ПЛАЗМЕННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ КАК ПРИЧИНА ОГРАНИЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ УСКОРЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ХРОМОСФЕРНОМ ИСТОЧНИКЕ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

Мерзляков В.Л.

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

PLASMA UNSTABILITY LIMITS THE ENERGY OF ELECTRONS IN CHROMOSPHERIC SOURCE OF SOLAR FLARE

Merzlyakov V.L.

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

There is an energy limit for electrons of a solar flare. It is suggested that the limit is due to plasma instability. This instability is excited by accelerated electrons under condition when electric field is more than Dreicer field. The formula for electron energy for this condition was obtained. The maximum electron energy is a line relation with electron temperature. From observing temperature of the flares of M, X classes this maximum is about 1 MeV.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-197-198

Введение

Основное энерговыделение солнечной вспышки происходит в хромосферном источнике. Для оценки выделяемой энергии необходимо, в частности, знать максимальную энергию ускоряемых электронов. А также иметь зависимость этой энергии от класса солнечной вспышки. Предлагается оценить указанный параметр, исходя из анализа режимов ускорения электронов.

Режимы ускорения

В качестве модели солнечной вспышки рассмотрим представление об ускорении частиц в области магнитной особенности X-типа [1]. Эта особенность возникает от взаимодействия зон локального усиления магнитного поля вблизи нейтральной линии активной области. Возбуждаемое этими зонами вихревое электрическое поле (E) ориентировано преимущественно вдоль X-особенности, оно и ускоряет заряженные частицы. Максимальная энергия (W_e), которую приобретают электроны в процессе такого ускорения, зависит от частоты столкновения с протонами ν_{ep} . Величина этой энергии определяется выражением:

$$W_e = e^2 E^2 / 2m_e \nu_{ep}, \quad (1)$$

где e , m_e – заряд и масса электрона.

В результате набора энергии во время ускорения и столкновений с протонами температура электронов увеличивается. И наступает момент, когда вихревое электрическое превысит поле Драйзера (E_D). С этого момента электроны переходят в режим убегания. В этом режиме возбуждается плазменная неустойчивость, вследствие которой электроны эффективно передают энергию волнам, а сами тормозятся. Наиболее быстро возбуждается Бунемановская неустойчивость с частотой столкновения $\nu_{\text{eff}} \approx 2n_p^{1/2} \sim 10^8 \text{ с}^{-1}$. При такой частоте столкновения нетепловая энергия электрона не превышает 1 эВ (1).

Исходя из вышесказанного, предельная величина энергии для ускоряемого электрона определяется условием $E \sim E_D \approx 2 \cdot 10^{-10} n / T_e$. Подставляя в выражение (1) E_D и частоту столкновения с протонами $\nu_{\text{ep}} \approx 30 n_p T_e^{-3/2}$, получаем формулу для величины предельной энергии электрона:

$$W_e < 3 \cdot 10^{-2} T_e [\text{эВ}]. \quad (2)$$

По данным работы [2] наибольшая электронная температура у вспышек класса X $\approx 45 \cdot 10^6 \text{ К}$. При такой температуре из формулы (2) находим величину ограничения на нетепловую энергию электрона $\leq 1.4 \text{ МэВ}$. Оказалось, что для классов вспышек C5 – X1 имеется небольшой разброс около средней температуры $25 \cdot 10^6 \text{ К}$ [2], что означает отсутствие зависимости максимальной энергии электронов от класса вспышки. А величина этой энергии 0.8 МэВ (2) мало отличается от предельного значения для вспышек класса X.

Выводы

В модели солнечной вспышки [1] получена оценка величины предельной энергии ускоряемых электронов. Это ограничение происходит из-за плазменной неустойчивости, которая возбуждается вследствие перехода электронов в режим убегания. Получена формула для предельной энергии в момент наступления неустойчивости. Эта предельная энергия, как оказалось, линейным образом зависит от электронной температуры. По наблюдательным данным о температуре для вспышек класса C5 – X8 получается, что предельное значение энергии электронов составляет $\approx 1 \text{ МэВ}$.

Литература

1. Мерзляков В.Л. // Труды Всероссийской конф. “Солнечная и солнечно-земная физика – 2020”, СПб, ГАО РАН, 2020, с. 209-212.
2. Warmuth A., Mann G. // Astron. and Asrtophys., 2016, v. 588, A115 (14 pp.).