

Космическое излучение и фундаментальные проблемы физики

53*

Исследование космических лучей расширило наше понимание фундаментальных вопросов физики, поскольку обнаружилось, что ранее употреблявшиеся понятия имеют лишь ограниченную область применения. Предоставляя сведения о поведении материи в самых малых (элементарные частицы) и в самых больших масштабах (Вселенная), они как нельзя лучше способствовали переосмыслению повседневных понятий, применяющихся в физике, и подтолкнули физиков к поискам новых понятий.

С самого своего открытия примерно 60 лет назад космическое излучение играет очень заметную роль в развитии физики. От первых известий о лучах, приходящих на Землю из космического пространства, захватывающе интересная история вела к обнаружению в их составе высоко-энергетических частиц, новых частиц с неожиданными свойствами, новых фундаментальных симметрий в законах природы, в конечном счете — к обогащению наших знаний об остаточной материи и магнитных полях в межзвездном пространстве, а также о возможных источниках космического излучения. Не стану, однако, прослеживать здесь исторический ход событий. Ограничусь в своем докладе теми фундаментальными проблемами физики, на которых более или менее существенно сказался рост наших сведений о космических лучах. Какова связь между этим весьма специальным разделом физики и фундаментальной проблематикой, затрагивающей первые основания всей нашей науки? Взаимодействие между ними впервые наметилось в начале 30-х годов, когда космическое излучение сыграло видную роль в одном из значительнейших физических открытий нашего века, открытии позитрона. Само по себе это открытие было сделано, собственно говоря, не в ходе работы над космическим излучением; создавая свою теорию электрона, Дирак предсказал существование полу-

* © Kosmische Strahlung und fundamentale Probleme in der Physik. R. Piper und Co., Verlag, München 1977.

жительно заряженного антипода электрона. Однако первые убедительные факты, подтверждающие это, были установлены Андерсоном, а также Блэкетом и Оккиалини именно на материале космического излучения⁵⁴. Первые снимки каскадов в камере Вильсона, в которой фотоны порождали пары «электрон-позитрон», а эти частицы при прохождении через материю снова порождали фотоны, предоставили несомненное доказательство существования позитронов и правильности теории Дирака. Вскоре затем удалось наблюдать позитроны и в ядерных процессах; я имею в виду бета-распад.

Следовало бы, пожалуй, добавить несколько слов о принципиальном значении этого открытия. Вплоть до того времени физики придерживались — можно сказать, более или менее бессознательно — взглядов древнегреческого философа Демокрита. Считалось, что если без конца делить материю, то мы в конечном счете остановимся на ее мельчайших частицах, уже не поддающихся дальнейшему делению, почему им и дали название «атомы». Атомы трактовались как неделимые, неизменные единицы материи, как кирпичики, из которых вся она построена; что касается ощущимых свойств разных видов материи, считалось, что они обусловлены относительным положением и движением атомов, или, как мы теперь сказали бы, элементарных частиц. Вся эта картина, какою бы правдоподобной она ни казалась, была полностью разрушена теорией Дирака и ее последствием — открытием позитрона. Суть дела заключалась не столько в существовании новой, дотоле неизвестной частицы — позднее была обнаружена масса новых частиц без каких-либо серьезных последствий для оснований физики, — сколько в открытии нового типа симметрии, сочетания частицы с античастицей, что было тесно связано с Лоренцовой группой специальной теории относительности и с превращением энергии в материю и наоборот. В нерелятивистской физике число частиц любого рода являлось константой движения, подобно энергии или импульсу. В релятивистской физике число это уже нельзя было считать надежным квантовым числом. Атом водорода, к примеру, не обязательно состоит из протона и электрона; его можно считать состоящим из одного протона, двух электронов и одного позитрона, хотя эта последняя конфигурация вносит лишь незначительную релятивистскую поправку в полную волновую функцию водорода. Одним из следствий этой ситуации явилось предположение, что при высокоэнергетическом столкновении двух

частиц может возникнуть большее число новых частиц, в принципе любое, ограниченное лишь законом сохранения энергии, импульса, изоспина и т. д. Это предположение также удалось подтвердить на космическом излучении.

Собственно говоря, уже в конце 30-х годов Блэй и Вамбахер обнаружили на фотографических пластинах, засвеченных космическим излучением высоко над поверхностью Земли, так называемые «звезды» — процессы, при которых из определенной точки пластины исходило большое число следов. По-видимому, то или иное атомное ядро подвергалось удару частицы с очень высокой энергией и под ее напором излучало целый ряд различных частиц. Интерпретировать эти «звезды» было непросто, поскольку началом процесса мог оказаться род каскада в ядре наподобие хорошо известного электронно-позитронного каскада, сопровождающегося испарением ядра. Полученные результаты не являлись поэтому прямым доказательством порождения многих частиц при столкновении всего лишь двух частиц; догадка оставалась пока догадкой. Но с течением времени эксперименты с космическими лучами удалось усовершенствовать, и спустя 15 лет факт порождения многих частиц был определено доказан.

Эти данные означали, что понятия «делится» и «состоит из» имеют ограниченную область применения. Как в теории относительности понятие «одновременно» или в квантовой механике понятия «положение» и «скорость» применяются лишь с характерными ограничениями, утрачивая свой смысл при некритическом употреблении не в том контексте, точно так же и понятия «деление» и «состав» имеют корректный смысл только в строго определенных ситуациях. Лишь когда элементарная частица распадается вследствие воздействия на нее малых энергий на две или более части, масса покоя которых в сравнении с этими малыми энергиями очень велика, мы имеем право говорить, что данная элементарная частица состоит из этих частей, может распадаться на них. Во всех прочих случаях слова «делится» или «состоит из» не имеют четкого смысла. При столкновении двух частиц высоких энергий происходит, по сути дела, создание новых частиц из кинетической энергии. Энергия становится материей, принимая форму элементарной частицы. Впрочем, различие между элементарной частицей и составленной из частиц системой опять-таки лишено четкого смысла. Частицы суть стационарные состояния физической системы «материя». Все эти очень важные и принципиальные выводы

были получены на экспериментальной базе исследования космических лучей.

Другим интересным результатом исследования космических лучей было открытие мюонов, или мю-мезонов, Неддермайером и Андерсоном в 1937 году. Вначале этот объект был ошибочно принят за частицу, которую Юкава предсказал как материальный носитель сильного взаимодействия между нуклонами. Но вскоре выяснилось, что взаимодействие мю-мезонов с тяжелыми частицами — протоном и нейтроном — слишком невелико, что мю-мезон не может считаться причиной сильного взаимодействия внутри ядра. Мю-мезон оказался чем-то вроде более тяжелого родственника электрона, отличаясь от этого последнего только своей более крупной массой. Открытие мю-мезонов не привело к столь же фундаментальному изменению в основаниях физики, как открытие позитрона. Однако оно выявило один интересный факт, касающийся спектра частиц. Этот спектр распадается на *две очень слабо связанные системы термов* — адроны и лептоны. Подобные слабо связанные системы термов хорошо известны из наблюдения оптических спектров атомов. Аналогичны ли причины такого распределения в обоих случаях, остается пока еще открытым вопросом. Мю-мезоны наряду с нейтрино представляют собой наиболее проникающую часть космического излучения и играют поэтому важную роль при определении интенсивности космического излучения в зависимости от высоты в атмосфере.

Стоило бы упомянуть еще и о другом, поистине примечательном случае, когда мю-мезоны способствовали прояснению фундаментальнейших вопросов. Незадолго перед войной теория относительности не признавалась политическими правителями в нашей стране, причем идея замедления времени при движении тел критиковалась как абсурд и как чисто теоретическая спекуляция. Проходили даже специальные разбирательства по вопросу о том, следует ли преподавать теорию относительности в университетах. На одном из таких обсуждений я выступил с предположением, что время распада мю-мезонов должно зависеть от скорости этих последних; мю-мезоны, скорость движения которых приближается к скорости света, распадаются медленнее тех, чья скорость меньше, — такое предсказание позволяла сделать теория относительности. Предсказание экспериментально подтвердилось; замедление времени удалось непосредственно пронаблюдать, и тем самым путь для университетских лекций о теории относительности был

расчищен. Я остался навсегда благодарен мю-мезонам за эту поддержку.

Вскоре после войны Пауэлл в Бристоле открыл пи-мезон, играющий очень важную роль в большинстве феноменов космического излучения. Этот объект удовлетворяет всем условиям, которые Юкава сформулировал для материального носителя сильного взаимодействия; как выяснилось позднее, он был не единственной частицей этого рода, но в качестве адрона с наименьшей массой он был вскоре обнаружен почти во всех процессах очень высоких энергий. К тому же пи-мезон распадается на один мю-мезон и одно нейтрино, так что попутно было прояснено возникновение мю-мезонов.

Подобно мю-мезонам, пи-мезон тоже не привел к фундаментальным сдвигам в основаниях физики. Он подтвердил лишь, что разнообразные частицы являются стационарными состояниями системы «материя», отличающимися друг от друга разным поведением при преобразовании основной группы. Группы более фундаментальны, чем частицы.

В те годы помимо Лоренцовой группы теории относительности из фундаментальных групп была известна только изоспиновая. Она была открыта в 1932 году в связи с исследованиями по ядерной физике; но лишь пи-мезоны позволили вполне понять ее фундаментальный характер. Эксперименты над пи-мезоном в космическом излучении показали, что изоспиновая группа дает точную симметрию для сильного взаимодействия, и лишь электромагнитное взаимодействие, а также более слабые взаимодействия нарушают эту симметрию. Для истолкования этих данных послужила гипотеза о том, что закон природы, лежащий в основе спектра частиц, строго инвариантен при изоспиновом преобразовании и что отклонения от этой симметрии вызываются асимметрическим, вырожденным основным состоянием. Аналогичные ситуации хорошо известны в квантовой механике твердых тел.

Почти одновременно с пи-мезонами в космическом излучении были открыты другие частицы — тяжелее пи-мезонов и немного «странные» в своем поведении. У них была довольно-таки большая продолжительность жизни — порядка 10^{-10} сек, и поэтому их следы можно было наблюдать в камере Вильсона или в эмульсиях. Однако эту большую продолжительность жизни было невозможно понять, учитывая лишь уже известные к тому времени симметрии и соответствующие квантовые числа

(барионное число, изоспин, орбитальный момент); они заставляли ожидать намного более краткую продолжительность жизни, и потому поведение новых частиц было странным. Верную интерпретацию дал Пайс в 1952 году; он ввел новое квантовое число, так называемую странность, и соответствующую симметрию, или свойство преобразований. Таким образом, исследование космических лучей привело к открытию новой группы симметрии; а поскольку, как я уже упомянул выше, группы важнее, чем частицы, это стало еще одним очень существенным вкладом в фундаментальные проблемы физики.

В то время большинство физиков считали, что можно обнаружить гораздо большее число элементарных частиц, если удастся сделать наблюдаемыми объекты с очень краткой продолжительностью жизни. Частицы суть не что иное, как стационарные состояния системы «материя», а потому следовало считаться с существованием многочисленных разнородных частиц с очень краткой продолжительностью жизни у большинства из них. Подобные объекты поддаются наблюдению лишь в качестве так называемых *резонансных состояний*, а для их выявления требовалась более совершенная статистическая база, чем та, которую могло предоставить наблюдение космических лучей. Физикам — специалистам по элементарным частицам посчастливилось, потому что как раз тогда были сооружены и введены в действие первые большие ускорители — космotron в Брукхейвене, беватрон в Беркли и протонный синхротрон ЦЕРН в Женеве. Соответственно физика элементарных частиц для получения своих важнейших результатов была вынуждена надолго переключиться на эти большие ускорители, тогда как исследованием космических лучей занялись астрофизики. Этот сдвиг был неизбежным, но он не всегда отвечал желаниям физиков — специалистов по элементарным частицам; произошла прискорбная перемена.

Ушли в прошлое романтические времена, когда изучение снимков камеры Вильсона в какой-нибудь высокогорной лаборатории можно было сочетать с лыжными походами и альpinизмом или когда экспериментальные аэростаты нужно было, как это приходилось делать нашим итальянским друзьям, запускать с помощью самолета или судна итальянского военно-морского флота на берегу одного из прекрасных средиземноморских островов. Теплое средиземноморское солнце, несомненно, содействовало научному успеху экспериментов. Но те счастливые времена тे-

перь кончились, и исследования элементарных частиц предстояло теперь проводить в «деловой» атмосфере гигантских ускорительных устройств.

В астрофизике космическое излучение стало новым ценным инструментом, обещавшим расширение познаний за пределы той информации, которую давало наблюдение видимого или инфракрасного свечения звезд. Ближайшей проблемой являлось, естественно, происхождение космических лучей. Уже Форбуш установил, что низкоэнергетическая часть космического излучения иногда посыпается Солнцем, имея источником известные турбулентные явления на его поверхности. Но очень скоро стало ясно, что окончательный ответ на вопрос о возникновении космического излучения предполагает основательное знание природы электромагнитных полей в звездной плазме, внутри нашей планетной системы — здесь я могу напомнить о солнечном ветре, впервые изученном Бирманом, — внутри нашей Галактики и, наконец, во внегалактическом пространстве. Исследования в этой области стали за последние годы главной составной частью астрофизики, и с помощью космических лучей было получено очень много информации. Что касается их происхождения, то сейчас, похоже, все считают главным источником высокоенергетического космического излучения сверхновые звезды и их реликты, пульсары. Но не буду входить в детали астрофизики, а вернувшись к своему первоначальному вопросу: в каком плане космическое излучение касается фундаментальных проблем физики?

Я только что упомянул о *пульсарах*, которые принадлежат к числу звезд с наибольшей наблюдавшейся до сих пор плотностью. Плотность их материи сравнима с плотностью атомного ядра. Их сплачивают силы тяготения. Существование подобных звезд выдвигает две фундаментальные проблемы; одна касается отношения гравитации к прочим силам взаимодействия внутри материи, другая — того, каким должно быть уравнение состояния для материи с такой или с еще большей плотностью. Однако прежде чем перейти к названным проблемам, я хотел бы перечислить несколько примеров высокой ценности исследования космических лучей для физики элементарных частиц даже *после* появления больших ускорителей.

Частицы космического излучения имеют энергию вплоть до 10^{19} электронвольт, и само собой ясно, что столь высокие энергии не могут быть достигнуты на ускорителях, по крайней мере в ближайшем будущем. Поэтому

столкновения частиц с такими огромными энергиями могут исследоваться лишь в космическом излучении. И вот, хотя малая интенсивность и малая статистическая частота ограничивают здесь точность получаемых данных, все же был поднят вопрос о том, как в области крайне высоких энергий изменяются в зависимости от энергии поперечное сечение или другие характеристики каскадов. Существует ли за пределами энергий обычных частиц или резонансных состояний такая область асимптотического приближения, где уже невозможно обнаружить и нельзя ожидать никаких новых процессов или драматических изменений? Полученная на материале космического излучения информация по этому вопросу едва выходила за пределы туманного намека; тем не менее она стимулировала теоретические исследования, более 20 лет назад приведшие к предположению, что в диапазоне высоких энергий величина полного сечения для столкновений между адронами должна возрастиТЬ пропорционально квадрату логарифма энергии. Соответственно следовало ожидать, что область асимптотического приближения существует; хотя общие сечения в этой области не могли быть константными, они должны были возрастать логарифмически. Эта догадка подтвердилась в новейших экспериментах с накопительными кольцами протонного синхротрона в Женеве и с ускорителем «Батавия»⁵⁵.

Асимптотическая область начинается, по-видимому, при энергии около 10 ГэВ в системе центра масс и в случае столкновений между протонами; она исследовалась на аккумулирующих кольцах женевского циклотрона вплоть до энергии 50 ГэВ. Существенным вкладом исследований на установке «Батавия» явился тот результат, что логарифмическое приращение может наблюдаться и при столкновении пи-мезонов или К-мезонов с протонами. Это стало сильным аргументом в пользу предположения, что общая асимптотическая область существует и что она достигнута в названных экспериментах. Для интерпретации этой асимптотической области вполне достаточно понимать частицы просто как почти сферические облака непрерывной материи, не касаясь того, из каких именно частиц могли бы состоять эти облака. Такая картина вполне приемлема, поскольку выражение «состоит из», собственно говоря, утратило свой смысл в физике элементарных частиц.

Существует еще одна проблема, занимающая в течение последних десяти лет умы ядерных физиков. Мы знаем, что группа SU_3 в спектре частиц играет определенную

роль в качестве приближенной симметрии. Простейшее представление группы SU_3 — трехмерное, и соответственно такому представлению можно было бы ожидать триплета частиц; электрический заряд этих частиц должен был составлять $\frac{1}{3}$ или $\frac{2}{3}$ элементарного заряда, и им дали название «кварки». Однако в экспериментах с большими установками эти частицы до сих пор не удавалось наблюдать. Поэтому сложилось мнение, что кварки обладают большой массой и сцепляются между собою очень большими энергиями связи, так что даже большие ускорители недостаточны для их разделения. Космическое излучение и тут сослужило хорошую службу, поскольку энергия первичных космических лучей может в тысячу и более раз превышать максимальную энергию частиц на большой ускорительной установке. Тот факт, что даже в космическом излучении кварки не были обнаружены, является очень сильным доводом в пользу их несуществования. Это можно было бы считать теперь уже окончательно установленным, и мне представляется поэтому крайне трудным придать сколько-нибудь определенный смысл высказыванию «протон состоит из трех кварков», коль скоро ни выражение «состоит из», ни слово «кварки» не обладают сами достаточно определенным смыслом. Как же тогда следует толковать подобное высказывание? Аналогичный скепсис оправдан и в отношении других частиц, которые были предсказаны, но не были обнаружены; W -мезоны, партоны, глюоны, магнитные полюса, «очарованные» частицы. Поскольку их нельзя наблюдать ни на больших ускорительных установках, ни в космическом излучении, то эти понятия едва ли могут считаться полноценными инструментами феноменологического описания. Мы сталкиваемся здесь с ситуацией, уже хорошо известной нам из квантовой механики. Наш повседневный язык провоцирует нас на постановку вопросов, не имеющих никакого смысла, например: «Какова орбита электрона, движущегося вокруг атомного ядра?» Из-за соотношений неточности ни слово «орбита», ни слово «движется» не имеют тут строгого определения; следовательно, вопрос не имеет смысла.

Так мы подходим к центральной проблеме, тесно связанной с уроками, которые нам дает космическое излучение. Но сначала я скажу об эмпирическом аспекте. Мне хотелось бы пояснить его основополагающее значение в физике элементарных частиц и в физической науке вообще.

Из экспериментов последних десятилетий мы узнали, что различные частицы суть лишь различные стационарные состояния системы «материя». Их характеристиками служат квантовые числа, или, если угодно, параметры преобразований, соответствующих фундаментальным группам. Теоретическое понимание физики элементарных частиц может означать только одно: понимание спектра частиц. Отдельную линию в оптическом спектре железа понять невозможно; но спектр понять можно, его можно связать со шредингеровским уравнением системы, состоящей из 26 электронов и ядра атома железа.

Существенные элементы теоретической интерпретации спектра хорошо известны, их можно извлечь как из классической физики, так и из квантовой механики. Мы можем здесь иметь в виду упругие колебания струны, электромагнитные колебания в пространственной полости или стационарные состояния атома, например атома железа. В любом случае нам прежде всего требуется точная формулировка динамических свойств системы, которую мы должны затем дополнить граничными условиями данного специфического случая. В случае колеблющейся струны первый шаг сводится к точной математической формулировке упругих и динамических свойств струны; затем, установив, где закреплена струна, мы можем вычислить спектр ее колебаний. Для электромагнитных колебаний в пространственной полости динамические свойства системы определяются уравнениями Максвелла; граничные условия задаются формой пространственной полости. Из-за сложности проблемы точный расчет всего спектра часто оказывается неосуществимым, однако ничто не мешает получить хорошие приближения для колебаний низшей частоты. Динамические свойства атома железа определяются квантовой механикой, то есть уравнением Шредингера. То дополнительное условие, что волновая функция должна обратиться в нуль на бесконечности, служит для установления стационарных состояний. Если бы атом был заключен в малом сосуде, его стационарные состояния были бы иными.

Из этих аналогий ясно, что первое условие для понимания спектра частиц есть точная математическая формулировка динамики материи. Само собой ясно, что слово «частица» не может встретиться в такой формулировке. В самом деле, частица получает свое определение лишь позднее, при сочетании динамики материальной системы с граничными условиями; частицы — вторичные структу-

ры. В нашем уголке Вселенной спектр частиц может оказаться совершенно иным, чем в недрах какой-нибудь очень плотной нейтронной звезды, поскольку граничные условия там и здесь вряд ли одинаковы. Этим объясняется фундаментальное значение динамики материи, и остается спросить, каким же образом получить ее математическую формулировку.

В нейтронной звезде вещество имеет плотность примерно такого же порядка, что и в атомном ядре. При подобной плотности все-таки еще имеет смысл говорить, что ядро состоит из определенного числа нуклонов, потому что небольшого количества энергии — небольшого в сравнении с массой покоя ядра — достаточно, чтобы вывести из ядра протон или нейtron. Нуклоны в ядре находятся еще на достаточном расстоянии друг от друга; энергия их взаимодействия поэтому незначительна в сравнении с их массой покоя. То же относится к нейтронной звезде, почему и оказалось возможным приблизительно охарактеризовать уравнение состояния подобной звездной материи. Но если плотность значительно выше — например, в звезде большой массы, связанный силами гравитации, — то вопрос, из каких частиц состоит звезда, уже не имеет четко определенного смысла. Имеющееся для каждой частицы пространство окажется тут меньше, чем ее нормальная величина, так что частица не будет иметь своей нормальной массы; из-за большой силы взаимодействия частицы, как правило, утратят разграничающую их массы оболочку. Иными словами, здесь можно говорить лишь о какой-то смеси всех частиц, а такую смесь было бы разумнее называть континуумом материи. Фундаментальная проблема физики элементарных частиц заключается в динамическом поведении этой непрерывной материи.

Окажись возможным получить больше информации об уравнении состояния не только в нейтронных звездах, но, главное, в звездах с еще большей плотностью, это было бы крайне важным для понимания динамического поведения материи. Я не могу предрешать, следует ли здесь опереться на исследование космических лучей или на более обширные астрофизические изыскания. Мне хотелось лишь подчеркнуть значение проблемы.

Коль скоро понятие частицы в данном контексте не имеет смысла, решающую роль должны играть групповые характеристики динамического закона. Динамический закон колеблющейся струны, например, инвариантен при переносах во времени и при параллельных переносах вдоль

струны, равно как и при вращениях вокруг струны. Вторая инвариантность нарушается граничными условиями, третья, как правило, не нарушается. Что касается электромагнитных колебаний в пространственной полости, динамический закон здесь инвариантен относительно полной Лоренцовой группы; инвариантность будет частично нарушаться краевыми условиями.

Известны некоторые существенные инварианты динамики материи: Лоренцова группа и изоспиновая группа SU_2 . Масштабную группу тоже, пожалуй, следовало бы причислить к фундаментальным инвариантам. Но я не хотел бы подробно обсуждать симметрии динамического закона. Вернемся вместо этого к космическому излучению. Как исследование космического излучения, или, говоря шире, астрофизическое исследование, может способствовать нашему познанию динамики материи?

Сперва два слова о причинности. Из дисперсионных соотношений мы знаем, что взаимодействие в материи следует закону причинности. Точная математическая формулировка этого положения, возможно, неизвестна нам в окончательном виде, но у нас есть неплохие основания предполагать, что взаимодействие может быть определено локально, как, скажем, в квантовой электродинамике. Нелокальность кулоновской силы этому не противоречит. С учетом данной ситуации можно сделать правдоподобное допущение, что исследование материи чрезвычайно высокой плотности предоставит нам прямую информацию об этом локальном взаимодействии и тем самым о динамике материи.

В космическом излучении есть другая специальная область, где в той же проблеме динамики материи можно приступить с совершенно иной стороны. Когда две частицы крайне высоких энергий сталкиваются между собой, то в первый момент столкновения мы имеем маленький диск чрезвычайно плотной материи, который затем взрывается и, теряя свою плотность, распадается в конечном счете на многочисленные частицы. Этот хорошо известный процесс множественного образования частиц, естественно, тем более интересен, чем выше была энергия сталкивающихся частиц. Если первичная частица космического излучения имеет энергию 10^6 ГэВ, то плотность возникающего при столкновении диска может вначале в тысячу раз превысить плотность нейтронной звезды.

Изучение поведения ливня таких космических лучей крайне высоких энергий должно поэтому дать ценнейшую

информацию о динамике материи. В данной связи обнадеживающим является то, что на накопительных кольцах протонного синхротрона Европейского центра по ядерным исследованиям (ЦЕРН) и на ускорителе «Батавия» асимптотическая область уже достигнута или по крайней мере к ней уже приблизились. Для начальной фазы столкновений в этой области первичные частицы можно представлять себе просто как облака непрерывной материи, плотность которой на поверхности уменьшается по экспоненте. Такая модель объясняет логарифмическое возрастание полного сечения в зависимости от приращения энергии. Следовало бы только указать на характерное различие, существующее между [мысленными] экспериментами со звездами предельно высокой плотности и экспериментами с дисками, получающимися при столкновении высокоэнергетических частиц. В первом случае гравитация играет важную роль, во втором она несущественна. Так что эти два вида экспериментов могут дать нам два разных типа важной информации.

Возвращаясь в заключение к общим вопросам, упомянутым мною в начале моего доклада, я должен, по-видимому, сказать, что особая роль космического излучения внутри физики как целого покоятся на двух обстоятельствах. Космическое излучение предоставляет информацию о поведении материи в наименьших масштабах; и оно же расширяет наше знание о строении Вселенной, о мире в широчайших масштабах. Оба эти крайних полюса недоступны прямому наблюдению, их можно изучать лишь посредством косвенных дедукций, по необходимости заменяя наши повседневные понятия другими, чрезвычайно абстрактными новыми понятиями; и лишь затем мы начинаем понимать, что могут означать в применении к природе такие выражения, как «последняя граница» или «бесконечность». В этом смысле исследование космических лучей — несмотря на все изменения в стиле экспериментов — все еще может быть названо очень романтической, очень вдохновляющей наукой.