействие где-то в окрестности камеры (рис. 21). Несомненно, именно такие группы частиц, или *ливни*, вызывали в моих прежних опытах совпадения в счетчиках, не расположенных на одной линии.

Выводы

Позвольте мне коротко суммировать все, что было до сих пор изложено:

1. Фотонная гипотеза не подтвердилась экспериментом.

2. Большая часть космических лучей вблизи уровня моря состоит из заряженных частиц с энергиями 1 Гэв и выше, способных проникать сквозь большие толщи вещества.

3. Космические лучи часто испытывают сложные взаимодействия, в которых рождается много вторичных частиц.

Обильное образование вторичных частиц означало, что значительная часть частиц, наблюдаемых вблизи уровня моря, возникает в атмосфере. В то время многие из нас были склонны считать наиболее проникающие частицы (способные проходить сквозь большие толщи свинца) истинным первичным космическим излучением, а более «мягкие» частицы, которые поглощались несколькими сантиметрами свинца, — вторичным излучением. Однако мы ясно представляли себе, что только очень малая доля первичных частиц может пройти через всю атмосферу, не испытав взаимодействий, а возможно, таких частиц вообще нет. Тогда все частицы вблизи уровня моря практически должны быть вторичными.

Таким образом, природа космических лучей оказалась гораздо более сложной, чем можно было себе представить. Эта проблема включает два вопроса:

1. Какова природа *первичного излучения*, падающего на границу земной атмосферы из мирового пространства?

2. Каков состав *излучения, наблюдаемого в атмосфере*?

Даже если все первичные частицы были бы одинаковыми, то ясно, что излучение в атмосфере, в большей своей части вторичное по происхождению, имело бы довольно сложный состав. Действительно, в течение следующих двух десятилетий было обнаружено, что космическое излучение в атмосфере содержит не только все ранее известные виды излучения и некоторые излучения, предсказанные теоретиками, но и очень много других, о существовании которых даже не догадывались.

Глава 5

ЗЕМЛЯ КАК МАГНИТ ДЛЯ АНАЛИЗА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Исследования космических лучей начались с полетов Гесса и Кольхёрстера. Постепенно физики изучали космические лучи на все больших и больших высотах. Шары-зонды заменили пилотируемые воздушные шары; позднее стали использоваться геофизические ракеты. В последние годы искусственные спутники и космические лаборатории вынесли счетчики и другую аппаратуру за пределы атмосферы Земли на миллионы километров в межпланетное пространство. Однако к тому времени, когда физики получили возможность непосредственно изучать первичное космическое излучение, они уже довольно много о нем знали. Значительную часть информации о космических лучах удалось собрать благодаря магнитному полю Земли.

Магнитное поле Земли напоминает поле магнитного диполя — магнитного стержня, длина которого мала по сравнению с радиусом Земли, — расположенного в центре Земли так, что северный полюс диполя смотрит на географический южный полюс, а его южный полюс — на географический северный полюс. Точнее, центр земного магнитного диполя смещен примерно на 350 километров от центра Земли, а его ось составляет угол около 11° с географической земной осью (рис. 22). Магнитное поле Земли простирается далеко за пределы атмосферы. На высоте около 2000 километров напряженность поля еще равна примерно половине его значения на поверхности Земли. Для сравнения отметим, что масса воздуха выше 35 километров составляет менее 1% массы всей атмосферы.

Таким образом, первичные космические лучи испытывают воздействие земного магнитного поля задолго до столкновения с молекулами воздуха. Если первичные космические частицы обладают электрическим зарядом, то в зависимости от знака заряда они будут отклоняться

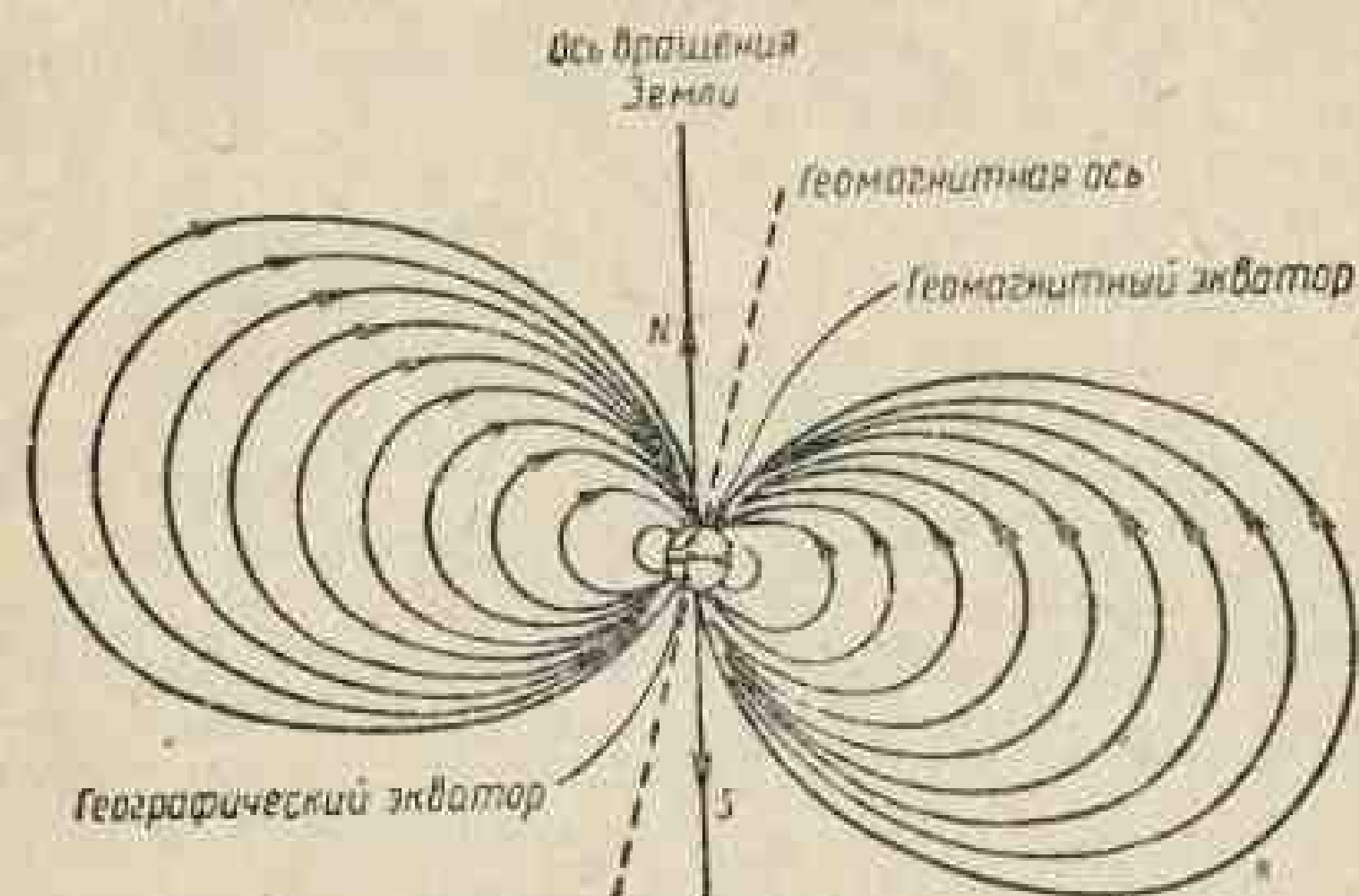


Рис. 22. Магнитное поле Земли неоднородно, т. е. магнитные силовые линии искривлены и напряженность поля изменяется от точки к точке, уменьшаясь при удалении от центра диполя. На заданном расстоянии от поверхности Земли напряженность поля наибольшая у полюсов и наименьшая у геомагнитного экватора. Средняя точка диполя не совпадает точно с центром Земли.

магнитным полем в том или ином направлении. Если же они нейтральные частицы или фотоны, то пройдут сквозь магнитное поле без отклонения. Земное магнитное поле гораздо слабее, чем поля, создаваемые электромагнитами в лабораториях, но колоссальная протяженность магнитного поля Земли компенсирует его слабость. Поэтому следует ожидать, что даже высокоэнергичные заряженные частицы должны сильно отклоняться в магнитном поле Земли.

Магнитная жесткость

Для того чтобы дальнейшее стало понятным, полезно вспомнить некоторые основные сведения о движении заряженных частиц в магнитных полях. На заряженную

частицу, движущуюся в магнитном поле, действует отклоняющая сила, направленная перпендикулярно магнитному полю и направлению движения частицы. Если магнитное поле однородно и направлено перпендикулярно

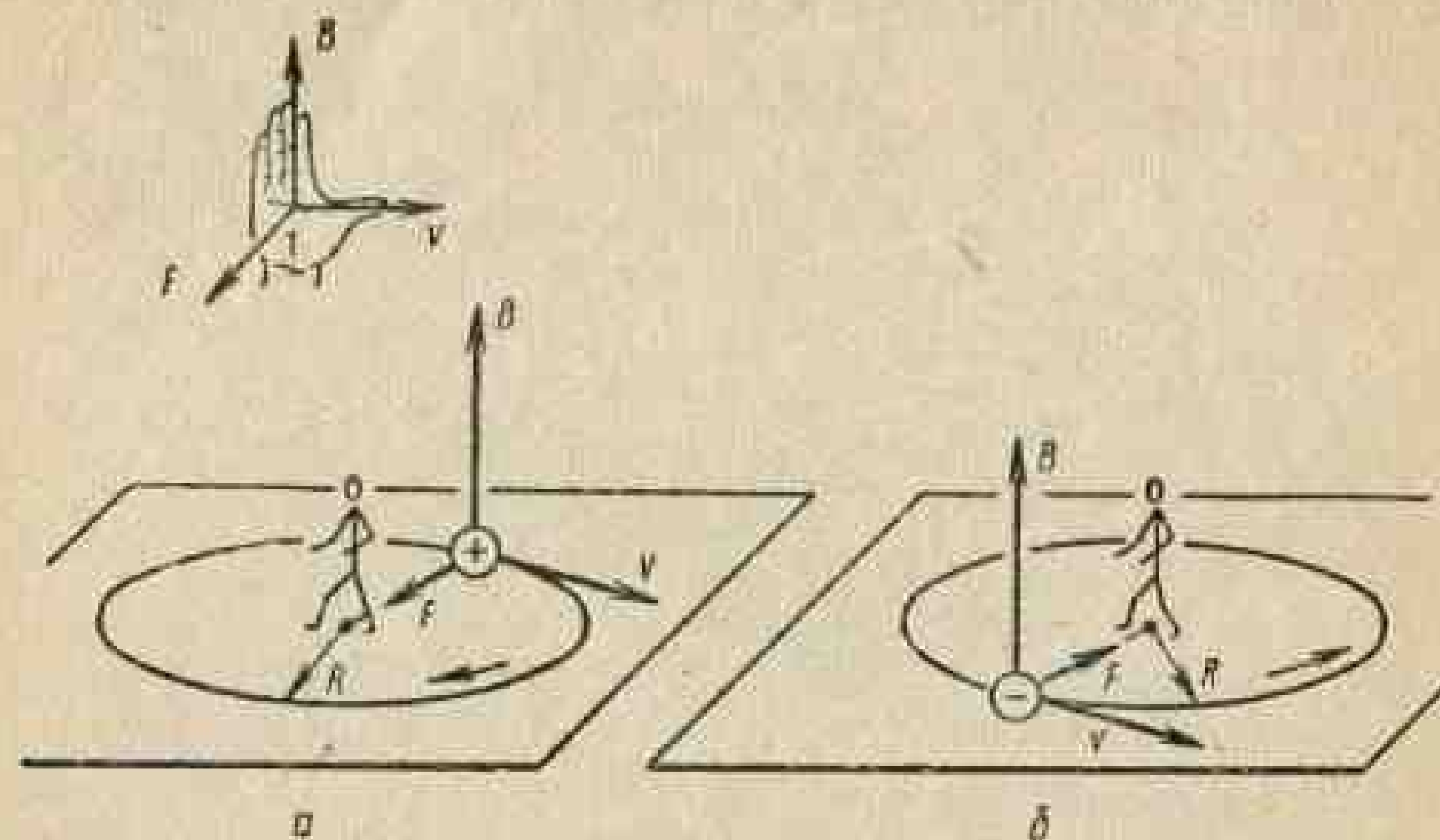


Рис. 23. Положительно заряженная частица, движущаяся в однородном магнитном поле, испытывает действие отклоняющей силы, вынуждающей частицу двигаться по окружности. Направление силы определяется правилом правой руки: если расположить правую руку так, чтобы пальцы были вытянуты по направлению напряженности поля B , а большой палец указывал направление движения частицы v , то перпендикуляр к ладони будет указывать направление действия силы F . Так как отклоняющая сила должна быть направлена к центру окружности, чтобы уравновесить центробежную силу, то положительно заряженная частица должна двигаться по направлению часовой стрелки относительно наблюдателя, стоящего параллельно полю (а). Для того же направления B отклоняющая сила, действующая на отрицательно заряженную частицу, направлена к центру, когда частица движется против часовой стрелки (б). При любых условиях изменение направления поля, знака заряда или направления движения частицы приводит к изменению направления силы на обратное. Кроме того, радиус окружности, по которой движется частица, уменьшается при уменьшении импульса частицы и при увеличении напряженности магнитного поля.

по движению частицы, то на частицу действует постоянная отклоняющая сила*, которая заставляет частицу двигаться по окружности (рис. 23). Для частиц с определенным зарядом радиус этой окружности R обратно

* Эта сила в физике обычно называется силой Лоренца, по имени голландского физика Гендрика Лоренца.

пропорционален напряженности магнитного поля B и прямо пропорционален импульсу частицы*.

Иными словами, произведение напряженности магнитного поля на радиус BR прямо пропорционально импульсу частицы. С другой стороны, для частиц с одинаковым импульсом, но с разными зарядами произведение BR обратно пропорционально заряду. На многозарядную частицу действует большая отклоняющая сила, чем на однозарядную, поэтому она будет двигаться по окружности меньшего радиуса.

Произведение BR называется магнитной жесткостью частицы. Напряженность магнитного поля измеряется в гауссах. Магнитное поле Земли на уровне моря составляет несколько десятых гаусса, сильные электромагниты создают поля порядка 10^4 гаусс. Если B измеряется в гауссах, R — в сантиметрах, то единицей магнитной жесткости служит гаусс на сантиметр. На рис. 24 изображена зависимость магнитной жесткости электронов и протонов от их кинетической энергии. Для достаточно больших значений кинетическая энергия в электронвольтах равна магнитной жесткости, умноженной на 300:

$$E(\text{эв}) = 300 BR(\text{гаусс} \cdot \text{см}).$$

Это уравнение справедливо для однократно заряженных частиц, кинетическая энергия которых велика по сравнению с их энергией покоя. Величина численного множителя (300) в правой части уравнения зависит от выбора системы единиц**. Для высокоэнергичной частицы с зарядом Z магнитная жесткость в Z раз меньше, чем для однократно заряженной частицы той же энергии. В этом случае соотношение между энергией и магнитной жесткостью имеет вид

$$E/Z = 300 BR.$$

Вернемся теперь к вопросу о том, как магнитное поле Земли влияет на движение заряженных частиц. Рассмотрим частицу, которая под действием магнитного поля Земли вращается вокруг нее в плоскости геомагнитного экватора (потери энергии в атмосфере здесь мы не учи-

* См. Приложение VI.

** Там же.

тываем). Для того чтобы удержать частицу на этой орбите, магнитное поле Земли должно действовать на нее с силой, направленной к центру Земли. Воспользовавшись правилом правой руки (см. рис. 23), получаем, что положительная частица должна двигаться с восто-

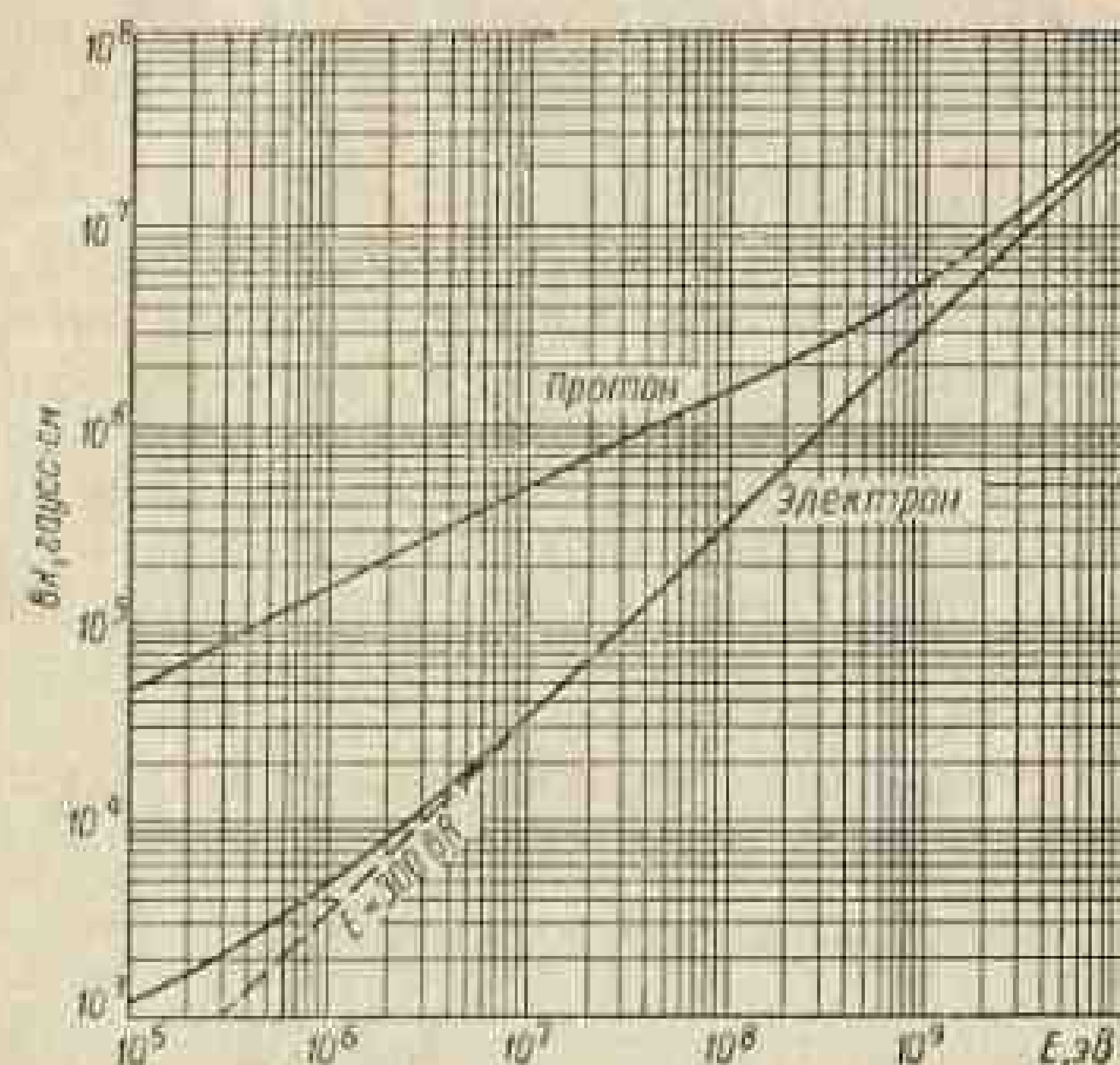


Рис. 24. Зависимость магнитной жесткости BR от кинетической энергии E для протонов и электронов. Величины E и BR даны в логарифмическом масштабе. При достаточно больших энергиях обе кривые приближаются к прямой линии, соответствующей уравнению $E=300 BR$.

ка на запад, а отрицательная — с запада на восток (рис. 25). Далее, магнитная жесткость этой частицы должна равняться произведению радиуса Земли ($R=6,38 \cdot 10^8$ см) на напряженность магнитного поля на экваторе ($B=0,32$ гаусс); отсюда получаем следующее значение жесткости:

$$BR=0,32 \cdot 6,38 \cdot 10^8=2 \times 10^8 \text{ гаусс} \cdot \text{см}.$$

Как видно из графика на рис. 24, магнитная жесткость в $2 \cdot 10^8$ гаусс·см (как для электронов, так и для протонов) соответствует кинетической энергии около 60 Гэв.

Следовательно, заряженные частицы с энергией порядка 60 Гэв и меньшей должны сильно отклоняться магнитным полем Земли.

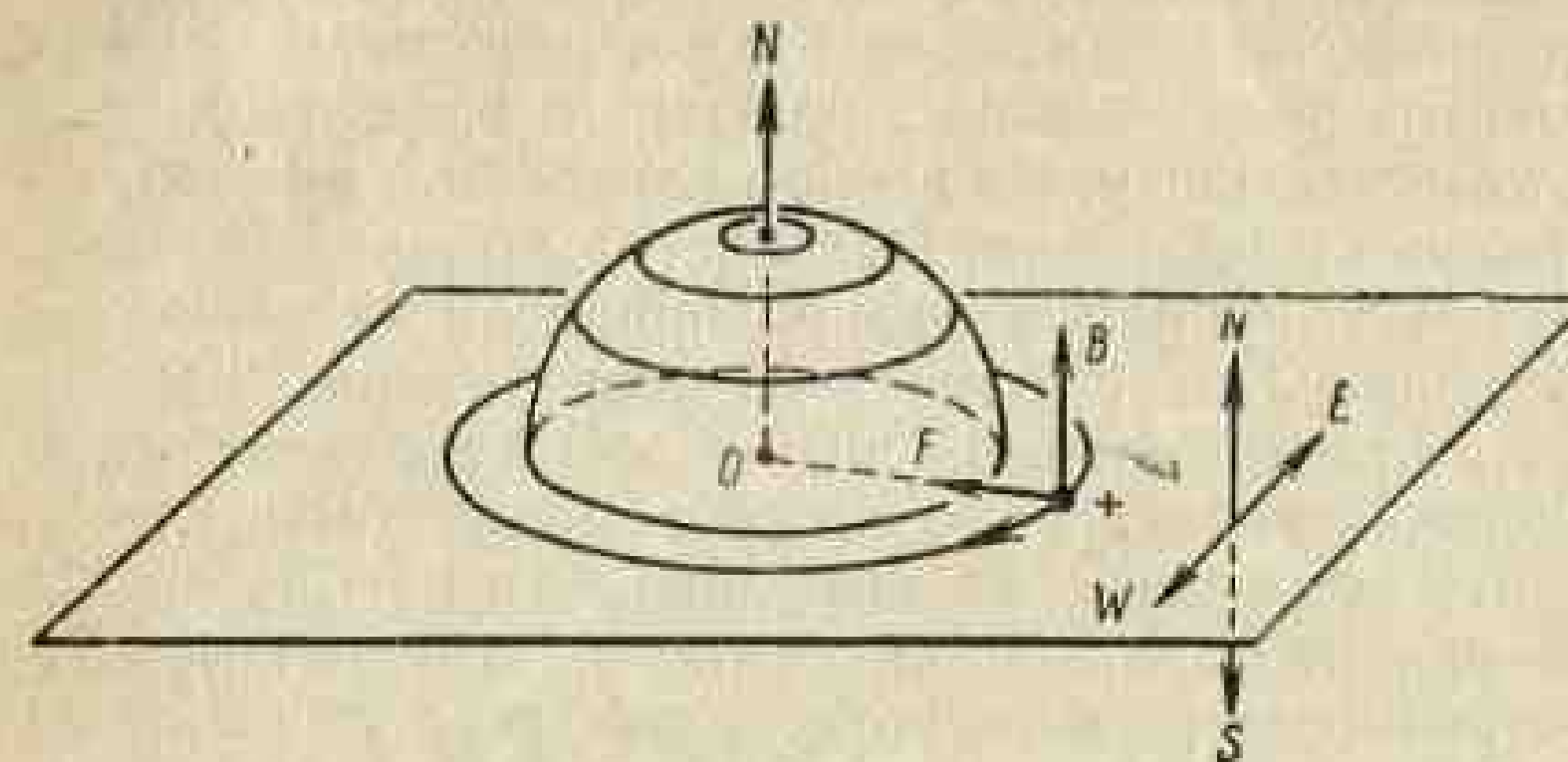


Рис. 25. Положительно заряженная частица, движущаяся к Земле, под влиянием земного магнитного поля отклоняется с востока на запад. Напряженность магнитного поля B направлена на северный геомагнитный полюс, а отклоняющаяся сила F направлена к центру Земли (точка O).

Поиски широтного эффекта

В 1930 г. представления о возможном влиянии магнитного поля Земли на космические лучи были еще довольно туманны как с теоретической, так и с экспериментальной точки зрения. Считали, что если первичные космические лучи обладают электрическим зарядом, то они каким-то образом проходят к полюсам вдоль магнитных силовых линий. Интенсивность космических лучей на больших широтах должна тогда быть больше, чем у экватора. В 1927 г. голландский физик Дж. Клей измерял интенсивность космических лучей при помощи ионизационной камеры во время путешествия от Лейдена до Явы. Он обнаружил уменьшение интенсивности на несколько процентов в окрестности Суэцкого канала. С другой стороны, Милликен и его сотрудники в 1928 г. не нашли заметной разницы в интенсивности между Боливией (19° южной широты) и Пасаденой в штате Калифорния (34° северной широты). В 1930 г. Милликен опять не обнаружил практически никакой разницы в интенсивности между Пасаденой и Черчиллем в Канаде (59° северной широты). В том же году потерпели неуда-

чу попытки Боте и Кольхёрстера найти какую-либо зависимость интенсивности от широты в Северном море, а шведский физик Аксель Корлин решил, что он заметил небольшой широтный эффект в Балтийском море.

Не приходится и говорить о том, что после этих экспериментов существование широтного эффекта казалось очень сомнительным. Во всяком случае этот эффект, если он вообще существовал, был настолько мал, что не мог быть сколько-нибудь уверенно приписан действию магнитного поля Земли. Скорее физики склонны были считать, что отличие атмосферных условий в различных географических точках само по себе может быть источником заметных изменений интенсивности космических лучей на уровне моря. Милликен и его сотрудники считали отсутствие большого широтного эффекта доказательством того, что космические лучи электрически нейтральны.

Теория геомагнитных эффектов

В распоряжении физиков к тому времени уже была большая часть теоретических предпосылок для строгого расчета рассматриваемых эффектов. Норвежский геофизик Карл Штермер, пытаясь объяснить происхождение полярных сияний, детально исследовал движение заряженных частиц в магнитном поле диполя. (Раньше уже упоминалось, что магнитное поле Земли очень похоже на поле магнитного диполя.) Штермер считал, что северные сияния вызываются заряженными частицами, приходящими от Солнца в периоды повышенной солнечной активности. Выполнив в течение нескольких лет утомительные расчеты, Штермер вычислил множество разрешенных траекторий для движения этих частиц в магнитном поле и, что еще важнее, нашел некоторые общие характеристики таких траекторий.

Теория Штермера оказалась ошибочной, хотя основные предпосылки были правильными. Дело в том, что частицы, возбуждающие полярные сияния, имеют сравнительно малые энергии и поэтому находятся под сильным влиянием слабых электрических и магнитных полей, присутствующих в межпланетном пространстве. Когда Штермер разрабатывал свою теорию, об этих полях еще не было известно. (При современных знаниях условий в межпланетном пространстве стало ясно, что се-

верные сияния — это гораздо более сложные явления, чем мог полагать Штермер, настолько сложные, что детально их объяснить не удастся и теперь; см. главу 14.) Частицы космических лучей обладают гораздо более высокими энергиями, чем частицы, вызывающие полярные сияния. Поэтому сегодня нет никаких оснований сомневаться в том, что траектории космических лучей очень близки к траекториям, вычисленным Штермером. Так, теория Штермера наиболее широкое применение нашла в исследовании космических лучей, хотя первоначально она была разработана совсем для другой цели. Связь между проблемой космических лучей и проблемой полярных сияний не была очевидной, именно поэтому теория Штермера стала применяться для изучения космических лучей спустя некоторое время после ее создания.

Как уже говорилось, Штермер вычислил траектории частиц с различными значениями магнитной жесткости, приходящих на Землю в каком-то определенном направлении, в частности от Солнца. Он стремился выяснить, над какими областями Земли и в каких направлениях эти частицы попадают в атмосферу. Относительно космических лучей известно, однако, что они приходят по всем направлениям. Исследование геомагнитных эффектов космических лучей подобным методом потребовало бы вычисления колоссального числа траекторий. До изобретения электронных вычислительных машин это было практически невозможно.

Геомагнитные эффекты заинтересовали меня. Изучая работы Штермера в 1930 г., я заметил, что при правильной постановке вопроса из них можно легко получить результаты, которые в конце концов имеют отношение к физике космических лучей. Позвольте мне объяснить это.

Для того чтобы правильно поставить вопросы, прежде всего следует рассматривать события не в прямом направлении по времени, а в обратном. Вместо того чтобы рассматривать движение гипотетической заряженной частицы с определенной жесткостью из мирового пространства к Земле, гораздо проще выбрать гипотетическую частицу, пришедшую с заданного направления в некоторую точку P вблизи земной поверхности (рис. 26), и затем проследить ее траекторию в обратном направлении через магнитное поле Земли.

Существуют две возможности. Траектория частицы, прослеженная в обратном направлении, может уйти в пространство, не пересекая поверхности Земли, или вернуться назад к Земле. В первом случае выбранная гипотетическая частица могла бы прийти на Землю из мирового пространства, т. е. быть космической частицей. Другими словами, данное направление в точке

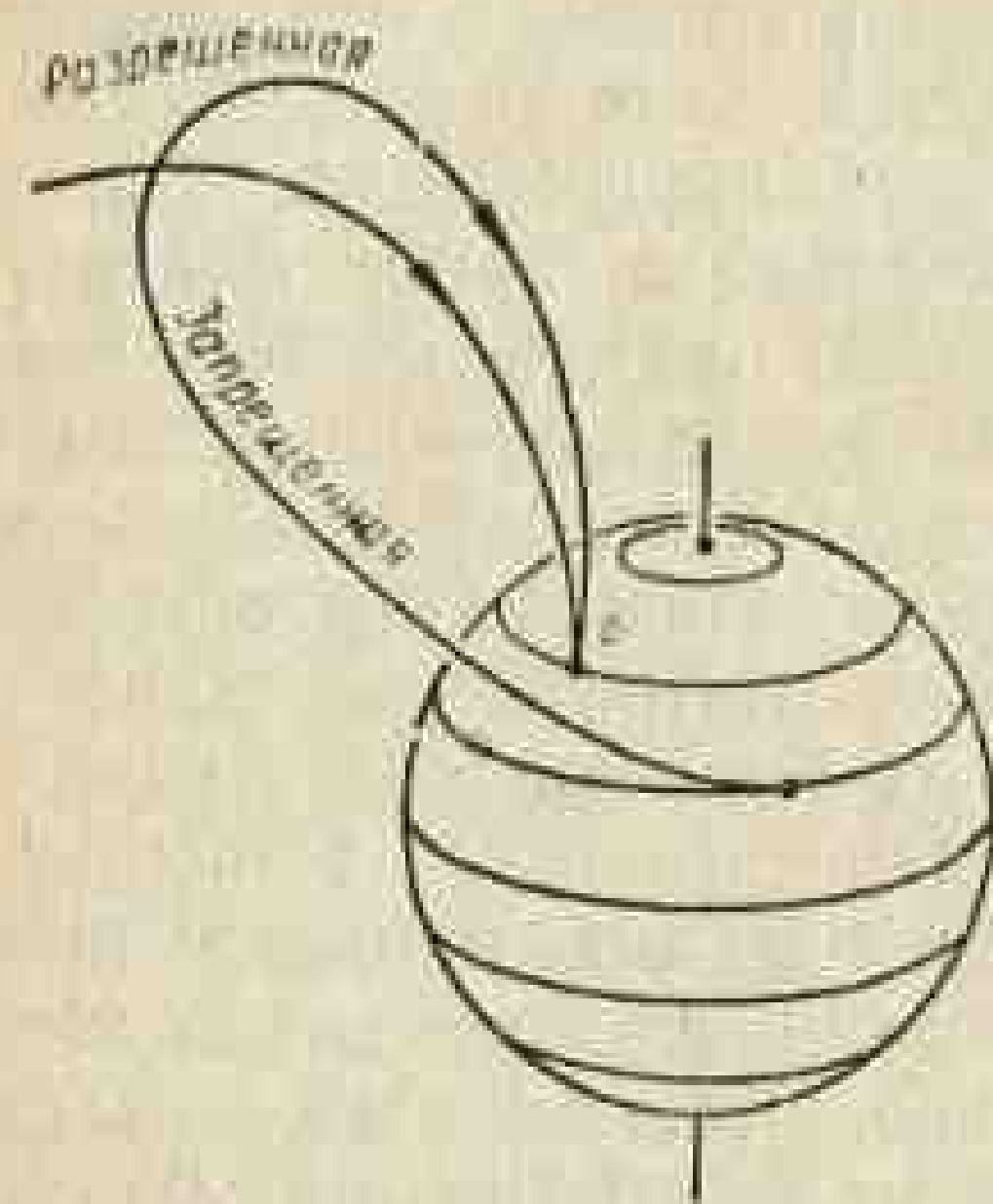


Рис. 26. Схематическое изображение траекторий двух гипотетических частиц с различными магнитными жесткостями, приходящих в одну и ту же точку P в одном и том же направлении.

Р представляется собой *разрешенное* направление для прихода космических частиц с определенной магнитной жесткостью. Во втором случае гипотетическая частица не могла бы прийти из мирового пространства и поэтому, конечно, не могла быть космической частицей. Иначе, это направление в точке P *запрещенное*, направление для прихода космических частиц с определенной магнитной жесткостью.

Физики, изучающие космические лучи, вначале не интересовались вычислением действительных траекторий частиц. Основная проблема для

них состояла в том, чтобы определить, какие направления разрешены, а какие запрещены. Именно здесь теория Штермера оказалась особенно полезной. Штермер показал, что существует особый класс траекторий, которые не уходят от диполя в бесконечность (*ограниченные траектории*). Ограниченные траектории, конечно, не могут быть траекториями космических частиц.

Штермер получил простое соотношение, пользуясь которым можно было по положению частицы, по направлению ее движения и магнитной жесткости определить, двигалась ли данная частица по ограниченной траектории или нет. Пользуясь этим соотношением, я пришел к следующему выводу: в каждой точке на Земле для поло-

жительных частиц любой заданной магнитной жесткости существует в пространстве конус (*конус Штермера*) с осью, ориентированной на восток, который обладает

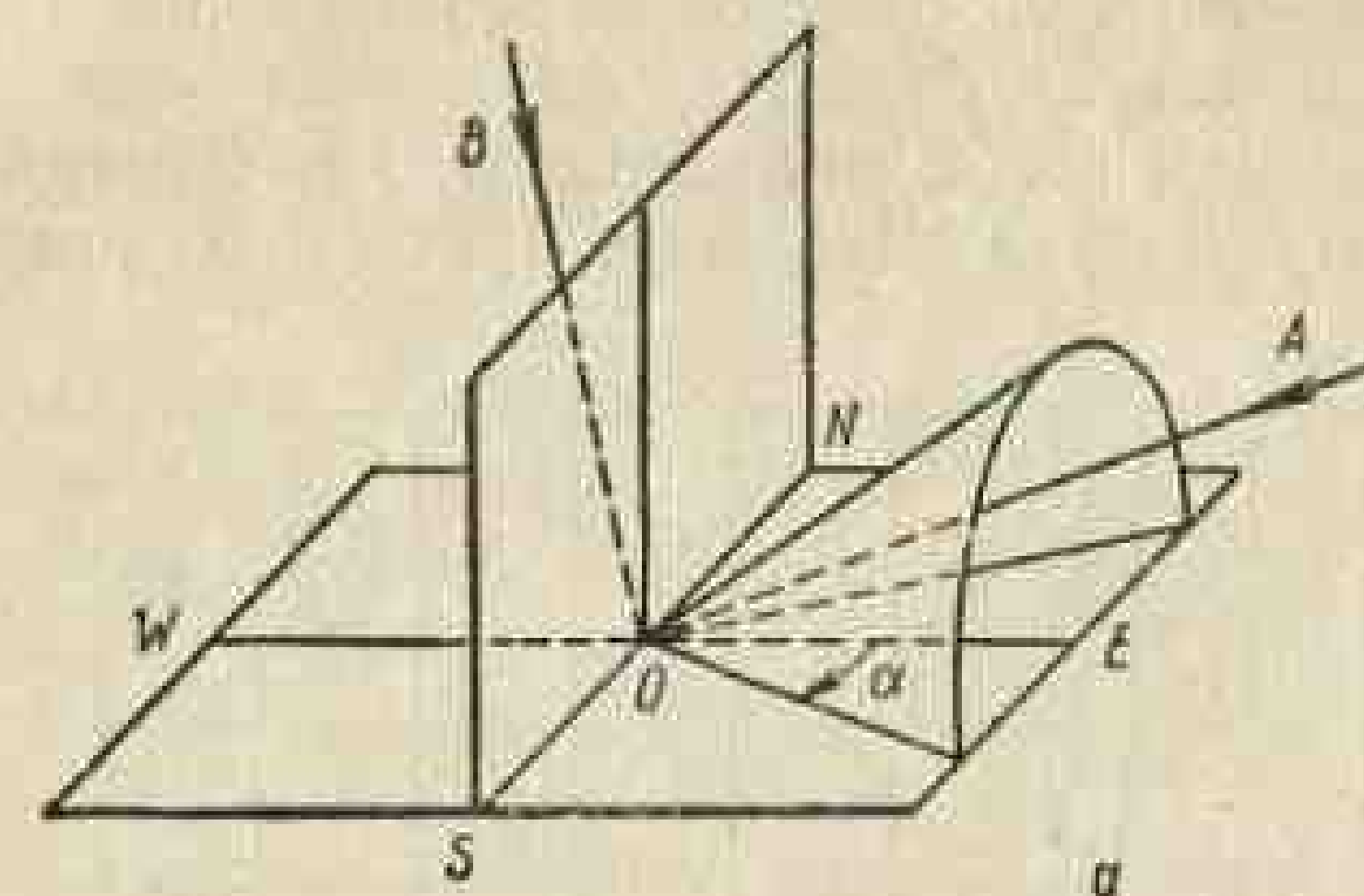


Рис. 27. Конусы Штермера для положительных и отрицательных частиц с одинаковой магнитной жесткостью. На рисунках a и b показана горизонтальная плоскость, проходящая через точку наблюдения O . Для положительных частиц (a) все направления внутри конуса (такие, как AO) запрещены; направления вне конуса (такие, как BO) могут быть разрешены. Для отрицательных частиц (b) AO — запрещенное направление; BO может быть разрешено. Угол α — половинный угол раствора конуса.

тем свойством, что все направления внутри этого конуса соответствуют ограниченным траекториям и поэтому представляют собой запрещенные направления (рис. 27, a). Для отрицательных частиц запрещенные

направления заполняют конус Штермера, представляющий собой зеркальное отображение первого конуса относительно меридиональной плоскости (т. е. вертикальной плоскости, проходящей через Северный и Южный полюсы, см. рис. 27, б).

Кривые на рис. 28 показывают, как изменяется половинный угол конуса Штермера (угол α на рис. 27, а и б)

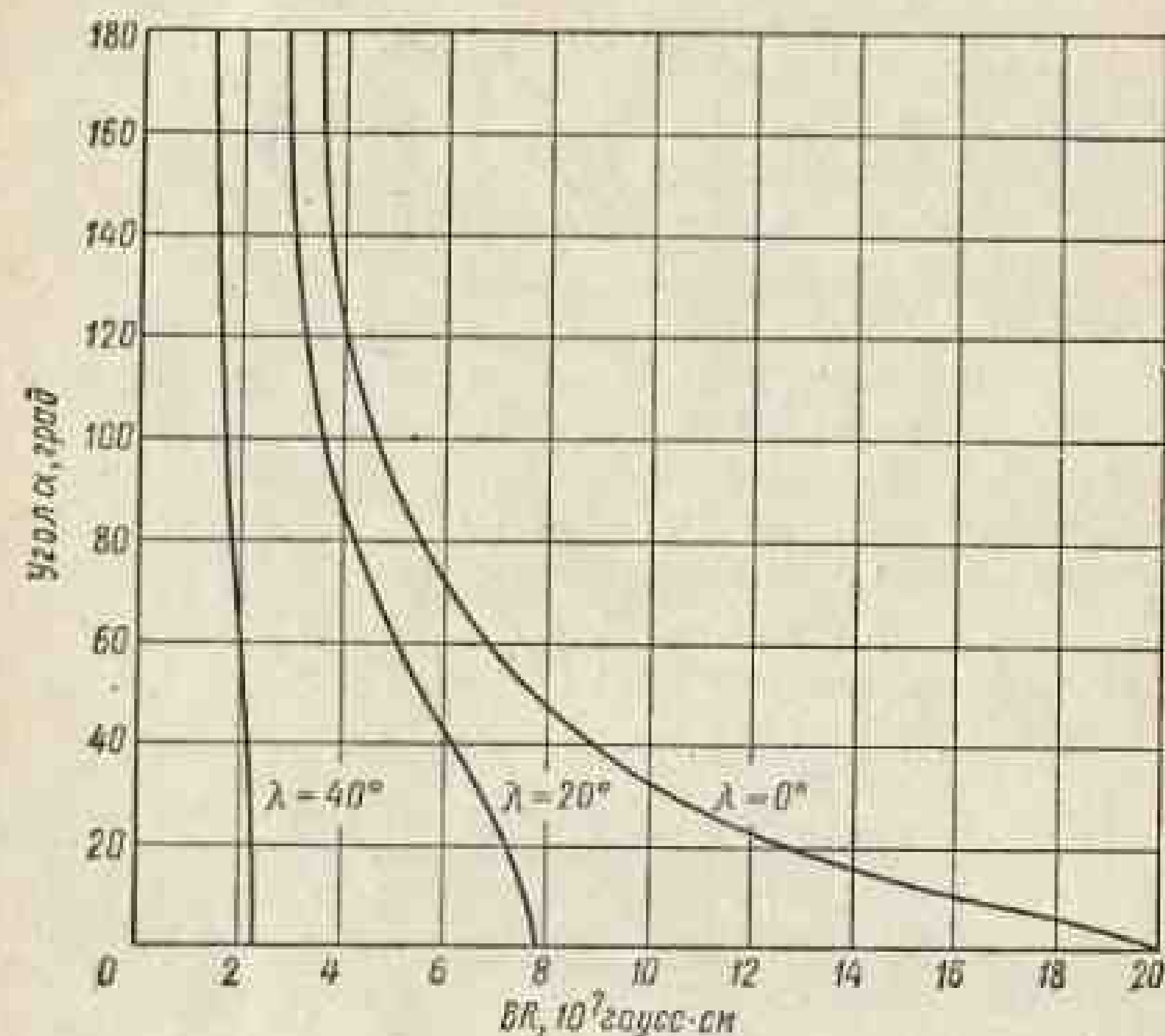


Рис. 28. Зависимость половинного угла конуса Штермера (угол α на рис. 27) от магнитной жесткости BR (в единицах 10^7 гаусс·см) для различных геомагнитных широт λ .

в зависимости от магнитной жесткости на различных геомагнитных широтах. Например, на широте $\lambda = 20^\circ$ угол α становится равным 180° для $BR = 2,8 \cdot 10^7$ гаусс·см. Это означает, что для частиц с жесткостью, равной или меньшей $2,8 \cdot 10^7$ гаусс·см, все направления на данной широте запрещены. При $BR = 7,8 \cdot 10^7$ гаусс·см угол α становится равным 0° , т. е. для частиц с магнитной жесткостью, большей этой величины, конус Штермера исчезает (другими словами, нет направлений, соответствующих ограниченному траекториям). На той же широте

$\alpha = 90^\circ$ для $BR = 3,9 \cdot 10^7$ гаусс·см, т. е. для частиц этой жесткости границы конуса Штермера совпадают с меридиональной плоскостью.

Однако эти выводы не были полными. Хотя и установлено, что все направления внутри конуса Штермера

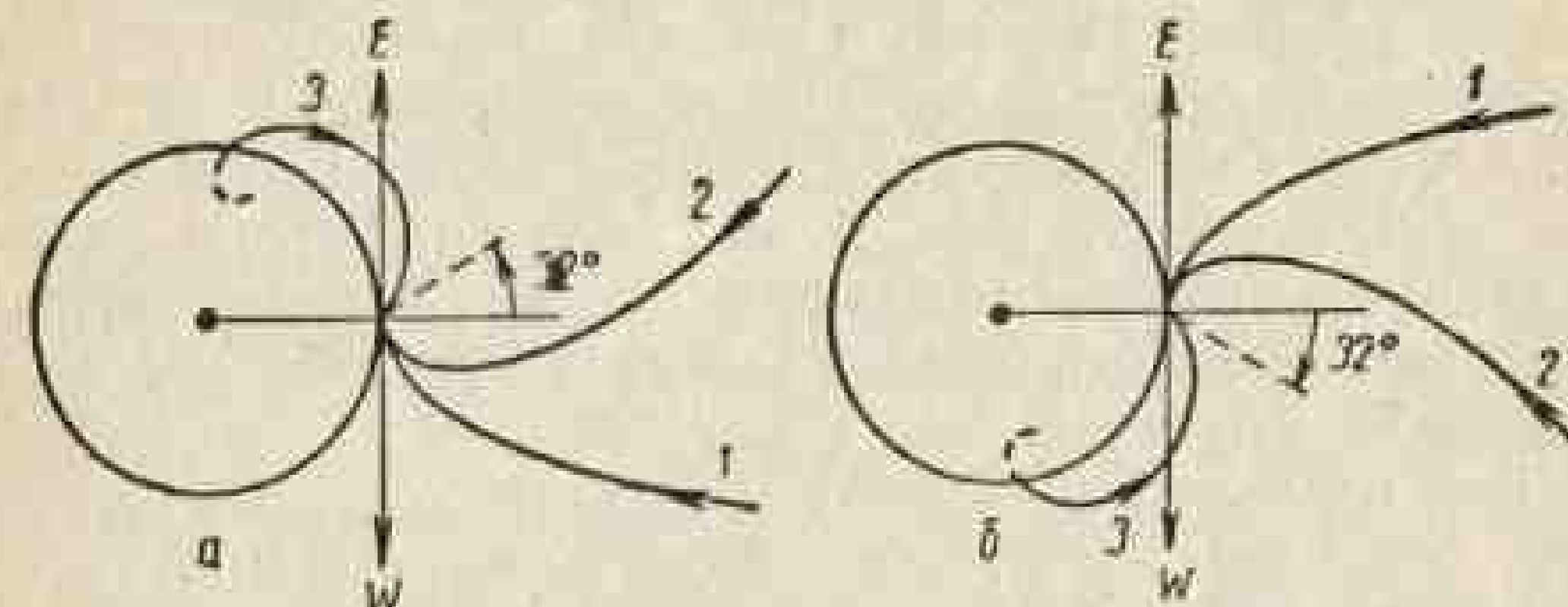


Рис. 29. Траектории положительно (а) и отрицательно (б) заряженных частиц в плоскости геомагнитного экватора. Магнитное поле направлено перпендикулярно рисунку в сторону читателя. По правилу правой руки (см. рис. 23) траектории должны искривиться так, как показано на рисунке. В обоих случаях магнитная жесткость равна $70 \cdot 10^7$ гаусс·см. Положительные частицы с такой магнитной жесткостью приходят из бесконечности на Землю по всем направлениям, составляющим с вертикалью углы в интервале между 32° к востоку и 90° к западу (частицы 1 и 2 на рисунке это иллюстрируют). А для того чтобы попасть на Землю под углом, большим чем 32° от вертикали, частица должна была бы приходить из некоторой точки земной поверхности (частица 3 на рис. а). Таким образом, траектории 1 и 2 — примеры разрешенных траекторий, 3 — пример запрещенной траектории. Отсюда следует, что положительные частицы в больших количествах приходят из западных областей неба, чем из восточных. Эффект восточно-западной асимметрии можно пояснить и другим путем, рассматривая частицы, подобные частице 2, которые приходят на Землю с востока, но они так отклоняются магнитным полем, что на поверхность Земли уже попадают с запада. (Для отрицательных частиц верны те же рассуждения, в которых «восток» и «запад» надо поменять местами.)

соответствуют ограниченному траекториям, а поэтому запрещены для космических лучей, но не было никаких данных о том, какие траектории вне конуса разрешены. Хотя все направления вне конуса соответствуют «неограниченным» траекториям, но некоторые траектории пересекают Землю прежде, чем уйти в космическое пространство. Кроме того, оставалось неясным, каким образом

меняется интенсивность космических лучей от одного разрешенного направления к другому.

Тем не менее уже можно было сделать некоторые интересные выводы. Наиболее важным, несомненно, было предсказание асимметрии в распределении интенсивности космических лучей. Действительно, для положительных частиц ось запрещенного конуса Штермера направлена на восток. Поэтому с запада должно приходить больше положительно заряженных первичных космических частиц, чем с востока. Если же первичные космические лучи отрицательны, то ось конуса Штермера направлена на запад и положение должно быть обратным. Этот предсказанный эффект получил название *восточно-западной асимметрии*.

Для иллюстрации этих общих результатов, может быть, полезно подробнее разобрать частный случай траекторий, лежащих в плоскости геомагнитного экватора. Особенность таких траекторий в том, что только они всегда остаются в одной плоскости. Несколько экваториальных траекторий, соответствующих частицам с магнитной жесткостью $7 \cdot 10^7$ гаусс·см, приведено на рис. 29, а (положительные частицы) и рис. 29, б (отрицательные частицы). Траектории проведены из одной и той же точки геомагнитного экватора Земли. На рис. 29, а все траектории, приходящие на Землю восточнее пунктирной линии, при прослеживании в обратном направлении пересекают поверхность Земли и притом не один раз; следовательно, это запрещенные траектории, и к тому же *ограниченные*. С другой стороны, все траектории, пересекающие Землю западнее пунктирной линии, при прослеживании назад уходят в бесконечность, т. е. представляют собой разрешенные траектории. Сама пунктирная линия — это линия пересечения конуса Штермера с экваториальной плоскостью (рис. 29, б — зеркальное отображение рис. 29, а).

Однако весь этот анализ не давал ответа на вопросы, которые меня интересовали. Эрико Ферми, с которым я обсуждал эту проблему, отметил, что по крайней мере один из пробегов легко может быть заполнен. Пользуясь общей теоремой механики, известной под названием теоремы Лиувилля, Ферми показал, что если космические лучи распределены равномерно по всем направлениям на больших расстояниях от Земли, то их интенсивность

вблизи Земли должна быть постоянной по всем разрешенным направлениям. Таким образом, оставалось только выяснить, какие направления вне конуса Штермера разрешены, а какие запрещены.

Этой проблемой усиленно занимались в последующие годы различные ученые, в частности Ж. Леметр (Бельгия) и М. Валларта (Мексика) с сотрудниками.

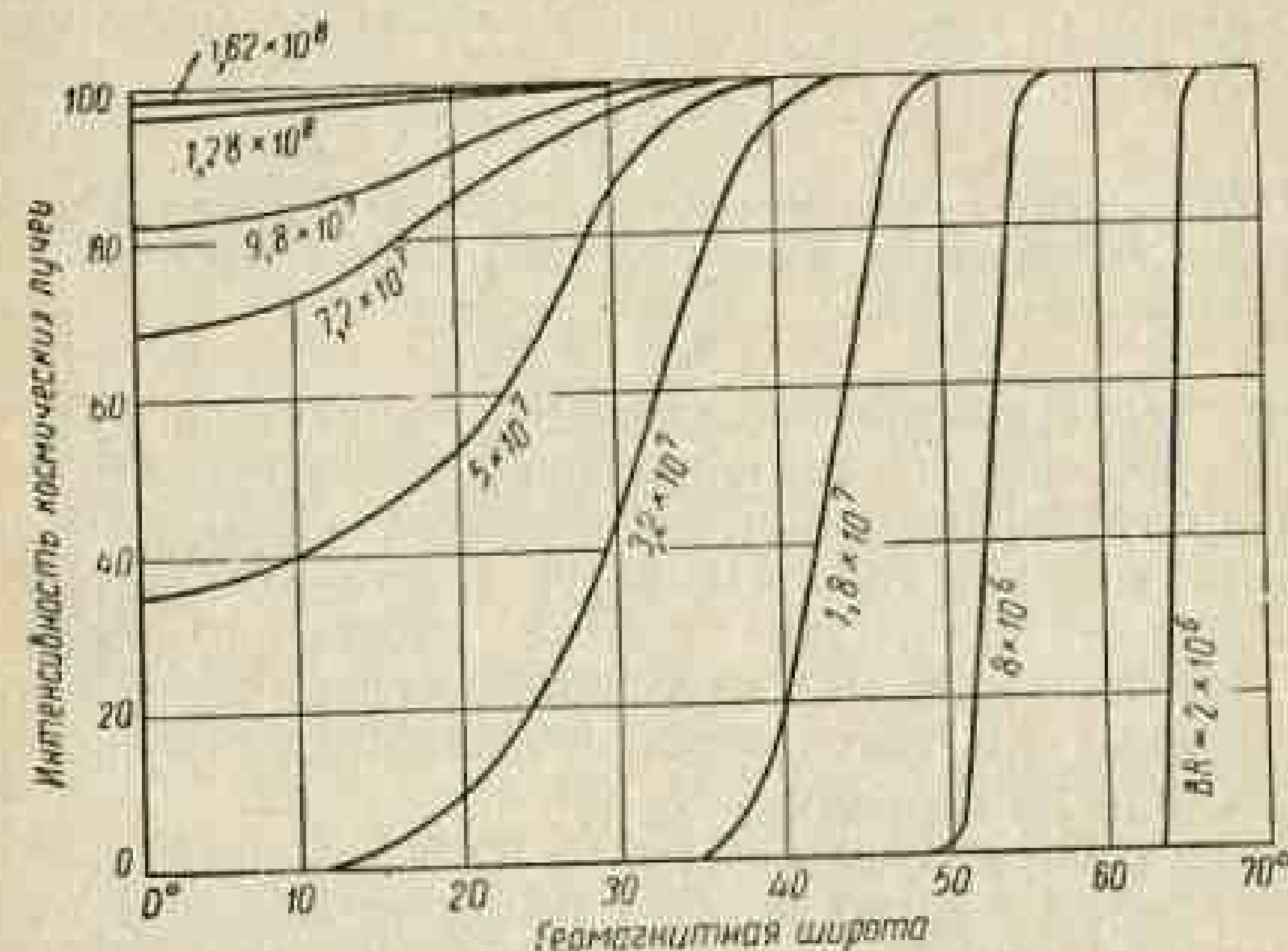


Рис. 30. Широтный эффект интенсивности космических лучей в соответствии с расчетами Леметра и Валларта.

В своих работах эти ученые применили механическое вычислительное устройство, так называемый дифференциальный анализатор, разработанный В. Бушем в Массачусетском технологическом институте. Они обнаружили, что некоторые направления вне конуса Штермера также запрещены для космических лучей. В большинстве случаев эти траектории неограниченные, но, прежде чем уйти в бесконечность, они пересекают земную поверхность.

Подробное рассмотрение этих исследований увело бы нас далеко в сторону, но все же дадим на рис. 30 один из важнейших результатов. Кривые на рисунке показывают влияние магнитного поля на полный поток первичных частиц, приходящих на границу атмосферы с данной жесткостью. Эти кривые позволяют сделать количествен-

ные оценки ожидаемого широтного эффекта космических лучей с различной магнитной жесткостью. Из кривых, например, следует, что частицы с магнитной жесткостью $3,2 \cdot 10^7$ гаусс·см не могут попасть в область между 12° северной и 12° южной геомагнитной широты; затем между 12 и 43° к северу и югу поток таких частиц постепенно возрастает и выше 43° достигает постоянного значения, равного величине потока в отсутствие всякого магнитного поля.

Открытие восточно-западной асимметрии и дальнейшие измерения широтного эффекта

Эти теоретические исследования в значительной мере сопровождалось и стимулировались большим размахом экспериментальных работ, которые велись одновременно учеными многих стран. Наиболее широкую программу исследований осуществил в 1930 г. Комптон, который при сотрудничестве многих ученых составил обзор мировых данных по интенсивности космических лучей на уровне моря и на высоте гор.

Я, со своей стороны, занялся исследованием восточно-западной асимметрии. Две основные причины обусловили этот выбор. Во-первых, мне казалось, что этот эффект надежнее, чем широтная зависимость интенсивности, позволяет судить о действии магнитного поля Земли, поскольку при этом не нужно сравнивать интенсивность космических лучей в различных местах. Разница атмосферных условий в различных районах Земли могла бы имитировать магнитный широтный эффект, но не может привести к восточно-западной асимметрии. Вторая причина состояла в том, что в случае электрически заряженных космических лучей восточно-западный эффект давал возможность определить знак их заряда.

В 1931 г. в Италии я предпринял первую попытку обнаружить восточно-западную асимметрию. С этой целью я использовал установку, которая позже стала известна как *телескоп для космических лучей*. Установка состояла из двух или более Г—М-счетчиков, включенных на совпадения и расположенных так, что их центры лежали на одной линии, называемой *осью телескопа* (рис. 31). Одновременные разряды в счетчиках могут

вызывать только те частицы, которые движутся по направлениям, близким к оси телескопа, и пересекают все счетчики. Меняя ориентацию телескопа, можно определить число космических частиц, движущихся по разным направлениям. Поле зрения, или *светосила* телескопа, зависит, конечно, от размеров счетчиков и расстояния между ними. На рис. 31, а показан телескоп с большой светосилой, на рис. 31, б — с малой светосилой. В своих опытах я направлял ось телескопа попеременно на восток и на запад относительно геомагнитного меридиана (рис. 32). Никакой заметной разницы в показаниях счетчиков в обоих случаях мне не удалось заметить. Но затем в 1933 г., когда «начали появляться» первые конкретные доказательства существования широтного эффекта с некоторыми указаниями на то,

что он обусловлен именно магнитным полем Земли, а не метеорологическими причинами, все-таки была обнаружена восточно-западная асимметрия одновременно в трех различных экспериментах. Т. Джонсон в Мехико (29° северной геомагнитной широты, 2250 метров над уровнем моря) и Л. Альварец, работавший там же вместе с Комптоном, обнаружили, что интенсивность космических лучей, приходящих с запада, больше, чем приходящих с востока. Результат был получен при помощи телескопа, ось которого составляла 45° с вертикалью. Разница в интенсивности около 10%. Спустя несколько месяцев С. Дебенедетти и я, экспериментируя с телескопом, также наклоненным под углом 45° к вертикали, в Эритрее (11° северной геомагнитной широты и 2370 метров над уровнем моря) нашли, что избыток интенсивности космических лучей в западном направлении достигает 26%.

Таким образом, стало ясно, что большая доля первичного космического излучения, а возможно и все оно, состоит из положительно заряженных частиц. Это

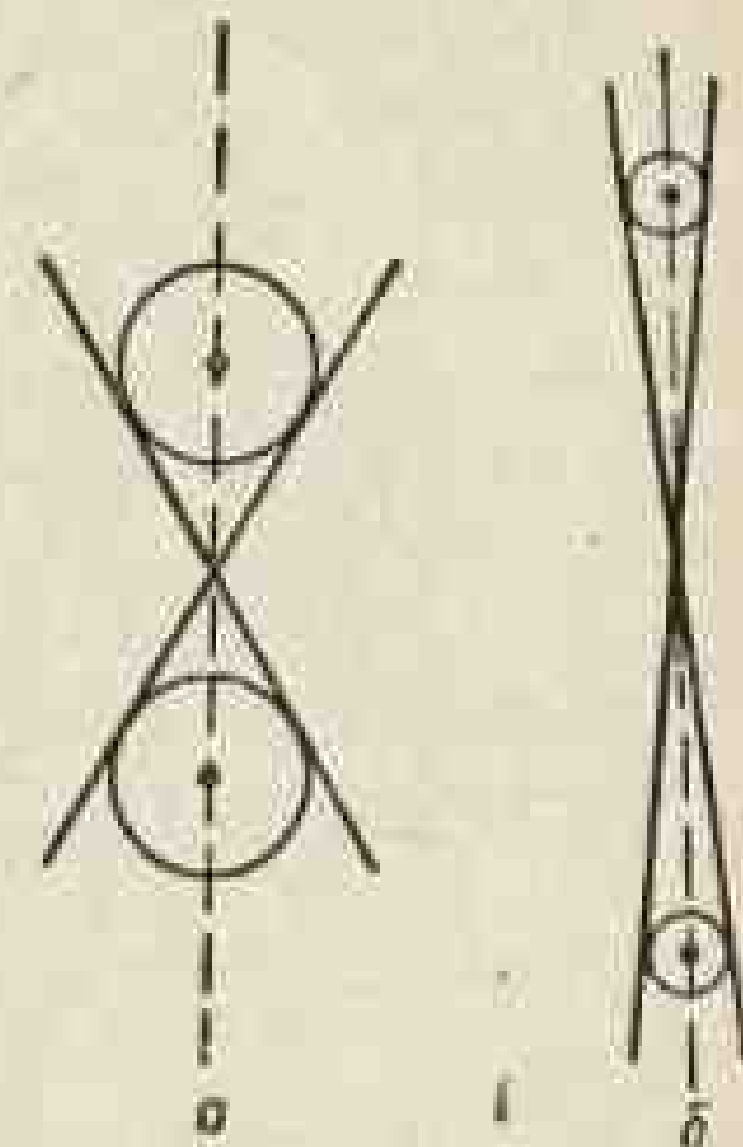


Рис. 31. Телескопы из двух счетчиков Гейгера — Мюллера, включенных на совпадения. Пунктиром отмечена ось телескопа.

был совершенно неожиданный результат, поскольку среди сторонников гипотезы о корпускулярной природе космических лучей преобладало мнение, что первичное излучение состоит из электронов. Если бы во-

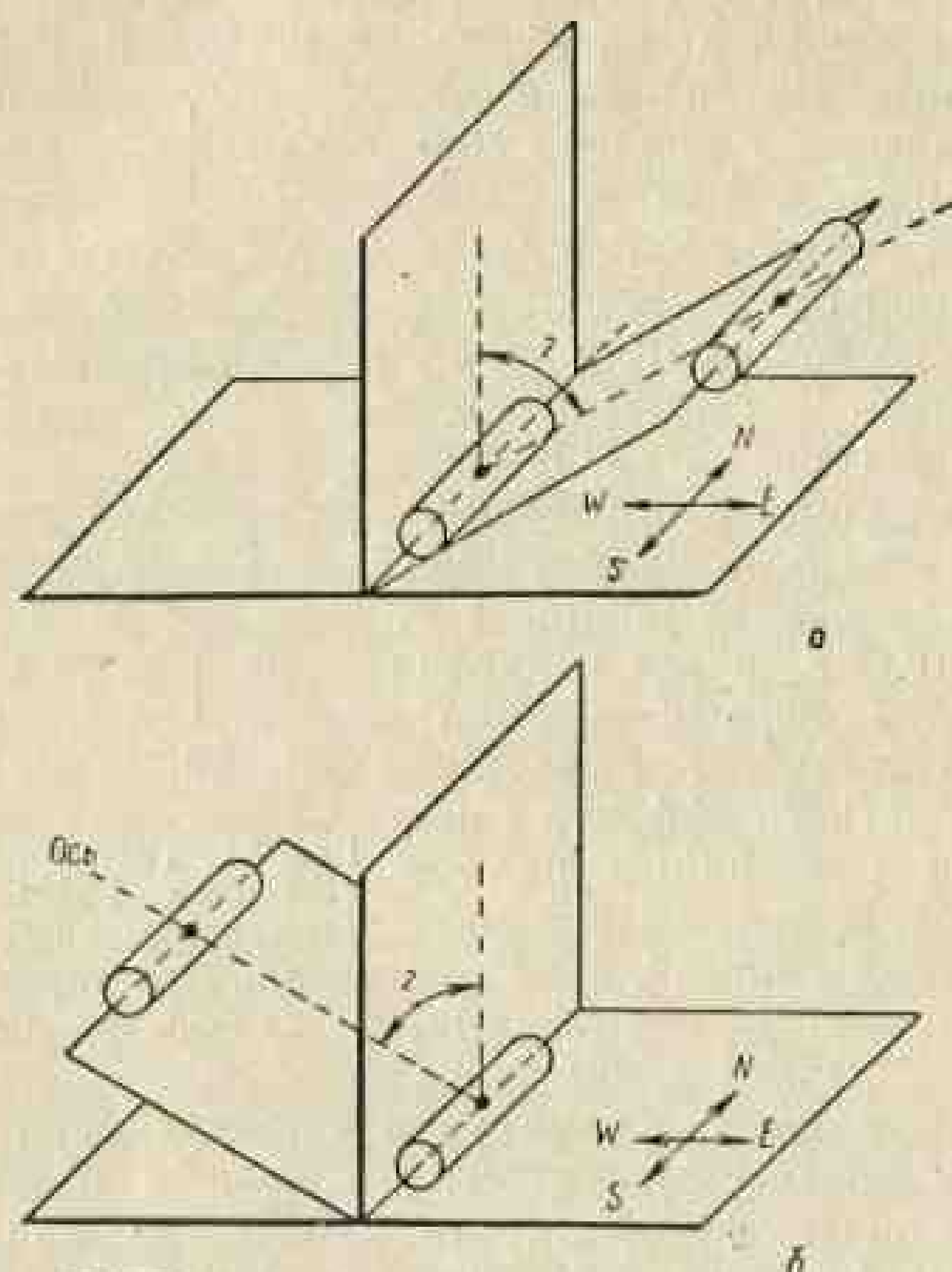


Рис. 32. Экспериментальная установка для изучения восточно-западной асимметрии; телескоп направлен на восток (а) и на запад (б) от геомагнитного меридиана. В обоих случаях телескопы наклонены под одним и тем же углом α к вертикали.

сточно-западная асимметрия была открыта всего на год раньше, мы не колеблясь сделали бы вывод о том, что первичные космические лучи — это протоны или более тяжелые ядра, поскольку других положительных частиц тогда не знали. Сейчас ясно, что это был бы правильный вывод. Но в 1932 г. была открыта новая положительная частица — *положительный* электрон, или *позитрон* (см. главу 6). Поэтому вопрос о природе первичных кос-

мических лучей оставался неопределенным до получения новых экспериментальных указаний.

В последующие годы появилось много данных по восточно-западной асимметрии и особенно по широтному эффекту*. Комpton в 1936 г. суммировал всю существующую информацию в виде диаграммы, которая воспроизводится на рис. 33. Кривые на диаграмме — это линии равной интенсивности космических лучей, или, как назвал их Комpton, *изокосмы*. На схеме отмечены геомагнитный экватор и геомагнитные параллели, соответствующие 50° северной и 50° южной широты. Как видно из рисунка, изокосмы следуют не географическим параллелям, а геомагнитным. Этот факт подтверждает ту точку зрения, что вариации интенсивности космических лучей на поверхности Земли обусловлены прежде всего земным магнитным полем, а не атмосферными факторами.

Однако полностью исключить влияние атмосферных условий нельзя. Действительно, в 1937 г. Комpton и его сотрудники заметили некоторое уменьшение интенсивности космических лучей на уровне моря при увеличении температуры атмосферы. Поскольку средняя температура атмосферы у экватора выше, чем у полюсов, это должно привести к соответствующему широтному эффекту. Точные измерения показали, что около одной трети широтного эффекта на уровне моря обусловлено температурными вариациями, а магнитное поле Земли ответственно за две трети суммарного эффекта.

Из диаграммы Комптона видно (см. рис. 33), что интенсивность космических лучей изменяется не только с широтой, но и с долготой. Например, интенсивность вдоль геомагнитного экватора падает до минимума в районе Индийского океана. Этот факт полностью соответствует принятой картине явления. Как упоминалось в начале этой главы, центр земного магнитного диполя не совпадает точно с географическим центром Земли. Он смещен по направлению к Индийскому океану. Магнитное поле в этом районе сильнее, поэтому здесь заметнее ослабление интенсивности космических лучей.

* Большой вклад в исследования широтного эффекта внесли работы советских ученых под руководством С. Н. Вернова. — Прим. перев

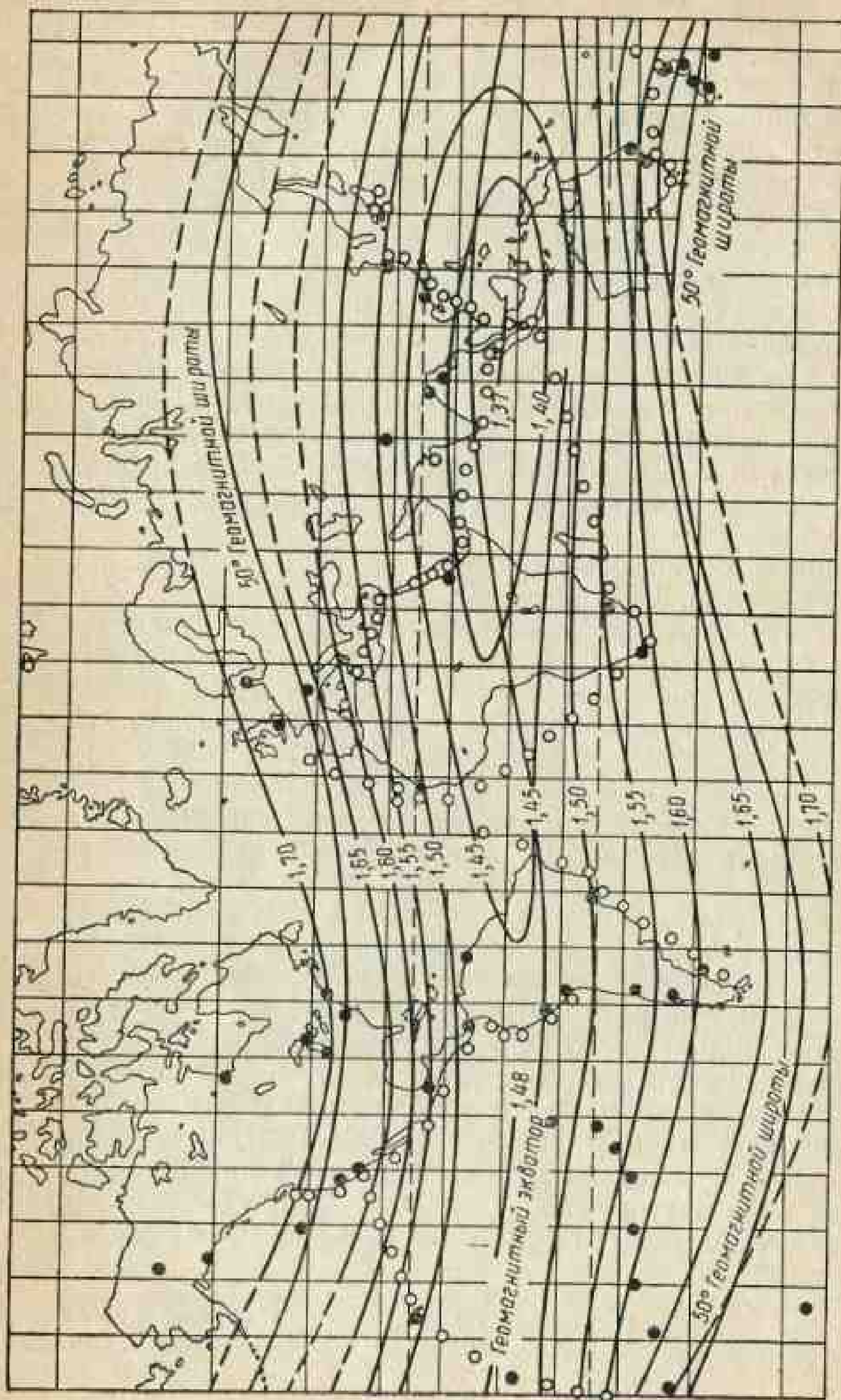


Рис. 33. Кривые равной интенсивности космических лучей, или изокосмы. Числа у кривых означают интенсивность космического излучения, измеряемую числом пар ионов, образованных в 1 см^3 воздуха при нормальных температуре и давлении. Точки отмечены места, где проводились измерения. (Из статьи А. Комптона в Review of Scientific Instruments. Том 7, 1936, стр. 76.)

Влияние атмосферы

До сих пор мы пренебрегали наличием атмосферы, теперь же пора разобраться, как скажется ее влияние в интересующих нас вопросах. В предыдущей главе упоминалось, что в те времена уже имелись достаточные основания считать наблюдаемое в атмосфере излучение состоящим в основном из вторичных частиц. В то же время теория, на основе которой объяснялись экспериментальные данные, была развита для первичного космического излучения, падающего на границу атмосферы из мирового пространства. Что давало основания для такого сопоставления?

В применении к широтному эффекту ответ на этот вопрос совершенно ясен. Поскольку количество вторичных частиц, наблюдаемых на какой-то глубине в атмосфере, изменяется вслед за изменением числа первичных частиц, падающих на границу атмосферы, то у вторичного излучения также будет проявляться широтный эффект. Однако эффект для вторичного излучения будет менее выражен, так как наибольшие широтные вариации испытывают первичные

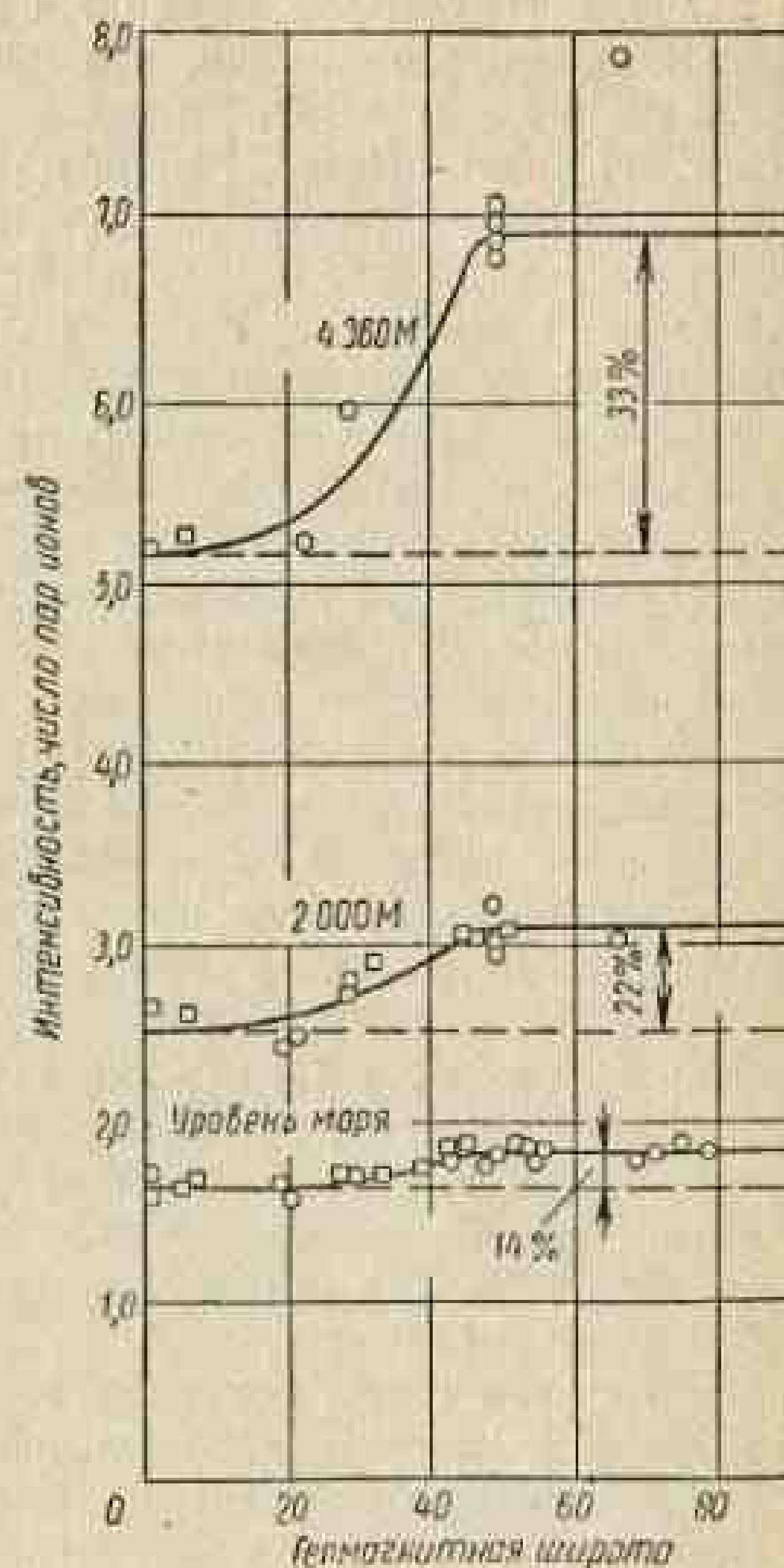


Рис. 34. Интенсивность космических лучей в зависимости от геомагнитной широты на трех различных высотах. Интенсивность измеряется числом пар ионов, образованных космическими лучами в 1 см^3 воздуха при нормальных температуре и давлении.

частицы наименьших энергий, которые, очевидно, создают меньше вторичных частиц в атмосфере.

В этой связи интересно отметить измерения на большой высоте в горах и на воздушных шарах, выполненные в начале 30-х годов группами Комптона и Милликена. Их измерения показали, что широтный эффект по мере увеличения высоты становится более четко выраженным (рис. 34). Этот результат легко понять. На больших высотах, т. е. под тонкими слоями атмосферы, электроскопы или Г—М-счетчики могут регистрировать первичные частицы меньших энергий (или непосредственно, или по вторичному излучению), которые испытывают более сильное влияние магнитного поля Земли.

Для объяснения восточно-западной асимметрии нужно было привлечь и другие соображения. Если частицы, возникающие при соударении первичных частиц с атомами и молекулами, вылетают под большими углами к первичному направлению, то вторичное излучение в атмосфере должно быть распределено более или менее равномерно по всем направлениям независимо от направления первичного излучения. В этом случае мы могли бы наблюдать восточно-западную асимметрию, только посылая свои приборы за границу атмосферы, в области, где первичное космическое излучение не искажено. Тем не менее мы наблюдаем этот эффект под большими толщами атмосферы, там, где преобладающая часть излучения состоит из вторичных частиц. Отсюда можно сделать вывод, что вторичные частицы, возникающие в атмосфере, движутся практически в том же направлении, что и первичные.

Этот вывод был подтвержден еще одним экспериментальным фактом. Измерения при помощи телескопа дали резкий максимум интенсивности космических лучей при вертикальном положении телескопа. Этот максимум можно объяснить только влиянием атмосферы, поскольку излучение, пересекающее атмосферу в вертикальном направлении, встречает на своем пути меньшее количество вещества, чем излучение, пересекающее атмосферу в любом другом направлении. Однако это объяснение справедливо лишь в том случае, если вторичное излучение более или менее сохраняет направление создающего его первичного излучения.

Глава 6

ПОЗИТРОНЫ И РОЖДЕНИЕ ПАР

В течение многих лет физики — специалисты по космическим лучам — были заняты исследованием двух различных, но тесно связанных между собой проблем. Первая — это вопрос о природе космических лучей. Вторая проблема — какие частицы вообще существуют в природе и как ведут себя частицы высоких энергий? Физики сравнительно просто могли бы разрешить любую из этих проблем, если бы была решена другая. Но в том-то и состояла трудность, что обе проблемы приходилось решать одновременно. История этих исследований, которая будет рассказана в этой и в нескольких следующих главах, — яркий пример того, как сочетание искусного эксперимента, смелого и критического анализа экспериментальных результатов и изобретательной теоретической мысли привело к решению одной из наиболее сложных научных задач. Успех объединенных усилий ученых означал не только проникновение в тайну космических лучей, но и начало бурного развития физики.

Все началось с изучения вторичного космического излучения. В опытах Боте и Кольхёрстера число совпадений уменьшалось на 24%, когда золотая пластинка толщиной 4,1 см помещалась между счетчиками. Мои эксперименты показали, с другой стороны, что космические лучи, пройдя свинцовую пластину определенной толщины, становятся более «жесткими» и что значительная их часть способна проникнуть сквозь толщу свинца порядка метра. Эти результаты были подтверждены и в других экспериментах (рис. 35). Таким образом, было установлено, что вторичное космическое излучение содержит две различные группы частиц: «мягкую» компоненту, ответственную за быстрый спад кривой поглощения,

и «жесткую», или «проникающую», компоненту, ответственную за пологий «хвост» кривой (см. рис. 35).

Кроме того, мы уже знали, что по крайней мере некоторые космические частицы вызывают сложные вторичные процессы, называемые ливнями. Однако еще не бы-

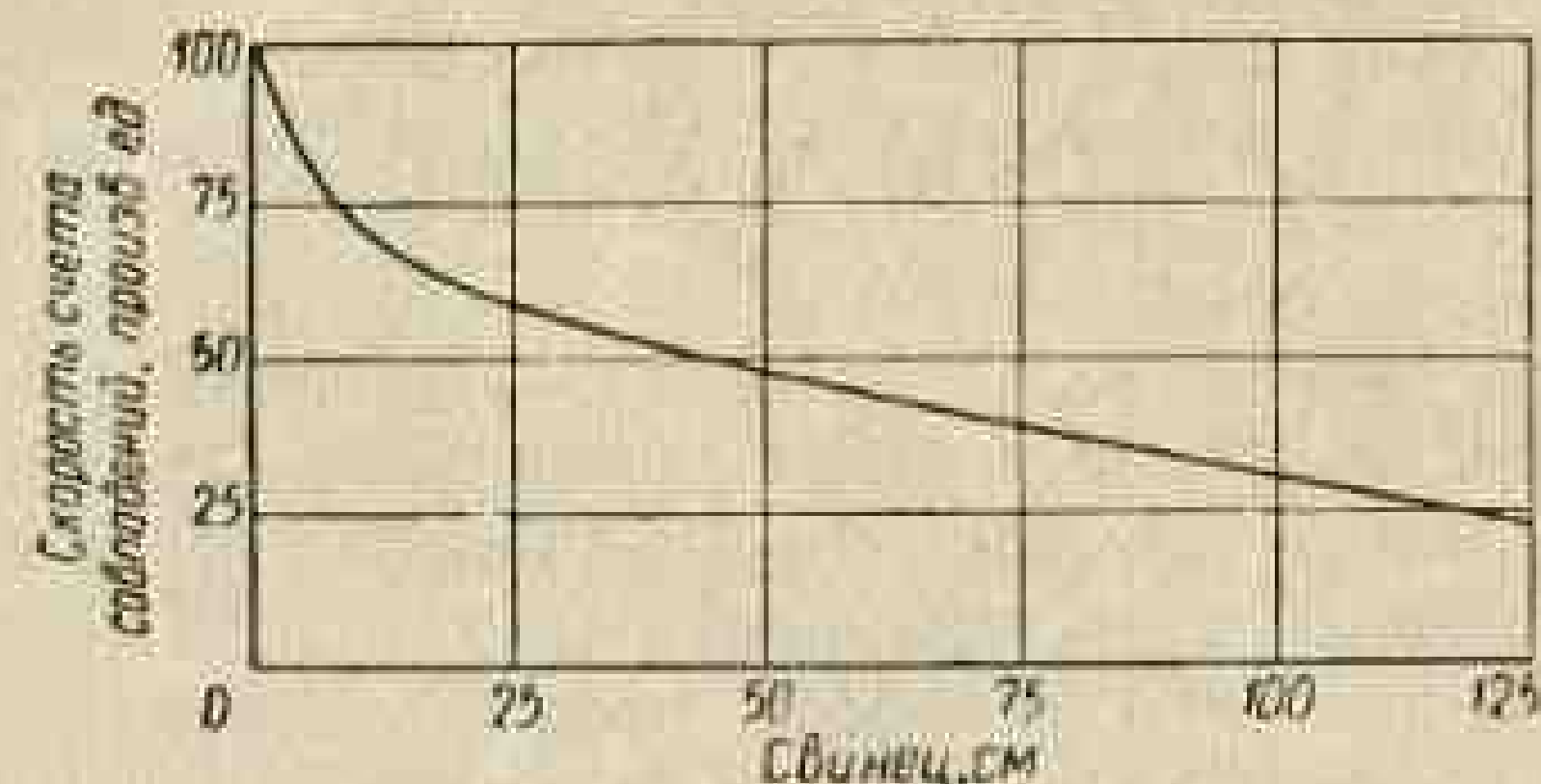


Рис. 35. Мягкая и проникающая компоненты космических лучей (на уровне моря). По горизонтальной оси отложена толщина свинца между счетчиками. По вертикальной оси отложена скорость счета совпадений в произвольных единицах. Кривая представляет собой экспериментальные данные, полученные автором в 1932 г.

ло известно, что представляют собой вторичные частицы. Ливни считали результатом расщепления атомного ядра, но это предположение нужно было проверить.

Открытие позитрона

Еще до открытия ливней К. Андерсон, работавший в лаборатории Милликена в Калифорнийском технологическом институте, начал экспериментальную работу, которая вместе с начатой несколько позднее работой Блеккета и Оккиалини должна была частично ответить на стоявшие перед физиками вопросы. Главным результатом работы Андерсона было открытие *положительного электрона*, или *позитрона*, и странных обстоятельств, сопровождавших рождение и исчезновение этой частицы.

Андерсон работал с камерой Вильсона, помещенной в сильное магнитное поле. При максимальной величине поля в 24 000 гаусс Андерсон мог измерять магнитное отклонение следов с радиусом кривизны около 7 метров, что соответствует магнитной жесткости около

$1,7 \cdot 10^7$ гаусс·см (24 000 гаусс·700 см). Кинетическая энергия таких частиц составляет 5 Гэв для частиц с массой электрона и около 4 Гэв для частиц с массой протона (см. рис. 24). Эта величина в сотни раз превышает те значения энергии, которые можно было измерять во всех

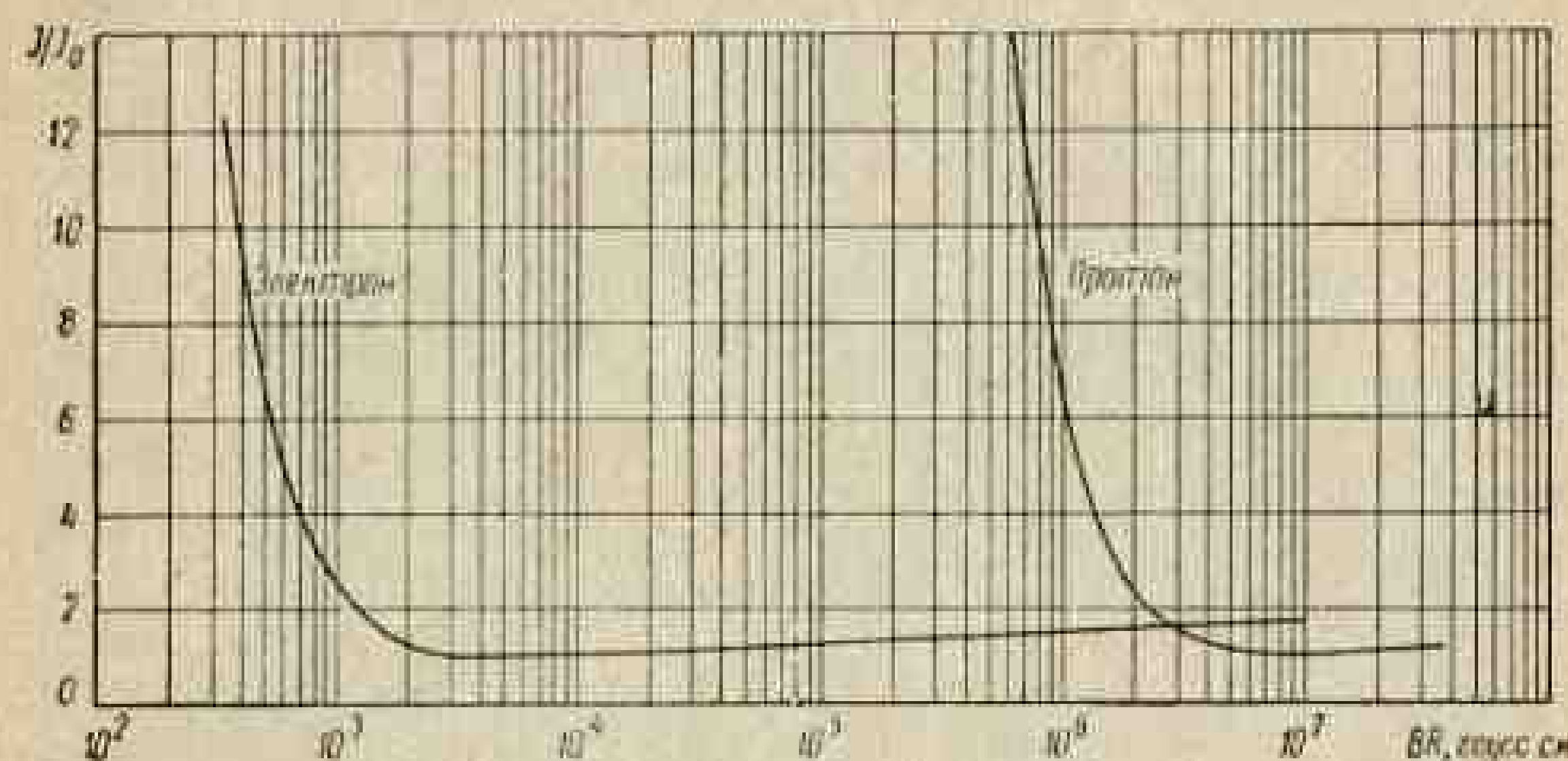


Рис. 36. Плотность ионов в зависимости от магнитной жесткости BR для электронов и протонов. Плотность ионов J отнесена к плотности ионов, создаваемой минимально ионизирующей частицей J_0 .

предыдущих опытах. Вскоре стало очевидно, что частицы вторичного космического излучения обладают широким диапазоном энергий, который простирается много дальше 1 Гэв. Далее оказалось, что примерно половина следов в магнитном поле отклоняется в одну сторону, а вторая половина — в другую. Предполагая, что космические частицы всегда движутся сверху вниз, Андерсон пришел к выводу о том, что во вторичном космическом излучении содержится примерно поровну положительных и отрицательных частиц.

Сначала Андерсон думал, что отрицательные частицы — это электроны, а положительные — протоны. Но затем, по мере увеличения точности экспериментов, это объяснение пришлось отбросить.

Дело в том, что по числу капелек, образованных частицей вдоль следа в камере Вильсона, можно оценить ее ионизирующую способность. Известно, что ионизирующая способность частицы уменьшается с ростом ее скорости (см. главу 2). При заданной магнитной жесткости легкая частица движется с большей скоростью, чем тяже-

лая. Поэтому легкая частица производит меньшее ионизирующее действие.

Для иллюстрации этого утверждения на рис. 36 представлена зависимость плотности ионов от величины жесткости для электронов и протонов. Кривые (подобные кривым на рис. 8, где дана зависимость плотности ионов от кинетической энергии частиц) показывают, что электроны и протоны с достаточно малыми магнитными жесткостями вызывают совершенно различную по плотности ионизацию. Следовательно, если бы положительные частицы в опытах Андерсона были протонами, то их следы оказались бы гораздо более плотными, чем следы отрицательных частиц.

Но вопреки ожиданиям плотности ионизации следов были практически одинаковыми даже для магнитных жесткостей, меньших 10^6 гаусс·см, где протоны ионизуют почти в шесть раз сильнее, чем электроны. Было очень соблазнительно считать эти результаты доказательством существования неизвестной до сих пор частицы с положительным элементарным зарядом и массой, близкой к массе электрона.

Прежде чем принять этот чрезвычайно смелый вывод, необходимо было тщательно исследовать все возможные источники ошибок. Поэтому Андерсон серьезно рассмотрел и такую возможность: а что если частицы, которые он считал положительными и движущимися сверху вниз, на самом деле обычные отрицательные электроны, но движущиеся снизу вверх? Для проверки этого предположения Андерсон разделил свою камеру свинцовой пластиной на верхнюю и нижнюю секции. Пройдя пластину, частица потеряет некоторое количество своей энергии и будет иметь соответственно меньшую жесткость, что позволит определить направление ее движения. Оказалось, что опасения Андерсона не были напрасными: в камере с пластиной наблюдались частицы, движущиеся как сверху вниз, так и снизу вверх. Однако на фотографиях камеры были следы, которые несомненно принадлежали положительным частицам с массой, практически равной массе электрона*. Любопытно, что наибо-

* Хорошая точность в измерении радиуса кривизны и плотности ионов на некоторых следах позволила Андерсону оценить массу частицы. По его данным, масса новой частицы могла отличаться от массы обычного отрицательного электрона не более чем на 20%.

лее убедительное доказательство было получено на фотографии положительной частицы, движущейся снизу вверх. Без свинцовой пластины этот след безусловно был

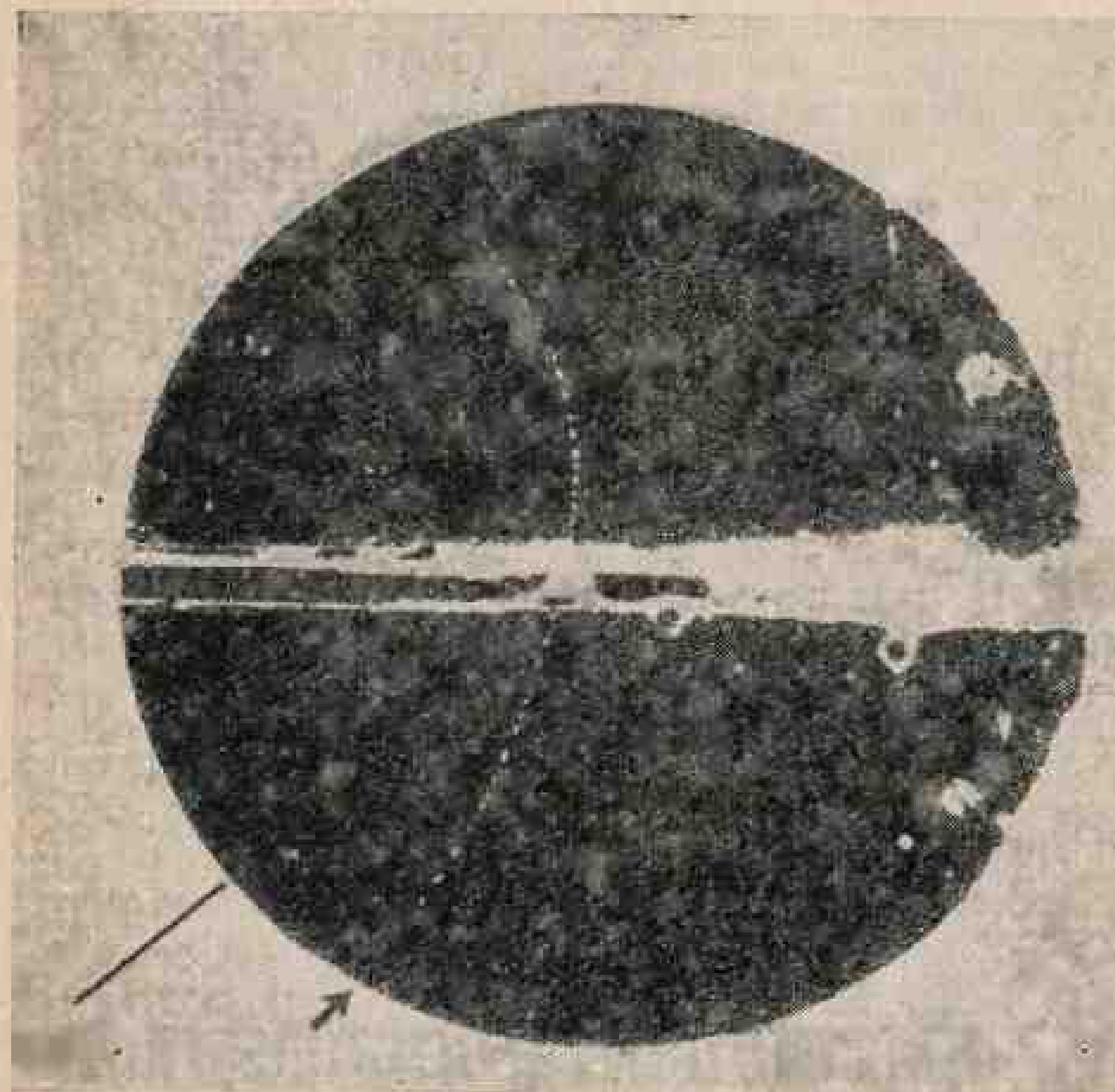


Рис. 37. Позитрон, или положительный электрон, был отождествлен с частицей, влетевшей в камеру снизу и оставившей след, сильно изогнутый влево после прохождения свинцовой пластины. Этой фотографией, полученной в 1932 г. Андерсоном, было доказано существование позитронов. (Из статьи в The Physical Review. Том 43, 1933, стр. 491.)

бы ошибочно принят за след обычного электрона, идущего сверху! (рис. 37). Направление движения частицы очевидно, так как участок следа над пластиной имеет значительно меньший радиус кривизны, чем участок следа под пластиной. Отклонение в магнитном поле указывает на то, что частица имеет положительный заряд. Магнитная жесткость частицы в результате

прохождения пластины уменьшается с $2,1 \cdot 10^5$ до $7,6 \cdot 10^4$ гаусс·см. Плотность ионизации на обоих участках следа минимальна.

Все эти результаты легко объяснить, если новой частице приписать массу, близкую к массе электрона. Ведь след протона с магнитной жесткостью $7,6 \cdot 10^4$ гаусс·см имел бы плотность ионизации гораздо больше наблюдаемой. Кроме того, такой протон имел бы пробег в газе камеры только 5 мм, тогда как наблюдаемая длина следа более 50 см.

Теория Дирака и происхождение позитронов

В то время как Андерсон работал в США, Блеккет и Оккиалини в Англии проводили свои эксперименты с камерой Вильсона, управляемой счетчиками. В этих экспериментах были получены очень важные результаты. Прежде всего Блеккет и Оккиалини подтвердили сделанное Андерсоном несколькими месяцами ранее открытие позитрона. Далее, они обнаружили, что все ливневые частицы, отклоняемые сравнительно слабым магнитным полем в их опытах (обычно от 2000 до 3000 гаусс), были отрицательными или положительными электронами. И, наконец, число положительных и отрицательных частиц, по крайней мере в некоторых ливнях, было примерно одинаковым.

Блеккет и Оккиалини получили также много фотографий в камере Вильсона со свинцовой пластиной внутри. На фотографиях часто были видны два и более ливней, образованных одновременно в пластине или в стенках камеры. Такое частое появление одновременно нескольких ливней было достаточно удивительным. Складывалось впечатление, будто вторичные ливни с большей вероятностью порождаются частицами, генерированными в ливнях, чем обычными космическими частицами, наблюдаемыми в атмосфере. В довершение всего, на некоторых фотографиях Блеккет и Оккиалини наблюдали и такие ливни, генерированные в пластине, когда над пластиной не было ни одного следа ионизирующей частицы.

Эти ливни не могли быть генерированы ни электронами, ни другими заряженными частицами. Пришлось

постулировать существование нейтральных лучей, способных создавать ливни. С точки зрения Блеккетта и Оккиалини, такими лучами были, вероятно, высокоэнергетичные фотоны. Ливни, которые нельзя было приписать ни одной из ионизирующих частиц (рис. 38), наблюдались довольно часто. На этом основании экспериментаторы считали, что среди вторичных продуктов ливней есть, вероятно, и фотоны.

В лаборатории Кавендиша, где проводили свой эксперимент Блеккет и Оккиалини, работал в то время молодой теоретик П. Дирак, который несколькими годами раньше разработал новую теорию электрона.

Дирак в своей теории сделал попытку сочетать основные принципы квантовой механики с постулатами теории относительности Эйнштейна. Научная общественность не видела в теории Дирака большого смысла, поскольку эта теория предсказывала, казалось бы, совершенно абсурдные вещи, такие, как частицы с отрицательной массой и отрицательной энергией.

Но Дирак показал, что его теория может быть спасена, если предположить существование не только отрицательного, но и положительного электрона. Это предположение тоже казалось совершенно нереальным. Дирак пытался отождествить нужную ему положительную частицу с протоном, но его теория упорно отказывалась принять положительную частицу с массой, отличной от массы отрицательного электрона. Две частицы должны были быть абсолютно одинаковыми во всем, за исключением знака их заряда. В соответствии с принятой позднее терминологией одна частица должна быть античастицей другой. Блеккет и Оккиалини увидели в своих положительных частицах не что иное, как положитель-

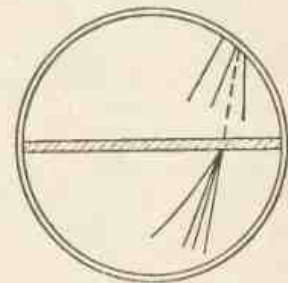


Рис. 38. Ливень, возникший в веществе над камерой Вильсона, содержит неионизирующую частицу, или фотон (пунктирная линия). Эта неионизирующая частица создала вторичный ливень в горизонтальной металлической пластине внутри камеры. [Рисунок сделан по фотографии, опубликованной Блеккетом и Оккиалини в *Proceedings of the Royal Society (London)*. Том A139, 1933, стр. 699.]

ные электроны, требуемые теорией Дирака. И сразу все встало на свои места.

Почему же позитроны встречаются так редко, что их не удавалось наблюдать раньше? Согласно теории Дирака, ответ состоял в том, что положительный электрон имеет малое время жизни в веществе, поскольку при встрече с отрицательным электроном обе частицы исчезают, или, как говорят физики, аннигилируют. В соответствии с уравнением Эйнштейна, связывающим массу и энергию, $E=mc^2$ масса обеих частиц переходит в энергию, которая излучается в виде фотонов.

Почему ливни содержат почти одинаковое число положительных и отрицательных электронов? Ответ на этот вопрос, по теории Дирака, состоял в том, что положительные электроны всегда рождаются в паре с отрицательными. В этом процессе *образования пар* часть энергии первичной частицы (или даже вся она) трансформируется в массу электрона и позитрона.

Какова же природа неионизирующих частиц, генерирующих ливни в экспериментах Блеккета и Оккиалини? Скорее всего они должны быть фотонами, так как, по теории Дирака, высокоэнергичные фотоны как раз способны создавать пары электронов и позитронов.

И последнее, некоторые физики заметили, что γ -лучи большой энергии, испускаемые радиоактивными источниками, поглощаются в веществе гораздо быстрее, чем предсказывает теория Клейна и Нишины (см. главу 2). «Избыток» в поглощении теперь мог быть приписан процессу рождения пар. При достаточно высоких энергиях фотоны расходуют свою энергию не только на комптоновское рассеяние (которое описывается теорией Клейна и Нишины), но и на образование пар. Экспериментально гипотеза об образовании пар высокоэнергичными фотонами была проверена Чедвиком, Блеккетом и Оккиалини в Англии и Ирен и Фредериком Жолио-Кюри во Франции. Они установили, что позитроны создаются также и γ -лучами, испускаемыми земными источниками, например бериллием, бомбардируемым α -частицами.

Глава 7

ЭЛЕКТРОНЫ, ФОТОНЫ И ЛИВНИ

Открытие позитрона, экспериментальная проверка теории Дирака, прямое наблюдение процессов превращения массы в энергию и энергии в массу относятся к числу самых замечательных достижений физики двадцатого века. Тем не менее все эти успехи не давали ответа на целый ряд вопросов физики космических лучей, в частности на вопросы о происхождении ливней космических лучей. Блеккет и Оккиалини пришли к заключению, что ливни часто возникают в результате двух и более последовательных соударений. Но всегда ли происходит так, и какое количество частиц (вернее, сколько пар положительных и отрицательных электронов) образуется в каждом соударении? Какова природа этих взаимодействий?

Участвуют ли в них атомные ядра? Если да, то разрушаются ли ядра при этом? Какие частицы вторичного космического излучения способны генерировать ливни? Таким образом, новые экспериментальные данные и новые теоретические исследования были еще более необходимы, чем прежде.

Экспериментальные характеристики ливней

Камера Вильсона — незаменимый прибор для изучения природы сложных взаимодействий, для анализа отдельных событий. И тем не менее очень важные сведения о ливнях и генерирующем их излучении были получены при помощи более простой и грубой аппаратуры, а именно установок из Г—М-счетчиков, расположенных не по одной линии (см. рис. 19). После открытия ливней космических лучей в различных лабораториях было вы-

полнено множество экспериментальных работ на установках из Г—М-счетчиков, включенных на совпадения. Нет смысла даже пытаться дать подробный обзор всех полученных данных. Упомянем лишь два ранних результата, особенно важных для понимания природы ливней.

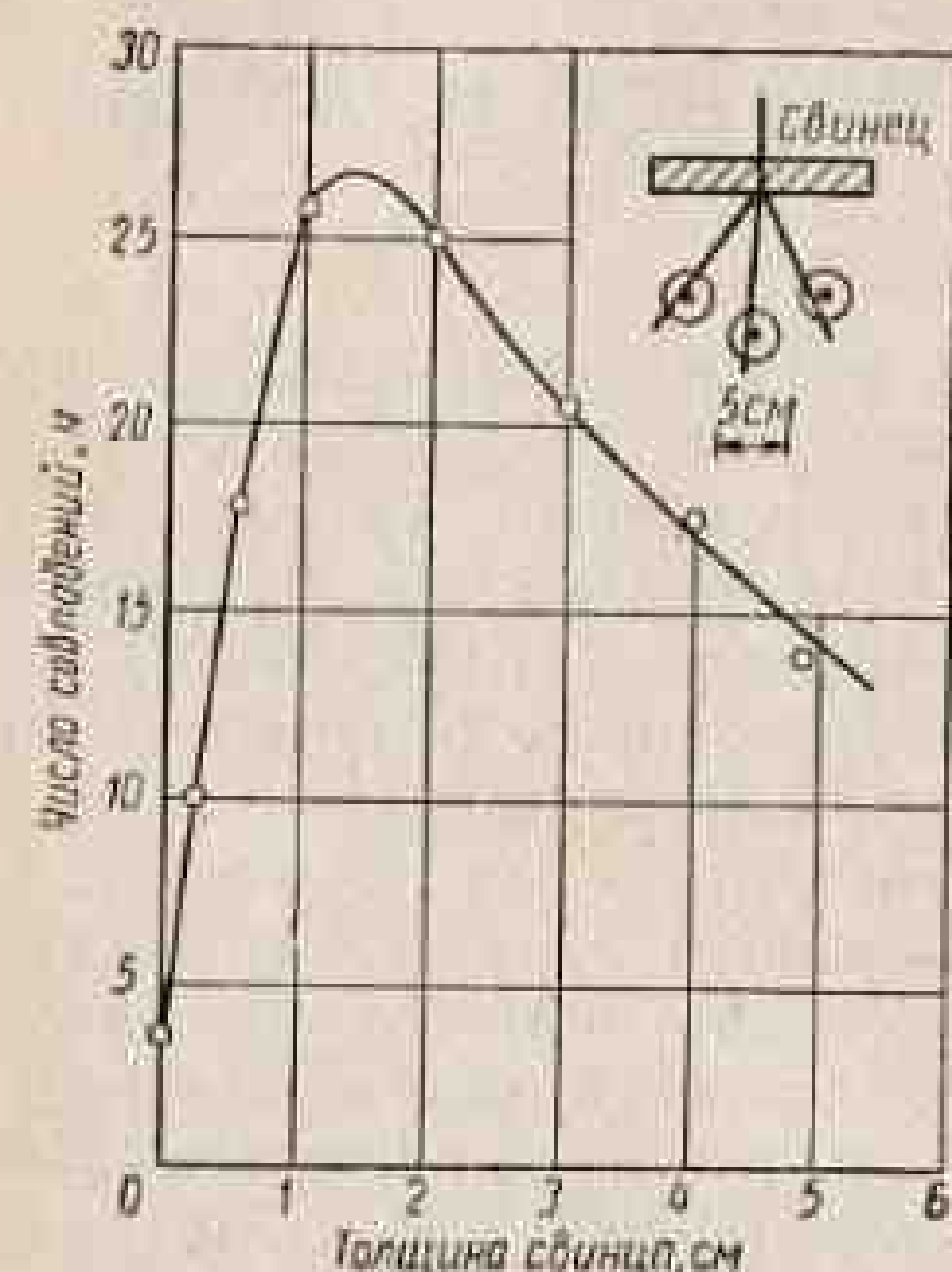


Рис. 39. Ливневая кривая. Число совпадений в час дано в зависимости от толщины свинца над счетчиками. Экспериментальная установка схематически показана на вставке. Экспериментальные точки отмечены кружками. (Этот рисунок основан на результатах автора, опубликованных в Zeitschrift für Physik. Том 82, 1933, стр. 151.)

проникающие частицы, наблюдаемые в атмосфере, и есть сами первичные космические частицы. По общему мнению, именно эти частицы генерировали ливни во взаимодействиях с атомными ядрами. Форма полученной ливневой кривой заставила признать ошибочность этого мнения. Было уже известно, что проникающие космические частицы имеют средний пробег в свинце порядка нескольких метров, поэтому их число и средние энергии не должны заметно измениться при прохождении несколь-

Первый результат представляет собой ливневую кривую, которая описывает изменение числа совпадений в установке по мере увеличения толщины поглотителя над счетчиками. Типичная ливневая кривая и схема установки, на которой она получена, приведены на рис. 39. Поглотителем служил свинец. Как видно из графика, при увеличении толщины свинца число совпадений от ливней, генерированных в поглотителе, вначале резко возрастает, достигает максимума при толщинах между 1 и 2 см, а затем совершенно неожиданно быстро убывает.

В то время многие ученые думали, что

ких сантиметров металла. Тем не менее число ливней, генерированных в свинцовой пластине, уменьшилось примерно в два раза при увеличении толщины пластины от 2 до 5 см. Очевидно, излучение, ответственное за ливни, поглощается в свинце гораздо сильнее, чем проникающее корпускулярное излучение.

Второй результат относится к частоте возникновения ливней в разных материалах. Помещая над установкой слой свинца, железа и алюминия с одинаковым количеством вещества на единицу площади (несколько граммов на квадратный сантиметр), я получил, что числа ливней в этих металлах относятся друг к другу примерно как 4:2:1. Оказалось, таким образом, что ливни с большей вероятностью возникают в данной массе тяжелого вещества (например, свинца), чем в той же массе легкого (например, алюминия). В других экспериментах было найдено, что чем тяжелее вещество, тем более эффективно оно поглощает излучение, генерирующее ливни. Это специфическое различие между тяжелыми и легкими элементами было новой особенностью физики высоких энергий. Ионизационные потери заряженных частиц, так же как вероятность комптон-эффекта, были практически одинаковыми в различных веществах, если их толщину измерять не в сантиметрах, а в граммах на квадратный сантиметр.

Все эти экспериментальные факты приводили к интересным выводам относительно ливнеобразующего излучения и его места во всей проблеме космических лучей. Постепенно начинала вырисовываться все более точная и конкретная картина. К счастью, не было необходимости по кусочкам создавать полную картину одних лишь эмпирических данных, так как уже были достигнуты и важные теоретические успехи. Эти успехи не означали открытия новых физических принципов, но физикам удалось на базе существующих теорий довольно точно предсказать поведение фотонов и электронов высоких энергий.

Теория Бете и Гайтлера

Было известно, что быстрые электроны при резкой остановке в веществе испускают фотоны (именно так возникает рентгеновское излучение). Обычно считалось,

что энергия, теряемая электронами на излучение, мала по сравнению с энергией, теряемой на ионизацию. Однако в 1934 г. Бете и Гайтлер, работавшие тогда в Англии, опубликовали результаты своих расчетов, которые приводили к совершенно иному выводу. Они подробно исследовали, что происходит, когда заряженная частица проходит вблизи атомного ядра и ее траектория искривляется сильным электрическим полем положительного заряда ядра.

В соответствии с классической теорией электрических и магнитных полей любой заряд, движущийся с ускорением, излучает электромагнитные волны. Так как движение по криволинейной траектории есть движение с ускорением, то заряженные частицы, проходя вблизи ядра, должны излучать, или, на языке квантовой физики, испускать фотоны.

Для точного вычисления эффекта Бете и Гайтлер должны были пользоваться квантовой теорией и релятивистскими уравнениями, поскольку они имели дело с отдельными частицами, размеры которых меньше атомных, а скорости близки к скорости света. Основные результаты Бете и Гайтлера таковы:

1. Радиационные потери для легких частиц (например, электронов) во много раз больше, чем для тяжелых частиц (например, протонов). Это легко понять, так как частица излучает в результате ускоренного движения, а при заданной силе ускорение обратно пропорционально массе, значит, чем больше масса, тем меньше ускорение.

2. При заданном количестве вещества на единицу площади радиационные потери в веществе с большим атомным номером значительно больше, чем в веществе с малым атомным номером. Этот результат обусловлен тем, что отклоняющая сила, которая действует на частицу, проходящую мимо атомного ядра, пропорциональна электрическому заряду ядра. Атомный номер Z — это число положительных зарядов (протонов) в ядре*. Таким образом, ядро с большим атомным номером, т. е. с большим электрическим зарядом, приводит к большему ускорению частиц и соответственно к большим радиационным потерям.

* См. Приложение VII.

3. Радиационные потери быстро возрастают с энергией. В этом отношении радиационные потери отличаются от ионизационных, которые вначале убывают при возрастании энергии, а затем становятся более или менее постоянными (см. рис. 8). Поэтому по мере возрастания

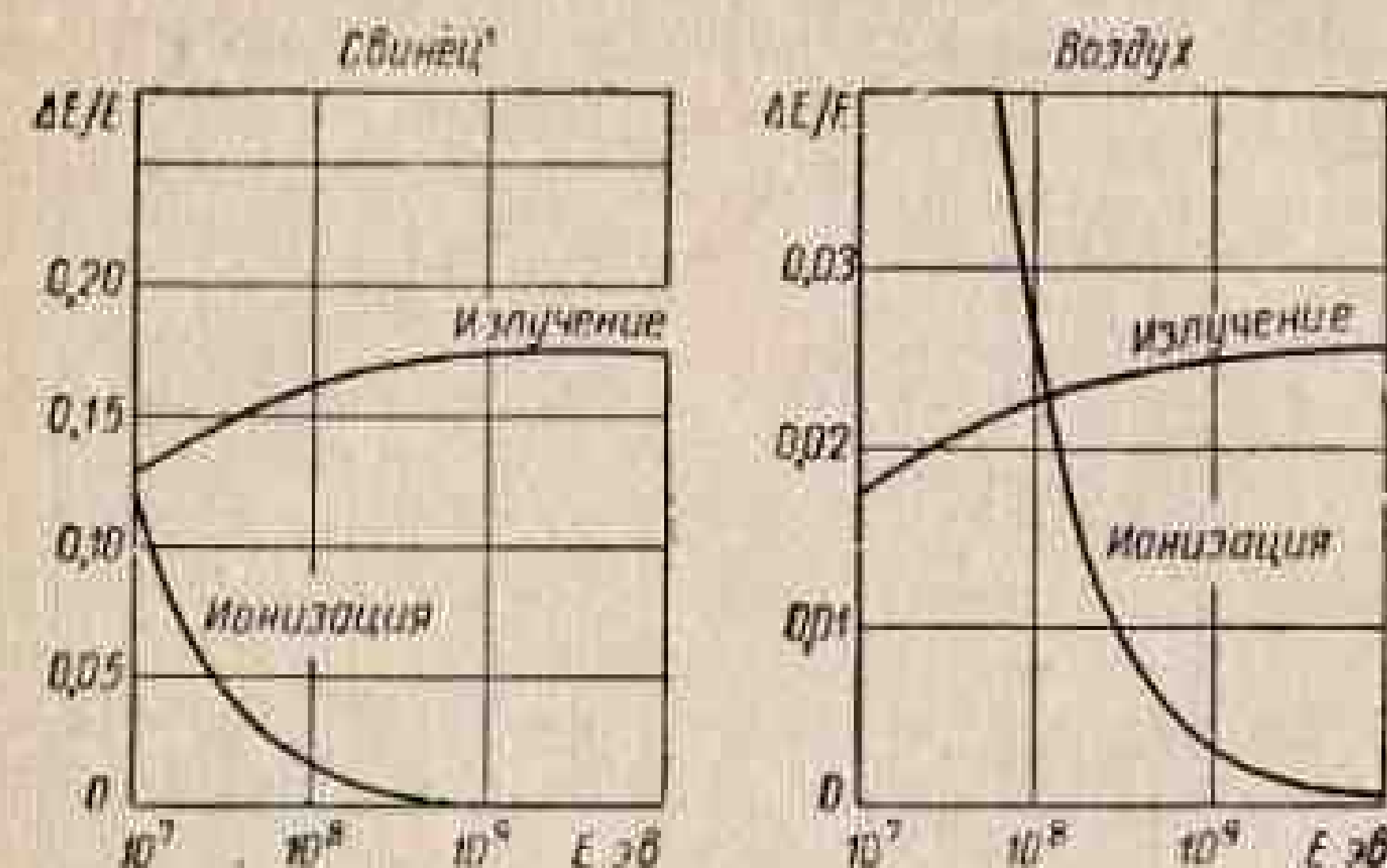


Рис. 40. Ионизационные и радиационные потери энергии электронами (в свинце и воздухе) в зависимости от их кинетической энергии. По вертикальной оси отложены потери энергии ΔE в 1 г/см², отнесенные к начальной кинетической энергии E электрона. Из графика видно, что, например, электрон с энергией 100 Мэв ($E = 10^8$ эв), пройдя 1 г/см² свинца, теряет около 1,7% своей энергии на ионизацию ($\Delta E/E = 0,017$) и в среднем 16% на радиацию ($\Delta E/E = 0,16$).

энергии радиационные потери в конце концов сравниваются с ионизационными. Для электронов это происходит при 10 Мэв в свинце и примерно при 100 Мэв в воздухе (рис. 40). (Зависимость радиационных потерь от энергии нельзя просто объяснить в рамках классической физики, нужно учесть требования теории относительности.)

Бете и Гайтлер опубликовали также на первый взгляд удивительные результаты расчета процесса образования пар. Вспомним, что теория Дирака, о которой шла речь в предыдущей главе, предсказывала образование фотоном пары частиц — позитрона и электрона. Оппенгеймер и один из его учеников рассмотрели этот процесс несколько тщательней. Оказалось, что наиболее вероятен

случай, когда фотон, проходя в сильном электрическом поле атомного ядра, внезапно исчезает, порождая только одну пару: электрон — позитрон.

Бете и Гайтлер провели точный расчет этого процесса и получили следующие результаты:

1. Для фотона заданной энергии вероятность образования пары в слоях различных веществ, но с одним и

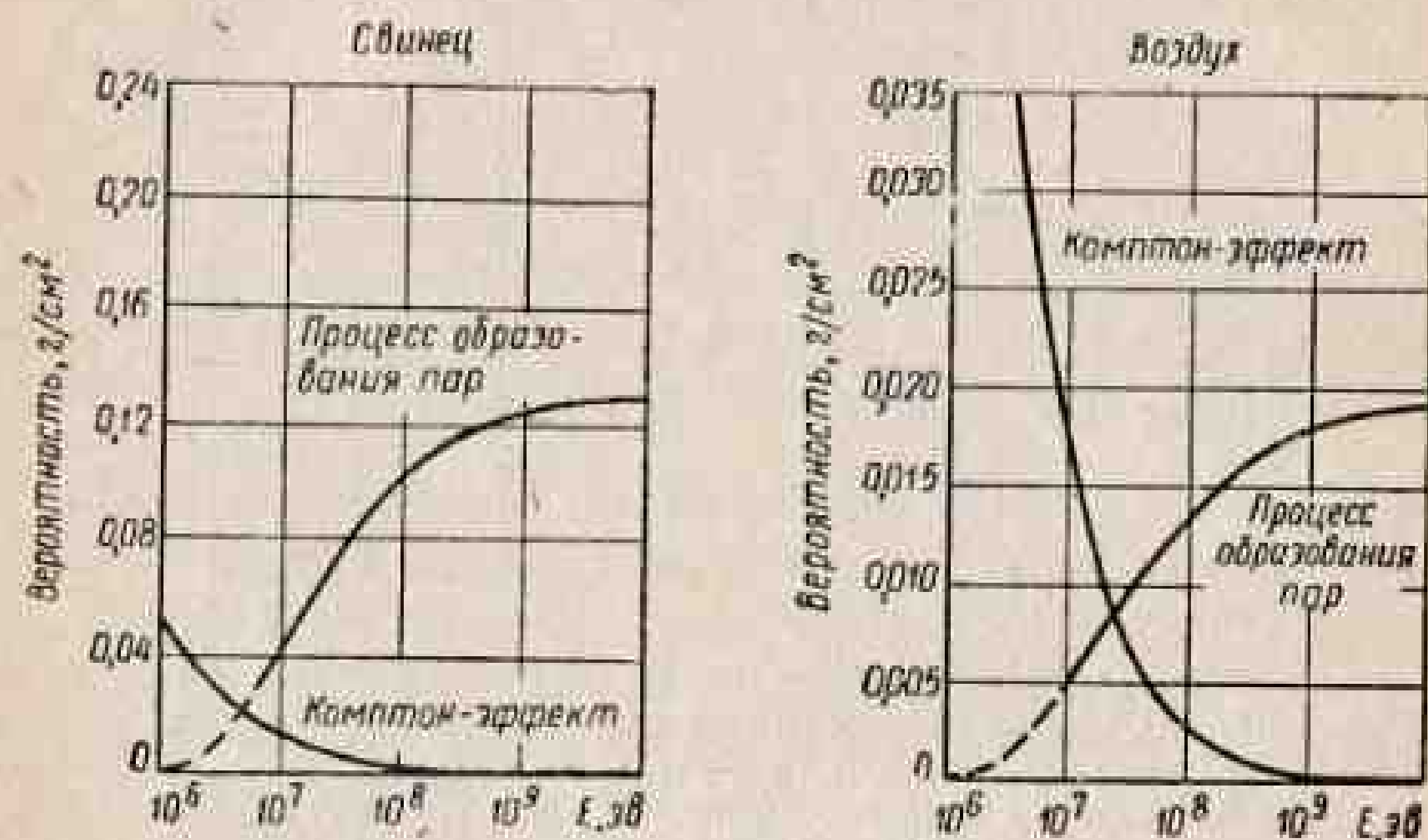


Рис. 41. Вероятность для фотона испытать комптон-эффект или образовать пару электронов при прохождении 1 г/см² свинца или воздуха приведена в зависимости от энергии фотона E . Из графика, например, видно, что фотон с энергией 10 Мэв ($E = 10^7$ эв) обладает вероятностью в 1,3% испытать комптон-эффект и в 4% — исчезнуть, создав пару в 1 г/см² свинца.

тем же количеством вещества на единицу площади быстро возрастает с ростом атомного номера Z вещества. В этом случае, так же как и в случае радиационных потерь, зависимость от атомного номера отражает влияние электрического заряда ядра. Хотя фотоны обладают электрическим зарядом, но, будучи электромагнитным излучением, они взаимодействуют с электрическим полем, причем это взаимодействие тем вероятнее, чем сильнее поле. Так что фотон с данной энергией имеет большую вероятность создать электронную пару в поле ядра с большим Z , чем в относительно более слабом поле ядра с малым Z .

2. Начиная с энергии фотона в 1 Мэв, при которой процесс образования пар становится возможным, ве-

роятность образования пар в определенном слое вещества вначале быстро возрастает с энергией фотона, а затем становится практически постоянной. Поскольку вероятность эффекта Комптона уменьшается при увеличении энергии фотона, то, следовательно, при малых энергиях фотоны поглощаются в основном благодаря эффекту Комптона, а при больших энергиях — за счет рождения пар. Энергия фотонов, при которой вероятности обоих процессов равны между собой, составляет около 5 Мэв в свинце и примерно 20 Мэв в воздухе (рис. 41).

В то время когда Бете и Гайтлер развивали свою теорию, физики были уверены, что все заряженные частицы во вторичном космическом излучении — это электроны или позитроны. Но тот факт, что много космических частиц проникает даже сквозь 1 метр свинца, явно противоречил теории Бете—Гайтлера. Ведь если теория верна, то только лишь электроны с абсурдно большими энергиями могут пройти сквозь такой толстый поглотитель.

Кроме того, Андерсон наблюдал в своей камере Вильсона заряженные частицы с энергией около 300 Мэв, которые теряли в веществе значительно меньшую долю энергии, чем предсказывалось теорией.

Под давлением экспериментальных фактов Бете и Гайтлер пришли к выводу о том, что «квантовая теория явно несправедлива для электронов таких высоких энергий».

Теория ливней

Однако спустя некоторое время совсем с другой стороны появилось доказательство, что теория Бете и Гайтлера вопреки мнению самих авторов несомненно верна для электронов и фотонов высоких энергий. Эта теория дала ключ к объяснению ливней космических лучей.

Объяснение основано на довольно простой идее (рис. 42). Допустим, например, что фотон высокой энергии, скажем в несколько Гэв, попадает в свинцовый блок. Пройдя небольшое расстояние (согласно теории, примерно 7 мм), фотон исчезает, образуя электронно-позитронную пару. Энергия падающего фотона делится между

электроном и позитроном, каждый из них, не успев отойти далеко от места своего рождения, теряет значительную часть энергии, излучая фотон. Эти фотоны образуют, в свою очередь, новые электронно-позитронные пары, и т. д. В каждом акте взаимодействия вместо одной частицы появляются две: электрон и позитрон вместо одного начального фотона или электрон и фотон вместо одного начального электрона. Соответственно энергия отдельной частицы в каждом акте уменьшается в среднем вдвое.

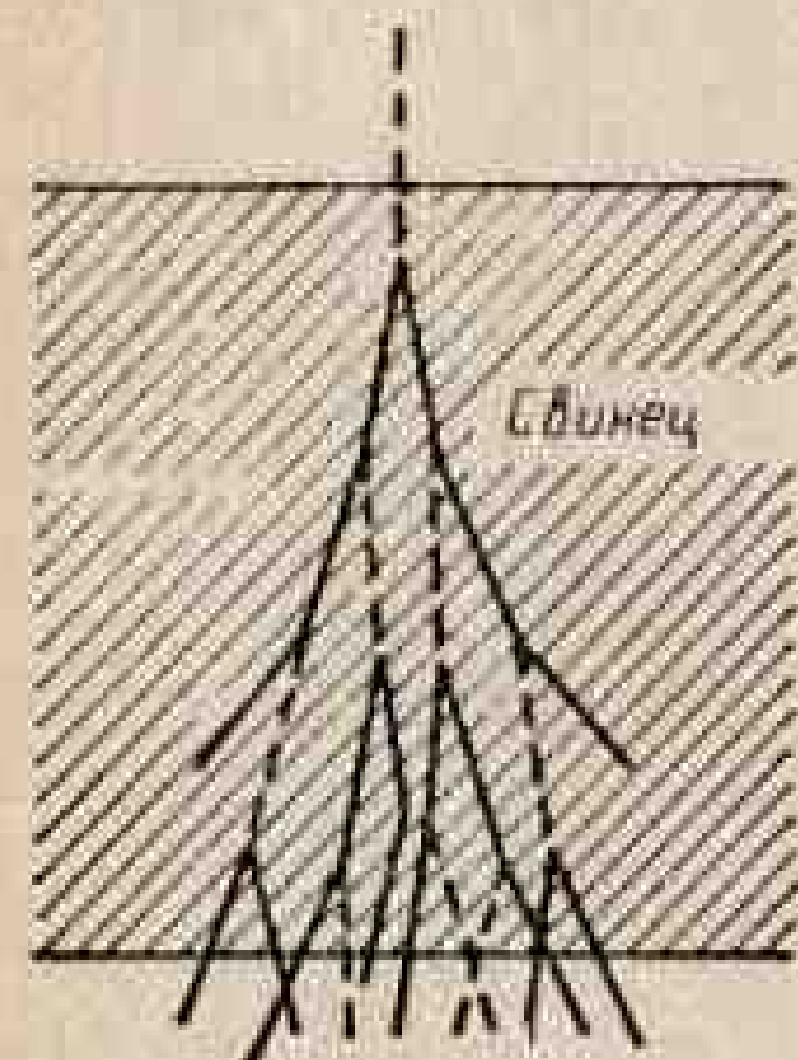


Рис. 42. Развитие ливня в свинце путем последовательных актов процессов образования пар и излучения. Пунктирные линии изображают фотоны, сплошные — электроны.

В результате такого *каскадного процесса* число частиц вначале возрастает, в то время как энергия этих частиц уменьшается.

В конечном счете начальная энергия делится между все большим и большим числом создаваемых частиц, но большинство электронов при этом имеют уже такую малую энергию, что они не способны эффективно излучать и, израсходовав основную энергию на ионизацию, останавливаются. Аналогично все большее число фотонов излучается с энергией, недостаточной для образования электронно-позитронных пар, и вскоре теряет свою энер-

гию путем комптоновского рассеяния.

Ливень постепенно затухает. На фотографии (рис. 43) показано развитие реального ливня в большой камере Вильсона с латунными пластинами.

Бете и Гайтлер в Англии и Дж. Карлсон и Оппенгеймер в США практически одновременно объяснили природу ливней космических лучей. Создание подробной теории *каскадного процесса*, объясняющей развитие ливня за счет рождения пар фотонами и излучения фотонов электронами при торможении в поле ядер, содержало в себе большие математические трудности. Среди многих ученых, которые внесли вклад в решение этой проблемы, следует упомянуть советских физиков Л. Д. Ландау,



Рис. 43. Фотография развития ливня в ряде латунных пластин толщиной 1,25 см, расположенных в камере Вильсона. Ливень создан в верхней пластине электроном высокой энергии или фотоном. Фотография получена группой по изучению космических лучей в Массачусетском технологическом институте.

И. Е. Тамма и С. З. Беленького, американцев Х. Снай-дера, Р. Сербера, В. Х. Фарри, индийских ученых Бабу и С. Чакрабартти.

Каскадный процесс носит статистический характер. Данный фотон образует пару электронов, или данный электрон излучает фотон в некоторой случайной точке. Точно так же энергия фотона или электрона делится двумя частицами, образованными в отдельном акте сравнительно произвольно. Следовательно, ливни, гене-

рированные фотонами (или электронами) определенной энергии, вовсе не обязаны быть совершенно одинаковыми.

Однако можно исследовать поведение ливней в *среднем*. Так, например, на рис. 44 показана зависимость среднего числа электронов в ливнях, генерированных электронами с энергией 1,1 и 3,0 Гэв, от различной толщины свинца. Эти кривые поразительно схожи с экспериментальной ливневой кривой, приведенной на рис. 39. Как экспериментальная, так и теоретическая зависимости обнаруживают вначале быстрый подъем до максимума, за-

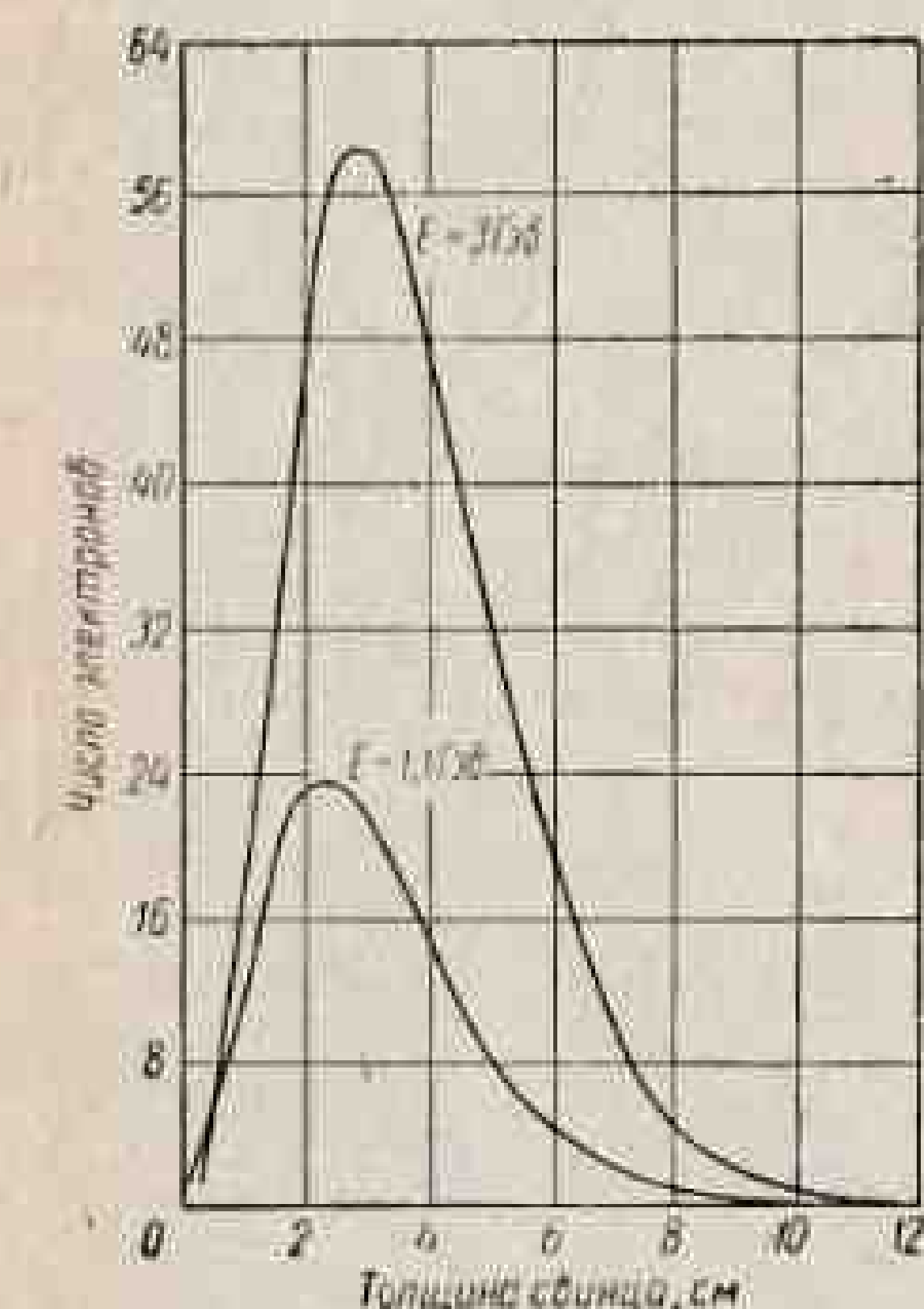


Рис. 44. Развитие ливней, образованных электронами с энергией 1,1 и 3 Гэв в свинце, в соответствии с теорией Снайнера. Число электронов в ливне приведено в зависимости от толщины свинца.

тем такой же резкий спад; причем в обоих случаях максимум соответствует толщине свинца около 1 см.

Нельзя, конечно, говорить, что кривые представляют собой точно одно и то же. Экспериментальная кривая дает число совпадений в Г—М-счетчиках, расположенных не на одной прямой, в зависимости от толщины свинца.

Теоретические же кривые дают число ливневых частиц, вылетающих из слоя свинца, также в зависимости от толщины этого слоя. Тем не менее сходство кривых не может быть случайным, поскольку вероятность того, что ливень вызовет срабатывание установки, увеличивается с числом ливневых частиц.

Как показал анализ большого числа экспериментальных данных, в целом каскадная теория удовлетворительно описывает наблюдаемые характеристики ливней. Например, эта теория успешно объяснила характер развития ливней в веществах с различным атомным номером. Выше уже отмечалось, что подъем и спад экспериментальной ливневой кривой значительно круче для элементов с большим атомным номером, таких, как свинец ($Z=82$), чем для элементов с малым атомным номером, таких, как алюминий ($Z=13$), если толщины измеряются в граммах на квадратный сантиметр. Точно такую же зависимость дают и теоретические кривые. Дело в том, что для рождения пары фотонов и для тормозного излучения в свинце требуется меньший пробег, чем в алюминии.

Хорошее соответствие каскадной теории эксперименту доказало правильность теории Бете и Гайтлера и позволило сделать следующие важные выводы.

1. В состав вторичного космического излучения входят электроны и фотоны с энергией в миллиарды электронвольт.

2. Наблюдаемые ливни — это результат каскадных процессов, вызываемых такими электронами и фотонами.

3. Элементарные взаимодействия, за счет которых развиваются каскады, — это тормозное излучение фотонов электронами и образование пар фотонами. Эти процессы происходят около атомного ядра, но никаких изменений в структуре ядра они не влекут (в противоположность мнению о том, что ливни появляются в результате ядерного распада). В каждом элементарном акте возникают только две частицы (электрон и позитрон или фотон и электрон). Группы из многих частиц, которые иногда кажутся выходящими из одной точки поглотителя, на самом деле являются результатом нескольких отдельных взаимодействий, происходящих близко друг от друга в веществе.

4. Ионизирующие частицы, составляющие мягкую компоненту вторичного космического излучения, — это электрон из ливней, зарождающихся в атмосфере или в крыше здания, в котором расположена установка.

Эти результаты принесли, конечно, физикам большое удовлетворение. Однако все еще оставалось явное противоречие между экспериментальными данными по ливням, которые, казалось, подтверждали теорию Бете и Гайтлера, и данными по проникающим частицам, которые ей противоречили. В этом необходимо было разобраться.

Глава 8

МЮ-МЕЗОНЫ

Теория радиальных потерь и образования пар дала последовательное объяснение ливням, но не раскрыла, однако, тайны происхождения другой проникающей компоненты вторичного космического излучения. Прежде всего вспомним, что до появления теории, довольно точно описывающей поведение электронов и фотонов высокой энергии, физики считали, что проникающую группу частиц (см. рис. 35) составляют электроны, которые расходуют свою энергию в основном на ионизацию вещества. Поскольку не было известно о преобладании радиационных процессов при высоких энергиях, то физики для объяснения колоссальной проникающей способности этих частиц вынуждены были постулировать существование электронов с энергией в несколько Гэв.

Тем не менее природа так называемых ливнеобразующих частиц все еще оставалась загадочной. Было очевидно, что двух известных процессов — ионизационных потерь электронов и комптоновского рассеяния фотонов — недостаточно для образования ливней космических лучей. Когда стали известны процессы тормозного излучения и образования пар, то физики пришли к выводу, что ливнеобразующее излучение состоит из высокоэнергичных электронов и фотонов, которые ведут себя в точном соответствии с теорией. В то же время было совершенно ясно, что наблюдаемые проникающие частицы нельзя считать электронами, если признать правильным теоретическое истолкование их поведения.

Что же в таком случае представляли собой эти частицы? На этот вопрос можно было дать два ответа, и каждый из них имел сторонников среди физиков, изучающих космические лучи. Либо эти частицы вообще не электроны, либо они электроны, но развитая теория

перестает быть справедливой при энергиях в несколько Гэв. Другими словами, если проникающие частицы — это электроны, то выше какой-то критической энергии они теряют способность излучать фотоны.

В конечном счете несостоятельным оказалось второе предположение. С одной стороны, Е. Вильямс (Англия) в 1933 г. и С. Вайцзекер (Германия) в 1935 г. теоретически показали, что предсказания Бете и Гайтлера относительно радиационных процессов электронов должны быть справедливы и при энергиях выше нескольких Гэв. С другой стороны, даже если не принимать во внимание эти теоретические соображения, трудно было указать также значение критической энергии, которое объясняло бы все экспериментальные данные. Некоторые из наблюдаемых ливней были настолько велики, что энергия генерировавшей их частицы должна была составлять много Гэв.

В то же время большинство проникающих частиц имело энергию в 1 Гэв и меньше. Таким образом, физики стали серьезно обсуждать первую возможность: существование новых частиц, ответственных за проникающую компоненту космических лучей.

Согласно теории, если радиационные потери какой-то частицы меньше, чем у электрона, то она должна иметь большую массу (см. главу 7). Среди известных в то время частиц единственной заряженной частицей тяжелее электрона был протон. На этом основании Вильямс в 1934 г. предположил, что проникающие космические лучи состоят из протонов. Но так как в экспериментах с камерами Вильсона были обнаружены проникающие частицы с электрическими зарядами обоих знаков, то Вильямсу пришлось включить в свою гипотезу наряду с положительными протонами отрицательные протоны*.

Новая частица промежуточной массы

Протонная гипотеза сразу же встретила с существенными трудностями. Едва только Вильямс выдвинул свое предположение, как стали появляться эксперимен-

* Теория Дирака предсказывала существование отрицательных протонов как античастиц по отношению к обычным протонам (см. главу 10).

тальные данные, прямо ему противоречащие. Эти данные были получены в исследованиях, проведенных Андерсоном и С. Неддермейером в Калифорнийском технологическом институте при помощи камеры Вильсона. Андерсон и Неддермейер изучали потери энергии космических лучей в веществе. Для этого они поместили внутри камеры Вильсона свинцовую пластину толщиной 3,5 мм.

На многих фотографиях исследователи обнаружили следы частиц с магнитными жесткостями в пределах от 10^5 до 10^6 гаусс·см, которые ионизовали слабее, чем протоны с такими же жесткостями (см. рис. 36) и радиационные потери которых в свинцовой пластине составляли меньшую величину, чем предсказывала теория для электронов.

Нужно, однако, иметь в виду, что радиационные потери энергии имеют статистическую природу. Теория предсказывает, что в среднем потери энергии в 3,5 мм свинца для электрона должны быть велики, однако всегда существует вероятность того, что отдельные электроны, не проходящие в поглотителе вблизи атомных ядер, могут потерять значительно меньше энергии. Поэтому результаты Андерсона и Неддермейера можно было рассматривать скорее как указание, а не как строгое доказательство.

Для получения более определенных данных они заменили свинцовую пластину платиновой толщиной 1 см. По отношению к радиационным потерям эта пластина была эквивалентна примерно 2 см свинца. Вероятность того, что электрон пройдет через такую толстую пластину, не испытав тормозного излучения, пренебрежимо мала. Результаты этих новых экспериментов, которые были опубликованы весной 1937 г., позволили сделать следующие выводы.

1. Существуют две группы совершенно различных частиц. Первая группа состоит из проникающих частиц, которые, проходя сквозь свинцовую пластину, теряют лишь малую долю своей энергии. Вторая группа состоит из сильно поглощаемых частиц, которые теряют большую долю своей энергии.

Энергетические потери частиц второй группы согласуются с расчетными значениями этих величин для электронов в предположении, что они теряют энергию на ио-

низацию и излучение. Следовательно, эти поглощаемые частицы скорее всего электроны. Для проникающих же частиц потери энергии можно полностью объяснить одними ионизационными потерями, т. е. *проникающие частицы не вызывают заметного тормозного излучения.*

2. Поскольку поглощаемые частицы часто приходят группами, они, по-видимому, представляют собой вторичные частицы из ливней, генерированных над камерой. В свою очередь они часто сами образуют ливни, подтверждая предположение о том, что это электроны. Проникающие частицы, наоборот, обычно появляются поодиночке на фотографиях камеры Вильсона.

3. Среди частиц, следы которых в камере Вильсона имеют одинаковую кривизну, одни частицы теряют значительную долю энергии, проходя сквозь пластину, а другие теряют лишь малую долю. Отсюда можно сделать вывод, что электроны не могут вести себя как поглощаемые частицы при энергиях ниже некоторой критической величины и как проникающие частицы при энергиях выше критической, ибо в противном случае частицы с одинаковой жесткостью (т. е. с одинаковой кривизной траектории) испытывали бы всегда одинаковые потери энергии.

Таким образом, поведение проникающих частиц нельзя было объяснить нарушением теории Бете и Гайтлера при высоких энергиях. Напрашивался вывод о том, что проникающие частицы — не электроны.

4. Многие проникающие частицы имеют магнитные жесткости меньше чем $1,5 \cdot 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{cm}$. При таких жесткостях протоны ионизуют по крайней мере в три раза сильнее, чем быстрые электроны (см. рис. 36). Однако плотность ионизации вдоль следов проникающих частиц примерно такая же, как и вдоль следов электронов. Поскольку проникающие частицы ионизуют меньше, чем протона.

С другой стороны, поскольку радиационные потери проникающих частиц *меньше*, чем для электронов, то их масса должна быть *больше*, чем масса электрона. На основании полученных результатов Андерсон и Неддермейер сделали вывод о том, что по всей вероятности «существуют частицы с единичным зарядом и с массой (которая может иметь и не одно значение) больше мас-

сы обычного свободного электрона и значительно меньше массы протона».

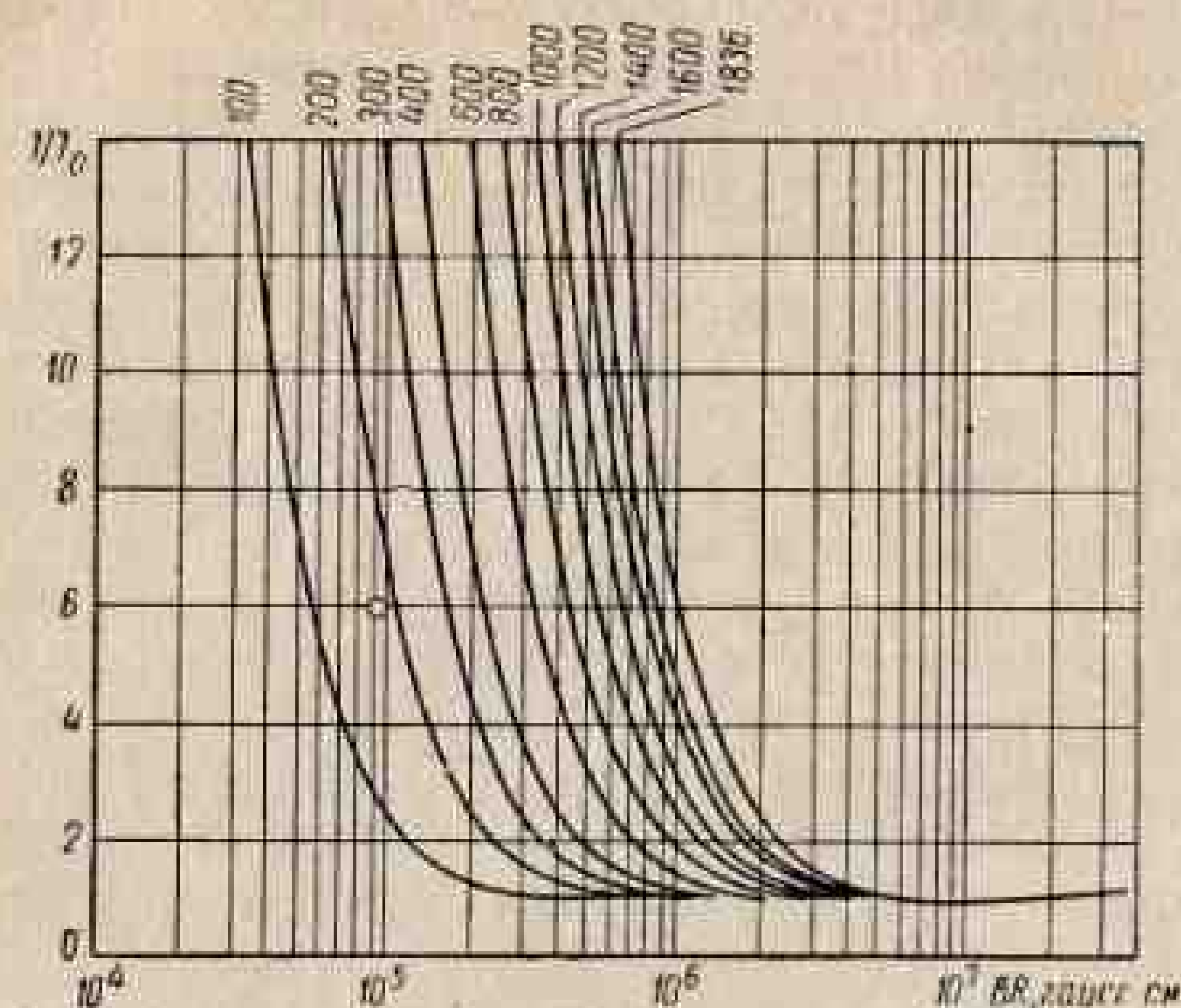


Рис. 45. Плотность капелек вдоль следа частицы в камере Вильсона дает плотность ионизации. Если камера находится в магнитном поле, то кривизна следа дает магнитную жесткость. По этим двум величинам при помощи приведенных кривых можно определить массу частицы. Магнитная жесткость отложена по горизонтальной оси в логарифмическом масштабе. По вертикальной оси отложено отношение наблюдаемой плотности ионизации J к той же величине для частицы с минимальной ионизацией J_0 . Разные кривые соответствуют частицам с единичным зарядом, но с различными массами, величины которых (в электронных массах) отмечены вверх над кривыми. (Частица с массой 1836 — это протон, соответствующая кривая идентична кривой на рис. 36.)

Значения магнитной жесткости и плотности ионизации для данного следа определяют точку на графике. Кривая, проходящая через эту точку, дает массу частицы. Например, для следа на рис. 47 $BR = 9,6 \cdot 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{cm}$ и $J/J_0 = 6$. Соответствующая точка, отмеченная на рисунке кружком, ложится возле кривой с массой 200 электронных масс.

При небольших значениях магнитной жесткости кривые хорошо разделяются, но практически сливаются при увеличении жесткости. Например, при $BR = 10^5 \text{ gauss} \cdot \text{cm}$ для частицы с массой 200 электронных масс $J/J_0 = 7$, а для частицы с массой 300 электронных масс $J/J_0 = 13$. Грубой оценки ионизации в этом случае достаточно для того, чтобы различить эти частицы. Но при $BR = 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{cm}$ обе частицы невозможно этим способом различать, так как они имеют практически одинаковую (минимальную) ионизацию.

Мю-мезон и его масса

Неддермейер и Андерсон не могли определить массу новой частицы со сколь-нибудь приемлемой точностью. Поэтому они не могли исключить возможность того, что проникающие частицы имеют такую же массу, как электроны, но обладают каким-то неизвестным свойством, запрещающим им излучать в тех условиях, когда обычные электроны излучают.

Причину такой неопределенности можно усмотреть из кривых рис. 45. На рисунке представлена зависимость плотности ионизации от величины магнитной жесткости для однократно заряженных частиц с массами, промежуточными между массами электрона и протона. При магнитной жесткости порядка $10^6 \text{ гаусс} \cdot \text{см}$ по плотности ионов вдоль следа заряженную частицу с массой вплоть до нескольких сот электронных масс нельзя отличить от электрона. Этим методом можно отождествить только частицы, массы которых близки к массе протона или превышают ее*.

Из рис. 45 следует также, что этим способом можно измерить массу только тех проникающих частиц, которые обладают довольно малой энергией. Именно такую задачу и поставили перед собой Дж. Стрит и Е. Стевенсон, работавшие в Гарвардском университете.

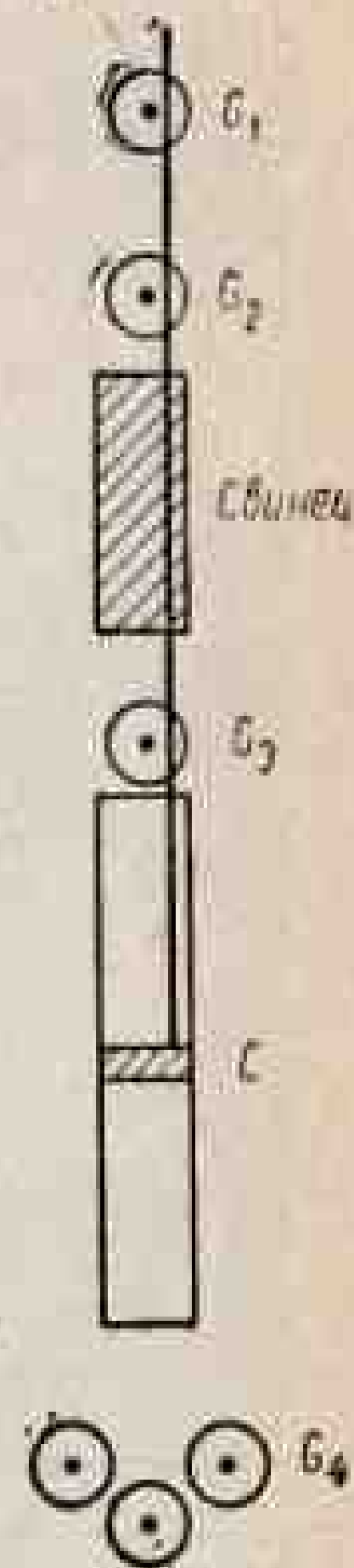
Стрит и Стевенсон использовали, так же как и Андерсон и Неддермейер, камеру Вильсона в магнитном поле. Поскольку малоэнергичные частицы среди проникающих частиц встречаются довольно редко, то Стрит и Стевенсон решили увеличить число полезных фотографий камеры, выбирая для регистрации только те частицы, которые останавливаются в камере. С этой целью камера Вильсона запускалась установкой из Г—М-счетчиков, которая сигнализировала о том, что частица попала в камеру, но не вышла из нее (рис. 46). Кроме того, экспериментаторы старались работать в условиях, наиболее благоприятных для счета капель, т. е. для измерения ионизации.

* Метод измерения плотности ионизации в камере Вильсона, который основан на подсчете капелек вдоль следа, неточен по своей природе. Небольшими изменениями режима работы камеры можно добиться того, что конденсация пара будет идти по-разному на ионах разных знаков или даже только на ионах одного знака.

Стрит и Стевенсон получили ряд фотографий в своей камере, и среди них была одна особенно важная, которая опубликована осенью 1937 г. (рис. 47). На этом снимке есть след, плотность ионизации вдоль которого превышает минимальную примерно в шесть раз, а магнитная жесткость его, определенная по кривизне, равна $9,6 \cdot 10^4 \text{ гаусс} \cdot \text{см}$. Точка на кривых рис. 45, соответствующая полученным значениям ионизации и жесткости, ложится вблизи кривой с индексом «200». Это означает, что масса интересующей нас частицы составляет приблизительно 200 электронных масс.

Таким образом, в работе Стрита и Стевенсона было не только уже вне всяких сомнений продемонстрировано существование новой частицы, но и сделана довольно точная оценка

Рис. 46. Схема установки, которую Стрит и Стевенсон использовали для получения фотографий проникающих частиц малой энергии в камере Вильсона. Камера С срабатывает от тех частиц, которые вызывают разряд в счетчиках G_1 , G_2 и G_3 , но не вызывают разряда ни в одном из счетчиков G_4 .



ее массы. Новую частицу называли по-разному: барион, юкон, мезотрон и, наконец, мезон. Последнее наименование — мезон — стало общепринятым. Позднее, когда были открыты и другие мезоны, физика присвоила этому первому мезону приставку «мю» (μ).

В последующие годы многие физики пытались точно измерить массу μ -мезонов. Среди наиболее точных измерений можно отметить работы Р. Броде и его сотрудников, выполненные в Калифорнийском университете в Беркли. В группе Броде массу частицы определяли не по магнитной жесткости и ионизации, а по магнитной жесткости и пробегу.

Принцип этого метода иллюстрируется рис. 48, где приведены для частиц различной массы зависимости между пробегом и магнитной жесткостью.



Рис. 47. По этой фотографии следа μ -мезона в камере Вильсона Стрит и Стевенсон впервые определили массу μ -мезона. (Из статьи в The Physical Review. Том 52, 1937, стр. 1003.)

Схема одного из опытов дана на рис. 49. Установка состояла из двух камер Вильсона, расположенных одна над другой. В верхней камере измерялась магнитная жесткость, в нижней, содержащей ряд свинцовых пластин, — пробег. Окончательное значение массы μ -мезона, опубликованное группой Брое в 1950 г., было равно

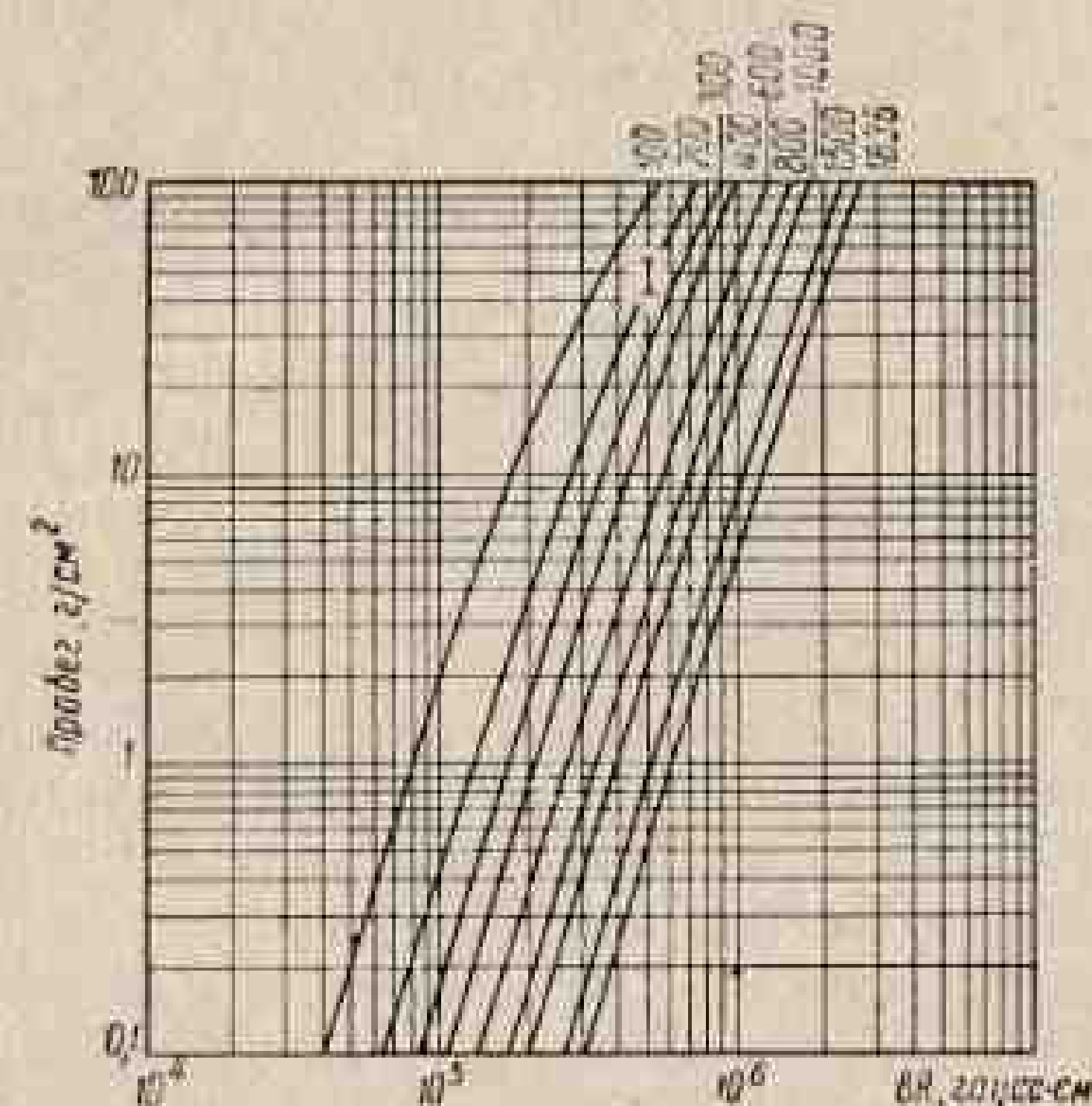


Рис. 48. Зависимость пробега однократно заряженных частиц различной массы от магнитной жесткости. Приведенные кривые можно использовать для определения массы частицы, когда экспериментально определены ее магнитная жесткость и пробег. Магнитная жесткость BR отложена по горизонтальной оси в логарифмическом масштабе; пробег в граммах на квадратный сантиметр — по вертикальной оси, тоже в логарифмическом масштабе. Разные кривые соответствуют частицам с единичным зарядом и различными массами (в единицах электронных масс). Магнитная жесткость и пробег определенной частицы дают точку на графике. Кривая, проходящая через эту точку, дает массу частицы. В экспериментах Брое (см. рис. 49) пробег в свинце измерялся с неопределенностью в 0,63 см или около 7 г/см^2 . Вертикальная черточка на рисунке изображает типичный случай, когда пробег частицы находится в пределах от 44 до 51 г/см^2 , а магнитная жесткость равна $5 \cdot 10^4$ гаусс·см.

Как видно из графика, масса частицы в этом случае лежит между 170 и 200 электронными массами. Однако неточность в измерении магнитной жесткости позволяет считать, что это определение массы согласуется с предположением о том, что наблюдаемая частица — μ -мезон.

206 ± 2 электронные массы. К этому времени μ -мезоны уже были получены с помощью ускорителей частиц искусственно, в лабораторных условиях. Принятое в настоящее время значение массы μ -мезона, определенное во многих экспериментах с искусственно полученными мезонами, равно $206,8$ электронной массы.

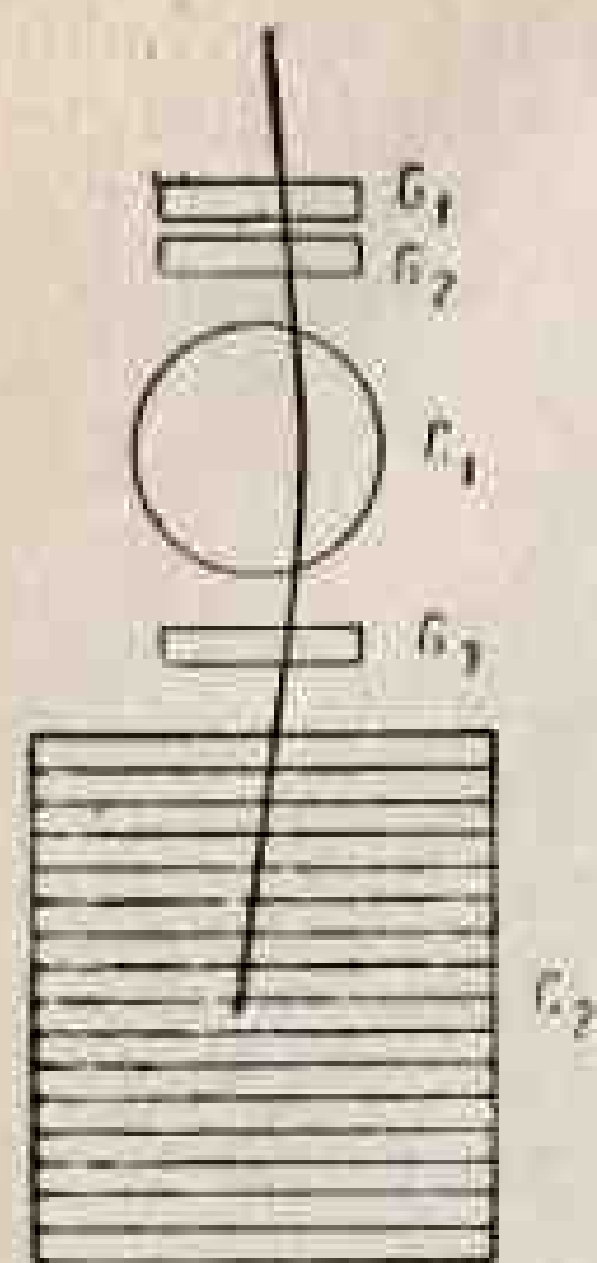


Рис. 49. Схема установки, использованной Броне и его группой для измерения массы μ -мезона. Обе камеры Вильсона срабатывали от частиц, вызывавших разряд в счетчиках G_1 , G_2 и G_3 . Камера G_1 помещалась в магнитном поле; по кривизне следов можно было определить магнитную жесткость. Камера G_3 содержала 15 свинцовых пластин толщиной $0,63$ см каждая.

Открытие μ -мезонов в 1937 г. завершило вторую главу в истории изучения космических лучей, начатую опытами Боте и Кольхестера. Природа вторичного космического излучения, наблюдаемого в атмосфере, наконец была выяснена: проникающие частицы — это μ -мезоны; поглощаемые частицы — электроны; неионизирующие частицы — фотоны. μ -Мезоны, электроны и фотоны составляют практически все излучение, наблюдаемое на уровне моря.

Теория Юкавы

Открытию μ -мезона, так же как и открытию позитрона, предшествовало теоретическое предсказание. В 1935 г. японский физик Хидеки Юкава постулировал существование субатомной частицы, в несколько сот раз более тяжелой, чем электрон. Рамки этой книги не позволяют разобрать строго все теоретические соображения Юкавы, и ниже мы лишь попытаемся дать приближенную грубую картину, которая, возможно, придаст хоть какую-то степень наглядности его выводам.

Как уже упоминалось в главе 2, природа вынуждает нас принять тот факт, что все излучения в одних аспектах ведут себя как волны, а в других — как частицы. Фотоны связаны с электромагнитными волнами, и по-

этому фотоны имеют отношение к электрическим силам, действующим между заряженными частицами. Квантовая теория действительно вскрыла тесную связь между свойствами фотонов и природой электрических сил.

Силы, которые сохраняют атом в виде единой системы, — это силы электрического притяжения между положительным ядром атома и его отрицательными электронами. К 1935 г. уже было известно, что само ядро состоит из протонов и нейтронов*. Но протоны, как положительно заряженные частицы, отталкиваются друг от друга, а нейтроны вообще электрически не взаимодействуют ни друг с другом, ни с протонами. Тем не менее атомные ядра — это удивительно стабильные образования. Для объяснения этого факта необходимо было предположить, что между протонами и нейтронами существуют силы притяжения неэлектрической природы — *ядерные* силы. Причем на малых расстояниях, характерных для атомных ядер, ядерные силы действуют гораздо сильнее электрических, а на больших расстояниях, наоборот, — гораздо слабее. Иными словами, ядерные силы убывают с расстоянием не по закону обратной пропорциональности квадрату расстояния, описывающему электрические силы, а значительно быстрее.

По аналогии с тем, как электрические силы связаны с фотоном, Юкава пришел к заключению, что ядерным силам тоже должна соответствовать какая-то частица. Затем он начал рассматривать свойства этой гипотетической частицы. Прежде всего он нашел, что, поскольку ядерные силы действуют на коротких расстояниях, частица, ответственная за эти силы, должна обладать конечной массой, как оказалось, порядка нескольких сот электронных масс. Далее Юкава предсказал, что частица, связанная с полем ядерных сил, должна быть *нестабильна*, что она должна распадаться так же, как распадаются ядра радиоактивных веществ. Более того, было предсказано, что среднее время жизни** частицы Юкавы

* См. Приложение VII.

** Термин «среднее время жизни» взят из теории радиоактивности, в соответствии с которой он означает среднее время существования всех ядер данного радиоактивного образца. Среднее время жизни совпадает с периодом, за который полное число ядер уменьшается за счет распада в $2,7$ раза ($2,7$ — основание натуральных логарифмов; определение среднего времени жизни с математической

до распада должно составлять около 1 микросекунды (10^{-6} секунды) и продуктами распада должны быть один электрон и одно *нейтрино*. Нейтрино — это частица с нулевой массой, лишенная электрического заряда. Существование нейтрино было постулировано В. Паули и Э. Ферми для объяснения того факта, что электроны, испускаемые при β -распаде радиоактивного элемента, обладают целым спектром энергий*.

После открытия мезонов некоторые физики, вспомнив теорию Юкавы, сделали вывод, что проникающие частицы в космических лучах это и есть «кванты поля ядерных сил», предсказанных теорией, т. е. *юконы*.

Как будет показано в главе 9, этот вывод оказался неправильным. Более того, когда кванты поля ядерных сил были открыты, то их свойства оказались не совсем такими, как предсказывал Юкава. Тем не менее идея о том, что мезоны космических лучей могли быть частицами, необходимыми в теории Юкавы, привела к очень важному открытию.

Открытие распада мю-мезона

В 1936—1937 гг. группы ученых в Англии, Франции, Германии и Италии проводили точные измерения числа космических частиц на разных высотах в атмосфере. Результаты этих измерений оказались неожиданными. Складывалось впечатление, вопреки более ранним данным группы Милликена (см. главу 1), будто воздух более эффективно поглощает космические лучи, чем твердые или жидкие вещества, если сравнивать слои с одинаковой массой вещества на единицу площади. Более того, казалось, что разреженные слои воздуха на больших высотах лучше поглощают, чем плотные слои на малых высотах в атмосфере.

точки зрения аналогично определению *среднего свободного пробега*; см. стр. 28 и рис. 10). Читателю, вероятно, более знакомо понятие «*период полураспада*» — промежуток времени, в течение которого полное число ядер уменьшается вдвое. Среднее время жизни радиоактивного ядра в 1,4 раза больше его периода полураспада.

* См. Приложение VIII.

Юкава предполагал, что предсказанные им частицы нестабильны. Если космические мезоны действительно совпадают с частицами Юкавы, то, следовательно, они должны спонтанно распадаться.

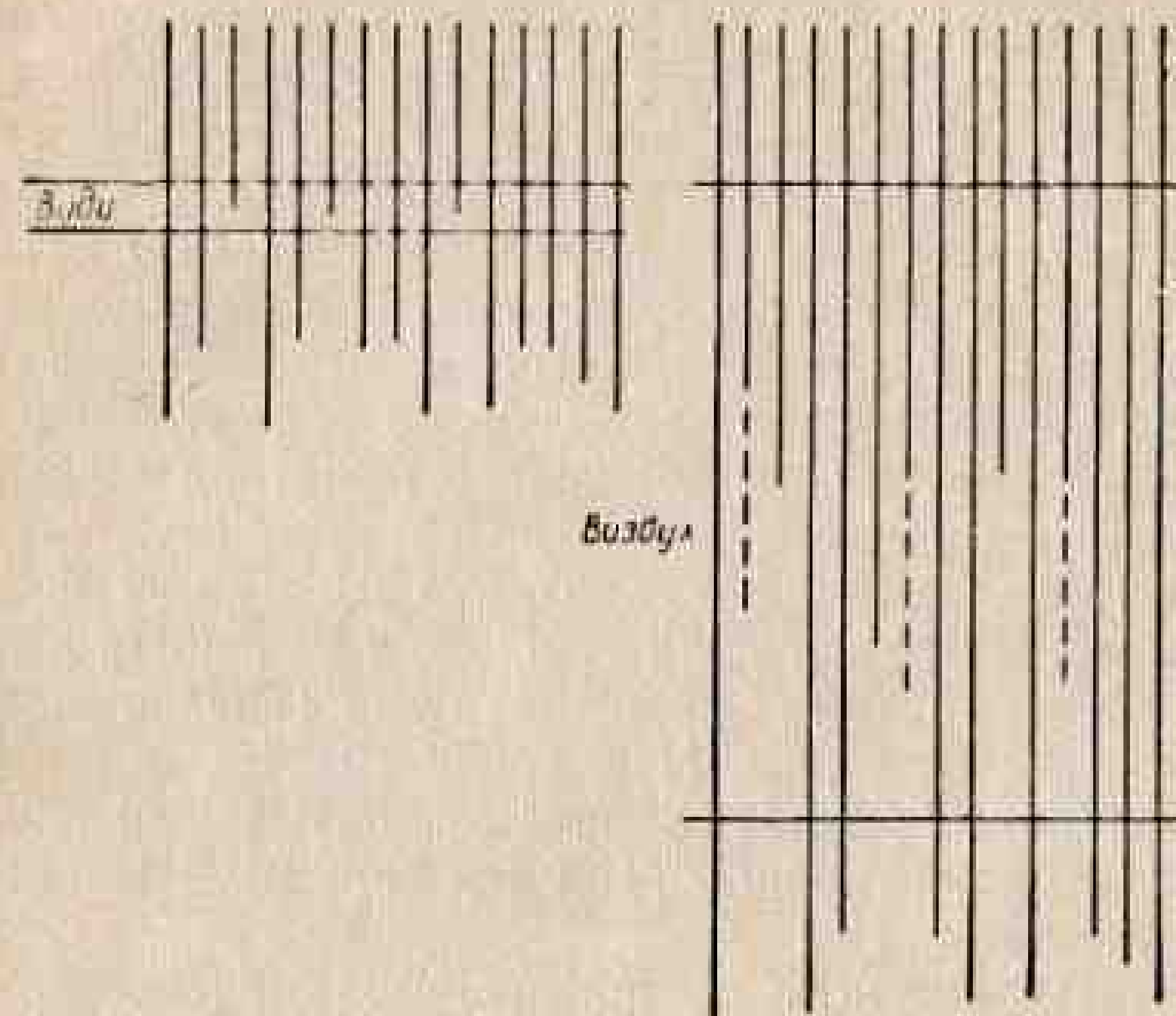


Рис. 50. Сравнение поглощения мезонов в слоях воды и воздуха с одинаковой массой, приходящейся на единицу площади. В обоих случаях останавливается равное число мезонов. Однако, проходя больший путь в воздухе, некоторые мезоны испытывают спонтанный распад. Поэтому под слоем воздуха будет обнаружено меньше мезонов, чем под эквивалентным слоем воды.

Немецкий физик Г. Кюхленкампп в 1938 г. показал, что это свойство мезонов естественным образом объясняет аномальное поглощение космических лучей в воздухе. Объяснение было очень простым (рис. 50). Рассмотрим, например, слой воды в 10 см толщиной. Слой воздуха с такой же массой на единицу площади имеет на уровне моря толщину 8000 см, поскольку плотность воздуха в 800 раз меньше плотности воды. На высоте около 5100 метров, где плотность воздуха вдвое меньше, чем на уровне моря, эквивалентный слой воздуха будет 16 000 см толщиной. Частица, движущаяся со скоростью, близкой к скорости света, проходит 10 см за $3,3 \cdot 10^{-10}$ се-

кунды, или за 0,00033 микросекунды. Той же самой частице потребуется 0,265 микросекунды, чтобы пройти 8000 см, и 0,53 микросекунды, чтобы пройти 16 000 см.

Предположим теперь, что среднее время жизни мезонов составляет несколько микросекунд. Тогда практически ни один мезон не успеет распасться, проходя 10 см воды. В этом поглотителе останутся лишь те частицы, пробег которых в воде меньше 10 см. Но на пути в 8000 см воздуха уже многие мезоны распадутся, и еще большее число распадется на пути в 16 000 см воздуха. Следовательно, к обычному поглощению мезонов добавляется эффект спонтанного распада. В результате получается, что воздух оказывается более эффективным, чем более он разрежен — в полном соответствии с экспериментальными данными.

Идею Кюхленкампа подхватили многие физики, в том числе В. Гейзенберг и Г. Эйлер в Германии и Блеккет в Англии, которые рассмотрели многочисленные следствия из этой гипотезы. И в конце 1938 г., и в начале 1939 г. вопрос о радиоактивном распаде мезонов вызывал самые горячие споры среди физиков, изучающих космические лучи.

Хотя эксперименты по поглощению космических лучей в атмосфере и указывали скорей всего на распад мезонов, но их еще нельзя было считать неопровержимым доказательством. Кроме того, терпели неудачу все попытки непосредственно обнаружить распад мезонов в камере Вильсона.

Я заинтересовался этой проблемой во время моего посещения Института теоретической физики Нильса Бора в Копенгагене осенью 1938 г. и лаборатории Блеккетта в Манчестерском университете следующей зимой. Весной 1939 г. по приглашению Комптона я начал работать в Чикагском университете. В то время я был увлечен мыслью проверить гипотезу о нестабильности мезонов путем непосредственного и точного сравнения поглощения мезонов в воздухе и в каком-нибудь плотном веществе.

Комптон великодушно предоставил в мое распоряжение все необходимое для эксперимента. Два члена его группы Н. Хилберри и Дж. Хоаг предложили мне свою помощь. Мы погрузили на грузовик детектор мезонов, состоящий из трех Г—М-счетчиков, включенных на сов-

падения, и свинца между счетчиками и вокруг них в достаточном количестве для обрезания электронной компоненты (рис. 51). С этой аппаратурой мы проводили измерения в Чикаго (180 метров над уровнем моря); затем мы отправились в Колорадо и работали в Денвере (1600 метров), на Эхо Лейк (3240 метров) и на горе Эванс (4300 метров). На всех пунктах в Колорадо мы проводили измерения как с блоком графита (около 87 г/см²) над счетчиками, так и без него.

Результаты измерений представлены на рис. 52. Как видно из графика, поглощение в графите значительно меньше, чем в воздухе. Например, на глубине атмосферы 699 г/см² (Эхо Лейк) добавление 87 г/см² графита уменьшает число мезонов на 10%, тогда как добавление 87 г/см² воздуха уменьшает ту же величину на 20%. Заметное дополнительное поглощение обусловлено распадом мезонов на пути в атмосфере.

Измеряя это дополнительное поглощение, мы могли грубо оценить среднее время жизни мезонов. При этом мы должны были учесть тот факт, что, в соответствии с теорией относительности, определение интервала времени зависит от системы отсчета, в которой происходит измерение. Если, например, часы движутся со скоростью v относительно какого-то наблюдателя, то для него часы идут медленнее, чем для наблюдателя, движущегося вместе с часами. Отношение интервалов времени, измеренных первым и вторым наблюдателями, составляет $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$, где c — скорость света.

Подставляя различные значения v , можно убедиться, что эффект становится заметным только для скоростей, очень близких к c (т. е. когда знаменатель $\sqrt{1-v^2/c^2}$ стремится к нулю). Нестабильные мезоны можно рассматривать как субатомные «часы», движущиеся с очень большими скоростями. Поэтому измеренное среднее время жизни этих мезонов τ' значительно больше среднего

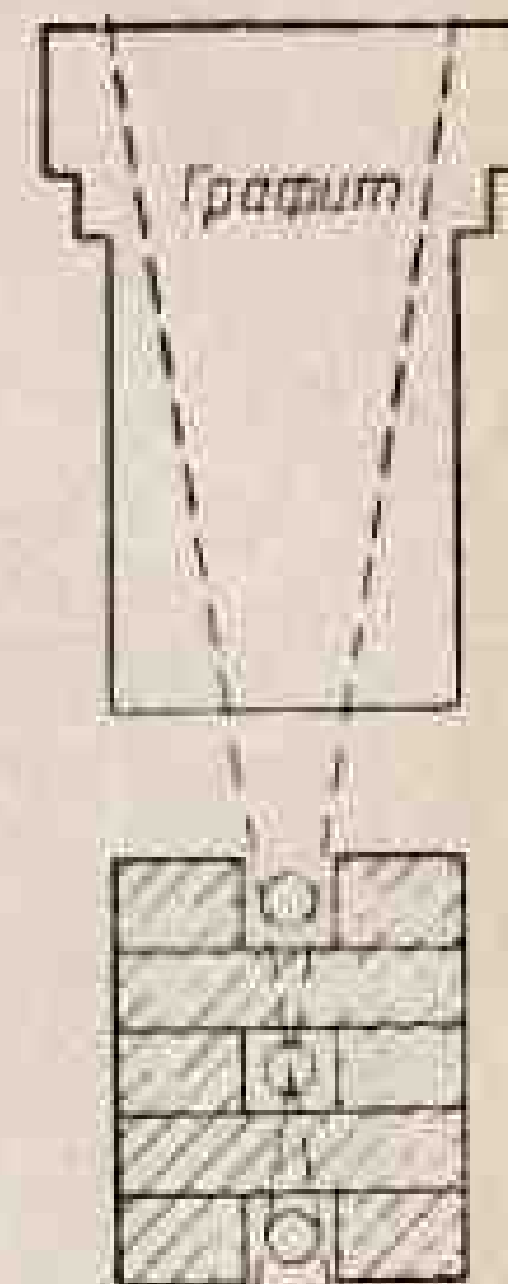


Рис. 51. Схема установки для сравнения поглощения мезонов в воздухе и в графите.

времени жизни мезонов, находящихся в покое τ . Например, для мезонов с кинетической энергией 500 Мэв отношение τ'/τ равно 4,7. Другими словами, измеренное среднее время жизни этих мезонов в 4,7 раза больше этой же

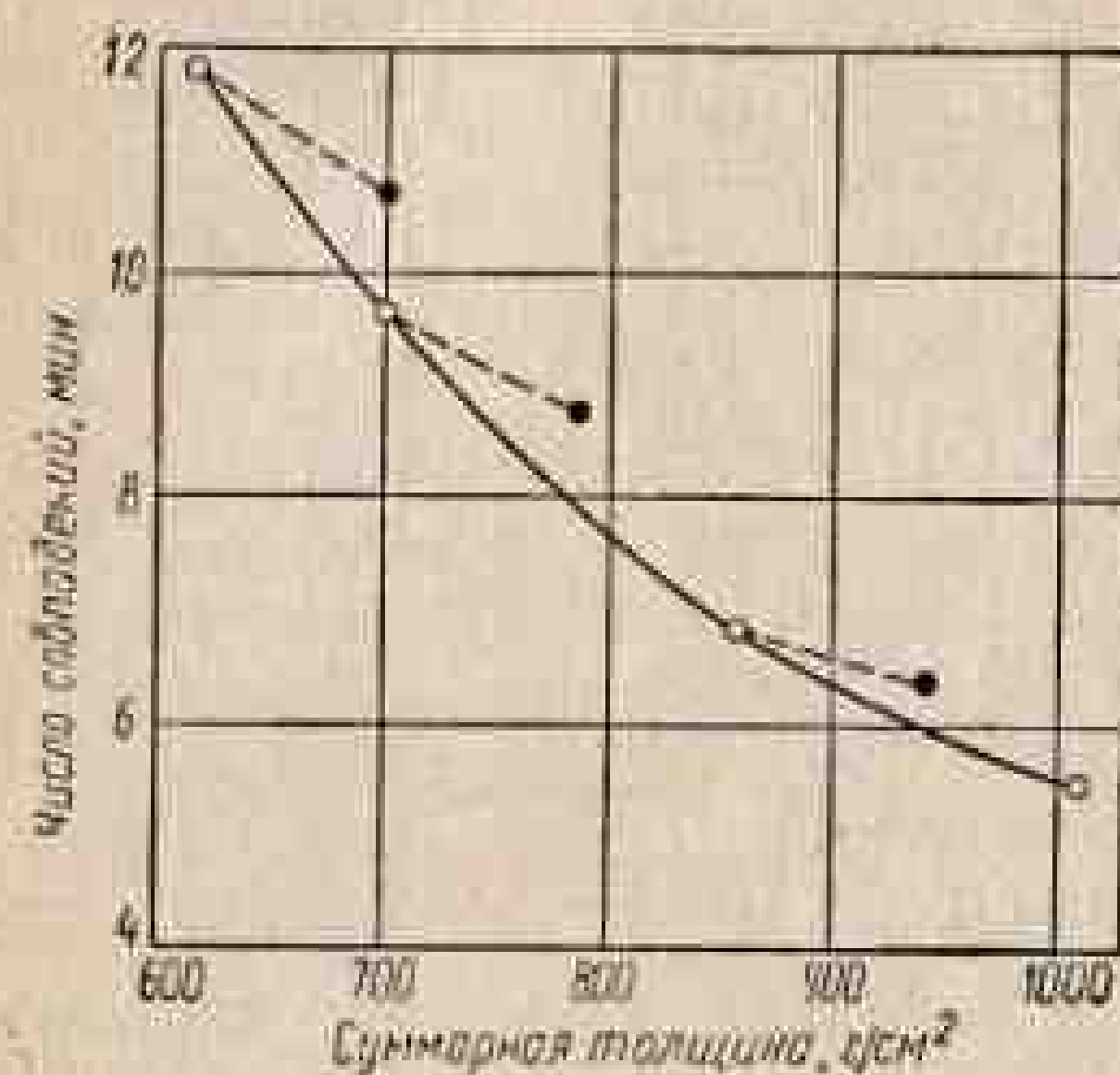


Рис. 52. Результаты по измерению поглощения мезонов в воздухе и графите, полученные с помощью установки, приведенной на рис. 51. Кружочки изображают скорость счета, измеренную в Чикаго, Денвере, на озере Эхо Лейк и на горе Эванс в отсутствие поглотителя над счетчиками. Сплошные точки изображают результаты измерения на трех станциях (кроме озера Эхо Лейк) под 87 г/см графита.

По горизонтальной оси отложена суммарная толщина вещества (воздух плюс графит) над счетчиками, измеренная в граммах на квадратный сантиметр.

величины для покоящихся мезонов*. Поэтому для определения среднего времени жизни покоящихся мезонов по измерениям с движущимися мезонами необходимо знать их энергию. Оценив энергию мезонов (или, точнее, среднюю энергию наблюдаемых мезонов), мы получили для среднего времени жизни покоящегося мезона величину порядка 2 микросекунд ($2 \cdot 10^{-6}$ секунд).

В последующие годы подобные измерения проводились многими физиками, в том числе В. Нильсеном, Г. Нейером, М. Померанцем и их сотрудниками в США, Дж. Бернардини, Дж. Коккони, О. Пиччиони и другими в Италии. В целом полученные ими результаты находились в согласии с нашими. Мне хотелось бы мимоходом упомянуть еще об одном эксперименте, выполненном

* Из релятивистского выражения для кинетической энергии E [см. Приложение IV, уравнение (IV.2)] следует, что $1/\sqrt{1 - v^2/c^2} = E/107 + 1$. В этом уравнении E измеряется в Мэв, а 107 дает «энергию покоя» μ -мезона, mc^2 — также в Мэв.

Д. Холлом и мною. Мы измеряли средние времена жизни движущихся мезонов разных энергий и получили, что они меняются в зависимости от энергии в полном соответствии с предсказаниями теории относительности. Наблюдаемый эффект был довольно велик — примерно в три раза изменялось среднее время жизни от самых быстрых до самых медленных мезонов, регистрируемых в эксперименте.

Электроны от распада мю-мезонов

Тем временем английским физикам Е. Вильямсу и Г. Робертсу удалось получить первую фотографию распада мезона в камере Вильсона. На снимке виден положительный мезон, остановившийся в газе камеры (действительно очень редкое событие!), из конца его следа выходит след положительного электрона. Кроме того, что эта фотография стала окончательным, решительным доказательством распада мезонов, она подтвердила, как и предполагалось, что при распаде μ -мезонов появляются электроны. (В последующие годы было получено много подобных фотографий. На рис. 53 приведен особенно удачный снимок, полученный в 1948 г. Р. Томсоном, в то время студентом-дипломником Массачусетского технологического института.)

Прямые измерения среднего времени жизни мю-мезонов

Следующий важный шаг был предпринят Ф. Разетти. На фотографии Вильямса и Робертса зафиксирован распад мезона, растратившего на ионизацию свою энергию и остановившегося в веществе. Однако остановившийся мезон не распадается немедленно, он «выжидает» некоторое время, равное в среднем его среднему времени жизни. Поскольку среднее время жизни уже было оценено в несколько микросекунд, то ожидалось, что электроны, испускаемые при распаде μ -мезонов, будут вылетать из поглотителя, в котором произошел распад, с задержкой в несколько микросекунд.

Пытаясь непосредственно продемонстрировать запаздывающее испускание электронов мезонами, останавли-

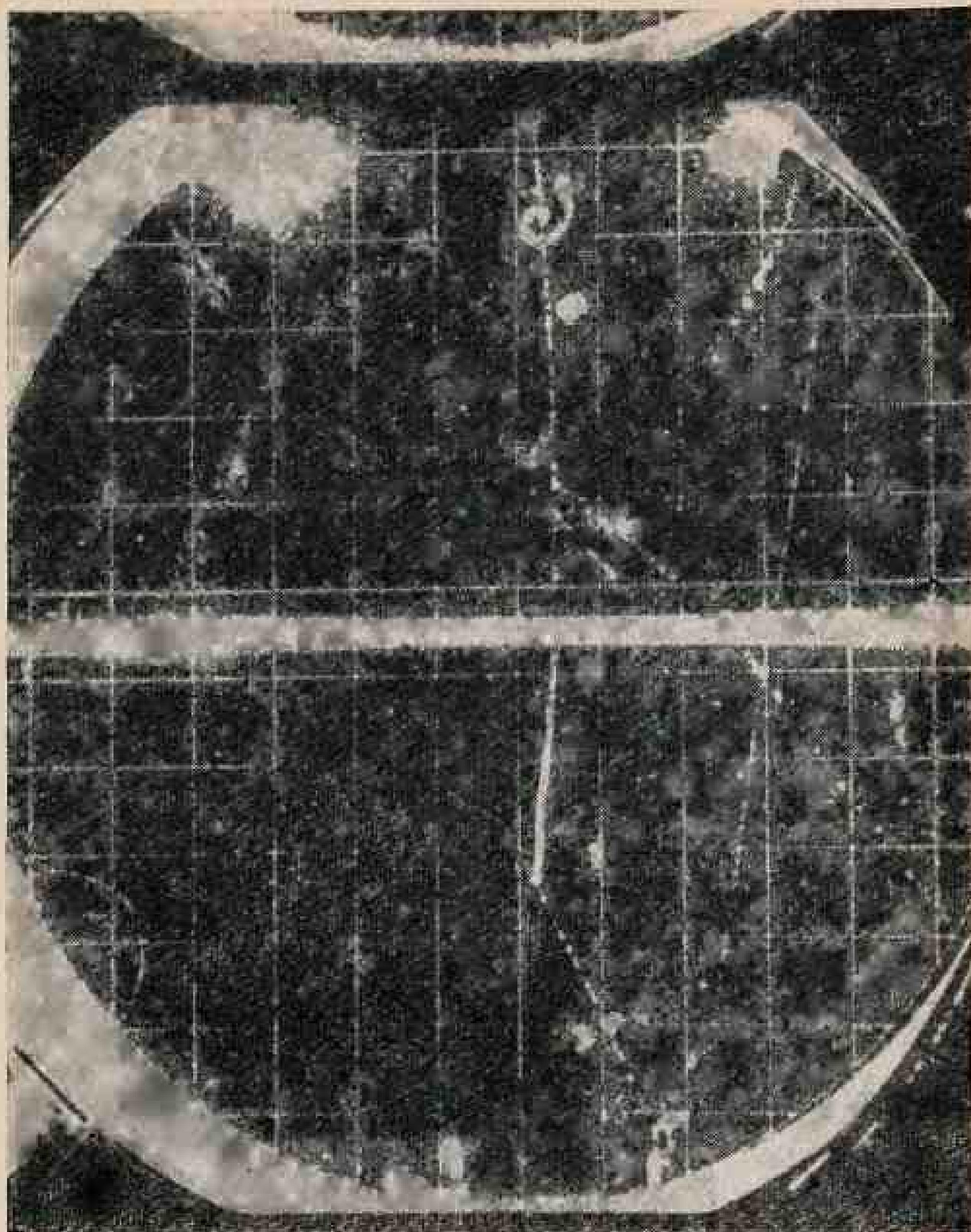


Рис. 53. Распад μ -мезона. Мезон попадает в камеру Вильсона сверху. Пересекая алюминиевую пластину толщиной 0,63 см, он теряет большую часть своей энергии. Мезон, выходящий из пластины, — медленная и поэтому сильноионизирующая частица — останавливается в газе камеры. Из конца следа μ -мезона выходит след электрона. Электрон, движущийся со скоростью, близкой к скорости света, оставляет след с минимальной ионизацией. Следы μ -мезона и электрона слегка искривлены магнитным полем. Направление отклонения следов указывает на то, что обе частицы несут положительный заряд. (R. W. Thompson. The Physical Review. Том 74, 1948, стр. 490.)

вающимися в веществе, Разетти в 1941 г. осуществил эксперимент, схема которого приведена на рис. 54. Г—М-счетчики G_1 , G_2 , G_3 , G_4 и G_6 вместе с соответствующей электронной схемой отбирают μ -мезоны, которые останавливаются в поглотителе — блоке железа. Эти мезоны вызывают разряд в одном из трех счетчиков G_1 и в одиночных счетчиках G_2 , G_3 и G_4 , но не вызывают разряды

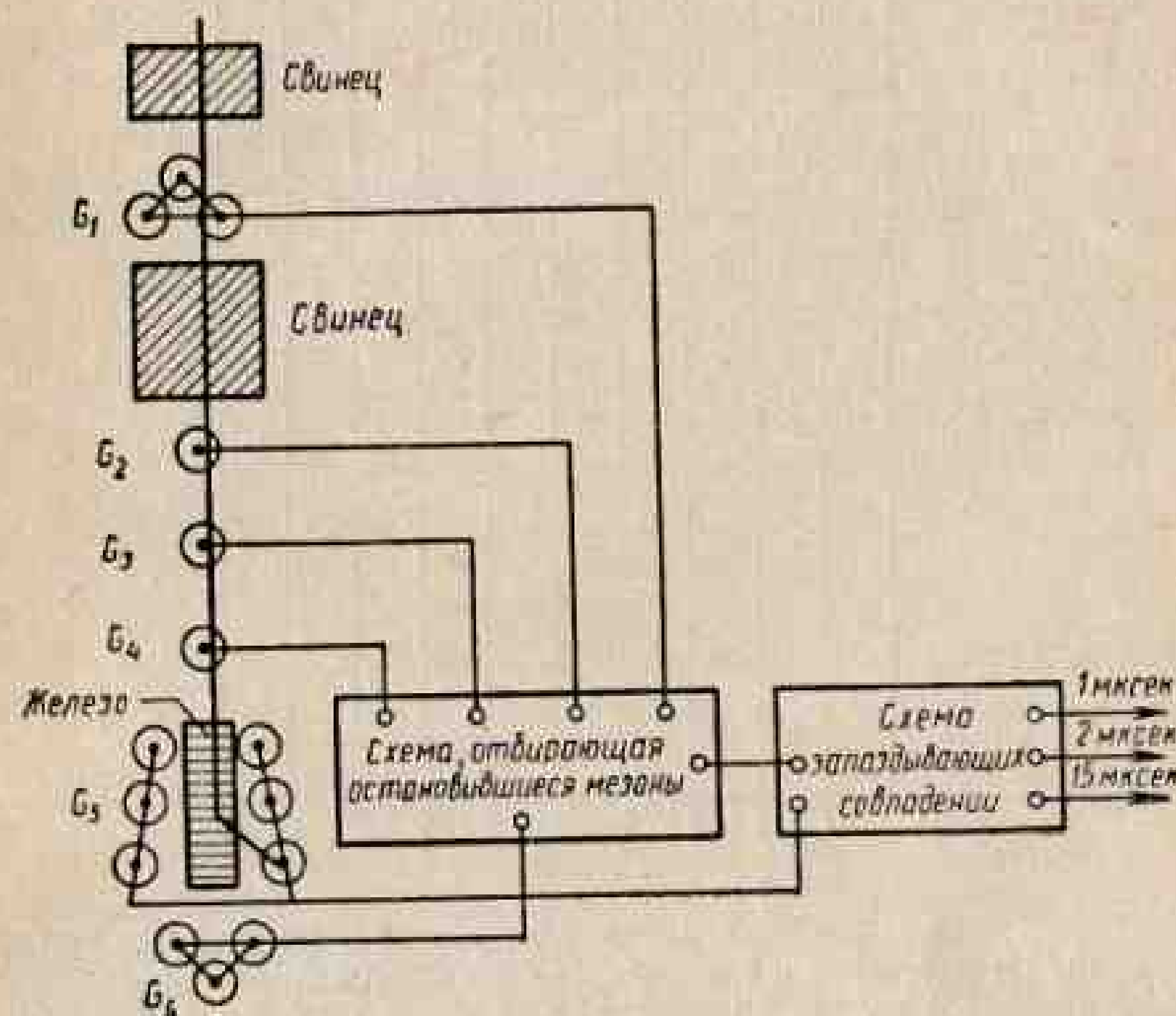


Рис. 54. Схема установки, с помощью которой Разетти в 1941 г. наблюдал распад остановившихся μ -мезонов.

ни в одном из счетчиков G_6 . Вдоль каждой стороны поглотителя было расположено шесть счетчиков G_5 , которые должны были регистрировать электроны, испущенные при распаде остановившихся мезонов. Сигнал на выходе схемы совпадений появлялся лишь в том случае, когда в каком-либо одном из счетчиков G_5 возникал разряд меньше чем через 1 микросекунду после прохождения мезонов. Две другие схемы совпадений работали таким же образом, но с задержками времени в 2 и 15 микросекунд.

Разетти обнаружил, что схема с 2-микросекундной задержкой регистрирует больше совпадений, чем схема с 1-микросекундной задержкой. Это означает, что были

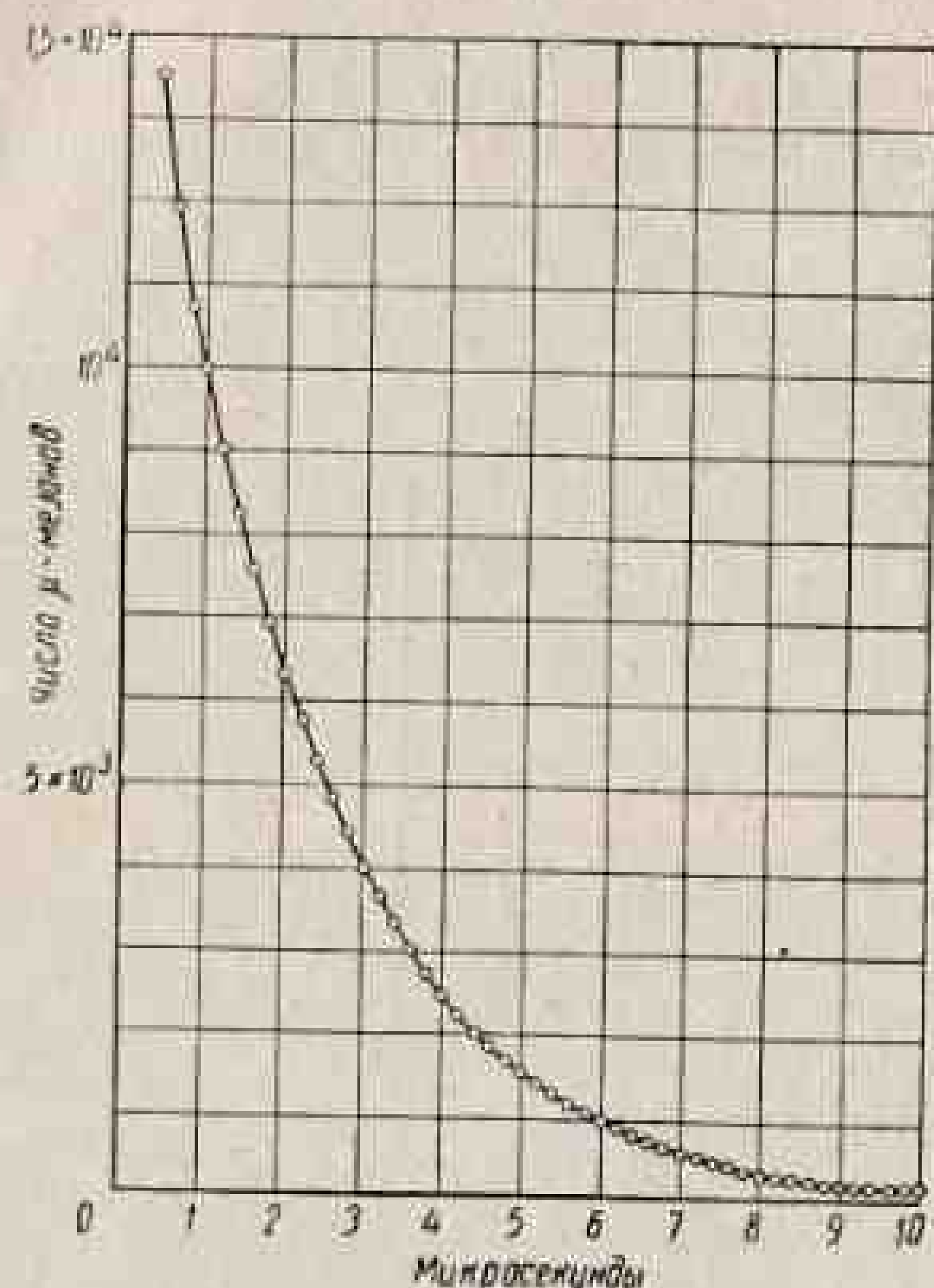


Рис. 55. Кривая распада μ -мезонов, остановившихся в свинце, полученная Нересоном и автором. По горизонтальной оси отложено время, прошедшее с того момента, как мезон попал в поглотитель. По вертикальной оси отложено число наблюдавшихся μ -мезонов, распад которых произошел после соответствующего интервала времени, отложенного по горизонтальной оси. Например, более 1 микросекунды «выживало» 10 000 мезонов, более 2 микро секунд — 6300 мезонов и т. д.

зарегистрированы электроны, испущенные с задержкой более 1 микросекунды, но менее 2 микросекунд.

Разетти нашел также, что 15-микросекундная схема регистрирует больше совпадений, чем 2-микросекундная. Это означало, что большая доля электронов была испущена с задержкой более 2 микросекунд, но не менее 15 микросекунд. На основании предыдущих оценок ожидалось, что электроны, возникающие при распаде

остановившихся мезонов, должны вылетать из поглотителя за время порядка нескольких микросекунд.

Сопоставляя относительные числа совпадений, зарегистрированных тремя различными схемами, Разетти получил для среднего времени жизни покоящихся мезонов величину порядка 1,5 микросекунды.

Тем временем я перебрался в Корнельский университет, где начал широкую программу исследования по космическим лучам вместе с двумя молодыми сотрудниками К. Грейзенем и Н. Нересоном. В 1934 г. мы с Нересоном провели точные количественные исследования распада мезонов с установкой из Г—М-счетчиков и поглотителей, подобной схеме Разетти. Особенностью нашего эксперимента было использование «электронных часов», которые позволили нам измерять в индивидуальных случаях задержку во времени между прохождением мезона и испусканием электрона. Мы нашли, что распад мезонов, так же как радиоактивный распад атомов, подчиняется экспоненциальному закону (рис. 55). Это означает, что из любой большой группы мезонов, имеющих в данное время, определенная доля частиц распадается в течение нескольких микросекунд независимо от того, сколько времени уже «прожили» отдельные мезоны. Из наших измерений для среднего времени жизни мезонов мы получили величину 2,15 микросекунды с ошибкой в 0,1 микросекунды.

Подобные измерения космических мезонов проводили в последующие годы разные группы физиков, и они подтвердили наши результаты. Среди них были Р. Шаминад, А. Фреон, Р. Маз во Франции, М. Конверси и О. Пиччиони в Италии*. После того как μ -мезоны стали получать на ускорителях, их среднее время жизни было измерено с большой точностью. Оно оказалось равным 2,20 микросекунды.

* Чтобы по достоинству оценить вклад европейских ученых, надо учесть, в каких тяжелых условиях приходилось им работать в годы войны. Итальянские физики, например, большую часть своих работ выполняли, прячась в подвалах, где им приходилось скрывать аппаратуру от немцев, оккупировавших Рим в 1943 г.

Глава 9

ПИ-МЕЗОНЫ

История научных исследований, подобно истории географических открытий, знает немало примеров, когда неожиданное открытие совершенно заслоняло первоначальную цель. Колумб в последнем десятилетии пятнадцатого столетия в поисках нового морского пути в Индию открыл Америку. Физики в четвертом десятилетии двадцатого века, пытаясь разрешить загадку космических лучей, обнаружили две неизвестные до сих пор частицы: позитрон и μ -мезон. Открытие этих частиц, которые возникают во взаимодействии излучений высокой энергии с веществом, но не являются «строительными кирпичиками» обычного вещества, стало началом совершенно новой области исследования. Физики встретились здесь с таким множеством новых и неожиданных явлений, что на многие годы исследование этой области стало их основным занятием.

Со временем сооружение ускорителей на миллиарды электронвольт, обеспечивших контролируемый и гораздо более интенсивный источник частиц высоких энергий, уменьшило роль космических лучей в исследовании элементарных частиц. Однако до того как это произошло, физики, изучающие космические лучи, сумели нарисовать довольно обширную, хотя далеко не полную и не очень подробную, картину всей области физики элементарных частиц.

Загадочное поведение отрицательных μ -мезонов

Наиболее важный этап в исследовании нового мира частиц как для физиков, изучающих атомное ядро, так и для физиков, изучающих космические лучи, начался в 1947 г. с открытием π -мезона (π). Исследования, ко-

торые привели к этому открытию, начались еще в 1940 г., когда японские физики С. Томонага и Дж. Араки указали на то, что положительные и отрицательные μ -мезоны после остановки в веществе должны вести себя существенно различным образом.

Томонага и Араки рассуждали следующим образом. Положительный мезон никогда не может подойти очень близко к атомному ядру, поскольку он испытывает действие электрических сил отталкивания со стороны положительного заряда ядра. Поэтому положительный мезон будет «выжидать» некоторое время, а затем испытает спонтанный распад и исчезнет. Отрицательный мезон, наоборот, притягивается зарядом ядра, и поэтому он может быть захвачен ядром, прежде чем успеет распасться. Если взаимодействие между μ -мезонами и ядрами достаточно сильно, то почти все отрицательные μ -мезоны будут захвачены ядрами; лишь немногие из них распадутся на электроны. Если же взаимодействие слабее, то некоторые мезоны будут поглощаться ядрами, а некоторые будут распадаться.

В любом случае ожидаемое время жизни отрицательных мезонов в веществе меньше, чем положительных, поскольку последние «умирают» только естественной смертью, тогда как первым грозит дополнительная опасность погибнуть при «случайном» захвате ядром. Будучи захваченными, отрицательные мезоны, по-видимому, исчезают, а освободившаяся энергия, соответствующая их массе по уравнению Эйнштейна, подобно крошечной бомбе, должна вызвать взрыв ядра.

Вскоре после того как Томонага и Араки опубликовали свою статью, Разетти выполнил эксперимент по изучению распада μ -мезонов, описанный в предыдущей главе. Сравнивая число мезонов, остановившихся в блоке железа, с числом электронов распада, вышедших из блока, Разетти обнаружил, что лишь половина мезонов распадается на электроны. Тогда он сделал вывод, что электроны образуются при распаде положительных мезонов, а отрицательные мезоны захватываются ядрами в соответствии с предсказаниями Томонаги и Араки.

Более непосредственное экспериментальное доказательство дали опыты Конверси, Панчини и Пиччиони. Эти опыты были схожи с ранними опытами Разетти и Нересона и моими, за исключением того, что теперь бы-

ло добавлено устройство, способное выделять мезоны одного знака. Это устройство, известное под названием *магнитной линзы*, я использовал в моих ранних работах по космическим лучам еще в 1931 г. *

Достоинство магнитной линзы состоит в том, что в железе можно создать сильное магнитное поле, а в то же

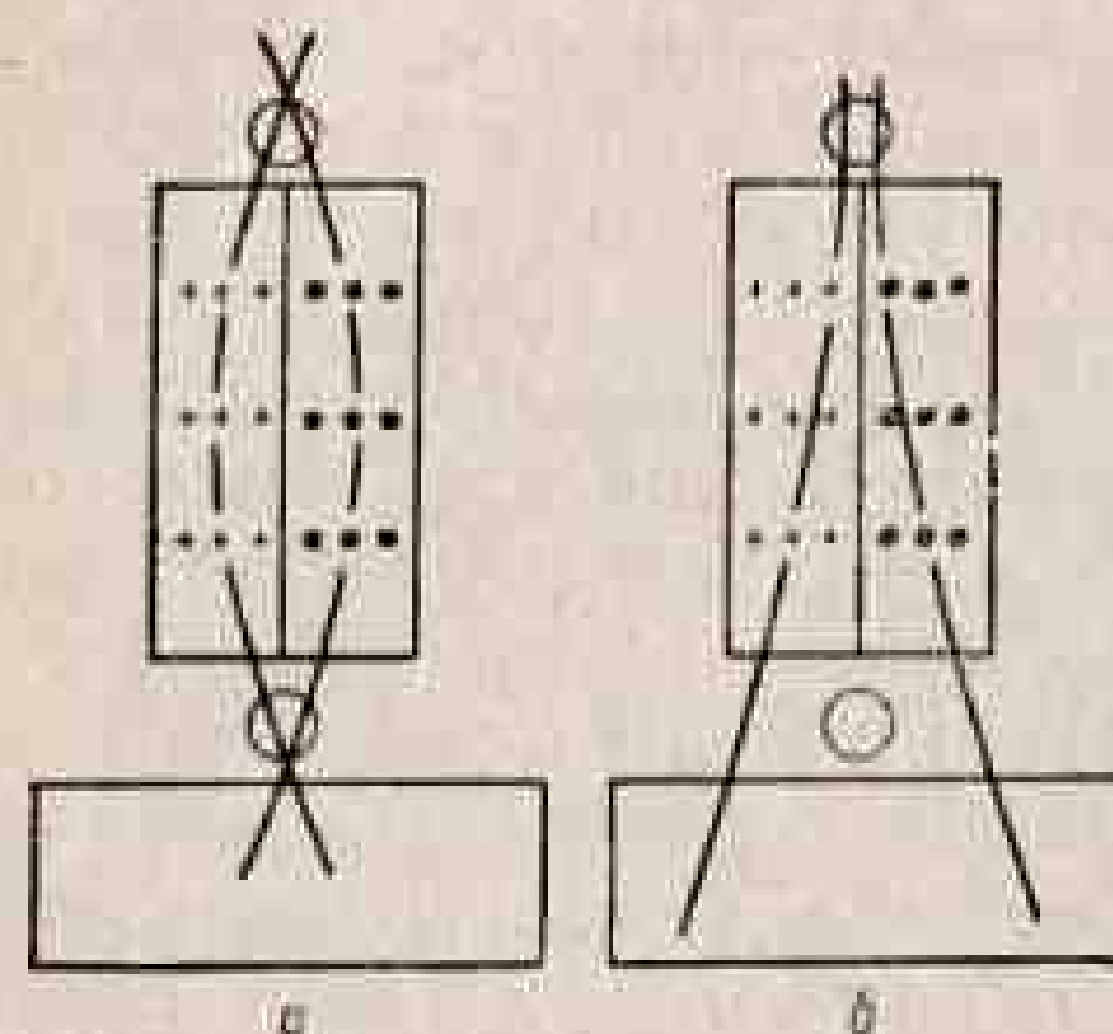


Рис. 56. Магнитная линза.

время космические мезоны могут пройти сквозь довольно большие толщины железа практически без потерь энергии и без рассеяния (что неверно для частиц малых энергий, таких, например, как α - и β -лучи радиоактивных веществ). Таким образом, можно использовать намагниченное железо для отклонения мезонов космических лучей. Намагнитить кусок железа гораздо легче, чем создать эквивалентное магнитное поле в воздухе, поэтому магнитная линза имеет и большие практические преимущества.

Рис. 56 служит иллюстрацией принципа работы магнитной линзы. Два железных бруска, намагниченных в противоположных направлениях, располагаются рядом. Два Г—М-счетчика (один над магнитами, другой под ними) включаются в схему совпадений. Предположим, что магнитное поле правого бруска направлено к наблюдателю (см. рис. 56, а), а поле левого бруска — от наблюдателя (см. рис. 56, б). Положительные мезоны, проходящие сверху вниз через верхний счетчик, будут отклоняться по направлению к нижнему счетчику. Таким образом, число положительных мезонов, пересекающих оба

* В то время я, конечно, ничего не знал о мезонах. Я разработал магнитную линзу в попытках определить знак заряда проникающих космических частиц. Результат эксперимента был неоднозначным; я мог только сказать, что или частицы обладают слишком большой энергией и поэтому не испытывают заметного отклонения в намагниченном железе линзы, или частицы обоих знаков имеются в космических лучах примерно в одинаковых количествах.

счетчика, возрастет. Отрицательные мезоны (за исключением очень малого числа мезонов, идущих точно вниз между брусками железа) будут отклоняться от нижнего счетчика. Если изменить направление намагничивания в обоих брусках, то линза будет собирать отрицательные мезоны и рассеивать положительные.

Конверси и двое его коллег, помещая поглотитель из железа под линзой, нашли, что только положительные мезоны дают запаздывающие электроны, характерные для спонтанного распада. На этом основании они пришли к выводу, что практически все отрицательные мезоны, останавливающиеся в железе, захватываются ядрами железа прежде, чем они успевают распасться.

В 1947—1948 гг. итальянская группа, а также группы физиков в Чикагском университете и в Массачусетском технологическом институте расширили эти эксперименты, используя в качестве поглотителя различные вещества. Самый важный результат этих экспериментов, впервые опубликованный итальянцами, состоял в том, что в легком веществе (например, в углероде) захват отрицательных мезонов атомными ядрами не так уж сильно конкурирует с их спонтанным распадом. Причем вероятность ядерного захвата постепенно возрастала с атомным номером. Так, если в магнии ($z = 12$) количество отрицательных мезонов, распавшихся в захваченных атомными ядрами, примерно одинаково, то в элементах, более тяжелых, чем магний, захват превышает спонтанный распад, в более легких элементах соотношение обратное.

Сам факт увеличения эффективности ядерного захвата с атомным номером вещества довольно естествен. Тяжелые ядра обладают большим положительным зарядом и поэтому представляют собой более эффективную ловушку для отрицательных мезонов, попадающих в поле этого заряда. Удивительным казался другой факт. Чрезвычайно трудно было понять, каким образом отрицательные мезоны могут не испытывать ядерного захвата, пусть даже в таких легких веществах, как углерод ($z = 6$). Физики рассуждали следующим образом. Как уже было известно, μ -мезоны имеют среднее время жизни около 2 микросекунд. Такой интервал времени может показаться очень коротким. Однако в атомной шкале это огромное время, и в действительности этот интервал по крайней мере в 20 миллионов раз превышает то время,

которое по самым общим теоретическим оценкам требуется для ядерного захвата.

Другими словами, на основании теоретических соображений можно было с уверенностью считать, что все отрицательные μ -мезоны, остановившиеся в углероде, должны быть захвачены ядрами углерода раньше, чем они распадутся. Если же тем не менее большинство мезонов все-таки испытывает спонтанный распад, то для этого они должны сохранять свою индивидуальность внутри ядра в течение такого длительного времени, что они имеют возможность опять выйти из ядра. На языке современной физики это означает очень *слабое взаимодействие* между μ -мезонами и протонами и нейтронами ядер углерода.

Такое слабое взаимодействие было по меньшей мере загадочным. Во-первых, если μ -мезоны — это «кванты поля ядерных сил», предсказанные Юкавой (см. главу 8), то они обязаны сильно взаимодействовать с протонами и нейтронами. Во-вторых, физики считали, что μ -мезоны образуются при прохождении частиц высокой энергии сквозь атомное ядро. Это событие длится чрезвычайно малое время, порядка 10^{-22} секунд. Если это представление верно, то становится совершенно непонятным, почему же обратный процесс, т. е. поглощение μ -мезонов ядрами, требует времени порядка нескольких микросекунд? Полученный, в конце концов, ответ на этот вопрос служит еще одной прекрасной иллюстрацией тесной взаимосвязи между развитием техники и научным прогрессом, примеров которой было немало в истории науки.

Ядерные эмульсии

Камера Вильсона — это поистине замечательный прибор. Она дала физикам возможность «увидеть» элементарные частицы и продукты их взаимодействия с атомами или ядрами. Но, как и всякому экспериментальному устройству, камере Вильсона присущи некоторые ограничения. Из-за малой плотности газов лишь очень небольшая доля частиц, проходящих сквозь камеру, сталкивается с ядрами или останавливается внутри камеры.

Для улучшения положения физики в 30-е годы начали конструировать большие камеры и помещать внутри пластины из твердых материалов (таких, как углерод

или различные металлы). Методика *многопластинчатых камер* оказалась очень полезной во многих исследованиях; о некоторых из них речь будет идти в следующей главе. Однако такое решение проблемы не было вполне удовлетворительным. Когда частица взаимодействует внутри пластины (толщина которой обычно варьируется от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров), нельзя достоверно знать, что именно происходит в точке взаимодействия. Аналогично при остановке частицы в пластине и последующем ее распаде продукты этого распада можно наблюдать лишь в том случае, когда они обладают энергией, достаточной для того, чтобы выйти из пластины. Для непосредственного наблюдения процессов взаимодействия и распада требуется плотное вещество, в котором частицы эффективно взаимодействовали бы с атомными ядрами, останавливались и одновременно оставляли бы видимые следы.

В середине 40-х годов физики разработали, наконец, детектор с нужными свойствами — *ядерные эмульсии*. И до этого уже в течение многих лет фотографические эмульсии широко использовались при исследовании излучений. Благодаря им были открыты рентгеновские лучи, фотоэмульсии играли важную роль в ядерной физике, иногда они применялись и в исследованиях космических лучей.

Действие высокоэнергичного излучения на фотоэмульсию подобно действию света. Проходя через эмульсию, ионизирующие частицы сталкиваются с «зернами» бромистого серебра и вызывают в них определенные изменения, в результате которых возникает так называемое «скрытое изображение». При погружении эмульсии в раствор соответствующего «проявителя» в зернах скрытого изображения восстанавливается металлическое серебро, частички которого имеют черный цвет. Поэтому траектория отдельной частицы видна под микроскопом как цепочка темных зерен серебра. Но обычные эмульсии чувствительны лишь к сравнительно медленным частицам, которые оставляют на своем пути очень плотную колонку ионов. Кроме того, вплоть до середины 40-х годов производились лишь очень тонкие эмульсии, в которых только частицы, движущиеся почти параллельно фотографической пластинке, оставляли след заметной длины. По этим причинам тогда почти полностью отказались от ис-

пользования фотоэмульсий в качестве детектора заряженных частиц.

Эмульсионная техника была возрождена группой физиков Бристольского университета в Англии под руко-

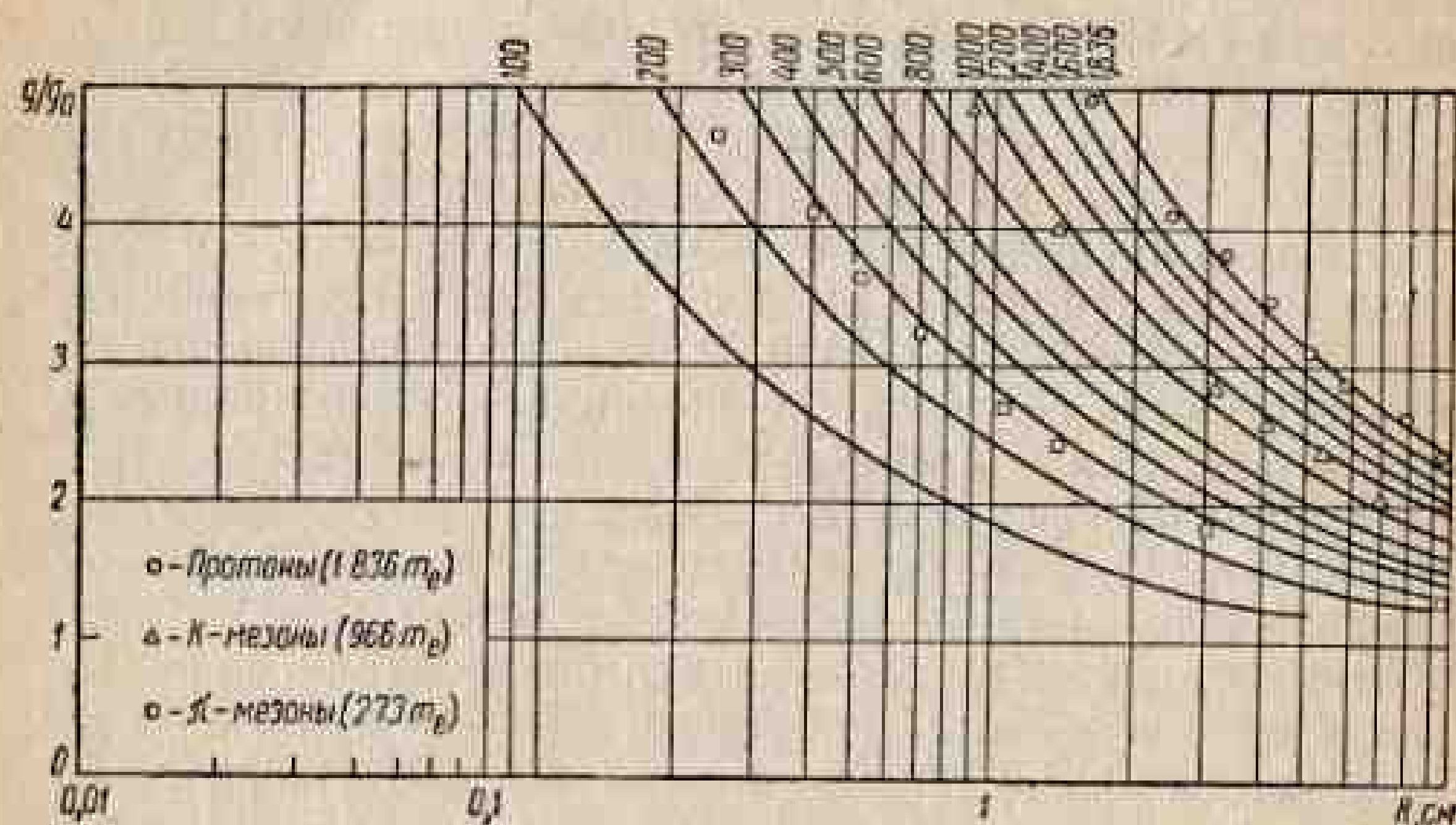


Рис. 57. Зависимость плотности зерен от величины остаточного пробега в эмульсии для однократно заряженных частиц с различными массами. Экспериментальные точки относятся к протону, K-мезону и π -мезону.

Рисунок можно использовать для определения массы частицы, остановившейся в ядерной эмульсии. По горизонтальной оси отложена величина *остаточного пробега* R в сантиметрах, т. е. расстояние от данной точки до конца следа. По вертикальной оси отложена *плотность зерен* g в окрестности этой точки, отнесенная к плотности зерен минимальноионизирующей частицы g_0 . Различные кривые соответствуют частицам с единичным зарядом и различной массой. Масса (в единицах электронных масс) указана вверху над кривыми. Измеряя величину g в различных точках данного следа, можно получить серию точек. По кривой, наилучшим образом удовлетворяющей этим точкам, находится масса частицы. Приведенные на графике экспериментальные точки получены бристольской группой.

водством С. Пауэлла и Д. Оккиалини*. В сотрудничестве с учеными компании «Ильфорд» они создали новые эмульсии с гораздо большими концентрациями бромид-

* Большой вклад в разработку метода ядерных фотоэмульсий внесли и советские ученые. Еще в 1927 г. Л. В. Мысовский предложил использовать специально изготовленные толстослойные эмульсии. Эти работы были продолжены в 1933—1935 гг. его учеником А. П. Ждановым. — Прим. перев.

стого серебра по сравнению с обычными фотографическими эмульсиями и более чувствительные к ионизирующему излучению. Вскоре в развитие этой методики внесли свой вклад и ученые компании «Кодак» в США, работавшие в той же области. Новые и остроумные методы проявления экспонированных пластинок позволили ис-

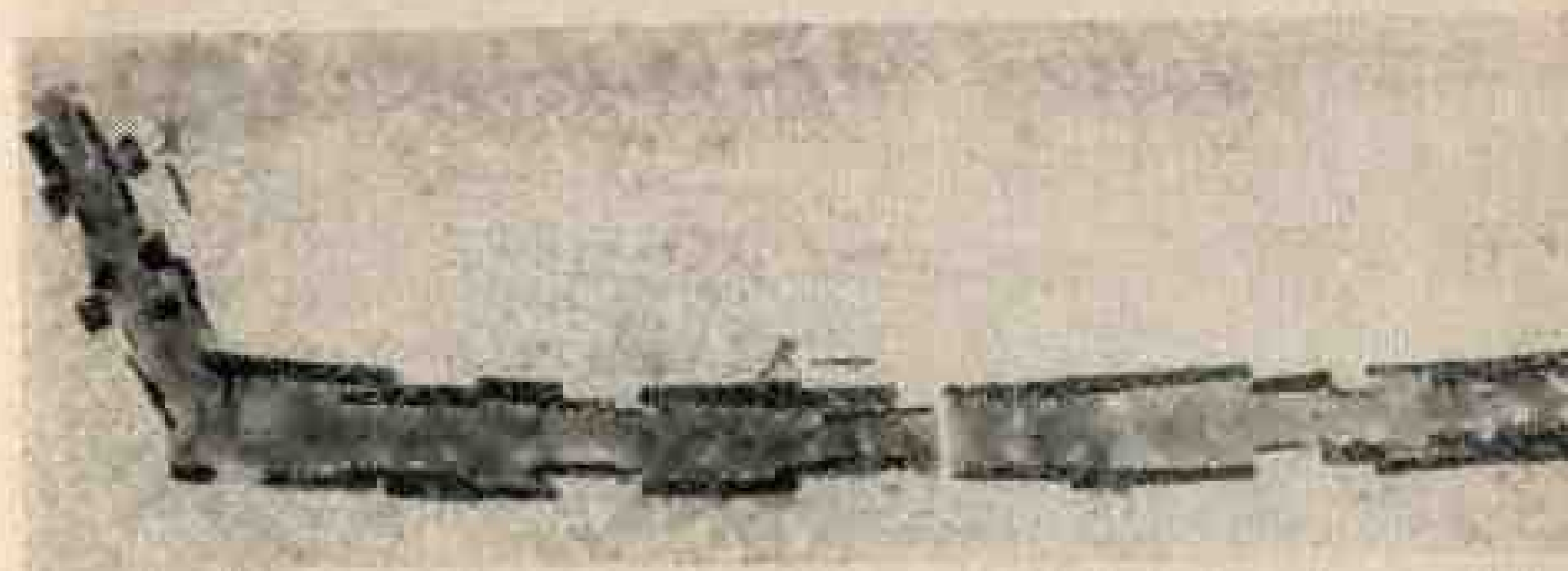


Рис. 58. Микрофотография, на которой виден след π -мезона (π), останавливающегося в ядерной эмульсии, и след μ -мезона (μ), выходящего из конца следа π -мезона. (Из статьи С. Латтеса, Х. Мюрхеда и Дж. Оккиалини и С. Пауэлла в журнале Nature. Том. 160, 1947, стр. 4. 53)

пользовать эмульсии почти в миллиметр толщиной или более чем в 100 раз толще применявшихся прежде. Следующим усовершенствованием стало применение эмульсий без всякой стеклянной основы, так называемых *бесподложечных эмульсий*. Эти эмульсии можно складывать в стопки, образуя *эмульсионные камеры*.

Тогда же физики научились определять свойства заряженных частиц по их следам в ядерных эмульсиях. Если эмульсия проявляется в определенных, тщательно контролируемых условиях, то плотность черных зерен серебра вдоль следа пропорциональна плотности числа пар ионов, образуемых частицей в газе. Следовательно, плотность зерен известным и вполне определенным способом убывает при возрастании скорости.

Другая измеряемая характеристика — это *рассеяние*, или «извилистость» следа. Рассеяние уменьшается с ростом кинетической энергии, но оно также зависит в некоторой степени от массы частицы. Если, наконец, частица останавливается в эмульсии, то можно измерить ее *пробег*; пробег тоже зависит от энергии и от массы частицы.

Следовательно, измеряя любые две из трех величин — плотность зерен, рассеяние и пробег, — можно определить массу частицы (рис. 57). В принципе этот метод определения массы подобен тому, который применяется в опытах с камерой Вильсона (см. рисунки 45 и 48).

Открытие Π -мезона

В 1947 г. Ч. Латтес, Оккиалини и Пауэлл экспонировали только что разработанные ядерные пластинки на высотах гор.

На этих пластинках они обнаружили несколько следов, подобных тому, который приведен на рис. 58. На рисунке виден след частицы (π), вошедшей в эмульсию и остановившейся. Постепенное возрастание плотности зерен, обусловленное снижением скорости, позволяет без всяких сомнений определить направление движения частицы. Скорость возрастания плотности зерен по мере приближения частицы к концу пробега позволяет заключить, что масса частицы в несколько сот раз больше массы электрона (см. рис. 57). Из точки, где эта частица остановилась, вылетела другая частица (μ). Оценка массы второй частицы, которая тоже останавливается в эмульсии, пройдя путь несколько больше 0,5 мм, дает также величину в несколько сот электронных масс. Однако тщательные измерения плотности зерен на различных расстояниях от конца пробега показали, что вторая частица немного легче первой.

Проанализировав несколько возможных интерпретаций, Латтес, Оккиалини и Пауэлл пришли к выводу, что на фотографии запечатлен распад одного мезона, в результате которого возникает другой, более легкий мезон. Но более тяжелый, «родительский», мезон не может быть мезоном, относящимся к проникающей компоненте космических лучей, поскольку при распаде того мезона испускается электрон, а не другой мезон. Таким образом, именно более легкий, «дочерний», мезон следовало идентифицировать с ранее известным мезоном, если только существует не более двух сортов мезонов.

Если это объяснение верно, то вторичный мезон после остановки в эмульсии должен распасться и испустить электрон. Эмульсии, которые применялись в 1947 г., были еще недостаточно чувствительны для регистрации ми-

нимальноионизирующих частиц, таких, как быстрые электроны. Когда в 1949 г. были получены эмульсии, чувствительные к этим частицам, то электрон нашли именно там, где его ожидали (рис. 59). Теперь уже не оставалось сомнений в правильности вывода бристольской группы. Более тяжелый, родительский, мезон стал называться π -мезоном. Более легкая вторичная частица, которую до тех пор считали единственным мезоном, стала называться μ -мезоном.



рис. 59. Микрофотография следов в ядерной эмульсии; показан π -мезон (π), который останавливается и распадается на μ -мезон (μ) Мю-мезон, в свою очередь, останавливается и распадается на электрон (e). (Из статьи Р. Брауна, У. Камерини, П. Фаулера, Х. Мюрхеда, С. Пауэлла и Д. Ритсона в журнале Nature. Том 163, 1949, стр. 46.)

Открытие π -мезона в значительной степени прояснило загадку мезонов. Именно π -мезоны, а не μ -мезоны оказались «квантами поля ядерных сил», предсказанными Юкавой.

π -Мезоны были частицами, возникающими в ядерных взаимодействиях. Перестал казаться удивительным тот факт, что μ -мезоны не взаимодействуют сильно с ядрами. Ведь μ -мезоны появляются не в ядерных взаимодействиях, они рождаются при распаде π -мезонов. Такая картина, однако, была совершенно отличной от прежней, теоретической. Юкава считал, что его частицы распадаются с испусканием электронов. Оказалось же, что они при распаде испускают μ -мезоны, а уж μ -мезоны в свою очередь, распадаясь, дают электроны.

Как же обстояло теперь дело с отрицательными π -мезонами, с первоначальной причиной загадки мезонов? Если π -мезоны — это действительно те частицы, которые были предсказаны в теории Юкавы, и если они в больших

количества образуются в ядерных взаимодействиях, тогда отрицательные π -мезоны, остановившиеся в веществе, должны тоже быстро захватываться атомными ядрами. Раньше уже говорилось, что энергия, которая внезапно выделяется при захвате мезона, должна вызвать взрыв ядра. Именно это и происходит. Никогда не удава-

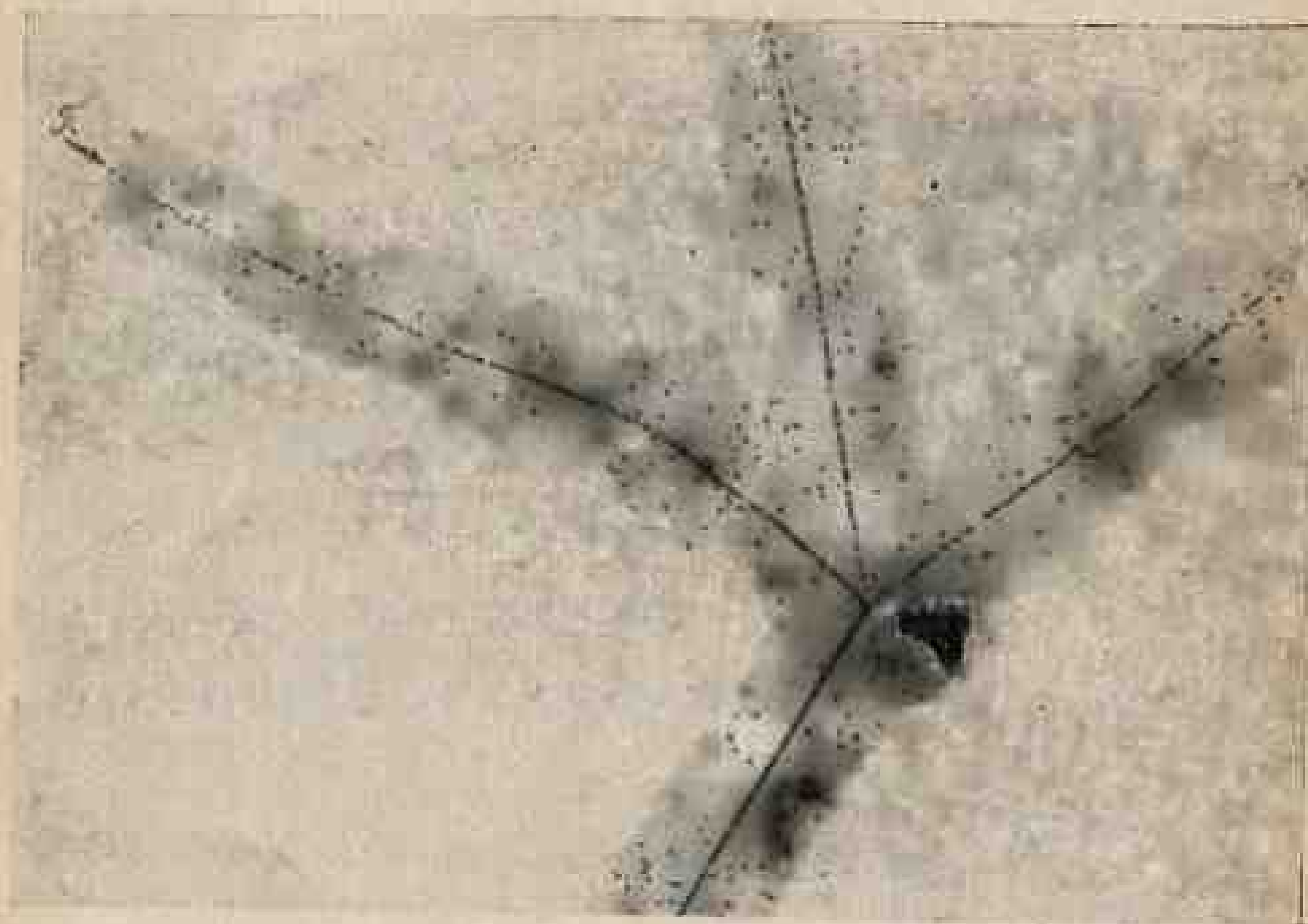


Рис. 60. Ядерный захват отрицательного π -мезона. Мезон останавливается в ядерной эмульсии и быстро захватывается ядром. Мгновенное выделение энергии, эквивалентной массе мезона, вызывает взрыв ядра. Звезда на фотографии состоит из следов, оставленных в эмульсии заряженными осколками ядра. [Из статьи С. Пауэлла в сборнике *Colston Papers* (Лондон), 1949, стр. 83.]

лось наблюдать отрицательных π -мезонов, которые, остановившись в ядерной эмульсии, распадаются на μ -мезоны. Но, как впервые показали Д. Перкинс и Д. Окниалини и Пауэлл в 1947 г. (рис. 60), на конце следов отрицательных π -мезонов наблюдаются «звезды». Звезда образуется частицами, на которые разлетается ядро в результате взрыва. Таким образом, в отличие от отрицательных μ -мезонов отрицательные π -мезоны, остановившиеся в веществе, не успевают распасться, так как сра-

зу же попадают в гибельную для них ядерную «ловушку»^{*}.

Мезонная компонента космических лучей на уровне моря почти сплошь состоит из μ -мезонов. Это значит, что π -мезоны распадаются так быстро, что практически ни один из них не «выживает» во время путешествия сквозь атмосферу. Самые первые расчеты показали, что время их жизни много меньше 1 микросекунды. Эта предварительная оценка оказалась правильной, несмотря на то, что в основных предположениях были допущены неточности довольно тривиального характера (ведь π -мезоны не могут пройти такие же расстояния, как μ -мезоны, не только потому, что они быстрее распадаются, но и потому, что они эффективно взаимодействуют с атомными ядрами).

В экспериментах, проведенных на ускорителях в 1948—1950 гг., для среднего времени жизни π -мезонов была получена величина $2,55 \cdot 10^{-8}$ сек, что примерно в 100 раз меньше среднего времени жизни μ -мезонов. Точные измерения массы π -мезонов, тоже выполненные на ускорителях, дали величину в 273 электронные массы.

Но и после того как были определены средние времена жизни и массы π - и μ -мезонов, все еще оставался вопрос о продуктах распада этих частиц. В теории Юкавы квант поля ядерных сил должен распадаться на электрон и нейтрино. Но при распаде π -мезонов испускаются μ -мезоны, а не электроны. А μ -мезоны, при распаде которых испускаются электроны, не имеют никакого отношения к теории Юкавы. Следовательно, надежной теории, которая давала какие-либо предсказания о распаде мезонов, не было.

Решить эту проблему можно было только экспериментально.

При распаде мезона (так же как и при распаде радиоактивного атома) часть массы, равная разности мас-

^{*} Интересно отметить, что когда π -мезоны останавливаются в эмульсии, они оставляют «подпись», по которой их можно безошибочно распознать: $\pi \rightarrow \mu$ -распад положительного мезона (см. рис. 58 и 59) и ядерная звезда в конце следа отрицательного мезона (см. рис. 60). Так что ядерные эмульсии — это прекрасный метод изучения π -мезонов малых энергий; именно по этой причине эмульсии так широко используются при изучении космических лучей и в экспериментах на ускорителях.

сы исходного мезона и суммарной массы испущенных частиц, преобразуется в энергию в соответствии с уравнением Эйнштейна $E = mc^2$. Эта энергия переходит в кинетическую энергию испущенных частиц.

При распаде π -мезона наблюдается единственный видимый след, исходящий из конца следа π -мезона, — след μ -мезона. Но в этом процессе должна рождаться по крайней мере еще одна частица. Этому требует закон сохранения импульса, тот же самый закон природы, который приводит к отдаче ружья в направлении, противоположном выстрелу. π -Мезон в момент распада покоится, поэтому его импульс равен нулю. Но μ -мезон, испускаемый при распаде, обладает импульсом, который должен быть скомпенсирован равным и противоположно направленным импульсом, уносимым одной или несколькими «невидимыми» частицами. Эта невидимая частица не имеет заряда, иначе она оставляла бы след в эмульсии.

Допустим, что при распаде π -мезона, кроме μ -мезона, рождается еще только одна невидимая частица. В этом случае вся кинетическая энергия распределяется между μ -мезоном и этой частицей единственным способом, а именно так, что обе частицы получают равные и направленные в противоположные стороны импульсы. Но если при распаде π -мезона испускаются две или более невидимых частиц, то энергия может быть без нарушения законов сохранения импульса и энергии распределена между продуктами распада несколькими различными способами (рис. 61). Далее, как показал эксперимент, μ -мезон распада останавливается в эмульсии всегда на одном и том же расстоянии от точки образования (0,63 мм). Это означает, что μ -мезон всегда получает при распаде одну и ту же энергию (4,17 Мэв), т. е. суммарная энергия всегда делится между продуктами распада одинаковым образом и при распаде π -мезона испускается только одна невидимая частица.

Что же представляет собой эта нейтральная частица? Проще всего оценить ее массу. В соответствии с уравнением Эйнштейна при распаде π -мезона выделяется энергия, равная $m_\pi c^2$ (m_π — масса π -мезона). Часть этой энергии, равная $m_\mu c^2$, расходуется на образование μ -мезона. Другая известная часть (4,17 Мэв) переходит в кинетическую энергию μ -мезона. Не составляет никакого

труда найти оставшуюся энергию (около 30 Мэв). Эта энергия, как требуют законы сохранения, должна быть равна величине $m_0 c^2$, необходимой для образования (неизвестной) массы m_0 нейтральной частицы, плюс ка-

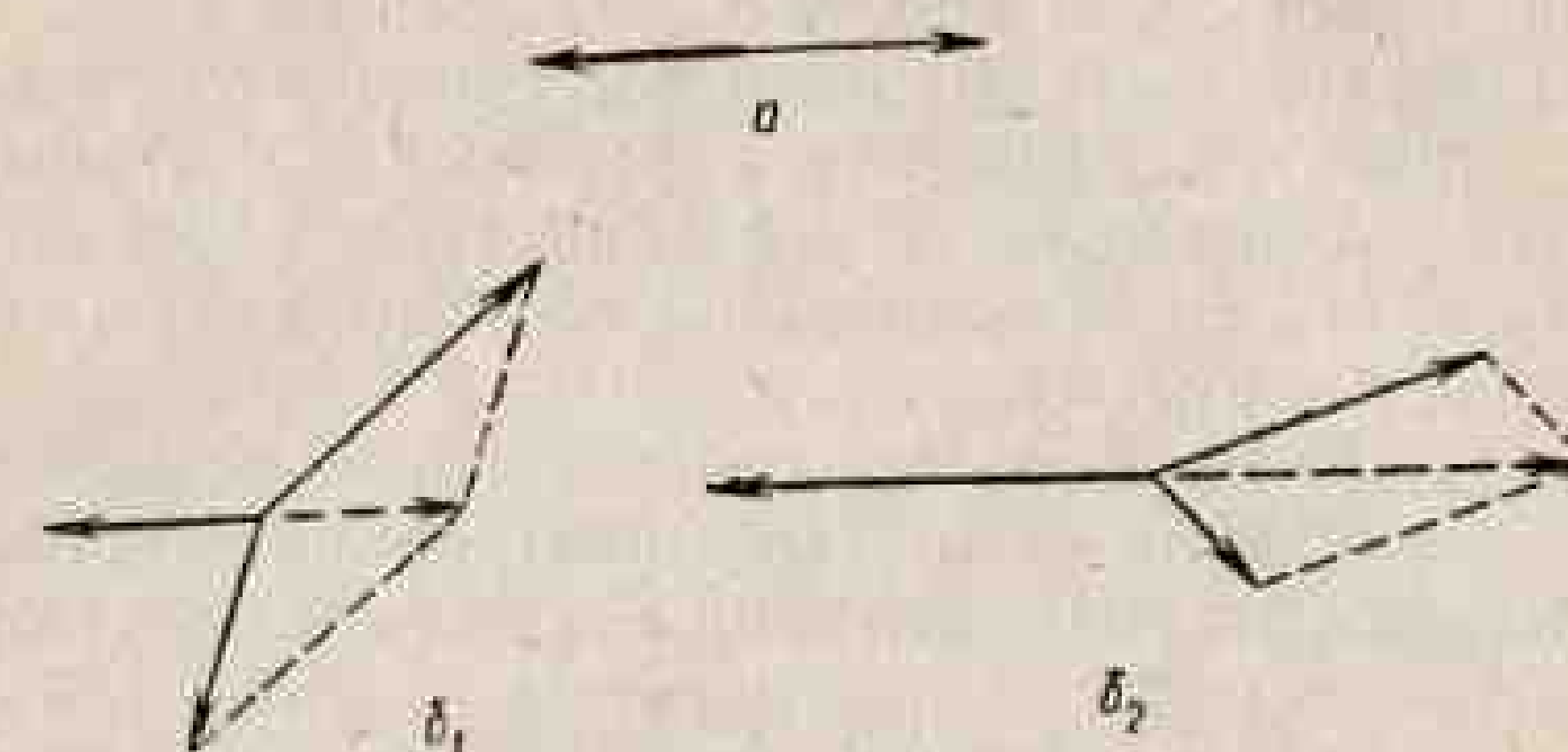


Рис. 61. Закон сохранения импульса. (a) — заряженная частица, которая распадается на другую заряженную частицу (жирная стрелка) и на нейтральную частицу (тонкая стрелка). Родительская частица находилась в покое и поэтому имела нулевой импульс. Закон сохранения импульса требует, чтобы импульсы двух дочерних частиц были равны и противоположно направлены так, чтобы их сумма (векторная) была бы равна нулю. Кинетическая энергия обеих частиц в сумме должна составлять определенную величину, равную произведению квадрата скорости света на разность масс родительской и дочерних частиц. Эти два условия однозначно определяют энергию, приобретаемую каждой из двух дочерних частиц. Таким образом, заряженная дочерняя частица имеет одну и ту же энергию во всех случаях распада. Зная эту энергию, можно рассчитать массу неизвестной нейтральной частицы. (b₁) и (b₂) — заряженная частица, которая распадается на другую заряженную частицу и две нейтральные частицы. Импульс заряженной дочерней частицы должен быть равен по величине и противоположен по направлению векторной сумме двух нейтральных частиц. Суммарная кинетическая энергия всех трех частиц должна составлять определенную величину, равную, как и прежде, энергии, эквивалентной дефекту массы в процессе распада, т. е. разности между массой родительской частицы и суммарной массой всех дочерних частиц. Однако эти два условия не определяют однозначно энергии, приобретаемой каждой из трех дочерних частиц. Следовательно, в этом случае заряженные частицы, испускаемые в разных актах распада, будут иметь различные энергии. Эта энергия будет малой, если нейтральные частицы испускаются почти во взаимно противоположных направлениях (b₁), и большой, если они испускаются почти в одном направлении (b₂). Энергия заряженной дочерней частицы максимальна, когда две нейтральные частицы испускаются точно в одном и том же направлении и с одной и той же скоростью. По значению этой максимальной энергии можно рассчитать суммарную массу двух нейтральных частиц.

кая-то (неизвестная) кинетическая энергия той же частицы.

Далее можно провести расчеты для различных масс. Для каждой предполагаемой массы вычисляем m_0c^2 , оставшаяся доля энергии дает кинетическую энергию. По известным значениям кинетической энергии и массы находим импульс частицы. Если мы сделали правильное предположение, то импульс нейтральной частицы должен быть равен импульсу μ -мезона (этот последний можно вычислить по известным значениям массы и кинетической энергии μ -мезона).

Анализ, метод которого в общих чертах описан выше, позволяет заключить, что масса нейтральной частицы гораздо меньше массы электрона и вероятнее всего равна нулю. Существуют две нейтральные частицы с нулевой массой — фотон и нейтрино. Нейтрино чрезвычайно трудно зарегистрировать, поскольку они очень слабо взаимодействуют с веществом*, фотон же можно без особых затруднений обнаружить по вторичным электронам, которые они образуют в процессах рождения пар и комптоновского рассеяния. Не обнаружив фотонов среди продуктов распада π -мезонов, физики пришли к выводу, что нейтральная частица с нулевой массой, испускаемая при распаде π -мезона, — это нейтрино.

Схему распада положительных и отрицательных π -мезонов символически можно описать следующим образом:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu},$$

где ν изображает нейтрино, а $\bar{\nu}$ — антинейтрино**.

Многие экспериментаторы измеряли энергии электронов, испускаемых при распаде «естественных» μ -мезонов в космических лучах и «искусственных» мезонов, созданных на ускорителях.

В 1949 г. Роберт Б. Лейтон, Карл Д. Андерсон и А. Дж. Шерифф, работавшие в Калифорнийском технологическом институте, доказали, что электроны распада μ -мезонов обладают энергиями в широком диапазоне

значений — от нуля до 50 Мэв. Это означало, что среди продуктов распада должно быть по крайней мере две нейтральные частицы*.

К тому времени физики уже знали, что фотоны не испускаются при распаде μ -мезонов. Кроме того, некоторые электроны распада имели такие большие энергии, что на суммарную массу невидимых частиц практически ничего не оставалось. (Этот аргумент поясняется рис. 61.) Поэтому и здесь нейтральными частицами должны были быть нейтрино, причем теоретические соображения указывали на то, что при распаде μ -мезона должны испускаться как раз две нейтральные частицы. Символически схема распада положительных и отрицательных μ -мезонов может быть описана формулами:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu},$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu},$$

где e изображает электрон.

Открытие нейтрального π -мезона

Для завершения рассказа о π -мезонах следует упомянуть еще об одном важном открытии — открытии, которое явилось результатом объединенных усилий физиков — исследователей космических лучей и физиков, работающих на ускорителях.

Еще со времени открытия положительных и отрицательных мезонов у физиков возникали мысли о возможном существовании нейтральных мезонов. Представления о свойствах этих предполагаемых частиц оставались довольно туманными, пока в 1947 г. Оппенгеймер не обратил особое внимание на эту проблему. Он выдвинул предположение, что нейтральные мезоны могут очень быстро распадаться на фотоны и что именно эти фотоны ответственны за большую часть фотонов и электронов космического излучения, наблюдаемых в атмосфере.

Гипотеза Оппенгеймера оказалась правильной. Первые экспериментальные указания о существовании нейтральных мезонов появились из наблюдений в космических лучах. Группа по изучению космических лучей в

* К аналогичному выводу в 1949 г. независимо пришел и советский ученый Г. Б. Жданов. — *Прим. перев.*

* См. Приложение VIII.

** См. Приложение IX.

Массачусетском технологическом институте в 1950 г. получила фотографии в камере Вильсона, свидетельствующие о том, что в ядерных взаимодействиях при высоких энергиях часто возникают не только проникающие частицы (заряженные π -мезоны), но также и нейтральные частицы, способные создавать каскады. Эти нейтральные частицы с успехом могли быть фотонами, возникающими при распаде нейтральных мезонов. Результаты были подтверждены в экспериментах с ядерными эмульсиями, экспонированными в космических лучах. Окончательное и решающее доказательство существования нейтральных мезонов было получено, однако, в экспериментах, выполненных на ускорителе Калифорнийского университета в Беркли в 1950 г.

В последующих экспериментах для массы нейтрального мезона была получена величина в 264 электронные массы — величина, очень близкая к массе положительного и отрицательного π -мезона. Следовательно, нейтральный мезон был не μ -мезон, а скорее π -мезон. Такая точка зрения подкреплялась тем фактом, что нейтральные мезоны, так же как и π -мезоны, в больших количествах возникали в ядерных взаимодействиях при высоких энергиях. Оценки среднего времени жизни нейтрального мезона дали величину порядка $2 \cdot 10^{-16}$ сек. Было также установлено, что этот мезон распадается на два фотона, т. е. имеет такую схему распада: $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$, где π^0 — символ нейтрального π -мезона, а γ — фотона*. Среднее время жизни π^0 -мезонов примерно в 100 миллионов раз меньше среднего времени жизни заряженных π -мезонов. Следовательно, π -мезоны распадаются так близко от точки своего рождения, что два фотона, испущенных при их распаде, кажутся выходящими из этой же точки. (Хотя пути фотона в веществе и невидимы, но их можно вычислить по наблюдаемым следам электронно-позитронных пар, образованных фотонами в эмульсии.) Только π^0 -мезоны очень больших энергий живут достаточно долго (благодаря релятивистскому эффекту, который мы обсуждали на стр. 95) и могут пройти расстояние в несколько микронов до своего распада (микрон равен одной миллионной доле метра). Среднее время жизни

π^0 -мезона как раз и было определено по измерениям этого пути в ядерных эмульсиях*.

* В рамках этой книги невозможно отдать должное многим ученым, которые внесли существенный вклад в открытия, о которых шла речь выше. Однако с познавательной точки зрения интересно отметить, что японские физики, которые в годы второй мировой войны работали в условиях полной изоляции, пришли к некоторым выводам, позднее оказавшимся совершенно правильными. Еще до экспериментов Конверси, Панчини и Пиччиони с магнитными линзами (см. стр. 106) японские физики убедились, что мезоны космических лучей не взаимодействуют с атомными ядрами так сильно, как постулировал Юкава. Они считали, что если бы взаимодействие было сильным, то космические мезоны не могли бы проходить очень большие толщи вещества. Чтобы преодолеть эту трудность, Томонага и его сотрудники в 1943 г. предположили, что космические мезоны и мезоны Юкавы — различные частицы. (Эта гипотеза о двух различных мезонах была сформулирована еще раз Робертом Е. Маршаком и Тансом А. Бете, которые не знали работы Томонаги, незадолго до экспериментального открытия π -мезонов.) В 1942 г. Н. Томаки постулировал существование нейтральных мезонов и выдвинул гипотезу о том, что они распадаются на фотоны, создавая, таким образом, основную массу частиц мягкой компоненты космических лучей.

* Есть и другие схемы распада π^0 -мезонов, но они осуществляются чрезвычайно редко.

Глава 10

ЯДЕРНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

В нашей книге уже несколько раз упоминалось о ядерных взаимодействиях частиц космических лучей. Настало время разобраться в этом вопросе подробнее. Какие данные свидетельствуют о существовании таких взаимодействий? Каковы они? Какие частицы в космических лучах действительно способны их вызывать? Более четверти столетия ведутся экспериментальные и теоретические исследования, в результате которых возникло современное, все еще далеко не завершенное представление о природе ядерных взаимодействий.

Первые указания

В главе 6 уже было рассказано, что в начале 30-х годов, когда впервые наблюдались ливни в космических лучах, многие физики думали, что эти ливни образуются при соударении космических частиц с атомными ядрами. Предполагалось, что в таких столкновениях ядра разрушаются и одновременно образуется много положительных и отрицательных электронов. Теории такого процесса множественного образования развивались многими физиками, в том числе В. Гейзенбергом в Германии и Г. В. Ватагиным в Италии. Однако вскоре стало ясно, что ливни требуют совершенно другого объяснения.

Положительные и отрицательные электроны появляются одиночными парами, а не группами из большого числа пар одновременно. Большое число частиц в ливне — это результат многих отдельных актов процессов рождения пар фотонами и тормозного излучения фотонов электронами. Эти процессы происходят вблизи атомных ядер, электрическое поле которых необходимо для

образования пар и для тормозного излучения. Но сами ядра в этих процессах не принимают участия.

Тем не менее были основания считать, что иногда космические частицы действительно разрушают ядра, и тогда возникают группы частиц, совершенно отличных от обычных электронно-фотонных ливней.

Самые первые доказательства существования подобных ядерных расщеплений были получены в 1932 г. австрийскими физиками Мариэттой Блау и Г. Вамбахером, открывшими так называемые *звезды*, вызванные космическими лучами. Эти звезды были обнаружены в фотоэмульсиях, проявленных после долгого хранения со времени изготовления, и представляли собой группы следов частиц, расходящихся из одной общей точки. Блау и Вамбахер работали с эмульсиями, в которых видимые следы оставляли только сильноионизирующие частицы. Поэтому наблюдаемые следы они приписали медленным протонам и α -частицам с энергиями около 10 Мэв. Затем они попытались определить, не вызываются ли эти звезды радиоактивными загрязнениями пластинок. (Мельчайшая крупинка радиоактивного вещества, такого, как полоний, может имитировать звезду. Хотя при распаде каждого ядра полония испускается только одна α -частица, но из-за малых размеров крупинки все следы α -частиц будут казаться исходящими из одной точки.) Однако это объяснение пришлось отбросить, поскольку испущенные частицы имели слишком большую энергию. Блау и Вамбахер пришли к заключению о том, что наблюдаемые звезды — результат ядерных расщеплений под действием космических лучей. Позднее, в подтверждение их выводов, звезды были найдены в больших количествах в пластинках, экспонированных на больших высотах, где интенсивность космических лучей выше.

Новые экспериментальные методы

В течение нескольких лет единственным прямым доказательством существования взаимодействия между космическими лучами и атомными ядрами были звезды в эмульсии. Энергия, необходимая для образования звезды, была весьма умеренной (порядка 100 Мэв) по сравнению с масштабами энергий космических лучей. Кроме того, звезды встречались довольно редко. Склады-

валось впечатление, что ядерные взаимодействия не играют существенной роли в общей картине явлений в космических лучах. Но открытие мезонов полностью изменило эту картину. Мезоны имеют малые времена жизни, поэтому они не могут приходить с далеких расстояний. Другими словами, мезоны не могут быть в первичном космическом излучении, они должны рождаться в атмосфере. Возникал вопрос, как образуются мезоны.

Некоторые физики полагали, что фотоны могут создавать пары мезонов в процессе, подобном процессу образования пар электронов и позитронов. Однако в основном считалось, что вероятнее всего мезоны образуются в результате ядерных взаимодействий. (Спустя много лет было показано экспериментально, что процесс образования фотонами пар мезонов действительно имеет место, но это необычайно редкое явление.) Физики-теоретики вспомнили теоретические идеи о множественном рождении частиц в ядерных взаимодействиях, которые раньше предлагались для объяснения обычных ливней, и пытались применить их к рождению мезонов. Физики-экспериментаторы приступили к исследованию таких процессов.

Первыми, кто начал примерно в 1940 г. эту серию исследований, были Ватагин, работавший в то время в Бразилии, и Яноши в Англии. Схема одной из экспериментальных установок Яноши и его сотрудников приведена на рис. 62. Установка состояла из Г—М-счетчиков, включенных в электронную схему для регистрации совпадений в счетчиках, не лежащих на одной линии. В принципе эта установка очень напоминала установку, применяемую для регистрации обычных ливней (см. главу 4). Но счетчики Яноши были расположены таким образом, что между ними можно было поместить толстые слои свинца. При наличии свинца между счетчиками число совпадений заметно снижалось, тем не менее значительное число их все еще наблюдалось, даже когда толщина свинца достигала 50 см. Эти совпадения не могли быть обусловлены обычными ливнями, поскольку обычные ливни не могут пройти 50 см свинца. Совпадения были приписаны группам проникающих частиц, по-видимому мезонам, образованным в ядерных взаимодействиях космических лучей с веществом, расположенным над счетчиками.

Установки из счетчиков, подобные приведенной на рис. 62 (известные под названием *детектора проникающих ливней*), оказались очень удобными для изучения ядерных взаимодействий космических лучей. Заметим, что такой детектор будет регистрировать только взаимодействия, вызванные частицами очень большой энергии,

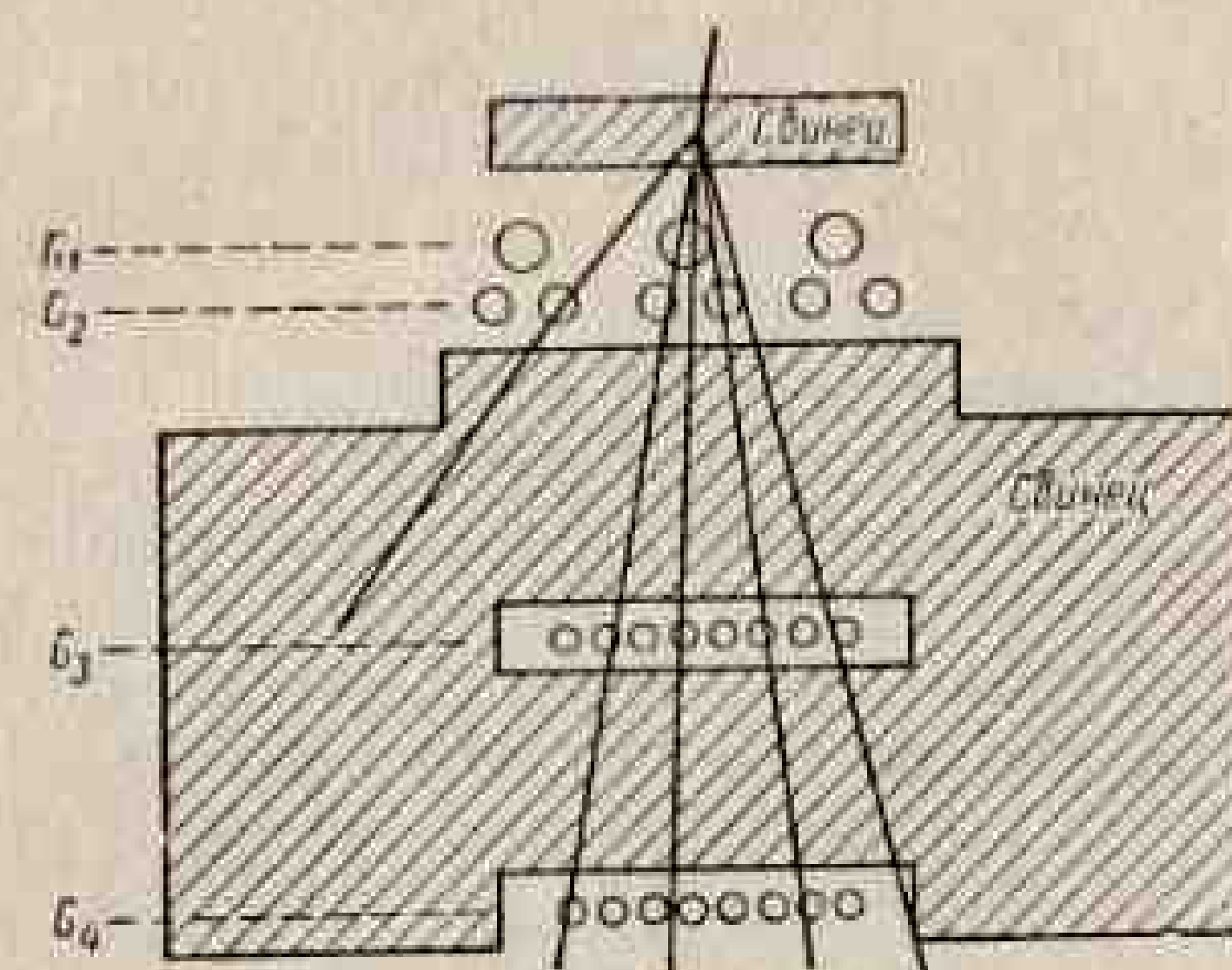


Рис. 62. Схема установки, использованной Яноши в его ранних экспериментах для регистрации проникающих ливней. Электронная схема отбирает случаи одновременного разряда по крайней мере одного счетчика в группе G_1 и двух счетчиков в каждой группе $G_2—G_4$. Такие совпадения могут быть вызваны только ливнями, содержащими проникающие частицы, которые способны пройти большие толщины свинца.

и ведь нужны по меньшей мере многие миллиарды электронвольт, чтобы образовывать несколько частиц, способных пройти сквозь 50 см свинца.

Примерно в то же самое время был разработан другой очень полезный прибор — многопластинчатая камера Вильсона, о которой шла речь в главах 7 и 9. Многопластинчатая камера Вильсона, часто прямоугольной формы, содержит несколько горизонтальных пластин, обычно металлических. Пластины ставятся для увеличения вероятности взаимодействия космической частицы с веществом при прохождении камеры. В большинстве случаев камера запускается системой Г—М-счетчиков, расположенных наиболее благоприятным образом для ре-

гистрации интересующих нас взаимодействий. Многопластинчатую камеру можно рассматривать как поглотитель, разрезанный на тонкие слои. Следы частиц видны в пространстве между слоями. Таким образом, экспериментатор получает довольно подробную картину того, что происходит, когда частица проходит через поглотитель.

Примерно в 1939 г. Стрит (который совместно со Стенсоном проводил первые измерения массы μ -мезона, см. главу 8) сконструировал многопластинчатую камеру для изучения обычных электронно-фотонных ливней. Среди большого числа обычных ливней он наблюдал несколько событий совершенно другого типа, которые, по-видимому, были образованы при соударении космических частиц с атомными ядрами. Отличительной особенностью этих событий было наличие вторичных частиц, которые проходили сквозь металлические пластины, не образуя электронных ливней. Эти частицы не могли быть электронами, вероятно, это были мезоны.

Типичный ливень, содержащий мезоны, показан на рис. 63.

И, наконец, третий экспериментальный метод, очень важный при детальном исследовании ядерных взаимодействий космических лучей, — это возрожденный в середине 40-х годов метод ядерных эмульсий, рассмотренный в предыдущей главе. Ядерные эмульсии, чувствительные к минимально ионизирующим частицам, позволили регистрировать мезоны больших энергий в космических звездах. В соответствии с предсказаниями некоторых теоретиков было действительно обнаружено, что при взаимодействии частицы высокой энергии с ядром часто образуются группы мезонов (рис. 64). Этот важный факт мог быть установлен только при помощи эмульсионной методики, позволяющей экспериментаторам «видеть» точку, в которой происходит ядерное взаимодействие. Так, например, в многопластинчатой камере взаимодействие происходит внутри пластины, и частицы должны пройти в ней некоторое расстояние, прежде чем они попадут в пространство между пластинами. Когда много частиц выходит из пластины, нельзя быть полностью уверенным в том, что эти частицы образованы в одном акте взаимодействия, а не в нескольких последовательных столкновениях.

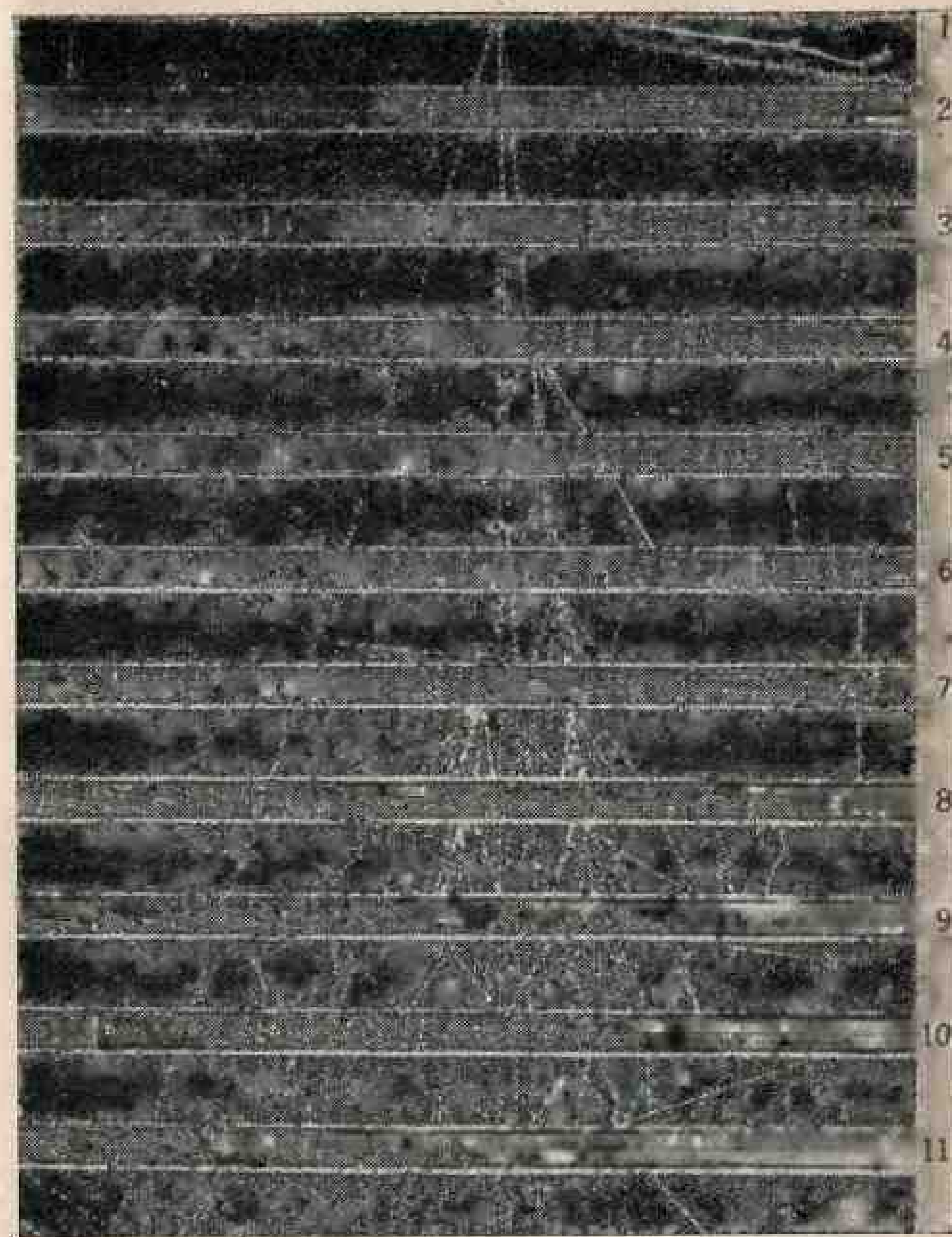


Рис. 63. Мезоны проникающих ливней проходят сквозь несколько металлических пластин в камере Вильсона, не образуя вторичных ливней. Но в пластине 4 во вторичном взаимодействии рождается фотон или электрон высокой энергии, который генерирует обычный ливень. Латунные пластины в камере имеют толщину 1,25 см. Фотография получена группой по изучению космических лучей Массачусетского технологического института в 1950 г.

У читателя уже, возможно, возник вопрос, какие же именно частицы из всего разнообразия частиц в космических лучах связаны с ядерными взаимодействиями. Все ли частицы или только некоторые из них способны вызывать взаимодействия? Или, может быть, такие взаимодействия вызываются совсем другими частицами, которые в описанных до сих пор экспериментах не удалось обнаружить?

Именно эти вопросы начали волновать физиков после того, как стало очевидно, какую важную роль играют ядерные взаимодействия в физике космических лучей. Кое-что начало проясняться, когда стали изучать частоту появления случаев ядерных взаимодействий под разными поглотителями и на различных высотах. Например, Д. Перкинс в 1947 г. установил, что число космических звезд в пластинках, экспонированных под толстым свинцовым экраном, ненамного меньше числа звезд в неэкранированных пластинках. Поскольку в таком экране поглощались практически все электроны и фотоны, то отсюда следовало, что во всяком случае не эти частицы образуют звезды.

В 1946 г. я переехал в Массачусетский технологический институт (МТИ) и возобновил свои исследования по космическим лучам, которые были прерваны войной. В последующие годы многие известные физики из США и других стран время от времени работали в МТИ в группе по изучению космических лучей. Следует подчеркнуть, что, ссылаясь на вклад группы МТИ, я прежде всего имею в виду работы, выполненные этими учеными, а не только мои собственные.

Ядерные взаимодействия космических лучей составляли одну из основных проблем, которыми занималась группа МТИ. Для того чтобы выяснить, не вызываются

Рис. 64. Звезда, образованная частицей высокой энергии (P). Звезда состоит из нескольких следов, среди которых следы от 1-го до 6-го обладают минимальной ионизацией. Они принадлежат частицам, по-видимому мезонам, движущимся со скоростью, близкой к скорости света. Это типичный пример процесса множественного образования мезонов. (Из статьи Р. Брауна, У. Камерини, П. Фаулера, В. Гайтлера, Д. Кинга и С. Пауэлла в журнале *The Philosophical Magazine*. Том. 40, 1949, стр. 862.)

ли эти взаимодействия μ -мезонами, Джон Тинлот в 1948 г. провел тщательное исследование зависимости частоты возникновения ядерных взаимодействий от высоты над уровнем моря. Тинлот проводил измерения, используя детектор проникающих ливней

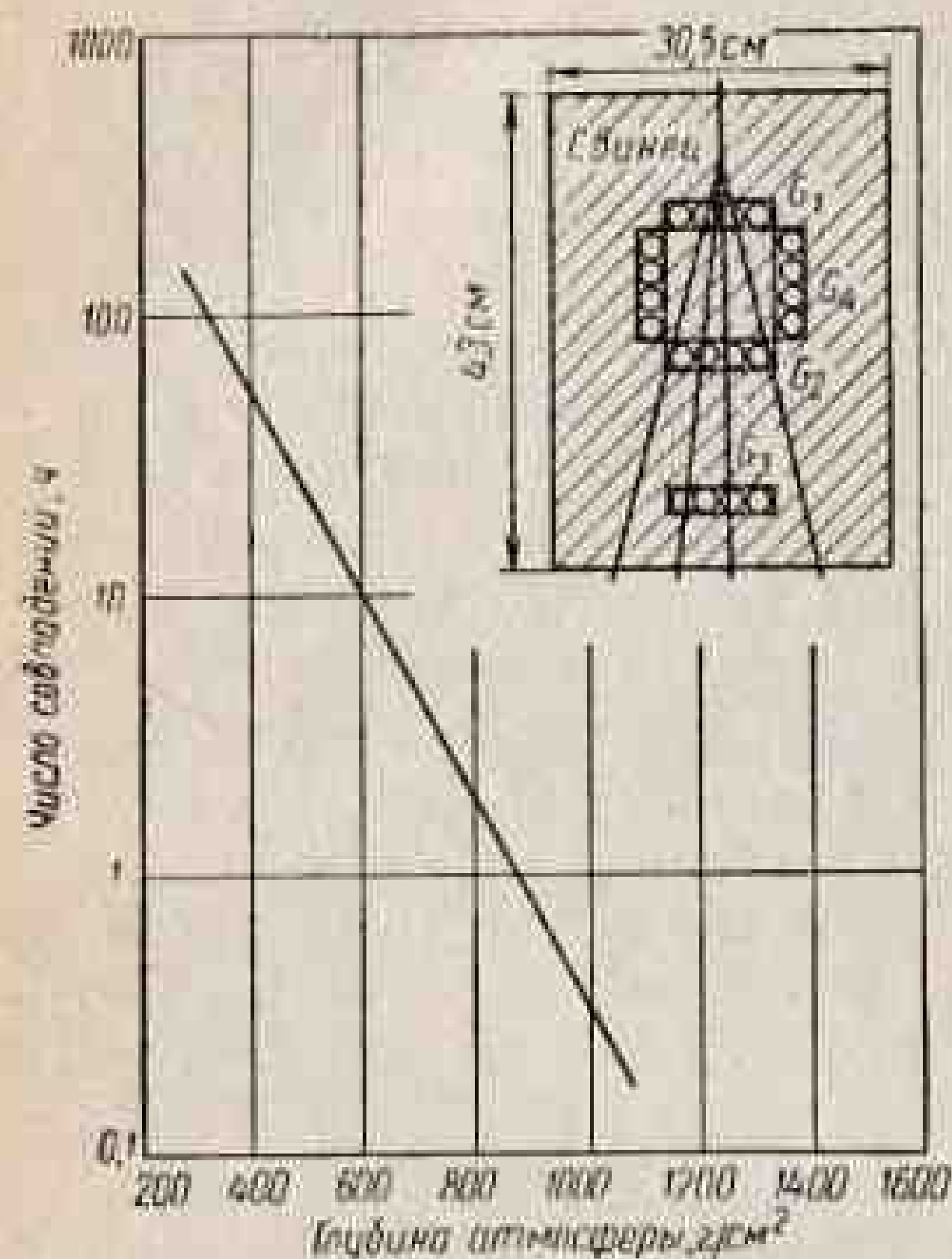


Рис. 65. Возрастание числа проникающих ливней с высотой, измеренное Тинлотом с помощью установки, показанной на вставке. Ливни регистрируются по одновременным разрядам двух и более счетчиков в каждом из рядов G_1 — G_3 (счетчики G_4 в этом измерении не использовались). По вертикальной оси отложено число совпадений в час; по горизонтальной — масса воздуха над установкой в граммах на квадратный сантиметр.

Что же означали эти результаты? Во-первых, они доказали, что высокоэнергичные электроны, фотоны и μ -мезоны, которые все вместе образуют основную массу космических лучей вблизи уровня моря, не взаимодействуют заметным образом с атомными ядрами. Во-вторых,

используя детектор проникающих ливней (рис. 65), на уровне моря, в скалистых горах в Колорадо, и на различных высотах на борту самолета Б-29. По данным Тинлота, число частиц высокой энергии, которые образуют проникающие ливни, возрастает с высотой гораздо быстрее, чем число μ -мезонов. Например, от уровня моря до 4300 м (вершина горы Эванс) число проникающих ливней увеличивается в 32 раза, а число μ -мезонов — лишь в 2,5 раза. Очевидно, что частицы, генерирующие проникающие ливни в ядерных взаимодействиях, не могут быть μ -мезонами. Аналогичные результаты были получены почти одновременно и некоторыми другими учеными, исследовавшими образование звезд в космических лучах.

они доказали, что космические лучи в атмосфере содержат не только электроны, фотоны и μ -мезоны, но также частицы одного или нескольких сортов, которые способны разрушать атомные ядра и создавать вторичные мезоны. Эти **ядерноактивные** частицы очень редко встречаются вблизи уровня моря, но их число быстро возрастает с высотой.

Размеры атомных ядер к тому времени уже были довольно хорошо известны. При известных величинах площади поперечного сечения ядра и числа атомов в грамме вещества можно легко подсчитать вероятность того, что частица, летящая по прямой линии через определенный слой вещества, попадет в атомное ядро. Для частицы, пересекающей слой железа в 1 см, эта вероятность составляет около 1/20. В случае заряженных частиц оценивать таким образом вероятность можно лишь для частиц достаточно высокой энергии, которые не отклоняются заметным образом электрическими полями ядер.

Космические лучи, конечно, удовлетворяют этому условию. Тем не менее тысячи и тысячи космических электронов, фотонов и μ -мезонов пересекают 1 см железа, не испытав ни одного ядерного взаимодействия. Это означает, что когда одна из этих частиц проходит сквозь ядро, то ничего не происходит ни с самой частицей, ни с ядром. Другими словами, по отношению к электронам, фотонам и μ -мезонам ядро ведет себя как облако, сквозь которое пролетает пуля. Неспособность μ -мезонов взаимодействовать с ядрами находится в соответствии с тем фактом, который отмечался в предыдущей главе, а именно, что остановившиеся μ -мезоны не захватываются атомными ядрами. Отсутствие ядерного взаимодействия объясняет также и слабое поглощение μ -мезонов в атмосфере. Ядерноактивные частицы, наоборот, очень быстро поглощаются в атмосфере (см. рис. 65). Действительно, наблюдаемое поглощение в атмосфере более или менее согласуется с тем, что при столкновении с ядром азота или кислорода ядерноактивные частицы исчезают.

Выяснение природы ядерноактивных частиц составляло новую проблему. В качестве возможных кандидатов по разным соображениям рассматривались протоны, нейтроны и π -мезоны. Как уже отмечалось, протоны и нейтроны — составные части ядра; значит, на малых расстояниях эти частицы испытывают колоссальные си-

лы притяжения друг к другу. Поэтому как протон, так и нейтрон должны сильно взаимодействовать с любым ядром, которое они встречают на своем пути. μ -Мезоны также должны сильно взаимодействовать с ядрами, если верно предположение о том, что они рождаются в ядерных взаимодействиях. Ряд экспериментов, подробно разбирать которые здесь нет возможности, подтвердили правильность всех этих предположений. Сильно взаимодействующими космическими частицами в атмосфере действительно оказались протоны, нейтроны и те μ -мезоны, которые не успели распасться на μ -мезоны.

Множество новых частиц

Число протонов, нейтронов и μ -мезонов быстро увеличивается с высотой, поэтому физики, интересующиеся ядерными взаимодействиями, старались проводить свои эксперименты как можно выше. В ответ на эти запросы была усовершенствована техника шаров-зондов. Шары-зонды стали поднимать довольно тяжелую и сложную аппаратуру и летать с ней на высотах около 30 000 метров в течение часов или даже дней. Для работы с громоздкими установками, которые приходится монтировать на земле, в разных странах были созданы высокогорные научные лаборатории: во Французских Пиренеях лаборатория на пике Дю-Миди, на высоте 2860 м (вблизи от хорошо известной солнечной обсерватории того же имени); в Итальянских Альпах на высоте 3500 метров, вблизи города Цервинья, лаборатория Теста Григия; в штате Колорадо, вблизи Денвера в Скалистых горах на высоте 3240 метров, межуниверситетская высотная лаборатория на озере Эхо; в Боливийских Андах, вблизи Ла-Паса на высоте 5200 метров, лаборатория Чакалтая и много других*. Эксперименты в космических лучах, выполненные на шарах-зондах, на высокогорных станциях и на уровне моря дали обширную информацию о ядерных взаимодействиях частиц высокой энергии. Среди

* В СССР вскоре после войны были созданы высокогорные научные станции для исследования космических лучей: на Памире (высота 3860 м) и в Армении на горе Арагац (высота 3250 м). В последние годы вступили в строй две новые большие станции — Тяньшанская вблизи города Алма-Аты (высота 3340 м), построенная Физическим институтом им. П. Н. Лебедева АН СССР, и в Грузии на перевале Цха-Цхарро (2500 м). — Прим. перев.

групп исследователей, которые особенно успешно работали в этой области, была группа Марселя Шайна (Университет, Чикаго), Луи Лепринс-Ринге (Политехническая школа, Париж) и С. Ф. Пауэлла (Университет, Бристоль).

Самое удивительное, с чем встретились физики, изучая ядерные взаимодействия космических частиц, — это

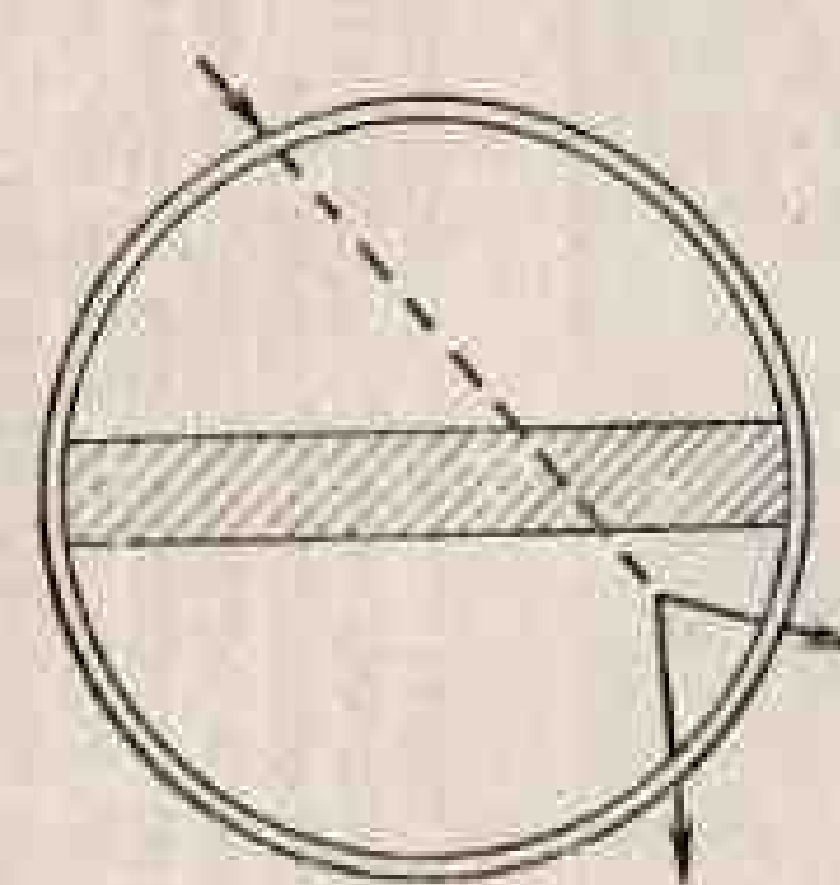


Рис. 66. Схематическое изображение фотографий в камере Вильсона, полученное Рочестером и Батлером в 1947 г. и интерпретированное ими как распад на лету нейтральной частицы (отмеченной пунктирной линией) на две заряженные частицы. (Из статьи, опубликованной в Nature. Том 160, 1947, стр. 855.)

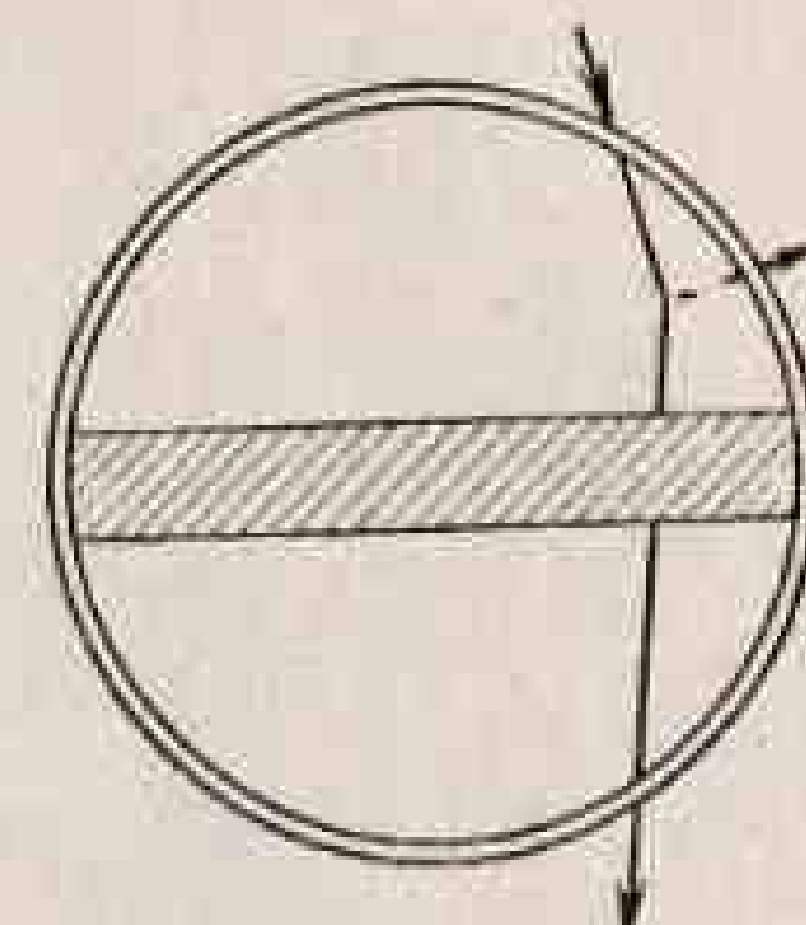


Рис. 67. Схематическое изображение фотографий в камере Вильсона, полученное Рочестером и Батлером в 1947 г. и интерпретированное ими как распад на лету заряженной частицы на одну заряженную и одну нейтральную вторичную частицы. (Из статьи в Nature. Том 160, 1947, стр. 855.)

образование поразительного разнообразия неизвестных ранее короткоживущих «элементарных» частиц. Если μ -мезон попал на отведенное ему теорией место, то совершенно неожиданный наплыв вновь открываемых частиц оказался для теории настоящим «поток». Действительно, понять роль и место этих частиц (а также и μ -мезона) в общей физической картине явлений природы стало одной из самых настоятельных проблем современной теоретической физики.

В 1947 г., спустя несколько месяцев после открытия μ -мезона, Дж. Д. Рочестер и С. С. Батлер (Лаборатория космических лучей в Манчестерском университете) опубликовала две замечательные фотографии камеры

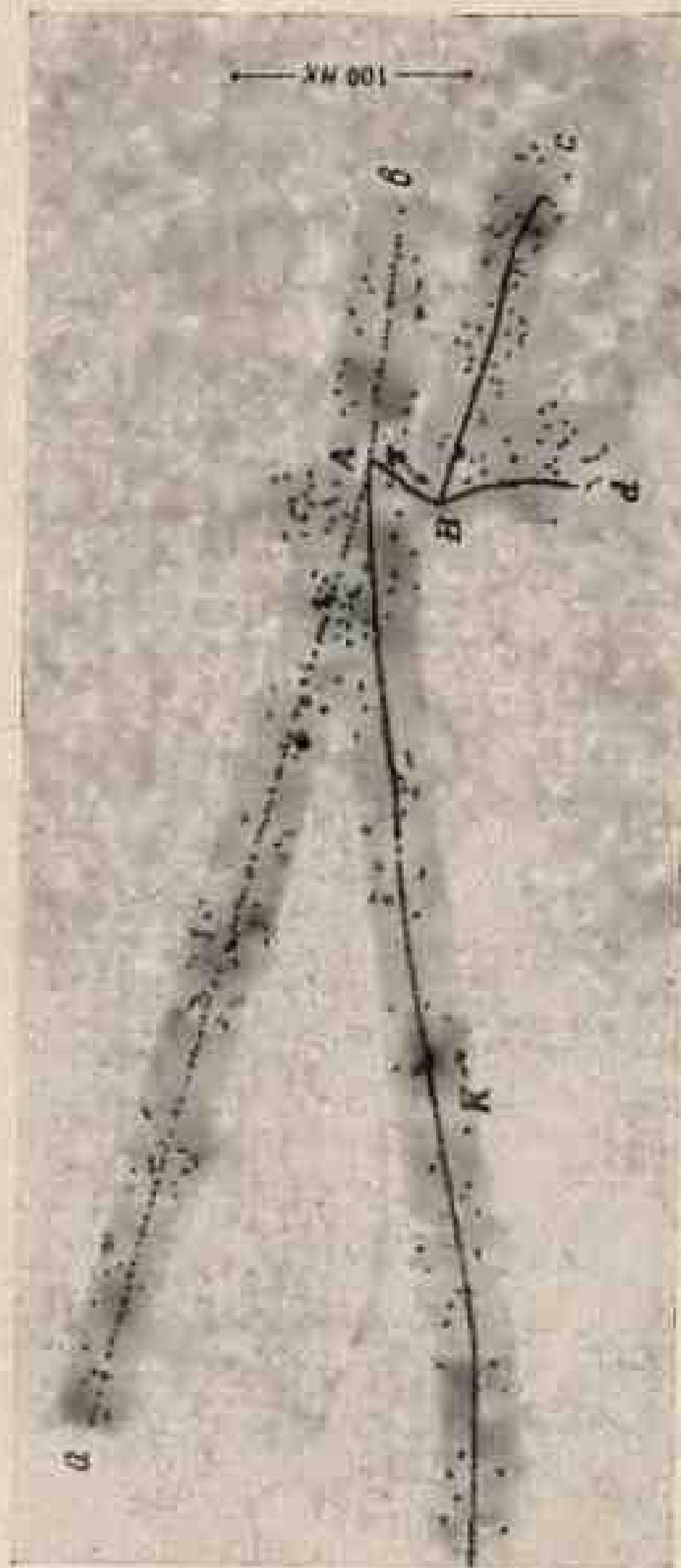


Рис. 68. Распад тяжелого мезона на три π -мезона, зарегистрированный группой Пауэлла в Бристольском университете в 1949 г. Тяжелый мезон K останавливается в точке A , где он распадается на два быстрых π -мезона (следы a и b) и на медленный отрицательный π -мезон, который в свою очередь останавливается в точке B . Отрицательный π -мезон захватывается ядром, которое расщепляется, испуская два сильноионизирующих осколка (c и d) и, по-видимому, один или более нейтронов, не оставивших видимых следов. (Из статьи Р. Брауна, У. Камернин, П. Фаулера, Х. Мюрхеда, С. Пауэлла, Д. Ритсона в *Nature*, Том. 163, 1949, стр. 82.)

Вильсона. На одной из них видны следы двух заряженных частиц, расходящихся вниз из одной и той же точки в газе камеры (рис. 66). Тщательно рассмотрев все возможные интерпретации этого события, Рочестер и Батлер вынуждены были сделать вывод о том, что обе частицы появились при распаде нейтральной частицы, летевшей сверху вниз и, конечно, не оставившей видимого следа.

На второй фотографии виден след заряженной частицы с изломом, т. е. кажется, будто частица, пересекая камеру, внезапно резко изменила направление своего движения (рис. 67). Для объяснения этого случая Рочестер и Батлер выдвинули предположение о том, что ими зарегистрирован распад на лету заряженной частицы на вторичную заряженную и нейтральную (т. е. невидимую в камере) частицу. Важно подчеркнуть здесь, что ни нейтральную частицу в первом случае, ни заряженную во втором не удалось отождествить ни с одной из известных частиц.

Бристольская группа Пауэлла в 1949 г. сообщила о еще одном необычном событии. Работая с ядерными эмульсиями, эта группа обнаружила частицу с массой, промежуточной между массами π -мезона и протона. Остановившись в эмульсии, эта частица распалась на три мезона. Один из мезонов при остановке в эмульсии дает ядерную звезду — характерный признак отрицательного π -мезона (рис. 68).

Трудно было сделать определенные выводы по этим отдельным случаям. Но число их начало быстро возрастать. Андерсон и его сотрудники в Калифорнийском технологическом институте (работавшие на высоте 3200 метров над уровнем моря) получили большое число фотографий, подтверждающих выводы Рочестера и Батлера. В последующие годы физики разных стран, изучающие космические лучи, регистрировали все больше и больше «новых» нестабильных частиц на фотографиях в камерах Вильсона и в ядерных эмульсиях.

Некоторое время царила большая путаница в числе и свойствах новых частиц, которые нужно было привлекать для объяснения экспериментальных данных. В конце концов стало ясно, что существуют две группы частиц, которые на конференции по космическим лучам во Франции, в Баньере-де-Бичорре, в 1953 г. были назва-

ны тяжелыми мезонами и гиперонами. Тяжелые мезоны и гипероны могут быть и нейтральными, и заряженными. Тяжелые мезоны легче протонов, но тяжелее π -мезонов. Гипероны тяжелее протонов. Тяжелые мезоны и гипероны никогда не встречаются поодиночке. Пары тяжелых мезонов возникают за счет перехода кинетической энергии в массу при ядерных взаимодействиях. Протон или нейтрон высокой энергии при столкновении с атомным ядром может превратиться в гиперон, но при этом одновременно испускается и тяжелый мезон. В этом случае часть энергии протона или нейтрона расходуется на образование массы тяжелого мезона и массы гиперона.

Первая из двух частиц, обнаруженных в 1947 г. Рочестером и Батлером, стала называться нейтральной лямбда-частицей — это гиперон, который обозначается греческой буквой Λ . Лямбда-гиперон распадается на протон и отрицательный π -мезон:

$$\Lambda \rightarrow p^+ + \pi^-.$$

Вторая частица Рочестера и Батлера была положительной сигма (Σ^+)-частицей — вторым гипероном. Σ^+ -Гиперон распадается на нейтрон и положительный π -мезон:

$$\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+.$$

Частица, найденная в 1949 г. бристольской группой, была тяжелым положительно заряженным мезоном (K^+), который распадался по следующей схеме:

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-.$$

Многие из вновь открытых частиц распадаются несколькими различными путями, это служит одной из причин, которая затрудняет анализ экспериментальных данных. Например, положительный K -мезон может распадаться в соответствии с одной из следующих схем распада:

$$K^+ \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^+,$$

$$K^+ \rightarrow \pi^0 + \pi^+,$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu,$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \pi^0 + \nu,$$

$$K^+ \rightarrow e^+ + \pi^0 + \nu.$$

Некоторые из схем распада с точки зрения принятых ранее теоретических идей считались совершенно несовместимыми друг с другом.

Эту трудность удалось преодолеть, когда была доказана несостоятельность одного оказавшегося незыблемым теоретического представления. Речь идет об открытии того факта, что *сохранение четности* в отличие от законов сохранения энергии и импульса не есть строгий закон природы*. Это открытие было сделано на основе теоретических работ Ц. Д. Ли и Ч. Н. Янга и экспериментальных данных, полученных Ц. С. Ву и ее сотрудниками.

Для завершения этого очень краткого и поверхностного описания необходимо хотя бы просто упомянуть об антипротоне и антинейтроне. Первый из них — это отрицательная частица с массой, равной массе протона. Антипротон относится к протону так же, как позитрон к электрону. Как и в случае электронов, взаимная аннигиляция происходит при столкновении протона со своей античастицей.

Антинейтрон, несмотря на то что он нейтрален и имеет ту же массу, не тождествен обычному нейтрону, а является как бы его негативным изображением, точно так же, как антипротон по отношению к обычному протону. Так что нейтрон и антинейтрон при столкновении также аннигилируют.

Антипротоны и антинейтроны были предсказаны теорией Дирака. В 1954 г. в камере Вильсона и в ядерной эмульсии было зарегистрировано два случая взаимодействия космических частиц, которые были очень похожи на аннигиляцию антипротонов.

Однако экспериментально существование антипротонов и антинейтронов было доказано лишь в 1956 г. в работах Эмилио Сегре и Оуэна Чемберлена, выполненных на ускорителе**.

* Закон сохранения четности включает в себя довольно сложные и тонкие понятия. Грубо говоря, этот закон постулирует то, что физические системы и их зеркальное изображение (например, винты с правой и левой резьбой) подчиняются одним и тем же физическим законам.

** В Приложении IX приведена таблица известных элементарных частиц и описание некоторых их основных свойств.

Нейтроны в космических лучах

В ядерных взаимодействиях образуются не только высокоэнергичные вторичные частицы, но также и довольно большое число протонов, нейтронов и α -частиц с энергиями порядка миллионов электронвольт. Протоны и α -частицы такой энергии очень быстро расходуют всю свою энергию на ионизацию и поглощаются. Нейтрино же, очевидно, не теряют своей энергии на ионизацию. В последовательных столкновениях с ядрами нейтроны постепенно замедляются и, в конце концов, становятся «жертвами» ядерного поглощения. Оказалось, что наиболее «прожорливые» ядра в атмосфере — это ядра азота ($A=14$, $z=7$). Следовательно, большинство нейтронов кончают свою жизнь, попадая в ядро азота, которое затем, испуская протон, превращается в ядро радиоактивного протона углерода-14 ($A=14$, $z=6$).

Значительный интерес в физике космических лучей представляет собой экспериментальное изучение медленных нейтронов в атмосфере. Среди физиков, которые внесли заметный вклад в изучение этой проблемы, следует отметить С. Корфа из Нью-Йорского университета и Джона А. Симпсона из Чикагского университета. Более того, образование углерода-14 под действием медленных нейтронов нашло важное применение в области, совершенно далекой от космических лучей, а именно в археологии. Возраст, например, куска дерева можно определить, измеряя отношение содержащегося в образце количества углерода-14 к углероду-12 (C^{12} — обычный, нерадиоактивный, изотоп). Все растения поглощают двуокись углерода в процессе фотосинтеза и выделяют ее при дыхании. В течение жизни растения или дерева отношение углерода-14 к углероду-12 должно быть таким же, как и в атмосфере. Когда же растение погибает, то это отношение убывает, так как углерод-14 начинает распадаться. Поскольку период полураспада углерода-14 составляет 5600 лет, то интересующее нас отношение за это время уменьшается вдвое. Таким образом, появляется возможность достаточно надежно определять возраст деревянных предметов (или других материалов органического происхождения) вплоть до возраста порядка 20 000 лет или даже больше.

Глава 11

ЧТО ТАКОЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ЧТО С НИМИ ПРОИСХОДИТ В АТМОСФЕРЕ?

В 1940—1950 гг., по мере того как выяснялись природа и свойства различных частиц вторичного космического излучения, начала складываться единая и внутренне непротиворечивая картина всех явлений, связанных с космическими лучами. И к концу этого десятилетия физики, наконец, нашли ответ на вопрос, поставленный перед ними еще в 1912 г. открытием Гесса: что представляет собой первичное космическое излучение, падающее на границу атмосферы Земли из мирового пространства?

Первичное излучение

Еще в 1940 г. экспериментами по исследованию влияния магнитного поля Земли на падающее излучение (см. главу 5) было показано, что первичное космическое излучение большей частью, а возможно, и полностью состоит из положительно заряженных частиц. Спустя несколько лет некоторые физики отождествили проникающие частицы, наблюдаемые вблизи уровня моря, с первичными космическими лучами. Но в 1940 г., однако, уже знали, что эти проникающие частицы — мезоны (а именно μ -мезоны), которые живут не более нескольких микросекунд. По этой причине μ -мезоны не могли входить в состав излучения, приходящего из мирового пространства, они должны были создаваться в атмосфере какими-то другими первичными частицами.

Если исключить существование новой, ранее неизвестной, положительно заряженной, стабильной частицы, то

первичное излучение могло состоять из позитронов или из протонов, либо из более тяжелых ядер, или же из смеси частиц всех трех сортов. Однако до 1940 г. не было надежных экспериментальных данных, на основании которых можно было бы прийти к определенному выводу. В начале 40-х годов группа Марселя Шайна (Университет, Чикаго) выполнила ряд опытов на шарах-зондах (вплоть до высот порядка 20 000 метров, где давление составляет всего лишь одну тридцатую часть атмосферы). Эти опыты убедительно показали, что позитронов в составе первичного космического излучения нет. Действительно, в опытах Шайна частицы, обнаруженные на очень больших высотах, проходили через несколько сантиметров свинца, не образуя ливней в таком количестве, как можно было ожидать от высокоэнергичных электронов или позитронов. Более того, оказалось, что эти частицы поглощаются свинцом совсем не так эффективно, как электроны и позитроны. На основании этих фактов Шайн и его сотрудники пришли к выводу о том, что первичные космические лучи скорее всего состоят из протонов*.

Этот вывод был основательно подкреплён экспериментами по ядерным взаимодействиям космических лучей, которые мы обсуждали в главе 10. Оказалось, что число ядерноактивных частиц, составляющих малую долю суммарного излучения вблизи уровня моря, растет с высотой гораздо быстрее, чем число электронов, фотонов и μ -мезонов. Действительно, возрастание числа ядерноактивных частиц продолжается постоянно вплоть до самых больших высот, достигнутых в экспериментах, тогда как интенсивность других компонент космических лучей достигает максимума и затем убывает (см. рис. 75). Тщательный анализ экспериментальных данных привел физиков к заключению о том, что практически все первичное космическое излучение состоит из ядерноактивных частиц. Протоны, нейтроны и π -мезоны — вот ядерноактивные частицы, которые были обнаружены в атмосфере. Единственная стабильная положительная частица среди них — протон. Отсюда последовал естественный вывод о том, что первичные космические лучи — это про-

* К аналогичным выводам независимо пришли и советские ученые в результате фундаментальных исследований, проведенных под руководством С. Н. Вернова. — *Прим. перев.*

тоны. Этот вывод оказался правильным, но только частично.

Далее действие нашей истории переносится в университеты Миннесоты и Рочестера, где вскоре после войны сложились сильные группы исследователей космических лучей под руководством Эдварда П. Нея, Ганса Л. Брэдта и Бернарда Питерса. В 1948 г. обе группы, выполняя совместную работу, запустили воздушный шар с ядерными эмульсиями на высоту 29 километров. После проявления в пластинках были обнаружены следы очень большой плотности. Большая часть таких следов пересекала всю стопку пластинок. По плотности зерен можно было оценить потери энергии вдоль следа, а значит, и суммарную энергию, потерянную частицей при прохождении пластинок. Оказалось, что эти частицы обладают энергией, равной по крайней мере многим миллиардам электронвольт.

При таких больших энергиях протоны уже ведут себя как минимально ионизирующие частицы. Поскольку ионизирующая способность (а, следовательно, и плотность зерен вдоль следа) для частиц определенной энергии возрастает с массой и электрическим зарядом, то наблюдаемые частицы должны быть тяжелее протона или нести более одного элементарного заряда. И действительно, скоро стало очевидно, что как масса, так и заряд этих частиц больше соответствующих величин для протона. Эти частицы были отождествлены с ядрами более тяжелых элементов, лишенных своей электронной оболочки. (На том же воздушном шаре вместе с ядерными эмульсиями поднималась и небольшая камера Вильсона. На фотографиях в камере также видны следы быстрых, многократных заряженных частиц.)

Тяжелые ядра, обнаруженные в верхних слоях атмосферы, благодаря своей высокой энергии были без всяких сомнений отнесены к космическому излучению. Физики, которые обнаружили их, привели убедительные аргументы в пользу того, что тяжелые ядра не могут быть вторичными частицами, что они принадлежат к первичному космическому излучению. Пожалуй, наиболее прямым доказательством был тот факт, что наблюдаемые ядра обладали большим зарядом, чем ядра атомов атмосферных газов. Очевидно, что такие тяжелые ядра

не могли возникать при расщеплении ядер газа под действием первичных космических частиц.

Эмульсии, применявшиеся в миннесота-роучестерских экспериментах, обладали недостаточной чувствительностью для регистрации быстрых протонов. Когда спустя некоторое время в верхние слои атмосферы были посланы более чувствительные пластинки, то в них нашли, как и ожидали, большое количество следов протонов. В действительности оказалось, что большая часть первичного космического излучения все-таки состоит из протонов. В табл. 1 приведено относительное содержание различных ядер в первичном излучении.

Таблица 1

Состав первичного космического излучения

Приведено число различных ядер, приходящихся на 10 000 протонов в первичном излучении. Рассматриваются только те первичные частицы, у которых энергия, приходящаяся на один нуклон, превышает 2,5 Гэв [т. е. протоны ($A=1$) с энергией более 2,5 Гэв; ядра гелия ($A=4$) с энергией более $4 \times 2,5 = 10$ Гэв; ядра углерода ($A=12$) с энергией более $12 \times 2,5 = 30$ Гэв и т. д.]. Данные взяты из статьи В. Л. Гинзбурга и С. И. Сыроватского в Journal of Theoretical Physics (Supplement). № 20, 1961, стр. 1.

Ядра	Z	Относительное содержание
Водород (p)	1	100 000
Гелий (α)	2	6 770
Легкие ядра	3—5	146
Средние ядра	6—9	430
Тяжелые ядра	> 10	246

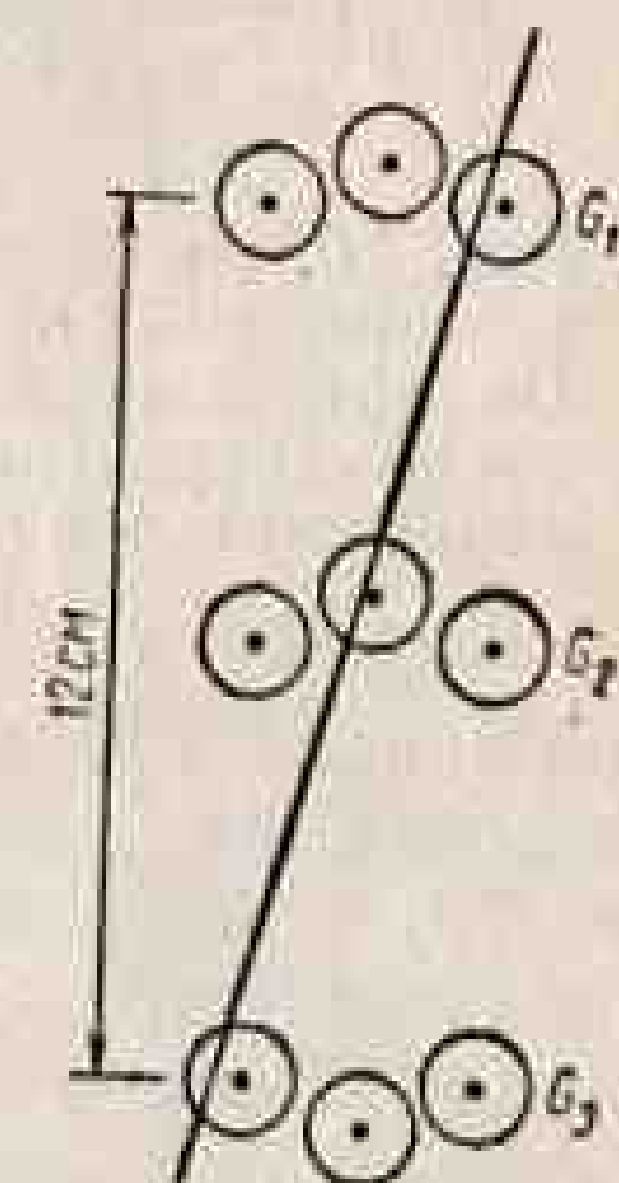
Хотя уже не оставалось никаких сомнений в том, что первичные космические лучи состоят в основном из протонов и небольшой доли ядер атомов более тяжелых элементов, тем не менее экспериментаторы все же продолжали поиски в первичном излучении быстрых электронов и фотонов. Эксперименты, выполненные в 1948 г. в МТИ и в Университете Миннесоты, дали отрицательный результат. Однако в 1961 г. Дж. Ерлу в Миннесоте, Мейеру и Р. Фогту в Чикаго удалось зарегистрировать первичные электроны, причем оказалось, что на каждую сотню первичных частиц приходится несколько первичных электронов (таким образом, поток электронов занимает промежуточное положение между потоком ядер гелия и суммарным потоком всех остальных тяжелых ядер).

В том же году Уильям Краушаар и Джорж В. Кларк в МТИ при помощи детектора, который на искусственном спутнике был вынесен за пределы атмосферы Земли, получили некоторые доказательства (еще не подтвержденные к моменту написания этой книги) того, что в первичном излучении на каждую тысячу падающих частиц имеется один или два первичных фотона с энергией больше 50 Мэв.

Генерация вторичных частиц в атмосфере

После всего рассказанного возникает естественный вопрос о том, что физики называют «генетическими отношениями» между различными компонентами вторичного космического излучения? Иными словами, посредством какой цепочки взаимодействий первичные космические лучи создают различные сорта частиц, наблюдаемые на различных уровнях в атмосфере?

Рис. 69. Телескоп из Г—М-счетчиков, примененный Г. Пфотцером в 1935 г. для измерения интенсивности космических лучей, проходящих сквозь атмосферу в вертикальном направлении. Совпадение регистрируется в том случае, когда частица вызывает разряд по крайней мере в одном счетчике в каждой из трех групп G_1 , G_2 и G_3 .



Уже упоминалось о замечательных экспериментах Эриха Регенера и его группы на больших высотах и на больших глубинах под водой. Один из сотрудников Регенера Георг Пфотцер в 1935 г. впервые поднял на шарах-зондах прибор для регистрации частиц, летящих более или менее вертикально. Эксперимент Пфотцера был гораздо «чище» предыдущих экспериментов с электроскопами, поскольку электроскоп регистрирует излучение, падающее на него со всех направлений, а на заданной высоте эффективная толщина атмосферы различна для частиц, идущих под разными углами к вертикали.

Основной частью прибора Пфотцера был телескоп из Г—М-счетчиков, направленный вертикально. Схема телескопа приведена на рис. 69. На рис. 70* изображена зависимость частоты совпадений от глубины атмосферы. Наличие максимума на глубине атмосферы около 90 г/см^2 представляет собой самую удивительную особенность

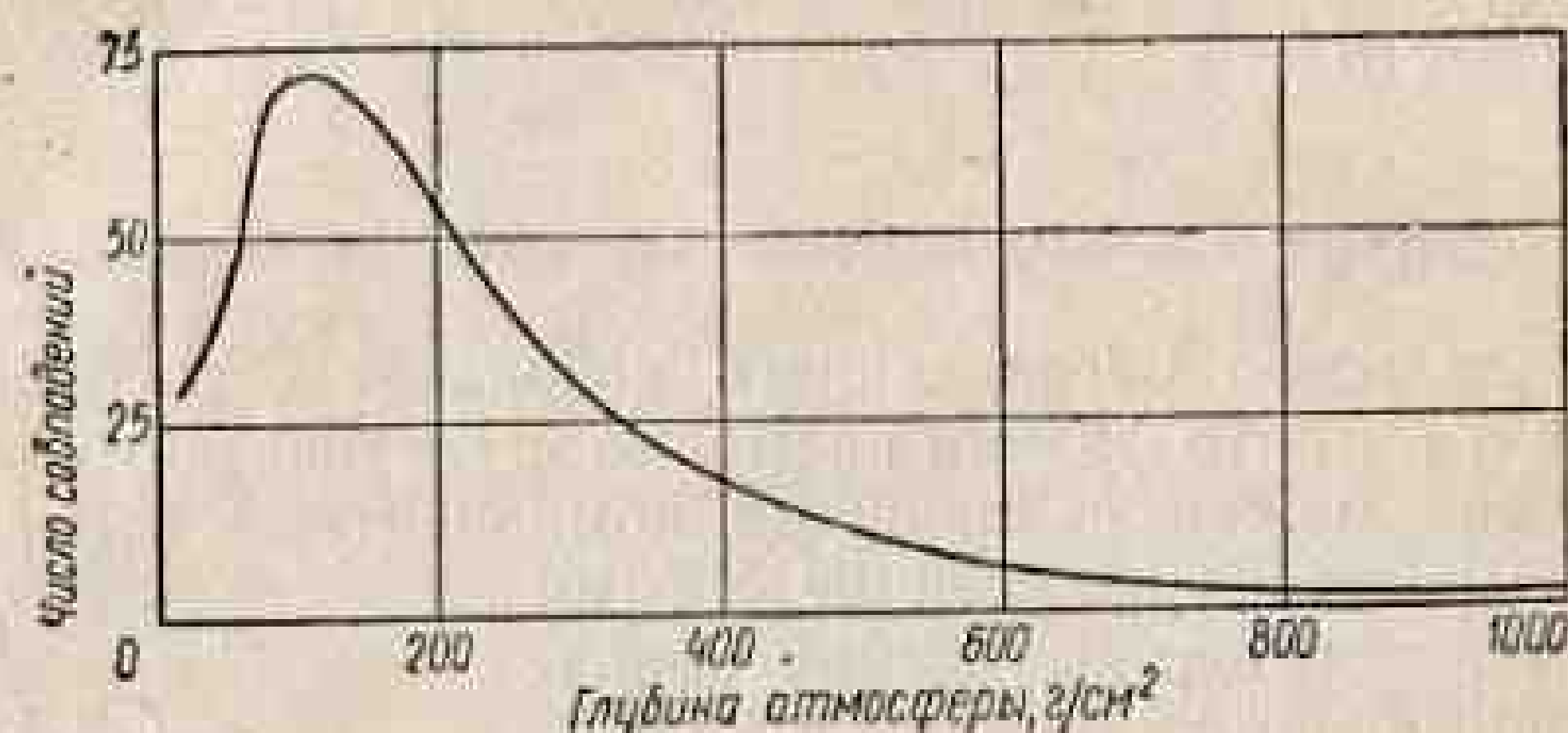


Рис. 70. Интенсивность космических лучей по вертикали в зависимости от глубины атмосферы, по данным Пфотцера. По вертикальной оси отложено число совпадений в минуту, зарегистрированное телескопом, показанным на рис. 69; по горизонтальной оси отложена глубина атмосферы в граммах на квадратный сантиметр.

этой кривой, которая очень напоминает ливневые кривые, обсуждавшиеся раньше (см. рис. 39). Эта кривая (см. рис. 70) более непосредственно, чем любой предшествующий эксперимент, свидетельствует о том, что большинство заряженных частиц, наблюдаемых в атмосфере, имеет вторичное происхождение. Действительно, значительное возрастание скорости счета от границы атмосферы до глубины 90 г/см^2 можно объяснить только возникновением вторичного излучения в результате взаимодействий первичных частиц с ядрами атомов воздуха.

В течение нескольких лет в середине 30-х годов моя группа в Падуанском университете в Италии активно работала над изучением генетического соотношения между различными группами вторичных космических лучей. Мы использовали различные комбинации из Г—М-счетчиков и поглотителей для выделения определенных сортов частиц. Например, вертикальный телескоп из Г—М-счет-

* См. Приложение I. Глубина атмосферы в зависимости от высоты дана на рис. 76.

чиков, разделенных толстыми блоками свинца, выделяет проникающие частицы (которые позже были идентифицированы как μ -мезоны). Установка из счетчиков, расположенных треугольником под свинцовой пластиной, регистрирует высокоэнергичные электроны и фотоны, которые образуют ливни в свинце (рис. 71). Наши эксперименты большей частью заключались в сравнении ско-

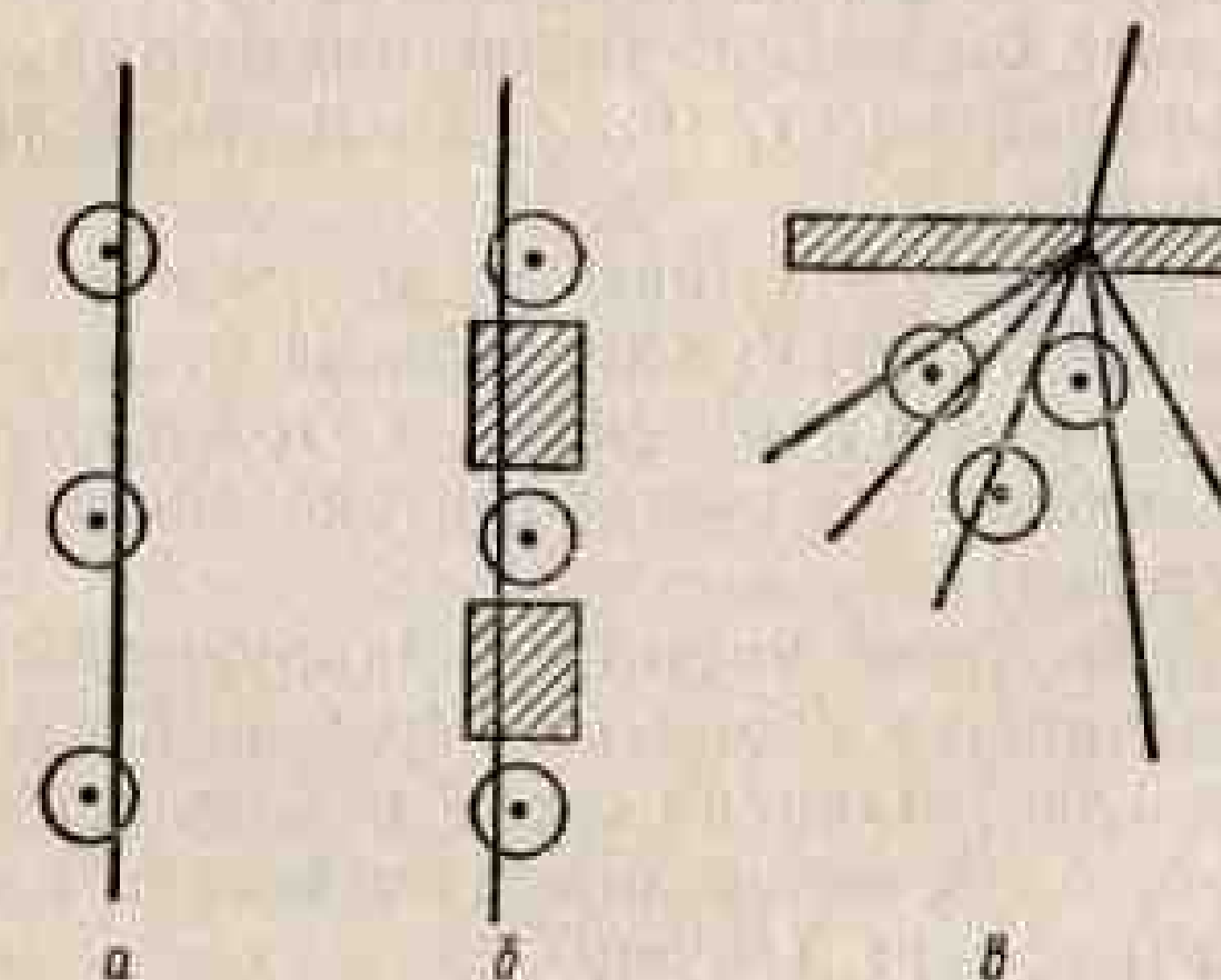


Рис. 71. Схемы установок для отбора различных компонент вторичного космического излучения; а — число совпадений в трех Г—М-счетчиках, расположенных один над другим, дает суммарный поток «мягкой» и «проникающей» компонент (т. е. электронов и μ -мезонов соответственно); б — число совпадений в трех Г—М-счетчиках, расположенных один над другим и разделенных свинцовыми блоками с суммарной толщиной 10 см, дает поток только «проникающих» частиц; в — число совпадений в трех Г—М-счетчиках, расположенных по углам треугольника, при наличии над счетчиками свинцовой пластины толщиной около 1 см дает поток ливнеобразующих частиц (высокоэнергичных электронов и фотонов).

ростей счета, зарегистрированных различными детекторами на разных высотах в горах. Подобные эксперименты проводились и другими исследователями. Особенно ценные результаты были получены в середине 40-х годов группой итальянских физиков во главе с Джильберто Бернадини.

Нет возможности описать здесь сколько-нибудь подробно результаты этих многочисленных экспериментов. Точно также совершенно невозможно описать те хитрые и часто довольно запутанные аргументы, которые использовали для их интерпретации.

Имеет смысл, однако, вкратце перечислить основные вехи развития физики космических лучей. Сделаем это в виде перечня ответов, которые можно было бы получить от физиков на разных этапах исследования космических лучей, на вопрос о том, что же представляют собой космические лучи. Но теперь мы можем и отметить, какие из этих ответов оказались правильными, а какие нет. Конечно, не каждый физик на вопрос о природе космических лучей давал бы именно такие ответы, так что выбор этих высказываний носит, может быть, несколько субъективный характер.

1928 г. Первичное космическое излучение состоит из фотонов высокой энергии; заряженные ионизирующие частицы, наблюдаемые в атмосфере, — это вторичные электроны, возникающие за счет комптоновского рассеяния фотонов. (*Неверно*).

1931 г. Заряженные частицы, обнаруженные в атмосфере, в большинстве своем — первичные космические частицы. (*Неверно*). Однако среди наблюдаемых частиц есть некоторое количество вторичных электронов, возникающих в атмосфере. (*Верно*).

1934 г. В состав космических частиц, наблюдаемых в атмосфере, входят электроны и фотоны больших энергий, которые можно обнаружить по их способности генерировать ливни. (*Верно*). К космическим частицам относятся и проникающие частицы, природа которых еще неизвестна. Проникающие частицы, вероятно, входят в состав первичного излучения. (*Неверно*). Некоторое количество электронов и фотонов образуется при столкновениях проникающих частиц с атомами атмосферы. Однако не все эти частицы образуются таким путем, поскольку, как показывают эксперименты, число электронов и фотонов возрастает с высотой быстрее, чем число проникающих частиц. (*Верно*).

1939 г. Проникающие частицы — это мезоны, а так как мезоны нестабильны, то они должны рождаться в атмосфере. (*Верно*). При распаде мезонов испускаются электроны; электроны создают ливни, содержащие как электроны, так и фотоны. Число этих электронов и фотонов возрастает с высотой быстрее, чем число мезонов, поскольку плотность атмосферы падает с ростом высоты, и вероятность распада мезона в слое воздуха с данной массой на единицу площади соответственно возрастает.

(*Верно*). Изменение числа электронов и фотонов с высотой согласуется с предположением о том, что все эти частицы создаются мезонами, главным образом при их распаде. (*Неверно*).

1945 г. Более точные данные относительно изменения числа электронов и фотонов с высотой опять изменили представление о происхождении этих частиц. Теперь считают, что электроны и фотоны возникают не только при распаде мезонов или при столкновении мезонов с атомами. Вероятно, некоторое их количество образуется в тех же ядерных взаимодействиях, в которых, как полагают, образуются и мезоны. (*Верно*).

1950 г. Существует несколько сортов мезонов. Проникающая компонента вторичного излучения состоит из μ -мезонов. μ -Мезоны возникают при распаде заряженных π -мезонов. Часть электронов и фотонов рождается при распаде μ -мезонов, но в большинстве своем электроны и фотоны образуются в ливнях, генерированных γ -лучами, возникающими при распаде нейтральных π -мезонов. Заряженные и нейтральные π -мезоны образуются во взаимодействиях первичных протонов и более тяжелых ядер с ядрами атмосферных газов. (*Верно*).

Выводы

Теперь все фрагменты общей картины космических лучей расставлены по местам, и будет полезно рассмотреть всю картину в целом (рис. 72). Наиболее существенные сведения о первичном излучении и различных компонентах вторичного излучения суммированы на рисунках 74 и 75. По вертикальной оси обоих рисунков отложены интенсивность в заданном направлении различных сортов частиц; точный смысл этого параметра объясняется на рис. 73.

Первичные космические лучи состоят из протонов и «голых» ядер более тяжелых элементов. Первичные частицы обладают широким спектром энергии, который простирается вплоть до невероятно больших значений (рис. 74). Траектории этих частиц, приближаясь к Земле, искривляются земным магнитным полем. У магнитных полюсов в атмосферу Земли попадают частицы любых энергий. Однако по мере приближения к экватору все более энергичным частицам магнитное поле препятст-

вует попадать на Землю (*широтный эффект*). В то же время магнитное отклонение приводит к асимметрии в распределении направлений, по которым космические частицы приходят на Землю. Будучи положительно за-

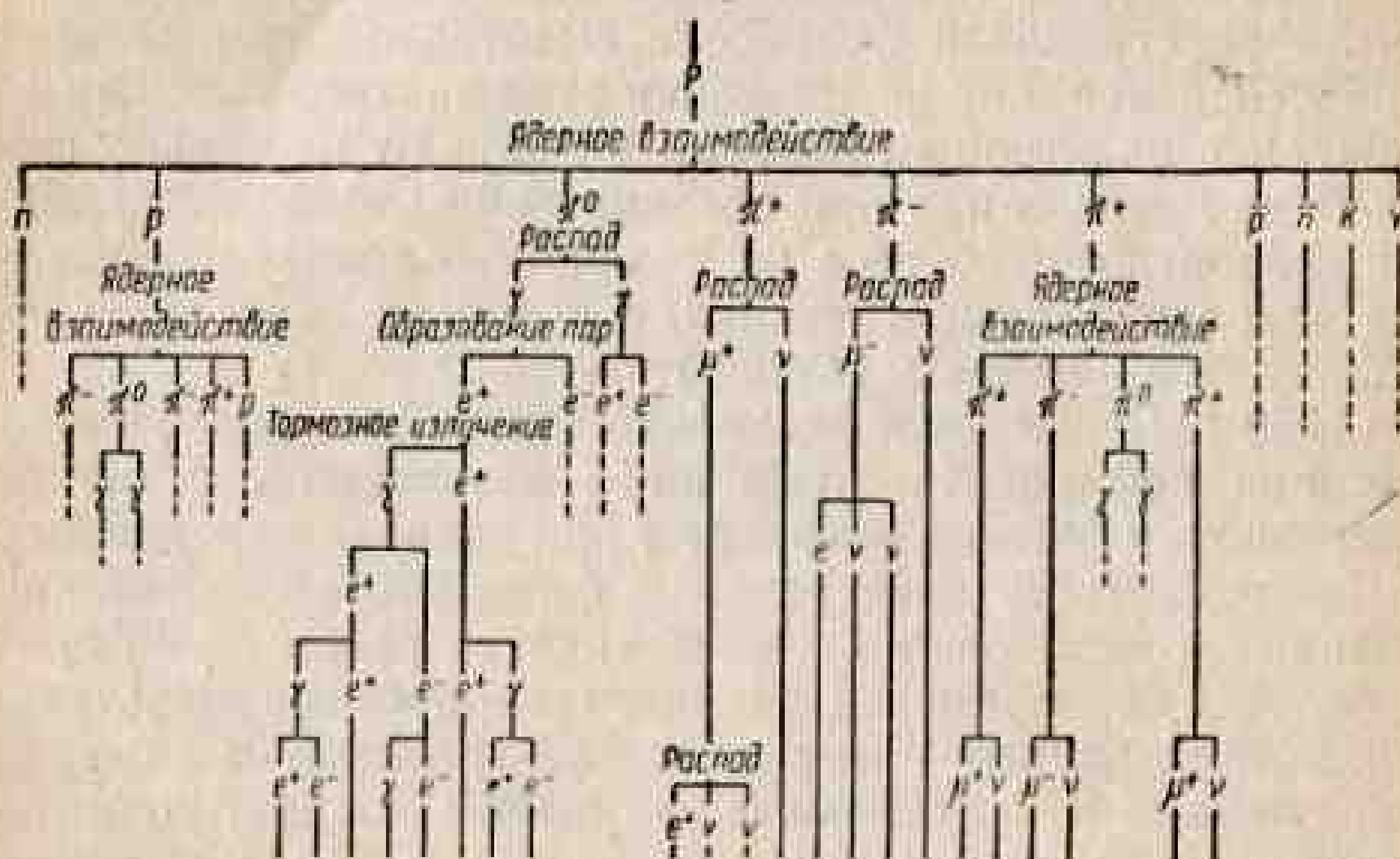


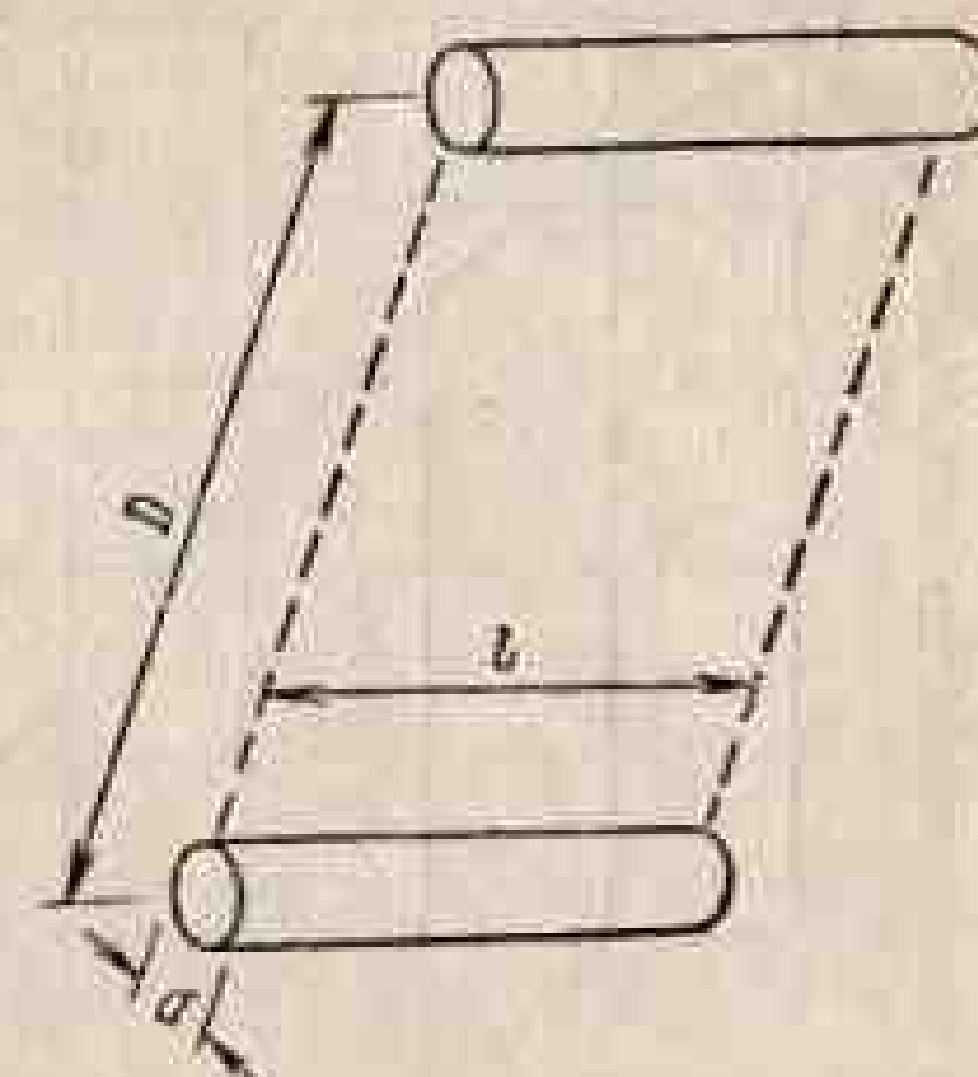
Рис. 72. Потомство первичной космической частицы. Первичная частица (обычно протон) сталкивается с ядром кислорода или азота в атмосфере. Среди продуктов столкновения есть нейтроны (n), протоны (p), нейтральные π -мезоны (π^0), заряженные π -мезоны (π^+ и π^-), антипротоны и антинейтроны ($\bar{p}$ и $\bar{n}$), тяжелые мезоны (K) и гипероны (Y). Нейтральные π^0 -мезоны распадаются на γ -кванты, которые в свою очередь образуют электронно-позитронные пары (e^- и e^+). Заряженные мезоны или взаимодействуют с другими ядрами в атмосфере, или распадаются на μ -мезоны (μ^+ и μ^-) и нейтрино (ν). Электроны часть своей энергии излучают в виде γ -квантов (тормозное излучение). Пунктирные линии указывают на то, что взаимодействие частиц продолжается дальше. Большинство заряженных частиц на поверхности Земли составляют электроны, позитроны и μ -мезоны.

ряженными, эти частицы в большем количестве приходят с запада, чем с востока (*восточно-западная асимметрия*).

Попадая в атмосферу, космические частицы вскоре сталкиваются с ядрами атомов атмосферных газов. Точное место, в котором происходит первое столкновение космической частицы с ядром, определяется случаем. Но в среднем протоны испытывают одно столкновение, прой-

дя путь около 70 г/см^2 , или около одной четырнадцатой доли суммарной массы воздуха над уровнем моря; тот же путь для α -частиц составляет около 25 г/см^2 , тяжелые

Рис. 73. Измерение интенсивности по определенному направлению. Рассмотрим телескоп, состоящий из двух одинаковых Г—М-счетчиков длиной l и диаметром d . Расстояние D между ними велико по сравнению с l и d . Число частиц, проходящих в секунду через верхний счетчик, пропорционально площади поперечного сечения $A = l \times d$. Доля этих частиц, проходящих через нижний счетчик, тоже прямо пропорциональна A и обратно пропорциональна квадрату расстояния $|D|$. Та-



ким образом, скорость счета совпадений пропорциональна A^2/D^2 . Величина, которая будучи умножена на A^2/D^2 , дает скорость счета совпадений, определяется как интенсивность по направлению на квадратный сантиметр площади в единицу телесного угла в секунду. Например, интенсивность по направлению равна умноженной на 100 скорости счета совпадений в двух счетчиках с размерами $d = 1 \text{ см}$, $l = 1 \text{ см}$, разнесенных на расстояние $D = 10 \text{ см}$, $A = 1 \text{ см} \times 1 \text{ см} = 1 \text{ см}^2$; $D^2 = 100 \text{ см}^2$;

$$A^2/D^2 = \frac{1}{100}.$$

ядра испытывают столкновения после прохождения еще меньших толщин. Следовательно, для первичной космической частицы вероятность достигнуть уровня моря, не испытав столкновения, практически равна нулю. На самых больших высотах в горах еще можно наблюдать небольшое число первичных протонов. Но первичные α -частицы и более тяжелые ядра можно наблюдать только в верхних слоях атмосферы, для их регистрации необходимо проводить эксперименты на шарах-зондах.

Столкновение первичной космической частицы с ядром приводит обычно к разрушению как ядра-мишени, так и самой первичной частицы, если она α -частица или более тяжелое ядро. Среди продуктов расщепления могут быть протоны и нейтроны с достаточно большой энергией, которые в свою очередь взаимодействуют с другими ядрами в атмосфере.

Но это еще не все. Часть энергии первичной частицы расходуется на образование новых, короткоживущих частиц, таких, как π -мезоны, тяжелые мезоны и гипероны.

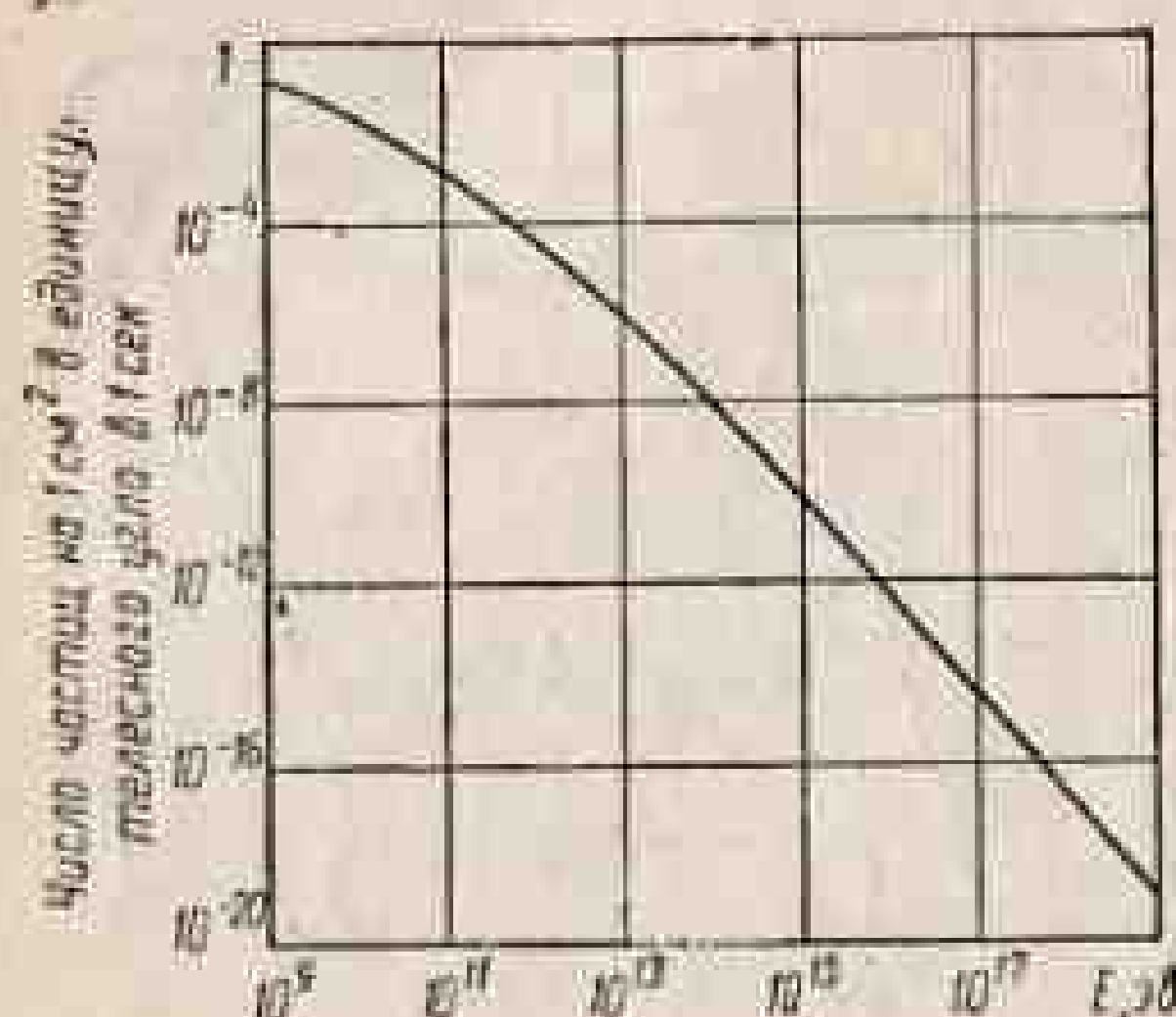


Рис. 74. Энергетический спектр первичных космических лучей. По горизонтальной оси отложена энергия космических частиц в электрон-вольтах. По вертикальной оси отложена интенсивность по направлению (см. рис. 73) для частиц с энергией, большей E , приходящих на границу атмосферы над геомагнитными полюсами (где влияние магнитного поля Земли пренебрежимо мало). Часть кривой от

10^9 до 10^{11} эв получена по измерениям геомагнитного широтного эффекта с помощью шаров-зондов. Некоторые данные в интервале энергий от 10^{11} до 10^{13} эв получены из экспериментов с ядерными эмульсиями на шарах-зондах (энергия частиц оценивалась по характеристикам их ядерных взаимодействий). Все данные, относящиеся к энергиям выше 10^{15} эв, получены в экспериментах с широкими атмосферными ливнями (см. главу 12). Следует обратить внимание на то, что интервал энергий очень велик — от 1 Гэв (10^9 эв) до величин порядка 10 миллиардов Гэв (10^{19} эв). Наибольшая энергия была зарегистрирована в августе 1962 г. и составляла $6 \cdot 10^{19}$ эв (этой энергии достаточно, чтобы поднять груз массой около килограмма на один метр). Обращает на себя внимание и колоссальный интервал интенсивностей — от 0,15 частиц на квадратный сантиметр в единицу телесного угла в секунду при энергии 10^9 эв до величины, приблизительно в 10^{18} раз меньшей, при энергиях 10^{19} эв. Можно показать, что полный поток частиц со всех направлений над горизонтом равен интенсивности по направлению, умноженной на π . Отсюда можно найти, что детектор площадью 2 см^2 регистрирует в верхних слоях атмосферы одну первичную частицу в секунду. Вся атмосфера (площадь около 10^{18} см^2) получает каждую секунду две-три частицы, энергии которых превышают 10^{19} эв.

Если энергия достаточно велика, то образуются также пары протонов и антипротонов, нейтронов и антинейтронов. Среди всех вторичных частиц преобладают π -мезоны (по крайней мере, в области энергий, типичных для большинства первичных космических частиц). π -Мезоны (заряженные и нейтральные) могут вызывать ядерные взаимодействия почти так же эффективно, как протоны

и нейтроны, но нейтральные мезоны практически все распадаются раньше, чем они успевают испытать такое взаимодействие. В противоположность этому заряжен-

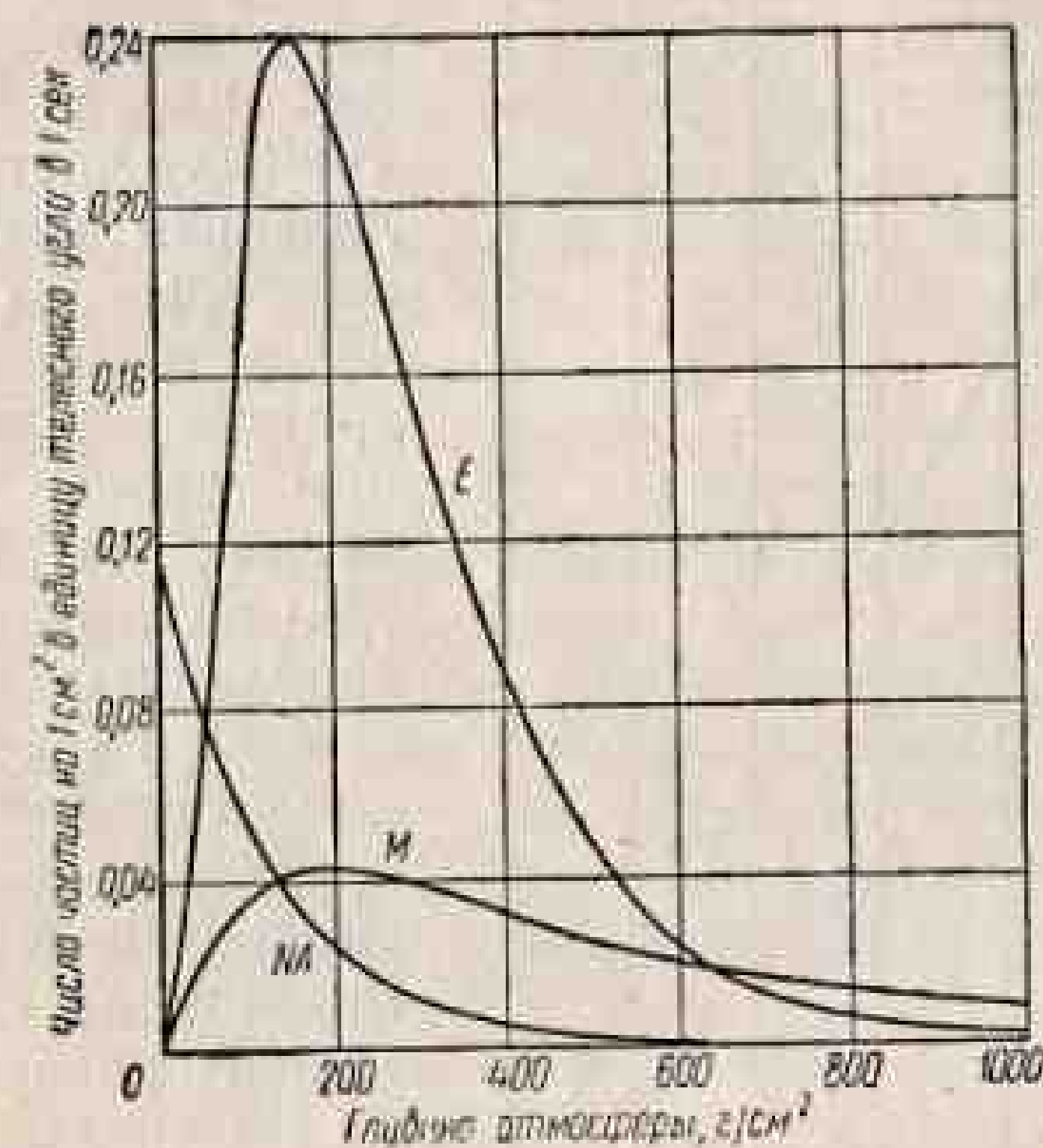


Рис. 75. Зависимость вертикальной интенсивности трех компонент вторичного космического излучения от глубины атмосферы. Кривая NA описывает ядерно-активные частицы с энергией больше 1 Гэв. Кривая E относится к электронам с энергией больше примерно 100 Мэв. Кривая M относится к μ -мезонам с энергией больше примерно 200 Мэв. Связь между глубиной атмосферы и высотой приведена на рис. 76.

ные π -мезоны, имеющие гораздо большее время жизни, часто соударяются с ядрами до своего распада. Кроме того, в соответствии с теорией относительности среднее время жизни движущегося мезона существенно увеличивается по мере того, как его скорость приближается к скорости света. Поэтому для мезона вероятность испытать до распада соударение с ядром возрастает с ростом его энергии.

Таким образом, ядерные взаимодействия, которые наблюдаются на любом заданном уровне в атмосфере, вы-

зывают вторичные протоны, вторичные нейтроны, вторичные π -мезоны, другие менее многочисленные вторичные частицы, а также те первичные частицы, которым удается

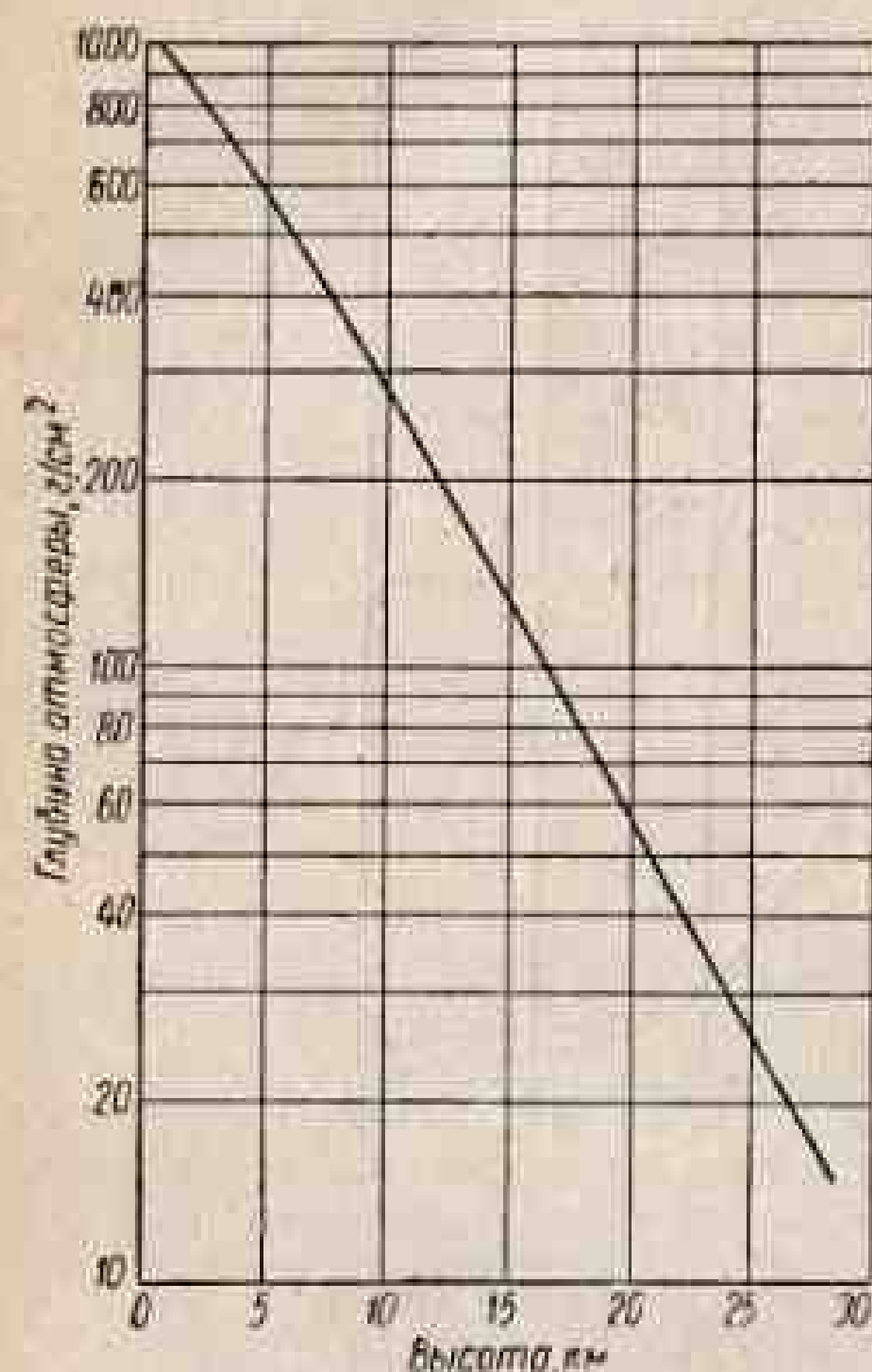


Рис. 76. Зависимость глубины атмосферы от высоты над уровнем моря.

новые фотоны. Таким образом, основная часть электронно-фотонной компоненты космических лучей развивается в результате каскадного процесса, чередующиеся звенья которого — процессы образования пар и тормозного излучения.

Интенсивность электронно-фотонной компоненты, равная нулю на границе атмосферы, достигает максимума на глубине порядка 100 г/см^2 и затем быстро убывает (см. рис. 75). Это убывание объясняется тем, что фотоны, испускаемые при распаде нейтральных π -мезонов в верхних слоях атмосферы, расходуют свою энергию на образование ливней из малоэнергичных электронов и фотонов. А на малых высотах уже нет «подпитки» фотонов большой энергии из-за быстрого уменьшения

числа ядерных взаимодействий по мере углубления в атмосферу.

μ -Мезоны, которые испускаются при распаде заряженных π -мезонов, не взаимодействуют с ядрами и свободно проходят сквозь них. Следовательно, μ -мезоны теряют энергию лишь на ионизацию, а исчезают только путем распада. Ионизационные потери μ -мезонов в атмосфере сравнительно малы, а их среднее время жизни сравнительно велико. Поэтому ничто не мешает μ -мезонам доходить даже до уровня моря. Этим и объясняется тот факт, что число μ -мезонов, достигнув максимального значения в верхних слоях атмосферы, затем медленно убывает с ростом глубины атмосферы (см. рис. 75). Вследствие этого вблизи уровня моря μ -мезоны становятся доминирующей компонентой вторичного космического излучения. А в действительности μ -мезоны проникают в Землю и на очень большие глубины. Они наблюдались даже под 300 метрами скального грунта. Те μ -мезоны, которые распадаются в атмосфере, вносят небольшой вклад в число электронов вторичного космического излучения.

Глава 12

ГИГАНТСКИЕ ЛИВНИ В АТМОСФЕРЕ

Описанная в конце предыдущей главы судьба космической частицы и ее потомства в атмосфере относится к первичным частицам любой энергии. Но, как видно из рис. 74, энергетический спектр первичных космических лучей охватывает огромный энергетический интервал, и поэтому наблюдаемые эффекты от частиц малых и больших энергий существенно отличаются по крайней мере количественно, если не качественно.

Семейство генетически связанных вторичных частиц, порождаемое «средней» первичной частицей (с энергией, скажем 10 Гэв), «вымирает» после нескольких поколений. На любом уровне в толще атмосферы члены этого семейства немногочисленны, а на уровне моря семейство бывает уже представлено лишь одиночной частицей (обычно это μ -мезон) или даже совсем до него не доходит. В отличие от этого первичная частица с энергией, скажем, в миллион раз большей — 10 млн. Гэв — дает начало семейству, у которого гораздо больше шансов выжить. Хотя частицы каждого нового поколения обладают значительно меньшей энергией, чем частицы предыдущего поколения, но «начальный капитал» так велик, что требуется большое число поколений, прежде чем энергия каждой новой частицы снизится до такого уровня, где дальнейшее образование вторичных частиц станет невозможным.

Таким образом, семейство, прежде чем начать «вымирать», разрастается до огромных размеров, и на уровне моря его члены будут исчисляться миллионами. Все эти частицы, возникшие от одной-единственной первичной космической частицы, образуют то, что называется *широким атмосферным ливнем*.

Открытие широких атмосферных ливней

Атмосферные ливни были открыты более или менее случайно, когда в экспериментальных исследованиях космических лучей стали широко применяться установки со счетчиками, включенными на совпадения. В таких установках импульсы от двух или большего числа счетчиков регистрируются как одновременные, если эти импульсы появляются в течение некоторого малого интервала времени — *разрешающего времени установки*. В первых опытах Боте и Кольхёрстера разрешающее время было порядка $0,01 \text{ сек}$. Дальнейшее развитие электроники и совершенствование методики снизили разрешающее время до величин, значительно меньших, чем 1 микросекунда .

Однако, как бы ни было мало разрешающее время, всегда существует возможность того, что совершенно не связанные друг с другом частицы пройдут в течение этого времени через счетчики и вызовут совпадение.

Начав экспериментировать со схемами совпадений, физики обычно для проверки работы установки располагали счетчики не по одной линии, чаще всего сдвигая их в горизонтальной плоскости. При этом истинных совпадений, вызванных прохождением одиночной частицы через все счетчики, вообще быть не могло, а число совпадений от ливней, образованных вблизи установки, в отсутствие тяжелого вещества над счетчиками было пренебрежимо мало. Некоторые экспериментаторы, возможно, замечали, что число отсчетов, регистрируемых установкой в таких условиях, было слишком велико, чтобы объяснить его только случайными совпадениями. Во всяком случае, я обратил на это внимание, а также и на то, что число таких необъясненных совпадений растет по мере подъема над уровнем моря. Результат этих наблюдений я сформулировал следующим образом (да простится мне цитирование собственных работ!): «Кажется, что на установку одновременно падают очень большие группы частиц». Это было в 1934 г.

Возникла гипотеза о том, что эти «очень большие группы частиц» — результат каскадных процессов в земной атмосфере, точно так же, как обычные ливни — результат каскадных процессов в свинце или других плотных веществах.

В 1938 г. французский физик Пьер Оже и его сотрудники предприняли систематические исследования, в которых было вне всяких сомнений установлено существование атмосферных ливней и получены некоторые предварительные данные об их свойствах. Эти первые эксперименты были выполнены с относительно простой аппаратурой, состоявшей из нескольких Г—М-счетчиков и схемы совпадений. В одном из своих экспериментов Оже

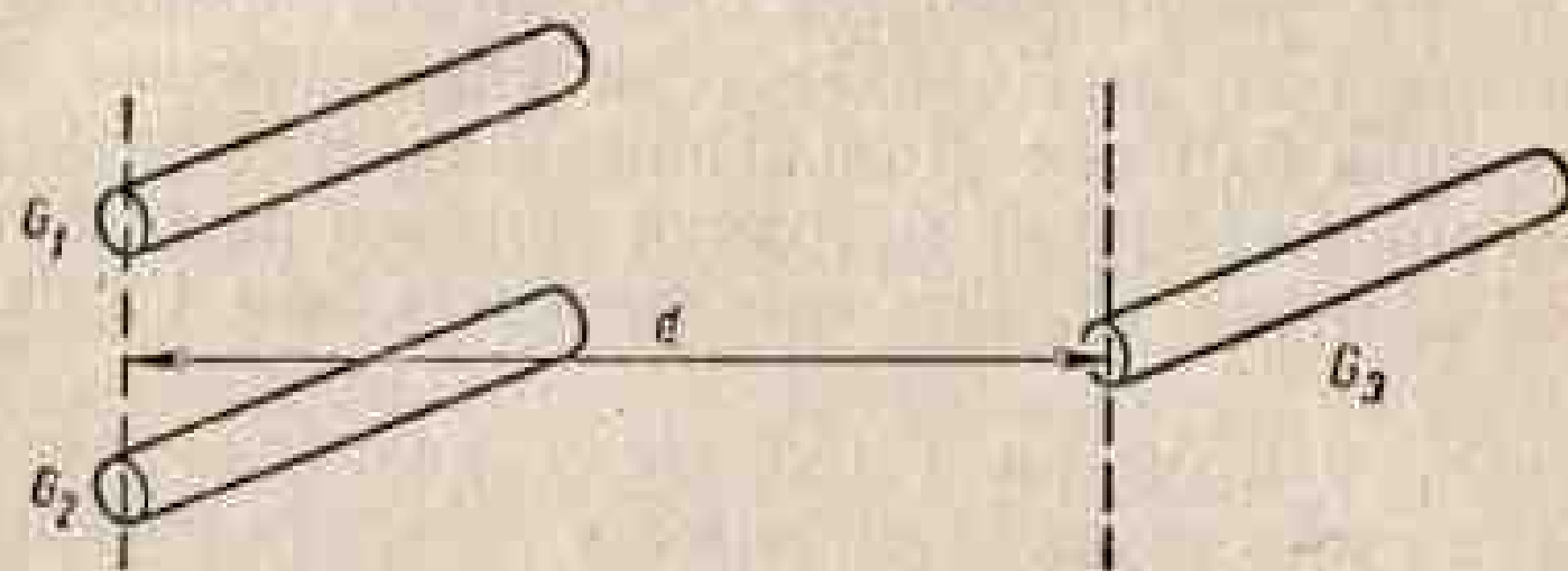


Рис. 77. Схема установки из счетчиков, с помощью которой Оже и его сотрудники в 1938 г. изучали широкие атмосферные ливни. Счетчики G_1 и G_2 располагались один над другим. Расстояние между их осями составляло 22 см. Третий счетчик G_3 отодвигался в горизонтальном направлении на разные расстояния d , менявшиеся от 15 см до 75 м.

и его сотрудники использовали установку из трех счетчиков, изображенную на рис. 77. По мере того как экспериментаторы отодвигали счетчик G_3 все дальше и дальше от счетчиков G_1 и G_2 , скорость счета совпадений постепенно падала (рис. 78). При максимальном расстоянии между счетчиками (75 м) аппаратура все еще регистрировала совпадения, свидетельствующие о том, что атмосферные ливни покрывают довольно большие площади.

Вначале считалось, что широкие атмосферные ливни образуются в верхней части атмосферы электронами или фотонами больших энергий и что единственные процессы, определяющие развитие ливней, — это радиационные потери электронов и образование пар фотонами. Вскоре, однако, список ливневых частиц пополнился мезонами. В то же время становилось все более очевидным, что первичные космические лучи — это не электроны и фотоны, а главным образом протоны и более тяжелые ядра.

Стало ясно, что широкий атмосферный ливень — не простой электронно-фотонный каскад, а сложное явление, в котором ядерные взаимодействия и спонтанные распады частиц играют также важную роль.

Общая картина широкого атмосферного ливня, следовательно, такова. Первичная частица очень большой энергии (протон или более тяжелое ядро), вторгаясь в

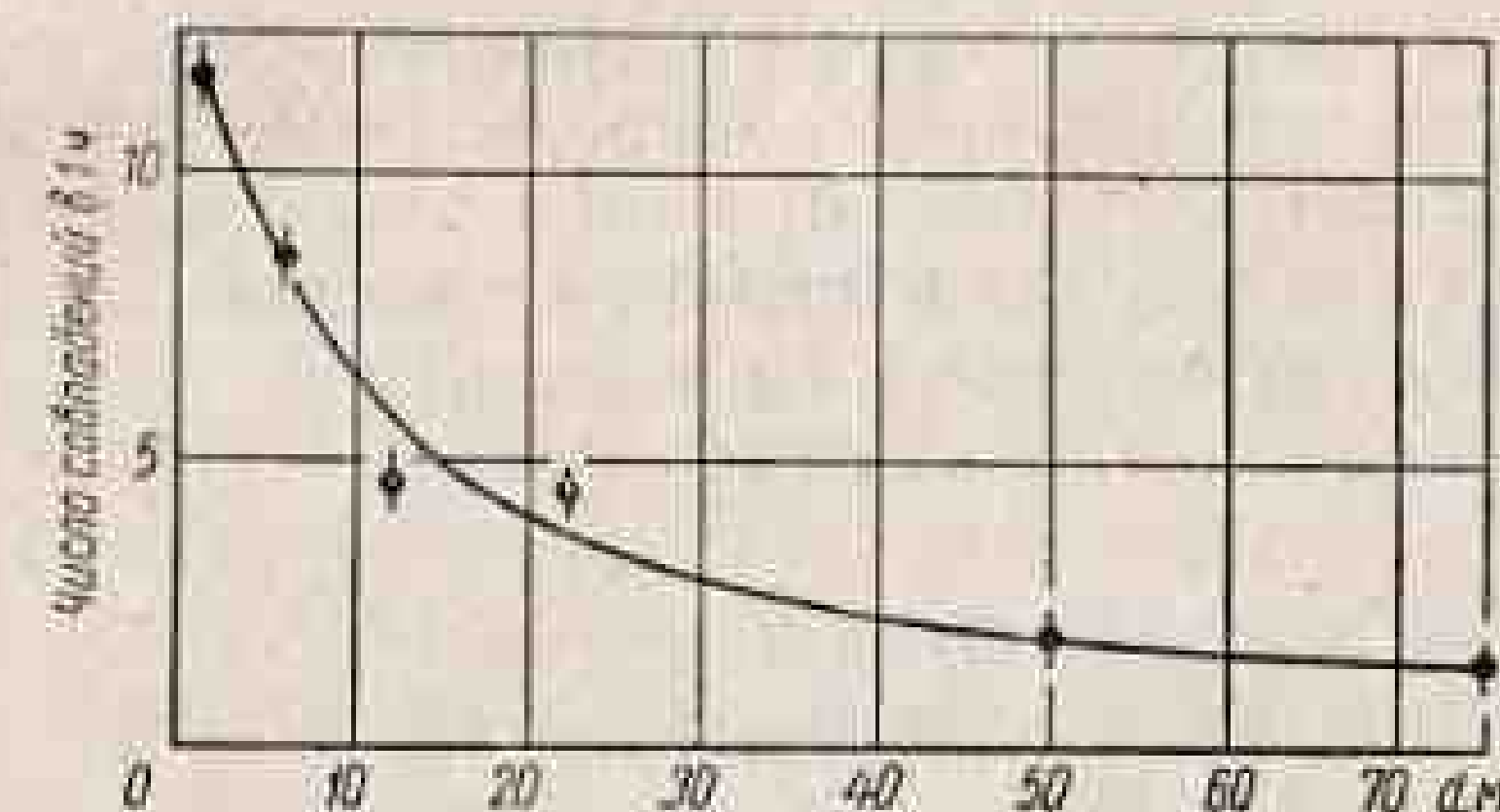


Рис. 78. Данные по широким атмосферным ливням, полученные с установкой, схематически изображенной на рис. 77. По горизонтальной оси отложено расстояние d между счетчиком G_3 и парой счетчиков G_1 и G_2 ; по вертикальной оси — число совпадений в час. (Из статьи в *Le Journal de Physique et Le Radium*. Том 10, 1939, стр. 39.)

атмосферу, вызывает цепь ядерных взаимодействий. Частицы, рождаемые в этих взаимодействиях, — это в основном высокоэнергичные протоны, нейтроны и заряженные π -мезоны, которые в свою очередь вызывают новые ядерные взаимодействия (см. рис. 72). Эти частицы образуют узкий пучок, который называется *стволом* ливня. На уровне моря диаметр ствола не превышает нескольких метров.

В каждом ядерном взаимодействии определенная доля энергии расходуется на образование нейтральных мезонов, которые немедленно распадаются на фотоны. Эти высокоэнергичные фотоны, которые появляются в стволе ливня, дают начало обычным каскадным ливням, в результате чего возникает большое число позитронов и электронов. Кроме того, некоторые заряженные π -мезоны вместо соударения с ядрами испытывают рас-

пад на μ -мезоны. Таким образом, μ -мезоны также возникают в стволе ливня.

В результате многократного рассеяния в атмосфере ливневые частицы отклоняются в сторону от ствола. Такое рассеяние представляет собою постепенное накопление большого числа отклонений на малые углы, которые испытывает заряженная частица, проходя в электрическом поле атомных ядер. За время, в течение которого ливень проходит некоторое расстояние в атмосфере, составляющие его частицы распределяются на большую площадь. Плотность частиц наибольшая в центре — в точке, куда попала бы первичная частица, если бы она не испытала соударений, — и постепенно спадает по мере увеличения расстояния от этой точки.

Экспериментальное изучение широких атмосферных ливней

С середины 1940-х годов изучение широких атмосферных ливней стало составлять существенную часть всех исследований по космическим лучам. Одной из побудительных причин к этому было, в частности, следующее. Широкие атмосферные ливни образуются теми редкими первичными частицами, энергия которых в огромное число раз превышает энергию, приобретаемую частицами в наиболее мощных ускорителях. Минимальная энергия, необходимая для образования ливня, наблюдаемого на уровне моря, составляет около 10^{14} эв. Энергия частиц, ответственных за образование самых больших зарегистрированных ливней, достигает $6 \cdot 10^{19}$ эв. Это действительно чрезвычайно большая энергия для индивидуальной элементарной частицы: $6 \cdot 10^{19}$ эв равно примерно 10 джоулям, т. е. энергии, достаточной для подъема массы в 1 кг на высоту около 1 м.

Физиков, конечно, очень интересуют свойства частиц со столь экспериментальными энергиями. Трудно ожидать в обозримом будущем получения таких частиц в лабораторных условиях. Существующие ускорители могут разогнать частицы до максимальной энергии в 35 Гэв ($3,5 \cdot 10^{10}$ эв), а самые смелые проекты будущих машин нацелены на достижение энергии порядка 1000 Гэв (10^{12} эв). Следовательно, физики должны обратиться к космическим лучам, как к единственному источнику ча-

стиц очень больших энергий. Перед астрофизиками само существование таких частиц ставит чрезвычайно сложные и увлекательные проблемы. Действительно, какие необычные процессы ускоряют частицы до таких громадных энергий? В надежде найти ключи к решению этих проблем ученые хотели бы выяснить, приходят ли самые энергичные частицы отовсюду или только из определенных участков неба, как распределены они по энергиям (например, каково число частиц с энергией между 10^{17} и 10^{18} эв по сравнению с числом частиц с энергией между 10^{18} и 10^{19} эв).

Изучение спектра космических частиц в области очень больших энергий невозможно иным путем, кроме наблюдения широких атмосферных ливней. Физики не достигли бы своей цели, поместив, например, детектор площадью в 1 кв. метр на искусственном спутнике Земли, орбита которого проходит выше атмосферы. Такой детектор регистрировал бы за целый год всего лишь несколько частиц с энергией, превышающей 10^{16} эв, а для регистрации одной частицы с энергией больше чем 10^{19} эв нужно было бы в среднем около одного миллиона лет.

К счастью, существование широких атмосферных ливней делает задачу выполнимой. Если число частиц в ливне достаточно велико (т. е. достаточно велика первичная энергия), то плотность частиц на расстоянии сотен метров от ствола такова, что может быть измерена соответствующими детекторами. Можно поэтому наблюдать все широкие атмосферные ливни, приходящие на большую площадь, разместив на этой площади сравнительно небольшое количество детекторов. Таким образом, малое количество высокоэнергичных частиц компенсируется очень большой площадью детектирования.

В последние 15 лет эксперименты по широким атмосферным ливням интенсивно проводились научными учреждениями по всему миру. Далеко не полный список этих учреждений включает Физический институт им. П. Н. Лебедева и Московский Государственный университет (СССР), Институт ядерных исследований в Токио (Япония), Институт Тата фундаментальных исследований в Бомбее (Индия), Исследовательский центр по атомной энергии в Харуэлле (Англия), Университет в Ла-Пасе (Боливия), Корнелльский университет и Массачусетский технологический институт (США).

Аппаратура для детектирования и исследования широких атмосферных ливней все больше и больше усложняется и в настоящее время достигла такого уровня, что позволяет получать обширную и точную информацию о каждом ливне, попадающем на установку. В качестве характерного примера на рис. 79 приведена экспериментальная установка, разработанная группой по изучению космических лучей в МТИ.

К тому времени, когда начала осуществляться программа исследований в МТИ, физиками уже была накоплена достаточно богатая информация о пространственном распределении частиц ливня относительно его ствола. Никто, однако, не измерял продольную протяженность ливня, т. е. никто не получил «моментальный снимок» распределения ливневых частиц вдоль направления распространения ливня. Поскольку частицы каждого поколения движутся со скоростью, близкой к скорости света, отклоняясь лишь очень незначительно от направления движения первичной частицы, можно ожидать, что продольная протяженность ливня будет совсем небольшой.

Дж. Кларк из МТИ и Р. Басси, приехавший работать в МТИ из Италии, подтвердили это. Они установили, что все ливневые частицы проходят через любой из детекторов за время порядка нескольких миллиардных (10^{-9}) долей секунды. А так как скорость света равна $3 \cdot 10^8$ метров в секунду, то это означает, что продольная протяженность ливня составляет величину порядка метра или около того.

Другими словами, в каждый заданный момент времени все частицы ливня группируются в пределах плоского диска толщиной около одного метра. Можно представить себе наглядную картину распространения ливня как движение диска через атмосферу со скоростью, близкой к скорости света, причем по мере движения частицы из ствола ливня непрерывно пополняются и постепенно за счет рассеяния расходятся все шире и шире.

Результаты работы Кларка и Басси подсказывают удобный метод определения направления распространения ливня. Действительно, если ливень падает на Землю вертикально, то все детекторы срабатывают в одно и то же время. Если же ливень приходит в наклонном направлении, то он попадет на одни детекторы чуть раньше,

на другие — чуть позже. А так как горизонтальные развертки всех осциллографов включаются одновременно, относительные положения выбросов на осциллографических картинках будут мерой интервалов времени между импульсами от соответствующих детекторов (рис. 79

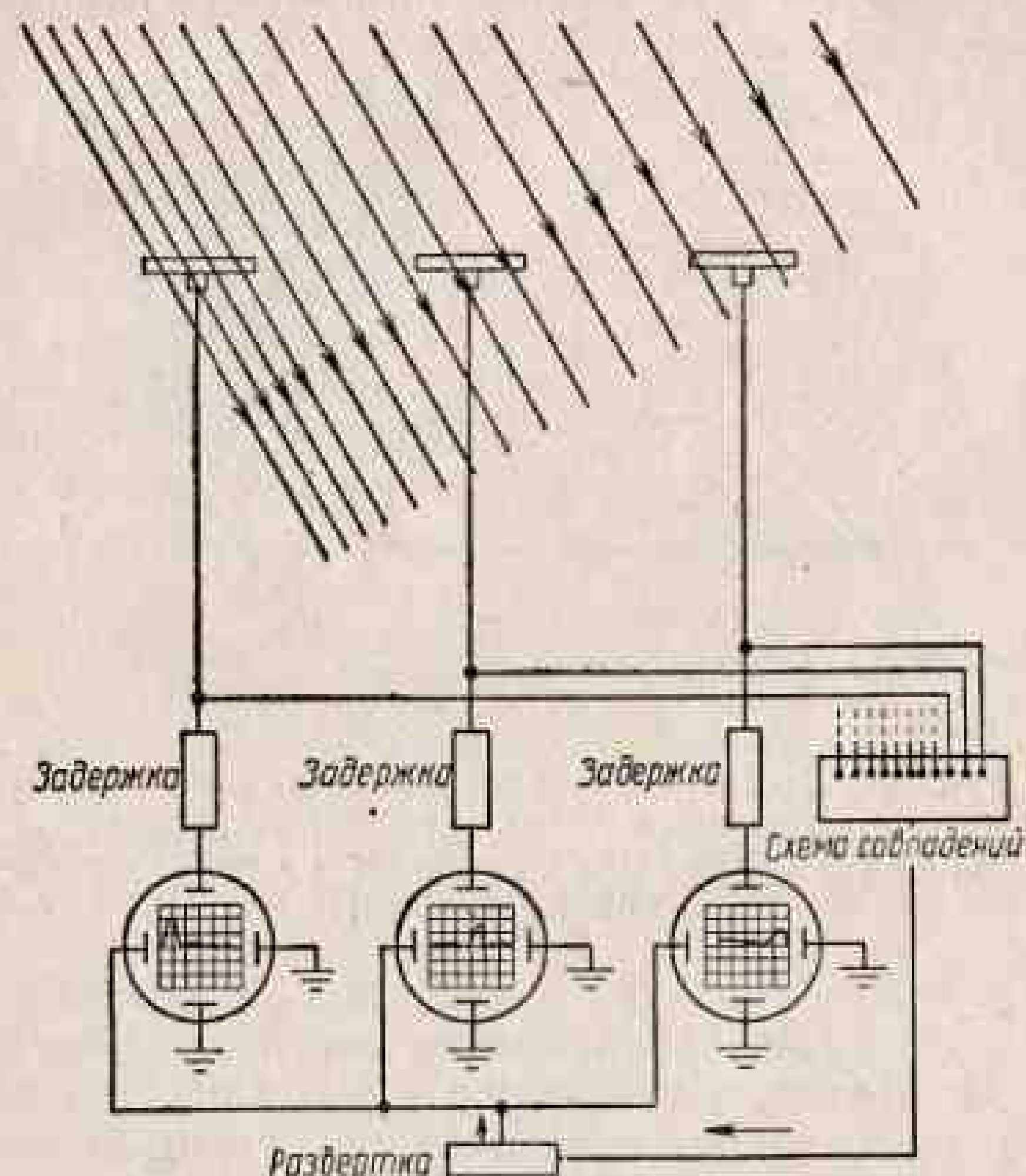


Рис. 79. Схема установки группы по изучению космических лучей в МТИ для исследования широких атмосферных ливней. Диски из сцинтиллятора каждый площадью 1 кв. метр и толщиной около 10 см (показаны прямоугольниками наверху установки) при прохождении через них заряженной частицы испускают вспышку света. Эта вспышка света фотоумножителем преобразуется в электрический импульс; амплитуда импульса пропорциональна яркости вспышки. Импульсы затем передаются на катодные осциллографы (изображенные кружками) через схемы задержки, уравнивающие электрическую длину каналов. Горизонтальные развертки всех осциллографов запускаются одновременно в случае, если схема совпадений регистрирует три или более одновременных импульсов. Амплитуда вертикальных выбросов на экранах осциллографов пропорциональна числу частиц, попавших в соответствующий детектор. Положение этих «пиков» на горизонтальной оси указывает время прихода частиц в данный сцинтиллятор.

и 80). Зная время попадания ливня на каждый детектор, легко вычислить направление, в котором он двигался. Это направление совпадает с направлением движения первичной частицы, вызвавшей ливень.

Далее, поскольку ливневые частицы приходят почти одновременно, вызванные ими импульсы складываются

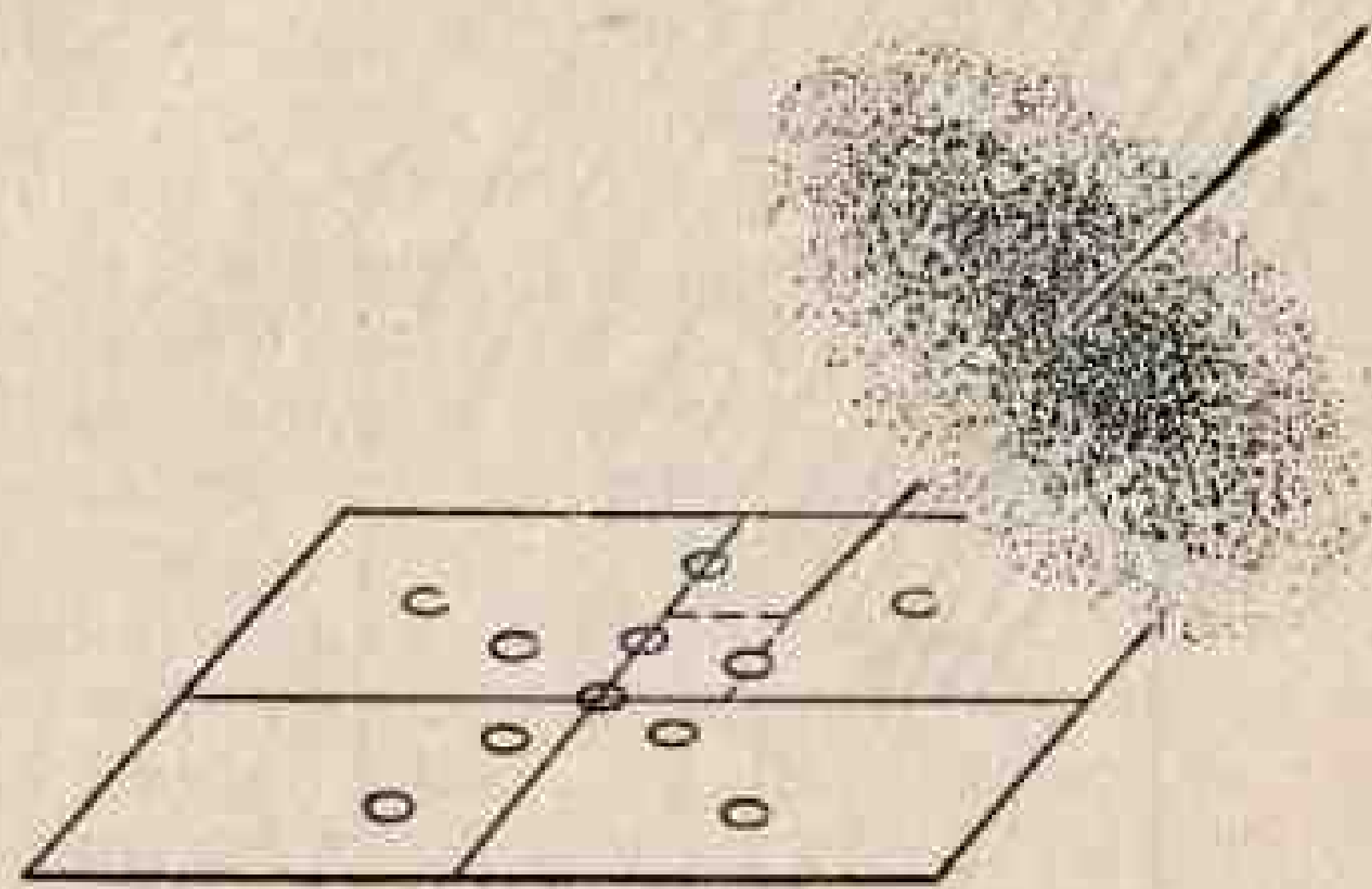


Рис. 80. Диск, образованный частицами широкого атмосферного ливня, приближается к детекторам (изображенным кружками на горизонтальной плоскости).

в один общий импульс, величина которого служит мерой плотности ливневых частиц в соответствующем детекторе. Эта информация позволяет определить положение центра ливня (т. е. точки, где проходит ось ливня на уровне наблюдения) и полное число частиц в нем. При этом используется методика последовательных приближений. Сначала на основании экспериментальных цифр делается предварительная, грубая оценка положения центра ливня. Затем на график наносится зависимость числа частиц, зарегистрированного каждым детектором, от расстояния от этого детектора до предполагаемого центра.

Поскольку плотность ливневых частиц спадает определенным образом с ростом расстояния от центра, точки на графике должны лечь на плавную кривую. Если же это не так, то ищут новое, лучшее положение центра ливня, используя наблюдаемые отклонения точек от

плавной кривой для определения нужного смещения. Такая операция повторяется несколько раз.

Когда определено положение центра ливня и получена новая кривая зависимости плотности частиц как функция расстояния от центра, можно вычислить и полное число частиц в ливне. В действительности вся эта процедура последовательных приближений выполняется автоматически электронной вычислительной машиной, так что полный анализ ливня занимает лишь доли минуты.

Описанный здесь метод был применен в ряде экспериментов, выполненных на разных высотах, разных географических широтах и с разными площадями детекторов. Например, в 1954—1957 гг. вблизи Кембриджа (штат Массачусетс) на уровне моря проводился эксперимент с одиннадцатью детекторами, размещенными в круге диаметром 460 метров (рис. 81).

Самый большой ливень, зарегистрированный в этом эксперименте, содержал около 2,5 миллиарда частиц. Первичная частица, вызвавшая ливень, шла под углом 11° к вертикали и обладала энергией $5 \cdot 10^{16}$ эв. Ствол наибольшего ливня прошел вне круга с детекторами примерно в точке, отмеченной крестиком на рис. 81.

На этом же рисунке цифрами отмечено число частиц, прошедших в этом конкретном ливне через каждый детектор.

На рис. 82 показано число ливневых частиц, прошедших через каждый детектор, как функция расстояния от ствола ливня.

Одна из главных задач описанного эксперимента состояла в том, чтобы выяснить, из каких областей неба приходят космические частицы очень большой энергии. Точками на рис. 83 на карте неба отмечено направление прихода частиц, вызвавших 652 самых больших зарегистрированных ливня. Из-за поглощения в атмосфере

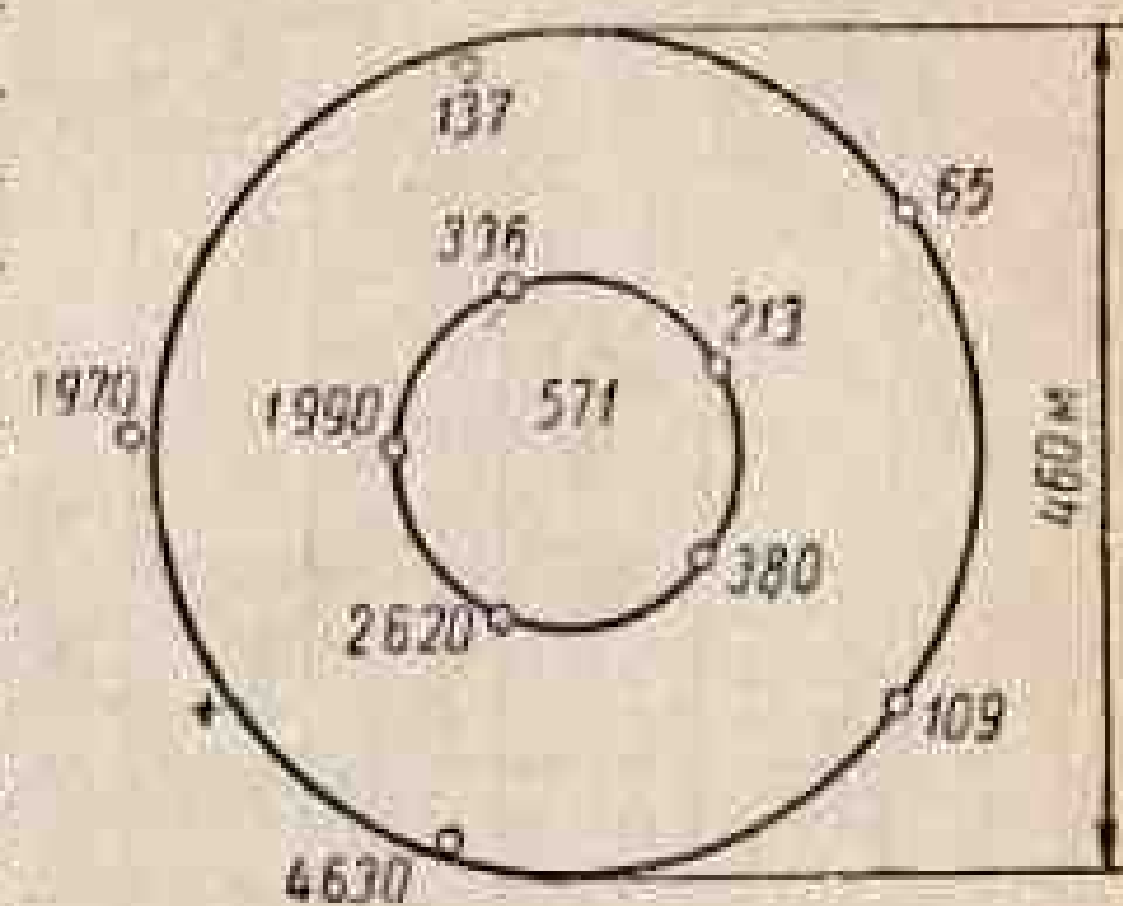


Рис. 81. Схема расположения детекторов, использованная группой МТИ в экспериментах на уровне моря.

в наиболее благоприятных для регистрации условиях оказываются ливни, приходящие по направлениям, близким к вертикальному. Этим и объясняется сгущение точек на рис. 83 вблизи линии постоянного склонения, равного 42° , поскольку широта Кембриджа 42° . Кроме этого тривиального эффекта, в данных нет никаких указаний на существование какого-либо преимущественного направления прихода первичных частиц.

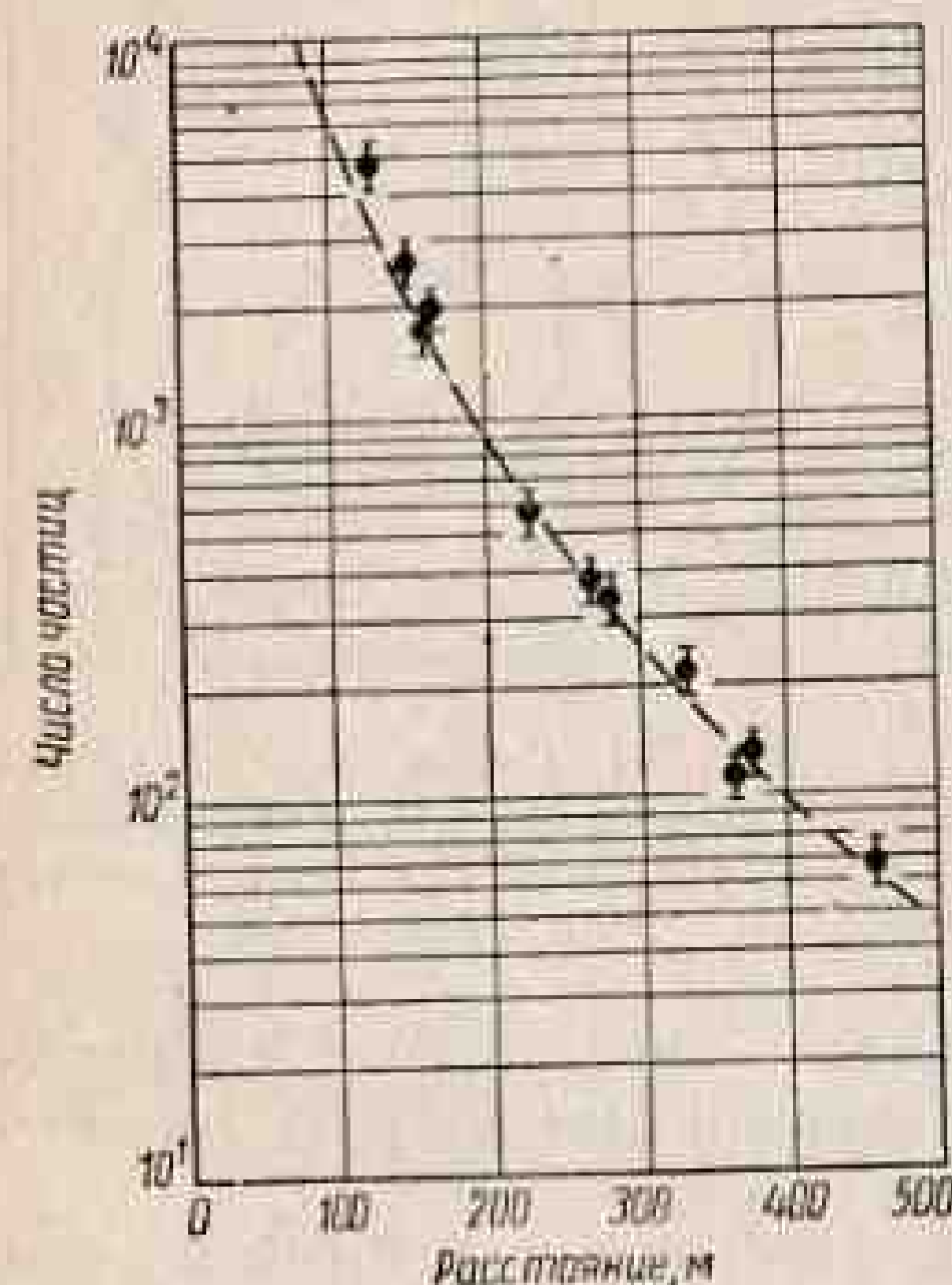


Рис. 82. Число ливневых частиц (в логарифмическом масштабе), прошедших через каждый детектор, показанный на рис. 81, как функция расстояния детектора от ствола ливня (см. крестик на рис. 81).

Другой целью эксперимента было определение относительной частоты ливней с различным полным числом частиц. Экспериментальные данные, приведенные на рис. 84, показывают, что относительная частота ливней быстро и притом совершенно определенным образом спадает с ростом числа частиц в ливне. Нет и намека на то, что размеры ливня могут быть как-то ограничены. Путем дальнейшего увеличения площади установки или времени наблюдения можно будет регистрировать ливни все с большим и большим числом частиц.

Такое предположение появилось после экспериментов, проведенных Дж. Линслеем и Л. Скарси в МТИ в 1959—1960 гг. на высоте 1700 метров, вблизи Альбукерка в штате Нью-Мексико. Девятнадцать детекторов, каждый из четырех сцинтилляторов, размещались внутри шестиугольника диаметром 1,8 километра так, как показано на рис. 85. За шесть месяцев работы было зарегистрировано около 10 000 ливней с числом частиц больше 10 миллионов. Среди них оказалось два ливня

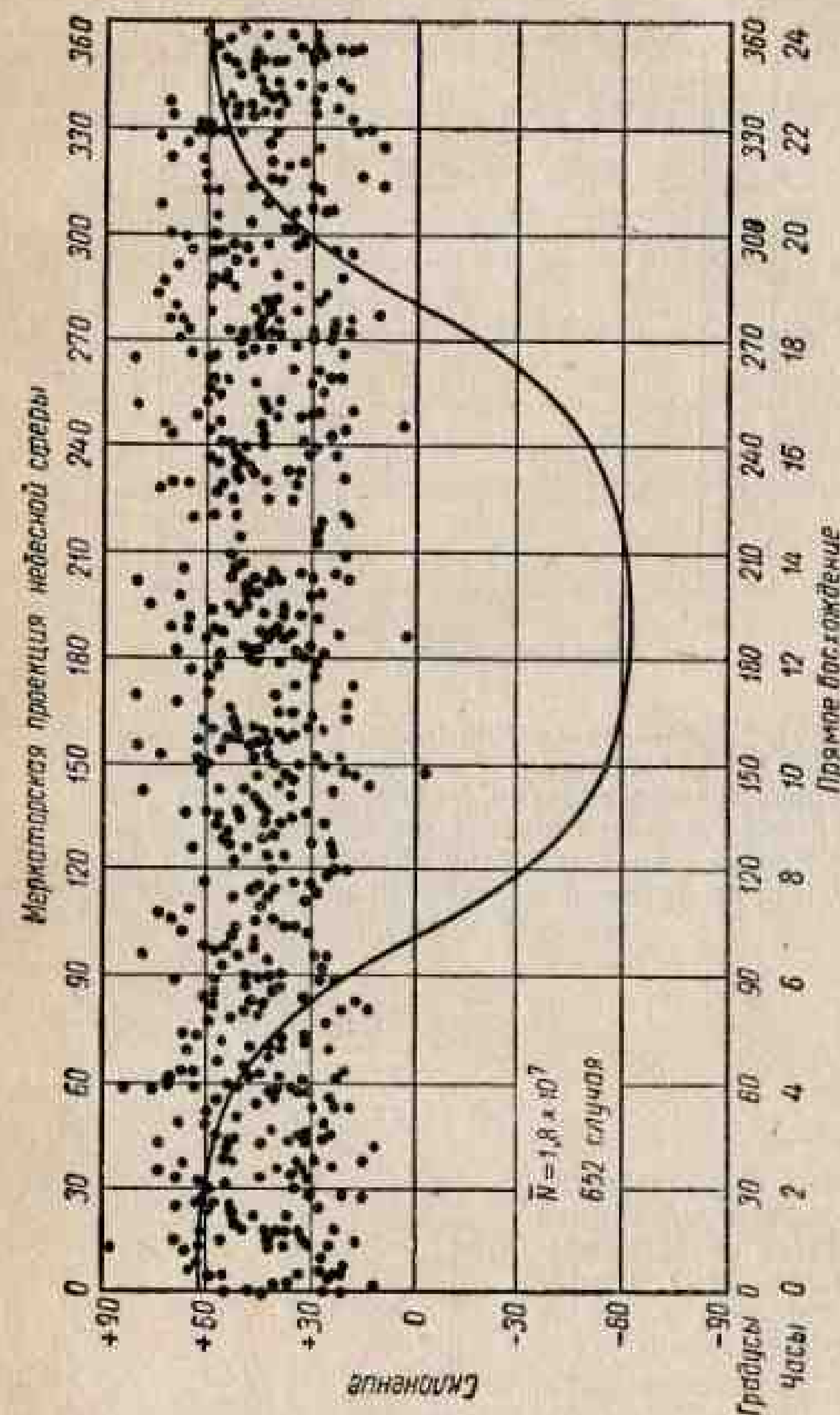


Рис. 83. Распределение направлений прихода 652 самых больших ливней, зарегистрированных установкой, показанной на рис. 81. Точками на Меркаторской проекции неба отмечено направление прихода ливней.

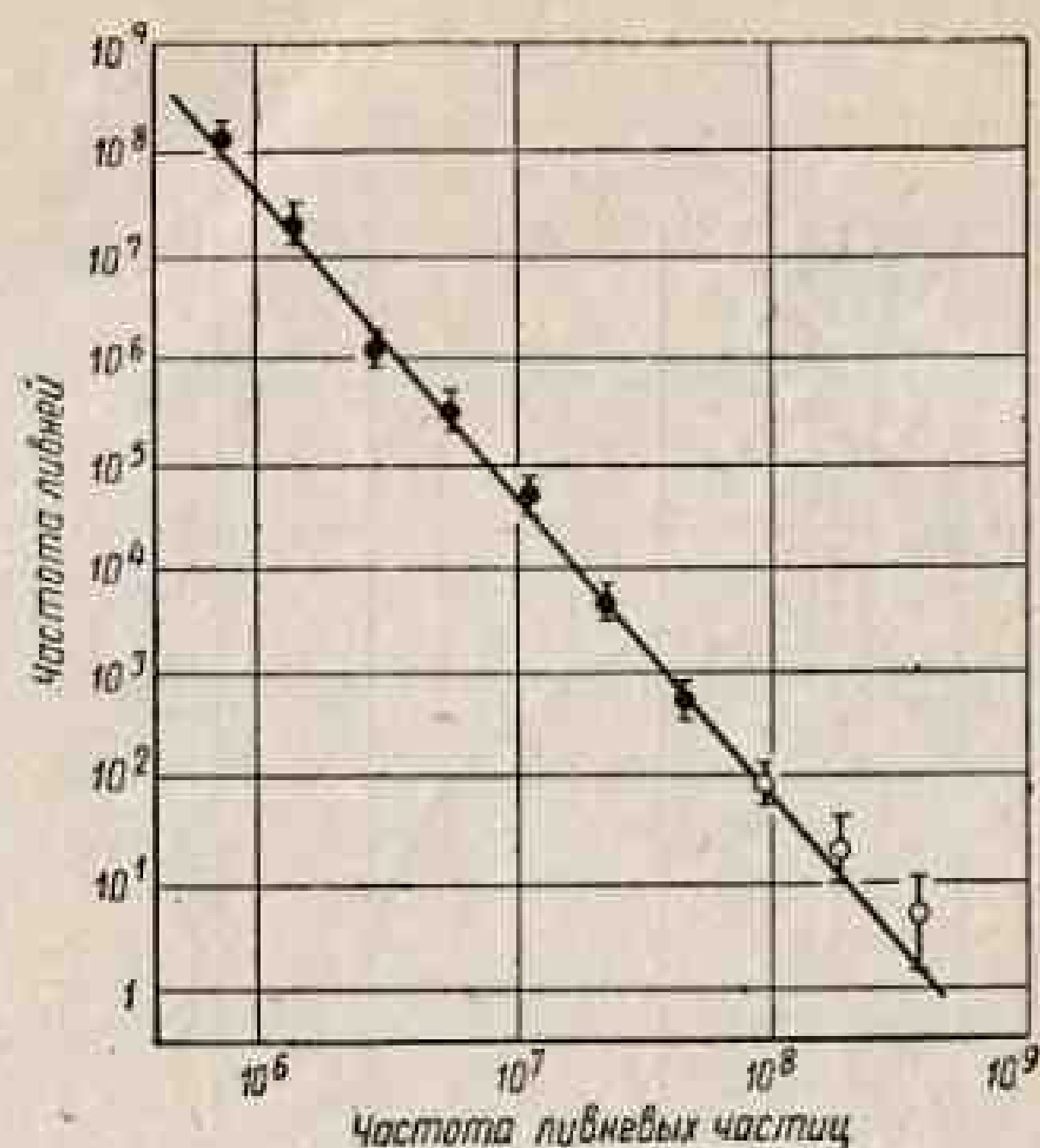
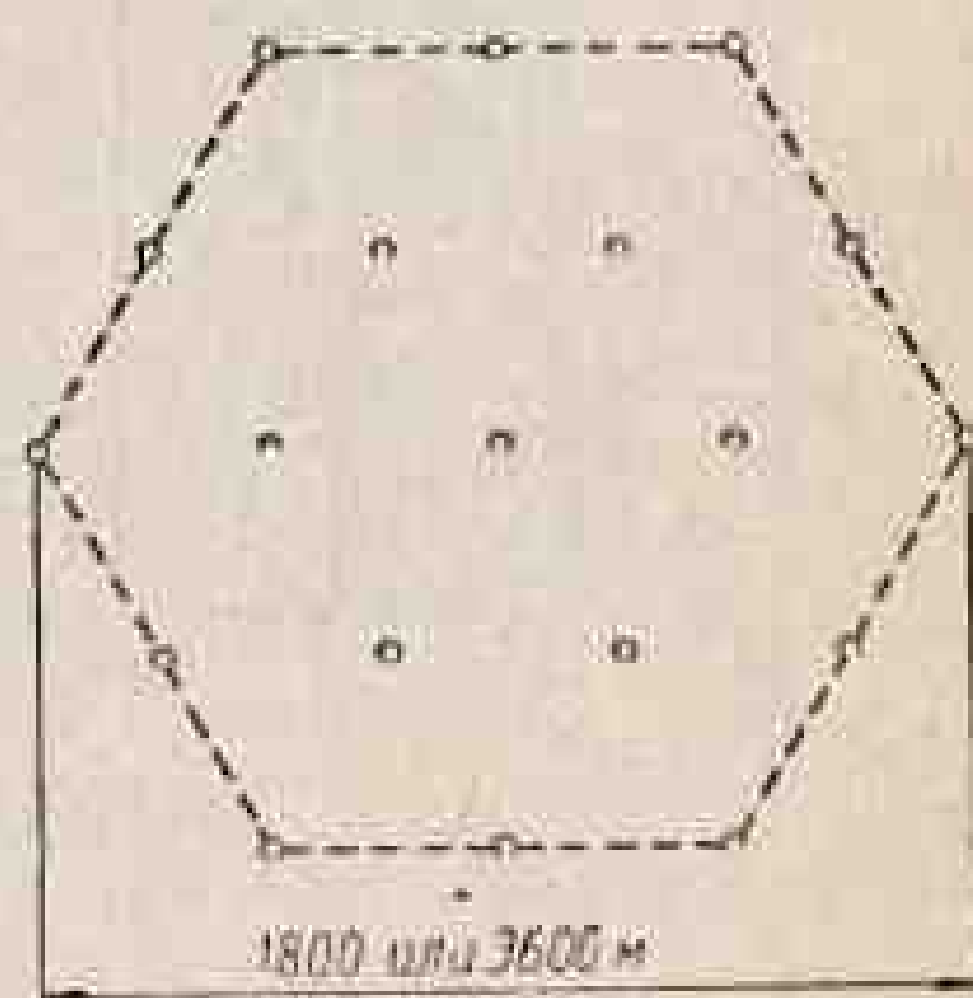


Рис. 84. Частота появления широких атмосферных ливней (в произвольных единицах) в зависимости от числа ливневых частиц. Видно, что частота ливней быстро спадает с ростом числа частиц в ливне (10^2 ливней с числом частиц приблизительно $1,7 \times 10^6$ приходится на каждые 10 ливней с числом частиц 2×10^6).

Рис. 85. Схема расположения детекторов, использованная группой МТИ в экспериментах на высоте 1700 метров вблизи Альбукерка в штате Нью-Мексико.



с числом частиц около 10 миллиардов каждый. Затем Линслей и Скарси увеличили площадь установки, разместив ее в шестиугольнике диаметром 3,6 километра. После этого в первые же месяцы работы был зарегистрирован ливень, содержащий около 30 миллиардов частиц, что соответствует первичной энергии около $6 \cdot 10^{19}$ эв*.

* Данные, полученные как в описанных здесь экспериментах, так и в аналогичных им, были использованы для построения энергетического спектра космических лучей на рис. 74.

Глава 13

РАДИАЦИОННЫЙ ПОЯС ЗЕМЛИ

4 октября 1957 г., когда советские ученые впервые в мире вывели искусственный спутник на орбиту вокруг Земли, непосредственное исследование мирового пространства стало реальностью. И физики — специалисты по космическим лучам — не замедлили ухватиться за открывшиеся возможности. 3 ноября 1957 г. в СССР был запущен Спутник II, а за ним 1 февраля и 26 марта последовали американские спутники Эксплорер I и Эксплорер III. На всех трех спутниках были помещены Г—М-счетчики, которые должны были дать предварительные сведения об интенсивности космических лучей на очень больших высотах. Самым поразительным результатом этих наблюдений было открытие большого радиационного пояса, окружающего Землю.

Следует ли частицы в этом поясе называть космическими лучами или нет — это лишь вопрос определения. Во всяком случае радиационный пояс — настолько важная характеристика мирового пространства в окрестностях Земли и его существование настолько тесно связано с собственно космическими лучами, что необходимо хотя бы кратко рассказать о нем в этой книге.

Открытие радиационного пояса

Открытие радиационного пояса Земли уходит своими корнями в научные исследования начала двадцатого века. При обсуждении влияния магнитного поля Земли на космические лучи уже упоминалась теоретическая работа Штермера о траекториях заряженных частиц в поле магнитного диполя. Из вычислений Штермера, в частности, следовало, что заряженные частицы могут быть «захвачены» таким полем на неограниченно длительное время

(это частицы, движущиеся по замкнутым траекториям, о которых упоминалось в главе 5). Следовательно, если частица попадет в поле с соответствующим импульсом и в соответствующем направлении, то она все время будет двигаться в ограниченной области окружающего диполь пространства (рис. 86). Траектории захваченных частиц в общем случае очень сложны, и предсказать их теоре-

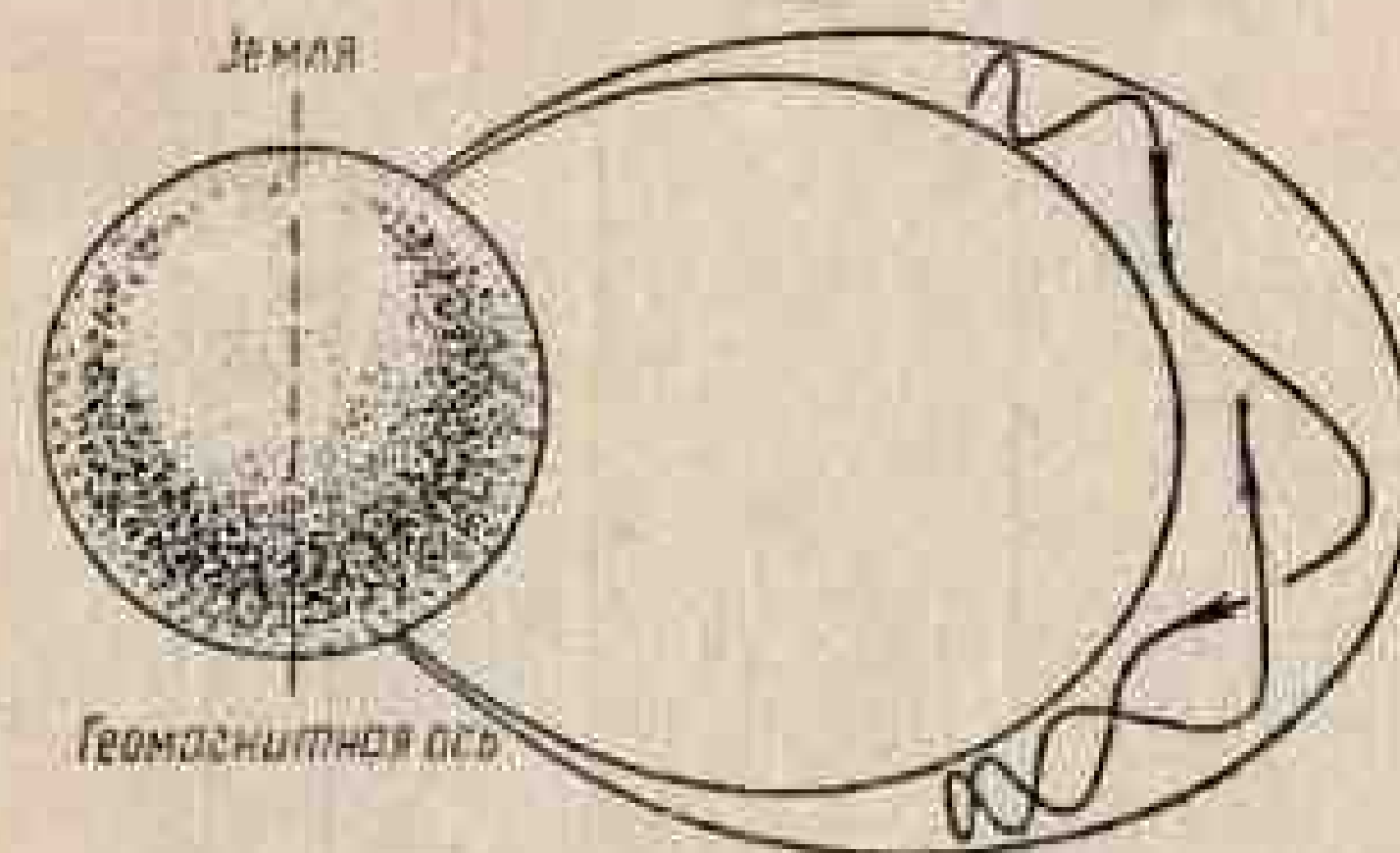


Рис. 86. Траектория заряженной частицы, захваченной полем магнитного диполя, согласно расчетам Штермера (1913 г.).

тически чрезвычайно трудно. Задача, однако, существенно упрощается в случае малых импульсов частиц.

Для того чтобы понять характер этих траекторий, рассмотрим сначала случай однородного магнитного поля. Вспомним (см. главу 5), что заряженная частица, движущаяся под прямым углом к магнитным силовым линиям, описывает окружность, радиус которой уменьшается при уменьшении импульса частицы или возрастании напряженности поля (см. рис. 23). Если же частица попадает в поле под каким-нибудь другим углом к силовым линиям, она движется по спирали вокруг «силовой трубки», т. е. вращается по окружности, лежащей в плоскости, перпендикулярной силовым линиям, тогда как сама окружность движется с постоянной скоростью вдоль силовой линии (рис. 87).

В дипольном магнитном поле, таком, как магнитное поле Земли, силовые линии искривлены, а напряженность поля меняется от точки к точке. Тем не менее в достаточно малом объеме — объеме, размеры которого малы по сравнению с расстоянием от него до центра диполя, —

поле будет *приблизительно* постоянным. Рассмотрим теперь частицу со столь малым импульсом, что магнитное поле вынуждает ее совершить много оборотов в пределах выбранного малого объема. В таком случае движение частицы в этом ограниченном объеме будет очень близко к движению в однородном магнитном поле. Это означает, что в первом приближении траектории заряженных

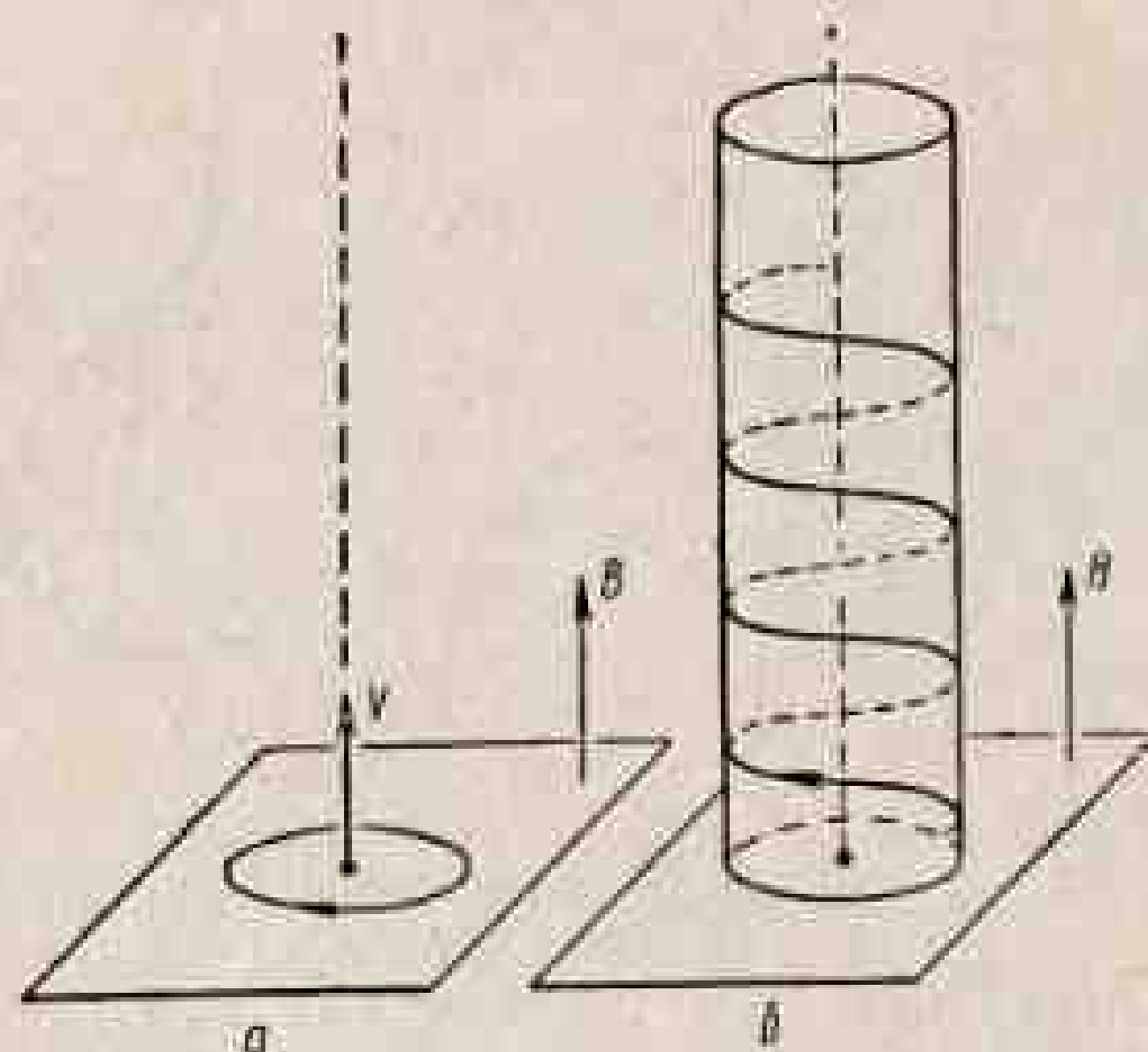


Рис. 87. Движение частицы в однородном магнитном поле B : a — частица движется по окружности в плоскости, перпендикулярной B , в то время как эта плоскость движется с постоянной скоростью v в направлении, совпадающем с B ; b — траектория — спираль, навитая на цилиндрическую силовую трубку.

частиц представляют собой спирали, навитые на магнитные силовые линии.

Выход за пределы первого приближения оказался очень сложной и запутанной проблемой, которая была решена шведским астрофизиком Х. Альфвенем в 1942 г. Его вычисления привели к следующей картине поведения заряженных частиц в дипольном магнитном поле (рис. 88). Каждая заряженная частица движется по окружности, центр которой (*направляющий центр*) колеблется взад и вперед по широте между двумя симметрично расположенными зеркальными точками (M и M') вдоль искривленной *направляющей линии*. Направ-

ляющая линия обладает такой же конфигурацией, как и силовая линия, и медленно вращается по азимуту (т. е. вокруг оси диполя) с востока на запад, если частица заряжена положительно, или с запада на восток, если частица заряжена отрицательно. Когда направляющий центр колеблется вдоль направляющей линии, он проходит через области с различной напряженностью магнитного поля, при этом радиус окружно-

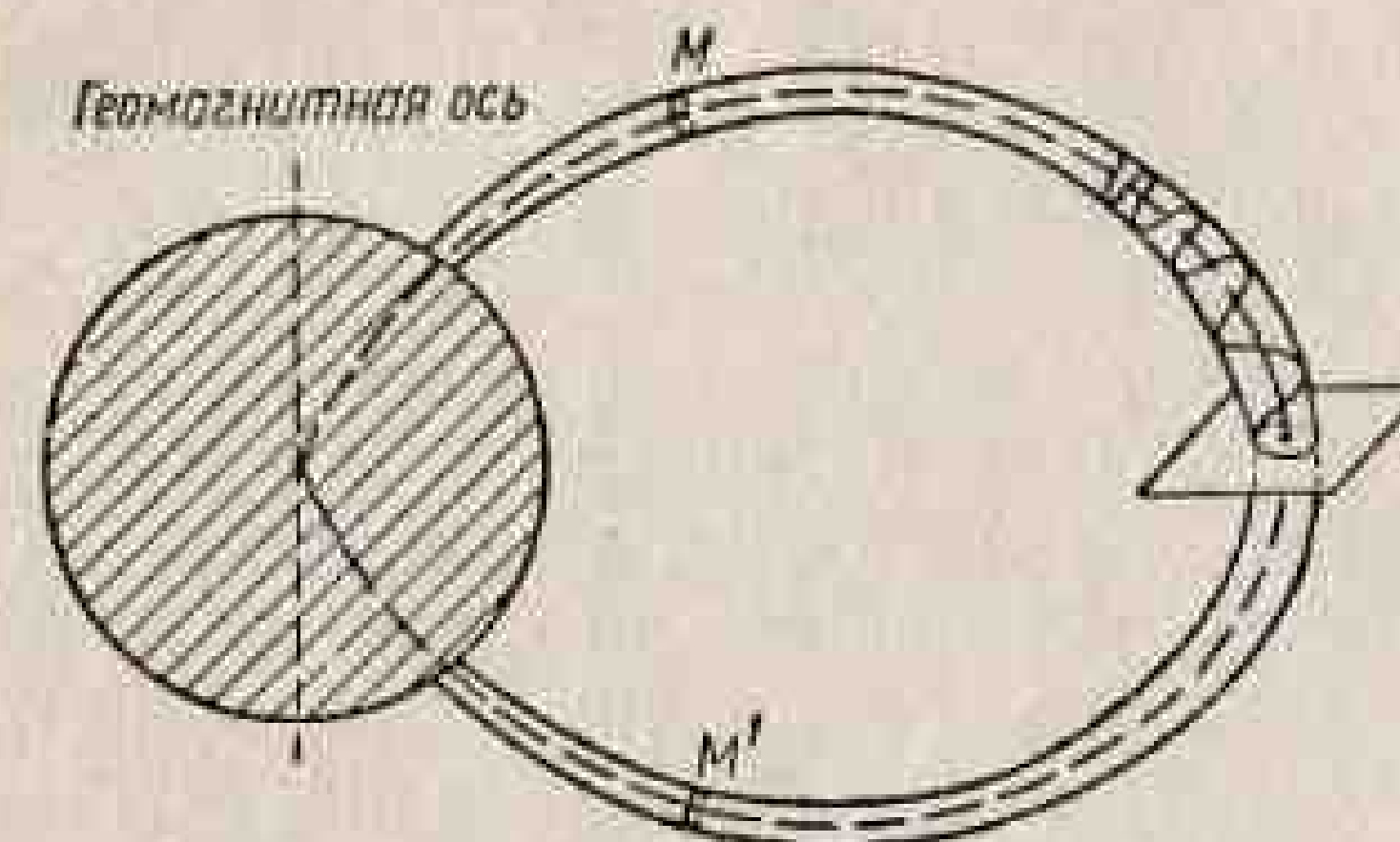


Рис. 88. Движение частицы с малым импульсом в магнитном поле Земли (схема).

сти, описываемой частицей, постепенно изменяется таким образом, что магнитный поток (определяемый как произведение площади круга на составляющую напряженности магнитного поля, перпендикулярную плоскости круга) через окружность остается постоянным.

В начале 1957 г. американский физик Ф. Зингер опубликовал статью, в которой обратил внимание на возможность того, что протоны и электроны, испускаемые Солнцем, могут иногда захватываться магнитным полем Земли. Дрейф положительных и отрицательных захваченных частиц во взаимно противоположных направлениях может приводить, как указывал Зингер, к возникновению электрического тока, окружающего Землю в виде своеобразной оболочки. Эта оболочка была бы совершенно аналогичной так называемому «токовому кольцу», которое геофизики нашли нужным постулировать для объяснения некоторых возмущений магнитного поля Земли (например, главной фазы магнитных бурь, см. главу 14). Таковы были основные представления и идеи, когда запуски Спутников I и II положили начало непосредствен-

ному исследованию мирового пространства. Г—М-счетчик на Спутнике II не зарегистрировал ничего необычного. Но счетчики, помещенные на Эксплорере I и Эксплорере III группой исследователей под руководством Дж. Ван-Аллена, начали вести себя чрезвычайно странным образом. При каждом обороте высота траекторий Эксплорера I и Эксплорера III менялась от минимальной, в несколько сот километров (соответственно 356 и 187 километров), до максимальной, в несколько тысяч километров (соответственно 2546 и 2796 километров).

Вплоть до высот около 1000 километров наблюдался только ускоренный и вполне регулярный рост числа отсчетов в единицу времени. Но на высотах больше 2000 километров, однако, счетчики явно переставали работать. А поскольку счетчики начинали опять регулярно посылать импульсы, когда спутники спускались на меньшие высоты, и поскольку данные по обоим спутникам в общем совпадали, то едва ли можно было предполагать какие-то неисправности в работе аппаратуры. Но равным образом было невозможно и предположение о том, что на высоте больше 2000 километров нет космических лучей. Единственное объяснение могло основываться на свойственной Г—М-счетчикам «инерционности»: если их подвергать облучению очень большой интенсивности, они «захлебываются» и вообще перестают работать. Ван-Аллен пришел к выводу, что это действительно правильное объяснение его результатов. По его оценкам, интенсивность излучения, при которой счетчики «захлебываются», должна быть по крайней мере в 15 000 раз больше интенсивности обычных космических лучей.

Ван-Аллен сообщил о своем открытии 1 мая 1958 г. В своем докладе он подчеркнул тот факт, что это излучение, хотя оно и регистрируется Г—М-счетчиками с достаточно толстыми стенками, не могло бы проникнуть в атмосферу ниже чем на 600 километров от земной поверхности. А поскольку весь слой атмосферы выше 600 километров эквивалентен лишь небольшой доле толщины стенок счетчика, то Ван-Аллен пришел к выводу, что излучение должно состоять из заряженных частиц, которым магнитное поле препятствует приближаться к поверхности Земли. Он предположил, что эти частицы возникают на Солнце, попадают в области, где они могут удерживаться магнитным полем Земли, в результате раз-

личного рода возмущений поля и затем остаются захваченными в этих областях.

С помощью Спутника II не удалось открыть радиационные пояса, потому что во время сеансов радиосвязи с приемными станциями траектория спутника проходила вне области повышенной радиации. Сразу же после сообщения Ван-Аллена в СССР был запущен Спутник III, оборудованный различными детекторами излучения, способными не захлебываясь регистрировать большие потоки частиц. Скорость счета этих детекторов очень сильно возрастала при прохождении спутника через определенные области пространства, что подтвердило существование радиации большой интенсивности, открытой Ван-Алленом.

В августе того же года в Соединенных Штатах был запущен спутник Эксплорер IV, на котором была помещена аппаратура, разработанная группой Ван-Аллена специально для исследования нового явления. Эти приборы регистрировали потоки частиц вплоть до 100 000 частиц через квадратный сантиметр в секунду. В согласии с предварительными результатами, интенсивность оказалась сильно зависящей от широты. И, что еще важнее, интенсивность менялась с широтой, отсчитываемой от геомагнитного экватора, а не от географического. Эти наблюдения подтвердили предположение о том, что распределение интенсивности излучения определяется магнитным полем Земли.

К тому времени еще не было наблюдений на высотах больше нескольких тысяч километров. И хотя было установлено, что интенсивность неуклонно повышается с ростом высоты, но никто не знал, достигает ли она максимума на каких-то больших высотах и затем начинает спадать или нет. Другими словами, оставалось неясным, действительно ли Земля окружена радиационным поясом, или же область интенсивной радиации простирается на всю Солнечную систему и Земля просто погружена в нее. Исследования далеких областей космического пространства, предпринятые в СССР и США в конце 1958 г. и начале 1959 г., дали ответ на этот важнейший вопрос. Они показали, что излучение большой интенсивности ограничено областью пояса, охватывающего Землю, а на больших расстояниях (около 15 радиусов Земли или больше) остаются лишь обычные космические лучи.

Эти результаты не оставили практически никаких сомнений в том, что излучение большой интенсивности состоит из частиц, захваченных магнитным полем Земли. Кроме того, весной 1959 г. группа американских ученых сообщила о результатах одного эксперимента, известного под названием «Проект Аргус», который самым прямым образом подтвердил теорию магнитного захвата. В эксперименте «Аргус» (предложенном ученым греческого происхождения А. Кристофилом еще до открытия радиационного пояса и выполненном в конце лета 1958 г.) в магнитное поле Земли вводились электроны большой энергии, это делалось с помощью атомных бомб небольшого размера, которые поднимались на ракетах и взрывались на большой высоте. Приборы на спутнике Эксплорер IV в течение многих дней регистрировали эти электроны, захваченные земным магнитным полем и образовавшие тонкую оболочку вокруг Земли.

Структура радиационного пояса

С 1958 г. было получено много экспериментальных данных о радиационном поясе. Для исследования использовались и искусственные космические объекты (спутники и межпланетные ракеты), и геофизические ракеты, запускаемые в нижние слои радиационного пояса. Наиболее существенный вклад внесли американские ученые, работающие под руководством Дж. Ван-Аллена, Дж. Симпсона и Дж. Вилклера, и советские ученые, в том числе С. Н. Вернов, А. Е. Чудаков, В. И. Красовский и их сотрудники. Последующее представляет собой краткую сводку наиболее важных результатов и выводов.

Оказалось, что радиационный пояс состоит из электронов и протонов. Их энергетический спектр очень крутой; это означает, что скорость счета прибора, чувствительного лишь к частицам с энергией больше E , будет очень быстро падать с ростом E . В действительности спектр частиц радиационного пояса значительно более крутой, чем спектр обычных космических лучей, или, иначе говоря, средняя энергия захваченных частиц много меньше, чем энергия частиц космических лучей. Более того, энергетический спектр частиц различен в различных областях радиационного пояса. Следовательно, распре-

деление интенсивности, зарегистрированное данным детектором, в значительной степени зависит от эффективности регистрации этим детектором электронов и протонов различной энергии.

Типичный Г—М-счетчик регистрирует с почти стопроцентной эффективностью электроны с энергией в несколь-

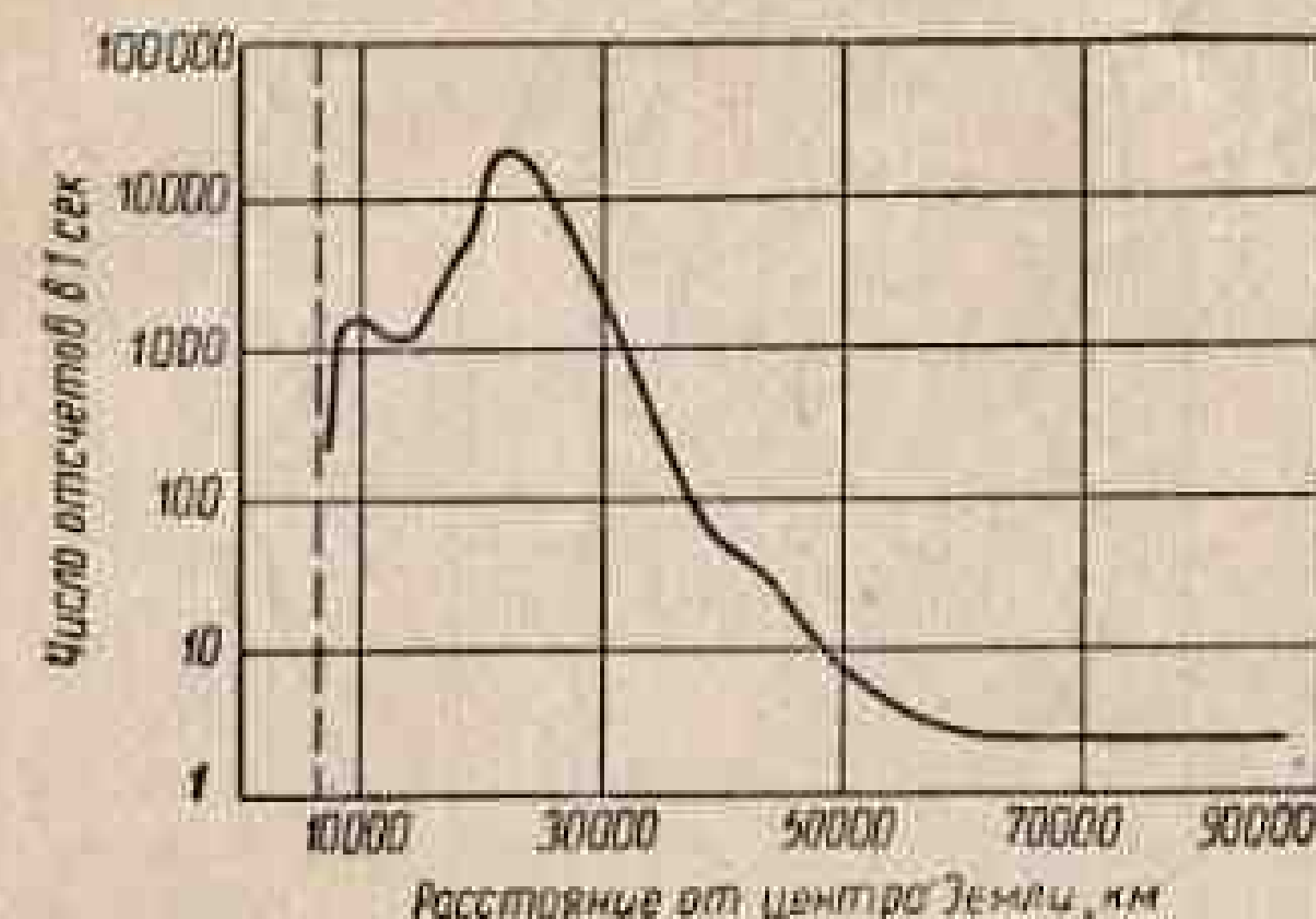


Рис. 89. Зависимость скорости счета Г—М-счетчика от расстояния от центра Земли, полученная Ван-Алленом (пунктирная линия соответствует поверхности Земли). Данные получены с помощью Г—М-счетчика, установленного на борту космической ракеты Пионер III.

ко Мэв и выше и протоны с энергией 30—40 Мэв и выше, поскольку такие частицы способны пройти сквозь стенки счетчика. Он также регистрирует, но со значительно меньшей эффективностью и электроны с меньшей энергией — вплоть до 20 тысяч электронвольт (кэв). Такие электроны при соударении со стенками счетчиков дают рентгеновское излучение, которое иногда приводит к срабатыванию счетчика от образованных им комптоновских электронов.

Г—М-счетчик при удалении от Земли регистрирует в интенсивности излучения два отдельных максимума (рис. 89). Значит, существуют две зоны большой интенсивности, разделенные областью меньшей интенсивности. Интенсивность излучения, как уже упоминалось, зависит как от магнитной широты, так и от высоты. На предварительной карте распределения интенсивности, опубли-

кованной Ван-Алленом в 1959 г. (рис. 90), ясно видны *внутренний пояс* вблизи экватора и *внешний пояс*, спускающийся к полюсам.

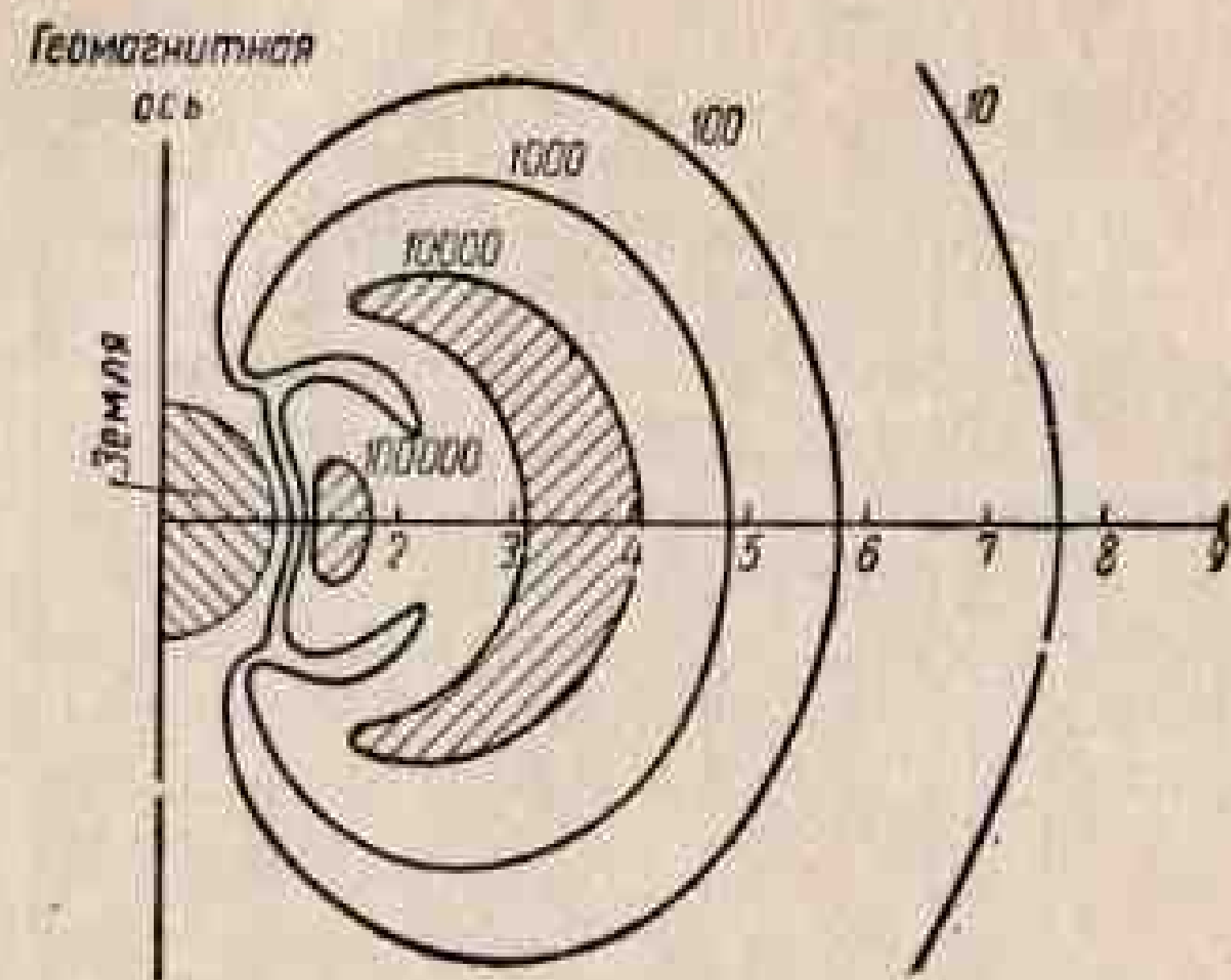


Рис. 90. Карта распределения интенсивности в радиационных поясах, по измерениям Ван-Аллена с помощью Г — М-счетчиков. Кривые изображают поверхности постоянной интенсивности; например, счетчик дает 1000 отсчетов в секунду во всех точках поверхности, которая получается вращением вокруг геомагнитной оси кривой с отметкой 1000. (Космическое излучение дает лишь около двух отсчетов в секунду.) Заштрихованной площадью отмечены области, в которых скорость счета превышает 10 000 отсчетов в секунду. По горизонтальной оси показано расстояние от центра Земли, измеренное в радиусах Земли. (Эта карта — результат ранних экспериментов, при анализе которых исходили из предположения, что магнитное поле Земли точно совпадает с полем магнитного диполя.)

Средняя энергия частиц во внутреннем поясе много больше, чем во внешнем. Энергии протонов во внутреннем поясе достигают примерно 100 Мэв, протоны во внешнем поясе имеют самое большее несколько Мэв. Кроме того, внутренний пояс сравнительно стабильный, тогда как населенность внешнего пояса колеблется в периоды повышенной солнечной активности.

Происхождение радиационного пояса

До сих пор нельзя дать определенный ответ на вопрос о происхождении радиационного пояса (или, точнее, поясов). Однако кажется весьма правдоподобным, что

большая часть протонной компоненты внутреннего пояса представляет собой вторичный эффект космических лучей. Среди вторичных частиц, возникающих при соударениях первичных космических лучей с атомными ядрами в атмосфере, имеются нейтроны. Некоторые из них испускаются в «восходящем» направлении, т. е. вверх от поверхности Земли. Поскольку нейтроны не несут электрического заряда, они уходят от Земли, не испытывая влияния ее магнитного поля. Но нейтроны нестабильны, они распадаются на протоны и электроны со средним временем жизни около 16,6 минуты. Часть нейтронов, распадаясь на своем пути от Земли, инжектирует электроны и протоны на замкнутые орбиты.

Известные сегодня данные о «восходящем потоке» нейтронов и среднем времени жизни захваченных частиц как будто позволяют объяснить этим механизмом происхождение большей части протонов внутреннего пояса. Трудно, однако, таким образом объяснить все захваченное излучение, особенно частицы внешнего пояса. Тот факт, что на структуру этого пояса сильно влияет солнечная активность, свидетельствует о связи происхождения внешнего радиационного пояса с Солнцем. Но пока что остается невыясненным, действительно ли частицы внешнего радиационного пояса приходят от Солнца или они ускоряются вблизи Земли в результате магнитных возмущений, вызванных Солнцем. Подробней об этих возмущениях речь будет идти в следующей главе.

Глава 14

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И СОЛНЦЕ

Замечательное постоянство интенсивности космических лучей во времени — один из самых поразительных результатов ранних исследований по космическим лучам. Происходящие иногда небольшие колебания интенсивности обычно объяснялись сравнительно тривиальными атмосферными эффектами, такими, как, например, изменение атмосферного давления.

Эти ранние исследования проводились на уровне моря или вблизи от него. Из-за поглощения в атмосфере наблюдаемые там явления могли быть вызваны только первичными космическими лучами довольно высокой энергии (несколько Гэв и больше). Позднее, когда начались систематические измерения на разных высотах и широтах, стали наблюдать и первичные космические частицы меньших энергий. Тогда-то и стало ясно, что интенсивность малоэнергичной части космического излучения совсем не постоянна во времени и что ее изменения главным образом связаны с деятельностью Солнца. Еще более ярко выраженные изменения потока частиц наблюдались при помощи искусственных спутников и космических ракет, которые позволили отправить приборы в те области, где экранирующее действие земной атмосферы и магнитного поля не играет уже заметной роли.

В то же время измерения, проведенные с большей точностью вблизи уровня моря, выявили небольшие, но явно выраженные изменения в интенсивности космических лучей, которые тоже были связаны с активностью Солнца. Более того, было обнаружено, что изредка, даже на уровне моря, происходят большие всплески интенсивности космических лучей. Эти изменения потока заряженных частиц, приходящих на Землю из мирового пространства, представляют собой важное звено в общей

картине взаимосвязи Солнце—Земля, в которую входят такие разнообразные явления, как магнитные бури, полярные сияния и нарушения радиосвязи.

Частицы, связанные с солнечными вспышками

Самая грандиозная солнечная вспышка, которая была зарегистрирована на Земле, произошла 23 февраля 1956 г. В этот день на поверхности солнечного диска внезапно появилась большая световая вспышка. Спустя несколько минут скорость счета детекторов космических лучей, расположенных в разных местах Земли, стала резко возрастать. В течение 15—20 минут скорость счета достигла максимальной величины, а затем начала спадать. Через несколько часов все кончилось, и скорость счета снизилась почти до своего нормального уровня.

Разного рода детекторы на специальных станциях, размещенных по всему земному шару, показали совершенно различные результаты. Самый большой эффект был зарегистрирован на довольно больших высотах детекторами вторичных нейтронов, генерированных космическими лучами (рис. 91). Максимальная скорость счета некоторых таких детекторов возросла в 25—50 раз по сравнению с нормальным уровнем. Другой крайний случай — самый малый эффект — был зарегистрирован вблизи экватора детектором μ -мезонов. Они дали увеличение скорости счета всего лишь на несколько процентов.

Наблюдаемое возрастание скорости счета несомненно обусловлено потоком высокоэнергичных частиц, преимущественно протонов, испущенных Солнцем во время вспышки. Поскольку возрастание показали даже приборы, расположенные на малых широтах, то по крайней мере некоторые из этих частиц должны обладать достаточно высокими энергиями, чтобы преодолеть отклоняющее влияние земного магнитного поля вблизи экватора, т. е. энергиями больше чем 10—20 Гэв. С другой стороны, наблюдаемый эффект вблизи экватора был гораздо меньше, чем на больших широтах, где магнитное поле Земли способно преодолеть частицы с энергией менее одного или нескольких Гэв. Это означает, что излучение, выброшенное во время вспышки, содержит по сравнению

с обычным космическим излучением меньше частиц высокой энергии и больше частиц малой энергии. Такое заключение подтверждается и тем, что нейтронные детекторы отметили значительно большее возрастание скорости счета, чем μ -мезонные, поскольку для образования μ -мезонов в заметных количествах нужны протоны

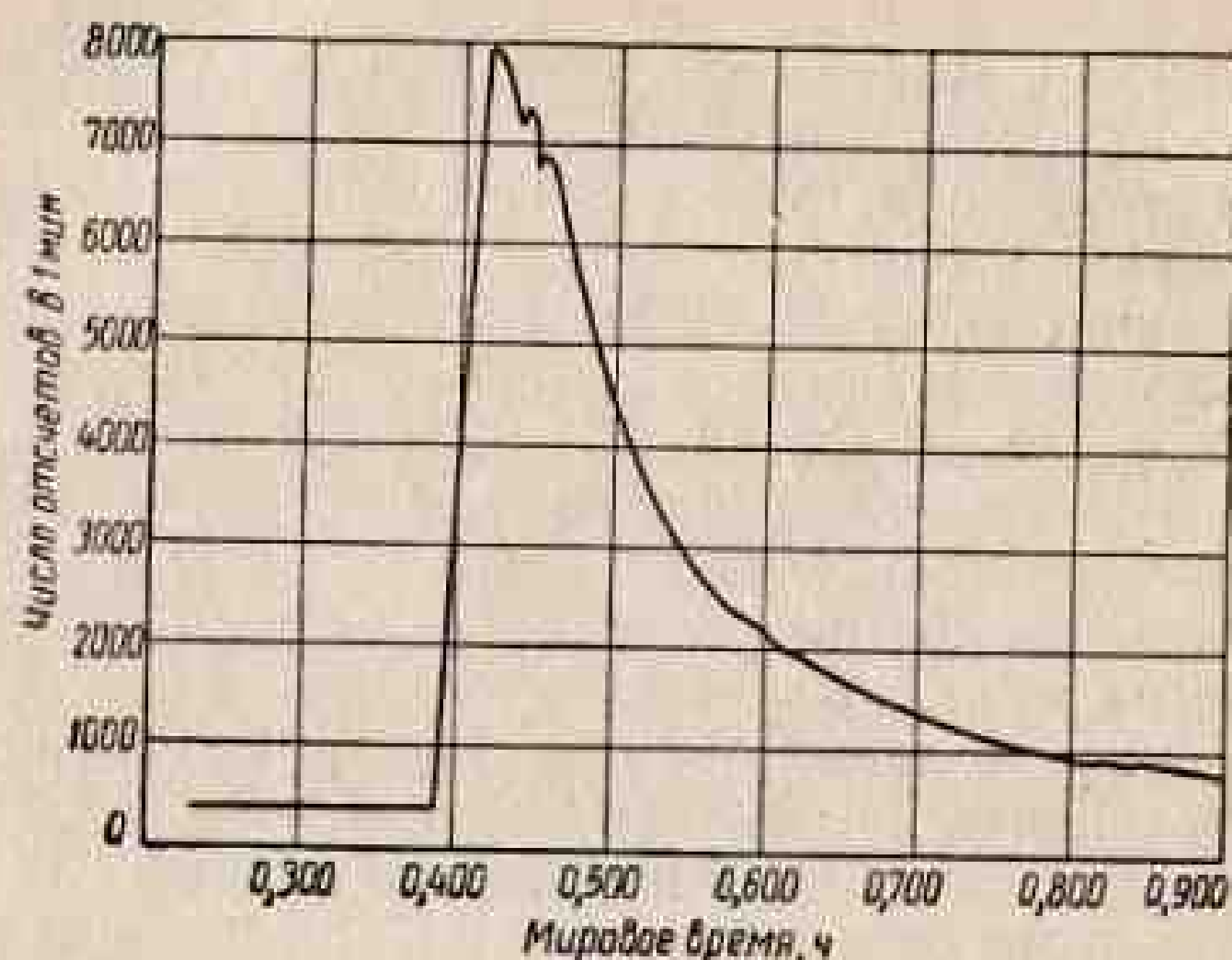


Рис. 91. Возрастание скорости счета нейтронного детектора в Чикаго, последовавшее за солнечной вспышкой 26 февраля 1956 г. (Из статьи Джона Симпсона в *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Том 43, 1957, стр. 42.)

с энергией, равной многим миллиардам электронвольт, тогда как нейтроны достаточно эффективно генерируются с протонами меньших энергий. До 1956 г., точнее за период между 1942 и 1956 гг., было зарегистрировано четыре случая возрастания интенсивности космических лучей, связанных с солнечными вспышками, меньших по величине, но в общих чертах такого же характера, как и в 1956 г. В последующие годы наблюдалось еще несколько подобных явлений в среднем по одному в год. Некоторые из них были довольно большими, другие едва заметными. Между тем выяснилось, что протоны с энергией в несколько Γ эв образуются в солнечных вспышках очень редко; образование же протонов с энергией в 100 Мэв и меньше — значительно более частое событие.

Наличие магнитного поля Земли приводит к тому, что протоны таких относительно малых энергий могут достигнуть земной поверхности лишь вблизи полюсов. Но даже и в районе полюсов эти частицы часто не доходят до расположенных на Земле детекторов, поскольку потери энергии приводят к их остановке уже в верхних слоях атмосферы. Эти частицы заметно увеличивают нормальный уровень ионизации в верхних слоях атмосферы, делая эти слои непроницаемыми для радиосигналов, приходящих из Галактики. Возросшая ионизация прерывает также радиосвязь на коротких волнах в полярной зоне. Наблюдение именно этих эффектов впервые позволило утверждать, что в атмосферу довольно часто вторгаются солнечные протоны сравнительно малой энергии.

В течение 1956—1957 гг., выполняя программу Международного геофизического года, ученые разных стран установили ряд чувствительных радиоприемников для наблюдения радиопрозрачности верхних слоев атмосферы путем измерения уровня космических радиосигналов. Эти приборы, получившие название *измерителей относительной прозрачности ионосферы* или *риометров*, часто отмечали резкое увеличение ионизации в атмосфере над полярными областями спустя примерно час после появления большой солнечной вспышки. Поскольку это возрастание ограничивалось полярными областями, то ученые приписали его заряженным частицам, образованным, вероятно, в солнечной вспышке. Время пролета от Солнца до Земли и глубина проникновения в атмосферу указывают на то, что эти частицы — протоны с энергией по крайней мере до 10 Мэв.

Первая прямая проверка этих выводов была произведена в 1958 г. Андерсон (Университет штата Айова) 21 августа запустил воздушный шар с детекторами излучения вблизи форта Черчилль в Канаде. Максимальной высоты, 32 километра, прибор достиг к 10 часам утра 21 августа и оставался на этой высоте до 5 часов вечера 22 августа. Вначале скорость счета детекторов была нормальной. Однако в 9 часов 30 минут утра 22 августа скорость счета начала нерегулярно возрастать до уровня, превосходящего нормальный примерно в 10 раз. Спустя несколько часов скорость счета стала постепенно уменьшаться. Позднее Андерсон узнал, что за 75 минут

до того, как детекторы на воздушном шаре дали увеличение скорости счета, произошла большая солнечная вспышка. По толщине слоя атмосферы над шаром Андерсон рассчитал, что зарегистрированные протоны должны были обладать энергиями выше 100 Мэв^* .

В то время когда выполнялись эти измерения на шарах-зондах, спутник Эксплорер IV еще обращался вокруг Земли и проводил измерения. На высоте 300 километров в полярной области приборы на борту спутника регистрировали появление еще более мощных потоков частиц от Солнца. Эффект был большим за счет того, что орбита спутника проходила вне атмосферы Земли и приборы на спутнике могли регистрировать частицы меньших энергий, которые не доходили до шара-зонда Андерсона. Во многих последующих полетах счетчики на борту спутников регистрировали появление частиц от Солнца после солнечных вспышек. Была обнаружена тесная связь между этими данными и показаниями рюметров, расположенных на Земле. Таким образом, стало ясно, что увеличение поглощения космических радиолучей можно с уверенностью считать сигналом о приходе частиц от Солнца.

Наблюдение солнечных частиц позволило получить очень ценную информацию как об атмосфере Солнца, где предполагается образование этих частиц, так и об условиях в межпланетном пространстве, через которое проходят частицы по пути к Земле. Обсуждение всех этих интереснейших вопросов выходит за рамки книги, но хотелось бы упомянуть о двух очень существенных результатах, полученных при изучении многих солнечных вспышек.

Первый состоит в том, что частицы, образованные во вспышках, продолжают приходить на Землю в течение нескольких часов после окончания вспышки. По-видимому, частицы не могут сразу же выйти из Солнечной системы, а на некоторое время захватываются ею. И второй, — частицы, наблюдаемые немедленно после вспышки, часто приходят на Землю в каком-то достаточно хо-

* В Советском Союзе под руководством А. Н. Чарухьяна ведутся систематические исследования интенсивности космических лучей на разных широтах в стратосфере. В этих опытах зарегистрированы многие случаи возрастания интенсивности, связанные с солнечными вспышками. — *Прим. перев.*

рошо определенном направлении; появляющиеся же ближе к концу вспышки частицы идут по всем направлениям. Эта картина точно соответствует ожидаемой, так как «ранние» частицы приходят непосредственно от Солнца, в то время как «поздние» частицы, прежде чем попасть на Землю, несколько раз отражаются в разных направлениях в межпланетном пространстве. Но и «ранние» частицы обычно не приходят точно по направлению от Солнца, поскольку их траектории искривляются магнитными полями, присутствующими в межпланетном пространстве.

Спады Форбуша

Итак, всплески интенсивности космических лучей и поглощение радиолучей в полярных областях, наблюдаемые во время солнечных вспышек, свидетельствуют о том, что Солнце генерирует частицы высоких энергий. В то же время другие наблюдения показывают, что активность Солнца влияет также и на поток частиц высокой энергии, приходящий в Солнечную систему извне. (Так, довольно часто наблюдается, особенно в периоды высокой солнечной активности, удивительный эффект — уменьшение по всей Земле интенсивности космических лучей. Этот эффект впервые заметил в 1937 г. американский физик Скотт Е. Форбуш, именем которого эффект и назван.)

Спады Форбуша относятся к тем геофизическим явлениям, которые возникают каждый раз после большого взрыва на Солнце. Спустя примерно сутки после взрыва на Солнце (этот период меняется от случая к случаю) на Земле происходит магнитная «буря». Вначале наблюдается кратковременное возрастание напряженности магнитного поля Земли примерно на 0,1% от ее нормального значения (*внезапное начало*), за ним следует уменьшение напряженности порядка нескольких десятых долей процента, которое продолжается несколько часов (*главная фаза*). Затем в течение нескольких дней магнитное поле медленно восстанавливается до своего начального значения.

Многие (хотя и не все) магнитные бури сопровождаются спадами Форбуша. Во время спада Форбуша интенсивность космических лучей начинает уменьшаться

одновременно с магнитным полем, достигая минимального значения, которое на несколько процентов ниже обычного уровня. Затем во время последующего восстановления магнитного поля интенсивность космических

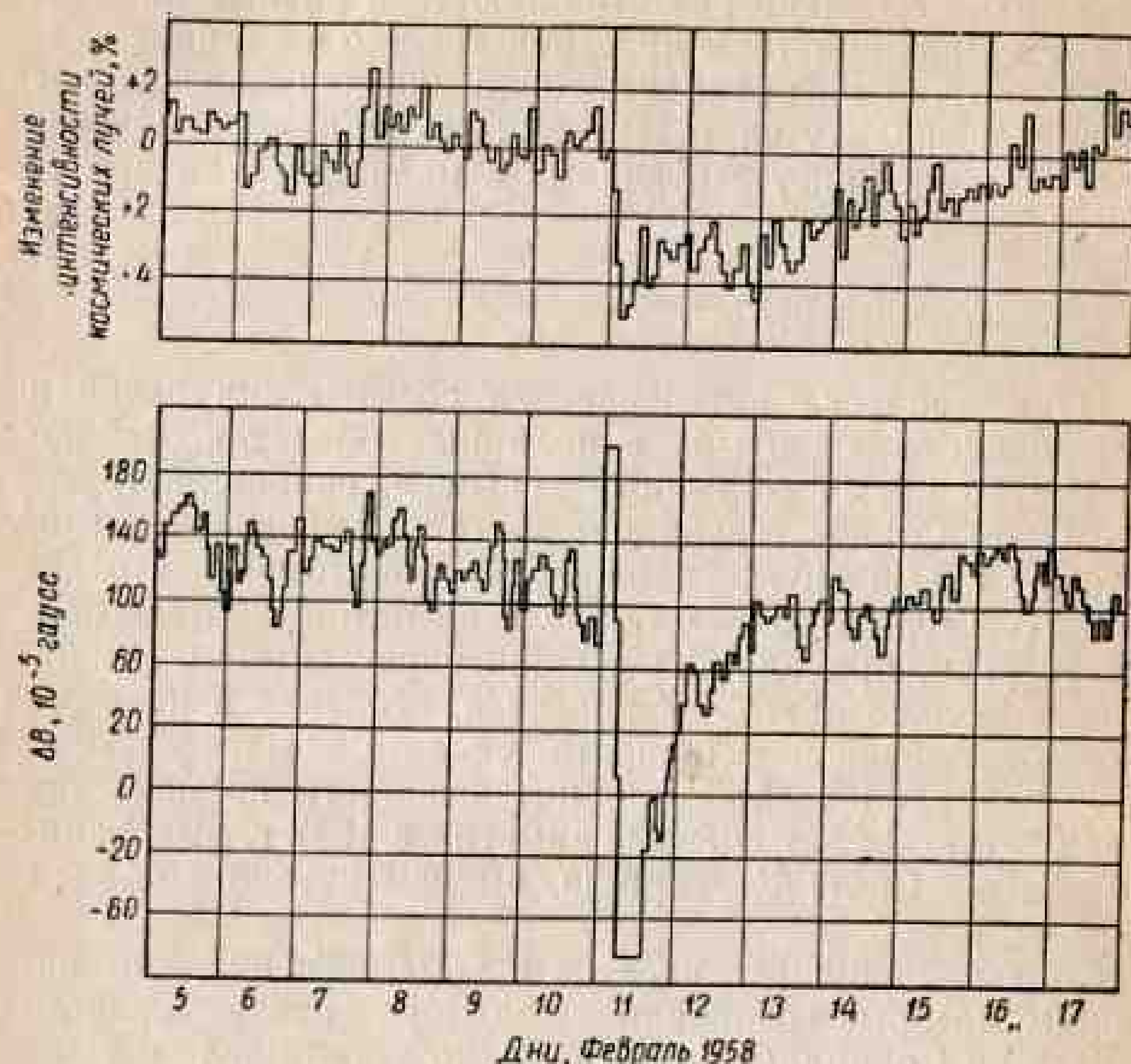


Рис. 92. Типичный спад Форбуша. Нижняя кривая изображает горизонтальную компоненту магнитного поля (от произвольно выбранного нуля) в единицах 10^{-5} gauss. Верхняя кривая дает соответствующие изменения интенсивности космических лучей (измеренные нейтронным монитором в Чикаго) в процентах от нормальной интенсивности. По горизонтальной оси отложено мировое время в днях. (Из статьи Ф. Бейчелета, П. Балата, А. Конфорто и Г. Марини в *Nuovo cimento*. Том 16, 1960, стр. 292.)

лучей также возвращается к своему обычному значению (рис. 92). Поскольку спады Форбуша — это явление, которое наблюдается по всей Земле, то какие бы факторы его ни вызывали, они должны воздействовать как на малоэнергичные первичные частицы (которые способны

достигнуть атмосферы Земли лишь вблизи магнитных полюсов), так и на высокоэнергичные частицы (которые могут приходить на любых широтах).

Одновременно с магнитными бурями происходят большие изменения и во внешнем радиационном поясе. Различные наблюдения, проведенные на спутниках, показали, что интенсивность излучения вначале резко падает, особенно в наиболее удаленных областях внешнего пояса. В то же самое время происходят интенсивные полярные сияния. Спустя день или два внешний пояс начинает восстанавливаться. Число частиц в нем сначала превосходит первоначальный уровень, а затем постепенно начинает уменьшаться. Через несколько недель внешний радиационный пояс возвращается к своему нормальному состоянию.

Попытка единого объяснения геомагнитных бурь, спадов Форбуша и родственных им явлений

До сих пор нельзя дать детального объяснения всем этим различным, но, очевидно, взаимосвязанным явлениям. Вряд ли можно сомневаться в том, что в момент солнечного взрыва нечто выбрасывается Солнцем и движется в пространстве с такой скоростью, что достигает Земли в течение одного дня. Это нечто способно вызывать магнитные бури, экранировать частично Землю от приходящих космических лучей, вызывать полярные сияния и «утечку» частиц из внешнего радиационного пояса. Это же нечто несет с собой и энергию, необходимую для восстановления внешнего пояса.

На основании ряда астрономических наблюдений, теоретических исследований и проведенных недавно прямых измерений при помощи космических ракет можно попытаться нарисовать следующую общую картину. Солнцем или, вероятно, более точно солнечной короной испускается непрерывный поток разреженного, сильно ионизованного газа, или плазмы, состоящей в основном из водорода. Таким образом, в межпланетном пространстве более или менее постоянно существует *солнечный ветер* плазмы. Солнечный ветер имеет вблизи Земли скорость в несколько сот километров в секунду и плотность, равную нескольким частицам в кубическом сантиметре.

(Между прочим, экспериментальное изучение межпланетной плазмы составляет в настоящее время одну из основных работ группы по исследованию космических лучей в МТИ.)

«Взрывы», которые приводят к солнечным вспышкам, происходят в основании короны, в области, лежащей непосредственно над фотосферой, т. е. видимым диском Солнца. Значительная часть энергии, освобождаемой при взрыве, выделяется в виде дополнительной кинетической энергии сравнительно плотной плазмы в основании короны. В результате этого в межпланетное пространство сквозь корону выбрасывается облако плазмы со скоростью порядка 1000 километров в секунду. Это облако образует ударную волну, поскольку оно врывается в межпланетную плазму (т. е. в солнечный ветер), которая тоже движется от Солнца, но с меньшей скоростью. В соответствии с этой картиной такая ударная волна и представляет собой то нечто, о котором шла речь выше.

Проникая в магнитное поле Земли, ударная волна, вероятно, вначале сжимает силовые линии, временно увеличивая таким образом напряженность магнитного поля (внезапное начало). Более того, эта волна может сильно деформировать (например, создать петли) далекие силовые линии (где поле слабее и поэтому может быть легче возмущено). В результате происходит утечка частиц, захваченных во внешнем радиационном поясе.

Главная фаза магнитной бури наступает тогда, когда переносимая ударной волной солнечная плазма попадает в *магнитосферу* — область, в которой земное магнитное поле сильнее межпланетного. Или же, в альтернативном случае, ударная волна может увеличить энергию частиц плазмы, уже присутствующей в магнитосфере, т. е. «подогреть» ее.

В любом случае давление плазмы увеличивается, в результате этого магнитные силовые линии раздвигаются и напряженность магнитного поля падает. Впрыскивание плазмы или нагревание плазмы в магнитосфере, вероятно, тесно связаны с восстановлением внешнего радиационного пояса. Действительно, полагают, что плазма состоит из ионизованного водорода, т. е. из протонов и электронов — тех самых частиц, которые обнаружены в радиационном поясе. Правда, энергия частиц

плазмы гораздо меньше энергии частиц, зарегистрированных счетчиками при изучении радиационного пояса. Но частицы плазмы и частицы во внешнем поясе могут быть как раз низкоэнергичной и высокоэнергичной частями единой совокупности частиц.

Вспомним, что и Зингер, и Ван-Аллен предполагали, что в магнитосферу впрыскиваются частицы солнечного происхождения. Зингер полагал, что для объяснения главной фазы магнитной бури требуются низкоэнергичные частицы плазмы; Ван-Аллен же ссылался на частицы более высокой энергии, которые были обнаружены его счетчиками. Оба предположения вместе не так уж далеки от той картины, к которой в настоящее время склоняется научная общественность, хотя в магнитосферу, возможно, впрыскивается энергия, а не частицы.

Прежде чем перейти к следующему вопросу, во избежание возможного недоразумения нужно сделать одно замечание. Зингер считал, что главная фаза магнитной бури обусловлена электрическими токами, возникающими при движении захваченных частиц вокруг Земли. Приведенное же здесь объяснение приписывает то же самое магнитное возмущение давлению захваченной плазмы, раздвигающей магнитные силовые линии. Эти точки зрения представляют собой не два различных предположения, а два различных способа описания одного и того же физического явления. К сожалению, любая попытка объяснить это подробнее завела бы нас далеко в дебри магнитной гидродинамики.

Как же объясняются спады Форбуша? Магнитное поле Солнца обычно имеет напряженность в несколько гаусс; в активных областях, где происходят солнечные вспышки, обычно существуют более сильные локальные магнитные поля. Солнечное магнитное поле индуцирует электрические токи в потоках ионизованных газов, текущих от Солнца. Так как эти газы ведут себя почти как идеальные электрические проводники, то наведенные токи продолжают в них циркулировать долгое время, пока газы удаляются от Солнца. Эти токи в свою очередь создают магнитное поле. Следовательно, обычно солнечный ветер в межпланетном пространстве обладает магнитным полем, а выброшенная при солнечной вспышке плазма, которая движется сразу же за фронтом ударной волны, имеет даже довольно сильное поле. Это поле «выметает»

космические частицы из Солнечной системы, что и ведет к возникновению спадов Форбуша. Если нарисованная нами картина верна, то спады Форбуша должны происходить не только в окрестности Земли, но и повсюду в межпланетном пространстве.

Это и было обнаружено при зондировании далеких областей межпланетного пространства космическими ракетами. Например, Пионер V в 1960 г. зарегистрировал спад Форбуша на расстоянии в 5 миллионов километров от Земли. В то же самое время магнитометр на борту Пионера V (который регистрировал магнитные поля напряженностью порядка нескольких единиц на 10^{-5} гаусс в межпланетном пространстве) обнаружил сильное увеличение напряженности магнитного поля (до 4×10^{-4} гаусс). Вероятно, уменьшение потока космических лучей и увеличение напряженности магнитного поля были связаны с прохождением ударной волны. Вскоре после этого на Земле произошла сильная магнитная буря, вызванная, по-видимому, фронтом той же самой ударной волны.

Любопытно отметить, что среди различных аспектов взаимосвязи Солнце—Земля до сих пор наименее понятными остаются полярные сияния, хотя это было первое явление такого рода, на которое обратили внимание ученые. Полярные сияния проявляются как свечение в верхних слоях атмосферы. Они обычно происходят на больших геомагнитных широтах и на высотах в диапазоне от одного до нескольких сот километров. Приборы, запущенные при помощи космических ракет в районы полярных сияний (группой в штате Айова), обнаружили большие потоки электронов с энергиями от 10 до 20 кэв и протонов с энергиями выше 70 кэв (приборы были нечувствительными к частицам меньших энергий).

В некоторых случаях, когда искусственные спутники пересекали радиационный пояс, было замечено, что полярные сияния происходят одновременно с утечкой частиц из внешних областей пояса. Казалось, что эти наблюдения поддерживают мнение о том, что полярные сияния вызываются частицами, которые выходят из магнитных ловушек вдоль магнитных силовых линий и попадают в расположенную ниже атмосферу. Но дальнейшие измерения не подтвердили этот вывод, и до сих пор не найдено убедительное объяснение этого явления.

11-летний цикл солнечной активности

Специалистам в области физики Солнца хорошо известно, что общая картина солнечной активности (число солнечных пятен, частота вспышек и другие явления) следует 11-летнему циклу. Когда начали регулярно в течение длительных периодов проводить точные измерения интенсивности космических лучей на уровне моря и систематизировать результаты измерений на воздушных шарах, то было обнаружено, что поток космических лучей также систематически меняется в течение 11-летнего солнечного цикла.

Например, скорость счета детекторов μ -мезонов вблизи уровня моря была примерно на 6% меньше в период максимума солнечной активности по сравнению с той же величиной в минимуме солнечной активности.

Более заметный эффект был зарегистрирован счетчиками, поднятыми воздушными шарами-зондами на большие высоты вблизи магнитных полюсов. Там поток космических лучей оказался в период максимума солнечной активности в несколько раз меньше, чем в период минимума. Это показано на рис. 93, представлены результаты некоторых измерений, проведенных Х. В. Нейером в Калифорнийском технологическом институте.

Как уже упоминалось выше, на уровне моря могут вызвать заметные эффекты только те первичные космические частицы, которые обладают энергией в несколько Гэв или выше. С другой стороны, первичные частицы малых энергий, порядка 100 Мэв, могут быть зарегистрированы приборами, поднятыми на воздушных шарах, в районах больших магнитных широт. Ясно, что факторы, ответственные за 11-летние изменения интенсивности космических лучей, гораздо сильнее влияют на частицы сравнительно малых энергий, чем на частицы очень высоких энергий. Кажется очень мало вероятным, чтобы вариации интенсивности космических лучей в течение солнечного цикла появлялись вследствие изменения интенсивности испускания космических лучей Солнцем. В противном случае трудно было бы понять, почему самое интенсивное испускание космических лучей соответствует периоду наименьшей активности. Ведь, как мы уже видели, ускорение частиц на Солнце связано с периодом возрастающей солнечной активности.

Более привлекательная идея состоит в том, что солнечная активность модулирует поток обычных космических лучей несолнечного происхождения. В соответствии с той картиной, которую мы рассмотрели при обсуждении спадов Форбуша, естественно считать, что магнитные поля, имеющиеся в межпланетном пространстве, были, образно говоря, перенесены с Солнца плазменными потоками. Межпланетное магнитное поле частично экранирует космические лучи, приходящие в Солнечную систему извне. При возрастании солнечной активности большое количество сгустков плазмы выбрасывается из активных областей Солнца, где имеются локальные поля. Вследствие этого увеличивается среднее магнитное поле межпланетного пространства, т. е. экран становится менее прозрачным.

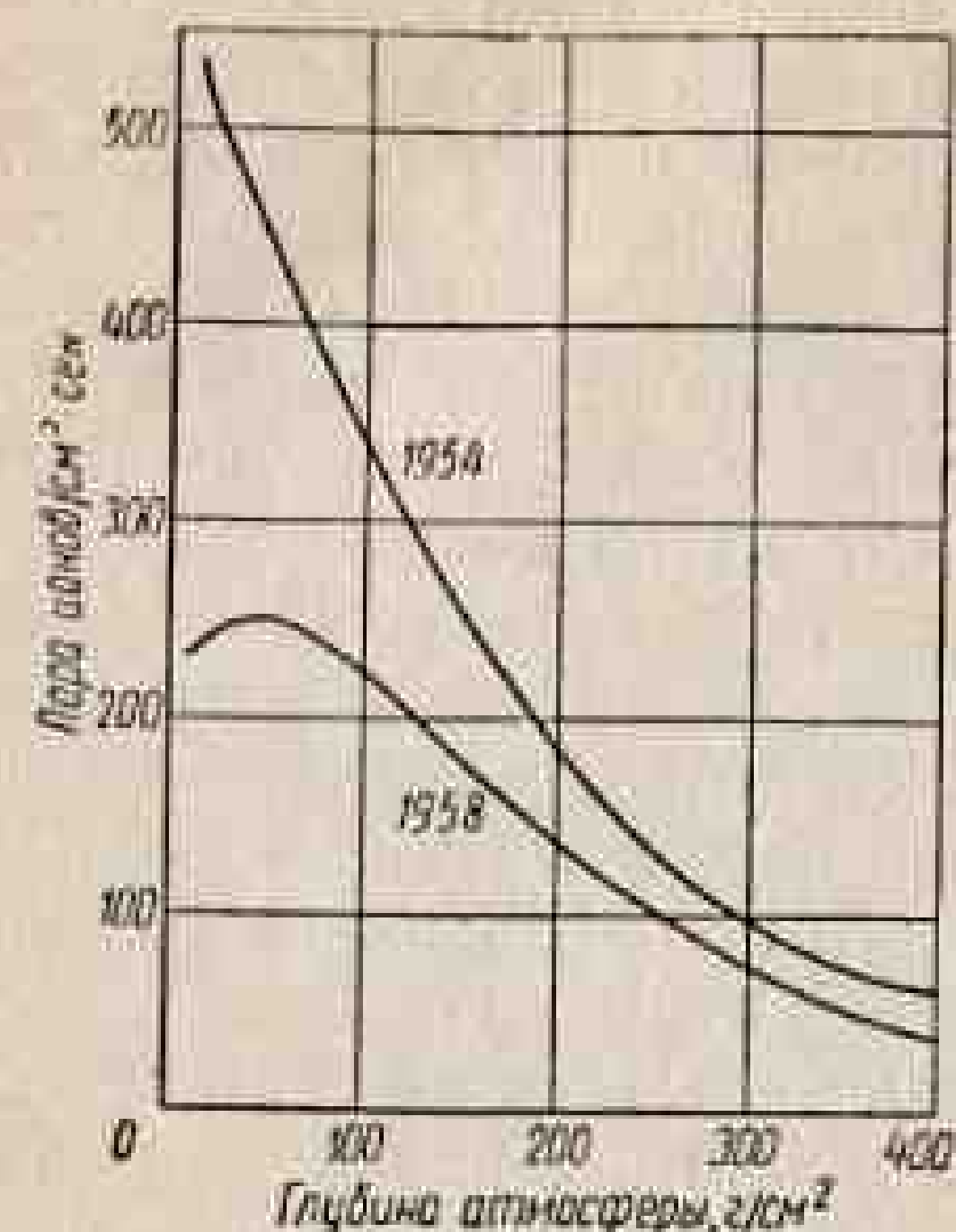


Рис. 93. Интенсивность космических лучей в зависимости от глубины атмосферы, измеренная на 88° северной геомагнитной широты во время минимума солнечной активности в 1954 г. и во время максимума солнечной активности в 1958 г. Измерения проводились с помощью электроскопа. По вертикальной оси дается число пар ионов, образованных в секунду космическими лучами в 1 см^3 воздуха при нормальных температуре и давлении. По горизонтальной оси отложена глубина атмосферы в граммах на квадратный сантиметр. (Из статьи Х. Нейера в Nature. Том 184, 1959, стр. 423.)

что детально известно все происходящее в действительности. Например, интересно, почему модуляционный механизм, приводящий к спадам Форбуша, действует одинаково эффективно на космические частицы больших и малых энергий, тогда как модуляционный механизм, ответственный за 11-летние изменения интенсивности, действует значительно сильнее на частицы малых энергий.

Рассмотренная общая схема кажется довольно правдоподобной, однако нельзя еще утверждать,

Глава 15

ПРОИСХОЖДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ — НЕРЕШЕННАЯ ПРОБЛЕМА

Со времени открытия космических лучей прошло уже столетие, а проблема их происхождения все еще не решена. Мы не знаем наверняка, откуда приходят космические лучи. Мы не знаем наверняка, как они приобретают свои космические энергии.

Космические лучи, испускаемые Солнцем

По результатам изучения солнечных вспышек мы определенно знаем, что довольно часто Солнце ускоряет частицы до энергий в сотни Мэв, а иногда и до энергий в несколько Гэв. Мы знаем, что это ускорение происходит в периоды высокой солнечной активности, когда во время взрывов большие массы ионизованных газов выбрасываются Солнцем в межпланетное пространство. Мы знаем также, что эти взрывы на Солнце сопровождаются магнитными возмущениями и есть все основания полагать, что эти быстро меняющиеся магнитные поля ускоряют до больших энергий протоны в солнечной атмосфере. Как это происходит, точно мы не знаем, возможно, процесс ускорения похож на процессы, происходящие в некоторых ускорителях частиц, например в бетатроне*.

Если Солнце испускает космические лучи, то почему бы не предположить, что все космические лучи приходят к нам от Солнца? Другими словами, почему бы не допустить, что Солнце непрерывно излучает частицы боль-

* Бетатрон применяется для ускорения электронов до энергий в сотни Мэв. Частицы ускоряются электрическим полем, индуцированным переменным во времени магнитным полем.

ших энергий, создавая тем самым обычный поток космических лучей на Земле, и что увеличение интенсивности космических лучей во время солнечных вспышек представляет собой лишь временное возрастание нормальной активности Солнца?

Основное возражение против такой гипотезы — это постоянство интенсивности космических лучей в любое время дня и ночи. Космические лучи приходят на Землю из мирового пространства по всем направлениям, а не только от Солнца.

Однако это возражение не так уж очевидно, как это может показаться. Магнитное поле Земли так искривляет траектории заряженных частиц, приходящих от Солнца, что некоторые из них получают возможность попасть и на ночную сторону Земли (см. главу 5). Кроме того, уже в течение некоторого времени ученые предполагали существование во всей Солнечной системе слабых магнитных полей. Как отмечалось в предыдущей главе, эти предположения были подтверждены прямыми измерениями при помощи космических ракет.

Межпланетные магнитные поля также будут рассеивать заряженные частицы, так что они совсем не будут казаться идущими от Солнца, даже если они на самом деле солнечного происхождения.

Тем не менее если космические частицы в действительности идут от Солнца, то ни земное магнитное поле, ни межпланетные поля не могут объяснить постоянства их потока. Это заключение относится к частицам с энергией порядка 10 Гэв , которые составляют основную долю наблюдаемого излучения. Но оно тем более справедливо для частиц значительно большей энергии, ответственных за широкие атмосферные ливни. Например, протон с энергией 10^{15} эв имеет магнитную жесткость (см. стр. 55).

$$BR = \frac{10^{15}}{300} = 3 \cdot 10^{12} \text{ гаусс} \cdot \text{см.}$$

Так как напряженность межпланетного магнитного поля B порядка нескольких единиц на 10^{-5} гаусс , скажем $3 \cdot 10^{-5} \text{ гаусс}$, то радиус кривизны этого протона в межпланетном пространстве достигает величины 10^{17} см , что примерно в 6500 раз больше расстояния от Земли до Солнца ($1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}$). С другой стороны, так как земное

магнитное поле имеет напряженность порядка $0,5 \text{ гаусс}$, то радиус кривизны в окрестности Земли равен примерно $6 \cdot 10^{12} \text{ см}$, или в 10 000 раз больше радиуса Земли ($6,38 \cdot 10^8 \text{ см}$). Таким образом, протоны с энергией в 10^{15} эв и выше не должны сколько-нибудь заметно отклоняться ни межпланетным, ни земным магнитными полями. Если бы эти протоны возникали на Солнце, то они приходили бы на Землю только по направлению от Солнца. Но, как показывают эксперименты по широким атмосферным ливням, никакого выделенного направления прихода частиц очень высокой энергии вообще не существует.

Космические частицы, испускаемые звездами

Если большая часть наблюдаемого космического излучения не связана с Солнцем, то где же следует искать основной источник космических лучей? Конечно, во Вселенной мириады звезд, и можно было бы думать, что излучение, приходящее на Землю, складывается из космических лучей, испускаемых всеми этими звездами. Однако если средняя звезда испускает такое же количество космических лучей, как и Солнце, то, учитывая относительную близость Солнца к Земле, мы должны были бы получить полный поток космических частиц от Солнца, в миллионы раз больший, чем поток от всех остальных звезд, вместе взятых. А это означало бы, что практически все космические лучи на Землю должны приходить от Солнца. На самом деле это не так.

Конечно, могут существовать звезды, которые благодаря каким-то особым свойствам чрезвычайно эффективно испускают космические лучи. Даже относительно малое число таких звезд, возможно, обеспечивает весь наблюдаемый поток космических лучей.

В поисках возможных источников космических лучей значительное место отводится так называемым сверхновым звездам. В галактической окрестности нашей Солнечной системы (т. е. в пределах нескольких тысяч световых лет) эти гигантские взрывы отдельных звезд происходят один раз в несколько сот лет. В таком взрыве освобождается количество энергии, эквивалентное, возможно, всей массе Солнца.

Никто с уверенностью не может сказать, почему постепенный процесс ядерного синтеза, который обеспечивает энергию, непрерывно испускаемую в мировое пространство обычными звездами, иногда вдруг сменяется бурным выделением энергии в виде взрыва. Однако большинство астрофизиков считает, что в общих чертах картина этого явления такова. Ядерный синтез происходит главным образом вблизи центра звезды, где температура максимальна. Постепенно эта гигантская ядерная печь сжигает свое топливо. Иными словами, весь водород уже синтезирован в гелий, а гелий — в более тяжелые ядра, пока сердцевина звезды не становится практически вся железной, так как ядра железа наиболее стабильны.

В этот момент гравитационные силы, которые уже не уравновешены давлением излучения, обусловленным непрерывным выделением энергии в центре, начинают резко сжимать звезду (наступает так называемый коллапс). В процессе сжатия температура звезды резко повышается благодаря переходу гравитационной энергии в тепло. Начинается синтез протонов и легких ядер, которые еще оставались во внешних слоях звезды. Поскольку скорость синтеза растет с ростом температуры, получается так, что все оставшееся ядерное топливо сгорает почти одновременно, и происходит колоссальный взрыв*. В ходе этого катастрофического процесса образуются тяжелые ядра. Высказывались предположения, что сверхновые звезды порождают также частицы высокой энергии, т. е. космические лучи, и был выдвинут ряд остроумных идей о том, как это происходит.

Большинство ученых считает, однако, что частицы космических лучей ускоряются при помощи электромагнитных процессов, более или менее сходных с теми, которые происходят в солнечных вспышках. Астрономы

* Не всякая звезда взрывается в конце своего жизненного пути. Оказалось, что взрыв сверхновой может произойти только в том случае, если масса звезды превышает массу Солнца более чем в 1,5 раза. При этом могут играть роль и другие свойства звезды (например, скорость ее вращения и химический состав). Заметим, что гравитационный коллапс приводит к таким катастрофическим последствиям только в том случае, если тепловая энергия, выделяемая внутри звезды, достаточно быстро удаляется. В противном случае возникает давление, которое замедляет процесс. Предполагают, что энергия удаляется в виде нейтрино.

наблюдали звезды, у которых извержения, напоминающие солнечные вспышки, происходят гораздо чаще, чем на Солнце. Были также обнаружены двойные звезды, обладающие большими магнитными моментами и быстро вращающиеся вокруг общего центра тяжести. В результате возникают сильные переменные магнитные поля. Наконец, встречаются переменные звезды, обладающие чрезвычайно сильными магнитными полями, направление которых, по-видимому, изменяется каждые несколько дней. Все это возможные источники космических лучей*.

Космические лучи и радиопузы

Многие ученые, и в особенности советский физик В. Л. Гинзбург, подчеркивают, что ключ к решению проблемы происхождения космических лучей можно найти в радиоастрономических наблюдениях. Они исходят из следующих соображений. Если электромагнитное поле ускоряет протоны и более тяжелые ядра, которые и составляют космические лучи, то это поле столь же хорошо должно ускорять электроны. Магнитное поле, которое обязательно присутствует в той области, где происходит ускорение частиц, искривляет траектории электронов и заставляет их двигаться по спиралям, навитым на магнитные силовые линии.

Движение по криволинейному пути — это движение с ускорением. Поэтому электроны, движущиеся по спирали, должны терять энергию, испуская электромагнитное излучение (см. главу 6). Это явление хорошо известно всем физикам, работающим с ускорителями заряженных частиц. Оно приводит к тому, что быстрые электроны, циркулирующие в ускорителе, излучают видимый и ультрафиолетовый свет. Это так называемое *синхротронное излучение*. Так же называют и излучение, возникающее, когда траектории быстрых электронов в космосе искривляются магнитными полями.

* Оценки, однако, показывают, что энергии невзрывающихся звезд недостаточно, чтобы объяснить всю наблюдаемую интенсивность космических лучей, и необходимо привлекать более мощные источники — сверхновые звезды. Подробнее см. в книге В. Л. Гинзбурга и С. И. Сыроватского «Происхождение космических лучей». М., Изд-во АН СССР, 1963. — Прим. перев.

В принципе, конечно, все заряженные частицы, движущиеся в магнитном поле, испускают синхротронное излучение. Однако интенсивность этого излучения сильно зависит от массы частиц. Легкие частицы, которые легче отклоняются магнитным полем и могут двигаться с большими скоростями, излучают значительно сильнее тяжелых частиц. И действительно, синхротронное излучение протонов и других ядер при любых условиях исчезающе мало — и в лабораторных установках, и, насколько нам известно, во Вселенной.

В то же время синхротронное излучение электронов часто представляет собой заметный эффект. Относительная интенсивность синхротронного излучения в разных участках электромагнитного спектра зависит от напряженности магнитного поля и от энергетического распределения электронов. В спектральной области, соответствующей радиоизлучению, синхротронное излучение вносит свой вклад в радишумы, приходящие к нам из мирового пространства. Радиоастрономы умеют отличать этот сорт радишумов от радишумов других источников.

Весьма вероятно, что источники космических лучей и источники синхротронного излучения тесно связаны между собой. Естественный объект для экспериментальной проверки этой связи представляет собой Солнце — ближайшая к нам звезда. Множество наблюдений показало, что высокоэнергичные протоны, испускаемые во время солнечных вспышек, почти всегда сопровождаются вспышкой радишумов, известной под названием *вспышки IV рода*. Астрофизики считают, что вспышки IV рода — это результат синхротронного излучения высокоэнергичных электронов, которые движутся по спирали вдоль магнитных силовых линий в солнечной короне.

В качестве возможных источников космических лучей рассматриваются и другие небесные тела, которые представляют собой мощные источники радишумов. Среди них, в частности, газовые туманности, оставшиеся после взрывов сверхновых. В наши дни на небе видны пять или шесть таких остатков от взрывов, зарегистрированных в исторических документах за последние 2000 лет. Из них лучше всего изучена Крабовидная туманность — газовое облако диаметром около шести световых лет, удаленное от нас на расстояние около 4000 световых лет.

Крабовидная туманность — это остаток взрыва сверхновой звезды, наблюдавшейся китайскими астрономами в 1054 г. нашей эры (световой год — это расстояние, проходимое светом за год, равное приблизительно 10^{18} см). Газ этой туманности все еще находится в состоянии сильного возбуждения, его движение отчетливо заметно при сравнении снимков туманности, сделанных с интервалом в несколько лет.

Большая часть видимого света, испускаемого Крабовидной туманностью, имеет непрерывный спектр. Это было загадкой в течение многих лет, поскольку такие разреженные газы обычно излучают лишь на нескольких четко выделенных частотах. Кроме того, позднее было обнаружено, что этот свет еще и сильно поляризован. Советский астрофизик И. С. Шкловский указал в 1953 г. на то, что единственное разумное объяснение обоих свойств — непрерывного спектра и поляризации — состоит в предположении, что этот свет — результат синхротронного излучения. Тем временем радиоастрономы нашли, что Крабовидная туманность — это сильный источник радишумов. Испускание радиоволн, так же как и испускание света, астрофизики приписывают теперь синхротронному излучению.

Высокая интенсивность синхротронного излучения Крабовидной туманности и появление значительной части этого излучения в видимой области спектра указывают на наличие большого числа электронов, энергия которых простирается до сотен Гэв, движущихся в относительно сильных магнитных полях. По-видимому, механизм, ответственный за ускорение электронов, ускоряет также и протоны, и любые другие ядра, которые могут быть в туманности. Эти частицы могут вылетать из Крабовидной туманности в межзвездное пространство. Если процесс происходит именно так, то эти частицы вместе с другими, возникающими таким же способом в остатках других сверхновых звезд, вносят заметный вклад в наблюдаемое космическое излучение.

Механизм ускорения Ферми

Как протоны, так и ядра более тяжелых элементов распространены по всей Вселенной. Поэтому проблема состоит не в том, чтобы объяснить их присутствие в кос-

мических лучах. Гораздо сложнее понять, каким образом космические частицы приобретают свои колоссальные энергии. До сих пор мы рассматривали механизмы ускорения, действующие лишь в ограниченных областях пространства, таких, как звездная атмосфера или остатки сверхновых звезд. Но, может быть, космические частицы ускоряются постепенно, двигаясь в пространстве за счет электромагнитных полей, присутствующих в межзвездной среде? В 1933 г. американский физик В. Сванн предположил, что Галактика в целом может действовать как гигантский ускоритель космических лучей. Принцип ускорения, предложенный Сванном, по существу, был использован позднее при разработке бетатрона.

В 1951 г. Энрико Ферми предложил более реалистичский механизм, опирающийся на общую картину межзвездного пространства, которая вырисовывалась из астрономических наблюдений. Согласно этой картине, по Вселенной блуждают громадные облака ионизованного газа, в основном водорода. Эти облака обладают магнитными полями, так же как и облака газа, извергаемые Солнцем. Ферми указал, что между этими блуждающими облаками и быстро движущимися отдельными частицами происходит обмен энергией. Причем в результате этого обмена в среднем частицы увеличивают свою энергию.

Чтобы понять, как это происходит, рассмотрим следующую модель, которая, несмотря на чрезмерное упрощение, правильно передает основные стороны процесса. Допустим, что облака — это более или менее твердые тела и что пространство между ними не содержит магнитных полей. Тогда частица движется по прямой линии до тех пор, пока она не столкнется с облаком. Внутри облака частица проходит очень запутанным путем, так что если она в конце концов вылетает из облака, то уже практически «не помнит» своего первоначального направления движения. Поэтому, согласно этой модели, частицы рассеиваются облаками как вперед, так и назад.

Когда частица сталкивается с облаком, движущимся по направлению к ней, то она отскакивает от него с увеличенной энергией; в случае столкновения с удаляющимся облаком частица теряет энергию. (Любой теннисист знает, что он может увеличить или уменьшить скорость мяча, попадающего на ракетку, если двигать

ракетку соответственно вперед или назад.) В среднем частица получает небольшое увеличение своей энергии, в основном потому, что встречные столкновения происходят чаще.

Ферми считал, что такой механизм действует в пределах нашей Галактики. Подобный механизм может работать и в более ограниченных областях пространства, таких, как Крабовидная туманность или атмосфера звезды. Возможно, он действует в грандиозных масштабах межгалактического пространства.

Космические лучи в Солнечной системе, в Галактике и вне ее

Поток энергии, приходящий на Землю в виде космических лучей, приблизительно равен потоку энергии, который получает Земля в виде света всех звезд, исключая Солнце. Не так легко ответить на вопрос о том, каков поток космических лучей в различных удаленных частях Вселенной по сравнению с потоком вблизи Земли. В случае космических лучей эта задача гораздо сложнее, чем в случае света звезд, поскольку свет распространяется по прямым линиям, а космические частицы, несущие электрический заряд, отклоняются магнитными полями. Магнитное отклонение может сильно задержать выход космических частиц из тех областей пространства, где они возникают, и, таким образом, привести к повышенной концентрации частиц в отдельных местах. Действительно, как подтвердило открытие радиационного пояса вокруг Земли, при определенных обстоятельствах заряженные частицы на долгое время могут быть захвачены магнитными ловушками.

Если бы в Солнечной системе существовали сильные поля, действующие как магнитные ловушки, то тогда даже небольшой добавки высокоэнергичных частиц от Солнца было бы достаточно для сохранения наблюдаемого потока космических лучей. Поскольку в подавляющем большинстве космические лучи приходили бы на Землю после многократных отражений в окружающем пространстве, то в результате казалось бы, что они приходят равномерно отовсюду, а не только от Солнца. Солнце, как надо полагать, и другие звезды в таком случае были окружены своеобразной «атмосферой» космических

лучей, а в межзвездном пространстве поток космических лучей был бы пренебрежимо мал. Но, как мы уже видели, в Солнечной системе нет магнитных полей, достаточно сильных, чтобы служить ловушками (существующие поля могут, по-видимому, удерживать выбрасываемые при солнечных вспышках частицы с энергией вплоть до нескольких Гэв в течение всего лишь нескольких часов или дней). По этой причине физики были вынуждены искать источник космических лучей вне Солнечной системы. Очевидно, если космические лучи не создаются в пределах Солнечной системы, то они должны заполнять большие объемы межзвездного пространства вокруг Солнца.

Звезды и межзвездное вещество не распределено во Вселенной равномерно, а сконцентрировано в галактиках. Наша Галактика содержит около 100 миллиардов (10^{11}) звезд. Большинство этих звезд заполняет объем плоского диска с утолщением посередине. Диаметр галактического диска составляет примерно 100 000 световых лет, толщина его — несколько тысяч световых лет. Большая часть межзвездного газа и пыли также сконцентрирована в этом объеме. Диск окружен гало почти сферической формы, которое образуют старые звезды и сильно разреженный газ (рис. 94).

Естественно предположить, что космические лучи образуются не в почти пустом пространстве между галактиками, а в самих галактиках. Если это верно, то большая часть наблюдаемого на Земле космического излучения должна приходить из нашей Галактики. Так как другие галактики отстоят от нас на слишком большие расстояния, то их вклад в поток космических лучей очень мал, так же как и в световой поток ночного неба.

Солнечная система расположена вблизи центральной плоскости галактического диска на расстоянии от центра, равном приблизительно двум третям радиуса. Поэтому по отношению к Земле звезды в Галактике и галактическое межзвездное вещество распределены очень несимметрично. Этим, в частности, объясняется большая концентрация звезд на Млечном Пути. Источники космических лучей тоже, по-видимому, распределены очень несимметрично. Если бы в Галактике не было магнитных полей, то интенсивность космических лучей, приходящих на Землю, в разных направлениях была бы различной. В действительности же интенсивность космических лучей,

приходящих из разных областей неба, меняется не более чем на доли процента. Следовательно, если космические лучи имеют галактическое происхождение, то в Галактике должны существовать магнитные поля, которые хаотически перемешивают космические лучи в пространстве.

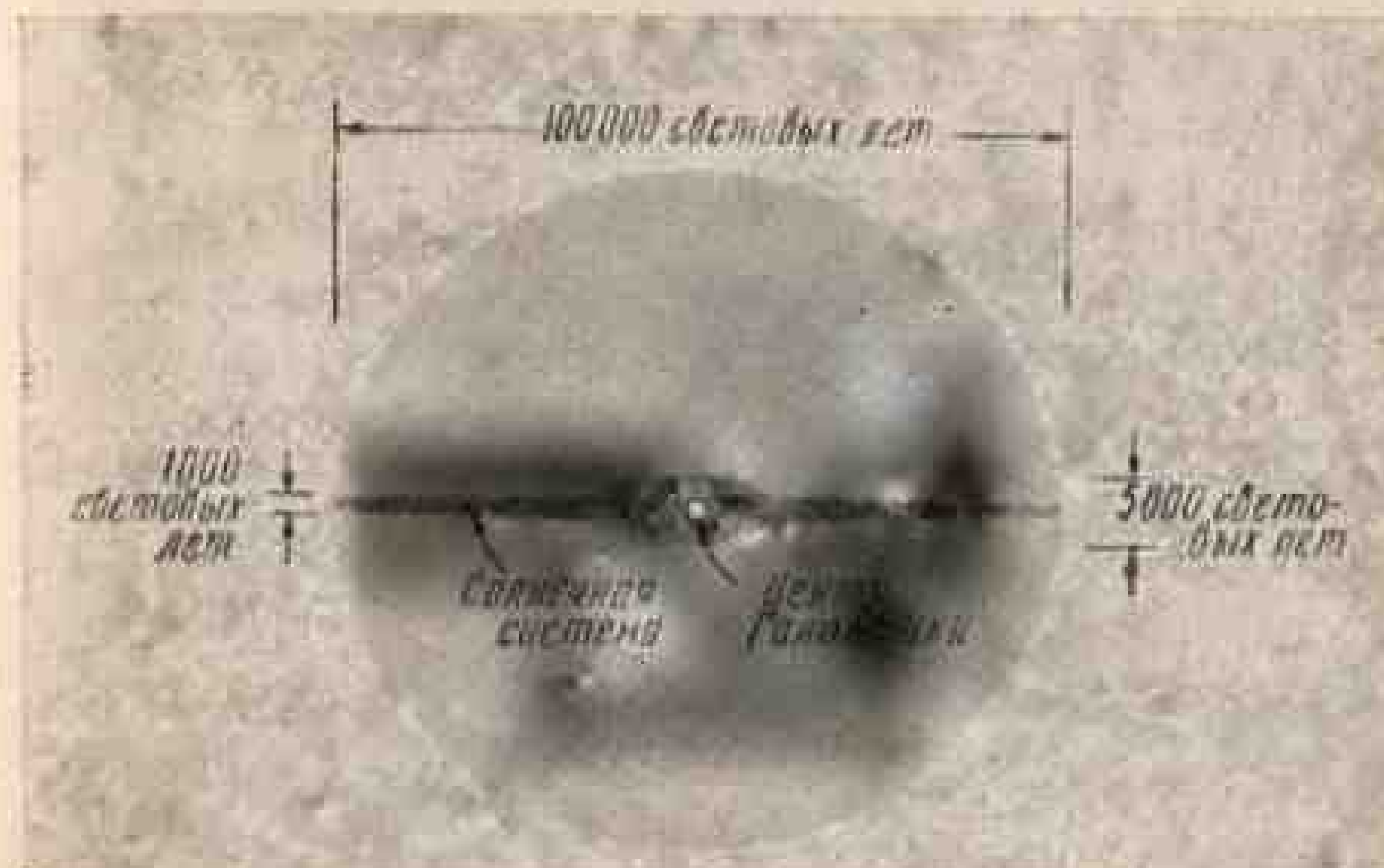


Рис. 94. Схематическое изображение структуры Галактики (Млечный Путь). Средняя толщина галактического диска составляет около 1000 световых лет (10^{21} см); выступ в центре диска имеет толщину около 5000 световых лет. Диаметр диска равен приблизительно 100 000 световых лет (10^{23} см).

Выше уже упоминалось о том, что в блуждающих облаках ионизованных газов скорее всего есть магнитные поля. Грубая картина, согласно которой космические частицы многократно отражаются от этих намагниченных облаков, позволяет объяснить не только механизм ускорения частиц, но также и случайное распределение направлений их движения. Если это так, то вполне вероятно, что магнитные поля удерживают космические частицы в пределах Галактики в течение длительного времени (по сравнению с временем, необходимым частице, чтобы пересечь Галактику по прямой и выйти за ее пределы). Тогда наша Галактика, так же как, скорее всего, и другие галактики, имеет свои собственные космические частицы, распределенные более или менее равномерно по ее объему. В то же время в пространстве между галак-

тиками плотность космических лучей должна быть пренебрежимо мала. Если такое представление верно, то даже кратковременно действующие источники, разбросанные в пределах каждой галактики (например, сверхновые звезды), могут поддерживать совершенно постоянный поток космических лучей. Удерживаются ли космические лучи только в галактическом диске или также и в гало и как долго они на самом деле удерживаются — все эти вопросы до сих пор оживленно обсуждаются физиками. Есть несколько важных экспериментальных фактов, дающих ключ к решению этих проблем. Во-первых, состав космических лучей. Самый факт наличия в космическом излучении ядер тяжелых элементов устанавливает верхний предел количества вещества, которое проходят космические частицы с момента своего зарождения и до момента регистрации. Средняя плотность межзвездного газа в галактическом диске составляет в среднем около одного атома водорода на кубический сантиметр. Считая известной вероятность соударения между ядрами водорода и углерода, получаем, что ядро углерода должно двигаться в галактическом диске около 4 миллионов лет, прежде чем оно столкнется с протоном неизвестного газа. При таком столкновении ядро углерода было бы разрушено. Так как ядра углерода все-таки наблюдаются в космических лучах, то, следовательно, космические лучи не могут находиться в галактическом диске более нескольких миллионов лет*.

Во-вторых, малое количество электронов высоких энергий в первичном космическом излучении. Это можно объяснить тем, что быстрые электроны, двигаясь в магнитном поле, испускают синхротронное излучение и, таким образом, довольно быстро теряют свою энергию, тогда как протоны и более тяжелые ядра таких потерь энергии не испытывают. Может быть, процессы, подобные тем, которые идут в солнечных вспышках, ускоряют электроны лишь до определенного предела, выше которого ускорение не в состоянии конкурировать с потерями на

синхротронное излучение. Кроме того, если космические лучи на длительное время удерживаются магнитными ловушками, то потери энергии на синхротронное излучение могут резко уменьшить поток электронов высокой энергии.

Вплоть до недавнего времени считали, что все космические лучи, приходящие на Землю, образуются в нашей Галактике. Это мнение было серьезно поколеблено данными по широким атмосферным ливням, которые постепенно отодвигали верхний предел энергетического спектра космических лучей в область все больших и больших энергий. В первичных космических лучах были обнаружены частицы с такой большой энергией, как $6 \cdot 10^{19}$ эв. Если эти частицы — протоны, то их магнитная жесткость равна

$$BR = \frac{6 \cdot 10^{19}}{300} = 2 \cdot 10^{17} \text{ гаусс} \cdot \text{см}.$$

По некоторым данным, магнитное поле в галактическом диске в среднем равно около $5 \cdot 10^{-6}$ гаусс. По-видимому, магнитное поле в гало тоже не превышает этого значения. Следовательно, как в галактическом диске, так и в гало радиус кривизны траектории таких частиц будет равен по меньшей мере $4 \cdot 10^{22}$ см. Этот радиус примерно в 40 раз больше толщины галактического диска (10^{21} см) и приблизительно равен радиусу гало ($5 \cdot 10^{22}$ см).

Кажется совершенно невероятным, чтобы частицы, на которые галактические магнитные поля действуют так слабо, удерживались бы в галактическом диске или даже в гало в течение какого-то большого промежутка времени. Если же они не могут удержаться, то, следовательно, они должны находиться не только в пределах галактик, но и в пространстве между ними. И тогда большинство таких частиц, наблюдаемых на Земле, приходят из пространства вне нашей Галактики*.

* Этот вывод не противоречит точке зрения о том, что суммарное число космических частиц в пространстве между галактиками мало по сравнению с той же величиной в пределах Галактики. Заключение о внегалактическом происхождении применимо лишь к космическим частицам очень высокой энергии, а эти частицы составляют лишь очень малую долю суммарного потока космических лучей. Как видно, например, из рис. 74, на 10^{16} частиц приходится лишь одна первичная частица с энергией, большей 10^{19} эв.

* Резервуаром для удержания космических лучей служит также гало. Если учесть, что в гало магнитные поля того же порядка, что и в галактическом диске, а плотность вещества примерно в 100 раз меньше, то оказывается, что среднее время жизни космических лучей в Галактике может достигать нескольких сот миллионов лет. — Прим. перев.

К этому выводу следует отнестись с осторожностью. Мы предполагали, что высокоэнергичные частицы, ответственные за широкие атмосферные ливни, — протоны. Но это не обязательно так. Если это не протоны, а более тяжелые ядра, то благодаря своему большему электрическому заряду они имеют меньшую магнитную жесткость, чем протоны той же энергии. Например, в магнитном поле напряженностью в $5 \cdot 10^{-6}$ гаусс ядро железа ($z=26$) с энергией $6 \cdot 10^{19}$ эв имеет радиус кривизны немного больший, чем 10^{21} см, что значительно меньше радиуса гало. Поэтому можно представить, что такие частицы будут удерживаться, если не в галактическом диске, то во всяком случае в гало.

С другой стороны, нет никаких указаний на то, что спектр космических лучей обрывается при $6 \cdot 10^{19}$ эв. Какие-либо новые экспериментальные данные, показывающие, что спектр простирается дальше, а высокоэнергичные космические частицы — это протоны, а не более тяжелые ядра, могут привести только к единственному выводу — частицы эти внегалактического происхождения.

Эпилог

Последние страницы этой книги были написаны в августе 1962 г. Несколько дней раньше исполнилось пятьдесят лет со времени полета Гесса, с которого начался наш рассказ. Прошедшие полстолетия были революционным периодом в науке. Я пытался показать, что изучение космических лучей сыграло большую роль в прогрессе науки, который так сильно расширил горизонты наших знаний. Без тех совершенно неожиданных фактов и загадок, на которые пролило свет изучение космических лучей, физика высоких энергий, возможно, переживала бы младенческий период. Может быть, физики до сих пор не открыли бы мезоны и другие частицы, изучение которых было их главным делом в течение последнего десятилетия. И, конечно, это не простое совпадение, что первые научные открытия космической эры, включая открытие радиационных поясов Земли, были сделаны физиками, изучающими космические лучи.

Сейчас самый подходящий момент, чтобы остановиться и оглянуться назад на всю историю космических лучей, не столько потому, что пятидесятилетняя годовщина их открытия требует какого-то торжественного юбилея, но и потому, что, как это ни забавно, годовщина наступила в критический момент для физиков, изучающих космические лучи, а может быть, и для самой физики космических лучей. Дело не в том, что пропал интерес к космическим лучам, наоборот, этот интерес постоянно растет. Дело в том, что исследование космических лучей вошло неотъемлемой составной частью в самые различные отрасли современной науки. В результате физика космических лучей фактически перестала существовать как самостоятельная отрасль науки. Физик, изучающий только космические лучи (физик-космик), как специалист становится анахронизмом. В то же время специалисты по ядерной физике, геофизике, астрофизике, космологии все

шире обращаются к изучению космических лучей для того, чтобы получить важнейшие сведения, относящиеся к ключевым проблемам их наук. И возможно, будущие историки науки закроют главу о космических лучах пятидесятой годовщиной открытия Гесса. Однако они безусловно должны будут отметить, что, даже теряя свою индивидуальность и растворяясь в общем потоке науки, физика космических лучей продолжает играть важнейшую роль в стремлении человека познать физический мир.

Приложение I

«МАССА НА ЕДИНИЦУ ПЛОЩАДИ»

В этой книге довольно часто используется понятие количества вещества или *массы на единицу площади*; поясним в нескольких словах его смысл. При сравнении поглощающей способности разных материалов необходимо учитывать как их плотность (массу в единице объема), так и толщину. Очевидно, 1 литр воздуха поглощает меньше излучения, чем 1 литр воды, поскольку плотность воздуха гораздо меньше плотности воды ($0,00129 \text{ г/см}^3$ при нормальных температуре и давлении).

Поэтому принято характеризовать поглотитель не только его геометрической толщиной, но и величиной массы в столбике вещества поглотителя с единичной площадью поперечного сечения (рис. 95). Эта величина — масса на единицу площади — измеряется в граммах на квадратный сантиметр (г/см^2). Для поглотителя с постоянной плотностью величина массы на единицу площади точно равна произведению толщины поглотителя на его плотность. Например, слой воды толщиной в 1 метр имеет массу на единицу площади, равную 100 г/см^2 , слой воздуха той же толщины имеет массу на единицу площади, равную $100 \times 0,00129 = 0,129 \text{ г/см}^2$. На уровне моря земная атмосфера обладает массой на единицу площади (которая в этом случае численно равна атмосферному давлению) в $1,003 \text{ г/см}^2$. Для атмосферы величина массы, приходящаяся на единицу площади, над определенным уровнем называется *глубиной атмосферы*.

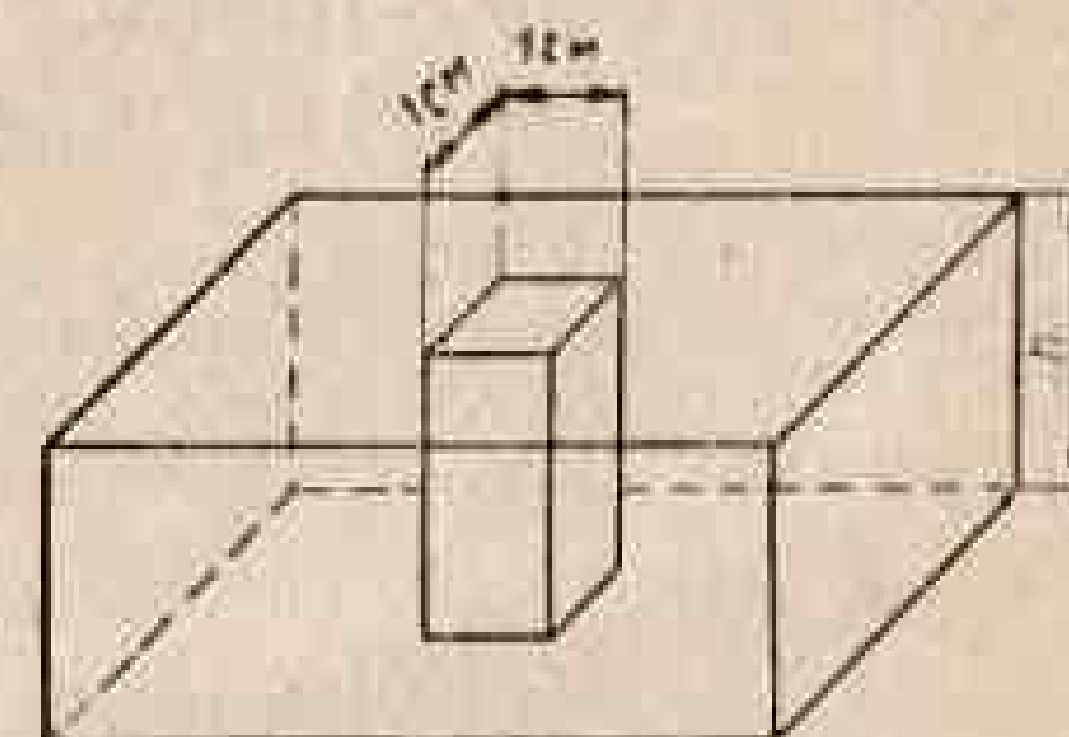


Рис. 95. Определение массы, приходящейся на единицу площади поглотителя. Рассмотрим призму сечением 1 см на 1 см, вырезанную в поглотителе толщиной h . Масса этой призмы — масса, приходящаяся на единицу площади поглотителя в граммах на квадратный сантиметр. Определение применимо как к поглотителю с постоянной плотностью, так и к поглотителю, состоящему из слоев разной плотности (такому, как атмосфера Земли). В первом случае масса призмы равна как раз ее объему ($1 \times h = h$), умноженному на плотность d , т. е. равна hd .

СТЕПЕНИ ЧИСЛА 10

При использовании в книге очень больших и очень малых чисел предполагалось, что читатель более или менее знаком с правилом записи таких чисел, основанном на положительных и отрицательных степенях числа 10. Поэтому следующие замечания предназначены для тех читателей, которые хотели бы освежить эти сведения в своей памяти.

Числа, точно равные n -кратному произведению числа 10, представляются в виде n -й степени числа 10, где n — целое положительное число:

$$10^1 = 10,$$

$$10^2 = 10 \cdot 10 = 100,$$

$$10^3 = 10 \cdot 10 \cdot 10 = 1000,$$

$$10^6 = 1\,000\,000 = 1 \text{ миллион},$$

$$10^9 = 1\,000\,000\,000 = 1 \text{ миллиард}.$$

Число, большее 10, но не равное точно положительной степени десяти, изображается в виде произведения числа, заключенного между 1 и 10, на соответствующую степень 10. Для конкретности возьмем, например, приближенное значение скорости света в вакууме:

$$3 \cdot 10^8 = 300\,000 \text{ километров в секунду, или}$$

$$3 \cdot 10^8 = 300\,000\,000 \text{ метров в секунду, или}$$

$$3 \cdot 10^{10} = 30\,000\,000\,000 \text{ сантиметров в секунду}.$$

Отрицательные степени десяти — это обратные величины соответствующих положительных степеней:

$$10^{-1} = 1/10 = 0,1,$$

$$10^{-2} = 1/10^2 = 1/100 = 0,01,$$

$$10^{-3} = 1/10^3 = 1/1000 = 0,001,$$

$$10^{-6} = 1/10^6 = 1/1\,000\,000 = 0,000001 = \text{одна миллионная доля},$$

$$10^{-9} = 1/10^9 = 1/1\,000\,000\,000 = 0,000000001 = \text{одна миллиардная доля}.$$

Число, заключенное между нулем и единицей, но не равное точно отрицательной степени десяти, изображается в виде произведения числа, заключенного между 1 и 10, на соответствующую отрицательную степень 10. Например, масса электрона в граммах равна

$$9 \cdot 11 \cdot 10^{-28} = \frac{9 \cdot 11}{10^{28}} = 0,00000000000000000000000000911 \text{ грамма}.$$

ЛОГАРИФИЧЕСКАЯ ШКАЛА

В физике космических лучей, вероятно, больше, чем в других областях физики, приходится иметь дело с величинами, меняющимися в очень широких пределах. Ярким примером может служить, например, энергетический спектр первичных космических лучей (см. рис. 74), который простирается от 10^9 примерно до 10^{19} эв, т. е. изменяется в 10^{10} раз. Соответствующая интенсивность изменяется от величин порядка 10^{-1} до 10^{-19} частиц на квадратный сантиметр в единицу телесного угла за секунду, т. е. в 10^{18} раз. В этих случаях обычная (линейная) шкала, на которой расстояние от начала координат пропорционально самой величине, очень неудобна. Если, например, 10 см на горизонтальной шкале соответствуют диапазону энергий от 0 до 10^{19} эв, то все измерения, скажем, в пределах от 10^9 до 10^{11} эв попадут в анекдотически малый интервал шкалы — в 10^{-7} см!

Таким образом, если нужно перекрыть большой диапазон значений по одной оси, то приходится пользоваться такой шкалой, которая «сжимается» по мере увеличения этих значений. Таким свойством и обладает *логарифмическая шкала*, которая применяется, например, на горизонтальной и вертикальной осях на рис. 74. В логарифмической шкале расстояние от начала координат пропорционально не самому числу, а его десятичному логарифму. В этом случае расстояние между 10^9 и 10^{11} равно расстоянию от 10^{17} до 10^{19} (поскольку $\log_{10} 10^{11} - \log_{10} 10^9 = 11 - 9 = 2$ и $\log_{10} 10^{19} - \log_{10} 10^{17} = 19 - 17 = 2$).

Вообще расстояние между двумя точками пропорционально *отношению* двух соответствующих чисел (100 в приведенном выше примере), а не их арифметической разности.

ЭНЕРГИЯ И ИМПУЛЬС

Кинетическая энергия частицы — это энергия, которую приобретает частица в результате движения. Когда пучок частиц (например, электроны в катодно-лучевой трубке) налетает на мишень, то кинетическая энергия частиц превращается в тепло. Количество выделившегося тепла пропорционально произведению числа частиц, попавших на мишень, на их среднюю кинетическую энергию. Кинетическая энергия в соответствии с классической (т. е. нерелятивистской) механикой связана со значением массы частицы m и ее скоростью v следующим уравнением:

$$E = \frac{1}{2} mv^2. \quad (\text{IV.1})$$

При определенной скорости, как видно из уравнения, кинетическая энергия частицы пропорциональна ее массе. Например, α (альфа)

частица, которая почти в 4 раза тяжелее протона, обладает кинетической энергией, почти в 4 раза большей, чем протон, движущийся с той же скоростью.

Из уравнения следует также, что при определенной массе кинетическая энергия пропорциональна квадрату скорости, так что если скорость частицы удваивается, то ее кинетическая энергия увеличивается в 4 раза.

Уравнение (IV.1) считалось абсолютно точным до тех пор, пока Альберт Эйнштейн не показал, что в действительности оно дает лишь приближенное выражение для кинетической энергии. Это уравнение точнее всего в случае, когда скорость частицы очень мала по сравнению со скоростью света ($c = 300\,000\text{ км/сек}$), но оно совершенно неверно для скоростей, сравнимых с c . Правильное выражение для кинетической энергии, полученное на основании теории относительности Эйнштейна, имеет вид

$$E = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right). \quad (\text{IV.2})$$

В уравнении (IV.2), так же как и в классическом уравнении (IV.1), E пропорционально m . Более того, можно показать математически, что в пределе при $v \rightarrow 0$ уравнение (IV.2) переходит в (IV.1), как и должно быть. Но из уравнения (IV.2) следует, что при значениях v , сравнимых с c , E возрастает быстрее, чем квадрат скорости. Действительно, когда v приближается к c , то значение $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ стремится к нулю, а отношение $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ и вместе с ним кинетическая энергия E стремится к бесконечности. Физически это означает, что никакая материальная частица не может двигаться со скоростью, равной скорости света, просто потому, что для сообщения частице бесконечно большой энергии требуется затратить бесконечно большую работу.

Величина mc^2 , множитель в правой части уравнения (IV.2), обычно называется *энергией покоя* частицы. В соответствии с эйнштейновским принципом эквивалентности массы и энергии, который гласит: энергия = масса $\cdot c^2$ (IV.3), энергия покоя mc^2 представляет собой энергию, «запасенную» в массе частицы. Эта энергия выделяется при аннигиляции частицы. Так, при аннигиляции электрона и позитрона (см. главу 6) образуются два фотона, полная энергия которых равна произведению величины c^2 на суммарную массу электрона и позитрона.

Перепишав уравнение (IV.3) в виде

$$\text{Масса} = \frac{\text{Энергия}}{c^2}. \quad (\text{IV.4})$$

мы видим, что, согласно принципу эквивалентности, энергии приписывается определенная масса (т. е. определенная механическая инерция).

В такой форме принцип эквивалентности был проверен экспериментально. Когда, например, два протона и два нейтрона соединяются в ядро гелия (или α -частицу, см. Приложение VII), то выделяется некоторое количество энергии ΔE . Прямыми измерениями показано, что масса α -частицы немного меньше суммы

масс двух протонов и двух нейтронов. Этот *дефект массы* точно равен величине $\Delta E/c^2$.

Верхняя кривая рис. 96 представляет собой график уравнения (IV.2). Отношение кинетической энергии к энергии покоя, E/mc^2 , отложено по горизонтальной оси в логарифмическом масштабе. По вертикальной оси (в линейной шкале) отложено отношение скорости частицы к скорости света, v/c . Как видно из графика, скорость частицы приближается к скорости света, когда E значительно больше mc^2 (например, v становится больше, чем 0,95; c при E большей $2,2 mc^2$). В этом случае частицу называют релятивистской. Ясно, что легкие частицы (например, электроны) становятся релятивистскими при меньших энергиях, чем тяжелые (например, протоны).

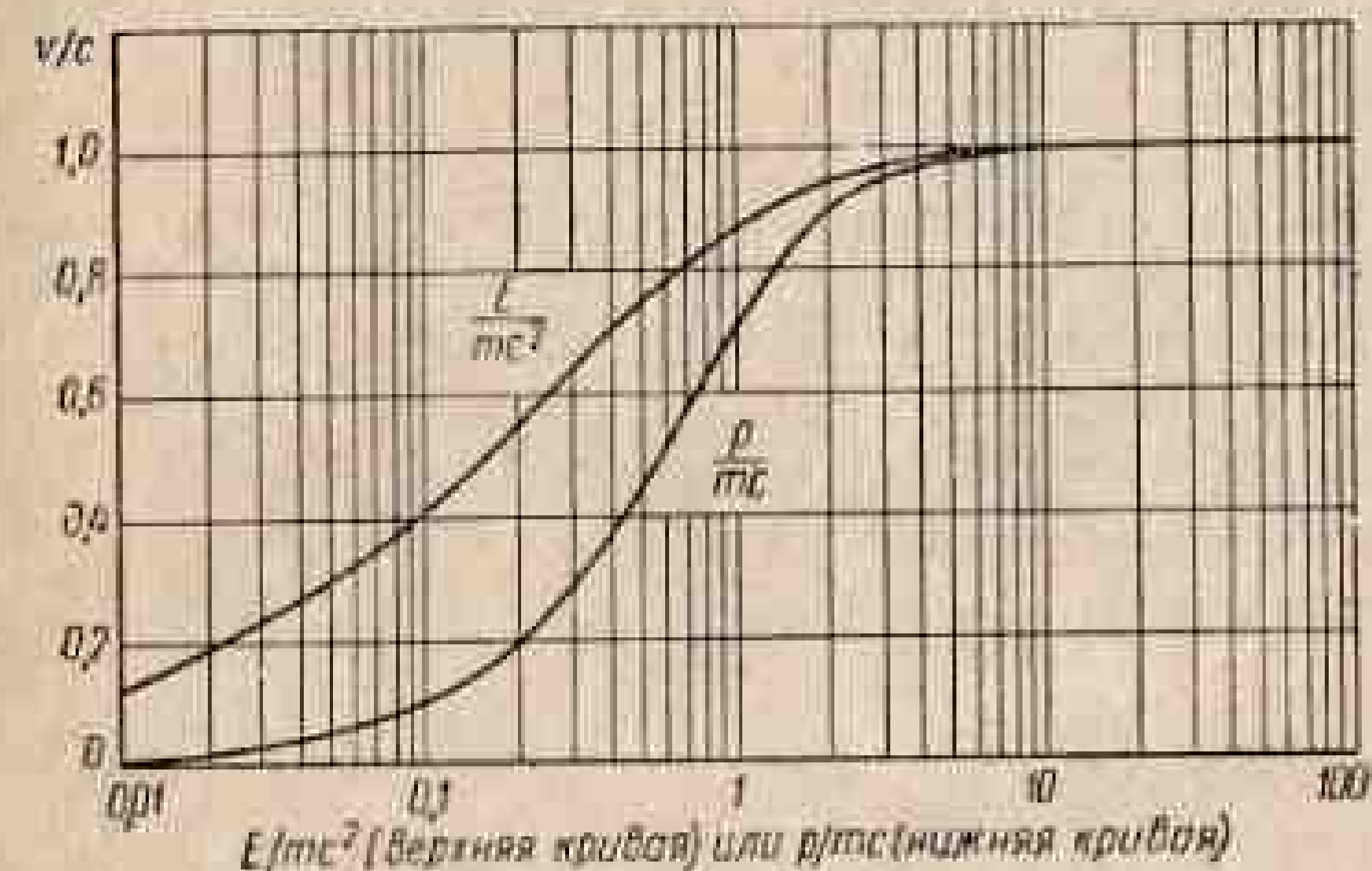


Рис. 96. Зависимость скорости частицы v , выраженной в долях скорости света c от кинетической энергии E , деленной на энергию покоя mc^2 , и от импульса p , деленного на mc .

Другой характеристикой движущейся частицы служит *импульс* p . В отличие от кинетической энергии скалярной величины импульс — это вектор. Физически импульс связан со вторым законом механики, который утверждает, что если на данное тело в течение времени t действует сила F , то импульс этого тела увеличивается на величину Ft . Таким образом, начальный импульс тела p_1 , конечный импульс p_2 и сила F связаны между собой следующим векторным уравнением:

$$p_2 - p_1 = Ft. \quad (\text{IV.5})$$

Классическая механика дает для импульса p_1 частицы с массой m , движущейся со скоростью v такое (приближенное) выражение

$$p = mv. \quad (\text{IV.6})$$

Согласно этому уравнению импульс частицы пропорционален массе частицы и изменяется как первая степень скорости. Точное релятивистское уравнение для импульса имеет вид

$$p = \frac{m}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \cdot v. \quad (IV.7)$$

Как и кинетическая энергия, импульс частицы неограниченно возрастает, когда ее скорость приближается к скорости света. Соотношение между импульсом и скоростью графически представлено нижней кривой рис. 96. По горизонтальной оси отложена величина $pc/mc^2 = p/mc$, т. е. произведение импульса на скорость света, отнесенное к энергии покоя частицы. По вертикальной оси отложено отношение v/c . Из сравнения двух кривых рис. 96 видно, что для релятивистских частиц величина кинетической энергии E близка к pc :

$$E \approx pc. \quad (IV.8)$$

[Этот же вывод можно получить аналитически из уравнений (IV.2) и (IV.7). Так как при скорости v , близкой к скорости света c , отношение $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ велико по сравнению с 1, то уравнение (IV.2) можно записать в виде $E \approx mc^2/\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Но в том же предположении в уравнении (IV.7) v можно заменить на c , т. е. $p = mc/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ и $pc \approx E$.]

Из уравнения (IV.2) получаем $E + mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$, и поэтому $\frac{mc^2}{E + mc^2} = \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Если масса частицы равна нулю, то левая часть уравнения также обращается в нуль. Тогда $\sqrt{1 - v^2/c^2} = 0$ и $v = c$. Так, мы пришли к выводу, что частица с нулевой массой покоя (например, фотон или нейтрино) должна всегда двигаться со скоростью света независимо от величины энергии.

Приложение V

ЭЛЕКТРОНВОЛЬТ

Кинетическая энергия электрона в электронном пучке определяется разностью потенциалов (напряжением) между накалимым катодом (отрицательным электродом) и анодом (положительным электродом). Кинетическая энергия пропорциональна этой разности потенциалов и не зависит от расстояния между электродами и их формы. Например, разность потенциалов, равная 20 000 вольт, будет сообщать всем электронам одну и ту же кинетическую энергию в любом электронно-лучевом приборе, и эта энергия всегда будет вдвое больше энергии электронов, ускоренных напряжением в 10 000 вольт.

Это обстоятельство дает возможность ввести удобную единицу для измерения энергии отдельных частиц. Электрон, ускоренный разностью потенциалов в 20 000 вольт, обладает кинетической энергией 20 000 электронвольт (сокращенно 20 000 эв). Соответственно элек-

трон, ускоренный напряжением 10 000 вольт, приобретает кинетическую энергию 10 000 эв и так далее. Иными словами, основная единица энергии (электронвольт) — это энергия, приобретаемая электроном, ускоренным разностью потенциалов в 1 вольт. Обычно используются производные единицы энергии

$$1 \text{ кэв} = 1000 \text{ эв (тысяча электронвольт)},$$

$$1 \text{ Мэв} = 10^6 \text{ эв (миллион электронвольт)},$$

$$1 \text{ Гэв} = 10^9 \text{ эв (миллиард электронвольт)}.$$

Таким образом, если говорят, что α -частица имеет энергию 4,9 Мэв, то это значит, что ее кинетическая энергия равна энергии электрона, ускоренного напряжением 4,9 миллиона вольт.

Любая заряженная частица ускоряется под действием электрического напряжения. Из общих законов механики следует, что частицы с одинаковым электрическим зарядом, ускоренные одинаковым напряжением, приобретают одинаковую кинетическую энергию, даже если их массы различны. Например, протон, ускоренный напряжением в 10 000 вольт, получает такую же кинетическую энергию (10 кэв), как и электрон, ускоренный той же разностью потенциалов; с другой стороны, частицы с разными зарядами, ускоренные одинаковой разностью потенциалов, приобретают кинетические энергии, пропорциональные их зарядам. Напряжение в 10 000 вольт (ускоряющее однократно заряженный протон до кинетической энергии 10 кэв) сообщает ядру гелия (которое содержит два протона и поэтому имеет двойной элементарный заряд) кинетическую энергию 20 кэв.

Энергию покоя частицы тоже удобно выражать в электронвольтах. Для электрона $mc^2 = 0,51 \text{ Мэв}$, а для протона $mc^2 = 938 \text{ Мэв}$.

В практической системе единиц энергия измеряется в джоулях. Один джоуль примерно равен энергии, необходимой, чтобы поднять груз весом 1,1 кг на высоту 10 см. Джоуль равен $6,24 \cdot 10^8 \text{ эв}$.

Приложение VI

ВЫЧИСЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ЖЕСТКОСТИ

Если заряженная частица движется в однородном магнитном поле, то радиус R траектории, которую она описывает в плоскости, перпендикулярной силовым линиям (см. главу 5), может быть получен из условия равенства двух сил — центробежной силы и силы Лоренца. Если m — масса частицы, v — ее скорость и v мало по сравнению со скоростью света, то центробежная сила равна mv^2/R . Если B — напряженность магнитного поля, а электрический заряд частицы равен Z элементарным зарядам e , то сила Лоренца равна $ZeBv$. Приравняв эти силы, получаем:

$$mv^2/R = ZeBv$$

или

$$BR = \frac{mv}{Ze}. \quad (VI.1)$$

Так как mv равно импульсу частицы p , то уравнение (VI.1) можно записать так:

$$BR = \frac{p}{Ze}. \quad (\text{VI. 2})$$

Это уравнение, которое утверждает, что *магнитная жесткость равна отношению импульса частицы к ее заряду*, получено в рамках классической механики. (Использованное выражение для центростремительной силы справедливо лишь при $v \ll c$). Оказалось (доказательство мы здесь опустим), что уравнение (VI.2) верно и в релятивистской области для скоростей, близких к c . [Уравнение (VI.1) в релятивистской механике несправедливо.]

В приложении IV мы видели, что для релятивистских скоростей кинетическая энергия E стремится к величине pc . В этом случае уравнение (VI.2) дает

$$cBR = \frac{pc}{Ze} = \frac{E}{Ze}.$$

Из определения электронвольта (см. Приложение V) следует, что отношение E/e — это энергия частицы в электронвольтах. (Частица с зарядом e , пройдя разность потенциалов V , приобретает кинетическую энергию $E = eV$, следовательно, $V = E/e$.) Обозначая через $E_{эв}$ энергию частицы в электронвольтах, получаем

$$cBR = \frac{E_{эв}}{Z}. \quad (\text{VI.3})$$

Уравнение (VI.3) численно верно лишь тогда, когда все входящие в него величины измерены в одной и той же системе единиц. Разность потенциалов мы измеряли в вольтах, вольт относится к системе единиц МКС. В этой системе длина R измеряется в метрах, а напряженность магнитного поля B в веберах на квадратный метр. Скорость света c соответственно должна быть измерена в метрах в секунду, и ее численное значение будет приблизительно равно $3 \cdot 10^8$. Величину B обычно измеряют в гауссах, а не в веберах на квадратный метр ($1 \text{ гаусс} = 10^{-4} \text{ вебер/м}^2$), так же как и R обычно измеряют не в метрах, а в сантиметрах ($1 \text{ см} = 10^{-2} \text{ м}$). Тогда коэффициент пропорциональности между $E_{эв}/Z$ и BR становится равным $3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-2} = 300$. Таким образом, мы получили обычную формулу, приведенную в главе 5:

$$300 B (\text{гаусс}) \cdot R (\text{см}) = \frac{E_{эв}}{Z}. \quad (\text{VI.4})$$

НЕЙТРОН И СТРУКТУРА АТОМНОГО ЯДРА

Нейтрон — это частица с массой, почти совпадающей с массой протона, но лишенная электрического заряда. Экспериментально нейтрон был обнаружен в 1932 г. Джеймсом Чедвиком. С открытием нейтрона была, наконец, решена загадка о структуре атомного ядра, которая волновала физиков в течение многих лет. Еще в начале нашего столетия стало ясно, что массы всех атомных ядер приблизительно кратны массе протона. Но заряды ядер были бы меньше, если бы ядра состояли целиком из протонов. Например, было показано экспериментально, что ядро гелия весит примерно столько же, сколько четыре протона, но его заряд равен лишь двум протонным зарядам.

Высказывалось предположение о том, что атомные ядра состоят из протонов и электронов. Если бы, например, ядро гелия состояло из четырех протонов и двух электронов, то отрицательный заряд электронов компенсировал бы заряд двух протонов и ядро обладало бы положительным зарядом, равным двум элементарным зарядам. Однако эта гипотеза встретила серьезные возражения. Отметим лишь одно из них. Принцип неопределенности — основной закон квантовой механики — утверждает, что если частица находится в объеме с линейными размерами r , то она не может быть в покое, она должна обладать импульсом порядка h/r , где h — постоянная Планка, равная $6,61 \cdot 10^{-27} \text{ эрг-сек.}$

Зная радиус ядра, можно рассчитать импульс, а значит, и энергию гипотетических электронов в ядре. Эта энергия оказалась больше 100 Мэв. Такой результат противоречит исходной гипотезе — электроны с такой большой кинетической энергией не могут быть заключены в пределах ядра*. Более того, электроны, испускаемые при β -распаде радиоактивных ядер, обладают значительно меньшими энергиями в пределах от долей Мэв до нескольких Мэв.

После открытия нейтронов стало ясно, что ядро состоит не из протонов и электронов, а из протонов и нейтронов. Так, ядро гелия содержит два протона и два нейтрона; ядро кислорода — восемь протонов и восемь нейтронов. Полное число протонов и нейтронов в ядре — это *массовое число* A ; число протонов в ядре (равное числу положительных электрических зарядов ядра) — это *заряд ядра* Z . Таким образом, для ядра гелия $A = 4$, $Z = 2$. Та же самая информация обычно записывается в более компактной форме: ${}^4_2\text{He}$, где нижний индекс дает заряд ядра, а верхний — массовое число. В такой системе записи ядро кислорода обозначается как ${}^{16}_8\text{O}$ (т. е. $A = 16$, $Z = 8$).

Ядра с одинаковым зарядом Z могут иметь различные массовые числа A . Атомы, ядра которых имеют различные массовые числа, но одинаковые заряды (а значит, и одинаковое число электронов вокруг каждого ядра), называются *изотопами*. В химических реакциях изотопы ведут себя практически одинаково, поскольку для химических превращений существенна лишь структура электрон-

* Эта трудность не имеет места для протонов, поскольку при данном импульсе энергия протона гораздо меньше энергии электрона.

ной оболочки атома, а не масса его ядра. По этой причине все изотопы одного и того же элемента помещаются в одной и той же клетке периодической таблицы элементов (отсюда и название «изотопы», происходящее от двух греческих слов, означающих «тот же самый» и «место»). Например, магний, двенадцатый элемент периодической таблицы ($Z = 12$), имеет три изотопы с массовыми числами 24, 25 и 26 соответственно (${}^{24}_{12}\text{Mg}$, ${}^{25}_{12}\text{Mg}$, ${}^{26}_{12}\text{Mg}$).

Если верна гипотеза о том, что в состав ядра входят лишь протоны и нейтроны, то электроны, испускаемые при β -распаде радиоактивных ядер, должны возникать в момент распада. Но по закону сохранения электрического заряда рождение электрона должно

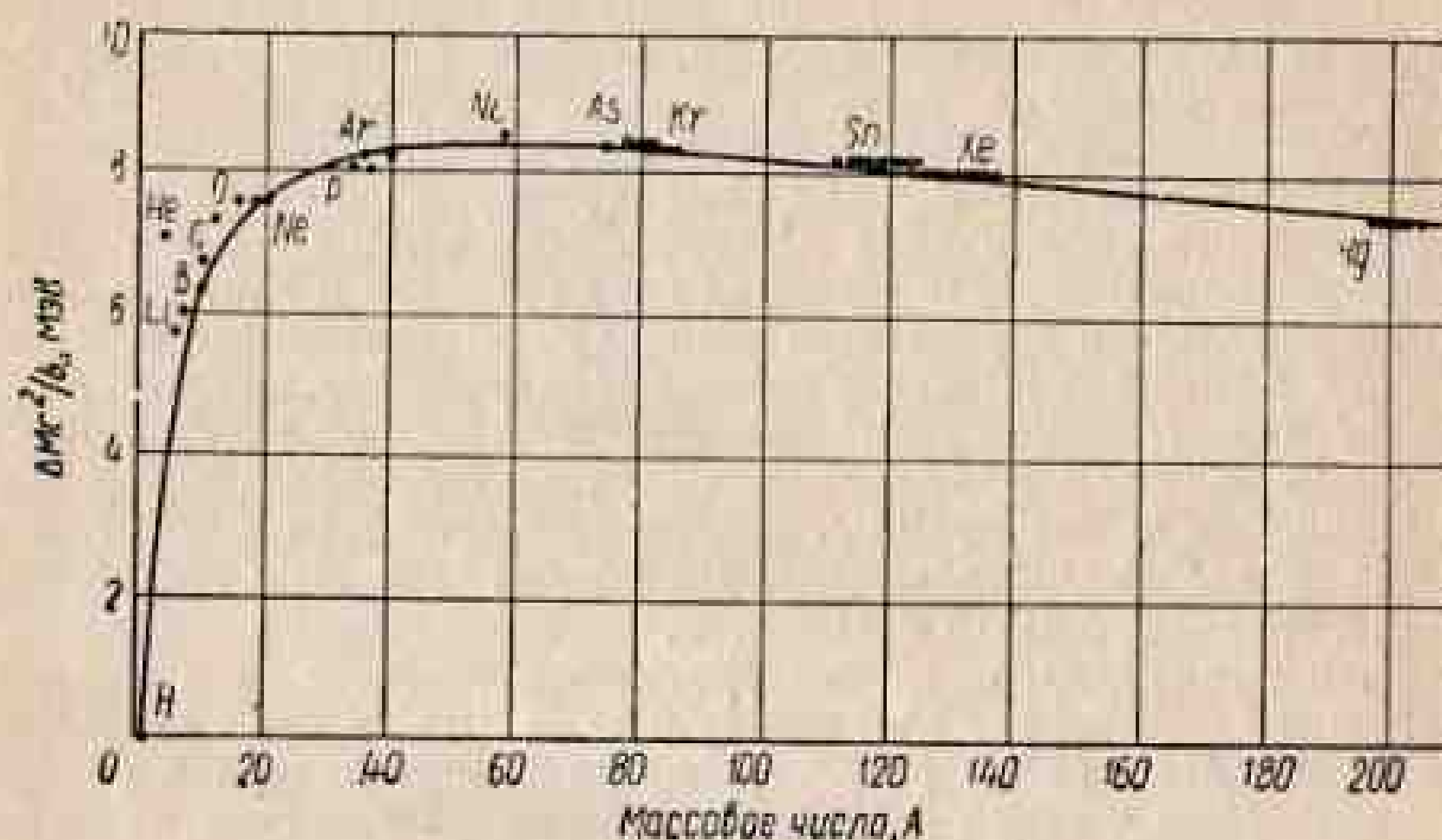


Рис. 97. Энергия, приходящаяся на частицу ($\Delta Mc^2/A$), необходимая для расщепления ядра на составляющие его протоны и нейтроны, в зависимости от массового числа ядра A . Точками показаны экспериментальные результаты, полученные Астоном.

сопровождаться рождением положительного заряда, равного по величине отрицательному заряду электрона. В соответствии с принятой моделью положительный заряд возникает, когда один из нейтронов в ядре превращается в протон. Распад свободного нейтрона (т. е. нейтрона, не входящего в состав ядра) на протон и электрон наблюдался экспериментально (см. Приложение VIII).

Следует отметить, что все ядра весят несколько меньше, чем составляющие их протоны и нейтроны, взятые отдельно. Поскольку протоны и нейтроны в ядре находятся под действием сил притяжения (известных под названием *ядерных сил*), то требуется затратить определенное количество энергии ΔE , чтобы разделить ядро на составляющие его частицы. И, наоборот, такое же количество энергии освобождается, когда свободные протоны и нейтроны соединяются в ядро. Это выделение энергии сопровождается уменьшением суммарной массы частиц на величину ΔM , которая по уравнению Эйнштейна равна

$$\Delta E = \Delta M \cdot c^2.$$

Дефект массы ΔM — это одна из наиболее важных экспериментальных величин в ядерной физике. Первые точные измерения дефектов масс были выполнены английским физиком Ф. В. Астоном в первой четверти нашего века. Его результаты приведены в виде графика на рис. 97. По горизонтальной оси отложены массовые числа A . По вертикальной оси отложено значение энергии $\Delta M \cdot c^2$ (соответствующей наблюдаемому дефекту массы для разных ядер), деленной на массовое число A и выраженной в МэВ. Величина $\Delta Mc^2/A$ представляет собой *среднюю энергию, приходящуюся на одну частицу*, которую необходимо затратить для того, чтобы расщепить ядро на отдельные протоны и нейтроны.

Как видно из рис. 97, эта энергия имеет максимальную величину (около 8,5 МэВ) для ядер с массовыми числами от 50 до 60. Поэтому именно эти ядра — самые стабильные ядра, встречающиеся в природе.

Приложение VIII

НЕЙТРИНО

В отличие от нейтрона открытие *нейтрино* было результатом скорее теоретических соображений, нежели экспериментального исследования. До этого уже было известно, что если данный радиоактивный элемент испускает α -частицы, то все эти частицы обладают одной и той же энергией (или, самое большее, несколькими строго определенными значениями энергии). В это же время было обнаружено, что при β -распаде испускаются электроны, имеющие различные энергии в интервале практически от нуля и до некоторого максимального значения, характерного для данного радиоактивного ядра.

Физики были сильно озадачены этим фактом. Трудно было поверить в то, что β -распад одних и тех же ядер может идти множеством различных способов, при каждом из которых выделяется свое количество энергии. Затруднение было так велико, что некоторые физики даже начали сомневаться, не нарушается ли в случае β -распада закон сохранения энергии.

Выход из этого положения нашел в 1931 г. физик-теоретик Вольфганг Паули. Паули постулировал, что при β -распаде испускается не одна частица (отрицательный электрон), а две частицы одновременно. Одной из частиц был электрон, а другой — какая-то неизвестная ранее «невидимая» частица, или частица, проходящая сквозь вещество, не производя в нем никаких возмущений, по которым ее можно было бы зарегистрировать. В соответствии с этим предположением при распаде определенных ядер должна была освобождаться всегда одна и та же энергия. Но эта энергия могла делиться между электроном и гипотетической невидимой частицей множеством различных способов. Новая частица не могла иметь никакого электрического заряда, иначе ее присутствие было бы обнаружено по цепочке ионов на ее пути. Далее, чтобы согласовать все известные экспериментальные данные по β -лучам, необходимо было предположить, что масса неизвестной частицы мала по сравнению с электроном или, возможно, равна нулю.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

В табл. 2 дается перечень известных элементарных частиц и описание некоторых их свойств. В этой таблице частицы разделены на четыре семейства:

1. *Фотон* (γ) — квант электромагнитного излучения, т. е. квант поля электромагнитных сил.

2. *Нейтрино* [которые, как мы упоминали в Приложении VIII, существуют в двух видах (ν_e и $\bar{\nu}_e$)], *электроны* [отрицательные (e^-) и положительные (e^+)] и *μ -мезоны* [отрицательные (μ^-) и положительные (μ^+)]. Нейтрино, электроны и μ -мезоны образуют семейство *лептонов*.

3. *π -Мезоны* [положительные (π^+), отрицательные (π^-) и нейтральные (π^0)] и *k -мезоны* [положительные (k^+), отрицательные (k^-) и нейтральные (k^0)]. π -Мезоны можно считать квантами поля ядерных сил — сил, связывающих нейтроны и протоны в ядре. K -мезоны — это разновидность «тяжелых» π -мезонов.

4. *Нуклоны* [протоны (p) и нейтроны (n)] и различные *гипероны* [лямбда-частицы (Λ), сигма-частицы (Σ) и кси-частицы (Ξ), среди гиперонов есть нейтральные и заряженные].

Эти частицы образуют семейство *барионов*.

Все члены третьего и четвертого семейства сильно взаимодействуют друг с другом посредством ядерных сил. Такого взаимодействия нет между двумя лептонами или между лептоном и частицей из другого семейства.

Все электрически заряженные элементарные частицы имеют заряды, равные положительному или отрицательному элементарному заряду ($1,6 \times 10^{-19}$ кулона). В таблице символ «+» в колонке «заряд» указывает на положительный элементарный заряд, символ «-» соответствует отрицательному элементарному заряду, а символ «0» — отсутствию заряда. Закон сохранения заряда утверждает, что в изолированной системе разность между суммарным числом положительных элементарных зарядов и суммарным числом отрицательных элементарных зарядов всегда остается постоянной. Например, рождение отрицательного электрона в процессе аннигиляции фотона сопровождается рождением положительного электрона (позитрона), так что суммарный заряд до и после этого события остается равным нулю.

Каждой частице соответствует античастица с той же самой массой. При встрече частица и античастица аннигилируют. Освобожденная при этом энергия (равная суммарной массе частиц, умноженной на квадрат скорости света) выделяется в форме фотонов или быстро движущихся частиц (например, при аннигиляции отрицательного и положительного электронов образуются два фотона; аннигиляция протона и антипротона ведет к образованию π -мезонов). И, наоборот, все пары частица — античастица могут быть образованы за счет преобразования части энергии в массу покоя.

Если частица нестабильна, то нестабильна и соответствующая ей античастица, причем средние времена их жизни равны. Более

Идея Паули была подхвачена и развита дальше Энрико Ферми, который показал в 1934 г., что гипотетическая частица позволяет объяснить свойства β -распада не только качественно, но и количественно.

Вначале новую частицу называли «нейтроном». Но после открытия Чедвика она была переименована в *нейтрино* (по-итальянски — «маленькая нейтральная частица»). Нейтрино так слабо взаимодействует с веществом, что физикам не удавалось их обнаружить вплоть до тех пор, когда спустя почти 20 лет были созданы мощные источники нейтрино — ядерные реакторы. (Эксперимент был выполнен в 1955 г. Ф. Райнесом, К. Коуэном и другими.)

Свободные нейтроны *n* самопроизвольно распадаются на протоны *p*, электроны e^- и нейтрино ν :



со средним временем жизни около 16,6 минуты. (Распад был зарегистрирован впервые в 1950 г.) Масса нейтрона m_n немного меньше массы протона m_p , разность соответствующих энергий покоя ($m_n c^2 - m_p c^2$) составляет приблизительно 1,3 Мэв. Эта энергия расходуется на энергию покоя и кинетическую энергию электрона и на энергию нейтрино, испускающихся при распаде. Распад нейтрона, связанного в ядре, может быть ускорен, замедлен или совсем запрещен в результате сильного взаимодействия нейтрона с другими нейтронами и протонами ядра.

Как отмечалось в Приложении VII, распад нейтрона в радиоактивных ядрах — это основной процесс, ответственный за β -распад. И наоборот, в ядрах, которые не испытывают β -распада, нейтроны стабильны.

Несмотря на то что свободные протоны стабильны (потому что они имеют энергию покоя, меньшую, чем нейтроны), протоны, входящие в ядра некоторых искусственно полученных элементов, испытывают спонтанный распад на нейтрон, позитрон и нейтрино (вернее, антинейтрино $\bar{\nu}$, см. Приложение IX)



Этот процесс ответствен за так называемую положительную β -активность ядер.

Нейтрино образуются не только при распаде нейтронов и протонов (при спонтанном или индуцированном), но также и при спонтанном распаде других элементарных частиц, таких, как μ -мезон и π -мезон (см. главы 8 и 9). Однако, как было недавно показано (Л. Ледерманом, М. Шварцем и Р. Дж. Стейнбергом в 1962 г.), нейтрино, испускаемые при распаде π -мезонов на μ -мезоны (ν_μ), отличны от нейтрино, испускаемых вместе с электроном при переходе нейтрона в протон и наоборот (ν_e). Таким образом, в природе существуют по крайней мере два различных сорта нейтрино (и антинейтрино).

того, продукты распада одной из них представляют собой античастицы продуктов распада другой. Если частица заряжена положительно, то античастица — отрицательно, и наоборот.

В семействах лептонов и барионов нейтральная частица физически отлична от своей античастицы. Так, нейтрон (n) отличается от антинейтрона ($\bar{n}$), поскольку при распаде нейтрона образуются протон (положительно заряженный) и отрицательный электрон, а при распаде антинейтрона образуются антипротон (отрицательно заряженный) и положительный позитрон. Но в двух других семействах нейтральные частицы тождественны своим античастицам (например, π^0 -мезон совпадает со своей античастицей).

Лептоны и барионы подчиняются двум законам сохранения, которые формально похожи на закон сохранения электрического заряда, законам сохранения лептонов и сохранения барионов.

Первый закон утверждает, что в изолированной системе разность между суммарным числом лептонов и суммарным числом антилептонов остается постоянной. Например, в процессе распада

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

был один лептон (μ^-) до распада и стало два лептона (e^- и ν_μ) и один антилептон ($\bar{\nu}_e$) после распада.

Аналогично второй закон утверждает, что в изолированной системе разность между суммарным числом барионов и суммарным числом антибарионов остается постоянной. Например, при аннигиляции протона и антипротона вначале есть один барион и один антибарион, а в конце нет ни барионов, ни антибарионов.

В принципе совершенно всё равно, какую из частиц пары называть частицей, а какую — античастицей. Однако обычно принято считать электрон и протон (которые представляют собой строительные кирпичики обычного вещества) частицами. При этом однозначно определяется характер всех остальных барионов. Например, обычный нейтрон — это барион, потому что он распадается на протон и две частицы, не принадлежащие к семейству барионов. Закон сохранения барионов обеспечивает стабильность вещества, благодаря ему протон не может распасться, скажем, на пять позитронов и четыре электрона, хотя этот распад не запрещен законами сохранения энергии и электрического заряда.

Для других двух семейств не существует закона сохранения, подобного законам сохранения лептонов и барионов.

Таблица 2

Элементарные частицы

Семейство	Группа	Частица	Античастица	Масса в массах электрона	Заряд	Среднее время жизни, сек	Схемы распада
Фотон	Фотон	γ	γ	0	0	Стабилен	
Лептоны	Нейтрино	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	Стабильно	
		ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	»	
		ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	»	
		ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	»	
π - и k -Мезоны	Электроны	e^-	e^+	1	-	Стабилен	
		e^+	e^-	1	+	»	
	μ -Мезоны	μ^-	μ^+	206,8	-	$2,20 \cdot 10^{-6}$	$e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$
		μ^+	μ^-	206,8	+	$2,20 \cdot 10^{-6}$	$e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
	π -Мезоны	π^0	π^0	264	0	$1,80 \cdot 10^{-16}$	
		π^+	π^-	273	+	$2,55 \cdot 10^{-8}$	
	k -Мезоны	k_1^0	k_1^0	974	0	$9,2 \cdot 10^{-11}$	$\pi^+ + \pi^-$
		k_2^0	k_2^0	974	0	$5,62 \cdot 10^{-8}$	$\pi^0 + \pi^0$

Продолжение табл. 2

Семейство	Группа	Частица	Античастица	Масса в массах электрона	Заряд	Среднее время жизни, сек	Схемы распада
							$\mu^+ \rightarrow \nu_\mu + \pi^+$ $\mu^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \pi^-$ $e^+ \rightarrow \nu_e + \pi^+$ $\pi^+ \rightarrow \pi^- + \pi^0$ $\pi^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0$ $\mu^+ \rightarrow \nu_\mu$ $\mu^+ \rightarrow \nu_\mu + \pi^0$ $e^+ \rightarrow \nu_e + \pi^0$ $\pi^+ \rightarrow \pi^0$ $\pi^+ \rightarrow \pi^0 + \pi^-$ $\pi^+ \rightarrow \pi^0 + \pi^0$ $\mu^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ $\mu^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \pi^0$ $e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + \pi^0$ $\pi^- \rightarrow \pi^0$ $\pi^- \rightarrow \pi^- + \pi^+$ $\pi^- \rightarrow \pi^0 + \pi^0$
		k^+	k^-	966	+	$1,23 \cdot 10^{-8}$	
					-	$1,23 \cdot 10^{-8}$	

Барiony	Нуклоны	n	p	n	p	Масса в массах электрона	Заряд	Среднее время жизни, сек	Схемы распада
									$p \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$ $\bar{p} \rightarrow e^+ + \nu_e$
Гипероны		Λ				2183	0	$1,01 \cdot 10^3$	
			n			1839	0	$1,01 \cdot 10^3$	
			p			1836	+	Стабилен	
						1836	-		
		Σ^0		$\bar{\Sigma}^0$		2183	0	$2,62 \cdot 10^{-10}$	
		Σ^+		$\bar{\Sigma}^+$		2332	0	$1,0 \cdot 10^{-14}$	
		Σ^-		$\bar{\Sigma}^-$		2332	0	$1,0 \cdot 10^{-14}$	
						2328	+	$7,88 \cdot 10^{-11}$	
						2328	-	$7,88 \cdot 10^{-11}$	
						2341	-	$1,58 \cdot 10^{-10}$	
						2341	+	$1,58 \cdot 10^{-10}$	
		Ξ^0		$\bar{\Xi}^0$		2566	0	$3,06 \cdot 10^{-10}$	
						2566	0	$3,06 \cdot 10^{-10}$	
						2580	-	$1,74 \cdot 10^{-10}$	
						2580	+	$1,74 \cdot 10^{-10}$	

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие переводчиков	3
Предисловие автора	5
Глава 1. Излучение из мирового пространства	7
Глава 2. Атомы и излучения	18
Глава 3. Природа космических лучей	30
Глава 4. Озадачивающие находки	44
Глава 5. Земля как магнит для анализа космических лучей	54
Глава 6. Позитроны и рождение пар	75
Глава 7. Электроны, фотоны и ливни	83
Глава 8. Мю-мезоны	95
Глава 9. Пи-мезоны	116
Глава 10. Ядерные взаимодействия космических лучей	134
Глава 11. Что такое космические лучи и что с ними происходит в атмосфере?	151
Глава 12. Гигантские ливни в атмосфере	166
Глава 13. Радиационный пояс Земли	180
Глава 14. Космические лучи и Солнце	190
Глава 15. Происхождение космических лучей — нерешенная проблема	203
Эпилог	217
Приложение I. «Масса на единицу площади»	219
Приложение II. Степени числа 10	220
Приложение III. Логарифмическая шкала	221
Приложение IV. Энергия и импульс	221
Приложение V. Электронвольт	224
Приложение VI. Вычисление магнитной жесткости	225
Приложение VII. Нейтрон и структура атомного ядра	227
Приложение VIII. Нейтрино	229
Приложение IX. Элементарные частицы	231

Бруно Росси

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Тематический план 1966 г. № 92

Редактор М. М. Григорьев Сдано в набор 23/XII 1965 г.
 Обложка художника Подписано в печать 27/IV 1966 г.
 В. Г. Прохорова Бум. 64×168/32. № 2. Физич. печ. л. 7,37
 Техн. редактор Е. И. Мавель Привед. п. л. 12,3. Уч.-изд. л. 12,02.
 Корректор Н. А. Смирнова Заказ изд. 1440. Тираж 27 000 экз.
 Заказ тип. 2083 Цена 66 коп.
 Атомиздат, Москва, К-31,
 ул. Жданова, 5/7.

Московская типография № 4 Главополиграфпрома
 Комитета по печати при Совете Министров СССР
 Б. Переяславская, 46