



Л. И. МИРОШНИЧЕНКО

**солнце
и косми-
ческие
лучи**

Л. И. МИРОШНИЧЕНКО,
кандидат физико-математических наук



В этой брошюре рассказывается о нашем Солнце, о пятнах и вспышках на нем, о его невидимых посланцах — солнечных космических лучах. Тема эта обширна, а число исследователей растет из года в год. Достойный вклад в изучение Солнца вносят советские ученые-астрофизики

Средства и методы исследования солнечных космических лучей очень разнообразны — от многочисленных наземных обсерваторий, расположенных на всех континентах, до автоматических межпланетных станций. Данные наблюдений непрерывно накапливаются и анализируются. Много закономерностей и просто интересных, важных фактов из жизни нашего Солнца ученые уже выяснили, однако немало вопросов еще ждут своего решения.

Автор видел свою задачу в том, чтобы коротко и систематически изложить основные сведения о солнечных космических лучах, а также познакомить читателя с тем, как исследователи добывают драгоценные факты о Солнце и как объясняют их.

— Луна, чего ты ждешь?
— Возможности приветствовать Солнце,
которому должна уступить дорогу.
Рабиндранат ТАГОР

1. РУКА АСТРОНОМА — НА «ПУЛЬСЕ» СОЛНЦА

Солнце и космические лучи... В этих словах есть что-то давно знакомое, как утренняя роса, и в то же время — тайна безбрежных просторов Вселенной. Солнце — ближайшая к нам звезда, самая «рядовая» среди множества других звезд. Но Солнцу человечество обязано жизнью, поэтому люди издавна интересовались своим дневным светилом. Страх перед Солнцем сменялся преклонением, но всегда человеческое любопытство брало верх, и люди узнали многие загадки Солнца, научились использовать его тепло и свет себе на пользу.

Но даже в характере близкого человека открываешь иногда неожиданные черточки, не всегда понятные (и не всегда приятные!). Солнце также имеет свой «характер», и лишь несовершенство человеческих знаний и инструментов для наблюдения не позволяло до последнего времени обнаружить некоторые очень важные его черты. Особенно бурно проявляется «характер» Солнца во время солнечных вспышек — мощных извержений энергии и вещества из раскаленной его атмосферы.

Поток малоэнергичных солнечных частиц обволакивает Землю (не приближаясь, однако, к ее поверхности на расстояние ближе 60 тыс. км) и вызывает магнитные бури, полярные сияния и другие геофизические явления. Ультрафиолетовое и рентгеновское излучение вспышек «возмущает» ионосферу¹ (рис. 1) и тем самым ухудшает распространение коротких радиоволн. На Земле тоже можно услышать «голос» Солнца: его радиоизлучение регистрируется специальными высокочувствительными приборами в широком диапазоне длин волн.

¹ Ионосфера состоит из нескольких слоев ионизированных частиц, простирается приблизительно от уровня 35 км над поверхностью Земли до высоты нескольких сотен километров.

Как отметил академик В. Л. Гинзбург, «космические лучи — это один из самых мощных способов познания Вселенной и ее законов... Изучать их — это значит постоянно следить за пульсом нашей звездной системы». Перефразируя эти слова, можно сказать, что изучать солнечные вспышки — значит держать руку на «пульсе» нашего Солнца.

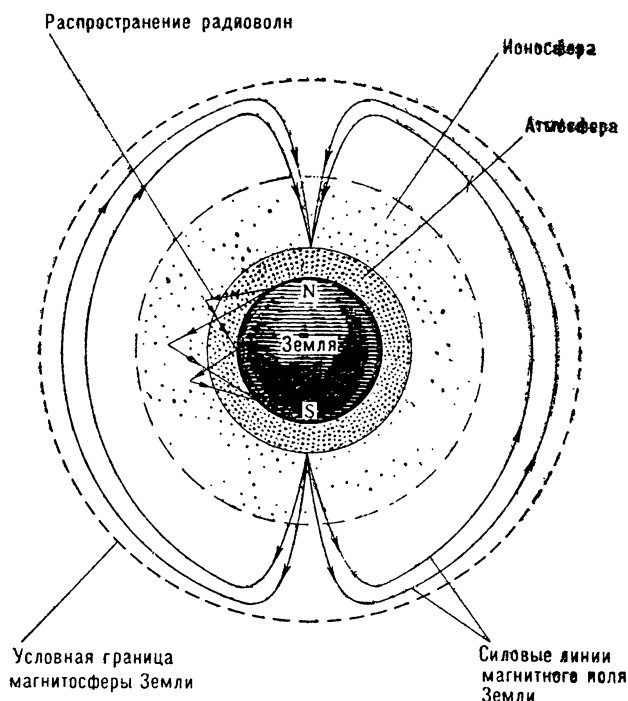


Рис. 1. Модель околоземного пространства.

Во время вспышек на Солнце создаются условия для ускорения заряженных частиц до энергий около 10^{10} эв (электрон-вольт)¹, которые принято называть солнечными космическими лучами из-за их близкого сходства с истинными космическими лучами галактического происхождения. Солнечные космические лучи играют важную роль в развитии вспышки и в динамических процессах в межпланетном пространстве. Они также оказывают заметное влияние на ионосферу полярных шапок Земли.

¹ На самых мощных наземных ускорителях подобных энергий удалось достигнуть только в последние несколько лет. Например, на Серпуховском ускорителе частицы разгоняются до энергии около $7 \cdot 10^{10}$ эв.

Чтобы выяснить место солнечных космических лучей в ряду других космических излучений, мы приглашаем читателя совершить мысленное путешествие в межпланетное пространство. Однако начать это путешествие нам придется с поверхности Земли, с тех «чрезвычайных происшествий», которые случаются иногда в повседневной будничной работе исследователей космических лучей.

2. СОБЫТИЕ, КОТОРОГО НЕ ЖДАЛИ

28 января 1967 г. было для космофизиков обычным зимним днем, не предвещавшим никаких особенных событий ни на Земле, ни в космосе. Магнитное поле Земли было спокойным, а активность Солнца — низкой. Как обычно, многочисленные обсерватории, разбросанные по всему земному шару от Арктики до Антарктики, вели непрерывные наблюдения за интенсивностью потока космических лучей.

Неожиданно около 8 ч 15 мин по гринвичскому времени (его называют также универсальным, или мировым) поток космических лучей начал довольно быстро увеличиваться. Это продолжалось около 3 часов, а затем поток начал медленно уменьшаться. Приблизительно через сутки интенсивность космических лучей вернулась к своему нормальному уровню. Увеличение интенсивности было особенно заметным на обсерваториях, расположенных в средних и высоких широтах. Если в Москве, например, поток космических лучей увеличился всего на 6% по сравнению с фоном, то на советской антарктической станции «Восток» увеличение было около 40%, а в Апатитах и Мирном — около 16%. На рис. 2 схематически показана картина этого явления.

Какова его причина? Обычно считают, что такие явления (получившие название «вспышек космических лучей») связаны с мощными солнечными вспышками. Однако особенно мощных вспышек 28 января 1967 г. на Солнце не было. Правда, одна очень слабая вспышка в юго-восточной части солнечного диска была все-таки отмечена астрономами Крымской обсерватории, при этом наблюдалось также увеличение потока солнечного радиоизлучения в сантиметровом и метровом диапазонах. Вероятно, усиление потока космических лучей 28 января 1967 г. было вызвано приходом к Земле солнечных частиц энергии от наблюдавшейся вспышки.

Это объяснение, однако, не является единственно возможным. Тщательный анализ данных по космическим лучам показывает, что быстрые частицы, вызвавшие «чрезвычайное происшествие» в январе 1967 г., могли прийти к Земле от вспышки... на обратной (невидимой) стороне Солнца! Приход частиц от такой вспышки заметить на Земле очень трудно. Дело

в том, что частицы с невидимой стороны Солнца придут к Земле лишь через сутки после вспышки, тогда как с видимой стороны они приходят за несколько часов (иногда за несколько десятков минут). Кроме того, поток частиц с обратной стороны Солнца будет примерно в 100 раз меньше, чем от вспышек на видимой стороне.

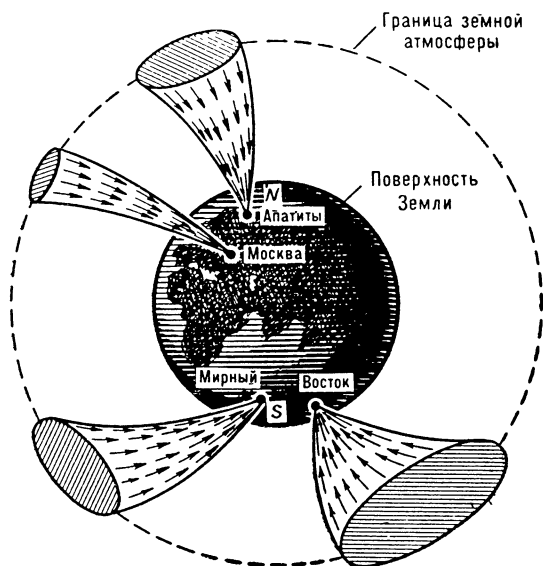


Рис. 2. Увеличение потока космических лучей на поверхности Земли 28 января 1967 г. Это явление наблюдалось, в частности, советскими станциями космических лучей (Москва, Апатиты, Мирный, Восток). Заштрихованные площади пропорциональны величине потока солнечных космических лучей.

Тем не менее был один исключительно интересный случай (20 ноября 1960 г.), когда определенно удалось зафиксировать приход солнечных космических лучей от вспышки на невидимой стороне Солнца. Вспышка произошла в активной области с долготой 120° к западу от центрального меридиана Солнца, т. е. на 30° за краем диска. Вспышку удалось заметить благодаря тому, что она, по-видимому, занимала огромный объем в солнечной атмосфере; во всяком случае высота области, охваченной усиленным свечением, была не менее 93 тыс. км над поверхностью Солнца. Именно поэтому вспышка «выглядела» из-за края диска (рис. 3). Увеличение потока космических лучей 20 ноября 1960 г. на Земле достигло 10%.

Два описанных события похожи на многие другие «вспышки космических лучей». Вместе с тем большое своеобразие

этих двух вспышек усиливает интерес астрофизиков к процессам на Солнце, а также к свойствам межпланетного пространства, куда мы теперь отправляемся в мысленное путешествие.

3. КОСМОС ПОЛОН ИЗЛУЧЕНИЙ

Представим себе, что мы находимся на борту космического корабля на расстоянии нескольких миллионов километров от Земли в межпланетном пространстве. Допустим, что нам удалось «остановиться» всего на 1 *сек*, чтобы «оглядеться» и прочесть показания приборов.

Что покажут приборы космического корабля? Они обнаружат, что космос полон излучений и пульсирующей энергии. Прежде всего в космосе мы имеем дело с проявлениями солнечной деятельности. Подсчитано, что за 1 *сек* Солнце излучает около $4 \cdot 10^{33}$ *эрг* в оптическом диапазоне, 10^{27} — 10^{29} *эрг* несет в себе «солнечный ветер» — непрерывный поток плазмы из расширяющейся короны и такого же порядка поток энергии уносится с поверхности Солнца за счет магнитных полей. Эти цифры относятся к спокойному Солнцу.

Но кроме того, Солнце «шумит» в радиодиапазоне на различных длинах волн. В межпланетном пространстве распро-

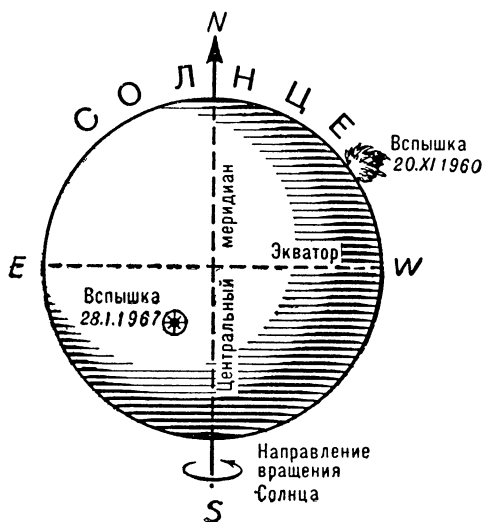


Рис. 3. Солнечная вспышка 20 ноября 1960 г., «выглядывающая» из-за края диска. Это первый случай, когда солнечные частицы высокой энергии пришли к Земле от вспышки с невидимой стороны Солнца. Звездочкой отмечена другая вспышка — возможная причина неожиданного возрастания потока космических лучей 28 января 1967 г.

страняются также радиоволны от других планет (например, известное радиоизлучение Юпитера), от радиогалактик, квазаров¹, межзвездного газа и т. д. Фактически в межпланетном пространстве можно наблюдать очень широкий диапазон электромагнитных волн — от километровых радиоволн до ультрафиолетовых и рентгеновских лучей с энергией до 100 кэв (килоэлектрон-вольт).

Магнитометры космического корабля показали бы меняющееся в пространстве и во времени межпланетное магнитное поле напряженностью $(5-10) \cdot 10^{-5}$ гс (гаусс). Колебания напряженности поля, как мы увидим, играют важную роль в распространении солнечных космических лучей.

Кроме электромагнитных излучений, в межпланетном пространстве постоянно присутствуют очень быстрые частицы — космические лучи галактического происхождения. Их поток почти изотропен (т. е. одинаков во всех направлениях) и приблизительно постоянен во времени, а плотность энергии на орбите Земли около 1 эв/см³.

В динамических и электромагнитных процессах в межпланетном пространстве и магнитосфере Земли решающая роль принадлежит солнечному корпускулярному излучению. Это излучение можно условно разделить на три типа: 1) спокойный «солнечный ветер», 2) солнечные корпускулярные потоки и 3) солнечные космические лучи.

«Солнечный ветер» представляет собой поток заряженных частиц (в основном протонов и электронов), непрерывно испускаемых из солнечной короны. К настоящему времени благодаря непосредственным измерениям в космическом пространстве, проведенным с помощью автоматических межпланетных станций, удалось изучить многие физические характеристики «солнечного ветра». В частности, подробная информация о нем была получена по измерениям на американском космическом аппарате «Маринер-2» в сентябре — декабре 1962 г. на расстояниях 100—150 млн. км от Солнца.

Самыми существенными параметрами «солнечного ветра» являются скорость u , концентрация протонов n_p и их энергия $\epsilon_{кр}$, измеряемая обычно в единицах температуры по абсолютной шкале Кельвина, причем $1 \text{ эв} = 1,16 \cdot 10^4 \text{ }^\circ\text{К}$.

По усредненным данным наблюдений, полученных с «Маринера-2», параметры «солнечного ветра» на орбите Земли имеют такие значения: $u = 500 \text{ км/сек}$, $n_p = 5 \text{ см}^{-3}$ и $T = 1,7 \cdot 10^5 \text{ }^\circ\text{К}$. Предельные значения $u = 350 \text{ км/сек}$, $n_p = 0,5-50 \text{ см}^{-3}$, $T = (1,5-1,9) \cdot 10^5 \text{ }^\circ\text{К}$. В некоторые периоды скорость снижается до 350—300 км/сек, а температура — приблизительно до $3 \cdot 10^4 \text{ }^\circ\text{К}$.

¹ «Квазизвездные радиоисточники» (сокращенно «квазары») были открыты в 1961 г. Основные свойства квазаров — очень малые размеры и переменность радиоизлучения во времени. Их природа пока неизвестна.

Если использовать значения скорости u «солнечного ветра», усредненные за каждые 27 дней (период вращения Солнца), то получим, что изменение концентрации протонов n_p обратно пропорционально изменению u . Температура «солнечного ветра» изменяется со временем по тому же закону, что и скорость. Концентрация частиц n_p при приближении к Солнцу возрастает примерно как квадрат расстояния, тогда как u и T практически не меняются с расстоянием. Уже из этих данных видно, что даже спокойный «солнечный ветер» представляет собой динамичный, изменчивый и сложный для изучения объект.

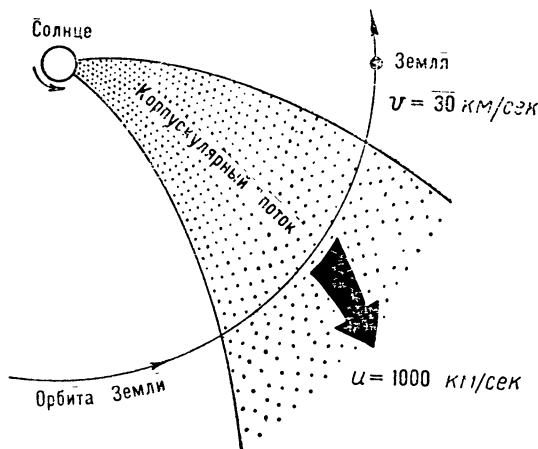


Рис. 4. Картина движения солнечного корпускулярного потока в межпланетном пространстве. Поток имеет форму конуса, искривленного из-за вращения Солнца. Поток «обтекает» Землю со скоростью около 1000 км/сек. Так как скорость движения Земли по орбите 30 км/сек, то ее можно считать практически неподвижной в потоке.

Во время солнечных вспышек «энергоотдача» Солнца увеличивается. Значительную долю энергии вспышек уносят так называемые **солнечные корпускулярные потоки**. Эти потоки по существу представляют собой усиленный «солнечный ветер». Типичный поток движется со средней скоростью $u = 1000$ км/сек, а концентрация частиц в нем на орбите Земли $n_p = 10$ см⁻³. Поток имеет форму конуса с полным углом развора до 120° (рис. 4). Масса вещества, содержащегося в таком потоке, будет около 10^{17} г, а полная энергия — примерно 10^{33} эрг.

Земное магнитное поле начинает «чувствовать» воздействие внешнего потока заряженных частиц, если их концентрация

превышает критическую величину $n_* = 10^{-8} \text{ см}^{-3}$. Так как «солнечный ветер» имеет концентрацию, намного превышающую указанный предел, то его воздействие на силовые линии магнитного поля Земли (см. рис. 1) оставляет «неизгладимый след»: геомагнитное поле постоянно сжато с солнечной стороны до расстояния около 10 земных радиусов (рис. 5) и вытянуто в антисолнечном направлении на десятки земных радиусов (так называемый «хвост» магнитосферы). Воздействие солнечных корпускулярных потоков, у которых концентрация еще выше, проявляется более «наглядно»: магнитосфера Земли деформируется сильнее, наблюдаются магнитные бури, полярные сияния, понижения интенсивности галактических космических лучей и т. д.

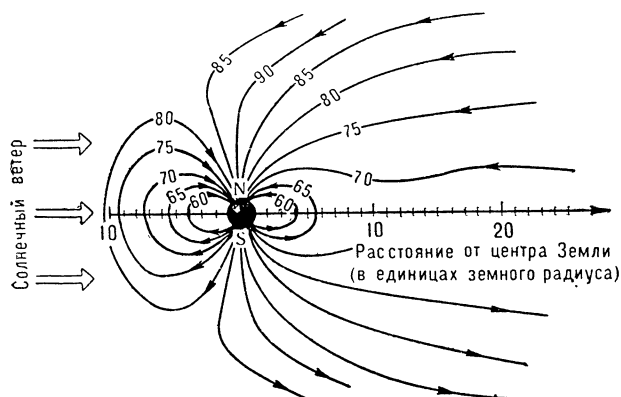


Рис. 5. Магнитное поле Земли, деформированное «солнечным ветром». Цифрами у силовых линий показана геомагнитная широта.

Солнечные космические лучи имеют небольшую концентрацию (по сравнению с первыми двумя типами корпускулярного излучения Солнца). Ее величина обычно не превышает 10^{-8} см^{-3} . Поток галактических космических лучей имеет еще меньшую концентрацию (10^{-10} см^{-3}). На рис. 6 схематически показаны интегральные спектры (т. е. распределение по энергиям) заряженных частиц, регистрируемых в межпланетном пространстве.

Как видно из рисунка, солнечные космические лучи 3 занимают промежуточное положение между межпланетной плазмой и истинными космическими лучами 4 галактического происхождения. Это означает, что в некоторых случаях поток быстрых частиц от солнечных вспышек может быть настолько большим, что эти частицы будут «сжимать» магнитосферу и

вызывать такие же геофизические явления, как и солнечный корпускулярный поток 2.

Критическая концентрация, при которой начинается воздействие частиц на геомагнитное поле, зависит от их кинетической энергии. Расчеты показывают, что для частиц с кинетической энергией $\epsilon_k = 10$ эв («солнечный ветер») критическая

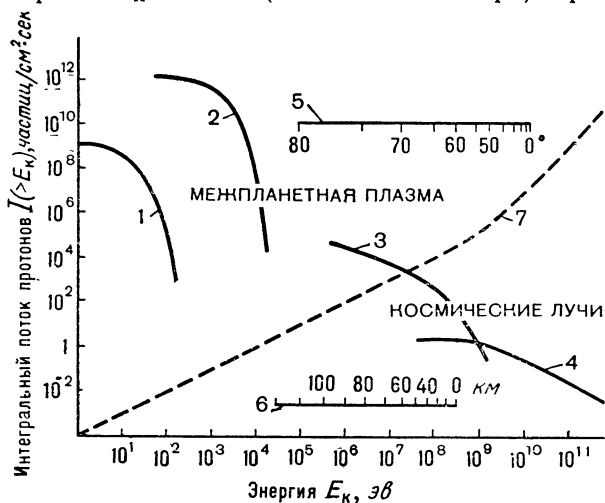


Рис. 6. Интегральные энергетические спектры частиц, наблюдаемых в межпланетном пространстве:

1—«солнечный ветер»; 2—солнечный корпускулярный поток; 3—солнечные космические лучи; 4—космические лучи галактического происхождения; 5—широта, на которую могут приходиться частицы данной энергии; 6—высота в атмосфере, на которую могут проникать частицы заданной энергии; 7—условная граница между космическими лучами и межпланетной плазмой.

концентрация составляет $n_* = 3 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-3}$; при $\epsilon_k = 10^3$ эв (солнечный корпускулярный поток) эта величина равна $3 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-3}$; при $\epsilon_k = 10^7$ эв и 10^8 эв (солнечные космические лучи) значения n_* равны соответственно $3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-3}$ и $8,45 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-3}$.

Для сравнения воспользуемся экспериментальными данными по двум вспышкам: 15 июля 1959 г. и 28 сентября 1961 г. Сравнимые данные по этим вспышкам имеются только для интервала энергии 100—400 Мэв (мегаэлектрон-вольт). В первом случае критическая концентрация протонов в этом интервале составляла $1,37 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-3}$, тогда как во втором — $7,3 \cdot 10^{-10} \text{ см}^{-3}$. Сравнивая эти значения с расчетами, можно заключить, что вспышка солнечных космических лучей 28 сентября 1961 г. не была геоэффективной, а вспышка 15 июля 1959 г. могла дать геомагнитный эффект.

Если оценить плотность энергии, заключенной в солнечных космических лучах от вспышки 15 июля 1959 г. в интервале 100—400 Мэв, то получим величину, равную $2,0 \cdot 10^{-8} \text{ эрг/см}^{-3}$,

что соответствует плотности энергии магнитного поля с напряженностью $8,55 \cdot 10^{-4}$ гс. Интересно узнать, какому расстоянию от центра Земли соответствует такая напряженность геомагнитного поля?

Напряженность геомагнитного поля приближенно описывается таким соотношением

$$H = H_0 (r_3/z)^3 \text{ для } z > r_3,$$

где r_3 — радиус Земли;

H_0 — напряженность геомагнитного поля на экваторе, равная 0,3 гс;

z — расстояние от центра Земли в экваториальной плоскости.

Используя это соотношение, можно вычислить расстояние, которого могли бы достигнуть солнечные частицы 15 июля 1959 г. Получим, что $z = 7r_3$ при $H = 8,55 \cdot 10^{-4}$ гс. Так как магнитосфера Земли с солнечной стороны (согласно прямым измерениям, проведенным с помощью спутников) простирается на расстояние до $10r_3$ (см. рис. 4), то напрашивается вывод, что солнечные космические лучи в некоторых случаях могут коллективно вторгаться в магнитосферу на значительную глубину.

Такое вторжение должно вызвать возмущения магнитного поля, а возможно полярные сияния и другие ионосферные эффекты в высоких широтах, поскольку именно в эти области должно в основном передаваться возмущение силовых линий магнитного поля из экваториальной плоскости Земли на расстояниях от ее центра больше чем $7r_3$ (см. рис. 5). Полярные сияния и другие подобные им явления во время вспышек космических лучей до сих пор не наблюдались. В середине июля 1959 г. электромагнитная обстановка в межпланетном пространстве вблизи Земли была исключительно сложной, и можно предположить, что некоторые геофизические явления в этот период могли быть вызваны интенсивным потоком солнечных космических лучей умеренной энергии (100—400 Мэв). Проверить это предположение очень трудно, поскольку в середине июля 1959 г. наблюдалось много геофизических явлений, которые обычно объясняются суперпозицией (наложением) нескольких корпускулярных потоков.

Корпускулярные потоки имеют гораздо большую энергию, чем обычный («спокойный») «солнечный ветер», и поэтому они должны сильнее сжимать магнитосферу Земли. При концентрации частиц 10^3 — 10^4 см⁻³ и скорости потока около 1000 км/сек размер области, занятой геомагнитным полем, может уменьшиться от $10r_3$ (см. рис. 5) до нескольких радиусов Земли.

Как показывают прямые измерения, в межпланетном пространстве имеется магнитное поле, напряженность которого

непостоянна в пространстве и времени и колеблется в пределах от 10^{-5} до 10^{-4} *гс*. Это соответствует плотности энергии от $4 \cdot 10^{-12}$ до $4 \cdot 10^{-10}$ *эрг/см³*. Из сказанного выше видно, что в некоторых случаях такая плотность энергии сравнима с плотностью энергии солнечных космических лучей (или даже меньше, как в случае вспышки 15 июля 1959 г.). Именно поэтому распространение частиц носит коллективный характер, т. е. они движутся в магнитном поле в виде «облака». Влияние галактических космических лучей на динамические и электромагнитные процессы в межпланетном пространстве незначительно, поскольку их энергия в 10^3 — 10^4 раз меньше солнечных.

4. МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Как мы уже знаем, к Земле приходят солнечные космические лучи с энергиями от 10^6 до 10^{10} *эв*. Нижняя граница спектра условна и зависит от соотношения плотностей энергии солнечных космических лучей и магнитных полей, в которых происходит распространение частиц (локальные поля в солнечной короне, межпланетное и геомагнитное поле). Для большинства вспышек нижняя граница спектра, по-видимому, находится в области энергий 10^5 — 10^6 *эв*. Например, после вспышки 28 сентября 1961 г. в межпланетном пространстве регистрировались солнечные частицы с энергиями вплоть до 10^6 *эв* = 1 *Мэв*.

Верхняя граница спектра определяется тем, могут ли ускоренные частицы удержаться в источнике. Если предположить, что источником является свёрхкорона Солнца с радиусом $5 \cdot 10^{12}$ *см* и напряженностью неоднородностей магнитного поля около 10^{-4} *гс*, то верхний предел энергии частиц, удерживаемых в такой ловушке, равен $1,5 \cdot 10^{11}$ *эв*.

В период самой мощной из наблюдавшихся до сих пор вспышек (23 февраля 1956 г.) были зарегистрированы релятивистские солнечные протоны с $\epsilon_k = 2 \cdot 10^{10}$ *эв* (скорость протонов с энергией больше 10^9 близка к скорости света $c = 300\,000$ *км/сек*; частицы с такой скоростью принято называть релятивистскими). Строго говоря, верхняя граница экспериментально не поддается точному определению из-за очень малой интенсивности потока солнечных частиц при высоких энергиях.

Столь значительное различие (более чем в 10 тыс. раз!) между минимальной и максимальной энергиями солнечных космических лучей требует применения различных методов и приборов для их регистрации в различных интервалах энергий. Но прежде чем переходить к рассказу о методах измерения космических лучей, необходимо вспомнить об одном историческом недоразумении.

История физики космических лучей (как и любой другой

отрасли науки) изобилует неожиданными открытиями, драматическими недоразумениями, успехами и неудачами. Достаточно вспомнить, что сам термин «космические лучи» отразил непонимание природы этого излучения на заре зарождения новой отрасли науки — физики космических лучей. Само открытие космических лучей произошло как бы случайно, мимоходом.

В начале XX в. физики были озабочены природой радиоактивности и в связи с этим серьезно заинтересовались причинами постепенной разрядки электроскопа. Сначала предполагали, что причина разрядки — это естественная радиоактивность земных пород, воды и воздуха. Однако измерения на различных высотах над поверхностью Земли (в горах и в стратосфере) показали вопреки ожиданиям, что, начиная примерно с 1000 м над уровнем моря, скорость разрядки электроскопа (т. е. степень ионизации воздуха) начинала постепенно возрастать. На высоте 9000 м ионизация возрастала уже в 10 раз.

Этот факт указывал на существование излучения неизвестного происхождения, приходящего на поверхность Земли из верхних слоев атмосферы или даже из космического пространства и обладающего огромной проникающей способностью по сравнению с «обычной» радиоактивностью. Это излучение получило вначале название «высотного излучения», или «ультра-излучения», а в дальнейшем стало называться космическими «лучами» (по аналогии с лучами Рентгена). И хотя впоследствии выяснилось, что космические лучи на границе атмосферы в действительности представляют собой заряженные частицы (в основном протоны), а не электромагнитное излучение, их прежнее название сохранилось до сих пор.

Для физиков 20—30-х годов нашего столетия самой поразительной особенностью космических лучей был, пожалуй, рост их интенсивности с высотой. Возник естественный вопрос: какова же интенсивность космических лучей на границе атмосферы и в межпланетном пространстве (за пределами магнитного поля Земли)? Штурм больших высот, предпринятый в 30—40-х годах с помощью шаров-зондов и геофизических ракет, привел к обнаружению нового удивительного факта: оказалось, что полная интенсивность космических лучей имеет максимум на высоте около 20 км. При дальнейшем подъеме к границам атмосферы она падала вдвое уже на высоте около 40 км (рис. 7), оставаясь затем постоянной вплоть до самых больших высот, достигнутых ракетами, — около 150 км.

Осмысление этих экспериментальных фактов привело исследователей к трем фундаментальным выводам: во-первых, Земля находится в потоке первичных космических лучей с приблизительно постоянной интенсивностью; во-вторых, в атмосфере происходит «размножение» частиц за счет взаимо-

действий налетающих частиц с ядрами атомов воздуха; в-третьих, вторичные частицы (нейтроны, μ -мезоны, электроны и др.), достигнув максимума интенсивности, поглощаются затем в атмосфере по определенному закону.

Кроме того, стало ясно, что воздушная оболочка Земли представляет для первичных космических лучей практически непроницаемую «броню». Толщину атмосферы принято выражать количеством вещества (в граммах), приходящегося на 1 квадратный сантиметр поверхности Земли. На уровне моря эта величина составляет около 1030 г/см^2 . Чтобы вызвать ядерное расщепление в воздухе, первичной частице достаточно пройти слой вещества толщиной около 60 г/см^2 . Совершенно очевидно, что ни одна первичная частица практически не дойдет до уровня моря, какой бы большой энергии она ни была. Таким образом, прибор, установленный на уровне моря, будет день и ночь регистрировать непрерывный «дождь» только вторичных частиц.

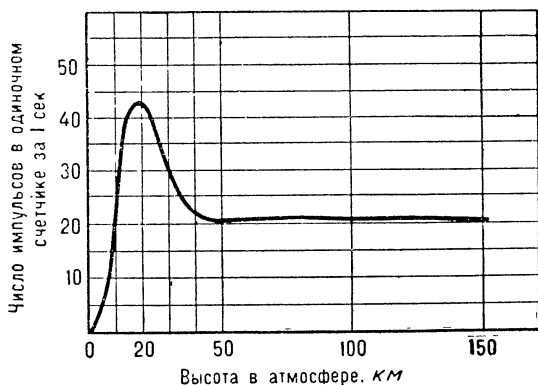


Рис. 7. Изменение полной интенсивности космических лучей в зависимости от высоты в атмосфере.

Поэтому в изучении космических лучей широко используются измерения в стратосфере, различные косвенные методы, измерения с помощью ракет, спутников, межпланетных станций, а также радиохимический метод.

Наземные наблюдения. Непрерывные наземные наблюдения космических лучей были начаты около 35 лет назад. Основными приборами для этой цели являются ионизационная камера (рис. 8), нейтронный монитор (рис. 9) и счетчиковый мезонный телескоп (рис. 10). Названия двух последних приборов отражают тот факт, что они могут регистрировать вторичные космические частицы только определенного сорта (нейтроны или мезоны). Ионизационная камера также регистрирует мезоны, но с энергией, несколько большей, чем счетчиковые

телескопы. Наблюдения за интенсивностью различных вторичных частиц в одном и том же пункте позволяют исследователям более определенно судить об энергетическом спектре первичных частиц, приходящих на границу атмосферы.

Прежде чем рассматривать основные этапы исследования солнечных космических лучей, отметим, что их связь с солнечными вспышками, с радиоизлучением Солнца, особенности распространения в межпланетном пространстве, их ядерный (химический) состав и энергетический спектр были выяснены далеко не сразу, а многие важные вопросы остаются нерешенными до сих пор.

История исследования солнечных космических лучей насчитывает около 28 лет. Первые четыре «вспышки космических

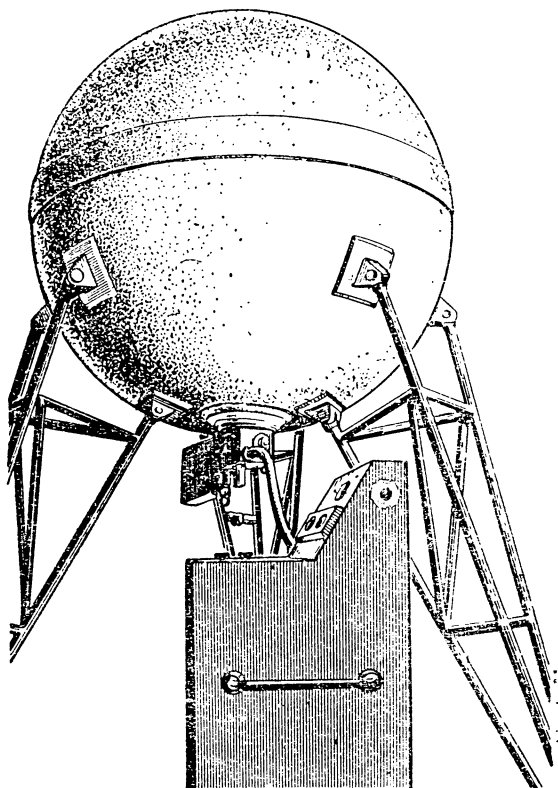


Рис. 8. Ионизационная камера — прибор для регистрации вторичного космического излучения высокой энергии (вторичных μ -мезонов). Камера наполнена аргоном при давлении 10 атм. Пространство между стальными наружной и внутренней стенками камеры заполнено свинцовой дробью для поглощения частиц малой энергии.

лучей» (т. е. резкие увеличения их интенсивности) были зарегистрированы 28 февраля и 7 марта 1942 г., 25 июля 1946 г. и 19 ноября 1949 г. Полученные при этом данные еще не были достаточно полны, так как обсерваторий для непрерывной регистрации космических лучей в то время было мало, к тому же они были оборудованы приборами для измерений в основном одной лишь мезонной компоненты. Точность этих приборов была невелика, так что анализировать результаты измерений было трудно.

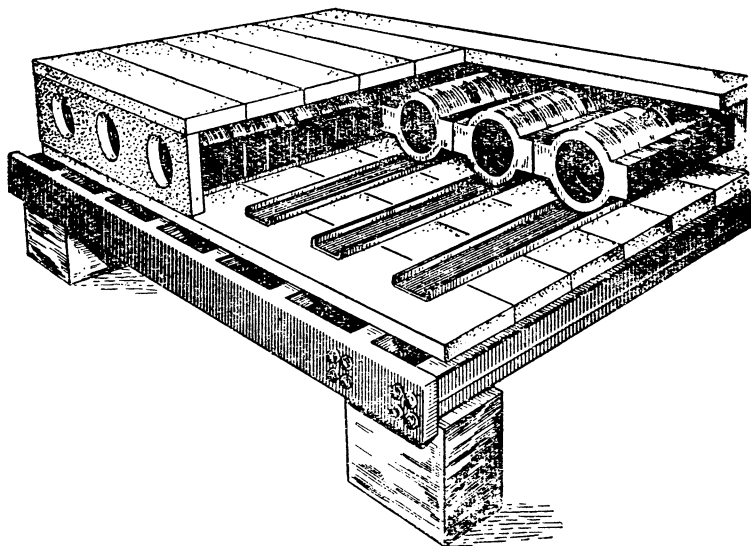


Рис. 9. Разрез одного из крупнейших в мире детекторов вторичного космического излучения — нейтронного супермонитора. Счетчики нейтронов помещаются в свинцовые трубы и экранируются со всех сторон слоем полиэтилена.

Уже в период этих первых измерений исследователи обратили внимание на тот факт, что вспышки космических лучей были тесно связаны с другими гелио- и геофизическими явлениями. Например, 28 февраля 1942 г. на Солнце в течение 3,5 ч наблюдалась вспышка. Одновременно на Земле резко ухудшилась радиосвязь на коротких волнах, а спустя примерно сутки была зарегистрирована очень большая геомагнитная буря.

Увеличение интенсивности космических лучей 7 марта 1942 г., по-видимому, также было обусловлено солнечной вспышкой, поскольку оно сопровождалось прекращением коротковолновой радиосвязи, хотя визуально обнаружить солнечную вспышку астрономам не удалось. Вспышка космических лучей 25 июля 1946 г., обусловленная мощной солнечной вспышкой, сопровождалась впоследствии геомагнитной бу-

рей. В период увеличения потока космических лучей 19 ноября 1949 г. также наблюдалась солнечная вспышка.

Эти первые данные были весьма скудными, однако их анализ все же позволил получить некоторые сведения об энергетическом спектре солнечных космических лучей, о влиянии межпланетного и земного магнитных полей на движение солнечных частиц, о процессах ускорения космических лучей в солнечной атмосфере. В частности, было установлено, что частицы, вызвавшие все четыре вспышки космических лучей, были заряженными, а их энергия не превышала 15 *Бэв* (биллиэлектрон-вольт, 1 *Бэв* = 10^9 эв). Амплитуда возрастания (в процентах к обычному фону галактических космических лучей), как оказалось, существенно зависит от долготы и широты пункта наблюдения.

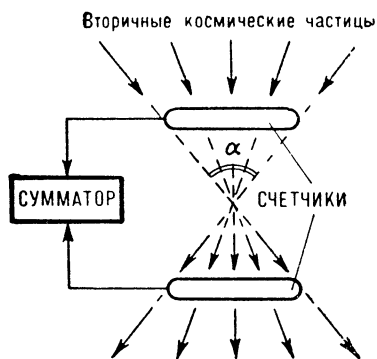


Рис. 10. Схема счетчикового телескопа для регистрации заряженных космических частиц. Два газоразрядных счетчика соединены таким образом, что в сумматоре фиксируется информация только о тех частицах, которые пришли из атмосферы в пределах некоторого угла.

По тем же данным удалось оценить верхние пределы напряженности для общего магнитного поля Солнца (около 2 *гс* на экваторе) и для поля спирального «рукава» нашей Галактики ($2 \cdot 10^{-6}$ *гс*), в котором находится Солнечная система (рис. 11).

Распределение солнечных частиц по энергиям для вспышек 19 ноября 1949 г., 28 февраля и 7 марта 1942 г. можно описать соотношением $D(\epsilon_k) = D_0 \cdot \epsilon_k^{-4}$ или $D(\epsilon_k) = D_0 \epsilon_k^{-5}$, т. е. число частиц с энергией ϵ_k резко уменьшалось с ростом их энергии. Для вспышки 25 июля 1946 г. получить подобное

соотношение было невозможно из-за малого количества экспериментальных данных. А для вспышки 19 ноября 1949 г. удалось вычислить диаметр области испускания (около 10^{10} см или 100 000 км, что составляет $1/14$ диаметра Солнца) и полное число испущенных Солнцем частиц (около 10^{32}).

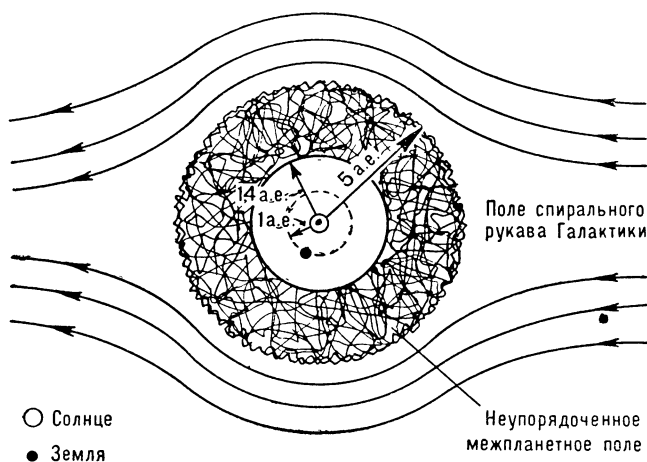


Рис. 11. Одна из моделей межпланетного магнитного поля для объяснения вспышек космических лучей. В центре — Солнце, пунктир — орбита Земли. Рассеяние солнечных частиц происходит в области с радиусом 5 а. е., занятой неупорядоченным полем.

Самая мощная из всех наблюдавшихся до сих пор вспышек космических лучей произошла 23 февраля 1956 г. Она была зарегистрирована большим числом обсерваторий, оснащенных различными приборами и регистрировавших, как правило, по несколько различных вторичных компонентов космических лучей. При этом было обнаружено, что в начальный период солнечные частицы приходят к Земле узким пучком. Кроме того, наблюдалась большая разность (около 9—10 мин) во времени прихода частиц от Солнца в различные пункты на поверхности Земли.

Запаздывание на 9—10 мин соответствовало разнице в энергиях частиц на порядок (т. е. в 10 раз), так что его трудно было объяснить различиями в чувствительности приборов. Время, затрачиваемое очень быстрой частицей (со скоростью, близкой к скорости света) на движение в геомагнитном поле, составляет около 0,1 сек. Поэтому естественно предположить, что наблюдаемая большая дисперсия (разброс) времен запаздывания обусловлена разным временем распространения частиц от Солнца до Земли. Это расстояние (радиус земной орбиты) равно $r_{орб} = 150$ млн. км (его принято называть астрономической единицей или сокращенно а. е.). Аналогичный дисперси-

онный эффект наблюдался также в период вспышки 19 ноября 1949 г.

Примечательно, что уже через 10 мин после начала вспышки 23 февраля 1956 г. интенсивность космических лучей достигла максимума, который был примерно в 50 раз (т. е. на 5000%) выше, чем нормальный уровень интенсивности вторичных нейтронов на уровне моря. Спустя еще около часа поток солнечных космических лучей начал уменьшаться приблизительно пропорционально $t^{-1.5}$ (время отсчитывается от начала возрастания).

Для объяснения этих фактов исследователями было предложено несколько моделей. В их основе лежала гипотеза о существовании в межпланетном пространстве неупорядоченных (неоднородных) магнитных полей, в которых происходит рассеяние (диффузия) солнечных частиц. Это фундаментальное предположение, выдвигаемое в той или иной форме, является неотъемлемой частью всех современных моделей распространения солнечных космических лучей.

В одной из моделей допускается, что в окрестности Солнца имеется сферическая полость радиусом 1,4 астрономических единиц (*а. е.*), в которой напряженность упорядоченного магнитного поля не превышает 10^{-6} гс. Эта полость окружена областью неупорядоченного поля напряженностью около 10^{-5} гс и радиусом около 5 *а. е.* (см. рис. 11). За областью неупорядоченного поля находится упорядоченное магнитное поле галактического рукава напряженностью 10^{-5} гс.

Часть космических лучей, испущенных Солнцем во время вспышки, приходит на Землю довольно быстро; другая часть, отразившись от области неупорядоченного магнитного поля, приходит на Землю с некоторым запаздыванием в виде рассеянного изотропного потока. В результате диффузии частицы будут уходить из внутренней полости через область неупорядоченного поля в межзвездное пространство. При этом интенсивность солнечных космических лучей будет убывать внутри полости пропорционально $t^{-1.5}$, если средний свободный пробег Λ для рассеяния в неупорядоченном поле будет не менее 10^{12} см. Если же считать, что внутренняя полость также заполнена неоднородным полем, то для объяснения экспериментальных результатов необходима величина $\Lambda = 10^{13}$ см.

Важно отметить, что, после того как солнечные частицы достигнут края рассеивающей области и начнут свободно выходить в межзвездное пространство, интенсивность космических лучей на Земле должна падать уже не по степенному ($t^{-1.5}$), а по экспоненциальному закону e^{-t/T_0} (здесь величина T_0 — время, за которое интенсивность уменьшается приблизительно в e раз).

Новый толчок исследованиям солнечных космических лучей дала организация мировой сети станций космических лу-

чей, которая была создана накануне МГГ — Международного Геофизического Года (1957—1958 гг.) и продолжает действовать в настоящее время. Благодаря наличию этих станций стало возможным детально изучать отдельные вспышки космических лучей и уверенно связывать их с конкретными процессами в земной атмосфере, геомагнитном и межпланетном полях, в атмосфере Солнца.

Измерения в стратосфере. Ценную информацию о вспышках космических лучей дают измерения в области высоких широт (больше 60°) на больших высотах в стратосфере. Эти измерения проводятся с помощью аппаратуры, поднимаемой на воздушных шарах-зондах (рис. 12) на высоту до 30 км, а также на геофизических ракетах (рис. 13) до высоты около 150 км.

Эффекты солнечных вспышек в стратосфере исследовались и до начала МГГ. Например, в период вспышки 23 февраля 1956 г. наблюдения, проведенные с помощью воздушных шаров, позволили определить спектр солнечных частиц в области малых энергий.

Однако наиболее полная информация была получена лишь в период проведения МГГ и в последующие годы. В част-

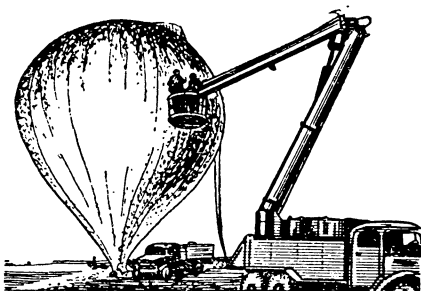


Рис. 12. Воздушный шар с аппаратурой для измерения космических лучей в стратосфере готовится к запуску.

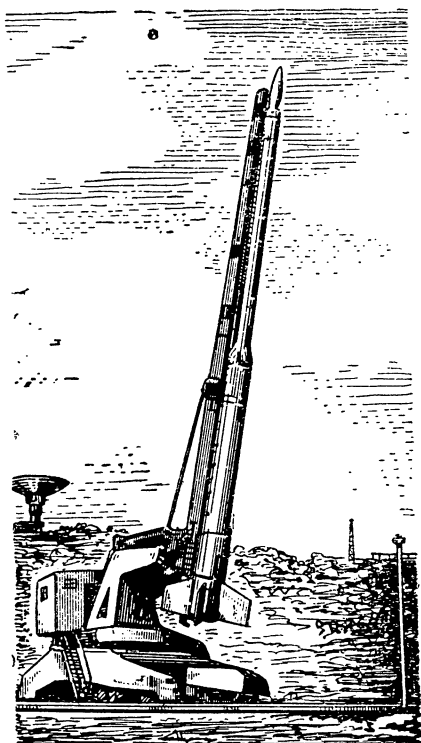


Рис. 13. Геофизическая ракета на старте.

ности, именно благодаря измерениям в стратосфере в мае 1959 г. независимо американскими и советскими исследователями было обнаружено существование магнитных ловушек частиц в передней части солнечных корпускулярных потоков. Стратосферные измерения в период вспышки 12—13 ноября 1960 г. позволили впервые обнаружить солнечные α -частицы с энергией больше 560 Мэв/нуклон.

В Советском Союзе регулярные стратосферные измерения проводятся начиная с середины 1957 г. (с начала МГГ). Первоначально измерения проводились на геомагнитных широтах 64° (Мурманск) и 51° (Москва), а с апреля 1958 г. также на широте 41° (Симеиз). В настоящее время проводятся измерения также на станции Мирный (Антарктика). С середины 1957 г. и до середины 1966 г. совершено беспрецедентное в мировой практике количество полетов шаров-зондов — более 10 тыс. Всего за период с 1958 г. до начала 1962 г. зарегистрировано 26 вспышек космических лучей в стратосфере, причем 26 из них наблюдались в районе Мурманска.

Косвенные методы. Известно, что усиление потока ультрафиолетового излучения во время солнечных вспышек резко увеличивает степень ионизации верхних слоев атмосферы на освещенной стороне Земли. Это приводит к резкому ухудшению или даже к полному прекращению радиосвязи на коротких волнах. В период вспышки 23 февраля 1956 г. была обнаружена еще одна причина, вызывающая повышенную иони-

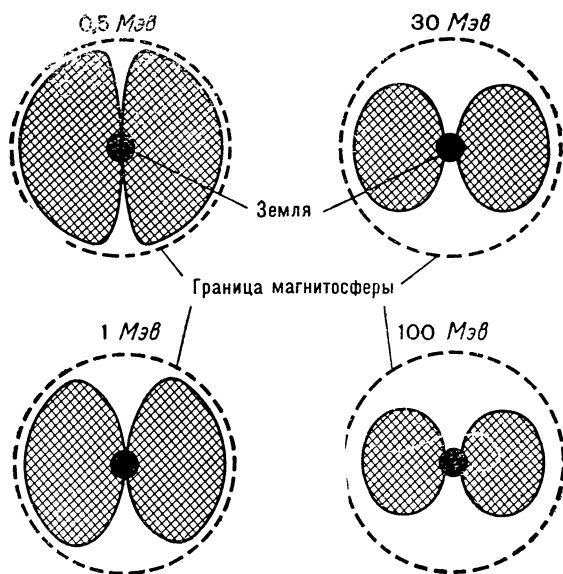


Рис. 14. «Запрещенные» (темные) и «разрешенные» (светлые) области в магнитосфере Земли для частиц с различными энергиями.

зацию в ионосфере. Как сейчас установлено, поглощение коротких радиоволн обусловлено приходом к Земле солнечных протонов с энергиями 10—100 Мэв.

Частицы таких энергий могут приходить только в полярные районы Земли (рис. 14). На рисунке заштрихованы области, куда доступ частицам с энергией, меньше указанной (0,5; 1; 30 или 100 Мэв) закрыт. Вторжение частиц в атмосферу сопровождается усилением поглощения как космического радиоизлучения, так и коротких радиоволн от наземных станций.

Для широкого исследования этого эффекта в США, Советском Союзе и ряде других стран была разработана специальная аппаратура для непрерывной регистрации интенсивности космического радиоизлучения на частоте 27,6 Мгц, так называемые риометры (рис. 15). В настоящее время непрерывные измерения проводятся и на других фиксированных частотах.

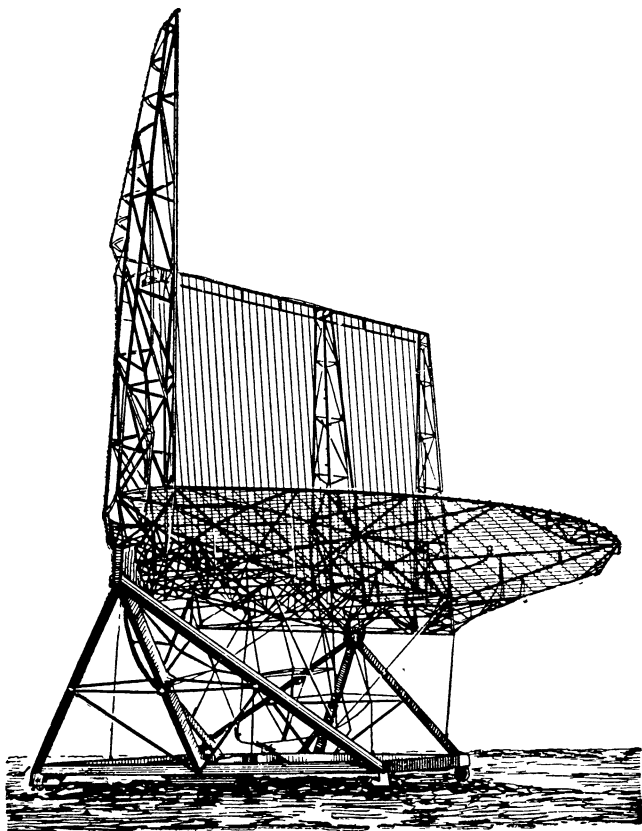


Рис. 15. Антенна риометра, регистрирующего интенсивность космических радиопомех на частоте 30 мгц.

Кроме риометрических измерений, ценную информацию о нижней границе спектра солнечных частиц вплоть до энергий порядка нескольких *Мэв* дают наблюдения рассеяния коротких радиоволн и минимальных частот отражения, а также вертикальное зондирование ионосферы, исследование распространения коротких радиоволн от спутников и космических ракет к Земле и другие ионосферные методы.

Использование спутников и межпланетных станций. Принципиально новые возможности для исследования солнечных космических лучей дает использование искусственных спутников Земли и автоматических межпланетных станций. С их помощью удастся вынести измерительную аппаратуру за пределы атмосферы и магнитосферы Земли, что позволяет непосредственно наблюдать поток солнечных космических лучей в межпланетном пространстве вплоть до самых малых энергий.

За пределами земной атмосферы вспышка космических лучей впервые была зарегистрирована 7 июля 1958 г. при помощи аппаратуры, установленной на третьем советском искусственном спутнике Земли. Несколько позже (12—13 сентября 1959 г.) во время полета второй советской космической ракеты к Луне наблюдалась другая вспышка космических лучей, причем основное увеличение потока приходилось на долю тяжелых ядер (с зарядом больше 15). Этот факт, крайне интересный для астрофизиков, можно объяснить тем, что во время некоторых солнечных вспышек, вероятно, возникают условия для преимущественного ускорения (или выхода за пределы солнечной короны) тяжелых ядер. Новое аналогичное явление было зарегистрировано при помощи такой же аппаратуры на борту третьего советского космического корабля-спутника 1 декабря 1960 г.

Исключительный интерес представляют данные по вспышке 28 сентября 1961 г., которая была зафиксирована за пределами магнитосферы Земли американским спутником «Эксплорер-12» в широком энергетическом интервале и в течение длительного времени.

В 1961—1962 гг. наблюдались еще три возрастания солнечных частиц, зарегистрированные спутниками «Эксплорер-12» (10 сентября и 10 ноября 1961 г.) и «Эксплорер-14» (23 октября 1962 г.). По наблюдениям на «Маринере-2» за период с августа по декабрь 1962 г. было зарегистрировано 13 малых вспышек космических лучей в межпланетном пространстве. Эти вспышки, по-видимому, обусловлены солнечными протонами с энергией 0,5—10 *Мэв*. Исследование этой малоэнергичной компоненты солнечных космических лучей широко проводилось в 1965—1969 гг. как советскими, так и американскими межпланетными автоматическими станциями («Венера-2», Венера-3», «Зонд-3», «Маринер-4», «Вене-

ра-4», «Маринер-5», «Пионер-6», «Пионер-7», «Венера-5», «Венера-6» и др.).

Наблюдения, проводимые с помощью ракет и спутников, дают уникальную информацию о солнечных космических лучах в области малых энергий, недоступных для наблюдений с помощью воздушных шаров. Особенно важно иметь данные о ядерном составе, не искаженные взаимодействиями солнечных частиц с веществом атмосферы. (При наблюдениях с помощью воздушных шаров такое «загрязнение» данных неизбежно, так как даже при подъеме на максимальную высоту около 30—35 км над ним все еще остается некоторый слой воздуха). Особенно ценные («чистые») данные об энергетическом спектре и ядерном составе солнечных космических лучей были получены американскими исследователями в измерениях с помощью ракет в период вспышки 15 ноября 1960 г.

Полученные спектры частиц по жесткостям¹ $R = cp/Ze$ (где p — импульс, Z — заряд частицы, e — заряд электрона, c — скорость света) оказались подобными для протонов и ядер гелия, углерода, кислорода и азота. Эти спектры можно представить в виде $I(>R) = I_0 e^{-R/R_0}$, где R_0 для всех ядер находится в пределах 85—100 Мв, $I(>R)$ — поток частиц с жесткостью больше заданной, I_0 — поток частиц с $R > 0$. Найденный ядерный состав частиц оказался близким к составу солнечной атмосферы.

Радиохимический метод. В последнее время широкое развитие получил радиохимический метод исследования космических лучей. Он сводится к изучению изотопов, образовавшихся при бомбардировке корпуса спутника (или специальных образцов вещества) космическими лучами. При этом, разумеется, спутник должен быть возвращен на Землю и доставлен в лабораторию, где проводится радиохимический анализ образцов.

При полете спутника за пределами земной магнитосферы он является хорошей «мишенью» для космических лучей как солнечного, так и галактического происхождения. «Мишенью» могут служить также взятые на борт спутника образцы горных пород, металлов и т. д., состав и свойства которых хорошо известны (очевидно, корпус спутника не является идеальной «мишенью», поскольку он изготавливается из металлических сплавов со сложным химическим составом).

Разделить изотопы, образованные солнечными космическими лучами и галактическими частицами, удастся радиохимическим методом благодаря различию их энергетических спек-

¹ Жесткость R — это величина, пропорциональная импульсу частицы. Она измеряется в вольтах (в), Мегавольтах (Мв) или Билливольтах (Бв). Ее применение удобно при изучении ускорения и распространения частиц с зарядом больше 1.

ров. Как мы уже знаем (см. рис. 6), поток солнечных космических лучей богаче частицами малой энергии. По этой причине солнечные космические лучи могут проникнуть в вещество «мишени» лишь на незначительную глубину. При этом они теряют свою энергию главным образом на ионизацию атомов мишени, а не на образование изотопов.

Галактические же космические лучи расходуют основную долю своей энергии на ядерные взаимодействия, причем в глубоких слоях «мишени». Таким образом, количество изотопов будет по-разному зависеть от глубины слоя в «мишени» при облучении солнечными или галактическими частицами. Проводя радиохимический анализ содержания изотопов на различных глубинах вещества «мишени», можно разделить изотопы, условно говоря, «солнечного» или «галактического» происхождения.

Аналогичные методы применимы и при радиохимическом анализе состава метеоритов, упавших на Землю: ведь метеориты бороздят межпланетное пространство миллионы лет! Несомненно, они «запоминают» сведения не только о галактических, но и о солнечных космических лучах. Поэтому для астрофизиков весьма желательным было бы падение метеорита на Землю через несколько часов после солнечной вспышки.

5. УСЛОВИЯ ВЫХОДА УСКОРЕННЫХ ЧАСТИЦ ИЗ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

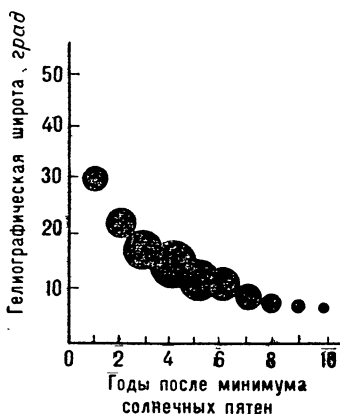


Рис. 16. Изменение числа солнечных пятен и их гелиошироты за период 11-летнего цикла активности Солнца (диаметр кружка пропорционален числу пятен).

По неизвестным причинам активность нашего Солнца отличается, с одной стороны, большим непостоянством (если рассматривать короткие промежутки времени), а с другой — приблизительно периодичностью (если рассматривать периоды порядка нескольких лет). За меру активности Солнца обычно принимают число солнечных пятен, открытых еще Галилеем. Число пятен изменяется с периодом приблизительно в 11 лет. При этом сами пятна, зарождаясь на гелиошироте около $\pm 30^\circ$, постепенно перемещаются к экватору (рис. 16).

Пятна представляют собой области более «холодного» (по

сравнению с окружающим) и, следовательно, более «темного» солнечного газа (отсюда название «пятна»). В пятнах наблюдаются сильные магнитные поля (обычно от 1200 до 3600 гс), причем два соседних пятна могут иметь поля противоположной полярности. Если два таких пятна «подплывают» слишком близко друг к другу, то на границе их раздела может начаться вспышка (рис. 17).

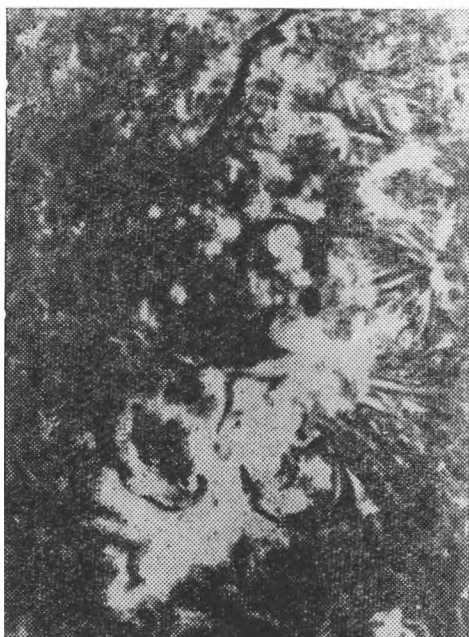


Рис. 17. Солнечная вспышка на фоне более темного газа фотосферы Солнца. Своеобразная неправильная форма вспышки и отдельные яркие детали отражают сложную структуру магнитных полей в солнечной атмосфере.

Вспышки — это очень сложные явления. Отдельные вспышки совершенно не похожи друг на друга. Самое «наглядное» проявление вспышки — это внезапное кратковременное увеличение яркости ограниченного участка хромосферы Солнца. Это явление сопровождается перестройкой магнитных полей на линии «соприкосновения» пятен, мощным выделением энергии (электромагнитное излучение от рентгеновских лучей до радиоволн, а также частицы с энергиями от сотен тысяч до десятков миллиардов электрон-вольт) и выбросами вещества (протуберанцы).

Наблюдают вспышки обычно специальным телескопом с применением красного светофильтра, который пропускает только лучи с длиной волны 6563 *ангстрем* ($1 \text{ ангстрем} = 10^{-8} \text{ см}$). Это излучение (так называемая линия H_α) принадлежит водороду, из которого в основном состоит солнечная атмосфера. Поскольку вспышки тесно связаны с пятнами, они могут происходить на любой долготе, но в пределах полосы гелиографических широт от 30° с. ш. до 30° ю. ш. В некоторых случаях вспышки происходят на западном краю солнечного диска, причем в этих случаях на Земле наблюдаются обычно наибольшие увеличения потока солнечных лучей.

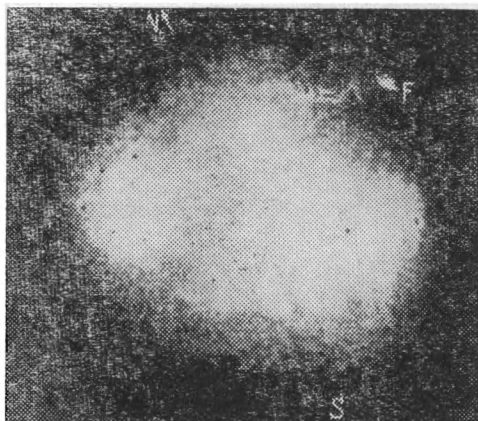


Рис. 18. Фотография Солнца, полученная с красным светофильтром в 4 ч по гринвичскому времени 23 февраля 1956 г. Индексом F отмечена солнечная вспышка, послужившая причиной вспышки солнечных космических лучей на Земле — самой мощной за всю историю их исследования.

На рис. 18 показана фотография Солнца 23 февраля 1956 г. Здесь индексом F отмечено положение вспышки на Солнце, вызвавшей увеличение потока космических лучей на Земле. Из рисунка видно, что вспышка произошла на краю видимой части солнечного диска. Ее координаты были приблизительно равны 74° з. д. и 23° с. ш. Началась она в 3 ч 41 мин ± 1 мин, достигла максимума яркости в 3 ч 42 мин и исчезла в 4 ч 15 мин (время всюду гринвичское). Общая площадь ее в момент максимума яркости была $1,3 \cdot 10^{-3}$ площади солнечной полусферы. Интенсивность вспышки в лучах H_α на 303% превышала яркость фона.

Во время этой вспышки наблюдалось резкое, исключительно большое возрастание интенсивности солнечного ра-

диоизлучения на волнах 3,2; 8 и 10 см, а также 1,5; 3,5 и 15 м. Многие станции сообщили о том, что во время солнечной вспышки полностью прекратилось прохождение коротких радиоволн на освещенной части земного шара. Наблюдались также характерные для больших солнечных вспышек магнитные и ионосферные возмущения.

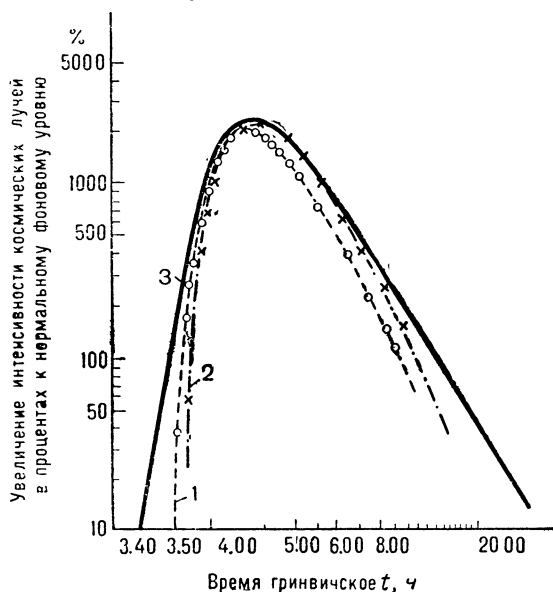


Рис. 19. Вспышка солнечных космических лучей 23 февраля 1956 г. по данным наблюдений на станциях Чикаго (США) — кривая 1 и Оттава (Канада) — кривая 2. Эти станции расположены недалеко друг от друга, поэтому кривые изменения со временем потока солнечных частиц в обоих пунктах оказались почти одинаковыми. Для сравнения приведена кривая 3, полученная расчетным путем из диффузионной теории.

Вспышка 23 февраля 1956 г., как уже отмечалось, была самой выдающейся за последние 28 лет по амплитуде увеличения потока космических лучей на поверхности Земли. Во время этого события увеличение интенсивности космического излучения достигало сотен и тысяч процентов в зависимости от широты пункта наблюдения. На рис. 19 показаны две кривые, описывающие зависимость интенсивности космических лучей от времени на станциях Чикаго и Оттава. Как видно из рисунка, такие «кривые временного хода» солнечных частиц имеют характерную несимметричную форму. Для сравнения на том же рисунке приведена теоретическая (расчетная) кривая, полученная из диффузионной теории, о которой чита-

тель узнает несколько позже. Прежде чем анализировать эти кривые, рассмотрим условия выхода солнечных космических лучей из области ускорения.

Процесс выхода солнечных частиц различных энергий из области ускорения можно описать следующим образом. Если в солнечных космических лучах имеются частицы очень высокой энергии, то влияние магнитных полей атмосферы Солнца на их движение будет незначительным. По этой причине частицы высокоэнергичной части спектра смогут довольно быстро преодолеть магнитные поля атмосферы Солнца. Они быстро придут к Земле, вызывая увеличение интенсивности космических лучей вскоре после солнечной вспышки. Поток таких частиц будет резко анизотропным (остро направленным), т. е. они придут к Земле в виде узкого пучка.

Частицам несколько меньшей энергии, которые сильнее подвержены влиянию магнитных полей короны и сверхкороны Солнца, по-видимому, потребуется несколько большее время, чтобы выйти из окрестностей Солнца, и поэтому они придут на Землю несколько позже. Запаздывание будет частично связано также с меньшей скоростью движения таких частиц.

Частицы еще меньшей энергии не смогут вырваться сквозь намагниченную плазму, расположенную над вспышкой. Однако их давление может быть настолько сильным, что оно вытолкнет эту плазму с большой скоростью, и тогда частицы смогут через образовавшийся «туннель» выйти из окрестности Солнца и попасть в межпланетную среду. Такие частицы придут на Землю со значительным опозданием, которое будет определяться временем прохождения корпускулярного потока через корону и сверхкорону и сравнительно медленной диффузией частиц в межпланетном пространстве.

6. МАГНИТНЫЕ ЛОВУШКИ В КОСМОСЕ

Как говорилось выше, солнечные космические лучи могут быть причиной выталкивания намагниченной солнечной плазмы и выброса корпускулярного потока. При выталкивании плазмы часть ускоренных частиц будет проникать в глубь плазмы. При этом в намагниченную плазму могут проникнуть даже частицы весьма малой энергии, которые при достаточно высокой их плотности могут ослаблять магнитное поле и своим давлением как бы прокладывать «каналы» в магнитном поле. Частицы могут также дрейфовать внутри потока, который в этом случае образует магнитную ловушку.

Что такое магнитная ловушка? Представим себе магнитное поле в виде пучка параллельных силовых линий. Если в такое поле влетит под произвольным углом (но не равным

90°) заряженная частица, то в дальнейшем она будет совершать винтообразное движение, постепенно перемещаясь вдоль поля. Таким образом, частица оказывается «привязанной» к силовым линиям магнитного поля.

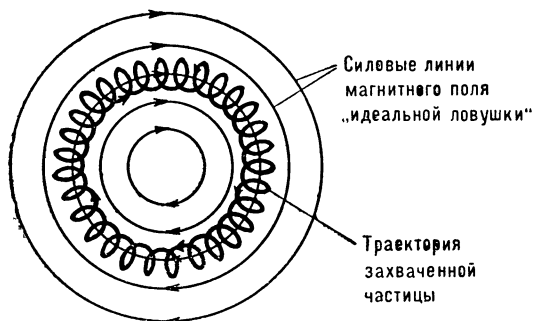


Рис. 20. Траектория движения заряженной частицы в идеальной магнитной ловушке.

Если теперь параллельный пучок силовых линий изогнуть и сделать из него магнитную «петлю», то частица будет «послушно» двигаться вдоль «петли». Если, кроме того, силовые линии окажутся замкнутыми, т. е. будут напоминать concentric окружности, то в идеальном случае частица уже не сможет «вырваться» из этого «заколдованного круга» (рис. 20). Конечно, такая упрощенная схема не может отражать реальные свойства и многообразие магнитных ловушек, суще-

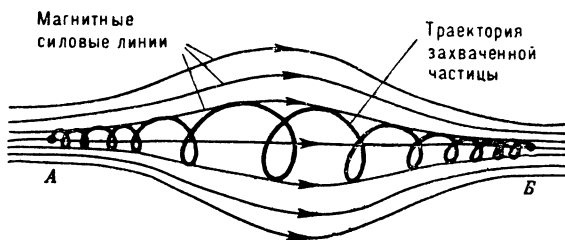


Рис. 21. Траектория движения заряженной частицы в ловушке, образованной магнитным полем с незамкнутыми силовыми линиями.

А и Б — «точки отражения», в которых захваченная частица меняет направление своего движения на обратное.

ствующих в природе, однако она иллюстрирует принципиальную возможность образования таких ловушек. Заметим, что, для того чтобы магнитное поле служило ловушкой для частиц, его силовые линии не обязательно должны быть замкнутыми. Это хорошо видно из рис. 21: в областях, где силовые линии

«сгущаются», поле сильнее и частица отражается от этих своеобразных «магнитных зеркал», меняя направление своего движения на обратное. Как щепка в завихрениях бурного ручья, частица будет «метаться» от одного «зеркала» к другому до тех пор, пока ловушка по какой-либо причине не разрушится.

В большинстве зарегистрированных до сих пор случаев солнечные космические лучи приходили к Земле гораздо раньше корпускулярного потока и независимо от него. Однако иногда начало возрастания потока солнечных космических лучей совпадает с приходом корпускулярного потока. Поскольку в кор-

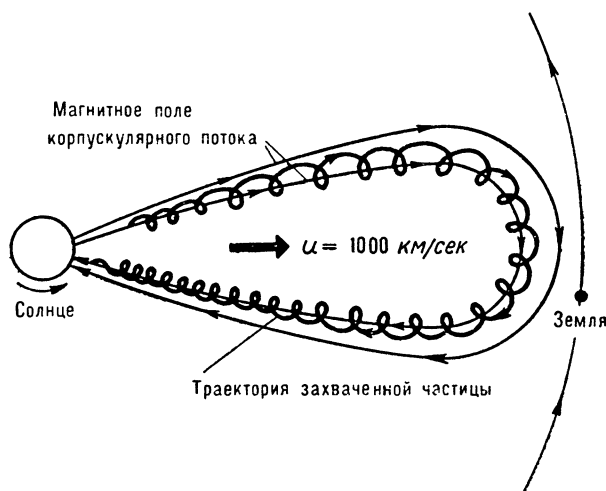


Рис. 22. Траектория движения заряженной частицы в магнитной ловушке солнечного корпускулярного потока.

пускулярных потоках имеются значительные магнитные поля, то неизбежно возникает «подозрение», что такое совпадение не случайно. По-видимому, в корпускулярных потоках могут существовать магнитные ловушки, захватывающие в «плен» какую-то долю солнечных космических лучей (рис. 22).

При взаимодействии с магнитным полем Земли ловушки разрываются и частицы «высыпаются» из них. Это происходит тогда, когда Земля оказывается внутри корпускулярного потока, поперечные размеры которого могут составлять многие миллионы километров. Такой случай наблюдался 11 мая 1959 г., когда независимо советскими и американскими исследователями было зарегистрировано большое возрастание потока частиц с энергией больше 120 Мэв. Аналогичное событие было зарегистрировано спутником «Эксплорер-12» 30 сентября 1961 г.

Гигантские ловушки космических лучей весьма разнообразны по своим свойствам. Поведение заряженных частиц в них зависит как от напряженности и конфигурации магнитного поля, так и от энергии (скорости) частиц. Одно и то же магнитное образование может служить прекрасной ловушкой для частиц с энергией меньше некоторой критической величины и быть практически «прозрачным» для частиц более высокой энергии.

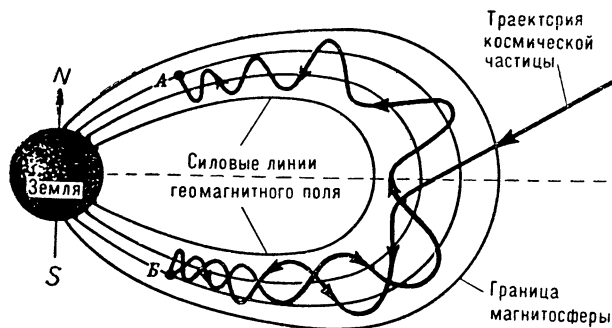


Рис. 23. Траектория движения заряженной частицы в магнитной ловушке, образованной геомагнитным полем (модель радиационного пояса Земли).

А и Б — «точки отражения», в которых захваченная частица меняет направление своего движения на обратное.

Ловушка, образованная геомагнитным полем в окрестности Земли (рис. 23), отличается высокой степенью стабильности и большим временем удержания частиц. Именно по этим причинам вокруг Земли существуют известные радиационные пояса из заряженных частиц. В то же время ловушки, образованные магнитными полями солнечной атмосферы в районе вспышек или в солнечных корпускулярных потоках, значительно более «прозрачны» для частиц.

Что же следует считать космической магнитной ловушкой? По-видимому, в качестве космических ловушек можно рассматривать любые магнитные образования, в которых движение частиц гораздо сложнее, а время их нахождения гораздо больше, чем в свободном пространстве такого же объема.

Энергия частиц, захваченных в магнитную ловушку солнечного корпускулярного потока, обычно не превышает 200 Мэв. Вместе с потоком они будут переноситься на большие расстояния от Солнца. При попадании Земли в поток эти частицы, приходя в область высоких широт, могут быть зарегистрированы в стратосфере.

7. ДИФФУЗИЯ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Случай 11 мая 1959 г. по существу остается до сих пор уникальным, если не считать вспышку космических лучей 12 ноября 1960 г., которая, возможно, была вызвана приходом к Земле магнитной ловушки. Однако случай 12 ноября является сомнительным, так как наблюдавшуюся вспышку можно объяснить и другими причинами по крайней мере частично.

Интересный случай возрастания потока протонов с энергией меньше 15 Мэв наблюдался в период магнитной бури 30 сентября 1961 г. Это возрастание, по мнению некоторых исследователей, могло быть вызвано ускорением частиц в турбулентной плазме на границе между магнитосферой и корпускулярным потоком.

В большинстве случаев распространение солнечных частиц промежуточных энергий (10^8 — 10^9 эв) в межпланетном пространстве удастся объяснить с большей или меньшей степенью приближения при помощи диффузионной модели. Остановимся на этом вопросе подробнее.

Для применения диффузионной модели распространения солнечных частиц есть ряд веских оснований. Прежде всего многочисленные исследования больших вспышек космических лучей показали, что уже через несколько часов после начала вспышки поток высокоэнергичных солнечных частиц становится изотропным, а его интенсивность падает со временем пропорционально $t^{-1.5}$. Такой характер изменения интенсивности соответствует диффузионной модели распространения частиц в неоднородных магнитных полях сверхкороны Солнца и межпланетного пространства.

В рассматриваемом приближении движение космических лучей уподобляется диффузии молекул в газе со скоростью v , равной скорости движения космических частиц вдоль силовых линий магнитного поля, и эффективной длиной свободного пробега Λ , которая характеризует конфигурацию поля (в простейшем случае Λ есть размер области с приблизительно однородным полем).

Одно из возможных возражений против такой диффузионной модели состоит в том, что космические лучи должны быть как бы «приклеены» к определенным силовым линиям и не могут поэтому диффундировать во всех направлениях. Нужно, однако, учитывать существование дрейфа частиц, связанного с неоднородностью поля и приводящего к переходу космических лучей с одних силовых линий на другие.

Кроме того, частицу вообще нельзя считать «приклеенной» к определенной силовой линии в том случае, когда плотность энергии, заключенной в космических лучах, становится сравнимой с плотностью энергии магнитного поля. В этом случае уже

не поле определяет движение космических лучей, а сами космические лучи в значительной степени определяют конфигурацию магнитного поля. Эти два соображения дают основание говорить о неизбежном «перемешивании» космических лучей, которое можно приближенно описать уравнением диффузии.

Таким образом, для применения диффузионной модели необходима прежде всего определенная степень неупорядоченности (хаотичности) межпланетного магнитного поля. Не касаясь возможных причин возникновения магнитных неоднородностей, отметим, что на существование их в межпланетной среде указывают такие факты, как расширение видимого изображения источника солнечных космических лучей, запаздывание прихода на Землю частиц меньших энергий из-за большего их рассеяния в межпланетной среде, а также прямые измерения (например, на американской ракете «Маринер-2»).

Не менее важным является также требование независимости солнечных частиц при их движении как в межпланетном, так и в геомагнитном полях. Выполнение этого требования для межпланетного поля в большинстве случаев вспышек не вызывает сомнений, если учесть, что хотя напряженность поля велика (10^{-5} — 10^{-4} гс), но при этом также мала плотность солнечных космических лучей (не больше 10^{-8} протонов/см³).

Что касается движения солнечных частиц в геомагнитном поле, то частицы с энергиями выше $100 \text{ Мэв} = 10^7 \text{ эв}$ можно считать независимыми, тогда как частицы меньших энергий следует рассматривать как проводящий газ — плазму (см. рис. 6). Однако в некоторых случаях последнее утверждение неприменимо. Например, 15 июля 1959 г. солнечные частицы с энергиями 100 — 400 Мэв имели настолько большую плотность энергии (больше 10^{-9} эрг/см^3), что могли коллективно преодолеть магнитное поле с напряженностью вплоть до 10^{-4} гс, тем самым проникая на значительную глубину в магнитосферу Земли.

Теперь, когда мы познакомились с условиями применимости диффузионной модели к распространению солнечных частиц в межпланетном пространстве, вернемся к рис. 19. Согласно диффузионной модели изменение со временем концентрации солнечных космических лучей на фиксированном расстоянии от Солнца можно представить в виде несимметричной кривой с максимумом. Одна из таких кривых, полученная расчетным путем для орбиты Земли, представлена на рис. 19. Сравнивая эту кривую с экспериментальными данными по вспышке 23 февраля 1956 г., можно видеть приблизительное согласие расчета с экспериментом.

Из решения уравнения диффузии следует, что кривая изменения концентрации имеет максимум в момент времени $t_{\text{max}} = r_{\text{орб}}^2 / 6\kappa$ (здесь $r_{\text{орб}}$ — радиус земной орбиты, а $\kappa = \Delta v / 3$ есть коэффициент диффузии, определяемый как половина среднего квадрата расстояния, проходимого частицей со скоростью

v за 1 сек). Крутизна восходящего и нисходящего участков этой кривой, положение и ширина максимума, амплитуда возрастания зависят от положения соответствующей вспышки на Солнце, от плотности распределения намагниченных «облаков» (неоднородностей), в межпланетном пространстве и некоторых других факторов. В качестве первого приближения считают, что Солнце испускает ускоренные частицы очень быстро (мгновенно), а межпланетное пространство равномерно заполнено магнитными «облаками» по крайней мере в несколько астрономических единиц.

Как отмечалось выше, Солнце во время вспышки испускает частицы с различными энергиями от 1 Мэв до 10 Бэв. По этой причине часть из них приходит к Земле довольно быстро, а остальные несколько запаздывают. В начале возрастания поток солнечных частиц имеет хорошо выраженный анизотропный характер, т. е. частицы приходят к Земле в виде узкого пучка (в этот период диффузионная модель неприменима). Возрастание интенсивности на орбите Земли быстро достигает максимума, а затем происходит постепенное падение приблизительно пропорционально $t^{-1,5}$. Такой процесс начинается тогда, когда солнечные частицы, рассеянные на неоднородностях межпланетного магнитного поля, начинают приходить на Землю равномерно по всем направлениям (изотропно).

Интенсивность анизотропного потока солнечных частиц в отличие от рассеянного (изотропного) падает по другому закону, а именно: приблизительно пропорционально e^{-t/T_0} . Такого рода случаи наблюдались, например, в марте 1942 г., в ноябре 1949 г., в феврале 1956 г. и в мае 1960 г. Все вспышки, вызвавшие эти возрастания, находились на западном краю солнечного диска. В других случаях, когда расположение солнечных вспышек было иным, а условия в межпланетном пространстве и вблизи Земли были более сложными, описанная четкая картина возрастания существенно нарушалась.

Диффузионная модель объясняет процесс распространения солнечных частиц приближенно, а поэтому ее нужно уточнять и развивать, чтобы приблизиться к точному описанию реального процесса распространения (точное описание этого процесса дается кинетической моделью). Однако даже из простой диффузионной модели распространения солнечных частиц можно получить важные сведения о процессах на Солнце и в межпланетном пространстве.

Прежде всего нас интересует спектр солнечных частиц, т. е. число частиц той или иной энергии, ускоренных Солнцем во время определенной вспышки. Так как частицы обладают различными скоростями, то их коэффициенты диффузии также будут отличаться. Поэтому согласно соотношению $t_{\max} = r_{\text{орб}}^2 / 6\kappa$ максимум интенсивности для более быстрых частиц наступит раньше, чем для медленных. Определяя по данным измерений

интенсивность в моменты максимумов для частиц той или иной энергии, можно получить представление о количестве ускоренных Солнцем частиц определенной энергии.

Сопоставляя значения интенсивности в моменты максимумов для различных энергий, мы получим спектр, несколько отличный от спектра в источнике. В области сравнительно малых энергий ($\epsilon_k = 100\text{—}500$ Мэв для протонов) показатель диффе-

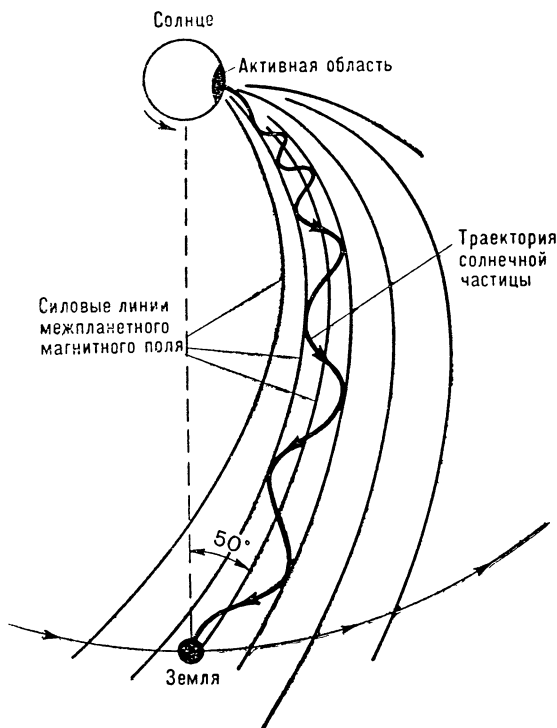


Рис. 24. Модель межпланетного магнитного поля внутри земной орбиты. Из-за вращения Солнца с востока на запад силовые линии поля несколько изогнуты и вблизи Земли расположены под углом около 50° к линии Солнце—Земля.

ренциального спектра солнечных частиц у Земли иногда близок к 5 (или даже больше). В большинстве же случаев показатель спектра в этом интервале энергий оказывается меньше 5.

В противоположность этому при очень высоких энергиях (больше 1 Бэв) спектр, измеренный у Земли, почти всегда имеет показатель около 5—6. В то же время показатель спектра в источнике всегда меньше, чем у Земли. Исследования показывают, что некоторые особенности спектра солнечных частиц можно частично объяснить на основе диффузионной модели.

Далее интересно отметить, что скорость движения ядер с зарядом больше 2 в области малых энергий примерно вдвое

меньше по сравнению со скоростью движения протонов при одной и той же энергии в расчете на единицу атомного веса. Поэтому в начальный период возрастания поток солнечных частиц будет богаче протонами, а спустя некоторое время начнет обогащаться ядрами. Таким образом, с помощью того же соотношения $t_{\max} = r_{\text{орб}}^2/6x$ можно в принципе разделить потоки протонов и более тяжелых ядер.

Кроме указаний о спектре солнечных частиц в источнике и их ядерном составе, диффузионная модель позволяет оценить направление и напряженность межпланетного магнитного поля. Мы уже отмечали, что диффузионная картина является наиболее четкой в том случае, если вспышка, вызвавшая увеличение потока космических лучей на Земле, произошла на западном краю солнечного диска. Это навело исследователей на мысль, что, кроме отдельных намагниченных «облаков» (магнитных неоднородностей), рассеивающих частицы, в межпланетном пространстве имеется регулярное поле H_0 . Из-за вращения Солнца его силовые линии должны быть изогнуты примерно так, как показано на рис. 24. Тогда диффузия частиц из области ускорения должна происходить преимущественно вдоль силовых линий такого межпланетного поля.

Если в момент вспышки активная область на Солнце и Земля связаны одной силовой линией, то прямой поток частиц нарастает на Земле очень быстро. Однако магнитные неоднородности будут эффективно рассеивать частицы, в результате чего через некоторое время после вспышки поток солнечных космических лучей станет изотропным и начнет уменьшаться пропорционально $t^{-1,5}$.

Что представляют собой магнитные неоднородности? Простейшей неоднородностью может быть «изгиб» пучка силовых линий (рис. 25). В месте «изгиба» силовые линии «сгущаются»

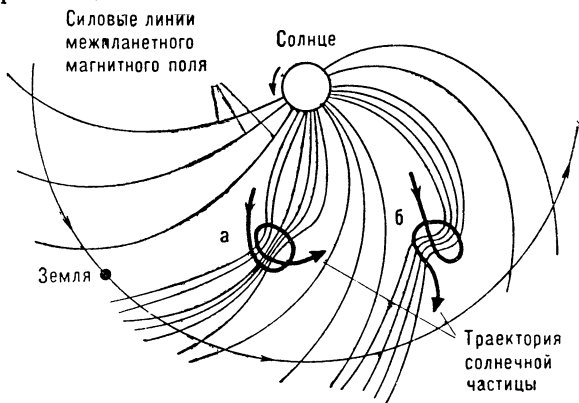


Рис. 25. Рассеяние солнечных частиц на неоднородностях межпланетного магнитного поля двух видов: а — «сгущение» силовых линий; б — «изгиб» силовых линий с одновременным их «сгущением».

ся», т. е. магнитное поле усиливается, так что оно может сильнее рассеивать частицы. Типичные поперечные размеры неоднородностей, полученные из анализа данных по вспышкам на основе диффузионной модели, составляют около 0,5—1 млн. км. Расстояние между ними может быть значительно (примерно в 10 раз) больше.

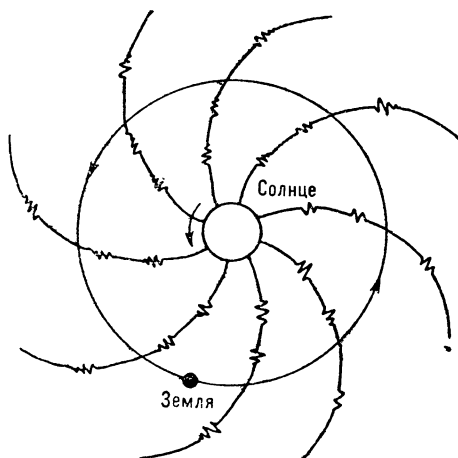


Рис. 26. Современная картина спиралевидного межпланетного поля, искаженного магнитными неоднородностями.

Любопытно отметить, что направление регулярной составляющей межпланетного поля удалось определить по данным о солнечных космических лучах раньше, чем были проведены непосредственные измерения. Например, из анализа данных по вспышке 4 мая 1960 г. следует, что в начальный период вспышки все частицы приходили приблизительно из одного и того же направления около 55° к западу от линии Земля — Солнце. Прямые измерения направления межпланетного магнитного поля дают наклон около 50° (см. рис. 24).

Коэффициент диффузии зависит не только от энергии частиц, но и от напряженности H_0 — регулярной составляющей межпланетного поля. На основе диффузионной модели удастся оценить величину H_0 . Эта величина составляет около 10^{-5} гс, что хорошо согласуется с результатами непосредственных измерений в межпланетном пространстве. По современным данным силовые линии межпланетного магнитного поля вблизи орбиты Земли имеют вид спиралей, идеальная форма которых искажается магнитными неоднородностями (рис. 26).

Описанными примерами не исчерпываются возможности применения диффузионной модели для изучения физики Солнца и межпланетного пространства. Большой интерес представляют отклонения от простой диффузионной модели. Их анализ позволяет получить сведения о продолжительности испускания частиц из атмосферы Солнца, движении магнитных облаков в межпланетном пространстве, возможном существовании магнитной границы диффузионной области и т. д.

Одним из отклонений от простой диффузионной модели является нарушение закона уменьшения концентрации $t^{-1.5}$. Как можно заметить из сравнения расчетной и экспериментальных кривых на рис. 19, на заключительной стадии вспышки 23 февраля 1956 г. интенсивность солнечных частиц падает уже не пропорционально $t^{-1.5}$, а скорее как t^{-2} . Этот факт можно объяснить либо увеличением коэффициента диффузии пропорционально расстоянию r^β , либо существованием более-менее резкой границы диффузионной области на некотором расстоянии r_0 от Солнца.

Действительно, если коэффициент диффузии растет с расстоянием, то частицы будут быстрее уходить за пределы Солнечной системы, чем при $\kappa = \text{const}$, а это приведет к более резкому уменьшению их интенсивности на орбите Земли. Таким образом, анализируя кривую временного хода, можно получить информацию об изменении рассеивающих свойств межпланетного поля далеко за пределами орбиты Земли. Исследования показывают, что данные наблюдений на заключительной стадии вспышки можно объяснить на основе модели, в которой коэффициент диффузии увеличивается с расстоянием как r^β , причем $\beta \leq 1$.

Это объяснение, однако, не является единственным. Дело в том, что на заключительной стадии вспышки интенсивность солнечных частиц мала, а ошибки измерений велики. Отсюда возникает неоднозначность в определении наклона кривой временного хода для моментов времени t , значительно больших t_{max} . Поиски других моделей (кроме модели, в которой κ растет как r^β) показали, что в некоторых случаях временной ход солнечных космических лучей (по наблюдениям на орбите Земли) на заключительной стадии вспышки можно объяснить на основе модели, в которой область диффузии предполагается ограниченной на расстоянии r_0 от Солнца.

При достаточно малых значениях r и t существование удаленной границы диффузионной области не оказывает заметного влияния на временной ход концентрации солнечных частиц на орбите Земли, причем их поток уменьшается как $t^{-1.5}$. Влияние границы начинает сказываться при $\kappa t / r_0^2 \approx 0,1$, когда поток частиц, уходящих за пределы области диффузии, достигает максимума, т. е. когда гребень «диффузионной волны» (см. рис. 19) достигает расстояния r_0 .

В этот момент концентрация внутри области r_0 начинает падать по экспоненциальному закону, т. е. пропорционально e^{-t/T_0} , где $T_0 = r_0^2/10\kappa$, т. е. T_0 непосредственно связано с величиной r_0 и коэффициентом диффузии. Интересно отметить, что в случае экспоненциального спада скорость диффузии $v_d = 3\kappa/r_0$ (т. е. скорость выхода частиц из области с радиусом r_0) остается постоянной, так что поток частиц, оставшихся внутри этой области, пропорционален потоку уходящих частиц. Важным следствием этого факта является сохранение формы спектра солнечных частиц во времени внутри области r_0 в течение многих часов после максимума вспышки.

Впервые экспоненциальный спад отчетливо наблюдался в период вспышки 4 мая 1960 г. Впоследствии аналогичный эффект имел место в ряде других случаев, сводка которых дана в табл. 1. В эту таблицу включена также вспышка 23 февраля 1956 г., заключительная стадия которой также поддается описанию на основе рассматриваемой модели.

Одним из аргументов в пользу предположения об ограниченности области диффузии может служить постоянство во

Таблица 1

Данные о границе диффузионной области

Дата вспышки	Метод измерений	Интервал жесткости, Бв	T_0 , ч	r_0 , а. е.
23.II.1956	Наземная сеть	1—15	1,56	5
4.V.1960	То же	>1	1,3	2,16
3.IX.1960	Воздушные шары	>1,34	23	2,2
15.XI.1960	Наземная сеть	>1		2,5
18.VII.1961	Воздушные шары	>1,34	8,9	1,8
20.VII.1961	»	0,18—1,34	5,3	1,7
28.IX.1961	Спутник	0,64—0,95	16±2	3,1±0,3
28.IX.1961	»	>1,21	4±1	1,8±0,2
5.II.1965	Полярный спутник	>0,136	16,8 ^{+2,7} _{-2,2}	
5.II.1965	То же	>0,194	11,6 ^{+2,1} _{-1,6}	
5.II.1965	»	>0,276	4,7 ^{+1,3} _{-1,0}	
5.II.1965	»	>0,395	4,0 ^{+0,3} _{-0,9}	
7.VII.1966	Воздушные шары	>1,0	4,5±0,5	1,7±0,1
28.I.1967	Наземная сеть	>1,02	,5±,05	2,5±1

времени (в пределах ошибок измерений) формы спектра солнечных частиц от вспышки 23 февраля 1956 г. Другим аргументом может служить такой факт: если предположить, что коэффициент диффузии растет при увеличении расстояния как r^β , то из данных по многим вспышкам получается поразительно однообразный набор значений β , а именно $\beta \leq 1$. Более того, для большинства исследованных вспышек β оказывается близким к единице. Такое значение β соответствует постоянной скорости диффузии, что характерно как раз для экспоненциального спада интенсивности, т. е. для случая диффузии в ограниченной области с радиусом r_0 .

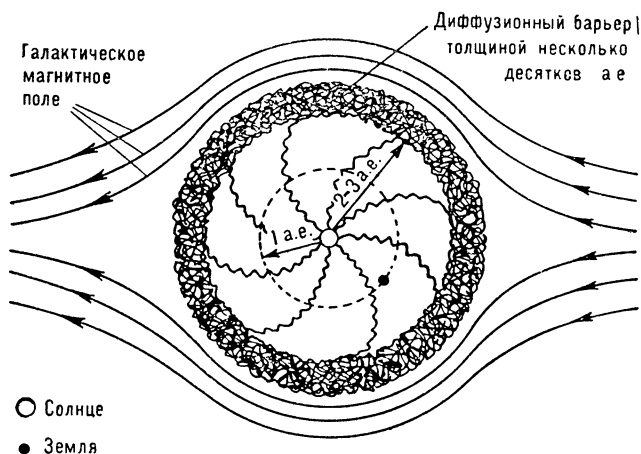


Рис. 27. Модель межпланетного магнитного поля на больших расстояниях от Солнца. Силовые линии этого поля вблизи орбиты Земли имеют вид спиралей, искаженных магнитными неоднородностями. На границе между областями пространства, занятого спиралевидным межпланетным полем и регулярным галактическим полем, находится толстая диффузионная оболочка, заполненная хаотическими магнитными полями.

Обращает на себя внимание тот факт, что все значения r_0 в табл. 1 находятся в сравнительно узком интервале 2—5 $a. e.$, что указывает на возможность существования некоторой эффективной магнитной границы диффузионной области приблизительно между орбитами Марса и Юпитера. Этот результат, по-видимому, не вступает в явное противоречие с оценками других исследователей, которые дают радиус области, занятой «солнечным ветром», от 5 до 100 $a. e.$

Скорее всего расхождение указывает на необходимость учитывать конечную толщину своеобразного диффузионного барьера, который несомненно существует на границе между «солнечным ветром» и галактическим магнитным полем (см. рис. 11). Толщина барьера, вероятно, может достигать несколь-

ких десятков астрономических единиц, тогда как изучение солнечных космических лучей дает информацию о пространственной области с радиусом не более 10 а. е. Модель межпланетного поля в свете сказанного выше может иметь вид, показанный на рис. 27. Сравнивая этот рисунок с рис. 11, можно заметить, как изменились представления астрофизиков о межпланетном магнитном поле за период с 1957 г. по настоящее время. Так, например, если в модели 1957 г. (см. рис. 11) область межпланетного пространства радиусом $1,4 \text{ а. е.}$ предполагалась свободной от магнитного поля, то теперь в современной модели (см. рис. 27) считается, что в области радиусом $2\text{—}3 \text{ а. е.}$ имеется спиралевидное магнитное поле.

8. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ЧАСТИЦ У ЗЕМЛИ И В АТМОСФЕРЕ СОЛНЦА

Точное измерение энергетического спектра солнечных космических лучей имеет исключительное значение для теории механизмов ускорения на Солнце, а также для расчета радиационной защиты пилотируемого космического корабля. Однако возможности такого эксперимента ограничены по нескольким причинам.

Во-первых, вследствие эпизодического характера появления вспышек космических лучей редко удастся одновременно измерить спектр в различных интервалах энергии. Во-вторых, измеренный на орбите Земли спектр искажен по сравнению со спектром в источнике, т. е. в атмосфере Солнца, поскольку параметры частиц при распространении (в частности, коэффициент диффузии) зависят от энергии частиц.

Кроме того, даже при детальных измерениях поведения частиц различных энергий во времени очень трудно извлечь из экспериментальных данных всю возможную информацию о спектрах инжекции, т. е. о спектрах частиц в момент испускания (спектр источника). Препятствиями на этом пути являются прежде всего недостаточно ясный механизм распространения в межпланетном пространстве, невысокая точность измерений, а также неизвестная геометрия вылета и длительность испускания частиц различных энергий.

Частицы, подверженные диффузии в межпланетном магнитном поле (т. е. частицы с кинетической энергией $\epsilon_k = 10^8\text{—}10^9 \text{ эв}$), по-видимому, испускаются за время, не превышающее $10\text{—}15 \text{ мин.}$ Во всяком случае для больших вспышек типа 23 февраля 1956 г. было установлено, что поток испускаемых частиц с энергией $10^9\text{—}10^{10} \text{ эв}$ уменьшался по экспоненциальному закону e^{-t/T_0} , где $T_0 \approx 15 \text{ мин.}$

Длительность испускания частиц малых энергий ($\epsilon_k = 10^7 \text{ эв}$) вообще неизвестна; относительно протонов с энергией порядка 1 Мэв или меньше существует предположение, что они ускоряются не в солнечных вспышках, а в межпланетном прост-

ранстве или в активных областях Солнца, не обязательно связанных со вспышками. Некоторые исследователи полагают, что частицы малых энергий могут накапливаться в магнитных ловушках, более-менее длительно существующих в атмосфере Солнца. В настоящее время можно уверенно считать, что в межпланетном пространстве всегда имеется переменный во времени и пространстве фон из малоэнергичных протонов. Чтобы подтвердить это, приведем некоторые экспериментальные результаты.

В 1964—1966 гг., т. е. в период, близкий к последнему минимуму солнечной активности (1964 г.), в межпланетном пространстве проводились длительные измерения магнитных полей, плазмы и космических лучей. Часть измерений проводилась сравнительно недалеко от Земли, но за пределами ее магнитосферы (американские спутники IMP-2, IMP-3), остальные — в далеком космическом пространстве между орбитами Марса и Венеры (две американские межпланетные станции «Маринер-4» и «Пионер-6» и три советские — «Венера-2», «Венера-3», «Зонд-3»). Измерения на этих аппаратах по времени совпадали редко, тем не менее полученные данные представляют исключительный интерес для понимания процессов ускорения на Солнце и выяснения структуры межпланетного магнитного поля.

На «Пионере-6» проводились измерения потока солнечных протонов на расстоянии 2,6 млн. км от Земли за период с 29 декабря 1965 г. по 1 января 1966 г. Дифференциальный спектр интенсивности галактических протонов в этот период имел вид $D_g(\epsilon_K) = 3,9 \cdot 10^{-3} \cdot \epsilon_K^{-1,25}$ (для $\epsilon_K = 0,6—100$ Мэв), тогда как спектр солнечных протонов был существенно другим $D_c(\epsilon_K) = 1,55 \cdot 10^6 \cdot \epsilon_K^{-4,25}$. Поток солнечных протонов обладал заметной анизотропией (отношение интенсивностей $I_{\max}:I_{\min} = 3:1$), причем направление I_{\max} составляло угол около 30° с линией Солнце—Земля. Направление анизотропии изменялось до 90° в течение 10 мин, интенсивность анизотропного потока также была очень изменчива. Угловое распределение частиц было довольно четко ограничено сектором с угловой шириной около 45° . В отдельные периоды времени наблюдались большие колебания интенсивности длительностью приблизительно 15 мин для частиц с энергией больше 0,6 Мэв и длительностью 3,5 ч — для частиц с энергией $\epsilon_K = 13—70$ Мэв. Такие изменения интенсивности отражают сложную и изменчивую структуру магнитных полей в «солнечном ветре».

Особенно интересным был случай усиления потока солнечных протонов с энергией 13 Мэв 30 декабря 1965 — 1 января 1966 гг. По данным измерений на «Пионере-6» поток этих частиц был резко анизотропным в течение 48 ч, причем направление анизотропии заметно менялось (рис. 28). Это объяснялось в основном изменчивостью потока частиц от Солнца,

поскольку поток из анτισолнечного направления менялся значительно меньше и более плавно.

Какова же причина наблюдавшихся больших и быстрых колебаний интенсивности и направления потока протонов? Вероятно, эти колебания отражают изменения во времени пространственной структуры межпланетного магнитного поля. Другими словами, мимо космического аппарата со скоростью «солнечного ветра» (300—400 км/сек) проносятся магнитные образования типа «волокон» (рис. 29). Они представляют собой пучки или трубки силовых линий, заполненные или незаполненные солнечными протонами в зависимости от того, связана данная трубка с областью вспышки или нет. Диаметр магнитных «волокон» составляет от 0,5 до 5 млн. км. Таким образом, картина межпланетного поля, нарисованная по данным о солнечных космических лучах высокой энергии (см. рис. 24, 25, 26), дополняется новыми интересными деталями по мере того, как исследователи начинают изучать солнечные частицы все меньших и меньших энергий.

Советскими межпланетными станциями «Венера-2», «Венера-3» и «Зонд-3» за период с 19 июля 1965 г. по 24 января 1966 г. был обнаружен поток протонов с $\epsilon_k = 1\text{—}5$ Мэв, сильно возрастающий при удалении от Солнца. При изменении расстояния от Солнца от 130 до 190 млн. км интенсивность этого излучения возросла в 5 раз. Измерения на станциях «Зонд-3» и «Венера-2» проводились на разных расстояниях от Солнца, но одновременно, так что временной характер этого явления исключается. Особенно быстрое возрастание начинается с расстояния 160 млн. км. Авторы эксперимента предполагают, что в исследуемый период времени в районе орбиты Марса существовала кольцевая область повышенной концентрации протонов с $\epsilon_k = 1\text{—}5$ Мэв солнечного происхождения.

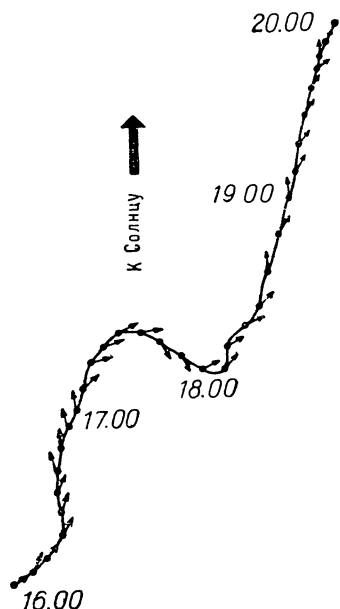


Рис. 28. Случай усиления потока солнечных протонов с энергией 13 Мэв по данным измерений на американском космическом аппарате «Пионер-6» 30 декабря 1965 г. на расстоянии 2,6 млн. км от Земли. Маленькие стрелки указывают направление максимального потока протонов, жирная стрелка — направление на Солнце, а цифрами показаны моменты измерений (в часах по гринвичскому времени).

По-видимому, в периоды солнечных вспышек (даже очень малых) большое количество протонов может быть заброшено за орбиту Земли по сравнительно узким магнитным каналам. Затем протоны диффундируют во все стороны, в том числе по

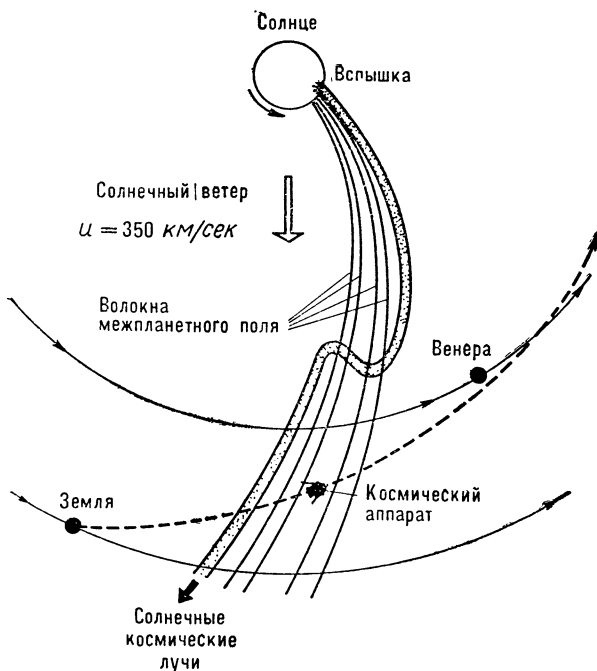


Рис. 29. Схематическое представление волокнистой структуры межпланетного поля. Жирной кривой показана трубка силовых линий, заполненная солнечными протонами малой энергии.

направлению к Солнцу. Такое предположение не лишено оснований, поскольку независимые данные по кометам, метеоритам и солнечным космическим лучам также указывают на возможность существования особой области (см. рис. 27) с сильно неупорядоченным магнитным полем между орбитами Марса и Юпитера (2—5 *а. е.* от Солнца).

При движении от места ускорения до места регистрации заряженная солнечная частица испытывает воздействие солнечной атмосферы и локальных магнитных полей на Солнце, межпланетной среды, межпланетного и геомагнитного полей, атмосферы Земли. В результате этих воздействий в принципе должны изменяться в пространстве и времени как индивиду-

альные характеристики отдельной частицы (траектория, энергия, заряд), так и коллективные свойства большой совокупности частиц (энергетический спектр, ядерный состав, полный поток). Рассмотрим роль основных факторов, способных вызвать изменение энергетического спектра, ядерного состава и других характеристик солнечных космических лучей.

ЯДЕРНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УСКОРЕННЫХ ЧАСТИЦ

Современная теория происхождения галактических космических лучей утверждает, что их ядерный состав у Земли должен существенно отличаться от состава ускоренных частиц в источниках. Это связывается с наличием ядерных превращений при взаимодействии космических лучей с межзвездной средой в процессе их распространения в Галактике. При этом происходит существенное обогащение космических лучей протонами и легкими ядрами в результате разрушения тяжелых ядер. Будет ли возникать аналогичная ситуация при распространении солнечных космических лучей? Рассмотрим отдельно роль ядерных взаимодействий в межпланетном пространстве, солнечной короне и хромосфере.

Количество вещества, через которое проходят солнечные частицы в межпланетном пространстве, значительно меньше, чем это необходимо для того, чтобы частица испытала хотя бы одно ядерное взаимодействие с веществом среды. Действительно, так как время движения частиц от Солнца к Земле не превышает одних суток, их скорость $v \approx 10^{10}$ см/сек и плотность межпланетной среды n меньше 10^3 см⁻³, то полное количество вещества, через которое проходят частицы, составляет не больше 10^{18} атом/см², т. е. меньше 10^{-6} г/см². Даже увеличение этой цифры на несколько порядков не меняет существа дела.

При движении ускоренных частиц в солнечной короне, где $n \approx 10^8$ см⁻³, ядерные взаимодействия будут существенны лишь в том случае, если время нахождения частиц в короне составляет не менее 10 суток. Так как процесс ускорения длится не более часа или нескольких часов, то ядерные взаимодействия в короне могут быть существенны лишь при наличии магнитных ловушек, способных длительное время (в течение многих суток) удерживать частицы. Такого рода ловушки, по видимому, могут существовать, однако время их жизни едва ли больше суток. В ловушках с таким временем существования ядерные взаимодействия будут существенны лишь при плотности среды 10^9 — 10^{10} см⁻³, т. е. если движение частиц происходит в нижней короне и верхней хромосфере.

Если движение частиц происходит в хромосфере при $n \approx 10^{12}$ см⁻³, то время их жизни относительно ядерных взаимо-

действий при $v \approx 10^{10}$ см/сек будет около 10^2 — 10^3 сек, что сравнимо с временем ускорения. Таким образом, эти простые расчеты показывают, что ядерный состав солнечных космических лучей может меняться, обогащаясь при этом более легкими ядрами, только при условии, если имеются длительно существующие магнитные ловушки в короне, либо если процесс ускорения происходит в основном в хромосфере при большой плотности вещества.

Поток солнечных частиц может обогащаться легкими ядрами с зарядом $Z=3-5$ в том случае, если процесс ускорения всех ядер происходит в достаточно плотной среде и в течение длительного времени. При этом в солнечных космических лучах должно наблюдаться большое количество ядер Li, Be, B. Однако данные наблюдений показывают, что этих ядер в потоке солнечных частиц практически нет. Так как в межпланетном пространстве ядерные взаимодействия крайне редки, то измерение состава солнечных частиц вблизи Земли дает почти такой же состав частиц, как при выходе из атмосферы Солнца.

Можно предположить, что при ядерных взаимодействиях в солнечной атмосфере образуется некоторое количество неустойчивых изотопов элементов, присутствующих в солнечных космических лучах. Часть этих изотопов, претерпевая радиоактивный распад с характерными периодами, сравнимыми с временем диффузии 10^3 — 10^5 сек, могла бы в какой-то степени изменять распределение солнечных космических лучей по энергиям и зарядам. Однако определенных данных по изотопному составу солнечных частиц пока нет, поэтому мы в дальнейших рассуждениях будем считать, что все ядра в составе солнечных космических лучей устойчивы.

Роль ядерных взаимодействий в земной атмосфере видна уже из того факта, что космические лучи, прежде чем достигнуть земной поверхности, должны пройти слой воздуха, который эквивалентен почти 15 ядерным пробегам. В этом случае оценка характеристик солнечных космических лучей на границе земной атмосферы проводится при помощи специального метода, позволяющего связать интенсивность вторичных частиц на данном уровне наблюдения в атмосфере с потоком первичных частиц (метод коэффициентов связи).

ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ СОЛНЕЧНЫХ ЧАСТИЦ В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

На основе известных формул можно оценить ионизационные потери для двух ядер из состава солнечных космических лучей — самого легкого (водород, заряд $Z=1$) и очень тяжелого (железо, заряд $Z=26$) — при их движении в межпланетной среде, плотность которой принимается равной 1 см^{-3} .

При движении нерелятивистской частицы с кинетической энергией $\epsilon_k = 100 \text{ Мэв}$ (скорость такой частицы намного меньше скорости света) потери на возбуждение и ионизацию атомов среды для протона и ядра железа составляют соответственно $3,23 \cdot 10^{-7} \text{ эв/сек}$ и $9,45 \cdot 10^{-4} \text{ эв/сек}$. В релятивистском случае, т. е. при скорости частицы $v \approx c$, где c — скорость света ($\epsilon_k = 10^{10} \text{ эв}$), ионизационные потери, как и следовало ожидать, несколько меньше: $2,26 \cdot 10^{-7} \text{ эв/сек}$ для водорода и $1,07 \cdot 10^{-4} \text{ эв/сек}$ для железа.

В полностью ионизованной среде с концентрацией электронов $n_e = 1 \text{ см}^{-3}$ в нерелятивистском случае ($\epsilon_k = 100 \text{ Мэв}$) ионизационные потери составляют $1,35 \cdot 10^{-6} \text{ эв/сек}$ для водорода и $6,1 \cdot 10^{-3} \text{ эв/сек}$ для железа, а в релятивистском случае — соответственно $6 \cdot 10^{-7}$ и $3,9 \times 10^{-4} \text{ эв/сек}$.

Таким образом, при оценке энергетических потерь в межпланетной среде ионизационными потерями солнечных космических лучей можно пренебречь, так как за время диффузии (10^3 — 10^5 сек) каждая отдельная частица теряет ничтожную долю своей энергии. Даже увеличение плотности среды на 1—2 порядка существенно не изменит этого вывода. Ионизационные потери, связанные с возможным присутствием в межпланетной среде гелия и других элементов, можно не учитывать, так как они не превосходят 20—25% потерь в водороде.

Следует иметь в виду, что в процессе ускорения на Солнце частицы могут оказаться не полностью ионизованными (т. е. потеряют не все свои электроны), поскольку так называемая энергия инжекции¹, при которой начинается ускорение, тем меньше, чем меньше степень ионизации атома. Однако в процессе набора энергии при достаточной плотности вещества атом будет все более ионизоваться. Степень ионизации ускоренных атомов будет зависеть, очевидно, от особенностей механизма ускорения и плотности вещества в области, где происходит набор энергии. Изменения степени ионизации атомов при прохождении межпланетного пространства, как следует из сказанного выше, практически не должно быть.

Для понимания механизма ускорения данные о степени ионизации солнечных частиц исключительно важны, однако пока таких данных нет. Наиболее прямые сведения о степени ионизации ядер можно в принципе получить на искусственных спутниках и космических ракетах. Для этой цели следует учесть тот факт, что геомагнитное поле разделяет ядра с эффективным зарядом Z^* по их жесткости $R^* = RZ/Z^*$ за пределами земной атмосферы. Отсюда степень ионизации $Z^* = RZ/R^*$, где R^* определяется из геомагнитной теории, а R

¹ Об энергии инжекции и некоторых особенностях процесса ускорения обстоятельно рассказывается в книге В. Л. Гинзбурга «Космические лучи у Земли и во Вселенной». М., «Знание», 1961.

и Z — по измерениям на воздушных шарах (после полного «обдирания» электронной оболочки атомов).

Для оценки роли ядерных взаимодействий и ионизационных потерь солнечных космических лучей несомненный интерес представляют результаты измерений спектра солнечных протонов с энергиями вплоть до $\epsilon_K = 1$ Мэв на спутниках «Эксплорер-12» и «Эксплорер-14» за пределами магнитосферы Земли в 1961—1962 гг. Анализ этих измерений показывает, что спектры солнечных частиц в источнике для нескольких вспышек (28 сентября 1961 г., 10 ноября 1961 г. и 23 октября 1962 г.) хорошо описываются степенной функцией от кинетической энергии $1/\epsilon_K$ вплоть до $\epsilon_K = 1$ Мэв, причем показатель степени $^1 \gamma$ находится в пределах от 1,7 до 3,5. Отсюда можно сделать вывод, что количество вещества, пройденного солнечными протонами после ускорения, было мало по сравнению с пробегом для поглощения протона с энергией 1 Мэв, т. е. меньше 10^{-3} г/см².

СТОЛКНОВЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЧАСТИЦ С «МАГНИТНЫМИ ОБЛАКАМИ»

Современная модель межпланетной среды предполагает динамически меняющуюся в пространстве и во времени картину движения неоднородностей магнитного поля («магнитных облаков») от Солнца. В связи с этим частицы, ускоренные во время солнечных вспышек, должны испытывать в процессе столкновений эффект замедления или ускорения в зависимости от того, догоняют ли они магнитные облака или испытывают встречные столкновения с ними.

При столкновении с магнитной неоднородностью ускорение обусловлено электрическим полем $\vec{E} = -\frac{1}{c} [\vec{u} \vec{H}]$, возникающим при переносе магнитного поля \vec{H} в ионизированной среде (плазме) со скоростью \vec{u} (рис. 30). Этот эффект лежит в основе статистического механизма ускорения Ферми. Солнечные частицы распространяются в расширяющемся потоке неоднородностей магнитного поля. В конечном счете это должно приводить к некоторому уменьшению энергии частиц, поскольку они испытывают в основном догоняющие столкновения. Этот механизм замедления частиц называют иногда «обратным» статистическим механизмом Ферми (или антифермиевским механизмом замедления).

¹ Величина γ показывает, насколько быстро число частиц уменьшается при увеличении энергии. Например, если спектр имеет вид $1/\epsilon_K^2$, т. е. $\gamma = 2$ то при увеличении энергии вдвое число частиц уменьшается в 4 раза.

Оценка эффекта замедления в рамках диффузионной теории показывает, что лишь для частиц очень малых энергий торможение становится заметным и его следует учитывать. Замедление приведет к более плоскому спектру в области малых энергий, т. е. к спектру с меньшим показателем степени γ . С

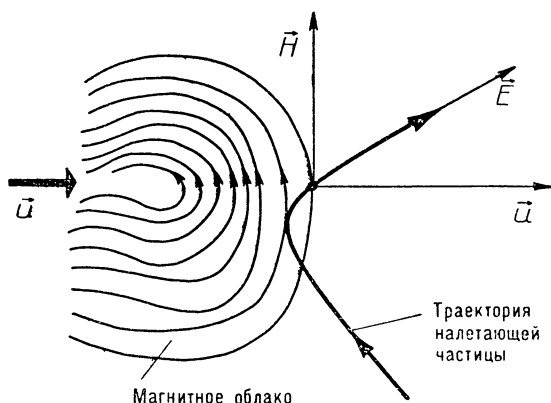


Рис. 30. Столкновение частиц с движущимся магнитным облаком. При движении облака возникает электрическое поле \vec{E} , направленное перпендикулярно векторам \vec{H} и \vec{u} . Это поле ускоряет частицу при встречном столкновении с облаком или замедляет ее, если она «догоняет» облако.

другой стороны, если спектр при малых энергиях является плоским, то замедление должно частично компенсировать понижение интенсивности частиц, обусловленное их конвекцией (дополнительным переносом) в «солнечном ветре».

УСКОРЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ЧАСТИЦ В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Интересный эффект увеличения потока солнечных космических лучей перед внезапным началом геомагнитной бури обнаруживается иногда по данным о поглощении космических радиосуммов в полярной шапке. До сих пор были зарегистрированы по меньшей мере три подобных случая: 11 февраля 1958 г., 8 мая 1960 г. и 30 сентября 1961 г. Благодаря одновременным измерениям на спутниках «Эксплорер-12» и «Инджун-1» 30 сентября 1961 г. удалось подтвердить предположение о том, что усиление поглощения вызвано увеличением потока солнечных протонов малой энергии.

Усиление поглощения перед началом магнитной бури можно объяснить, если предположить, что в межпланетной среде

вблизи Земли происходит «сжатие» потока солнечных частиц между двумя ударными волнами. Одна из этих волн, вызывающая геомагнитную бурю, движется от Солнца к Земле со скоростью 1000 км/сек. Эта волна связана с солнечным корпускулярным потоком, тогда как другая «стоячая» волна образована «солнечным ветром» при обтекании магнитосферы Земли (рис. 31). В результате «сжатия» происходит накопление частиц между волнами и увеличение их энергии за счет ускорения механизмом Ферми. Оба эти эффекта, действуя одновременно в окрестности Земли, приводят к возрастанию потока частиц с энергией выше заданной. Сравнение с данными наблюдений показало, что некоторые особенности поглощения космических радишумов можно объяснить на основе этой модели.

ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРА И СОСТАВА СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ПРОЦЕССЕ ДИФФУЗИИ

Влияние межпланетной среды на движение солнечных частиц от Солнца к Земле не ограничивается перечисленными эффектами. Из предыдущих разделов читателю известно, что решающую роль в распространении солнечных космических лучей играет межпланетное магнитное поле с его спиралевидной структурой вблизи орбиты Земли, с целым спектром неоднородностей, с его изменчивостью в пространстве и времени.

Самым важным следствием диффузии солнечных частиц в неоднородном межпланетном поле является изменение их спектра и состава со временем. Например, в начальный период вспышки 23 февраля 1956 г. дифференциальный спектр частиц по жесткостям в интервале $R=1,5-4,0$ Бв имел вид $R^{-3,5}$ для частиц, пришедших непосредственно от Солнца практически без рассеяния. Спустя несколько часов спектр стал совершенно другим (R^{-6} или R^{-7}), т. е. поток рассеянных частиц был обогащен частицами малых энергий. Резко выраженный дисперсионный эффект (т. е. запаздывание частиц малых энергий) наблюдался также в период вспышек 3 сентября 1960 г., 12 ноября 1960 г., 28 сентября 1961 г. и во многих других случаях. Эти экспериментальные факты находят свое естественное объяснение в предположении, что коэффициент диффузии существенно возрастает при увеличении энергии (жесткости) частиц.

Анализ экспериментальных данных по вспышкам, а также теоретические расчеты с учетом спектра неоднородностей межпланетного поля показывают, что средний свободный пробег зависит от жесткости частиц, от характера пространственного распределения неоднородностей и напряженности поля в них. Это означает, что коэффициент диффузии частиц $\kappa = \Lambda v/3$ может зависеть как от жесткости частиц, так и от скорости их

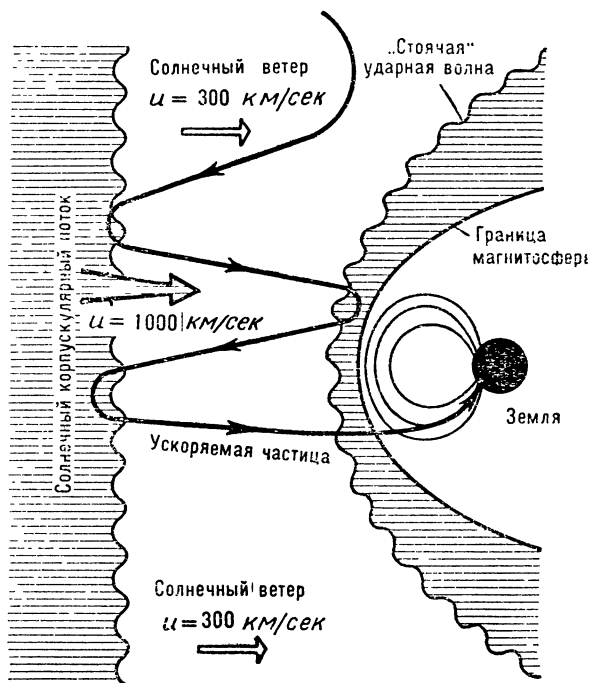


Рис. 31. Ускорение солнечных частиц вблизи Земли между двумя ударными волнами. Одна из них образована «солнечным ветром» при обтекании магнитосферы Земли, а другая — солнечным корпускулярным потоком. Многократное отражение частицы от этих волн приводит ее к ускорению. Ускоренные частицы приходят преимущественно в полярные области Земли.

движения. Особенно заметно эта зависимость проявляется в области энергий меньше 1 Бэв, тогда как при энергии выше 1 Бэв коэффициент диффузии κ пропорционален Λ , поскольку $v \approx c$.

Зависимость κ от v будет сильно сказываться на времени движения частиц от Солнца к Земле (ведь мы уже знаем, что поток солнечных частиц достигает максимума в момент $t_{\max} = r_{\text{орб}}^2 / 6\chi = r_{\text{орб}}^2 / 2\Lambda v$). Более того, по этой же причине должен изменяться со временем и ядерный состав солнечных космических лучей. Действительно, поскольку для всех ядер тяжелее протона отношение заряда к массовому числу $Z/A \approx 1/2$, то скорость ядер в области малых энергий примерно вдвое меньше скорости протонов при одинаковой жесткости.

Таким образом, следует ожидать, что в период вспышек космических лучей потоки протонов и более тяжелых ядер

одинаковой жесткости будут четко разделяться, причем со временем поток солнечных частиц будет обогащаться ядрами тяжелее протона. Кроме того, все ядра тяжелее протона при одинаковом значении R должны одновременно присутствовать в потоке солнечных космических лучей, т. е. дальнейшее разделение потоков ядер по R происходить не должно.

Из сказанного ясно, что, измеряя моменты максимумов, например для потоков малоэнергичных протонов и ядер гелия (α -частиц) у Земли, можно для любого момента вычислить их отношение $H^1 : \alpha$ при одинаковой жесткости. Это отношение зависит от жесткости частиц и меняется со временем, что позволяет более определенно судить о процессах ускорения и распространения солнечных космических лучей.

В релятивистской области (т. е. при $v \approx c$) в любой момент времени наблюдаемое соотношение потоков протонов и более тяжелых ядер должно быть таким же, как и в момент их испускания из источника. К сожалению, экспериментальные данные в этом отношении крайне скудны. Так, на основании данных стратосферных измерений во время вспышки 3 сентября 1960 г. можно проследить лишь тенденцию к обогащению потока α -частиц со временем частицами малых энергий.

Более определенный результат был получен для вспышки 12 ноября 1960 г. Спектр солнечных частиц с энергиями больше 35 Мэв имел в этом случае степенной вид $\epsilon^{-\gamma}_k$, причем показатель степени оказался одинаковым для α -частиц и средних ядер ($Z=6-9$), но был примерно вдвое больше для протонов в области энергий от 20 до 130 Мэв. Это различие естественно объясняется зависимостью коэффициента диффузии от энергии частиц.

Сравнение результатов измерений по вспышкам 3 сентября и 15 ноября 1960 г., в частности, показало, что отношение протонов к α -частицам или протонов к средним ядрам может более чем в 10 раз меняться от случая к случаю, тогда как отношение потока α -частиц к потоку более тяжелых ядер остается практически постоянным.

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРА СОЛНЕЧНЫХ ЧАСТИЦ И МЕХАНИЗМЫ УСКОРЕНИЯ

Несмотря на неоднородность и неполноту экспериментальных данных о солнечных космических лучах по наблюдениям у Земли, в настоящее время уже можно выделить некоторые характерные особенности их спектра.

Если использовать для описания спектра степенную функцию $\epsilon_k^{-\gamma}$, то оказывается, что при энергиях порядка нескольких сотен Мэв показатель степени $\gamma \approx 3$ и приблизительно одинаков для разных вспышек. В области энергий выше нескольких сотен Мэв спектр претерпевает излом, причем показатель

степени увеличивается до $\gamma=5-6$. Положение излома может меняться от вспышки к вспышке.

Если частицы с энергией 10^7-10^8 эв движутся в ловушке корпускулярного потока, то показатель их спектра также близок к $\gamma=5-6$. Таким образом, между спектрами для различных вспышек космических лучей имеются известные, хотя и не очень значительные, различия.

Вместе с тем наблюдения показывают, что спектры солнечных космических лучей слабо зависят от характеристик самих солнечных вспышек (площадь, мощность, продолжительность, положение на Солнце и т. д.). Поэтому естественно считать, что постоянство спектра при различных вспышках является некоторым общим свойством динамики солнечной плазмы и термодинамики газа космических лучей. Действительно, спектр солнечных космических лучей может быть получен из общих термодинамических соображений безотносительно к конкретным значениям параметров механизма ускорения.

Прежде всего разумно предположить, что в результате какого-либо ускорительного процесса в солнечной атмосфере образуется полость, занятая быстрыми частицами и удерживаемая давлением внешнего магнитного поля. При достаточно большом давлении этих частиц может произойти «прорыв» удерживающего магнитного поля и содержимое полости будет выбрасываться в окосолнечное пространство. Тогда, считая внешнее давление, созданное сильным магнитным полем солнечных пятен, практически постоянным, можно вычислить число ускоренных частиц со средней кинетической энергией ϵ_k .

Рассматривая космические лучи как идеальный газ, можно теоретически получить спектр частиц, вышедших из полости. Этот спектр имеет степенной вид $\epsilon_k^{-\gamma}$, где $\gamma=3,5$ в области нерелятивистских энергий и $\gamma=5$ в релятивистской области.

Очевидно, такой вид спектра в общих чертах согласуется с данными наблюдений. Однако, как мы знаем, в некоторых случаях показатель спектра γ равен $5-6$ уже в области сравнительно малых энергий ($\epsilon_k=100-300$ Мэв для протонов). Кроме того, величина γ может изменяться во времени в течение вспышки.

Объяснение этих фактов заключается в следующем. Прежде всего нужно учесть, что частицы могут терять часть своей энергии еще в процессе ускорения в солнечной атмосфере. Кроме того, по мере сжатия полости, где происходит ускорение частиц, давление внешнего магнитного поля может меняться. Действуя одновременно, эти два фактора должны привести к увеличению показателя спектра.

Далее, не исключена возможность, что ускоренные частицы от одной-двух вспышек сначала накапливаются в некоторой области и лишь после третьей вспышки выбрасываются в окосолнечное пространство. В этом случае связь между

показателями спектров для частиц высоких и малых энергий будет практически полностью отсутствовать из-за длительного «блуждания» в солнечной атмосфере и «перемешивания» частиц от разных вспышек. Наконец, не следует забывать, что в процессе распространения частиц в межпланетном пространстве их спектр значительно изменяется благодаря зависимости коэффициента диффузии от энергии частиц.

За последние годы различными методами были измерены спектры солнечных космических лучей в интервале энергий от нескольких *Мэв* до десятков *Бэв*, причем не только для протонов, но также для более тяжелых ядер.

Из-за разнообразия методов измерений, которые применяются к тому же в различных интервалах энергий, возникает необходимость согласовать результаты различных измерений и найти удобную форму описания спектра и его изменения со временем. Обычно дифференциальный спектр записывают в виде степенной функции от кинетической энергии или от жесткости частицы (т. е. в виде $\epsilon_K^{-\gamma_1}$ или $R^{-\gamma_2}$), причем γ_1 и γ_2 одновременно являются функциями от энергии (или жесткости) и времени. Из эксперимента известно, что γ_1 или γ_2 обычно имеют меньшие значения при малых ϵ_K или R , где наблюдается «изгиб» спектра (см. рис. 6); кроме того, γ_1 и γ_2 обычно возрастают со временем.

Некоторыми исследователями было обнаружено, что солнечные протоны и α -частицы имеют одинаковые по форме спектры жесткости. Это послужило основой для предположения, что жесткость может служить самым удобным параметром для описания процессов формирования спектра на Солнце и объяснения данных измерений вблизи Земли.

Интервал жесткостей или энергий, охватываемый одним измерением, обычно является очень узким, так что спектр солнечных частиц можно достаточно точно представить в виде степенной функции от жесткости или энергии с постоянным показателем γ . Если же рассмотреть полный диапазон жесткостей или энергий солнечных частиц (от 1 *Мэв* до 10 *Бэв*), то такое представление уже будет неудовлетворительным, хотя можно предположить, конечно, что γ_1 и γ_2 зависят от энергии или жесткости.

Для точного описания спектра необходимо сравнить результаты измерений с помощью ракет, спутников, риометров в области малых энергий (1—50 *Мэв*) с данными измерений на воздушных шарах с помощью эмульсий, счетчиков, ионизационных камер при промежуточных энергиях (70—500 *Мэв*) и с результатами наземных измерений в области энергий выше 500 *Мэв*. Для этой цели нужно точно знать абсолютную чувствительность упомянутых детекторов к различным участкам первичного спектра. С другой стороны, определение чувствительности требует определенных предположений о форме

первичного спектра. Поскольку степенной спектр первичного излучения имеет показатель, зависящий одновременно от энергии (или жесткости) и времени, то в этих условиях нельзя быть уверенным в точности экстраполяции такого спектра по области энергий, перекрывающей несколько типов измерений.

Эти трудности побудили некоторых исследователей рассмотреть другие возможности для описания спектра. Одна из таких возможностей — экспоненциальное представление спектра $I(>R) = I_0 e^{-R/R_0}$, где R_0 — характеристическая жесткость, которая для данной вспышки зависит только от времени, $I(>R)$ — поток частиц с жесткостью выше заданной, I_0 — поток частиц с $R > 0$. Значение R_0 может меняться от вспышки к вспышке. В случае экспоненциального спектра отпадает необходимость искусственно «загибать» спектр при низких энергиях, поскольку хотя R_0 не зависит от R , однако результат получается такой же, как и при «загнутом» спектре.

Следует отметить, что экспоненциальное представление для описания спектра во всем диапазоне жесткостей солнечных космических лучей в настоящее время подвергается сомнениям. Современная точность определения показателей спектра γ_1 и γ_2 или величины R_0 пока недостаточна, чтобы сделать однозначный выбор формы спектра. Тем не менее один факт вырисовывается довольно определенно: характеристическая жесткость R_0 в экспоненциальном спектре для сравнительно узкого интервала жесткостей меняется со временем в период вспышки, однако спектр сохраняет свою экспоненциальную форму. Таким образом, процесс распространения солнечных частиц заметно изменяет величину R_0 , но не меняет экспоненциальной формы спектра.

Это позволяет предположить, что в источнике спектр также имеет экспоненциальный вид с характеристической жесткостью R_0 , которая несколько отличается от жесткости, измеряемой у Земли. Подтверждением этого могут служить результаты исследования непрерывного спектра электромагнитного излучения Солнца (от радиоволн до видимого света) в течение начальной фазы солнечной вспышки. Как оказалось, это излучение обусловлено синхротронным (тормозным) излучением электронов в солнечных магнитных полях, а его спектр можно объяснить лишь на основе экспоненциального спектра жесткостей для электронов со значениями R_0 , близкими к полученным для протонов.

Эти результаты означают, что электроны, протоны и более тяжелые ядра могут приобретать одинаковый экспоненциальный спектр жесткостей при ускорении в солнечной вспышке.

Каков возможный механизм для такого ускорения? Современное состояние теории ускорения позволяет утверждать, что три обсуждаемых спектральных представления (ϵ_k^{-1} , R^{-1} и e^{-R/R_0}), по-видимому, соответствуют трем типам ускорительных процессов в области вспышки.

1. **Статистические процессы** передачи импульса частицам, захваченным в области ускорения (например, уже упоминавшийся механизм Ферми). Такие процессы, как известно, распределяют ускоренные частицы в соответствии с их энергиями. Например, для механизма Ферми скорость изменения энергии частицы $d\epsilon_k/dt$ пропорциональна ϵ_k , что в конечном счете приводит к спектру вида ϵ_k^{-1} .

2. **Электромагнитные процессы** ускорения за счет электрических полей, возникающих при быстром увеличении напряженности магнитного поля (например, бетатронное ускорение); процессы такого типа действуют на частицы в соответствии с их жесткостями. При этом скорость приращения жесткости dR/dt пропорциональна R , что также приводит к степенному спектру R^{-1} .

3. **Ускорение в поле электростатического типа.** В этом случае скорость ускорения определяется лишь напряженностью некоторого среднего поля E_0 независимо от жесткости частиц: $dR/dt = bE_0 = \text{const}$. В результате формируется спектр экспоненциального типа e^{-R/R_0} . Чтобы объяснить данные измерений спектра для различных вспышек, необходимо электрическое поле $E_0 = 1,4 \cdot 10^{-4}$ в/см и $dR/dt = bE_0 = 5 \cdot 10^6$ в/сек.

Возникает вопрос: каким образом электрическое поле достаточной величины может существовать и ускорять частицы в области вспышек на Солнце? Как известно, проводимость солнечной плазмы очень высока, поэтому трудно представить себе, как мог бы возникать пространственный заряд, достаточный для появления заметного электрического поля, или как это поле могло бы совершать «работу» над частицами.

Большинство наблюдателей уподобляют вспышки катастрофическому процессу, который по своей природе, вероятно, требует выполнения специальных условий. Могут ли существовать такие условия, которые способствовали бы возникновению достаточно сильных электрических полей в высокопроводящей плазме солнечной вспышки? Многие исследователи отвечают на этот вопрос утвердительно.

В некоторых специальных магнитных конфигурациях электрическое поле, возможно, «работает» в относительно малом объеме, заполненном частицами. Полное падение потенциала в такой области и полное число частиц, которые могли бы ускоряться, не противоречат современным данным наблюдений.

Нельзя исключать также возможность импульсного ускорения солнечных частиц случайными электрическими полями в области вспышки, особенно если учесть, что мощные движения плазмы и магнитных полей вызывают образование локальных пространственных зарядов. Чтобы выяснить, какой из механизмов ускорения является основным, нужны более подробные данные о солнечной плазме и реальных физических

ких условиях в области вспышки. Электрические поля, необходимые для формирования экспоненциального спектра, по-видимому, могут возникать при так называемой динамической диссипации магнитного поля (т. е. при быстром «превращении» энергии магнитного поля в энергию ускоренных частиц). Теория этого механизма ускорения успешно развивается в Советском Союзе с 1965 г.

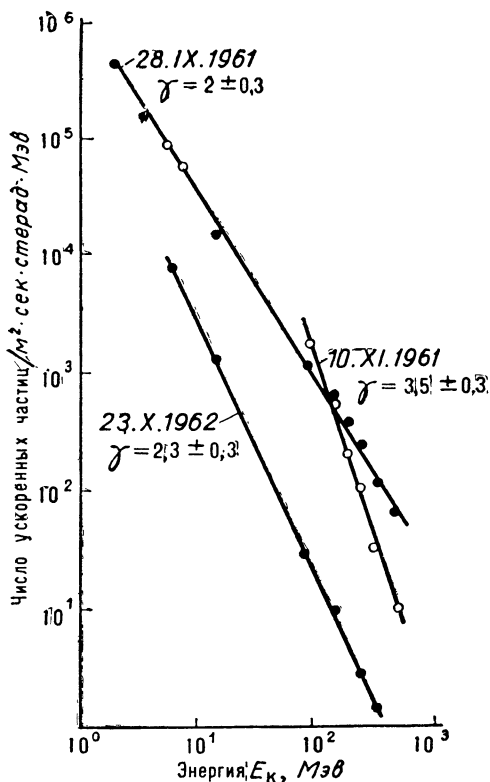


Рис. 32. Спектры солнечных протонов в источнике (вблизи Солнца) для трех вспышек в интервале энергий 10—500 Мэв.

Чтобы сделать окончательный вывод о характере процессов, формирующих спектр солнечных частиц, очевидно, необходимо точно знать, является ли спектр экспоненциальным e^{-R/R_0} до процессов его изменения в межпланетном пространстве. Результаты, полученные из диффузионной теории, показывают, что спектр солнечных протонов в источнике имеет не экспоненциальный, а степенной вид $\epsilon_K^{-\gamma}$, по крайней мере в области нерелятивистских энергий 10—500 Мэв (рис. 32). Правда, данных о спектрах источника в настоящее

время мало, к тому же нет ни одной вспышки, для которой этот спектр был бы известен во всем диапазоне жесткостей солнечных космических лучей. Поэтому в целом пока трудно судить об истинной форме спектра частиц в момент их испускания Солнцем.

Таким образом, объяснение измеряемого на орбите Земли спектра солнечных космических лучей основано на двух предположениях: 1) особенности спектра у Земли определяются особенностями механизмов ускорения и выхода частиц из области вспышки на Солнце (магнитная ловушка в солнечной атмосфере); 2) форма спектра в момент испускания мало изменяется от вспышки к вспышке, а его особенности у Земли определяются диффузионным выходом частиц из ловушки Солнечной системы (см. рис. 27).

Не исключено, что обе эти причины действуют одновременно, но в настоящее время пока трудно ответить на вопрос о том, какая из них играет основную роль в формировании спектра солнечных космических лучей, наблюдаемого у Земли.

9. СОСТАВ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Основную долю солнечных космических лучей составляют протоны. Исследования последних лет привели к обнаружению различных ядер тяжелее протона, а также электронов и (менее определенно) нейтронов. Сам факт их присутствия, энергетические спектры и относительное содержание имеют чрезвычайно важное значение не только для изучения солнечных космических лучей, но также для понимания физики Солнца и исследования несолнечных космических лучей.

В изучении состава солнечных космических лучей первые существенные успехи были достигнуты в годы, близкие к предыдущему максимуму солнечной активности (1957—1962 гг.). К настоящему времени картина в общих чертах более-менее ясна, так что главное внимание привлечено к деталям этой проблемы.

Наиболее подробные сведения имеются, естественно, для протонов, так как протоны составляют подавляющую часть солнечных космических лучей и их легче регистрировать, чем ядра. Энергетические спектры солнечных протонов H^1 и ядер гелия (α -частиц) в ряде случаев были измерены одновременно с помощью фотоэмульсий на воздушных шарах и ракетах. Несмотря на ограниченное количество измерений, они представляют большой интерес, поскольку различие в отношениях заряда к массе для протонов и α -частиц позволяет разделить их потоки по скоростям и жесткостям.

Успехи в изучении изотопного состава солнечных частиц пока незначительны. В двух случаях были зарегистрированы

заметные потоки ядер дейтерия H^2 , а в двух других случаях удалось получить довольно строгие верхние пределы их потока. В составе солнечных космических лучей были обнаружены также тритий H^3 и изотоп гелия He^3 .

В нескольких случаях вспышек удалось зарегистрировать небольшие потоки более тяжелых ядер. Вероятно, эти ядра всегда имеются в составе солнечных космических лучей. Действительно, они регистрируются каждый раз, когда наблюдаемая интенсивность солнечных протонов достаточна для того, чтобы ожидать появления также более тяжелых ядер.

СООТНОШЕНИЕ ПРОТОНОВ И БОЛЕЕ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

Детальные исследования показывают, что состав ядер тяжелее протона ($Z \geq 2$), видимо, очень близок к составу солнечной атмосферы и значительно отличается от состава космических лучей за пределами Солнечной системы (табл. 2).

Относительное содержание солнечных протонов и α -частиц при постоянной жесткости сильно меняется от вспышки к вспышке. Отношение их потоков колеблется в пределах от 5 до 50, если измерения проводятся до начала геомагнитной бури, и приблизительно равно 1, если состав частиц измеряют после ее начала (рис. 33). Измерения средних и тяжелых солнечных ядер показывают, что их спектры жесткостей сходны со спектром жесткостей α -частиц, а отношение числа α -частиц к числу этих ядер почти постоянно от случая к случаю.

Таким образом, одной из особенностей ядерного состава солнечных космических лучей является изменчивость отношения $H^1 : \alpha$ от вспышки к вспышке: в некоторых случаях потоки протонов и более тяжелых ядер хорошо отражают состав атмосферы Солнца, тогда как в других поток солнечных космических лучей оказывается значительно богаче протонами.

Чем объясняются эти различия? Чтобы ответить на этот вопрос, можно сопоставить данные об отношении $H^1 : \alpha$ с характеристиками солнечных радиовсплесков так называемого IV типа (радиовсплески этого типа считают обычно одним из признаков начавшегося процесса ускорения частиц во вспышке). Такое сопоставление позволяет заключить, что на начальной стадии ускорения солнечные протоны приобретают энергию быстрее, чем более тяжелые ядра. Это означает, вероятно, что в период начальной фазы ускорения механизм Ферми является более эффективным, чем бетатронный механизм. В этом случае в составе ускоренных частиц протонов будет относительно больше, чем в составе солнечной атмосферы.

Другое объяснение изменения отношения $H^1 : \alpha$ заключается в следующем. На Солнце имеются, видимо, две области

Таблица 2

Относительное содержание ядер (количество ядер кислорода принято равным 1,0).

Элемент	Солнечные космические лучи	Солнце*	Вселенная	Галактические космические лучи**
He ²	107 ± 14	—	150	48
Li ³	—	< 10 ⁻⁵	< 10 ⁻⁵	0,3
Be ⁴ — Be ⁵	0,02	< 10 ⁻⁵	< 10 ⁻⁵	0,8
C ⁶	0,59 ± 0,07	0,6	0,26	1,8
N ⁷	0,19 ± 0,04	0,1	0,20	≤ 0,8
O ⁸	1,0	1,0	1,0	1,0
F ⁹	< 0,03	0,001	< 10 ⁻⁴	≤ 0,1
Ne ¹⁰	0,13 ± 0,02	—	0,36	0,30
Na ¹¹	—	0,002	0,002	0,19
Mg ¹²	0,043 ± 0,011	0,027	0,040	0,32
Al ¹³	—	0,002	0,004	0,06
Si ¹⁴	0,033 ± 0,011	0,035	0,045	0,12
P ¹⁵ — S ²¹	0,057 ± 0,017	0,032	0,024	0,13
Ti ²² — Ni ²⁸	≤ 0,02	0,006	0,033	0,28

* Неопределенность значений в этой колонке около 50%.

** Неопределенность значений в этой колонке 10—30%.

атмосферы, где может происходить ускорение частиц, — одна с высокой плотностью (в хромосфере), а другая с довольно низкой плотностью (в короне). В области низкой плотности ускоряются все ядра. В области с высокой плотностью начальная энергия, необходимая для ускорения (энергия ин-

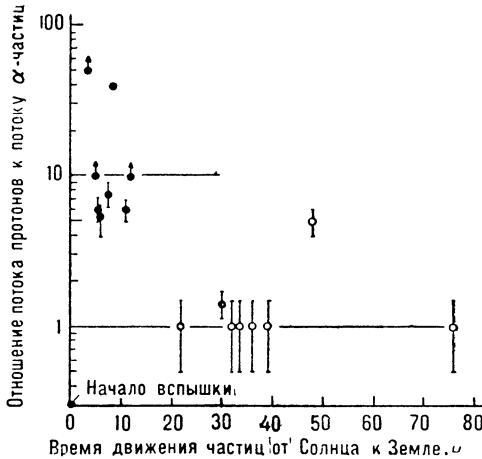


Рис. 33. Отношение потока солнечных протонов к потоку α-частиц по измерениям на орбите Земли до начала геомагнитной бури (темные кружки) и после ее начала (светлые кружки).

жекции), оказывается слишком большой, поэтому, как предполагают исследователи, необходима промежуточная стадия, на которой ускорялись бы преимущественно протоны. Таким образом, в зависимости от того, на какой высоте в атмосфере Солнца, при каких плотностях вещества происходит ускорение частиц, получится различное соотношение между потоком ускоренных протонов и общим потоком более тяжелых ядер.

Это последнее предположение косвенно подтверждается данными о радиоизлучении солнечных вспышек. По мнению некоторых исследователей, радиоизлучение вспышек может служить индикатором ядерного состава солнечных космических лучей. Действительно, сопоставление данных о радиоизлучении с данными о содержании протонов и более тяжелых ядер показывает, что чем выше произошла вспышка (например, в нижней короне), тем больше поток ядер (и меньше поток протонов) и тем интенсивнее поток метровых радиоволн. Если же вспышка произошла глубоко в атмосфере Солнца (в хромосфере), то наблюдается сантиметровое радиоизлучение большой длительности, а поток солнечных космических лучей у Земли оказывается обогащенным протонами.

ВОЗРАСТАНИЯ ПОТОКА ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

В связи с особенностями ядерного состава солнечных космических лучей заслуживают внимания несколько случаев преимущественного возрастания потока тяжелых релятивистских ядер с зарядом больше 15 и энергией выше 600 Мэв на единицу атомного веса.

Эти возрастания имели длительность от 2 до 20 мин и не были связаны с обычными вспышками солнечных космических лучей. Некоторые из этих явлений сопровождались всплесками солнечного рентгеновского излучения. Из 6 случаев, наблюдавшихся в 1959—1960 гг., лишь один (20 августа 1960 г.), вероятно, был обусловлен солнечной вспышкой. Все остальные случаи обнаруживают очень плохую связь со вспышками. Можно предположить, что они являются принципиально новыми эффектами, связанными с какими-то другими проявлениями солнечной активности (быстрые процессы).

Интересно отметить, что, кроме легких ядер и протонов, во всех наблюдавшихся случаях возрастания потока тяжелых ядер отсутствовали также частицы малых энергий. Для иллюстрации этого эффекта опишем хорошо исследованный случай 23 февраля 1964 г., зарегистрированный приборами советского спутника «Электрон-2». Поток ядер с зарядом больше 15 возрос в этот день на $42 \pm 14\%$ по сравнению со средним значением для 20 февраля (рис. 34). В то же время возрастание потока ядер с меньшим зарядом не выходило за пре-

делу ошибок измерений. В протонной компоненте космических лучей согласно показаниям приборов того же спутника также не было обнаружено заметного возрастания.

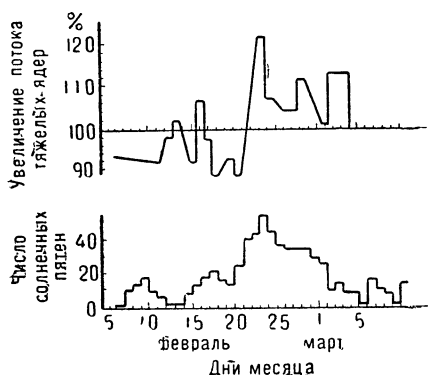


Рис. 34. Возрастание потока солнечных ядер с зарядом больше 15 в конце февраля 1964 г. (в процентах к фоновому уровню).

Именно в этой области в период 21—26 февраля наблюдалось большое количество вспышек, а также выбросы вещества. Таким образом, есть основания считать, что зарегистрированное 23 февраля 1964 г. возрастание потока тяжелых ядер связано с их ускорением на Солнце. Это предположение подтверждается значительным увеличением потока рентгеновского и радиоизлучения Солнца 23 февраля 1964 г., зарегистрированным приборами нескольких космических аппаратов.

БЫСТРЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Как уже говорилось, солнечное радиоизлучение так называемого IV типа считают верным признаком ускорения протонов во вспышках. Очевидно, вместе с протонами и другими ядрами должны ускоряться и электроны. Действительно, исследования показали, что радиоизлучение IV типа вызывается синхротронным (тормозным) излучением релятивистских электронов, ускоренных во вспышках и вращающихся по спирали в магнитных полях активных областей.

Со вспышками также тесно связано рентгеновское излучение с длиной волны меньше 8 ангстрем. В частности, при исследовании рентгеновского всплеска от вспышки 28 сентября 1961 г. обнаружили, что этот всплеск можно объяснить тормозным излучением релятивистских электронов с энергией больше 20 Кэв, если их энергетический спектр имеет вид ϵ_K^{-3} , а полное число электронов, ускоренных во вспышке, равно $3 \cdot 10^{35}$.

Если продолжить спектр электронов в область релятивистских энергий, то можно удовлетворительно объяснить также наблюдавшийся всплеск сантиметровых радиоволн. Таким образом, можно дать следующее объяснение излучения вспышки. Рентгеновское излучение с длиной волны меньше 8 ангстрем возникает в области вспышки в результате тормозного излучения *нерелятивистских* электронов, ускоренных в процессе развития вспышки и обладающих, например, степенным энергетическим спектром ϵ_k^{-1} . Сантиметровый радиовсплеск IV типа возникает одновременно в результате синхротронного излучения электронов, ускоренных в той же вспышке до *релятивистских* энергий и обладающих спектром с тем же показателем γ .

Хотя число электронов, ускоряемых во вспышке до высоких энергий, сравнимо с числом протонов, однако до последнего минимума солнечной активности (1964—1965 гг.) не было надежных данных о присутствии солнечных электронов в межпланетном пространстве на орбите Земли. Этот факт частично объясняется тем, что поток электронов от вспышки мал по сравнению с потоком протонов той же жесткости, поскольку электроны, находясь еще в атмосфере Солнца, теряют много энергии на рентгеновское и радиоизлучение.

Первые надежные данные о высокоэнергичных электронах, ускоренных во вспышках и дошедших до орбиты Земли, были получены на американских спутниках «IMP-1» и «IMP-3» в течение 1964—1966 гг. В межпланетном пространстве за этот период отмечено 10 случаев появления солнечных электронов с энергией выше 40 Кэв.

В 1965 г. приборы американского космического аппарата «Маринер-4», летевшего к Марсу, уверенно зарегистрировали три случая импульсного испускания солнечных электронов с энергией больше 40 Кэв (эта энергия представляла собой порог чувствительности аппаратуры). В момент измерений «Маринер-4» находился на большом расстоянии от любого тела Солнечной системы. Возрастания потока электронов в межпланетном пространстве наблюдались 25—28 мая, 5—7 июня и 13—14 июня 1965 г., а максимальные значения их интенсивности оказались равными соответственно 80, 58 и $5 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стерад}^{-1}$. Угловое распределение электронов было близким к изотропному, что позволяет использовать простую диффузионную модель распространения частиц для определения полного числа электронов в момент испускания. Для случаев 25 мая и 5 июня расчеты дают около 10^{34} электронов, а для случая 13 июня — около 10^{33} .

Солнечные электроны от вспышки 5 июня 1965 г. были зарегистрированы также ионизационными камерами американского спутника «OGO-A». Сравнение с результатами счетчиковых измерений на «Маринере-4» во время той же вспыш-

ки показало, что камеры, по-видимому, регистрировали электроны с энергией выше 600 Кэв. Максимальная величина их потока у орбиты Земли составляла $1,3 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$.

Если эту величину проэкстраполировать на место нахождения «Маринера-4» (1,5 а. е. от Солнца), то получим поток электронов, равный $0,42 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$. Эти данные вместе с результатами измерений на «Маринере-4» позволяют оценить интегральный спектр электронов, который на орбите Марса имеет вид $\epsilon_k^{-2,7}$.

Следует иметь в виду, что спектр, измеренный у Земли, может сильно отличаться от спектра электронов в источнике, поскольку их распространение в атмосфере Солнца и межпланетном пространстве имеет некоторые особенности по сравнению с распространением протонов.

Возрастания потока электронов солнечного происхождения с энергией больше 30 Кэв и больше 60 Кэв были зарегистрированы также на советском спутнике Луны «Луна-11» 1 и 8 сентября 1966 г. Максимальная интенсивность электронов колебалась в пределах от 300 до 4000 $\text{см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стерад}^{-1}$. Одновременно с электронами 8 сентября регистрировались протоны с энергией больше 1 Мэв и интенсивностью $10^2 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стерад}^{-1}$. В период измерений спутник находился в тени Луны, так что влияние рентгеновского излучения Солнца исключалось.

Важно отметить, что электроны и протоны имеют различные радиусы кривизны — радиусы окружностей, по которым они вращаются в межпланетном магнитном поле. Например, радиус кривизны для электрона с $\epsilon_k = 40 \text{ Кэв}$ приблизительно в 1000 раз меньше, чем для протона в области энергий 10—100 Мэв и составляет около 10^{-6} а.е. в межпланетной среде. Это означает, что электрон с $\epsilon_k = 40 \text{ Кэв}$ будет «чувствителен» к рассеянию на магнитных неоднородностях с размерами в 1000 раз меньшими, чем протон соответствующей энергии (при прочих равных условиях).

Отсюда можно сделать вывод, что солнечные электроны, возможно, представляют собой новое ценное средство для изучения мелкомасштабной структуры межпланетного магнитного поля. Например, рассеяние на магнитных неоднородностях с размером порядка 10^{-4} а.е. должно иметь для электронов с $\epsilon_k = 40 \text{ Кэв}$ совершенно другую природу, чем для протонов с $\epsilon_k = 20 \text{ Мэв}$.

О НЕЙТРОНАХ СОЛНЕЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Поскольку во вспышках ускоряются протоны и более тяжелые ядра вплоть до энергий 10^{10} эв , то следует ожидать, что в результате ядерных взаимодействий ускоренных частиц в фотосфере (т. е. в плотных слоях атмосферы Солнца) будут рождаться высокоэнергичные нейтроны.

Несмотря на отсутствие теоретической ясности вопроса и большие технические трудности, многие исследователи пытались экспериментально обнаружить солнечные нейтроны во время вспышек. В 1963—1966 гг. проводились обширные измерения потока нейтронов на американских спутниках серии «Вела». Эти измерения дали отрицательный результат: вероятно, поток нейтронов находился за пределами чувствительности аппаратуры.

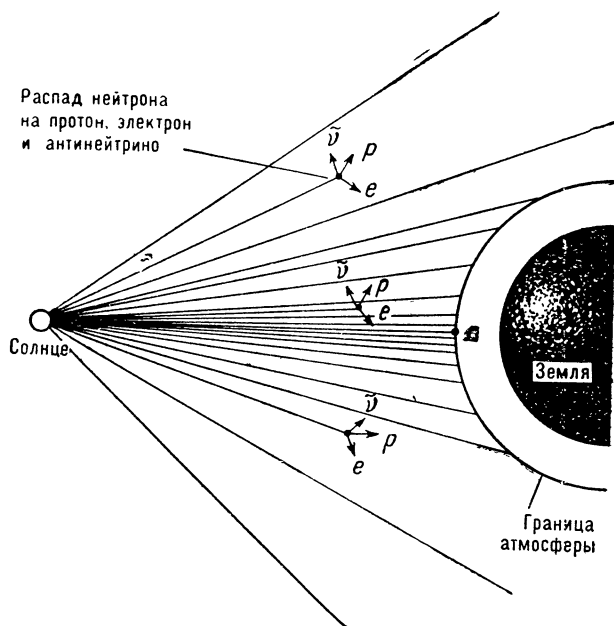


Рис. 35. Солнечные нейтроны в межпланетном пространстве. Часть из них распадается, не дойдя до Земли. Интенсивность солнечных нейтронов вблизи Земли максимальна в подсолнечной точке А.

Нейтроны не подвержены влиянию магнитных полей, поэтому их максимальная интенсивность должна наблюдаться в подсолнечной точке А (рис. 35). Учитывая это, две группы исследователей из Индии предприняли несколько попыток зарегистрировать солнечные нейтроны в стратосфере вблизи экватора. Во время наблюдений, проводившихся с помощью воздушных шаров 23 марта 1962 г., был обнаружен поток нейтронов, видимо, солнечного происхождения $148 \pm 60 \text{ м}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ в интервале энергий 4—160 Мэв.

Наблюдения проводились через 6 ч после мощной солнечной вспышки, которая, однако, не вызвала изменений интенсивности заряженных частиц. Учитывая эти обстоятельства,

следует предположить, что результаты измерений фактически относятся к спокойному Солнцу, а не к вспышке, т. е. был получен лишь верхний предел потока нейтронов от спокойного Солнца.

В стратосфере над Хайдерабадом ($17,6^\circ$ с.ш., $78,5^\circ$ в.д.) 15 апреля 1966 г. был зарегистрирован поток нейтронов около $1000 \text{ м}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ (усредненный за 1,5 ч наблюдений) в интервале энергий 50—500 Мэв. При этом наблюдались колебания потока с периодом около 10 мин и амплитудой, в несколько раз превышающей статистическую ошибку. Гейгеровский счетчик в том же полете не обнаружил ни возрастания интенсивности, ни колебаний потока заряженных частиц. Сопоставление с гелиофизическими явлениями показало, что возрастание потока нейтронов было связано, по-видимому, с усилением излучения Солнца в красной водородной линии H_α (см. стр. 28).

Из этих данных, а также из результатов других экспериментов видно, что по существу ни одна из предпринимавшихся попыток не дала убедительных доказательств рождения нейтронов в солнечных вспышках.

Дело в том, что регистрация нейтронов затруднена рядом обстоятельств. Прежде всего отметим, что нейтрон — нестабильная частица с периодом полураспада около 1000 сек. В результате до орбиты Земли могут дойти только быстрые нейтроны с энергией выше 1 Мэв. Из-за сильного поглощения в атмосфере непосредственная регистрация нейтронов возможна только с помощью приборов, установленных на воздушных шарах и спутниках.

Для обнаружения нейтронов от вспышек предпочтительны непрерывные измерения на долгоживущих спутниках, так как появление вспышек нельзя точно предсказать. Детекторы должны быть нечувствительны к заряженным частицам и γ -квантам и должны размещаться на достаточном удалении от больших масс вещества (в том числе вдали от Луны и планет), в которых под действием заряженных частиц рождаются вторичные нейтроны. При исследовании солнечных нейтронов вблизи Земли важно учитывать фон атмосферных нейтронов.

Интересно, что поток солнечных нейтронов слабо зависит от широты и почти не меняется с высотой за пределами атмосферы. В то же время поток атмосферных нейтронов уменьшается на порядок при переходе от северных широт к геомагнитному экватору, а также уменьшается с увеличением расстояния от центра Земли как $r^{-3.2}$. Таким образом, измерения потока солнечных нейтронов следует проводить преимущественно в экваториальных широтах и на больших высотах. При этом необходимо учитывать различие спектров жесткостей солнечных и атмосферных нейтронов.

Важным «сопутствующим» обстоятельством при изучении солнечных нейтронов является их распад (см. рис. 35), в результате которого в межпланетном пространстве появляется некоторое количество протонов. Эти протоны могут быть зарегистрированы на спутнике за пределами магнитосферы Земли.

Расчеты показывают, что столь большому потоку нейтронов (около $1000 \text{ м}^{-2} \text{ сек}^{-1}$), зарегистрированному 15 апреля 1966 г., должно сопутствовать значительное увеличение интенсивности протонов соответствующей энергии, если и нейтроны, и протоны были генерированы одной и той же вспышкой. При этом около 10% протонов должно иметь «распадное» происхождение. Между тем счетчики протонов на спутниках не обнаружили в указанное время заметного увеличения потока протонов.

Таким образом, несмотря на многочисленные попытки, уверенно обнаружить нейтроны от солнечных вспышек пока не удалось.

10. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВСПЫШЕК

Прогнозирование радиационной обстановки в межпланетном пространстве основано на исследовании особенностей активных областей, где происходят вспышки с испусканием солнечных космических лучей.

Активные области можно охарактеризовать прежде всего конфигурацией магнитных полей солнечных пятен, площадью пятен, измеряемой в миллионных долях от площади видимого солнечного диска, а также количеством вспышек в данной активной области. Кроме того, сами вспышки могут различаться между собой в зависимости от того, испускаются при этом космические лучи или нет. Поэтому изучение солнечных частиц в сравнении с особенностями активных областей и солнечных вспышек дает ценную информацию для предсказания внезапных возрастаний уровня радиации в межпланетном пространстве.

Особый интерес представляет солнечное радиоизлучение вспышек, его интенсивность и длительность. Например, можно считать установленным, что солнечные радиовсплески IV типа являются не только индикатором процесса ускорения космических лучей на Солнце, но и в значительной степени количественно определяют поток ускоренных частиц.

Следует различать несколько моментов в вопросе о прогнозировании радиационной обстановки в межпланетном пространстве, особенно если речь идет об орбитальных полетах космонавтов вблизи Земли или Луны. Во-первых, необходимо научиться надежно предсказывать зарождение на Солнце самих вспышек — этих предвестников появления солнечных кос-

мических лучей в межпланетном пространстве. Во-вторых, нужно быть уверенным в том, что наблюдаемая вспышка действительно испускает солнечные космические лучи. И, наконец, важно оценить вероятность того, что достаточно мощный поток ускоренных солнечных частиц достигнет окрестностей Земли.

Если два последних условия выполнены, то солнечную вспышку иногда называют «протонной» в отличие от других вспышек, не сопровождавшихся появлением у Земли быстрых солнечных протонов. Однако многочисленные исследования показывают, что разница между «протонной» и «непротонной» вспышками скорее количественная, чем качественная. Кроме того, быстрый прогресс в методах измерений (в частности, риометрические наблюдения) и более детальный анализ прежних данных приводят к явно выраженной тенденции расширить класс «протонных» вспышек за счет все более слабых эффектов.

Некоторые исследователи сводят предсказание вспышек солнечных космических лучей к предсказанию появления мощных солнечных вспышек. Для этой цели можно применять два различных метода. Первый метод — статистический — заключается в том, чтобы на основании известных особенностей данной активной области предсказать лишь вероятность появления в этой области мощной солнечной вспышки.

В период высокой солнечной активности наблюдается большое количество довольно мощных солнечных вспышек за сравнительно короткие промежутки времени. Поэтому не всегда удается однозначно связать возрастание интенсивности космических лучей на орбите Земли с определенной вспышкой на Солнце. Зная из наблюдений общее число больших солнечных вспышек и число вспышек, сопровождавшихся возрастаниями интенсивности космических лучей, можно оценить вероятность частиц из данной активной области.

Другой метод — «метод полутени» — полностью основан на учете особенностей изучаемой активной области: если площадь так называемой «полутени» солнечного пятна равна или превышает 1000 миллионных долей солнечного диска, то активная область считается «опасной», т. е. в этой области может произойти большая солнечная вспышка с испусканием космических лучей.

Однако не во всех случаях вспышек удавалось зарегистрировать солнечные частицы высокой энергии вблизи Земли. Для решения вопроса о том, во всех ли случаях генерируются быстрые частицы, важно исследовать особенности самих вспышек, сопровождавшихся большими возрастаниями потока космических лучей на Земле.

Одной из особенностей вспышек, ответственных за генера-

цию солнечных космических лучей, можно читать появление двух ярких волокон на фоне вспышки с очень своеобразной конфигурацией (рис. 36). В начале вспышки наблюдается одно яркое волокно (1), которое затем расщепляется на два (2), принимая форму буквы V или даже скорее Y и сохраняя ее в течение нескольких минут (3). По-видимому, «рождение» быстрых частиц происходит в момент, когда два волокна вспышки расположены Y-образно. Эту стадию можно рассматривать как возникновение в магнитном поле открытого «канала», по-которому ускоренные частицы уходят с Солнца. Y-фаза была обнаружена для вспышек 19 ноября 1949 г., 23 февраля 1956 г., 31 августа 1956 г., 18 июля 1961 г., 28 сентября 1961 г. и некоторых других.

Детальный анализ оптических характеристик вспышек, испускающих космические лучи (за период 1959—1963 гг.), показал, что из 22 случаев в 19 наблюдались петлеобразные протуберанцы. Этот факт служит не только хорошим признаком рождения высокоэнергичных протонов, но важен также для понимания механизма самих вспышек. Некоторые исследователи считают, что протонные вспышки должны всегда сопровождаться петлеобразными протуберанцами. Имеются также сведения о том, что области протонных вспышек соответствуют местам наибольших токов, рассчитанных по данным наблюдений магнитного поля активных областей Солнца.

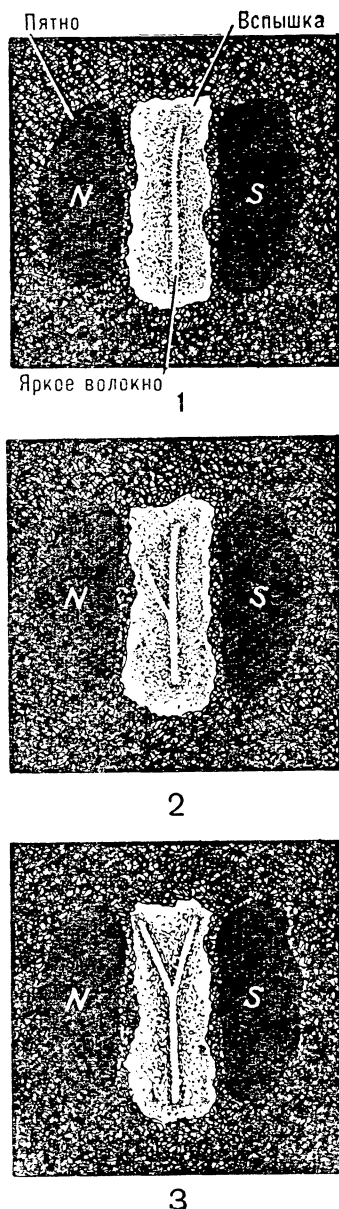


Рис. 36. Последовательные стадии развития Y-фазы солнечной вспышки:

1 — начало вспышки с одним ярким волокном; 2 — появление второго яркого волокна; 3 — Y-фаза вспышки. В последней, третьей стадии происходит испускание солнечных космических лучей.

К сожалению, в настоящее время пока не найден определенный критерий ни в оптическом, ни в радиодиапазоне излучения Солнца, который бы однозначно характеризовал «протонную» вспышку.

Особенно поразительным и загадочным остается тот факт, что большие возрастания интенсивности солнечных космических лучей имеют тенденцию появляться в годы спада или подъема солнечной активности, но не в момент максимума цикла (рис. 37). Этот факт можно объяснить тем, что в периоды спада или подъема солнечной активности в межпланетном пространстве существуют наиболее благоприятные условия для распространения солнечных частиц.

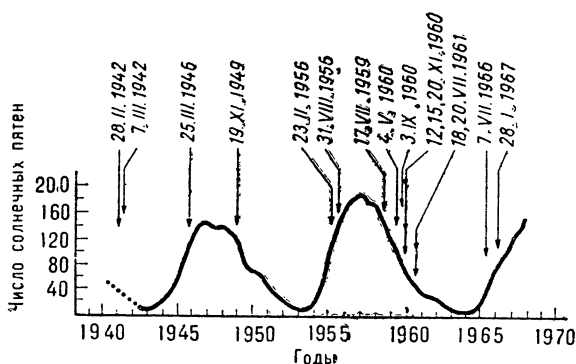


Рис. 37. Частота появления у Земли потоков солнечных частиц высокой энергии в зависимости от уровня солнечной активности. Стрелками показаны все наиболее мощные вспышки солнечных космических лучей, зарегистрированные на поверхности Земли, в стратосфере и межпланетном пространстве.

Имеется и другая возможность для объяснения этой тенденции. Дело в том, что частота появления вспышек балла 3+ постоянна примерно в течение трех лет после максимума солнечной активности, в то время как частота других вспышек¹ довольно резко падает. Кроме того, наиболее интенсивные радиовсплески IV типа, сопровождающие «рождение» быстрых частиц, имеют тенденцию появляться в фазах подъема и спада солнечной активности. Если считать, что для испускания солнечных космических лучей более эффективны вспышки балла 3+, сопровождаемые интенсивным радиоизлучением IV типа (по сравнению со вспышками балла 3+, не сопровождаемыми таким радиоизлучением), то можно построить следующую модель.

¹ Для оценки мощности солнечных вспышек астрономы пользуются 3-балльной шкалой — от 1 до 3. Вспышки максимальной мощности имеют балл 3+.

Чтобы мог произойти выброс космических лучей, необходимо, во-первых, постепенное увеличение магнитного давления в области ускорения частиц за счет постепенного «искривления» магнитного поля и, во-вторых, должен существовать спусковой механизм, освобождающий накопленную магнитную энергию. Тогда в момент максимальной активности в атмосфере Солнца должно наблюдаться большое количество возмущений за счет этого спускового механизма, так что интервал времени между возмущениями будет слишком мал, чтобы запасти большую энергию, необходимую для ускорения частиц. В то же время для восходящей и нисходящей фаз солнечного цикла число возмущений, которые сопровождаются выбросом частиц, должно быть значительно меньше.

11. СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ — ГЛАВНЫЙ ИСТОЧНИК РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ КОСМОНАВТОВ

При полетах космонавтов в межпланетном пространстве наибольшую радиационную опасность представляют протоны от солнечных вспышек. Исследователями предпринимались попытки оценить величину дозы облучения от некоторых вспышек. На основе таких оценок уже при нынешнем уровне знаний о солнечных космических лучах можно дать определенные рекомендации об оптимальных характеристиках экрана, необходимого для защиты космонавта.

Характер и глубина облучения какого-либо материала существенно зависят от энергетического спектра частиц. Поскольку в спектре солнечных космических лучей в большинстве случаев преобладают частицы сравнительно малых энергий, то облучению в открытом пространстве будут подвергаться преимущественно слабо защищенные участки поверхности тела космонавта (кожа, хрусталик глаза и т. д.).

Исходя из этого можно разделить вспышки солнечных протонов на два типа — *А* и *Б* в зависимости от вида спектра. Вспышки типа *А* характеризуются интегральным спектром вида ϵ_k^{-4} в интервале энергий $\epsilon_k = 30—400$ Мэв. Частицы таких энергий нельзя обнаружить при измерениях на поверхности Земли. Обычно они регистрируются на воздушных шарах, ракетах и спутниках. Частота вспышек типа *А* достаточно высока: например, за период июль 1957 — ноябрь 1960 гг. наблюдалось около 40 случаев. К вспышкам этого типа могут быть отнесены вспышки 10 мая 1959 г., 12 ноября 1960 г. и др.

Вспышки типа *Б* характеризуются интегральным спектром вида ϵ_k^{-6} . Вспышки такого типа в общем происходят достаточно редко. Их можно регистрировать на поверхности Земли. Типичная вспышка типа *Б* произошла 23 февраля 1956 г.

Представление о дозах радиации на границе атмосферы и в межпланетном пространстве в спокойные дни и в периоды некоторых вспышек дает табл. 3. Следует отметить, что при-

Таблица 3

Поток галактических и солнечных космических лучей по измерениям на воздушных шарах и в межпланетном пространстве

Вид измерений	Период измерений	Поток частиц, $см^{-2} сек^{-1}$	Доза, $рентген/ч$	Космические лучи
Межпланетное пространство (ракета «Пионер-5»)	11—23.III.1960	4,6	0,0006	Галактические ($10^8—10^{17}$ эв)
То же	1.IV.1960	33	0,026	Солнечные (40—500 Мэв)
Воздушные шары	1.IV.1960	0,4	0,0004	Солнечные (90—500 Мэв)
Экстраполировано к межпланетному пространству по данным измерений на воздушных шарах	14.VII.1959	$1,5 \cdot 10^7$	$7,6 \cdot 10^3$	Солнечные (40—500 Мэв)
	15.VII.1959	$1,76 \cdot 10^4$	9,1	Солнечные (40—500 Мэв)

веденные в этой таблице дозы радиации могут быть завышены. Дело в том, что при расчете доз, приведенных в таблице, учитывался вклад всех солнечных частиц, вплоть до самых малых энергий. Для этой цели спектр солнечных протонов, измеренный с помощью воздушных шаров в интервале энергий 100—500 Мэв, экстраполировался в область малых энергий (меньше 100 Мэв), причем предполагалось, что наклон спектра при переходе в эту область не меняется. В действительности же в области малых энергий происходит существенное уменьшение показателя спектра (рис. 38), так что фактически частицы с энергией меньше 100 Мэв дают меньший вклад в дозу радиации, чем получено при экстраполяции.

Наибольший интерес представляет интегральная интенсивность частиц с энергиями больше 100 Мэв, так как частицы меньших энергий будут эффективно поглощаться экраном космического корабля. Оказывается, что поток излучения достигает максимальной величины через 8—16 ч после начала вспышки и заметно уменьшается через 32 ч (см. рис. 38).

Вероятно, от сравнительно небольших вспышек максимальный поток протонов с энергией больше 100 Мэв не превышает $2 \cdot 10^3—5 \cdot 10^2$ $см^{-2} сек^{-1}$, что сравнимо по величине с потоком излучения во внутреннем поясе радиации Земли. Максимальный поток протонов с энергией выше 500 Мэв от

наиболее мощных вспышек, вызывающих большие возрастания на поверхности Земли, составляет около $10^8 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ и в течение всей вспышки достигает $3,6 \cdot 10^{11} \text{ протон/см}^2$.

Для обеспечения безопасности полета во время такой вспышки необходима толщина экрана около 400 г/см^2 углерода (при длительных полетах в межпланетном пространстве в качестве экрана можно использовать запас горячего). Частота появления таких вспышек настолько мала (1 вспышка за несколько лет), что полеты малой длительности (например, на Луну и обратно) практически безопасны при толщине экрана всего $5\text{--}10 \text{ г/см}^2$. Однако уже при полетах к Марсу или Венере опасность от наиболее мощных вспышек значительно возрастает.

Наиболее опасным для космонавта является воздействие солнечных космических лучей от самых мощных хромосферных вспышек баллов 3 и 3+. Используя данные об энергетическом спектре, интенсивности и временных изменениях больших вспышек солнечных космических лучей, можно рассчи-

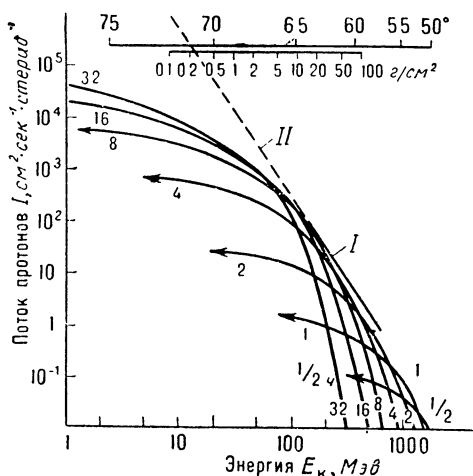


Рис. 38. Ожидаемое изменение интегрального энергетического спектра солнечных протонов со временем. Цифрами у кривых показано время в часах после солнечной вспышки. Вверху приведены геомагнитная широта, на которую могут приходиться частицы соответствующей энергии, и их пробег до поглощения в атмосфере (в г/см^2). Прямой линией показан спектр солнечных протонов, измеренный в интервале энергий $100\text{--}500 \text{ Мэв}$ и экстраполированный с тем же наклоном в область малых энергий. I—измеренный спектр, II—экстраполированный спектр.

тивать наиболее оптимальные размеры экрана, необходимого для защиты космонавтов от опасной дозы облучения.

В качестве защитного экрана наиболее целесообразно применять углерод, а для защиты от рентгеновских лучей, возникающих за счет торможения электронов, можно использовать дополнительный слой свинца или железа. Снаружи межпланетный корабль может быть покрыт тонким слоем синтетического вещества (полиэтилен), что приведет к резкому понижению интенсивности тормозного излучения.

На примере вспышки космических лучей 10 мая 1959 г. можно рассчитать толщину углеродного экрана, понижающего дозу облучения до безопасного уровня. При степенном спектре частиц с показателем $\gamma=6,8$ толщина экрана составляет 22 см (50 г/см^2). Однако во время вспышки космических лучей типа 23 февраля 1956 г. безопасная доза облучения будет достигнута только при толщине углеродного экрана около 260 см. В этом случае сферический экран с внутренним радиусом в 90 см будет весить около 379 т!

Таким образом, расчеты доз облучения от солнечных протонов показывают, что солнечные вспышки создают серьезную радиационную опасность при космических полетах, в связи с чем на космических кораблях необходимо предусматривать специальную защиту. Вместе с тем следует отметить, что самые первые оценки радиационной опасности, связанной с солнечными вспышками, оказались существенно завышенными. Кроме того, в ранних расчетах, проведенных еще до начала полетов человека в космос, не учитывалась конечная вероятность облучения космонавта протонами от нескольких солнечных вспышек.

Для сравнительно небольших промежутков времени возникновение солнечных вспышек можно считать событиями статистически независимыми. Возникновение вспышки определенного типа во время полета космического корабля — событие случайное, вероятность которого зависит как от частоты вспышек этого типа, так и от продолжительности полета.

Вероятность того, что за время полета произойдет заданное число солнечных вспышек, может быть рассчитана. Если принять, что в среднем за сутки происходят 0,03 вспышки типа *A* и 0,0011 вспышки типа *B*, то получим, что при космических полетах продолжительностью более 10 суток следует считаться с опасностью воздействия на космонавта потоков протонов от нескольких солнечных вспышек типа *A*. Так, при продолжительности полета около 20 суток вероятность того, что такая вспышка не произойдет, составляет всего лишь около 55%; в то же время вероятность только одной вспышки — 33%, двух — 10, трех — 2%. Очевидно, что при проектировании защиты от протонов для полетов такой продолжительности необходимо в расчетах защиты учитывать по крайней

мере две солнечные вспышки типа А. При этом допустимая доза облучения за время полета будет достигнута при толщине защиты из алюминия около 10 г/см^2 вместо 4 г/см^2 , необходимых для защиты от протонов одной вспышки.

Для космических полетов продолжительностью в несколько месяцев увеличивается вероятность облучения космонавта протонами не только двух вспышек, но и трех, четырех и т. д. Вместе с тем возрастает вероятность солнечных вспышек типа Б. Однако можно отметить, что если в расчетах защиты учитывается вероятность нескольких вспышек типа А, т. е. толщина выбрана более $10\text{—}15 \text{ г/см}^2$, то при этом в значительной степени снижается доза облучения протонами от вспышки типа Б.

Другим важным способом оценки радиационной опасности от протонов нескольких солнечных вспышек может быть использование некоторого «критерия риска». В качестве такого критерия можно принять 5%-ную вероятность облучения космонавта дозой, несколько превышающей допустимую, а вероятность облучения смертельной дозой следует ограничить величиной 0,5%. При этом для обеспечения продолжительности полета, например до 20 суток, требуется толщина защиты около 10 г/см^2 . Для обеспечения безопасности полета продолжительностью 100 суток требуется экран толщиной около 20 г/см^2 .

Приведенные данные относятся к периоду максимальной солнечной активности. Для минимума солнечной активности эти данные следует рассматривать как верхние оценки.

В полетах по околоземным орбитам (исключая полярные) космонавты защищены от протонов солнечных вспышек магнитным полем Земли. При более глубоком проникновении в космическое пространство необходима специальная защита. Выше шла речь о защите, состоящей из слоев различных материалов (материальная защита). В качестве защиты могут быть в принципе использованы также магнитное, электростатическое поле вокруг корабля или плазма.

Каковы перспективы применения того или иного типа защиты в космических полетах недалекого будущего?

Расчеты показывают, что толщина материальной защиты от протонов с $\epsilon_k = 30, 100$ и 200 Мэв соответствует 1, 10 и 30 г/см^2 . Если сравнить вес конструкции защиты магнитным полем, генерируемым электромагнитом из сверхпроводящего материала, то увидим, что он не меньше веса материальной защиты.

Защита от протонов электростатическим полем практически не осуществима в связи с большим расходом энергии на отклонение электронов, ускоренных этим полем, от корабля.

В плазменной радиационной защите комбинируются принципы электростатической защиты от протонов с созданием

вокруг корабля магнитного поля в виде экрана для электронов. Требуемая при этом напряженность магнитного поля и соответствующий вес магнитной системы оказываются гораздо меньше, чем в случае использования только магнитной защиты от протонов солнечных вспышек. Для корабля тороидальной формы можно полностью исключить проникновение электронов через «дырки» в магнитном поле, подобные полюсам на Земле. Вокруг корабля образуются скрещенные магнитное и электрическое поля. Траектории электронов, захваченных в них, имеют вид спирали вокруг магнитных силовых линий. Корабль, имеющий в этом случае положительный заряд, будет окружен облаком электронов равного заряда.

Приведем основные параметры плазменной защиты в предположении, что на корабле максимальным диаметром 10 м электрический потенциал составляет 200 тыс. кв. Из условия стабильности магнитного поля минимальная величина магнитной индукции должна составлять 2660 гс. При плотности тока в электромагните из сверхпроводящего материала $100\,000\text{ а/см}^2$ его вес составляет 550 кг, ток равен $2 \cdot 10^6\text{ а}$. С учетом веса системы для охлаждения электромагнита (180 кг) общий вес электромагнитной установки равен 730 кг, а ее мощность — 36 квт. Очевидно, что создание плазменной защиты для космического корабля представляет нелегкую задачу.

Проблема прогноза солнечных вспышек вообще и особенно вспышек, сопровождающихся мощным потоком быстрых частиц, видимо, далека от своего разрешения. Отсюда следует, что для обеспечения радиационной безопасности космонавтов при длительных полетах к другим планетам Солнечной системы наряду с разработкой методов магнитной и плазменной защиты необходимы надежные оценки толщины материальных защитных экранов. Грубые расчеты, проведенные до сих пор на основе имеющихся данных, дают слишком большие толщины, что приводит к чрезмерному утяжелению космических кораблей. В связи с этим возникает задача разработать методы защиты, которые позволяли бы в качестве экрана использовать конструктивные детали корабля (подвижные экраны, специальные радиационные убежища, топливные баки) или изменение его ориентации.

Очевидно, для этого необходимы новые расчеты опасных доз и толщины экранов, основанные на учете особенностей распространения солнечных космических лучей и изменчивости их энергетического спектра во времени и пространстве. При наличии таких данных специальная дозиметрическая аппаратура, реагирующая на скорость изменения интенсивности излучения, вместе с программным устройством, содержащим необходимую информацию о допустимых дозах, позволили бы экипажу космического корабля в каждом конкретном случае выбирать оптимальный вариант защиты.

12. «ЧЕЛОВЕЧЕСТВО ЗАВОЮЕТ ВСЕ ОКОЛОСОЛНЕЧНОЕ ПРОСТРАНСТВО»

Итак, уважаемый читатель, Вы познакомились с солнечными вспышками и солнечными космическими лучами — с историей и методами их исследования, с достижениями и проблемами на пути познания тайн нашего Солнца. Их разгадка, как и любое другое достижение науки, в конечном счете послужит прогрессу человечества.

Исследования космического пространства ведутся в настоящее время широким фронтом, и одним из ответственных участков этого фронта является изучение солнечных вспышек и солнечных космических лучей. Ученые многих стран и среди них большая армия советских астрофизиков напряженно и увлеченно трудятся над выполнением одной из прекраснейших задач человечества — познанием и освоением космического пространства.

Блестящие успехи, достигнутые нашей страной в изучении окрестностей Земли, в изучении Луны, Венеры и Солнца, полеты наших и американских космонавтов, посадка и выход на поверхность Луны первых землян и другие достижения в исследовании космоса являются лишь первыми практическими шагами в решении этой задачи.

Это интересная, но нелегкая задача. Как не раз бывало в прошлом, на пути к цели возможны трудности и неудачи, но разум и воля Человека, несомненно, преодолеют все препятствия. Но даже не заглядывая в отдаленное будущее, можно уверенно сказать, что уже сейчас начинают сбываться пророческие слова нашего великого соотечественника К. Э. Циолковского: «Человечество не останется вечно на Земле, но, в погоне за светом и пространством, сначала робко проникнет за пределы атмосферы, а затем завоюет себе все околосолнечное пространство».

С О В Е Т У Е М П Р О Ч И Т А Т Ь

Тем, кто, прочитав эту брошюру, захочет узнать больше о солнечных космических лучах, о межпланетном пространстве, о влиянии Солнца на Землю и о многих других вопросах физики солнечно-земных связей, советуем прочитать еще несколько книг:

1. М. А. Эллисон. СОЛНЦЕ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЗЕМЛЮ. М., ФИЗМАТГИЗ, 1959.
2. Д. Г. Мензел. НАШЕ СОЛНЦЕ. М., ФИЗМАТГИЗ, 1963.
3. С. К. Всехсвятский. СОЛНЦЕ И МЕЖПЛАНЕТНОЕ ПРОСТРАНСТВО. Киев, Изд-во АН УССР, 1963.
4. Н. В. Пушков, Б. И. Силкин. ВНИМАНИЕ! СОЛНЦЕ СПОКОЙНО. М., Гидрометеиздат, 1966.
5. Л. И. Дорман, Л. И. Мирошниченко. СОЛНЕЧНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ. М., «Наука», 1968.

О ЧЕМ РАССКАЗЫВАЕТСЯ В ЭТОЙ КНИГЕ

1. Рука астронома — на «пульсе» Солнца	3
2. Событие, которого не ждали	5
3. Космос полон излучений	7
4. Методы наблюдений	13
5. Условия выхода ускоренных частиц из солнечной атмосферы	26
6. Магнитные ловушки в космосе	30
7. Диффузия солнечных космических лучей в межпланетном пространстве	34
8. Энергетический спектр частиц у Земли и в атмосфере Солнца	43
9. Состав солнечных космических лучей	60
10. Прогнозирование вспышек	69
11. Солнечные вспышки — главный источник радиационной опасности для космонавтов	73
12. «Человечество завоеует все околосолнечное пространство»	79
Советуем прочитать	79

Леонтий Иванович Ми ро ш н и ч е н к о

СОЛНЦЕ И КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Редактор В. С. За х а р о в

Обложка Г. И. Петушковой

Художественный редактор Т. И. Добровольнова

Технический редактор Л. А. Муравьева

Корректор И. И. Поршнева

А04614 Сдано в набор 10/XI-1969 г. Подписано к печати 21/IV-1970 г.

Формат бумаги 60×90¹/₁₆ Бумага типографская № 2 Бум. л. 25

Печ. л. 5,0 Уч.-изд. л. 4,85 Тираж 35 500 экз. Издательство «Знание». Москва,
Центр, Новая пл., д. 3/4. Заказ 2678. Цена 15 коп.

Саратов. Типография издательства «Коммунист», пр. Ленина, 94.

15 коп



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»