



ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

ФИЗИКА СОЛНЦА

ЛЕДЕНЦОВ
ЛЕОНИД СЕРГЕЕВИЧ

ФИЗФАК МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН
СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ
ПРОФ. РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ
СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ.
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ
НА [VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

ЕСЛИ ВЫ ОБНАРУЖИЛИ
ОШИБКИ ИЛИ ОПЕЧАТКИ,
ТО СООБЩИТЕ ОБ ЭТОМ,
НАПИСАВ СООБЩЕСТВУ
[VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).



БЛАГОДАРИМ ЗА ПОДГОТОВКУ КОНСПЕКТА
СТУДЕНТКУ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ
ЕМЕЛЬЯНОВУ АНАСТАСИЮ РОМАНОВНУ



Оглавление

Лекция №1. Солнце как звезда	7
Отличие Солнца от других звезд	7
Строение Солнца как звезды. Основные предположения модели	8
Уравнения моделирования звезды. Конвективная неустойчивость.....	10
Показатель ионизации различных веществ. Источник энергии.....	12
Проблема солнечных нейтрино	14
Уравнения состояния	15
Непрозрачность. Конвекция. Калибровка солнечных моделей.....	16
Лекция №2. Гелиосейсмология	19
Преобразование Фурье. Локальная и глобальная сейсмология	19
Доплерограмма. Спектр мощности. Круговые диаграммы	21
Сферическая функция. Собственные частоты	23
Звуковые волны. Закон Дюваля. Результаты гелиосейсмологии.....	27
Вырождение по числу m . Вращение Солнца, региональные течения	30
Лекция №3. Атмосфера Солнца.....	35
Фотосфера.....	35
Хромосфера	36
Корона	43
Спектр Солнца.....	47
Модель атмосферы.....	54
Лекция №4. Солнечные пятна	56
Характеристика и структура солнечных пятен	56
Группы солнечных пятен: формирование. Доплерограмма солнечного пятна	58
Историческая справка.....	60
Классификация пятен. Объяснение их природы.....	61
Механизм понижения температуры. Эффекты Вильсона и Эвершеда. Закон Джоя.....	65
Закон Шпёрера. Закон Хейла. Модель Бэбкока-Лейтона	66
Связь солнечных пятен и солнечных вспышек	68
Лекция №5. Солнечный цикл	71

Историческая справка.....	71
Наблюдения солнечных пятен.....	72
Минимумы солнечной активности. Индексы активности.....	73
Магнитограммы и солнечные вспышки как индикаторы. Изотопный метод.....	75
Особенности солнечной активности. Активные долготы.....	77
Солнечное динамо. Прогнозирование солнечного цикла.....	79
Лекция №6. Солнечные вспышки.....	83
Событие Кэррингтона. Вспышки в разных слоях Солнца.....	83
Магнитное пересоединение. Токовый слой.....	85
Стандартная модель.....	87
Ударные волны. Магнитные ловушки. Основания вспышечных петель.....	90
Фотосферная нейтральная линия. Вспышечная аркада.....	92
Лекция №7. Корональные выбросы массы.....	95
Корональный выброс массы (КВМ): характерные черты.....	95
Проблемы отождествления. Связь с активностью Солнца.....	96
Проявления КВМ и механизм формирования.....	98
Приборы, наблюдающие КВМ. Волновой фронт и ударная волна.....	100
КВМ с облаком. Эффект Форбуша. Геоэффективные долготы.....	101
Продолжительные и импульсные события. Ускорения частиц.....	103
Радионаблюдения КВМ.....	104
Лекция №8. Солнечный ветер.....	107
Плазма и ее характеристики. Частицы солнечного ветра (СВ).....	107
Спутники, изучающие СВ. Спектр мощности МП.....	109
Закон изменения плотности атмосферы. Убегание атмосфер.....	110
Модель Чапмена. Модель Паркера. Давление СВ.....	112
Особенности СВ. Спираль Паркера. Наблюдения.....	116
Гелиосфера. Аппараты "Пионер" и "Вояджер".....	120
Лекция №9. Солнечно-земные связи.....	123
Кратковременные взаимодействия. Магнитосфера Земли.....	123
Геомагнитные индексы. Возмущения различных показателей.....	125

Спутники Земли. Воздействие геомагнитных бурь. Вспышки на звездах	127
Воздействие на климат Земли: оценки и корреляции. Глобальные циклы	129
Энергетический баланс атмосферы. Солнечная постоянная	132
Поглощение в атмосфере. Озоновый слой. Факторы изменения климата	132
Лекция №10. Эволюция Солнца	135
Эволюция Солнца: трек на диаграмме Герцшпрунга-Рассела	135
Эволюция перед главной последовательностью. Изменения параметров	138
Эволюция на главной последовательности. Параметры Солнца	142
Парадокс тусклого молодого Солнца. Нестандартные модели Солнца	144
Активность Солнца как источник энергии. Атмосферное поглощение	147
Лекция №11. Солнечные приборы	149
Наблюдения Солнца из космоса и с Земли	149
Телескоп, спектрогелиограф, магнитограф. Эффект Зеемана	151
Магнитограф Бэбкока. Глобальное магнитное поле	155
Космические наблюдения: использование зеркал	158
Коронографы. Корпускулярное излучение: нейтрино. Радиоастрономия	161
Лекция №12. Экскурсия на солнечный телескоп МГУ	165
Холл ГАИШ: исторические сведения	165
Башня целостата телескопа	166
Шахта телескопа: второй этаж	167
Пункт наблюдения: цокольный этаж. Спектрограф	167
Лекция №13. Физика плазмы: кинетический подход	169
Кулоновский и гравитационный дрейф частицы	169
Градиентный и центробежный дрейф частицы	170
Адиабатические инварианты. Магнитные зеркала и ловушки	172
Механизм ускорения Ферми для КЛ. Столкновения частиц	176
Механизм ускорения частиц за счёт ЭМ волн. Механизм затухания Ландау	178
Ускорение частиц на каскаде волн	180
Лекция №14. Физика плазмы: жидкостный подход	183
Альвеновские и магнитозвуковые волны	183

Наложение волн: ударная волна. Разрывные решения.....	187
Переход ударной волны из одного типа в другой. Диффузионный и дрейфовый механизмы ускорения	191
Пересоединение в плазме: механизм ускорения.....	194



Лекция №1. Солнце как звезда

Отличие Солнца от других звезд

Астрофизика (от др.-греч. «астрон» – звезда) – физика, изучающая эволюцию, поведение, жизнь звезд. Солнце, являясь рядовой звездой, в то же время отличается от всех иных звезд тем, что допускает всестороннее подробное изучение. Эта особенность заметна в четырёх характерных явлениях:

1. *Солнце можно наблюдать с высоким пространственным и временным разрешением во всем диапазоне электромагнитного излучения.* Это позволяет изучать вопросы, связанные и с другими звездами: вспышки (природа ЭМ взрыва), эволюция, внутренние процессы. От звезд мы чаще видим лишь интегральный поток, измененный на своем пути через межгалактическое пространство межзвездным поглощением. Солнце позволяет изучать сложные процессы в своей атмосфере.
2. *Наблюдатель на Земле может принимать корпускулярное излучение:* электроны, протоны, нейтральные частицы, нейтроны, нейтрино. Последние возможно точно идентифицировать как приходящие от Солнца, в отличие от нейтрино, приходящих из космоса, где допустимо лишь предполагать, что было их источником. Заряженные частицы можно увидеть на Солнце как «снег», заполняющий приемник.
3. *Земля и наблюдатели находятся внутри атмосферы Солнца,* поскольку корона Солнца – это обширный объект, простирающийся до земной орбиты. Солнечный ветер также достигает Земли, уходя за пределы орбит планет Солнечной системы, формируя гелиопаузу, где ветер от нашей звезды сталкивается с ветром Галактики. Спутники, отправленные с Земли, находятся в пределах гелиопаузы, где они регистрируют первоначальный набор данных (параметры плазмы, содержание ионов, напряженность магнитных полей) для дальнейшего анализа и изучения эволюции.
4. *Возможность заглянуть в прошлое Солнца.* Звезда Солнечной системы оставила на Земле своего рода «летописные записи» своей активности, например, ледяные керны становятся индикаторами изменения химии атмосферы Земли под влиянием Солнца. Вещества оседают на льдах и позволяют изучать эволюцию планеты и звезды за тысячелетия. Годовые кольца деревьев также являются индикаторами Солнечной активности, в частности окаменелые деревья.

Строение Солнца как звезды. Основные предположения модели

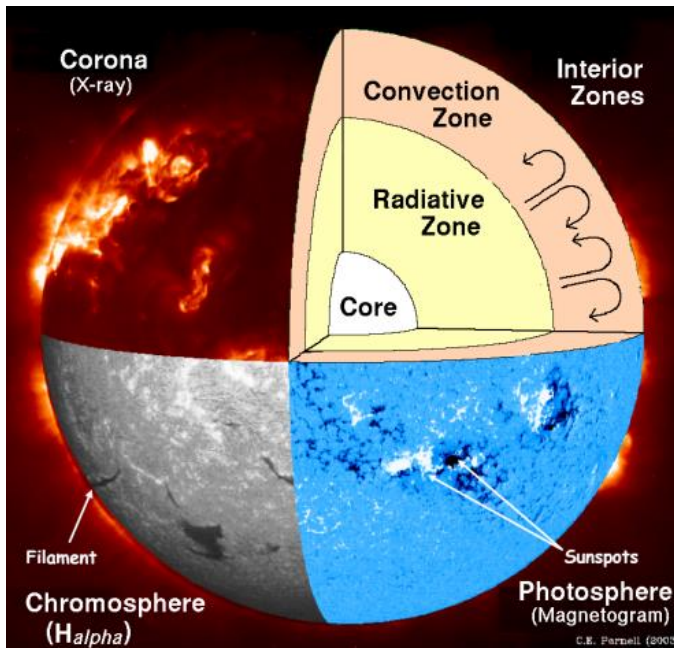


Рисунок 1.1 Строение Солнца

Верхние слои Солнца(☉):

- Фотосфера
- Хромосфера
- Корона
- Солнечный ветер

Внутреннее строение Солнца (требует моделирования, определяется эволюцией звезды):

- Солнечное ядро – полностью обеспечивает энергией, составляет $\frac{1}{4} R_{\odot}$ и $\frac{1}{2} M_{\odot}$
- Зона лучистого переноса
- Конвективная зона Солнца

Рассмотрим внутреннее строение Солнца, основываясь на двух книгах: Эрик Прист «Магнитогидродинамика Солнца» 2014 г. и Эдвард Гибс «Спокойное Солнце» 1973 г.

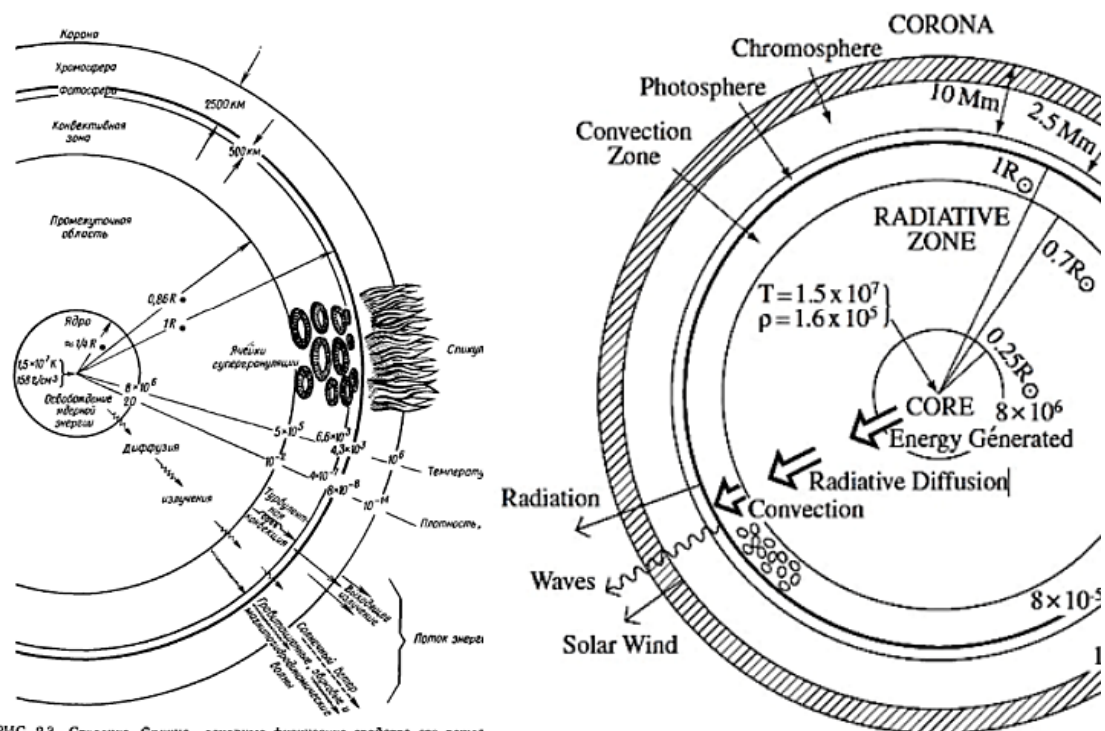


РИС. 9.3. Строение Солнца, основываясь на физических свойствах его частей

Рисунок 1.2 Слева – строение Солнца (Гибс), справа – строение Солнца (Прист).

За прошедшее время почти ничего не изменилось, кроме размера конвективной зоны: треть радиуса Солнца против меньшего у Гибса. Модели звездной эволюции не меняются с тех пор как появилось объяснение того, почему звезды горят – из-за ядерных реакций в центре звезд. За почти 100 лет модели стали хорошо проработанными, однако существуют нюансы, которые можно наблюдать на Солнце и невозможно описать в стандартных моделях звездного строения, в частности это размер конвективной зоны.

Солнце является совершенной типовой звездой, т.е. находящейся на главной последовательности распределения Герцшпрунга-Рассела. В своем эволюционном развитии находится на стадии зрелости. Около 5 млрд. лет назад начались ядерные реакции в звезде, примерно через столько же лет они прекратятся.

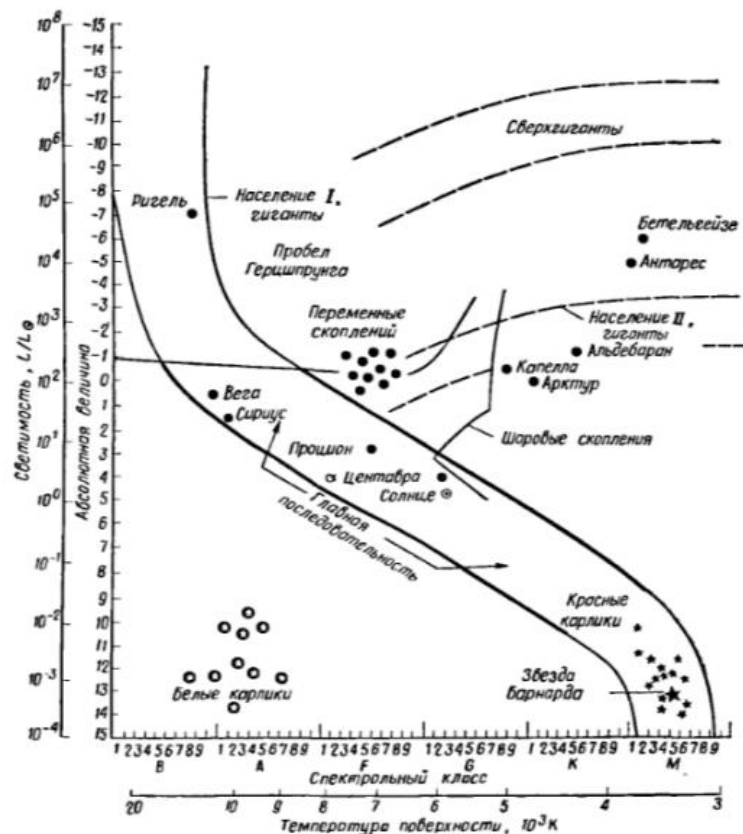


Рисунок 1.3 Диаграмма Герцшпрунга-Рассела (с изображением на ней Солнца – на главной последовательности)

Основные предположения, характерные для модели строения Солнца:

1. Макрофизика

- Отсутствие вращения
- Отсутствие магнитного поля внутри, значит и нет оси, вдоль которой был бы градиент свойств
- Сферическая симметрия
- Отсутствие гидродинамических неустойчивостей, за исключением конвективной зоны в приповерхностных слоях
- Упрощенная модель конвекции
- Отсутствие потери массы на звездный ветер

2. Микрофизика

- Диффузия и оседание элементов

- b. Скорости ядерных реакций
- c. Степени вырождения частиц

Уравнения моделирования звезды. Конвективная неустойчивость

Уравнение баланса давлений

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{Gm\rho}{r^2}$$

Данное уравнение показывает, с какой силой Солнце притягивает к себе свои слои, с этой же силой слои друг друга расталкивают гидродинамически. Газодинамическое давление равно гравитационному притяжению.

Масса не исчезает и не берется из ниоткуда

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

Закон сохранения энергии

$$\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \left[\rho \epsilon - \rho \frac{d}{dt} \left(\frac{e}{\rho} \right) + \frac{p}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \right],$$

где L — светимость, ϵ — энергия, выделяющаяся в ядерных реакциях, e — внутренняя энергия вещества (термодинамические изменения в веществе).

Производная по времени содержится именно в этом уравнении, поэтому, воздействуя на энергетические характеристики Солнца, происходит эволюция его внутреннего строения (изменение количества элементов в ядре).

Распределение температуры с высотой

$$\frac{dT}{dr} = \nabla \frac{T}{p} \frac{dp}{dr}, \quad \nabla = \frac{d \ln T}{d \ln p},$$

здесь ∇ — «градиент температуры». Определяет, где у Солнца начинается лучистый перенос, а где — конвекция.

Если в объекте преобладает перенос тепла путем излучения, то есть лучистый перенос, тогда такой градиент можно вычислить с помощью формулы лучистого градиента:

$$\nabla_{rad} \equiv \frac{3}{16\pi a \tilde{c} G} \frac{\kappa p L(r)}{T^4 m(r)},$$

где T^4 – появляется в выражении из закона Стефана-Больцмана, k – непрозрачность, показывает, как вещество внутри Солнца способно перехватывать тот свет, который излучился в глубине.

Лучистый градиент взаимодействует с адиабатическим, при котором вещество внутри гравитационного поля может быть стационарным, стабильным:

$$\nabla_{ad} = \frac{\gamma - 1}{\gamma}$$

Если градиент температуры превысит адиабатический, то начнется конвекция. Условие Шварцшильда для конвективной неустойчивости

$$\frac{d \ln T}{d \ln p} \equiv \nabla > \nabla_{ad} \equiv \left(\frac{d \ln T}{d \ln p} \right)_{ad}$$

Смысл условия: рассматривается некоторый объем жидкости/газа внутри Солнца, который получает энергию из нижних слоёв и переизлучает её на внешние слои. Из-за того, что этот слой получил энергию с внутренних слоев, он начинает разогреваться и расширяться, из-за этого окружающее вещество стремится его вытолкнуть.

Если такой объем жидкости будет излучать энергию быстрее изменения температуры в процессе подъема, то такой объём жидкости не сможет высоко всплыть, он быстрее остынет. Такое условие будет соответствовать обратному знаку $\nabla < \nabla_{ad}$. Как только объем всплывает быстрее, чем он остывает, то эффективность передачи тепла выше по причине всплытия, а излучения. Вниз будут выталкиваться более нагретые, вверх – остывшие. Запущен процесс конвекции.

В конвективном слое будет работать не лучистый градиент температуры, а конвективный. Он **не** равен адиабатическому, несмотря на то, что объем жидкости поднимается, всё же он продолжает излучать и два процесса работают в таком случае одновременно: и лучистый, и адиабатический. Конвективный градиент описывается как локальный процесс, зависящий от макропараметров:

$$\nabla = \nabla_{conv}(\rho, T, L, \dots)$$

Причины конвективной неустойчивости

- **Рекомбинация электронов с ядами и ионами, вследствие чего происходит рост непрозрачности.** Постепенно поднимаясь, объем вещества из глубин Солнца становится все менее ионизованным, происходит все больше рекомбинаций. При появлении ионов и атомов становятся видны линии

поглощения – энергетические условия при которых ион поглощает излучение из недр (непрозрачность).

- **Стремление эффективного показателя адиабаты к 1 за счёт ионизации и возбуждения атомов.** Показатель адиабаты показывает, сколько у частицы есть степеней свободы для поглощения энергии. Под степенью свободы стоит понимать все возможности куда можно потратить пришедшую к частице энергию; если число степеней свободы неограниченно увеличивается, то

$$\gamma = \frac{i + 2}{i} \rightarrow 1, \text{ откуда } \nabla_{ad} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \rightarrow 0$$

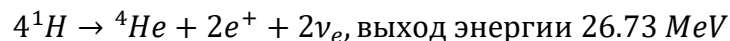
Более эффективной причиной всё же является рекомбинация электронов с ростом непрозрачности.

Существует помимо конвективного и лучистого переноса тепла еще и теплопроводность, однако для звезд она не играет никакой роли. Бывают такие условия внутри звезд, когда её всё же стоит учитывать.

Показатель ионизации различных веществ. Источник энергии

В теории звездной эволюции принято, что все элементы представляют собой водород, гелий и металлы (астрономическая терминология). На графике показана степень ионизации водорода, гелия и остальных металлов. Центр Солнца находится в правой части оси $\log T$, поверхность, соответственно, в левой. В центре всё вещество ионизовано. С ионизацией гелия связано образование конвективной зоны на Солнце.

Источник энергии – ядерные реакции. Главная цепочка реакции:



Если процесс слияния отдельных частиц в ядро – это процесс, связанный с сильными взаимодействиями, преобразование протона в нейтроны происходит по каналу слабого. Такой процесс менее вероятен, чем сильное взаимодействие.

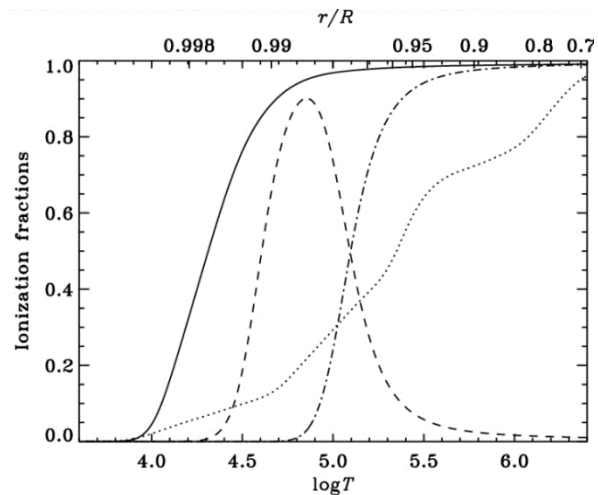
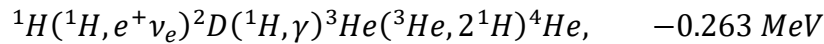


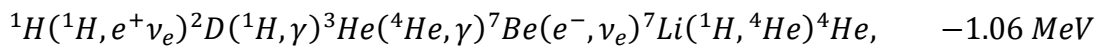
Рисунок 1.4 Показатель ионизации различных веществ. Сплошная кривая показывает долю ионизированного водорода, размытая и пунктирная кривые – долю одиночного и полностью ионизированного гелия соответственно, а пунктирная кривая показывает среднюю степень ионизации тяжелых элементов

Полученный выход энергии может быть по-разному распределен, не вся она уходит в электромагнитное излучение. Часть уносится с нейтрино.

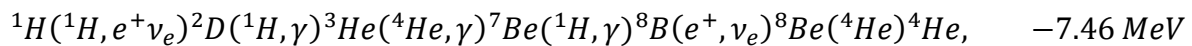
Рассмотрим РР цепочки преобразования одних ядер в другие. На Солнце с разной вероятностью происходит каждая из них. С учётом того, что ${}^1\text{H}({}^1\text{H}, e^+ \nu_e) {}^2\text{D}({}^1\text{H}, \gamma)$ эквивалентно $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{D} + e^+ + \nu_e$, рассмотрим РР-I цикл:



Из РР-I может пойти реакция от ${}^3\text{He}$, тогда это будет РР-II цикл



Из РР-II может пойти реакция от ${}^7\text{Be}$, тогда это будет РР-III цикл



	Общая выработка энергии в центре нынешнего Солнца	Вклад в солнечную светимость
РР-I	23%	77%
РР-II	77%	23%
РР-III	0.2%	0.02%

На звездах также происходят CNO-цепочки: атом углерода выступает в роли катализатора для сборки из 4 протонов одного ядра гелия.

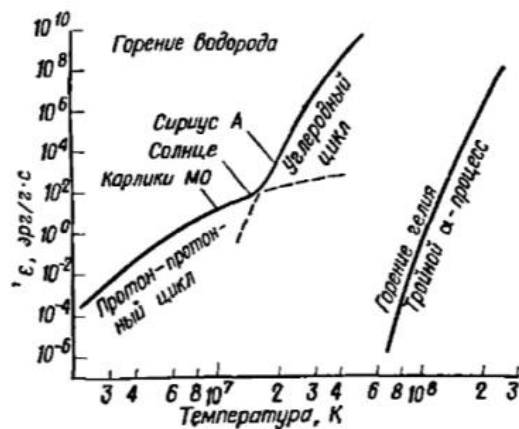
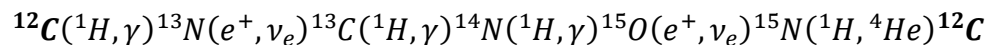


Рисунок 1.5 Диаграмма генерации энергии в ядерных реакциях как функция температуры

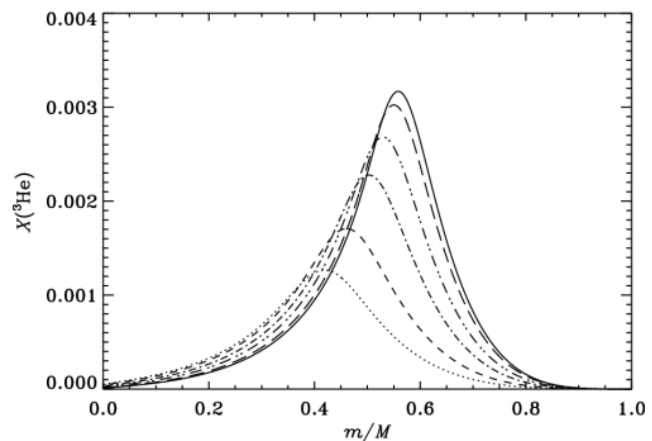


Рисунок 1.6 Эволюция распространенности ${}^3\text{He}$. Сплошная кривая показывает численность в модели современного Солнца, остальные показывают численность в возрасте 0,5, 1,0, 2,0, 2,9 и 3,9 млрд лет соответственно.

Солнечные условия находятся на границе эффективности протон-протонного (чуть ближе, доминирует в ядре Солнца) и углеродного циклов. В процессе ядерных реакции постепенно меняется химический состав звезды.

Проблема солнечных нейтрино

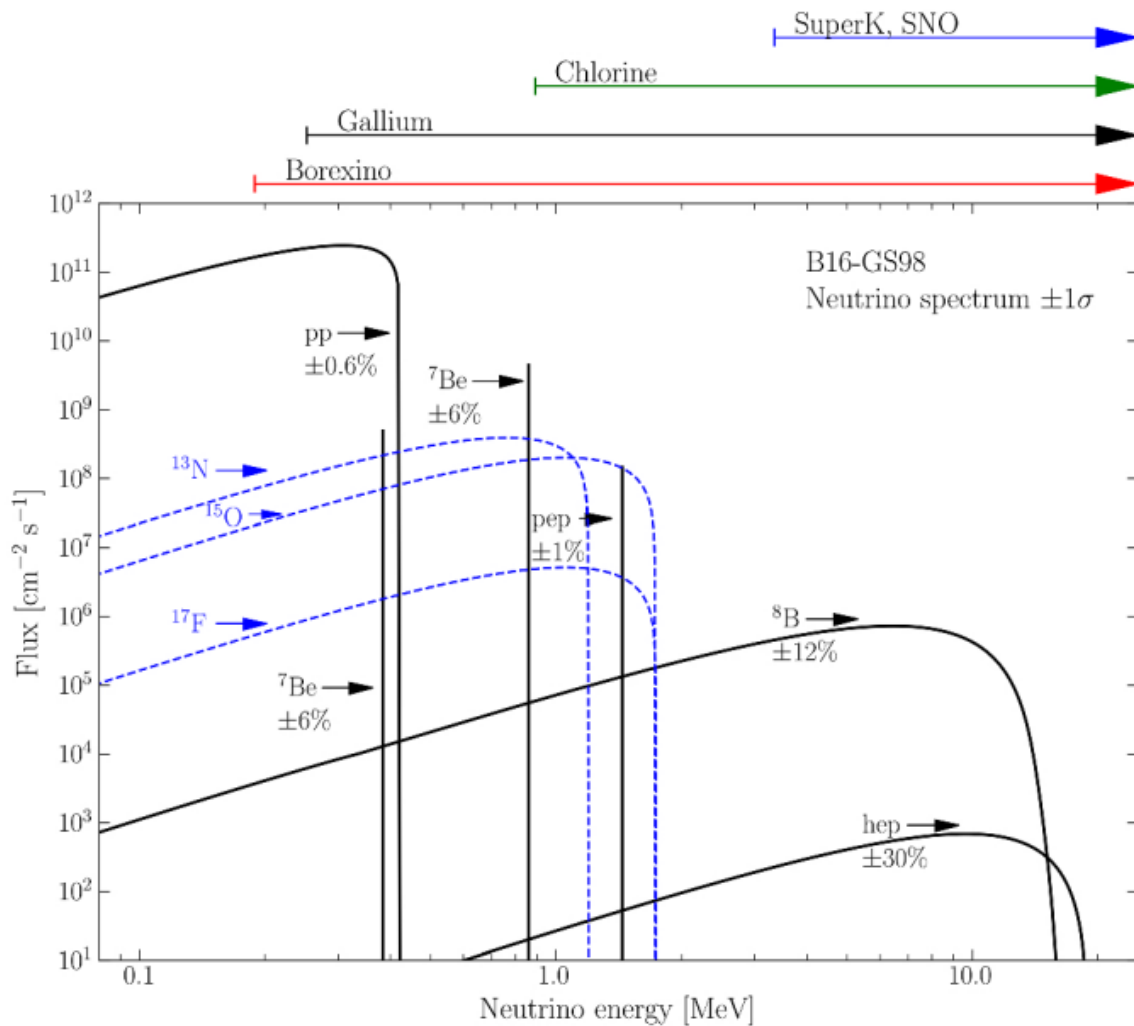


Рисунок 1.7 Распределение энергий, содержащихся в различных сортах нейтрино, образующихся в ядерных реакциях

Солнечные нейтрино можно наблюдать на Земле с помощью нейтринных экспериментов. На графике видно, что борные нейтрино самые высокоэнергичные; hep-нейтрино имеют большую энергию, но вероятность их появления значительно меньше. Различные детекторы имеют разные пороги чувствительности. Разные по своему устройству эксперименты регистрируют разные типы частиц с разной эффективностью.

Способы детектирования нейтрино:

- Радиохимический [хлорные (эксперимент Homestake), галлиевые (эксперименты SAGE, GALLEX)]
- Рассеяние нейтрино на электронах

С первых наблюдений было замечено, что детекторы не добирают по количеству от теоретически предсказанной интенсивности солнечных нейтрино (в 2-3 раза). Проблема нехватки солнечных нейтрино – нейтринные осцилляции.

Уравнения состояния

В звездах чаще всего рассматривают уравнение состояния идеального газа, так как газ ионизован, частицы отдельно друг от друга.

$$p \simeq \frac{k_B \rho T}{\mu m_u}, \quad \gamma \simeq \frac{5}{3}, \quad \nabla_{ad} \simeq \frac{2}{5}$$

Для Солнца важен параметр μ , оказывающий наибольшее влияние на уравнение состояния идеального газа. μ – средняя масса частицы в относительных атомарных единицах массы, он меняется в зависимости от того, сколько в данной точке содержится водорода, гелия и металла, каждая частица которых находится в движении ввиду диффузии и оседания внутри гравитационного поля. Эти два процесса описываются уравнением

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = \mathcal{R}_i + \frac{1}{r^2 \rho} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \rho \left(D_i \frac{\partial X_i}{\partial r} + V_i X_i \right) \right],$$

где X_i – частица, \mathcal{R}_i – скорость образования новых частиц, D_i – коэффициент диффузии, показывает быстроту передвижения частицы среди окружающего пространства, V_i – скорость оседания частицы. Это уравнение описывает, как меняется концентрация частиц. В звёздной эволюции приняты следующие обозначения:

$$H \rightarrow X, \quad He \rightarrow Y, \quad Me \rightarrow Z$$

Из рассуждений о массивных частицах (в числителе) и летающих частицах (в знаменателе) можно получить, что

$$\mu_H = \frac{1}{2}, \quad \mu_{He} = \frac{4}{3}, \quad \mu_{Me} = \frac{2Z}{Z+1} \approx 2$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{X}{\mu_H} + \frac{Y}{\mu_{He}} + \frac{Z}{\mu_{Me}}, \quad \mu = \frac{4}{3 + 5X - Z}$$

На уравнение состояния вещества оказывает влияние:

Давление излучения (доли процента)

$$p_{\text{rad}} = 1/3 a T^4$$

Эффекты общей теории относительности (доли процента) – чем ближе к ядру Солнца, тем ближе тепловая энергия частиц приближается к полной энергии частицы, тем сильнее играют роль релятивистские эффекты

$$x_e = \frac{k_B T}{m_e \tilde{c}^2}$$

Эффект кулоновского взаимодействия (проценты), где d_e – характерное расстояние между частицами

$$\Gamma_e = \frac{E_{\text{кул}}}{E_{\text{тепл}}} = \frac{e^2}{d_e k_B T}, \quad d_e = \left(\frac{3}{4\pi n_e} \right)^{1/3}$$

Квантовые процессы (десятки процентов) – каждая частица имеет волновую характеристику – волну де-Бройля. Частицы на таком расстоянии начинают друг друга расталкивать по принципу Паули. Фермионы не могут занимать одно и то же энергетическое состояние с идеальным набором квантовых чисел, а потому электроны не могут быть упакованы на расстояние ближе, чем длина волны де-Бройля. ζ_e показывает отношение объема, занимаемого λ_e , к объему, занимаемому одной частицей

$$\zeta_e = \lambda_e^3 n_e, \quad \lambda_e = \frac{h}{(2\pi m_e k_B T)^{1/2}}$$

Непрозрачность. Конвекция. Калибровка солнечных моделей

Эффекты непрозрачности связаны с появлением ионов или атомов. Процессы, воздействующие на непрозрачность:

1. **Связанно-связанные переходы**; пролетающий фотон поглощается атомом (или ионом), испускающим затем, при возвращении в прежнее состояние, один или несколько фотонов с частотами, характерными для энергетических состояний (линий) данного атома (или иона).
2. **Связанно-свободные переходы** (фотоионизация); пролетающий фотон поглощается атомом (или ионом), в результате чего один из электронов последнего уходит из связанного состояния и становится свободным. Этот электрон в конце концов рекомбинирует с каким-нибудь ионом, причем излучается фотон или несколько фотонов с частотами, зависящими от энергии электрона и энергетических уровней иона (в континууме или в линиях).
3. **Свободно-свободные переходы**; фотоны (или их часть) поглощаются свободными электронами, за счет чего увеличивается их кинетическая энергия.
4. **Рассеяние**; направление движения фотона (но, как правило, не его энергия) изменяется в результате взаимодействия с электроном или ионом.

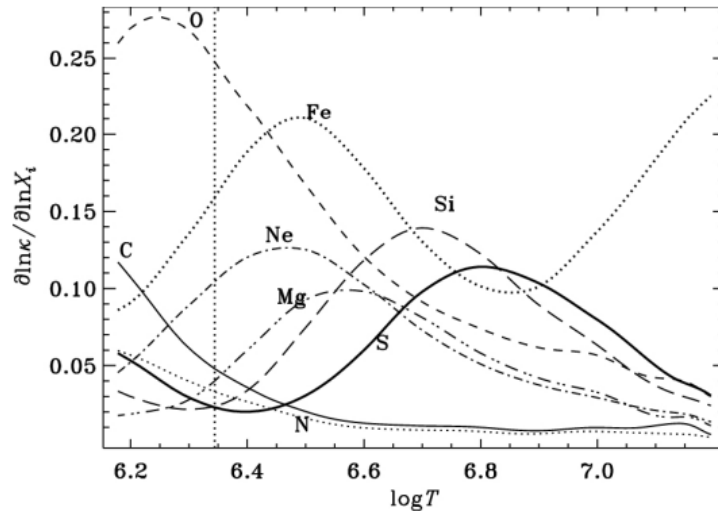


Рисунок 1.8 Степень ионизации различных металлов с глубиной на Солнце. Вертикальная линия – уровень конвективной зоны. Справа – центр Солнца, слева – его поверхность.

В конвективной зоне нужно учитывать теплоперенос двумя процессами: конвективный и лучистый перенос (из-за перемешивания вещества).

$$F_{con} \sim \rho c_p T \frac{l^2 g^{1/2}}{H_p^{3/2}} (\nabla - \nabla_{ad})^{3/2}$$

$$F_{rad} = \frac{4a\bar{c}T^4}{3\kappa\rho} \nabla$$

$$F_{con} + F_{rad} = L/4\pi r^2$$

Этот процесс в моделях часто упрощают до некоторого параметра, называемого длиной перемешивания α_{ML}

$l = \alpha_{ML} H_p$, где l – характерный масштаб перемешивания, H_p – высота однородной атмосферы (высота, на которой плотность вещества падает в e раз). Длина перемешивания α_{ML} характеризует, насколько интенсивно идет конвекция внутри конвективной зоны. Для звезд околосолнечной массы этот параметр несильно варьируется ($\sim 1,5 - 2$).

Все вышеперечисленные параметры и уравнения можно калибровать на солнечных данных. Произведение GM_{\odot} известно достаточно точно, поскольку его можно найти из звездной динамики, из небесной механики по наблюдению движения орбит и планет.

$$GM_{\odot} = 1.32712438 \times 10^{26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-2}$$

Гравитационная постоянная известна менее точно

$$G = 6.67430(15) \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

Масса Солнца, его возраст (радионуклидный анализ метеоритов), светимость, радиус:

$$M_{\odot} = 1.98841 \times 10^{33} \text{ g}$$

$$t_{\odot} = 4.570 \pm 0.006 \times 10^9 \text{ s}$$

$$\mathcal{L}_{\odot}^N = 3.828 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$$

$$\mathcal{R}_{\odot}^N = 6.957 \times 10^8 \text{ m}$$

Из результатов гелиосейсмологии определяются содержание гелия и металличность на поверхности, отсюда же определяется кривая дифференциального вращения Солнца.

$$Y_S = 0.25, \quad Z_S/X_S = 0.0181, \quad \frac{\Omega}{2\pi} = (415.5 - 65.3 \cos^2 \theta - 66.7 \cos^4 \theta)$$

Как происходит калибровка?

Свободные параметры в звездных моделях: $\{p_i\} = \{X_0, Z_0, \alpha_{ML}\}$, где X_0, Z_0 – начальная концентрация водорода и гелия соответственно, α_{ML} – длина свободного перемешивания. Варьируя эти параметры, производится подгонка расчетов под наблюдаемые параметры: $\{o_k\} = \{L_S, Z_S/X_S, R\}$, где L_S – светимость, Z_S/X_S – металличность на поверхности, R – радиус.

Порядковые соотношения

$$\text{Непрозрачность } \kappa \propto Z(1 + X)\rho T^{-3.5},$$

с помощью которой можно определить размер конвективной зоны, который в свою очередь зависит от подбираемого значения длины свободного перемешивания α_{ML} .

$$\text{Светимость } L \propto Z^{-1}(1 + X)^{-1} M^{5.5} \mu^{7.5}$$

Список литературы

1. Эдвард Гибсон “Спокойное Солнце” (1977)
2. Joergen Christensen-Dalsgaard “Solar structure and evolution” \\\ Living Rev. Solar Phys., 18, (2021), 2

Лекция №2. Гелиосейсмология

Гелиосейсмология изучает глобальные колебания Солнца как газового шара. На Земле существуют детекторы колебаний, считывающие колебания поверхности Земли, однако на звезде такой детектор поставить невозможно. Колебания на Солнце определяются из визуальных наблюдений. Существует математический аппарат, позволяющий изучать такие колебания.

Преобразование Фурье. Локальная и глобальная сейсмология

Преобразование Фурье - основной метод, используемый для изучения глобальных колебаний Солнца. В нем любую непрерывную функцию, зависящую от времени, можно разбить на набор составляющих её гармонических колебаний, разные колебания с разными частотами вносят отличный по значимости вклад в эту функцию.

Если функция такова, что ее можно описать конечным набором гармонических колебаний (амплитуд), то её можно восстановить из набора соответствующих коэффициентов. Такие преобразования применимы не только к временным, но и к пространственным рядам, например, преобразования Фурье применяются в методе сжатия изображений, программах звуко- и видеообработки.

При наблюдениях Солнца работа производится в ограниченном пространственном и временном диапазоне. У любого аппарата, наблюдающего Солнце, есть следующие характеристики

- *каденция* – промежуток времени, через который прибор делает 2 последовательных снимка;
- *пространственная разрешающая способность* – угловое расстояние, на котором разрешимы 2 фотона.

Пусть есть сигнал, в котором содержатся частоты большие, чем может разрешить прибор (*высокочастотная область*). Иная частота в процессе *дискретизации* (переход от аналогового сигнала к отсчетам через определенные промежутки времени), другая частота может при той же дискретизации дать те же значения сигнала. Таким образом, мы не сможем отличить различные гармонические функции. Пример на рисунке 2.1.

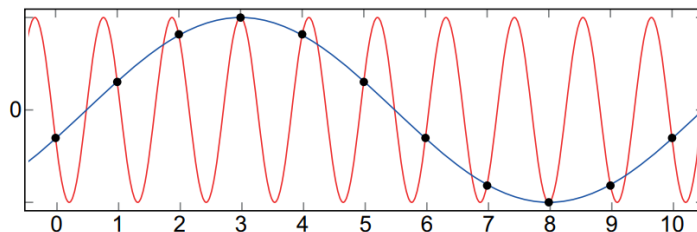


Рисунок 2.1 Красная линия – реальная частота сигнала. Синяя линия – максимально разрешаемая частота прибором.

С помощью механизмов обработки сигналов Фурье невозможно брать информацию о частотах, превышающих частоту Найквиста:

$$\omega_{Ny} = \pi/\Delta t$$

где Δt – минимальное время взятия отсчётов прибором.

$$\Delta\omega = 2\pi/T \leq \omega < \pi/\Delta t, \quad \Delta k_x = 2\pi/L_x \leq k_x < \pi/\Delta x$$

Частота дискретизации в 2 раза больше частоты Найквиста (например, у аудиофайлов). В низкочастотной области использование преобразований Фурье ограничено тем временным промежутком, на котором изучается сигнал, и той площадкой, которую наблюдают в пространстве. В наше время Солнце можно охватить одним снимком.

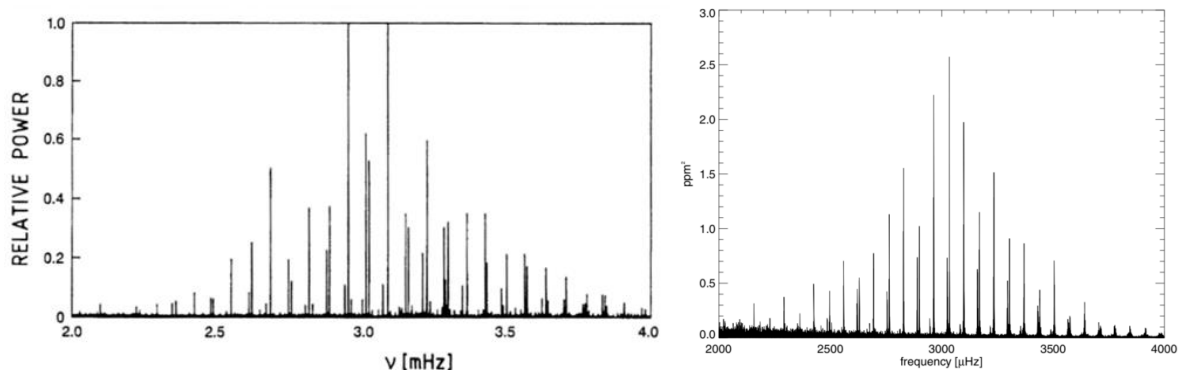


Рисунок 2.2 и 2.3 Спектр мощности солнечных колебаний. 1985 год и современные наблюдения

В гелиосейсмологии существует два понятия: *локальная* и *глобальная сейсмология* Солнца. С одной стороны, возможно некоторый сигнал от Солнца (интенсивность, свечение или поляризация в некоторой линии) собрать интегрально со всего диска звезды, тогда получится сигнал, зависящий от времени. Его можно разложить в ряд Фурье и получить частоты, на которых происходят наиболее сильные колебания. На Солнце выделяются пятиминутные колебания.

По наблюдаемым расщеплениям в спектрах можно судить о внутренних процессах Солнца, скорости звука в плазме, распределениях плотностей. График выше можно разделить на *диаграмму Эшелле*: для этого вся зависимость от времени делится на части равного периода и помещаются друг над другом. Это позволяет наблюдать эволюцию тонкой структуры расщеплений.

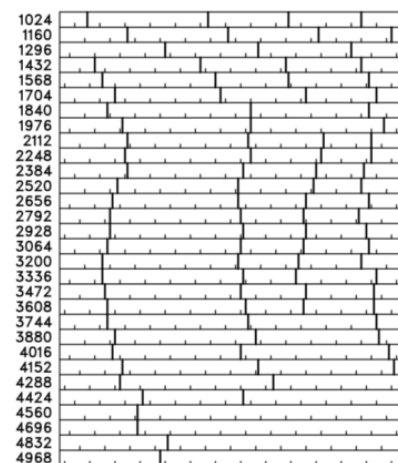


Рисунок 2.4 Диаграмма Эшелле

Доплерограмма. Спектр мощности. Круговые диаграммы

В современных наблюдениях видно, как выглядит Солнце в течение 3 дней с текущего момента. Чтобы сделать преобразование Фурье, необходимо понять, какой сигнал нужно преобразовать. В нашем случае это *движения на поверхности Солнца*. В белом свете движений не видно, но их можно увидеть в доплерограммах.

Доплерограмма показывает, с какой скоростью те или иные элементы поверхности Солнца движутся на нас или от нас.

Принцип получения доплерограмм:

1. Рассматриваем линию излучения на некоторой частоте
2. Если линия излучения движется к наблюдателю, то, согласно эффекту Доплера, её излучение становится более высокочастотным, смещаясь в сторону увеличения частоты вдоль оси
3. Если линия излучения движется от наблюдателя, то, согласно эффекту Доплера, её излучение уходит в область более низких частот, смещаясь в сторону уменьшения частоты вдоль оси
4. Поставив 2 фильтра в высокочастотном и низкочастотном крыле, смещенным относительно «нормального», по разности отсчётов этих фильтров можно указать, в какую сторону сместилась линия

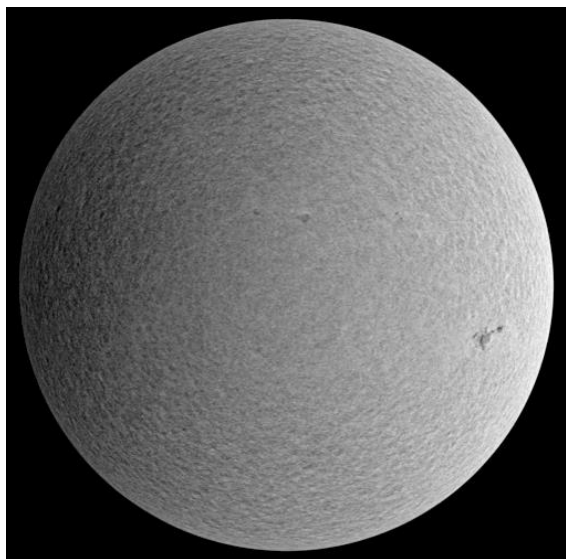


Рисунок 2.5 Доплерограмма Солнца

Основная особенность доплерограмм: потемнение восточного края диска Солнца (т.е. восходящего для наблюдателя, левого края) и осветление западного, что явно сообщает о вращении звезды.

Гелиосейсмология работает не с движениями, а с яркостью, которая добавляется к общему, глобальному вращению Солнца. На *рисунке 2.5* это заметно как своеобразная зернистость.

Чтобы извлечь из кадра эту зернистость, «песок», вычтем из кадра доплерограммы следующий за ним, избавившись от глобального вращения.

Оставшаяся картинка подвергается преобразованиям Фурье и дальнейшему анализу, причем допустимо как локальное рассмотрение участков, так и всего диска в целом.

Спектр мощности

Математически преобразования Фурье являются постановкой некоторого эквивалента между функцией, зависящей от координат и времени, и некоторой иной функции, зависящей от волновых чисел и частоты колебаний.

$$v(x, y, t) = \int f(k_x, k_y, \omega) \exp[i(k_x x + k_y y + \omega t)] dk_x dk_y d\omega$$

Такое выражение ставит в соответствие один набор величин другому, выполняя переход от пространственного и временного распределения интенсивности или, как в данном случае, скоростей движения участков поверхности Солнца к тем частотам и длинам волн возмущений, которые складывают эти движения.

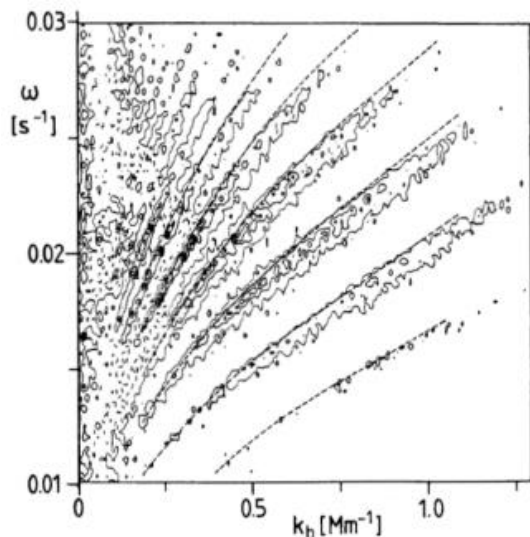


Рисунок 2.6 Гребни p - и f -мод в k_h , ω -плоскости (контуры равной мощности) и собственные частоты теоретической модели Солнца (пунктирные кривые). По Deubner et al. (1979)

В таком кубе данных, полученном при переходе от координат и времени к частоте и волновым числам, просматриваются некоторые закономерности. Все пространственные величины можно свернуть в k_h , то частота возмущения, вносящая вклад в возмущение Солнца в зависимости от волнового числа будет представлять на Солнце набор нескольких линий.

$$P(k_x, k_y, \omega) = ff^*, \quad k_h = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}$$

$$P(k_h, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int P(k_h \cos \phi, k_h \sin \phi, \omega) d\phi$$

Как видно на рисунке 2.6 теория хорошо коррелировала с наблюдениями.

Круговая диаграмма

Другой подход к изучению дисперсионных кривых или спектров мощности амплитуд тех возмущений, что вносят свой вклад в колебания поверхности звезды – **круговые (кольцевые) диаграммы**.

Для этого увидим, что по осям можно отложить k_x и k_y , а третья ось будет представлять ось частот, тогда кривые, представленные на *рисунке 2.6* развернутся вокруг оси частот в некоторые раструбы. Срезая их на некоторой высоте по частоте, получим области повышенной интенсивности.

По расположению колец можно судить о том, как направлены глобальные течения под поверхностью Солнца в приповерхностном слое, потому что любое течение будет смещать эти кольца в соответствующих направлениях по указанным координатам. Изменения диаметров колец вызваны возмущениями скорости звука.

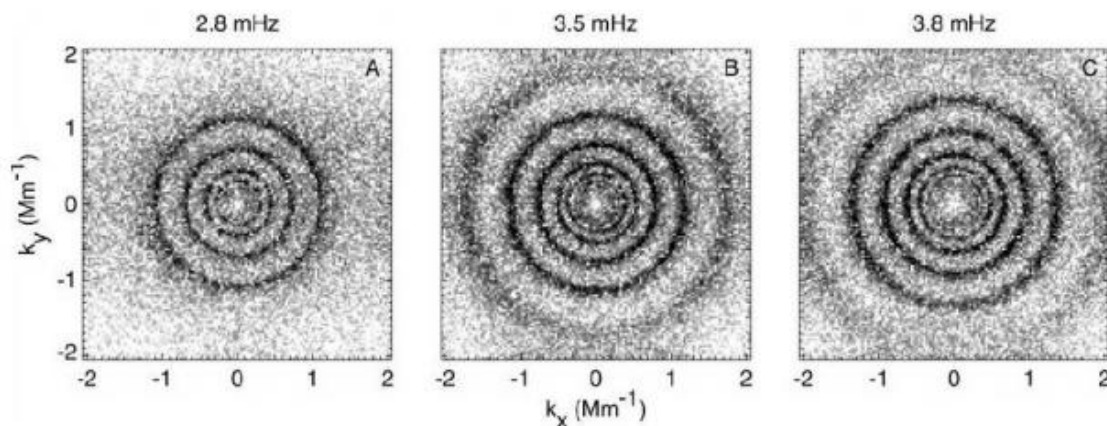


Рисунок 2.7 Срезы с постоянной частотой в трехмерном спектре мощности. Панели А, В и С соответствуют срезам на частотах 2,8, 3,5 и 3,8 МГц соответственно.

Современные наблюдения имеют намного лучше качество и разрешающую способность. По таким наблюдениям можно выделять тысячи полос на дисперсионной диаграмме.

Сферическая функция. Собственные частоты

До этого рассматривался локальный подход гелиосейсмологии (изучение некоторой области Солнца). Иной подход подразумевает изучение полного диска Солнца – *глобальная гелиосейсмология*. В данном случае берется звезд рассматривается как колеблющийся шар. В таком описании удобно пользоваться не волновыми числами, а *сферическими функциями*. Простыми словами, используется некоторый математический приём, описывающий возможные колебания шара.

$$v(\theta, \phi, t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm}(t) Y_l^m(\theta, \phi), \quad \text{where } Y_l^m(\theta, \phi) = P_l^{|m|}(\theta) e^{im\phi}$$

где l – зональный индекс, показывает, сколько есть узлов колебаний, m – меридиональный индекс, показывает, сколько из этих узлов образуют полюс.

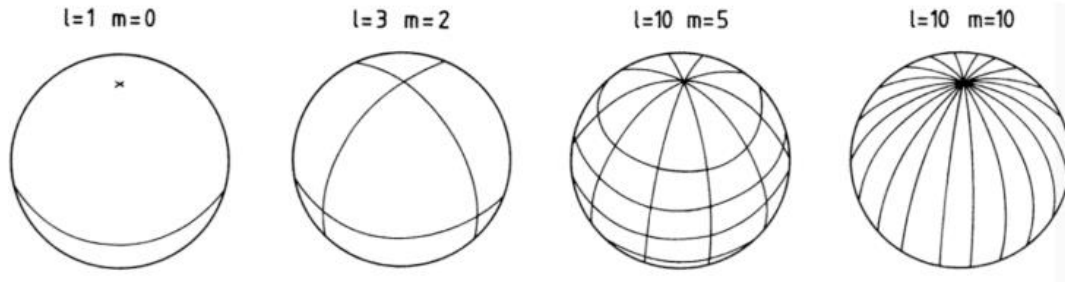


Рисунок 2.8 Сферические гармоники при различных индексах m и l .

Волновое число k заменяется на зональное число l . На глобальные колебания эффекты несферичности влияют слабо, поэтому меридиональный индекс почти не вносит вклад в сферическую функцию, описывающую такие колебания.

$$\nu = \omega/2\pi, \quad k_h r_\odot = [l(l+1)]^{1/2}, \quad P(l, \nu) = \hat{a}_l(\nu) \hat{a}_l^*(\nu)$$

Собственные частоты

Математически теория колебаний Солнца как газового шара строится на тех же уравнениях, что и эволюция Солнца как звезды, но в упрощенном виде.

Закон сохранения массы

$$\rho_1 + \nabla \cdot (\rho_0 \xi) = 0$$

На некоторый объем жидкости может действовать либо газодинамическое давление в случае возмущения, либо гравитационное, этот факт можно описать с помощью **уравнения движения**

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + \underbrace{\nabla P_1}_{\text{изменение газодинамического давления}} - \frac{\rho_1}{\rho_0} \nabla P_0 + \rho_0 \underbrace{\nabla \Phi_1}_{\text{изменение гравитационного потенциала}} = 0, \quad \text{where } \nabla \Phi_1 = 4\pi G \rho_1$$

Закон сохранения энергии в адиабатическом виде (нет обмена энергией между отдельными жидкими элементами)

$$\frac{\delta P}{P_0} = \Gamma_1 \frac{\delta \rho}{\rho_0}$$

$$\delta f = f_1 + \xi \cdot \nabla f_0$$

Подставляя сферические функции в такой набор уравнений, можно получить уравнения, определяющие осцилляции Солнца как газового шара. В них появятся

параметр – **частота Бранта-Вяйсяля**. Эта частота показывает, когда лучистый перенос сменяется на конвективный.

$$N^2 = g \left(\frac{1}{\Gamma_1 P_0} \frac{dP_0}{dr} - \frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho_0}{dr} \right), \quad g = -\rho_0^{-1} dP_0/dr$$

Если уравнения выше упростить, перейти снова к пространственным волновым числам, то в таких колебаниях можно выделить различные моды

$$k_r^2 = \frac{\omega^2 - \omega_A^2}{c^2} + S_l^2 \frac{N^2 - \omega_A^2}{c^2 \omega^2}, \quad k_r \cong n\pi/d$$

Моды колебаний

Гравитационные колебания (объем жидкости всплывает и под действием гравитации опускается обратно). Могут реализоваться только там, где нет конвективного перемешивания – в лучистой зоне и ядре.

$$g\text{-mode} \quad \omega = Nk_h/k_r$$

Акустические колебания – звуковые волны (расширение некоторого объема жидкости внутри Солнца увеличивает давление по краям, которое стремится вернуть его в начальное положение).

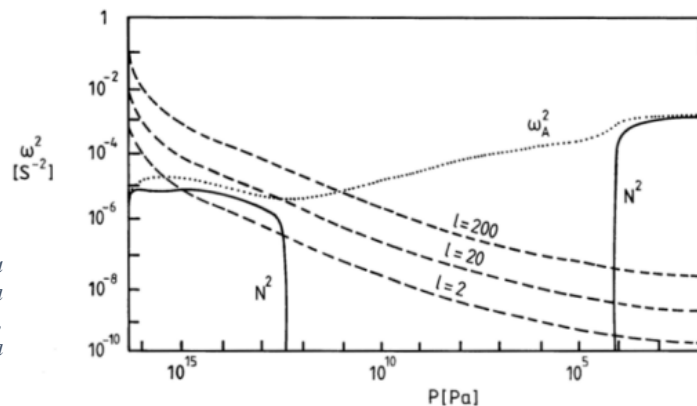
$$p\text{-mode} \quad \omega = ck_h$$

1. Частота звуковой отсечки $\omega_A = c/2H$, где H – высота однородной атмосферы. Акустические волны существуют на частотах выше, чем ω_A .
2. Параметр, отвечающий за гармоники/зональные числа $S_l^2 = \frac{l(l+1)}{r^2} c^2$.

Поверхностные гравитационные колебания (аналог – колебания поверхности воды на Земле, рябь на поверхности озера)

$$f\text{-mode} \quad \omega = \sqrt{gk_h}$$

Рисунок 2.9 Критические частоты на Солнце. Ось X – давление в Па. Центральная часть графика конвективную зону Солнца, левая часть – лучистая зона и ядро, правая часть – приповерхностная зона.



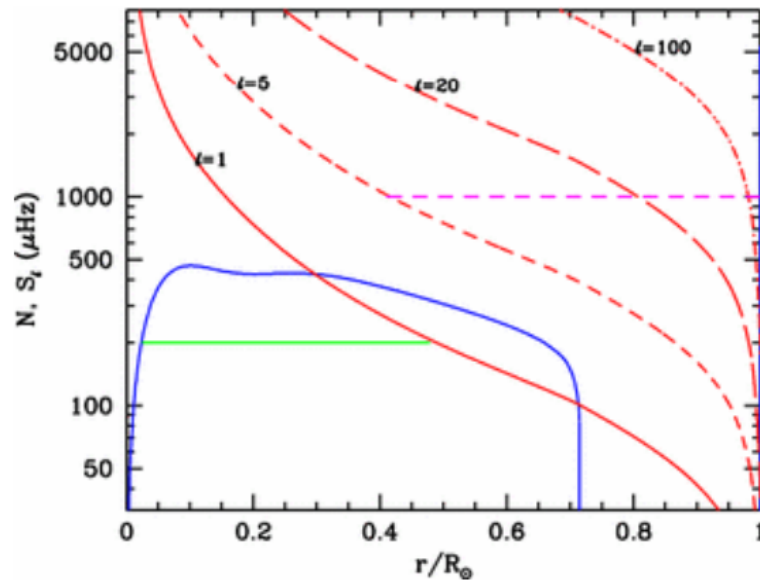


Рисунок 2.10 Диаграмма распространения для стандартной солнечной модели. Зеленая сплошная горизонтальная линия показывает область гравитационные волны. Розовая пунктирная горизонтальная линия показывает акустические колебания с зональным числом $l=5$. Поверхностная гравитационная волна на графике НЕ видна в данном масштабе.

Из физического расположения волн становится ясным, какие из них наиболее интересны и доступны.

Волны поверхности не содержат информации о том, что происходит в недрах звезды. С их помощью можно определять **сейсмический радиус** Солнца.

Гравитационные волны локализованы глубоко внутри звезды, они не выходят на поверхность – не содержат полезной информации, так как претерпевают влияние других слоев и становятся малоамплитудными, малодостоверными.

Акустические волны являются наиболее полезными из вышеперечисленных. Они проникают на большие глубины, чем ниже зональное число l , тем глубже волна

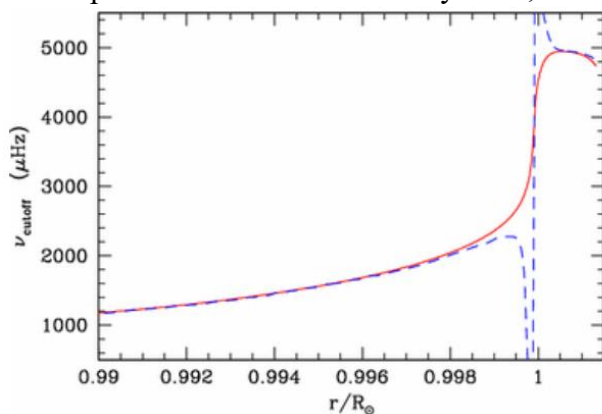


Рисунок 2.11 Акустическая частота среза солнечной модели, показана синей пунктирной линией. Красная кривая - это частота среза, модель с изотермической атмосферой.

может проникнуть в звезду. Такая волна возвращается на поверхность и может усиливаться другими акустическими колебаниями.

Скорость акустической отсечки сильно зависит от химического состава. Рассчитывая атмосферу Солнца как изотермический газ или согласно современным моделям, получаем, что частота звуковой отсечки «отсекает» колебания с частотой менее 3 мГц.

Звуковые волны. Закон Дюваля. Результаты гелиосейсмологии

Как физически выглядят звуковые колебания? Для распространяющейся волны l - это количество мест на Солнце, где звуковая волна выйдет на поверхность. На поверхности волна отражается в связи с эффектами звуковой отсечки. В глубине волна отражается постепенно из-за того, что фронт волны не может распространяться строго вглубь Солнца, всегда есть некоторая флуктуация от горизонтального направления.

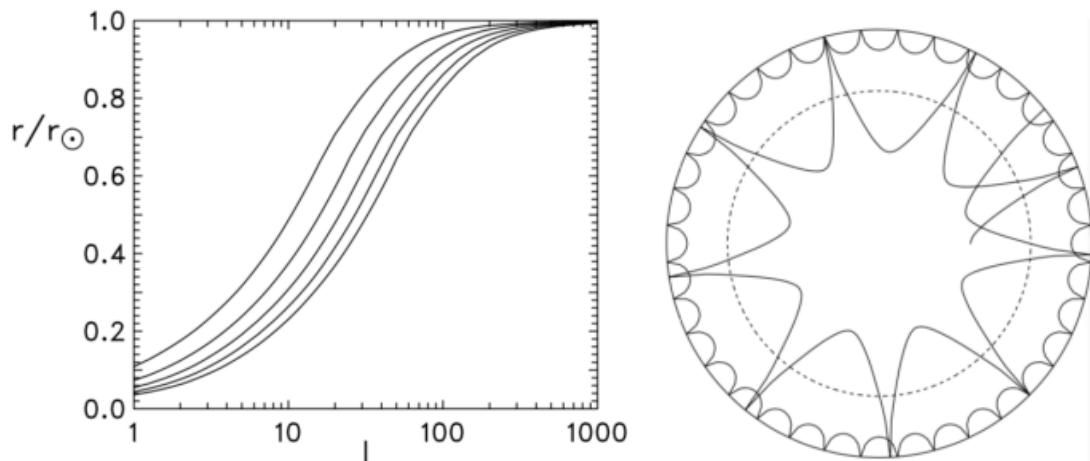
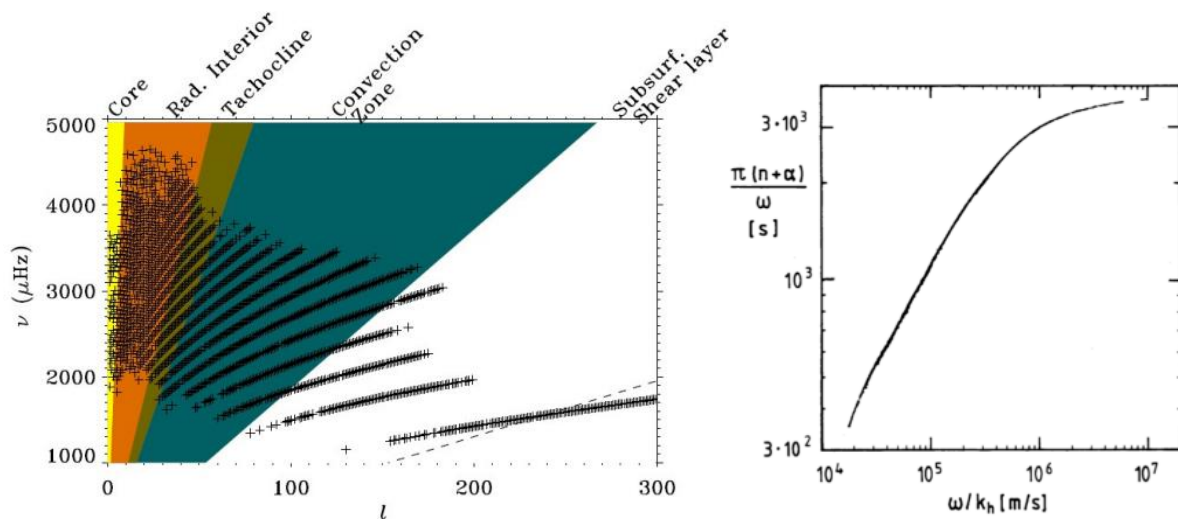


Рисунок 2.12 Глубина внутреннего отражения в зависимости от степени l , для p -режимов с частотами колебаний 1,5, 2,25, 3, 3,75 и 4,5 МГц (сверху). И **Рисунок 2.13** Траектории акустических лучей двух солнечных p -мод с разной глубиной отражения в недрах солнца. Пунктирный круг обозначает основание зоны конвекции.

При разных l звуковая волна добирается до различных глубин Солнца.

Откуда возникает уверенность в том, что обсуждаемые волны имеют одну и ту же звуковую природу? Для них характерно выполнение **закона Дюваля**. При перенормировке графика по осям получим, что все линии сходятся в одну (см. ниже)



Для правого графика n – порядок волны (гармоника, на которой колеблется струна), показывает число длин полуволн, которое укладывается на расстоянии между двумя выходами на поверхности Солнца, α – подгоночный коэффициент (появляется из-за того, что Солнце есть сферическая оболочка, внутри которой распространяются колебания)

Результаты современной гелиосейсмологии

Чтобы получить результаты гелиосейсмологии, необходимо произвести *процедуру инверсии*, т.е. смоделировать такой газовый шар, который в соответствии с приведенными ранее уравнениям будет колебаться, соблюдая наблюдаемые закономерности, эффекты, частоты и амплитуды.

Процедура инверсии есть *решение обратной задачи*, т.е. придумывается модель, объясняющая и описывающая наблюдения. Решение любой обратной задачи некорректно, поскольку корректная задача такова, что имеет единственное устойчивое решение. Для моделей строения Солнца распределение вещества внутри звезды достаточно хорошо известно, поэтому такую обратную задачу решают с высокой точностью.

Подбирая параметры модели, можно приблизиться к решению, удовлетворяющему наблюдаемым данным. Например, *размер конвективной зоны* вычислен с помощью модели, результат представлен на рисунке 2.14. При отклонениях от $0,713 R_{\odot}$ модель показывает большое расхождение относительно наблюдений.

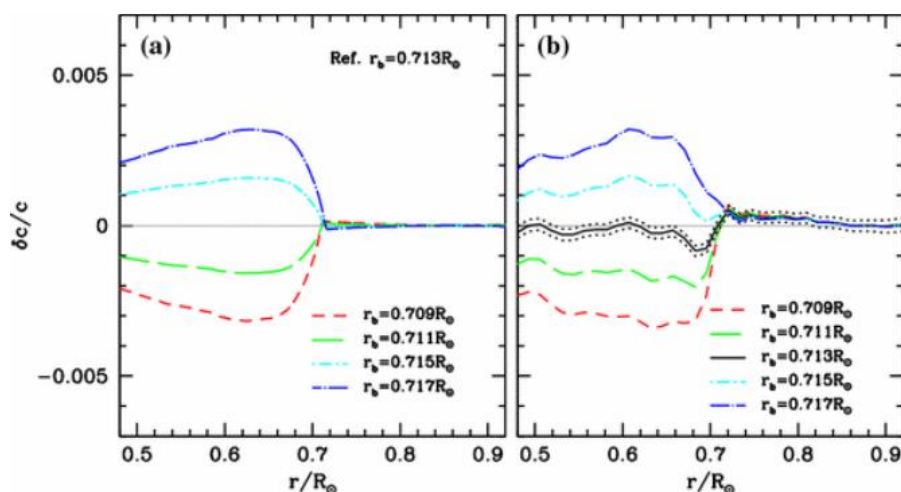


Рисунок 2.14 а Относительная разница в скорости звука между моделью солнечной оболочки с основанием зоны конвекции, равным $0,713 R_{\odot}$, и другими моделями с различными значениями. б Разница в скорости звука между Солнцем и различными моделями в а. При отклонениях от $0,713 R_{\odot}$ модель показывает большое расхождение относительно наблюдений.

Другим хорошо восстанавливаемым параметром методами гелиосейсмологии является *содержание водорода/гелия* в приповерхностных слоях Солнца.

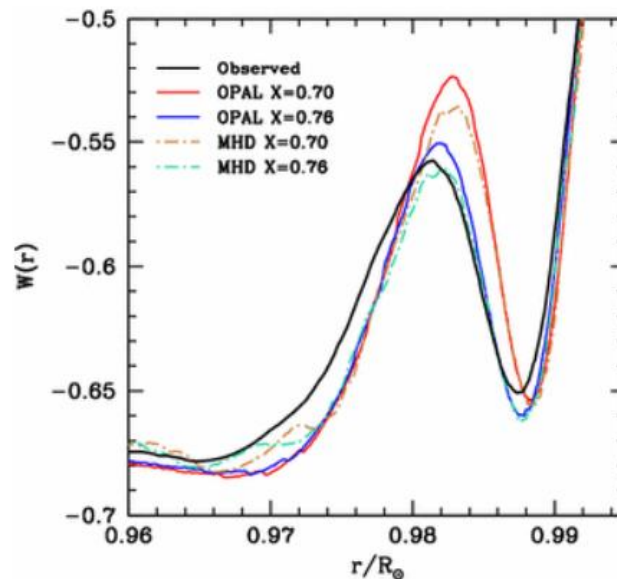


Рисунок 2.15 Сравнение наблюдаемого безразмерного градиента скорости звука Солнца в области зоны ионизации He II (черная линия) с градиентом различных моделей, построенных с различными уравнениями состояния и различным содержанием гелия в зоне конвекции. Содержание тяжелых элементов одинаково для всех моделей.

Как в модели OPAL, так и в модели MHD при содержании водорода 76% наблюдаемые данные сходятся лучше. Обратите внимание, что высота $W(r)$ зависит от содержания гелия для данного уравнения состояния, но для данного содержания гелия она зависит от уравнения состояния.

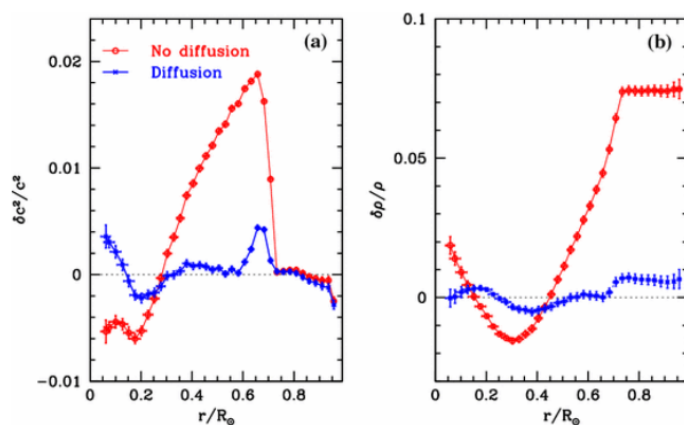


Рисунок 2.16 Относительные различия в квадрате скорости звука (а) и плотности (б) между Солнцем и двумя солнечными моделями получены путем инвертирования различий в частотах.

Влияние диффузии также можно увидеть с помощью моделирования колебаний Солнца. На графике представлены квадрат отклонения скорости звука и отклонение плотности от наблюдаемых при учете диффузии и без её учёта.

Модель без диффузии имеет гораздо большие различия по отношению к Солнцу, чем модель с диффузией.

Успешно моделируются **уравнения состояния вещества и металличность** Солнца. Однако стоит помнить, что моделированием в гелиосейсмологии решается

обратная задача, из-за чего проявляется эффект, представленный на рисунке 2.17: хотя различия в скорости звука очень незначительны, различия в плотности сильно меняются.

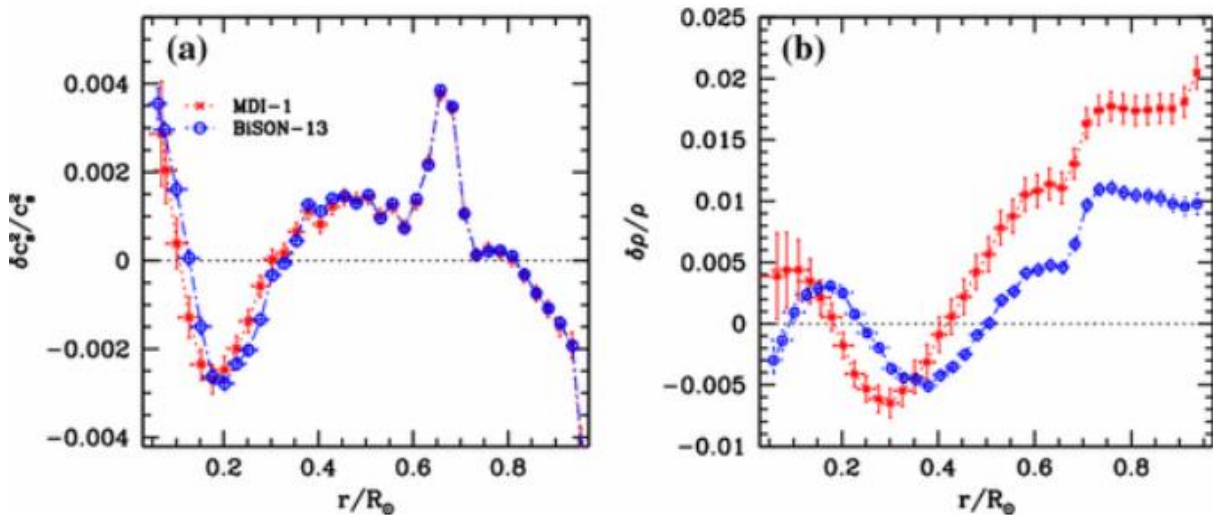


Рисунок 2.17 Относительные различия в скорости звука и плотности между Солнцем и моделями, полученными путем инвертирования двух разных наборов данных, которые отличаются только своими режимами $\ell=0, 1, 2$ и 3 .

Почему так произошло? В ядре изменили скорость звука, но из-за высокой плотности ядра (половина массы Солнца содержится в $0.25 R_{\odot}$) произошло перераспределение масс на более высокие слои, которые, в свою очередь, имеют меньшую плотность, то плотности на поверхности изменились уже значительно.

Вырождение по числу m . Вращение Солнца, региональные течения

Меридиональное число отвечает за *несферичность Солнца*, существующую ввиду:

- Вращения Солнца
- Дифференциального вращения Солнца под поверхностью + меридиональные течения

Изучение эффектов несферичности начинают с разложения суммы на 2 компонента

$$\frac{\omega_{nlm}}{2\pi} = \nu_{nlm} = \nu_{nl} + \sum_{j=1}^{j_{\max}} a_j(nl) P_j^{nl}(m),$$

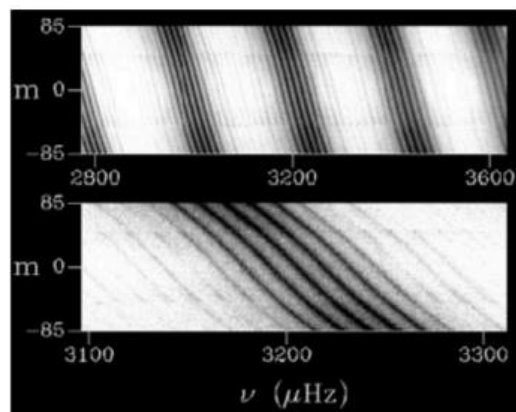


Рисунок 2.18 На дисперсионных кривых (спектрах мощности) снятие вырождения по числу m выглядит как разделение каждой кривой на отдельные полосы.

здесь ν_{nl} — частоты, образующиеся под действием зональных чисел и порядков n , на эти частоты накладываются некоторые возмущения, связанные с появлением меридионального числа m . Физически коэффициенты при чётных и нечётных функциях,

связанных с числом m , отвечают за разные физические процессы. Нечётные показывают глобальное вращение Солнца, а чётные зависят от распределения вращения под поверхностью. Величины этих проявлений имеют порядок тысячных долей от наблюдаемых частот.

- Основные колебания – 3000 мкГц
- Отклонения из-за глобального вращения Солнца – порядка 400 нГц
- Отклонения из-за тонких эффектов (дифференциальное вращение и меридиональные течения) – порядка 20 нГц

SDO – обсерватория солнечной динамики. Данный спутник является источником многих данных, благодаря нему возможен подсчет

- распределения дифференциального вращения относительно широты

$$\frac{\Omega}{2\pi} = (415.5 - 65.3 \cos^2 \theta - 66.7 \cos^4 \theta) \text{ nHz}$$

- полную кинетическую энергию вращения

$$T = (253.4 \pm 7.2) \times 10^{33} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$$

- полный момент импульса

$$H = (190.0 \pm 1.) \times 10^{39} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$$

- квадрупольный гравитационный момент (показывает насколько распределение вещества внутри Солнца отличается от сферически симметричного распределения)

$$J_2 = (2.18 \pm 0.06) \times 10^{-7}$$

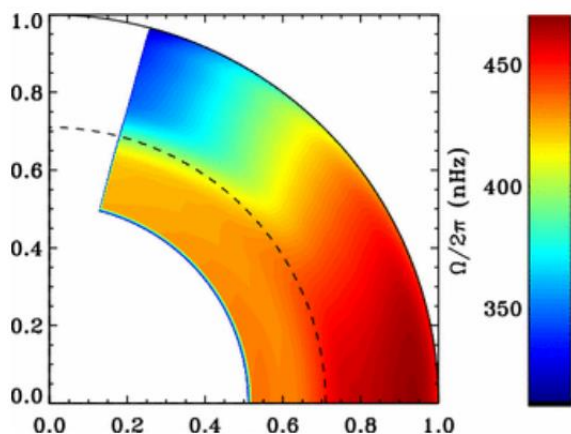


Рисунок 2.19 Средний профиль вращения Солнца

Наиболее быстро Солнце вращается на экваторе (рисунок 2.19). Ближе к полюсам скорость падает.

С глубиной скорость вращения почти не меняется и очень резко меняется вблизи **основания конвективной зоны** (область конвективной неустойчивости). Область большого градиента скорости называют **областью тахоклина**.

Дифференциальное вращение присутствует в основном *внутри конвективной зоны*. Скорость вращения в глубоких недрах имеет большие неопределенности, потому что распределение в этой области не показано на графике.

Меридиональные течения на Солнце приводят к тому, что в конвективной области начинаются перемещения вблизи поверхности – от экватора к полюсам, а вблизи основания конвективной зоны – от полюсов к экватору, образуя **конвективную ячейку**.

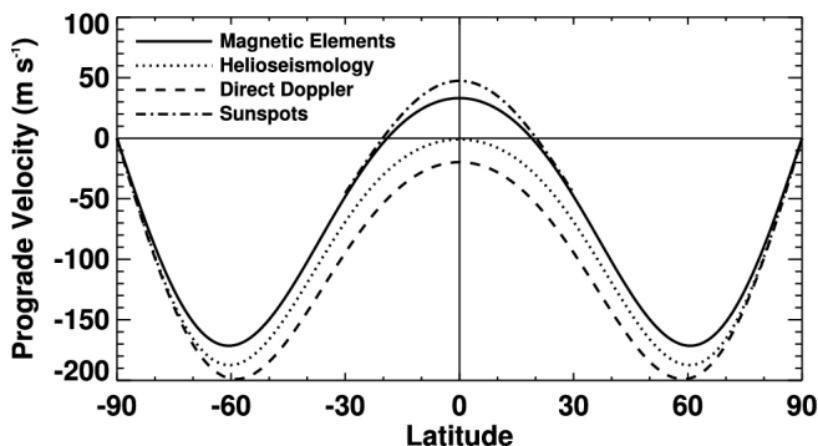


Рисунок 2.20 Сравнение оценок дифференциального вращения поверхности, полученных с использованием различных методов; была вычтена средняя фоновая скорость вращения.

Дифференциальное вращение, которое считается чрезвычайно хорошо известным, регистрируется по-разному по амплитуде в зависимости от различных методов. Важно, что выводы о солнечных пятнах распространяются только на широты $\pm 30^\circ$ (так как существуют пояса активности). Очевидно, что каждый метод по-разному чувствителен к движениям плазмы, т.е.

- магнитные элементы могут быть неглубокими и восприимчивыми к перетаскиванию (вращение немного ниже фотосферы);
- доплеровские выводы основаны на измерениях линий, сформированных в фотосфере (вращение немного выше фотосферы);
- солнечные пятна располагаются на разной глубине и, следовательно, вращаются с разной скоростью;
- гелиосейсмология использует режимы, которые отбирают пробы приповерхностных слоев в определенном порядке и определенным образом (вблизи сейсмической поверхности).

В то время как солнечные пятна являются плохими оценками меридиональных течений, другие методы вполне согласуются (рисунок 2.21).

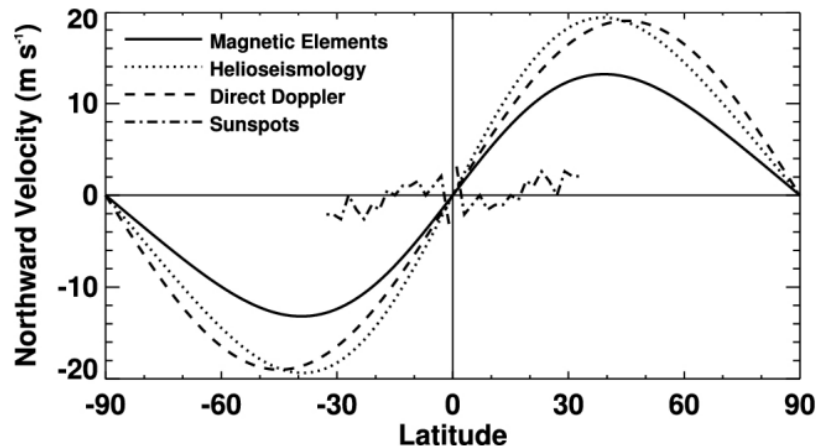


Рисунок 2.21 Сравнение поверхностных меридиональных течений, полученных с использованием различных методов

Если дифференциальное вращение имеет характерные времена порядка одного оборота Солнца, то есть изменение скорости вращения Солнца с широтой соизмеримо со скоростью вращения звезды (доли от скорости вращения), то скорость меридианного течения намного ниже, так что чтобы веществу обойти одну меридиональную ячейку, веществу потребуется около **11 лет – период солнечной активности**.

Любой вращающийся газовый шар обязан иметь такое меридиональное течение, потому что во вращающемся объекте атомы движутся не хаотично, вещество перераспределяется, что приводит к появлению течений. Такие течения имеют характерные времена, соизмеримые с временем образования шара (временем гравитационного сжатия).

Возможно, меридиональные течения вовлечены в процессы образования солнечных пятен, процесса магнитного динамо (генерация магнитного поля в ходе солнечной активности Солнца под его поверхностью и его сброс), а также других активностей Солнца.

Солнце вращается различно в зависимости от широты только в

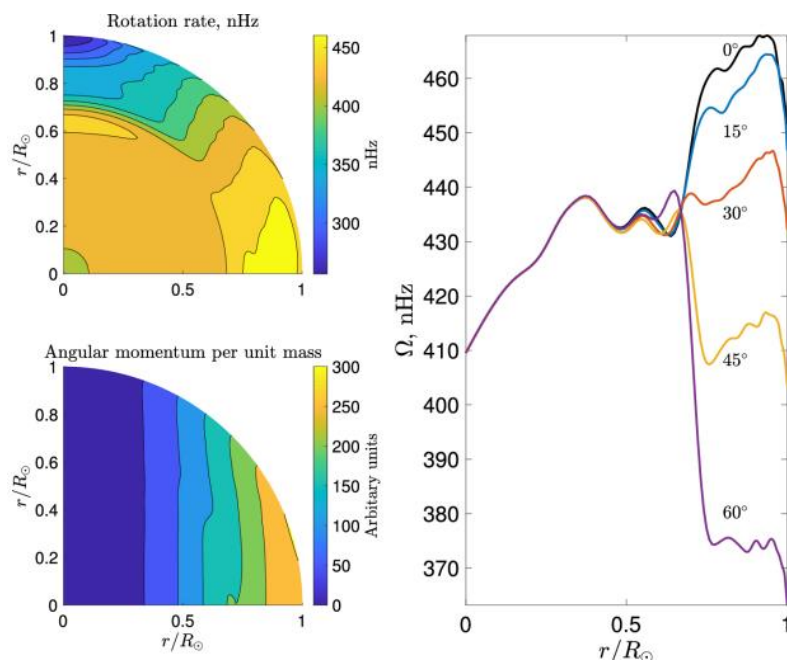


Рисунок 2.22 Дифференциальное вращение на различных широтах

конвективной зоне. В лучистой области кривые сходятся. Ядро вращается твердотельно.

Если посмотреть на распределение углового момента на единицу массы, то обнаружим, что Солнце вращается одинаково на различных удалениях от оси вращения.

Относительно меридиональной циркуляции всё не так просто. Во-первых, меридиональная циркуляция меняется с течением времени. Во-вторых, при решении обратной задачи получаются различные количественные результаты, несмотря на качественно одинаковую составляющую.

Список литературы

1. Michael Stix “The Sun. An Introduction” (2002)
2. Laurent Gizon, Aaron C. Birch “Local Helioseismology” \ Living Rev. Solar Phys., 2, (2005), 6
3. Rachel Howe “Solar Interior Rotation and its Variation” \ Living Rev. Solar Phys., 6, (2009), 1
4. Sarbani Basu “Global seismology of the Sun” \ Living Rev. Solar Phys., 13, (2016), 2
5. Shravan M. Hanasoge “Surface and interior meridional circulation in the Sun” \ Living Rev. Solar Phys., 19, (2022), 3

Лекция №3. Атмосфера Солнца

Атмосфера Солнца подразделяется на 3 глобальных слоя: **фотосфера, хромосфера и корона**. Деление обусловлено физическими условиями в этих областях. Рассмотрим далее каждый из слоев, перемещаясь от глубины к поверхности, изучим характерные структуры, обусловленность физическими законами, особенности.

Фотосфера

Фотосфера (греч. «сфера света») – область формирования непрерывного излучения белого света. Это та область пространства, в которой длина свободного пробега фотона $\frac{1}{\rho\kappa}$ становится примерно равной шкале однородной атмосферы H (расстояние от источника, на котором плотность вещества падает в e раз).

$$\frac{1}{\rho\kappa} \approx H,$$

где ρ – плотность вещества, κ – непрозрачность вещества.

Если длина свободного пробега примерно равна шкале однородной атмосферы, то частица, вылетевшая из Солнца, будет испытывать меньшее взаимодействие с другими окружающими частицами, плотность окружающего её вещества будет экспоненциально падать. Такой фотон может улететь от Солнца почти бесстолкновительно с другими частицами.

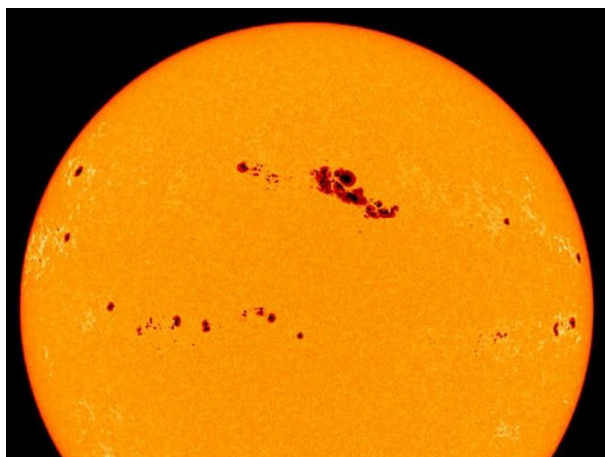


Рисунок 3.1 Фотосфера. Солнечные пятна и факелы

Перенос излучения описывается специальной одноименной теорией. В её терминах такая ситуация характеризуется оптической толщиной вещества, равной 1.

Рассмотрим характерные структуры, наблюдаемые в солнечной фотосфере. Прежде всего, это **солнечные пятна** – темные образования, имеющие ядро (тень), полутень и окружающие их поры – тёмные точки. С ними связано наблюдение первой солнечной активности – **числа Вольфа**, характеризующие количество пятен на Солнце.

На фотосфере присутствуют и светлые пятна – **факелы**, образующие сетку на поверхности Солнца. Лучше всего видны ближе к краям солнечного диска.

При приближении можно увидеть, что солнечные пятна окружены *грануляцией* – бурлением поверхности. Характерный размер грануляционной ячейки, как и многих других структур в солнечной атмосфере, будет составлять примерно 10^6 метров.

Обратив внимание на промежутки между гранулами, можно заметить, что они бывают как тёмные, так и светлые. Они отличаются друг от друга напряженностью магнитного поля. В тёмных напряженность ниже, чем в светлых.

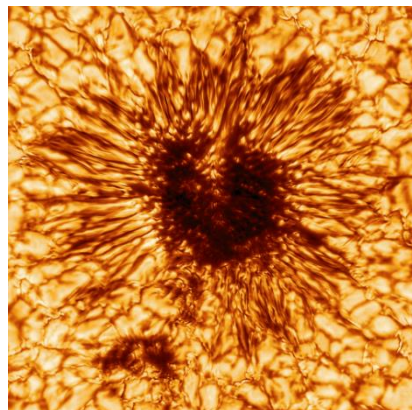


Рисунок 3.3 Солнечное пятно

Казалось бы, возникает *противоречие в том, как формируются солнечные пятна*, поскольку последние являются областью выхода сильных магнитных полей. В среднем магнитное поле Солнца составляет 1 – 10 Гс, в магнитных пятнах поле составляет 1000 Гс. Магнитное поле, подавляя магнитосферу под фотосферой Солнца, делает пятно тёмным, поскольку оно охлаждается за счёт передачи энергии тепла наверх в хромосферу и не успевает нагреваться потому как магнитное поле подавляет конвекцию под пятном.

Повышение магнитных полей в промежутках между гранулами не такое большое – около 10 – 100 Гс. Такое промежуточное поле не мешает конвекции, т.е. поступлению энергии из глубинных слоев Солнца наружу. С другой стороны, способствует проведению различных возмущений, например, акустических волн. Такое «среднее» поле приводит к увеличению яркости межгранулярных участков. Суммируя такие участки *возможно наблюдение факелов* на поверхности Солнца.

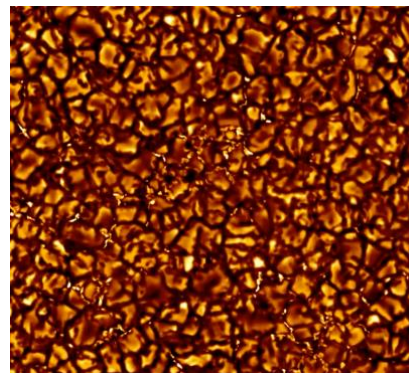


Рисунок 3.2 Солнечная грануляция, шведский солнечный телескоп

Хромосфера

Хромосфера (греч. «сфера цвета») – область формирования оптических эмиссионных линий излучения. Самая яркая и используемая на практике линия Н-альфа (красная) – это линия перехода в атом е водорода с 3 электронного уровня на 2-ой.

С физической точки зрения при сравнении условий на фотосфере Солнца и в короне заметны существенные различия в концентрации, температуре и давлении. Получается, что газ должен выдавливать корону, расширяясь, *что приводит к образованию хромосферы*.

Без хромосферы

Корона $n = 10^9 \text{ см}^{-3}$ $T = 1 \text{ млн. К}$ $p_{\text{газ}} = nkT = 0.14 \text{ дин}$

Фотосфера $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ $T = 4500 \text{ К}$ $p_{\text{газ}} = nkT = 6200 \text{ дин}$

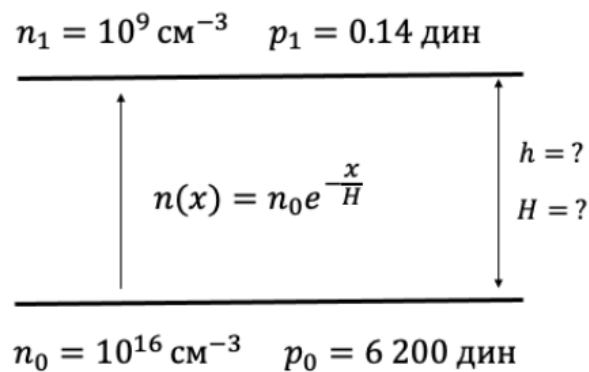
Решение

Корона $p_{\text{газ}} = nkT = 0.14 \text{ дин}$

Хромосфера

Фотосфера $p_{\text{газ}} = nkT = 6200 \text{ дин}$

Решим такую задачу. Нижняя граница будет тождественно равна фотосфере по физическим параметрам, а верхнюю – короне. Предположим, что между ними существует изотермическая прослойка, концентрация которой падает по барометрическому закону.



Исходное уравнение

$$n(x) = n_0 e^{-\frac{x}{H}}, \quad \text{тогда } n_1 = n(h) = n_0 e^{-\frac{h}{H}}$$

Запишем также уравнение равновесия по второму закону Ньютона. Приравняем изменение давления dp к гравитационному притяжению

$$dp = -G \frac{M_s m_p n(x)}{R_s^2} dx \rightarrow dp = -An(x)dx, \quad \text{где } A = G \frac{M_s m_p}{R_s^2} = \text{const}$$

Давление от высоты в такой задаче будет зависеть только от распределения концентрации вещества

$$dp = -An(x)dx = -An_0e^{-\frac{x}{H}}dx$$

Подставим полученный результат в барометрический закон. Интегрируем по x от 0 до h - высоты короны

$$p_1 - p_0 = ANn_0 \left(e^{-\frac{h}{H}} - 1 \right) = AN \left(n_0 e^{-\frac{h}{H}} - n_0 \right) = AN(n_1 - n_0)$$

Так как $p_0 \gg p_1$, а $n_0 \gg n_1$, получаем связь

$$p_0 = ANn_0$$

Отсюда

$$H = \frac{p_0}{An_0} = \frac{kT_0}{A}$$

Таким образом, для звезды с массой M_s , радиусом R_s и температурой поверхности T_0 , высота однородной хромосферы H определяется формулой:

$$H_{\text{хром}} = \frac{kT_0R_s^2}{GM_s m_p}$$

Для Солнца

$T_0 = 4500 \text{ K}$	$R_s = 7 \times 10^{10} \text{ см}$
$M_s = 2 \times 10^{33} \text{ г}$	$G = 6,67 \times 10^{-8} \frac{\text{см}^3}{\text{с} * \text{г}}$
$k = 1,38 \times 10^{-16} \text{ эрг К}$	$m_p = 1,67 \times 10^{-24} \text{ г}$

Получаем

$$H_{\text{хром}} = 136 \text{ км}$$

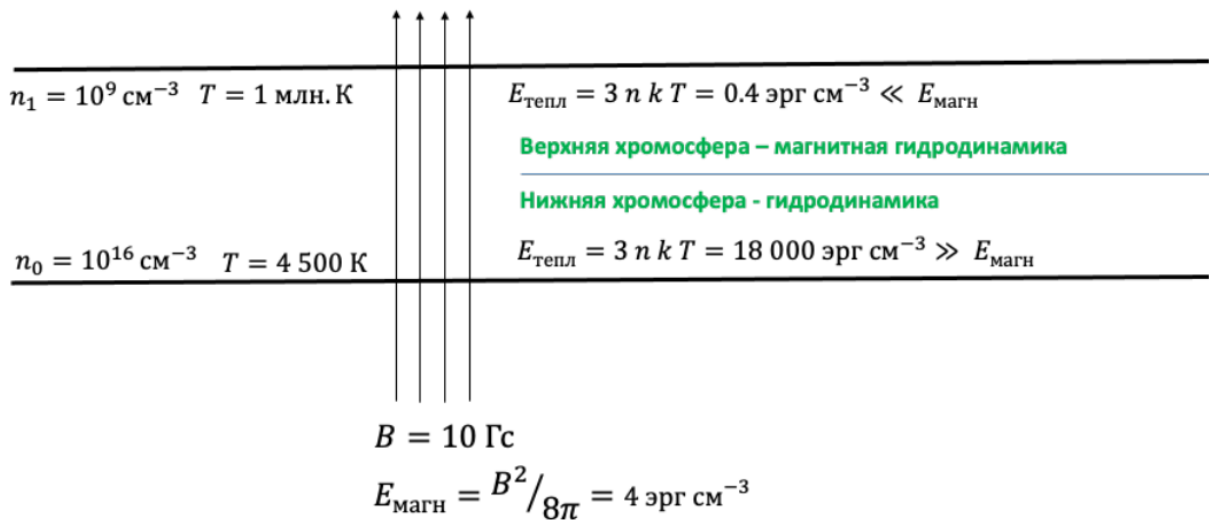
Найдём полную высоту хромосферы h . Начнём с формулы

$$n_1 = n(h) = n_0 e^{-\frac{h}{H}} \rightarrow n_1/n_0 = e^{-\frac{h}{H}}$$

$$h = H \ln \left(\frac{n_0}{n_1} \right)$$

Получаем $h_{\text{хром}} = 2200$ км. Полученные значения сходятся с наблюдаемыми в случае спокойной хромосферы. В общем случае её характеристики нестабильны, меняются в некоторых пределах.

Если сравнивать энергии, связанные с динамическими движениями (тепловая) и с магнитным полем, то обнаружим, что соотношения энергии различны для верхней ($E_{\text{тепл}} \ll E_{\text{магн}}$) и нижней ($E_{\text{тепл}} \gg E_{\text{магн}}$) хромосфер.



Нижняя хромосфера достаточно хорошо описывается **уравнением гидродинамического типа** (вещество увлекает за собой магнитное поле из-за высокой ионизации, происходит вмороженность). В верхней хромосфере наоборот, **магнитное поле** определяет направление движения вещества.

Таким образом, **размеры хромосферы однозначно определяются** из характеристик фотосферы и короны. Для звёзд солнечного типа хромосферы – чрезвычайно тонкие слои.

Высота хромосферы Солнца – 2 200 км, соответствует 3 угловым секундам при наблюдении с Земли. Для хромосфер характерны чрезвычайно высокие градиенты плотности – на 2000 км плотность падает на 7 порядков и температуры – температура растёт на 2 порядка от 4500 К до 1 млн. К.

В хромосфере происходит перестройка физики Солнца от гидродинамической модели, в которой плазма находится в равновесии с силами гравитации, а магнитное поле играет роль незначительной добавки, к магнитогидродинамической модели, где основную роль играет магнитное поле, а плазма находится в его полном подчинении.

Отличаются верхняя и нижняя хромосферы структурами: у первой пёстрая ломаная сетка, хромосферная сетка, у второй – гладкие вытянутые линии, фибриллы, показывающие расположение линий магнитного поля.

Нижняя хромосфера описывается с помощью уравнения гидродинамического равновесия. Верхняя хромосфера – уравнения Максвелла.

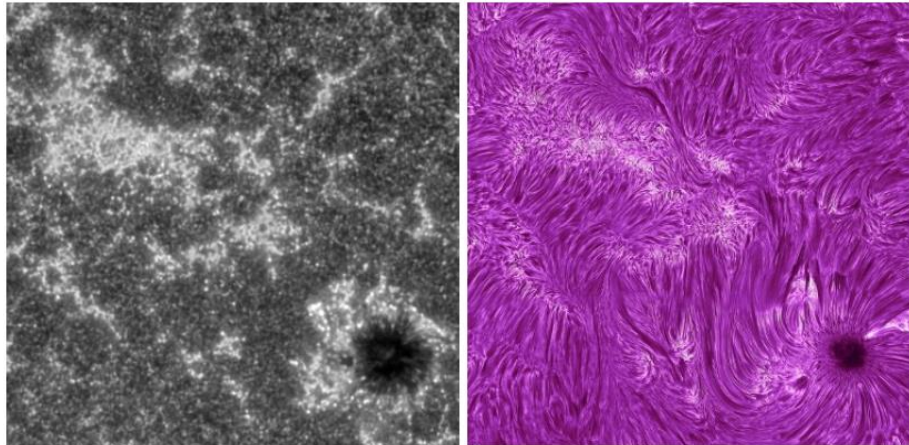


Рисунок 3.3 и 3.4 Левая картинка – нижняя хромосфера – кипение плазмы (нет признаков влияния магнитного поля). Правая картинка – верхняя хромосфера – плазма полностью подчинена магнитному полю (металлические опилки в поле магнита)

Для гидродинамической модели Солнца характерно падение температуры с высотой (по мере удаления от источника тепла – солнечного ядра). Так как в нижней хромосфере некоторое время действует гидродинамическая модель, то можно ожидать, то температура некоторое время будет продолжать падать. Это, действительно, наблюдается. В хромосфере находится точка с наименьшей температурой на Солнце – **температурный минимум**.

$$T \sim 4200 \text{ K}, \quad h \sim 550 \text{ км}$$

В области температурного минимума, благодаря снижению T , могут существовать некоторые молекулы, а именно:

- CO – угарный газ - имеет наивысшую энергию диссоциации среди молекул – 11.09 эВ

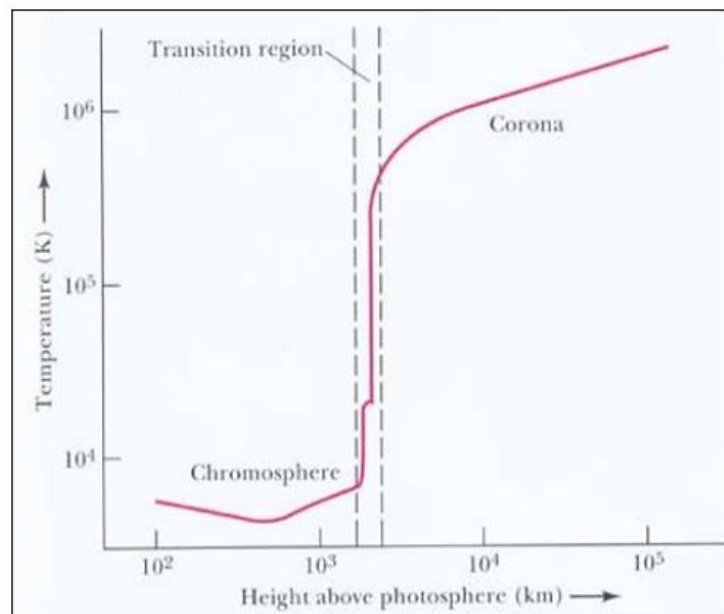


Рисунок 3.5 График зависимости температуры от высоты над хромосферой.

- N_2 – азот, его энергия диссоциации – 9.76 эВ
- H_2O – вода

Хромосферная сетка есть структура нижней хромосферы. Показывает глобальные течения под поверхностью Солнца – супергрануляцию, имеет второй масштаб конвекции. Представляет собой ячеистую структуру, похожую на грануляцию фотосферы (порядок 10^6 метров), но имеющую существенно более крупные ячейки (порядок $(30 \div 50) \times 10^6$ метров).

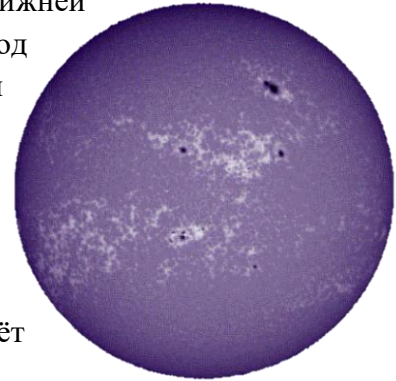


Рисунок 3.6 Хромосферная сетка

Данная структура выглядит более яркой за счёт дополнительного энерговыделения магнитного поля (поле сгребается к краям ячеек конвективными течениями плазмы).

Фибриллы – структура верхней хромосферы. Представляют собой очень длинные и низкие магнитные петли, заполненные плазмой, которые повторяют структуру силовых линий магнитного поля. Ширина порядка 10^6 метров. Длина – до 100 и 200 тыс. км. Высота – от 2 до 4 тыс. км. (рисунок 3.4)

На протяжении всей хромосферы меняется физика и постепенно от энергетического доминирования вещества происходит переход к доминированию магнитного поля, поэтому верхняя граница атмосферы Солнца определяется не барометрическими законами распределения, а поведением магнитного поля. Верхняя граница хромосферы является условной. В ней присутствуют многие нестационарные явления, приводящие к образованию *спикул*.

Спикулы – основные элементы тонкой структуры хромосферы Солнца, представляют собой выбросы солнечного вещества над поверхностью. Наблюдаются как тонкие (диаметром от 500 до 1200 км) столбики светящейся плазмы. Выбрасываются из нижней хромосферы со скоростью около 20 км/с. Время жизни 5— 10 минут, длина — от 10 до 20 тыс. км.



Рисунок 3.7 Спикулы

Спикулы расположены в областях межгранульных ячеек, концентрируясь в хромосферной сетке, то есть концентрируются около областей выхода линий магнитного поля, образующихся вследствие конвективных течений под фотосферой Солнца.

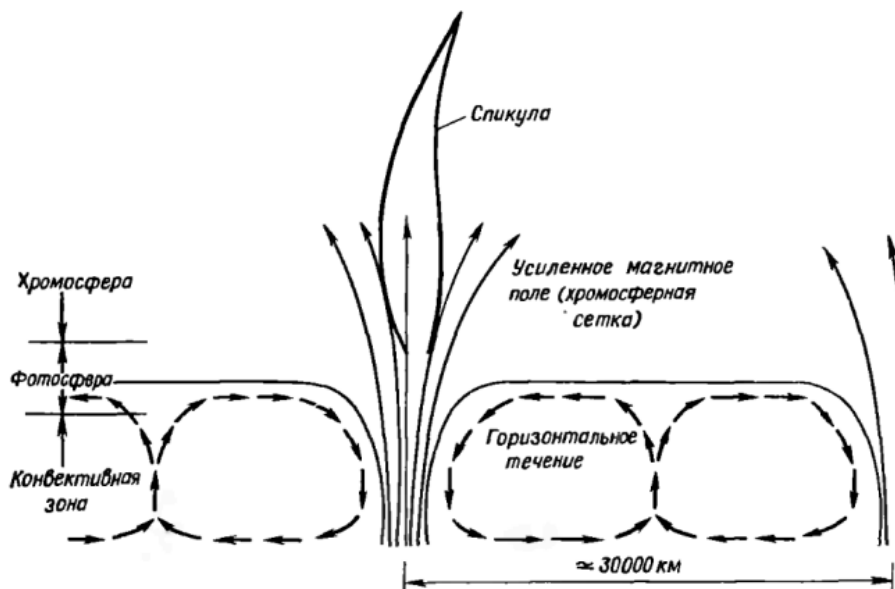


Рисунок 3.8 Супергрануляция. Поток ионизованного газа от центра к краям в ячейках супергрануляции переносят магнитные поля к границам ячеек, и в результате образуется сетка усиленных полей. На этой сетке возникают спикулы.

Объект, характерный для хромосферы, но наблюдаемый в короне – **протуберанцы**. Протуберанцы есть вещество хромосферы, которое было захвачено магнитными полями и поднято ими в корону. Температура этого вещества значительно ниже, чем у окружающей среды (коронального вещества). Это заметно при рассмотрении протуберанца на фоне солнечного диска.

Разделяют протуберанцы на обычные протуберанцы и темные волокна – те, что видны на фоне диска.

Это холодные протяжённые структуры с температурой 6-8 тыс. К и плотностью порядка 10^{10} см^{-3} . Длина до 100 – 200 тыс. км. Эффективно поглощают излучение более низких ярких слоёв и по этой причине выглядят тёмными. Волокна на краю диска выглядят как эмиссионные структуры и называются протуберанцами.

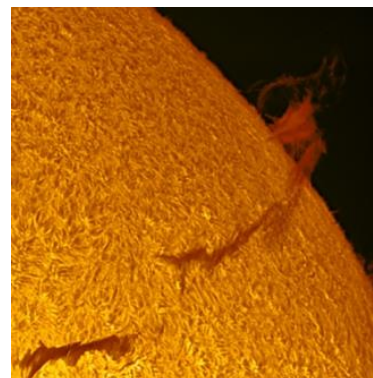


Рисунок 3.9 Протуберанец

Концентрация вещества на протяжении хромосферы падает до корональных значений, температура же почти не меняется, можно сказать, что хромосфера **изотермична**. Для того, чтобы температура выросла до корональных значений (от десятков тысяч К. до 1 млн. К), необходима добавка переходного слоя.

Переходный слой – обеспечивает температурные изменения. Наблюдается в тех линиях излучения, которые формируются на характерных температурах для этого переходного слоя, а именно 50-100 тыс. К.

Например, при этих температурах хорошо формируется линия He II 304 Å (Т = 40 тыс. К). Заметка про обозначения: атом – I; атом, ионизованный единожды – II, и т.д.

Корона

Корона - верхняя разреженная и горячая часть атмосферы. Наблюдается

- визуально в оптическом диапазоне – до нескольких радиусов Солнца;
- по поляризационным измерениям – до 20 радиусов Солнца;
- по покрытию зодиакальных радио источников – до 100 солнечных радиусов (для сравнения – 1 а.е. = 215 радиусов).



Рисунок 3.10 Корона Солнца

Светимость короны:

- Фотосфера = 1
- Хромосфера = 0.005
- Корона = 10^{-6}

Полное число частиц в короне: 10^{42} частиц. **Масса:** 10^{15} кг.

Для сравнения: в столбе 1 см^2 короны содержится 10^{19} частиц – столько же, сколько в 1 см^3 воздуха. Масса всей короны равна массе воздуха в слое высотой 2 метра.

Характеристики короны

Температура	Концентрация частиц
Основание – 1 млн. К	Основание – 10^9 см^{-3}
На высоте 1 радиус – 1.8 млн. К	+ 70 тыс. км – 10^8 см^{-3}
На высоте 10 радиусов – 1 млн. К.	+ 0.5 радиуса – 10^7 см^{-3}
	+ 2.5 радиуса – 10^6 см^{-3}
	+ 5 радиуса – 10^5 см^{-3}
	+ 10 радиусов – 10^4 см^{-3}

Вывод: температура меняется слабо, то есть высокая теплопроводность. Плотность падает барометрически.

Физические характеристики	Виды энергии
$B = 10 \text{ Гс}$	Тепловая = $3nkT = 0.014 \text{ эрг/см}^3$
$N = 10^8 \text{ см}^{-3}$	Магнитная = $B^2/8\pi = 4 \text{ эрг/см}^3$

Физические характеристики	Виды энергии
$T = 10^6$ К	Кинетическая $mV^2/2 = 0.18$ эрг/см ³
Скорости плазмы – не более 600 км/с	Гравитационная $\frac{GMm}{R} = 0.17$ эрг/см ³

Магнитная энергия превышает все остальные виды. Магнитное поле полностью контролирует плазму.

К-Корона

Корона с температурой 1 млн. К в принципе не может формировать оптическое излучение. Видимая корона – томсоновское рассеивание света фотосферы на электронах короны. Особенности:

1. Нет фраунгоферовых линий (замыты тепловыми движениями)
2. Излучение поляризовано – особенности томпсоновского рассеивания.

Ф-Корона

Зодиакальный свет. Рассеивание света на межпланетной пыли. Особенности:

1. Присутствуют линии Фраунгофера.
2. Нет поляризации (невысокие скорости движения пыли).

L-Корона

К- и Ф-Корона излучают переотраженным светом, исходящим из фотосферы Солнца. В L-Короне существует собственное излучение вещества самой короны. В короне вопреки ожиданиям наблюдается несколько (около 20) оптических линий.

Самые известные: 6374 А – красная линия короны, 5303 А – зелёная линия короны. Их особенность заключается в том, что они невозпроизводимы в земных условиях. В первоначальных наблюдениях в 1968 году возникло предположение о существовании на Солнце неизвестного химического элемента – корония. Это всё были излучения запрещённых линий.

Запрещённые линии (магнитодипольные)

Для того, чтобы электрон мог перейти с одной орбиты на другую, ему нужно иметь разные квантовые числа. В атоме есть несколько оболочек с различными энергетическими уровнями. Они в свою очередь описываются главным квантовым числом n . Помимо оболочек существует орбитальная характеристика (S, P, D, F... орбитали), которой соответствует орбитальное число. Для перехода с одного квантового

числа на другое, электрону выгоднее всего реализовать такой манёвр в соответствии с правилами отбора.

Правила отбора:

- n – главное квантовое число,
- L – орбитальное квантовое число от 0 до $n - 1$ (S, P, D, F, ...),
- S – оператор спина (1/2),
- $J = L + S$ – полное квантовое число.

Обычные правила отбора: $DL = \pm 1$, $DJ = 0, \pm 1$

Магнитодипольные: $DL = 0$, $DJ = 0, \pm 1$ (вероятность 10^{-5})

В земных условиях нет глубокого вакуума как в короне Солнца, так что элемент, способный на магнитодипольный переход, скорее всего столкнется с другим атомом, получив дополнительную энергию и перейдя на другой уровень, произведет излучение. Однако в короне Солнца в условиях глубокого вакуума возникают условия для того, чтобы магнитодипольные переходы также осуществлялись. Их излучения видны как L-Корона. Например

- **Красная линия Fe X** (17 электронов): $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$

Основной уровень $3p^5$ расщепляется на $3P_{3/2}$ и $3P_{1/2}$. Между ними возможен магнитодипольный переход $DL = 0$. Так как расщепление тонкое, то энергия перехода мала и соответствует оптическому диапазону с длиной волны 6563 Å.

- **Зелёная линия Fe XIV** (13 электронов): $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p$

Основной уровень $3p$ расщепляется на $3P_{3/2}$ и $3P_{1/2}$. Между ними возможен магнитодипольный переход $DL = 0$. Так как расщепление тонкое, то энергия перехода мала и соответствует оптическому диапазону с длиной волны 5303 Å.

Рассеянное излучение Солнца в атмосфере – главное препятствие для наблюдения короны Солнца. Если сравнить яркость неба с некоторой дымкой или чистого неба, то яркость короны ниже (см. рисунок 3.12).

Однако в моменты солнечных затмений яркость чистого неба значительно падает, тогда K-Корона может наблюдаться размером до 4-5 R_{\odot} . В то же время F-Корона может наблюдаться как **зодиакальный свет** – диффузионная светлая полоса, обусловленная рассеянием на межзвездной пыли.

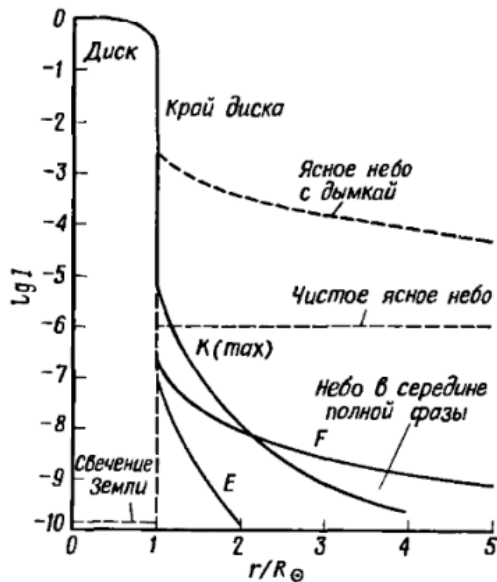


Рисунок 3.11 Зависимость логарифма светимости от расстояния в единицах радиуса Земли.

L-Корону (на рисунке 3.12 обозначена как E) можно наблюдать с Земли с помощью инструментальных методов. Несмотря на то, что, согласно графику, она является самой бледной, данная корона излучает не в непрерывном спектре, а в отдельных линиях. Если перед телескопом поставить искусственную Луну (перегородку, закрывающую прямой солнечный свет), а также поставим узкий фильтр вблизи корональных линий, то будет возможно наблюдение L-Короны.

Характерными структурами в нижней короне являются **петли** – хорошо видны при наблюдении в ультрафиолетовом диапазоне. Открытые линии магнитного поля **стримеры**, основные структуры внешней короны. **Корональные дыры** – области с пониженной яркостью излучения. Являются основаниями линий магнитных полей.

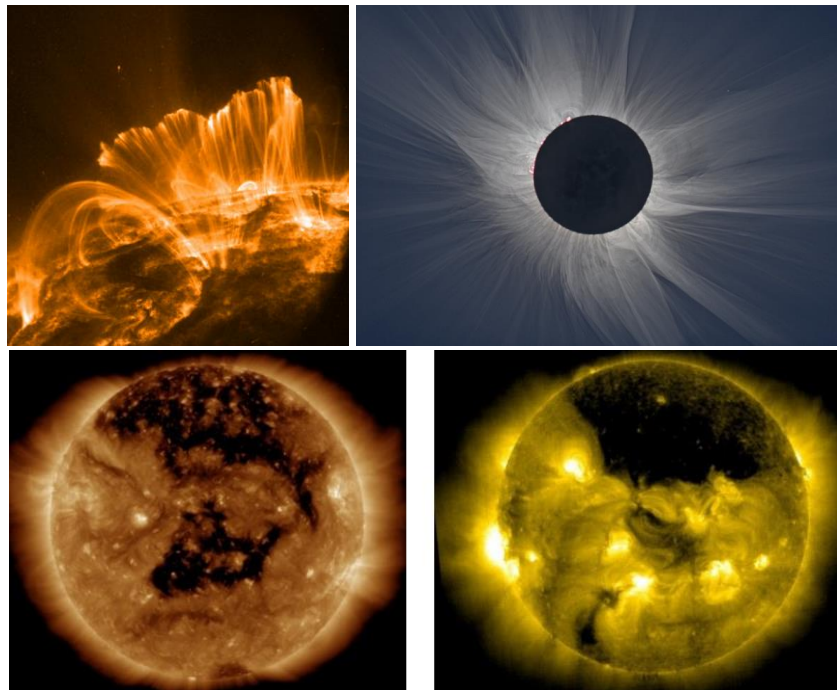


Рисунок 3.12 Петли, стримеры и корональные дыры.

Спектр Солнца

С точки зрения теории переноса излучения всё, что наблюдатель видит от солнечной атмосферы, *описывается следующим набором уравнений*, где τ_ν – оптическая толщина, показывает, сколько соударений/рассеяний ощутит фотон на своем пути до приёмника.

$$d\tau_\nu = -\kappa_\nu \rho dr,$$

Здесь κ_ν – обратная длина свободного пробега, dr – расстояние, которое прошел фотон. Если оптическая толщина равна 1, то это означает, что фотон прошел одну собственную длину свободного пробега, то есть смог рассеяться единожды. Именно поэтому поверхность с оптической толщиной, равной 1, видится наблюдателю как непрерывная светящаяся область. Спектр такой области будет описываться непрерывным спектром черного тела.

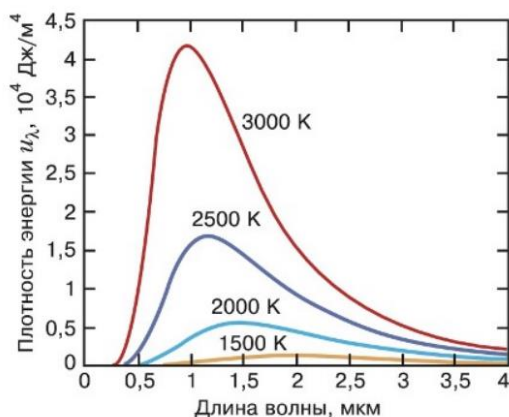


Рисунок 3.13 Спектр АЧТ

$$\mu \frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = I_\nu - S_\nu$$

$$I_\nu(0, \mu) = \frac{1}{\mu} \int_0^\infty S_\nu(\tau_\nu) \exp(-\tau_\nu/\mu) d\tau_\nu$$

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad S_\nu = B_\nu(T)$$

Непрозрачное тело формирует непрерывный спектр без линий, так как из-за частых столкновений возбужденный атом не успевает переизлучить фотон, а отдаёт энергию в тепло. На этот непрерывный спектр накладываются линии поглощения в хромосфере Солнца.

Есть свет в непрерывном спектре, приходящий из фотосферы Солнца через его хромосферу. В некоторых линиях из-за наличия атомов и ионов свет эффективно переотражается или поглощается, такое перераспределение света интерпретируют в терминах *обращающего слоя* – область повышенного взаимодействия с конкретной длиной волны спектра. При многократном переотражении свет выйдет из обращающего слоя, но будет менее горячим, чем



фоновый свет, пришедший напрямую. Фотоны в линиях испытывают когерентное рассеивание, в результате чего увеличивается их путь в слое и растёт вероятность **поглощения**. Если обращающий слой окажется в области с повышением температуры с высотой (верхняя часть хромосферы и переходный слой между хромосферой и короной Солнца), то такие линии будут **эмиссионными**. Линии отражают химический состав обращающего слоя.

При фиксировании спектра Солнца на Земле заметны отклонения от чернотельного. Наиболее сильно спектр меняется под действием поглощения земной атмосферы.

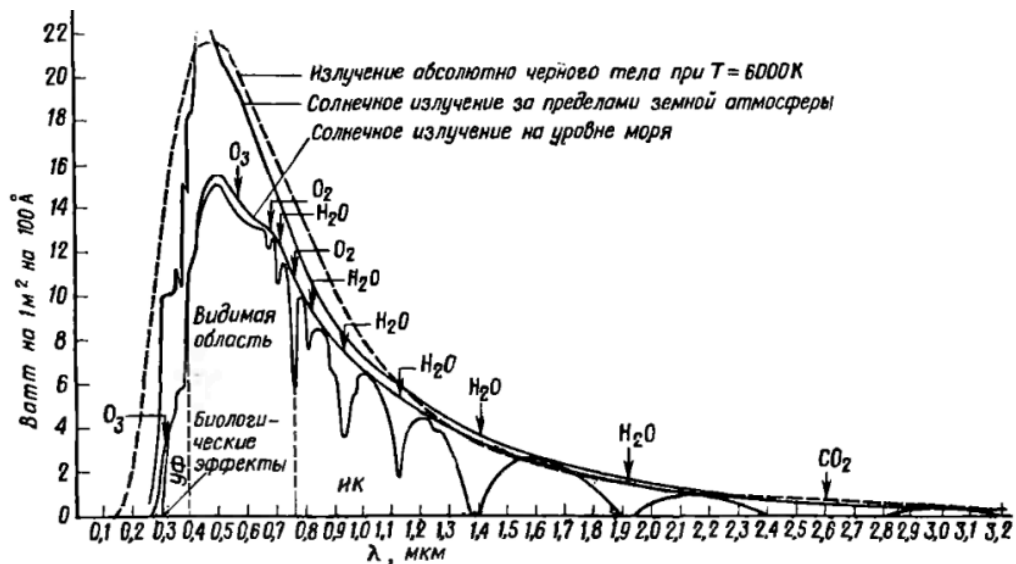


Рисунок 3.14 Спектр солнечного излучения у орбиты Земли и после прохождения через земную атмосферу.

Если приблизить спектр, то можно рассмотреть фраунгоферовы линии поглощения хромосферы. Открыты в 1814 году Йозефом Фраунгофером. Для него это был не спектр Солнца, а спектр неба.

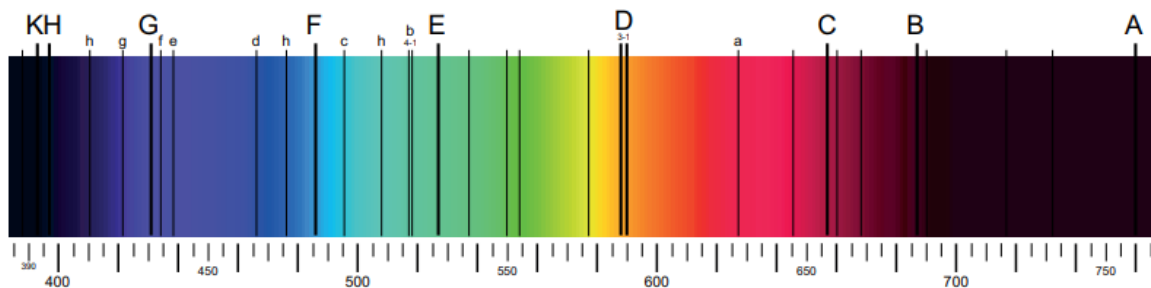


Рисунок 3.15 Спектр Солнца

Самые известные линии:

- Дублет Na I: D1 = 5895,93 А и D2 = 5889 А – жёлтые линии.

- Дублет Ca II: H = 3968,47 А и К = 3933,68 А – фиолетовые линии.
- Линия H_α = 6562,81 А (красная) – линия С в спектре Фраунгофера
- Линия D₃ = 5875,62 – линия Гелия открыта на Солнце в 1868 году независимо двумя наблюдателями (Пьер Жансен и Норман Локьер); гелий обнаружен на Земле спустя 27 лет в 1895 году.

Наиболее интересна в любом спектре **линия водорода**, поскольку является наиболее яркой, так как водорода как элемента содержится больше всего в любом астрономическом объекте. Водород содержит в себе несколько спектральных серий, при переходе электронов на нижнюю орбиту происходит изменение орбитального числа. Особенность линий состоит в подчинении правилам отбора (с учетом более вероятных переходов).

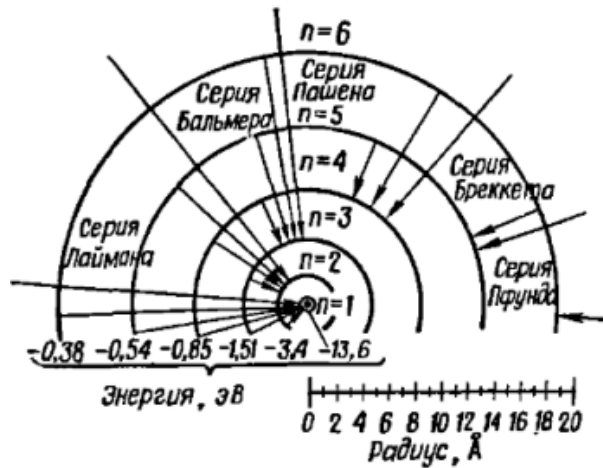


Рисунок 3.16 Возможные переходы электрона

Серии переходов, сопровождающиеся излучением, для атома водорода H:

- Серия Лаймана: 1215 – 912 А
- Серия Бальмера: 6563 – 3646 А

Рассмотрим формирование дублетов линий, например, дублет натрия. Переход электрона с одного и того же уровня (Зего) с одной орбитали на другую возможен с изменением полного момента либо без него.

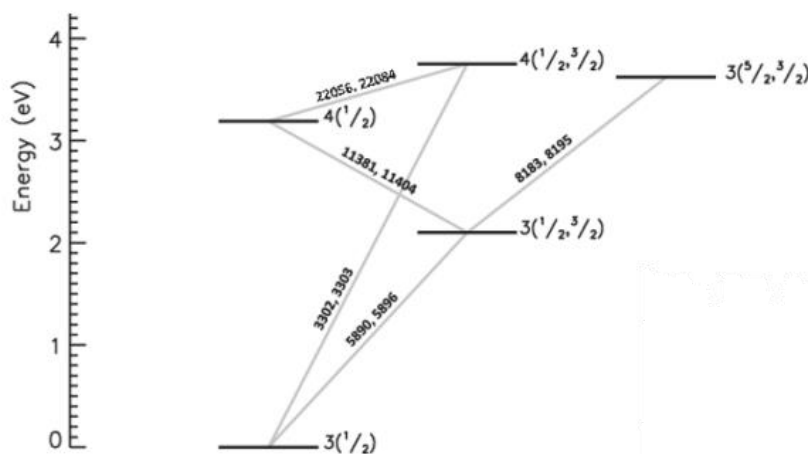


Рисунок 3.17 Схема формирования линий хромосферы – Na I

Na I – (элемент № 11)

1s² 2s² 2p⁶ 3s¹

D1 = 5896 А

D2 = 5890 А

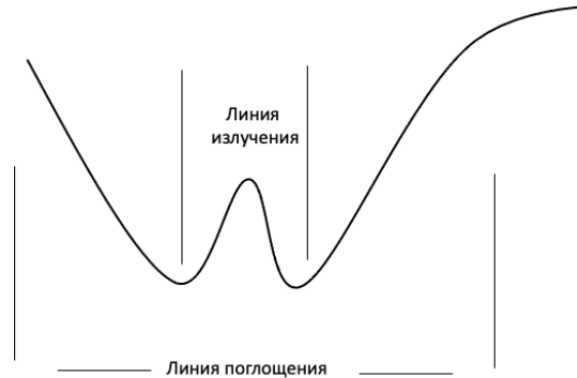
Обилие – 6.33 (14-е место) – относительное количество элемента в солнечной хромосфере по отношению к другим элементам.

Благодаря тому, что различные линии образуются при излучении разных ионов с отличающимися температурами и электронными оболочками получается, что **разные линии образуются на разных высотах**, так как с высотой меняется температура Солнца. Даже разные участки линий могут образовываться на отличных друг от друга высотах.

Газовая оболочка, окружающая Солнце, не является холодной – обладает собственным спектром излучения. Спектр излучения определяется химическим составом хромосферы и совпадает со спектром поглощения.

Наблюдая различные спектральные линии возможно **наблюдение атмосферы солнца на разных высотах**. В спектральной линии может быть 3 составляющие

1. Фоновое излучение – непрерывный спектр
2. Поглощение в некотором обрашающем слое, который имел меньшую температуру, чем та область Солнца, что сформировала фоновое излучение (непрерывный спектр)
3. Эмиссионный горб в линии поглощения (с повышением температуры если появляются условия для образования линии)



Рассматривая одну и ту же линию в различных областях можно увидеть разные срезы атмосферы Солнца.

Так, например, при рассмотрении Солнца близи линии H_{α} , можно увидеть непрерывный спектр, то есть фотосферу (см. *рисунок 3.19*).

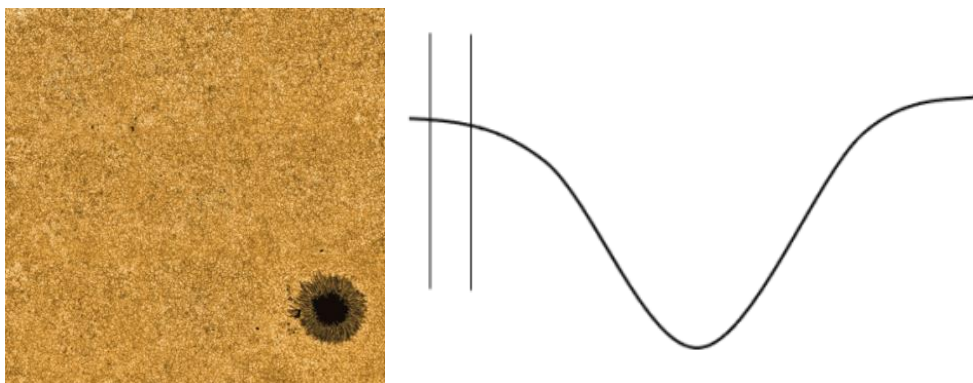


Рисунок 3.18 Фильтр наведён на край линии – близи непрерывного спектра. Видна поверхность Солнца (фотосфера).

Если сместить фильтр ближе к центру, на крыло линии, то будет видна нижняя хромосфера с характерными хромосферными сетками.

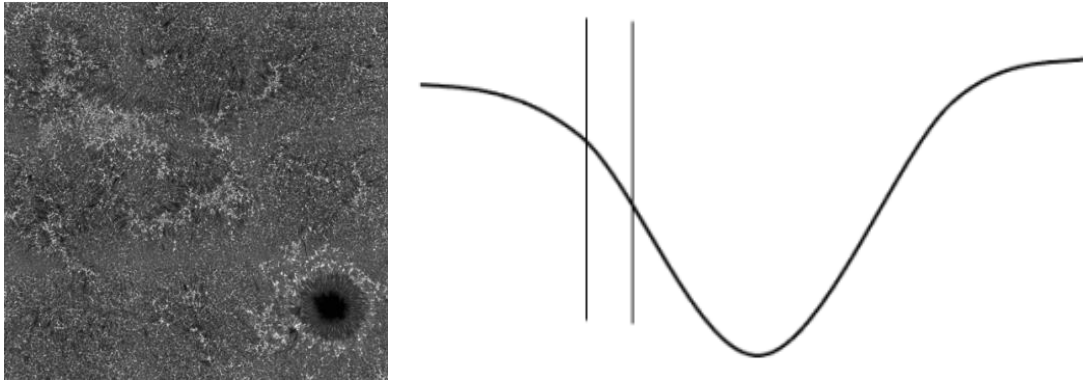


Рисунок 3.19 Фильтр смещён. Виден более высокий слой – промежуточная хромосфера.

Если сместить фильтр к центру (ядру) линии, то будет видна верхняя хромосфера с выделенными направлениями магнитных полей.

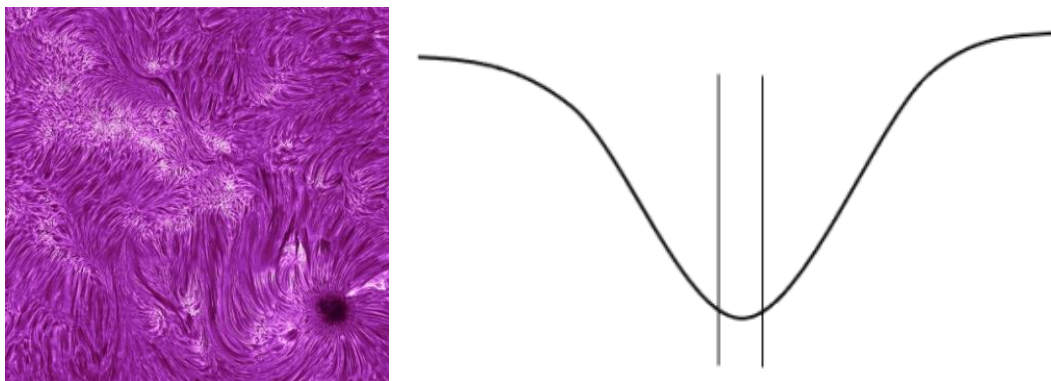


Рисунок 3.20 Фильтр наведён на центр. Виден самый высокий слой – верхняя хромосфера. Полуширина линии $H\alpha$ около 0.5 \AA . Ширина специализированных фильтров до 0.1 \AA .

Кроме зависимости от расположения фильтра, от температуры образования линии существуют физические эффекты, которые воздействуют на форму линии:

1. **Естественное расширение** – связано с квантово-механической природой атома, электрон переходит с одной орбиты на другую, что приводит к разности в энергиях. В то же время неопределенность Гейзенберга утверждает, что если какой-либо процесс происходит за конечный промежуток времени Δt , то неопределенность в энергии ΔE , умноженная на Δt превышает постоянную Планка. Из-за этого любая спектральная линия НЕ является «отрезком» на некоторой частоте, НЕ является монохроматической, а представляет собой Гауссов колокол.

2. **Доплеровское расширение** – излучающие атомы движутся, следовательно, при движении от наблюдателя линия смещается в красную часть спектра, при движении на наблюдателя линия смещается в синюю часть спектра.
3. **Расширение вследствие давления** – излучающий атом/ион окружен другими атомами/ионами. Физически имеет значение не газодинамическое давление между частицами, а воздействие электромагнитных полей одних атомов/ионов на другие.

Типы взаимодействия частиц

Значение m	Описание	Название
2	Электроны или ноны возмущают атомы водорода	Линейный эффект Штарка
3	Нейтральные атомы возмущают атомы того же элемента	Резонансное расширение
4	Электроны или ноны воздействуют на неводородоподобные атомы	Квадратичный эффект Штарка
6	Нейтральные атомы возмущают атомы другого элемента	Силы Ван-дер-Ваальса

В ультрафиолетовом диапазоне солнечная корона видна как горячая область с температурами порядка миллиона кельвин. Рассмотрим, как Солнце выглядит в линиях white light, 1700 Å, 1600 Å, 304 Å, 171 Å, 193 Å, 211 Å, 335 Å, 94 Å, 131 Å.

Wavelength	Emission line	Regions	$\log_{10}(T/K)$
white light	continuum	photosphere	3.7
1700 Å	continuum	Photosphere, minimum temperature	3.7
304 Å	He II	Chromosphere, transition region	4.7
1600 Å	C IV+cont.	Transition region, upper photosphere	5.0
171 Å	Fe IX	Quiet corona, upper transition region	5.8
195 Å	Fe XII	Corona	6.2
193 Å	Fe XII, XXIV	Corona, hot flare plasma	6.1, 7.3
284 Å	Fe XV	Corona, active-regions	6.3
211 Å	Fe XIV	Corona, active-regions	6.3
335 Å	Fe XVI	Corona, active-region	6.4
94 Å	Fe XVIII	Corona, flaring regions	6.8
131 Å	Fe VIII, XX, XXIII	Corona, flaring regions	5.6, 7.0, 7.2

Почему существует потемнение диска Солнца к краю? При рассматривании диска Солнца в его центре взгляд погружается вглубь звезды и натывается на всё более плотные слои. В какой-то момент взгляд проходит достаточное количество частиц, набегит оптическая толща, равная 1. При взгляде на край диска Солнца луч зрения

проходит по касательной, пройдя сквозь менее плотные слои, но, встретив на своем пути большее количество частиц. Оптическая толща, равная 1, наберется уже на другом расстоянии от поверхности Солнца, большем, чем вблизи центра диска, **НО** не с больших глубин. **Таким образом, непрерывный спектр Солнца из центра диска придет с больших глубин, нежели спектр от его края.** Так как на больших глубинах Солнца выше температуры, то и яркость такого излучения выше, отсюда и появляется потемнение края диска Солнца.

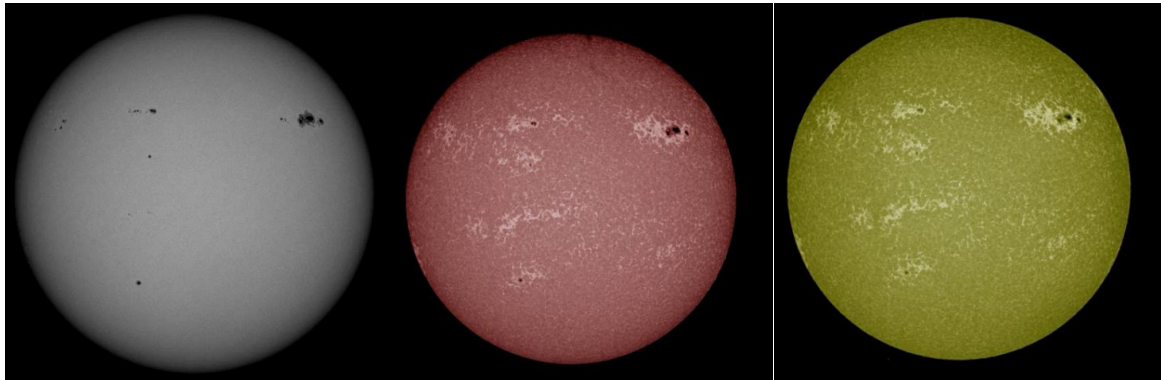


Рисунок 3.21 Солнце в линиях white light, 1700 Å, 1600 Å

В линии 1700 Å видна нижняя хромосфера. В линии 1600 Å эффекта потемнения к краю почти не наблюдается, для неё характерен температурный минимум хромосферы Солнца.

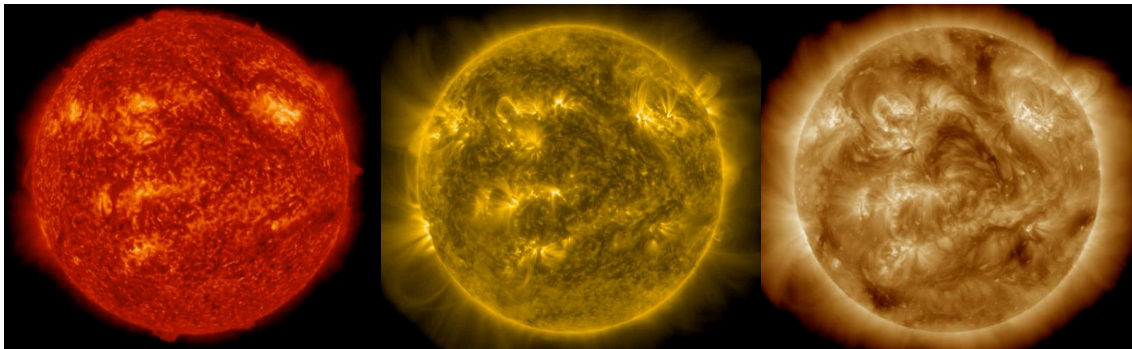


Рисунок 3.22 Солнце в линиях 304 Å, 171 Å, 193 Å, 211 Å, 335 Å, 94 Å, 131 Å.

В линии 304 Å (линия гелия) виден переходный слой между хромосферой и короной Солнца – десятки тысяч К. Наблюдается эффект поярчения к краю, но его почти не видно, так как в фиолетовых линиях доминирует не фоновый спектр, а излучение отдельных горячих областей, связанных со вспышечными энерговыделениями в атмосфере Солнца. Ячеистая структура сменяется магнитными полями при переходе от хромосферы к короне.

В линии 171 Å температура составляет почти 1 млн. К. Заметны вспышки и рост ярких *магнитных аркад*. Хромосферная сетка пропадает с изображения, появляются подсвеченные петли магнитного поля в короне.

В линии 193 Å при температуре 10-15 млн. К наблюдается смесь спокойного излучения Солнца и активных областей Солнца, видны начавшие свое формирование корональные дыры.

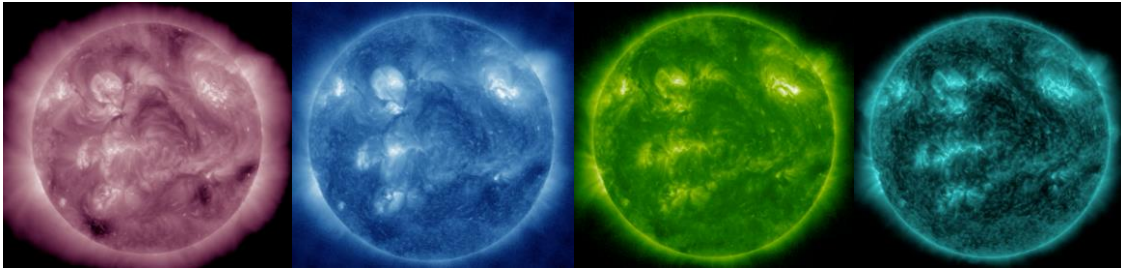


Рисунок 3.23 Солнце в линиях 211 Å, 335 Å, 94 Å, 131 Å.

В линии 211 Å лучше видны малые корональные дыры. В линии 335 Å почти отсутствует спокойная корона, температура порядка 2-4 млн. К, видна вспышечная плазма.

В линии 94 Å заметно яркое излучение от областей со вспышками. В линии 131 Å наблюдаются разные температурные диапазоны: как хромосферные, так и высокотемпературные. Видны и вспышки, и хромосферные сетки.

Модель атмосферы

Используя наблюдения, а именно измеряя эффект потемнения к краю, данные о форме спектральной линии, можно восстанавливать в звезде изменение плотности и температуры с высотой.

Реальный рост температуры в хромосфере происходит в очень тонком слое – всего несколько сот км. В этом слое температура изменяется от 10 тысяч до 1 млн. К

Ионизация вещества при переходе к короне становится сильной, по крайней мере

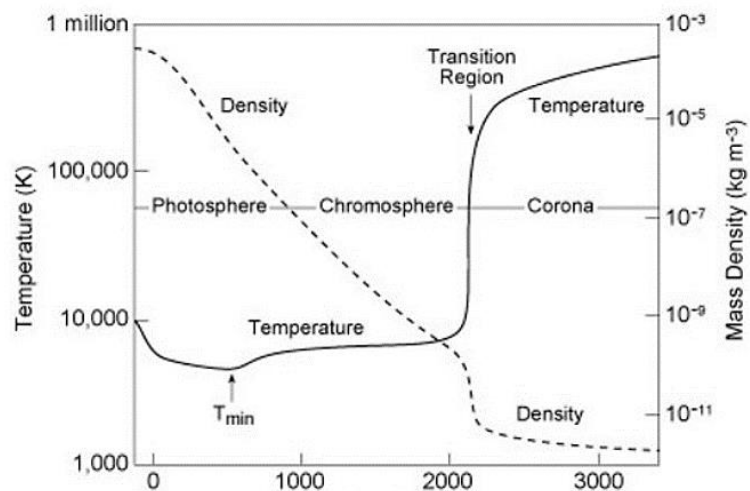


Рисунок 3.24 Модель атмосферы Солнца

водород становится полностью ионизован. Концентрация электронов падает с расстоянием от центра Солнца до $h \approx 2200 \text{ km}$, а затем переходит в ионизованное состояние. Неионизованными остаются только некоторые атомы металлов, которые, в частности, производят корональные линии излучения.

Наблюдая за линиями в спектре, возможно *восстановить химический состав фотосферы Солнца*. Обилие элементов в фотосфере хорошо согласуется с обилием элементов в метеоритах (за исключением лития), так как они образовывались примерно в то же время, что и ядерные реакции на Солнце. *Литий не совпадает* по той причине, что у Солнца перед стадией главной последовательности была короткая стадия, в которой конвективная зона была распространена до ядра, куда литий уходил, сгорая в ядерных реакциях.

Список литературы

1. Эдвард Гибсон “Спокойное Солнце” (1977)
2. Сергей Богачёв “Физика Солнца” (лекции)
3. SDO Dashboard (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/dashboard/>)
4. SDO Ultra HD (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/ultrahd/>)

Лекция №4. Солнечные пятна

Характеристика и структура солнечных пятен

Исторически первым проявлением активности Солнца были солнечные пятна. Понятие активные области/солнечная активность на сегодняшний день связано не столько с пятнами на Солнце, сколько с магнитными полями, выходящими из-под поверхности Солнца. Наиболее ярким проявлением магнитных полей как раз являются солнечные пятна.

На прошлой лекции подробно обсуждалось, что на фотосфере в белом свете наиболее различимыми явлениями являются грануляция и солнечные пятна. В грануляции отчётливо заметны прожилки между отдельными солнечными гранулами, прожилки могут быть тёмными и светлыми, которые говорят о том, какова напряженность магнитного поля (МП) в них. Если среднее магнитное поле в центрах гранул составляет около 0.1 – 1 Гс, то МП в прожилках составляет порядка 10 Гс, а в светлых порядка 100 Гс. Светлые прожилки разогреты ввиду небольшого усиления МП, нагрев происходит за счёт переноса волновой энергии постоянными токами. Если напряженность МП возрастет значительно, то оно подавит конвекцию под фотосферой, что повредит передаче тепла из недр Солнца. В таком случае наблюдается **образование солнечного пятна**.

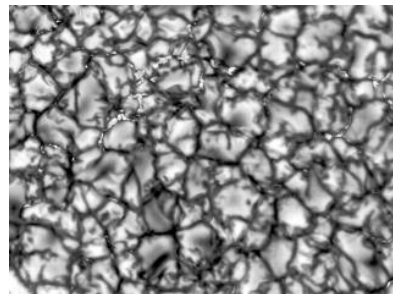


Рисунок 4.1 Грануляция солнечной поверхности

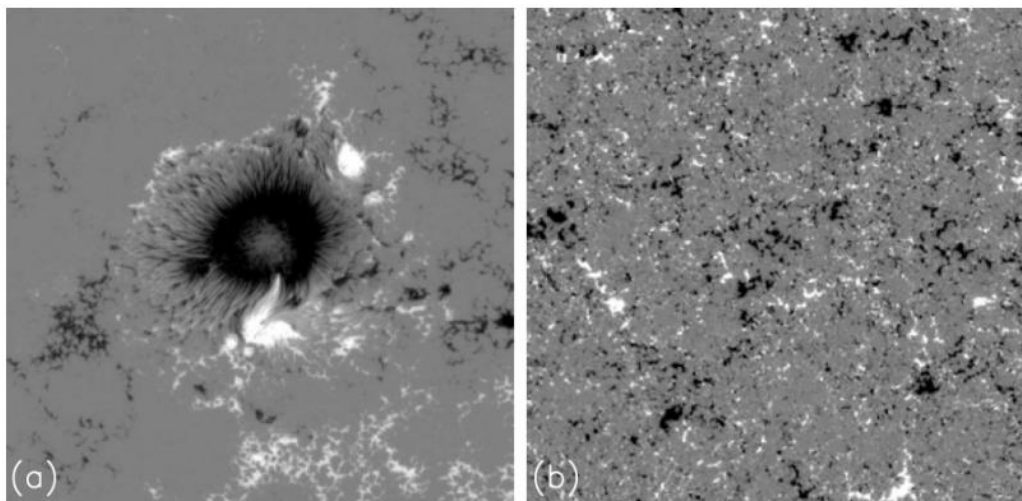


Рисунок 4.2 Солнечное пятно в магнитограмме является концентрированным в сравнении со спокойным участком солнечной поверхности (пёстрая картина перемешанных более-менее однородно полярностей). В солнечном пятне доминирует одна полярность. Parnell et al. (2009), авторские права AAS.

В солнечном пятне выделяют **область тени** (однородное тёмное ядро) и **область полутени** (переходная область между ядром пятна и грануляцией на поверхности Солнца), последняя представляется как набор вытянутых линий, **филаментов**, тянущихся от поверхности к ядру. Пятна могут иметь достаточно сложную структуру относительно их количества в группе солнечных пятен. **Поры** – солнечные пятна, не обладающие полутенью. Если посмотреть на солнечное пятно в движении, то можно обнаружить **характерные течения** гранул от области ядра к другим гранулам, а также течения филаментов в полутени к центру ядра. Нередко можно заметить **прожилки** из полутени, вторгающиеся внутрь ядра, они характерны для стареющих солнечных пятен, которые делятся на несколько отдельных элементов, которые диссипируют в окружающей солнечной грануляции. Молодые солнечные пятна имеют правильную округлую, зачастую симметричную форму.

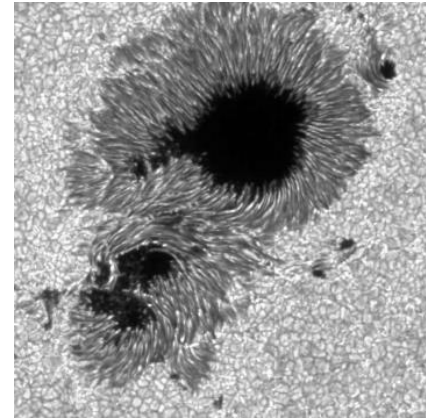


Рисунок 4.3 Солнечное пятно крупным планом в видимом спектре

На снимках солнечных пятен с хорошим разрешением видны светлые области в ядрах пятен и тёмные области в полутени (например, рис. 4.3, нижнее левое солнечное пятно).

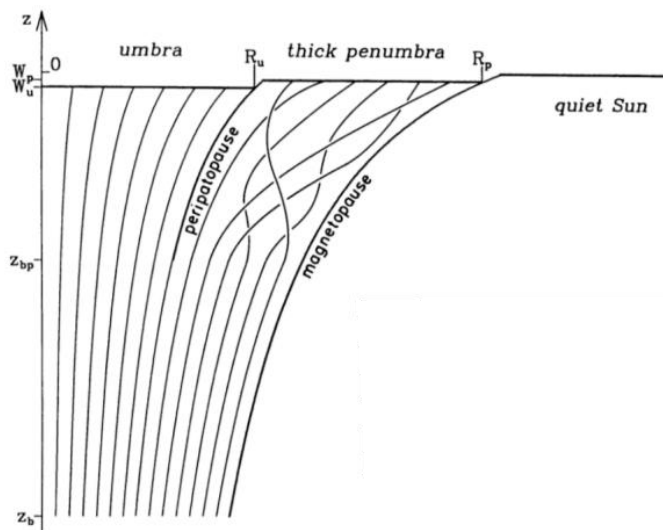


Рисунок 4.4 Модель солнечного пятна. Из работы Schmidt, 1991

Любое представление солнечного пятна подразделяет плазму на три области: тень, полутень, спокойное Солнце. Различаются эти области физикой, которая связана с магнитными полями. Внутри тени энергия магнитного поля намного превосходит кинетические движения конвекции, благодаря чему вещество не перемешивается. В спокойном Солнце энергия МП много меньше энергии кинетических движений, из-за чего теплоперенос осуществляется посредством конвекции. В промежуточной области, полутени, оба вида энергии схожи по порядкам, поэтому МП полутени представляет собой смешанную конфигурацию, на которую воздействуют конвективные течения, но их взаимодействие мешает перемешиванию.

МП подавляют эффективный теплоперенос за счёт конвекции, остается только теплоперенос за счёт теплопередачи, из-за чего области тени намного холоднее (~ на 1500 К) областей спокойного Солнца. Такая область газа излучает сравнительно меньше света, нежели поверхность, из-за чего кажется, что солнечные пятна чёрные. Из-за пониженной температуры у вещества солнечного пятна повышена прозрачность, фотоны выходят с больших глубин, поэтому видимое положение тени пятна находится ниже, чем уровень спокойной фотосферы. Солнечные пятна успешно моделируются численными методами в полной системе МГД (магнитогидродинамических) уравнений.

Группы солнечных пятен: формирование. Доплерограмма солнечного пятна

Солнечные пятна эволюционируют: появляются на поверхности Солнца, увеличиваются в размере, а после рассеиваются. Эволюция солнечных пятен происходит в широком временном диапазоне. С наблюдением солнечных пятен связано первое определение скорости вращения Солнца Галилео Галилеем. Быстрое развитие солнечных пятен производит наиболее сильные вспышечные события на Солнце (см. след. лекции).

Солнечное пятно формируется постепенно слиянием пор, выступающих на поверхность звезды в активной области. Чаще всего солнечные пятна формируются биполярными группами, поскольку у линии МП есть начало (выход) и конец (вход).

1. Перед всплытием солнечных пор появляется факельная площадка – область, содержащая много световых прожилок в грануляционных движениях на фотосфере. Их появление говорит о повышении МП до значений пока не достаточных для сдерживания конвективных движений под фотосферой.
2. Появление тёмных вытянутых прожилок, а после и первых пор, которые движутся в противоположных направлениях и постепенно сливаются в крупные солнечные пятна.

На магнитограмме видно, что область магнитных пятен много больше темных образований: МП занимают большую область, угол наклона к экватору относительно изображения в видимом свете отличен (рис. 4.5).

Линия, разделяющая северную и южную полярности, называют нейтральной линией магнитного поля (фотосферная нейтральная линия). С этой линией связаны различные проявления процессов, связанных с солнечными вспышками (см. след. лекции).



Рисунок 4.5 Снимки SOHO/MDI в белом свете и магнитограммы, сделанные 26 июля 2010 года, показывают, что биполярные магнитные поля (белое/черное = положительное/отрицательное) более протяженные, чем солнечные пятна, которые видны на снимках в белом свете. Солнечные пятна соответствуют наиболее сильным концентрациям магнитного поля на магнитограмме. Однако активная область (AR) простирается до различного магнитного поля.

Доплерограмма (см. лекцию 2) показывает, что в пятне, наблюдаемом в центре диска Солнца, скорости распределены структурно, по краям пятна вещество движется от наблюдателя, вблизи границы тень-полутень вещество поднимается. Реализуется конвекционное движение (эффект Эвершеда):

1. всплытие вещества на границе тень-полутень;
2. перемещение по полутени в сторону спокойного Солнца;
3. спуск по внешней границе полутени под фотосферу.

Пятно около западного края лимбо находится под углом к наблюдателю, дальняя часть полутени показывает движение вещества от наблюдателя, в ближней – на наблюдателя.

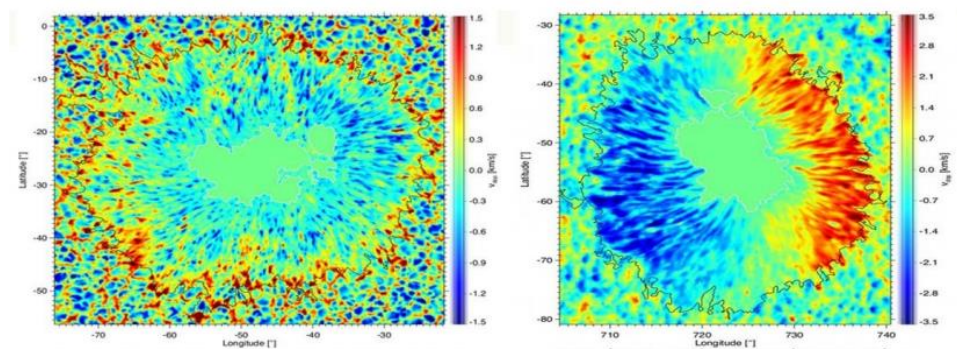


Рисунок 4.6 Пятно NOAA 10933, наблюдаемое с помощью SP/Hinode под двумя различными гелиоцентрическими углами: $\theta = 3^\circ$ (слева) и 47° (справа). В верхнем ряду показаны карты скоростей, полученные по линейному крылу Fe I 630,15 нм. Красный – от наблюдателя, синий – к наблюдателю.

Историческая справка

Первые наблюдения солнечных пятен фиксировались в летописях. Невооруженным глазом наблюдать солнечный диск можно было только в периоды затянутого дымкой неба ввиду неплотной облачности или дыма от лесного пожара.

Первые сообщения о пятнах на Солнце относятся к наблюдениям 800 года до н. э. в Китае. Впервые пятна были зарисованы в 1128 году в хронике Иоанна Вустерского.

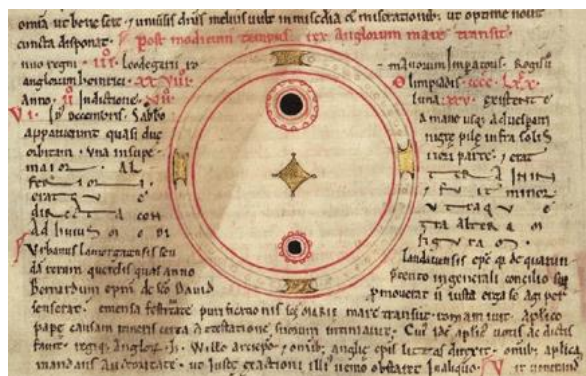


Рисунок 4.7 Первая зарисовка солнечных пятен, 1128 год, хроника Иоанна Вустерского. Масштаб не соблюден

Первое известное упоминание солнечных пятен в древнерусской литературе содержится в Никоновской летописи, в записях, относящихся ко второй половине XIV века:

- бысть знамение на небеси, солнце бысть, аки кровь, и по нем места черны — (1365 год)
- бысть знамение в солнце, места черны по солнцу, аки гвозди, и мгла велика была — (1371 год)

Первые изображения Солнца были получены с помощью камеры-обскура. С 1610 года начинается эпоха инструментального исследования Солнца. Изобретение телескопа и его специальной разновидности для наблюдения за Солнцем — гелиоскопа, позволило Галилею, Томасу Хэрриоту, Кристофу Шейнеру и другим учёным рассмотреть солнечные пятна. Галилей, по-видимому, первым среди исследователей понял, что пятна являются частью солнечной структуры, в отличие от Шейнера, посчитавшего их проходящими перед Солнцем планетами. Это предположение позволило Галилею открыть вращение Солнца и вычислить его период.

С первыми наблюдениями эффекта Вильсона (тень солнечного пятна видна с более глубоких слоев) стало понятно, что пятна – это углубления в видимой поверхности Солнца.

Статистика с 2000 года гласит, что число дней с пятнами – 81 %, число дней без пятен – 19 %. Самая крупная группа пятен: 30.10.2013. В этот же день – максимальная суммарная площадь пятен ~ 0.5 % от площади видимого диска.

На красных карликах пятна занимают до 30 % площади, на коричневых карликах – предположительно более половины площади.

Классификация пятен. Объяснение их природы

С началом наблюдения за группами солнечных пятен появилась необходимость в классификации их видов. Популярная классификация Макинтоши включает три критерия: первая буква описывает общую форму пятна или группы пятен, вторая — описывает наибольшее пятно в группе, а третья — распределение пятен в группе.

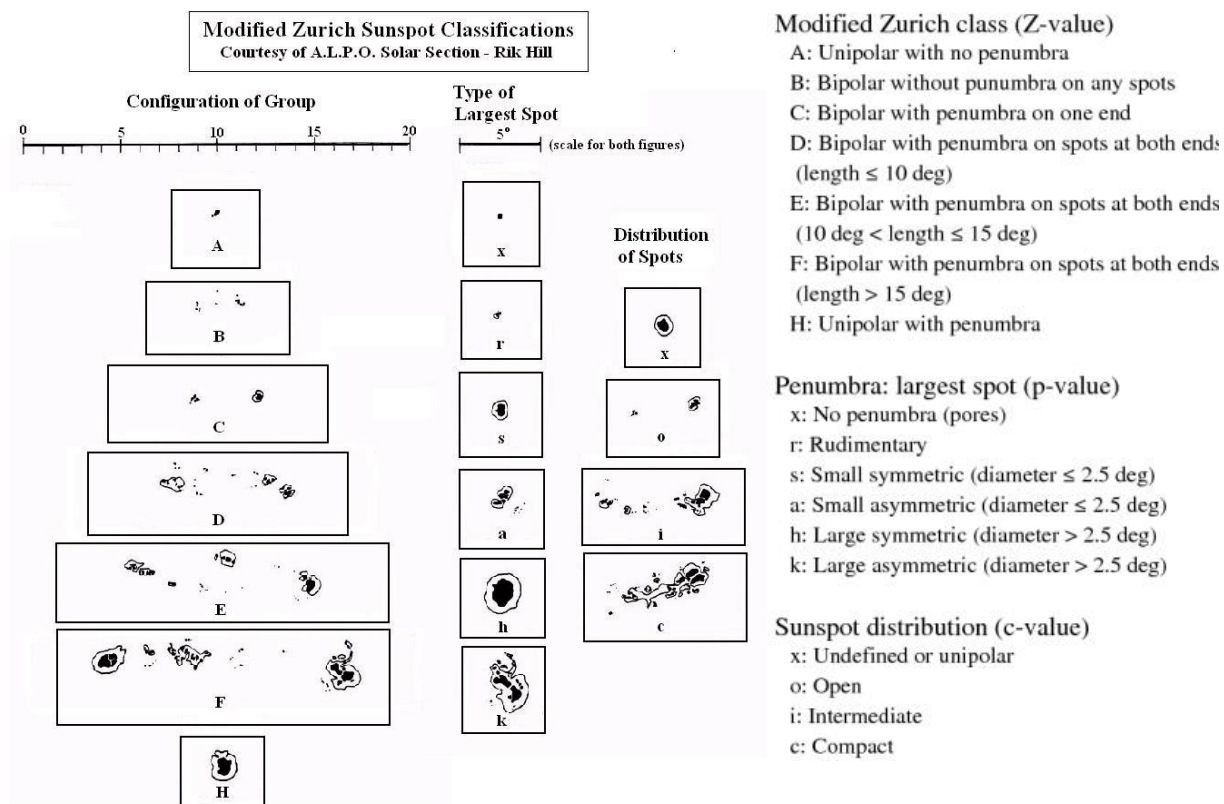


Рисунок 4.8 Классификация солнечных пятен Макентош

Современная классификация основывается на эффективности произведения солнечных вспышек. Сложные конструкции теней и полутеней являются наиболее эффективными и быстро развивающимися во времени. Применяется 4 индекса: α , β , γ , δ . α — униполярная область, одно солнечное пятно, β — биполярная область (есть северная и южная полярности), γ — наличие малых пятен, δ — солнечные пятна слились в полутень. Комбинации индексов описывают характерные структуры.

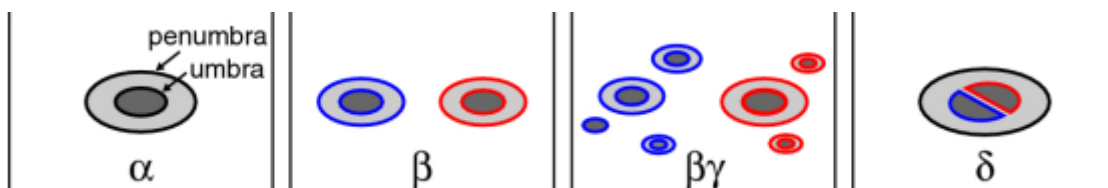


Рисунок 4.9 Примеры диаграмм классификации Маунт-Уилсона. Из работы Sammis et al. (2000).

Ниже представлена схема (рис. 4.10) с указанием площади пятен и их максимальным рентгеновским потоком. Заметна прямая пропорциональность (чем больше площадь пятна, там больше рентгена высвечивается в вспышках). Наименьшую продуктивность с точки зрения вспышек имеют простые солнечные пятна типа α и β . Наибольшую продуктивность имеют пятна сложной конфигурации $\beta\delta$ и $\beta\gamma\delta$.

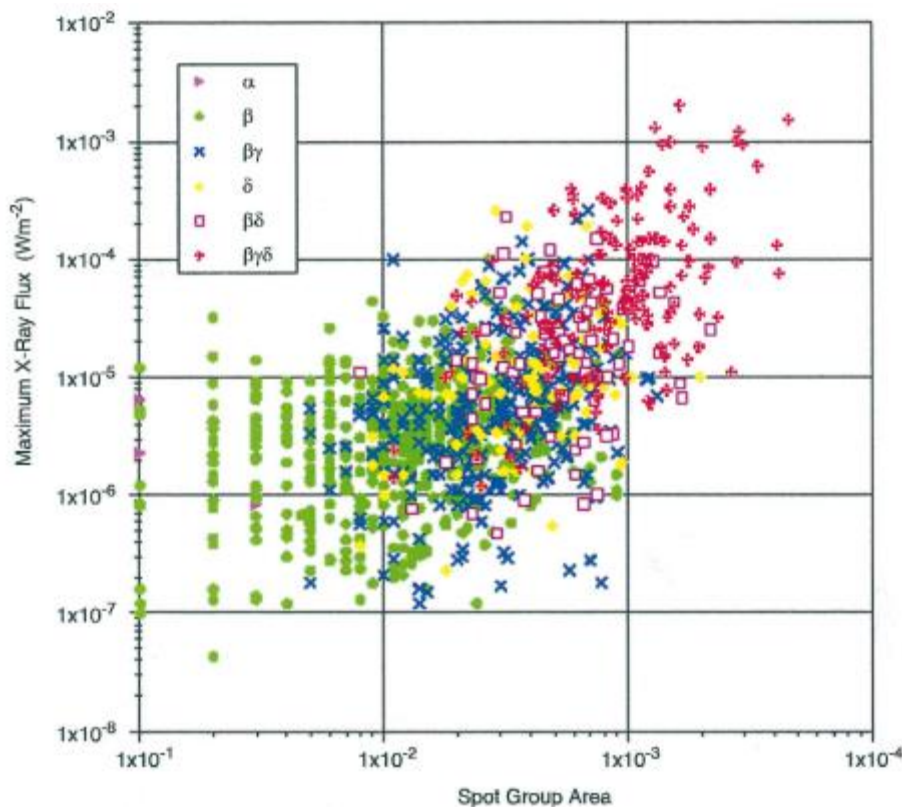


Рисунок 4.10 Пиковые величины вспышек как функция максимальной площади солнечных пятен. Изображение из работы Sammis et al. (2000).

Природа пятен

На объяснение природы солнечных пятен больше других повлияли два исследователя:

1. **Джордж Хейл** – американский астроном, изобретатель спектрогелиографа (позволяет наблюдать Солнце в некоторой спектральной линии). Доказал наличие на Солнце сильных магнитных полей (~ 1910 год) – первое измерение внеземного магнитного поля.
2. **Хорэс Уэлкам Бэбкок** – американский астроном, изобретатель магнитографа – позволяет наблюдать МП на поверхности Солнца (1953 год). Получил точные значения полей в пятнах – от 1000 до 5000 Гс.

Исследователи определили, что солнечные пятна являются областями выхода сильных магнитных полей, откуда становится понятна причина парного образования пятен: если некоторый магнитный поток вышел из-под фотосферы, то он стремится уйти обратно под фотосферу.

В соответствии с классическими представлениями пара солнечных пятен образуется в результате всплытия некоторой трубки МП. Всплытие связывают с *неустойчивостью Паркера*.

Рассмотрим искривившуюся трубку вещества, направленного МП (рис. 4.11) выше фотосферы и рядом расположенную трубку. На равновесие последней действует две силы: притяжение Солнца своим гравитационным полем и газодинамическое давление окружающей плазмы. Под фотосферой МП не сильно воздействуют на солнечное вещество ($E_{\text{вещества}} \gg E_{\text{МП}}$). Ввиду ионизации вещества и его высокой проводимости оно вморожено в МП, поэтому вещество скользит вдоль МП. Пусть в такой горизонтальной трубке возникнет возмущение, начальное искривление, тогда веществу удобно в поле тяжести Солнца «провалиться», а МП при этом, избавившись от давления, расширяется. Малое возмущение приводит к сильным искривлениям вещества трубки вплоть до выхода из-под поверхности фотосферы.

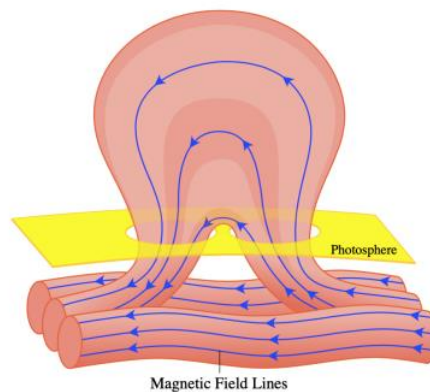


Рисунок 4.11 К объяснению Паркеровской неустойчивости

Образование пятна пошагово:

1. Неустойчивость трубки
2. Приближение трубки к поверхности Солнца
3. Возрастание напряженности МП в фотосфере вследствие п. 2
4. Разогрев фотосферы, появление факельной площадки
5. Трубка проступает на фотосферу в виде тёмных каналов в солнечной грануляции, в концах которых образуются солнечные поры. Всплытие трубки происходит поэтапно, будто несколько более мелких трубок всплывает и сливается со временем воедино, как и их основания
6. Трубка проходит сквозь фотосферу и поднимается в хромосфере, часть вещества хромосферы может содержаться в этой трубке, что наблюдается как аркада с более плотным веществом в сравнении с корональным.
7. Под действием конвективных потоков под солнечным пятном трубка диссипирует – расплзается в стороны, образуя светлые прожилки-мостики.
8. Пятно распадается и разрушается в солнечной фотосфере.

В тени солнечного пятна напряженность МП составляет 2500 – 4000 Гс. В области полутени падает до 1000 Гс. В то же время вблизи ядра солнечного пятна МП

направлено вертикально к наблюдателю, в полутени вектор наклоняется, «ложится», на границе – горизонтально располагается.

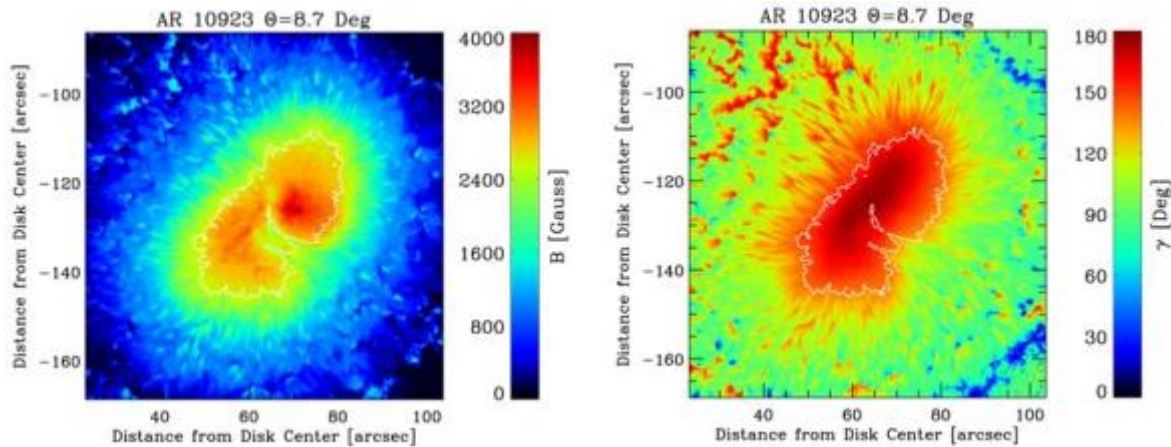


Рисунок 4.12 Слева: распределение модуля напряженности МП в солнечном пятне. Справа: распределение угла наклона векторов напряженности относительно наблюдателя.

Пучок линий МП либо выходит из одного солнечного пятна и уходит в другое, либо распределяется по поверхности Солнца и не дает достаточную напряженность для подавления конвекции и, как результат, проявления данного процесса в виде потемнений на поверхности. Преимущественно пятна всё же образуются парами.

Сравним тепловую энергию плазмы и энергию магнитного поля вне солнечных пятен и внутри них.

Для плазмы вблизи солнечной поверхности:

$$n = 10^{16} \text{ см}^{-3}, \quad T = 6000 \text{ K}, \quad E_{\text{тепл}} = 3nkT = 25\,000 \text{ эрг/см}^{-3}$$

Для магнитного поля вне пятен:

$$B = 10 \text{ Гс}, \quad E_{\text{магн}} = \frac{B^2}{8\pi} = 4 \text{ эрг/см}^{-3}$$

Для магнитного поля в пятнах:

$$B > 2000 \text{ Гс}, \quad E_{\text{магн}} = \frac{B^2}{8\pi} > 160\,000 \text{ эрг/см}^{-3}$$

Таким образом

- вне пятен $E_{\text{тепл}} \gg E_{\text{магн}}$ – плазма доминирует над МП
- внутри пятен $E_{\text{тепл}} \ll E_{\text{магн}}$ – МП подавляет движение плазмы

Механизм понижения температуры. Эффекты Вильсона и Эвершеда. Закон Джоя

Механизм понижения температуры

Из-за подавления магнитным полем теплового движения ухудшается теплоперенос. Вместо конвективного теплопереноса остается теплоперенос путем теплопередачи.

$$\nabla T = \frac{\Phi}{k}$$

где Φ – тепловой поток, k – коэффициент теплопроводности, T – температура.

Чем сильнее подавлена передача тепла (меньше k), тем больше разница температур, то есть тем ниже температура на поверхности Солнца. Коэффициент теплопроводности k поперек МП в плазме очень низкий ввиду того, что k зависит от длины свободного пробега. Если частица заряжена, то она навивается на линию МП и не может пройти внутрь солнечного пятна, из-за чего значение k падает в области движения поперек магнитного поля вместе с теплопроводностью. Так, солнечное пятно не успевает прогреться окружающим горячим веществом.

Ввиду распределения в глубинах существует проекционный *эффект Вильсона* (1769), суть которого есть изменение видимой формы солнечного пятна в зависимости от его положения на диске Солнца. Состоит в том, что, если пятно находится вблизи лимба Солнца, ближайшая к лимбу сторона полутени пятна кажется толще, чем удалённая от неё.

Эффект Эвершеда (1909) – движение газа на уровне фотосферы со скоростью порядка 2 км/с по направлению от центра солнечного пятна наружу, к фотосфере. В хромосфере над пятном происходит движение газа в обратную сторону, к центру пятна со скоростью до 5 км/с.

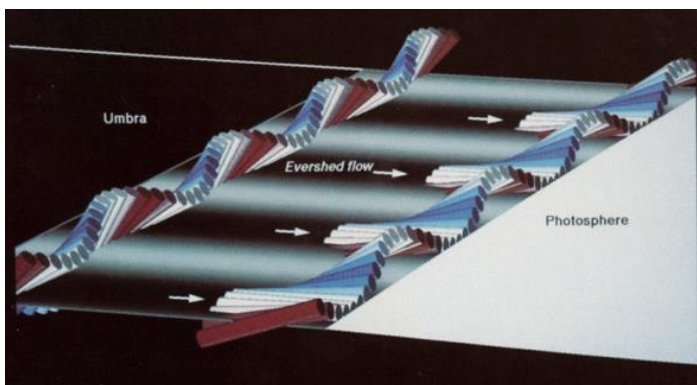


Рисунок 4.13 Эффект Эвершеда

Закон Джоя (1919)

Группы пятен демонстрируют эмпирические особенности, например, зависимость положения пятен относительно широты. Средний угол наклона оси

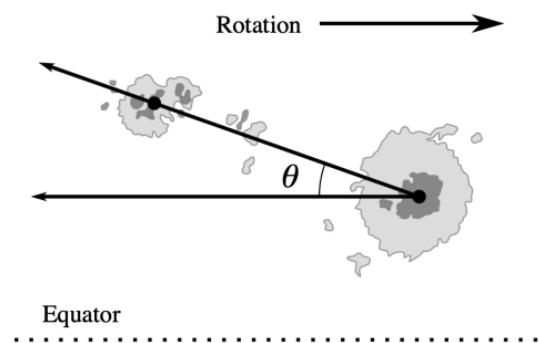


Рисунок 4.14 Демонстрация закона Джоуля

биполярной группы возрастает от нескольких градусов (для групп, близких к экватору) до 10-15° — для высокоширотных групп (с широтами ±25-30° и выше).

В настоящее время принято считать, что закон Джоуля обусловлен действием силы Кориолиса, которая разворачивает всплывающие магнитные поля, образующие солнечные пятна.

Закон Шпёрера. Закон Хейла. Модель Бэбкока-Лейтона

В 19 веке отмечено, что солнечные пятна имеют тенденцию образовывать периодический цикл (цикл солнечной активности – 11 лет). Характерная особенность перемещения пятен пописывается **законом Шпёрера** (1861). Солнечные пятна появляются в начале цикла на широтах около 30°, а затем в ходе цикла спускаются к экватору. В максимуме цикла они располагаются на широтах около 15°, а в момент окончания цикла – на широтах 0° – 5°.

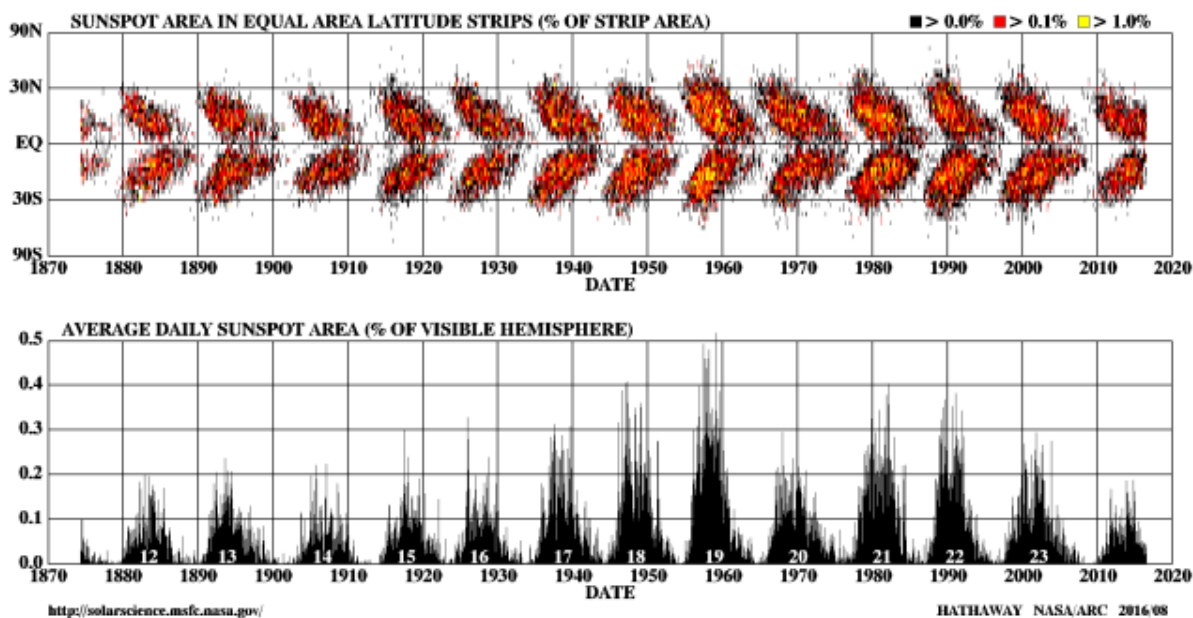


Рисунок 4.15 Диаграмма «бабочек» Маундера

Закон Хейла (1919) связан с тем, что полярность пар солнечных пятен N-S или S-N сохраняется в каждом полушарии в течение всего цикла, а с началом нового цикла меняется на противоположную. Полярность ведущего пятна совпадает с полярностью глобального дипольного МП Солнца.

Все наблюдаемые эмпирические закономерности, наблюдаемые на Солнце, требовали интерпретации. **Модель Бэбкока-Лейтона** является наиболее значимой в историческом аспекте, объясняет формирование солнечных пятен. Так как МП вморожено в вещество, а Солнце имеет дифференциальное вращение (на экваторе быстрее, чем на полюсах), локально МП увлекается этим вращением и наматывается

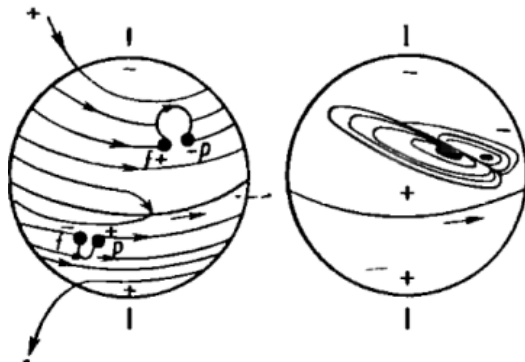


Рисунок 4.16 К объяснению модели Бэбкока-Лейтона

постепенно на ось вращения Солнца. Из дипольного МП образуется тороидальное (окаймляет звезду вдоль экватора). Под действием некоторых процессов (например, неустойчивости Паркера) отдельные линии МП при выходе из-под фотосферы постепенно образуют биполярную группу пятен. Сравнение направлений глобального МП и МП отдельной группы приводит к обнаружению совпадения полярностей ведущего пятна и глобального МП. Данная модель объясняет закон Хейла и закон Джоя.

В процессе распада солнечных пятен связанный с ними магнитный поток постепенно переносится: магнитный поток ведомого пятна уносится на север и компенсирует глобальное МП северного полушария Солнца, магнитный поток ведущего пятна уносится к экватору и компенсируется глобальным МП южного полушария. На полюсах при этом переносе происходит смена полярности. Так, в следующем солнечном цикле глобальное МП Солнце будет иметь обратную полярность.

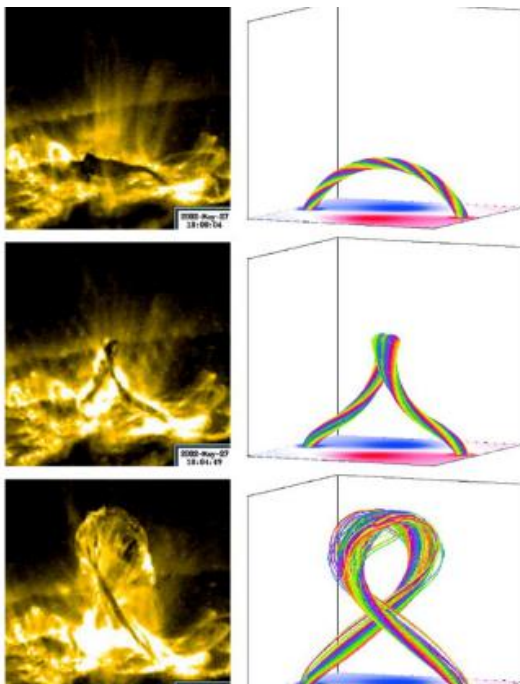


Рисунок 4.17 Скручивание поднимающегося филамента, заключенного внутри трубки МП

Для работы такой модели необходимы процессы, «вытаскивающие» петли МП из-под фотосферы Солнца на поверхность и осуществляющие перенос этих магнитных потоков к экватору или полюсу звезды. Такие процессы **связаны с неустойчивостями в плазме**. Примеры: Паркеровская неустойчивость, желобковая неустойчивость (связанная с кривизной линий МП, применяется на ускорителях), гидродинамические неустойчивости (Гельмгольца, Тейлора). Наиболее удобная для неустойчивостей область – нижняя граница конвективной зоны (области больших градиентов скорости вращения Солнца), которая позволяет организовать процессы закрутки трубок МП.

Всплывая из-под фотосферы, магнитная трубка естественным образом расширяется ввиду разреженности окружающего вещества и превалирования МП над тепловой энергией вещества. Трубки, наблюдаемые на Солнце, *скручены* (не более одного оборота). При подъеме трубка может испытывать искривление (рис. 4.17). Это связано с нарушением устойчивости Титова-Демулина.

Такие *магнитные трубки могут образовываться в хромосфере* (рис. 4.18). Пусть есть аркада магнитных петель, слева и справа разные поверхности МП, штрих-линия – граница полей (а). Если вдоль этой линии появится некоторое сдвиговое движение (b), то оно приблизит друг к другу две линии МП, которым будет выгоднее перезамкнуться, поменять свою связность (с, d). Повторяя такой процесс с другими петлями МП (е), можно реализовать конфигурацию закрученной магнитной трубки в процессе многократного пересоединения отдельных линий МП.

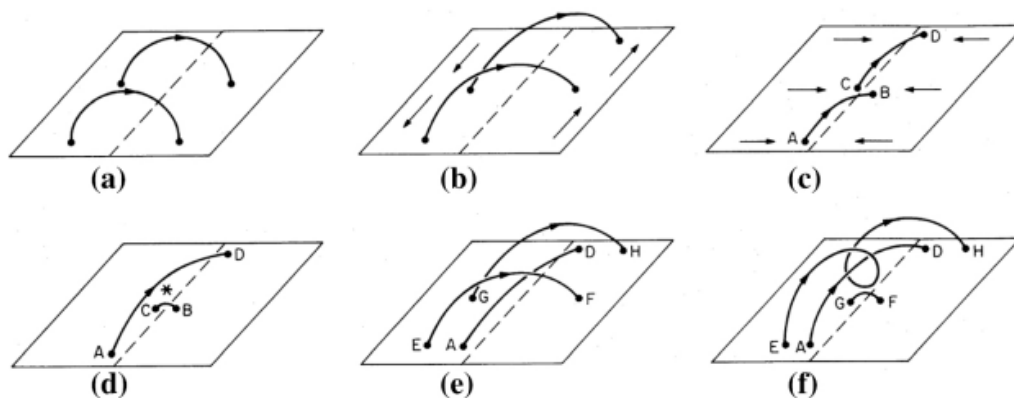


Рисунок 4.18 Образование магнитных трубок в хромосфере

С процессом магнитного пересоединения связана физика энерговыделения в солнечных вспышках (см. след. лекции). Скрученные магнитные трубки могут захватить в себя вещество хромосферы, а затем, поднимаясь в корону, образовать протуберанцы или темные волокна.

Протуберанцы – вещество, которое поддерживается гравитационным полем Солнца и напряженностью линий МП, так как вещество в заморожено в МП. В атмосфере Солнца МП является доминирующим по энергии субстанций и способно поддерживать замороженное в него вещество хромосферы, образуя протуберанцы.

Связь солнечных пятен и солнечных вспышек

Наиболее сильные солнечные вспышки образуются в быстро развивающихся, сложных конфигурациях пятен, внутри которых могут наблюдаться переплетения полярностей в полутенях, окаймляющих солнечные пятна. Такие переплетения могут быть связаны с различными конфигурациями магнитных потоков, находящихся под

фотосферой. Каждая из них может быть продуктивной с точки зрения формирования солнечных вспышек.

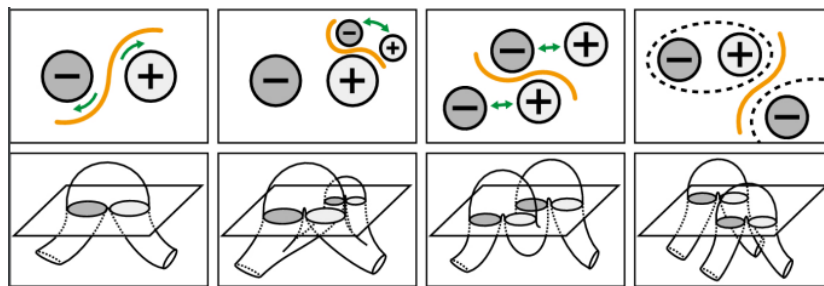


Рисунок 4.19 Конфигурации магнитных потоков. 1 – биполярная группа, связанная с одним магнитным потоком. 2 – двойная биполярная группа, связанная с разделяющимся магнитным потоком, взаимодействующим в солнечной атмосфере с самим собой. 3 – двойная биполярная группа с многократно выходящим магнитным потоком, взаимодействующим в солнечной атмосфере с самим собой. 4 – различные магнитные потоки, оказавшиеся близко локализованными.

Исторически первое наблюдение солнечной вспышки относят к 1859 году, Кэррингтон наблюдал вблизи группы солнечных пятен уярчение фотосферы. Такое явление называется белой вспышкой, является редким ввиду энерговыделения солнечной вспышкой в короне, редко проявляя себя в фотосфере.

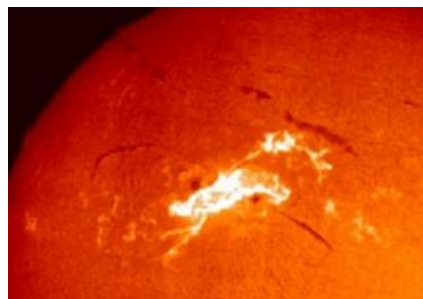


Рисунок 4.20 Двухленточная структура

В линии H_{α} , где наблюдается хромосфера, в результате солнечной вспышки образуется двухленточная структура. При наложении магнитограммы на изображение видно, что каждая из лент расположена в области разных полярностей МП, а между лентами наблюдается нейтральная область МП.

В рентгеновском диапазоне солнечная вспышка выглядит как уярчение потока. Вспышки классифицируют относительно потоков, принимаемых на космических аппаратах GOES в диапазоне 1-8 Å. Классы соответствуют рентгеновскому потоку:

Класс	A	B	C	M	X
Порядок потока, Вт * м ⁻²	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴

Так, например, вспышка класса X_{3,4} означает поток 3,4 * 10⁻⁴ Вт * м⁻². В короне солнечная вспышка и пятно связаны с аркадой магнитных петель, внутри которых заключена разогретая в процессе вспышки плазма. Рассматривая вспышку покадрово (рис. 4.21), будет заметна сложность изменения МП. Перед вспышкой пятна составляют простую биполярную конфигурацию, постепенно она усложнялась образованными белыми пятнами, что привело к смешиванию полярностей. После вспышки хаотичное перемешивание упрощается (последний кадр q).

Непосредственно на солнечном пятне вспышка ведет к *изменению магнитного потока*. Происходит скачок напряженностей МП.

Протуберанец, связанный с МП, образованными в процессе вспышки, может потерять устойчивость, оторваться от Солнца и образовать вытянутую структуру, превышающую размер Солнца, но разреженную и уносящую пренебрежимо малую массу – *корональный выброс массы*.

Список литературы

1. Эдвард Гибсон “Спокойное Солнце” (1977)
2. Matthias Rempel, Rolf Schlichenmaier “Sunspot Modeling: From Simplified Models to Radiative MHD Simulations” \ Living Rev. Solar Phys., 8, (2011), 3
3. Juan M. Borrero, Kiyoshi Ichimoto “Magnetic Structure of Sunspots” \ Living Rev. Solar Phys., 8, (2011), 4
4. Lidia van Driel-Gesztelyi, Lucie May Green “Evolution of Active Regions” \ Living Rev. Solar Phys., 12, (2015), 1
5. Shin Toriumi, Haimin Wang “Flare-productive active regions” \ Living Rev. Solar Phys., 16, (2019), 3

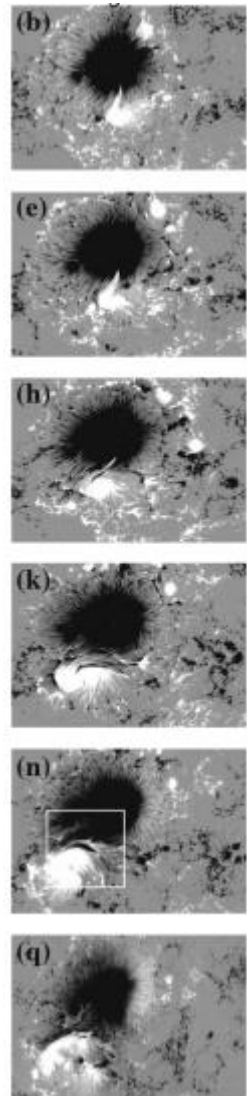


Рисунок 4.21
Покадровая съемка
солнечных пятен

Лекция №5. Солнечный цикл

Солнечный цикл – глобальное изменение магнитного поля Солнца в течение приблизительно 11 лет (точнее – 22 лет).

Историческая справка

Исторически солнечный цикл наблюдался в изменениях покрытия Солнца пятнами с периодом приблизительно 11 лет. Эмпирический закон Хейла (см. прошлую лекцию) показывал, что пятна обладают непостоянным периодом и имеют «зону существования» от 30° с.ш. до 30° ю.ш. В процессе одного солнечного цикла пятна смещаются от высоких широт к экваториальным.

Первые наблюдения солнечных пятен зафиксированы в летописях, религиозных документах, эти свидетельства **совпадают** пиками солнечной активности с циклом, восстановленным моделями.

Начиная с 15 века появляются документальные свидетельства солнечных пятен, наблюденных с использованием **камеры-обскура** (лат. «тёмная комната»). В закрытом тёмном помещении делают малое отверстие, свет от протяженных объектов проецируется на противоположную стену. Отверстие работает как собирающая линза.

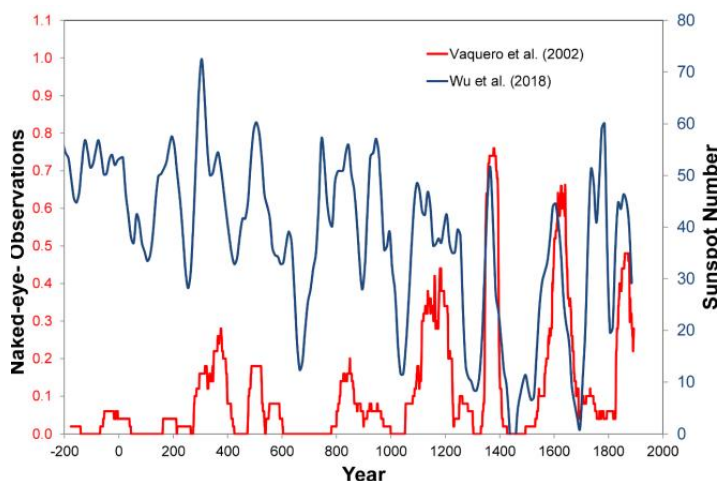


Рисунок 5.1 Прямое сравнение между восстановлением числа солнечных пятен и 50-летним скользящим средним годового числа наблюдений солнечных пятен невооруженным глазом

С 17 века начинаются телескопические наблюдения Солнца и его пятен. Прежде всего эти наблюдения связаны с тремя учёными:

1. **Томас Хэрриот** – обучался в Оксфордском университете, благодаря покровителям мог позволить себе научную деятельность. Наблюдал пятна с помощью телескопа и фиксировал их как рисунок в 1610 году. Рисунки долгое время оставались неизвестными, поскольку Т. Хэрриот не публиковал результаты исследований. Однако именно его зарисовка первична.
2. **Галилео Галилей** – разносторонний человек, построил первые телескопы и положил начало экспериментальной астрономии. Строил проекции через телескоп на экран, зарисовывал результаты.

3. **Христофор Шейнер** – усовершенствовал телескоп Галилея, заменив одно из прозрачных стёкол на окрашенное, тем самым преобразовав его в гелиоскоп. Наблюдал пятна непосредственно в трубу телескопа благодаря уменьшенной яркости солнечного диска за счёт фильтра. Работы публиковал под псевдонимом.

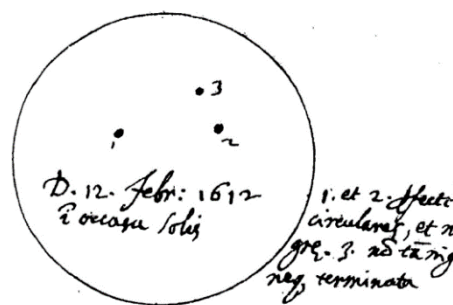


Рисунок 5.2 Зарисовка пятен Галилео Галилеем 12 февраля 1612 года

Телескоп-рефрактор можно построить по двум схемам: **схема Кеплера** (собирающая линза на окуляре, перевернутое изображение) и **схема Галилея** (рассеивающая линза на окуляре, строит прямое изображение).

Наблюдения солнечных пятен

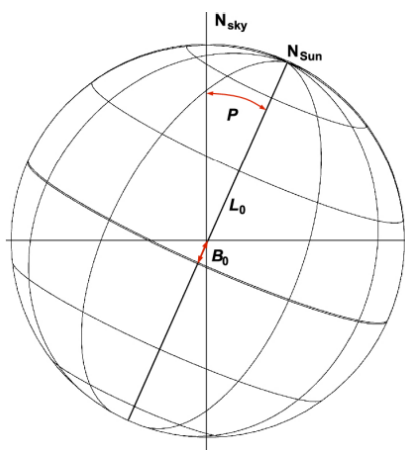


Рисунок 5.3 Линии гелиографических координат, расположенные под углом P к северному полюсу неба и с наклоном к линии обзора B_0 примерно на 7°

При таких наблюдениях кроме зарисовки диска Солнца и его особенностей нередко наносят опорные линии. В 17-18 веках такой линией была эклиптика, а в 18-19 веке такой линией была линия экватора (ввиду распространения экваториальных монтировок телескопов). Зенит и надир также наносились на изображение. Смещение оси вращения Солнца на рисунке происходит относительно существующих на рисунке опорных осей из-за наклона эклиптики к экватору Солнца либо ввиду наклона небесного экватора к экватору Солнца. Также учитывается некоторое расхождение B_0 ввиду того, что Земля не находится строго в плоскости эклиптики.

В 17 веке существовало немало наблюдателей – порядка 10 человек. Такие наблюдения порой совпадали по времени и их можно было сопоставить для сравнения и определения их качества. Предположительный размер Венеры на тот момент был в 2-2,5 раза был позже. Лидировало мнение, что солнечные пятна – это прохождения малых небесных тел на фоне диска Солнца. Некоторые астрономы всё же считали, что солнечные пятна ни что иное как часть Солнца, принадлежат его поверхности. По таким пятнам рассчитывали скорость вращения Солнца.

В середине 17 века появились печатные работы с высококачественным изображением групп солнечных пятен и их эволюции. Ввиду малости пятен их увеличивали в масштабе для наглядности, из-за чего трудно сказать, каков был их истинный размер.

Минимумы солнечной активности. Индексы активности

В конце 17 века начинается период с названием «минимум Маундера», когда на Солнце почти не было солнечных пятен. В начале 18 века солнечная цикличность восстановилась, возобновилась интенсивность, однако интерес исследований угас – количество дней, в которые Солнце наблюдалось, в разы сократилось. Зато качество наблюдений возросло: теперь исследователи делили диск на концентрические окружности, чтобы точнее фиксировать положение солнечного пятна.

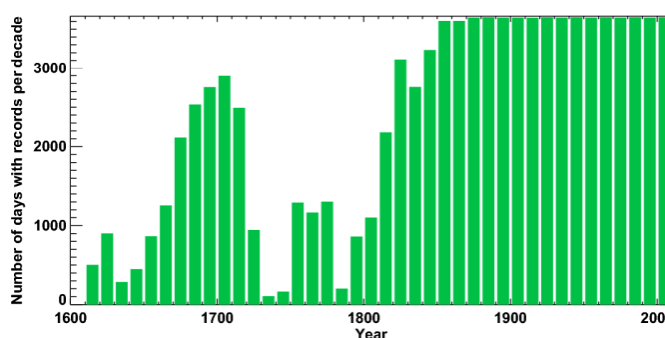


Рисунок 5.4 Охват наблюдений за десятилетия по дням, адаптированный по данным Vaquero и др. (2016). Цифры включают все наблюдения за солнечными пятнами, а также те, которые не содержат рисунков, и обнаружения нулевых пятен

С началом 19 века появляется большой каталог наблюдений Генриха Швабе. Интерес к Солнцу и солнечным пятнам в частности был не беспочвен: в те годы произошли открытия малых тел Солнечной системы (астероиды). К середине 19 века было отмечено, что движение Меркурия неправильно, его перигелий смещается – предполагается, что на него действует другая планета, которая расположена к звезде еще ближе. Планету называют «Вулкан», начинаются активные поиски, что также стимулирует наблюдения за Солнцем. Швабе оставил после себя несколько годовых книг с наблюдениями. Швабе был первым, кто смог за счёт регулярных наблюдений выявить некоторую цикличность активности Солнца.

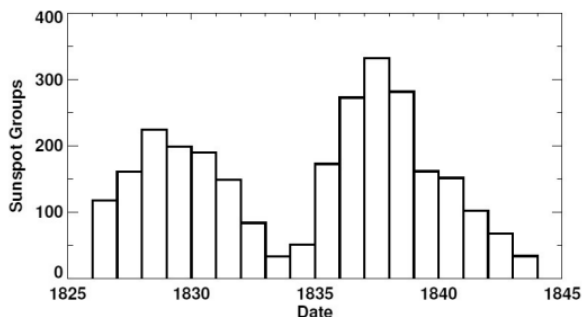


Рисунок 5.5 Группы солнечных пятен ежегодно наблюдались Генрихом Швабе с 1826 по 1843 год (1844). Эти данные привели Швабе к открытию цикла солнечных пятен.

Вольф вдохновляется трудами Швабе и начинает каждодневный подсчёт солнечных пятен без зарисовок. Появилось такое понятие как **число Вольфа** R_z .

$$R_z = k(10G + N)$$

где N – количество пятен, G – количество групп пятен, k – подгоночный коэффициент (для учета разных условий, у Вольфа =1).

Вольф не только продолжал наблюдения, но и систематизировал старые, определив для них числа Вольфа (до середины 18 века).

В ряду чисел Вольфа существует *разрыв Вольфера*, связанный с тем, что на обсерватории в Цюрихе поставили улучшенное оборудование, а потому коэффициент k стали приравнять значению 0,6. Существует еще один – *разрыв Вольдмаера*, связанный с применением новой формулы для подсчёта.

Бабочки Маундера также являются показателем солнечной активности. Распределение пятен по широтам Солнца также продлены вглубь веков за счёт исторических документов.

В настоящее время цикл телескопических наблюдений продлен вплоть до 17 века. График таких наблюдений показывает не только периодичность активности, но и минимум Маундера (вторая половина 17 века) и минимум Далтона (начало 19 века).

Существуют *иные индексы активности*: число Боулдера, американское число солнечных пятен, число групп пятен. С числами Вольфа они имеют прямую пропорциональность. Более физичным является индекс площади солнечных пятен, поскольку солнечное пятно формируется при достижении им некоторой напряженности. Суммируя площади пятен, получается полный поток, пронизывающий фотосферу Солнца.

С появлением радиотелескопов вводят новый индекс солнечной активности: *поток радиоизлучения от Солнца в линии 10,7 см*. В этой линии излучают вспышки Солнца, а также эта линия проходит через земную атмосферу, то есть такой поток может наблюдаться круглогодично с Земли.

Полный индекс солнечной светимости или солнечная постоянная – полная интегральная светимость Солнца на расстоянии земной орбиты. Его измерения производят со спутников, чтобы избежать помех от атмосферы Земли.

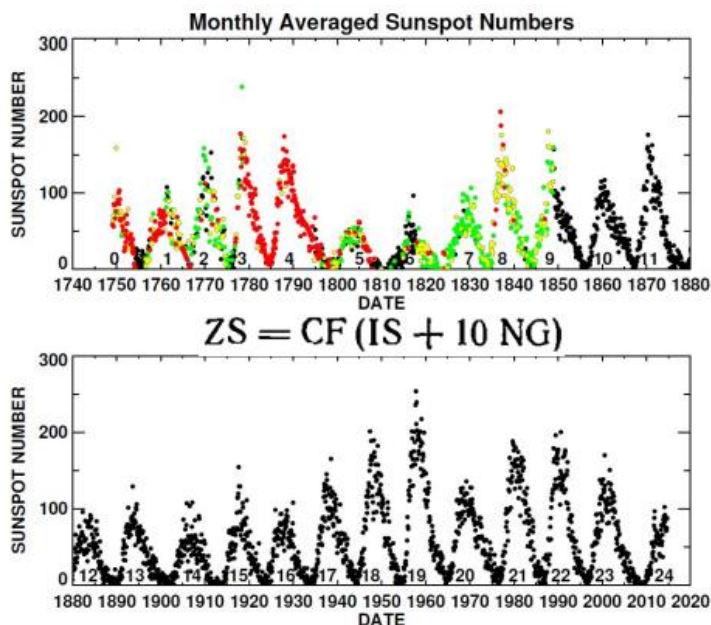


Рисунок 5.6 Среднемесячные значения суточного международного числа солнечных пятен. Иллюстрация солнечного цикла показывает, что он меняется по амплитуде, форме и продолжительности. Месяцы с ежедневными наблюдениями показаны черным цветом. Месяцы, в которых не хватает наблюдений, показаны зеленым, желтым, красным цветом.

Магнитограммы и солнечные вспышки как индикаторы. Изотопный метод

Физическим индексом активности являются **магнитограммы**. При суммировании магнитных потоков вдоль каждой широты, то можно получить средний поток для каждой их широт. Откладывая такие потоки в зависимости от даты, получим **бабочку Маундера** относительно магнитных

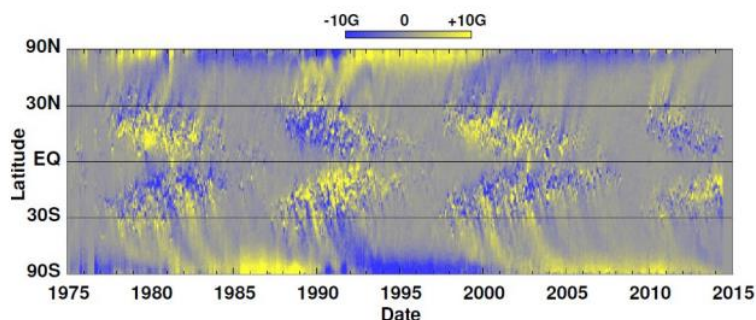


Рисунок 5.7 Диаграмма магнитной бабочки, построенная на основе усредненного по длине радиального магнитного поля, полученного с помощью приборов на Китт-Пике и СОХО

потоков. Такая бабочка не ограничена в диапазоне широт, так как магнитное поле наблюдается на всей поверхности Солнца. На такой магнитограмме заметны полярные области. Каждый солнечный цикл (11 лет) их полярность меняется, это происходит примерно в середине солнечного цикла. Таким образом, относительно МП стоит говорить о 22-летнем цикле Солнца как о физически обоснованном явлении, когда МП полностью переходит к начальному состоянию (**цикл Хейла**).

Еще одной особенностью такой развернутой магнитограммы являются **магнитные диффузионные наклонные линии**, по которым возможно отслеживание смещение магнитных потоков в процессе развития солнечного цикла. По магнитограмме магнитных потоков можно проследить, как один цикл смены полярности зарождается еще в середине предыдущего цикла. Солнечная цикличность не является строго периодическим процессом, который можно было бы разделить на сумму периодических компонент. Солнечная цикличность представляет собой наслаение отдельных всплесков активности.

На графике зависимости силы магнитных полей северного и южного полушария от даты (рис. 5.8) хорошо заметна асимметричность их изменений с периодом 1 год. Магнитные поля отличаются по фазе, по интенсивности и по продолжительности. Кроме того, в каждом цикле солнечной активности можно заметить характерную двугорбость в числе солнечных пятен, она характеризуется периодом 2 года. Двойной горб не может быть описан несимметричностью двух полушарий, объяснение физики процесса пока не представлено.

Солнечный цикл характеризуется количеством пятен – чем их больше, тем в более активной фазе находится Солнце. Аналогично **активность Солнца может оцениваться вспышками**. Такая зависимость имеет нетривиальный вид с линейной

частью. Вспышки по циклу распределены неравномерно. Бывает так, что сильные вспышки происходят на ветви спада солнечной активности.

Удобным и точным индексом солнечной активности является наблюдаемый с Земли **геомагнитный aa индекс**.

Получается сложением результатов наблюдений магнитного поля с двух противоположно лежащих точек экватора. Показывает, как возмущена земная магнитосфера под действием солнечных вспышек. Если построить зависимость **геомагнитного aa индекса** от числа солнечных пятен, то зависимость не будет иметь простой вид, однако прослеживается нижний срез. Один из наиболее эффективных индексов с точки зрения предсказания солнечной активности.

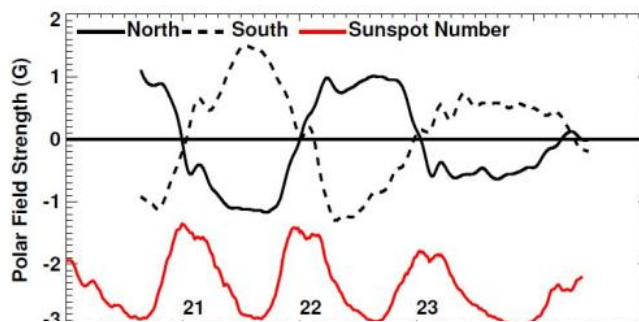


Рисунок 5.8 Полярные поля Солнца, данные Солнечной обсерватории Уилкокса.

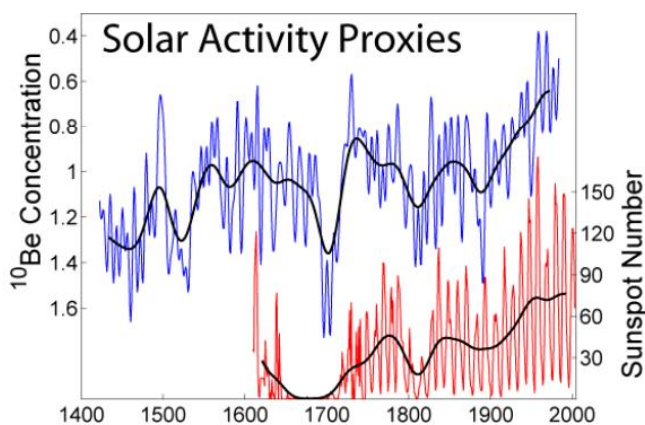


Рисунок 5.9 Восстановление солнечной активности по изотопу ^{10}Be

Солнечные вспышки не только возмущают земную магнитосферу, но и рассеивают галактические космические лучи (ГКЛ), вторгающиеся в Солнечную систему. В моменты повышенной солнечной активности ГКЛ терпят подавление из-за солнечного ветра. Вторгаясь в атмосферу Земли, ГКЛ производят радиоактивные изотопы (^{10}Be , ^{14}C) в воздухе, оседая со временем в Антарктике и Арктике; по наблюдениям изотопов на земной поверхности, а именно **по срезам льда**, можно судить о солнечной активности в прошлом. Чем больше изотопа, тем больше ГКЛ долетело до Земли, тем меньше была солнечная активность.

Развитие метода восстановления активности Солнца по изотопу ^{14}C в прошлые годы стало результатом развития метода углеродного анализа. На **рисунке 5.10** можно увидеть результат такого анализа, наглядно видны минимумы и максимумы солнечной активности.

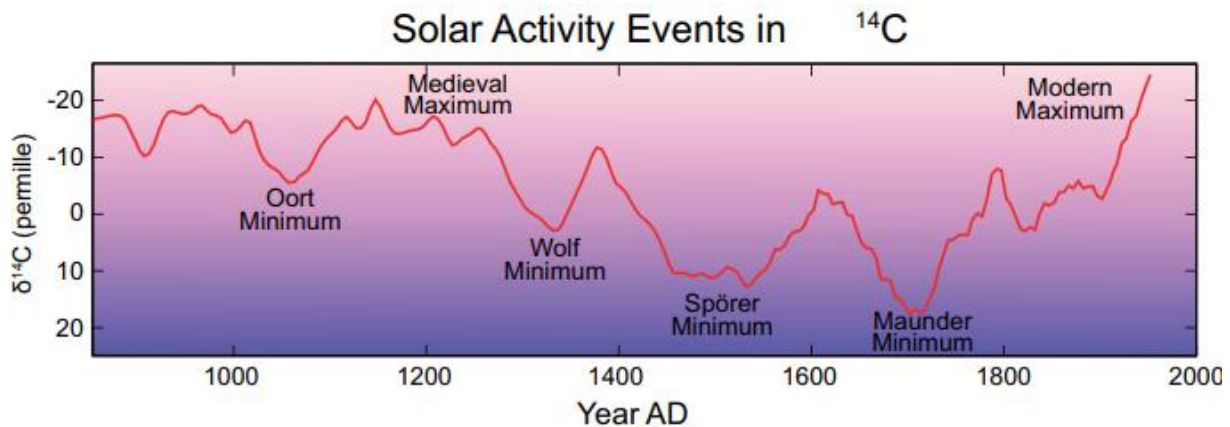


Рисунок 5.10 Солнечная активность за последнюю тысячу лет, измеренная радиоуглеродным методом.

Точность метода падает, если смотреть в более далекие от нынешнего дня годы, разрешающая способность по годам уменьшается. Отдельные циклы солнечной активности в древние века и годы до н.э. увидеть не удастся, но можно наблюдать отдельные минимумы и максимумы солнечной активности. Солнечная активность не сильно меняется в течение нескольких тысячелетий.

Особенности солнечной активности. Активные долготы

Для прогнозирования солнечной активности применяют различные методы. Один из приёмов – **выведение среднего цикла**. Все циклы разрезаются по длительности, растягиваются до 11 лет (цикл нестабильный и может быть от 8 до 14 лет), а после выводится средняя кривая между всеми известными циклами солнечной активности. Эту кривую можно аппроксимировать формулой (их существует несколько), например, экспоненциально-степенная функция (рис. 5.11). Удобство состоит в том, что некоторые из параметров такого распределения (время начала цикла и смещение) остаются почти неизменными, поэтому распределение упрощается, становится двухпараметрическим (высота цикла и его продолжительность).

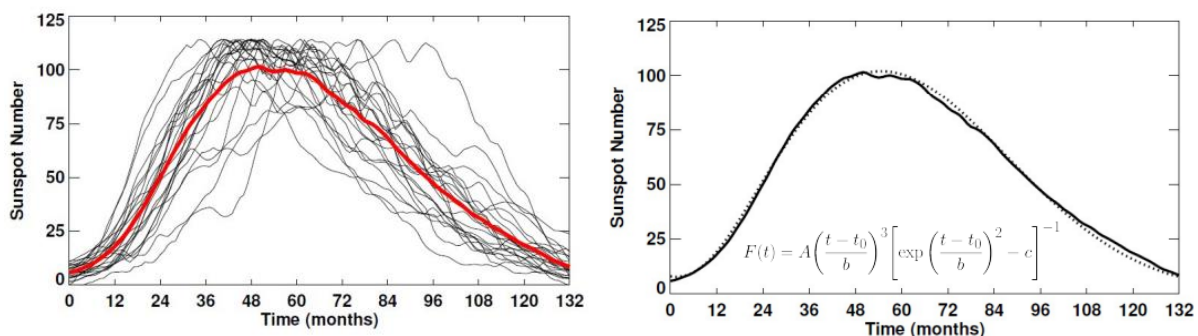


Рисунок 5.11 Слева – выведение среднего цикла. Справа – аппроксимация среднего цикла формулой.

У циклов солнечной активности есть наблюдаемые взаимосвязи, например

- Между высотой цикла и временем роста цикла (то время, за которое цикл добирается до максимума): чем быстрее цикл добирается до максимума, тем он будет короче.
- Продолжительность цикла и высота следующего цикла друг с другом находятся в обратной пропорциональности: чем дольше текущий цикл, тем ниже будет следующий цикл и наоборот.
- Между значением числа пятен в минимуме цикла и в максимуме цикла: чем больше количество пятен в начале цикла, тем больше их будет в максимуме цикла.
- Преобладающее количество пятен в северном и южном полушарии периодически меняется (рис. 5.12). Приблизительно по половине цикла приходится на преобладание количества пятен в южном полушарии над количеством пятен в северном полушарии и наоборот.

Возможно наблюдение за *средней долготой* Солнца: отсчитывается количество пятен, образующихся на конкретной долготе, а затем производится усреднение по времени. Обнаружены активные долготы, которые производят большее количество пятен, чем другие долготы. Пятнам *удобнее образовываться* на тех долготах, на которых пятна уже существовали, такие активные долготы сохраняются на протяжении нескольких циклов солнечной активности.

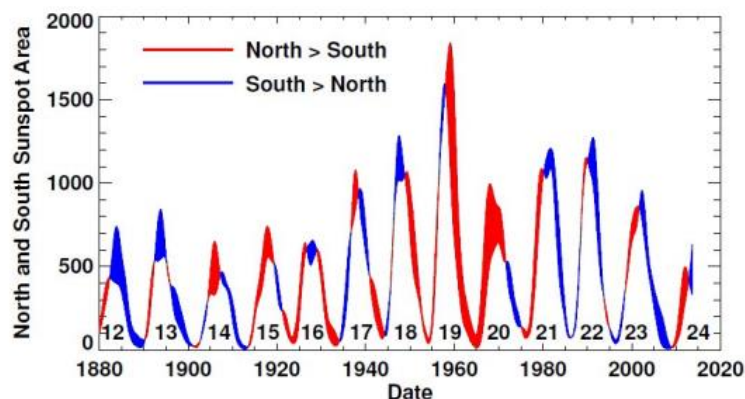


Рисунок 5.12 Сглаженные области солнечных пятен за месяц для северного и южного полушарий отдельно. Разница между двумя кривыми заполнена красным цветом, если доминирует север, или синим, если доминирует юг.

Закон Джоя (см. лекцию 4): зависимость положения пятен относительно широты. Средний угол наклона оси биполярной группы возрастает от нескольких градусов (для групп, близких к экватору) до $10-15^\circ$ — для высокоширотных групп (с широтами $\pm 25-30^\circ$ и выше). Разброс в зависимости от долготы очень сильный, конкретная корреляция слабо выделяется.

Закон Гневышева-Оля:

нечётный цикл чаще всего выше, чем предыдущий, чётный цикл (рис. 5.13). Обратное правило не выполняется. Рассмотрим 21 цикл (см. рис. 5.6), он выше 20-го, 19-ый цикл выше 18-го, 17-ый цикл выше 16-го. Однако 20-ый цикл ниже 19-го, но 18-ый цикл выше 17-го.

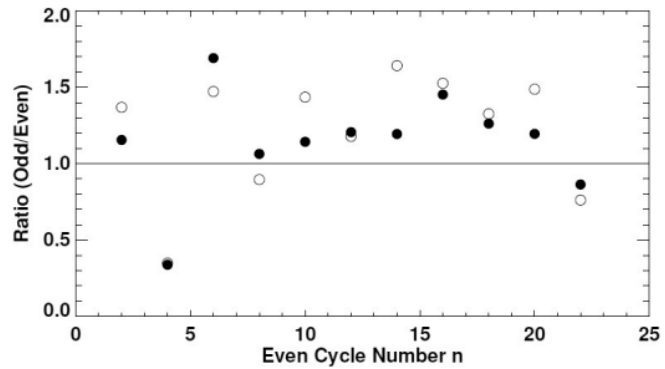


Рисунок 5.13 Отношение суммы солнечных пятен нечетного цикла к сумме солнечных пятен предыдущего четного цикла показано закрашенными кружками. Отношение амплитуды нечетного цикла к амплитуде (высоте) предыдущего четного цикла показано открытыми кружками

Разложение

высокочастотной части спектра солнечной активности позволяет наблюдать квазидвухлетние

колебания, что проявляется в двугорбости числа солнечных пятен (см. рис. 5.8).

Солнечное динамо. Прогнозирование солнечного цикла

Математически солнечная цикличность описывается **уравнениями магнитогидродинамики** (МГД). Суть МГД в том, что магнитным полем и полем скоростей можно описать параметры плазмы, содержащейся внутри Солнца.

Уравнение индукции магнитного поля:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (u \times B - \eta \nabla \times B)$$

Уравнение движения вещества:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + g + \frac{1}{4\pi\rho} (\nabla \times B) \times B - 2\Omega \times u + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \tau$$

Решать такие уравнения для подповерхностного вещества сложно, помехой является и конвективная зона, где происходят постоянные перемешивания вещества. Поэтому чаще всего уравнение движения заменяют на измеренное распределение скоростей вращения Солнца $\Omega(r, \theta)$ с помощью методов гелиосейсмологии.

$$B(r, \theta, t) = \nabla \times (A(r, \theta, t)\hat{e}_\phi) + B(r, \theta, t)\hat{e}_\phi$$

$$u(r, \theta) = u_p(r, \theta) + \varpi\Omega(r, \theta)\hat{e}_\phi, \quad \text{где } r \text{ — глубина, } \theta \text{ — широта}$$

Уравнение индукции разбивают на две компоненты: тороидальную (направленную вдоль экватора Солнца) и полоидальную компоненту МП.

Полоидальная компонента состоит из отрицательных слагаемых:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \underbrace{\eta \left(\nabla^2 - \frac{1}{\omega^2} \right) A}_{\text{resistive decay}} - \underbrace{\frac{u_p}{\omega} \cdot \nabla(\omega A)}_{\text{transport}}$$

Тороидальная компонента включает в себя (1) затухание в связи с тем, что плазма имеет конечную электропроводность (омическая диссипация, затухание токов), (2) перенос МП с течением вещества из-за вмерзненности МП в вещество, (3) расширение-сжатие МП, также из-за вмерзненности МП в вещество, (4) растяжение сдвиговыми движениями линий МП:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial t} = & \underbrace{\eta \left(\nabla^2 - \frac{1}{\omega^2} \right) B + \frac{1}{\omega} \frac{\partial(\omega B)}{\partial r} \frac{\partial \eta}{\partial r} \nabla(\omega A)}_{\text{resistive decay}} - \underbrace{\omega u_p \cdot \nabla \left(\frac{B}{\omega} \right)}_{\text{transport}} - \underbrace{B \nabla \cdot u_p}_{\text{compression}} \\ & + \underbrace{\omega \left(\nabla \times (A \hat{e}_\phi) \right) \cdot \nabla \Omega}_{\text{shearing}} \end{aligned}$$

Первые три слагаемых являются отрицательными, уменьшая напряженность МП. Увеличивает напряженность МП только последнее, 4-е слагаемое, связанное с растяжением линий МП.

Выполнение преобразования МП из тороидального в полоидальное реализуется выполнением некоторых математических преобразований, например, с использованием **теории среднего поля**:

1. Реализуется разложение МП и поля скоростей на среднюю + хаотичную компоненты
2. После усреднения хаотичная компонента дает слагаемое, которое может быть положительным. Математически такую добавку записывают в виде прямой пропорциональности относительно МП (αB).
3. Из-за присутствия коэффициента α в таком слагаемом используется градиент скоростей по радиусу Солнца $\nabla \Omega$. Механизм называют « α - Ω эффект».
4. Из полоидального поля путём накрутки получается тороидальное за счёт градиента скоростей по радиусу Солнца - « Ω эффект».
5. « α -эффект» реализует обратный механизм, превращая поле из тороидального в полоидальное. Физическая природа « α -эффекта» не выяснена.

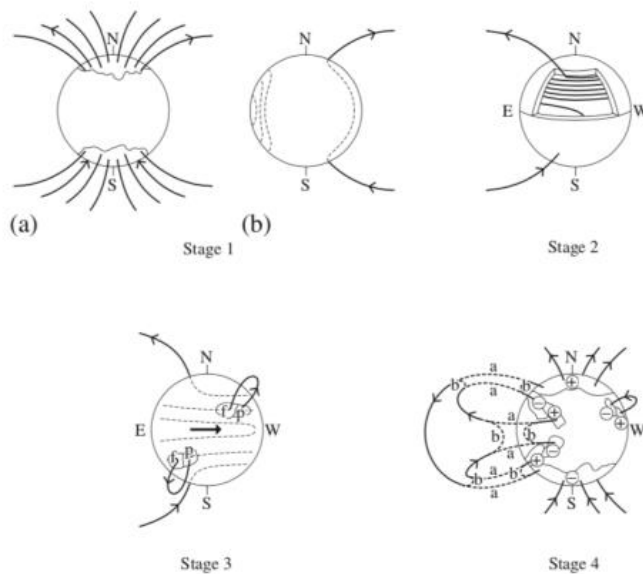


Рисунок 5.14 Модель Бэбкока-Лейтона

Качественно процесс представляется следующим образом (рис. 5.14): дипольное МП в середине одного из циклов на полюсах постепенно усиливается, за счёт дифференциального вращения наматывается вокруг оси Солнца. Намотка происходит в области с наибольшим градиентом по скоростям: знаем из гелиосейсмологии, что наибольший градиент находится в основании конвективной зоны – область тахоклина, где и происходит,

согласно современным представлениям, Ω -эффект. МП выходит на поверхность, формируя аркады – петли, формируются их основания – солнечные пятна, за счёт постепенного пересоединения в атмосфере Солнца, перезамыкания на фотосфере, диффузии МП магнитный поток уносится в соответствующую полярную область и компенсируется с ней. Так происходит глобальная смена полюсов.

Для положения α -эффекта есть несколько предположений мест формирования: как на приповерхностных слоях Солнца, так и в зоне тахоклина в зависимости от рассматриваемого механизма формирования.

Прогнозировать солнечную цикличность пока не удастся, предпринимаются попытки. Один из, казалось бы, очевидных способов: разложить достоверный ряд солнечной активности в ряд Фурье, просуммировать соответствующие гармоники и продолжить в будущее. Однако такой метод не даёт результатов.

Существует возможность продлить цикл по некоторому среднему значению. Берется начало некоторого цикла (рис. 5.15) до линии со стрелками, кривые сопоставляются так, чтобы наилучшим образом соответствовать

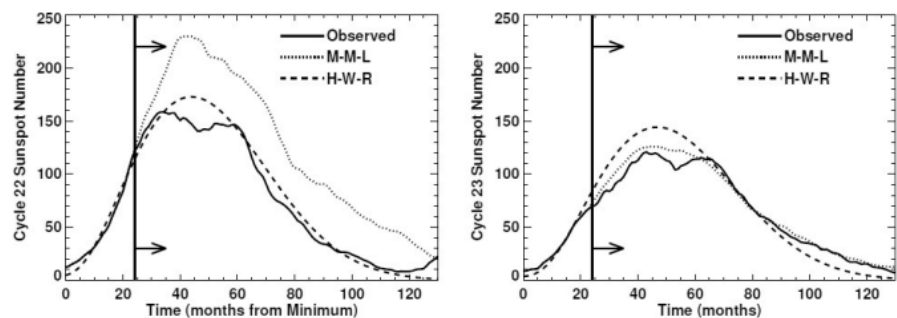
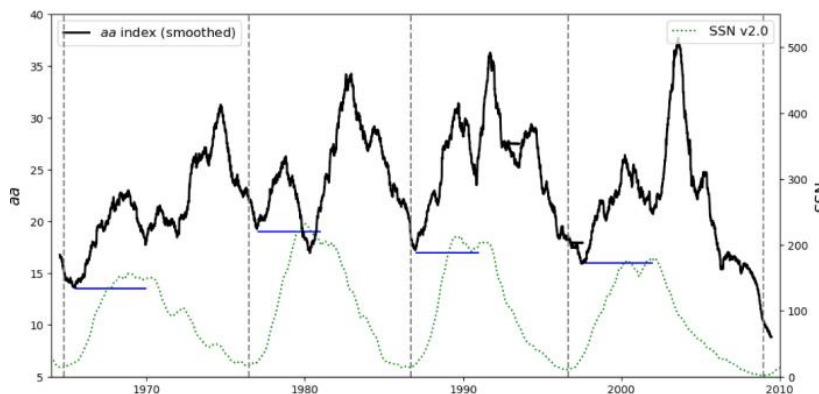


Рисунок 5.15 Прогнозы для циклов 22 и 23. Точки – средний цикл солнечной активности, пунктир – аппроксимация среднего цикла.

имеющимся данным, а затем анализируют правую часть цикла. Плохо работает, что видно на рисунке: средний цикл на левой части рисунка показывает значительно больший максимум относительно смоделированного, а на правой части наоборот лучше описывает испытываемый цикл активности.

Неплохим методом прогнозирования солнечной активности является **геомагнитный aa индекс**. Значения индекса в минимуме между циклами пропорционально максимуму следующего цикла (рис. 5.16).



У геомагнитного aa индекса есть **физическая интерпретация**: геомагнитная активность

Рисунок 5.16 Иллюстрация метода Ола в циклах 20-23. Показано изменение суточного геомагнитного индекса aa (сплошным черным цветом) и месячного SSN (зеленым пунктиром). Горизонтальными синими линиями отмечено значение предиктора в каждом цикле. Периоды минимумов солнечных пятен отмечены пунктирными вертикальными линиями.

рассматривается между двумя циклами, то есть пятен и вспышек в этот момент времени на Солнце почти нет, на земную магнитосферу воздействуют эффекты только от глобального МП Солнца. Новый солнечный цикл рождается из глобального дипольного МП. Геомагнитный отклик на Земле от Солнца связан с максимальным значением активности звезды в следующий солнечный цикл.

Сравнение различных методов предсказания солнечной активности показывает, что три метода геомагнитных предвестников (Олова, Фейнмана и Томпсона) дают наименьшие погрешности. Прогнозы для 24 цикла солнечной активности посредственно сходятся в своих предсказаниях: от 57 до 175 чисел Вольфа с большими ошибками. Нынешний, 25 цикл солнечной активности, развивается по предсказуемому сценарию — схоже с предыдущим.

Список литературы

1. David H. Hathaway “The Solar Cycle” || Living Rev. Solar Phys., 12, (2015), 4
2. Ilya G. Usoskin “A history of solar activity over millennia” || Living Rev. Solar Phys., 14, (2017), 3
3. Rainer Arlt, José M. Vaquero “Historical sunspot records” || Living Rev. Solar Phys., 17, (2020), 1
4. Kristof Petrovay “Solar cycle prediction” || Living Rev. Solar Phys., 17, (2020), 2

Лекция №6. Солнечные вспышки

Солнечные вспышки включают в себя множество взаимосвязанных процессов, разнесенных в пространстве и времени. Наиболее ярко и наглядно солнечные вспышки проявляют себя в УФ диапазоне наблюдений, т.к. на этих длинах волн излучают разогретые вспышки плазмы в солнечной атмосфере, подсвечивая линии МП. Исходной энергией для солнечной вспышки служит энергия свободного МП в короне.

Солнечные вспышки сопровождаются различными движениями, течениями вещества (хромосферные конденсации, вспыхивающие аркады магнитных петель, разбегающиеся светлые полосы на фотосфере).

Событие Кэррингтона. Вспышки в разных слоях Солнца

Первым наблюдением солнечной вспышки является *наблюдение Кэррингтона* (1 сентября 1859). Кэррингтон отметил появление ярких областей вблизи группы пятен – *белая вспышка*, энергичное редкое явление в солнечной атмосфере, которое не всегда добирается до фотосферы. Для Земли последствия данной вспышки проявились 2 сентября, когда произошла сильная электромагнитная буря, испортившая телеграфную связь в Америке и Европе, были спровоцированы яркие полярные сияния.

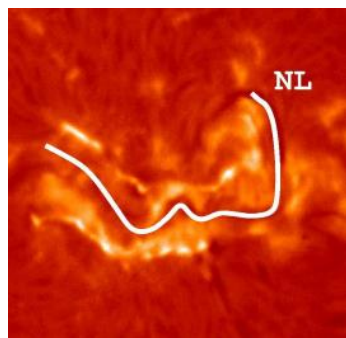


Рисунок 6.1 Солнце в линии H_{α}

При наблюдении в хромосфере групп солнечных пятен в линии H_{α} заметны вспышечные ленты, поэтому вспышки называют *хромосферными*. Вспышки происходят по причине взаимодействия магнитных полей различных направленностей в короне Солнца. Любая простая группа пятен представляет собой две полярности МП, из одной линии выходят в корону, в другую – возвращаются. На границе раздела двух таких полярностей возможно взаимодействие двух МП, приводящее к солнечной вспышке.

С появлением возможности наблюдения Солнца в фильтрах некоторых линий звезды начинают активно изучать. В фильтре линии H_{α} (рисунок 6.1) вспышки выглядят как параллельные друг другу поярчения – *вспышечные ленты*. При совмещении поярчений с магнитограммой заметно, что каждая из лент расположена в своей фотосферной полярности, а нейтральная линия проходит между ними.

Наблюдение хромосферы Солнца производится с помощью фильтра, однако в более высоких слоях энергии больше, поэтому с Земли такие наблюдения невозможны из-за поглощения земной атмосферой УФ излучения. Первые наблюдения с Земли несли информацию о солнечных пятнах, появляющихся в особо активных областях.

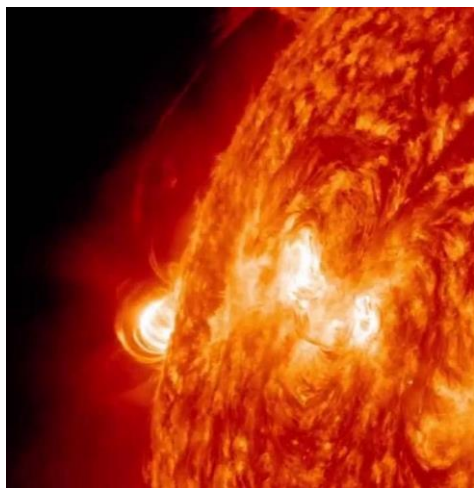


Рисунок 6.2 Вспышечные петли

SDO (solar dynamic observatory) – спутник, запущенный в 2010 году и работающий по сей день, находится на геосинхронной орбите. Основной инструмент по изучению вспышечной активности Солнца в УФ диапазоне.

Переходный слой между хромосферой и короной Солнца (304 \AA – линия перехода в атоме гелия) показывает протуберанцы, которые в процессе вспышки отходит от поверхности Солнца и улетает в межпланетное пространство. Хорошо заметны линии МП, заполненные горячей плазмой, проявляют себя как аркады вспышечных петель. Образуются и магнитные ленты, которые разбегаются в стороны от нейтральной линии, над которой находится протуберанец.

В более энергичном диапазоне (корона, 171 \AA , рисунок 6.3) видна **плазма** с температурами, превышающими корональные, то есть видно вещество, разогретое вспышечной активностью. Лучше заметны магнитные петли, структура хромосферы почти не видна.

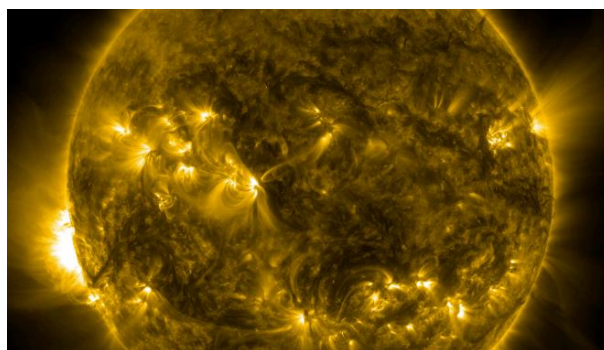


Рисунок 6.3 Корона Солнца (171 \AA)

При рассмотрении короны диапазоне 193 \AA хорошо различимы очертания **корональных дыр**, где силовые линии МП являются открытыми, ввиду чего происходит отток вещества и энергии от Солнца – быстрый солнечный ветер (см. след. лекцию).

В рентгеновском диапазоне видно, что перед вспышкой в короне образуется **мягкое рентгеновское излучение**. В момент вспышки в основании вспышечной аркады появляются **источники жёсткого рентгена**. После импульсной фазы вспышки до приемника изображения добираются заряженные частицы и создают шум. В конце видна поднимающаяся аркада вспышечных петель, заполненная разогретой плазмой.

Рассмотрим **процесс вспышки** при отдалении от Солнца пространственно. Перед вспышкой происходит излучение мягкого и жесткого рентгена, в момент вспышки образуется корональный выброс массы, который может превышать геометрический размер Солнца, но имеет малую плотность. Характерная масса коронального выброса $10^{15} \text{ г} \ll M_{\odot} = 2 * 10^{33} \text{ г}$. На эволюцию звезды такая потеря не оказывает влияния, даже с учётом того, что $0,25M_{\odot}$ заключена в ядре.

Спутники, изучающие Солнце

- SOHO – запущен в 1995 году, в точке L1, наблюдает с 1996 года. Наиболее существенны наблюдения коронографа (поле зрения в белом свете, видны выбросы корональных масс). На борту есть УФ телескоп
- TRACE – запущен в 1998. Гелиосинхронная орбита. Дает УФ изображение с высоким разрешением выбранных участков. В 2010 прекратил работу.
- RHESSI – рентгеновский спутник, запуск в 2002, прекратил работу в 2023. Разрешение не очень хорошее.

Магнитное пересоединение. Токовый слой

Ключевым механизмом для реализации вспышек на Солнце является *магнитное пересоединение*, который можно рассмотреть на примере взаимодействия двух электрических токов проводника (рисунк 6.4). У токов есть связанные с ними МП,

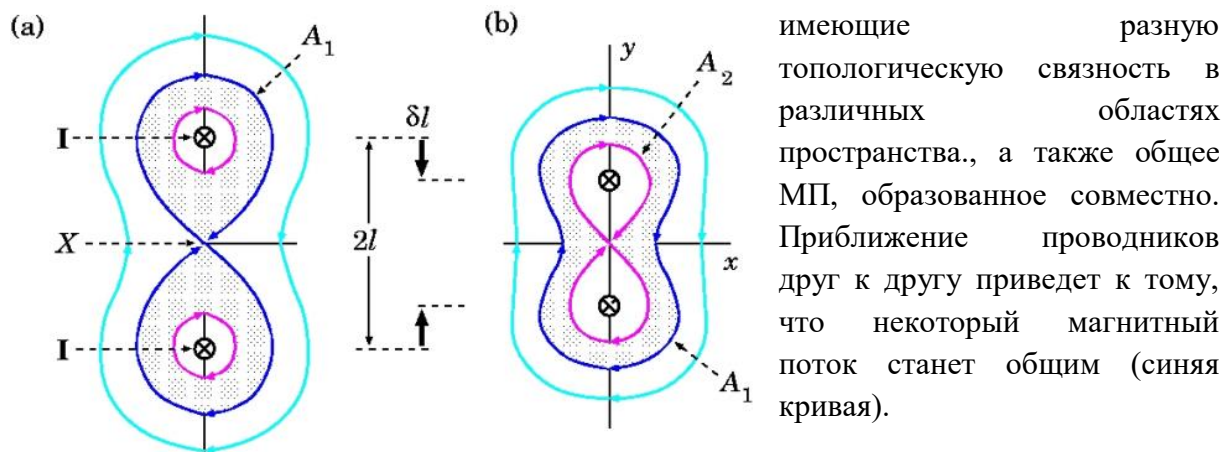


Рисунок 6.4 Проводники с токами в вакууме. Бирюзовая, синяя и розовая линии – магнитный поток, сформированный двумя проводниками совместно и по отдельности соответственно.

В таком процессе конфигурация МП упрощается, при соединении двух

проводников МП станет центрально-симметричным. Так происходит в вакууме, однако

при сдвигении таких проводников в плазме (газе, состоящем из заряженных частиц) по законам Максвелла при изменении магнитного потока формируется ЭДС, приводящая заряды (плазму) в движение (рисунк 6.5). Из-за их движения формируется ток, выстраивающийся в виде слоя,

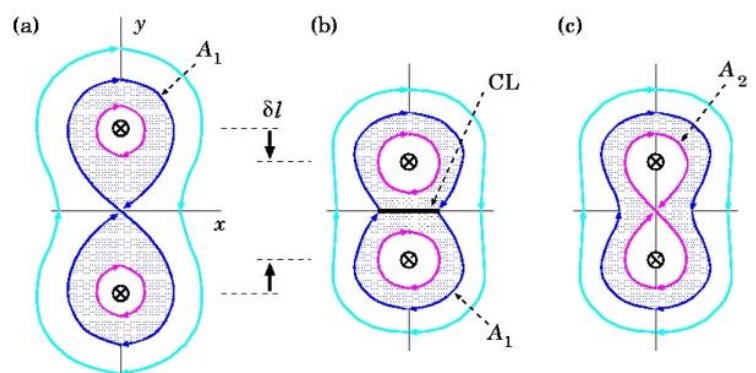


Рисунок 6.5 Проводники с токами в плазме

экранирующего два сближающихся магнитных потока в соответствии с законами электромагнитной индукции (ток формируется таким образом, чтобы своим МП подавить изменение внешних МП). Так, в плазме можно свести друг к другу два электрических тока, но магнитные потоки при этом не перейдут в другую топологическую связность: между (b) и (c) вариантами существует разница в энергиях, причем (b) более высоко энергетически, чем (c). Если есть процесс, способный быстро диссипировать слой тока, то в процессе такого разрушения произойдет быстрая перестройка МП и ускорение заряженных частиц. За этими процессами последует разогрев плазмы и ее высвечивание в различных электромагнитных диапазонах, т.е. вспышка. **Токовый слой тем самым выполняет две функции:**

1. Аккумулятор энергии – энергия запасается в МП, связанном с электрическим токовым слоем. Является свободной магнитной энергией, т.е. превышающей состояние потенциального МП.
2. При разрушении электрического тока пропадают излишние МП и свою энергию передают в кинетические движения частиц, направленные и тепловые, которые далее могут быть выделены в качестве некоторого электромагнитного излучения.

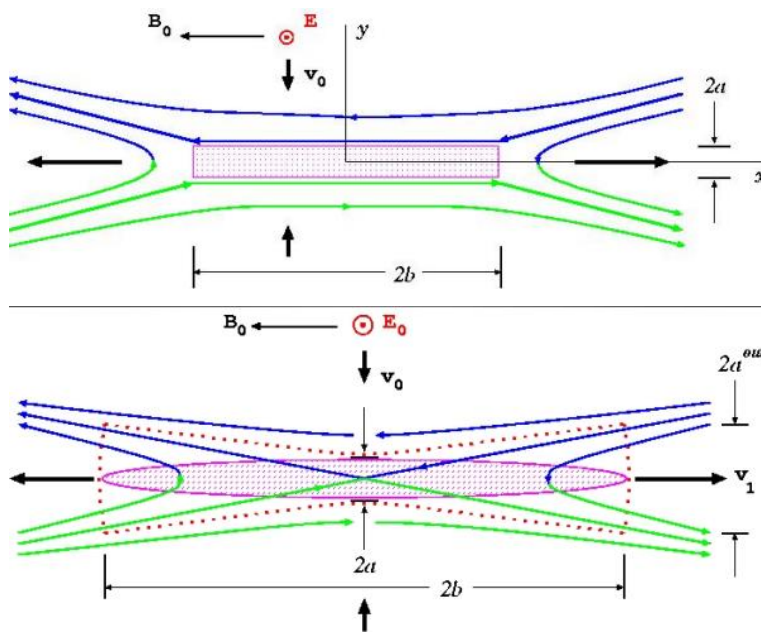


Рисунок 6.7 Перезамыкание магнитных потоков

Токовый слой является **двумерной размерной конфигурацией**, что означает поступление вещества в токовый слой сверху и снизу (рисунок 6.6) с большей его стороны, а выбрасывается с торцов слоя. Вводятся понятия полуширины «b» и полутолщины «a» токового слоя. Чем шире токовый слой, тем больше энергии МП он может запасти, тем больший магнитный поток он может экранировать при взаимодействии магнитных потоков друг с другом. Чем

больше полутолщина, тем быстрее токовый слой способен выделить энергию. Любой токовый слой включает в себе компоненты МП, потому как магнитные потоки, проникая в токовый слой, перезамыкаются и меняют свою связность.

Наличие малой перпендикулярной компоненты МП показывает, что энергия из пересоединяющего токового слоя может выводиться как через торец, так и через

связанные поглощенные линии МП. Эффективная величина толщины токового слоя в таком случае увеличивается, и появляется возможность выбросить энергию из токового слоя, производя быстрое магнитное пересоединение.

Токовый слой имеет два состояния:

1. Предвспышечное (фаза накопления энергии) – МП внутри такого слоя почти отсутствует
2. Вспышечное (энерговывделяющее) – пересоединяющее линии МП, соответствует импульсной фазе солнечной вспышки

Модели прошлого века показывают конфигурацию противоположно направленных магнитных полей, сталкивающихся друг с другом, где, вероятно происходит формирование токового слоя.

Стандартная модель

В 20 веке под стандартной моделью подразумевали объяснение свечения вспышечных петель, но о геометрической конфигурации магнитных потоков и исходном процессе энерговыведения не говорилось. В наши дни о ***стандартной модели*** говорят более широко, в неё включают:

- ***Механизм первичного энерговыведения*** (запас энергии в токовом слое при взаимодействии магнитных потоков)
- ***Сопровождающие вспышку процессы*** (свечение вспышечной аркады, отрыв коронального выброса масс; область токового слоя разделяет пространственно эти два явления. Корональный выброс масс отрывается и уходит от Солнца, аркада вспышечных петель остается на поверхности)

Большая вспышка уносится с кинетической энергией движения коронального выброса массы. Можно предположить, что начальный филамент (протуберанец) теряет устойчивость по МГД причинам и начинает всплывать в солнечной атмосфере, тогда он вытягивает за собой МП, которые пересоединяются и создают магнитную вспышку. С этой точки зрения корональный выброс массы является начальным объектом, формирующим все последующие процессы. С другой стороны, все магнитные поля, которые поддерживают протуберанец и обуславливают его устойчивость, формируются под поверхностью Солнца и управляются конвективными движениями, вследствие чего и происходит перестройка всех МП в солнечной атмосфере. Перестройка МП приводит к неустойчивости филамента. МП сталкиваются между собой два противоположно направленных магнитных потока, за счёт чего формируется токовый слой, который запасает в себе энергию МП. Рассмотрим ***процессы формирования солнечной вспышки*** (рисунок 6.8):

1. *Столкновение магнитных потоков.* Формирование электрического тока, что приводит к появлению омической диссипации (разогрев плазмы при столкновении частиц). Свечение плазмы в УФ диапазоне
2. *Импульсная фаза:* предвспышечный токовый слой терпит разрыв ввиду его неустойчивости. В токовом слое прямыми электрическими полями ускоряются частицы, которые разлетаются к Солнцу по силовым линиям и от Солнца. Электроны быстрее реагируют, двигаясь в искривленных магнитных полях с ускорением, начинают производить ЭМИ (микроволновое излучение). В плотных слоях хромосферы частицы останавливаются, производя тормозное ЭМИ (жесткий рентген). По форме спектры этих ЭМИ схожи, так как производятся одной и той же популяцией частиц. Частицы, улетевшие от Солнца, движутся в менее плотной области, их излучение приходится на радиодиапазон.
3. *Хромосфера* под действием ударившихся о нее электронов *разогревается*, испаряется и заполняет своим веществом петли МП, формируя аркаду вспышечных петель. Петли светят с помощью теплового механизма (остывания) в мягком рентгене и далеком УФ.

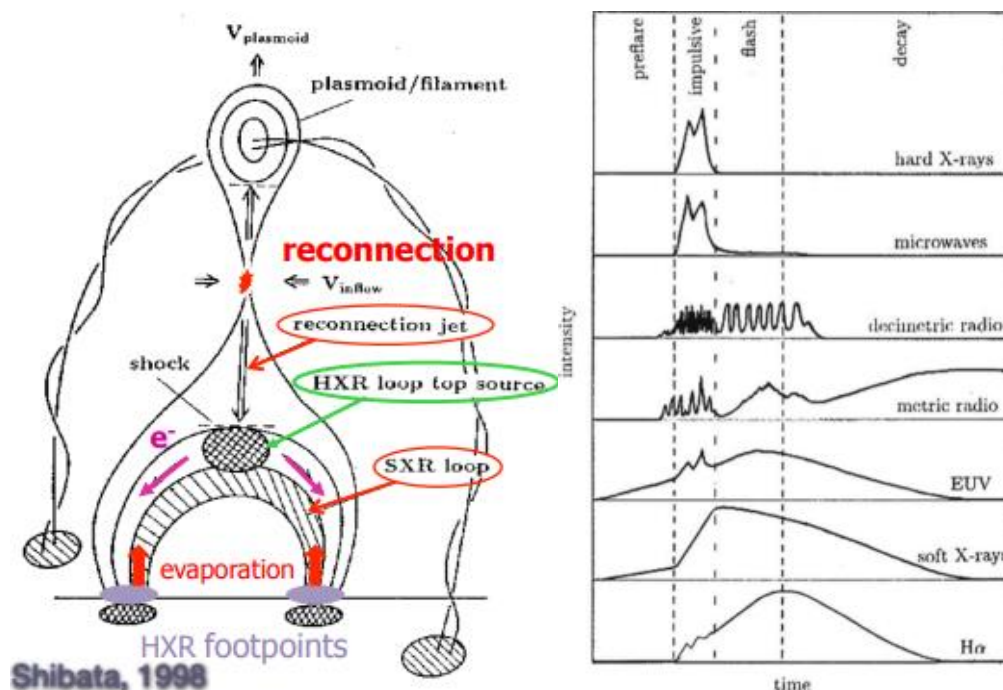


Рисунок 6.7 Процесс формирования солнечной вспышки

4. *Тепловая стадия:* постепенное остывание вещества во вспышечных петлях, УФ излучение, свечение в линии H_{α} , а также излучение в мягком рентгене претерпевает спад. От Солнца отрывается корональный выброс массы,

распространяясь в пространстве, за ним – ускоренные в этой же вспышке электроны и другие заряженные частицы. При взаимодействии с межпланетным МП и плазмой электронами вызываются колебания (ленгмюровские колебания), которые преобразуются в радиоизлучение.

Эффект Нойперта

Кривые жесткого рентгена (*рисунок 6.7*) и микроволнового излучения являются производными от кривой мягкого рентгена. Иначе можно сказать, что кривая мягкого рентгена на импульсной стадии солнечной вспышки является интегралом от жесткого рентгена. Физическая интерпретация такова: жесткий рентген показывает количество электронов, добравшихся из ускорителя до хромосферы, мягкий рентген показывает интегральный разогрев вещества электронами, которое постепенно остывает.

Рассмотрена стандартная модель солнечной вспышки, однако все вспышки на Солнце являются *нестандартными*. Многие проходят без отрыва некоторого заметного волокна, некоторые не поярчаются при вспышке в УФ и рентгене. Соотношение между энергией, ушедшей в разогрев вещества, заряженные частицы, кинетическую энергию движения корональной массы или солнечных джетов различно для каждого случая.

Стандартная модель полезна тем, что качественно показывает *взаимосвязь различных физических процессов*, входящих в солнечную вспышку. У стандартной модели существуют косвенные подтверждения, а именно

- *температурные распределения* в солнечной атмосфере в процессе формирования солнечной вспышки (температура увеличивается в области формирования солнечной вспышки);
- *геометрия наблюдаемых излучений*, в частности формируют характерные основания вспышечной петли и некоторый рентгеновский корональный источник в той области, где сталкиваются солнечный джет, выбрасываемый из токового слоя, и поднявшееся (испарившееся) из хромосферы вещество, образуя уплотнение;
- *положение вспышечных лент и жестких рентгеновских источников* в основании вспышечных аркад относительно магнитограмм. Вспышечные явления – обусловленный магнитными взаимодействиями процесс, разные вспышечные ленты находятся по разные стороны от нейтральной линии фотосферного МП.

Ударные волны. Магнитные ловушки. Основания вспышечных петель

Солнечная вспышка сопровождается рядом *вторичных механизмов*, которые могут воздействовать на видимые проявления вспышки. Один из механизмов – ударные волны, формирующиеся в области распространения ускоренных потоков солнечных джетов. Джеты окаймляются медленными ударными волнами, на фронте потока формируются быстрые ударные волны или перпендикулярные ударные волны (различные вариации скачка плотности в МГД).

Особенность ударных волн заключается в скачке различных параметров среды: давление, температура, плотность вещества. На таких скачках возможен не только дополнительный разогрев вещества (что приводит к изменению его светимости по тепловому механизму), но и дополнительное ускорение заряженных частиц на ударных волнах, которые, посредством тормозного ускорения или взаимодействия с окружающей плазмой, преобразуются в электромагнитное излучение.

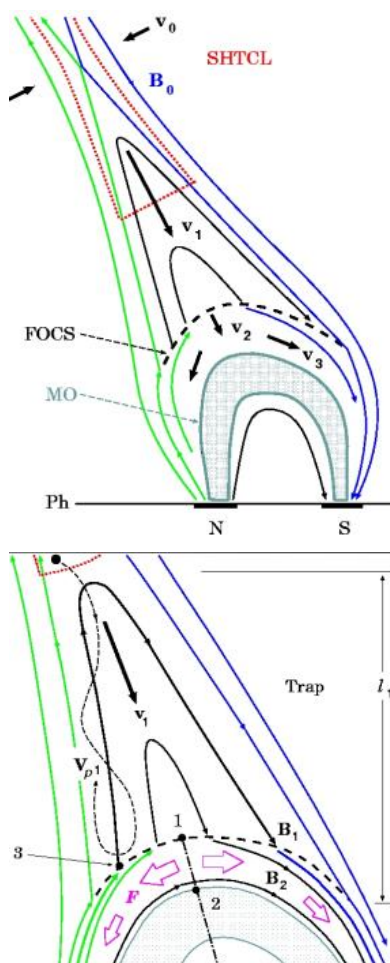


Рисунок 6.8 Магнитная ловушка

Еще один механизм, вовлеченный в процесс образования вспышки – *образование магнитных ловушек* и дополнительное *ускорение заряженных частиц* в них. Рассмотрим *рисунок 6.8*, чёрные линии – линии МП, которые только что пересоединились в токовом слое, начали из него выходить. Растянутое МП имеет большую энергию, оно стремится уменьшить свою энергию и сократить длину петли, за счёт чего и формируется джет. Некоторые заряженные частицы, попадая на такие схлопывающиеся линии МП, могут угодить в магнитную ловушку если в основаниях петли высокая напряженность МП. Они отскакивают от так называемых «магнитных зеркал». При уменьшении длины и поперечного сечения коллапсирующей ловушки происходит дополнительное ускорение заряженных частиц:

- Ускорение Ферми первого порядка – при уменьшении длины
- Бетатронное ускорение – при уменьшении сечения

Физический смысл (на примере ускорения Ферми, см. *рисунок 6.9*): частица, отражаясь от магнитных зеркал, становится «мячиком», отражающимся от движущейся на него стенки, приобретая в момент удара дополнительную

скорость. Многократно ударяясь со стенками возможно повышение энергии. Такое ускорение называют ускорением первого порядка, так как в полную энергию будет входить отношение скорости магнитного зеркала к скорости света в первой степени.

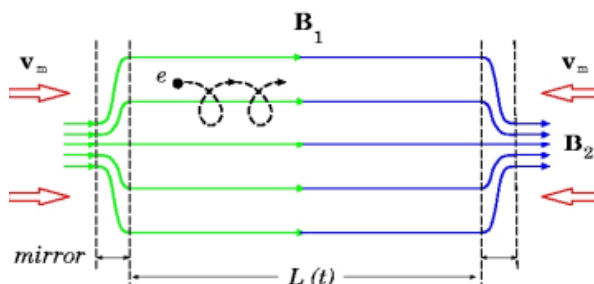


Рисунок 6.9 Ускорение Ферми первого порядка

Ферми, предлагая механизм ускорения, рассматривал не коллапсирующие ловушки, а искал ответ на вопрос: «**Как формируются космические лучи?**» Им была предложена модель, в которой частица, путешествуя в межзвездном пространстве, отражается от магнитных препятствий, которые могут хаотически двигаться. При лобовом столкновении частица приобретает энергию, а догоняя – теряет её. Вероятность столкновения с препятствием, движущимся в сторону исследуемого тела, больше, чем с отдаляющимся препятствием, так как взаимное приближение сокращает промежуток времени, через который произойдет столкновение, поэтому в среднем частица приобретает энергию в процессах столкновения.

Особенность бетатронного и Ферми ускорений заключается в разном преобразовании спектра функции распределения частиц по энергии. Бетатронное ускорение оставляет исходный спектр неизменным, ускорение Ферми преобразует любой спектр к степенному виду (см. рисунок 6.10).

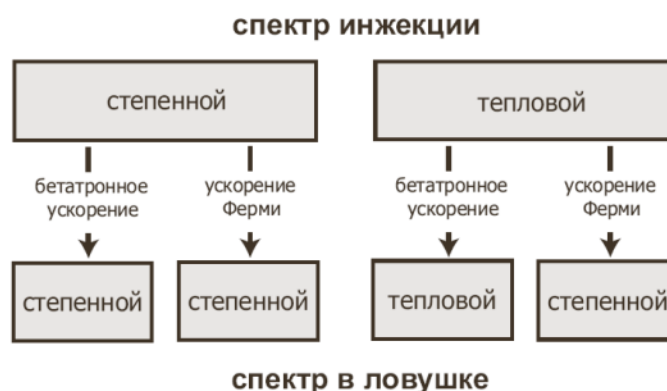


Рисунок 6.10 Разница в ускорениях Ферми и бетатронном

Косвенным подтверждением стандартной модели солнечной вспышки является **видимое движение в основании вспышечных петель**, а именно вспышечных лент и источников жесткого рентгеновского излучения. Рассмотрим упрощенную модель двух магнитных потоков (рисунок 6.11), взаимодействующих в точке А. В точке А образуется нулевая точка Х типа – область возможного процесса пересоединения (две линии МП с одинаковой напряженностью сталкиваются и нивелируют друг друга). Напряженность в нулевой точке есть 0. Появляются условия для перехода МП и разделенных магнитных потоков к совмещенной конфигурации, в этой же точке происходит формирование токового слоя и последующее магнитное пересоединение, отсюда же отправляются заряженные частицы для разогрева хромосферы в основаниях вспышечной петли. После перезамыкания двух линий

следующая, близлежащая к ним пара линий также будет стремиться к перезамыканию, откуда электроны будут двигаться по соответствующим линиям МП и разогреют дальние области хромосферы. Процесс рекурсивный, из-за чего наблюдается видимое движение вспышечных лент в разогретых областях, а также областей жесткого рентгеновского излучения.

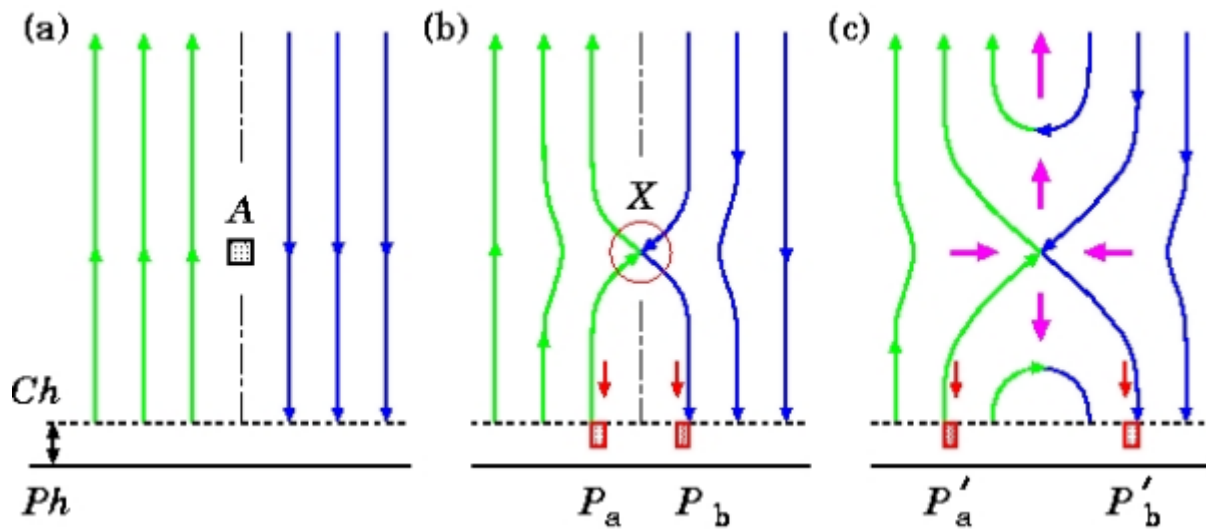


Рисунок 6.11 Механизм пересоединения линий магнитного поля

Кроме видимых движений, показанных красными стрелками, есть движения реального вещества (розовые стрелки), оно вморожено в МП, поступает в токовый слой, а после выбрасывается из него. На УФ изображениях наблюдаются как стекания вещества, так и солнечные джеты, что является проявлениями солнечных вспышек.

Солнечные вспышки происходят в активных областях, сформированных сложными конфигурациями солнечных пятен с перемешанными полярностями МП.

Фотосферная нейтральная линия. Вспышечная аркада

Для солнечной поверхности характерны **вихревые движения**: закручивание вещества, солнечных пятен, конвективная оболочка под фотосферой. Рассмотрим элементарный вихрь поверхности Солнца, который искривит нейтральную линию между северной и южной полярностью МП (рисунок 6.12). Движение такого вихря можно разделить на две компоненты:

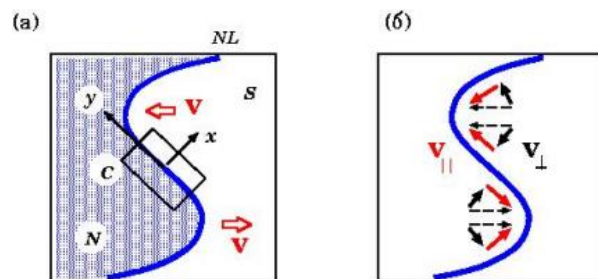


Рисунок 6.12 Модель вихря на Солнце

1. Конвергентное движение – выделено чёрными стрелками, приводит к столкновению двух магнитных потоков на нейтральной линии
2. Параллельное движение – вдоль нейтральной линии МП.

Аркада вспышечных петель представляет собой переведенный в трёхмерие *рисунок 6.11* с помощью продления вдоль нейтральной линии (*рисунок 6.12*). Нулевые точки выстраиваются в нулевую линию, на которой при конвергентном движении вещества друг к другу формируется предвспышечный токовый слой, а после пересоединяющий слой, ускоряющий частицы и создающий светящиеся вспышечные ленты в основаниях вспышечных аркад.

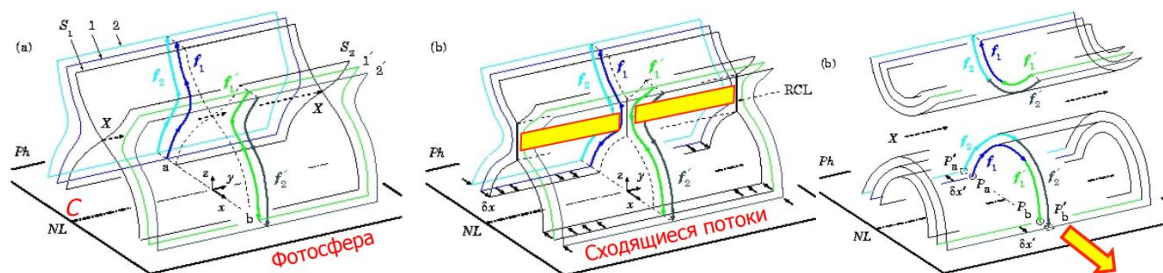


Рисунок 6.12 Стандартная интерпретация процесса магнитного пересоединения солнечной вспышки

Лежащее над токовым слоем вещество захватывается магнитными полями, отрывается в процессе магнитного пересоединения от МП Солнца и уходит в межпланетное пространство в виде коронального выброса массы. Вспышечные ленты и источники жесткого рентгена постепенно уходят. Это наблюдается в процессе постепенного пересоединения в аркаде вспышечных петель, например, в УФ изображениях Солнца. Одно из наиболее ярких зарегистрированных событий – **Бастильская вспышка**.

Параллельные движения вещества вдоль нейтральной линии приводят к **растяжению линий** МП. При наличии градиента скоростей первыми пересоединяются сильно растянутые линии МП – зеленая и синяя (*рисунок 6.13*). Соответствующие электроны пройдут на большом расстоянии друг от друга вдоль нейтральной линии.

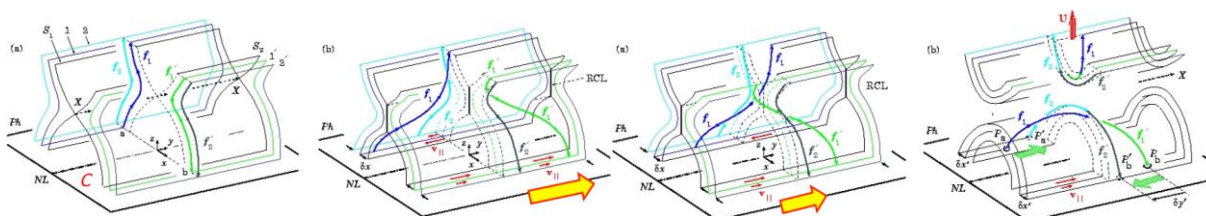


Рисунок 6.13 (а, слева) Начальная конфигурация в центральной части С. (б, слева) Сдвиговые потоки растягивают силовые линии, увеличивая энергию магнитного поля (а, справа) Состояние магнитного поля под действием сдвиговых потоков перед пересоединением. (б, справа) Быстрое уменьшение расстояния между источниками излучения в основаниях петель

Следующими будут пересоединяться голубая и темно-зеленая линии, связанные с ними электроны будут располагаться на расстоянии меньшем предыдущих двух потоков электронов. Визуально будет складываться впечатление, что жесткие рентгеновские источники будут сближаться – *пересоединение вишьрь*. Аналогично с источником в вершине петли, который постепенно, из-за распрямления аркады петель, будет смещаться в направлении, противоположном предсказанному в стандартной теории.

Наблюдаемые проявления вспышек (движение аркадных петель, геометрические эффекты, скорости, особенности в спектрах излучения) согласуются со стандартной моделью. Однако все вспышки нестандартные, в них существуют различные дополнительные процессы: течения, опадание вещества, сложные конфигурации МП.

Список литературы:

1. TRACE (<http://www.lmsal.com/TRACE/POD/>)
2. SDO (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/ultrahd/>)
3. SOHO, RHESSI (<https://svs.gsfc.nasa.gov/index.html>)
4. Arnold O. Benz “Flare Observations” \ Living Rev. Solar Phys., 14, (2017), 2
5. Somov B.V. Plasma astrophysics (2012-2013)
<https://www.springer.com/us/book/9781461442820>
<https://www.springer.com/us/book/9781461442943>
6. SolarMonitor (<https://solarmonitor.org>)
7. SDO Dashboard (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/dashboard/>)
8. Living Reviews in Solar Physics (<https://link.springer.com/journal/41116>)
9. Grand Archive of Flare and CME Cartoons
(<http://solarmuri.ssl.berkeley.edu/~hudson/cartoons/>)

Лекция №7. Корональные выбросы массы

Корональный выброс массы (КВМ): характерные черты

Стандартная модель вспышки на прошлой лекции была представлена как состоящая из трех глобальных объектов:

- Токовый пересоединяющий слой (отвечает за выделение энергии, ускорение частиц, разогрев плазмы)
- Вспышечные петли
- Корональный выброс массы

Вспышечные петли подробно рассмотрены ранее (см. лекцию №6). Теперь рассмотрим отдаляющийся от Солнца **корональный выброс массы** (КВМ) – большие по своим масштабам образования, имеющие низкую плотность вещества. В начале вспышки происходит первичное энерговыделение, с которым связано жесткое рентгеновское излучение в основании вспышечных петель. От Солнца при этом отрывается образование, сопровождаемое набегающим потоком заряженных частиц, засоряющим область зрения телескопа.

Основным прибором, наблюдающим КВМ, является прибор SOHO, находящийся в точке Лагранжа между Землей и Солнцем и поставляет изображения с большим полем зрения – **короннограммы**.

КВМ несмотря на большие размеры содержит столько вещества, сколько содержится в одной грануле солнечной фотосферы. На *рисунке 7.1* представлен КВМ массой порядка 10^{16} г. Обычно масса такого выброса на порядок или два меньше. Любая такая масса значительно меньше массы Солнца, которая составляет $2 \cdot 10^{33}$ г.

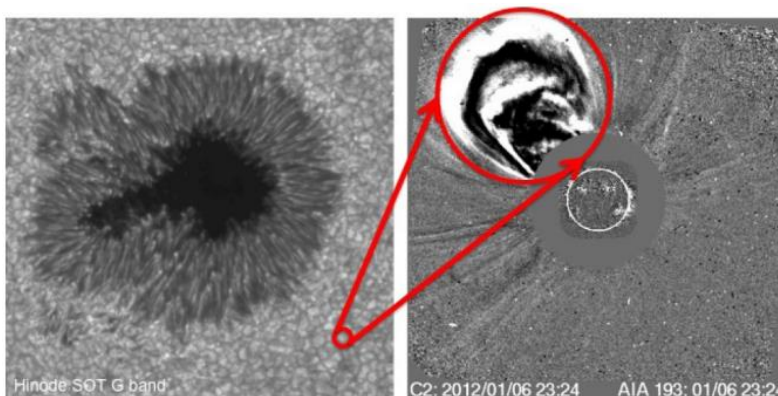


Рисунок 7.1 Корональный выброс массы в солнечной атмосфере.

КВМ обладает **характерными чертами**, проявляющимися во многих случаях

1. светящаяся резкая граница, ассоциируемая исследователями с образующейся ударной волной при распространении КВМ в межпланетное пространство;

2. яркое ядро КВМ, выглядящее как скрученная петля МП, содержащая в себе плотное вещество. Такая петля ассоциируется с филаментом (темным волокном или протуберанцем), находившимся в атмосфере Солнца;
3. область между ядром и границей, более темная и разреженная, наполненная магнитными полями, которые разделяют эти две области и способствуют расширению КВМ и его движению от Солнца.

В начальной стадии КВМ нередко ассоциированы с отдельными *солнечными стримерами* (см. рисунок 7.2). На верхнем левом рисунке представлено спокойное Солнце, корона выглядит как отдельные солнечные лучи, которые не переплетаются между собой, а также два ярких стримера. Один из них является началом для отрывающегося КВМ.

Если КВМ вылетает в сторону наблюдателя, то в связи с эффектом проекции чем ближе он будет к наблюдателю, тем больший угол в поле зрения он будет занимать. Такие КВМ могут занимать полный диск Солнца, их называют *КВМ типа гало*.

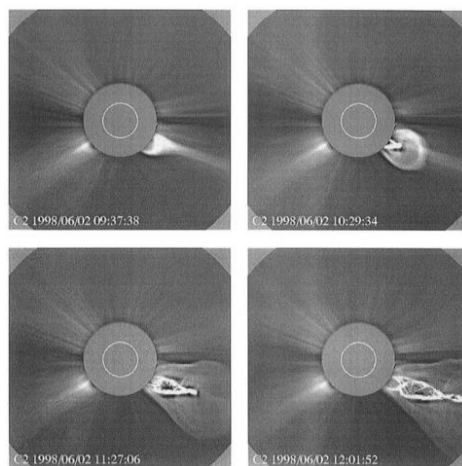


Рисунок 7.2 Эволюция классического КВМ

В наблюдаемых размерах КВМ большую роль играют эффекты проекций, хотя важно отметить, что сами КВМ имеют значительные размеры вплоть до превышающих размер Солнца. Для устранения проекционных эффектов требуется наблюдение КВМ с разных сторон. С такой целью запускался набор спутников STEREO в 2006 году: один (А) шел по земной орбите, опережая Землю (головной спутник), другой (В) отставал от планеты, шел по большей орбите. В 2011 году спутники вышли на орбиты таким образом, что составляли углы по 90 градусов с Солнцем и Землей.

Так, например, КВМ для SOHO выглядел как принадлежащий типу гало, а при просмотре того же события со спутников STEREO А и STEREO В он выглядел небольшим объектом с углом раствора около 50-60°. По углу раствора можно статистически анализировать КВМ.

Проблемы отождествления. Связь с активностью Солнца

Из-за аморфности структуры КВМ существуют проблемы их отождествления (см. рисунок 7.3). Рассмотрим три графика: серая кривая – количество солнечных пятен (солнечный цикл), синяя – КВМ, отождествленные наблюдателем, красная – автоматическое отождествление проектом SACTus. Заметно из графика, что

автоматическое отождествление неплохо коррелирует с солнечной активностью, в то время как человеческий фактор играет большую роль, искажая статистику по КВМ, что связано с меньшими по углу раствора КВМ.

Распределение КВМ по скорости распространения в межпланетном пространстве показывает, что в годы низкой солнечной активности распространяются с меньшими скоростями, около 300 – 400 км/с. В периоды высокой солнечной активности скорости возрастают до 600 км/с, в исключительных случаях до 1000 – 2000 км/с.

Между КВМ и циклами активности появления пятен существует временной лаг: пятна образуют двугорбую структуру в некоторый конкретный момент, а через несколько месяцев наблюдается подобное распределение в КВМ. Интерпретация состоит в следующем: КВМ образован МП, вышедшими из-под фотосферы Солнца и сначала образовавшими солнечные пятна.

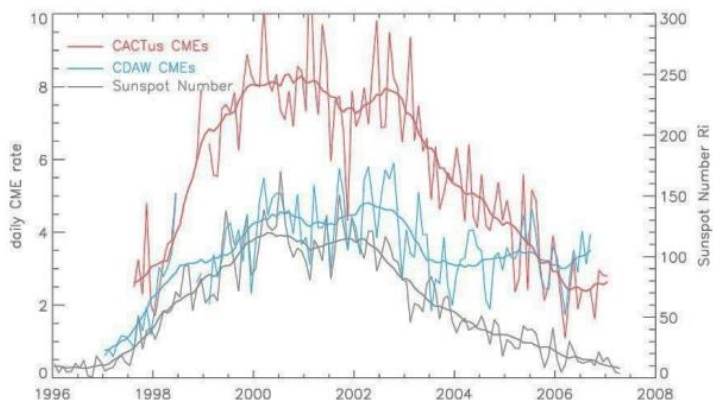


Рисунок 7.3 Солнечная активность и наблюдаемые КВМ в зависимости от времени

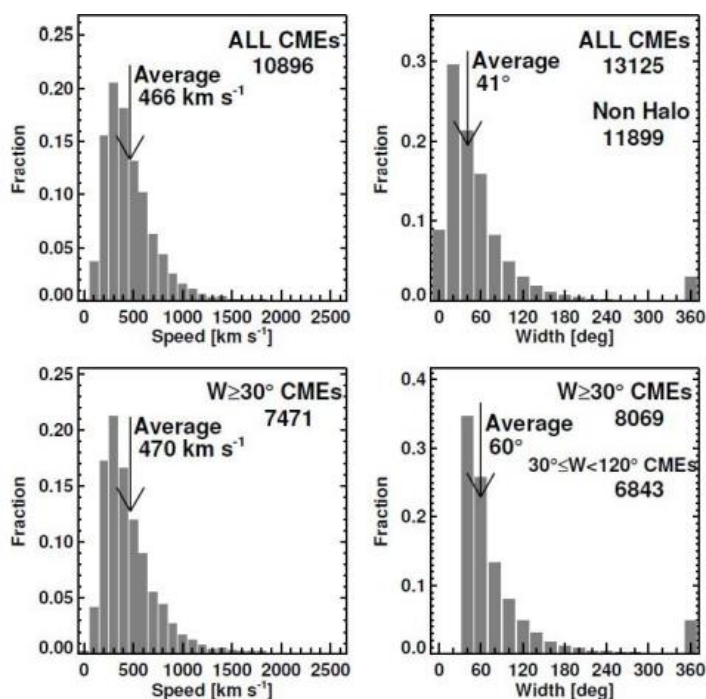


Рисунок 7.4 Распределение скоростей и ширины всех CME (вверху) и более широких CME ($W \geq 30^\circ$; внизу). Средняя ширина более широких CME рассчитывается с использованием только тех CME с $W \geq 30^\circ$.

КВМ наблюдаются на всех широтах в отличие от солнечных пятен, у которых есть пояса активности [30 с.ш.; 30 ю.ш.]. При этом существует статистическая разница между КВМ на разных широтах. На рисунке 7.4 представлены распределения по скоростям и в угле раствора КВМ для всех объектов и тех, что образовались на широтах больших, чем 30° (вне поясов активности относительно солнечных пятен). В скоростях особой разницы у КВМ не наблюдается, однако в размерах существует заметная статистическая разница.

КВМ, образующиеся вне поясов солнечной активности, имеют более широкий угол раствора.

Существует также статистическая разница между КВМ, набирающими массу на разных высотах. Те КВМ, что набирают полную массу ниже $5 - 7 R_{sun}$, в среднем имеют меньшую массу и большую плотность относительно образовавшихся выше. Отличается также и кинетическая и полная механическая энергия: КВМ, набирающие максимальную массу на высотах ниже $7 R_{sun}$ в среднем имеют меньшую кинетическую и полную энергию.

Интересна внутренняя структура ядра КВМ: оно представляет собой магнитные петли, которые поддерживали некоторый протуберанец и имели некоторую степень закрученности вдоль оси, чтобы заключить в начале своего образования вещество, поднять его в атмосфере солнечную корону, удерживать там. В последствии вещество отрывается и улетает в пространство. Вследствие скрученности ядро может иметь сложную структуру, хоть и не всегда.

Проявления КВМ и механизм формирования

В соответствии с представлениями о стандартной солнечной вспышке при отрыве КВМ ожидается проявления сопутствующих процессов в солнечной атмосфере, в частности

- образование аркады вспышечных петель при распространении ускоренных частиц в солнечной хромосфере;
- отрыв протуберанца, уносящегося с КВМ (составляет ядро КВМ);
- процессы, связанные со вспышечным импульсным энерговыделением при разрыве токового слоя

На поверхности Солнца перед формированием протуберанца и его подъемом в нижних слоях солнечной атмосферы наблюдаются **сигмоидные структуры** – поярчения в виде буквы «S». У таких структур нередко наблюдается промежуток – разрыв посередине. Интерпретация хорошо согласуется в рамках магнитных петель. Сигмоидные структуры чаще всего расположены над нейтральной линией, сигмоиды могут быть ассоциированы с некоторыми вытянутыми линиями магнитного поля (магнитными трубками), что, вероятно, связано с некоторыми движениями фотосферы. При пересоединении магнитных трубок может происходить их объединение (*рисунок 7.5*), трубка АВ и CD объединяются в линию МП, в которой закручивается и захватывается некоторое плотное хромосферное вещество, которое впоследствии из-за неустойчивостей поднимается в корону, образуя протуберанец. Последний захватывает

собой окаймляющие МП, при вытягивании которых может формироваться токовый слой, который даёт вспышку и позволяет КВМ оторваться от Солнца. До того как вещество отрывается, оно может пребывать в «подвешенном» состоянии до 6 оборотов Солнца. **Выполняется баланс сил:** гравитационное притяжение Солнца тянет вниз филамент и протуберанец держат линии МП, а с другой стороны – силы Лоренца позволяют оторваться от притягивающей звезды (конфигурация МП подразумевает под собой проходящий через петли электрический ток, взаимодействие которого с окружающим корональным МП приводит к эффектам магнитной плавучести).

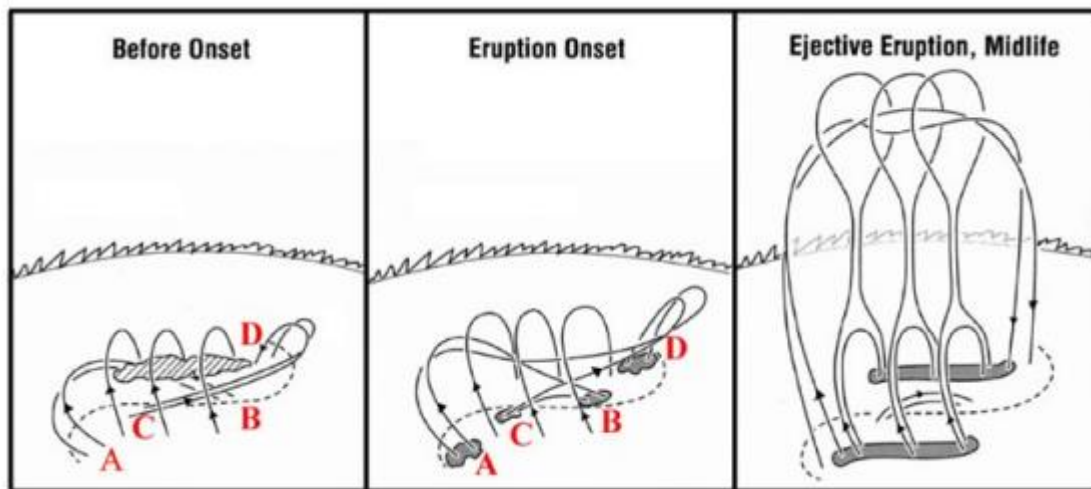


Рисунок 7.5 Механизм образование электрического тока в процессе формирования КВМ

Чтобы оторваться, протуберанец должен испытать **неустойчивость**, которую зачастую интерпретируют с точки зрения неустойчивости сдерживающего окружающего МП: необходимо подействовать на внешнее МП каким-то новым. К такому результату можно прийти двумя путями (см. рисунок 7.6):

1. **Выход магнитного потока из-под фотосферы Солнца в активной области.** Образуется новый магнитный поток с противоположной полярностью (а). Взаимодействуя друг с другом, два потока гасятся, а под протуберанцем оказывается пониженная плотность энергии МП. По этой причине линии МП стремятся внутрь, чтобы схлопнуться, что приводит к движению вещества и способствует процессу магнитного пересоединения под протуберанцем, что позволяет оторваться протуберанцу.
2. **Всплытие магнитного потока вне активной области.** Тогда происходит взаимодействие со сдерживающими магнитными полями, увеличивается их длина, изменяется их конфигурация. Это приводит к подъему протуберанца на большую высоту, что приведет к вытягиванию низлежащего МП, что приведет к процессу перезамыкания, протуберанец сможет оторваться.

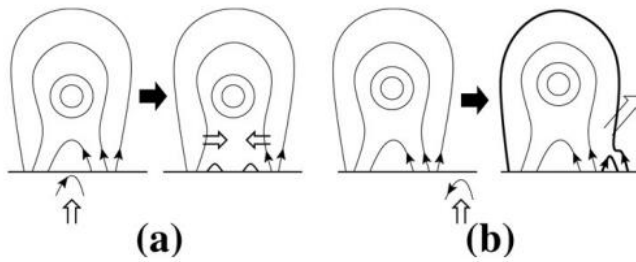


Рисунок 7.6 Принципиальная схема механизма возникающего потока для КВМ

Для того, чтобы протуберанец мог оторваться, в двумерной картине пересоединения стандартной модели солнечной вспышки все линии МП, сдерживающие протуберанец, должны быть перезамкнуты и потерять связь с МП Солнца. Это не так, что видно при рассмотрении трехмерной картинке. Скрученная петля МП может раздвинуть

сдерживающее её МП, таким образом понижая его напряженность. При таком условии возможно перезамыкание оснований магнитной петли.

Вывод: образование КВМ есть трехмерный процесс, для трактовки которого недостаточно упрощенных двумерных моделей.

Приборы, наблюдающие КВМ. Волновой фронт и ударная волна

КВМ наблюдаются с двух аппаратов: SOHO и STEREO. На спутниках TRACE установлены коронографы (закрывают диск Солнца искусственной Луной), которые могут наблюдать рассеянное излучение короны Солнца в белом свете на свободных электронах, и гелиографы, которые смотрят мимо диска Солнца и видят рассеяние на межзвездной пыли, т.е. наблюдают «зодиакальный свет».

На поверхности Солнца с КВМ и большими солнечными вспышками связаны образования различных **волновых фронтов**. Волновые движения наблюдаются в хромосфере в линии H_{α} , называются волнами Мортонa. В УФ такие волны называются EIT-волнами, по названию прибора на SOHO. Физически представляют из себя быстрые магнитозвуковые волны, распространяющиеся в солнечной короне. На нижних слоях проявляются как бегущие волны Мортонa, на верхних – видны в УФ.

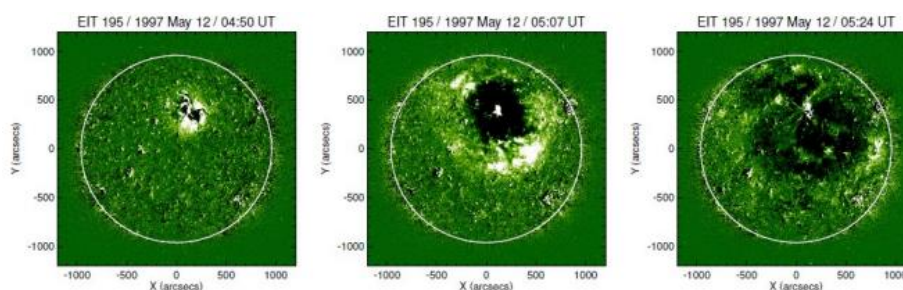


Рисунок 7.7 Одна из первых наблюдаемых крупномасштабных корональных волн

Быстрые магнитозвуковые волны (МЗВ) – особый вид волн, связанный с взаимодействием плазмы в короне с МП. Порождаются не только колебания

плотности/давления вещества, но и колебания вмороженного в плазму МП. Особенность быстрых МЗВ – могут распространяться поперек МП в отличие от других типов возмущений МП, существующих в плазме. При высокой напряженности МП быстрые МЗВ имеют изотропную скорость распространения относительно МП, т.е. распространяются как звук в воздухе – во всех направлениях с одинаковой скоростью (магнитный звук). На *рисунке 7.7* видно – распространение волны сферично, что указывает на сильную напряженность МП, а также природу волны как быстрой МЗВ.

КВМ, распространяясь в межпланетном пространстве, взаимодействует с межпланетным МП – солнечное, имеющее открытую структуру линий. Вращение Солнца приводит к тому,

что открытые силовые линии завиваются в *спираль Паркера* (см. след. лекцию). КВМ, имея большую кинетическую энергию, «сминает» МП, распространяясь радиально от звезды. На фронте распространения КВМ образуется ударная волна и переходный слой между основным телом и ударной волной. Такие образования могут быть

напрямую измерены спутниками Земли, которые измеряют различные параметры (величина МП, содержание частиц ионов, их энергии, скорости). На *рисунке 7.8* приведены результаты характерных наблюдений со спутника ACE в точке L1. При переходе через ударную волну МП резко возрастает, в переходо-турбулентном слое МП «возмущается», после чего появляется более однородное высоконапряженное тело КВМ.

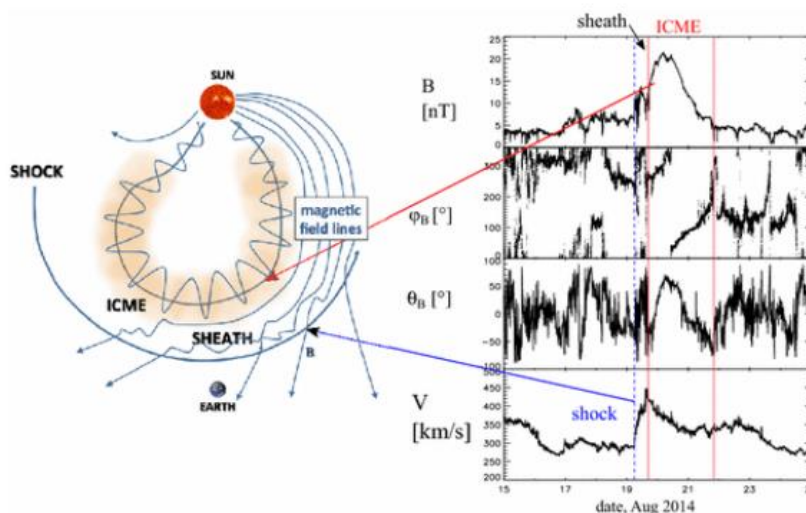


Рисунок 7.8 (Слева) Схема КВМ, показывающая ударную волну с ускорением вперед и область оболочки. (Справа) Наблюдения солнечного ветра во время КВМ с космического аппарата ACE, расположенного в точке L1.

напрямую измерены спутниками Земли, которые измеряют различные параметры (величина МП, содержание частиц ионов, их энергии, скорости). На *рисунке 7.8* приведены результаты характерных наблюдений со спутника ACE в точке L1. При переходе через ударную волну МП резко возрастает, в переходо-турбулентном слое МП «возмущается», после чего появляется более однородное высоконапряженное тело КВМ.

КВМ с облаком. Эффект Форбуша. Геоэффективные долги

КВМ может как содержать большие по напряженности МП, так и не содержать их, если в процессе пересоединения протуберанец не захватил достаточно много МП (т.е. раздвинул магнитные поля и улетел в пространство без них). Такие КВМ называют *с магнитным облаком* либо *без магнитного облака* соответственно.

Кроме заметной разницы в напряженности МП внутри КВМ обратим внимание на распределение заряженных частиц по питч-углу (угол, под которым заряженные частицы направлены относительно направления МП). Заряженные частицы стремятся

идти по траекториям в виде спирали вокруг некоторой силовой линии, поэтому в распределении по питч-углу бывает «провал» в распределении частиц по этим углам из-за того, что частицам сложно перемещаться перпендикулярно к МП.

КВМ содержит МП, на которых могут рассеиваться не только частицы, связанные с солнечной вспышкой, но и частицы галактического происхождения – космические лучи (КЛ). Понижение интенсивности КЛ (рисунок 7.9), связанное с их распространением в различных магнитных препятствиях в солнечном ветре, называют **эффектом Форбуша**.

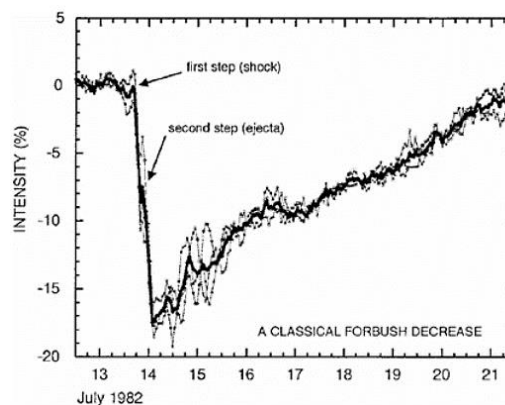


Рисунок 7.9 Снижение давления, связанное с КВМ, приводящим в движение при ударе.

Спутники находятся в различных пространственных положениях, следовательно, они могут измерить проходящий через них КВМ относительно разных плоскостей. Выделяют 3 характерных ситуации:

- прохождение спутника через тело КВМ (ядро),
- прохождение спутника через турбулентный слой, а также касание ядра КВМ
- касание спутником внешней ударной волны

По виду графиков можно **восстанавливать и моделировать** пространственную **структуру КВМ**. Переходный турбулентный слой является вариативной составляющей КВМ (может как присутствовать, так и отсутствовать).

КВМ пролетает через межпланетное пространство и добирается до земной магнитосферы, взаимодействует с ней своими МП и повлиять на Землю.

На Солнце существуют **геоэффективные долготы** (рисунок 7.10), с которых приходят некоторые объекты, оказывающие влияние на Землю. Для КВМ геоэффективными являются долготы около центра диска Солнца, так как кинетическая энергия КВМ позволяет «продавливать» МП планеты, устремляясь на наблюдателя. Заряженные частицы, которые ускоряются при образовании КВМ при разрыве токового слоя, идут вдоль линий межпланетного МП, закрученного в спираль. Из-за этого геоэффективные долготы относительно заряженных частиц **смещаются в западную часть** солнечного диска.

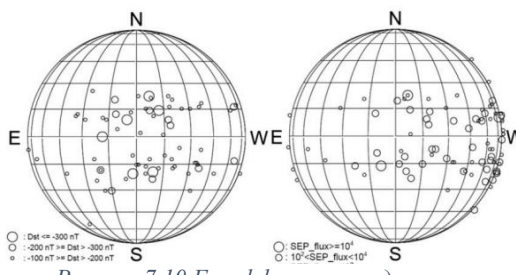


Рисунок 7.10 Геоэффективные долготы

Продолжительные и импульсные события. Ускорения частиц

На Земле солнечные высокоэнергичные частицы, связанные с солнечными вспышками, дают отклик (например, протоны). По химическому составу такие частицы разделяют на 2 класса:

- **импульсные** (изотоп ^3He), короткие, с быстрым спадом
- **продолжительные** (в основном протоны), несколько дней

Подразделение на классы связано с тем, как ускоряются частицы. Ускорение частиц в солнечной вспышке провоцирует распространение вдоль узкого сектора линий МП, которые были связаны с областью вспышки, из-за чего Земля лишь недолгое время находится в области заряженных частиц. Повышенное содержание изотопа обусловлено высокой температурой ($> 3 \cdot 10^8 \text{ K}$) в солнечной вспышке. Несмотря на малую плотность вещества в солнечной короне, высокие температуры обеспечивают протекание ядерных реакций в атмосфере. Обилие реакций приводит к разнообразию химических элементов.

Продолжительные протонные события связывают с ускорением частиц на фронте ударной волны, распространяющейся с КВМ. КВМ имеет большие геометрические размеры, следовательно, линии межпланетного МП, связанного с ударной волной, имеют намного больший угол раствора, из-за чего Земля дольше выходит из области облучения ускоренными частицами.

Из спиральной структуры межпланетного МП на различных областях ударного фронта поведение МП отлично. Продолжительные и импульсные события различаются долготами, откуда отрываются КВМ, связанные с этими частицами. Продолжительные события не имеют выраженной зависимости (так как ввиду своих размеров КВМ задевают несколько линий МП) в отличие от импульсных, которые были сформированы КВМ на геоэффективных долготах.

Частицы могут ускоряться пошагово: ускорение на фронте первого КВМ, затем на ударной волне второго КВМ. Ускорение частиц на ударных волнах имеет «выборку» относительно скоростей: лучше всего ускоряются те частицы, что имеют большую скорость на момент начала взаимодействия с ударной волной. Процесс ускорения в токовом слое во время солнечной вспышки не проявляет такую избирательность, так как механизм ускорения основан на взаимодействии прямого индуктивного электрического поля с частицей.

Процессы ускорения на ударной волне зависят от её направления относительно МП. Вблизи центра КВМ ударная волна приблизительно перпендикулярна: линии МП параллельны фронту волны (см. *рисунок 7.11*).

С одного края ударная волна становится *квазипараллельной*, где механизм ускорения – *диффузионный* (есть область разности скоростей с рассеивающими частицами). Ударная волна представляет собой объект, в который вещество втекает с большой скоростью (большей, чем магнитозвуковая), а вытекает – с меньшей. Так, между двумя областями, в которые втекает и вытекает вещество, есть разница в средних скоростях, в среднем такие области сближаются. При наличии рассеивающих объектов (турбулентность) заряженные частицы могут многократно переотражаться от рассеивающих областей и пересекать линию фронта ударной волны. Получается тот же эффект, что и в магнитных ударных ловушках: есть движущиеся друг на друга магнитных зеркала, которые передают энергию частицы.

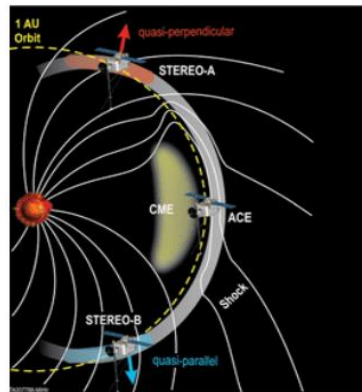


Рисунок 7.11 Схема ударной волны, вызванной КВМ, видимая с космического аппарата, иллюстрирующая изменение плотности ударной волны и соответствующие области переменных пороговых скоростей выброса.

С другого края – остается *квазиперпендикулярной*, где механизм ускорения – *дрейфовый*. Связан с тем, что происходит ларморовское движение частицы и наивание частицы на линию МП, в спиральном движении частица многократно пересекает фронт ударной волны. В одной стороны напряженность МП от ударной волны выше, с другой – ниже, а от напряженности МП зависит радиус движения частицы. Расстояния, проходимые частицей по обе стороны, различны, постепенно происходит дрейфовое смещение частицы вдоль фронта ударной волны, где на нее начинает действовать электрическое поле.

Радионаблюдения КВМ

УФ изображения характерны для разогретого вещества в корональных магнитных петлях вблизи поверхности Солнца, но КВМ наблюдают в *радиодиапазоне*, который отличается наличием частот, характерных для межпланетной плазмы. *Плазменная частота* ограничивает распространение ЭМ волн в своей среде. При приближении к плазменной частоте ЭМ волны испытывают искажение направления распространения из-за сильной рефракции. Диск Солнца построить в этом диапазоне трудно ввиду сильных искажений радиоволн, распространяющихся в солнечной атмосфере.

Тепловые изображения Солнца в радиодиапазоне (см. рисунок 7.12) на различных частотах показывают аморфное пятно, размер которого превышает размеры видимого диска Солнца, тонкие детали не различимы. Это также связано с тем, что длина волны в

таким диапазоне большие длины волн λ порядка 1 метра, а разрешение любого телескопа есть λ/D , где D – диаметр объектива телескопа. Приходится строить очень большие радиотелескопы на Земле ($D = 100$ м) или использовать наблюдения нескольких радиотелескопов - радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами.

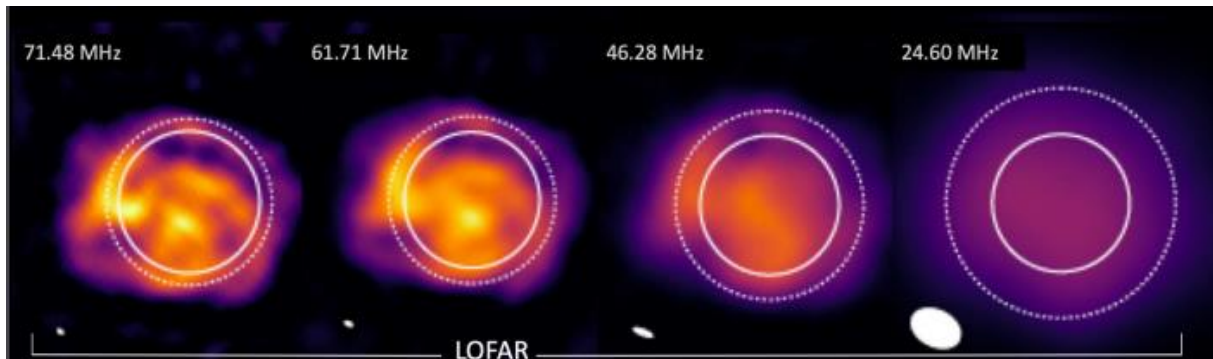


Рисунок 7.12 Тепловые изображения Солнца в радиодиапазоне

Помимо фонового излучения спокойного Солнца во время вспышек наблюдается всплеск разнообразных радиоволн. Выделяют 5 типов радиовсплесков, которые связаны с распространением разных популяций частиц. Рассмотрим *рисунок 7.13*, по вертикали отложена частота радиоизлучения (убывает с подъемом вдоль оси), по горизонтали – время. Излучение образуется на частотах, связанных с движением частиц в МП (гирочастоты) и с плазменными колебаниями; также проявляются гармоники частот. Для радиовсплесков характерно изменение частоты со временем – дрейф частоты, которая постепенно уменьшается. Это говорит об изменении условий в окружающей плазме для частицы.

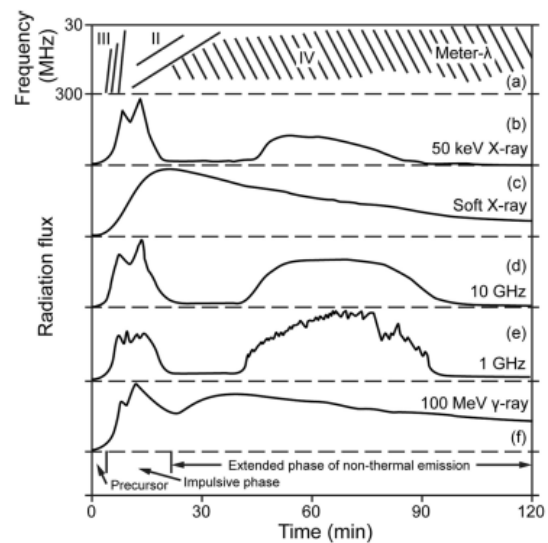


Рисунок 7.13 Схема временных профилей всплесочного излучения на различных длинах волн и энергетических диапазонах

- Быстрое изменение частоты для всплесков **третьего типа** говорит о субсветовых скоростях частиц ($1/3$ скорости света), которые ускоряются непосредственно в солнечной вспышке. Поднимаясь в солнечной короне, где плотность с радиусом падает по экспоненте, с тем же законом падает и частота.
- Частицы, связанные с радиовсплесками **второго типа**, ускоряются на фронте ударной волны КВМ. Скорость движения такой частицы совпадает со скоростью движения ударной волны, порядка 500 – 1000 км/с.

- После ускорения в ударной волне или токовом слое частицы уходят в неоднородности/турбулентности межпланетного вещества, с чем связан шум *четвертого и пятого типа*.
- С предвспышечной активностью Солнца связан *первый тип* короткоживущих радиовозмущений.

Рассмотрим распределение выделяемой энергии по различным каналам (рисунки 7.14). Энергия магнитного поля составляет 10^{33} эрг, она наибольшая и преобразуется в дальнейшем в другие виды энергии, большая часть уходит в кинетическую энергию КВМ, остальное в болометрическую светимость, в ускоренные электроны и ионы, еще меньше – в частицы, что доберутся до Земли, и мягкий рентген.

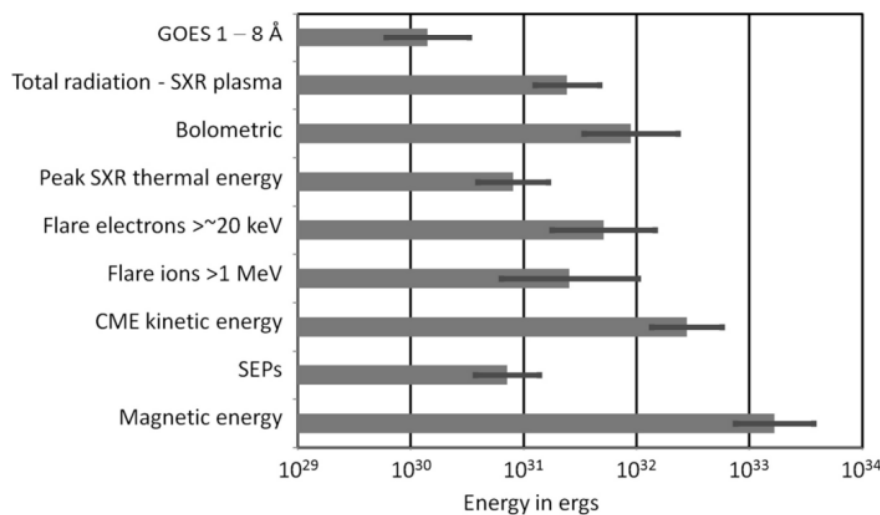


Рисунок 7.14 Гистограмма, показывающая свободную магнитную энергию (обозначенную нижней чертой), содержащуюся в различных источниках энергии (с их стандартными отклонениями в логарифмических значениях) для шести основных крупных вспышек

Список литературы

1. David F. Webb, Timothy A. Howard “Coronal Mass Ejections: Observations” \ Living Rev. Solar Phys., 9, (2012), 3
2. Emilia Kilpua, Hannu E. J. Koskinen, Tuija I. Pulkkinen “Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space” \ Living Rev. Solar Phys., 14, (2017), 5
3. Mihir Desai, Joe Giacalone “Large gradual solar energetic particle events” \ Living Rev. Solar Phys., 13, (2016), 3
4. Edward W. Cliver, Carolus J. Schrijver, Kazunari Shibata, Ilya G. Usoskin “Extreme solar events” \ Living Rev. Solar Phys., 19, (2022), 2

Лекция №8. Солнечный ветер

В лекции обсуждаются солнечный ветер (СВ), а также наиболее отдаленные области Солнечной системы, которые формируются под влиянием излучения частиц Солнцем. Межпланетное пространство имеет разнообразные характеристики на различных расстояниях от Солнца. На данные характеристики влияют частицы, которые вылетают из Солнца и распространяются, воздействуя на межпланетную среду.

Плазма и ее характеристики. Частицы солнечного ветра (СВ)

Рассматриваются конкретные характеристики плазмы в межпланетном пространстве для получения информации о физике происходящих в ней процессов, например, плазменная β – показывает, как соотносится газодинамическое давление и давление магнитного поля (МП). Таким образом, β говорит о том, что управляет плазмой – движение вещества или конфигурации МП. При удалении от поверхности Солнца β значительно изменяется.

Рассмотрим моделирование β (рисунок 8.1). Жирная линия соответствует МП в 2500 Гс, характерное МП для солнечных пятен, в то время как тонкая линия – 150 Гс, характерно для факельных площадок. В данных пределах заключено характерное поле активных областей на Солнце. Штрих-пунктирная линия разграничивает модель, указывая на переход между гидродинамическим приближением, где $\beta > 1$ (кинетические движения вещества преобладают над энергиями, связанными с МП), и магнитогидродинамическим (МГД), где $\beta < 1$.

У поверхности Солнца при слабых МП (спокойное Солнце, максимум – поле факельных площадок)

плазменная $\beta \ll 1$. Конвективные движения при фотосферных слоях Солнца формируют некоторую картину магнитных полей, выходящих из-под фотосферы и поднимающихся в межпланетное пространство. Распространяясь в межпланетном пространстве, МП занимает все больший объем, плотность энергии такого МП постепенно спадает, что становится причиной изменения отношения энергии МП к энергии теплового движения вещества. При переходе от фотосферы к хромосфере происходит изменение описания

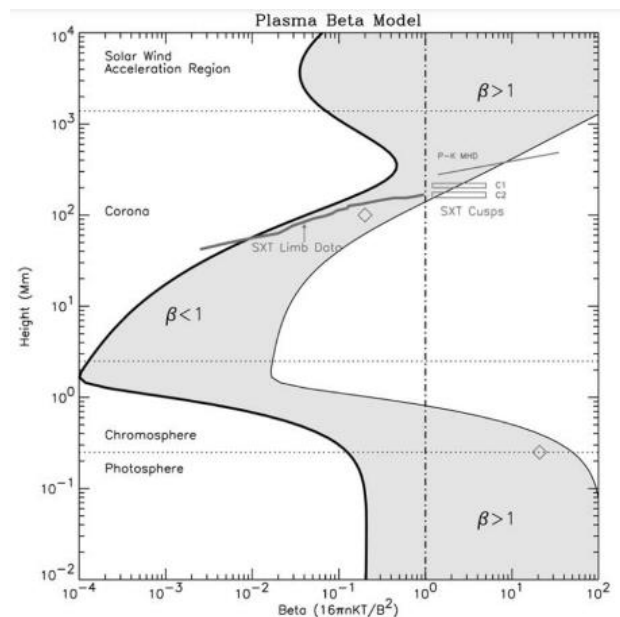


Рисунок 8.1 Моделирование плазменной β при различных значениях поверхностного МП (заштрихованная область соответствует магнитным полям, возникающим в области солнечных пятен с 2500 Гс и в области пляжей с 150 Гс).

плазмы от гидродинамического к МГД, когда $\beta \gg 1$. Поднимаясь выше в корону и переходя к солнечному ветру, β возрастает и вещество становится преобладающим.

Рассмотрим характеристики плазменных параметров (см. таблицу ниже), в частности, концентрацию, температуру, МП, характерные размеры и времена плазменных процессов. Заметна существенная разница между областью короны (расстояние в 100 Мм от центра Солнца) и положением земной орбиты (столбец solar wind). Значительно меняются МП и концентрации, температура – лишь на порядок.

Symbol	Solar wind	(Upper) Corona	Definition
n_p, n_e	3 cm^{-3}	10^6 cm^{-3}	Proton and electron number density
T_p, T_e	10^5 K	10^6 K	Proton and electron temperature
B	$3 \times 10^{-5} \text{ G}$	1 G	Magnetic field strength
$\lambda_{\text{mfp},p}$	3 au	100 Mm	Proton collisional mean free path
L	1 au	100 Mm	Characteristic size of the system
d_p	140 km	230 m	Proton inertial length
ρ_p	160 km	13 m	Proton gyration radius
d_e	3 km	5 m	Electron inertial length
ρ_e	2 km	30 cm	Electron gyration radius
λ_p, λ_e	12 m	7 cm	Proton and electron Debye lengths
Π_{vc}	120 d	2 h	Proton collision time
τ	2.4 d	10 min	Expansion time
Π_{Ω_p}	26 s	$660 \mu\text{s}$	Proton gyration period
$\Pi_{\omega_{pp}}$	3 ms	$5 \mu\text{s}$	Proton plasma period
Π_{Ω_e}	14 ms	360 ns	Electron gyration period
$\Pi_{\omega_{pe}}$	$70 \mu\text{s}$	110 ns	Electron plasma period

Характерные плазменные масштабы в таблице показывают поведение частиц в МП. Характерная длина свободного пробега протонов приблизительно равна области, в которой они распространяются: плазма солнечного ветра *слабостолкновительная*.

Дебаевский радиус – расстояние, на котором экранируется кулоновское взаимодействие; расстояние, на котором частица не будет воспринимать другие заряженные частицы как некоторое препятствие, с которым могут столкнуться. Возникает из-за двухзарядности плазмы и сохранения ей электрической нейтральности. Рассмотрим конкретную частицу, например, протон: он будет притягивать к себе отрицательные заряды, которые, в свою очередь, притянут к себе положительные и т.д. Произойдет эффект экранирования, характерный масштаб которого и будет дебаевский радиус. Он сравнительно мал относительно других плазменных пространственных

масштабов в солнечном ветре (см. таблицу). Это говорит о том, что частицы при своем распространении не воспринимают другие частицы солнечного ветра как препятствие, с которым может произойти столкновение и последующее изменение импульса.

Протонная инерционная длина – размер скин-слоя, то есть расстояние в веществе, на котором затухают ЭМ волны. Волна взаимодействует с плазмой на расстояниях протонной инерционной длины, много больше дебаевского радиуса.

Гирорадиус – размер спирали, по которой вращается частица вокруг линии МП. В процессе своего движения частица почти не сталкивается с другими частицами, поэтому из некоторой линии МП заряженная частица не соскакивает (*эффект замагниченности частиц*).

Последний раздел таблицы посвящен характерным временным масштабам. Период столкновения между отдельными протонами составляет 120 дней и 2 часа для орбиты Земли и короны Солнца соответственно. Время распространения частицы в области короны (выход частицы из этой области) 10 минут, до орбиты Земли долетает за 2,4 дня.

В совокупности характеристики, влияющие на поведение частиц в СВ, показывают, что диапазон изменений масштабов длины и времени велик, составляет 12 порядков.

Спутники, изучающие СВ. Спектр мощности МП

Параметры, рассмотренные выше, показывают нетривиальные изменения характеристик частиц СВ в пространстве. Для их изучения используются космические аппараты, которые могут измерять показатели непосредственно на месте (рисунок 8.2). В основном все спутники летают на околоземной орбите или в точках Лагранжа (SOHO, ACE). Есть исключения, отличающиеся по своему пространственному положению в Солнечной системе, а именно группа далеких спутников:

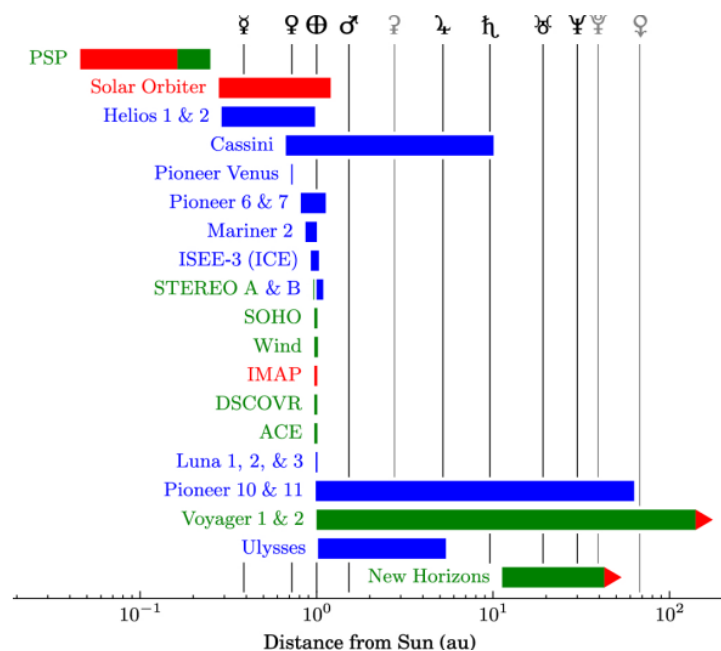


Рисунок 8.2 Радиальный охват отдельных гелиосферных миссий

«Пионеры», ушедшие за орбиту Плутона, «Вояджеры», «Новые горизонты», «Улисс» (на орбите Юпитера совершил гравитационный маневр, чтобы выйти из зоны эклиптики). Существует также группа спутников, приблизившихся к Солнцу для изучения СВ близки звезды: «PSP» (наиближайшее расположение к поверхности, $8 - 9 R_{\odot}$), «Solar Orbiter» (выходит из плоскости эклиптики за счет гравитационного маневра около Венеры).

Для солнечного ветра характерны **степенные распределения** в возмущениях различных величин. Данные возмущения имеют теоретическую интерпретацию (рисунок 8.3). Рассмотрим спектр мощности возмущений МП в зависимости их от частот. Наблюдаются области:

- Накачки энергии в возмущения f^{-1}
- Инерции $f^{-5/3}$
- Спада $f^{-2.8}$

Перелом в спектре связан с тем, что центральная область спектра лучше описывается МГД приближениями (степень $-5/3$ из закона Колмогорова-Обухова, соответствующий модели турбулентного переноса). Высокочастотная часть (правая) соответствует кинетическому описанию плазмы с другим наклоном спектра (степень -2.8). Турбулентные структуры для СВ являются характерными, что прослеживается не только по изменению МП, но и по потокам частиц, флуктуациям температур и концентраций.

Солнечный ветер представляет собой некоторую популяцию заряженных частиц, удаляющаяся от Солнца и заполняющая собой межпланетное пространство, формируя межпланетную плазму.

Закон изменения плотности атмосферы. Убегание атмосфер

Характеристики плазмы СВ меняются при удалении от Солнца. Рассмотрим общий сценарий, **как меняется плотность солнечной короны**. Предположим, что атмосфера находится в равновесии и, для начала, предположим, что имеет постоянную температуру (изотермический процесс). Последнее предположение очень похоже на правду, так как температура короны Солнца очень слабо зависит от высоты ($T = T_0 = const$). Для такого случая можно выписать уравнения, чтобы найти стационарное распределение плотности в таком СВ.

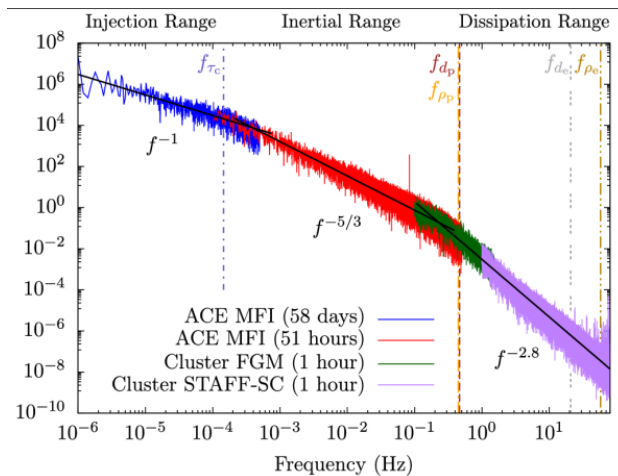


Рисунок 8.3 Спектральная плотность мощности флуктуаций магнитного поля в солнечном ветре в течение временного интервала с $\Delta p \approx 1$

Условие равновесия (баланс давления – Солнце притягивает к себе частицы гравитационным полем, но собственный градиент давления поддерживает частицы, отталкивая от звезды) и **давление идеального газа** p :

$$\frac{dp}{dr} + \rho g = 0, \quad p = nkT_0, \quad \rho = nm, \quad g = \frac{GM_0}{r^2} = g_0 \frac{R_0}{r^2},$$

где M_0 – масса Солнца, R_0 – радиус Солнца, а g_0 – ускорение падения на уровне $r = R_0$. Получаем дифференциальное уравнение:

$$\frac{dn}{n} = -\frac{R_0^2}{H_0} \frac{dr}{r^2}$$

где $H_0 = \frac{kT_0}{mg_0} \approx 50 \times 10^3$ км – высота однородной атмосферы. Решение уравнения дает:

$$n(r) = n_0 \exp \left[\frac{R_0^2}{H_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_0} \right) \right]$$

$$\text{Если } r \approx R_0, \quad \text{то } n(r) = n_0 \exp \left[-\frac{r - R_0}{H_0} \right]$$

Для малых высот получаем барометрическую формулу, концентрация падает по экспоненциальному закону.

Из известного экспоненциального закона возникает иллюзия, что плотности атмосфер должны на бесконечности стремиться к нулю. На самом деле видно, что на **бесконечности для Солнца**:

$$n(r \rightarrow \infty) = n_0 \exp \left[-\frac{R_0}{H_0} \right] \approx 10^{-6} n_0 \cong 10^3 \text{ см}^{-3}$$

В реальности же на орбите Земли (из таблицы выше) концентрация частиц 3 см^{-3} , что почти на три порядка меньше результата формулы в пределе. **Итог:** если бы СВ был изотермическим, то стационарным он быть бы **НЕ** мог. Иначе должно было бы быть некоторое обволакивающее вещество, которое поддерживало бы такую концентрацию частиц.

Формула $n(r) = n_0 \exp \left[-\frac{r - R_0}{H_0} \right]$ отражает простую вещь. Атмосфера любого тела с радиусом R_0 и однородной высотой H_0 стремится заполнить всё пространство, то есть убегает. Единственный способ препятствовать убеганию – наличие внешней среды с плотностью $n > n_\infty$. При этом для каждой плотности внешней среды можно рассчитать

плотность у поверхности n_0 , при которой атмосфера приходит в равновесие со средой, и её убегание прекращается.

Для атмосферы Солнца внешним сдерживающим фактором является межзвёздная среда с плотностью $\sim 1 \text{ см}^{-3}$. Таким образом, n_∞ ($\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$) превышает плотность среды на 3 порядка, и атмосфера Солнца с наблюдаемыми характеристиками существовать не может.

Понизить n_∞ при фиксированном n_0 можно понижением H_0 , то есть, например, для планет плотность удерживаемой атмосферы возрастает при понижении температуры, либо при повышении средней массы молекулы (изменении химического состава).

Модель Чапмена. Модель Паркера. Давление СВ

Рассмотренный выше сценарий, хотя и позволяет понять основные закономерности, но для Солнца, как было показано, противоречит наблюдениям. Главным ресурсом для его модификации является отказ от предположения, что температура не зависит от высоты.

Положим, что $T = T(r)$. Соответствующая модель называется *моделью Чапмена*. Начнём с тех же уравнений, но уже не считаем, что $T = T_0$. Главной задачей при такой постановке становится вопрос, по какому закону меняется температура в короне. Прежде всего, если температура зависит от расстояния, то есть присутствует её градиент, то в короне будет распространяться поток тепла.

$$\Phi = 4\pi r^2 k_{\text{тепл}} \frac{dT}{dr}, \quad k_{\text{тепл}} \sim T^{5/2}$$

где $k_{\text{тепл}}$ – коэффициент электронной теплопроводности. Если в короне нет внутренних источников тепла, то поток тепла не должен зависеть от r : $\Phi = \text{const}$. Получаем:

$$r^2 T^{5/2} \frac{dT}{dr} = \text{const}$$

Проинтегрируем зависимость:

$$T^{5/2} dT = \text{const} \frac{dr}{r^2}$$

$$T(r) = T_0 \left(\frac{R_0}{r} \right)^{2/7}$$

Таким образом, температура в короне должна падать, но слабо (показатель $2/7$ довольно близок к нулю, что соответствует изотермическому случаю, рассмотренному выше). Например, для уровня орбиты Земли, где $1 \text{ а. е.} \approx 215 R_0$, получаем $T \approx 200$ тыс. К. Реальное значение температуры электронов короны на уровне орбиты Земли 150 тыс. К, то есть совпадение довольно хорошее.

Вернёмся к условию равновесия $\frac{dp}{dr} + \rho g = 0$, $p = nkT_0$ и подставим в него найденный закон изменения температуры:

$$\frac{dp}{dr} + p \frac{mg_0 r^{2/7} R_0^2}{kT_0 R_0^{2/7} r^2} = 0$$

$$\frac{dp}{p} = -\frac{1}{H_0} \frac{R_0^{12/7}}{r^{12/7}} dr$$

$$p(r) = p_0 \exp \left[\frac{7 R_0}{5 H_0} \left(\frac{R_0^{5/7}}{r^{5/7}} - 1 \right) \right]$$

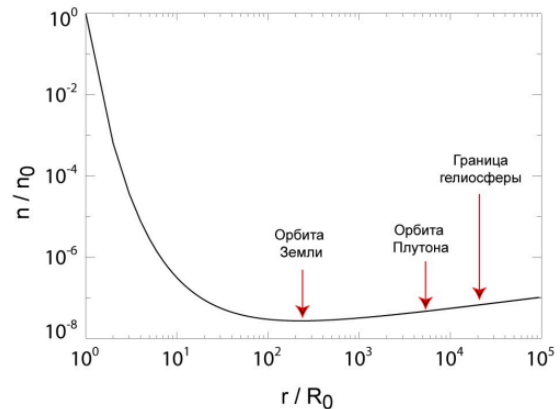


Рисунок 8.4 Плотность в зависимости от расстояния

Отсюда для плотности выражение имеет вид:

$$n(r) = n_0 \frac{T_0 p}{T p_0} = n_0 \frac{r^{2/7}}{R_0^{2/7}} \exp \left[\frac{7 R_0}{5 H_0} \left(\frac{R_0^{5/7}}{r^{5/7}} - 1 \right) \right] \rightarrow n_0 \frac{r^{2/7}}{R_0^{2/7}} \exp \left[\frac{7 R_0}{5 H_0} \right] \rightarrow \infty$$

Плотность короны стремится к бесконечности, но перед этим проходит через минимум и далее растёт очень незначительно. Положение и значения минимума:

$$r_{min} = \frac{7 R_0^{12/7}}{2 H_0^{5/7}} \approx 1.07 \text{ а. е.} - \text{ почти на уровне орбиты Земли}$$

$$n_{min} \approx 2.7 \times 10^{-8} n_0 \approx 27 \text{ см}^{-3}$$

Реальное значение на уровне орбиты Земли: $\approx 6 \text{ см}^{-3}$. Тем самым есть определённое расхождение, также как расхождение с межзвёздной средой, но это лучшее из того, что можно получить в стационарном случае.

Модель Паркера

Паркер анализировал наблюдения *хвостов комет*, в которых выделяются две компоненты. Одна (более яркая и изогнутая) к тому времени была объяснена влиянием давления света. Однако вторая компонента не имела объяснения. Главным препятствием

была форма компоненты: вытянутая, строго радиальная от Солнца, свидетельствовавшая о действии со стороны Солнца некой силы, отличной от давления света и, при этом, приводящей к очень сильному увеличению скорости газа.

Корона Солнца, в целом, очень разреженная среда. Уже говорилось, что её масса на порядки величины меньше массы атмосферы Земли. Соответственно, солнечный ветер, представляет собой, очевидно, ещё более *эфемерную среду*. Оценим, например, его полное кинематическое давление на единичную поверхность на уровне орбиты Земли:

$$p_{\text{ветра}} = m_p v^2 n = 1.6 \times 10^{-8} \text{ дин}$$

Для сравнения давление света на уровне земной орбиты:

$$p_{\text{света}} = \frac{S}{c} = 4.7 \times 10^{-5} \text{ дин}$$

Здесь S – солнечная постоянная (1400 Вт/м²) – полный поток световой энергии на единицу площади в секунду на орбите Земли. Отсюда

$$\frac{p_{\text{света}}}{p_{\text{ветра}}} = 3000$$

Так, например, *солнечный парус* — приспособление, принцип которого основан на действии давления солнечного света на отражающую поверхность для приведения в движение космического аппарата.

Паркер высказал предположение, что корона Солнца, которая в стационарном приближении не может, согласно, расчётам находиться в равновесии с межзвёздной средой, *непрерывно расширяется в окружающее пространство* до тех пор, пока в равенство не приходит кинематическое давление этого расширения и сопротивление ему со стороны давления межзвёздной среды. Иными словами, *корона заканчивается там, где скорость расширения обращается в ноль*.

Для такого случая в уравнение стационарного равновесия добавляется новое слагаемое, зависящее от скорости $v(r)$:

$$\frac{dp}{dr} + \rho g + \rho v \frac{dv}{dr} = 0$$

Вопрос в том, по какому закону изменяется $v(r)$. Если его найти и подставить сюда, то остальное решение происходит по уже описанной выше схеме. Паркер предложил рассматривать процесс расширения газа как политропический, то есть более общий, чем изотермический или адиабатический. Для такого процесса:

$$p \sim \rho^\alpha, \quad \alpha - \text{показатель политропы}$$

- Если $\alpha = 1$, то $p \sim \rho$, что из уравнения $p = nkT$, означает $T = \text{const}$. То есть это изотермический случай.
- Если $\alpha = \gamma = 5/3$, то $p \sim \rho^\gamma$, что означает адиабатический процесс (расширение без совершения работы).

В случае если газ расширяется с совершением работы, то есть в нём есть внутренние источники энергии, то $1 < \alpha < 5/3$. Можно сказать, что именно такой случай, согласно наблюдениям, соответствует солнечному ветру. Реальное значение α для него составляет $\alpha \approx 1.1 - 1.2$. В чём заключаются источники энергии, которые совершают работу над газом, на настоящий момент однозначно не установлено. По факту это приводит к тому, что ветер ускоряется быстрее, чем это предсказывает адиабатическая модель.

Для вывода зависимости $v(r)$, Паркер воспользовался уравнением Бернулли, представляющим собой закон сохранения энергии для идеальной жидкости/газа:

$$\frac{v^2}{2} + gr + \frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{p}{\rho} = \text{const}$$

Так как мы ищем функцию $v(r)$, наша задача оставить в левой части уравнения только переменные v и r . Первое слагаемое уже зависит только от v и r . Для второго и третьего слагаемого:

$$gr = \frac{g_0 R_0^2}{r}, \quad \frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{p}{\rho} = \text{const} \times \frac{\rho^\alpha}{\rho} = \text{const} \times \rho^\alpha$$

Воспользуемся уравнением непрерывности потока

$$\rho v r^2 = \text{const} \Rightarrow \rho = \frac{\text{const}}{v r^2}$$

Подставляя в третье слагаемое получаем:

$$\frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{p}{\rho} = \text{const} \times \frac{\rho^\alpha}{\rho} = \frac{\text{const}}{(v r^2)^\alpha}$$

В результате перепишем уравнение Бернулли для ветра в искомом виде, который зависит только от v и r :

$$\frac{v^2}{2} + \frac{g_0 R_0^2}{r} + \frac{\text{const}}{(v r^2)^\alpha} = \text{const}$$

После нормировки, окончательно получаем неявное уравнение:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{g_0 R_0^2}{r} + \frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{p_0}{\rho_0} \frac{const}{(vr^2)^\alpha} = \frac{v_0^2}{2} + g_0 R_0 + \frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{p_0}{\rho_0}$$

Получившееся уравнение, очевидно, нельзя выразить простым образом в виде функции $v(r)$. Более того, видно, что для каждого r возможно несколько решений относительно v . Поэтому это уравнение решается численно, что даёт следующее семейство решений:

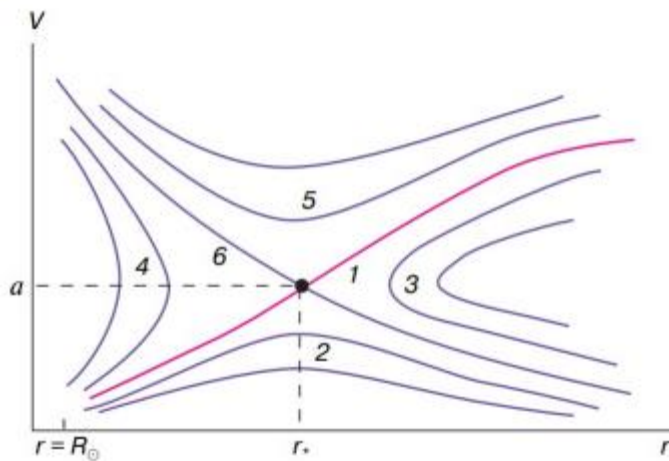


Рисунок 8.5 Семейства решений уравнения

- Семейства 3 и 4 – нефизичны (4-ое семейство описывает вещество, поднимающееся от Солнца, останавливается и падает на Солнце, 3-е семейство описывает межзвездное вещество, которое вторглось в Солнечную систему, а затем её покинуло).

- Семейства 5 и 6 – требуют очень высоких скоростей при $r = R_0$, которые не наблюдаются вблизи Солнца. СВ не адиабатический,

поэтому СВ передается некоторая энергия из МП.

Остаются два решения, различающиеся поведением на бесконечности:

- Семейство 2 – стремится на бесконечности к нулю и никогда не переходит скорость звука. Называется *солнечным бризом*.
- Семейство 1 – стремится на бесконечности к $v = const$, и после $r > r^*$ становится сверхзвуковым. Именно этот режим, согласно наблюдениям, реализуется и называется *солнечным ветром*.

Особенности СВ. Спираль Паркера. Наблюдения

Таким образом, солнечный ветер (а также звёздный ветер) обладает следующими особенностями:

1. Это течение газа, имеющее у поверхности Солнца *скорость равную нулю и стремящуюся на бесконечности к постоянному значению*.

2. После какого-то расстояния течение газа становится *сверхзвуковым*. Для Солнца это происходит очень быстро, примерно на 2-3 радиусах от его поверхности.
3. В реальных условиях, в какой-то момент солнечный ветер начинает тормозиться межзвёздной средой, замедляется, снова становится дозвуковым, а потом и вовсе останавливается. Именно это является границей солнечной системы. За ней начинается межзвёздная среда.

Некоторые усреднённые характеристики солнечного ветра (межзвёздной среды на уровне орбиты Земли):

- Скорость – 400 км/сек
- Концентрация протонов/электронов – 6 см^{-3} .
- Температура протонов – 50 тыс. К
- Температура электронов – 150 тыс. К
- Магнитное поле – 5×10^{-5} эрстед = 5 г (для сравнения, поле у поверхности Земли $\sim 10^5$ г)
- Состав: 96 % протоны, 4 % - ядра гелия.

Фактически параметры варьируются в очень широких пределах вслед за изменениями в короне Солнца. Скорость, например, может падать до 300 км/с, и возрастать до 1-2 тысяч км/с.

Спираль Паркера

Если посмотреть на графическое представление межпланетной среды, то всегда можно увидеть, что распределение магнитных полей и потоков плазмы имеет вид спиралей ввиду вращения Солнца. Например, слева показано распределение плотности плазмы между Солнцем и Землёй (вид сверху от полюса на плоскость эклиптики). Это так называемая *спираль Паркера*, связанная с тем, что структура межпланетного магнитного поля (и, соответственно, плазмы) определяется двумя процессами – радиальным расширением солнечного ветра и вращением Солнца.

С математической точки зрения это *спираль Архимеда*. Выведем её форму. Предположим, что поле в каждой точке может быть разложено на продольную (радиальную) и поперечную (тангенциальную) компоненты:

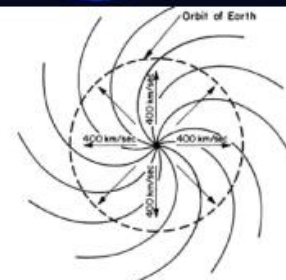
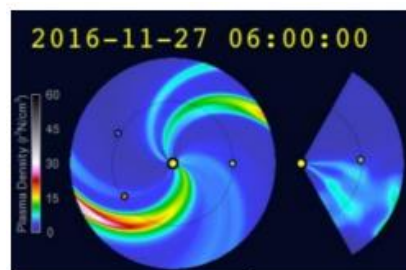


Рисунок 8.6 Спираль Паркера

$$B^2 = B_r^2 + B_t^2$$

Для продольной компоненты из закона сохранения потока:

$$B_r r^2 = const, \quad \text{то есть } B_r(r) = B_{r0} R_0^2 / r^2$$

Для поперечной компоненты запишем уравнение вращения:

$$\phi = \omega t, \quad r = vt, \quad \text{то есть } \phi = \omega r / v$$

Итого

$$B_t(r) = B_r \frac{rd\phi}{dr} = \frac{\omega}{v} (r - R_0) B_r$$

где ω – частота вращения Солнца, v – скорость ветра.

Наличие спирали Паркера приводит к интересному эффекту. Если солнечная вспышка произошла прямо напротив Земли по центру видимого диска, заряженные частицы могут не попасть на Землю, так как будут уведены силовыми линиями в сторону от Земли. И наоборот, частицы с определённых долгот почти наверняка достигнут Земли. Определим эту долготу.

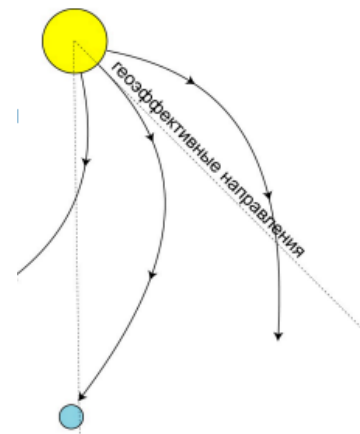


Рисунок 8.7 К определению геоэффективной долготы

$$\Delta\phi = \frac{1 \text{ а. е.}}{v} \omega$$

Для Солнца $v \sim 400$ км/с, $\omega = \frac{2\pi}{T}$, где $T \sim 27$ дней получаем **геоэффективную долготу Солнца** $\Delta\phi \approx 58^\circ$.

Спираль Паркера становится спиралевидной, начиная с расстояния $2 - 3 R_{sun}$ от центра звезды. До этого расстояния МП вращается с Солнцем «твёрдотельно», при этом сильно искажается процессами, происходящими на поверхности Солнца. У Солнца есть две полярности, поэтому из-за эффекта спирали эти две полярности в некоторый момент сталкиваются, где и будут формироваться электрические токи. В межпланетном пространстве существуют **гелиосферные токовые слои** – токовые структуры.

Наблюдения

Аппарат «Улисс» был запущен в 1993 году, добравшись до Юпитера, совершил гравитационный манёвр и вышел на более полярную орбиту вокруг Солнца. В течение 1,5 циклов солнечной активности измерял параметры СВ. На *рисунке 8.8* представлены измеренные скорости СВ на различных широтах и в разное время солнечной активности.

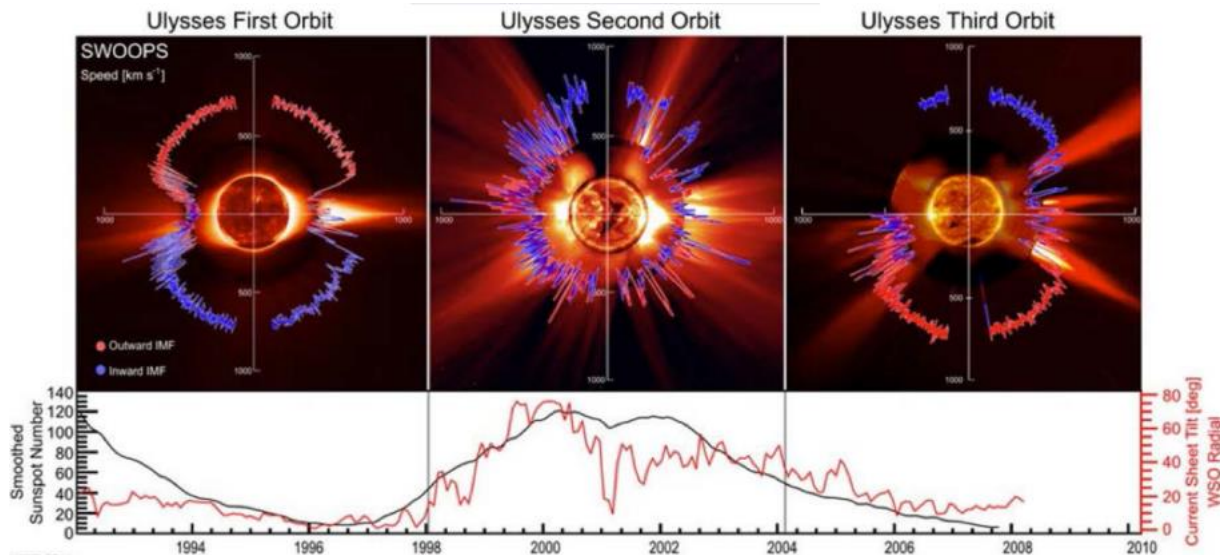


Рисунок 8.8 Изменение солнечного ветра в течение солнечного цикла. Межпланетное магнитное поле, направленное на юг, выделено синим цветом, межпланетное магнитное поле, направленное внутрь, - красным. На нижней панели показаны временная шкала и линейные графики относительного сглаженного количества солнечных пятен. Обратите также внимание на смещение силовых линий межпланетного магнитного поля между первой и третьей орбитами из-за изменения направления магнитного поля.

В эпохе между циклами в спокойном Солнце СВ имеет примерно изотропную структуру скорости: возле экватора скорость низкая, около 400 км/с, на высоких – больше. При высокой активности Солнца спутанные МП тормозят частицы, которые могли бы распространяться в силовых линиях МП, получается смешанная картина скоростей.

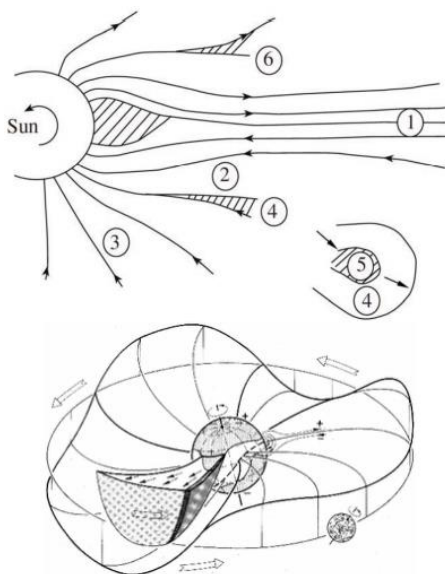


Рисунок 8.9 Схематическое изображение различных крупномасштабных образований в межпланетном пространстве. Верхний – «нахлесты» потоков СВ. Нижний – гелиосферный токовый слой

СВ зависит от стадии активности Солнца: спокойное Солнце демонстрирует только экваториальные стримеры в короне, МП примерно радиальное. При активном Солнце МП в короне запутанное, СВ имеет низкие скорости.

В короне могут происходить «нахлесты» одних потоков СВ на другие. Рассмотрим *верхний рисунок 8.9*, смотрим на Солнце с полюса, область 2 относится к медленному СВ (есть активные образования), область 3 – быстрый СВ. При вращении Солнца область 3 нагоняет 2-ую, перекрывает её, образуя **область повышенной плотности вещества**. Наоборот, если область медленного СВ «догоняет» (на деле отстает) область быстрого, то может образовываться **разреженное пространство** между ними.

Медленный ветер связан с активными образованиями, быстрый СВ – с *корональными дырами*. Области повышенной плотности вещества наблюдаются земными космическими аппаратами.

Взаимодействующие разнонаправленные потоки МП образуют *гелиосферный токовый слой*, является изгибным, пронизывая межпланетное пространство под различными геометрическими углами (рисунки 8.9, нижний).

Гелиосфера. Аппараты "Пионер" и "Вояджер"

Рассмотрим, что представляет из себя СВ на далеких расстояниях от Солнца. Основные структуры гелиосферы определяются особенностями СВ. На 2 радиусах Солнца СВ разгоняется и преодолевает скорость звука (см. рисунок 8.10). Затем, если бы СВ распространялся по модели Паркера, то он бы выходил на константу, но из-за отсутствия МЗС в его модели это не так, реальный СВ теряет скорость и становится дозвуковым, происходит образование *гелиосферной ударной волны*.

- **Гелиосферная ударная волна** – граница, на которой скорость ветра падает до дозвуковой. После этой границы ветер замедляется.
- **Гелиопауза** - граница, на которой останавливается скорость ветра (граница солнечной системы).
- **Гелиооболочка** – область солнечной системы между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой. Все эти структуры не наблюдаются снаружи и долгое время были гипотетическими.
- **Хвост гелиосферы** – гипотетическая структура похожая на хвост магнитосферы Земли (пересоединение линий солнечного поля с межзвёздным полем. Головная ударная волна - всё ещё гипотетическая структура, которая может возникать из-за того, что скорость движения Солнца в межзвёздной среде превышает скорость звука. По виду на волну от носа корабля, разбегающуюся к берегам.

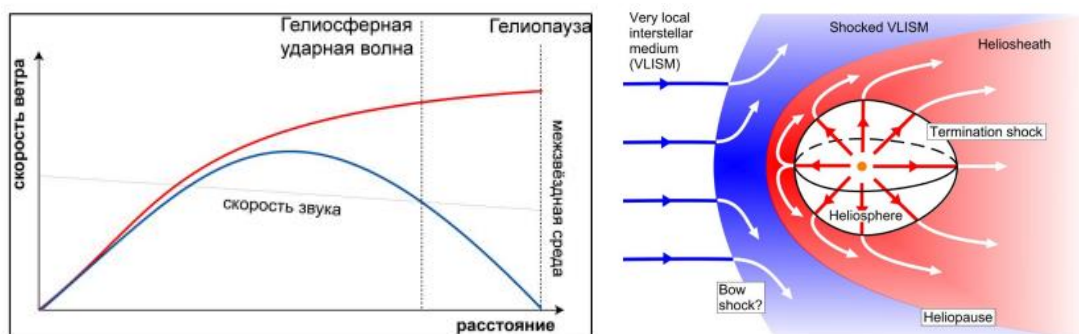


Рисунок 8.10 Слева: изменение скорости от расстояния от Солнца. Справа: окрестности Солнца

Сравнение расстояний

Орбита Земли	1 а.е.	Гелиосферная ударная волна	75-90 а.е.
Орбита Нептуна	30 а.е.	Гелиопауза	110-130 а.е.
Орбита Плутона	30-50 а.е.	Наклонная ударная волна	250 а.е.

Аппараты «Пионер»

Программа межпланетных станций «Пионер» была начата НАСА в 1958 году. Первые аппараты запускались к Луне. Самыми известными являются станции «Пионер-10» и «Пионер-11». Преодолели третью космическую скорость, связь с ними утеряна.

«Пионер-10»



Запущен 2 марта 1972 года к планете Юпитер. Первый аппарат в истории, который достиг третьей космической скорости и покинул (вероятно) солнечную систему. Связь с аппаратом была потеряна 23 января 2003 года, в момент, когда он находился на расстоянии 80 а.е. (закончилась энергия передатчика). Сейчас (2020) должен быть на расстоянии 123 а.е. Должен достичь окрестностей Альдебарана (68 св.лет) через 2 млн. лет.

«Пионер-11»



Запущен 6 апреля 1973 года к планете Сатурн. Второй из пяти аппаратов в истории, который достиг третьей космической скорости и покинул (вероятно) солнечную систему. Связь с аппаратом была потеряна 24 ноября 1995 года. Визуально наблюдался до 2002 года. Сейчас (2020) должен быть на расстоянии 101 а.е. Двигается в сторону созвездия Щита. Может достичь ближайших по направлению звёзд через 1 млн. лет.

Пластинки «Пионеров» сделаны из алюминия, анодированного золотом 23×15 см. Изображены мужчина, женщина и корабль «Пионер» в одном масштабе. Слева - Солнце. Лучами показано расположение и расстояния (в двоичной системе) до 14 ближайших пульсаров и центра Галактики. Вверху показаны два основных состояния атома водорода и масштаб – 21 см.

Аппараты «Вояджер»

Программа межпланетных станций «Вояджер» начата НАСА в 1977 году и включает два аппарата «Вояджер-1» (работает) и «Вояджер-2».

«Вояджер-1»



Запущен 5 сентября 1977 года по маршруту Юпитер – Сатурн, Титан (спутник Сатурна). Третий аппарат в истории, который достиг третьей космической скорости. Первый аппарат в истории, который пересёк гелиопаузу и вышел в межзвёздное пространство (сообщение НАСА от 25 августа 2012 года; 121 а.е.). До этого в мае 2005 года НАСА сообщило, что аппарат пересёк гелиосферную ударную волну (94 а.е.). Должен достичь облака Оорта через 300 лет. Далее будет двигаться в сторону созвездия Жирафа. Первых звёзд может достичь через 0.5 млн. лет.

«Вояджер-2»



Запущен 20 августа 1977 года (на 13 дней раньше Вояджера-1) по маршруту Юпитер – Сатурн – Уран – Нептун. Четвёртый аппарат в истории, который достиг третьей космической скорости. Примерно 30 августа 2007 года пересёк гелиосферную ударную волну на расстоянии 76 а.е. Вышел в межзвёздное пространство 5 ноября 2018 года на расстоянии 122 а.е. Двигается примерно в сторону созвездия Андромеды. Первых звёзд может достичь через пол миллиона лет.

Уникальность в том, что с КА «Вояджер-1» получены данные о его проходе через гелиопаузу. Поток частиц с энергиями больше, чем 0,5 МэВ за границей гелиопаузы **резко сокращается**. Пластинки Вояджеров содержат, кроме надписей, записи музыки, звуков, фотографий, приветствие Президента США и т.п.

Список литературы

1. Сергей Богачёв “Солнечный ветер” (лекция)
2. Daniel Verscharen, Kristopher G. Klein, Bennett A. Maruca “The multi-scale nature of the solar wind” \ Living Rev. Solar Phys., 16, (2019), 5
3. Manuela Temmer “Space weather: the solar perspective” \ Living Rev. Solar Phys., 18, (2021), 4

Лекция №9. Солнечно-земные связи

В лекции рассматриваются солнечно-земные связи, а именно воздействие Солнца на Землю, её климат, магнитосферу и человека в частности. Воздействия подразделяются на **кратковременные** (геомагнитный шторм) и **долговременные** (изменения светимости Солнца и интенсивности циклической солнечной активности).

Кратковременные взаимодействия. Магнитосфера Земли

Взаимодействие Земли и Солнечного ветра представлено на рисунке 9.1. Структура земной магнитосферы представляет собой диполь, искаженный под воздействием солнечного ветра, который сплюсчивает обращенную к Солнцу часть и вытягивает магнитосферный хвост в сторону, обратную Солнцу. Размер земной магнитосферы со стороны Солнца составляет $\approx 10 R_3$, размер хвоста на порядок больше $\approx 100 R_3$ (Луна находится на $\approx 60 R_3$). Орбита геостационарных спутников (находятся над одной и той же точкой земной поверхности) $\approx 6,5 R_3$ от центра Земли.

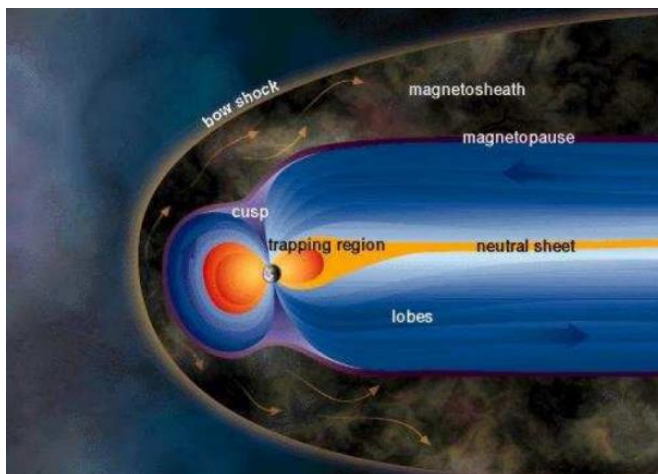


Рисунок 9.1 Основная структура магнитосферы. Слабо выраженные синие стрелки показывают направление МП к Земле в северной хвостовой части, от Земли в южной части и к северу на дневной стороне магнитосферы. Красные области во внутренней магнитосфере содержат как кольцевой ток, так и внешний пояс Ван Аллена, где ионы и электроны удерживаются на замкнутых траекториях дрейфа. Направление Солнца указано слева (ЕКА).

МП Земли (напряженность ≈ 1 Гс) превышает МП окружающего пространства (напряженность $\approx 10^{-5}$ Гс), но от Солнца могут отрываться КВМ (корональные выбросы массы), содержащие в себе плазму с вмороженными МП, что может внести значительные возмущения в магнитосферу планеты и привести к возникновению индуцированных токов. **Ударная волна** формируется при взаимодействии солнечного ветра и магнитосферы Земли, образуется головная волна при снижении скорости до дозвуковых значений (аналогия с ударной волной перед гелиопаузой). Выделяется поверхность **магнитопаузы**, разграничивает между собой МП, связанные с Землей и солнечным ветром. **Магнитослой** находится между ударной волной и магнитопаузой – область, где солнечный ветер потерял скорость до дозвуковых значений, но содержит в себе межпланетные МП. **Земная магнитосфера** такова, что северный магнитный полюс совпадает с южным географическим: силовые линии из южного географического полюса выходят, окаймляют Землю, а затем входят в северный географический полюс. **Хвост**

магнитосферы отличается противоположно направленными магнитными потоками. Область взаимодействия этих двух потоков образует *нейтральный токовый слой*. Выделяется также область, густонаселенная заряженными частицами – *область ловушек (область радиационных поясов Земли)*.

Солнечный ветер, взаимодействуя с лицевой по отношению к Солнцу частью магнитосферы, приводит к магнитному пересоединению между линиями земного и межпланетного МП. В местах пересоединения появляется возможность проникновения внутрь земной магнитосферы для заряженных частиц солнечного ветра. Частица попадает внутрь магнитосферы, добирается до токового слоя, который также может испытывать магнитное пересоединение, в результате которого частица попадает в более глубокие слои магнитосферы. Двигаясь по некоторым линиям МП, частица постепенно приближается к земному полюсу, если частица имеет некоторый конкретный вектор импульса, то она может отразиться от сгущений линий МП – *явление магнитного зеркала*. Тогда частица возвращается по магнитной петле к противоположному полюсу и может оказаться запертой в некоторой магнитной ловушке. Иные частицы находятся в *конусе потерь*, то есть их вектор импульса таков, что частицы проникают через магнитные ловушки, добираются до земной атмосферы и сталкиваются с её атомами, образуя свечение – *полярное сияние*.

Земное МП направлено преимущественно в одну сторону – противоположную от Солнца. *Наиболее активно* в таком случае на земную магнитосферу воздействуют те КВМ, что содержат в себе вмороженные МП *с противоположно направленным МП* для последующего перезамыкания. Поля, которые провзаимодействовали, сносятся солнечным ветром в сторону хвостовой части магнитосферы.

В хвосте магнитосферы токовый слой может образовать *нейтральную линию*, в которой происходит пересоединение и отрыв некоторого плазмоида со своим МП; заряженные частицы, пришедшие в процессе пересоединения на стороне, обращенной к Солнцу, собираются во внутренних слоях магнитосферы в *радиационные пояса*.

Магнитосфера Земли содержит в себе множество электрических токов:

1. Токовый слой хвоста магнитосферы, замыкается через магнитопаузу
2. Ток в области радиационных поясов Земли – кольцевой ток, через электроджеты взаимодействует с приполярным током вблизи Земли

Когда некоторое возмущение меняет структуру магнитосферы, то колебания МП индуцируют дополнительные токи, существующие токи меняются по своим амплитудам. Изменение токов воздействует на МП, регистрируемое магнитографами.

Геомагнитные индексы. Возмущения различных показателей

На рисунке 9.2 представлены графики зарегистрированной магнитной бури 6-7 апреля 2000 г. Слева, сверху вниз: межпланетное магнитное поле B_x и B_y , B_z , плотность и давление солнечного ветра, скорость и неподвижное электрическое поле. Справа, сверху вниз: θ -параметр, измеряющий энергию, поступающую в систему; индексы AU и AL , приблизительно характеризующие активность ионосферного электрического тока; AL -основан на усреднении значений с высоких широт (более 40°). Индексы составлены из показаний нескольких магнитографов на Земле. Индексы различно реагируют на изменения токов в магнитосфере. Один из популярных – D_{st} индекс, получается из усреднения значений, наблюдаемых на магнитографах по всему земному шару. D_{st} индекс наиболее чувствителен к изменениям кольцевого тока в радиационных поясах Земли, в то время как AU и AL индексы чувствительны к изменениям в электроджетах (токи, связывающие приполярные круговые и кольцевой токи).

Геомагнитные индексы испытывают вариации, схожие с вариациями солнечной активности (рисунк 9.3), но эти колебания мене ярко выражены. Усреднение отчетов по длительности цикла даёт такой результат: пик солнечной активности расходится с пиком геомагнитного максимума.

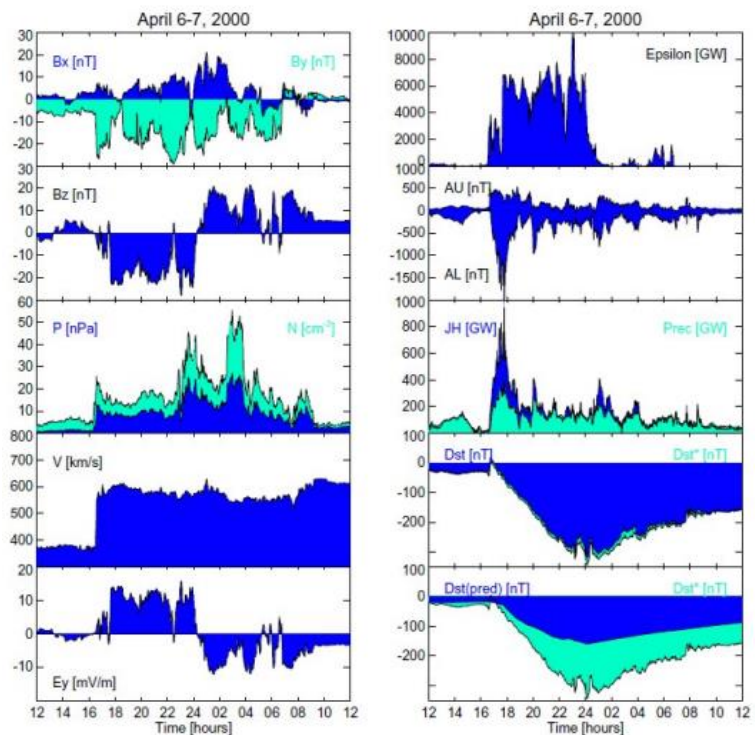


Рисунок 9.2 Магнитная буря 6-7 апреля 2000 г. Регистрация возмущений

Рисунок 9.3: Four panels showing the periodicity of solar and geomagnetic activity. Top-left: Sunspot number vs. Time [years] (1940-2000). Top-right: Sunspot number and Ap index vs. Time [years] (0-10). Bottom-left: AP index vs. Time [years] (1940-2000). Bottom-right: Sunspot number and Ap index vs. Time [months] (0-12).

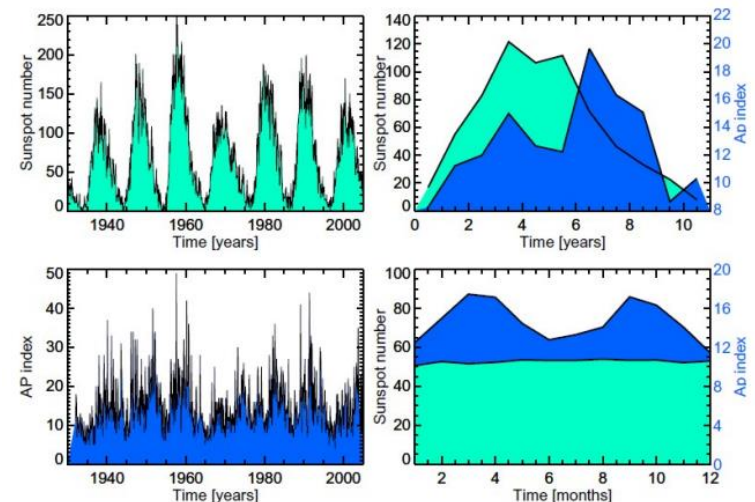


Рисунок 9.3 Периодичность солнечной и геомагнитной активности. Зеленый – значения солнечной активности, синий – значения AP индекса.

Обусловлено это тем, что статистически наиболее сильные солнечные вспышки происходят на ветви спада солнечного спада, что приводит к наибольшим возмущениям в земной магнитосфере. Усреднение по земному году показывает независимость солнечной активности от вращения Земли (что естественно), а геомагнитный индекс имеет выраженные 2 максимума, что объясняется геометрией земной магнитосферы. Земля в процессе своего вращения вокруг Солнца меняет проекцию оси вращения на направление Земля-Солнце. Летом и зимой (периоды минимума) ось земного вращения находится в одной плоскости с линией Земля-Солнце, а весной и осенью (периоды максимума) ось вращения Земли составляет наибольший угол с осью вращения Солнца. Таким образом, проекция земной магнитосферы оказывается максимальной именно весной и осенью (проекционный эффект).

Возмущения в земной магнитосфере наблюдаются не только магнитометрами с поверхности Земли, но и КА непосредственно в космосе, например, **возмущения в кольцевом токе** по наблюдениям высокоэнергичных нейтральных атомов.

На *рисунке 9.4* представлено изменение солнечной активности (верхняя панель, черная линия) и интенсивность космических лучей в противофазе (верхняя панель, красная линия). На нижней панели показано распределение релятивистских электронов во внутренней магнитосфере Земли в зависимости от времени, слева значения L-value можно рассматривать как расстояние от поверхности планеты в радиусах Земли.

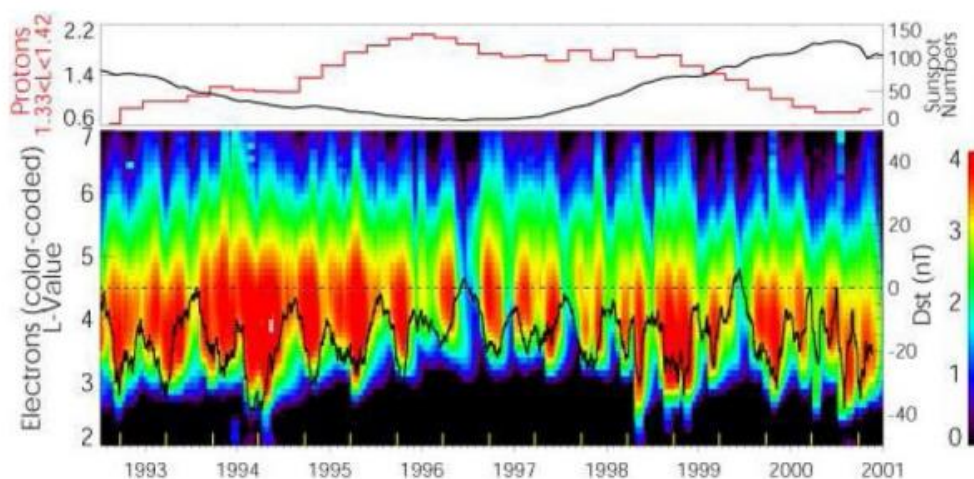


Рисунок 9.4 На верхней панели красным цветом показан поток протонов во внутреннем поясе, а черным - количество солнечных пятен. На нижней панели показано распределение релятивистских электронов во внутренней магнитосфере. Цветовая маркировка показывает интенсивность потока релятивистских электронов во внутренней магнитосфере в зависимости от времени, а L-образная оболочка показывает экваториальное расстояние от Земли. Черная кривая, нанесенная поверх, показывает среднесуточные значения индекса летнего времени (шкала справа), используемого здесь для измерения потока энергии кольцевого тока, с большим количеством отрицательных значений, указывающих на больший кольцевой ток (из Li et al., 2001).

Заметно, что в периоды повышенной солнечной активности область распределения релятивистских электронов расширяется, в периоды пониженной солнечной активности – сужается. На графике также отложен D_{st} индекс, который трассирует нижнее положение области распространения высокоэнергичных электронов в земной атмосфере.

Внутренний радиационный пояс связан с высокоэнергетичными протонами, внешний – с электронами. Примечательная высота $5,5 R_3$ над поверхностью Земли – область расположения геостационарных орбит. Если высокоэнергетичные заряженные электроны добираются до высот геосинхронных орбит, то они могут испортить спутники, поэтому КА, летающие в этой области, имеют пролетную орбиту, которая лишь несколько раз пересекает область релятивистских частиц, а не лежит в ней полностью, чтобы продлить службу аппарата. Между $2 - 3 R_3$ существует **пояс стабильности**, куда обычно запускают спутники.

Спутники Земли. Воздействие геомагнитных бурь. Вспышки на звездах

На карте распределения спутников (<https://sky.rogue.space/>) отчётливо выделяются:

- тонкий пояс геостационарных спутников
- широких пояс геосинхронных орбит (вращение над одним и тем же меридианом),
- гало спутников $2 - 3 R_3$
- спутники под внутренним радиационным поясом

Геомагнитные бури воздействуют на земную экономику посредством влияния **радиационных поясов** на спутники и **генерации индукционного тока** в замкнутом электрическом токе (земная кора, электропроводящие конструкции) за счёт переменного МП (магнитосфера Земли). Наиболее известными геомагнитными бурями являются **событие Кэррингтона** (выход из строя телеграфной связи в Европе и Америке) и **Квебекское событие** (отключение электричества в провинции). Требуется дополнительная защита на больших развернутых электрических сетях.

Чем больше вспышка на Солнце, тем больше МП она может выбросить в межпланетное пространство и сильнее воздействовать на магнитосферу Земли. Возникает вопрос: **насколько большой может быть солнечная вспышка?** Площадь группы пятен определяет мощность возможной вспышки. Принимая условно треть магнитного потока преобразованным в энергию вспышки, можно рассчитать ожидаемую площадь пятен, производящих вспышки. На *рисунке 9.5* приведены оценки

наблюдающихся вспышек и их характерных энергий. Обычно энергии находятся в пределах $10^{32} - 10^{34}$ эрг.

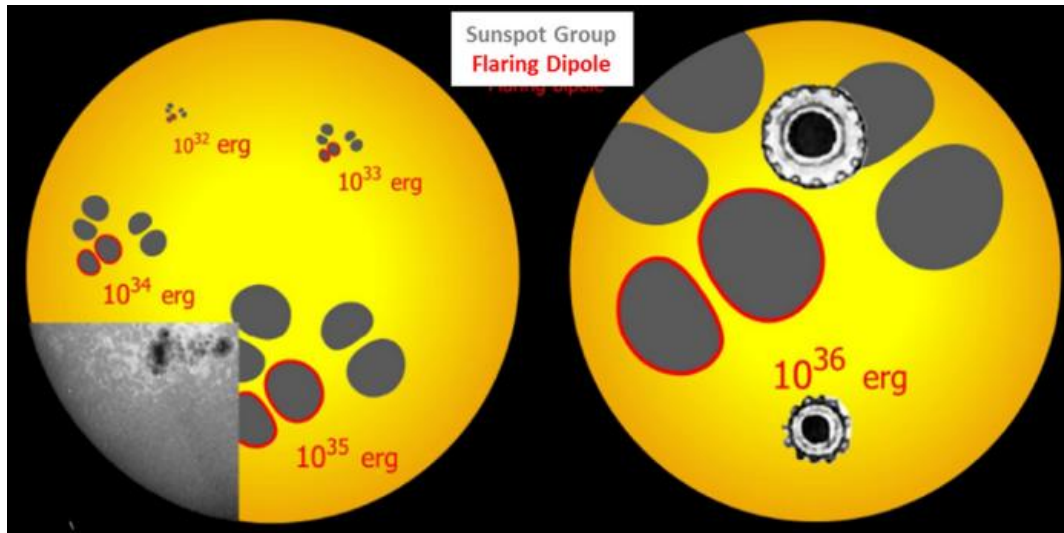


Рисунок 9.5 Изображение предполагаемых площадей групп солнечных пятен, необходимых для обеспечения вспышек с различным энергетическим балансом.

Вспышки с большими энергиями ($10^{34} - 10^{36}$ эрг) наблюдаются на других звездах – **супервспышки**, поскольку такие события способны себя обнаружить за счёт больших энергетических потоков, изменяя светимость звезды. На рисунке 9.6 отложен энергетический спектр различных по мощности вспышечных событий: супервспышки, регулярные солнечные вспышки, микро- и нановспышки. Имеются

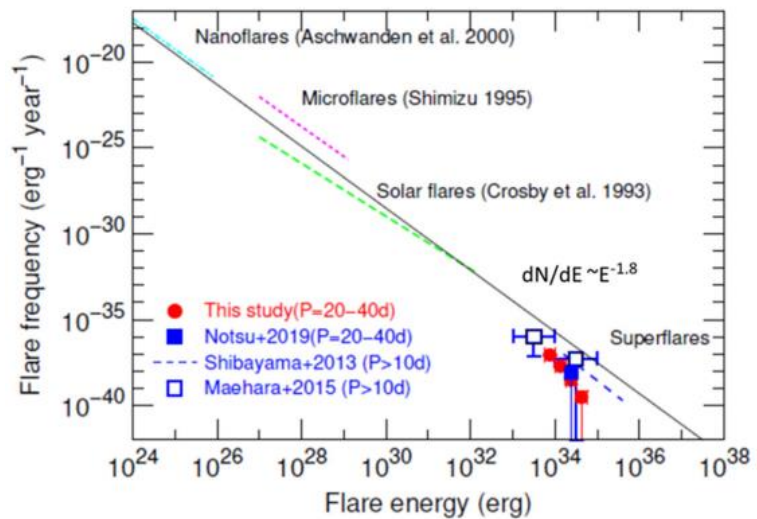


Рисунок 9.6 Зависимость частоты вспышек от энергии

наблюдательные отличия: в микровспышках сложно наблюдать структурные особенности, характерные для больших вспышек (ленточная структура, КВМ), в нановспышках наблюдать ничего не получается ввиду существующего на нынешний момент пространственного разрешения приборов. Все классы вспышечных событий соответствуют некоторому степенному закону (лежат на одной прямой), **что говорит о единой природе** таких явлений – магнитное пересоединение в короне звезды.

Солнцеподобные звезды (со спектральным классом и возрастом как у Солнца) могут иметь различные соотношения между количеством пятен и факелов (области выхода наиболее сильного МП, выглядят как потемнение ввиду ослабления конвекции в подфотосферных слоях, факельные площадки – более светлые). Для Солнца площади факельных площадок и пятен примерно равны друг другу (рисунок 9.7), однако для солнцеподобных звезд такая тенденция не всегда характерна. **Наблюдается следующая зависимость:**

чем меньше период вращения звезды, тем более она склонна производить выход МП из-под фотосферы в виде звездных пятен, чем медленнее звезда вращается – тем больше факельных площадок образуется.

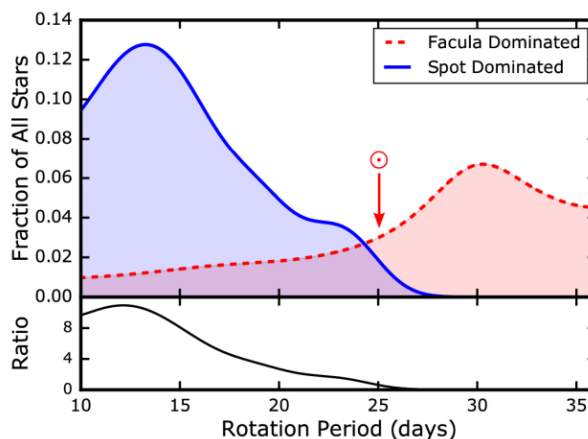


Рисунок 9.7 Частота встречаемости (и их соотношение) 463 солнцеподобных звезд Кеплера с преобладанием пятен и факелов в зависимости от периода вращения. Стрелка указывает период вращения Солнца.

Среди солнцеподобных звезд Солнце, по некоторым оценкам, находится в нижнем пределе своей активности, поэтому **существует вероятность повышения его активности** по каким-либо причинам в будущем. Иные оценки показывают, что Солнце наоборот находится в свойственном для солнцеподобных звезд диапазоне средней, стандартной активности.

Воздействие на климат Земли: оценки и корреляции. Глобальные циклы

Рассмотрим воздействие активности Солнца на Землю в долгосрочной перспективе. Существует 4 канала воздействия.

Вынуждающий фактор	Общий механизм
Общая освещенность (колебания, обусловленные изменениями орбиты или переменным солнечным излучением).	Радиационное воздействие на климат. Прямое воздействие на температуру поверхности моря и гидрологический цикл
Солнечное ультрафиолетовое излучение.	Высокоэнергетичные кванты (рентгеновские, ультрафиолетовые) поглощаются в земной атмосфере. В зависимости от энергии кванта, он добирается до разных глубин атмосферы. → Нагрев

Частицы солнечной энергии.

Галактические космические
лучи

верхних и средних слоев атмосферы, динамическая связь с тропосферой. Химический состав средних и нижних слоев атмосферы; влияет на температурную структуру и радиационное воздействие.

Ионизация верхних и средних слоев атмосферы после вторжения частиц в атмосферу; влияние на состав и температуру. Взаимодействие магнитосферы, ионосферы и термосферы.

Ионизация нижних слоев атмосферы, образование ливня вторичных частиц, что служит областями концентраций для водяного пара и льда (образование облаков, эффективно отражающих радиацию); воздействие на электрическое поле.

Средняя температура с 20 века резко повышается. Возможно восстановление температуры из косвенных данных (биологический фактор – дерево наращивает более толстые кольца в тёплые годы), на рисунке 9.8 представлен результат такой работы. На протяжении последней 1000 лет температура не росла (и даже уменьшалась в перспективе), а затем с 20 века резко выросла.

Восстановление температуры вглубь времен (радионуклидные методы, наблюдения морских отложений) не выявляет какого-либо тренда. Восстановление температур на сотни тысяч лет возможно по содержанию различных газов, испаряющихся из океанов

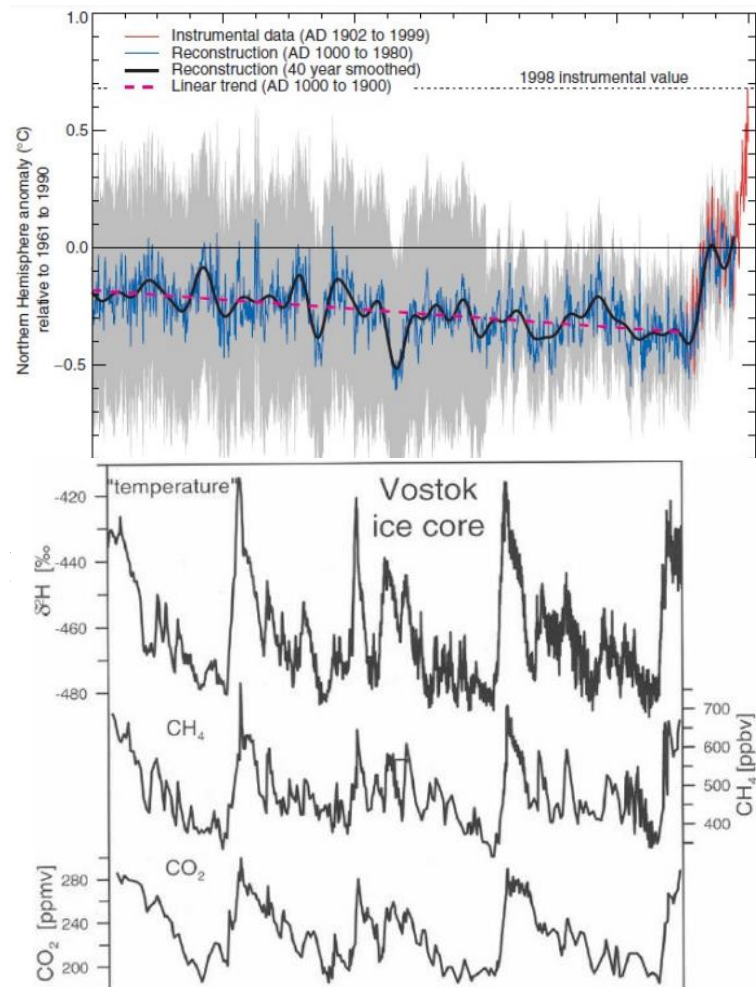


Рисунок 9.9 Данные, полученные из ледяного ядра, показывают колебания температуры (полученные на основе измерений содержания дейтерия) и концентраций метана и углекислого газа по меньшей мере за 400 000 лет

(дейтерий, метан, углекислый газ): чем теплее на Земле, тем активнее испаряются океаны – основной источник дейтерия, который впоследствии оседает на полюсах, что возможно увидеть в ледяных кернах. Такая процедура была проведена, на *рисунке 9.9* представлен её результат: нет существенного тренда.

Глобальные циклы изменения температуры на Земле связаны с геометрией движения Земли вокруг Солнца. У Земли изменяются эксцентриситет, наклон оси по отношению к плоскости вращения, присутствуют эффекты прецессии, нутации, из-за чего меняется расстояние до Солнца, как следствие, солнечная постоянная, и далее, температура. Такие циклы называют *циклами Миланковича*. Вычитание таких эффектов из общей картины температурных изменений приводит к получению зависимости температурных показателей именно от солнечной активности (*рисунок 9.10*). Проведем сравнение цикла солнечной активности (инструментальные наблюдения и восстановленные данные по изотопу углерода C^{14}) и температурных изменений на поверхности Земли за последнюю 1000 лет. Некоторые максимумы и минимумы совпадают с эпохами потепления и похолодания.

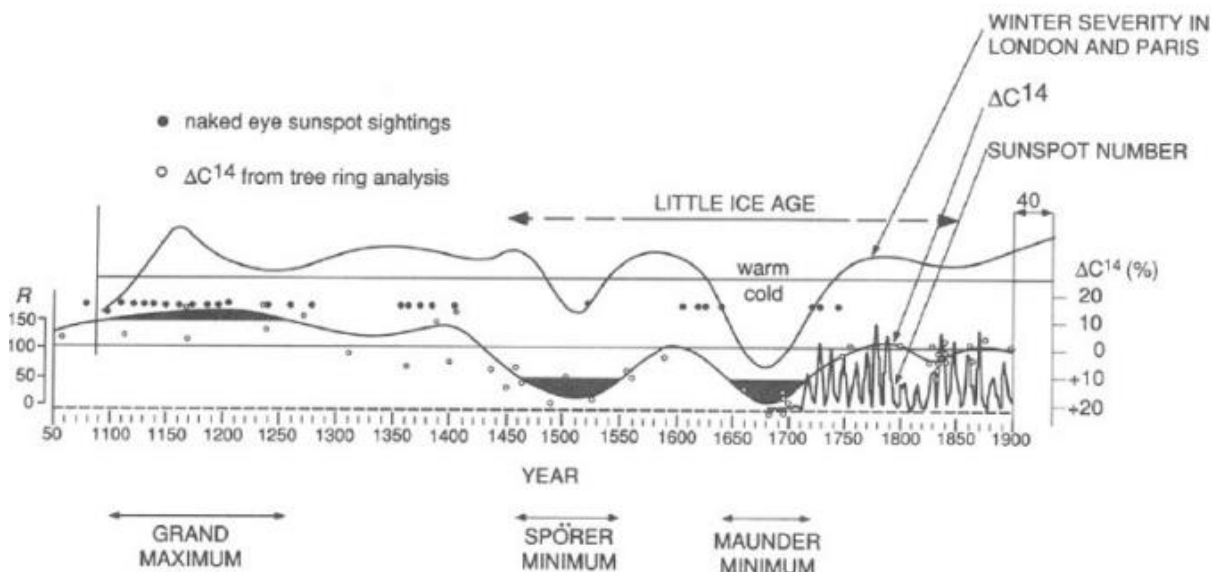


Рисунок 9.10 Из статьи Эдди (Eddy, 1976), в которой предполагается, что зимние температуры на северо-западе Европы коррелируют с солнечной активностью. Обратите внимание на совпадение “Малого ледникового периода” с минимумом Маундера в солнечных пятнах.

Со временем изменяется мнение о том, насколько явная корреляция существует между активностью Солнца и температурой на Земле. Тем не менее, всё же существует зависимость некоторых характеристик Земли от солнечной активности, например, между вариациями приповерхностной температуры в земных океанах, но в различных географических положениях отклонения могут быть либо в фазе, либо в противофазе. Замечены также изменения в океанических глобальных течениях, зависящих от

активности Солнца: в случае нагрева водяной массы появляется нестабильность и в эту область устремляется холодная вода.

Энергетический баланс атмосферы. Солнечная постоянная

Солнечное излучение проходит следующий путь при воздействии на атмосферу: от Солнца приходит энергия, равная солнечной постоянной, 342 W m^{-2} . Часть этой энергии отражается от земных облаков, другая часть – от земной поверхности, оставшееся поглощается земной поверхностью и атмосферой. Поглощенная земной поверхностью часть излучения Солнца преобразуется и отправляется обратно в атмосферу

- конвективными потоками
- переносом некоторых частиц (пар)
- посредством ИК излучения (большая часть задерживается в облаках)

На таком *энергетическом балансе* сказываются как человеческий фактор (вспаханное поле, вырубка леса, крупномасштабные карьеры), так и солнечные изменения.

Необходимо просуммировать имеющиеся наблюдения Солнца для того, чтобы оценить изменение солнечной постоянной со временем. Существует трудность совмещения абсолютных отсчётов, так как датчики КА работают на различных принципах, при совмещении абсолютных значений теряется глобальный тренд изменений. Из косвенных данных *зависимость солнечной постоянной от времени* может быть восстановлена, но *особого тренда выявлено не было*.

Поглощение в атмосфере. Озоновый слой. Факторы изменения климата

Значительно изменяется поглощение в высокочастотном диапазоне спектра солнечного излучения в атмосфере. На *рисунке 9.11* можно увидеть, на каких высотах поглощаются те или иные кванты (в зависимости от длины волны). Особенно разнятся высоты в поглощении наиболее энергичных квантов в периоды минимума и максимума солнечной активности.

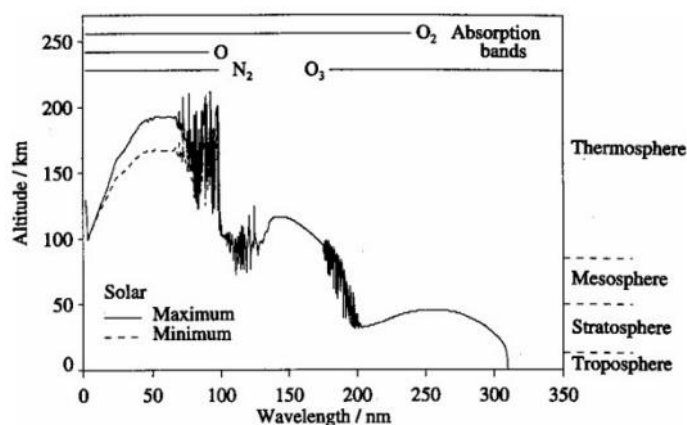


Рисунок 9.11 Зависимость длины волны от высоты одной оптической глубины для поглощения солнечного излучения Солнцем, находящимся над головой

Разные высоты поглощения влияют на химию на этих высотах.

На разных высотах поглощается разная часть спектра (см. рисунок 9.12, верхний график). Видно, что **излучение высокоэнергетичной области не добирается до поверхности Земли**. Разница между периодами высокой и низкой активности демонстрирует, что наиболее значимо эта разница воздействует на фотоны с длиной волны около 300 нм, которая важна для химии образования **озонового слоя** (см. рисунок 9.12, нижний график).

Для образования **озона** необходимо, чтобы энергичный квант разбил молекулу кислорода на 2 атома кислорода, после чего один из атомов кислорода при взаимодействии с молекулой кислорода и какой-то третьей компоненты М (для выполнения законов сохранения энергии и импульса) образует молекулу озона. Тройное соударение может происходить при достаточной плотности вещества (низкие высоты), в то время как разбиение квантом молекулы кислорода должно быть на больших высотах. Это становится причиной того, что **озоновый слой** заключен в некоторой узкой полосе высот земной атмосферы около 50-60 км над поверхностью Земли.

Скачки в изменении земной химии вызывают изменения в структуре распределения температуры с высотой. В тропосфере температура постепенно снижается, в стратосфере повышается, в мезосфере понижается вновь, в термосфере поднимается вплоть до межпланетных значений. Область озонового слоя находится в стратопause – между стратосферой и мезосферой. Термосфера начинается примерно с 90 – 100 км, эта же высота считается окончанием земной атмосферы и началом перехода к космическому пространству. Техническое определение перехода к космическому пространству: никакой аппарат, в основе работы которого лежит подъемная сила крыла, не может летать выше 100 км.

Солнечная активность влияет на озоновый слой. Так, протонное событие 1989 года наиболее сильно **снизило концентрацию озона** на высотах 40-50 км.

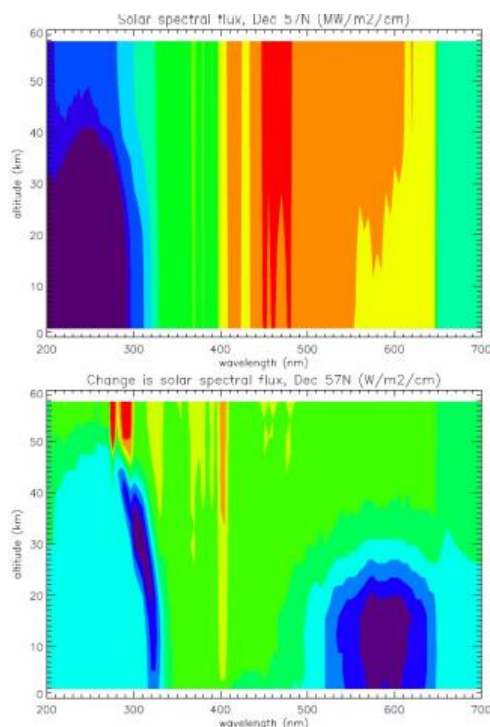


Рисунок 9.12 (Верхний) Спектральная освещенность Солнца в зависимости от длины волны и высоты над уровнем моря для 57° Северной широты в день зимнего солнцестояния. (Нижний), как и выше, но показывающая разницу между значениями в максимальные и минимальные периоды 11-летнего солнечного цикла.

Изменение в галактических КЛ и количестве облаков в земной атмосфере в зависимости от времени показывает, что *существует корреляция между количеством КЛ и обилием облаков в атмосфере Земли.*

КЛ производят облака на низких высотах (водяные, кучевые) и на больших высотах (ледяные, серебристые).

Межправительственная экспертная комиссия по контролю за земным климатом с 70-х годов составляет циркуляр с отчетами об изменениях климата и прогнозами на ближайшие годы. Комиссия преследует цель изучать антропогенное влияние на земной климат, однако в отчетах также присутствуют природные факторы. Сравнение различных факторов, воздействующих на климат Земли, показывает, что *влияние человека на порядок больше* (примерно в 10 раз), *чем влияние солнечной активности.* Человек не только ухудшает климатическую обстановку (оседание пыли на полярных шапках и парниковые газы), но и улучшает её за счёт использования аэрозолей, которые способствуют образованию облаков, отражающих излучение Солнца. В последнем отчете природными факторами изменения климата пренебрегают, поскольку *антропогенный вклад значительно их превышает.*

Моделирование земного климата позволяет разделять природные и человеческие факторы и неплохо описывает наблюдаемый тренд. Важно учитывать, что дифференцированные географические области земного климата могут различно реагировать на природные и человеческие факторы. *Метод отпечатка пальца* – отдельное моделирование природных и человеческих факторов влияния на климат с учетом некоторых весов для подгонки к реальным наблюдениям. В координатах вес природных факторов/вес человеческого фактора наблюдается хорошее согласие тех моделей, у которых природный вес меняется в несколько раз, в отличие от веса человеческого фактора, имеющего определенное значение (рисунок 9.13).

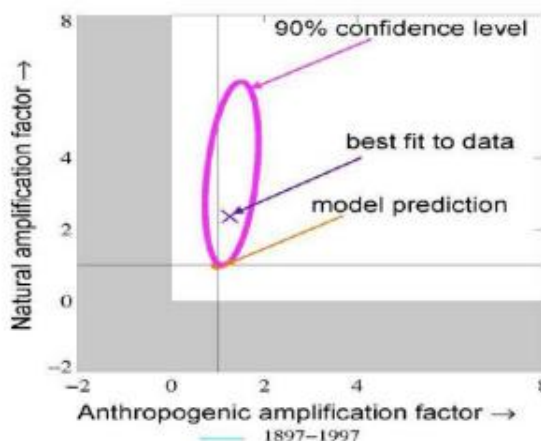


Рисунок 9.13 Метод отпечатков пальцев, при котором географические закономерности изменения температуры поверхности для различных нагрузок сопоставляются с наблюдаемыми временными рядами. Полученная величина природных и антропогенных воздействий.

Список литературы

1. Tuija Pulkkinen “Space weather: Terrestrial Perspective” \\\ Living Rev. Solar Phys., 4, (2007), 1
2. Joanna D. Haigh “The Sun and the Earth’s Climate” \\\ Living Rev. Solar Phys., 4, (2007), 2

Лекция №10. Эволюция Солнца

Эволюция Солнца: трек на диаграмме Герцшпрунга-Рассела

Любая звезда в процессе жизненного пути преобразуется в размерах, светимости, начиная с образования газового облака, которое постепенно сжимается и формирует тело звезды. После начала термоядерных реакций звезда живет продолжительное время, являясь стабильной – это время жизни характеризуется положением звезды на *главной последовательности* (ГП) на диаграмме Герцшпрунга-Рассела (ДГР). После звезда преобразуется в газовый гигант, переходя к конечной стадии своей эволюции, в случае Солнца – белый карлик.

Солнце в процессе жизненного цикла имеет разные размеры и светимости. Несмотря на относительную стабильность Солнца на ГП, даже в этот промежуток жизни звезда претерпевает изменения в светимости и радиусе. Солнцеподобные звезды, обладающие начальным содержанием тяжелых элементов и гелия, а также массой, схожими с солнечными, обладая разными возрастами, показывают прошлое и будущее Солнца. Набор таких солнцеподобных звезд называют «Солнцем во времени».

Эволюцию любой звезды определяют три временных параметра.

Время динамического изменения – определяется тем, как быстро вещество под действием гравитации может упасть на гравитирующий центр. Время переходных процессов между различными стадиями звезды.

$$t_{dyn} = \left(\frac{R^3}{GM} \right)^{1/2} \cong 30 \text{ min} \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^{3/2} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1/2}$$

Тепловое время (время Кельвина-Гельмгольца) – время остывания звезды, если реакции внутри нее прекратятся. Так как гравитационное взаимодействие и излучение звезды взаимосвязаны через теорему вириала, то это время описывает характерный масштаб сжатия с учетом сопротивления газа в виде давления. Показывает время существования до ГП.

$$t_{KH} = \frac{GM^2}{LR} \cong 3 \times 10^7 \text{ year} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^{-1} \left(\frac{L_s}{L_{\odot}} \right)^{-1}$$

Время ядерного горения (время ядерных реакций) – время, в течение которого звезда находится на стадии ГП.

$$t_{nuc} = \frac{Q_H q_c X_0 M}{L} \cong 10^{10} \text{ year} \frac{M}{M_{\odot}} \left(\frac{L_s}{L_{\odot}} \right)^{-1}$$

Сравнение данных трех временных масштабов показывает $t_{nuc} \gg t_{KH} \gg t_{dyn}$.

Рассмотрим характерные стадии эволюции Солнца (рисунок 10.1).

а) вещество в процессе падения формирует газовый шар, происходит гравитационное сжатие, половина энергии которого уходит на нагрев звезды, а половина испускается в виде электромагнитного излучения (ЭМИ). Данный процесс описывают явлением **отрицательной теплоемкости** – разогрев звезды и излучение одновременно, потому как излучение света в соответствии с теоремой вириала (связывает глобальные энергетические характеристики объекта) соответствует закону: сколько звезда излучает, столько же энергии она приобретает во внутренних процессах. Происходит сжатие до стадии главной последовательности, 2×10^7 лет;

б) стадия главной последовательности; в центре горит водород, происходят регулярные ядерные реакции, которые компенсируют уходящее ЭМИ звезды. Изменения светимости и размеров звезды незначительны. Химический состав постепенно меняется, количество тяжелых элементов в ядре возрастает 9×10^9 лет;

в) стадия красного гиганта: водород горит в сферическом слое, звезда расширяется, Солнце поглотит все объекты в радиусе 1,15 а.е. от её центра, 4×10^8 лет;

г) в центре горит гелий, 5×10^7 лет;

д) стадия белого карлика, поддерживаемый вырожденным газом, доминирует квантово-механическое давление электронов, которые не могут занимать объем меньший, чем длина волны де-Бройля, 10^9 лет.

В данной лекции подробно обсуждаются пункты а) и б).

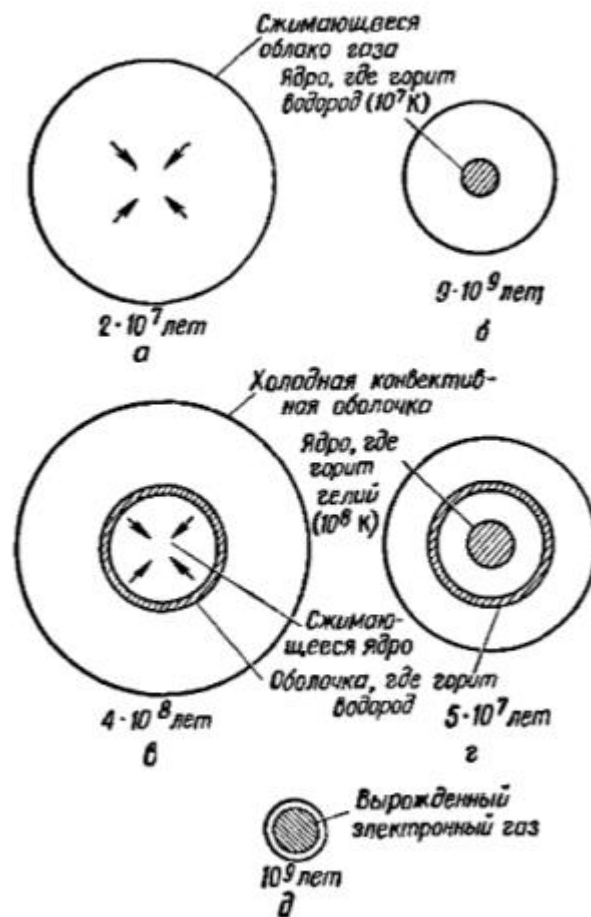


Рисунок 10.1 Эволюция Солнца

Эволюционный трек Солнца на ДГР (зависимость светимость-температура) можно описать следующим образом: в начале происходит сжатие газа, температура растёт, светимость падает. После почти при постоянной температуре продолжается сжатие звезды и снижение ее светимости (стадия Хаяши). Затем происходит резкий разворот звезды, увеличивается ее температура – Солнце на ГП. Затем загораются слоевые источники, происходит переход звезды к красным гигантам.

Рассмотрим подробнее процесс эволюции перед ГП (рисунок 10.3), его подразделяют на

- **стадию Хаяши** – сжатие газового облака и тела звезды, звезда является полностью конвективной по всему своему объему. При выполнении условия Шварцшильда (конвекционная неустойчивость) начинает формироваться лучистое ядро внутри звезды, что произошло приблизительно через 1,5 млн. лет после формирования Солнца. После лучистое ядро постепенно расширяется примерно до $0,5 R_{\odot}$, звезда приобретает наименьшую светимость за весь свой эволюционный путь.

- **стадию Хеньи** (при почти постоянном радиусе звезды происходит увеличение температуры звезды). Лучистое ядро остается примерно тем же по своему размеру, но возрастают температура и давление в звезде.

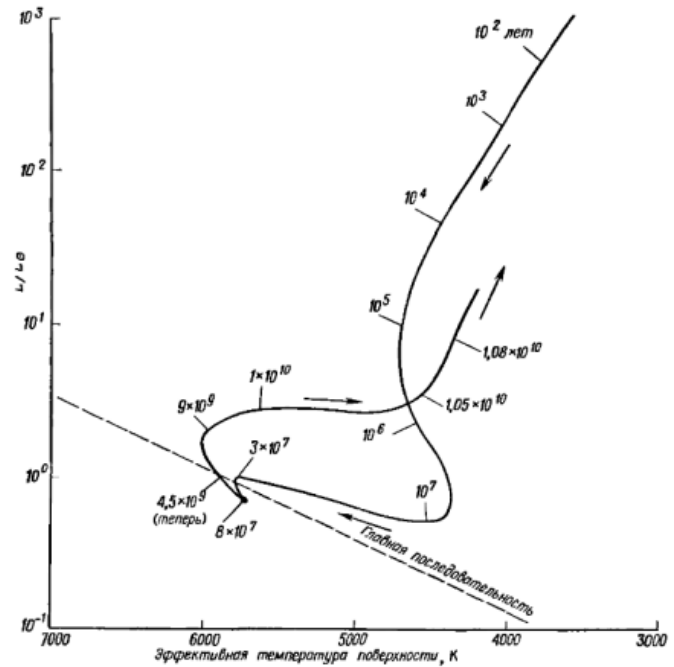


Рисунок 10.2 Эволюционный путь Солнца на диаграмме Герцшпрунга – Рессела

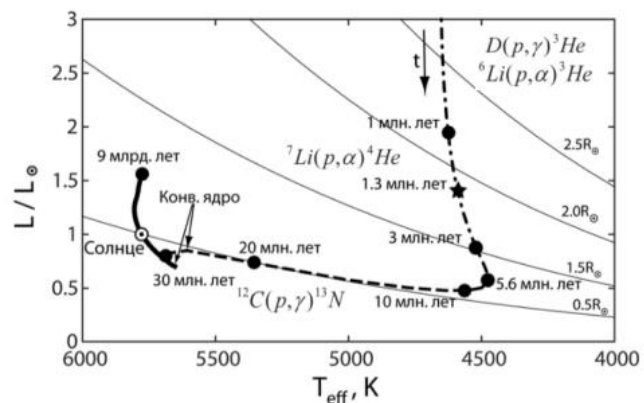


Рисунок 10.3 Эволюционный трек звезды с массой Солнца на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Штрихпунктирная линия - стадия Хаяши, штриховая - стадия Кеньи, жирная сплошная - стадия главной последовательности. Тонкие линии соответствуют постоянно-ным радиусом. Звёздочка обозначает момент образования лучистого ядра.

В процессе движения по данным двум трекам внутри звезды *начинают протекать ядерные реакции.*

- На времени порядка 10 – 30 тыс. лет в звезде сгорает весь дейтерий D ввиду конвективности звезды (перемешивание слоев).
- При температуре 1 млн. К и времени жизни около 750 тыс. лет начинает гореть изотоп ${}^6\text{Li}$, успевает полностью переработаться.
- На времени порядка 1 млн. лет начинает гореть ${}^7\text{Li}$, загорается тогда же, когда и начинает формироваться лучистое ядро в Солнце, из-за чего не весь литий из поверхностных оболочек переносится к недрам звезды или основаниям конвективной оболочки, где может быть переработан в гелий.

После на некоторое время ядерные реакции прекращаются, происходит переход к стадии Хенри, на которой поднимается температура в центре звезды и на пороге 20 млн. лет начинает гореть изотоп углерода ${}^{12}\text{C}$, преобразуясь в азот ${}^{13}\text{N}$. При горении изотопа углерода в ядре образуется еще одна конвективная область, тем самым делая ядро на некоторое время также конвективным. Такое горение не затрагивает внешних оболочек, отделенных от конвективного ядра лучистой зоной. При переходе на ГП звезда начинает сжигать водород в соответствии с PP-цепочками.

Эволюция перед главной последовательностью. Изменения параметров

Параметры звезды могут влиять на её эволюционный трек: начальное содержание гелия и тяжелых металлов, параметр упрощенной конвекции в приповерхностной оболочке звезды α – *длина свободного перемешивания*, показывает во сколько раз конвективный вихрь в приповерхностном слое звезды больше или меньше высоты однородной атмосферы (рисунок 10.4). Для наблюдаемых звезд данный параметр несильно отличается от 1, не обязательно постоянен. Эволюционные треки звёзд с массой Солнца и с разной эффективностью конвекции показывают, что чем меньше α , тем большие размеры приобретает

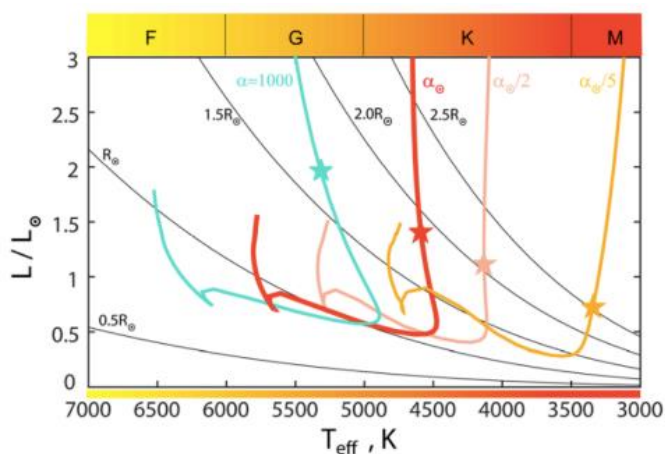


Рисунок 10.4 Эволюционные треки звёзд с массой Солнца и с разной эффективностью конвекции. Звёздочками обозначены моменты образования лучистого ядра. Верхняя шкала показывает спектральные классы звёзд.

звезда. Размер конвективной зоны наиболее чувствителен к изменению параметра α . Размером конвективной зоны моделируемая звезда подгоняется под наблюдаемую величину.

Для звезды, находящейся на стадии ГП, не имеет значения эволюционный путь до этой стадии. Значимыми остаются такие параметры как масса и параметр конвективного перемешивания. Вид трека перед ГП влияет на химический состав звезды.

Выделяют такую особенность как момент формирования *лучистого ядра* в звезде, который происходит при выполнении *условия Шварцшильда*: если произведение энерговыделения звезды на характерную непрозрачность в звезде достигает некоторой критической отметки на некотором радиус звезды, то на этом радиусе начинает формироваться конвективная неустойчивость и конвективная оболочка. На стадии Хаяши вся звезда конвективная, поэтому если произведение энерговыделения звезды на характерную непрозрачность в звезде опускается ниже некоторой критической отметки, то на этом радиусе конвективная неустойчивость пропадает и формируется лучистое ядро.

Чем больше энерговыделение в центре звезды, тем выше её яркость. Удовлетворение некоторому критическому произведению энерговыделения на непрозрачность ограничивает допустимые значения данных характеристик: **чем больше яркость, тем меньше должна быть непрозрачность для начала формирования лучистого ядра** (рисунок 10.5). Непрозрачность зависит от ионного состава вещества: чем больше ионов, тем больше линий поглощения и тем сложнее фотонам вылетать. Чем выше температура, тем выше степень ионизации вещества и тем прозрачнее вещество становится. Более яркое свечение звезды обуславливает большее энерговыделение и меньшую прозрачность, и, следовательно, более высокую температуру и плотность вещества.

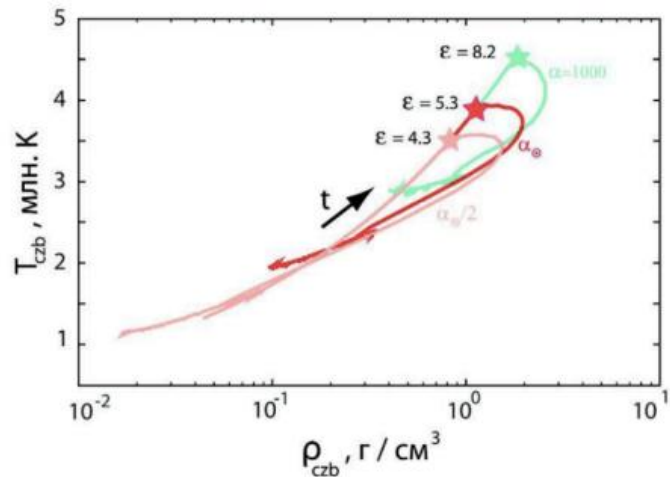


Рисунок 10.5 Изменение температуры и плотности на дне конвективной зоны с течением времени. Разными цветами показаны модели с разной эффективностью конвекции. Звёздочками указаны моменты образования лучистого ядра. Рядом указана мощность энерговыделения в центре звезды.

От равномерного сжатия полностью конвективной звезды происходит переход к различным процессам сжатия в конвективной и лучистой зоне (рисунок 10.6). На стадии

Хаяши происходит переход увеличения лучистого ядра примерно до $0,5 R_{\odot}$. После начинает эффективно повышаться плотность и температура в центре звезды, что обуславливает переход Солнца на стадию Хэньи, где при возрастании температур в центре начинают формироваться условия для зажигания ядерных реакций.

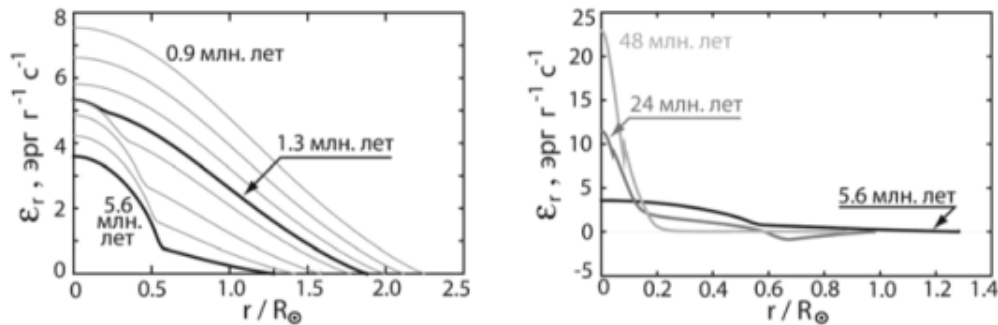


Рисунок 10.6 Распределение удельного энерговыделения по радиусу звезды в последовательные моменты времени на стадии Хаяши (левая панель) и стадии Хэньи (правая панель). Излом на кривых соответствует границе между лучистым ядром и конвективной зоной.

Содержание лития зависит от того, как меняется температура в основании конвективной зоны. Распределения изменения температуры внутри звезды (центр и основание конвективной зоны) и содержания лития для разных параметров перемешивания представлены на рисунке 10.7. **Процесс горения лития** можно описать так: начало горения наступает немного раньше, чем формирование лучистого ядра. Как только ядро формируется, литий может с конвекцией из внешних слоев звезды может переноситься только до границы конвективной зоны. В случае подходящей температуры, на границе КЗ начнется горение лития. Как только основание КЗ удалится от центра настолько, что температура значительно опустится, литий перестанет гореть, поэтому именно то количество лития, что осталось, будет видно в спектре звезды. Относительное содержание лития несет информацию о том, какая была физика при формировании лучистого ядра на стадии Хаяши.

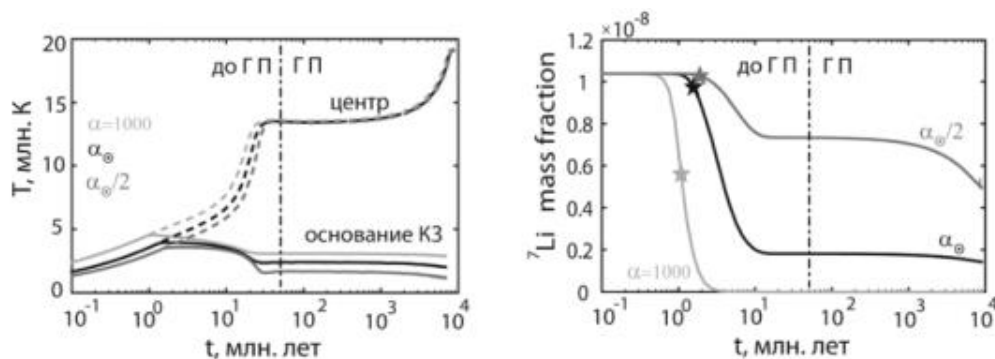


Рисунок 10.7 Изменение температуры (левая панель) и содержания лития в фотосфере (правая панель) в моделях с разной эффективностью конвекции. Звёздочками отмечен момент образования лучистого ядра. Вертикальная штрихпунктирная линия разделяет стадию до главной последовательности и стадию главной последовательности.

Температура в основании КЗ меняется плавно, поэтому **возможно отследить момент остановки горения лития**. Содержание лития значительно зависит от параметра конвекции. Для солнечного конвективного параметра содержание лития в процессе эволюции ГП почти не меняется, но если α уменьшить, то содержание лития резко упадет, а если его значительно увеличить, то лития не будет на стадии ГП, он весь сгорит на стадии Хаяши.

Если нанести на один график изменение таких параметров как светимость, температура и радиус Солнца со временем (на оси отмечены главные моменты эволюции звезды), то получится *рисунок 10.8*. Видно, что на ранних стадиях эволюции (первые сотни млн. лет) светимость сильно меняется, радиус падает, а температура возрастает, но не так быстро, как предыдущие два параметра.

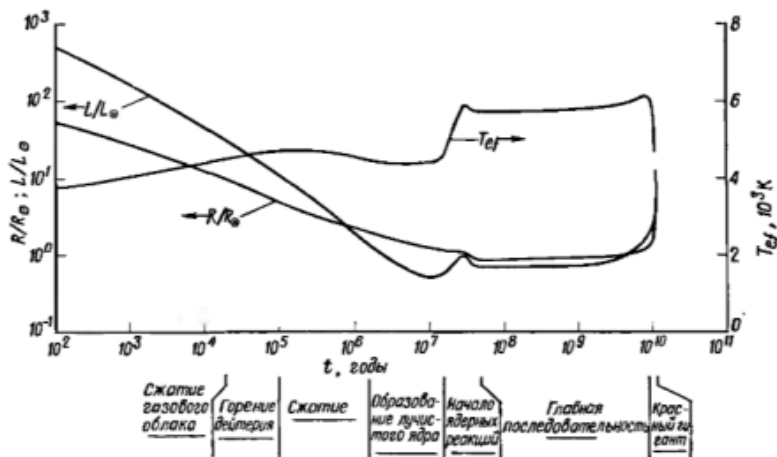


Рисунок 10.8 Эволюция наблюдаемых свойств Солнца.

Отследим, **на каком объеме звезда является конвективной**. На стадии Хаяши звезда полностью конвективная, затем формируется лучистое ядро, которое постепенно расширяется. Чем ближе к поверхности звезды, тем меньше плотность вещества, поэтому в верхней конвективной оболочке заключена малая масса звезды. Затем при некотором разогреве в возрасте $4 - 5 \times 10^7$ лет в Солнце начинает гореть ^{12}C и перерабатываться в азот, в этот момент образуется конвективное ядро, после чего оно уменьшается и происходит переход звезды на ГП.

Подробное рассмотрение стадии ГП (10^9 лет) показывает, что светимость слабо растет в сравнении с эволюцией до ГП, сейчас она примерно на 30% выше той, что была в момент перехода Солнца на стадию ГП. Незначительно меняется температура, плотность, радиус.

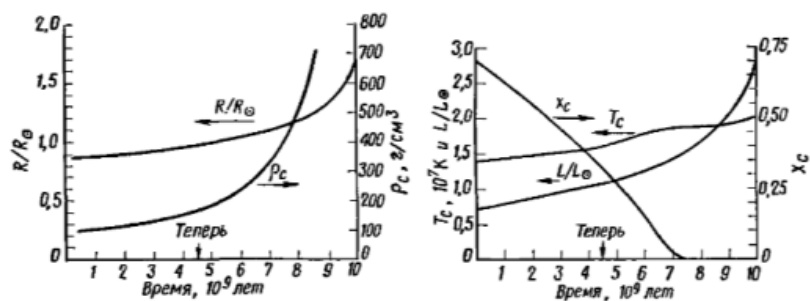


Рисунок 10.9 Слева: изменения объема и центральной плотности Солнца во время пребывания на главной последовательности. Справа: изменения светимости Солнца, его центральной температуры и содержания водорода в центральной области во время пребывания на главной последовательности.

Эволюция на главной последовательности. Параметры Солнца

Современная светимость Солнца измеряется с помощью болометров на космических аппаратах. Возникают такие сложности как:

- калибровка болометров, в том числе между экспериментами
- изменение светимости с солнечным циклом и долгосрочное

Космические измерения проводят на аппаратах: HF on NIMBUS 7 (с 1978), ACRIM I on SMM, ACRIM II on UARS, VIRGO on SOHO, ACRIM III on ACRIMSat, TIM on SORCE (с 2003).

Современное значение солнечной постоянной по данным Bahcall, Pinsonneault, Wasserburg (1995) соответствует полной энергетике одной крупной вспышки:

$$L = 3.844 (1 \pm 0.004) \cdot 10^{33} \text{ эрг/сек}$$

Возраст Солнца оценивается с помощью радионуклидного анализа самых старых метеоритов по содержанию изотопов урана, свинца:

$$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} + ^{235}\text{U}/^{238}\text{U} + \text{initial Pb} \rightarrow \text{возраст } 4.57 \pm 0.02 \text{ млрд. лет}$$

Эволюция до Главной последовательности: еще 0.03 млрд. лет

Итого: 4.6 млрд. лет

Важно понимать, с чем связано изменение температуры и светимости со временем. Солнечный спектр в наши дни хорошо аппроксимируется излучением абсолютно черного тела (АЧТ) при температуре 5770 К (рисунки 10.10). Более значимый вклад в вид солнечного спектра оказывает именно

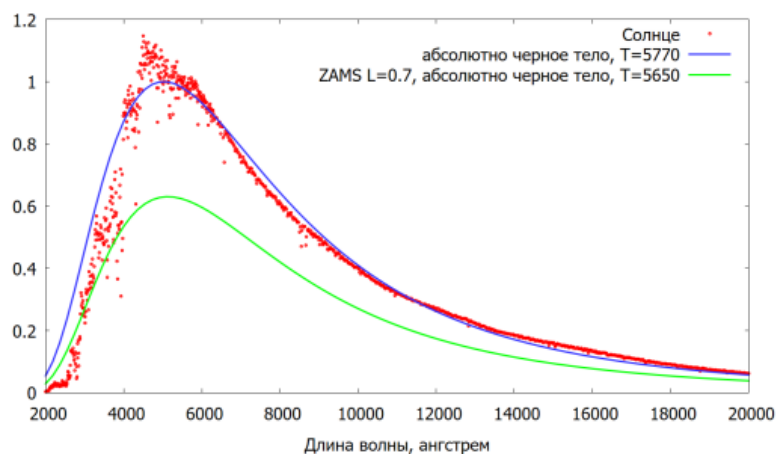


Рисунок 10.10 Спектр солнечного излучения

изменение светимости со временем, а не температура, поскольку ее значение после попадания звезды на ГП изменилось всего на 120 К, что привело к смещению графика к более красным длинам волн.

Почему эволюционируют звезды:

- причина эволюции — потеря энергии с поверхности звезды в окружающее пространство; чем больше светимость звезды, тем быстрее она эволюционирует
- при уменьшении общей тепловой энергии звезды, находящейся в равновесии, она сжимается и нагревается (парадокс отрицательной теплоемкости; является следствием теоремы вириала) – до стадии ГП
- на стадии Главной Последовательности источники энергии ядерных превращений компенсируют потери энергии с поверхности звезды: квазистационарное состояние, эволюция идет медленно

Почему растет светимость:

1. Водород превращается в гелий → увеличивается молекулярный вес m (частицы увеличиваются)
2. Увеличение m , а так как давление обратно пропорционально молекулярному весу → уменьшение давления (т.к. число частиц уменьшается – 4 протона в 1 гелий)
3. Уменьшение давления → сжатие звезды в центральных областях (давление внешних слоев газа)
4. Рост давления → рост температуры T и плотности ρ для поддержания гидростатического равновесия
5. Рост T и ρ → увеличение скорости ядерных реакций (несмотря на уменьшение количества топлива)
6. Увеличение скорости ядерных реакций → увеличение общего энерговыделения и светимости

Важно: ядерные реакции не прекращают эволюцию звезды, а тормозят

Повышение светимости важно с практической точки зрения. Изменение светимости Солнца не столь значительно, чтобы повлиять на климат и бытовую жизнь человека, но с этим процессом связана проблема геологии, биологии и палеонтологии. Рассмотрим *баланс теплообмена* некоторого тела, вращающегося вокруг звезды. Площадью поверхности диска происходит перехват некоторой части излучения и отражение оставшейся части. Баланс теплообмена для планеты:

$$\frac{1}{4} S \cdot (1 - A) = \varepsilon \sigma T^4$$

здесь S — солнечная постоянная, A — альbedo, ε — излучательная способность в ИК, T — температура поверхности Земли. Подсчет равновесной температуры Земли дает

$$A = 0.29, \quad \varepsilon = 0.9, \quad \rightarrow T \sim 262 \text{ K}$$

Это значение значительно меньше измеренных $+14^\circ\text{C} = 287 \text{ K}$. В настоящий момент разница объясняется наличием парникового эффекта. Поток энергии из недр Земли составляет $2 * 10^{-5}$ от солнечного (земная кора хороший изолятор тепла), что значительно меньше вклада от парникового эффекта, поэтому данным фактором пренебрегают.

Парадокс тусклого молодого Солнца. Нестандартные модели Солнца

Оценка равновесной температуры в прошлом Земли и учёт парникового эффекта показывают (рисунок 10.11), что ранее температура Земли была ниже, причем в возрасте 2 млрд лет температура поверхности должна была быть ниже 0°C , значит вода должна была находиться в замерзшем состоянии, что не подтверждается геологическими данными. В рисунке есть неточности, которые важно учитывать: если вся вода была льдом, то океан должен был отражать больше излучения, тогда предположение о том, что альbedo постоянно – не верно, и тогда температура была бы еще ниже, чем описывается в работе.

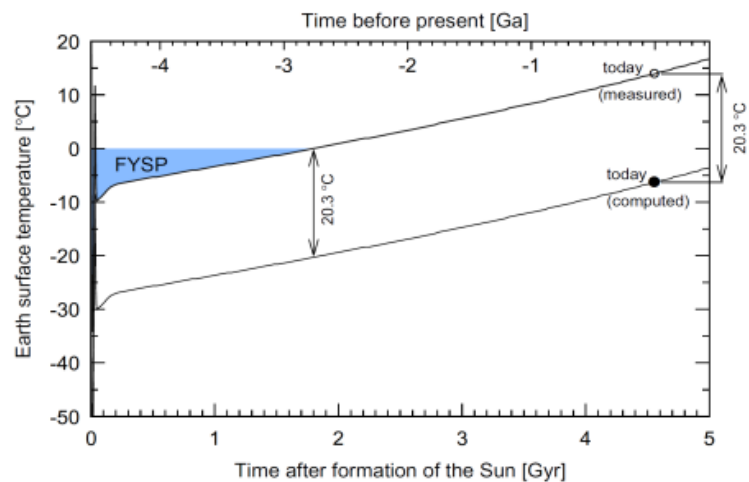


Рисунок 10.11 Температура Земли во времени. Из работы Heller et al. PalZ (2021) 95:563–575

Парадокс тусклого молодого Солнца (Faint Young Sun Paradox) характерен и для других планет: для Марса он наиболее ярко выражен.

Планеты	Солнечная постоянная S_o ($\text{Вт}/\text{м}^2$)	Планетарное альbedo A (%)	Эффективная температура T_e (K)	Орбитальная температура T_R ($^\circ\text{C}$)	Ср. темп. поверхн. T_s ($^\circ\text{C}$)
Марс	589	15	210	- 48	- 53
Земля	1367	30	255 K = - 18 $^\circ\text{C}$	278 K = + 5 $^\circ\text{C}$	+ 15
Венера	2613	75	230	+ 58	+ 460

Если A (альбедо), ϵ (эффективность энерговыделения), **парниковый эффект** постоянны в течение жизни Земли, а S меняется в соответствии со светимостью, то около 2 млрд. лет назад океаны должны были замерзнуть, но 3.2 млрд. лет назад (и даже раньше!) вода была в жидком состоянии.

Возможные пути решения парадокса

1. Земля: A, ϵ

- a. – излучательная способность Земли раньше была меньше, парниковый эффект (нужно учитывать все изменения на Земле во времени)

2. Солнечная постоянная: S

- a. – эволюция шла по-другому;
- b. – значительная потеря массы 7% (+ Земля была ближе к Солнцу)

3. Что-то еще

- a. – другие источники тепла для ранней Земли;
- b. – гравитационная постоянная менялась со временем (?).

Рассмотрим возможность изменения модели Солнца на нестандартную, чтобы попытаться учесть слабое изменение солнечной постоянной во времени, когда Солнце находится на ГП. Все модели массой $1M_{\odot}$, $R = 1R_{\odot}$, $L = 1L_{\odot}$, возраст 4.6 млрд. лет. Для примера рассмотрим две нефизичные модели, которые покажут характерные процессы в звездной эволюции.

- **Полное перемешивание:** равномерное распределение гелия по звезде, выравнивание молекулярного веса
- **Уменьшенное сечение реакции $p+p$:** изменение ключевой величины в ядерных реакциях

Проверка моделей проста: находится центральная температура через поток нейтрино от реакции распада бора-8. Ни одна из моделей не соответствует реальному Солнцу: изменение светимости в этих примерах совпадает с солнечным с погрешностью 20%, этого достаточно, чтобы попробовать скорректировать модели с помощью изменения альбедо или атмосферы Земли и разрешить парадокс тусклого Солнца.

Полное перемешивание: происходит распределение областей энерговыделения, ядерные реакции идут по большему объему, из-за чего падает температура в центре звезды до $T_c = 14.3$ млн.К. При такой температуре уменьшается поток борных нейтрино $0.75 \cdot 10^6$ 1/(см² · сек), этого значения не хватает для согласования с наблюдаемыми данными.

Сечение $pp/10$ (уменьшенная эффективность pp -цепочки): показывает уменьшенное выделение энергии, что приводит к более сильному сжатию для компенсации оттока за счёт излучения. Сильное сжатие приведет к увеличению температуры в центре до $T_c = 20.0$ млн. К. В горячей плазме будет много реакций с бором, что приведет к увеличению потока борных нейтрино $93 \cdot 10^6$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{сек})$, это значение превышает наблюдаемое.

Наблюдаемый поток борных нейтрино: $(5.25 \pm 0.16) \cdot 10^6$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{сек})$,

Различные модели не согласуются как с наблюдением химического состава, так и данными гелиосейсмологии, например, о положении основания конвективной зоны. На рисунке 10.12 приведены некоторые характеристики моделей в распределении на данный момент (4,6 млрд лет). Наиболее сильно выбивается из общей картины модель уменьшенной интенсивности ядерных реакций. Модель с повышенным сечением ядерной реакции имеет наиболее гладкую функцию энерговыделения от радиуса. По содержанию водорода сильнее всего отличается модель полного перемешивания, потому что она перераспределяет всё вещество из лучистого ядра, где происходят реакции.

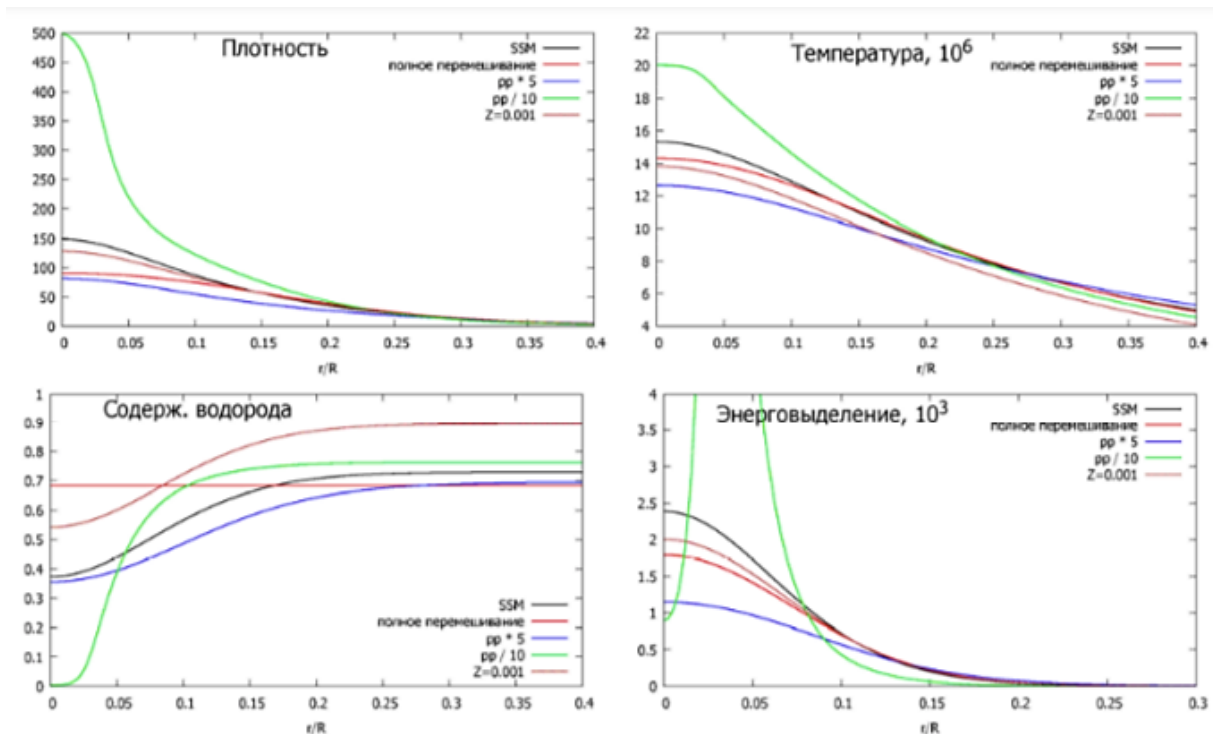


Рисунок 10.12 Строение моделей Солнца. Слева сверху: плотность в г/см; справа сверху: температура в млн. К; слева внизу: содержание (массовая доля) водорода; справа внизу: выделение энергии в единицу времени в единице объема, 10^3 эрг/сек*см³.

Одна из моделей эволюции Солнца включает в себя дополнительное истечение вещества с поверхности звезды на ранних стадиях ГП. На рисунке 10.13 представлены

модели для разных начальных масс Солнца на момент перехода на ГП. Парадокс слабого Солнца относительно Земли решается с помощью данной модели. Звезды действительно могут иметь повышенный отток массы на ранней стадии ГП из-за повышенной активности (звездного ветра). Однако считается, что $0.07 M_{\odot}$ – довольно большая масса для оттока. Для Марса же данная модель работает лишь в случае, если отток массы будет большим, чем для объяснения его на Земле. Таких сильных звездных ветров не наблюдается, поэтому данная модель не принимается верной.

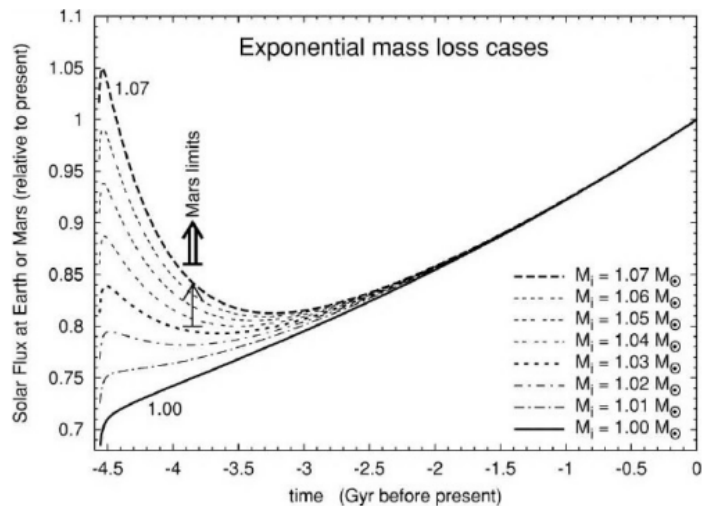


Рисунок 10.13 Солнечный поток во времени относительно настоящего времени для Солнца, которое в прошлом сильно теряло массу. Различные кривые показывают расчеты для различных начальных масс и соответствующих темпов потери массы, которые позволяют получить текущие значения. Скорость потери массы со временем уменьшается экспоненциально; увеличение потока в более поздние периоды времени связано с увеличением яркости Солнца при почти постоянной массе. Двойная стрелка указывает на нижний предел присутствия жидкой воды на раннем Марсе, тонкая стрелка - на (нереалистичный) экстремальный нижний предел.

Работы последних лет объясняют парадокс тусклого Солнца следующим образом:

- *Gurumat et al. 2022* соотношение между возрастом и темпом потери массы для других звезд; оценка потери массы для Солнца $6.1 \pm 0.6\%$
- *Gupta 2022* переменность мировых констант c , G , h , kB
- *Heller 2020* нагрев из-за приливных волн от близкой Луны
- *Charnay 2013* 3D модели климата: можно обойтись меньшим количеством CO_2
- *Думин 2015* расширение орбит планет со временем из-за локального эффекта Хаббла (темная энергия)

Активность Солнца как источник энергии. Атмосферное поглощение

Дополнительным каналом энергии в земном климате может быть **активность на Солнце**. Наша звезда в процессе своей эволюции теряет орбитальный момент. Для различных звезд солнечного типа характерны две отдельные моды активности: обычная (связанная с цикличностью на звездах, период вращения которых порядка 20 дней) и спорадическая (у звезд с быстрым вращением порядка 5 дней, являющихся более

молодыми). Повышенная активность может воздействовать на планету через МП и галактические КЛ: чем выше активность, тем меньше ГКЛ долетает до планеты, тем меньше центров конденсации и облаков соответственно – уменьшается альbedo.

Решение проблемы слабого молодого Солнца нужно искать в *климатологии*, а именно рассматривать иной количественный и качественный состав атмосферы на ранних этапах жизни планет. Наиболее сильным парниковым эффектом обладают линии углекислого газа и водяного пара. Они поглощают как прямой солнечный свет, так и отраженный, понижая равновесную температуру. Молекулы метана, окислов азота перекрывают полосы поглощения от углекислого газа и водяного пара, в совокупности все эти молекулы формируют «барьер» относительно земного спектра излучения.

Заключение

- у всех звезд (включая Солнце) растет светимость во время пребывания на Главной последовательности из-за увеличения молекулярного веса вещества в ядре;
- светимость Солнца в начале стадии Главной последовательности была 70% от современной;
- проблема “тусклого молодого Солнца” пока не решена!
- Земля гораздо сложнее Солнца (состав атмосферы, альbedo, модели климата и др.)

Список литературы

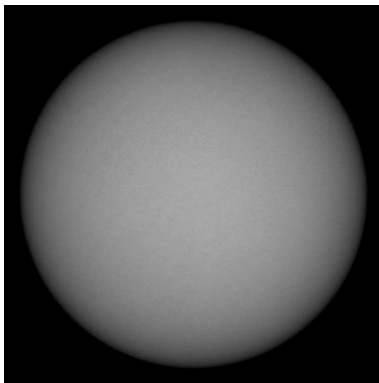
1. Эдвард Гибсон “Спокойное Солнце” (1977)
2. Michael Stix “The Sun. An Introduction” (2002)
3. В.А. Батулин, А.В. Орешина, С.В. Аюков, А.Б. Горшков “Эволюция Солнца и физические процессы на ранней стадии до главной последовательности” // Жизнь и Вселенная, (2017), 33
4. С.В. Аюков, В.А. Батулин, А.Б. Горшков, А.В. Орешина “Светимость Солнца на главной последовательности. стандартная модель и возможные вариации” // Жизнь и Вселенная, (2017), 53

Лекция №11. Солнечные приборы

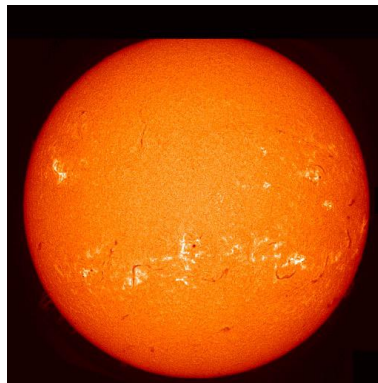
В лекции обсуждаются особенности солнечных приборов наблюдения, их отличия от приборов для наблюдения объектов космоса, а также солнечные особенности, доступные для изучения с помощью таких приборов.

Наблюдения Солнца из космоса и с Земли

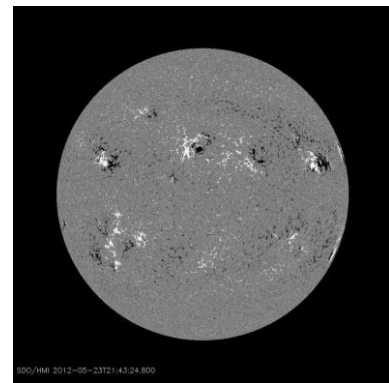
Наблюдения Солнца возможны либо с *поверхности Земли* (более дешевый способ), либо из *космоса* (больше ЭМ диапазон для наблюдений). Основным способом наблюдения космических объектов с Земли являются оптические измерения. Таким способом, в частности, удаётся наблюдать такие особенности как:



Видимая поверхность
Солнца (*телескоп*)



Хромосфера Солнца
(*спектрогелиограф*)



Магнитное поле Солнца
(*магнитометр*)

Телескопы являлись первыми приборами, которые использовались для наблюдений Солнца. Применение фильтров (спектрогелиограф) позволяет изучать Солнце в различных диапазонах ЭМ спектра, а использование магнитометра позволяет наблюдать МП звезды.

Ввиду повышенной яркости Солнца, казалось бы, нет необходимости собирать большее количество света и размер прибора становится не так важен. Однако и в солнечной физике есть необходимость в том, чтобы собрать как можно больше света – так можно получить снимки с большей частотой во времени для разложения света по спектру с высоким разрешением.

Часто солнечные телескопы ассоциируют с башенными конструкциями, которые включают в себя *целостат* – система зеркал, с помощью которой можно компенсировать суточное вращение Земли. Целостаты обычно включают в себя два зеркала: одно снабжено часовым механизмом и его ось вращения направлена вдоль оси мира (оси вращения Земли), второе является неподвижным и перенаправляет

отраженный свет в прибор. Внизу башенной конструкции устанавливается главное зеркало телескопа.

Современные солнечные телескопы являются *вакуумными*. В отличие от звездных телескопов интенсивность приходящего света высокая, содержащийся внутри трубы телескопа воздух нагревается, что вызывает конвективные движения и изменение коэффициента преломления воздуха, что приводит к искажению изображений. Во избежание ошибок наблюдений, а также для продления времени службы телескопа в местах концентрации солнечного света применяют технологию вакуумных камер.

Актуальным прибором с точки зрения применения является *гелиостат*, совмещающий в себе два зеркала целостата, что усложняет траекторию его движения. В случае целостата достаточно применения часового механизма, в случае гелиостата вращение происходит в двух осях, поэтому управление таким прибором реализуется с помощью компьютера. На солнечных телескопах используются и линзовые объективы, что позволяет продлить вакуумную систему до элементов целостата.

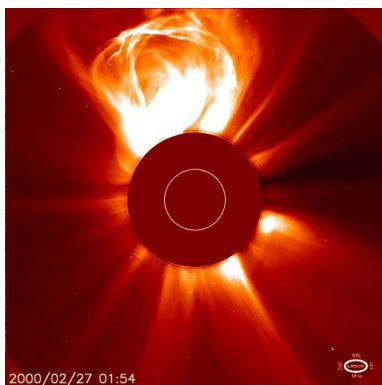
В настоящее время *наземные телескопы получают снимки более качественные, чем существующие космические аппараты* (в видимом диапазоне наблюдений).

Существуют большие наземные телескопы, на данный момент работающим является 4-метровый американский DKIST (Daniel K. Inouye Solar Telescope) на Гавайях с двумя осями вращения. Его конструкция схожа со звездными телескопами с азимутальной монтировкой. Современные солнечные телескопы оснащены системами активной и адаптивной оптики для нивелирования эффектов атмосферы. В настоящий момент строится

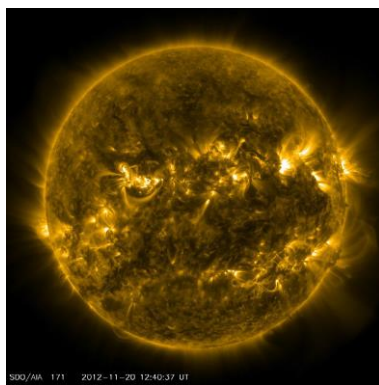
- Европейский солнечный телескоп (EST) – 4-метровое зеркало, месторасположение Канарские острова.
- Коронограф с 3-метровым зеркалом, Россия, Бурятия

Корону Солнца трудно наблюдать с Земли из-за рассеянного свечения неба, превышающего её по яркости. Корональное излучение – свет Солнца, переотраженный на электронах (томсоновское рассеяние) или пыли. Существуют линии спектра, в которых корона излучает, их можно наблюдать с Земли.

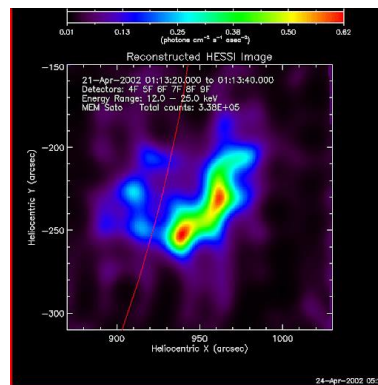
Ряд наблюдений, формируемый с Земли, дополняется *наблюдениями из космоса*. В основном это изображения Солнца в коротковолновых диапазонах. За счет отсутствия атмосферы и засветки удобно наблюдать верхнюю и нижнюю корону Солнца. Сверхгорячая плазма видна в рентгеновских диапазонах (см. лекцию №6 «Солнечные вспышки»)



Верхняя корона
(коронограф)



Нижняя корона (УФ
телескоп)



Сверхгорячая плазма
(рентгеновский телескоп)

В настоящее время в космосе летает несколько десятков спутников с приборами, изучающими Солнце. Все космические аппараты можно разделить на:

- Выполняющие текущую миссию
- Выполнившие запланированную миссию и продолжающие исследования
- Находящиеся на стадии производства
- Запланированные для запуска (производство не началось)

Основными КА являются: SDO (УФ-обсерватория), SOHO (основной коронограф), STEREO-A, IRIS (малое поле зрения). Спутники, получающие информацию о солнечной плазме: Solar Probe, ACE, WIND.

Телескоп, спектрогелиограф, магнитограф. Эффект Зеемана

Наблюдения Солнца с Земли возможны с помощью *телескопа* – это простейший прибор, строящий действительное или мнимое изображения. Первые наблюдения Солнца в истории – Галилео Галилей (телескоп, 1609 год), Кристоф Шейнер (гелиоскоп, 1611 год).

Прорывом в изучении Солнца стало изучение отдельных диапазонов ЭМИ, приходящего от звезды с помощью *спектрогелиографа*. Изобретён в 1889 году Джорджем Хейлом. Прибор позволяет фотографировать хромосферу Солнца в отсутствие затмений. В 1892 году впервые с помощью этого прибора получил фотографии протуберанцев и кальциевых флоккулов (эмиссионные структуры в хромосфере). Выполнил первые эксперименты, связанные с обнаружением общего магнитного поля Солнца. Это было первым открытием *внеземного магнитного поля*.

Организаторская деятельность Джорджа Хейла: основатель и первый директор обсерватории Маунт Вилсон (США). Инициатор создания и один из трёх

первых соруководителей Калифорнийского технологического института (Caltech). Основатель и первый редактор журнала *Astrophysical Journal*.

Прибор получает монохроматическое изображение участка Солнца, попадающего в щель. Снимок полного Солнца получается в режиме сканирования (см. рисунок 11.1).

Можно построить спектрогелиометр и без щели. При этом в спектр будет раскладываться всё Солнце и будет наблюдаться переналожение участков – диски Солнца (рисунок 11.2). Чтобы его снизить, иногда размер Солнца сжимают вдоль оси спектра.

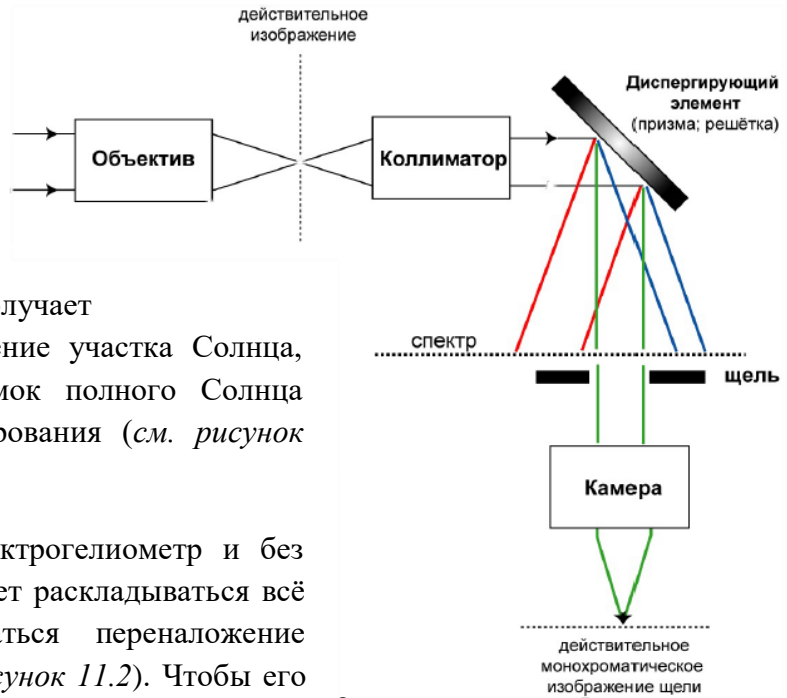


Рисунок 11.1 Схема спектрогелиографа

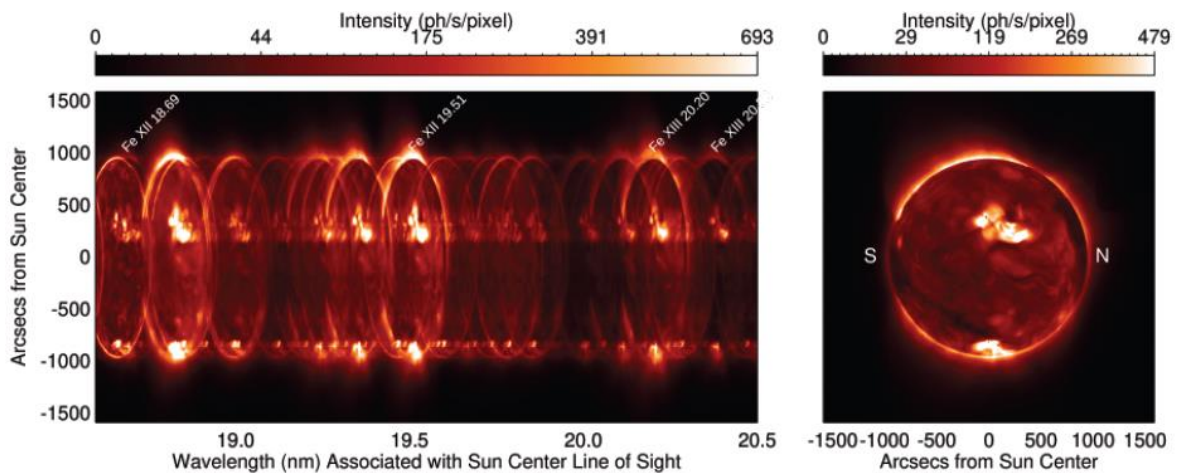


Рисунок 11.2 Бесщелевой спектрограф: получаемое изображение и его преобразование

Вслед за спектрогелиографом был построен *магнитометр* – прибор для измерения магнитного поля Солнца, принцип работы которого основан на классическом эффекте Зеемана. Спектральная линия в магнитном поле разделяется на несколько поляризованных компонент, число и поляризация которых зависит от направления магнитного поля:

- *Поперечный эффект:* линия расщепляется на 3 компоненты, из которых одна является несмещённой (π - компонента), а две симметрично смещены и имеют линейную поляризацию (σ - компоненты).
- *Продольный эффект:* линия расщепляется на 2 компоненты, симметрично расположенных относительно положения исходной линии (σ - компоненты). Обе компоненты имеют круговую поляризацию.

Общие принципы:

- Сумма поляризаций всегда равна нулю.
- Сумма излучения не меняется.

Концепция простого эффекта Зеемана может быть объяснена на основе классических представлений о строении атома. Электрон в составе атома имеет магнитный момент ввиду заряженности частицы и её движения по некоторой круговой орбите. Электрон прецессирует вокруг направления магнитного поля с *ларморовской частотой*

$$\omega_L = \frac{eB}{2m_e c}$$

Не стоит путать с гирочастотой вращения свободных электронов в магнитном поле

$$\omega_B = \frac{eB}{m_e c} = 2\omega_L$$

Ларморовская частота (энергия) добавляется или вычитается из уровня энергии электрона, что приводит к изменению длины волны при переходе на другой уровень

$$\Delta\lambda = \frac{2\pi c}{\omega_L^2} \Delta\omega_L = \frac{e}{4\pi m_e c^2} \lambda^2 B \approx 4.7 \times 10^{-13} \lambda^2 B^*$$

* численное значение приведено для λ в Ангстремах, и B , измеряемого в Гауссах.

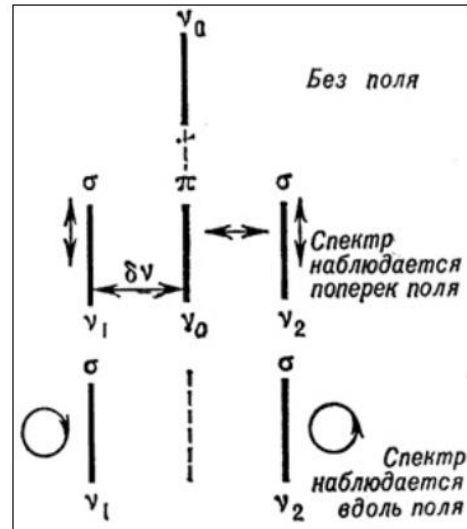


Рисунок 11.3 Эффект Зеемана. Продольный эффект более эффективный в наблюдениях Солнца.

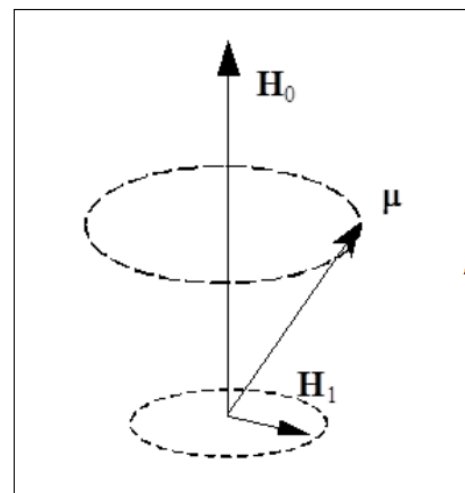


Рисунок 11.4 Прецессия магнитного момента

Классическое описание не соответствует действительности, поскольку представляет собой значительное упрощение. Эффект Зеемана объясняется с точки зрения квантовой механики: линия излучения расщепляется на большее число компонент. Электрон находится на некотором энергетическом уровне, под действием МП он расщепляется на подуровни. Переходы между подуровнями обуславливают излучение с разными частотами.

Электрон обладает магнитным моментом

$$\mu = \mu_B g, \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e c} \text{ — магнетон Бора}$$

здесь g – фактор Ланде, вычисляемый с помощью L — значения орбитального момента атома, S — значения спинового момента атома, J — значения полного момента

$$g = 1 + \frac{J(J + 1) - L(L + 1) + S(S + 1)}{2J(J + 1)}$$

В магнитном поле магнитный момент приводит к приросту энергии:

$$\Delta E = \mu B = \mu_B g B m, \quad m \text{ — квантовое число}$$

Изменение в длине волны в отличие от классического эффекта Зеемана будет заключаться в наличии дополнительных множителей m – квантового числа и g – фактора Ланде:

$$\Delta \lambda = \frac{2\pi\hbar}{E^2} \Delta E = \frac{2\pi\hbar\lambda^2}{4\pi^2\hbar^2} \frac{e\hbar}{2m_e c} B g m = \frac{e}{4\pi m_e c} m g \lambda^2 B$$

В сильных МП квантовый эффект Зеемана переходит в классический. Интерпретация солнечных наблюдений в первом приближении производится в рамках классического эффекта Зеемана ($\Delta \lambda \approx 4.7 \times 10^{-13} \lambda^2 B$)

Для короны Солнца характерные длины волн, соответствующие температуре короны, составляют около 200 Å (крайний УФ).

Для фотосферы характерные длины волн, соответствующие температуре фотосферы, составляют около 5000 Å (оптика). **Таким образом**

Для фотосферы

$$\Delta \lambda_B \approx 10^{-5} \frac{\text{Å}}{\text{Гс}}$$

Для короны

$$\Delta \lambda_B \approx 10^{-8} \frac{\text{Å}}{\text{Гс}}$$

Так как поля на Солнце составляют 1 – 1000 Гс, то для фотосферы расщепление линий лежит в диапазоне $10^{-2} - 10^{-5} \text{ \AA}$. Для короны Солнца расщепление в 1000 раз меньше.

Помимо расщепления у линии есть собственная ширина, на которую более всего влияет *доплеровское расширение линий* (так как атомам свойственно хаотическое движение, некоторые летят на наблюдателя, другие – от него, из-за чего ввиду доплеровского смещения частота принимаемого излучения может быть выше или ниже исходной):

$$\Delta\lambda_D \approx \lambda \frac{v_T}{c} = \lambda \sqrt{\frac{k_B T}{m}}$$

Для фотосферы (водород): $m = m_p, T \approx 6000 \text{ K}$. Отсюда $\Delta\lambda_D \approx 0.15 \text{ \AA}$.

(железо): $m = 56 m_p, T \approx 6000 \text{ K}$. Отсюда $\Delta\lambda_D \approx 0.02 \text{ \AA}$.

Из формулы $\Delta\lambda \approx 4.7 \times 10^{-13} \lambda^2 B$ видно, что для наблюдения эффекта Зеемана удобнее выбирать большие длины волн. Таким образом, измерения магнитного поля проводятся *в фотосфере* (на поверхности) *в линиях тяжёлых элементов*, имеющих минимальное доплеровское расширение с большим значением фактора Ланде. Выбор таких линий – достаточно самостоятельная научная проблема.

Примеры линий, выбранных для магнитографов

- HMI на космическом аппарате SDO: 6173 Å (Fe I)
- MDI на космическом аппарате SOHO: 6768 Å (Ni I)
- SOT на космическом аппарате Hinode: 6302 Å (Fe I)

Магнитограф Бэбкока. Глобальное магнитное поле

Даже для тяжёлых элементов (железа и никеля) расщепление линий в полях 1 – 10 Гс составляет примерно 0.1 – 1 % от теплового уширения линии. Выделение столь незначительного сдвига (а по сути не сдвига, а изменения полуширины линии) является сложной технической проблемой, которая впервые была решена отцом и сыном: **Хорес Уэлкам Бэбкок** (сын; традиционно считается изобретателем прибора), **Хэролд Дилос Бэбкок** (отец). Был изобретен *магнитограф Бэбкока*.

$$\Delta\lambda_B \approx 10^{-5} \frac{\text{Å}}{\text{Гс}}, \quad \Delta\lambda_D \approx 0.02 \text{ \AA}$$

Принцип магнитографа основан на двойном лучепреломлении: разделение света в некоторых средах (кристаллах) на две составляющих, движущихся с разной скоростью: обыкновенный луч, преломляющийся по обычному закону, и необыкновенный луч, движущийся с отличной от него скоростью. Эффект связан с *зависимостью скорости распространения света в кристалле от поляризации света*. Оптическая ось кристалла — направление в оптически анизотропном кристалле, по которому луч света распространяется, не испытывая двойного лучепреломления.

Пластинка $\lambda/4$: Кристалл, в котором обыкновенный и необыкновенный лучи движутся в одном направлении, но с разной скоростью. При этом в среде в этом направлении распространяется один луч, поляризация которого меняется по мере распространения. Если подобрать толщину кристалла таким образом, чтобы отставание одного луча на выходе составляло четверть длины волны, то круговая поляризация превращается в линейную.

Эффект Керра: Изменение значения показателя преломления оптического материала пропорционально квадрату напряжённости приложенного электрического поля. Позволяет при подаче напряжения на кристалл превращать его в пластинку $\lambda/4$.

Прибор представляет собой модификацию спектрометра Хейла. Главные отличия:

- На входе прибора ставится электрооптическая пластина для преобразования круговой поляризации в линейную.
- После построения спектральной линии, ещё излучение пропускается через две щели, то есть отдельно меряется сигнал в правом и левом крыле линии.
- Сигнал в крыльях пропускается через поляризатор, который отсекает линейную поляризацию одного направления, затем усиливается ФЭУ и регистрируется.

Рассмотрим принципиальную схему магнитографа (*рисунок 11.5*). Спектрогелиограф, состоящий из телескопа, диспергирующего элемента и камеры, строящей монохроматическое изображение, помещается пластинка $\lambda/4$, которая под действием электрического поля переменного напряжения преобразовывать свое состояние в соответствии с различными длинами волн. После построения монохроматической линии из неё вырезаются два крыла в низко- и высокочастотной области и сравниваются их интенсивности для определения напряженности МП. Доплеровское уширение, как было упомянуто, превышает эффект Зеемана, который в условиях короны Солнца не приводит к расщеплению линий, а по сути приводит к их

очень незначительному (менее 1 %) дополнительному уширению, которое наиболее выражено в крыльях линии.

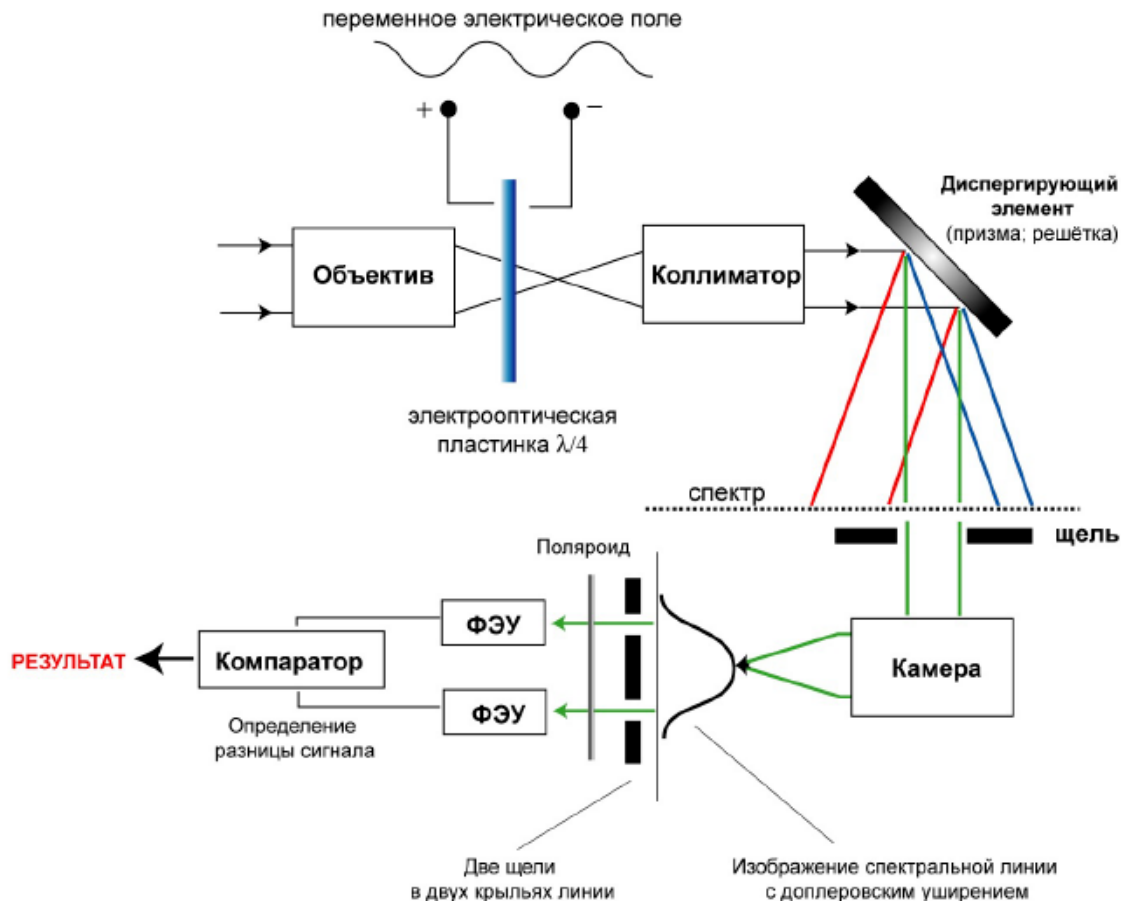


Рисунок 11.5 Принципиальная схема магнитографа

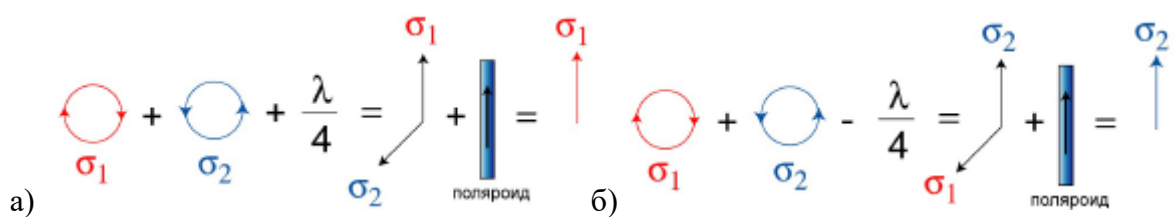


Рисунок 11.6 Выделение пластинкой $\lambda/4$ компонент линий, что приводит к разнонаправленности излучения

При подаче на электрооптическую пластинку напряжения «+», на выходе прибора останется только компонента σ_1 .

При подаче на электрооптическую пластинку напряжения «-», на выходе прибора останется только компонента σ_2 . Колебания переменного напряжения приводят к колебанию сигнала в крыльях, что позволяет измерить B .

Магнитограф в классическом исполнении измеряет только продольный эффект Зеемана, то есть компоненту поля, перпендикулярную к поверхности Солнца. Магнитографы, измеряющие всё поле, существуют, но имеет значительно меньшую точность для поперечной компоненты.

Поле всего Солнца измеряется сканированием щели по его поверхности. Поле, как уже отмечалось, измеряется только на поверхности. Прямые измерения магнитного поля в короне Солнца отсутствуют. Классическая карта магнитного поля приведена на рисунке 11.7:

- **N** – северная («+») полярность – **белые** области
- **S** – южная («-») полярность – **чёрные** области

Магнитные линии Солнца выходят из северных (белых) участков и входят в южные (чёрные) участки.

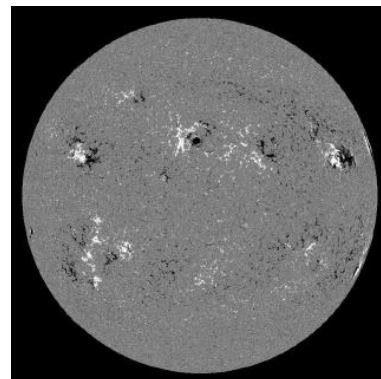


Рисунок 11.7 Карта магнитного поля

Существуют математические методы, позволяющие найти соответствие между точками входа и выхода магнитных линий на Солнце. Такие методы позволяют по наблюдениям поля на поверхности получать картину трёхмерного магнитного поля во всей короне Солнца, которое не наблюдается непосредственно. Наилучшим образом восстанавливается потенциальное МП, т.е. в предположении отсутствия электрических токов в короне, которые могли бы добавить искажения в общую картину МП.

Космические наблюдения: использование зеркал

Основной особенностью наблюдений из космоса является то, что они обычно ведутся в коротких длинах волн (менее 3000 \AA), не проходящих через атмосферу Земли. В ином случае теряется экономическая целесообразность. Исключения составляют уникально точные измерения, где препятствием является турбулентность атмосферы (например, Хаббл), или обсерватории, предназначенные для непрерывного мониторинга (например, оптические солнечные телескопы). **В коротких длинах волн, однако, не работает обычная оптика:** стёкла не прозрачны, а зеркала, наоборот, пропускают это излучение, поэтому требуются особые технологии.

Вещество, которое может отражать высокоэнергетичные фотоны, есть металл. **Металлические зеркала** содержат в себе свободные электроны, которые способны совершать колебания относительно неподвижной ионной сетки.

Принцип отражения излучения металлическими зеркалами – тот же, что и отражение радиоволн в плазме – **плазменные волны**. Как известно свободные электроны испытывают колебание с длиной волны

$$\lambda_e = \sqrt{\frac{\pi c^2 m_e}{n_e e^2}} \approx \frac{3.34 \times 10^6}{\sqrt{n_e}}$$

Если снаружи на такую среду падает излучение с длиной волны λ , то коэффициент преломления для него равен

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_e^2}}$$

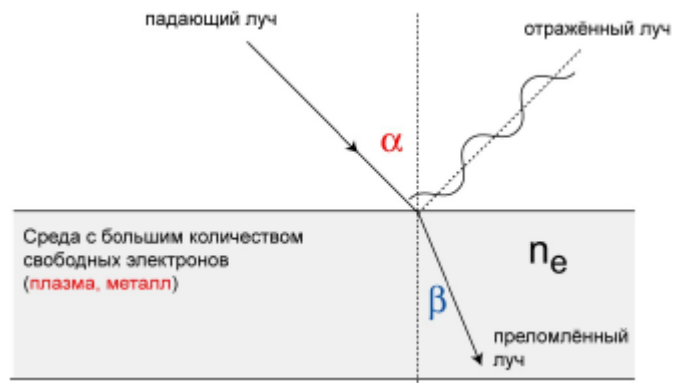


Рисунок 11.8 Металлические зеркала: схема отражения

Если $\lambda > \lambda_e$, то излучение в принципе не может пройти сквозь среду и будет отражено от неё.

Если $\lambda < \lambda_e$, то часть излучения проходит сквозь среду, причём чем меньше l , тем большая доля излучения проходит.

Для металлов концентрация свободных электронов составляет порядка $n_e \approx 10^{23} \text{ см}^{-3}$, поэтому

$$\lambda_e \approx \frac{3.34 \times 10^6}{\sqrt{n_e}} \approx 10^{-5} \text{ см} \approx 1000 \text{ \AA}$$

Таким образом, металлическое зеркало становится прозрачным на длинах волн короче 1000 \AA (100 нм). Коэффициент отражения зеркала в общем случае равен

$$R = \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)}$$

Для нормального падения ($\alpha = 90^\circ$), коэффициент отражения:

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 = \left(\frac{\sqrt{\lambda_e^2 - \lambda^2} - \lambda_e}{\sqrt{\lambda_e^2 - \lambda^2} + \lambda_e}\right)^2 \approx \left(\frac{\lambda}{2\lambda_e}\right)^4$$

Таким образом, на длине волны 100 \AA зеркало отражает порядка 10^{-5} падающего излучения. Как же получают изображения на коротких длинах волн. Самый известный способ, это *зеркала наклонного падения*. Рассмотрим формулу для отражения для очень наклонённых лучей ($\alpha \approx 90^\circ$). Введём углы:

$$a = \frac{\pi}{2} - \alpha \approx 0, \quad b = \frac{\pi}{2} - \beta \approx 0$$

Тогда коэффициент отражения

$$R = \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \approx \left(\frac{b - a}{b + a}\right)^2$$

Показатель преломления

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\cos a}{\cos b} \approx \frac{1 - a^2/2}{1 - b^2/2}$$

Для коротковолнового диапазона $\lambda \ll \lambda_e$. Поэтому

$$n = \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_e^2}} \approx 1 - \frac{\lambda^2}{2\lambda_e^2}$$

Отсюда после преобразования (грубо):

$$R \approx \frac{1}{a^4} \left(\frac{\lambda}{\lambda_e}\right)^2$$

Отражение $R=1$ достигается под углом

$$a \approx \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_e}}$$

Вывод

- Для $\lambda = 100 \text{ \AA}$ угол наклонного падения: $a \approx 18^\circ$
- Для $\lambda = 10 \text{ \AA}$ угол наклонного падения: $a \approx 6^\circ$

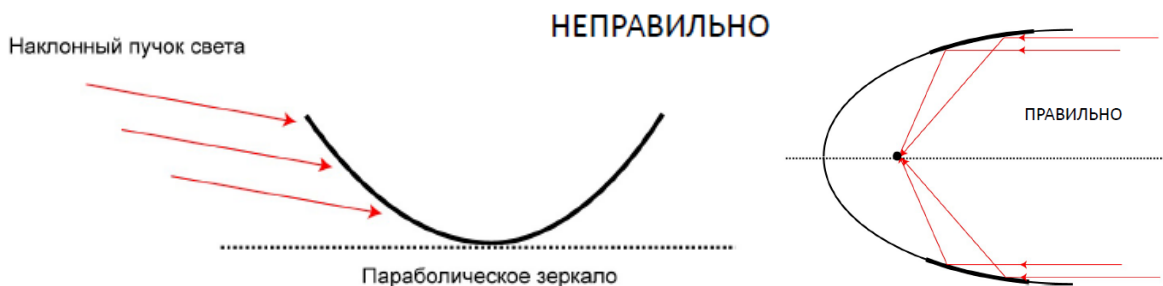


Рисунок 11.9 Неправильная и правильная схемы падения света на зеркала наклонного падения

Попытка осветить наклонным пучком обычное зеркало не приведёт к успеху, так как оптика работает только с лучами, направленными параллельно (или почти

параллельно оптической оси). Наклонные зеркала формируют по этой причине из удалённых сегментов параболы.

Известные зеркала наклонного падения

- Обсерватория Chandra (НАСА) – 1999 год.
- Обсерватория Yohkoh (Япония, США, Великобритания) – 1991 год.
- Обсерватория Skylab (НАСА) – 1973 год.

Другим подходом к изучению высокочастотных диапазонов служат **многослойные зеркала**. Наносится множество (сотни) слоёв металла толщиной несколько нм. Получившаяся подложка эффективно отражает выбранный узкий диапазон длин волн. В остальных длинах зеркало прозрачно.

Коронोगрафы. Радиоастрономия Корпускулярное излучение: нейтрино.

Способ многослойных зеркал был реализован на аппарате КОРОНАС-И (1994 год), но спустя несколько месяцев КА вышел из строя.

SOHO (запуск - 1996 год) и SDO (2010 год) – NASA также используют метод многослойных зеркал.

Собственное излучение короны становится крайне слабым уже на расстояниях около 1 радиуса. Чтобы наблюдать дальнюю корону, используют коронोगрафы - приборы, позволяющие наблюдать оптическую корону, подсвеченную Солнцем. Построение коронोगрафа требует избавление от лишнего излучения, рассеянного на частицах пыли и на конструкции телескопа.

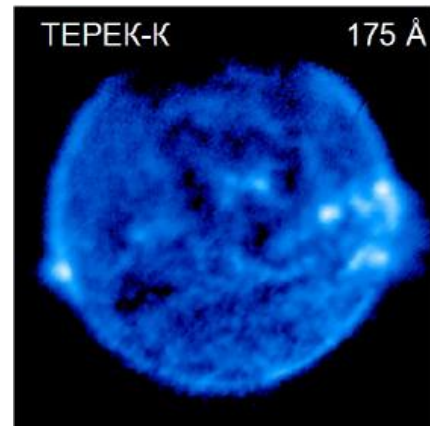


Рисунок 11.10 Получено прибором ТЕРЕК на борту обсерватории КОРОНАС-И (РФ) в 1994 году.

Основная проблема при наблюдении короны Солнца в оптическом диапазоне – её крайне низкая яркость по сравнению с диском Солнца:

- у поверхности: 10^{-6} от фотосферы
- при удалении на 1 радиус: 10^{-8} от фотосферы
- при удалении на 2 радиуса: 10^{-9} от фотосферы

Таким образом, даже ничтожная (одна миллиардная доля) рассеянного света в приборе способна погубить наблюдения. Коронोगраф, таким образом, это телескоп, в

котором максимально устранена любая возможность по попаданию рассеянного света на детектор.

Принципиальная схема коронографа

Коронограф по своей сути обычный телескоп, усложнённый для наблюдения внешних областей атмосферы (короны):

- Первое усложнение – **искусственная «Луна»**. Размещается в фокусе объектива, там, где обычный телескоп строит изображения, и закрывает видимый диск.
- Второе – **линза поля**. Возвращает лучи света с края поля зрения обратно к оптической оси.
- Третье – **диафрагма Лео**. Так как основное рассеивание и дифракция света происходят на краевых лучах (близких к краю «Луны»), то диафрагма отсекает механически эти лучи.
- Четвёртое – **объектив переноса изображения**. Строит изображение в фокальной плоскости инструмента.

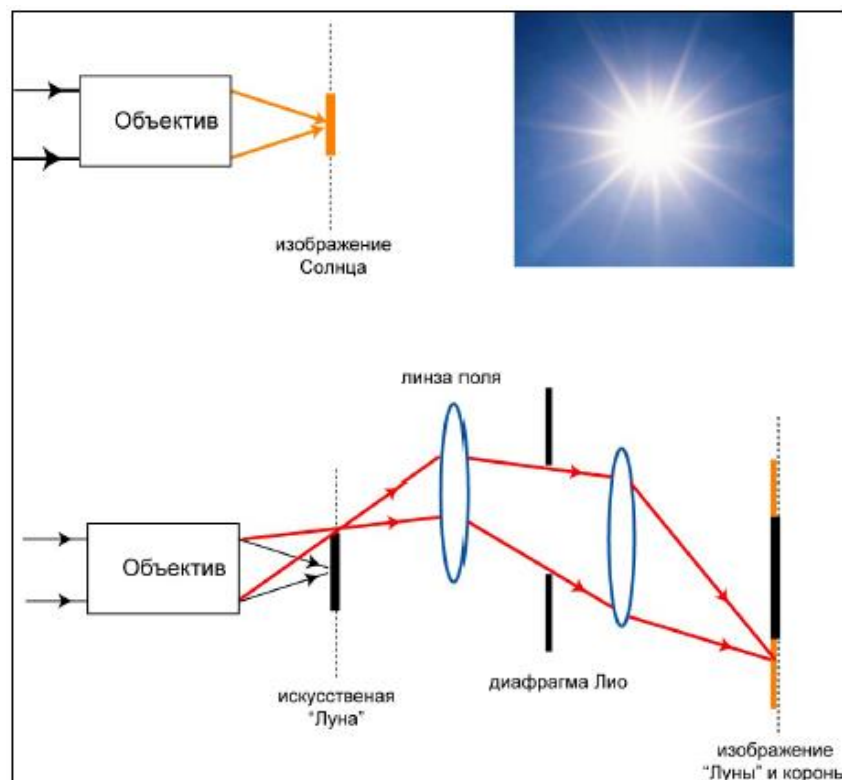


Рисунок 11.11 Принципиальная схема коронографа

От Солнца приходят и другие типы излучения (помимо оптического, УФ и т.п.), в частности, корпускулярное. Одним из элементов корпускулярного излучения являются нейтрино. Корпускулярное излучение улавливается детекторами посредством приема ливня вторичных частиц от взаимодействия высокоэнергетичных частиц с земной атмосферой. Для наблюдения нейтрино применяются различные подходы (сцинтилляция, химия).

Байкальский нейтринный телескоп основан на наблюдении черенковского излучения от продуктов взаимодействия нейтрино с Землёй, а именно мюонов. При прохождении мюонного нейтрино через земной шар в некотором месте оно может провзаимодействовать с протоном и образовать выброс мюона. Мюон также плохо взаимодействует с веществом, однако при прохождении мюона в веществе со скоростью большей, чем скорость света в данном веществе, производится черенковское излучение (фотоны). Фотоприемники располагают в однородных средах, например, лёд или воду. В случае Байкала фотоприемник расположен в воде. Преимущество такого расположения заключается в том, что у воды рассеяние меньше, что повышает точность позиционирования направления, откуда прилетел мюон, иначе говоря, в таком случае лучше пространственное разрешение. Вода Байкала спокойная, без активных течений, с примерно постоянной температурой, прозрачная, без мешающих примесей.

Опуская восемь «гирлянд» фотоприемников и образец света (импульсный лазер для синхронизации приборов по времени и отсчётам) под воду, наблюдается свет, который может прийти из воды из-под земли в результате черенковского рассеяния (рисунок 11.12). Установка оборудования производится, когда на поверхности озера есть лёд для упрощения поставок.



Рисунок 11.12 Байкальский нейтринный телескоп

Аналогичные эксперименты: IceCube, Баксанская нейтринная обсерватория.

Нейтринные наблюдения не имеют непосредственной цели наблюдения за Солнцем, потому как большие нейтринные обсерватории нацелены больше на получение астрофизических результатов: прихода высокоэнергичных нейтрино от галактических и межгалактических источников.

Радиоастрономия применяется для изучения Солнца. При наблюдениях не строится изображение, а получается корреляционная картина между показаниями отдельных антенн.

В качестве примера можно привести Сибирский радиогелиограф (СРГ), расположен в Радиоастрофизической обсерватории «Бадары». Является одним из крупнейших астрономических инструментов в России и предназначен для мониторинга активности Солнца и наблюдения за его поверхностью.

В Иркутске работает национальный гелиогеофизический комплекс, состоящий из радиотелескопа, наблюдениями за атмосферой Земли, строящегося 3-метрового коронографа.

Список литературы

1. Сергей Богачёв “Приборы для исследования Солнца” (лекция)
2. Michael Stix “The Sun. An Introduction” (2002)

Лекция №12. Экскурсия на солнечный телескоп МГУ

Экскурсия посвящена башенному солнечному телескопу ГАИШ МГУ, находящемуся в здании института. Целостат находится на крыше, в одной из башен, шахта телескопа проходит через все три этажа здания в цоколь, где располагается спектрограф.

Холл ГАИШ: исторические сведения



Рисунок 12.1 П.К. Штернберг руководит обстрелом Кремля в 1917 году. Худ. В.К. Дмитриевский, Н.Я. Евстигнеев

В фойе второго этажа представлено несколько картин, содержащих историю института. В частности, центральное полотно демонстрирует как **П.К. Штернберг** руководит обстрелом Кремля в 1917 году (рисунки 12.1) – человек, в честь которого и назван институт. **Павел Карлович** – российский и советский астроном, гравиметрист, педагог, общественный и политический деятель, основатель астрофизической школы. В первой революции Павел Карлович не участвовал ввиду отъезда за границу,

однако после своего возвращения в Россию вступил в партию большевиков, скрывал на территории обсерватории в подвале оставшееся после революции оружие, где находился стандарт времени – часовой маятник. В промежутки между революциями защитил докторскую диссертацию, стал профессором МГУ, а также директором ГАИШ в 1916 году. Во время февральской революции 1917 года П.К. Штернберг командовал замоскворецким отрядом при обстреле Кремля. В научной деятельности Штернберг был одним из пионеров **применения фотографии в астрономии**, в частности, проводил наблюдения визуально-двойных звезд с помощью фотографических методов и определения их точного положения на небе. В 1919 г. как политкомиссар был отправлен на осаду Омска, где из-за несчастного случая простудил лёгкие и вскоре умер.

Более ранний момент истории института виден на картине, где изображен **Федор Александрович Бредихин** – директор обсерватории МГУ в конце 19 века. Он оставил после себя не только научные труды, но и свою астрофизическую школу. В 1890 г. сменил пост и стал директором Пулковской астрономической обсерватории. На этой же картине изображены П.К. Штернберг, Витольд Карлович Цераский, Лидия Петровна Цераская. В.К. Цераский также был пионером применения фотографии в астрономии, проводил фотометрические измерения.

Со становлением профессиональной астрофизической школы в России связано и *изучение Солнца*. После Бредихина директором астрономической обсерватории МГУ стал В.К. Цераский в 1890 г., под руководством которого проводятся *измерения абсолютной звездной величины Солнца и оценка его нижней температуры* (3500 К). Оценка последнего параметра производилась с помощью параболического зеркала, в фокусе которого устанавливался тугоплавкий металл. Если энергии хватает на плавление металла, то возможна оценка температуры излучающего тела с учетом расстояния до него и геометрических размеров установки. Федор Александрович Бредихин также интересовался вопросами, связанными с Солнцем, в частности, организовал регулярные наблюдения за хромосферой Солнца с помощью спектральных приборов и фотографическая фиксация солнечных пятен.

Л.П. Цераская была профессиональным учителем французского языка, Витольд Карлович привлек жену к изучению переменных звезд, потому она стала известна как *первооткрыватель сотен новых переменных звезд* фотографическим методом сравнения интенсивности звезд в отдельный момент времени.

На одной из картин изображен М.В. Ломоносов, одного из отцов-основателей МГУ. Благодаря его усилиям и активному участию мецената И.И. Шувалова был составлен проект университета. Под его портретом в здании ГАИШ расположен вход на крышу института – витая лестница, совершающая несколько оборотов прежде, чем привести человека наверх.

Башня целостата телескопа

На крыше института открывается вид на башни телескопов, одна из них – *башня солнечного телескопа*, целостат которого находится под куполом. Свет подпет на целостат, переотражается, уходя в шахту телескопа и попадая в спектрограф на цокольном этаже в пункте наблюдателей. В настоящее время (2024 г.) телескоп находится в процессе модернизации.

Купол башни управляется посредством системы привода, включающей 2 мотора: один отвечает за раскрытие створок купола, второй – его кручение. Открытие створок и вращение купола возможно механически без использования электричества посредством кручения рычагов. Также на полу есть полозья, которые подключаются к трехфазному напряжению; модернизацией данного элемента телескопа стал трансформатор напряжения из 380В в 220В.

Под куполом башни располагается *целостат* 440 мм и *вторичное зеркало* того же диаметра. Когда телескоп не используется, для закрытия зеркал от пыли используются металлические крышки, которые плотно сидят на ободке зеркал. Свет

падает на целостат, отражается и падает на вторичное зеркало, отражаясь от которого попадает в шахту. У целостата и вторичного зеркала есть *несколько движений*.

- Целостат вращается относительно оси мира, следуя за Солнцем с помощью часового механизма. Каретка, на которой расположен целостат, может совершать передвижение вверх-вниз и влево-вправо относительно пола купола для компенсации сезонных изменений положения Солнца на небе (летом – по более высокой дуге, зимой – по более низкой).
- У вторичного зеркала возможно вращение вокруг оси мира и изменение наклона для подбора угла отражения света в шахту. Движения зеркал возможны как вручную с опорой на окошки с показателями угла, так и с помощью автоматических приборов, скорости движений можно изменять с помощью пульта. Каретка расположена на тросах, обрыв которых предупреждается стопорным механизмом из пружин.

Задача наблюдателя заключается в том, чтобы в начале дня установить зеркала таким образом, чтобы перенаправить свет в шахту, и запустить часовой механизм. Дальнейшее пребывание наблюдателя проходит в пункте наблюдения и обработки данных на цокольном этаже, откуда возможна корректировка вращения купола и отдельных элементов телескопа – зеркал.

Шахта телескопа: второй этаж

Настоящий солнечный телескоп имеет *несколько оптических конфигураций* и может трансформироваться в рефлектор или рефрактор. В шахте телескопа на полозьях располагаются каретки с линзой, плоским отражающим зеркалом, зеркалом Кассегрена. Для зеркальных схем объектив находится снизу, а после отражается от одного из двух упомянутых зеркал. Если наблюдателю нужно работать, например, в режиме линзового телескопа, то из пункта наблюдения возможна автоматическая установка объектива в необходимое положение к пучку света.

Пункт наблюдения: цокольный этаж. Спектрограф

Дверь, ведущая в пункт наблюдения, достаточно толстая – это необходимо для теплоизоляции и минимизации внешнего света, поскольку первые наблюдения в середине 50-х включали в себя использование чувствительных фотопластинок. Обращение к наблюдателю извне пункта было возможно с помощью дверного звонка.

В наблюдательном посту первое, что бросается в глаза, - *конструкция шахты телескопа*, которая основана на бетонных опорах и имеет независимый от всего здания фундамент для минимизации колебаний, связанных с хождением людей в помещениях и между ними. Такая конструкция хоть и имеет преимущество минимизации колебаний,

но влечет за собой большое количество пыли из-за того, что отдельные фундаменты и стенки разделены зазором, в который пробирается пыль с крыши, в особенности в случае передвижения тяжелых конструкций и вращения куполов телескопов.

Фокусное расстояние у схемы с плоским вторичным зеркалом составляет 15 м – длина пути света от главного объектива к зеркалу наверх, после луч возвращается к косому диагональному зеркалу и уходит в спектрограф или визуальный поляриметр. Конфигурация с Кассегреновским зеркалом имеет фокусное расстояние 20 м за счёт двойного расстояния между рельсами с зеркалами (прямым и Кассегреновским). Система с линзовым объективом обладает фокусным расстоянием 15 м.

Дифракционный спектрограф является основным используемым прибором на данном телескопе. Свет падает на поворотную призму, с помощью которой возможно изменение поступающей в щель спектрографа области диска Солнца (диаметр которого около 20 см). В спектрографе свет переотражается системой зеркал, фокусное расстояние которых 10 м. Наиболее часто используемая в приборе дифракционная решетка имеет 600 штр/мм, что дает спектральное разрешение (способность аппаратуры разрешать линии в электромагнитном спектре $\lambda/\Delta\lambda$) в 150.000. Разложенный спектр поступает на приемник: ранее это были фотопластинки, теперь – ПЗС матрица, поле зрения которой меньше, но преимущества электронных носителей нивелируют этот факт.

Цокольная комната наблюдателей в целом удачно сконструирована для различных конфигураций телескопа, однако одна из возможностей ныне отсутствует – удлинение пути света в подвальное помещение комнаты наблюдателей невозможно ввиду приходящих грунтовых вод.

Спектрограф расположен в одной из комнат цокольного помещения, на одном конце которого – дифракционная решетка (ближе к стенке), на другом – зеркало коллиматора и камеры. Суммарно зеркала коллиматора и камеры увеличивают путь, пройденный светом на 40 м. Поверх спектрографа добавлена оболочка для минимизации движений воздуха и пыли. **Внутри телескопа свет проходит 100 м.**

В той же комнате расположен спектрограф для образцов различных ламп. Теперь не пользуется спросом, поскольку в интернете есть доступ к таким спектральным данным. Есть и прибор для измерения фотопластинок: углов, направлений, микрофотометрии. В архивах ГАИШ можно найти записи солнечных вспышек и кинопроектор.

Лекция №13. Физика плазмы: кинетический подход

Рассмотрение физики плазмы как совокупности частиц интересует учёных в первую очередь ввиду существования регистрируемых космических лучей. Понимание механизмов ускорения частиц до высоких энергий в солнечной плазме позволит понять механизмы ускорения частиц во Вселенной.

Кулоновский и гравитационный дрейф частицы

Рассмотрим движение отдельно взятой заряженной частицы. В стационарном однородном МП заряженная частица движется по спирали, навиваясь на линию МП. При этом движению частицы вдоль МП ничто не препятствует, поэтому компонента движения частицы вдоль поля остается неизменной, в отличие от поперечной компоненты, которая изменяет свое направление. Таким образом, частица движется по спирали, такая траектория характеризуется ларморовским радиусом r_L и циклотронной частотой ω_B

$$r_L = \frac{cp_{\perp}}{eB}, \quad \omega_B = \frac{eB}{mc}$$

где p_{\perp} — поперечная компонента импульса частицы, B — магнитное поле, e, m — заряд и масса частицы, c — скорость света.

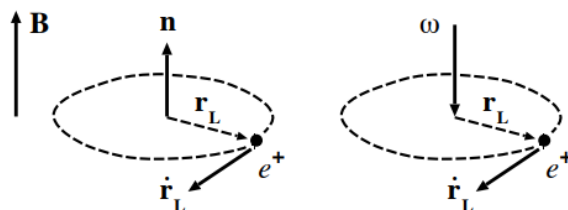


Рисунок 13.1 Иллюстрация траектории, векторов МП, циклотронной частоты и скорости заряженной частицы

Если частица движется не в однородном МП, а в скрещенных магнитных полях или дополнительном гравитационном поле, то она будет испытывать дополнительный дрейф, смещение. Важно отметить, что дрейф частицы в плазменной системе характерно имеют направление поперек магнитного поля и действия внешней силы (например, сила Кулона, гравитационная сила).

Дрейфы могут быть быстрыми или медленными (рисунок 13.2) в зависимости от величины дрейфовой скорости — скорости смещения частицы поперек МП и действия силы.

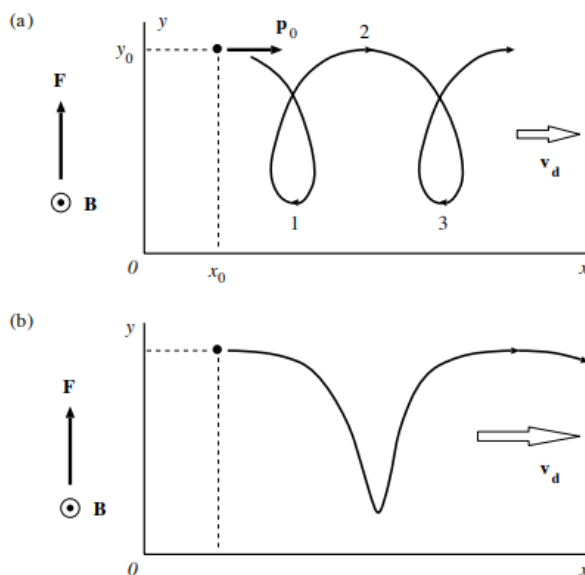


Рисунок 13.2 Медленный (а) и быстрый (б) дрейфы. Проекция рисунка вдоль линии МП

При медленном дрейфе частица движется по спирали, если бы дополнительной силы F не было, то частица двигалась бы на месте по окружности. В случае быстрого дрейфа спираль не успевает закрутиться в процессе движения и распрямляется до изогнутой траектории. Скорость дрейфа частицы v_d оценивается как

$$v_d = \frac{c}{e} \frac{F \times B}{B^2}$$

В случае, когда F – есть сила Кулона, $F = eE$, получаем, что скорость дрейфа не зависит от типа частицы:

$$v_d = c \frac{E \times B}{B^2}$$

Траектория частицы в таком случае будет зависеть от знака заряда частицы и ее массы (рисунки 13.3). Поскольку все частицы движутся с одной скоростью, то образуется поток плазмы поперек ЭМП.

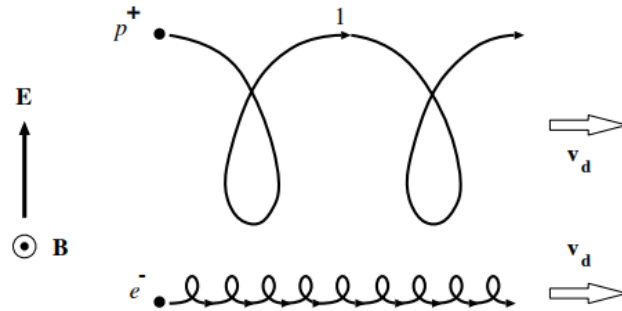


Рисунок 13.3 Дрейф частицы под действием силы Кулона

Рассмотрим гравитационный дрейф, в таком случае $F = mg$, получаем, что скорость дрейфа зависит от типа частицы (частицы с противоположным знаком будут двигаться в разных направлениях с разным модулем скорости):

$$v_d = \frac{mc}{e} \frac{g \times B}{B^2}$$

Имеем движение зарядов в разных направлениях (рисунки 13.4), откуда получаем токовое течение j . Гравитационный дрейф в плазме, находящейся в МП, приводит к формированию электрического тока как поперек ЭМП, так и поперек гравитационного поля. Эффект

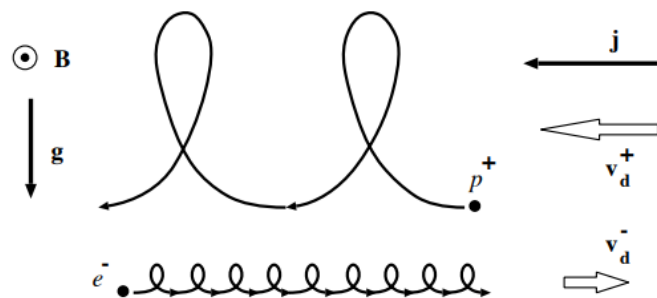


Рисунок 13.4 Дрейф частицы под действием гравитационной силы

наблюдается в атмосферах звезд, где на частицы действуют сильные МП и гравитационное притяжение звезды, что проявляется в виде электрических токов.

Градиентный и центробежный дрейф частицы

Рассмотрим градиентный дрейф, формирующийся под действием диамагнитной силы $F = -\mathcal{M} \nabla B$, действующая со стороны переменных в пространстве МП на ток,

формирующийся при движении по ларморовской орбите электронам (электрон, огибая линию МП, формирует замкнутый электрический ток). Получаем, что скорость дрейфа зависит от типа частицы, что приводит к формированию электрического тока как в случае гравитационного дрейфа:

$$v_d = \frac{Mc}{eB} \mathbf{n} \times \nabla B$$

Дрейф будет направлен перпендикулярно МП (\mathbf{n} – направление МП) и направлению изменения МП по величине.

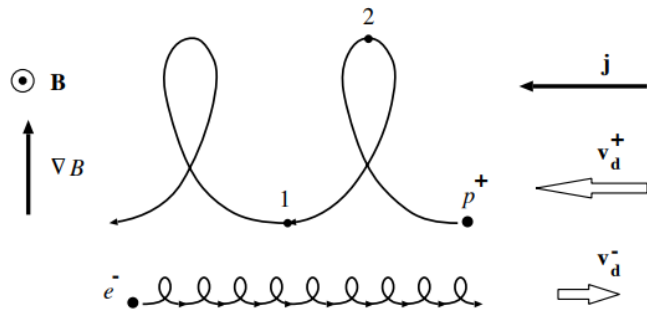


Рисунок 13.5 Дрейф частицы под действием диамагнитной силы

Выделяют также центробежный дрейф, возникающий на искривленных линиях МП под действием сил инерции в системе отсчета заряженной частицы. Такой дрейф приводит к смещению частицы поперек действующей силы (перпендикулярно центростремительному ускорению) и направления МП. Центробежная сила F_c и скорость центробежного дрейфа v_d :

$$F_c = \frac{mv_{\parallel}^2}{R_c} e_c, \quad v_d = -\frac{mc}{eB} \ddot{\mathbf{R}} \times \mathbf{n}$$

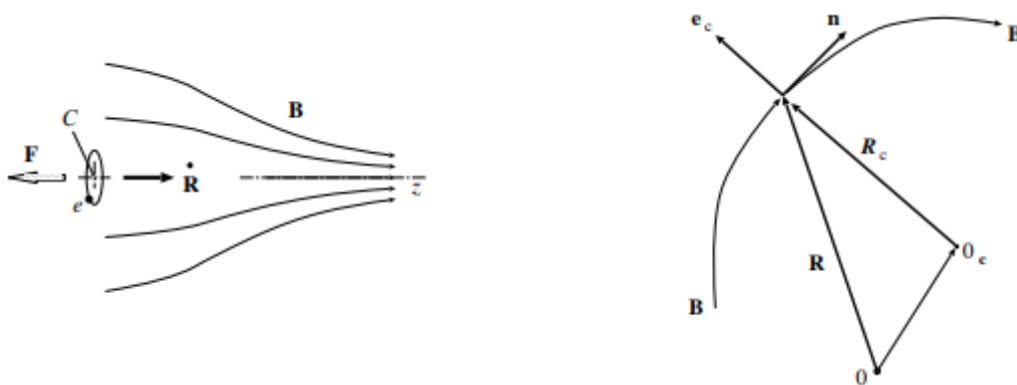


Рисунок 13.6 Сравнение движения заряженной частицы под действием диамагнитной (слева) и центробежной (справа) силы

Отметим, что движение частицы, обладающей поперечной компонентой скорости по отношению к МП, в медленно меняющемся МП под действием диамагнитной силы из области более разреженных полей в область более сгущенных, напряженных полей (рисунок 13.6, левый) происходит по спирали. Спираль формирует электрический контур, взаимодействующий с увеличивающейся напряженностью МП по мере приближения к сгущению линий, что приведет к остановке частицы. Если напряженность поля возрастет значительно, то частица не только остановится, но и ускорится в обратном направлении,

«отразившись» от места сгущения линий МП. Такая ситуация называется **магнитным зеркалом**.

Адиабатические инварианты. Магнитные зеркала и ловушки

В системе некоторый параметр может меняться медленно, тогда в такой системе возможно возникновение квазипериодического движения. В точном периодическом движении сохраняется энергия (например, колебания маятника без учета диссипативных сил). В случае медленного изменения некоторого параметра системы (например, длина маятника) полная энергия сохраняться не будет, однако существуют иные **адиабатические варианты**, остающиеся неизменными. Заряженные частицы при движении по слабо неоднородным медленно меняющимся ЭМП имеют характерные адиабатические инварианты.

Первый адиабатический инвариант или **поперечный адиабатический инвариант** показывает, что отношение квадрата поперечной составляющей импульса к напряженности магнитного поля сохраняется.

$$\frac{p_{\perp}^2}{B} = const$$

При подстановке из выражения для ларморовского радиуса движения заряженной частицы $r_L = \frac{cp_{\perp}}{eB}$ поперечной составляющей импульса в первый адиабатический инвариант получаем в левой части выражения полный магнитный поток, пронзающий площадку, окаймленную движением частицы, он должен сохраняться. Пренебрегая продольным движением частицы, получаем, что при увеличении напряженности МП увеличивается импульс частицы и, следовательно, её энергия. Такой механизм ускорения частицы называется **бетатронным**.

Рассмотрим иную ситуацию. В пространстве слабо неоднородного МП, например, линии МП, входящее в солнечное пятно южной полярности на фотосфере Солнца (рисунок 13.7). Частица влетает в МП с некоторыми компонентами поперечного p_{\perp} и продольного p_{\parallel} импульса под некоторым углом θ

$$p_{\perp} = p \sin \theta, \quad p_{\parallel} = p \cos \theta$$

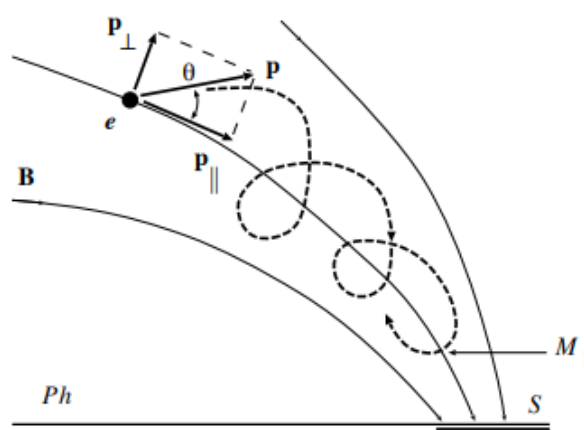


Рисунок 13.7 Процесс отражения частицы, влетевшей под углом $\theta > \theta_0$

В соответствии с первым адиабатическим инвариантом отношение квадрата поперечной компоненты импульса к напряженности МП должно сохраняться. Частица перемещается в пространстве, у нее появляется возможность перекачивать импульс из поперечной компоненты в продольную и наоборот, тем самым сохраняя полный момент импульса. Поперечная компонента выражается через синус угла, тогда угол наклона можно выразить через напряженности МП и питч-угол θ_0 (начальный угол, угол влёта частицы)

$$\frac{\sin^2 \theta}{B} = \text{const} = \frac{\sin^2 \theta_0}{B_0}$$

$$\sin^2 \theta = \frac{B}{B_0} \sin^2 \theta_0$$

Постепенная перекачка продольной компоненты в поперечную приводит к ситуации, когда продольная компонента может исчезнуть, частица остановится под действием диамагнитных сил

$$p_{\parallel} = p \cos \theta_1 = 0,$$

$$\cos \theta_1 = 0, \quad \sin \theta_1 = 1 \quad \theta_1 = 90^\circ$$

Получаем ситуацию магнитного зеркала.

Такое условие соответствует частицам, которые изначально влетели в МП под углом θ_0 и напряженностью МП B_0 . Для таких частиц определено МП, соответствующее магнитному зеркалу поля B_1

$$B_1 = \frac{B_0}{\sin^2 \theta_0}$$

Если $\theta > \theta_0$, то продольная компонента импульса была меньше, перекачка импульса произойдет быстрее, такие частицы также отразятся от магнитного зеркала, но на больших высотах, нежели частицы предельного случая питч-угла θ_0 . Отраженные частицы будут захвачены в **магнитную ловушку**, частицы будут отражаться от магнитных зеркал разных полярностей, претерпевая квазипериодическое движение (рисунок 13.8).

Если $\theta < \theta_0$, то продольная компонента импульса будет больше, частица сможет преодолеть магнитное зеркало, образуется **конус потерь**. Те частицы, что имеют угол влёта в МП меньше питч-угла, имеют траектории, начинающиеся внутри некоторого

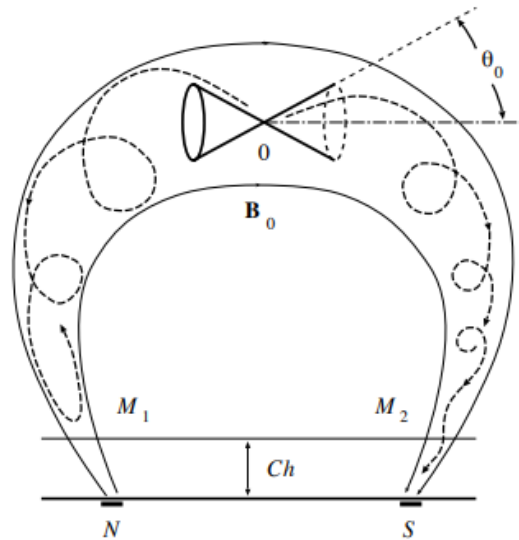


Рисунок 13.8 Магнитная ловушка: квазипериодическое движение частицы

конуса с раствором, равным питч-углу, и будут улетать в хромосферу звезды, далее претерпевая столкновения с плотными слоями плазмы и теряя энергию.

В случае стабильности магнитной ловушки частица бесконечно долго будет колебаться между двумя магнитными зеркалами. Если же магнитная ловушка будет постепенно изменять свою длину, то в такой квазипериодической колебательной системе должен сохраняться **второй адиабатический инвариант (продольный адиабатический инвариант)**:

$$p_{\parallel}L = const$$

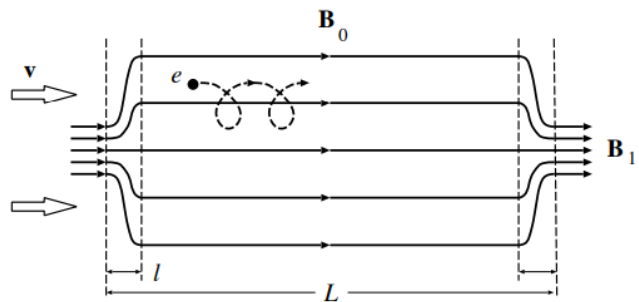


Рисунок 13.9 Магнитная ловушка

Представим магнитную ловушку с однородными МП и резко неоднородными МП по краям, представляющими магнитное зеркало (рисунок 13.9). В такой магнитной ловушке ларморовский радиус частицы будет постоянен в процессе своего движения. Продольная компонента импульса частицы будет изменяться под действием сохранения адиабатического инварианта. При уменьшении длины ловушки продольная компонента импульса частицы увеличивается, следовательно, энергия частицы также будет расти. Такой процесс ускорения называется **ускорением Ферми**, фактически схож с ускорением мячика, отталкивающегося от набегающей на него стены в случае упругих столкновений. Если же магнитная ловушка увеличивается в размере, то частица теряет энергию после соударений и ситуация соответствует адиабатическому охлаждению частиц.

Из рассмотрения получили **два механизма ускорения частиц**:

1. Бетатронное ускорение – соответствует увеличению напряженности МП (в случае рисунка 13.9 этого можно добиться сжатием ловушки поперек линий МП).
2. Ускорение Ферми – соответствует изменению масштаба магнитной ловушки вдоль линий МП.

Магнитная ловушка может уменьшаться исходя из двух предположений.

Пусть магнитная ловушка опирается на солнечные пятна на фотосфере и под действием уходящих в конус потерь заряженных частиц плазма в хромосфере Солнца начнет быстро разогреваться и расширяться, формируя ударные волны в основаниях магнитной ловушки. Ударные волны будут работать как магнитные зеркала и, поднимаясь вдоль ловушки, будут уменьшать эффективную длину ловушки, тем самым формируя условия для ускорения Ферми. Конфигурация МП при этом сохраняется (рисунок 13.10).

Ускорение Ферми реализуется и при изменении геометрии (уменьшении ловушки), но с сохранением положения магнитных зеркал. Наблюдается такая модель в солнечных вспышках. Первичное энерговыделение в солнечной вспышке происходит в некоторой области столкновения двух противоположно направленных магнитных потоков, где формируются благоприятные условия для магнитного пересоединения. Магнитные линии перезамыкаются и под действием сил натяжения МП устремляются к поверхности Солнца, выстреливая захваченной собой плазмой. Линии МП быстро сокращаются под действием натяжения МП и за счёт этого магнитная ловушка быстро схлапывается, формируя условия для ускорения Ферми (рисунок 13.10).

Третий адиабатический инвариант (поточковый адиабатический инвариант) – формируется из замкнутого движения частицы в магнитной ловушке с аксиальной симметрией с градиентом МП вдоль направления радиуса магнитной ловушки. Под действием первого адиабатического инварианта частица будет находиться на своей ларморовской орбите. Под действием второго адиабатического инварианта частица будет отражаться от магнитных зеркал и двигаться между зеркалами магнитной ловушки. В скрещенных МП и градиенте изменения МП у частицы появится градиентный дрейф, под действием которого частица начнет смещаться как поперек направления МП, так и поперек направления изменения МП, то есть по линии, окаймляющей эту аксиальную магнитную ловушку. Появится квазипериодическое движение вокруг оси симметрии магнитной ловушки под действием градиентного дрейфа. При сохранении геометрии магнитной ловушки будет

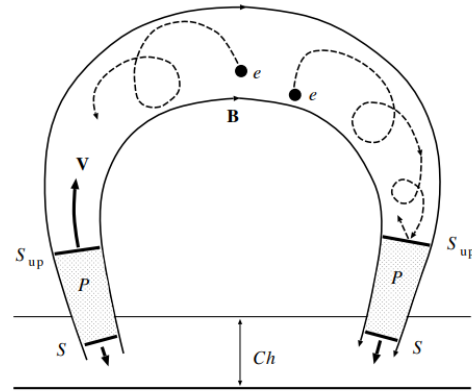


Рисунок 13.10 Механизм ускорения Ферми. Уменьшение эффективной длины ловушки.

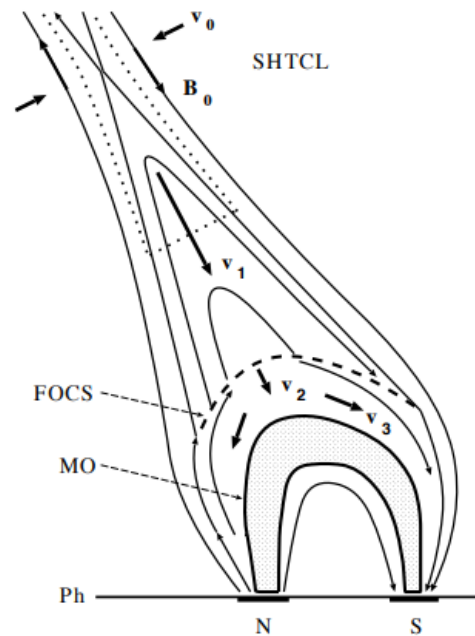


Рисунок 13.11 Механизм ускорения Ферми. Уменьшение ловушки с сохранением положения магнитных зеркал.

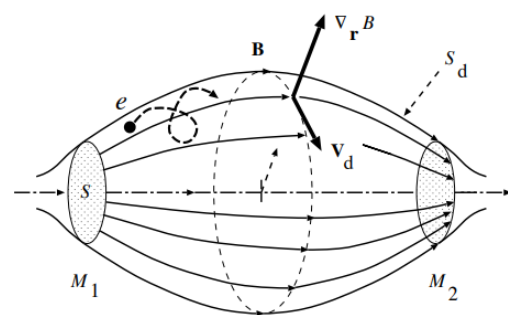


Рисунок 13.12 Аксиальная магнитная ловушка. К объяснению третьего адиабатического инварианта

сохраняться полная энергия. В процессе движения частица будет полностью заметать поверхность, окаймляющую магнитную ловушку (*рисунок 13.12*).

Такое движение частиц наблюдается в МП Земли: вблизи магнитных полюсов Земли напряженность МП увеличивается, там образуются магнитные зеркала. В такой магнитной ловушке заряженные частицы оказываются запертыми и не только отражаются от северного и южного полюса, но и огибают Землю вокруг оси вращения, формируя магнитную оболочку, по которой они движутся.

При медленном изменении некоторых параметров такой ловушки, например, скорость изменения МП вдоль радиуса ловушки, должен сохраняться потоковый инвариант (сохранение потока, пронизывающего заметаемую частицей поверхность):

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = const$$

Наблюдается схожесть первого и третьего инвариантов: для первого должен сохраняться поток через ларморовскую орбиту заряженной частицы, для третьего – через орбиту, формируемую дрейфовым движением частицы вокруг некоторой магнитной ловушки.

Механизм ускорения Ферми для КЛ. Столкновения частиц

Механизм ускорения Ферми может работать не только когда магнитная ловушка является схлапывающейся. Исторически механизм ускорения Ферми был предложен для интерпретации наблюдения галактических космических лучей. Разброс энергий КЛ достаточно большой и объясняется отражением на некоторых магнитных облаках, случайным образом дрейфующих в космическом пространстве (например, сгущения плазмы). По прошествии долгого времени частица будет набирать энергию, что наглядно можно объяснить на упрощенном примере. Пусть частица и магнитные облака движутся вдоль одной оси. При лобовом столкновении частицы и зеркала частица получает дополнительную скорость, равную удвоенной скорости зеркала $2v_m$. Сравним начальную и конечную кинетическую энергию, их разность составит положительную величину

$$\delta\mathcal{K}_+ = \frac{1}{2}m(V_0 + 2v_m)^2 - \frac{1}{2}mV_0^2 = 2mv_m(V_0 + v_m)$$

При столкновении «вдогонку» частица потеряет скорость и энергию соответственно. Потеря составит

$$\delta\mathcal{K}_- = -2mv_m(V_0 - v_m)$$

Многочисленные столкновения приводят к увеличению энергии частицы, поскольку лобовые столкновения являются более вероятными, нежели столкновения, в которых происходит движение вдогонку. Прирост энергии составит

$$\delta\mathcal{K}_{av} = \delta\mathcal{K}_+ \frac{V_0 + v_m}{2V_0} + \delta\mathcal{K}_- \frac{V_0 - v_m}{2V_0} = 4mv_m^2$$

Получаем, что вклад пропорционален квадрату скорости движения магнитного зеркала. Ускорение Ферми часто интерпретируют в двух вариациях: *механизм ускорения первого и второго порядков*.

Механизм ускорения первого порядка реализуется *на отражателях, движущихся по направлению к частице*, в то время как механизм ускорения второго порядка – *на случайно движущихся отражателях*. Порядок заключен в степени скорости.

При переходе к релятивистскому случаю при массе частицы стоит Лоренц-фактор, который в свою очередь пропорционален энергии частицы, поэтому в таком случае прирост энергии будет пропорционален самой энергии частицы. Прирост энергии при этом будет зависеть обратно пропорционально от квадрата скорости света. Лоренц-фактор в подобных ситуациях всегда мал, поскольку магнитные облака – это неоднородности плазмы с малыми скоростями по сравнению со скоростью света. Эффективность ускорителя значительно уменьшается в случае, когда коэффициент стоит во второй степени, характерной для столкновений со случайно движущимися отражателями.

Учёт только тех столкновений, что реализуются на отражателях, движущихся по направлению к частице (первое слагаемое в выражении для прироста энергии $\delta\mathcal{K}_{av}$), даст следующее: малый параметр отношения скорости движения магнитного зеркала к скорости света останется в первой степени. Такой механизм ускорения более эффективный и именно он работает в коллапсирующих магнитных ловушках.

Оба механизма ускорения Ферми призваны к интерпретации ускорения космических лучей в большом диапазоне энергий. На *рисунке 13.13* представлена схема потока приходящих КЛ и их энергий, поделенная на зоны: желтый – КЛ солнечного происхождения, синий – КЛ местного галактического происхождения, розовым – КЛ межгалактического происхождения.

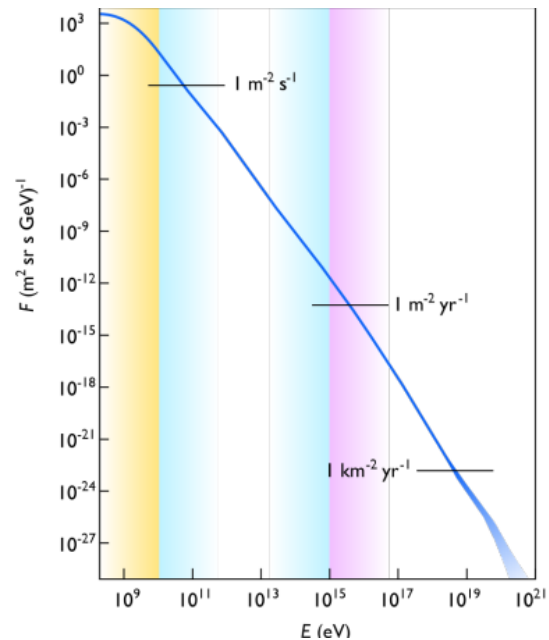


Рисунок 13.13 Поток космических лучей и их энергии

Механизм ускорения частиц за счёт ЭМ волн. Механизм затухания Ландау

Существует *механизм ускорения частиц за счёт* взаимодействия не постоянно медленно меняющихся МП, а наоборот – быстро меняющихся осциллирующих МП, то есть *ЭМВ* (электромагнитных волн). Свободные заряженные частицы могут взаимодействовать с ЭМП, но если скорость частицы мала по сравнению с фазовой скоростью движения ЭМВ, то взаимодействие будет слабым.

В качестве примера рассмотрим свободную частицу и свободную ЭМВ – свет, у которого высокие частоты движения по сравнению со скоростью движения частицы. За некоторое время мимо частицы будет проскакать множество периодов изменения ЭМП, связанных с распространяющимся светом. Интеграл по времени от движения частицы показывает, что ЭМП не вносят вклад в движение частицы.

ЭМВ распространяются не только в вакууме или разреженной плазме, но и в плазме, связанной между собой собственными ЭМП заряженных частиц (протонов, ионов, электронов). В таком веществе ЭМВ может представлять собой не только свет, но и электростатическую волну. Свет – перпендикулярная волна (вектора электрического и магнитного полей перпендикулярны друг к другу и направлению распространения световой волны), а *электростатическая волна характеризуется колебаниями ЭМП вдоль направления волны*.

Пример: плазменная система, состоящая из водородной плазмы (электроны и протоны), пусть в некоторой области пространства будет создана неоднородность (сгустим электроны); появится разность потенциалов между той областью пространства, из которой электроны ушли (появится избыток положительного заряда, протонов), и той областью пространства, в которую электроны пришли (появится избыток отрицательного заряда, электронов). Появившееся электростатическое поле будет действовать на заряженные частицы, электроны ввиду малой массы быстрее откликнутся на это изменение и устремятся в ту область, откуда были изъяты изначальным возмущением. Как и в любой колебательной системе в отсутствие диссипативных сил электроны пройдут мимо положения равновесия, уйдут в другую область пространства, где под действием давления вытолкнут находящиеся в этой области пространства электроны – создастся волна движения электронов под действием электростатических сил (то сгущение электронного облака, то разряжение).

Примечание: фактически электроны в пространстве переноситься не будут, они лишь будут колебаться около положения равновесия, расталкивая окружающие электроны и вызывая колебания электростатического поля. Фазовая скорость движения такой волны есть отношение частоты волны к её волновому числу и может быть много меньше скорости света.

Фазовая скорость – та скорость, с которой движется фронт постоянной фазы изменения какой-либо величины в волне (например, напряженность поля).

Таким образом, если быстрая заряженная частица на фоне распространяющейся электростатической волны будет иметь скорость близкую к фазовой скорости электростатической волны, то в каждый момент времени частица будет нагонять электрическое поле, находящееся в одной и той же фазе (распространяющееся в одном и том же направлении). В системе отсчета, связанной с частицей, электрическое поле будет постоянным или медленно меняющимся, если скорость частицы мало отличается от фазовой скорости волны. Иными словами, частица будет видеть электрическое поле волны как постоянное, которое будет ускорять или замедлять частицу в зависимости от направления поля и знака заряда частицы. Энергия на изменение скорости движения частицы берется из энергии электростатической волны, из-за чего последняя будет затухать или раскачиваться.

Механизм затухания Ландау

Частицы в природе стремятся выстроиться в равновесие. Тепловому равновесию частиц соответствует распределение Максвелла по скоростям (чем больше скорость частицы, тем меньше таких частиц можно найти). Рассмотрим электростатическую волну с собственной фазовой скоростью ω/k_{\parallel} (рисунок 13.14). Более быстрых частиц, близких по скорости к фазовой, будет меньше, чем тех частиц, скорость которых близка к фазовой, но меньше неё. Те частицы, что немного обгоняют волну, будут ускоряться, те, что отстают от волны, – замедляться. Наглядная аналогия – корабли на гребнях волны. Левый корабль (см. рисунок 13.14), находящийся на переднем склоне волны и имеющий скорость меньшую, чем волна, будет ускоряться за счёт стекающей под действием сил гравитации воды. Правый корабль, находящийся на заднем склоне волны и имеющий скорость большую, чем волна, будет замедляться за счёт стекающей под действием сил гравитации воды. Распределение частиц сглаживается, если проинтегрировать графики (а) и (б), то энергии окажется запасено больше, следовательно, волна затухает. Такой механизм называют **механизмом затухания Ландау**. Как только частицы, близлежащие к фазовой скорости в распределении

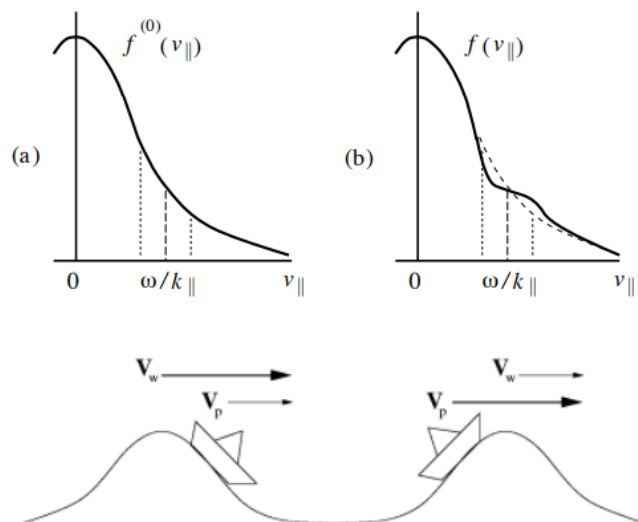


Рисунок 13.14 а) Максвелловское распределение частиц б) Число частиц соответствующих скоростей. Нижний рисунок: корабли на гребнях волн, аналогия для частиц в электростатическом поле.

скоростей, набирают некоторую скорость, близкую к фазовой скорости, их ускорение прекращается.

Ускорение на каскаде

Для дальнейшего ускорения требуется новая волна с большей фазовой скоростью, чтобы другая волна подхватила на резонансе Ландау прежде ускоренные частицы и ускорила их вновь. В каскаде волн с различными волновыми числами можно статистически ускорять свободные заряженные частицы.

Если у распределения частиц есть некоторый рост (положительная производная по скорости) в области фазовой скорости (рисунок 13.15), то частицы теряют энергию и раскачивают электростатические волны. Например, такой график описывает ситуацию, когда в спокойной тепловой плазме распространяется пучок заряженных частиц, имеющих примерно одинаковую скорость.

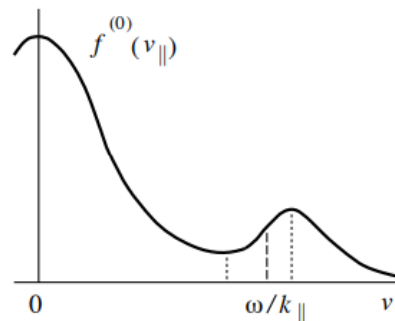


Рисунок 13.15 Распределение частиц по скоростям

Ускорение частиц на каскаде волн

Турбулентность Колмогорова-Обухова описывается степенным спектром зависимости энергии, заключенных в различных вихрях, возмущениях, волнах различных пространственных масштабов (или волновых чисел k , чем больше k , тем меньше пространственный масштаб). Энергетический спектр Колмогорова-Обухова возникает в следующих предположениях (рисунок 13.16):

- Вся энергия накачивается в волны при минимальном волновом числе (в максимальных по размеру возмущениях)
- Энергия не диссипирует, а передается от возмущений одного масштаба к более малому, постепенно спускаясь по волновым числам.
- В области больших волновых чисел (в минимальных по размеру возмущениях) начинают действовать механизмы диссипации, энергия уходит из энергетического каскада.

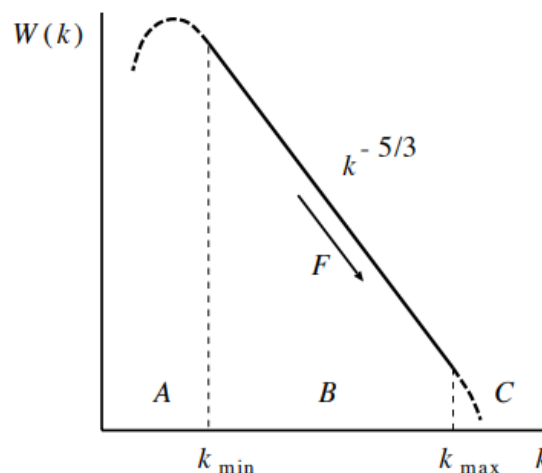


Рисунок 13.16 Энергетический спектр Колмогорова-Обухова

Диапазон, в котором энергия не производится и не теряется, называется инерциальным диапазоном волновых чисел. Вихри с соответствующими волновыми числами и пространственными масштабами будут передавать энергию от одного вихря к другому, меньшего масштаба.

Спектр Колмогорова-Обухова с характерной степенью $-5/3$ формируется из размерных соображений. Пусть вся энергия вырабатывается с постоянной скоростью на максимальных по размеру вихрях, то есть с постоянной мощностью \mathcal{P} . Размерность мощности \mathcal{P} – энергия \mathcal{E} в единицу времени t :

$$[\mathcal{P}] = \left[\frac{\mathcal{E}}{t} \right] = \frac{g \text{ cm}^2}{s^3}$$

Предположим, что необходимо найти распределение спектральной плотности энергии W в таких вихрях с разными волновыми числами, то есть содержание энергии на единицу волнового числа k . Размерность спектральной плотности энергии W :

$$[W] = \left[\frac{\mathcal{E}}{k} \right] = \frac{g \text{ cm}^3}{s^2}$$

Спектр Колмогорова-Обухова формируется в предположении, что спектральная плотность энергии зависит только от мощности производства энергии и волнового числа. Исходя из симметрии размерностей, видим, что для получения той же размерности у множителя с мощностью, что и у спектральной плотности энергии W , необходимо возвести мощность \mathcal{P} в степень $2/3$ (т.к. $\mathcal{P} \sim s^3$, а $W \sim s^2$).

$$[\mathcal{P}] = \left[\frac{\mathcal{E}}{t} \right] = \frac{g \text{ cm}^2}{s^3}, \quad [\mathcal{P}]^{2/3} = \frac{g^{2/3} \text{ cm}^{4/3}}{s^2}$$

Тогда в числителе размерности множителя $\mathcal{P}^{2/3}$ получаем $cm^{4/3}$, нам же нужно, чтобы было $cm^3 = cm^{9/3}$. Умножим на $k^{-5/3}$. В итоге получаем спектр Колмогорова-Обухова:

$$W(k) = C_k \mathcal{P}^{2/3} k^{-5/3},$$

где C_k – размерный коэффициент для нормировки на граммы. Несмотря на то, что формула выведена исходя из размерности, она имеет физический смысл. Наклон спектра энергетических распределений у различных возмущений в астрофизике, геологии, гидродинамики часто соответствует наклону Колмогорова-Обухова. Например, на *рисунке 13.17* представлено распределение возмущений напряженности МП в солнечном ветре. Центральный инерциальный диапазон соответствует наклону Колмогорова-Обухова. Таким образом, частицы могут ускоряться на некотором турбулентном распределении волн (каскаде волн).

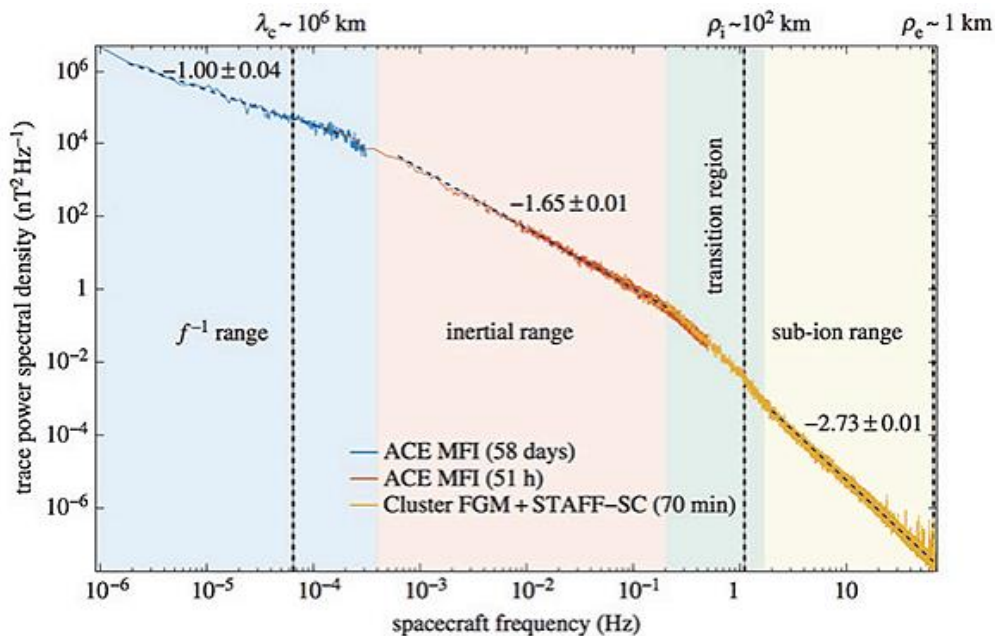


Рисунок 13.17 Распределение возмущений напряженности МП в солнечном ветре (примечание: $-5/3 \approx 1,65$)

В лекции рассмотрены три механизма ускорения заряженных частиц на квазистационарных и медленно меняющихся МП, а также на быстро меняющихся ЭМП, содержащихся в ЭМВ, турбулентных каскадах:

1. Бетатронное ускорение за счет сохранения первого адиабатического инварианта при усилении напряженности МП во времени
2. Ускорение Ферми за счет изменения напряженности МП в пространстве, например, в коллапсирующих магнитных ловушках за счёт сохранения второго адиабатического инварианта
3. Статистическое ускорение на каскаде турбулентных возмущений при взаимодействии частицы с возмущениями за счёт резонансных условий Ландау

Список литературы

- Леденцов Л.С., Сомов Б.В. "Лекции по плазменной астрофизике: классические основы теории" (2023)

Лекция №14. Физика плазмы: жидкостный подход

Альвеновские и магнитозвуковые волны

В данной лекции рассматривается жидкостное описание солнечной плазмы. Астрофизическая плазма имеет высокую электрическую проводимость, благодаря чему существует *эффект вмороженности МП в вещество*. При высокой проводимости (в предельном случае при бесконечной проводимости) имеет место идеальная плазма, тогда по закону электромагнитной индукции МП отслеживается положение проводящих элементов. Если вещество уносится течением перпендикулярно к направлению линий МП, то данное вещество захватывает это МП и уносит за собой в случае, когда энергия вещества превосходит энергию поля. При обратной ситуации ($E_{МП} > E_{вещества}$) МП утаскивает за собой вещество.

Вдоль МП вещество может перемещаться свободно. Таким образом, *вещество оказывается запертым* внутри отдельных магнитных трубок (рисунки 14.1): как перемещается магнитная трубка, так и перемещается вещество. Исключение: вдоль канала перемещение может быть свободным.

Такие идеальные условия накладывают ограничения на топологические перестройки, конфигурации линий МП. Пусть магнитная петля существовала в некоторый момент времени, тогда при бесконечной проводимости данная конфигурация сохраняется бесконечно долго. Если же проводимость конечна (например, при возникновении турбулентностей, в частности, ионно-звуковой турбулентности), то появляются возможности для разрыва отдельных линий МП и пересоединения между собой.

Рассмотрим плазму при идеальных условиях и её отличие от обычного газа (например, воздуха). В изотропном однородном газе распространяется два типа возмущений: энтропийные и звуковые волны. Энтропийные волны являются не распространяющимися колебаниями температуры, концентрации газа, имеющими нулевую фазовую скорость. Звук – волна с конкретно заданной скоростью, в условиях однородной среды является изотропной (в различных направлениях распространяется с одной и той же скоростью). Возникновение в ионизированном газе, плазме, выделенного направления приводит к формированию иных типов распространяющихся возмущений с неизотропной структурой распределения фазовых скоростей.

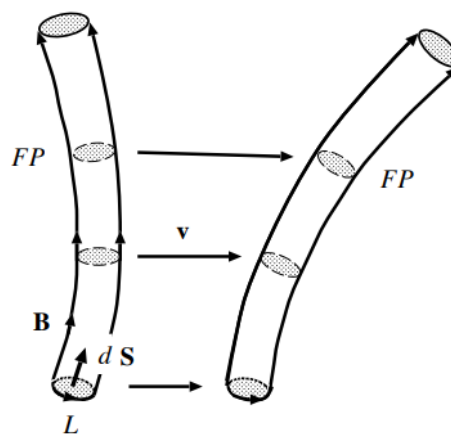


Рисунок 14.1 Магнитная трубка через поверхность dS , движущаяся с плазмой со скоростью v . L – “жидкий контур”, ограничивающий поверхность dS . “Жидкие частицы” (FP), которые первоначально были в этой трубке, остаются в той же трубке.

Решение задачи о малых возмущениях в идеальной плазме с внешним МП дает *дисперсионное соотношение*, описывающее зависимость частоты возникающих возмущений от волнового вектора. Полное дисперсионное соотношение имеет вид

$$\omega_0^2 \left[\omega_0^2 - \frac{(\mathbf{k} \cdot \mathbf{B})^2}{4\pi\rho} \right] \times \left[\omega_0^4 - k^2 \left(V_s^2 + \frac{B^2}{4\pi\rho} \right) \omega_0^2 + k^2 V_s^2 \frac{(\mathbf{k} \cdot \mathbf{B})^2}{4\pi\rho} \right] = 0$$

Существует три решения данного соотношения. Как и в обычной газовой среде *энтропийные волны* описываются нулевой фазовой скоростью, поэтому в этом случае

$$\omega_0 = 0$$

Второе решение соответствует *альвеновским волнам*. Фазовая скорость альвеновских волн зависит от угла между направлением МП и волновым вектором.

$$\omega_0 = \pm \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}}{\sqrt{4\pi\rho}}$$

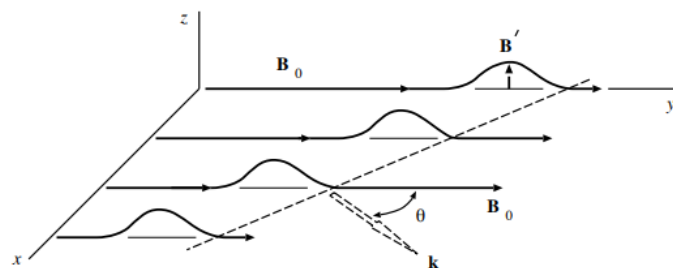


Рисунок 14.2 Поперечные смещения плазмы и магнитного поля в альвеновской волне.

Групповая скорость такой волны (производная частоты по волновому вектору) направлена вдоль МП, то есть энергия распространения в волне направлена туда же, куда и групповая скорость. В то же время, поверхность одной фазы распространяется в том же направлении, что и фазовая скорость (рисунки 14.1, 14.2).

Альвеновская волна представляет собой колебание натянутых линий МП. Между МП в альвеновской волне и физикой твердого тела можно провести следующую аналогию: *магнитные силовые линии выглядят как натянутые струны*. Натяжение в некотором месте струны является начальным возмущением, которое распространится волнообразно вдоль струны. Точно так же в плазме МП встроено в вещество, из-за чего при создании начального возмущения вместе с МП поднимается и вмороженное в него вещество – плазма. Отпуская натянутую линию МП, создается бегущая волна возмущения, которое будет представлять собой поперечную волну, поскольку вектора возмущения МП и поля скоростей в веществе будут перпендикулярны к направлению волнового вектора волны.

В обычной газодинамике естественной волной является звук, который распространяется со скоростью звука, зависящего от динамических параметров среды. Скорость же альвеновских волн не зависит от температуры плазмы, но зависит от напряженности МП.

Третьим решением являются *магнитозвуковые волны*, бывают двух типов: медленные и быстрые. Данные типы волн связаны между собой в дисперсионном соотношении.

$$\omega_{\pm}^2 = \frac{k^2}{2} \left[V_s^2 + \frac{B^2}{4\pi\rho} \pm \sqrt{\left(V_s^2 + \frac{B^2}{4\pi\rho} \right)^2 - 4 \frac{B^2}{4\pi\rho} V_s^2 \cos^2 \theta} \right]$$

Рассмотрим фазовую скорость быстрых (знак +) и медленных (знак -) *магнитозвуковых волн (МЗВ)*, она зависит от сочетания между сочетанием плазменной альвеновской волны и газодинамической звуковой волной.

$$V_{\pm}^2 = \frac{1}{2} \left[V_s^2 + V_A^2 \pm \sqrt{(V_s^2 + V_A^2)^2 - 4V_A^2 V_s^2 \cos^2 \theta} \right]$$

Диаграмма фазовых скоростей (рисунок 14.3) наглядно демонстрирует решения данного соотношения. На фазовой диаграмме направление МП взято за направление оси абсцисс, от МП откладывается угол между фазовой скоростью волны и направлением МП. Длина вектора есть величина фазовой скорости, то есть ее модуль.

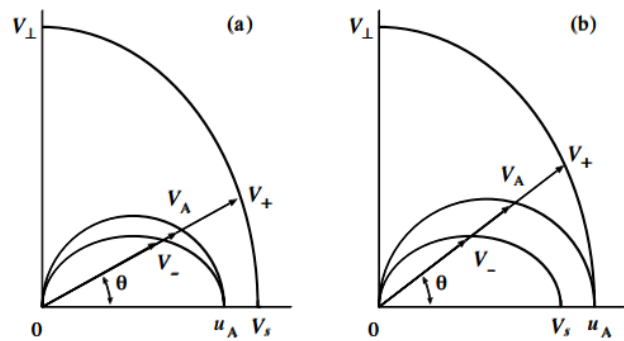


Рисунок 14.3 Фазовые скорости МГД волн в зависимости от угла θ для двух случаев а) $V_s > V_A$ б) $V_s < V_A$

Рассмотрим самую большую дугу на фазовой диаграмме (рисунок 14.3, дальняя дуга от начала координат), она соответствует быстрой V_+ магнитозвуковой волне. На фазовой диаграмме средняя дуга обозначает альвеновскую волну, а наименьшая и ближайшая к началу координат и медленной МЗВ V_- .

Если волна распространяется вдоль МП, то $\cos 0 = 1$ и в выражении получаем

$$V_{\pm}^2 = \frac{1}{2} [V_s^2 + V_A^2 \pm |V_s^2 - V_A^2|]$$

В зависимости от того, какая скорость больше (альвеновская или звуковая), выражение будет принимать различные значения.

$V_s > V_A$, тогда получаем фазовую диаграмму (а) и

$$V_{\pm}^2 = \frac{1}{2} [V_s^2 + V_A^2 \pm V_s^2 - V_A^2] = \begin{cases} V_s^2, & \text{быстрые МЗВ} \\ V_A^2, & \text{медленные МЗВ} \end{cases}$$

$V_s < V_A$, тогда получаем фазовую диаграмму (b) и

$$V_{\pm}^2 = \frac{1}{2} [V_s^2 + V_A^2 \pm V_A^2 - V_s^2] = \begin{cases} V_A^2, & \text{быстрые МЗВ} \\ V_s^2, & \text{медленные МЗВ} \end{cases}$$

В направлении распространения волны вдоль МП альвеновская волна всегда бежит с альвеновской скоростью, поэтому на правом рисунке (b) фазовая диаграмма смыкается с фазовой диаграммой быстрой МЗВ, а на левом рисунке (a) фазовая диаграмма смыкается с фазовой диаграммой медленной МЗВ.

Медленная и быстрая МЗВ по-разному ведут себя при распространении поперек МП. Скорость быстрой МЗВ стремится по модулю к следующему соотношению

$$V_{\perp} = \sqrt{V_s^2 + V_A^2}$$

При распространении волны поперек МП $\cos 90^\circ = 0$. В зависимости от того, какая волна рассматривается, выражение для фазовой скорости будет принимать различные значения.

$$V_{\pm}^2 = \frac{1}{2} [V_s^2 + V_A^2 \pm |V_s^2 + V_A^2|] = \begin{cases} V_s^2 + V_A^2, & \text{быстрые МЗВ} \\ 0, & \text{медленные МЗВ} \end{cases}$$

Так как $V_{\pm} = 0$, медленные МЗВ волны не распространяются в направлении поперек МП. По сравнению с данными диаграммами в обычной газодинамике существует одна выделенная скорость, с которой могут распространяться малые возмущения – скорость звука. В плазменной системе с МП скорости распространения малых возмущений могут изменяться в некотором диапазоне от 0 до наибольшей скорости (альвеновской или звуковой). Быстрая МЗВ распространяется поперек поля быстрее со скоростью поперечного распространения V_{\perp} .

Если МП в среде большое, то $V_s \ll V_A$ и в поперечном направлении распространения МЗВ оказывается приблизительно равной альвеновской скорости, такая ситуация называется **альвеновским звуком** по аналогии с обычным звуком в газодинамике. Звуковая волна изотропна, быстрая МЗВ в сильном МП также изотропна.

Наличие различных скоростей распространения у разных типов волн приводят к возможности преобразования одних волновых возмущений в другие при совпадении их фазовых скоростей. Так, например, альвеновская скорость при распространении вдоль МП имеет возможность преобразоваться в быструю или медленную МЗВ, если $V_s > V_A$. Медленная и альвеновская магнитозвуковые волны при нулевой скорости и распространении поперек МП имеют возможность преобразоваться в энтропийную волну.

Наложение волн: ударная волна. Разрывные решения

Наложение волн друг на друга может быть представлено модельным случаем *трубки и толкающего вперед поршня*. В обычной газодинамике это приведет к наложению волн друг на друга, причем каждая последующая волна будет бежать с большей скоростью, поскольку скорость звука тем выше, чем выше плотность вещества, в котором этот звук распространяется. Отдельные волны, в конечном счёте, сливаются в общий резкий фронт и создают ударную волну. В обычной газодинамике существует только два решения для таких разрывных течений (уравнения газодинамики, описывающие такие течения, терпят разрыв). Сшивка двух решений при различных параметрах основывается на законе сохранения энергии: сколько вещества втекло в разрыв, столько же должно вытечь, то же самое про импульс и энергию.

Такие граничные условия на поверхностях разрыва обычно записываются с помощью математического обозначения – фигурных скобок, обозначающих разность между значениями параметра, указанного в скобках, в положении слева и справа от разрыва соответственно.

$$\{\rho v_x\} = \rho_2 v_{x_2} - \rho_1 v_{x_1} = 0$$

Данная скобка показывает, что при переходе через разрыв поток массы не меняется, т.е. выполняется закон сохранения масс.

Закон сохранения продольной компоненты импульса

$$\{p + \rho v_x^2\} = 0$$

Закон сохранения поперечной к нормали относительно поверхности разрыва компоненты импульса вещества

$$\rho v_x \{v_t\} = 0$$

Закон сохранения энергии (w – удельная энтропия вещества)

$$\rho v_x \left\{ \frac{v^2}{2} + w \right\} = 0$$

Особенность указанных уравнений состоит в том, что в обычной газодинамике данные уравнения распадаются на два независимых случая. Поток массы в последних двух законах сохранения вынесен за скобки, поскольку он также сохраняется. Поток массы v_x может быть равным или не равным нулю.

$v_x = 0$	$v_x \neq 0$
$\{p\} = 0$	$\{\rho v_x^2\} = 0$
$\{\rho\} \neq 0$	$\{p + \rho v_x^2\} = 0$
$\{\mathbf{v}_\tau\} \neq 0$	$\{\mathbf{v}_\tau\} = 0$
$\left\{\frac{v^2}{2} + w\right\} \neq 0$	$\left\{\frac{v^2}{2} + w\right\} = 0$

Тангенциальный разрыв (один поток вещества течет вдоль другого потока вещества без совместного проникновения, получается граница раздела двух движущихся сред) Один поток вещества течет вдоль другого потока вещества с совместным проникновением, остаются граничные условия для ударной волны в обычной гидродинамике

В сравнении с плазменной системой граничные условия сильно изменятся. Появляются следующие дополнительные условия

непрерывность нормальной компоненты МП	$\{B_x\} = 0$
непрерывность тангенциальной компоненты ЭП	$\begin{cases} \{v_x B_y - v_y B_x\} = 0 \\ \{v_x B_z - v_z B_x\} = 0 \end{cases}$
сохранение уравнения для непрерывности массы	$\{\rho v_x\} = 0$
сохранение уравнения для непрерывности продольного импульса	$\left\{p + \rho v_x^2 + \frac{B^2}{8\pi}\right\} = 0$
сохранение уравнения для непрерывности поперечного импульса	$\begin{cases} \left\{\rho v_x v_z - \frac{1}{4\pi} B_x B_z\right\} = 0 \\ \left\{\rho v_x v_y - \frac{1}{4\pi} B_x B_y\right\} = 0 \end{cases}$
сохранение уравнения для энергии	$\left\{\rho v_x \left(\frac{v^2}{2} + w\right) + \frac{1}{4\pi} (B^2 v_x - (\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}) B_x)\right\} = 0$

К указанным уравнениям добавляются слагаемые, связанные с МП. Главное отличие системы, описывающей плазменную структуру, от системы, описывающей газодинамическую структуру, в том, что уравнения не разделяются, никакие множители нельзя вынести за скобки.

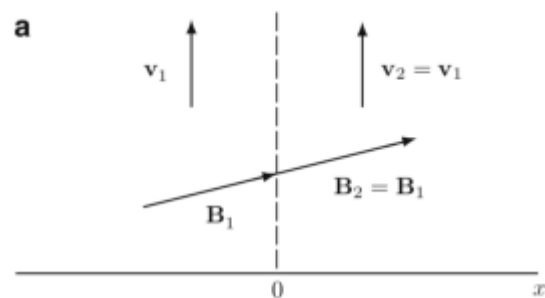
Классификацию различных разрывных решений в плазменной системе основывают на внешних признаках течения вещества, но математически различные типы разрывов не распадаются на отдельные типы уравнений друг от друга относительно граничных условий.

Рассмотрим *типы разрывных решений* в плазменных системах. Для классификации используется соотношение углов между направлением МП до и после разрыва и нормалью относительно положения плоскости разрыва. Введем индексацию для рисунков: все параметры до разрыва имеют индекс 1, после – 2.

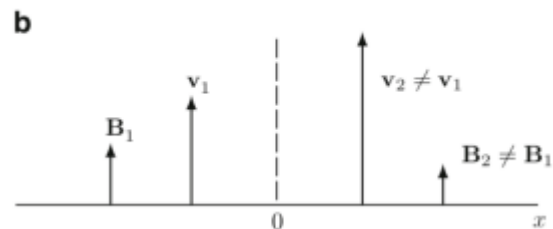
1. Пусть *скорость перетекания вещества через разрыв* $v_x = 0$, то есть вещество не проходит через разрыв. Дополнительные условия принимают следующий вид

$$\{B_x\} = 0, \quad \left\{ \begin{array}{l} \{v_y B_x\} = 0 \\ \{v_z B_x\} = 0 \end{array} \right\}, \quad \left\{ p + \frac{B^2}{8\pi} \right\} = 0 \quad \text{а}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\{ -\frac{1}{4\pi} B_x B_z \right\} = 0 \\ \left\{ -\frac{1}{4\pi} B_x B_y \right\} = 0 \end{array} \right\}, \quad \left\{ -\frac{(\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}) B_x}{4\pi} \right\} = 0$$



В таком случае тип разрыва зависит от того, проникает ли МП через поверхность разрыва.



а) **Контактный разрыв** (рисунок 14.4) – нормальная составляющая МП не равна нулю, контакт происходит между средами с разными температурами, плотностями, но с балансом давлений на поверхности разрыва.

Рисунок 14.4 Поверхности разрывов без перетекания плазмы: (а) контактный разрыв, (б) тангенциальный разрыв

б) **Тангенциальный разрыв** – нормальная составляющая МП равна нулю, скачком меняется плотность, скорость движения вещества, напряженность МП, но с балансом давлений (газодинамических и МП) на поверхности разрыва.

В обычных газодинамических системах тангенциальный разрыв является подверженным *неустойчивости Кельвина-Гельмгольца*.

Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца (рисунок 14.5): на поверхности разрыва появляется возмущение. С той стороны, откуда появилось это возмущение (*прим. на рисунке – снизу*), обнаруживается излишек газодинамического давления, с противоположной – его недостаток, так как вещество огибает появившееся возмущение

и движется в данной области быстрее, становится разреженным. Под действием разницы давлений возмущение увеличивается.

В плазменных системах появляется дополнительное давление МП, которое будет расти с той стороны, куда направлено возмущение. Причиной тому является вмороженность вещества в МП, сжатие такого вещества приводит к сжатию линий МП. При достижении энергии МП примерно 1/4 от тепловой энергии вещества неустойчивость Кельвина-Гельмгольца будет полностью подавляться на тангенциальном разрыве.

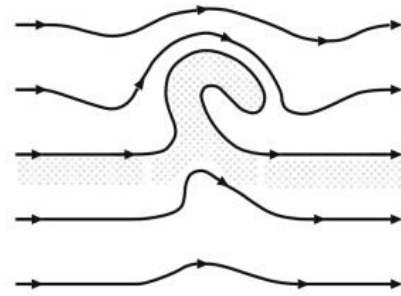


Рисунок 14.5 Формирование турбулентного вихревого течения приводит к росту магнитного поля

2. Пусть вещество течет вдоль линий МП $B_y = 0$, $B_z = 0$, то есть вещество проходит через разрыв, но МП не проникает через него. Дополнительные условия принимают следующий вид

$$\begin{aligned} \{B_x\} &= 0, & \{v_y\} &= 0, & \{v_z\} &= 0 \\ \{\rho v_x\} &= 0, & \{p + \rho v_x^2\} &= 0 \\ \left\{ \begin{aligned} \{\rho v_x v_z\} &= 0 \\ \{\rho v_x v_y\} &= 0 \end{aligned} \right. & \left\{ \rho v_x \left(\frac{v^2}{2} + w \right) \right\} &= 0 \end{aligned}$$

Из системы уходят все составляющие, связанные с МП. В данной ситуации наблюдается *газодинамическая ударная волна*, т.к. вдоль МП вещество не попадает под воздействие МП. Иногда такие разрывные решения называют *параллельные ударные волны*.

3. Пусть МП направлено вдоль поверхности разрыва, вещество течет $v_x \neq 0$, $B_x = 0$. МП вносится веществом за поверхность разрыва. Сжимаясь, вещество будет сжимать и МП. Система уравнений схожа с газодинамической ударной волной, но за давление принимается сумма газодинамического давления и давление МП. Получаем случай *перпендикулярной ударной волны*.

$$\begin{aligned} \{v_x B_y\} &= 0, & \{\rho v_x\} &= 0, & \left\{ p + \rho v_x^2 + \frac{B^2}{8\pi} \right\} &= 0 \\ \{\rho v_x v_y\} &= 0, & \left\{ \rho v_x \left(\frac{v^2}{2} + w \right) + \frac{B^2 v_x}{4\pi} \right\} &= 0 \end{aligned}$$

4. **Вращательный разрыв** отличается сохранением плотности вещества и модуль напряженности МП, направление последнего может меняться, но сохранять величину угла по отношению к перпендикуляру к плоскости разрыва (рисунк 14.6). При переходе через такой разрыв линия МП может оказаться на поверхности конуса с углом раствора, равным углу падающего МП.

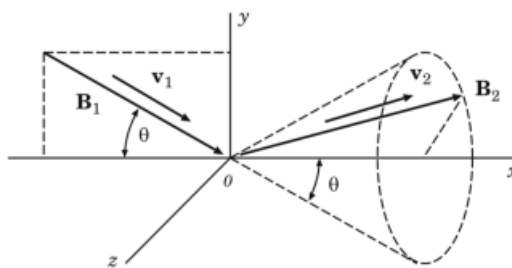


Рисунок 14.6 Альевновский или вращательный разрыв

5. **Плоские разрывы** – $B_x \neq 0$, $v_x \neq 0$, из системы отсчета, движущейся вдоль поверхности разрыва со скоростью де Хоффмана-Теллера, всегда можно перейти к такой системе отсчета, в которой МП и поле скоростей будут совпадать как перед разрывом, так и после него, а также лежать в одной плоскости. Существует несколько подтипов.

а) Быстрые ударные волны – усиление напряженности МП при переходе через разрыв.

б) Медленные ударные волны – ослабление напряженности МП при переходе через разрыв.

В пределе слабых, малых возмущений быстрые и медленные ударные волны соответствуют быстрым и медленным магнитозвуковым волнам. Частные случаи:

а) Ударные волны включения – МП до разрыва перпендикулярно плоскости разрыва, после разрыва получает тангенциальную компоненту

б) Ударные волны выключения – МП до разрыва имеет тангенциальную компоненту, при переходе через разрыв перпендикулярно плоскости разрыва

Переход ударной волны из одного типа в другой. Диффузионный и дрейфовый механизмы ускорения

Ударные волны в плазменных системах могут переходить друг в друга при постепенном изменении характеристик течения. Переходы можно отследить по аналогии с фазовыми диаграммами волн малой амплитуды (рисунк 14.7).

Если в медленной ударной волне МП стремится

- к положению вдоль поверхности разрыва, то она может перейти к тангенциальному разрыву, что является аналогией течения магнитозвуковой волны поперек МП, когда та может перейти к энтропийной волне.

- к положению, перпендикулярному к поверхности разрыва, то в зависимости от того, какая скорость в среде больше, звуковая или альвеновская, возможен переход к параллельной или альвеновской ударной волне.

Ударные волны являются эффективным механизмом ускорения заряженных частиц. Первым механизмом ускорения частиц на ударных волнах является **диффузионный механизм ускорения**, реализуется на параллельных и квазипараллельных ударных волнах.

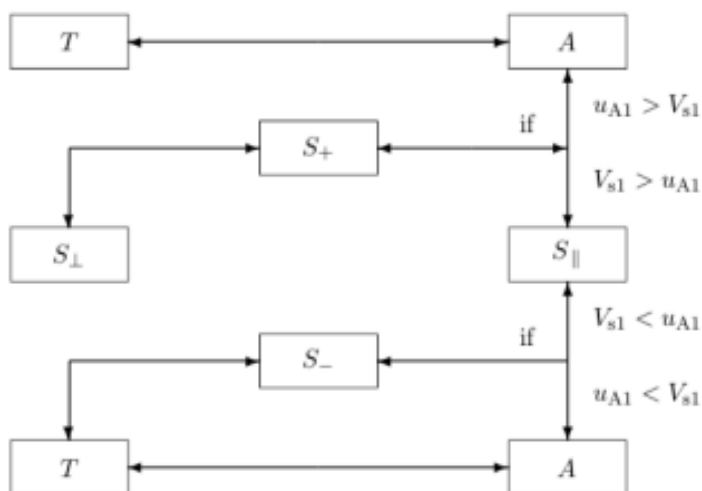


Рисунок 14.7 Схема непрерывных переходов между разрывными решениями в идеальной МГД

Структура ударной

волны: при переходе через поверхность разрыва плотность

вещества претерпевает скачок $\rho_1 < \rho_2$. Не существует волн разрежения, иначе бы энтропия в таком процессе уменьшалась. Плотность вещества растет, поток массы должен сохраняться, поэтому переход через поверхность разрыва сопровождается уменьшением скорости движения вещества. Если в движущемся веществе появятся отражательные элементы, которые будут выполнять роль магнитных зеркал, то получится конструкция, схожая с коллапсирующей магнитной ловушкой. Частицы с высокой эффективностью отражения оказываются запертыми в такой ловушке и, многократно пересекая поверхность ударной волны, на отражениях от магнитных зеркал получают дополнительную энергию (механизм ускорения Ферми первого порядка).

Важно: для существования такого механизма необходимо предполагать, какие именно отражатели существуют в веществе, чтобы заряженные частицы от них отскакивали. Обычно в качестве отражателей рассматривают турбулентности. Кроме того, ударная волна должна долго существовать, чтобы за время её жизни ускоряемая частица успела многократно пересечь фронт ударной волны и испытать множество актов отдельных ускорений, чтобы достичь высоких энергий.

Другой механизм ускорения на ударных волнах – **диффузионный**. Рассмотрим перпендикулярную ударную волну, её поверхность расположена в плоскости ZOY, вещество вдоль OX втекает в ударную волну и вытекает из нее вдоль той же оси. При пересечении фронта происходит сжатие вещества и линий МП – увеличение напряженности МП. Отдельные заряженные частицы движутся по ларморовским орбитам вокруг линий МП. Быстро двигаясь по ларморовской орбите, частица (скорость

которой много больше скорости, с которой поток вещества вносится в разрыв) достигает поверхности разрыва и многократно пересекает ударный фронт.

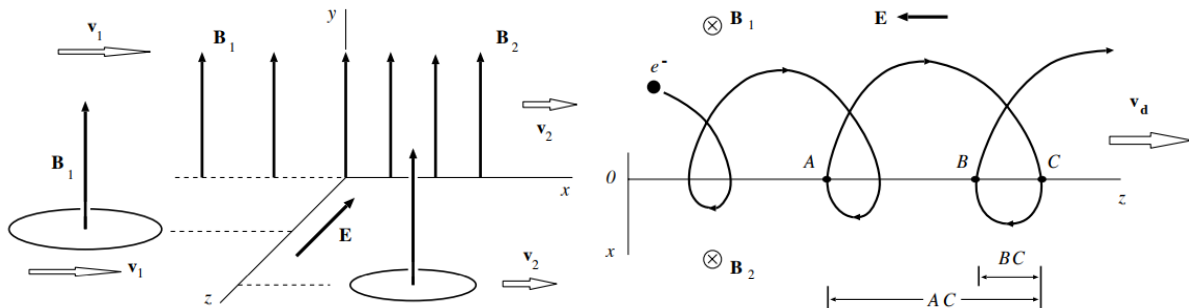


Рисунок 14.8 Левый: Ларморовский кружок движется вместе с плазмой и магнитным полем через фронт перпендикулярной ударной волны. Правый: Траектория отрицательно заряженной частицы (электрона), многократно пересекающей перпендикулярную ударную волну.

Рассмотрим **движение заряженной частицы по ларморовской орбите вблизи ударного фронта** (рисунок 14.8). Смотрим на поверхность ударной волны сверху. Втекающее вещество на рисунке расположено сверху, вытекающее из ударной волны – снизу. Напряженность МП в верхней части ниже, чем сверху, поэтому частица в нижней части своей траектории будет иметь ларморовский радиус меньше, чем в верхней (в связи с выполнением первого адиабатического инварианта). Таким образом, частица при многократном пересечении поверхности разрыва постепенно смещаться вдоль поверхности ударной волны. В ударной волне присутствует тангенциальное электрическое поле, пропорциональное произведению скорости втекания вещества на величину МП перед разрывом. Заряженная частица за каждые пол-оборота будет проходить расстояние вдоль МП большее, чем в нижней полуплоскости. Так, на расстоянии AC частица совершает положительную работу, а на участке BC – отрицательную. За один ларморовский оборот A-B-C частицей будет произведена **положительная работа AB**.

Дрейфовый механизм ускорения частиц по сравнению с диффузионным обладает преимуществом: **не нужно предполагать существование отражателей**. Однако необходимо предположение (как и в диффузионном механизме) о долгом существовании фронта волны. Также для эффективного ускорения частиц требуется начальная высокая энергия частицы.

Некоторые механизмы ускорения могут **сочетать в себе ускорение за счёт диффузионных и дрейфовых механизмов**, а также вовлекать механизмы, рассмотренные для плазмы, рассмотренной с точки зрения кинетического подхода. Рассмотрим случай квазиперпендикулярной ударной волны (быстрой ударной волны, МП которой находится почти в плоскости ударной волны) напряженность МП проходит через поверхность разрыва, возрастает, увеличивается угол наклона МП к нормали $\psi_1 <$

ψ_2 . При увеличении напряженности МП для некоторых частиц с конкретными питч-углами может сработать пробковое соотношение. Ударная волна может сработать как магнитное зеркало. Если частица отразится, то она будет удаляться от поверхности разрыва. В случае небольшого искривления МП в процессе распространения ударной волны, тип ударной волны сменяется от быстрой ударной волны в нижней части *рисунка 14.9* к перпендикулярной ударной волне в центре рисунка и обратно к быстрой ударной волне в верхней части. В такой конфигурации МП реализуется образование магнитной ловушки, в которой в качестве магнитного зеркала выступает ударная волна. На рисунке волна дважды пересекает ударный фронт, если частица окажется внутри магнитной петли, то она отразится от поверхности ударной волны. Течением вещества магнитная петля вносится в ударную волну, поэтому такая ловушка оказывается коллапсирующей. В сжимающейся ловушке вновь работает механизм ускорения Ферми первой степени.

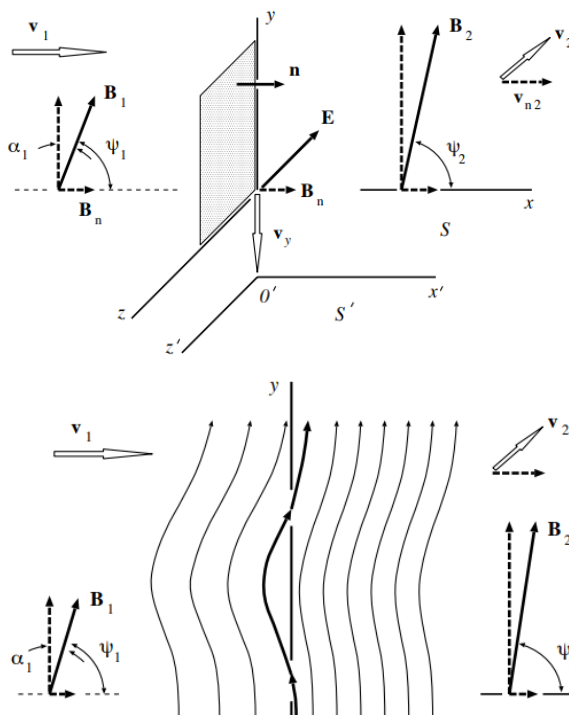


Рисунок 14.9 Квазиперпендикулярная ударная волна. Коллапсирующая магнитная ловушка перед квазиперпендикулярной ударной волной.

Любые сочетания механизмов ускорения являются удобными ввиду своей распространенности для интерпретации различных ускорителей в астрофизике (например, ударные волны в остатках вспышек сверхновых), однако требуют для своей эффективной работы предускоренную популяцию частиц.

Пересоединение в плазме: механизм ускорения

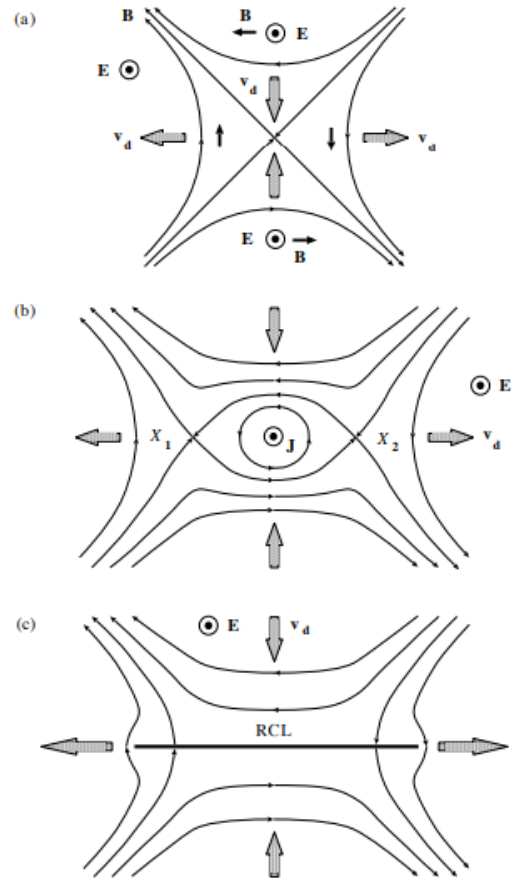
Существует механизм ускорения, работающий в процессах, связанных с солнечными вспышками в процессах пересоединения в токовых слоях, который для своей работы и эффективности не требует выборочности популяции частиц относительно их скорости. Для образования в плазме токового слоя необходимо существование нейтральной точки X-типа, т.к. 2 линии МП скрещиваются.

В слабо неоднородном медленно меняющемся МП на заряженную частицу действуют различные дрейфы, в том числе электрический. Скорость дрейфа направлена перпендикулярно как к электрическому, так и к магнитному полю. ЭП возникает в процессе электромагнитной индукции вблизи нулевой точки, где нарушается вмороженность МП в вещество. ЭП перпендикулярно к внешним МП. Дрейфовое

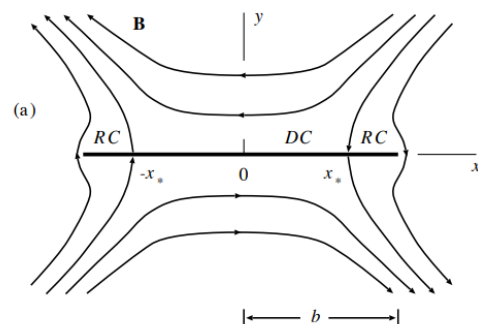
движение вещества вверх и вниз относительно нулевой точки направлено к нулевой точке, а слева и справа – от неё (рисунки 14.10 а). Электрический дрейф создает течение вещества, которое будет заноситься в область нулевой точки сверху и снизу, удаляться от нее – справа и слева. В нулевой точке МП компенсируют друг друга, ЭП действует на свободные заряды в плазме, поэтому в нулевой точке возникнет электрический ток, который своим МП преобразит конфигурацию внешнего МП с формированием пары нулевых точек Х-типа – бифуркация нулевой точки (рисунки 14.10 б). Продляя такой процесс, получаем электрический слой, разделяющий два сталкивающихся магнитных потока, образующих градиент МП (рисунки 14.10 с). Появляется дополнительный, градиентный дрейф частиц, приводящий к появлению электрических токов. Градиентный электрический ток, образующийся вблизи токового слоя, будет частично замыкать электрический ток.

Движение отдельных заряженных частиц около токового слоя (рисунки 14.11)

Введем систему координат, токовый слой лежит в плоскости XOZ , ось OY перпендикулярна токовому слою. В проекции YOZ такой, что OX направлена от наблюдателя, наблюдаем, что под влиянием электрического дрейфа частица будет подталкиваться к токовому слою. Влияние градиентного дрейфа определяется знаком заряженной частицы и направлением МП: из рисунка видно, что по правилу буравчика из закона электромагнитной индукции электрический ток при сближающихся МП будет направлен вправо, значит протоны (+) будут двигаться влево, создавая поток частиц, компенсирующий электрический ток в токовом слое.

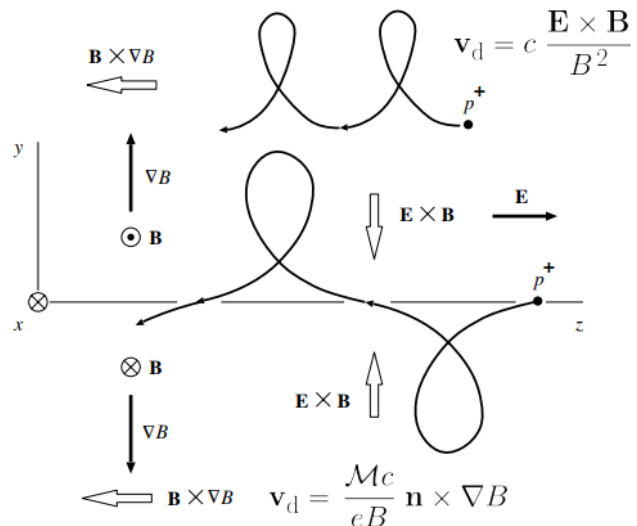


Рисунки 14.10 (а) Течения плазмы, вызываемые электрическим дрейфом в окрестности нулевой Х-точки, т.е. линии вдоль оси z . (б) Появление вторичных Х-точек – бифуркация исходной нулевой точки, вызываемая текущим вдоль оси z током J . (с) Тонкий пересоединяющий токовый слой (RCL).



Рисунки 14.11 Движение отдельных заряженных частиц около токового слоя

Если протон в процессе своего ларморовского движения проникает через токовый слой, то одной из траекторий заряженной частицы будет нижняя линия на *рисунке 14.12*. Частица, проникая сквозь токовый слой, попадает в противоположно направленные МП, поэтому направление её закрутки периодически меняется. Радиус Лармора при этом будет регулярно уменьшаться, потому что напряженность ЭП при удалении от токового слоя возрастает.



Траектория движения частицы зависит от угла, под которым она влетает в токовый слой. Возможны три траектории (*рисунк 14.13*)

Рисунок 14.12 Дрейфовые движения положительно заряженной частицы вблизи нейтральной плоскости $y = 0$ в пересекающем токовом слое. Электрическое поле E заставляет частицы дрейфовать в направлении к нейтральной плоскости как сверху над нейтральной плоскостью, так и снизу.

- Частица влетела под углом $\psi > \psi_0$, частица движется по вышеописанной траектории заряженной частицы. ЭП замедляет такую частицу.
- Частица влетела под углом ψ_0 , величина которого зависит от характеристик токового слоя, от распределения МП в окрестности токового слоя. Частица движется по замкнутой орбите – «восьмерка».
- Частица влетела под углом $\psi < \psi_0$, частица не успевает разворачиваться в полуплоскостях, траектория похожа на «змейку», которая растягивается по направлению ЭП (*рисунк 14.14*). ЭП ускоряет положительно заряженную частицу. При большой протяженности токового слоя частица может ускориться до высоких энергий: электроны солнечных вспышек в токовых слоях ускоряются до релятивистских значений (порядка 0,3 от скорости света).

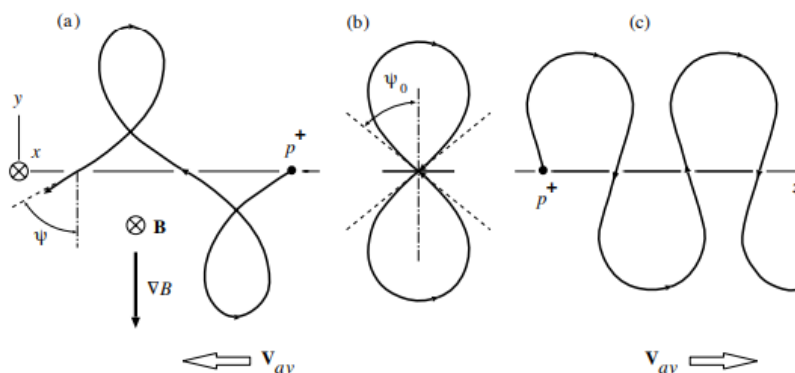


Рисунок 14.13 Змеевидные орбиты положительно заряженных частиц, пересекающих нейтральную плоскость.

Токовые слои являются хорошим кандидатом в качестве механизма первичного ускорения заряженных частиц в астрофизических задачах. Ускорение КЛ на остатках вспышек сверхновых может являться первичным ускорением заряженных частиц в процессе коллапса звезды, когда МП вслед за коллапсирующим веществом быстро преобразовываются, формируют токовые слои и ускоряют частицы до высоких энергий.

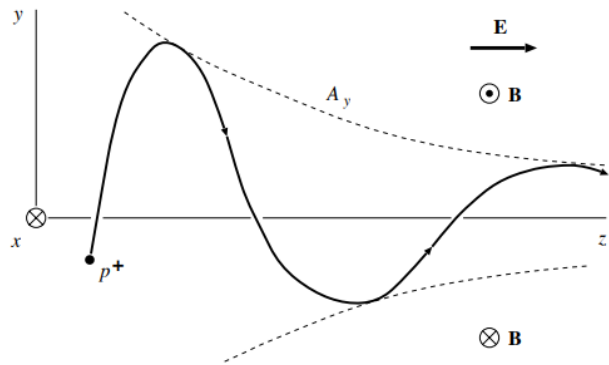


Рисунок 14.14 Траектория положительно заряженной частицы, ускоряемой электрическим полем E в окрестности нейтральной плоскости $y = 0$ внутри нейтрального токового слоя

Список литературы

- Леденцов Л.С., Сомов Б.В. "Лекции по плазменной астрофизике: классические основы теории" (2023)



ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ