

COSMIC RAYS
AND THEIR ROLE
IN THE DEVELOPMENT
OF HIGH ENERGY
PHYSICS
AND ASTROPHYSICS

S. A. SLAVATINSKII

General information about cosmic rays, their discovery, investigations and their properties, is given. The problem of cosmic ray origin, mass composition and acceleration to very high energies in the Universe is discussed. The role of cosmic rays in high energy physics and astrophysics is considered.

Приведены общие сведения о космических лучах, их открытии и изучении их природы и свойств. Рассмотрены их происхождение, формирование массового состава и ускорение частиц космических лучей до сверхвысоких энергий. Обсуждена роль космических лучей в современной физике высоких энергий и астрофизике.

© Славатинский С.А., 1999

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ИХ РОЛЬ В РАЗВИТИИ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И АСТРОФИЗИКИ

С. А. СЛАВАТИНСКИЙ

Московский физико-технический институт,
Долгопрудный Московской обл.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Космические лучи представляют собой одно из интереснейших явлений природы. Они были открыты австрийским ученым В.Ф. Гессом в начале нашего века (1912 год). При подъеме на воздушном шаре он обнаружил, что по мере увеличения высоты над Землей растет ионизация атомов воздуха, регистрируемая его электроскопом¹. Такой рост ионизации с высотой мог быть вызван только частицами внеземного происхождения.

Большой вклад в изучение космических лучей внесли американский физик Р.Э. Милликен в начале 20-х годов и русский физик Д.В. Скobelцын, который с помощью камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле, не только подтвердил вывод Милликена о том, что космические лучи состоят из заряженных частиц, но и впервые обнаружил группы частиц с высокой энергией, получивших в дальнейшем название атмосферных ливней, образуемых космическими лучами. Опыты Д.В. Скobelцына заслуженно рассматриваются как зарождение нового направления в физике – физики высоких энергий, давшей многочисленные блестящие открытия в XX веке.

От того начального этапа до настоящего времени с космическими лучами проведены многие тысячи опытов несколькими поколениями физиков в разных странах мира [1]. Опыты ставили на разных высотах в атмосфере Земли, стрatosфере на шарах-зондах, на самолетах, на высотах гор, в подземных лабораториях и, наконец, вне атмосферы, на искусственных спутниках Земли.

В итоге установлено, что космические лучи представляют собой поток атомных ядер, массовый состав которого близок к распространенности различных атомных ядер во Вселенной. Космические лучи непрерывным потоком падают на Землю. Они приходят к нам как из ближнего (околосолнечного), так и дальнего (галактического) и, по-видимому, сверхдальнего (метагалактического) мирового пространства.

¹ Электроскоп измеряет число ионов воздуха, образуемых заряженными частицами.

Источником солнечных космических лучей является наше Солнце. Источником галактических космических лучей являются звезды, главным образом так называемые сверхновые звезды нашей Галактики. Метагалактические космические лучи приходят к нам из других Галактик. Их интенсивность существенно меньше, чем галактических лучей, но они содержат частицы очень большой энергии.

Следует отметить, что солнечные космические лучи проявляют себя эпизодически, после крупных хромосферных вспышек в период большой активности Солнца. Энергия солнечных космических лучей сравнительно невысокая. Она равна нескольким десяткам миллионов электронвольт, хотя и достигает иногда гигаэлектронвольт, то есть лежит в диапазоне $10^7 - 10^{10}$ эВ¹. Тем не менее солнечные космические лучи играют существенную роль в жизни Земли, о чем будет рассказано ниже.

В отличие от солнечных космических лучей галактические и метагалактические космические лучи обычно называют первичными космическими лучами. Они представляют собой мало изменяющийся во времени поток атомных ядер. Величина потока на границе атмосферы Земли приблизительно равна 1 частице на 1 см² в 1 секунду.

Около 92% частиц являются ядрами атомов водорода, то есть протонами, около 6% – ядрами атомов гелия (α -частицами), и около 1% приходится на долю более тяжелых атомных ядер. Из тщательного сравнения доли различных атомных ядер или, как говорят, массового состава космических лучей с распространностью атомных ядер во Вселенной следует, что в космических лучах содержится значительно больше ядер лития, бериллия и бора и больше тяжелых ядер с атомным номером $Z > 20$. По современным представлениям, большая доля тяжелых ядер связана преимущественно с особенностью источников космических лучей сверхновых звезд [2, 3]. Увеличение же доли легких ядер в космических лучах связано с образованием в результате расщепления более тяжелых ядер при соударениях с ядрами атомов межзвездной среды.

Расчеты показали, что до прихода на Землю от источников частицы космических лучей встречают на своем пути в межзвездной среде в среднем около 5 г вещества межзвездного газа. Время же прохождения частиц космических лучей через Галактику ученые приблизительно оценивают в 10^7 лет. Энергия частиц первичных космических лучей на границе атмосферы Земли весьма высокая, она превышает 10^{10} эВ. Это означает, что, двигаясь со скоростью, близкой к скорости света, до Земли способны дойти частицы, образованные даже в самых отдаленных от нас участках нашей Галактики. Траектории частиц космических лучей вследствие их соударений с

¹Энергию в 1 эВ приобретает электрон, проходя электрическое поле с разностью потенциалов в 1 вольт.

межзвездным газом и отклонением заряженных частиц магнитными полями, имеющимися в Галактике, не прямолинейные, а скорее, имеют характер хаотического или, как говорят, броуновского движения подобно тому, как атомы газа диффузно распространяются в газовой же среде (рис. 1). При таком движении происходит интенсивное перемешивание частиц от различных источников и достигается наблюдаемая на опыте независимость потока первичных космических лучей от угла их падения на Землю.

Важным обстоятельством является присутствие в первичных космических лучах небольшого числа электронов (их доля около 1%). Попадая в межзвездные магнитные поля, электроны испускают так называемое синхротронное излучение в результате своего движения вокруг силовых линий магнитного поля под действием силы Лоренца. Такое излучение регистрируется в радиодиапазоне. В итоге радиоастрономических исследований разных участков Галактики установлено, что первичные космические лучи практически равномерно заполняют всю Галактику и область галактического гало, а именно сферическую область вокруг центра Галактики с радиусом $R = R_{\text{Галактики}}$.

Самое же удивительное и важное свойство первичных космических лучей – это энергия составляющих их атомных ядер, для наиболее быстрых из них достигающая огромной величины в 10^{20} эВ. Таким образом, во Вселенной существуют такие активные объекты и области, которые оказались как бы гигантским естественным ускорителем атомных ядер.

Максимальная энергия, достигнутая на ускорителях к настоящему времени, равна $2 \cdot 10^{15}$ эВ. После пуска следующего поколения ускорителей в начале следующего века она достигнет 10^{17} эВ. В интервале энергий $10^{17} - 10^{20}$ эВ космические лучи, по-видимому, еще надолго останутся уникальным источником частиц самых высоких энергий.

Средняя плотность энергии первичных космических лучей во всем объеме Галактики равна приблизительно 10^{-12} эрг/см³, что сравнимо с плотностью других видов энергий в Галактике: гравитационной,

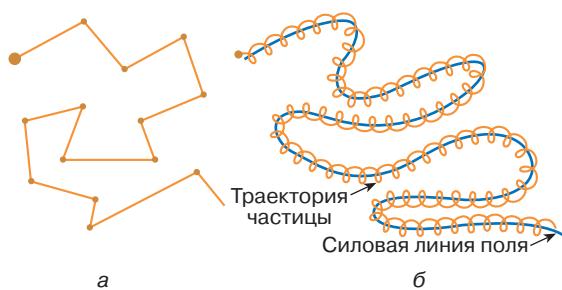


Рис. 1. а – движение молекул газа; б – движение частицы в магнитном поле Галактики, изменяющемся в результате движения облаков межзвездного газа и галактического вращения

магнитной, кинетической энергий межзвездного газа. Таким образом, в энергетическом балансе нашей Галактики космические лучи играют существенную роль. На рис. 2 показано распределение частиц первичных космических лучей по энергии — так называемый энергетический спектр. В очень широком интервале энергий (от 10^{10} до $2 \cdot 10^{15}$ эВ) наблюдается степенная зависимость их интенсивности от энергии $I(E) = AE^{-\gamma}$ с постоянным показателем степени $\gamma = 2,7$. При меньших энергиях в спек-

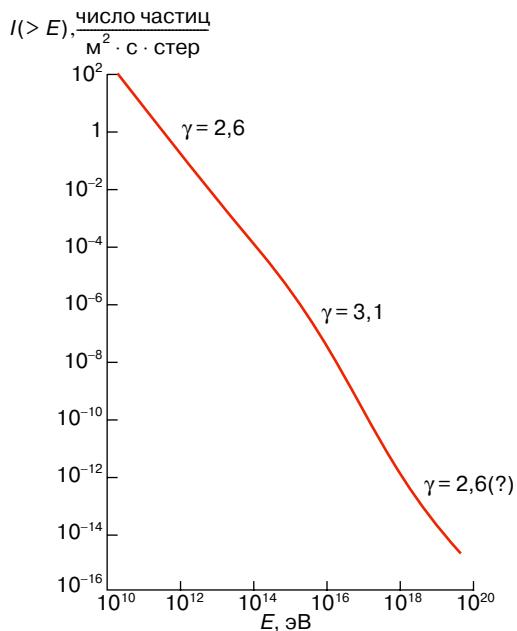


Рис. 2. Энергетический спектр космических лучей в интервале энергий 10^{10} – 10^{20} эВ

ктре наблюдается уменьшение интенсивности. Этот эффект связан с наличием у Земли магнитного поля, отклоняющего от Земли медленные частицы (эффект геомагнитного обрезания). При энергии выше $3 \cdot 10^{15}$ эВ академик Г.Б. Христиансен обнаружил укручение энергетического спектра первичных космических лучей. Причина такого изменения спектра первичных космических лучей сейчас интенсивно изучается. На этом пути еще уйма работы, увлекательной и очень интересной.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Эта проблема, кажется, сейчас уже решена в первом приближении, и ее решение дано в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН академиком В.Л. Гинзбургом. Согласно его идеи, космические лучи образуются преимущественно при взрывах сверхновых звезд, вспыхивающих в нашей Галактике в среднем один раз в 30 лет. Первое свидетельство о появлении на небе новой яркой звезды, видимой

даже днем, содержится еще в летописи XII века. Фотография Крабовидной туманности, возникшей от этого взрыва, показана на рис. 3.

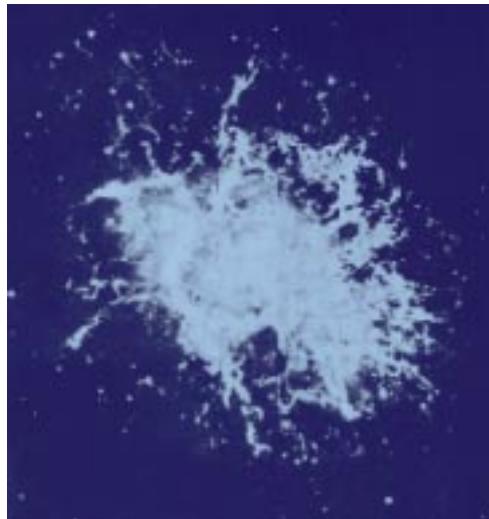


Рис. 3. Фотография Крабовидной туманности, содержащей пульсар, отождествляемый со Сверхновой звездой, взорвавшейся в 1054 году

Последняя яркая вспышка сверхновой звезды наблюдалась совсем недавно — в 1987 году. Вспышка произошла в Большом Магеллановом Облаке, сравнительно близкой к нам Галактике, расположенной на расстоянии около 10^5 световых лет, или 10^{18} км¹. Вспышка Сверхновой 87 впервые одновременно наблюдалась астрономами в оптическом диапазоне (то есть в видимом свете), в радиодиапазоне, в диапазонах, соответствующих рентгеновским и γ -лучам, и наконец, она была зарегистрирована в нейтринных обсерваториях России, США, Японии. Магелланово Облако расположено в южной полусфере неба. Поэтому первыми вспышку заметили астрономы, обсерватория которых находилась в южном полушарии — в Чили. Она произошла 24 февраля 1987 года на участке неба, на котором ранее была видна лишь с помощью телескопа очень слабая звездочка. Эта звездочка внезапно вспыхнула, так что ее яркость увеличилась более чем в 10^6 раз, а затем упала на несколько порядков. Еще задолго до вспышки астрономы измерили массу и радиус этой звезды. Звезда была сверхгигантом с массой, близкой к 20 массам Солнца, и с радиусом $R = 30R_{\text{Солнца}}$.

КОРОТКО ОБ ЭВОЛЮЦИИ ЗВЕЗД-ГИГАНТОВ

По современным представлениям, звезды во Вселенной образуются в областях повышенной

¹ Световой год — это расстояние, которое свет проходит за время, равное одному году.

плотности межзвездного газа в результате его гравитационного сжатия. Межзвездный газ состоит в основном из водорода. По мере его сжатия газ разогревается. После достижения температуры выше 10^7 К в плотно сжатом газе начинает протекать термоядерная реакция горения водорода, в которой из четырех протонов (ядер атомов водорода) образуется одно ядро атома гелия. В такой реакции выделяется большая энергия, которая еще больше разогревает недра вновь образованной звезды. После того как в центре звезды водород выгорает, начинает гореть гелий. В конечном счете в гелиевом цикле горения из трех атомов гелия образуется один атом углерода и дальнейшее сжатие звезды приостанавливается.

После выгорания гелия гравитационные силы вновь продолжают сжатие звезды, и в ее центре температура и плотность газа снова возрастают. В итоге в центре звезды начинается углеродный цикл горения, а также образуются и более тяжелые атомные ядра вплоть до ядер атомов железа. Более тяжелые ядра, чем железо ($Z > 26$), образуются менее эффективно. Все эти процессы протекают за миллиарды лет.

После выгорания углерода дальнейшая эволюция звезды прямо зависит от ее полной массы. Если $M_{\text{звезда}} > 8M_{\text{Солнца}}$, а масса и плотность металлического (железно-никелевого) ядра звезды больше $1,4M_{\text{Солнца}}$, согласно теории, гравитационные силы оказываются столь большими, что само ядро коллапсирует, то есть катастрофически сжимается, его температура резко повышается до $T \sim 10^{11}$ градусов, ядра распадаются на составляющие их протоны и нейтроны. Более того, при возникшем при коллапсе огромном давлении электроны начинают вдавливаться в протоны, образуя нейтроны (идет реакция $p + e \rightarrow n + v$). В итоге коллапса образуется нейтронная звезда. Ее радиус всего около 10 км. Малое время сжатия означает практически свободное падение частиц в центр звезды за счет гравитации. При таком катастрофическом сжатии возникает мощная ударная волна.

Излучение при коллапсе огромного потока нейтрино приводит еще к одной важнейшей ядерной реакции, определяющей дальнейший ход процесса. Именно благодаря соударениям нейтрино с протонами $v + p \rightarrow n + \pi^+$ возникает “газ”, состоящий из положительно заряженных пионов. Именно этот газ сжимается ударной волной, и его сжатие в дальнейшем приводит к взрыву и сбросу оболочки сверхновой звезды, отделяющейся от ядра и рассеивающейся в окружающее пространство.

В этом процессе частично ядро звезды разрушается, и его составляющие также выталкиваются в окружающее пространство и рассеиваются. Температура оболочки в результате взрыва сильно возрастает, оболочка начинает светиться не только в оптическом диапазоне длин волн, но и в рентгеновском и гамма-диапазоне. В целом при коллапсе выделяется

огромная энергия. Так, энерговыделение при коллапсе Сверхновой 87 оказалось равным $E = 10^{53}$ эрг.

Описанная картина коллапса сверхновой показывает, что такие звезды играют огромную роль во Вселенной. Действительно, согласно расчетам, именно в их недрах во время коллапса происходит интенсивное образование практически всех известных нам атомных ядер, более тяжелых, чем ядра атомов железа. Таким образом, все существующее на Земле разнообразие тяжелых атомов в значительной степени есть результат синтеза атомных ядер во время вспышек сверхновых. Здесь мы подходим и к главной теме нашего повествования о космических лучах, так как, по современным представлениям, и они образуются в процессе взрыва сверхновых. Именно, при взрыве в окружающее пространство выбрасываются как атомные ядра из оболочки сверхновых, так и частично атомные ядра, образовавшиеся в процессе коллапса и составлявшие ядро звезды. При их излучении атомные ядра получают огромную энергию, ускоряясь ударной волной при взрыве звезды. Грубо говоря, подобно тому как спортсмены, занимающиеся серфингом, несутся вместе с океанской волной к берегу, так и атомные ядра ускоряются ударной волной, возникающей при взрыве сверхновой звезды. Подсчитано, что такой ускоритель может разогнать, особенно тяжелые атомные ядра, вплоть до очень высокой энергии $\sim 10^{15}$ эВ.

Более того, механизм ускорения позволяет объяснить и наклон энергетического спектра и массовый состав первичных космических лучей. Ясно, что массовый состав лучей при этом близок к массовому составу сверхновой сразу после коллапса и лишь приблизительно соответствует массовому составу Земли и метеоритов.

Что же происходит далее с остатком сверхновой, точнее, с ее ядром? Имеются две основные возможности, а именно: звезда вращалась до взрыва и имела небольшое магнитное поле. После коллапса нейтронная звезда начинает бешено вращаться (с периодом в доли секунды), а ее магнитное поле возрастает до гигантской величины $\sim 10^{12}$ Гс. Такая звезда называется пульсаром. Излучение пульсара подобно вращающемуся прожектору, своим лучом освещаящему окружающее пространство. Оно продолжает подогревать улетающую от пульсара сброшенную оболочку бывшей звезды-гиганта.

Другая возможность реализуется, если значительная часть оболочки звезды, преодолев силу взрыва, снова падает на ядро. В этом случае через несколько минут нейтронная звезда, получив дополнительную массу, снова начинает сжиматься до образования нового объекта во Вселенной – “черной дыры”. Такие объекты еще мало изучены. Можно лишь сказать, что их главная особенность состоит в том, что из их недр не может быть испущено никакое излучение, так как даже испущенный свет

притягивается черной дырой вследствие ее огромного притяжения.

О существовании таких объектов, обладающих гигантской гравитацией, можно лишь судить по свечению газа, перетекающего в "черную дыру" из соседней, близко расположенной звезды. Это так называемое явление акреции, позволяющее косвенно наблюдать "черные дыры".

Вернемся к космическим лучам. Что же происходит с атомными ядрами, разлетающимися с огромными скоростями от их источника — сверхновой. Почему же не наблюдается прямой связи интенсивности космических лучей со вспышками сверхновых. Дело в том, что межзвездное пространство во все не такое уж пустое. В нем имеется межзвездный газ, потоки которого образуют магнитные поля большой протяженности. Отдельные атомные ядра космических лучей, соударяясь с ядрами межзвездного газа и отклоняясь ими от направления своего движения, временами ускоряясь в движущихся потоках межзвездного газа, теряют память о направлении своего начального движения (см. рис. 1). В итоге все направления прихода первичных космических лучей на Землю становятся равновероятными.

Как показали расчеты В.Л. Гинзбурга и С.И. Сыроватского [4], полное число вспышек сверхновых в нашей Галактике и количество выбрасываемых при каждой вспышке атомных ядер вполне достаточны, чтобы обеспечить наблюдаемую интенсивность первичных космических лучей.

Очень интересная проблема — происхождение космических лучей при сверхвысоких энергиях выше $2 \cdot 10^{15}$ эВ. Эта проблема еще далека от своего решения. Показано лишь, что предельное ускорение атомных ядер во время коллапса сверхновых явно недостаточно для образования самых высокоэнергичных космических лучей. Однако уже сейчас известны и более мощные объекты во Вселенной, взрывы которых сопровождаются энерговыделением, много большим, чем у сверхновых. К таким объектам относятся ядра галактик, квазары, радиогалактики. Квазары являются активными ядрами наиболее удаленных от нас галактик, обладающих грандиозным излучением ($\sim 10^{47}$ эрг/с) и имеющих сравнительно небольшие угловые размеры ($< 10''$). Радиогалактики представляют собой большие звездные системы, масса которых достигает 10^{12} масс Солнца и которые обладают колоссальным энерговыделением. Как и квазары, они расположены очень далеко от нашей Галактики. Однако сейчас рано детализировать картину образования космических лучей сверхвысокой энергии из-за скучности наших сведений об их возможных источниках. Это задача XXI века.

ВТОРИЧНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Рассмотрим теперь, что происходит с первичными космическими лучами, достигшими атмосферы

Земли [5]. Согласно концепции, разработанной академиком Г.Т. Зацепиным в 1949 году, в атмосфере Земли атомные ядра первичных космических лучей, сталкиваясь с ядрами атомов воздуха, порождают новые элементарные частицы. Этот процесс получил название процесса множественного рождения частиц. Число рожденных частиц при каждом соударении растет при увеличении энергии налетающего ядра по закону $N \sim \lg E$. При высоких энергиях, например при энергии 10^{15} эВ, величина N достигает нескольких десятков и даже сотен. На рис. 4 приведена фотография, полученная автором этой статьи около 40 лет назад, задолго до создания больших ускорителей. На фотографии видны следы многих частиц, зарегистрированных камерой Вильсона, помещенной в магнитное поле. С подобной аппаратурой в 1932 году американский физик К. Андерсон открыл в составе космических лучей первую частицу антиматерии — позитрон, а примерно семь лет спустя он же обнаружил аналог электрона, но с массой, в 207 раз большей, — мюон. Открытие новых частиц в составе космических лучей продолжалось и далее. В середине 40-х годов английский физик С. Пауэлл открыл новую ядерно-активную частицу — пион, а в конце 40-х годов в Англии Батлером (C.C. Batler) и Баркером (K.H. Barker) были открыты частицы, за свои необычные свойства получившие название странных, — K -мезоны и гипероны.

Вернемся к первому акту соударения ядра первичного космического излучения с атомным ядром воздуха. Поскольку в акте рождается сразу много вторичных ядерно-активных частиц, в основном пионов, ясно, что каждый из них по мере прохождения атмосферы Земли соударяется с ядром атомов воздуха, генерирует вторичные пионы, которые, в свою очередь, рождают третье поколение пионов и

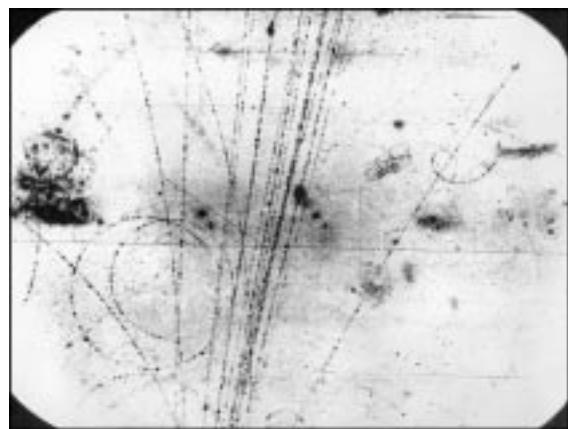


Рис. 4. Фотография в камере Вильсона следов частиц, образовавшихся в результате взаимодействия протона с ядром атома лития, расположенного под камерой. Видны следы 15 заряженных частиц. Фотография иллюстрирует процесс множественного рождения пионов

т.д. Схематично этот процесс изображен на нашем рис. 5. В итоге возникает ядерно-каскадный процесс размножения частиц ядерной материи. Именно этот механизм образования ядерного каскада и был открыт Г.Т. Зацепиным [6]. При высоких энергиях выше 10^{15} эВ ядерный каскад частиц, развивающийся в атмосфере Земли, получил название широкого атмосферного ливня (ШАЛ). По мере прохождения ливня через атмосферу сначала нарастает доля ядерно-активных частиц, достигая максимума уже на самолетных высотах ($\sim 10-12$ км), а затем уменьшается вследствие потери ими энергии на рождение новых ядерных частиц. Заряженные пионы — частицы нестабильные, они уже в верхних слоях атмосферы распадаются на тяжелые электроны — мюоны и нейтрино. Мюон не обладает ядерным зарядом, эта частица по своим свойствам действительно близка к электрону, хотя и обладает в 207 раз большей массой. Свою энергию мюоны расходуют очень слабо, только на ионизацию атомов воздуха атмосферы Земли. Поэтому уже на уровне моря практически все пионы вторичных космических лучей замещаются мюонами.

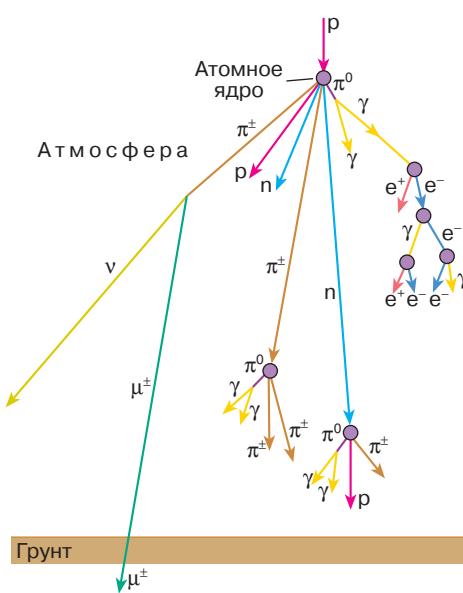


Рис. 5. Схема ядерно-каскадного процесса в атмосфере. В результате соударения протона космических лучей с ядром атома воздуха образовались π^0 - и π^\pm -мезоны. π^0 -Мезон породил электронно-фотонный ливень (показан в правой части рисунка). π^\pm -Мезоны генерировали новый π^0 -мезон и заряженные π^\pm -мезоны второго поколения, часть π^\pm -мезонов распалась, породив мюоны. Протон очень высокой энергии способен породить в атмосфере Земли десятки поколений и образовать миллионы и миллиарды вторичных частиц, генетически связанных между собой, — так называемые широкие атмосферные ливни

Существенно отличается от описанной картины прохождение через атмосферу Земли нейтральных пионов. Их путь в атмосфере чрезвычайно мал — лишь доли миллиметров. Такие пионы распадаются на два γ -кванта (так называют фотоны высокой энергии). Каждый из γ -квантов, обладающий большой энергией, образует электронно-позитронную пару. Электроны и позитроны, в свою очередь, в полях атомных ядер встречных атомов тормозятся и испускают новые γ -кванты и т.д. Таким образом, снова возникает каскад частиц, называемый электронно-фотонным ливнем. Именно такие ливни и наблюдал Д.В. Скobelцин еще в 20-х годах. В итоге развития широкого атмосферного ливня число электронов и γ -квантов в ливне становится фантастически большим, достигая миллионов и даже миллиардов частиц.

Таким образом, мы видим, что атмосфера Земли играет большую роль в преобразовании первичных космических лучей во вторичные. В глубине атмосферы существенно уменьшается не только число частиц первичных космических лучей, но и изменяется природа самих частиц. Так, на уровне моря интенсивность вторичных космических лучей примерно в 100 раз меньше интенсивности первичного излучения, причем в них практически отсутствуют ядерные частицы. Их заменили лептоны — мюоны, электроны, γ -кванты и нейтрино.

ЕЩЕ РАЗ О РОЛИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ И АСТРОФИЗИКЕ

В развитии современной физики высоких энергий (физики элементарных частиц) космические лучи сыграли роль прародителей этой области физики. Они явились источником крупнейших открытий XX века: открытия антиматерии (позитрона), тяжелых электронов (мюонов), открытия, как думали раньше, основного носителя ядерных сил — пиона, который играет ведущую роль в ядерных процессах, открытия странных частиц и чармированных частиц¹. Их изучение привело к открытию процесса множественного рождения частиц, открытиям электромагнитного и ядерно-каскадного процессов при прохождении частиц через вещество. Как известно, после создания ускорителей электронов, протонов и атомных ядер исследование элементарных частиц и их свойств переместилось из космических лучей на ускорители. Космическим лучам сейчас отведена другая существенная роль — поставлять частицы сверхускорительной энергии для детальной разведки того, что при сверхвысоких энергиях видно нового и необычного по сравнению с тем, что уже открыто и известно из работ на ускорителях.

¹ Странными и чармированными частицами названы такие частицы, в состав которых входит странный или чармированный夸克。

В настоящее время в космических лучах исследуются процессы взаимодействия частиц в широком диапазоне энергий от 10^{15} до 10^{20} эВ. Уже сейчас планируются широкомасштабные эксперименты XXI века (ШАЛ-1000), "Эксперимент Оже" – по созданию установок с огромной площадью аппаратуры в тысячи и десятки тысяч квадратных километров для регистрации широких атмосферных ливней с энергией до 10^{20} эВ.

Перейдем теперь к роли космических лучей в изучении ближнего и дальнего космоса или, как принято говорить, к астрофизическим исследованиям космических лучей. Здесь разделяются два направления. Первое – это изучение солнечных космических лучей и околоземного пространства. Нет нужды говорить, как важно нам, землянам, познать наше Солнце. Солнечно-земные связи, их изучение и являются предметом этих исследований. В России, США, Канаде и ряде других стран создана специальная сеть станций по регистрации интенсивности космических лучей, работающих в тесном контакте с астрономами, проводящими исследования Солнца и других звезд как в оптической области, так и в радиодиапазоне, гамма-диапазоне, на нейтринных обсерваториях. Станции регистрации космических лучей расположены на уровне моря, на уровне гор, в подземных лабораториях, на искусственных спутниках Земли и шарах-зондах. Так, в Физическом институте им. П.Н. Лебедева вот уже более 40 лет в стратосферу ежедневно запускаются шары-зонды. Такие опыты начаты еще на заре исследований космических лучей академиком С.И. Верновым и его школой. Систематические измерения дали много новых сведений, в частности показали, что увеличение интенсивности космических лучей приводит к нарушению радиосвязи на Земле на коротких волнах, а крупные вспышки на Солнце сопровождаются потоками радиации, опасными для здоровья космонавтов.

Многолетние опыты зондирования солнечных космических лучей показали, что магнитное поле Солнца в отличие от магнитного поля Земли периодически меняет свое направление, то есть происходит его переполюсовка. Причина этого интересного явления пока еще не установлена.

Доказано также, что солнечные космические лучи образуются в верхних слоях Солнца и это явление тесно связано с протеканием на Солнце мощных электрических токов, связанных с образованием пятен на Солнце. Подобные исследования сейчас интенсивно проводятся на шарах-зондах и искусственных спутниках Земли. Несомненно, они проливают свет на многие стороны деятельности нашей ближайшей звезды – Солнца.

Не менее велика роль всестороннего исследования галактических космических лучей для изучения нашей Галактики, Метагалактики, межзвездного вещества, магнитных полей в них и грандиозных катализмов – вспышек сверхновых, галактических ядер, квазаров и радиогалактик. Недаром один из известных исследователей космических лучей, академик А.И. Алиханян, говорил, что космические лучи являются "золотым Эльдорадо" как для физиков, исследующих ядерные процессы сверхвысоких энергий, так и для физиков, изучающих звезды, Галактику и всю нашу Вселенную. Роль этих исследований со временем только возрастает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983.
2. Гинзбург В.Л. Космические лучи у Земли и во Вселенной. М.: Наука, 1967. 95 с.
3. Гинзбург В.Л. О физике и астрофизике. М.: Бюро Квантума, 1995. 512 с.
4. Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И. Происхождение космических лучей. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
5. Мурzin В.С. Введение в физику космических лучей. М.: Изд-во МГУ, 1988. 316 с.
6. Зацепин Г.Т. // Доклады АН СССР. 1949. Т. 67. С. 993.

* * *

Сергей Анатольевич Славатинский, доктор физико-математических наук, профессор МФТИ, главный научный сотрудник и зав. лабораторией Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, член-корреспондент Российской академии естественных наук. Область научных интересов – физика космических лучей, физика высоких энергий и астрофизика. Автор более 200 научных статей и учебных пособий.