

ОБЛАСТИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ

Мерзляков В.Л., Старкова Л.И.

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

ENERGY SOURCES IN THE SOLAR CORONA

Merzlyakov V.L., Starkova L.I.

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

The problem of heating the Sun's corona is investigated. For this purpose, the search is carried out for areas with maximum temperatures in the corona, which are indicators of energy release sites. The determination of the coronal temperature is based on the effect of the influence of moving electrons on the position of the polarization plane of scattered photospheric radiation, which is observed as a K-corona. The position of the polarization plane has been calculated based on the data of polarization observations of the K-corona, which were obtained by the authors during the total solar eclipse of August 1, 2008. The analysis of these data shows the presence of three extremes in the deviation of the position of the polarization plane from the standard one. The location of the extremes is stable within the equatorial zone and middle latitudes. They are located at a distance from the center of the Sun at 1.3 Rs, 1.8 Rs, 2.5–2.7 Rs (in solar radii). Taking into account the configuration of the coronal magnetic field in the epoch of low solar activity, which accounted for the eclipse of 2008, the values of extreme electron temperatures are about 10 MK.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-201-204

Введение

Вопрос о нагреве короны Солнца имеет два ответа. Это происходит либо от дискретных источников типа нановспышек, либо от «раскачки» электронов и ионов плазмы волновыми процессами. Решение данного вопроса не может ограничиться оценками энергетических потенциалов указанных процессов, но также необходимо установить возможные зоны такого энерговыделения. В случае нановспышек максимум энерговыделения следует ожидать в основании солнечной короны. В то же время волновые источники могут находиться на всей протяжённости короны. Индикатором зон энерговыделения, очевидно, является максимум температуры плазмы.

Наблюдаемое высотное распределение электронов короны показывает, что гидростатический масштаб требует, по крайней мере, двух максимумов протонной температуры [1]. В зависимости от скорости радиального потока корональной плазмы положение этих максимумов различно [2]. Существует возможность оценки электронной температуры независимо от условия радиального потока корональной плазмы. Как было показано Молоденским [3], движущиеся электроны отклоняют плоскость поляризации

рассеянного излучения фотосферы. Указанный феномен был использован для поиска областей максимума электронной температуры.

Методика

В солнечной короне плазма ионизована и замагничена. При этом плотность ионов и электронов уменьшается с высотой. Такое уменьшение в нижней короне происходит по всему объёму под действием гравитации. Высотное изменение плотности и замагниченность создают в короне циклотронный ток. Рис. 1 иллюстрирует указанный эффект, где возникающий ток зависит не только от градиентов плотности, но и от изменения напряженности магнитного поля. Это создает ток $\mathbf{j} = -c \operatorname{rot}(P/B^2 \cdot \mathbf{B})$, где P – газовое давление плазмы, B – напряженность магнитного поля, c – скорость света.

Магнитное поле в период низкой солнечной активности формируется регулярной системой подфотосферных источников [4], которые создают ячеистую структуру поля в экваториальной зоне и средних широтах. В таком случае определяющей компонентой коронального магнитного поля будет $B_\phi \gg B_\theta$, $B_\phi \gg B_r$ в сферической системе координат, связанной с Солнцем. Также градиент вдоль широты будет существенно меньше радиального градиента $\nabla_\phi(P/B^2) \ll \nabla_r(P/B^2)$. В итоге основной составляющей циклотронного тока будет компонента вдоль солнечного меридиана:

$$j_\theta \approx c \nabla_r(P/B^2) B_\phi + c(P/B^2) \nabla_r B_\phi \quad (1)$$

В регулярной структуре коронального магнитного поля величина компоненты $B_\phi \propto M/r^3$. Высотное распределение плотности определяется шкалой высот протонов $\propto \exp[-(r-r_0)/H_p]$. В итоге величина циклотронного тока (1) представляется выражением:

$$j_\theta \approx c \cdot P \cdot B_\phi / B^2 \cdot (3/r - 1/H_p) \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что направление тока зависит как от ориентации компоненты магнитного поля B_ϕ , так и знака последнего сомножителя. А в местах, где происходит смена знака тока (2), имеем соотношение:

$$H_p = k \cdot T_p / m_p \cdot g(r) = r/3, \quad (3)$$

где T_p – протонная температура, $g(r)$ – ускорение силы тяжести. Из формулы (3) можно найти протонную температуру в местах, где $j_\theta = 0$ (2).

Циклотронный ток (1) представляет собой направленный поток электронов (рис. 1) параллельно фотосфере со скоростью $(2/3)^{1/2}$ от величины тепловой скорости. И этот поток электронов отклоняет плоскость поляризации рассеянного фотосферного излучения в направлении наблюдателя, что было показано в работе [3]. В таком случае, измерив величину этого отклонения, можно определить тепловую скорость электронов в короне. Это позволит найти распределение электронной температуры по всей

наблюдаемой короне. И на основе этого распределения должны проявиться зоны максимальных значений, где, как ожидается, происходит выделение энергии.

Результаты

Для проведения расчетов по описанной выше методике необходимы измерения плоскости поляризации рассеянного фотосферного излучения. Это излучение известно как К-корона Солнца, и оно наблюдается во время полных солнечных затмений. Благоприятным для проводимого исследования оказалось затмение 1 августа 2008 года, когда был минимум солнечной активности. Авторы получили поляризационные снимки этого затмения на высококачественную фотометрическую матрицу камеры Canon 30D. Анализ плоскости поляризации К-короны проводился с использованием пакета IDL. Были получены радиальные зависимости отклонения плоскости поляризации рассеянного фотосферного излучения от тангенциального направления. Типичная картина такого отклонения $\delta\chi$ (в градусах) в зависимости от расстояния до центра Солнца приведена на рис. 2. Анализ такого рода графиков показал, что в высотном распределении проявляются экстремумы на расстояниях $r = 1.3 R_s$, $1.8 R_s$, $2.5\text{--}2.7 R_s$ (в масштабе солнечного радиуса). Эти экстремумы уверенно выделяются в экваториальной зоне и средних широтах до 40° .

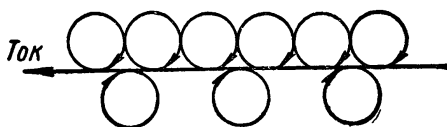


Рис. 1.

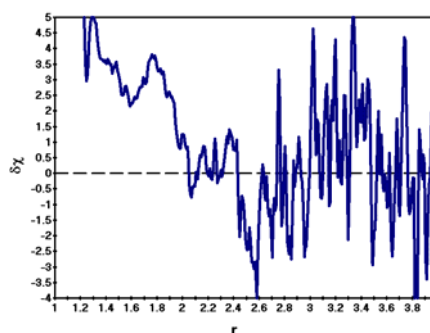


Рис. 2.

Для получения значений отклонения плоскости поляризации именно фотосферного излучения необходимо учитывать поляризацию неба. Этот учёт был проведён, и были получены реальные корональные значения отклонений $\chi = 3.8^\circ$, 3.6° , -3.0° [5]. Вариации этих пиковых значений оказались небольшие для разных кривых (рис. 2). И это вариации можно объяснить ошибками измерений.

Из найденных значений отклонений можно получить скорость электронов по формуле $\text{tg}(\chi) \approx V_e/c$ [3]. В рассматриваемой модели скорость электронов – это есть скорость циклотронного тока (1) $V_e = (2/3)^{1/2} V_{Te}$ (тепловой). С учетом этого соотношения получаем, что электронная температура имеет три зоны с экстремальными значениями $T_e = 3.9 \cdot 10^7$ К, $3.5 \cdot 10^7$ К, $2.4 \cdot 10^7$ К, величина которых уменьшаются с ростом высоты в короне.

От максимума $\delta\chi$ на $1.3 R_s$ наблюдается уменьшение этого отклонения до $\approx 2.0 R_s$ (рис. 2). И затем до смены знака $\delta\chi$ среднее значение стабилизируется на уровне $\delta\chi \approx 0.5^\circ$. Такая наблюдаемая тенденция $\delta\chi$ означает падение электронной температуры с последующей стабилизацией около величины $\approx 10^6$ К, которой соответствует отклонение плоскости поляризации излучения К-короны $\chi \approx 0.6^\circ$.

Полученные высотные распределения $\delta\chi$ (рис. 2) показали, что происходит смена знака тока (2) на расстояниях около $r \approx 2.4 R_s$ и $r \approx 3.0 R_s$. В этих местах смены знака циклотронного тока (2) по формуле (3) можно оценить величину протонной температуры. Оценки по формуле (3) дали величины $T_p = 3.2 \cdot 10^6$ К и $2.6 \cdot 10^6$ К соответственно на $r \approx 2.4 R_s$ и $r \approx 3.0 R_s$.

Выводы

Проведённое исследование показало существование в короне трех зон с максимальными температурами $\approx 3 \cdot 10^7$ К. Радиальная протяжённость таких зон относительно небольшая (рис. 2), что, по-видимому, указывает на резонансный характер выделения энергии. Вне этой зоны температура устанавливается на уровне $\approx 3 \cdot 10^6$ К на расстоянии $2.4\text{--}3.0 R_s$. Эта температура протонов, но можно ожидать, что электроны имеют ту же температуру. Поскольку вне зоны нагрева должно установиться термодинамическое равновесие корональной плазмы.

Обнаруженные области находятся высоко в короне и имеют дискретное распределение. Такие особенности явно указывают на волновой механизм коронального нагрева. И этот механизм надо рассматривать как основной, поскольку энергетические возможности нановспышек не могут обеспечить нужный поток энергии. Это было обнаружено по наблюдениям [6], а также оценено по модельным расчетам [7]. Вопрос о реализации волнового механизма нагрева короны пока остаётся открытым, поскольку предлагается несколько возможных вариантов [8]. Полученные в данной работе результаты относительно расположения областей с максимумом электронной температуры и её величиной являются важным аргументом для выбора среди предложенных механизмов нагрева.

Литература

1. Lemaire J.F., Stegen K. // Solar Phys., 2016, v. 291, pp. 3659–3683.
2. Lemaire J.F., Katsiyannis A.C. // Solar Phys., 2021, v. 296, pp. 64(12).
3. Molodensky M. M. // Solar Phys., 1973, v. 28, pp. 465–475.
4. Merzlyakov V.L., Starkova L.I. // Geom. Aeron., 2015, v. 55, no. 8, pp. 1066–1070.
5. Старкова Л.И., Мерзляков В.Л. // Труды Всероссийской конференции “Солнечная и солнечно-земная физика – 2010”, СПб, ГАО РАН, 2010, с. 417–420.
6. Ульянов А.С., Богачёв С.А., Рева А.А., и др. // Письма в АЖ, 2019, т. 45, № 4, с. 290 – 300.
7. Merzlyakov V.L. // Geom. Aeron., 2017, v. 57, no. 8, pp. 1063–1066.
8. Van Doorselaere T., Srivastava A.K., Antolin P., et al. // Space Sci. Rev., 2020, v. 216, pp. 140(40).