УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ

Мерзляков В.Л.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

CONDITIONS FOR ORIGIN OF THE NONTHERMAL SOURCES OF AN ACTIVE REGION

Merzlyakov V.L.

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, RAS,
Moscow, Troitsk, Russia*

Current sheets of local magnetic source in the active region of the Sun are studied. The sheets can arise in the solar corona above a magnetic neutral line and in the chromosphere. At these sheet places the charge particles are accelerated by vortex electric field. The magnetic source that is connected with mesogranulation convection creates the electric field $E_s \sim 10^4$ (CGS). The plasma instability in the coronal place of acceleration is arisen by the E_s . This instability limits the electron energy to ~ 10 keV. In the chromospheric place of acceleration the electron can take the energy to ~ 100 keV. These processes of particle acceleration restricted by mesogranulation life time $\approx 10^3$ s. Such time-dimension and energetic scales of the studied phenomenon correspond to the properties of solar flare.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-209-212

Введение

В атмосфере Солнца происходит ускорение частиц плазмы. Ускорение имеет либо постоянный характер, что нагревает корону, либо это эпизодическое явление в активных областях. Эпизодическое явление наблюдается как солнечная вспышка [1]. Предлагаются различные механизмы такой вспышки [2], среди которых наиболее эффективным является токовый слой. Однако реализация такого слоя в солнечной атмосфере имеет серьёзные трудности [3].

В настоящем исследовании предлагается новая концепция формирования токового слоя. Высказывается предположение, что такой слой может возникнуть от действия зон локального усиления магнитного поля мелко-масштабной конвекцией. Усиление фотосферного магнитного поля в таких местах возможно до 10 раз [4], и в некоторой окрестности такие зоны являются определяющими конфигурацию магнитного поля. И эта конфигурация может иметь магнитную особенность X-типа, которая необходима для появления токового слоя.

Модельные построения

Изучаемый вспышечный процесс продолжается, обычно, $\sim 10^3$ сек и занимает область $\sim 10^4$ км. При таких временных и пространственных масштабах естественно связать этот процесс с действием конвекции мезоградуационного масштаба. Для появления магнитной особенности X-типа наиболее благоприятна область около нейтральной линии активной области. Здесь фотосферное магнитное поле ориентировано горизонтально, что позволяет его эффективно локально усиливать [4]. Кроме того, эти зоны по разные стороны от нейтральной линии имеют противоположные полярности. И это приводит к созданию магнитного источника со сложной конфигурацией. В такой конфигурации должна присутствовать октупольная гармоника, которая совместно с дипольной и формируют X-особенность. Силовые линии этой X-особенности изображены на рис. 1. Стрелками на рис. 1 показаны направления вектора магнитного поля. Особенность X-типа (рис. 1) имеет вид дуги и располагается в плоскости перпендикулярной дипольному моменту магнитного источника.

Рис. 1.

Рис. 2.

Во время усиления конвекцией магнитного поля естественно увеличивается дипольная гармоника изучаемого магнитного источника. В результате изменения величины дипольной гармоники возбуждается вихревое электрическое поле. Это поле E_ϕ ориентировано по координате ϕ в системе координат, привязанных к дипольному моменту магнитного источника. Такое же направление в пространстве имеет X-особенность (рис. 1). В таком случае, в окрестности X-особенности, где нарушается вмерзность плазмы, возникает токовый слой. И в этом слое под действием электрического поля E_ϕ ускоряются частицы плазмы.

Помимо ускорения частиц происходит дрейфовое перемещение окружающей плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях $[\mathbf{E} \times \mathbf{B}]$. Расчеты показали, что в результате такого дрейфа плазма локально уплотняется в виде петли (рис. 2). Со временем высота петли уменьшается. На рис. 2 также показано расположение X-особенности в виде тонкой трубки.

Важно отметить, что оно всегда расположено выше локально уплотненной петельной структуры.

Внешнее магнитное поле искажает наблюдаемую картину рис. 2, и если оно превышает $\approx 10\%$ относительно поля, создаваемое конвективным магнитным источником, то петельная структура не образуется. Помимо этого внешнее магнитное поле разрушает и магнитную X-особенность (рис. 1). Конфигурация вида рис. 1 сохраняется в местах, где внешнее поле направлено по ϕ координате. Эти места находятся над нейтральной линией в короне и две области в хромосфере (основания X-особенности на рис. 2).

Корональная область ускорения

В случае симметричной магнитной конфигурации у источника возможно рассчитать величину вихревого электрического поля из аналитического выражения [5]:

$$E_{\phi} = -(1/c) \cdot (\partial B / \partial t) \cdot r, \quad (1)$$

где c – скорость света, r – расстояние до источника, $\partial B / \partial t$ – временная производная магнитного поля на расстоянии r .

Наблюдения показывают, что корональный источник ускоренных частиц находится на высотах $\sim 10^4$ км. Наш конвективный магнитный источник расположен на глубине $\approx 10^3$ км. В таком случае для оценки поля (1) берем $r = 10^4$ км. На этих высотах напряженность магнитного поля, как полагают, находится в пределах $\sim 1 - \sim 10$ Гс. Тогда и увеличение этого поля ΔB за время существования магнитного источника (время жизни мезогранулы $\Delta t \approx 10^3$ сек) должно быть того же порядка. Отсюда имеем среднюю величину временной производной $\partial B / \partial t = \Delta B / \Delta t \sim 10^{-3} - 10^{-2}$ [СГС]. С учётом принятого расстояния для r электрическое поле из (1) $E_{\phi} \sim 10^{-4}$ [СГС].

Характер ускорения зависит от соотношения величин поля E_{ϕ} и поля Драйсера E_D . Последнее зависит от температуры электронов T_e и плотности n , в системе СГС эта зависимость имеет вид:

$$E_D \approx 2 \cdot 10^{-10} n / T_e \quad (2)$$

Для корональной плазмы с температурой $T_e \approx 10^6$ К и плотностью $n \approx 10^8$ см $^{-3}$ поле Драйсера согласно формуле (2) $E_D \approx 10^{-6} \ll E_{\phi} \sim 10^{-4}$. Значит, ускорение электронов будет происходить без торможения протонами. Но в таком режиме обязательно возникнет неустойчивость, которая и создаст тормозящее действие. Для нашего случая магнитного поля, ориентированного вдоль токового слоя (X-особенности), наиболее вероятно возбуждение неустойчивости Драммонда-Розенблюта. При этой неустойчивости эффективная частота столкновения $\nu_{\text{eff}} =$ циклотронной частоте протона, величина которой в поле ≈ 1 Гс равна $\approx 10^4$ сек $^{-1}$. Тогда ускоренный электрон может набрать скорость $eE_{\phi} / m_e \nu_{\text{eff}} \approx 5 \cdot 10^9$ см/с, что соответствует приобретенной энергии ~ 10 КэВ.

Хромосферная область ускорения

Поле Драйсера в средней хромосфере Солнца ($T_e = 10^4$ К, $n = 5 \cdot 10^{11}$ см⁻³) $E_D \approx 10^{-2}$ согласно (2). Эта величина много больше $E_\phi \sim 10^{-4}$, что означает торможение электронов протонами с эффективной частотой $\nu_{ep} \approx 30n_p T_e^{-3/2}$.

До столкновения с протоном электрон набирает дополнительную энергию $m_e \delta V^2 / 2 = e^2 E_\phi^2 / (m_e \nu_{ep}^2) = 0.01$ эВ. И такая дополнительная энергия растёт пока электрон продолжает движение в токовом слое. Однако есть предел этому росту по достижении состояния «убегания». Это состояние наступает, когда поле Драйсера (2) станет меньше до ускоряющего поля $E_\phi \sim 10^{-4}$. Этот предел наступает по достижению температуры $T_e \approx 3 \cdot 10^6$ К. После достижения электронами такой температуры частота столкновения с протонами уменьшится до $\nu_{ep} = 3 \cdot 10^3$ сек⁻¹. И это позволит электрону набрать энергию ~ 100 КэВ. Такие энергичные электроны переходят в состояние «убегания», что приводит к возбуждению неустойчивостей, которые и ограничивают дальнейший набор энергии электронами.

Выводы

Рассмотренная ситуация с токовым слоем от зон локального усиленного магнитного поля воспроизводит наблюдаемые эффекты солнечной вспышки [1]. Области ускорения частиц возникают в короне над нейтральной линией и в хромосфере, где появляются два места вследствие геометрии X-особенности (рис. 2). Энергетические возможности корональной области ускорения намного меньше, чем в хромосферных местах.

Кроме того, ниже корональной области ускорения возникает плотное образование в виде петли (рис. 2). И высота этой петли уменьшается в процессе вспышки.

Помимо указанных вспышечных проявлений вариант магнитной X-особенности позволяет разрешить проблему нехватки электронов во время вспышки. В случае конфигурации X-типа (рис. 1) по силовым магнитным линиям в область ускорения постоянно поступают электроны из окружающей плазмы.

Литература

1. Benz A. O. // Living Rev. Sol. Phys., 2017, v. 14, p. 2.
2. Fletcher L., Dennis B.R., et al. // Space Sci. Rev., 2011, v. 159, pp. 19–106.
3. Подгорный А.И., Подгорный И.М. // Астрон. Журн., 2006, т. 83, № 10, с. 940–949.
4. Getling A.V., Ishikawa R., Buchnev A.A. // Adv. Space Res., 2015, v. 55, pp. 862–870.
5. Молоденский М.М., Мерзляков В.Л. // Письма Астрон. Журн., 2002, т. 28, № 4, с. 314–320.