

Рис. 5.7. Кривая роста для атмосферы Солнца. N — число атомов на луче зрения, f — сила осциллятора спектральной линии, определяемая как эффективное число классических осцилляторов, дающее полное сечение поглощения в линии (проинтегрированное по профилю линии): $\int_0^\infty \sigma(\nu) d\nu = (\pi e^2 / m_e c) f$. Сила осциллятора представляет собой квантово-механическую поправку к классической теории.

подробно рассматриваются, например, в книге В. В. Соболева «Теоретическая астрофизика».

5.8.4. Эмиссионные линии в спектрах звезд

Эти линии могут рождаться только в том случае, когда свет излучается прозрачным газом. Они свидетельствуют о наличии газовой оболочки (газовых струй) в окрестности звезды. Если оболочка расширяется или сжимается, то частоты эмиссионных линий из-за доплеровского сдвига могут заметно отличаться от частот линий поглощения тех же элементов в спектре звезды. Так, в случае расширяющейся газовой оболочки вокруг звезды (истечение звездного ветра, сброс оболочки при вспышках новых звезд и т. д.), возникающие в ней линии поглощения из-за эффекта Доплера оказываются смещенными в голубую область спектра относительно эмиссионных линий оболочки (т. н. профиль типа P Cyg).

5.9. Солнце как ближайшая звезда

5.9.1. Общие характеристики

Выше мы неоднократно иллюстрировали физические принципы строения стационарных звезд и их атмосфер на примере наше-

го Солнца. В этом разделе более детально рассмотрим основные наблюдаемые характеристики Солнца. Основные физические параметры Солнца приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Основные характеристики Солнца

Параметр	Значение
Масса	$2 \cdot 10^{33}$ г
Светимость	$4 \cdot 10^{33}$ эрг/с
Видимая звездная величина	$m_B = -26.3$
Абсолютная звездная величина	$M_B = +5.47$
Радиус	$7 \cdot 10^{10}$ см
Спектральный класс	G2V
Средняя магнитная индукция	~ 1 Гс
Магнитная индукция в пятнах	$\gtrsim 300$ Гс
Эффективная температура	5800 К
Средняя плотность	1.4 г/см ³
Период вращения на экваторе:	
синодический	27.3 сут.
сидерический	25.4 сут.

Внутреннее строение Солнца, непрерывный спектр и спектральный класс соответствуют звезде главной последовательности с возрастом около 5 млрд. лет. Но это — единственная звезда, в которой возможно детальное изучение всех слоев атмосферы. Особый интерес изучение Солнца представляет в связи с влиянием изменяющейся солнечной активности на земные процессы. Известно три канала таких влияний: коротковолновое излучение активных областей, космические лучи и усиление солнечного ветра (корональные выбросы плазмы, ответственные за магнитные бури на Земле).

Наибольшее влияние солнечной активности испытывают внешние, ионизованные слои земной атмосферы, но опосредованно активность Солнца сказывается на многих явлениях живой и неживой природы — от роста нестабильности атмосферной циркуляции до увеличения частоты сердечно-сосудистых кризов. Отдельные звенья сложных цепочек, обуславливающих связь земных явлений с активностью Солнца, пока плохо изучены.

Переменность Солнца. Можно сказать, что переменность Солнца присутствует на различных масштабах времени — от вековых (11-летний цикл и более длительные вариации) до нескольких минут (последнее — при солнечных вспышках). В оптическом диапазоне мощность излучения в непрерывном спектре постоянна в пределах 0.1%. На Землю от Солнца приходит (без учета потерь в атмосфере) 1367–1368 Вт/м² в зависимости от фазы активности (солнечная постоянная). Небольшие случайные изменения регистрируемого от Солнца потока могут также быть связаны с прохождением по диску пятен и более горячих светлых областей — факелов. Однако Солнце — это сильно переменная звезда в гамма, рентгеновском и радиодиапазонах, где температура излучения иногда на несколько порядков превосходит эффективную температуру. Эта переменность связана с активными областями атмосферы Солнца. Общий поток гамма или рентгеновского излучения в годы минимума и максимума активности может различаться более чем на порядок.

Со временем и радиус, и поток излучения от Солнца будут расти со скоростью несколько процентов за миллиард лет, пока оно не сойдет с главной последовательности. После этого изменения параметров Солнца станут более быстрыми.

5.9.2. Особенности фотосферы, хромосферы и короны

Фотосфера. Основные наблюдаемые детали фотосферы — пятна, гранулы, факелы. На любой фотографии Солнца в видимых лучах бросается в глаза потемнение диска к краю. Это результат радикального градиента температуры, благодаря которому на краю диска оптическая толщина $\tau \approx 1$ соответствует более холодным поверхностным слоям Солнца. Видимые детали фотосферы связаны с наличием под ней конвективной зоны. Происхождение пятен вызвано торможением конвективных потоков в областях «выноса» из глубин магнитных трубок силовых линий. Гранулы — это выход мелких короткоживущих конвективных потоков, их характерный размер $\sim 2''$ (1500 км). Более масштабные потоки не доходят до фотосферы, но проявляют себя как крупномасштабная грануляция (супергрануляция), наиболее отчетливо заметная в хромосфере (хромосферная сетка) по наблюдениям в сильных спектральных линиях. Характерный размер супергранул — 30 тыс. км, преимущественное движение вещества на вершине потока — от центра к краям, характерное время жизни ячеек — сутки.

Все надфотосферные слои атмосферы представляют собой плазму, в которой плотность энергии магнитного поля $B^2/8\pi$ много больше плотности тепловой энергии $(\rho/m_p)kT$. Поэтому движение газа диктуется полем и происходит (если это не мощный выброс) вдоль линий магнитной индукции. Из-за вмороженности магнитного поля, плазма, покидающая Солнце, уносит с собой петли поля. Этим определяется, например, характер взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли или ионизованным газом кометных хвостов.

Хромосфера (до 3–10 тыс. км). Хотя хромосфера не затрагивается конвекцией, ее температурное поле определяется звуковыми волнами, порождаемыми глубинными конвективными потоками. Важнейшей особенностью хромосферы является рост температуры с высотой и неоднородная структура (струи более плотного газа поднимаются и опускаются, образуя своеобразную пенную структуру). Хромосфера и нижняя корона — это еще и области зарождения солнечных вспышек. С физической точки зрения, особенности хромосферы и короны обусловлены тем, что из-за низкой плотности газа ρ плотность энергии магнитного поля превалирует над плотностью тепловой и механической энергии. Поле возрастает к границам ячеек супергрануляции. Там же — сильнее нагрев газа.

Корона. Это неоднородная и нестационарная, самая внешняя часть солнечной атмосферы, состоящая из полностью ионизованного газа (за исключением наиболее трудно ионизируемых тяжелых ионов). Механизм излучения короны — собственное тепловое излучение плазмы (в оптике — это линии высокоионизованных атомов, вплоть до [FeXVII]), томсоновское рассеяние оптического света Солнца, рассеяние на межпланетной пыли. К структурным элементам короны относят корональные лучи и корональные дыры (более разреженные, темные области в рентгене). Над активными областями в рентгеновских лучах видны яркие пятна — результат нагрева плазмы до $\sim 10^7$ К. Вспышки на Солнце могут породить корональные выбросы вещества, навсегда покидающего Солнце. Внешняя корона переходит в солнечный ветер. Его параметры в околоземном пространстве (в спокойном состоянии Солнца) таковы: скорость — около 400 км/с, концентрация электронов — несколько частиц в кубическом сантиметре.

Протуберанцы — это крупномасштабные уплотнения плазмы в хромосфере и короне ($n_e = 10^{10} - 10^{11}$ см⁻³), обычно имеющие фор-

му дуг. Температура протуберанцев около 10^4 К. Их форма, устойчивость и сравнительная долгоживучесть обусловлены вмороженностью магнитного поля. За исключением короткоживущих активных протуберанцев, основное направление движения газа в них — вниз, к Солнцу. Это означает, что они возникают как результат уплотнения газа в разреженных атмосферных слоях, его последующего остывания и скатывания вниз по линиям магнитной индукции.

Магнитное поле. Солнце — многополюсный магнит, причем конфигурация поля в атмосфере непрерывно меняется. Поле концентрируется в активных областях, а вне их — к границам супергранул. При среднем значении $\langle B \rangle \sim 1$ Гс полный магнитный поток Солнца в течение 11-летнего цикла активности меняется в 4–5 раз, причем преобладание определенной полярности в северном и южном полушариях меняются с каждым последующим циклом. Магнитное поле энергетически подпитывается конвективным и турбулентным движением плазмы под фотосферой — там, где плотность энергии движения газа превалирует над плотностью энергии поля. Дифференциальное вращение Солнца стремится вытянуть линии поля параллельно экватору, увеличивая при этом энергию поля, а конвективные потоки выносят силовые линии поля на поверхность, где его энергия становится преобладающей. Возникает тот комплекс явлений, который называют *образование активной области* (пятна, факелы, хромосферный прогрев, протуберанцы). Но высшим проявлением солнечной активности являются солнечные вспышки.

Солнечные вспышки. В областях хромосферы и нижней короны, где благодаря всплыванию магнитных петель возникают очень крутые градиенты магнитного поля, происходит солнечная вспышка — своего рода сильный разряд, когда за короткое время поле и его градиент уменьшаются, геометрия поля сильно упрощается, а его энергия переходит частично в локальный нагрев плазмы (с последующим свечиванием), частично — в энергию ускоренных протонов и электронов с $E \approx 10^8$ – 10^9 эВ, а частично — в кинетическую энергию коронального выброса, который за 1–2 суток может достичь Земли и вызвать возмущение ионосферы и магнитосферы планеты. Типичная энергетика сильных вспышек составляет $\sim 10^{32}$ эрг, продолжительность $\sim 10^3$ с, температура плазмы в области вспышки достигает 10^7 – 10^8 К. Подробнее о физических процессах, сопровождающихся вспышками на Солнце, можно прочесть в монографии Б. В. Сомова «Космическая электродинамика и физика Солнца», МГУ, 1993.

5.9.3. Гелиосейсмология

Гелиосейсмология изучает распространение в недрах Солнца колебаний (звуковых, акустических) с самыми различными длинами волн (различные моды колебаний) — от нескольких тысяч километров и длиннее. Эти волны возбуждаются конвективными потоками. Обнаружение звуковых колебаний и их интерпретация приходится на 1960–1970-е годы. Звуковые колебания распространяются и вверх, в хромосферу и корону (где их энергия диссипирует и поддерживает высокую температуру разреженных слоев), и вниз.

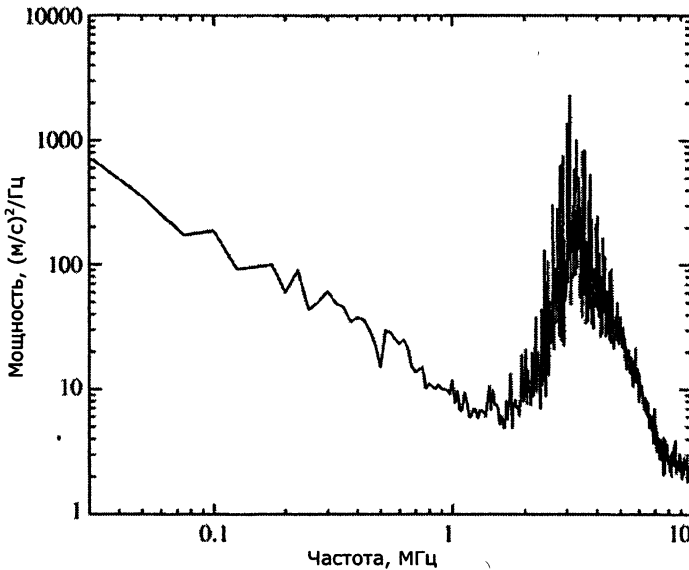


Рис. 5.8. Пример спектра мощности низкого разрешения [(м/с)²/Гц] солнечных колебаний 1996 г. в эксперименте GOLF со спутника SOHO. Частотол линий между 2 и 7 МГц соответствует различным p -модам 5-минутных колебаний Солнца. SOHO/GOLF (ESA&NASA).

Наблюдательную основу гелиосейсмологии составляет анализ волновых изменений яркости и/или доплеровской скорости отдельных областей солнечного диска или диска в целом. Разумеется, наблюдения диска в целом выявляют только крупномасштабные осцилляции с длинами волн, сопоставимыми с радиусом Солнца. Эти измерения требуют наиболее высокой точности. Отдельные реги-

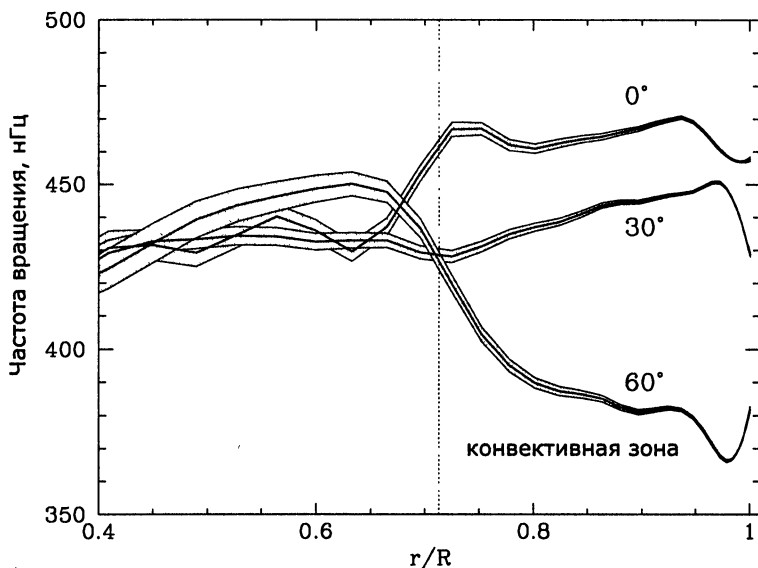


Рис. 5.9. Зависимость частоты вращения внутренних слоев Солнца от глубины и широты, полученная из анализа наблюдений солнечных колебаний в эксперименте MDI со спутника SOHO. Конвективная зона вращается сравнительно однородно вдоль радиуса, но с разной частотой на разных широтах. Между конвективной зоной и лучистым ядром расположен слой с заметным градиентом частоты вращения, в котором, по-видимому, происходит основная генерация крупномасштабного магнитного поля динамомеханизмом. SOHO/MDI (ESA&NASA).

стрируемые моды имеют амплитуду скорости всего в несколько метров или даже сантиметров в секунду, амплитуда колебаний измеряется километрами и десятками километров.

Акустические волны (p -моды), распространяющиеся «снизу» по направлению к поверхности (фотосфере), частично отражаются от нее и уходят в глубинные слои. В недрах Солнца акустические волны почти не поглощаются. Они отражаются на определенной глубине (которая зависит от направления волны) и вновь возвращаются к поверхности. Отражение происходит вследствие возрастания с глубиной температуры плазмы, а следовательно — фазовой скорости звука, причем волна отразится тем глубже, чем более близким к радиальному будет ее первоначальное направление и чем выше частота. Результатом взаимодействия падающих и отраженных волн

является появление стоячих волн. Волновую рябь на поверхности наблюдают как узор, образуемый стоячими волнами с резонансными частотами.

Выявлены многие тысячи гармоник колебаний, большинство которых приходится на область частот вблизи $1/300$ Гц (пятиминутные колебания) (рис. 5.8). По наблюдаемым колебаниям судят об условиях распространения волн в недрах Солнца, а следовательно, о его внутреннем строении. Анализ частоты и горизонтальной длины волны стоячих волн позволяет восстановить условия распространения волн в недрах Солнца, уточнить распределение скорости звука (а следовательно, давления газа и плотности) с глубиной. Правильная модель внутреннего строения Солнца должна не только объяснить равновесное состояние звезды и перенос энергии из ядра наружу, но и наблюдаемый набор частот звуковых колебаний. Анализ колебаний, плюс к этому, дает информацию о вращении глубинных слоев и даже о положении активных областей на невидимой стороне Солнца, как и о других характеристиках солнечного вещества, в том числе и о химическом составе газа в его недрах.

Модель строения Солнца, основанная на данных гелиосейсмологии, прекрасно согласуется с моделью, где поток тепла выделяется в ядре при превращении H в He (достигнута точность 0.1% по температуре). Осложнение возникло лишь с объяснением низкого (примерно втрое ниже расчетного) потока нейтрино от Солнца. Но и эта проблема, по-видимому, решена обнаружением осцилляций нейтрино (см. раздел 5.5.2).

5.10. Задачи

1. Показать, что при фрагментации протозвездного облака массы образующихся фрагментов не могут быть ниже некоторого фундаментального предела, зависящего только от характерной массы $M_{Ch} \approx m_p \cdot (m_{pl}/m_p)^3$ (M.J.Rees, 1976).

Решение. Облако с джинсовской массой сжимается за время свободного падения, при этом повышение плотности и температуры ведет к уменьшению значения джинсовской массы и возможна фрагментация на меньшие массы, которые самостоятельно начинают сжиматься со своим временем свободного падения. Процесс фрагментации происходит до момента загорания водорода в ядре звезды, когда повышение плотности делает сжимающуюся прото-