

О КОНВЕКТИВНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ КОРОНАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ В ДИПОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ СОЛНЦА

И.В. Чашей

Рассмотрена конвективная неустойчивость плазмы солнечной короны в дипольном магнитном поле. Показано, что замкнутые структуры в приэкваториальных областях существуют, если температура короны не превосходит $3 \cdot 10^6$ К.

В периоды минимума солнечной активности магнитные поля в короне в значительной мере упорядочены: имеется замкнутый приэкваториальный пояс и разомкнутые структуры на высоких широтах /1/. Это позволяет предположить, что магнитное поле в основании короны можно представить как поле точечного диполя, расположенного в центре Солнца:

$$B_* = (1/2) B_0 (1 + 3 \cos^2 \theta), \quad (1)$$

где B_0 — индукция в полюсах, θ — полярный угол. Взаимодействие солнечного ветра с исходным магнитным полем (1) приводит к формированию в короне и сверхкороне квазидипольной магнитной структуры с двумя токовыми поверхностями, одна из которых, расположенная в короне, отделяет текущую плазму от неподвижной, а другая, расположенная в солнечном ветре и совпадающая с плоскостью экватора, разделяет области с противоположной полярностью магнитного поля /2, 3/. Линия пересечения токовых поверхностей находится в плоскости экватора и является нейтральной линией, точки которой — нейтральные точки типа "касп" /4/. Формирование описанной структуры происходит при последовательном размыкании внешних магнитных линий приэкваториальной области, соответствующих высокоширотным областям исходной поверхности. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока различие в полных давлениях замкнутых и открытых областей на экваторе не станет достаточно малым. В настоящем сообщении для определения физических условий вблизи касповой линии рассмотрена конвективная неустойчивость плазмы в экваториальных областях солнечной короны.

Считаем, что идеально проводящая плазма с давлением p и температурой T находится в дипольном магнитном поле

$$B = (1/2) B_0 (r_*/r)^3 (1 + 3 \cos^2 \theta), \quad (2)$$

где r_* — радиус Солнца, r — гелиоцентрическое расстояние. Магнитное поле (2) бессилово, поэтому для давления p имеем уравнение гидростатики

$$d \ln p / d \ln r + g_* r_*^2 / r v_T^2 = 0, \quad (3)$$

в котором g_* — ускорение силы тяжести при $r = r_*$, v_T — изотермическая скорость звука. При перемещении магнитной трубки от r до $r + \delta r$ на плазму в экваториальной области ($\theta = \pi/2$) будет действовать сила плавучести

$$g \delta p = \rho g \left(- d \ln p / d \ln r + d \ln T / d \ln r + d \ln \rho' / d \ln r \right) \frac{\delta r}{r}, \quad (4)$$

где ρ' — плотность плазмы во всплывшей трубке, и сила натяжения магнитных линий

$$\delta f = -(3B^2/4\pi^2) \delta r, \quad (5)$$

где B определяется (2) при $\theta = \pi/2$. Условие конвективной неустойчивости с учетом $\rho' \propto r^{-4}$ /5/ и формул (2)–(5) принимает вид:

$$\frac{gr}{v_T^2} + 3 \frac{B^2}{4\pi\rho} \frac{v_T^2}{gr} + \frac{d \ln T}{d \ln r} < 4, \quad g = g_* \left(\frac{r_*}{r}\right)^2. \quad (6)$$

Из (6) находим

$$(2 - a_T) - \sqrt{(2 - a_T)^2 - \frac{3}{\beta}} < \frac{gr}{v_T^2} < (2 - a_T) + \sqrt{(2 - a_T)^2 - \frac{3}{\beta}}, \quad (7)$$

где $a_T = d \ln T / d \ln r$, $\beta = 4\pi\rho/B^2$. При $\beta < 3/4$ неустойчивость отсутствует; при $\beta \gg 1$ и $a_T \ll 1$ имеем условие неустойчивости

$$3/4\beta < gr/v_T^2 < 4, \quad (8)$$

правая часть которого в точности совпадает с критерием Кадомцева для дипольных магнитных ловушек с проводящими торцами /5/.

Таким образом, конвективная неустойчивость будет иметь место при выполнении условий $\beta_k \gg 1$ и $g_k r_k / v_{Tk}^2 < 4$, где индексом k отмечены значения параметров вблизи каспа. Для солнечной короны, как показывают оценки, первое из условий является более жестким. В работе /2/ при расчетах стационарного течения в квазидипольном поле использовалось соотношение

$$p_- = B_+^2/8\pi + p_+, \quad (9)$$

связывающее давления в замкнутых (p_-) и открытых (p_+) областях вблизи каспа. Из этого соотношения в /2/ найдено, что во внешней окрестности каспа скорость течения v совпадает с альвеновской v_a . Однако давление p_+ понижено по сравнению с p_- не столько за счет истечения, как предполагалось в изотермической модели /2/, сколько за счет охлаждения, связанного с потерями энергии на подъем вещества /6/. По этой причине $p_+ \ll p_-$, и тогда (9) формально совпадает с условием неустойчивости $\beta_k \approx 1$, если считать, что поле B_+ мало искажено течением и совпадает с дипольным. При этом о равенстве v и v_a можно говорить только в том смысле, что обе величины стремятся к нулю при приближении к нейтральной линии, лежащей в основании стримера, что подтверждается и численными расчетами /3/ для нестационарной политропной модели.

В основании короны $\beta_* \approx 1$, что следует из баланса теплопроводного потока энергии, поступающего из короны в переходный слой, и потерь на излучение /7/. Наблюдательные данные /8/ подтверждают эту оценку. Принимая для газокINETического давления распределение /1, 6/: $p_k = p_* \exp[-0,7(Mg_* r_*/kT_k)] \times (1 - r_*/r_k)$, где M – средняя масса иона, k – постоянная Больцмана, T_k – температура во внутренней окрестности каспа, и учитывая условия $\beta_* \approx 1$, $\beta_k \approx 1$, $B_k \sim r_k^{-3}$, приходим к выводу, что замкнутый приэкваториальный пояс может существовать только при температурах $T_k < 3 \cdot 10^6$ К. При $T_k > 3 \cdot 10^6$ К касп опускается до основания короны, и линии магнитного поля разомкнуты на всех широтах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Priest E. R. Solar magnetohydrodynamics, Dordrecht, Holland, D. Reidel Publ. Comp., 1982.
2. Pneuman G. W., Kopp R. A. Solar Phys. 18, 258 (1971).
3. Steinolfson R. S., Suess S. T., Wu S. T. Astrophys. J., 225, 730 (1978).
4. Sturrock P. A., Smith S. M. Solar Phys., 5, 87 (1968).
5. Кадомцев Б. Б. В сб. Вопросы теории плазмы, под ред. М.А. Леонтовича, М., Атомиздат, 1963, т. 2, с. 132.
6. Чашей И. В., Шишов В. И. ,Астрономический журнал, 64, 119 (1987).
7. Чашей И. В., Шишов В. И. Геомагнетизм и аэрономия, 27, 705 (1987).
8. Аллен К. У. Астрофизические величины, М., Мир, 1977.

Поступила в редакцию 25 июня 1990 г.