

The background of the slide is a high-resolution image of the Sun's surface. It shows the characteristic granular pattern of the photosphere, with bright, irregularly shaped granules separated by darker, sunken lanes. In the lower-left quadrant, a solar prominence is visible, appearing as a dark, filamentary structure extending from the solar limb. The overall color palette is dominated by shades of orange, red, and yellow, reflecting the high temperatures of the solar surface.

Магнитная гидродинамика солнечных явлений

Введение.

- **Магнитная гидродинамика (МГД),**

наука о движении электропроводящих жидкостей и газов в присутствии магнитного поля; раздел физики, развившийся "на стыке" гидродинамики и классической электродинамики.

- **Космическая магнитогидродинамика,**

раздел астрофизики, сформировавшийся в 40-х гг. 20 в., в котором методы магнитной гидродинамики применяются при исследованиях космических объектов: Солнца, звёзд, межзвёздного газа, межпланетной среды, вещества околоземного пространства, содержащих ионизованный проводящий газ (плазму) и магнитные поля. Законы магнитной гидродинамики описывают взаимодействие магнитного поля и движений проводящей жидкости или газа. В проводящем веществе, движущемся поперёк силовых линий, индуцируются токи, поле которых, складываясь с исходным, меняет его структуру. В случае большой проводимости или больших масштабов явления это изменение таково, что силовые линии практически следуют за веществом, проходят через те же частицы («вмороженность» поля в вещество). В случае, когда между двумя противоположно направленными полями расположен тонкий слой газа, силовые линии поля быстро проходят через газ и, взаимодействуя с противоположно направленными линиями, исчезают, аннигилируют. Поле, в свою очередь, влияет на движение плазмы; это взаимодействие описывается как натяжение и поперечная упругость силовых линий. При этом возникают силы, оказывающие сопротивление движениям, ведущим к поперечному сжатию и растяжению силовых линий, которые увеличивают магнитную энергию. В плазме могут распространяться низкочастотные магнитогидродинамические и магнитозвуковые волны.

МГД

- В основе МГД лежат две группы законов физики: уравнения гидродинамики и уравнения электромагнитного поля (уравнения Максвелла).
- Уравнения Максвелла:

$$\operatorname{rot} H = \frac{4\pi}{c} j + \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\operatorname{div} B = 0$$

$$\operatorname{div} D = 4\pi\rho$$

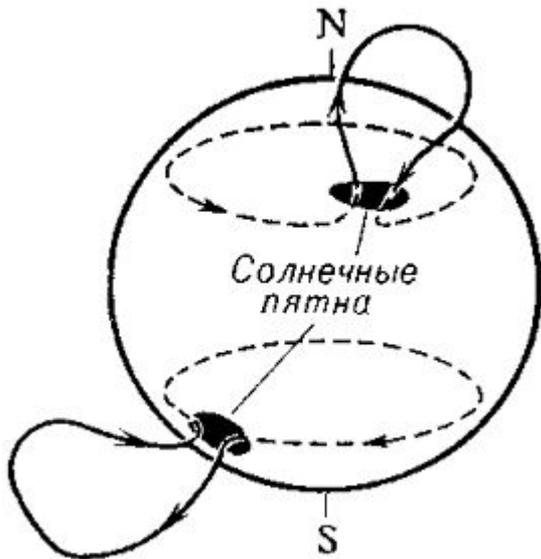
Уравнения гидродинамики

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v) = 0$$

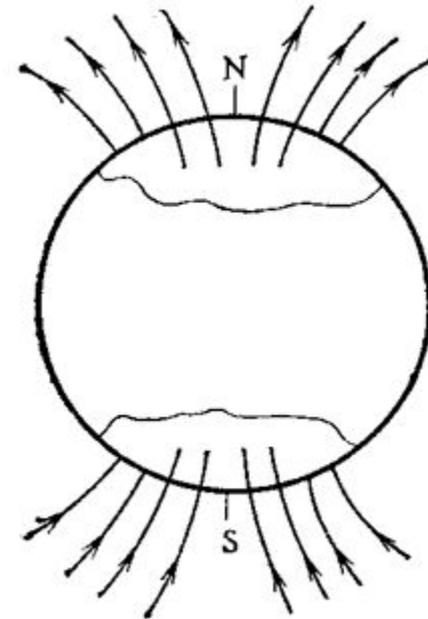
+ ур-ие Эйлера, Навье-Стокса...

Магнитное поле Солнца

Поле в пятнах есть проявление общего азимутального магн. поля Солнца, силовые линии к-рого имеют различное направление в Северном и Южном полушариях Солнца



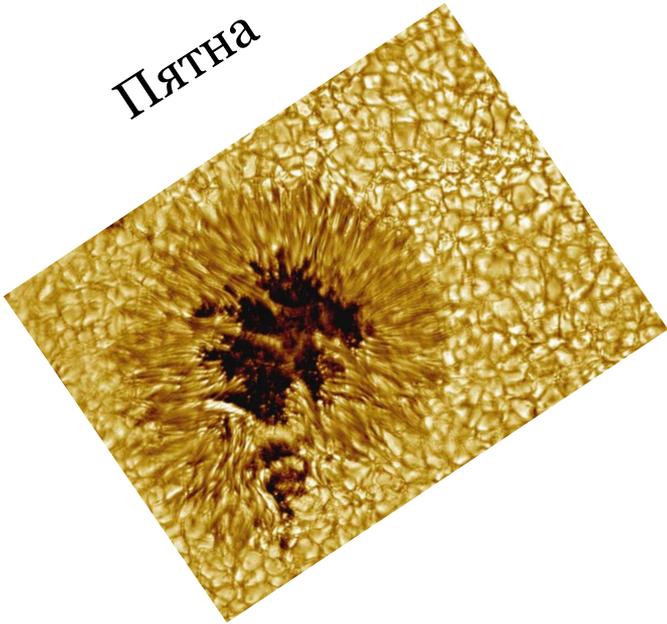
Магнитные поля солнечных пятен, образующиеся благодаря подъёму на поверхность общего подфотосферного азимутального магнитного поля.



Дипольная осесимметричная составляющая крупномасштабного магнитного поля Солнца. Наиболее выражена у полюсов.

Солнечные явления

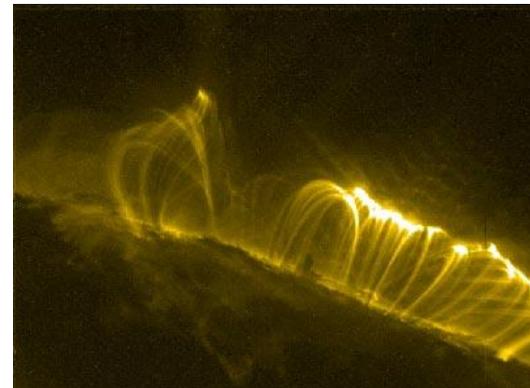
Пятна



Протуберанец

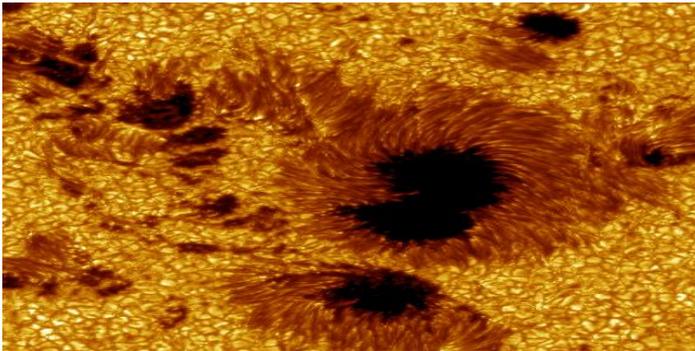


Вспышка



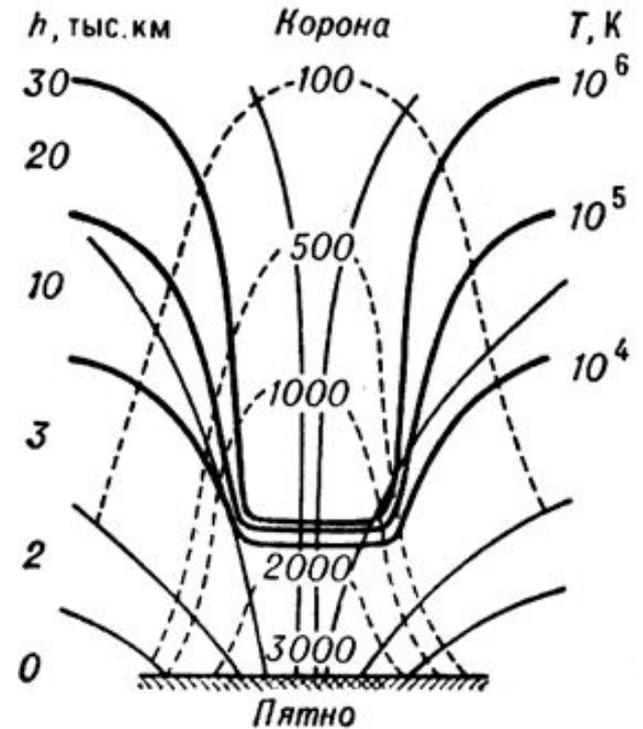
Пятна

Уменьшение потока энергии в пятнах ("чернота" пятен) обусловлено остановкой магн. полем конвективных движений вещества фотосферы. В большой области хромосферы над пятном газ втекает внутрь пятна по отдельным трубкам, совпадающим с силовыми линиями поля.



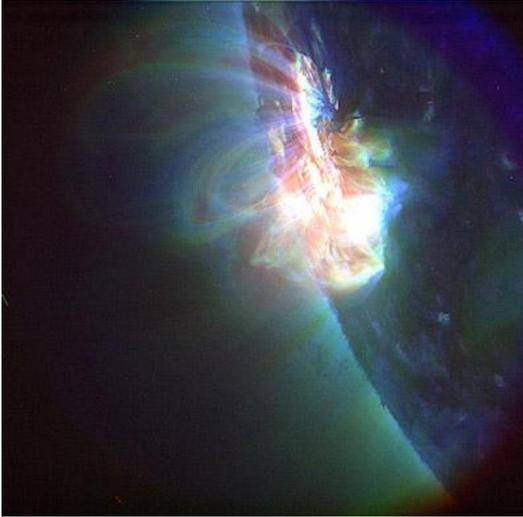
Мельчайшие пятна - поры - имеют диаметры ~1000 км, размеры самых больших из наблюдавшихся пятен - более 100000 км.

Мелкие пятна часто существуют менее суток, развитые - прибл. 10-20 сут, самые большие могут наблюдаться до 100 сут.



Строение солнечной атмосферы над пятном. Тонкие линии - силовые линии магнитного поля H , штриховые линии - линии равной напряженности H в Э, толстые линии - изотермы. Видно, что высокотемпературный корональный газ над пятном опускается до малых высот.

Вспышки

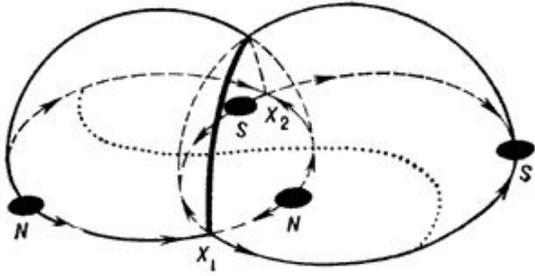


ВСПЫШКИ НА СОЛНЦЕ

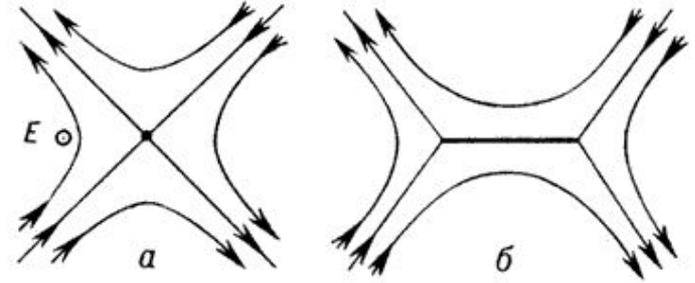
представляют собой самое мощное из всех проявлений солнечной активности. Энергия большой солнечной вспышки достигает 10^{32} эрг

Совр. наблюдения и базирующиеся на них теоретич. модели свидетельствуют в пользу предположения, что главный вспышечный процесс обусловлен накоплением и последующим быстрым выделением свободной магн. энергии в верхней хромосфере и нижней короне. Под свободной здесь понимается магн. энергия, избыточная по сравнению с энергией потенциального (магн. поле потенциально вне области, занятой его источниками) магн. поля, имеющего те же источники (солнечные пятна, фоновые магн. поля) в фотосфере. Иными словами, свободная энергия активной области связана с токами, текущими в атмосфере Солнца над уровнем фотосферы (это есть энергия взаимодействия токов с магн. полем), а процесс вспышки есть процесс быстрого изменения этих токов. Возникновение избытка магн. энергии (и порождающих его токов над фотосферой) может осуществляться различными путями. Возможен, напр., такой. Медленные движения источников (токов) под фотосферой непрерывно изменяют потенциальное магн. поле в атмосфере Солнца. В нек-рый момент оно может стать достаточно сложным - в нём может появиться т. н. предельная силовая линия. Она явл. общей для неск. независимых магн. потоков. Через предельную линию происходит перераспределение магн. потоков, к-рое необходимо для того, чтобы магн. поле имело наименьшую энергию, т. е. оставалось потенциальным при изменении его источников на фотосфере. Однако с момента появления такой линии электрич. поле, индуцируемое изменениями магн. поля, вызывает вдоль неё ток. Последний из-за взаимодействия с магн. полем принимает форму токового слоя. В условиях высокой проводимости солнечной плазмы токовый слой препятствует перераспределению магн. потоков. В результате в верхней хромосфере и короне происходит накопление энергии в виде магн. энергии токового слоя.

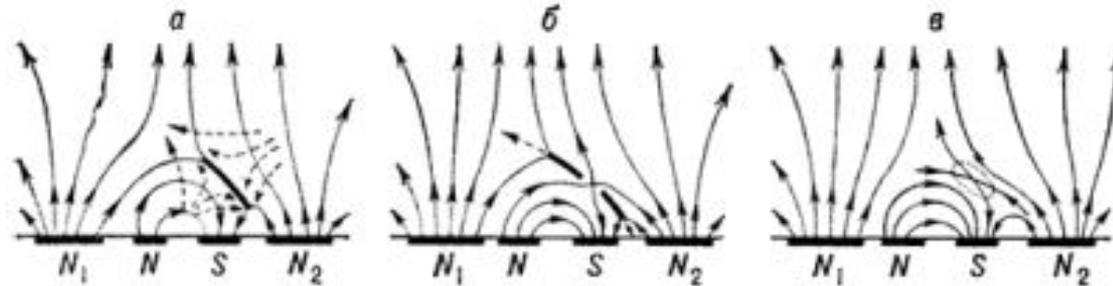
Вспышки



Модель магнитного поля четырёх пятен попарно противоположной полярности. Магнитные потоки разделены поверхностью, состоящей из двух куполов. Предельная силовая линия является общей для этих потоков (жирная линия). Она спускается к фотосфере в нулевых точках X_1 и X_2 . Пунктир - нейтральная линия фотосферного магнитного поля.



Формирование токового слоя на нулевой линии магнитного поля: а - силовые линии магнитного поля в окрестности нулевой линии X-типа, которая перпендикулярна плоскости рисунка; Е - электрическое поле, направленное вдоль нулевой линии; б - токовый слой (жирная линия), образующийся на нулевой линии.



Стадии развития токового слоя (жирная линия) в атмосфере Солнца. Сплошные линии - магнитное поле полюсов N, N1, N2, S, штриховые - движение плазмы с вмороженным магнитным полем: а - квазистационарный предвспышечный токовый слой с кулоновской проводимостью; б - быстрая перестройка (разрыв) токового слоя - взрывная фаза вспышки; в - квазистационарное магнитное пересоединение в области аномального сопротивления - горячая фаза вспышки.

Вспышки

Начальная фаза - сравнительно длительная (часы или даже десятки часов) стадия возникновения и формирования (расширения) токового слоя. На этой стадии, по-видимому, преобладает джоулев нагрев плазмы током в слое. Через нек-рое время из-за действия ряда неустойчивостей баланс энергии нарушается, и начинается существенно нестационарная стадия развития токового слоя.

Взрывная фаза представляег наибольший интерес, поскольку за короткое время (секунды - десятки секунд) при разрыве токового слоя выделяется огромная энергия, запасённая в его магн. поле. Эта энергия выделяется в виде энергии гидродинамич. течений (разрыв слоя сопровождается быстрыми движениями плазмы), мощных потоков тепла из области разрыва токового слоя и в виде энергии ускоренных частиц. Причиной разрыва токового слоя явл., возможно, тепловая неустойчивость, к-рая приводит к цепочке кинетич. явлений: быстрому нагреву электронов плазмы, возбуждению той или иной плазменной неустойчивости и переходу слоя в турбулентное состояние. При этом резко увеличивается электр. сопротивление токового слоя. Появление в нек-рой части токового слоя области высокого или аномального сопротивления приводит к быстрой диссипации тока и, соответственно,- к проникновению магн. поля через токовый слой. Последнее явление сопровождается пересоединением силовых линий магнитного поля, в силу чего оно получило название - магнитное пересоединение. Возникает сильное магнитное поле поперёк токового слоя, которое создаёт магнитную силу, стремящуюся разорвать токовый слой . Под действием этой силы плазма выбрасывается из области слоя с большой скоростью.

Горячая фаза вспышки соответствует стадии существования высокотемпературной корональной области магн. пересоединения. Здесь главным каналом выделения энергии явл. джоулев нагрев плазмы с аномальным сопротивлением. В охлаждении такого высокотемпературного турбулентного токового слоя играют важную роль насыщенные тепловые потоки.

Протуберанцы



Типичный П. имеет вид гигантской светящейся арки, к-рая опирается на хромосферу и образована струями более плотного и холодного, чем окружающая корона, газа. Высота такого П. 15-100 тыс. км при длине 60-6000 тыс. км и толщине всего 4-15 тыс. км.

крупные образования в атмосфере Солнца, отличающиеся от окружающего их вещества повышенной плотностью и пониженной темп-рой; наиболее заметный тип проявления активности в солнечной короне. В моменты полной фазы солнечного затмения они могут наблюдаться невооруженным глазом в виде ярких выступов у края диска Луны (отсюда их название от лат. protuberans - вздувающийся).

Они возникают либо вдали от групп солнечных пятен, либо вблизи них на поздних стадиях их развития. В последнем случае П. (волоконно) располагается по линии раздела полярностей магн. поля активной области или на ее периферии. При этом одним своим концом волокно направлено на ведущее (по вращению Солнца) пятно.

С течением времени волокна медленно смещаются к полюсам Солнца, их длина увеличивается, а ориентация постепенно принимает восточно-западное направление. Примерно через 10 оборотов Солнца волокна достигают полярной области, где могут существовать еще ок. 5 месяцев. Многие спокойные П. переживают активную стадию, длящуюся от десятков минут до неск. суток, нередко заканчивающуюся полным исчезновением П. или превращением его в эруптивный П., т.е. в выброс вещества в корону, происходящий со скоростями порядка неск. сотен км/с. Вещество эруптивных П. может подниматься до высот, сравнимых с радиусом Солнца.

Протуберанцы

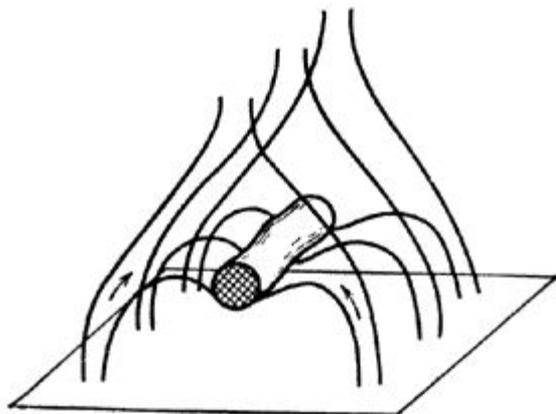


Схема поддержки спокойного протуберанца магнитным полем. Стрелки указывают направление втекания вещества.

Длительное существование П. показывает, что его вещество удерживают магн. силы. Наличие магн. полей в П. напряженностью в неск. сотен эрстед установлено спектроскопическими наблюдениями. Поле в окрестности П. имеет вид анфилады арок. Плазма П. не может свободно двигаться поперек магн. поля, поэтому П. как бы висит на силовых линиях магн. поля. Устойчивость П. объясняется прогибом силовых линий в вершинах арок, которые оказываются в состоянии удерживать вещество П., несмотря на действие силы тяжести. Возникновение этого прогиба силовых линий связано, возможно, с общей конфигурацией магн. поля над П. и выносом части магн. полей солнечным ветром. Накопление вещества П. в образующейся таким путем седловине магн. поля, скорее всего, связано с относительным уменьшением роли магнитогидродинамических волн, нагревающих плазму (до седловины им приходится пройти более длинный путь вдоль силовых линий магн. поля, чем до той же высоты вне арки). Охлаждение вещества в седловине приводит к сжатию газа и засасыванию его через силовые трубки магн. поля из более глубоких слоев. В П. накапливается значительная масса вещества, к-рое затем медленно просачивается вниз в результате различного типа неустойчивостей плазмы. В итоге за 1-2 суток вещество П. может полностью обновиться.



The End