

Активная солнечная корона

Окружающее солнечный диск серебристо-белое сияние, которое раньше можно было наблюдать только при полных затмениях Солнца, сейчас является объектом постоянного исследования.

Динамическая активность короны отражает сложные процессы взаимодействия вещества с магнитными полями

РИЧАРД ВОЛЬФСОН

СОЛНЕЧНАЯ корона — внешняя разреженная оболочка Солнца, видимая лишь в моменты его полных затмений, представляет собой редкое и необычное зрелище. Почти каждый год в каком-нибудь из районов Земли можно наблюдать солнечное затмение, однако немногим удается за всю жизнь увидеть его более одного или двух раз. Из-за высокой яркости внешнего слоя Солнца, называемого фотосферой, корона обычно не заметна, и только благодаря тому, что видимые размеры Луны и Солнца почти одинаковы, ее удается иногда наблюдать. Будь Луна чуть меньше, полных солнечных затмений не было бы вообще, а оказалась она чуть больше, внутренняя область солнечной короны была бы скрыта от наших глаз.

За прошедшее десятилетие наши знания о короне, как и о самом Солнце, значительно пополнились. Это стало возможным благодаря новым приборам, установленным не только на Земле, но и на ракетах, спутниках и космических кораблях. Как показывают наблюдения, корона постоянно находится в состоянии истечения, время от времени прерываемого бурными всплесками. «Ветер» из частиц, выбрасываемых короной, пронизывает всю Солнечную систему; изменения скорости и интенсивности этого ветра свидетельствуют об активности короны. Такое представление о короне и ее проявлениях позволяет рассматривать Солнце уже не как компактный объект в центре Солнечной системы, а как целостное образование гигантских размеров, простирающееся за пределы орбит наиболее удаленных планет. Корона — это расположенная недалеко от нас огромная лаборатория для исследования астрофизических процессов. Ее изучение будет способствовать расширению наших представлений о различных явлениях, например о процессах, протекающих в термоядерных реакторах. Вполне возможно, что мы узнаем много нового и о взрывах сверхновых звезд в глубинах Вселенной.

На обычных фотографиях корона выглядит как серебристо-белое гало вокруг заслоненной Луной солнечного диска. Светимость гало обусловлена в основном рассеянием солнечного света корональными электронами. Из каждого миллиона фотонов, покидающих солнечную фотосферу, только один рассеивается в короне. Поэтому яркость фотосферы в миллион раз превышает яркость короны. Прозрачность короны указывает на то, что составляющий ее газ чрезвычайно разрежен. По земным стандартам корона — это отличный вакуум: максимальная концентрация ее частиц находится в пределах $10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Спектроскопические исследования короны показывают, что ее состав примерно такой же, как и у Солнца: в основном это водород и гелий со следами более тяжелых элементов. Эти исследования позволяют также судить о температуре короны. Известно, что нагревание газа приводит к ионизации его атомов, т.е. потере ими одного или более электронов. Газ в короне ионизован гораздо сильнее, чем в фотосфере, температура которой близка к 6000 К. Атомы водорода и гелия в короне, по существу, лишены электронов, а атомы более тяжелых элементов теряют большую часть своих электронов. Высокая степень ионизации свидетельствует о том, что корона чрезвычайно горяча. Кроме того, ее спектральные линии уширены, что говорит о хаотичности движения корональных частиц с высокими скоростями. Результаты спектральных наблюдений показывают, что температура короны лежит в пределах 1 — 2 млн. К.

ВЫСОКАЯ температура короны долгое время представляла серьезную теоретическую проблему. Согласно второму началу термодинамики, более холодное тело не может самопроизвольно отдавать тепло более горячему. Поэтому поток тепла от Солнца, как бы он ни был велик, не может нагреть корону до температуры выше 6000 К.

Это положение носит столь фундаментальный характер, что десятки лет астрономы, изучающие Солнце, с недоверием относились к полученным спектроскопическим данным. Выдвигались различные хитроумные гипотезы, например, что корональные ионы возникают в недрах Солнца, где температура достаточно высока, или рождаются непосредственно в короне в результате ядерных реакций. В 40-х годах концепция горячей короны стала общепринятой. Она позволила теоретикам быстро продвинуться вперед в описании общей физической природы короны.

Если второе начало термодинамики исключает возможность переноса тепловой энергии от фотосферы к короне, то как происходит ее нагрев? Наиболее вероятно, что он обусловлен прямым переносом механической энергии. Согласно современным представлениям, механическая энергия переносится в корону из конвективного слоя Солнца, находящегося под фотосферой, в форме мощных акустических или магнито-гидродинамических волн.

Акустические волны — это механические возмущения газа, которые проявляются в виде изменений давления. Магнито-гидродинамические волны, которые появляются в ионизованном газе, — это возмущения при взаимодействии ионизованного вещества и магнитных полей. Хотя общая концепция механического нагрева короны волновыми процессами утвердилась достаточно прочно, для построения детальных моделей, согласующихся с наблюдениями, потребуются усилия многих исследователей. В результате, по-видимому, удастся связать физические свойства короны и нижележащих слоев, что позволит ближе подойти к пониманию физической природы Солнца в целом.

Итак, корона — это область с высокой температурой и низкой плотностью, окружающая менее нагретую, более плотную и в большей степени изученную фотосферу. (Фотосферу отде-

ляет от короны тонкий промежуточный слой, называемый хромосферой.) Большинство обычных фотографий показывают, что корона далеко не симметрична, вблизи полюсов Солнца она менее яркая и менее протяженная. За-

метные выпуклости вдали от полюсов говорят о сложности ее структуры. Эти отклонения от симметрии меняются от затмения к затмению. Наиболее симметричные короны наблюдаются в периоды максимумов солнеч-

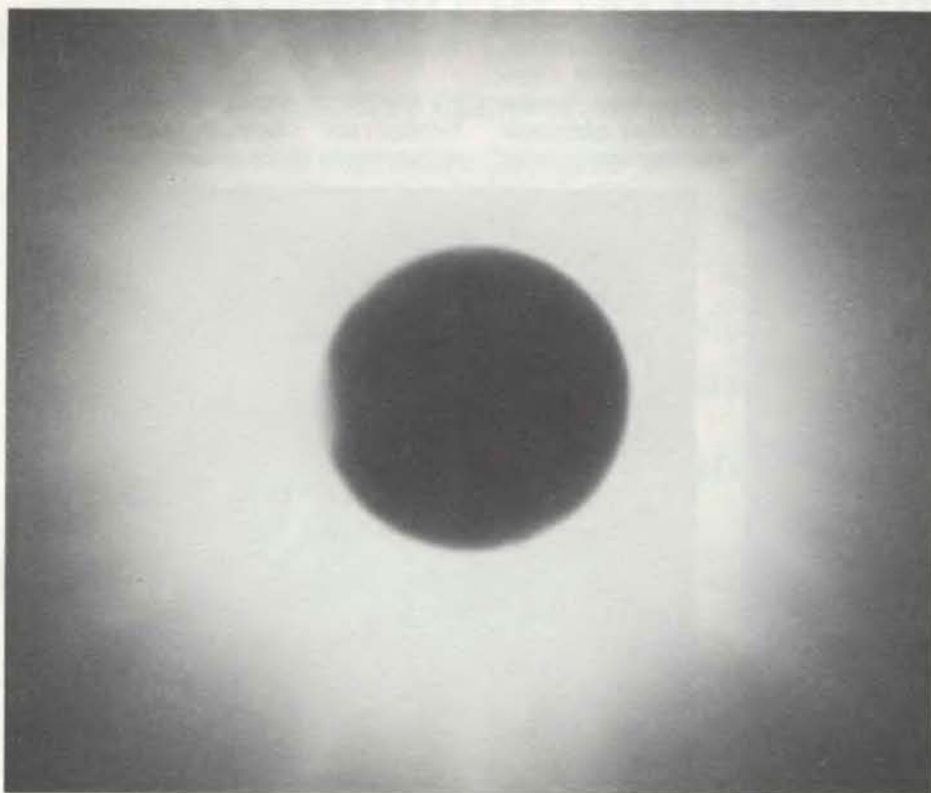
ных пятен в ходе 11-летнего цикла активности Солнца.

СУДИТЬ о структуре короны по обычным фотографиям весьма трудно из-за ее яркой внутренней обла-

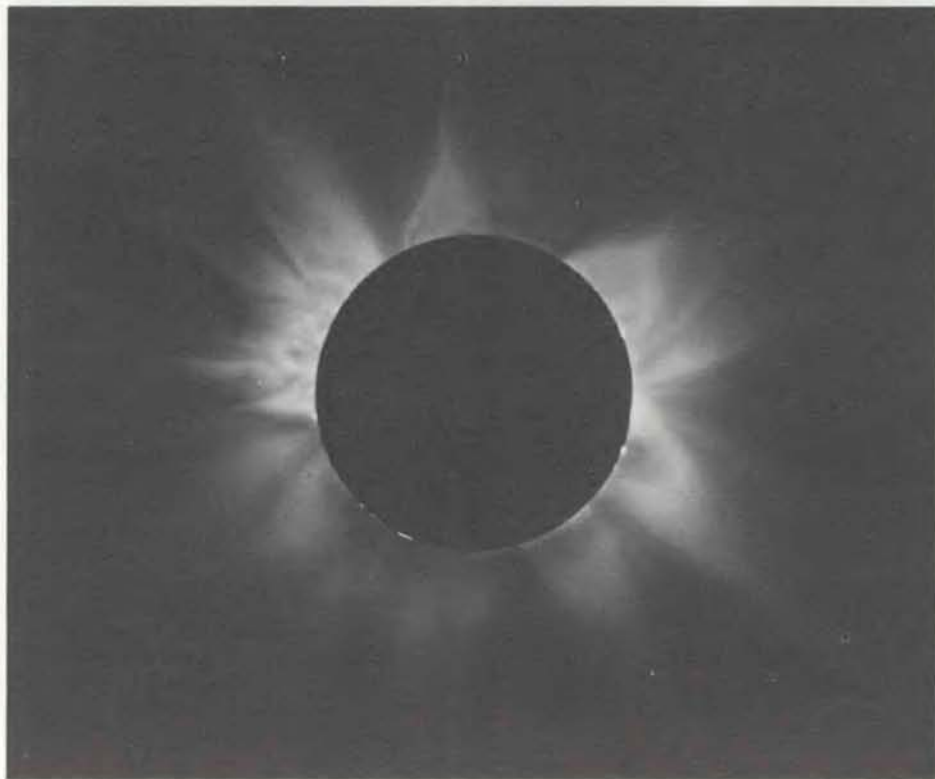


БЫСТРО ИЗМЕНЯЮЩАЯСЯ ПЕТЛЯ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ, обнаружена в апреле 1980 г. при наблюдении с помощью коронографа, установленного на спутнике SMM. Коронограф — это телескоп, в котором специальный круглый экран заслоняет яркий свет солнечной фотосферы (видимой поверхности Солнца), позволяя наблюдать в миллион раз менее яркую корону. Коронограф для спутника SMM разработан на Высокогорной обсерватории Национального центра исследований атмосферы (Боулдер, шт. Колорадо). Свет от короны фокусируется на фотокатоде телевизионной камеры, полученное изображение передается на Землю в цифровой форме. Корона до начала быстропотекающего процесса изображена на первом из четырех последователь-

ных снимков (цвета произвольные). Три других снимка получены методом цифрового вычитания: яркость в каждой точке соответствует изменению интенсивности света относительно уровня, зарегистрированного для первого изображения. *Вверху справа*: корональная петля имеет размер, примерно равный диаметру Солнца. *Внизу слева*: спустя 25 мин петля, расширяясь со скоростью примерно 300 км/с, достигает края изображения; вслед за ней начинает подниматься вверх протуберанец. *Внизу справа*: спустя 20 мин видно только одно основание петли. Неизвестно, связаны между собой корональная петля и протуберанец или оба явления вызваны неустойчивостью магнитного поля Солнца.



ОБЫЧНАЯ ФОТОГРАФИЯ ЗАТМЕНИЯ СОЛНЦА, сделанная в Индии 16 февраля 1980 г. группой специалистов во главе с Дж. Пасаховом (Вильямсовский колледж). Неразличимые здесь детали показаны на нижнем снимке. Тем не менее даже на этой фотографии видно, что корона симметрична — особенность, связанная с 11-летним циклом солнечных пятен.



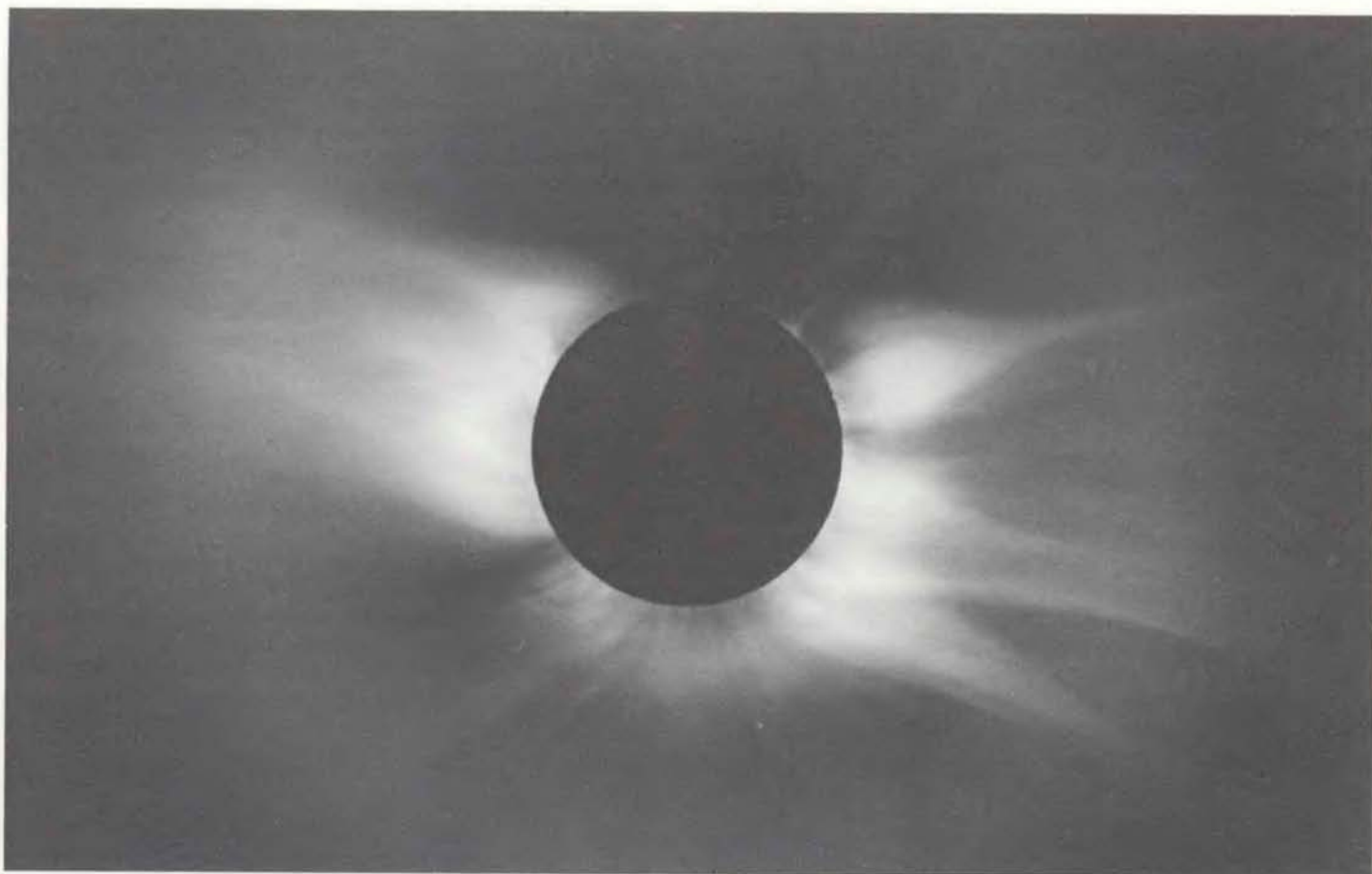
ТОНКИЕ ДЕТАЛИ СТРУКТУРЫ КОРОНЫ во время затмения 16 февраля 1980 г. удалось сфотографировать с помощью фильтра с оптической плотностью, меняющейся вдоль радиуса. Такой фильтр позволяет выявить детали корональной структуры от уровня фотосферы до расстояния в несколько солнечных радиусов. Яркие пятна выше диска Луны — протуберанцы. Хорошо видны корональные лучи (стримеры). Снимок сделан в Индии группой исследователей из Высокогорной обсерватории.

сти, приводящей к передержке при фотографировании. Самым успешным способом решения этой проблемы является фотографирование короны через специальный фильтр, плотность которого меняется вдоль радиуса таким образом, что свет в центре изображения ослабляется в большей степени, чем по краям, и тем самым компенсируется падение яркости короны. С помощью таких фильтров удается проследить корональную структуру на расстоянии многих солнечных радиусов от фотосферы.

На фотографии, полученной с использованием такого фильтра, солнечная корона предстает во всем своем причудливом великолепии. Длинные тонкие лучи (стримеры) вытягиваются на несколько миллионов километров. Ближе к солнечному диску видны яркие петли и арки из коронального вещества. На некоторых photographиях заметны также прямые узкие корональные лучи. В периоды максимумов солнечной активности эти детали структуры короны окружают весь солнечный диск, в периоды же минимумов активности они наблюдаются в пределах более низких солнечных широт. В последнем случае в короне видны большие «дыры» на обоих полюсах Солнца, где она гораздо слабее, чем у экватора. В полярных «дырах» часто заметны слабые полярные «щеточки». От каждого полюса расходится своеобразный пучок этих щеточек, ослабевая и становясь невидимым на расстоянии примерно одного солнечного радиуса. Основные детали структуры — лучи, петли и дыры — настолько преобладают, что ряд исследователей полагают, что корона состоит только из них и не имеет подструктуры, которую можно было бы назвать «спокойной короной».

Вид короны существенно меняется от одного затмения к другому. Даже обычные фотографии затмений различаются настолько, что можно без труда определить, в момент какого затмения производилась съемка. Снимки короны через радиальный фильтр сильно отличаются друг от друга. Помимо общих изменений, связанных с циклом солнечной активности, для каждого затмения характерна специфическая конфигурация корональных лучей, петель и других деталей структуры. Серия фотографий, сделанных в различные моменты в течение одного затмения, свидетельствует о динамичности короны, структурные детали которой изменяются за время, гораздо меньшее, чем интервалы между затмениями.

Для изучения динамики короны необходимо вести наблюдения даже в отсутствие затмения, что практически невозможно в оптическом диапазоне, в котором плотная фотосфера оказывается в миллион раз ярче разреженной



СИММЕТРИЧНАЯ КОРОНА. Сфотографирована через радиальный фильтр во время затмения 30 июня 1973 г.; время затмения пришлось почти на минимум 11-летнего цикла солнечных пятен. В такие периоды корональные лучи скон-

центрированы в экваториальной области, а вблизи полюсов Солнца появляются «дыры» — области пониженной активности. Снимок сделан в Кении исследователями из Высокотгорной обсерватории.

короны. Однако корона гораздо горячее фотосферы, поэтому испускаемое ею электромагнитное излучение высокой энергии практически отсутствует в спектре последней. Имея температуру порядка 2 млн. К, газ короны оказывается мощным источником рентгеновского излучения. Если не учитывать рентгеновское излучение, связанное с солнечными вспышками и другими активными областями, то более холодная фотосфера оказывается пренебрежимо слабым источником такого излучения. Поэтому корону можно изучать с помощью рентгеновского телескопа.

Такие наблюдения приходится выполнять в космосе, поскольку земная атмосфера непрозрачна для рентгеновских лучей. Первые рентгеновские телескопы, устанавливавшиеся на космических аппаратах в начале 1970-х годов, позволили получить грубые снимки короны, на которых различимы яркие области с высокой плотностью или температурой. Сопоставление снимков затмений, сделанных с Земли, с рентгеновскими снимками, сделанными в космосе примерно в то же время, позволило установить соответствие между областями, яркими в рентгеновском диапазоне, и оптически наблюдаемы-

ми деталями структуры короны.

Метод получения рентгеновских изображений быстро развивался в последнее десятилетие. В середине 1970-х годов астронавты на борту орбитальной обсерватории «Скайлэб» получили множество рентгеновских снимков короны. Киномонтаж таких снимков наглядно показывает, как изменяются и перемещаются корональные структуры при вращении Солнца. Полученные на «Скайлэбе» рентгеновские снимки позволили установить, что корональные дыры существуют не только на полюсах, но и по всей короне, хотя имеют меньшие размеры. С помощью усовершенствованной аппаратуры недавно были выполнены наблюдения короны в рентгеновском диапазоне с более высоким разрешением.

Дополнительную информацию о короне может дать анализ ультрафиолетового излучения, источником которого являются ее высокоионизованные тяжелые элементы. В этой области спектра излучение фотосферы также пренебрежимо мало. Данные об ультрафиолетовом излучении особенно ценны тем, что определенные спектральные линии соответствуют только узким интервалам температур; это по-

зволяет как бы зондировать различные слои короны, хромосферы и переходной области между ними.

Исследование короны в радиодиапазоне возможно с помощью наземных радиотелескопов, способных регистрировать радиосигналы, связанные с характерными колебаниями ионизованного коронального газа. По частоте таких колебаний удастся судить непосредственно о плотности короны, различные области которой зондируются путем изменения частоты, на которую настроен радиотелескоп. Методом радиоинтерферометрии с помощью нескольких радиотелескопов можно проследить за эволюцией отдельных корональных особенностей. В Калгуре (Австралия) установлен инструмент, принадлежащий Государственной организации по научным и промышленным исследованиям, названный радиогелиографом. Он состоит из 96 связанных между собой радиотелескопов, предназначенных для исследования Солнца.

СОЗДАНИЕ искусственного затмения — наиболее прямой подход к исследованию короны между полными затмениями Солнца. В принципе даже

большой палец на вытянутой руке мог бы заслонить свет солнечной фотосферы. Однако этот простой прием оказывается непригодным из-за того, что рассеиваемый земной атмосферой солнечный свет буквально «забивает» свет короны. Тем не менее за пределами атмосферы и даже на высоких горах оказывается возможным наблюдать солнечную корону, искусственно экранируя свет от фотосферы. Разработанный для этой цели инструмент получил название коронографа. Это небольшой телескоп-рефлектор, снабженный круглым экраном, заслоняющим солнечный диск, подобно Луне, во время затмения. Однако приходится добавлять еще несколько различных экранов и диафрагм для максимального ослабления рассеянного света и дифракционных эффектов, искажающих изображение короны. Выделенный свет короны либо сразу регистрируется, либо про-

ходит через поляризаторы или фильтры для детального анализа.

Коронографы, появившиеся около 50 лет назад, устанавливаются на горных вершинах, на стратостатах и на борту космических аппаратов. Коронограф на «Скайлэбе» позволил открыть быстроменяющиеся структуры в короне, которые, по-видимому, выбрасывают корональное вещество в межпланетную среду. Коронографы имеются на борту нескольких беспилотных космических аппаратов. Основные наземные коронографы размещены на Сакраменто-Пик (Нью-Мексико, США), на Пик-дю-Миди (Франция) и на горе Мауна-Лоа (Гавайские о-ва). В 1979 г. орбитальный коронограф Морской исследовательской лаборатории (США) зарегистрировал событие, никогда не наблюдавшееся ранее, — столкновение кометы с Солнцем. В новейших коронографах для регистрации изобра-

жения используется не фотопленка, а цифровые электронные детекторы, сигналы с которых обрабатываются на ЭВМ, что позволяет получать контрастные изображения с высоким разрешением.

Одними из лучших являются снимки короны, полученные с помощью коронографа на спутнике SMM (Solar Maximum Mission), запущенном в феврале 1980 г. примерно в период максимума солнечной активности. На спутнике была установлена аппаратура для исследования Солнца в диапазоне длин волн от видимого света до гамма-лучей. За шесть с небольшим месяцев спутник SMM передал множество данных, но затем в результате серии неисправностей в системе ориентации на Солнце, его вращение вышло из-под контроля, поэтому программа исследований с помощью этого спутника, рассчитанная на два года, была прервана. Однако спутник SMM — первый космический аппарат, сконструированный с учетом возможности его ремонта в космосе. Он снабжен специальным крюком, а приборы размещены в сменных блоках. Программа полета космического корабля «Шаттл», запланированного на апрель 1984 г., предусматривает сближение со спутником SMM, во время которого астронавт, выйдя в космос, остановит его неуправляемое вращение. Механическая рука «Шаттла» перенесет спутник в грузовой отсек корабля, и после устранения в нем неисправностей он будет возвращен на прежнюю орбиту. Восстановленный спутник SMM должен возобновить наблюдения в период минимума солнечной активности; полученные данные можно будет сравнить с данными, переданными спутником в период максимума солнечной активности.

Коронограф на спутнике SMM сконструирован группой исследователей под руководством Л. Хауза из Высогогорной обсерватории Национального центра исследований атмосферы (США). В этом приборе свет от короны проходит через взаимозаменяемые фильтры и поляризаторы и фокусируются на фотокатоде телевизионной камеры. С камеры данные передаются на Землю в цифровой форме и записываются на магнитную ленту. Каждое передаваемое изображение содержит свыше миллиона бит информации и соответствует одному квадранту солнечной короны. Принятые наземными станциями изображения обрабатываются ЭВМ и преобразуются в цветное телевизионное изображение. С помощью ЭВМ наблюдатель может выделить интересующие его области короны и получить увеличенные изображения отдельных деталей.

До временного перерыва в работе осенью 1981 г. коронограф спутника SMM передал около 30 тыс. изображе-



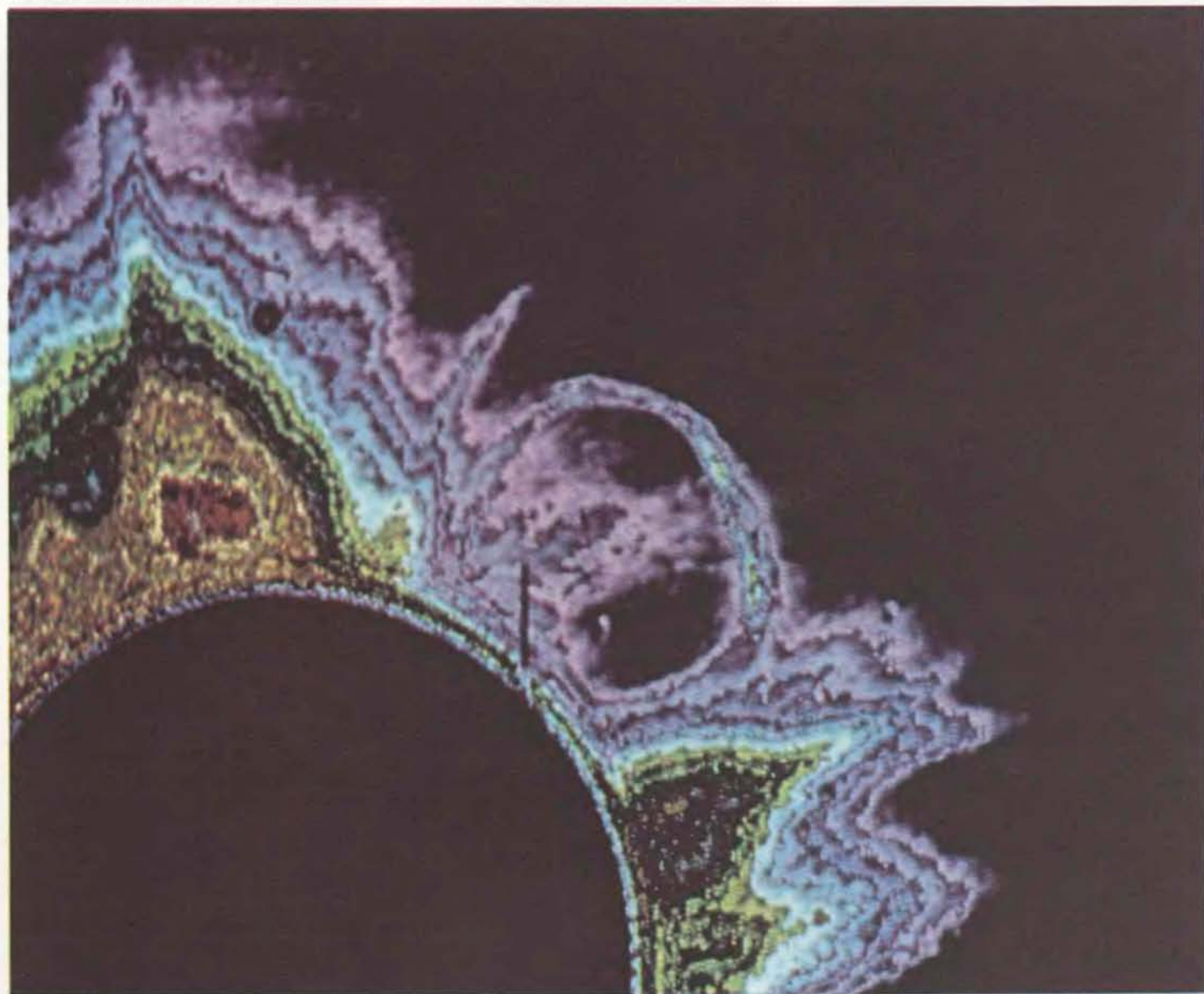
РЕНТГЕНОВСКИЙ СНИМОК СОЛНЦА. Корона, температура которой достигает примерно 2 млн. К, является источником рентгеновского излучения. Фотосфера, имеющая температуру 6000 К, слишком холодна, чтобы быть источником этого излучения. Снимок сделан астронавтами с орбитальной станции «Скайлэб» 18 сентября 1973 г., примерно через два с половиной месяца после получения снимка, показанного на с. 63. Яркие «пятна» — это корональные области повышенной температуры или плотности, соответствующие корональным лучам или петлям. Темные области — это корональные дыры. Видна также дыра в экваториальной области. Подобные снимки Солнца показывают, что корональные дыры образуются не только в полярных районах и что они связаны с высокоскоростными потоками частиц, выбрасываемых из Солнца. Рентгеновский телескоп, с помощью которого получен снимок, создан фирмой American Science and Engineering, Inc.



ПЕТЛЯ У ГРАНИЦ ФОТОСФЕРЫ, поддерживаемая сильным локальным магнитным полем, имеет температуру около 100 000 К. Изображения получены в ультрафиолетовых лучах с длиной волны 1548,19 Å, испускаемых трехкратно ионизованными атомами углерода. Снимок слева сделан в узком спектральном интервале с центральной длиной волны, указанной выше. Изображение справа — «скоростеграмма» той же петли, полученная разделением излучения на две



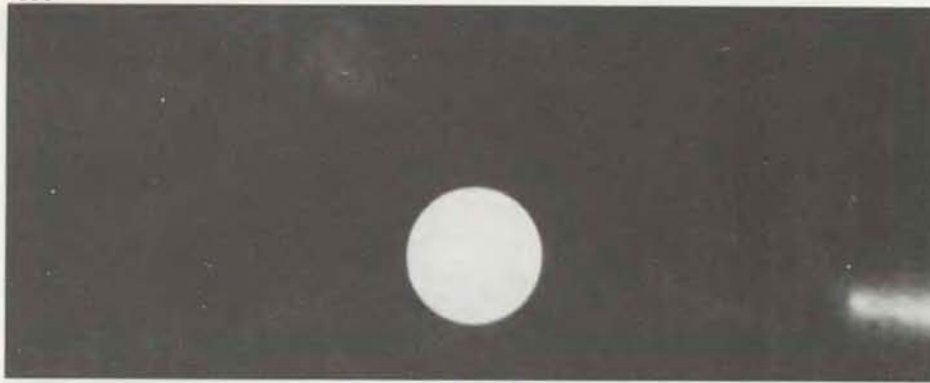
составляющие — меньшую и большую относительно центральной длины волны. Составляющая с меньшей длиной волны (синяя) испускается веществом, приближающимся к наблюдателю (ультрафиолетовому спектрометру на спутнике SMM), составляющая с большей длиной волны (красная) — веществом, удаляющимся от него. Такие скоростеграммы хорошо иллюстрируют динамичный характер внешних слоев Солнца.



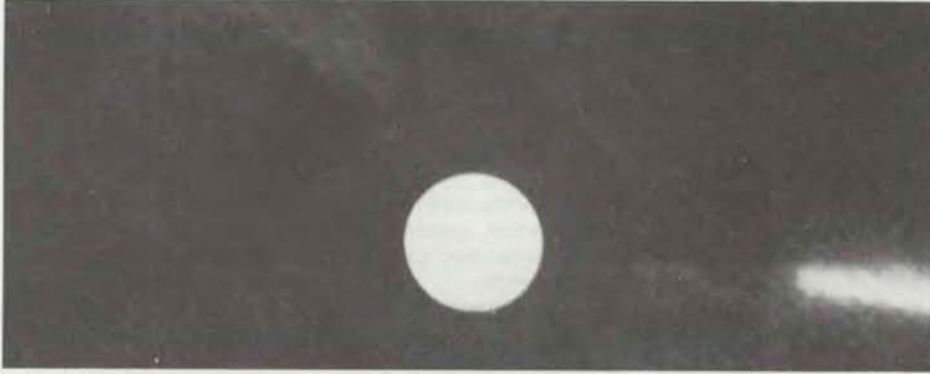
КОРОНАЛЬНЫЕ ЛУЧИ И ПОДНИМАЮЩИЙСЯ ПРОТУБЕРАНЕЦ сняты 14 апреля 1980 г. при помощи коронографа Высокогорной обсерватории, установленного на спутнике SMM. Контрастность увеличена за счет приема «эффективного

обозначения контура» — выделение деталей изображения при помощи ЭВМ. Различные цвета соответствуют разной плотности короны. На снимке — высококонтрастное изображение явления, 4 фазы которого приведены на с. 61.

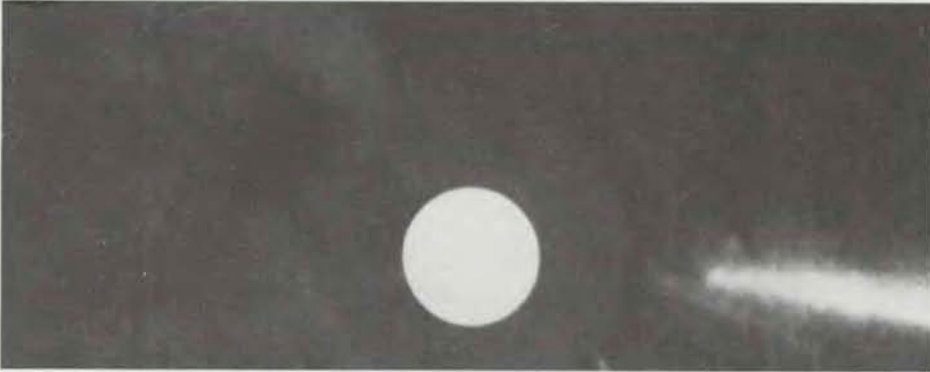
1856



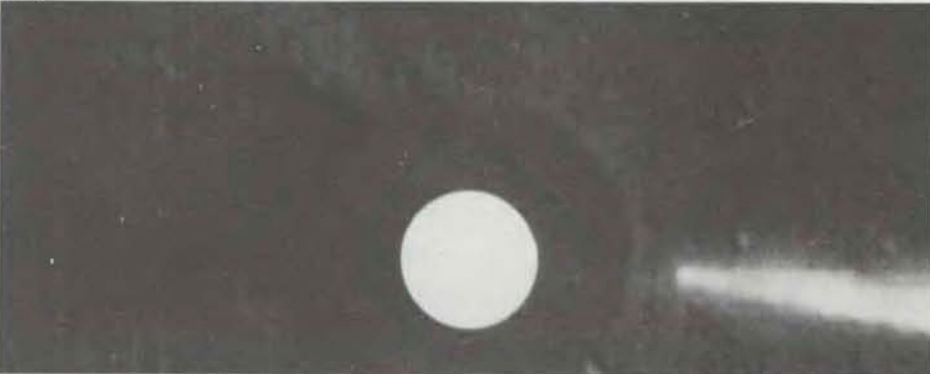
1935



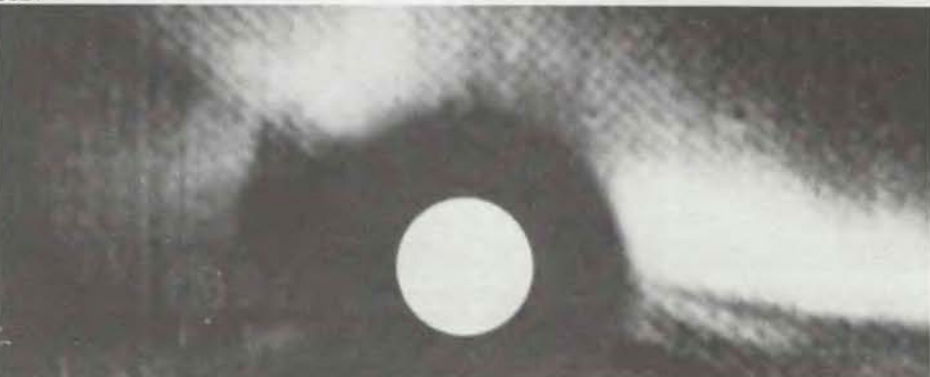
2032



2049



0821



ний короны. Р. Иллинг из Высокогорной обсерватории сделал киномонтаж серии изображений, полученных в апреле 1980 г., что позволило впервые увидеть корону как беспокойную, постоянно изменяющуюся динамическую структуру. Хотя основные ее детали остаются различимыми в течение нескольких дней или более, они явно изменяются за это время. Меньшие детали структуры появляются и изменяются еще быстрее. Случайные быстропротекающие процессы «развиваются» в короне в течение нескольких часов. Коронोगраф SMM позволил зарегистрировать один из таких процессов, представляющий собой внезапное расширение корональной петли и ее разрастание в изогнутую вогне арку со скоростью порядка нескольких сотен километров в секунду.

КАКОВА физическая природа деталей корональной структуры? Как может горячий разреженный газ образовывать такие удивительные узоры? Почему одни корональные детали существуют несколько дней, а другие изменяются быстро и неожиданно? Ни сила тяготения, характеризующаяся сферической симметрией, ни силы, связанные с вращением Солнца, не могут придать короне ее необычный облик. Разгадка происхождения корональных структур кроется в их формах. Отдельные корональные петли, арки и полярные щеточки образуют рисунки, напоминающие расположение железных опилок вблизи магнита. Подобно тому как опилки выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля, так и в корональном газе проявляется структура солнечного магнитного поля. Именно магнитные силы ответственны за детали корональных структур, их разнообразие и изменчивость.

Подобно магнитному полю Земли и многих других небесных тел, магнитное поле Солнца, по-видимому, обусловлено конвективными движениями и вращением проводящего электричества вещества внутри него. По причинам, до сих пор не выясненным, маг-

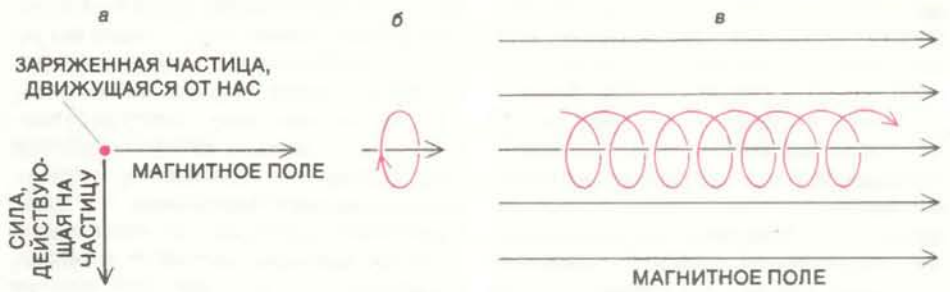
КОМЕТА СТАЛКИВАЕТСЯ С СОЛНЦЕМ.

Впервые такое событие удалось запечатлеть при помощи орбитального коронोगрафа Научно-исследовательской лаборатории Военно-морского флота США. Снимок вверху сделан в 18 ч 56 мин мирового времени 30 августа 1979 г. Само Солнце полностью закрыто искусственной «луной» коронोगрафа; белый диск соответствует размеру и положению Солнца. Комета, принадлежащая семейству комет, близко подходящих к Солнцу, до этого не была зарегистрирована на Земле. Яркие области, видные на нижнем снимке, существовали в течение примерно 24 ч после столкновения. С 1979 г. наблюдались еще два подобных столкновения.

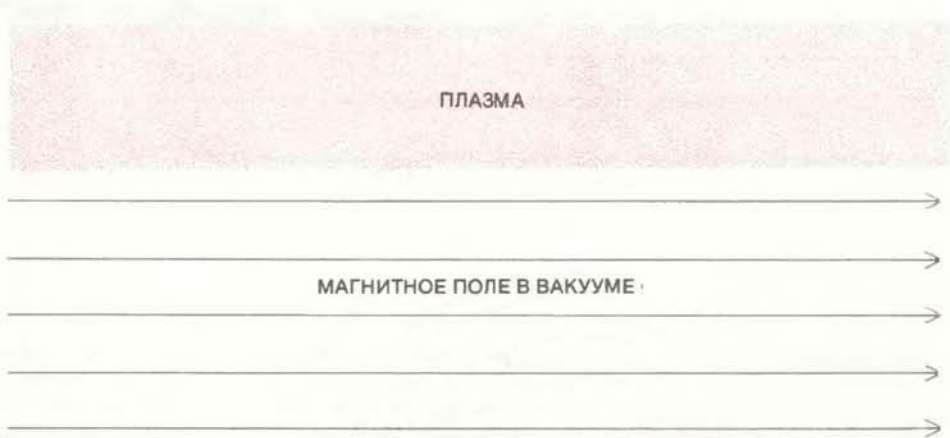
нитное поле Солнца очень изменчиво. Примерно каждые 11 лет его полярность меняется. Наиболее выраженный характер полюсы имеют в периоды минимума солнечных пятен, в это время общая конфигурация поля проста и напоминает поле магнитного диполя, каковыми являются, например, стержневой магнит и Земля. Дипольная структура поля хорошо проявляется в полярных щеточках, заметных в короне в периоды минимума солнечных пятен. В периоды максимума пятен магнитное поле хаотично; вместо четко выраженных северного и южного полюсов наблюдаются сильные локальные магнитные поля, часто связанные с солнечными пятнами. Корональные петли и арки, особенно многочисленные в это время, обрисовывают границы локальных полей.

Взаимодействие коронального газа и магнитного поля подчиняется основным законам электромагнетизма. Изучение магнитных явлений началось с изучения магнитных свойств черных металлов, таких, как железо. Известно, что магнитное поле создается движущимися электрическими зарядами. В магнитных материалах такими зарядами являются электроны, обращающиеся вокруг атомных ядер; именно этим движением электронов и обусловлены магнитные свойства этих материалов. Частицы ионизованного газа, такого, как корона, заряжены и, следовательно, взаимодействуют с магнитным полем. Эти электромагнитные взаимодействия делают ионизованный газ настолько отличным от обычных газов, что он получил специальное название — плазма. Плазму нередко называют четвертым состоянием вещества. На такой относительно холодной планете, как наша Земля, плазма встречается редко. Однако для многих объектов Вселенной это состояние вещества, по-видимому, является основным.

На заряженную частицу в магнитном поле действует сила, зависящая от ее заряда, скорости а также напряженности и направления поля. Направление этой силы перпендикулярно направлению движения частицы и направлению магнитного поля. Она максимальна, когда частица движется под прямым углом к направлению поля, и равна нулю при ее движении параллельно направлению поля. Поскольку магнитная сила всегда перпендикулярна направлению движения частицы, то она может изменить только направление, в котором движется частица, но не ее скорость. При движении частицы параллельно направлению поля эта сила равна нулю, поэтому магнитное поле оказывает на нее воздействие только тогда, когда ее скорость имеет составляющую, перпендикулярную полю. В этом случае заряженные частицы движутся



ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ В КОРОНЕ ведут себя так же, как и заряженные частицы в магнитном поле. Действующая на них сила перпендикулярна магнитному полю и направлению их движения. На положительно заряженную частицу, движущуюся перпендикулярно плоскости рисунка (а) «от нас», действует сила, направленная вниз, если магнитное поле направлено слева направо. Под действием этой силы частица начинает двигаться по окружности (б). Если скорость частицы имеет составляющую вдоль поля, то она будет двигаться по спирали (в). Отрицательно заряженная частица будет двигаться в направлении, противоположном указанному на рисунке.



ПЕРЕМЕЩЕНИЮ ПЛАЗМЫ под прямым углом к магнитному полю препятствует оказываемое этим полем давление. Вакуум, «пронизанный» силовыми линиями магнитного поля, граничит с находящейся под давлением плазмой. Проникновение плазмы в эту область препятствует давлению магнитного поля. Но эту конфигурацию нельзя считать устойчивой. Небольшое возмущение в плазме или магнитном поле может вызвать ее резкое изменение.



МАГНИТНАЯ ПЛАВУЧЕСТЬ проявляется в области более сильного магнитного поля, находящегося между областями с более слабым полем. Полное давление в каждой области равно сумме давлений магнитного поля и плазмы. Если все области имеют одинаковую температуру, то меньшее давление соответствует и меньшей плотности. На область с меньшей плотностью сила тяготения оказывает меньшее действие и она стремится «всплыть». Этим можно объяснить выбрасывание вещества петель в межпланетную среду.

по спиральям, вокруг силовых линий. Говорят, что они «вморожены», или «привязаны» к магнитному полю, подобно тому как связаны с ниткой нанизанные на нее бусины. Частицы могут перемещаться только вдоль направления поля. Неоднородность поля и столкновения между частицами делают их менее «привязанными» к полю, однако для разреженной плазмы, подобной солнечной короне, допущение, что ее частицы «привязаны» к магнитному полю, является вполне приемлемым.

ЗАРЯЖЕННЫЕ частицы, составляющие корону, образуют своеобразный газ, который, как и газ земной атмосферы, оказывает давление. Вообразим, что корональный газ стремится под действием собственного давления проникнуть в область, где имеется магнитное поле. Поскольку частицы плаз-

мы не могут свободно двигаться перпендикулярно силовым линиям поля, то поле активно противодействует давлению газа. Количественный анализ показывает, что магнитное поле действительно оказывает давление на ионизованный газ, причем это давление пропорционально квадрату напряженности поля. Поведение коронального газа гораздо сложнее поведения земной атмосферы, поскольку его динамика определяется как газовым давлением, так и магнитным.

Корональная плазма отнюдь не пассивно реагирует на солнечное магнитное поле. Поскольку корона разрежена и высокоионизована, она оказывается отличным проводником электричества и может поддерживать весьма сильные электрические токи. Последние в свою очередь генерируют магнитные поля, изменяющие первоначальное поле.

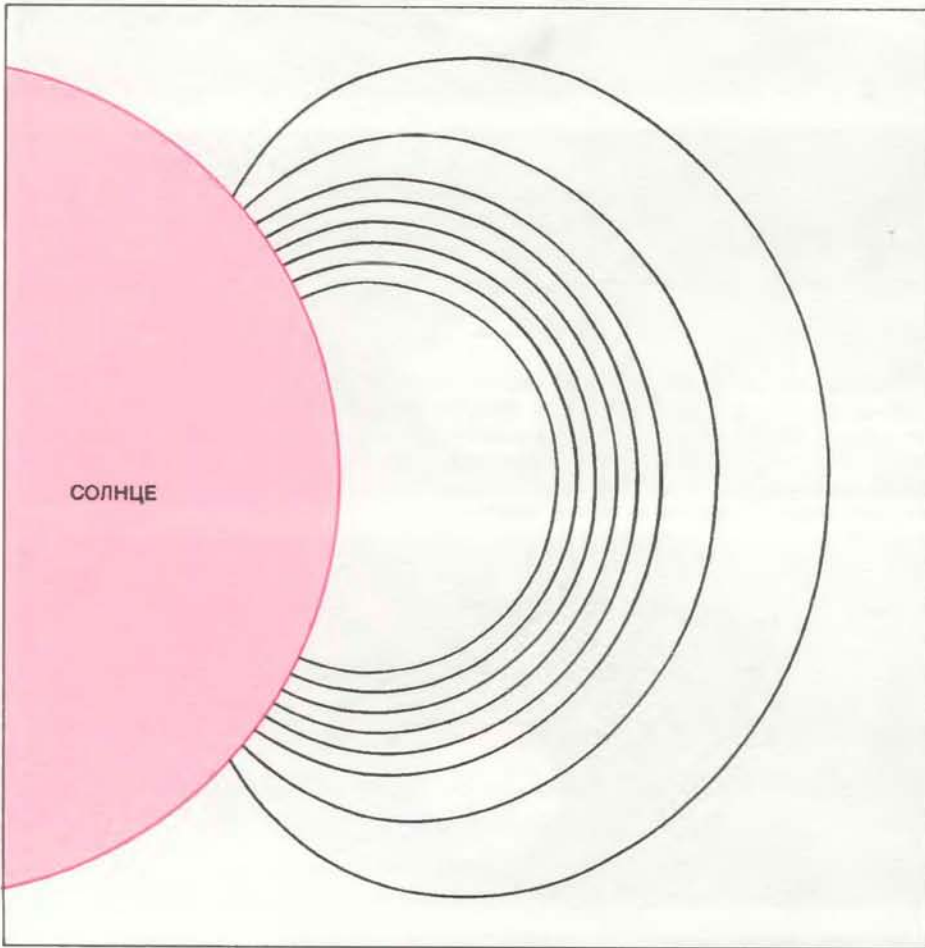
Этим взаимодействием короны с магнитным полем Солнца обусловлено богатое разнообразие ее свойств, которое не характерно для непроводящего газа.

Широкий диапазон корональных явлений значительно усложняет попытки теоретического объяснения поведения короны. Для полного понимания корональных процессов необходимо получение непротиворечивого решения сложной системы уравнений, описывающей процессы формирования магнитным полем корональной структуры с учетом корональных токов, изменяющих само поле. Кроме того, нельзя пренебрегать действиями тяготения, вращения и газового давления. Не удивительно, что теория, охватывающая весь комплекс корональных явлений, еще не разработана.

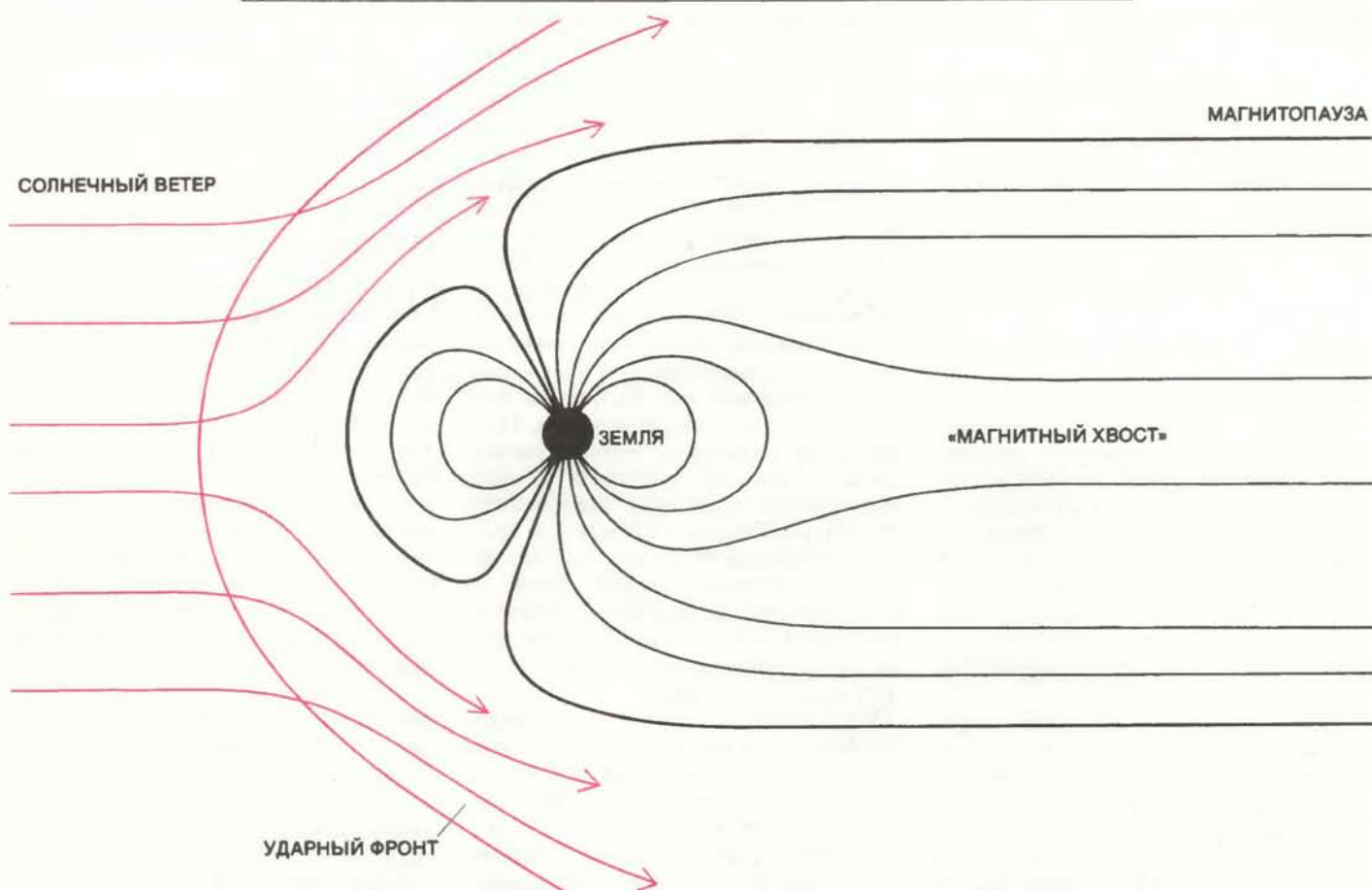
Первым важным шагом в этом направлении явилась разработка математической модели Дж. Ньюманом и Р. Коппом из Высокогорной обсерватории. Модель хорошо описывает развитие корональных лучей в экваториальной области Солнца. Ньюман, Тянь Е из Национального управления по исследованию океанов и атмосферы (США) и другие исследователи усовершенствовали модели экваториальных лучей, что привело к более полному пониманию их структуры. В настоящее время предпринимаются попытки установить, как связаны корональные лучи с ближайшими к ним корональными дырами. Разрабатываемая мною модель описывает образование лучей в высоких солнечных широтах.

Открытия, сделанные за последнее десятилетие, стимулировали теоретические исследования динамики солнечной короны, в особенности быстропротекающих корональных процессов. Работа, выполненная недавно Б. Лоу из Высокогорной обсерватории и автором настоящей статьи, позволяет предположить, что быстрый подъем корональных петель обусловлен магнитной плавучестью. Подобно тому как на погруженную в воду щепку действует выталкивающая сила, так и на область более сильного магнитного поля в короне действует выталкивающая сила со стороны окружающего газа. Теоретические модели показывают, что корональная петля может внезапно потерять устойчивость и подняться в корону либо вследствие хаотического движения фотосферного газа у основания магнитной петли, либо в ответ на бурное возмущение в фотосфере, например солнечную вспышку.

Поскольку корональная плазма и магнитное поле связаны друг с другом, плазма не может двигаться перпендикулярно направлению поля, не увлекая за собой силовые линии поля. Поэтому возмущения в плазме могут привести к вздутию силовых линий. Это вздутие может перемещаться вдоль линий,



БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИЙ ПРОЦЕСС РАСШИРЕНИЯ петли описан с помощью математической модели, недавно разработанной автором этой статьи. Кривые представляют последовательные положения петли в магнитном поле. Вершина петли поднимается по мере увеличения расстояния между ее основаниями в результате, например, солнечной вспышки или хаотического движения газа у поверхности Солнца. Согласно модели, при расширении петли скорость ее подъема все более превышает скорость расхождения оснований. Такая картина свидетельствует о неустойчивости: относительно небольшое возмущение на поверхности Солнца может быть причиной быстрых изменений в структуре короны. В модели учтены эффекты газового давления, магнитного поля и тяготения. Для упрощения математического описания предполагалось, что магнитное взаимодействие происходило в тонких слоях, ограниченных изображенными кривыми.



ДАВЛЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА удерживает магнитное поле Земли в ограниченной области, называемой магнитосферой. Эта область сжата в направлении к Солнцу и вытянута в противоположном направлении в длинный «магнитный хвост». Магнитопауза — граница между солнечным ветром и магнитосферой — является своеобразным барьером, препятствующим попаданию на Землю основной массы частиц солнечного ветра. Однако вблизи полюсов Земли частицы могут перемещаться вдоль силовых линий магнитного поля, попадая в верхнюю атмосферу и вызывая полярные сияния. Перед магнитосферой образуется ударный фронт, как при полете сверхзвукового самолета.

подобно тому как бежит изгиб вдоль натянутой струны. Такое перемещающееся возмущение представляет собой магнитогидродинамическую волну, переносящую энергию в форме отклонений как плазмы, так и магнитного поля от состояния равновесия, характеризующегося наименьшей энергией. Как отмечалось выше, перенос энергии из лежащего под фотосферой конвективного слоя через фотосферу и хромосферу непосредственно в корону может быть обусловлен магнитогидродинамическими волнами. В виде ударных волн они рассеивают свою энергию в короне, разогревая ее до температуры в 2 млн. К.

Почему изучение динамики короны так важно? Оказывает ли корональная активность какое-либо прямое влияние на Землю? Изучение короны позволит глубже исследовать сложное поведение горячего ионизованного газа в магнитном поле. Полученные результаты пригодятся при исследовании гораздо более далеких и загадочных объектов, таких, как пульсары, квазары и активные галактики. Если мы лучше будем понимать процессы, происходящие в короне, это поможет нам использовать термоядерные реакции в качестве источника энергии, так как наиболее перспективные направления в этой области связаны с проблемой удержания горячей плазмы магнитными полями.

ЕЩЕ БОЛЕЕ значительным представляется тот факт, что Земля «погружена» в солнечную корону. В конце 1950-х годов стало общепризнанным, что именно высокой температурой короны обусловлен солнечный ветер — поток солнечного газа, скорость которого вблизи Земли достигает 400 км/с. Солнечный ветер — это истечение короны в межпланетную среду.

Поскольку корональная плазма «привязана» к солнечному магнитному полю, то области короны, окруженные магнитными петлями, не могут породить солнечный ветер. В самом деле, магнитные петли обоими концами связаны с поверхностью Солнца, поэтому корональный газ из этих петель не истекает в межпланетную среду. Газ попадает в нее вдоль силовых линий магнитного поля Солнца, простирающихся в бесконечность. В настоящее время считают, что солнечный ветер, в особенности его высокоскоростные потоки, образуется в основном в корональных дырах. Быстропротекающие корональные процессы могут «проложить» еще один путь для вещества, покидающего Солнце.

Во многих таких явлениях первоначально замкнутая петля становится неустойчивой, поднимается и увеличивается в размерах до тех пор, пока ее силовые линии не размыкаются, приводя к выбросу вещества в межпланетную среду. Недавние наблюдения выявили существование своеобразных «корональных снарядов» — результата процесса конденсации холодного плотного вещества, которые быстро ускоряются при прохождении через корону, увеличивая истечение вещества из Солнца. Магнитное поле Земли защищает ее от прямого потока солнечного ветра, который, однако, искажает это поле. В направлении к Солнцу поле Земли сжато, а в противоположном направлении вытянуто в виде длинного хвоста. Область магнитного поля Земли, охваченная солнечным ветром, называется магнитосферой. Как и солнечная корона, магнитосферы Земли и других планет — это своего рода лаборатории для изучения взаимодействия плазмы с магнитным полем. Магнитосфера представляет собой препятствие на пути солнечного ветра. Поскольку его скорость превышает скорость звука или магнитогидродинамических волн, ни один сигнал, также

кидающего Солнце. Магнитосфера представляет собой препятствие на пути солнечного ветра. Поскольку его скорость превышает скорость звука или магнитогидродинамических волн, ни один сигнал, также

кидающего Солнце. Во многих таких явлениях первоначально замкнутая петля становится неустойчивой, поднимается и увеличивается в размерах до тех пор, пока ее силовые линии не размыкаются, приводя к выбросу вещества в межпланетную среду. Недавние наблюдения выявили существование своеобразных «корональных снарядов» — результата процесса конденсации холодного плотного вещества, которые быстро ускоряются при прохождении через корону, увеличивая истечение вещества из Солнца.

Магнитное поле Земли защищает ее от прямого потока солнечного ветра, который, однако, искажает это поле. В направлении к Солнцу поле Земли сжато, а в противоположном направлении вытянуто в виде длинного хвоста. Область магнитного поля Земли, охваченная солнечным ветром, называется магнитосферой. Как и солнечная корона, магнитосферы Земли и других планет — это своего рода лаборатории для изучения взаимодействия плазмы с магнитным полем.

являющийся возмущением, не может быть передан от магнитосферы к набегающему потоку так, чтобы солнечный ветер мог плавно обогнуть это препятствие. Ситуация аналогична движению самолета быстрее звука или лодки быстрее волн на поверхности воды. В этих случаях не происходит плавное обтекание препятствия, как это имело бы место при движении со скоростью, меньшей скорости звука или скорости распространения другого вида волн. В результате возникает ударная волна, и такие свойства среды, как давление, плотность и скорость, резко меняются. Ударная волна, создаваемая сверхзвуковым самолетом, порождает «звуковой удар»; от быстродвижущейся лодки разбегается носовая волна. Перед земной магнитосферой образуется обширный ударный фронт на расстоянии около 60 000 км от Земли. Космический аппарат, пересекающий этот фронт, может собрать богатую информацию о структуре ударной волны в плазме.

При неизменном солнечном ветре магнитосфера и ударный фронт оставались бы относительно друг друга в фиксированном положении, определяемом равновесием между полным давлением набегающего солнечного ветра и давлением магнитного поля Земли. Однако ветер — это продолжение короны, которая подвержена значительным изменениям как в пространстве, так и во времени. По мере вращения Солнца различные пространственные нерегулярности короны — такие, как корональные дыры и магнитные петли, — преобразуются во временные вариации солнечного ветра, достигающие Земли. Динамические явления на Солнце (вспышки или быстропотекающие процессы в короне) вызывают изменения солнечного ветра.

В результате изменения давления солнечного ветра ударный фронт и магнитосфера смещаются, сжимая магнитное поле Земли и изменяя его напряженность. Изменения магнитного поля возбуждают электрические токи в ионосфере — проводящем слое верхней атмосферы. Это в свою очередь может привести к внезапным нарушениям дальней радиосвязи. Такие же токи могут возбуждаться в телефонных линиях и линиях электропередач — как воздушных, так и подземных, — а также в земле. Поэтому сильные возмущения на Солнце могут исказить показания компасов, нарушать связь и даже подачу электроэнергии. В это время частицы высокой энергии, двигаясь по спиральным траекториям вдоль магнитных силовых линий, попадают в полярные области Земли и вызывают полярные сияния.

Высокоскоростные потоки солнечного ветра вырываются из корональных дыр. По мере того как такой поток

«наталкивается» на движущийся впереди поток ветра, обладающий меньшей скоростью, переходная зона между этими потоками уменьшается, а сам переход становится более резким. К тому времени, когда солнечный ветер достигнет орбиты Юпитера, удаленного от Солнца в пять раз дальше, чем Земля, эти переходные зоны превратятся в ударные волны, которые сталкиваются с магнитным полем Юпитера. Магнитосфера Юпитера заполняет такой большой объем, что, несмотря на огромное расстояние от Земли, она по размерам казалась бы больше Солнца, если бы мы могли ее видеть. Под давлением солнечного ветра ее размеры могут изменяться почти в три раза всего за несколько дней. Космические аппараты «Пионер» и «Вояджер», прошедшие вблизи Юпитера, последовательно пересекли ударный фронт и магнитопаузу, в результате удалось установить, что эти две области быстро перемещаются взад и вперед, то вздуваясь, то сжимаясь.

Если солнечная корона столь явно проявляет себя вблизи Юпитера, то как далеко она простирается? На каком расстоянии Солнце еще способно оказывать воздействие? В какой-то точке постепенно уменьшающееся давление солнечного ветра должно стать слабее очень малого давления межзвездного газа и магнитного поля Галактики. Эта область перехода указывает положение гелиопаузы, т.е. границы физической протяженности Солнца. Теоретические расчеты, выполненные около десяти лет назад, позволили предположить, что эта граница проходит между орбитами Юпитера и Сатурна. Однако космический аппарат, ныне приближающийся к орбите Нептуна, не обнаружил никаких признаков гелиопаузы. По нынешним представлениям, солнечный ветер простирается за орбиту самой далекой планеты Солнечной системы.

За гелиопаузой должен существовать ударный фронт, порожденный движением всей Солнечной системы в межзвездной среде. Из-за непостоянства солнечной короны гелиосфера — область, лежащая внутри гелиопаузы, — может сжиматься и расширяться подобно воздушному шару. От термоядерной «печи» в центральной области Солнца до гелиопаузы, включая конвективную зону, фотосферу, хромосферу, корону и солнечный ветер, — все это составляющие Солнца. Человечество занимает привилегированное положение в пределах этого гигантского небесного тела — наша планета расположена достаточно далеко от его ядра, так что на ней создались благоприятные условия для развития жизни и существования человека, и достаточно близко к нему, чтобы можно было проникнуть в тайны короны.