

ПРИРОДА

№ 2, 2001 г.

Жданов Г.Б., Стожков Ю.И.

Физика космических лучей на пороге XXI века

(с) “Природа”

*Использование или распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск
VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!

<http://vivovoco.nns.ru>

<http://vivovoco.rsl.ru>

<http://www.ibmh.msk.su/vivovoco>

Физика космических лучей на пороге XXI века

Г.Б.Жданов, Ю.И.Стожков

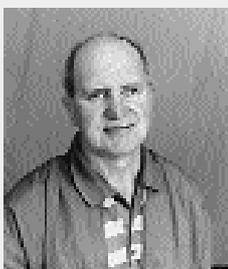
После открытия космических лучей (КЛ) в 1912 г. Р.Гессом постепенно проясняются их состав, происхождение, механизмы распространения в межзвездной и межпланетной средах, характер ядерных взаимодействий, в которых они участвуют. Однако до сих пор остается много вопросов и загадок, связанных не только с источниками КЛ, движением этих частиц в магнитных полях Галактики и солнечной системы, но и с уникальными явлениями, вызываемыми КЛ в атмосфере, их воздействием на погоду и климат Земли.

Что такое
космические лучи?

Опытами многих ученых, в том числе Д.В.Скобельцына (1927) и С.Н.Вернова (1935), было доказано, что КЛ — потоки заряженных частиц, в основном протонов, приходящие из космического пространства. Такие частицы принято называть первичными космическими лучами (ПКЛ). Характеризуются ПКЛ прежде всего своим энергетическим спектром, т.е. зависимостью плотности потока частиц в единичном энергетическом интервале от энергии



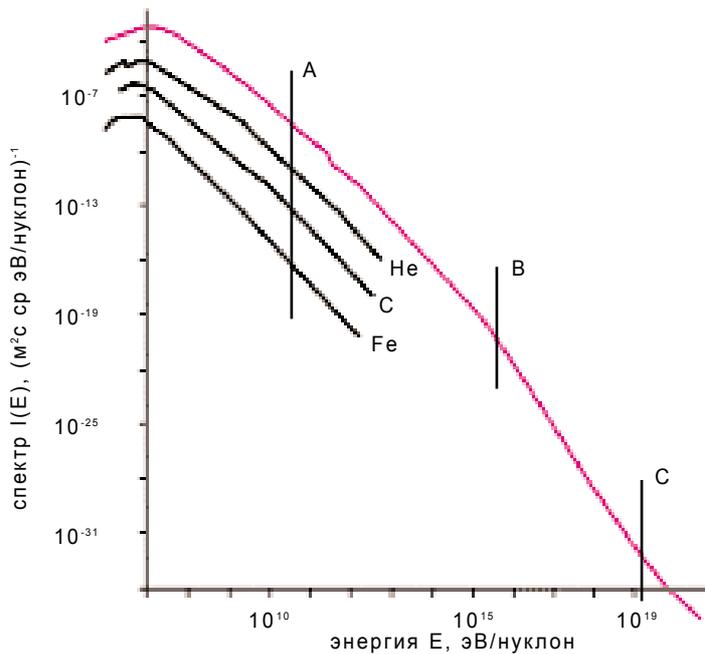
Георгий Борисович Жданов, доктор физико-математических наук, советник Физического института им.П.Н.Лебедева РАН. Специалист в области физики взаимодействия частиц космических лучей с веществом. Автор 10 научно-популярных книг и брошюр. Печатается в «Природе» с 1959 г.



Юрий Иванович Стожков, доктор физико-математических наук, профессор, руководитель Долгопрудненской научной станции им.С.Н.Вернова того же института. Лауреат Ленинской премии (1976). Заместитель председателя Научного совета РАН по проблеме «Космические лучи». Руководитель работ по мониторингу космических лучей в земной атмосфере. Область научных интересов — модуляционные эффекты космических лучей.

© Г.Б.Жданов, Ю.И.Стожков

$$I(E) = \frac{dN}{dE \cdot dt \cdot dA \cdot d\Omega}$$



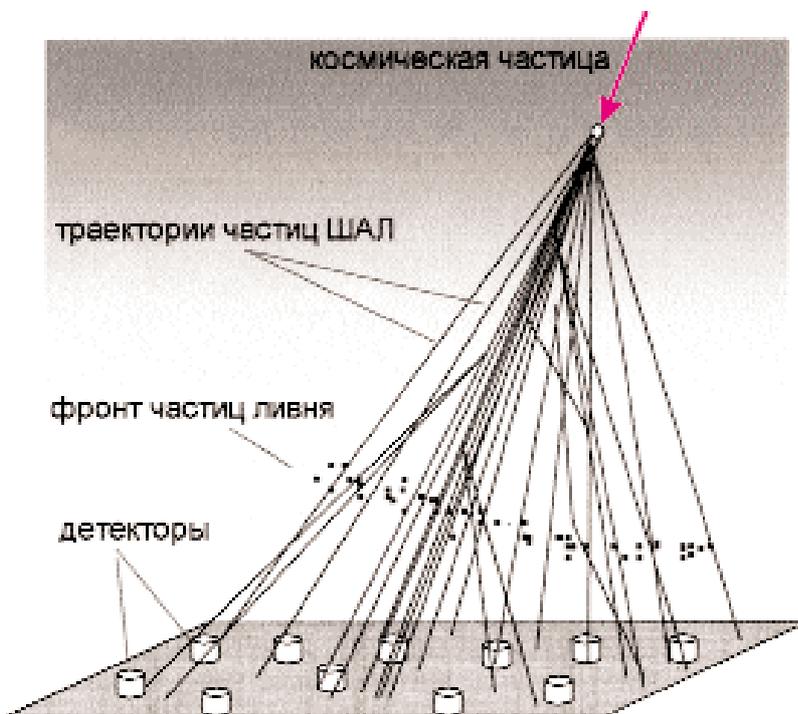
Схематический вид дифференциальных спектров первичных космических лучей. Даны полный спектр (цветная кривая) и спектры для отдельных составляющих. Вертикальные линии А, В, С показывают особенности (изломы) полного энергетического спектра.

Частицы можно условно разделить на две группы: не достигающие поверхности Земли и доходящие до нее. Первую составляют частицы низких энергий ($E \sim 5 \cdot 10^{10}$ эВ/нуклон), доля которых в ПКЛ $\sim 90\%$ (при этом они переносят $\sim 60\%$ всей энергии). Вторую — частицы высоких энергий: от $E \gg 5 \cdot 10^{10}$ до максимальных значений $E \gg 3 \cdot 10^{20}$ эВ, измеряемых в настоящее время.

Энергия КЛ имеет нетепловое происхождение. Считается, что высокоэнергетичные КЛ порождаются взрывами сверхновых звезд и затем ускоряются ударными волнами, сопровождающими эти взрывы. Солнце время от времени — при мощных вспышках — также генерирует потоки ускоренных заряженных частиц; они в основном оказываются в низкоэнергетической части спектра. Эти частицы называются солнечными космическими лучами (СКЛ).

Отличительная черта КЛ низких энергий — значительные временные изменения потока этих частиц, связанные как с процессами их распространения в межпланетной среде, так и с генерацией частиц на Солнце во время взрывных процессов. Частицы низких энергий заметно влияют на атмосферные явления.

Напротив, поток КЛ высоких энергий практически не меняется со временем. Их энергетический спектр круто падает с увеличением энергии и описывается выражением $I(E) \sim E^{-2.75}$. Поиски источников космических частиц с энергиями в этой области продолжаются, параллельно изучаются возможные механизмы ускорения. Кроме того, наблюдательные эксперименты с высокоэнергетичными космическими частицами позволяют исследовать природу взаимодействий частиц при энергиях, недостижимых на современных ускорителях. Так удастся проверить правильность экстраполяций многих



Схематическое изображение широкого атмосферного ливня. Первое взаимодействие космической частицы с ядром атома кислорода или азота произошло в атмосфере на высоте $h \sim 20$ км.

параметров, характеризующих взаимодействия частиц, на интервал энергий от максимальных, достижимых сегодня на ускорителях, $E_{\text{уск max}} \sim 10^{14}$ эВ до $E \sim (10^{17}—10^{19})$ эВ и тем самым испытать теоретические модели.

Высокоэнергетичные частицы КЛ при попадании в атмосферу Земли взаимодействуют с ядрами атомов кислорода и азота, образуя ливни вторичных частиц. Рождаемые в первом взаимодействии вторичные частицы снова сталкиваются с ядрами атомов и дают новые частицы. Таким образом, процесс носит каскадный характер, увеличивающий число частиц в ливне во много раз (например, частица с $E = 10^{15}$ эВ порождает ливень с числом вторичных частиц до нескольких миллионов). Эти вторичные частицы образуют в атмосфере конус, радиус поперечного сечения которого достигает сотен метров. Такой каскад частиц в атмосфере называется широким атмосферным ливнем (ШАЛ). Направление прихода первичной частицы определяет ось ливня. Впервые ливни в атмосфере наблюдал французский ученый П.Оже в 1938 г. В результате многолетних исследований [1, 2] удалось установить, что ШАЛ состоит в основном из электронов и гамма-квантов. Высокоэнергетичные электроны ливня движутся в воздухе с огромными скоростями, превышающими фазовую скорость распространения света. В результате излучения Вавилова—Черенкова в атмосфере возникает свечение.

Как их регистрируют?

Поскольку регистрацию частиц КЛ проводят в огромном энергетическом диапазоне, приходится применять различные методы. При этом используются как небольшие детекторы, устанавливаемые на космических аппаратах для исследований в низкоэнергетической части спектра, так и огромные наземные установки, регистрирующие ШАЛ от частиц предельно высоких энер-

гий. Измерения проводятся под большими толщами грунта или воды, на поверхности Земли и в атмосфере, а также в космическом пространстве до расстояний >70 а.е.*.

В России успешно работают несколько больших установок для исследования КЛ высоких и сверхвысоких энергий. Модернизированные комплексы по изучению ШАЛ, например Баксанский, созданный под руководством А.Е.Чудакова и состоящий из подземного сцинтилляционного телескопа и наземной установки ШАЛ (Институт ядерных исследований РАН), или одна из крупнейших в мире установок по регистрации ШАЛ от частиц сверхвысоких энергий в Якутске (Институт космофизических исследований и аэронауки РАН), дают новую информацию о космических лучах в области энергий $E \gg 10^{14}—10^{20}$ эВ. На Тянь-Шане функционирует уникальная высокогорная научная станция космических лучей Физического института РАН.

Для регистрации космических частиц с $E > 10^{20}$ эВ требуются детекторы очень большой площади, поскольку поток частиц таких энергий очень мал. В среднем за 100 лет на площадку в 1 км^2 падает всего одна высокоэнергетичная частица. Сейчас в мире сооружаются три гигантские установки для регистрации широких атмосферных ливней от частиц сверхвысоких энергий. Одна из них — в России, ее детектор будет иметь площадь 1000 км^2 , две другие, с площадью сбора по 3000 км^2 каждая, — на Северо- и Южно-Американском континентах.

В стадии проработки находится проект по регистрации самых мощных (гигантских) атмосферных ливней при помощи зеркала с площадью $\sim 10 \text{ м}^2$, устанавливаемого на спутнике. Дело в том, что ПКЛ с $E > 10^{19}$ эВ в результате взаимодействия с ядрами воздуха порождают ливни с числом вторичных электронов $N_e > 10^{10}$. Эти электро-

ны теряют энергию на возбуждение и ионизацию атмосферных молекул и атомов, и вдоль оси ливня в атмосфере образуется светящееся пятно. Такие пятна будут отражаться зеркалами, установленными на одном или нескольких спутниках, в направлении Земли.

В новом столетии энергетический спектр и ядерный состав космических лучей в области $E = 10^{14}—10^{16}$ эВ будет изучен прямыми методами, когда экспериментальная установка улетит на космической ракете за пределы атмосферы. Первый подобный эксперимент в нашей стране был проведен под руководством Н.Л.Григорова (Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ) еще в 60—70-е годы. Тогда вне атмосферы определялись спектры и ядерный состав ПКЛ в области энергий $E = 10^{11}—10^{14}$ эВ. Калориметр, прибор для измерения энергии и заряда космических частиц, был размещен на спутниках серии «Протон» на околоземной орбите; он выполнил прямые измерения спектров ПКЛ. Однако «заглянуть» в область энергий частиц с $E > 10^{14}$ эВ, где поток частиц очень мал, тогда не удалось, так как светосила прибора, которая лимитировалась его весом, была для этого недостаточной. Сейчас техника физического эксперимента позволяет увеличить светосилу аппаратуры и продвинуться в область бо́льших энергий. Предложено несколько экспериментальных установок, чтобы регистрировать частицы в области излома спектра ПКЛ. Для измерения энергии частицы предполагается использовать как сцинтилляционный метод (для электронов и фотонов), так и супермонитор (для потока нейтронов [3]). Во втором случае можно будет надежно отделить электроны ПКЛ от космических ядер.

Загадки
высокоэнергетичных частиц

При изучении спектра ПКЛ в области очень высоких энергий

* Астрономическая единица (а.е.) — расстояние от Земли до Солнца, $1 \text{ а.е.} = 150 \text{ млн км}$.

были обнаружены две особенности. Первая — это излом в спектре частиц при $E \sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ (отмечен вертикальной линией В на первом рисунке), открытый на установке ШАЛ НИИЯФ МГУ С.Н.Верновым и Г.Б.Христиансенom почти 40 лет назад. Понять происхождение излома на кривой спектра крайне важно для установления источников космических частиц и механизмов ускорения последних. В настоящее время предложено несколько гипотез, объясняющих эту особенность. Большая часть ПКЛ с энергиями $E \sim 10^{17}$ эВ, по-видимому, образуется в нашей Галактике. Однако частицы с $E > 3 \cdot 10^{15}$ эВ слабо удерживаются галактическим магнитным полем и диффундируют в метагалактическое пространство. С ростом энергии частиц происходит более быстрая утечка из Галактики протонов по сравнению с другими ядрами. В этом случае при $E \sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ в первичном космическом излучении доля ядер, более тяжелых, чем протоны, должна была бы стать больше, но надежных экспериментальных данных в пользу этого пока нет.

Иначе объясняют причину излома в спектре ПКЛ С.И.Никольский и В.А.Ромахин. Они связывают его с тем, что характеристики акта взаимодействия первичных частиц (в основном протонов) с ядрами изменяются при $E > 3 \cdot 10^{15}$ эВ. Они пришли к такому заключению на основе анализа данных многолетних наблюдений ШАЛ на высокогорной Тянь-Шаньской научной станции ФИАН. Каждый ШАЛ рождается при взаимодействии космической частицы высокой энергии с ядром какого-нибудь атома в атмосфере. После акта взаимодействия ливень сначала развивается (число частиц в нем растет), достигает максимума своего развития и затем затухает (число частиц ливня уменьшается). Поскольку взаимодействие первичной космической частицы с ядром может произойти в верхних, средних или нижних слоях атмосферы, то в зависимости от вы-

соты точки взаимодействия мы на уровне наблюдения регистрируем затухающий, зрелый или молодой ливень. Анализ данных показал, что вклад в спектр ШАЛ после излома дают в основном молодые ливни, т.е. меняется «возраст» ливней. В ближайшее десятилетие будет окончательно поставлена точка в проблеме, известной более четырех десятилетий.

Другая аномалия в спектре ПКЛ была обнаружена сравнительно недавно и пока не имеет достаточно убедительного объяснения. Были зарегистрированы гигантские широкие атмосферные ливни, возникающие от ПКЛ с энергией $E > 5 \cdot 10^{19}$ эВ (вертикальная линия С на первом рисунке). Считалось, что частицы таких энергий не должны попадать на Землю, так как их источники находятся на больших расстояниях от нашей Галактики и при распространении во Вселенной эти частицы потеряют свою энергию в результате столкновений с фотонами реликтового излучения (впервые предсказали и рассчитали этот эффект К.Грейзен, Г.Т.Зацепин и В.К.Кузьмин). Но по мере накопления событий гигантских атмосферных ливней становилось ясно, что спектр при сверхвысоких энергиях не «обрезается». Частицы ПКЛ таких огромных энергий могут наблюдаться у Земли в том случае, если их источник (или источники) находится на расстоянии не более 40 Мпк (менее $4 \cdot 10^{24}$ м, для сравнения: размер нашей Галактики около 10^{21} м). Однако на таких близких расстояниях от Земли трудно найти звездные объекты, которые могли бы ускорять частицы до таких огромных энергий.

Еще одна загадка, обнаруженная в экспериментах с использованием рентген-эмульсионных камер, заключается в том, что неожиданно часто самые высокоэнергетичные частицы ливня распространяются в виде достаточно плоского веера. Явление выстроенности, или компланарности, высокоэнергетичных час-

тиц в стволах ливней было открыто группой С.А.Славятинского с сотрудниками (ФИАН) на Памире, а также французским ученым Ж.П.Капдевилем.

Эти факты еще ждут своего объяснения.

Солнце и космические лучи

Поток КЛ сравнительно низких энергий, $E < 5 \cdot 10^{10}$ эВ (до линии А на первом рисунке), регистрируемый на Земле, изменяется во времени и пространстве в зависимости от уровня солнечной активности [4]. Околосолнечное пространство заполнено движущимся в радиальном направлении от Солнца ионизованным газом — солнечным ветром — с вмороженным в него солнечным магнитным полем. Из-за вращения Солнца вокруг своей оси (период вращения ~ 27 сут) это поле закручивается в спираль. Квазисферическая область вокруг Солнца, имеющая радиус ~ 100 а.е., где вмороженное в солнечный ветер поле доминирует над межзвездным, называется гелиомагнитосферой. Гелиомагнитосфера разделена нейтральным токовым слоем на две полусферы. В одной полусфере силовые линии межпланетного магнитного поля направлены к Солнцу, в другой — от Солнца.

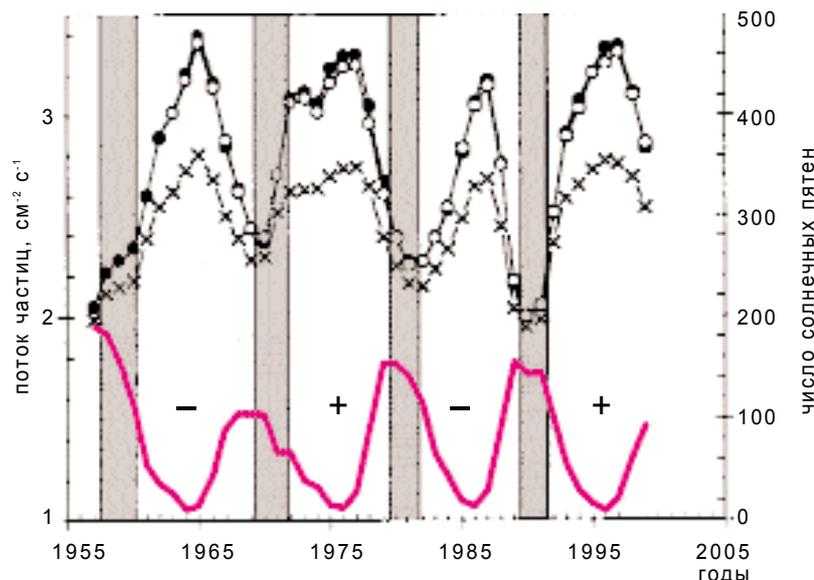
КЛ приходят в околосолнечное пространство из межзвездной среды и, распространяясь в гелиомагнитосфере, рассеиваются на магнитных неоднородностях, так что их движение похоже на беспорядочные перемещения броуновских частиц в жидкости. При этом некоторые частицы снова выносятся в межзвездную среду.

Уровень активности Солнца определяется феноменологически по нескольким признакам: числу солнечных пятен (или групп пятен), потоку радиоизлучения, числу солнечных вспышек различной мощности и др. Его величина испытывает значительные временные изменения, на-

иболее существенный из которых — 11-летний цикл солнечной активности. Изменения направлений магнитного поля в полярных областях Солнца и в солнечных пятнах происходят с удвоенным, 22-летним периодом. Так как магнитное поле Солнца выносится в гелиосферу солнечным ветром, знак силовых линий межпланетного магнитного поля в северной и южной частях гелиосферы определяется знаком магнитного поля в полярных широтах Солнца. Примерно в максимуме активности 11-летнего солнечного цикла происходит изменение знака магнитных полей на Солнце и соответственно в гелиосфере. Солнечные циклы оказывают сильное модулирующее воздействие на процессы распространения КЛ в гелиосфере.

Для изучения связи КЛ с солнечной активностью в конце 50-х годов была создана мировая сеть специальных станций — нейтронных мониторов. Одновременные показания этих станций позволяют получать мгновенную картину распределения потоков космических частиц в межпланетной среде. В нашей стране такую сеть организовал С.Н.Вернов. Более 40 лет на территории России работают восемь станций КЛ, на которых проводятся круглосуточные измерения. Наряду с регистрацией сетью наземных станций Вернов и А.Н.Чарахчян наладили регулярные наблюдения КЛ в атмосфере Земли в северных полярных широтах, в Антарктиде и на средних широтах. Сейчас в нашей стране накоплен ряд экспериментальных данных о потоках заряженных частиц в атмосфере на разных уровнях (от земной поверхности до высот 30—35 км), охватывающий период с 1957 г. по настоящее время.

Сравнение временно́х зависимостей потока галактических КЛ, регистрируемых в максимуме их высотного хода в стратосфере северных, южных и средних широт (Долгопрудненская научная станция ФИАН), и временно́х

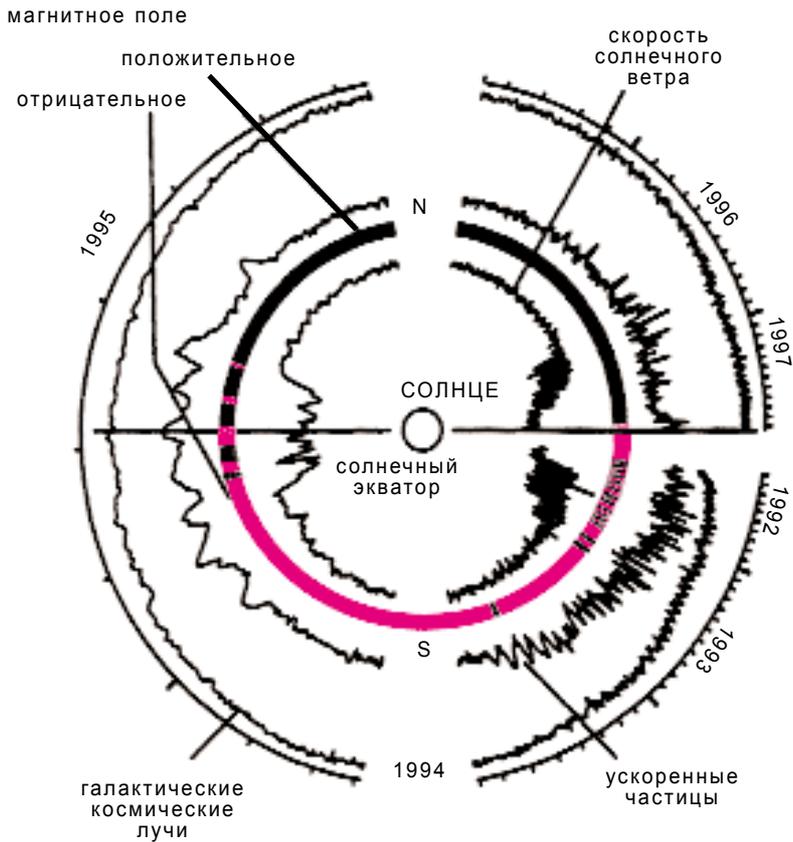


Временные изменения среднегодового числа солнечных пятен (показано цветом) и среднегодовых значений полного потока галактических космических лучей в атмосфере. Знаки (+) и (-) соответствуют направлению магнитных полей в северной полярной шапке Солнца. Поток частиц измерялся в северных полярных широтах (●), в Антарктиде (○) и в средних широтах (×). Заштрихованные полосы обозначают периоды инверсий общего магнитного поля Солнца.

хода уровня солнечной активности (среднегодового числа солнечных пятен) показывает следующее. Поток КЛ изменяется в противофазе с 11-летним циклом солнечной активности и ведет себя по-разному в положительных и отрицательных фазах солнечного магнитного цикла: в отрицательные фазы (1960—1968 и 1982—1989) кривые изменения потока КЛ имеют остроконечную форму, в положительные (1972—1980 и 1992—2000) зависимость сильно сглажена. Такое различие в поведении КЛ вызвано сменой направления скорости дрейфа заряженных частиц в квазирегулярных магнитных полях гелиомагнитосферы. В положительные фазы солнечного магнитного цикла частицы дрейфуют из области высоких гелиоширот к плоскости солнечного экватора (к нейтральному токовому слою), в отрицательные фазы —

наоборот, от низких (от нейтрального токового слоя) к высоким гелиоширотам.

Наряду с долговременными происходят и более короткопериодические изменения потока КЛ. К ним прежде всего относятся 27-дневные и суточные вариации. Кроме того, наблюдаются спорадические вариации, называемые Форбуш-понижениями, когда внезапно, в течение нескольких часов, поток частиц, регистрируемый наземными станциями, в атмосфере Земли или на космических аппаратах, начинает резко падать. Такие события происходят после мощных взрывов на Солнце. Образовавшаяся ударная волна распространяется в межпланетной среде со скоростью, достигающей 1000 км/с и более. Эта ударная волна несет перед собой усиленное солнечное магнитное поле, которое затрудняет проникновение



Схематическое изображение (в полярных координатах) зависимостей потока космических лучей, скорости солнечного ветра и направления межпланетного магнитного поля от гелиошироты, полученных на космическом аппарате «Ulysses» в минимуме солнечной активности 1994—1996 гг. Показан меридиональный разрез гелиосферы. Неравномерность временной шкалы, которая изображена на самой большой окружности, связана с различной скоростью движения космического аппарата вокруг Солнца.

заряженных частиц внутрь высокоскоростного потока. Поэтому, когда Земля оказывается за фронтом ударной волны, интенсивность КЛ падает. Поскольку вспышки на Солнце происходят чаще всего в годы высокой солнечной активности, в эти периоды наиболее часто генерируются ударные волны и наблюдаются Форбуш-понижения КЛ.

В середине 70-х годов в экспериментах на космических аппаратах и искусственных спутниках Земли была открыта так называемая аномальная компонен-

та галактических КЛ. Аномальность заключается в том, что в КЛ появляются неполоностью ионизованные атомы He, C, N, O, Ne и Ar. Они в основном обладают энергией $E \sim (10^6 - 10^7)$ эВ/нуклон, а их спектр отличается от спектра галактических КЛ более высоких энергий. Американский ученый Л.Фиск предложил следующий механизм образования аномальной компоненты. Нейтральные атомы межзвездного газа проникают в гелиосферу, где происходит их ионизация солнечным коротковолновым излу-

чением. Затем эти ионы выносятся солнечным ветром на границу гелиосферы и ускоряются ударной волной, которая существует на этой границе (на расстояниях ~ 100 а.е.). Затем неполоностью ионизованные ускоренные ионы диффундируют внутрь гелиосферы. Природа аномальных частиц в КЛ в настоящее время активно изучается.

В 90-е годы европейскими и американскими учеными был проведен уникальный эксперимент: космический аппарат «Ulysses» впервые пролетел над полюсами Солнца и зафиксировал гелиоширотное распределение космических лучей, скорости и плотности солнечной плазмы, величину межпланетного магнитного поля. Измерения проводились на расстояниях 2—5 а.е. в период низкой солнечной активности. Был получен неожиданный результат: радиальная составляющая межпланетного магнитного поля во всем диапазоне гелиоширот, которые прошел космический аппарат (от 80° с.ш. до 80° ю.ш.), оказалась постоянной. Прямые измерения подтвердили, что скорость солнечного ветра увеличивается с ~ 400 км/с до ~ 800 км/с при переходе от экваториальных гелиоширот к средним и полярным (ранее об этом судили по наземным радионаблюдениям «мерцаний» солнечной плазмы). Полет этого аппарата продолжается, в 2001 г. он еще раз пройдет над полюсами Солнца и проведет измерения уже в период высокой солнечной активности.

Во время роста солнечной активности в областях Солнца, в которых сосредоточено много пятен и имеется сложная конфигурация фотосферных магнитных полей, неожиданно возникает яркое свечение, представляющее собой вспышку в видимом свете. Примерно в это же время наблюдается увеличение радиоизлучения Солнца и очень часто — появление рентгеновского и гамма-излучений, выброс вещества из солнечной короны. Если вспышка достаточно мощная, в ней

с большой вероятностью ускоряются заряженные частицы, которые приходят на орбиту Земли. В настоящее время считается, что солнечная вспышка происходит благодаря энергии, выделяющейся в процессе пересоединения солнечного магнитного поля в нейтральном токовом слое. Заряженные частицы ускоряются в этом слое и затем распространяются в межпланетное пространство.

Распространение солнечных КЛ в межпланетной среде определяется условиями, которые существовали в ней до вспышки. Если условия были спокойными, т.е. скорость солнечного ветра не слишком отличалась от средней и магнитное поле не испытывало существенных флуктуаций, то солнечные частицы диффундируют от места генерации в межпланетную среду, причем диффузия вдоль магнитных силовых линии оказывается определяющей. Если при вспышке на Солнце была генерирована мощная ударная волна, частицы длительное время ускоряются на фронте этой волны, пока она распространяется в межпланетной среде. Когда магнитная силовая линия межпланетного магнитного поля соединяет место вспышки на Солнце и Землю, ускоренным частицам легче всего попасть на Землю.

Хотя за последние 10—15 лет в изучении солнечных вспышек получено много новой информации, до сих пор окончательно не установлен механизм ускорения частиц, не определены максимально достижимые энергии вспышечных частиц, нет и единой модели распространения солнечных частиц в межпланетной среде — так что ученым в XXI в. еще остается над чем поработать.

Тем более что потоки заряженных частиц, ускоренных во вспышках на Солнце, являются радиационноопасными. Спасают Землю от этой губительной радиации магнитное поле и атмосфера. Но космонавтам, находящимся на околоземной орбите

или отправляющимся в далекие космические путешествия, например к Марсу, необходимо иметь заблаговременную информацию об опасных потоках частиц, чтобы принять защитные меры (укрыться в специальном отсеке). В настоящее время создается Всемирная служба контроля за космической погодой, разрабатываются методы прогнозирования солнечных вспышек космических лучей. Уже запущены специализированные космические аппараты, которые следят за процессами на Солнце и в межпланетной среде. Один из них — солнечная обсерватория (SOHO)—американский космический аппарат, находящийся на расстоянии ≈ 1.5 млн км от Земли, где гравитационные силы Солнца и Земли, действующие на него, уравновешены (точки Лагранжа). Большой комплекс современной аппаратуры, установленный там, позволяет вести оперативные наблюдения за солнечной активностью, обнаруживать выбросы вещества из солнечной короны до их прихода на Землю, измерять параметры межпланетной плазмы, потоки галактических и солнечных космических лучей.

Свидетели взрывов близких Сверхновых

Результаты многолетних исследований КЛ в широком диапазоне энергий дают возможность оценить, когда и где они были рождены. Из данных наблюдений следует: среднее время жизни галактических КЛ примерно $3 \cdot 10^8$ лет и определяется либо выходом частиц из Галактики, либо их поглощением за счет неупругих взаимодействий с веществом межзвездной среды.

В настоящее время установлено, что поток КЛ в области энергий $10^{11} \text{ J} < E < 10^{14} \text{ эВ}$ анизотропен. Один из первых результатов по анизотропии космических частиц для энергий $E > 10^{12} \text{ эВ}$ был получен на Баксанской установке. Несмотря на малую вели-

чину анизотропии (доли процента), ее обнаружение очень важно, так как может свидетельствовать о существовании близких (по космическим масштабам) источников КЛ.

О возможном близком источнике КЛ говорит и недавно замеченное постепенное уменьшение потока космических частиц (отрицательный тренд, равный нескольким сотым процента в год). Этот эффект выявляется в долговременных рядах данных, полученных при стратосферных и наземных измерениях в периоды минимумов солнечной активности.

Если использовать простую модель диффузионного и конвективного распространения частиц, ускоренных при взрыве звезды, можно рассчитать время взрыва Сверхновой и расстояние, на котором этот взрыв произошел. Вблизи Солнечной системы, в сфере радиусом менее 300 пк (10^{19} м) есть несколько звездных объектов (остатков Сверхновых), которые могли быть источниками космических лучей, регистрируемых на Земле (см. таблицу).

Решающим доказательством существования близкого к Солнечной системе источника КЛ может быть обнаружение космических электронов с энергией $E_e \approx 5 \cdot 10^{12} \text{ эВ}$. Такие электроны при распространении в межзвездной среде от источника к Земле быстро расходуют энергию на тормозное излучение в магнитном поле Галактики и могут прийти к Земле только от близкого источника. Возможно, эта задача будет решена в рамках международного космического эксперимента «Рим—Памела», который планируется начать в 2003 г. В этой работе участвуют Россия (Московский инженерно-физический институт — головная организация, ФИАН, Физико-технический институт, Санкт-Петербург), Италия, Швеция, ФРГ и США. Главная цель — исследовать античастицы (антипротоны, позитроны, ядра антигелия), но небольшая модернизация прибора позволит надежно отличать электроны от

Ближайшие к Солнечной системе звездные объекты (остатки Сверхновых) — возможные источники КЛ. Приведены расстояния до этих объектов и время после их взрыва.

Источник	r , пк	t , лет	Источник	r , пк	t , лет
Вела	500	$(2-3) \cdot 10^4$	Петля 1	170	$2 \cdot 10^5$
Моногем	300	$8.6 \cdot 10^4$	Геминга	<100	$3.4 \cdot 10^5$

других частиц. Трудность регистрации электронов высокой энергии состоит в том, что их поток очень мал, менее 1% от полного потока космических частиц. Чтобы выделить электроны, предполагается регистрировать нейтроны в каскадах, образованных в установке первичными космическими частицами. В каскадах, рожденных электронами, нейтронов будет гораздо меньше, чем в каскадах от космических протонов или ядер.

Космические лучи и атмосферные процессы

Попадая в земную атмосферу, космические частицы с $E < 5 \cdot 10^{10}$ эВ практически полностью теряют свою энергию из-за рождения вторичных частиц, так что до высот 15—25 км наблюдается разномножение частиц, а на меньших высотах идет уже процесс поглощения. Кроме того, КЛ испытывают воздействие магнитного поля Земли, которое существенно уменьшает поток первичных частиц, падающих на границу атмосферы в экваториальных районах по сравнению с полярными.

Таким образом, поток частиц в атмосфере зависит от высоты, уровня солнечной активности, а также геомагнитной жесткости обрезания R_c , которая определяется напряженностью геомагнитного поля в пункте наблюдения. Все частицы с энергией, отнесенной к заряду, $R > R_c$ будут про-

пускаться магнитным полем, а частицы с $R < R_c$ будут отклоняться им и не попадут в земную атмосферу (величина R_c минимальна в районе геомагнитных полюсов и максимальна в районе геомагнитного экватора).

Если сравнить потоки энергий, которые попадают на границу атмосферы от Солнца ($F \gg 10^{10}$ эрг·м⁻²·с⁻¹) и от КЛ ($F \gg 10^2$ эрг·м⁻²·с⁻¹ для частиц с энергией $E \leq 10^8$ эВ), то напрашивается очевидный вывод, что космические частицы не должны оказывать какого-либо существенного воздействия на процессы, происходящие в земной атмосфере. Однако если частицы КЛ перестанут попадать к нам, то на малых высотах электропроводность воздуха значительно уменьшится и изменятся условия накопления грозных зарядов. Возможно, произойдет уменьшение облачного покрова и количества осадков, что приведет к глобальным изменениям климата. Поэтому, несмотря на малую долю энергии, выделяемую КЛ в земной атмосфере, они играют важную, а иногда определяющую роль во многих атмосферных процессах.

Прежде всего космические частицы ионизуют воздух и создают в нем проводимость, которая обеспечивает работу глобальной токовой электрической цепи. Известно, что у земной поверхности имеется электрическое поле, величина которого ≈ -130 В/м. Это поле создается отрицательным зарядом Земли $\approx -6 \cdot 10^5$ Кл. В атмосфере от зем-

ной поверхности к нейтральному слою, расположенному в ионосфере на высоте 55—80 км, постоянно протекает электрический ток со средней плотностью $\approx 10^{-12}$ А/м². Такой ток в течение нескольких минут мог бы разрядить Землю, но этого не происходит. Электрическими генераторами, которые непрерывно подзаряжают Землю, служат молниевые разряды грозных облаков.

КЛ играют существенную роль в образовании облаков. Обнаружена высокая корреляция между изменениями потоков галактических КЛ, достигающих земной атмосферы, и площадью, занятой облаками. Поток КЛ оказывает воздействие на осадки: во время уменьшения потока заряженных частиц в атмосфере Земли уровень осадков уменьшается, а при увеличении потока частиц, например после прихода в атмосферу частиц, ускоренных в солнечной вспышке, интенсивность осадков увеличивается.

Качественно наблюдаемые явления можно объяснить следующим образом. В атмосфере имеются центры конденсации, на которых растут водяные капли. Такие центры могут быть нейтральными и заряженными. Заряженные создаются путем «прилипания» ионов к нейтральным, причем ионы в атмосфере образуются главным образом космическими лучами. А на заряженных центрах конденсации капли растут быстрее, чем на нейтральных.

В настоящее время в ЦЕРНе готовится эксперимент под названием «Облако» («Cloud»). Намечается исследовать воздействие заряженных частиц на образование капель воды. Специальная камера, в которой будут созданы условия, близкие к атмосферным на уровне образования облачности (высоты 2—5 км), подвергнется облучению пучком протонов от ускорителя. В результате удастся выяснить характер роста капель на нейтральных, положительно и отрицательно заряженных центрах конденсации.

Конечно, здесь мы не смогли охватить все аспекты физики космических лучей. Не менее важны вопросы их изотопного состава, механизмы ускорения частиц до предельно высоких энергий, гамма-астрономия космических лучей и др.

В новом столетии в физике космических лучей наверняка будут сделаны интересные открытия, и некоторые из них сегодня мы не можем себе даже представить. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 98-02-16420.

Литература

1. *Зацепин Г.Т.* // ДАН СССР. 1949. Т.67. №6. С.993—996.
2. *Зацепин Г.Т., Никольский С.И., Христиансен Г.Б.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1964. Т.28. №11. С.1876—1885.
3. *Antonova V.A., Chubenko A.P. et al* // Nucl. Phys. B. 1999. V.75A. P.333—336.
4. *Вернов С.Н.* // ДАН СССР. 1958. Т.120. №6. С.1231—1233.