

РОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И РЕКОМБИНАЦИИ В ФОРМИРОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

М.С. Малышев, А.В. Костров

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия
mix.malyshev@yandex.ru

THE ROLE OF ELECTRIC FIELD AND RECOMBINATION IN FORMATION OF SOLAR FLARE IMAGES

M.S. Malyshev, A.V. Kostrov

The Institute of Applied Physics RAS, Nizhniy Novgorod, Russia

Аннотация. Рассмотрена модель, в которой формирование изображений солнечных вспышек связано с рекомбинационным свечением ионов, ионизованных внутри Солнца. В рамках данной модели построены траектории движения ионов над активными областями в электрическом и гравитационном полях. Полученные изображения вспышек представляют собой корональные структуры типа дуги, петли, арки и т. д.

Ключевые слова: электрическое поле, рекомбинация, траектории движения ионов, корональные структуры.

Abstract. We considered a model in which the formation of images of solar flares is associated with recombination luminescence of ions ionized inside the Sun. In the framework of this model, trajectories of ion motion over active regions in electric and gravitational fields are constructed. The resulting images of flares are coronal structures such as arcs, loops, arches, etc.

Keywords: electric field, recombination, trajectories of ion motion, coronal structures.

Введение

В последнее время с помощью космических аппаратов и в наземных наблюдениях получена достаточно полная совокупность данных по солнечным вспышкам в различных областях электромагнитного спектра, а также по ионному составу солнечного ветра.

По спектральным линиям высокоионизованных элементов были обнаружены различные коронарные структуры. Доминирующими элементами внутренней структуры короны являются яркие петли и дуги. Аппарат TRACE обнаружил, что спокойная корона Солнца, состоит из тонких петель, которые имеют сложную динамику и непрерывно развиваются.

На основании исследований рентгеновского излучения в диапазоне длин волн от нескольких единиц до нескольких сотен ангстрем был сделан вывод, что температура короны, даже спокойной, очень высока, и, что многочисленные наблюдаемые спектральные линии высокой кратности (железа, кремния, кислорода, кальция, магния и других элементов) обусловлены ионизацией и возбуждением ионов электронным ударом. Установлено, что чем выше степень ионизации иона, тем на большей высоте наблюдается его излучение. Отсюда было получено, что температура короны Солнца растет с увеличением высоты (см. рис. 1).

В данной работе обращается внимание на спектральные наблюдения излучения короны Солнца, которые свидетельствуют, что чем выше степень ионизации конкретного иона (железо, магний, кремний и др.), тем на большей высоте регистрируется его излучение, т. е. чем меньше электрическая масса M/Z (где M – масса иона, Z – кратность заряда иона), тем выше он поднимается во время вспышек над по-

верхностью Солнца. Влияние электрической массы на движение иона указывает на тот факт, что его движение происходит в электрическом и гравитационном полях. В активных областях Солнца появление энергичных электронов приводит к созданию электрического поля, которое может достаточно эффективно ускорять ионы различной степени ионизации в корону Солнца. Многочисленные лабораторные эксперименты также свидетельствуют, что в нестационарной плазме процессы ионизации и рекомбинации могут быть разнесены в пространстве и во времени (например, *afterglow plasma*). Таким образом, при движении многозарядных ионов (ионизованных внутри Солнца) в гравитационном и электрическом полях вследствие рекомбинации в короне Солнца может освобождаться электромагнитная энергия в виде непрерывного и линейчатого излучения.

Ионы химических элементов ускоряются в электрическом поле и переносят в корону потенциальную энергию, запасенную при ионизации внутри Солнца. Эта энергия при движении ионов в электрическом и гравитационном поле, вследствие рекомбинации, может освобождаться в короне Солнца в виде непрерывного и линейчатого излучения. При рекомбинации температура (средняя энергия) электронов значительно меньше потенциала возбуждения и ионизации наиболее представленных многозарядных электронов, поэтому регистрация высокоэнергичных квантов излучения не несет никакой информации о температуре электронов в Короне Солнца.

Структура электрического поля может быть различной. Именно это различие и определяет всевозможные наблюдаемые изображения вспышек на поверхности Солнца: дуги, петли, арки и т. д.

В данной работе была поставлена задача: построить траектории движения ионов разной степени ионизации в электрическом и гравитационном полях, которые были бы максимально похожи на наблюдаемые структуры солнечных вспышек. Траектории движения можно получить, решив уравнение движения для ионов:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{Ze\vec{E}(\vec{r})}{M} + \vec{g}(\vec{r}), \quad (1)$$

где M и Z — масса и заряд иона, соответственно, $\vec{E}(\vec{r})$ — неоднородное электрическое поле над активной областью, $\vec{g}(\vec{r})$ — ускорение свободного падения. Точное решение задачи о движении и рекомбинации ионов в пространственно неоднородном электрическом поле с учетом силы тяжести, столкновений перезарядки, влияния пространственного заряда достаточно сложная проблема и требует специального рассмотрения. Однако простейший анализ решения уравнения (1) в заданном двухмерно-неоднородном электрическом поле позволяет получить разнообразные траектории движения ионов, которые могут иметь вид арок, стримеров, корональных лучей.

Видно, что движение иона против силы тяжести определяется величиной и пространственной структурой электрического поля $\vec{E}(\vec{r})$, а также электрической массой иона M/Z . Определим структуру электрического поля над активной областью.

Для построения электрического поля необходимо знать распределение пространственных зарядов в активной области и над ней. Было высказано следующее предположение: электроны, вылетев с поверхности Солнца, образуют объемный заряд, в основном сконцентрированный на некоторой высоте. Между положительными и отрицательными зарядами создается электрическое поле бочкообразной формы. По своей конфигурации это поле напоминает поле плоского конденсатора с характерными размерами «пластин» $L=200$ тыс. км (расстояние на поверхности Солнца) и $D=50$ тыс. км (высота над поверхностью Солнца). Вблизи поверхности Солнца появляется тангенциальная компонента электрического поля, которая связана с токами компенсации заряда, возникающими на поверхности Солнца и распространяющимися вдоль нее.

Для описания электрического поля требовалось найти универсальные формулы для модуля поля и угла φ к вертикальной оси Y (см. рис. 2), с помощью которых можно было бы построить абсолютно все модельные траектории движения ионов. Для решения такой задачи был выдвинут целый ряд утверждений.

Электрическое поле почти полностью концентрируется над активной областью, т.е. модуль поля внутри данной области пространства остается практически неизменным, а вне — быстро падает при увеличении координаты по модулю. Поскольку распределение поля в нашей модели двумерное, нужно определить законы спада модуля поля в

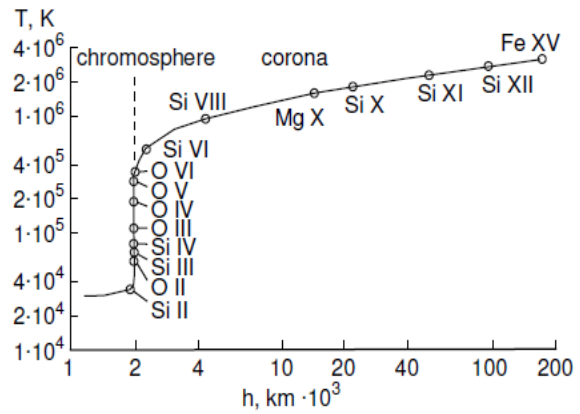


Рис. 1. Распределение температуры электронов в переходной области и солнечной короне. [Gibson, 1973]

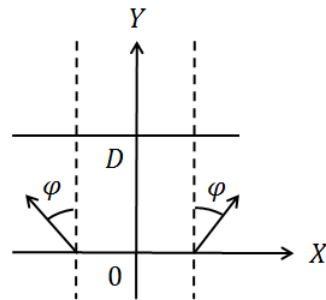


Рис. 2. Направление электрического поля в некоторой точке вблизи поверхности Солнца. Координата x определяет расстояние на поверхности Солнца от центра вспышки, координата y определяет высоту над поверхностью Солнца

зависимости от координаты x и y . Самым оптимальным оказался экспоненциальный спад поля по координате X и квадратичный спад поля по координате y .

На основании вышеизложенных рассуждений были получены формулы для модуля и направлении электрического поля:

$$|\vec{E}| = E_0 \left(\left(\frac{x}{L} \right)^2 + \alpha \right) \exp \left(- \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right) \frac{D^2}{D^2 + y^2} \quad (2)$$

$$\sin \varphi = \sin(x) \left(\frac{2 - \beta^{\frac{|x|}{L}}}{1 + \gamma \frac{y^2}{D^2} \left(1 - \beta^{\frac{|x|}{L}} \right)} - 1 \right) \quad (3)$$

В эти формулы входят четыре варьируемых параметра — E_0 , α , β , γ . Меняя каждый из этих параметров, можно изменить конфигурацию электрического поля, а вместе с ней и траекторию движения ионов.

Моделирование траекторий движения ионов в электрическом и гравитационном полях на основе изображений солнечных вспышек

Как уже было сказано, чтобы решить уравнение (1) и найти траектории движения ионов в электрическом и гравитационном полях, нужно задать не только неоднородное электрическое поле $\vec{E}(\vec{r})$, но и электрическую массу иона M/Z . В первой части

работы показано многообразие траекторий, по которым могут двигаться ионы химических элементов (см. рис. 3–4). Во всех случаях была взята одна и та же линия излучения иона железа Fe X с электрической массой $M/Z=5.6$. Отметим, что полученные траектории весьма похожи на структуры вспышек на поверхности Солнца.

В формулы для электрического поля (2)–(3) входят параметры $E_0=0.00006$, $\alpha=0.2$, $\beta=0.2$, $\gamma=50$.

В формулы для электрического поля (2)–(3) входят параметры $E_0=0.00023$, $\alpha=0.7$, $\beta=0.2$, $\gamma=10$.

Во второй части работы показана зависимость структуры траекторий движения от электри-

ческой массы иона M/Z (см. рис. 5). Важным условием здесь является неизменность конфигурации электрического поля. Как и ожидалось, легкие ионы или покидают атмосферу Солнца, или летят по очень высокой траектории, а тяжелые ионы не могут преодолеть гравитационное поле, и их траектория движения оказывается прижатой к поверхности Солнца. Также отметим, что ионы с различной электрической массой летят по абсолютно разным траекториям. Это значит, что изображения солнечной короны, полученные во время вспышек в линиях излучения ионов различных химических элементов, могут сильно отличаться друг от друга.

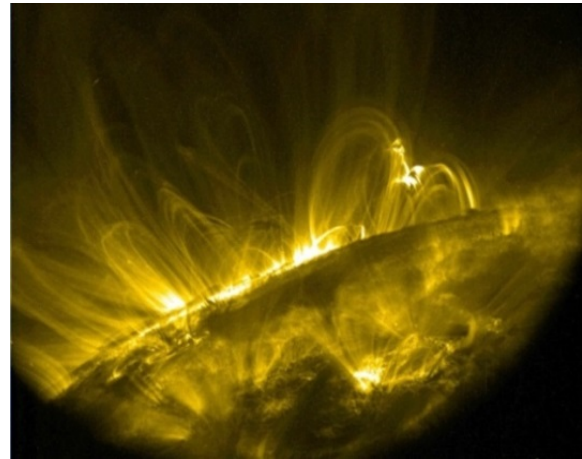
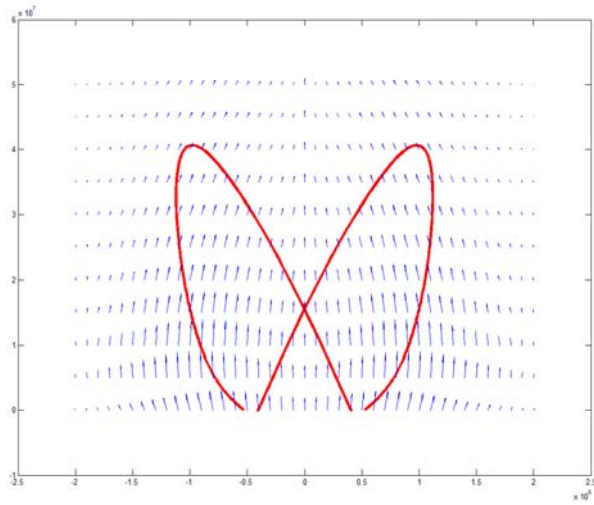


Рис. 3. Траектория движения ионов (слева) и изображение вспышки на Солнце

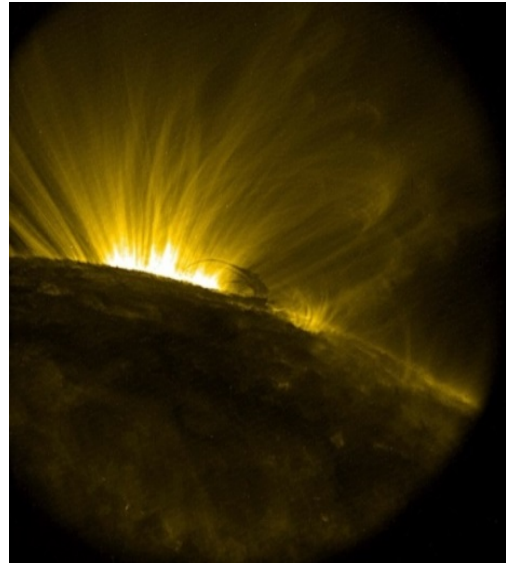
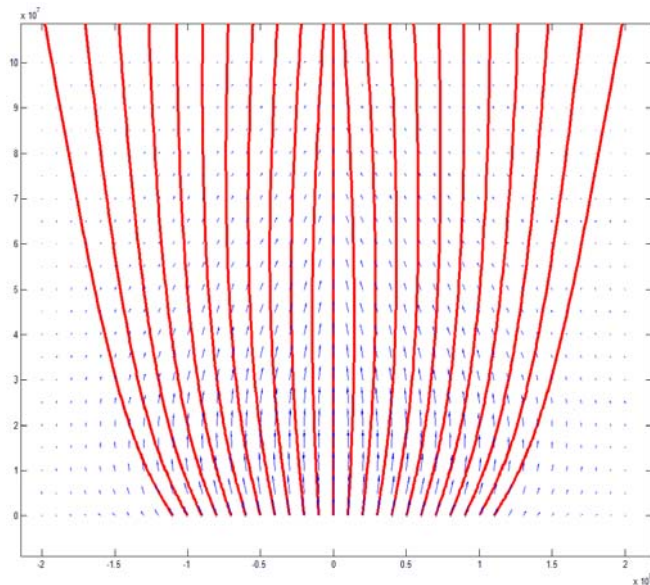


Рис. 4. Траектория движения ионов (слева) и изображение вспышки на Солнце

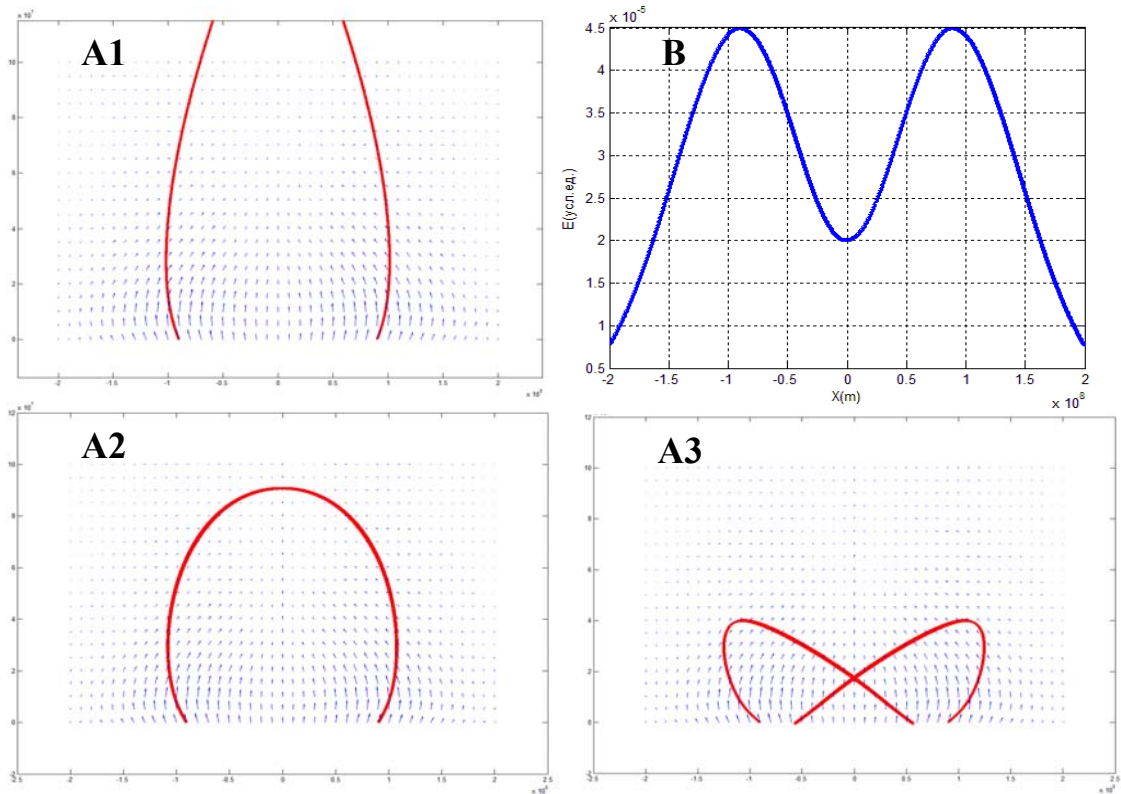


Рис. 5. A1, A2, A3 — траектории движения ионов с электрической массой $M/Z=2$, $M/Z=5.6$ и $M/Z=9$ соответственно; B — зависимость модуля поля от координаты X ; В формулы для электрического поля (2)–(3) входят параметры $E_0=0.0001$, $\alpha=0.2$, $\beta=0.35$, $\gamma=50$

Заключение

На основе изображений солнечных вспышек было построено двумерное распределение электрического поля вблизи активных областей. При решении уравнения движения, куда входит данное неоднородное электрическое поле, были найдены различные траектории движения ионов. Все модельные траектории, представленные в данной работе, весьма похожи на реальные изображения вспышек на поверхности Солнца, что подтверждает важную роль электрического поля в их формировании.

Движение ионов различных элементов в электрическом поле против силы тяжести зависит от электрической массы ионов M/Z . При заданном электрическом поле покинуть атмосферу Солнца, в первую очередь, могут электрически легкие ионы. Электрически тяжелые ионы останавливаются в хромосфере или короне Солнца и определяют структуру и спектр излучения конкретной вспышки. Рост «кажущейся» температуры короны Солнца с высотой, связан с подъемом на большую высоту высокоионизированных ионов, с малой электрической массой и излучением при рекомбинации характеристического линейчатого спектра иона.

Список литературы

Gibson E.G. The Quiet Sun. 1973. 356 p.