

РЕФЕРАТЫ

НОВЫЕ РАБОТЫ В ОБЛАСТИ ИЗУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

С. Н. Вернов, Ленинград

Измерение энергии космических частиц *

Впервые Д. В. Скобелыным были обнаружены в камере Вильсона пути частиц, обладающие энергией больше $15 \cdot 10^6$. Им было предположено, что эти частицы создаются космическими лучами. В последующих опытах Кунце ¹ и Андерсона ² при помощи применения сильных магнитных полей

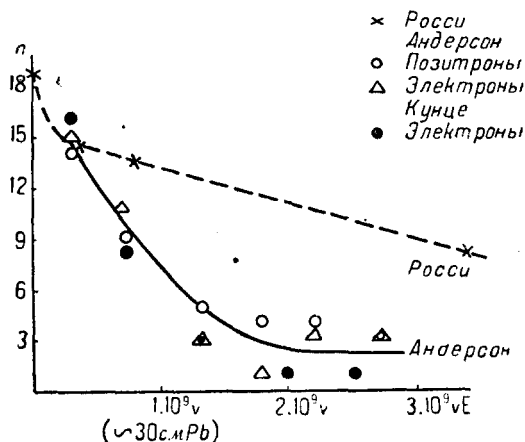


Рис. 1.

[18 400 гаусс (Кунце) и 15 000 гаусс (Андерсон)] удалось измерить энергию этих частиц. Приблизительно половина частиц имеет отрицательный заряд (электроны). Другие же обладают положительным зарядом и являются, по всей вероятности, позитронами. На рис. 1 представлена кривая, дающая распределение числа частиц по энергиям.

Из кривой можно заключить, что в пучке космических лучей присутствуют ионизирующие частицы с энергией нескольких миллиардов вольт. Однако число таких частиц невелико и недостаточно для объяснения большой проникающей способности космических лучей. Следует указать, что часть частиц, энергия которых измерялась, могла являться вторичными, созданными космическими лучами в окружающих камеру Вильсона предметах. Последняя возможность в сильной степени усугублялась ввиду присутствия вблизи камеры больших масс тяжелых элементов, вследствие чего измерения велись в области так называемого переходного слоя.

* Ср. статьи Л. В. Мысовского, Успехи физических наук, 10, вып. 1, 1930; 13, 518, 1933.

Измерение проникающей способности космических частиц

Опыты Боте и Кольгерстера впервые показали, что в пучке космических лучей имеются ионизирующие частицы большой энергии, способные вызывать одновременные разряды в двух счетчиках Гейгера-Мюллера, поставленных один над другим. Эти опыты были продолжены Росси¹. Помещая между тремя счетчиками слой свинца толщиной до 101 см, он измерял поглощение свинцом частиц, вызывающих совпадение между разрядами в счетчиках. Сравнение, полученное кривой поглощения с кривой поглощения космических лучей, найденной Миликэном и Камероном, по измерениям ионизации на различных глубинах под водой показывает хорошее согласие. Таким образом проникающая способность корпускулярных лучей, вызывающих совпадения, не отличается от той же для первичных космических лучей. Это в сильной степени подтверждает гипотезу Боте и Кольгерстера о корпускулярной природе космических лучей. Однако опыты Кунце и Андерсона, произведенные при помощи камеры Вильсона, находятся в противоречии с опытами Росси. В то время как проникающая способность корпускулярных лучей по опытам Росси соответствует той же для первичных космических лучей, значение энергии для тех же самых лучей по измерениям Кунце и Андерсона значительно меньше, чем это необходимо для объяснения столь большой проникающей способности. Исходя из опытов Росси следовало бы ожидать значительно большего числа частиц большей энергии (пунктирная кривая, рис. 1). Вычисления энергии частиц сделаны на основании данных Андерсона о потере энергии космических частиц при прохождении через свинец ($35 \cdot 10^6$ на 1 см свинца). Эти данные получены при помощи измерения (в камере Вильсона с магнитным полем) энергии космической частицы до и после прохождения пластинки свинца в 1,34 см Pb. Противоречие между опытами Кунце и Андерсона, с одной стороны, и Росси, с другой стороны, пока не поддается объяснению. Контрольные опыты Росси показали, что образование вторичных лучей и ливней под действием космических лучей не в состоянии заметно исказить полученные результаты.

Создание ливней частиц под действием космических лучей

(Изучение при помощи счетчиков Гейгера-Мюллера) *

Образование вторичных от космических лучей было открыто Д. В. Скобельцыным при помощи камеры Вильсона. Потом Росси³, Фюнфер⁴ и Соьер⁵ изучали их свойства при помощи установок, состоящей из трех счетчиков (рис. 2а). Когда счетчики находятся в таком положении, каждое тройное совпадение должно быть обусловлено появлением не менее двух частиц. При помещении свинца над счетчиками, число тройных совпадений увели-

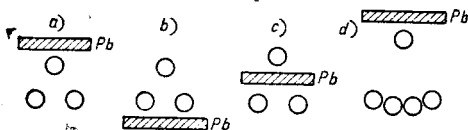


Рис. 2.

валось, так как часть вторичных создавалась в свинце. При увеличении толщины свинца число совпадений растет, но затем достигает максимума, положение которого определяет проникающую способность вторичных лучей. Измерения Росси и Фюнфера дают одно и то же значение для положения максимума для свинца (1,6 см Pb). Опыты Фюнфера, произведенные при помощи установки, состоящей из пяти счетчиков (рис. 2 d), показали, что при помещении свинца над счетчиками наблюдается значительное число пятикратных совпадений. Пятикратные совпадения могут

* Ср. статью Блэккета и Оккиаджи, Успехи физических наук, 13, 491, 1933.

быть вызваны появлением одновременно не менее четырех частиц, т. е. ливней, созданных космическими лучами. Тот факт, что проникающая способность частиц, вызывающих пятикратные совпадения, равна той же для частиц, вызывающих тройные совпадения, доказывает, что, повидимому, большинство вторичных являются частицами из ливней. При дальнейшем увеличении толщины свинца над счетчиками число тройных (или пятикратных) совпадений уменьшается в соответствии с поглощением в свинце лучей, создающих ливни. Эти лучи не могут быть первичными космическими лучами, так как их коэффициент поглощения $0,18 \text{ см}^{-1}$ в Рb много больше коэффициента поглощения даже самой мягкой компоненты космических лучей ($0,05 \text{ см}^{-1}$ Рb). Сойер высказывает предположение, что эти лучи являются, в свою очередь, вторичными, созданными космическими лучами в легких элементах.

Опытами Фюнфера было доказано, что число тройных совпадений возрастает при помещении свинца под счетчиками (рис. 2b). В этом случае для ливневых частиц понижающаяся способность оказывается значительно меньше (максимум при $0,6 \text{ см Рb}$), что соответствует иному направлению движения (снизу вверх). В опытах Сойера свинец, в котором создавались ливни, помещался между счетчиками. Проникающая способность частиц оказалась малой (максимум при $0,7 \text{ см Рb}$), т. е. близкой той же для случая, когда свинец помещался под счетчиком и сильно отличной от проникающей способности ливневых частиц, двигающихся сверху вниз из свинца, находящегося выше счетчика ($1,6 \text{ см Рb}$). Это заставляет нас предположить, что хотя бы одна из частиц в ливне, созданном в свинце между счетчиком, должна двигаться снизу вверх. И мы можем высказать гипотезу о том, что частицы, создающие ливни, являются не ионизирующими частицами.

Отклонения космических лучей в земном магнитном поле

А. Эффект широты. Гипотеза о корпускулярной природе космических лучей, высказанная Боте и Кольгерстером, требовала фактов, свидетельствовавших об отклонении космических лучей в магнитном поле земли. Вот почему в течение многих лет ряд исследователей изучали зависимость интенсивности космических лучей от магнитной широты. Однако окончательное решение этого вопроса было получено очень недавно, хотя ряд указаний о наличии такого эффекта был уже и раньше.

Трудности в обнаружении эффекта широты бесспорно были связаны с весьма малой величиной этого эффекта. Так, по данным Клэя интенсивность космических лучей на экваторе меньше, чем на широте в 45° N , всего лишь на $12,4\%$. Комптон дает 14% и Милликэн 7% . Неудача многих прежних опытов была обусловлена также тем, что интенсивность космических лучей меняется только между экватором и широтой в 43° N , оставаясь неизменной при дальнейшем увеличении широты. Результаты измерений могут быть приведены в согласии с теорией, разработанной Леметром и Валларта. Для объяснения наблюдаемого эффекта следует предположить, что в пучке космических лучей присутствуют заряженные частицы в интервале между $6 \cdot 10^9 \text{ V}$ и $30 \cdot 10^9 \text{ V}$. Весьма интересными опытами Милликэна⁷ было обнаружено увеличение эффекта широты при измерениях на высоте до 6 км над уровнем моря. Так, при давлении 330 мм Hg эффект широты (между 34° N и 8° N) составляет 39% вместо 7% для уровня моря. По данным Комптона мы получаем увеличение от 14% (уровень моря) до 33% (высота 4360 м , давление 450 мм Hg). Следует отметить, что, как показывают вычисления, лишь частицы, прошедшие путь сотен километров в земном магнитном поле, в состоянии до такой степени отклониться в нем, чтобы вызвать заметные изменения в интенсивности космических лучей на различных широтах. Так как практически граница атмосферы лежит ниже таких высот, то следовательно, исключается возможность объяснения эффекта широты отклонением вторичных лучей в земном магнитном поле.

Б. Азимутальная асимметрия космических лучей. Из теории Леметра и Валларта следовало, что отклонение космических частиц в магнитном поле земли должно обуславливать асимметрию в распределении их по направлениям. Так, для положительно заряженных частиц число идущих с запада должно превышать число с востока. Для отрицательных частиц картина получается обратная. Опыты последнего года, произведенные при помощи счета числа совпадений в счетчиках Гейгера-Мюллера, нашли существование такого эффекта. Он соответствует отклонению в земном магнитном поле положительно заряженных частиц. Опыты Джонсона⁸ показали, что на широте 29° N число частиц, идущих с запада под углом 45° с вертикалью на 100% , превосходят число частиц под тем же углом с востока. В хорошем согласии с этим находятся опыты Альвареса и Комптона, при помощи которых была найдена асимметрия в 12% при том же угле с вертикалью и на той же широте, но на высоте 2 км над уровнем моря. При больших широтах асимметрия сказывается значительно слабее. Из многих исследователей, занимавшихся этим вопросом, лишь Джонсону и Стефенсону¹⁰ удалось обнаружить, что на широте 51° интенсивность космических лучей, идущих с запада под углом 30° с вертикалью, на 3% больше, чем с востока (возможная ошибка $0,7\%$)^{*}.

Изучение космических лучей в стратосфере

Изучение космических лучей в стратосфере имеет особое значение ввиду того, что оно позволяет раскрыть природу первичных космических частиц. При измерениях на поверхности земли результаты в сильной степени зависят от свойств вторичного излучения, созданного космическими лучами в атмосфере. Начало этим исследованиям было положено опытами Регенера¹¹, Пикара и Козинса¹² и Боуэна и Милликэна¹³, которые сводились к измерению ионизации, создаваемой космическими лучами на больших высотах. Регенер и Боуэн и Милликэн пользовались автоматическими установками с фотозаписью, посылаемыми в стратосферу при помощи шаров-зондов. Регенеру удалось произвести измерения до высоты в 28 км (22 мм Hg), Боуэну и Милликэну — до 18 км (60 мм Hg). Данные Регенера и Боуэна и Милликэна хорошо согласуются между собой, данные же Пикара и Косина оказываются на 40% больше. Однако характер кривой, представляющей зависимость интенсивности от давления, создаваемого слоями атмосферы, находящимися над прибором у всех наблюдателей, одинаков. До высоты 9 км, ионизация растет в соответствии с коэффициентом поглощения космических лучей 0,6 на 1 м воды. При дальнейшем увеличении высоты (т. е. уменьшении давления) рост ионизации замедляется и при наибольших высотах (давление 22 мм Hg) стремится к постоянному значению. Вид кривой является довольно неожиданным и делает невозможным ряд предположений о природе первичных космических лучей. Так, для фотонов кривая должна была бы иметь максимум и спадать при приближении к границе атмосферы. Если фотоны еще до входа в земную атмосферу проходили слой какой-либо материи, то они достигают земли в сопровождении созданных ими вторичных лучей. В данном случае следует ожидать, что ионизация будет расти с высотой (до границы атмосферы) в соответствии с коэффициентом поглощения космических лучей 0,6 на 1 м воды. Как видно, ни одно из высказанных предположений о природе первичных космических лучей не позволяет объяснить экспериментальной кривой. Предположения о корпускулярной природе первичных лучей приводит к аналогичным трудностям^{**}. Следует упомянуть, что по-

^{*} В последнее время азимутальная асимметрия в 15% найдена и на магнитном экваторе (H. Johnson, Phys. Rev. 41, 836, 1933). На основании теории Леметра и Валларта подобный эффект мог бы быть вызван лишь благодаря присутствию в пучке космических лучей частиц с энергией в $30 \cdot 10^9$ V.

^{**} Однако, если учесть тот факт, что космические лучи идут со всех сторон, то, как в последнее время показал Гросс (Gross, Zs. Phys. 83, 214, 1933) для параллельного пучка космических лучей следует ожидать наличие максимума ионизации при давлении в 130 мм Hg.

стоянство ионизации вблизи границы атмосферы также указывает на отсутствие в мировом пространстве мягких лучей и в том числе и γ лучей наших обычных радиоактивных элементов.

Разрушение ядра космическими лучами

Еще в 1927 г. при продолжительной регистрации ионизации, создаваемой космическими лучами, Гофманом было обнаружено появление несколько раз в сутки ионизационных толчков, свидетельствовавших о создании миллионов пар ионов. Вначале можно было думать о чисто электрической природе этих толчков (образование искр и т. п.). Однако опыты показали их исчезновение при помещении приборов в шахтах на большую глубину под землей. Это впервые указало на связь между ионизационными толчками и проникающей радиацией. Окружая ионизационную камеру свинцом, Штейнке и Шиндлер ¹⁴ нашли, что значительное количество частиц, вызывающих ионизационные толчки, создаются космическими лучами в свинце, окружающем камеру. При увеличении толщины свинца от 10 см до 20 см число толчков возросло почти в 2 раза ¹⁵. Отсюда проникающая способность частиц должна быть не меньше 10 см Pb, а потому несомненная энергия не меньше $2 \cdot 10^{10}$ V. Если предположить, что ионизационные толчки создаются ливнем частиц, ионизирующая способность которых близка к той же для быстрых электронов (40 ионов на 1 см), то для объяснения огромного количества созданных во время толчка ионов следует допустить, что число таких частиц в ливне может достигать 1000. Это число можно значительно уменьшить, предполагая наличие более сильно ионизирующих частиц. Однако при изменении давления газа в ионизационной камере число ионов отдельного толчка менялось так же, как и общая ионизация, создаваемая космическими лучами. Поэтому следует думать, что природа частиц в ливне и космически одинакова. В очень интересных опытах Суанна и Монтгомери ¹⁶ изучалось появление толчков в двух ионизационных камерах, расположенных одна над другой. Кроме того, три счетчика Гейгера-Мюллера были расположены вокруг обеих камер и фиксировались совпадения между разрядами в трех счетчиках. Оказалось, что довольно значительный процент толчков появлялся одновременно в двух камерах и сопровождался тройным совпадением в счетчиках. Статистическое рассмотрение показывает, что для объяснения этого факта следует предположить наличие одновременно не менее 100 частиц. Что касается до природы лучей, вызывающих такие ливни, то опыты Штейнке, Гастелля и Ни (Nie) указывают на явно выраженное соответствие между числом ионизационных толчков и барометрическим давлением. Это делает ответственным за создание толчков мягкую компоненту космических лучей, поглощение которой в атмосфере должно быть значительно и сильно меняться при изменении атмосферного давления.

Проникающая радиация и грозовые облака

Размеры облаков в 1—3 км и градиент поля в них, близкий к искровому $10^4 \frac{V}{cm}$, приводит к значениям разности потенциалов на границе облака порядка 10^9 V, т. е. вполне достаточный для создания искусственных космических лучей. Однако измерения ионизации, созданной космическими лучами, произведенные Шонландом ¹⁷, показали, что в присутствии грозовых облаков над местом измерения увеличение ионизации не наблюдается. Напротив, грозовые облака вызывают иногда уменьшение ионизации, причем это уменьшение более ярко выражено при преобладании положительных зарядов, чем при преобладании отрицательных. В первом случае оно колеблется между 12% и 39%, во втором между 0% и 10%. Автор объясняет этот эффект торможением первичных космических частиц в электрическом поле выше облака. Более сильное действие облаков, в которых преобладает положительный заряд, указывает на то, что космические лучи представляют собой поток положительно

заряженных частиц. Связь между грозowymi облаками и проникающей радиацией изучалась также Шонландом и Вильеном¹⁸ при помощи установки регистрирующей, с одной стороны, разряды в счетчике Гейгера-Мюллера и, с другой стороны — молниевые вспышки. Было установлено, что ряд грозowych облаков, удаленных от места наблюдения на расстоянии более 25 км, создают в момент появления молниевой вспышки частицы большой энергии. Число импульсов в счетчике перед молниевой вспышкой также превышало число импульсов после вспышки. Все это говорит в пользу создания проникающей радиации в электрических полях грозowych облаков. Однако направление электрического поля в облаках таково, что электроны, ускоренные им, должны двигаться снизу вверх и, лишь отклоняясь в магнитном поле земли, могут достигнуть ее поверхности в расстоянии нескольких десятков километров от места зарождения. И действительно, опыты Шонланда и Вильена показали, что только облака, удаленные на расстоянии не меньше 25 км, являются эффективными для создания проникающей радиации. Однако не всякие грозowe облака в состоянии создавать проникающую радиацию. Для объяснения этого факта авторам пришлось допустить, что распределение электричества в облаке является также решающим в процессе ускорения электронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kunze, Zs. Phys., **80**, 559, 1933.
 2. Anderson, Phys., Rev., **41**, 466, 1933.
 3. Rossi, Zs. Phys., **82**, 151, 1933.
 4. Fünfer, Zs. Phys., **83**, 92, 1933.
 5. Sawyer, Phys. Rev., **44**, 241, 1933.
 6. J. Clay, Proc. Roy. Acad. (Amsterdam), **30**, 1115, 1927, **31**, 1091, 1928; **33**, 711, 1930; Naturwiss., **20**, 687, 1932; A. H. Compton, Phys. Rev., **43**, 387, 1933; R. A. Millikan, Phys. Rev., **43**, 666, 1933.
 7. Millikan, Phys. Rev., **44**, 246, 1933.
 8. Johnson, Phys. Rev., **43**, 834, 1933.
 9. Alvarez a. Compton, Phys. Rev., **43**, 835, 1933.
 10. Johnson a. Stevenson, Phys. Rev., **44**, 125, 1933.
 11. Regener, Naturwiss., **20**, 659, 1933.
 12. Piccarda a. Cosyns, C. R., **195**, 604, 1932.
 13. Bowen a. Millikan, Phys. Rev., **42**, 695, 1933.
 14. Steinke u. Schindler, Naturwiss., **20**, 491, 1932.
 15. Messerschmidt, Naturwiss., **21**, 285, 1933.
 16. Swann a. Montgomery, Phys. Rev., **44**, 52, 1933.
 17. Schonland, Proc. Roy. Soc. A **130**, 37, 1930.
 18. Schonland, Proc. Roy. Soc., A **140**, 314, 1933.
-