

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ПРИРОДЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

А. И. Алиханов и А. И. Алиханян¹⁾

Основная тенденция в развитии физики последних десятилетий заключалась во всё большем отходе от изучения макроскопических тел и явлений, связанных с ними, и углублении в мир микроскопический. От явлений, происходящих с твёрдыми, жидкими и газообразными телами в целом, физика перешла через кинетическую теорию вещества к строению атомов и молекул, и теперь в центре её внимания — явления, происходящие в объёме 10^{-39} см^3 — в ядре атома.

Переход в микромир сопровождался коренным изменением таких физических понятий, как причинность, частица, волна, и привёл к созданию новой механики — микромеханики, известной под названием квантовой механики. Вместе с тем, с переходом в микромир физика вступила в область огромных скоростей, приближающихся к скорости распространения света, т. е. той области скоростей, где безраздельно господствуют принципы механики Эйнштейна. Однако, энергии частиц в ядре не являются предельными, то же так же, как ядра не являются пределом микромира. Мы хорошо знаем, что ядра атомов являются, несмотря на ничтожные размеры, сложными системами, состоящими из протонов и нейтронов. Сейчас в физике наступил момент, когда не только естественным развитием выдвинулись на передний план вопросы свойства и «структуры» элементарных частиц — протонов, нейтронов, мезонов и т. д., но и дальнейший прогресс в понимании строения ядра и процессов, происходящих в нём, упирается в незнание свойств и «структуры» этих элементарных частиц.

Основной и самый очевидный метод изучения свойств частиц заключается в том, чтобы сталкивать их друг с другом и наблюдать результат столкновения (разлёт частиц после удара, порцию энергии, передаваемую одной частицей другой, форму этой энергии, расщепление частиц, если они сложны и т. д.). При этом, чем более прочна бомбардируемая система, т. е. чем сильнее в ней связаны частицы, тем с большей энергией должны мы вталкивать в неё разрушающую частицу.

Отсюда происходит стремление создавать приборы и установки, позволяющие сообщать заряженным частицам большие энергии, как, например, циклотрон Лауренса, ускоритель электронов Керста и др.

¹⁾ Доклад на сентябрьской сессии Академии Наук СССР, 1943.

Однако, несмотря на то, что достигнута возможность получать частицы с энергиями в несколько десятков миллионов и даже до сотни миллионов вольт, всё же никакие искусственные источники не могут сравниться с естественным источником частиц большой энергии — со вселенной, дающей нам космические лучи, где частицы имеют в среднем энергии порядка нескольких миллиардов вольт. Более того, нам известны явления в космических лучах, так называемые «ливни Оже», которые могут быть вызваны только частицами, обладающими энергией в 10^{14} — 10^{18} В.

Мы сейчас знаем очень мало о происхождении космических лучей и не можем даже себе представить, в результате каких процессов они получают эти фантастические энергии. Но когда мы выясним это, а такой момент несомненно наступит, то одновременно мы, по-видимому, узнаем много нового и о вселенной. Так, углубляясь в мир микроскопический, мы своеобразным путём придём к объединению изучения обоих миров — микроскопического и макроскопического.

Уже сказанным объясняется необычайный рост интереса к космическим лучам, наблюдающийся в настоящее время. Нельзя назвать другую область физики, число приверженцев которой увеличивалось бы так сильно день ото дня, несмотря на специфические трудности работы в этой области. Она привлекает и начинающих учёных и учёных, прославленных своими работами в других областях физики. И это вполне понятно, так как благодаря космическим лучам мы имеем возможность проникнуть в глубочайшие тайны природы — строение, свойства и структуру элементарных частиц, составляющих вселенную, — которые при отсутствии космических лучей были бы скрыты от нас на долгие времена.

К сожалению, интенсивность потока космических лучей ничтожна, и поэтому не так легко с ними производить количественные исследования. Наблюдение их основано на том обстоятельстве, что быстрая заряженная частица, проходя через вещество, отрывает электроны от атомов, т. е. создаёт ионы, вследствие чего после её прохождения остаётся электрический след. Этот след можно сделать видимым, если он образовался в газе и если сконденсировать на каждом ионе капли воды из паров, содержащихся в газе. В камере Вильсона, действующей именно на этом принципе, впервые воочию увидел пути космических частиц Д. В. Скобельцын.

Более простым и портативным прибором (а это свойство очень существенно для исследования космических лучей) является счётчик Гейгера, в котором первоначально созданные частицей в газе ионы при движении в электрическом поле образуют большое количество новых ионов, так что в конце концов в газовом промежутке между электродами происходит процесс, подобный пробоем газа. Попадание каждой частицы в счётчик, сколько бы она ни создала первоначальных ионов (только, конечно, не меньше одной пары), вызовет такой пробой, что и даст возможность установить число прошедших через счётчик частиц. На уровне моря через 1 см^2 проходит одна частица в минуту.

Так же проста ионизационная камера. В ней под действием электрического поля ионы из следа частицы расходятся к двум электродам без всякого увеличения в числе. В этом случае измеряется суммарное число ионов, создаваемых в газе потоком космических частиц за некоторый промежуток времени.

Какие же свойства космических лучей прежде всего были исследованы при помощи этих методов?

Всякий раз, когда в физике обнаруживалось новое излучение, исследование его свойств начиналось с измерения проникающей способности, т. е. поглощения этого излучения в веществе. Точно так же это было и с космическими лучами. Уже тот факт, что интенсивность космических лучей возрастает с высотой, т. е. с уменьшением толщины слоя атмосферы, которую им приходится преодолевать, показывает, что часть лучей поглощается по пути и не доходит до уровня моря. Наличие излучения на уровне моря и ниже (под толстыми слоями земли — в метро, шахтах) показывает, что часть излучения имеет огромную проникающую способность.

Согласно первым работам в этой области получилось, что приблизительно поглощение определяется только количеством вещества, которое пройдено частицей, независимо от сорта поглощающего вещества. Однако, тщательное сравнение поглощения космических лучей в различных тяжёлых и лёгких веществах, т. е. веществах с малым (воздух, вода) и большим (свинец) атомным номером, позволило получить новые данные.

Крупнейший французский исследователь космических лучей Пьер Оже обратил внимание на то, что по поглощению в космических лучах можно заметить две довольно резко различающиеся составные части. Одна часть поглощается очень слабо и независимо от сорта вещества, но в соответствии с тем количеством его, которое встречается на пути лучей, т. е., короче говоря, в соответствии только с плотностью поглощающего вещества. Так, 1 см свинца по поглощению будет приблизительно для этого излучения эквивалентен 11 см воды. Другая же часть поглощается значительно сильнее, и поглощение при одинаковой плотности зависит ещё и от атомного номера поглотителя: оно тем больше, чем больше атомный номер поглотителя. Соответственно различие в свойствах двух компонент становится всё более резким с увеличением атомного номера поглотителя.

Для второй компоненты 4 мм свинца по поглощению эквивалентны 30 см воды.

Оже назвал первую компоненту жёсткой, а вторую — мягкой. Это, казалось бы чисто описательное, различие вскоре приобрело глубоко-физическое содержание и привело к одному из крупнейших открытий в современной физике — открытию новой частицы, названной мезоном. К этому открытию удалось прийти благодаря тому, что опыты по поглощению были дополнены целым рядом непосредственных наблюдений над свойствами отдельных частиц, входящих в состав жёсткой и мягкой компонент.

Так оказалось, что мягкая компонента состоит из электронов и квантов больших энергий (в среднем около 100 млн. вольт) и что при прохождении их через вещество происходит превращение электронов в кванты, и обратно — квантов в электроны. Следствием таких взаимных превращений является возникновение так называемых ливней космических лучей, т. е. пучков электронов, исходящих как бы из одной точки.

Это свойство — создавать ливни из частиц — является характерной особенностью электронов и квантов больших энергий и представляет собой понятное следствие из всех хорошо известных нам экспериментальных и теоретических данных о свойствах этих частиц. Оно служит причиной того, что мягкая компонента поглощается сильнее, чем жесткая, и притом тяжелыми веществами больше, чем легкими.

Что же касается жесткой компоненты, то она оказалась состоящей из частиц, ранее неизвестных — мезонов, — обладающих таким же зарядом, как электрон, но массой в 130—180 раз большей, чем масса электрона, или, если сравнивать с массой самого легкого ядра, в 10—12 раз меньшей, чем масса протона — ядра водорода.

Как и электроны, мезоны обладают способностью на своем пути ионизовать атомы, теряя при этом акте немного энергии, так что длина пути мезона в веществе зависит от запаса у него кинетической энергии. Чем больше энергия у мезона, тем больший путь он может пройти в веществе, и, таким образом, ослабление пучка мезонов в веществе обусловлено просто тем, что одни мезоны имеют большую энергию и, таким образом, обладают большей возможностью терять энергию на образование ионов при столкновении с атомами, а другие — меньшую.

Как будет видно дальше, ещё одно уточнение измерений поглощающей способности жесткой компоненты привело к новому замечательному открытию. Сравнение поглощения жесткой компоненты в плотном веществе, например в воде, с поглощением в воздухе, имеющем плотность, в 700 раз меньшую, показывает, что при эквивалентных по количеству вещества слоях (1 км воздуха эквивалентен, приблизительно, 1 м воды) воздух поглощает сильнее, чем вода. Поскольку атомные номера элементов в воздухе и в воде очень близки, практически одинаковы, это может быть обусловлено только резким различием плотности. К тому же различие по величине остаётся таким же, если мы сравним поглощение в воздухе с поглощением в эквивалентном по количеству вещества свинце.

Отсюда с неопровержимой очевидностью следует, что если бы мы смогли на пути мезонов создать вакуум на участке длиной 1 км, то интенсивность проходящей через него жесткой компоненты заметно бы ослабла. Таким образом, мезоны самопроизвольно, без внешнего воздействия исчезают — «умирают» — в пути. Средняя продолжительность «жизни» медленных мезонов, как показывают опыты, равна 0,000002 сек.

Разумеется, энергия, как кинетическая, так и энергия покоя мезона, не может исчезнуть, и, следовательно, «смерть» мезона сопровождается «рождением» других частиц. Вместе с тем из свойства мезонов распадаться следует, что они не могли прийти на Землю извне, из далеких космических пространств, на что даже при скорости, близкой к скорости света (максимально возможной), нехватило бы их короткой «жизни». Это означает, что мезоны где-то в атмосфере зарождаются первичными космическими лучами.

К этому именно моменту в развитии наших знаний о космических лучах относится начало наших работ на высоте 3250 м на горе Алагез в Армении.

Открытие распада мезона поставило два вопроса: 1) во что превращается мезон при распаде, и 2) если он превращается в электрон и нейтрино, как это можно было думать из ряда общефизических представлений, то существуют ли в действительности определённые соотношения между интенсивностью мягкой и жёсткой компонент (т. е. между числом электронов и мезонов), которые должны иметь место в том случае, если одна компонента генерирует другую. Надо сказать, что до последнего момента по этому вопросу существовало много противоречивых наблюдений из-за ошибочных или недостаточно чистых, как это сейчас выяснилось, экспериментов и недостаточно внимательного анализа особенностей применяемых методов измерений.

В результате первой экспедиции в 1942 г. мы показали, что на высоте Алагеза отношение мягкой компоненты к жёсткой — то, что мы называем отношением числа электронов к числу мезонов, — зависит от прибора, которым эта величина измеряется.

Если пользоваться ионизационной камерой, то отношение равняется 1,0, если же измерять его при помощи счётчика Гейгера, то оно равно 0,65. Между тем, если все электроны генерируются мезонами, т. е. мягкая компонента является производной от жёсткой, отношение должно быть равно 0,45.

В более низкой точке, в г. Ереване (высота около 900 м), различия сглаживаются.

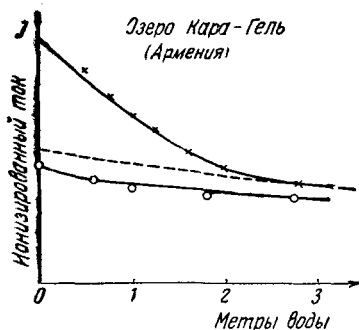
Каков физический смысл этого различия показаний двух приборов — счётчика Гейгера и ионизационной камеры?

Выше говорилось, что счётчик регистрирует число частиц независимо от того, какое количество ионов в газе счётчика создала частица — одну пару или сколь угодно больше. Ионизационная камера, напротив, регистрирует количество ионов, создаваемых потоком частиц в объёме камеры.

Таким образом, различия в величине отношения мягкой компоненты к жёсткой обусловлены тем, что первая на Алагезе состоит не только из электронов и квантов, но в ней имеются ещё частицы, ионизирующие газ сильнее, чем быстрые электроны и мезоны.

В связи с этим перед нами возникли две задачи: 1) выяснить происхождение этих частиц и 2) выяснить их природу. Выяснить про-

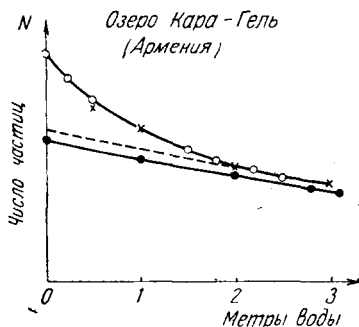
исхождение частиц — означает установить, являются ли они производными, вторичными от электронно-квантовой или мезонной компоненты (т. е. создаются ли они в веществе благодаря взаимодействию одной из этих двух компонент) или возникают независимо от них. В качестве примера такой генетической связи можно сослаться на факт, о котором уже говорилось выше — электроны распада генерируются мезонами. Вторым примером могут служить электроны столкновения, т. е. электроны, выбрасываемые из атома мезонами



Высота 3225 м над уровнем моря

- Иониз. ток в камере закрытой свинцовым панцирем 6,7 см толщины
- × Иониз. ток в камере без свинца

Рис. 1.



Высота 3225 м над уровнем моря

- Жёсткая
- Общая - метод совпадений
- × Общая - одним счётчиком

Рис. 2.

при столкновении с ними. И эти электроны генетически связаны с мезонами — жёсткой компонентой.

Для решения вопроса о происхождении сильно ионизирующих частиц мы обратились к испытанному уже ранее методу анализа космических лучей — к методу поглощения. В качестве поглощающей среды мы избрали воду, погружая приборы в оз. Кара-Гёль на высоте 3225 м над уровнем моря.

Вода по своему среднему атомному номеру по существу не отличается от воздуха, и поэтому все процессы взаимодействия космических лучей с веществом будут одинаковыми и в воде и в воздухе. Только из-за того, что плотность воды значительно превышает плотность воздуха мезоны на эквивалентном по количеству вещества пути не успеют распасться, следовательно, не будут рождать электронов распада.

На рис. 1 и 2 приведены результаты измерений, полученные нами во второй экспедиции (в 1943 г.¹⁾), при погружении ионизационной камеры и счётчика в воду без свинцового фильтра (т. е. когда

¹⁾ В этих измерениях принимали участие также К. М. Качарян (Ереванский университет), И. Ф. Кварцхиви и Г. М. Мириношвили (Грузинская Академия Наук).

измеряется сумма мягкой и жёсткой компонент) и со свинцовым фильтром (когда измеряется только жёсткая компонента, а мягкая поглощена в свинце).

Из этих кривых прежде всего видно, что характер поглощения жёсткой компоненты в воде при измерении счётчиком и камерой не изменяется и соответствует очень слабому поглощению ($10^0/0$ на 1 м воды).

Гораздо сложнее поведение мягкой компоненты. Прежде всего обращает на себя внимание отношение мягкой компоненты к жёсткой, которое на глубине около 2 м равно всего 10. Между тем на 2200 м ниже (в г. Ереване), что приблизительно эквивалентно по количеству вещества погружению на глубину 2,2 м в оз. Кара-Гёл, оказывается, что отношение мягкой компоненты к жёсткой равно 0,35.

Разница в условиях измерений состоит только в том, что плотность воды значительно больше плотности воздуха.

Отсюда следует, что 25 из $35^0/0$ мягкой компоненты в г. Ереване — это электроны от распавшихся мезонов, образовавшиеся в воздухе на пути от Алагеза до г. Еревана. В соответствующем месте озера на глубине 2,2 м распада этих электронов нет, так как на коротком пути в 2,2 м мезоны не успели распасться, а те электроны, которые получились от распада мезонов выше озера, благодаря их малой проникающей способности (меньшей, чем у мезонов) поглотились в слое воды около 2 м.

Так, нам удалось из анализа поглощения установить существование электронов распада и их число для уровня г. Еревана.

Зная количество этих электронов в г. Ереване, мы можем определить, сколько их должно быть на Алагезе. Как уже говорилось, отношение мягкой компоненты к жёсткой, если принимать во внимание только ту часть, которая рождается мезонами, должно на Алагезе составлять 0,45. Продолжая далее анализ, мы выделили отдельно кривую поглощения мягкой компоненты как «счётчиковую» (полученную при помощи счётчика), так и «камерную».

Сравнение их показывает, что не только по абсолютной величине, как это было установлено во время первой экспедиции, но, больше того, и по проникающей способности они резко отличаются друг от друга. На рис. 3 приведено сравнение кривых поглощения. На этом же рисунке приведены данные ещё одного опыта, который был сделан на том же озере.

Как уже говорилось, электроны и кванты больших энергий создают ливни, что отличает их от других частиц. Мы погружали прибор, регистрирующий только ливни, в озеро и таким образом установили, как поглощаются электроны в воде. Эти данные изображены на рис. 3 в виде звёздочек. Треугольником показаны данные поглощения в виде мягкой компоненты, полученные при погружении ионизационной камеры в озеро, находящееся на высоте всего 800 м над уровнем моря.

Наконец, крестом показано, какова должна быть интенсивность электронов на глубине 1 м воды, если известна их интенсивность над этим слоем по теоретическим расчётам Л. Д. Ландау и И. Е. Тамма. Сопоставление этих данных приводит нас к очень важным выводам.

1. Компонента, к которой ионизационная камера более чувствительна, чем счётчик — назовем её в отличие от мягкой и жёсткой компонент третьей — поглощается в воде медленнее, чем электронная компонента, регистрируемая счётчиком и прибором для ливней, и, следовательно, генерируется не электронами.

2. Третья компонента состоит не из электронов (она не даёт ливней) и не из мезонов.

3. На малых высотах третья компонента уже почти отсутствует.

4. Третья компонента не создаётся мезонами в результате воздействия их на вещество, так как в этом случае она должна была бы поглощаться в воде так же, как жёсткая компонента. Точно так же эта компонента не создаётся мезонами в результате их распада, так как в этом случае она на малых высотах должна была бы присутствовать в таком же отношении к электронам распада, как и наверху, чего в действительности нет.

5. Третья компонента сильнее поглощается в свинце, чем в воде.

Таким образом, третья компонента представляет собой независимую, отдельную компоненту, или, как принято называть, неравновесную компоненту.

Отличительная её особенность — большая ионизирующая способность или её самой или, скорее всего, создаваемых ею вторичных частиц.

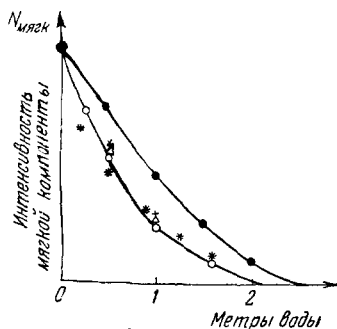
Если считать, что излишние 15% мягкой компоненты над вычисленным отношением 45% для Алагеза, которые наблюдались и в измерениях со счётчиком, обусловлены третьей компонентой, то её ионизирующая способность окажется в 3—4 раза больше, чем у мезона.

Итак, главные результаты двух наших экспедиций сводятся к следующему.

1. Доказано существование и определено количество электронов от распада мезонов.

2. Доказано существование третьей, неравновесной компоненты.

3. Показано, что свойства третьей компоненты отличны от свойств электронов и мезонов.



Кривые поглощения

- Мягкая компонента методом иониз. камеры
- Мягкая компонента счётчика
- Ливни дозиметр в свинце
- Высота 3225 м
- Озеро Кара-Гель (Армения)
- Иониз. камера (мягкая комн.) по Крамеру — высота 850 м
- Теоретич. выч. Ландау и Тамма

Рис. 3.

Наша задача теперь — ответить на вопрос о природе частиц самой третьей компоненты и создаваемых ею вторичных частиц. Очень возможно, что эти вторичные частицы, создаваемые ею, — протоны. Задача эта не лёгкая, но будем надеяться, что экспедиция 1944 г. приблизит нас к её решению.

В заключение — несколько слов об условиях, в которых происходила работа экспедиции. Разумеется, они были очень трудны, в особенности в 1942 г., летом, в самые тяжёлые времена для Кавказа. Но благодаря огромной помощи, оказанной нам ЦК КП(б) Армении, удалось решить такие трудные задачи, как снабжение экспедиции горючим, питанием, доставка грузов к подножию и переброска почти 15 т груза выючным транспортом от подножья на вершину и обратно.

Большая помощь была оказана нам ректором Ереванского университета проф. Г. Х. Бунатяном и сотрудниками кафедры физики Ереванского университета, а также заместителем председателя Армянского филиала Академии Наук В. О. Гулканяном. Всё это дало нам возможность привести в Ереване в порядок наши приборы, опробовать их перед подъёмом и провести наблюдения на вершине.

Работа происходила частью в помещении метеостанции Алагеза, частью в палатках, причём наличие метеостанции на Алагезе и товарищеское отношение к нам её сотрудников очень облегчили нашу работу.
