

Солнце

Самая детально изученная звезда — это наше Солнце. Оно весьма полезно для нас: без него не было бы жизни на Земле. Из предыдущей лекции мы знаем, что оно очень большое: по диаметру в 10 раз крупнее самой большой планеты нашей системы — Юпитера — и почти в 110 раз крупнее Земли. А по массе Солнце с Юпитером различаются почти в $10^3 = 1000$ раз, поскольку их плотность примерно одинакова, около $1,5 \text{ г/см}^3$ — это чуть больше, чем у морской воды, т. е. привычная для нас величина. Но надо понимать, что это среднее значение по всему объему: на поверхности Солнца плотность газа намного меньше, а к центру она нарастает так, что становится в 20 раз больше, чем у железа.

Как смотреть на Солнце

Мы ощущаем Солнце благодаря его излучению. А какова его полная мощность? Если поместить Солнце в точку фокуса гигантского космического рефлектора и тем самым сконцентрировать всю его световую мощь на нашей планете (рис. 10.1), то через четыре минуты все океаны не просто закипят — они полностью улетучатся в космическое пространство. Представьте: всего четыре минуты — и нет больше воды на Земле: вот что такое солнечное излучение. А через 10 суток испарился бы весь земной шар.

К счастью, на нас попадает не всё солнечное излучение, а его микроскопическая доля, поэтому Земля и жизнь на ней не сильно от него страдают. Но учтите: прямой солнечный свет очень опасен для зрения. Конечно, можно на мгновение глянуть — и сразу же отвести взгляд. Но лучше этого не делать. Даже если вы собираетесь наблюдать за солнечным затмением, то смотреть на него длительно без темных очков нельзя. И очки нужны не пляжные, а специальные, с очень плотной светозащитной пленкой (рис. 10.2), которая примерно в тысячу раз ослабляет световой поток: в таком случае сетчатка ваших глаз не пострадает от наблюдения Солнца.



Рис. 10.1. Полная мощность излучения Солнца ($4 \cdot 10^{26}$ Вт), целиком направленная на Землю, может быстро уничтожить ее.

А если вы решили наблюдать Солнце в телескоп, то запомните, что дело это крайне опасное. Телескоп собирает свет огромным объективом и весь его направляет в ваш глаз. Астрономы шутят, что на Солнце в телескоп можно посмотреть лишь дважды в жизни: один раз – правым глазом, а второй раз – левым. Чтобы не рисковать зрением, сделали специальный окуляр с зеркальцем (рис. 10.3), которое отбрасывает 99,99% света вбок, отводя его в ту часть обсерватории, где людей не должно быть. А в глаз попадает совсем чуть-чуть света, и тогда можно безопасно смотреть на солнечную поверхность.



Рис. 10.2. Безопасное наблюдение Солнца сквозь светозащитные очки.



Рис. 10.3. Наблюдение Солнца на рефракторе с солнечным окуляром.

Но если вам когда-нибудь придется подсесть к окуляру большого телескопа, учтите, что это не совсем безопасно: обратите внимание, что параллельно его оси имеется маленький телескопчик — своеобразный оптический прицел, называемый *гидом* или *искателем*, у которого свой окуляр. В школьные годы в такой телескоп я наблюдал Солнце в проекции на белом экране (рис. 10.4) — это очень удобный и безопасный способ — и однажды забыл закрыть объектив искателя. Внезапно, почувствовав запах горелого, я догадался и момен-



Рис. 10.4. В обсерватории Волгоградского планетария. Автор (спиной к зрителю) снят в том самом пальто, еще не прожженном, поскольку объектив искателя (его тень — на спине) в тот раз был закрыт.

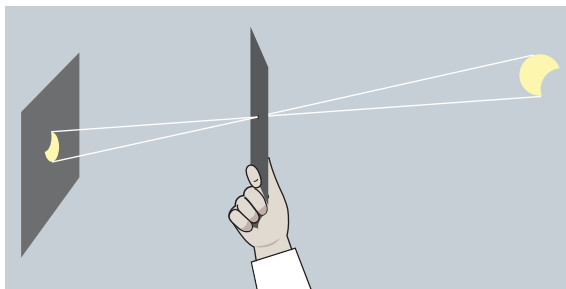


Рис. 10.5. Схема принципа камеры-обскуры для наблюдения солнечного затмения.

тально отпрыгнул от телескопа. А потом долго ходил в пальто с прожженной на спине дырой. Так что даже небольшой телескоп, сфокусировав на вашей спине лучи Солнца, может сильно вам навредить.

Проще всего наблюдать Солнце вообще без телескопа. Берете маленький листок бумаги или картона, протыкаете в нем дырочку



иглой — и получившаяся камера-обскура дает вам геометрически точный портрет Солнца. Люди таким способом наблюдают затмение, не рискуя.

Если у вас есть небольшая подзорная труба без специальных светофильтров, то можно, удобно расположив у окуляра экран, спроецировать на него изображение Солнца (рис. 10.6). По мере того как Луна «наползает» на Солнце, с экрана вы фотографируете фазы затмения безопасно для глаз.



Рис. 10.6. Наблюдение солнечного затмения 20 марта 2015 г. на крыше ГАИШ МГУ с помощью небольшой зрительной трубы и проекционного экрана. Фото В. Г. Сурдина.

Что видно на Солнце

Глядя на нашу родную звезду с Земли, мы видим хорошо оформленный круг фотосферы, можем измерить его диаметр. Присмотревшись, замечаем любопытный эффект потемнения к краю: в центре солнечный диск ярче, чем по краям. Это легко объяснимо: в середине наш взгляд «протыкает» солнечную атмосферу перпендикулярно и уходит вглубь, в горячие слои, вплоть до предела прозрачности, в то время как на видимом крае (его называют *лимбом*) луч зрения проходит только сквозь верхние слои атмосферы, а они более холодные и поэтому менее яркие.

Поверхность Солнца не столь однородна, как кажется на первый взгляд: на светлом фоне мы замечаем какие-то пятнышки. Причем если день ото дня мы фотографируем или зарисовываем Солнце, то отметим перемещение этих пятен (рис. 10.7). Делаем вывод, что, во-первых, Солнце вращается, а во-вторых, на Солнце не все области имеют одинаковую температуру: если обычная температура — около 6000 К, то пятна явно холоднее — до 4000 К, как показывают измерения. Вроде бы разница невелика, но вспомните, что лучеиспускательная способность пропорциональна 4-й степени температуры. Кроме того, спектр смещается из области видимого света в инфракрасный диапазон, а инфракрасные лучи хуже проходят сквозь земную атмосферу и хуже фиксируются фотоприемниками, поэтому пятна выглядят такими черными.

Размер солнечных пятен невероятен. Бывают пятна в несколько раз больше земного шара (рис. 10.8). Пятна окружены яркой поверх-

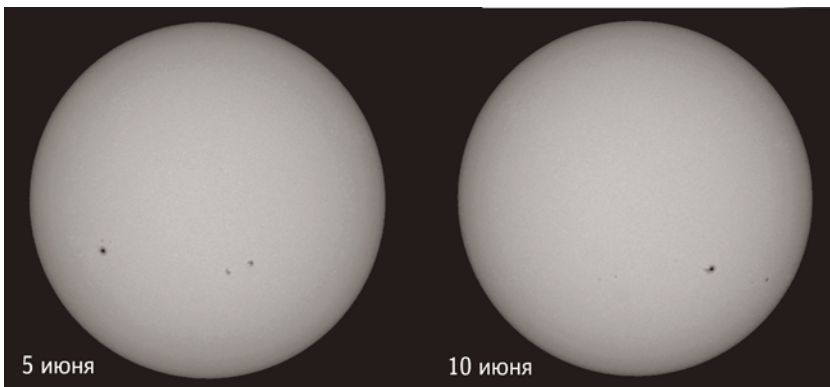


Рис. 10.7. Фото солнечных пятен (1998 г.). Прошло всего пять дней — и темные пятна на поверхности Солнца заметно сдвинулись. (Источник — Big Bear Solar Observatory.)

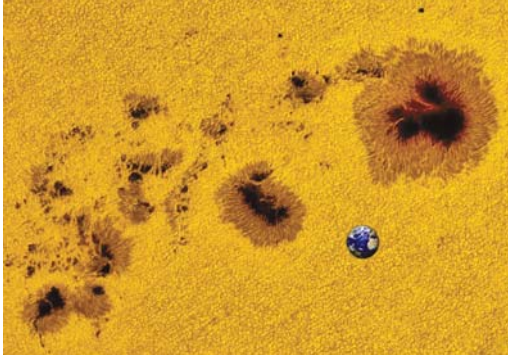


Рис. 10.8. Размеры земного шара в сравнении с размерами солнечных пятен.

ностью фотосферы, где постоянно всплывают горячие потоки газа. На их фоне явно выделяются более холодные пятна, причем с градацией яркости (рис. 10.9): астрономы говорят, что у солнечного пятна есть «тень» (амбра) и «полутень» (пенамбра). Пятно стабильно, потому что мощное магнитное поле препятствует горизонтальному перемешиванию в нем газа. Частицы горячего газа ионизованы, по существу это плазма, которая в магнитном поле движется своеобразно: вдоль силовых линий может, а поперек — нет, поэтому циркуляция вещества в поперечных направлениях заторможена.

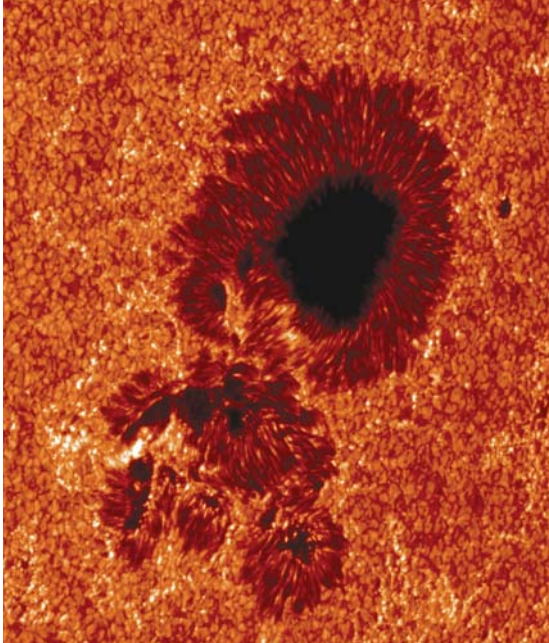


Рис. 10.9. Темные пятна на Солнце крупным планом. Черная сердцевина пятна — тень; окружающая его область с радиальной структурой — полутень. Вокруг пятна — невозмущенная поверхность Солнца, разбитая на мелкие гранулы, указывающие на конвективное движение газа. Размер типичной гранулы — около 1000 км.

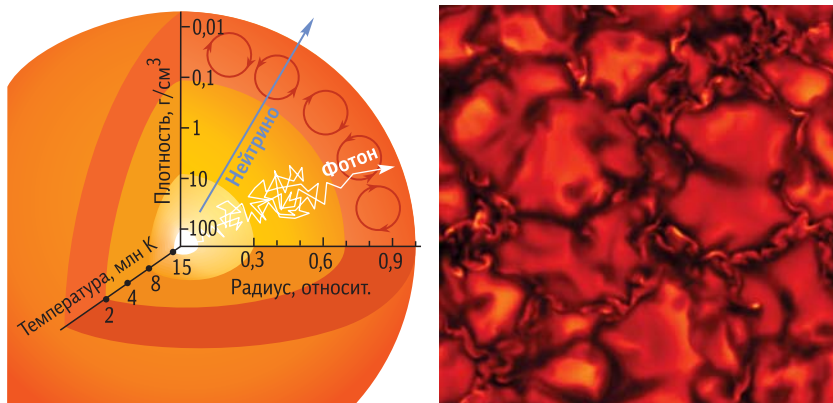


Рис. 10.10. Слева – внутреннее строение Солнца и схема переноса энергии: фотоны, рождающиеся в ядре, петля по очень запутанной траектории во внутренней части, постепенно выбираются наружу. Справа – конвекционные ячейки.

Когда мы изучаем фотосферу Солнца с сильным увеличением, то и помимо пятен обнаруживаем много любопытного. Сейчас появилось новое поколение телескопов, в том числе и на спутниках, летающих за пределами атмосферы Земли, так что теперь мы можем наблюдать структуру поверхности очень детально. Оказывается, что даже спокойная, невозмущенная фотосфера неоднородна, она вся состоит как бы из зернышек, гранул (рис. 10.10). Размер этих гранул – порядка угловой секунды, что соответствует примерно 1000 км. Это гигантские потоки плазмы, которые с околосветовой скоростью выныривают из недр Солнца, остывают и уходят вниз. А в пятнах происходит «водопад»: охлаждаясь, вещество вдоль силовых магнитных линий устремляется вниз, но снизу поток тепла подходит не такой интенсивный. Поэтому вещество охлаждается всё сильнее и сильнее и по контрасту с яркой поверхностью становится для телескопа темным, практически черным.

Как работает Солнце

Внутреннее строение Солнца мы себе представляем так: есть центральная часть, или ядро, в котором температура выше 5 млн градусов, а в самом его центре – примерно 15 млн. Это источник энергии, там идут термоядерные реакции, а выделяющаяся при этом энергия переносится наружу. В звездах эффективно работают два механизма переноса.

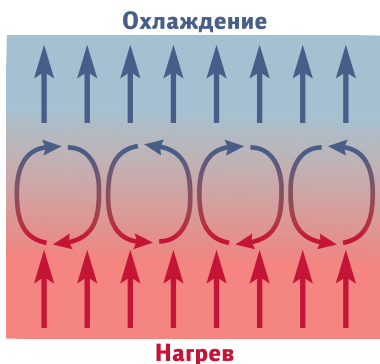


Рис. 10.11. Формирование конвективных ячеек Бенара.

электромагнитному кванту, который движется со скоростью света, чтобы выбраться на поверхность и улететь в открытое пространство, требуется порядка ста тысяч лет.

На какой-то глубине плотность и температура квантов уменьшаются настолько, что они становятся не в состоянии обеспечить перенос всей энергии, которая рождается в ядре. И тут в дело перенос

Из внутренней, высокотемпературной части перенос энергии осуществляется в основном квантами излучения, фотонами. Вещество лежит слоями, практически не перемешиваясь, а кванты из ядра сквозь него диффундируют к более холодной поверхности. Квантов там много, плотность их отнюдь не маленькая, и продвигаются они очень медленно. Дело в том, что плазма настолько непрозрачна для света, что родившемуся в ядре

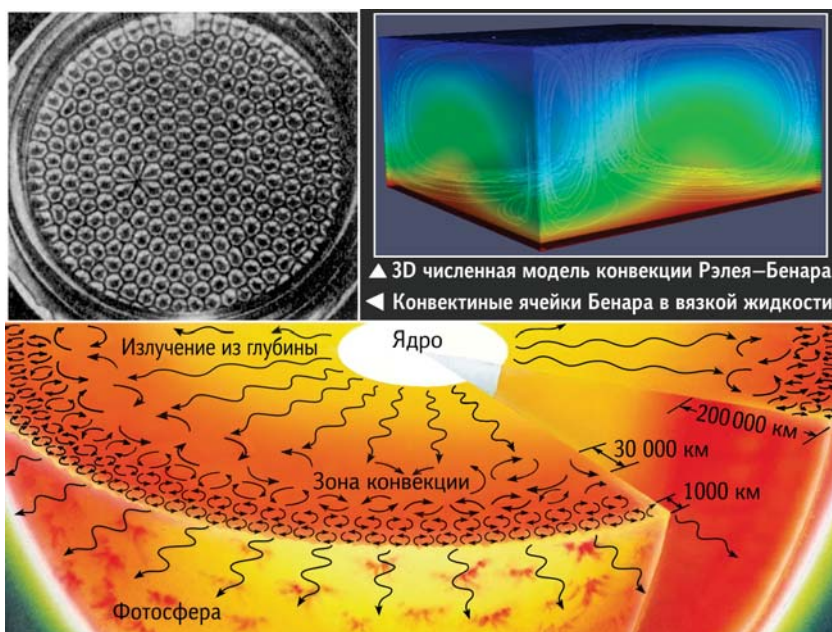


Рис. 10.12. Схема конвекционных процессов на Солнце.

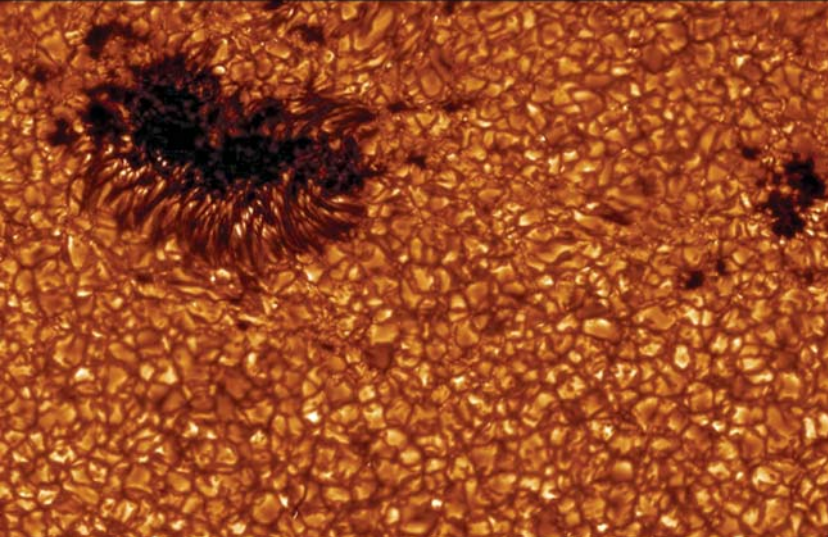


Рис. 10.13. Яркие точки в фотосфере Солнца возникают в результате локального взаимодействия плазмы с магнитным полем. Фото: Swedish 1-m Solar Telescope, Institute for Solar Physics, Sweden.

са энергии вступает уже конвекция, перемешивание вещества: горячие потоки газа всплывают, охлаждаются, становятся менее теплыми и тонут. Как в кастрюльке: если подогреваем воду на плитке, она бурлит.

В природе есть и третий механизм переноса энергии — теплопроводность: в твердом теле молекулы колеблются и толкают друг друга, происходит кинетическая передача тепла. Этот процесс внутри Солнца тоже имеет место, но роли практически не играет. Однако есть звезды, в которых теплопроводность является основным способом переноса: это белые карлики.

Современным телескопам на космических аппаратах не мешает атмосфера Земли, они намного детальнее показывают нам структуру поверхности Солнца, и иногда мы видим странные вещи: яркие точки на границах отдельных конвективных ячеек (рис. 10.13). Космические снимки получаются очень качественными, с высоким угловым разрешением. Раньше, всего лишь лет десять тому назад, в наземные телескопы мы не могли заметить это явление. Теперь же мы понимаем, что бурление газа выносит не только горячие слои вещества, но вместе с ними и магнитное поле, «вмороженное» в потоки плазмы. В соседних ячейках с обеих сторон выходящие на поверх-

ность потоки несут свои магнитные поля друг к другу. Встречаются два потока газа, на линии их соприкосновения силовые магнитные линии уплотняются, и плотность энергии магнитного поля, пропорциональная квадрату его напряженности, нарастает. На изображениях, полученных при моделировании, и на прямых снимках Солнца видно, что на границе конвективных ячеек температура выше. Этот локальный разогрев происходит потому, что часть магнитной энергии переходит в тепловую энергию газа. На этом принципе основаны многие наземные приборы. Так, в некоторых термоядерных реакторах, которые сейчас конструируют, способом нагрева плазменного потока служит его «обжимание» магнитным полем, так называемый *пинч-эффект*.

Хотя космические телескопы, например американский спутник «Обсерватория солнечной динамики» (Solar Dynamics Observatory), действительно показывают нам намного более детальные изображения, но не это главное. Важнее то, что с помощью заатмосферных обсерваторий мы регистрируем гораздо больший спектральный диапазон: можно получить отдельно рентгеновский, ультрафиолетовый, инфракрасный портреты Солнца. Рассматривая последовательную серию этих фотографий, мы прежде всего замечаем, что площадь, занятая на диске Солнца пятнами, их количество и плотность меняются. Иногда их нет совсем или мало, а иногда их много и они большого размера. Это регулярное явление, открытое еще в XVII в., называют солнечной активностью, по сути это и есть активность процессов во внешнем слое Солнца, а пятна — ее индикатор. Актив-

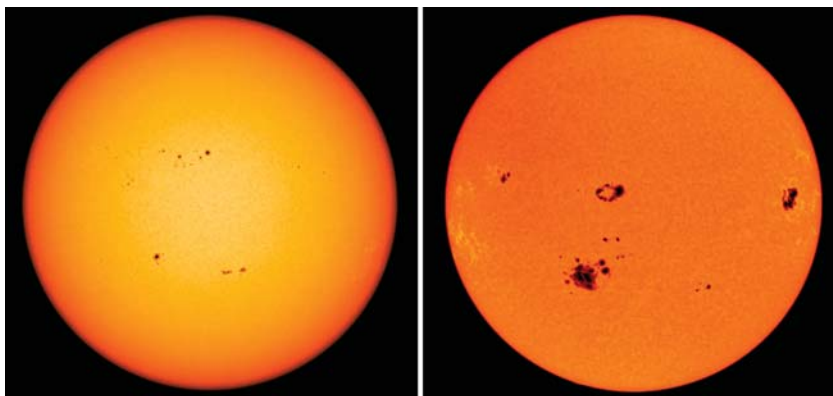


Рис. 10.14. Слева: Солнце в белом свете 5 июня 2012 г. (фото: Solar Dynamics Observatory, NASA); справа: снимок 28 октября 2003 г. (фото: SOHO, ESA, NASA).

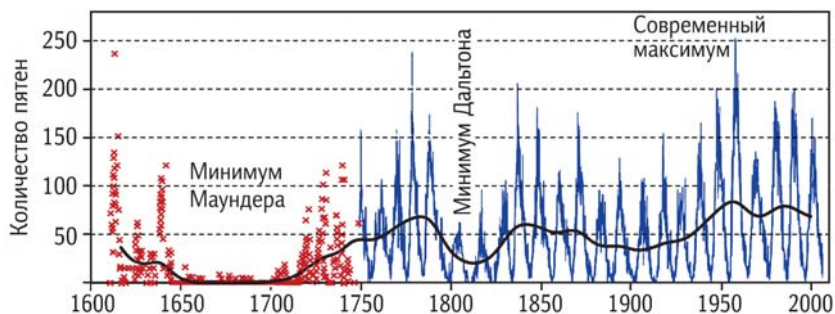


Рис. 10.15. Так менялось количество пятен на Солнце за последние 400 лет наблюдений.

ность Солнца проявляется не только зримо, но и в его радиоизлучении, и в корпускулярном излучении, и в рентгеновском, которые тоже меняются год от года.

Рядом с пятном можно различить светлые прожилки, их обычно называют *факелами*. Физикам это явление тоже должно быть понятно: горячая плазма не смогла прорваться в область пятна, магнитное поле ее туда не пустило, но ей надо куда-то деваться — и она прорывается рядом. Такими факелами окружено каждое пятно, но по краям Солнца они выглядят более контрастно (рис. 10.14).

С начала XVII в., когда Галилей начал наблюдать Солнце, ведется хронология солнечной активности (рис. 10.15). На графике, демонстрирующем изменение во времени числа пятен или их общей площади, довольно четко соблюдается периодичность: примерно 11,5 лет отделяет каждый максимум от последующего максимума солнечной активности, т. е. периоды активности можно прогнозировать. Это важно, потому что в эпоху высокой активности Солнце представляет опасность, особенно для космической техники: чаще возникают неполадки, плотнее становятся верхние слои земной атмосферы и т. п.

С середины XVII по начало XVIII в. (в так называемый минимум Маундера) на Солнце вообще не отмечалось пятен, вспышек, мощных потоков газа, а на Земле это отозвалось малым ледниковым периодом. На старых голландских картинах изображали, как люди катаются по каналам на коньках: в то время это было распространенной забавой. А попробуйте сейчас зимой поехать в Голландию: каналы не замерзают, а если иной раз и замерзнут на неделю, то никто на такой лед выйти не решится.

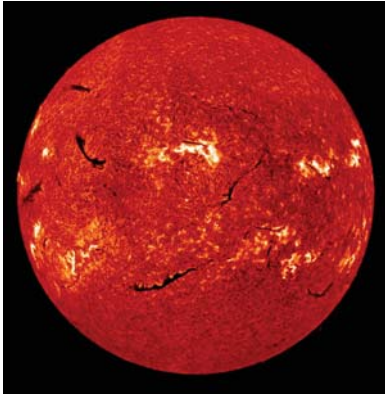


Рис. 10.16. Солнечная поверхность в узком диапазоне линии $H\alpha$.

го диска видны яркие области, в которых водород интенсивно излучает, и темные — в которых он поглощает (рис. 10.16). Понятно, что яркие области более горячие. Но откуда берутся темные? Это взрываются фонтаны газа, которые висят некоторое время над поверхностью Солнца, поддерживаемые магнитным полем. Их называют *протуберанцами*, это относительно холодные и плотные водородные облака, плавающие в разреженной и горячей солнечной атмосфере, и они частично поглощают свет, идущий с поверхности.

И совсем фантастическим Солнце выглядит в отдельных линиях ультрафиолетового диапазона, но такие портреты получаются только со спутников: до поверхности Земли излучение длиной волны менее 300 нм не доходит. В белом свете Солнце кажется спокойным, но в линии излучения ионизованного железа та же самая поверхность выглядит совсем по-другому. На синтетическом портрете, сложенном из нескольких спектральных линий, многое можно увидеть одновременно: тут и активные области, и выбросы-протуберанцы, и потоки газа в солнечной короне, и отдельные яркие точки, которых раньше не замечали вообще (рис. 10.17). Такие снимки рассказывают нам о том, как функционирует эта звезда на поверхности.

Особенно интересно получается, если делать снимки непрерывно и потом складывать из отдельных кадров «мувики». Так, один из старейших орбитальных телескопов, SOHO, уже 20 лет летает в космосе и несколько раз в час фотографирует Солнце через фильтр, пропускающий линии излучения водорода. Просматривая серии таких снимков, мы видим вспышки и протуберанцы в развитии, а так-

Когда мы фотографируем не в широком диапазоне излучения, а выделяем из всего спектра одну узкую спектральную линию, получаются довольно интересные портреты. Например, если наблюдать Солнце сквозь интерференционно-поляризационный фильтр, который пропускает свет только в окрестности линии $H\alpha$ (соответствующей переходу электрона в атоме водорода с 3-го на 2-й энергетический уровень), то на фоне однородной поверхности солнечно-

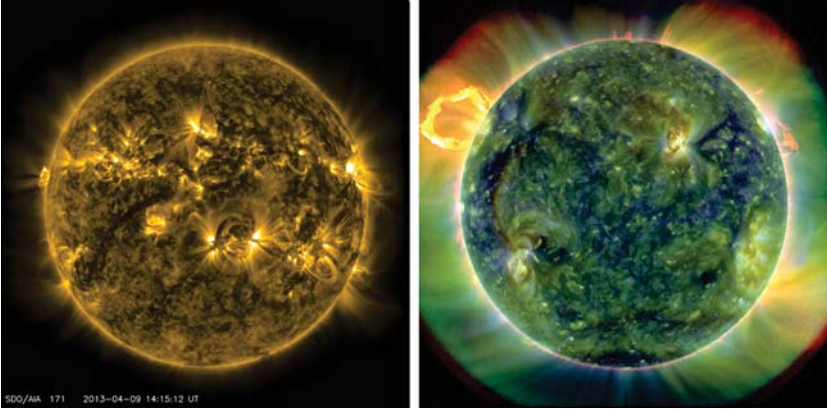


Рис. 10.17. Слева: Солнце 9 апреля 2013 г. в линии восьмикратно ионизованного железа Fe IX (17,1 нм). Справа: Солнце 30 марта 2010 г. в линиях He II (30,4 нм) и высокоионизованного железа. Фото: Solar Dynamics Observatory, NASA.

же вращение звезды. Солнце вращается не особенно быстро: примерно за 27 суток оно делает один оборот вокруг своей оси. Но есть звезды, которые оборачиваются за несколько часов. Причина медленного вращения Солнца в том, что в процессе формирования нашей Солнечной системы планеты «отобрали» у своей звезды момент

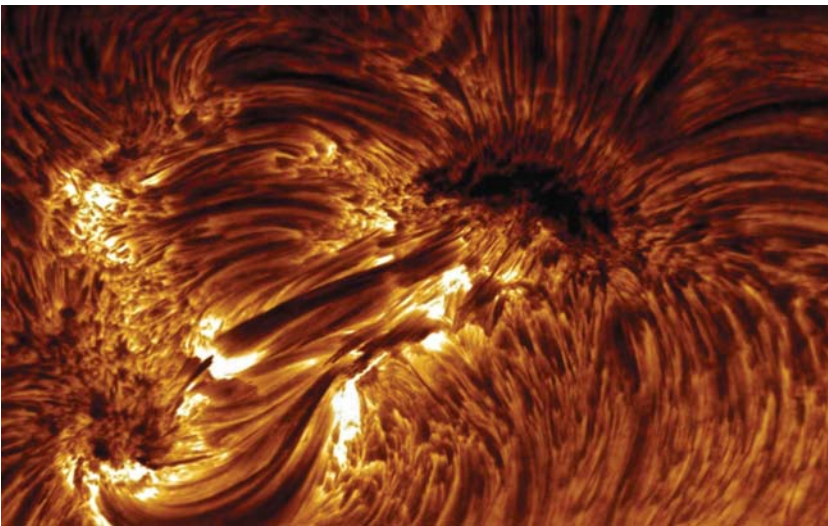


Рис. 10.18. Структура магнитного поля Солнца в области солнечного пятна детально «обрисована» потоками ионизованного газа.

импульса, так что полный момент Солнечной системы в основном принадлежит планетам и складывается из их орбитального движения, прежде всего движения массивного Юпитера. Поэтому если мы видим, что какая-то звезда быстро вращается, то планет у нее, скорее всего, нет.

Детальный снимок окрестности солнечного пятна, сделанный в области одной спектральной линии ионизованного железа, хорошо показывает структуру магнитного поля (рис. 10.18). Насыпанные на картонку железные опилки при поднесении снизу магнита выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля — точно так же ориентируются и потоки плазмы вокруг пятен, представляющих собой магнитные полюсы. Таким образом, мы можем непосредственно изучать магнитные поля и поведение газа в этих магнитных полях. Поля там неслабые, порядка тысячи гауссов. В принципе такую напряженность можно получить и на Земле, но это нелегко. А тут у нас, можно сказать, бесплатная физическая лаборатория, в которой можно наблюдать и изучать магнитную газодинамику.

Как правило, протуберанцы спокойные. Они приподнимаются магнитным полем, еще немного свет на них давит снизу, т. е. получается магнитная ловушка, в которой висит плазменное облако; оно остывает — и тогда мы его видим. Иногда газ все-таки покидает поверхность Солнца, и его потоки устремляются из фотосферы в более



Рис. 10.19. Выброс протуберанца 3 февраля 2016 г. Фото: NASA.

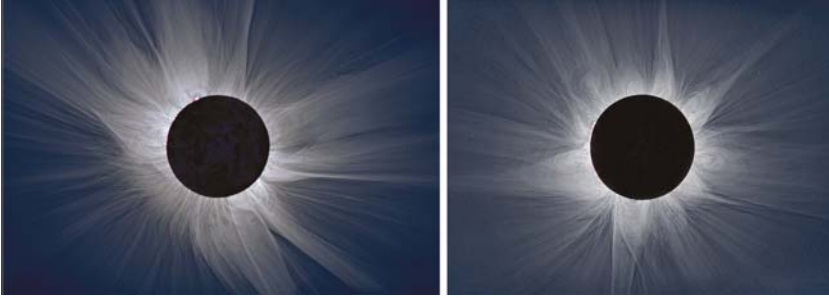


Рис. 10.20. Солнечная корона, сфотографированная во время полных солнечных затмений 2015 г. (слева) и 2012 г. Фото: Милослав Друкмюллер (Miloslav Druckmüller).

высокие слои атмосферы — хромосферу и корону. Корону мы видим редко, потому что она хоть и очень горячая, более миллиона градусов, но очень разрежена и поэтому света дает мало. Только во время солнечного затмения, когда солнечный диск закрыт Луной, мы замечаем, что у Солнца атмосфера очень протяженная и динамично меняющаяся: потоки газа вырываются из нее довольно интенсивно. На хороших снимках солнечного затмения мы прослеживаем корону очень далеко, и она каждый раз разная, потому что меняется активность в разных областях Солнца.

А теперь сопоставьте известные вам данные: поверхность Солнца нагрета всего до 5–6 тысяч градусов, но отходим дальше в холодный космос — и вдруг миллионы градусов. Странная картина, правда? Вроде бы тепло течет от нагревателя к холодильнику, а поверхность Солн-



Рис. 10.21. В фотосфере Солнца постоянно происходят «нановспышки» с относительно небольшим выделением энергии, около 240 Мт ТНТ. Они существенно подогревают солнечную корону.



Рис. 10.22. Протуберанцы на Солнце. Фото: NASA, 2010 г.

ца — это и есть холодильник по сравнению с ядром. Что приносит туда энергию, что нагревает корону?

До сих пор выдвигали разные гипотезы для объяснения необычно высокой температуры газа в короне — и звуковые волны, и магнитные. Лишь недавно астрофизики поняли, откуда у короны такая высокая температура: причиной являются микровспышки на поверхности

Солнца, малюсенькие яркие точки в области контакта между всплывающими в виде гранул потоками газа (рис. 10.21). Но «микро» такая вспышка лишь в масштабе всего Солнца, а абсолютная величина энергии каждой вспышки — порядка сотни мегатонн тринитротолуола (ТНТ). Для сравнения: энергия взрыва самой мощной бомбы за всю историю человечества (водородной) — 50 мегатонн (это была наша бомба, отечественная). А тут — сотни мегатонн, тем не менее мы их называем «нановспышками», потому что на Солнце они почти не заметны.

Вспышка выглядит так: магнитные поля сжимают плазму, от этого она за короткое время сильно разогревается. По сути, происходит взрыв магнитной бомбы, на поверхности Солнца возникает возмущение, от которого расходятся тяжелые (иногда физики говорят — гра-

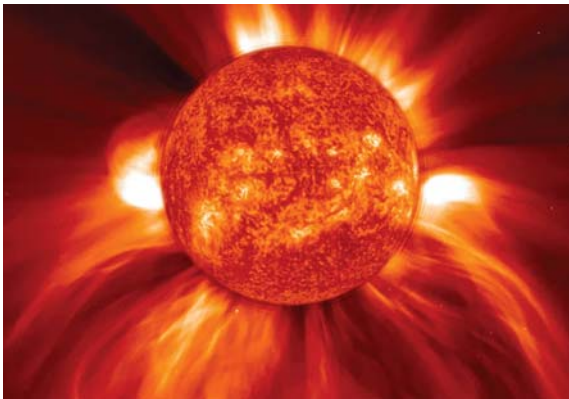


Рис.10.23.Корональный выброс массы на Солнце 8 января 2002 г. Фото космической обсерватории SOHO (NASA, ESA).

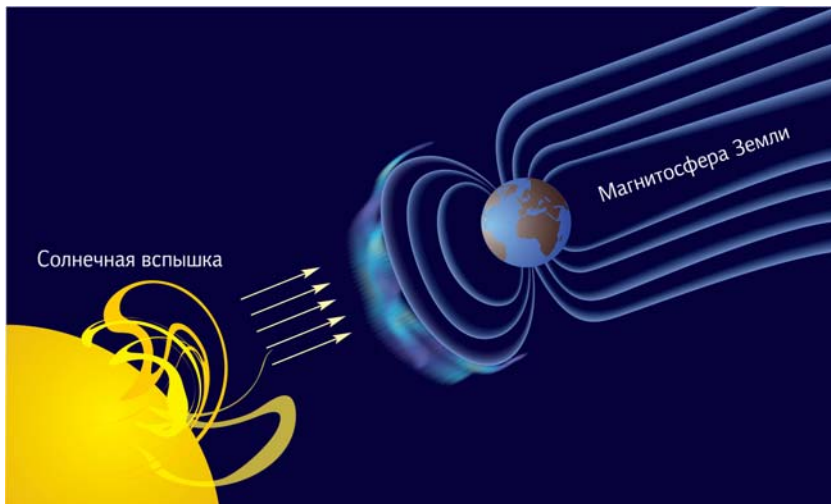


Рис. 10.24. Схема образования полярного сияния.

витационные) волны, подобные волнам на поверхности воды. Вспышка как бы стукнула по поверхности – и пошла волна, типичное цунами. В каждой такой вспышке выделяется достаточно энергии, чтобы нагреть большой кусок плазмы и выбросить его с поверхности. Не обязательно насовсем: он может взлететь и потом упасть – ведь от



Рис. 10.25. Фото полярного сияния, сделанное астронавтом ЕКА А. Герстом с борта Международной космической станции. Источник: ESA/NASA.

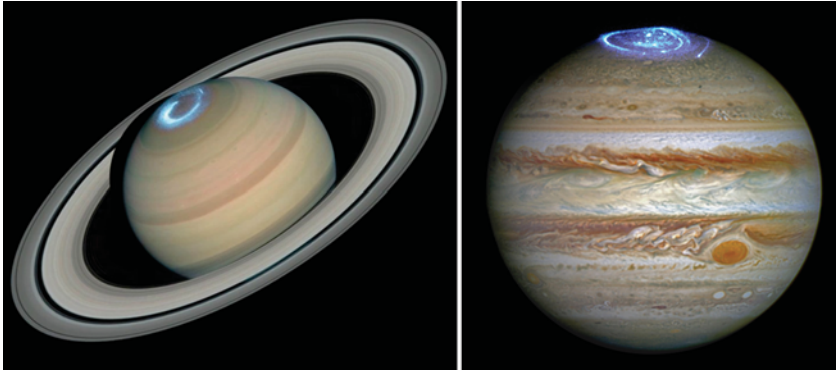


Рис. 10.26. Полярное сияние на Сатурне и Юпитере. Здесь ультрафиолетовые снимки полярных сияний совмещены с оптическими снимками планет. Фото: «Хаббл», NASA.

Солнца оторваться нелегко (рис. 10.22). Бывает, что облако выбрасывается со второй космической скоростью — это называют *корональными выбросами массы*, — и вещество летит в разные стороны. Если комета сталкивается с таким выбросом, у нее может оторвать хвост. Правда, тут же вырастет новый, как у ящерицы, потому что ядро кометы постоянно испаряется.

Налетают солнечные выбросы и на Землю. Когда такое плазменное облако обрушивается на нашу атмосферу, мы наблюдаем полярное сияние (рис. 10.25). Для нас эти события важны, поэтому за солнечными чудесами сегодня следит множество спутников. Полярное сияние также возникает и на Юпитере, и на Сатурне (рис. 10.26), и даже на Уране.

