

УДК 523.985

В. М. Ефименко¹, В. В. Токий², Н. В. Токий²

¹Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко 04053, Киев, ул. Обсерваторная, 3, e-mail: efim@observ.univ.kiev.ua

²Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАНУ 83114, Донецк, ул. Р. Люксембург, 72, e-mail: nat1976@mnogo.ru

Электрическое поле и электрический заряд в солнечной короне

Рассмотрена задача о применении гидродинамического приближения Паркера к стационарному потоку плазмы, расширяющемуся в вакуум из Солнца. Записана система из четырех уравнений непрерывности, движения ионов, локального равновесия электронов и квазинейтральности стационарного сферически-симметричного потока плазмы при однородных температурах компонентов с учетом электрических и гравитационных полей. Получены аналитические выражения для зависимости поляризованного электрического поля и заряда от расстояния до центра Солнца. Оценен электрический заряд Солнца. Полученные результаты применяются для солнечного ветра.

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ І ЕЛЕКТРИЧНИЙ ЗАРЯД У СОНЯЧНІЙ КОРОНІ, Єфіменко В. М., Токий В. В., Токий Н. В. — Розглянуто задачу про застосування гідродинамічного наближення Паркера до стаціонарного потоку плазми, який розширюється у вакуум із Сонця. Записана система із чотирьох рівнянь неперервності, руху іонів, локальної рівноваги електронів і квазінейтральності стаціонарного сферично-симетричного потоку плазми при однорідних температурах компонентів з урахуванням електричних і гравітаційних полів. Отримано вирази для залежності швидкості і концентрації електронів від відстані до центра джерела плазми. Оцінено електричний заряд Сонця. Отримані результати застосовуються до сонячного вітру.

THE ELECTRIC FIELD AND CHARGE IN THE SOLAR CORONA, by Yefimenko V. M., Tokii V. V., Tokii N. V. — We consider the applications the Parker hydrodynamic approximation to stationary spherically symmetric plasma expansion from the Sun into a vacuum. We present a system of four equations including the continuity, ion motion, local electron equilibrium equations and equation of quasineutrality of stationary spherically symmetric plasma flux under a homogeneous temperature of components with consideration for the gravitational and electric fields. Analytical expressions for the relationship between the electric field and electron density and the distance to the Sun centre are derived. The positive charge of the Sun is assessed. Our results are used to the solar wind.

ВВЕДЕНИЕ

Задачу определения электрического заряда звезды в стационарном состоянии, и в частности стационарного заряда Солнца, решал В. Крат [3]. Е. А. Пономарев [5] рассмотрел газ, который находится в поле тяжести и испытывает на себе действие объемного положительного заряда короны, уравнивающего некоторую долю β веса протона. Электрическое поле Паннекока — Росселанда статической плазмы, поляризованной гравитационным полем, в рамках статической модели рассмотрено в обзоре [6].

Дальнейшее развитие представлений об электрических полях получено в моделях короны, содержащей гелий. В первом, весьма грубом приближении, корона считалась статической [14]. Изменение поляризационного поля, связанного с динамическим характером модели расширения короны, найдено в работе [10]. В последнее время электрические поля в короне учитываются при компьютерных расчетах в рамках 16-моментной модели солнечного ветра [12].

Настоящая работа посвящена применению гидродинамического приближения Паркера [13] к стационарному потоку плазмы расширяющемуся в вакуум из Солнца. В ее рамках получены аналитические выражения для зависимостей как поляризационного электрического поля, так и заряда от расстояния до центра Солнца. Обоснование пренебрежения магнитным полем и давлением межпланетной среды на внешней границе расширяющейся короны в рамках рассматриваемой модели можно найти в работах Паркера [4, 13].

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Расширение плазмы в вакуум — одно из важных явлений физики космической плазмы. Система уравнений, описывающих плазму, настолько сложна, что трудно указать нестационарную нелинейную задачу, которая имела бы ясный физический смысл, и решение которой было бы доведено до конца. Вот почему до настоящего времени многие аспекты этого явления остаются не ясными.

Теоретическое и экспериментальное изучение вопросов, связанных с расширением в вакуум космической плазмы, давно привлекало внимание исследователей. Впервые теорию протяженной солнечной короны выдвинул Чепмен в 1957 г. [9], рассмотревший статическую атмосферу, перенос энергии в которой осуществляется только при помощи теплопроводности. Из его результатов следовало, что корона протягивается до Земли и дальше.

Паркер в 1958 г. [13] в своей статье устранил теоретические затруднения предшественников, предположив, что корона не может находиться в статическом равновесии, а должна непрерывно расширяться наружу. Другими словами, при отсутствии «крышки» (т. е. большого давления на бесконечности), удерживающей корону, последняя должна истекать наружу в виде «солнечного ветра». Паркер построил математическую модель этого стационарного расширения и нашел решения, при которых давление на больших расстояниях стремится к нулю. Основные характеристики солнечного ветра и более подробные сведения можно найти в работах [4, 6, 8, 15]. Было установлено, что солнечная корона вследствие высокой температуры и большой теплопроводности не может находиться в статическом состоянии при условии, что на бесконечности нет сил, препятствующих ее расширению.

Во всех этих работах по расширению космической плазмы в вакуум из исходных уравнений исключалось электрическое поле со ссылками на нейтральность плазмы и Солнца [4, 11].

В настоящей работе рассмотрение стационарной задачи расширения плазмы в вакуум проводится при учете как гравитационных, так и электрических полей.

Будем рассматривать движение квазинейтральной с постоянными однородными температурами компонентов плазмы. Основным ионным компонентом плазмы будем считать водород.

Для сферически-симметричной задачи при отсутствии магнитных полей, вязкости, сил трения и температурных градиентов и наличии гравитационного поля сферического источника плазмы уравнения движения электронов и протонов записываются в виде

$$m_e \frac{\partial V_e}{\partial t} + m_e V_e \frac{\partial V_e}{\partial r} = - \frac{kT_e}{n_e} \frac{\partial n_e}{\partial r} - eE - m_e \frac{MG}{r^2}, \quad (1)$$

$$m_p \frac{\partial V}{\partial t} + m_p V \frac{\partial V}{\partial r} = - \frac{kT_p}{n_p} \frac{\partial n_p}{\partial r} + eE - m_p \frac{MG}{r^2}, \quad (2)$$

где $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$ — гравитационная постоянная, M — масса Солнца, E , V_e и V — радиальные составляющие напряженности электрического поля, скорости электрона и протона соответственно, m_e и m_p — массы электрона и протона, $-e$ — заряд электрона.

В пренебрежении инерционными свойствами электронов для стационарной задачи уравнение движения электронов (1) превращается в условие локального равновесия:

$$0 = - \frac{kT_e}{n_e} \frac{dn_e}{dr} - eE - m_e \frac{MG}{r^2}. \quad (3)$$

Уравнение движения протонов (2) для стационарной задачи примет вид

$$m_p V \frac{dV}{dr} = - \frac{kT_p}{n_p} \frac{dn_p}{dr} + eE - m_p \frac{MG}{r^2}. \quad (4)$$

Условие квазинейтральности плазмы [7] записывается в виде

$$n_e = n_p = n, \quad (5)$$

а уравнение непрерывности —

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr}(nVr^2) = 0. \quad (6)$$

Уравнения (3)—(6) образуют систему уравнений для стационарного расширения квазинейтральной плазмы с однородным распределением температур электронов и протонов, позволяющую при заданных граничных условиях найти сферически-симметричные распределения электронов, протонов, скорость протонов и самосогласованное электрическое поле.

РЕШЕНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ СФЕРИЧЕСКИ-СИММЕТРИЧНОЙ ЗАДАЧИ

Электрическое поле согласно уравнению (3) равно

$$E = - \frac{kT_e}{en_e} \frac{dn_e}{dr} - m_e \frac{MG}{er^2}.$$

С учетом квазинейтральности плазмы (5) уравнение для электрического поля примет вид

$$E = - \frac{kT_e}{en} \frac{dn}{dr} - m_e \frac{MG}{er^2}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в уравнение (4), получим выражение для уравнения движения протонов:

$$m_p V \frac{dV}{dr} = - \frac{k(T_p + T_e)}{n} \frac{dn}{dr} - (m_p + m_e) \frac{MG}{r^2}. \quad (8)$$

Проинтегрировав уравнение непрерывности (6), получаем связь между концентрацией и скоростью протонов:

$$n(r)V(r) = n_0 V_0 \left(\frac{a}{r} \right)^2, \quad (9)$$

где a — внутренний радиус короны, V_0 — радиальная составляющая скорости иона на расстоянии a от центра источника, n_0 — концентрация протонов на расстоянии a от центра источника.

Логарифмируя и дифференцируя (9), получаем

$$\frac{1}{n} \frac{dn}{dr} = -V^{-1} \frac{dV}{dr} - \frac{2}{r}. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (8), перепишем уравнение движения протонов в виде

$$\left(V - \frac{V_c^2}{V} \right) \frac{dV}{dr} = \frac{2V_c^2}{r} - \frac{2r_c V_c^2}{r^2}, \quad (11)$$

где введены обозначения

$$V_c = \sqrt{\frac{k(T_p + T_e)}{m_p}},$$

$$r_c = \frac{GM(m_p + m_e)}{2k(T_p + T_e)}.$$

Проинтегрировав уравнение движения протонов (11), получаем следующую зависимость для $V(r)$:

$$\left(\frac{V}{V_c} \right)^2 - \ln \left(\frac{V}{V_c} \right)^2 = 4 \ln \frac{r}{r_c} + \frac{2GM}{rV_c^2} + \text{const}. \quad (12)$$

Паркер [13], анализируя пять типов решений уравнения (12) для расширяющейся солнечной короны и учитывая наблюдаемые значения скорости солнечного ветра на орбите Земли, пришел к выводу о необходимости равенства $\text{const} = -3$, что при наблюдаемых значениях концентрации плазмы n_0 диктует значения скорости ионов V_0 на внутреннем радиусе солнечной короны a

$$V_0 = V(a) = V_c \left(\frac{r_c}{a} \right)^2 \exp \left(\frac{3}{2} - \frac{2r_c}{a} \right),$$

где использована константа Паркера, которая задает граничную скорость.

При малых отношениях $V/V_c \ll 1$ из (12) получим приближенное выражение для распределения скоростей протонов в стационарном сферически-симметричном потоке вблизи основания солнечной короны:

$$V(r) = V_c \left(\frac{r_c}{r} \right)^2 \exp \left(\frac{3}{2} - \frac{2r_c}{r} \right). \quad (13)$$

Подставляя (13) в (10), получим приближенное выражение для распределения протонов и электронов в потоке плазмы солнечного ветра:

$$n(r) = n_0 \exp \left(\frac{2r_c}{r} - \frac{2r_c}{a} \right). \quad (14)$$

Подставляя (14) в (7), получаем выражение для электрического поля в солнечной короне:

$$E = \frac{GMm_p}{er^2(1 + T_p/T_e)} \left(1 - \frac{T_p m_e}{T_e m_p} \right). \quad (15)$$

В случае изотермической короны $T_p = T_e$, и считая $m_e/m_p = 0$, получим известное выражение для электрического поля Паннекока — Росселанда [6]:

$$E = \frac{GMm_p}{2er^2}.$$

Подставляя в (15) массу Солнца ($M = 1.99 \cdot 10^{30}$ кг) и параметры солнечной короны T_p , T_e , можно оценить электрическое поле в основании солнечной короны:

$$E = 2.84 \frac{1 - T_p m_e / (T_e m_p)}{1 + T_p / T_e}, \text{ мкВ/м.}$$

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД СОЛНЦА

Источником солнечного ветра служит корона, поэтому наблюдаемые в короне значения температуры и плотности являются исходными для применения нашей теории. Плотность электронов в короне определяют по рассеянию короной видимого света. Обсуждение соответствующего метода и связанных с ним трудностей и неопределенностей можно найти в работе Ван де Хюлста [1].

Следуя Паркеру [13], для эффективной температуры короны мы принимали значение $2 \cdot 10^6$ К.

Используем теорему Остроградского — Гаусса для интеграла по замкнутой сферической поверхности S радиуса r :

$$\oint_S \varepsilon_0 \mathbf{E} d\mathbf{S} = 4\pi \varepsilon_0 r^2 E = q. \quad (16)$$

Подставляя полученное выражение для электрического поля (15) в (16), при стремлении $r \rightarrow a$ получаем заряд Солнца, обусловленный стационарным сферически-симметричным потоком плазмы при малых начальных скоростях $V_0 < V_c$ у основания солнечной короны:

$$q = \frac{4\pi \varepsilon_0 GMm_p}{e(1 + T_p/T_e)} \left(1 - \frac{T_p m_e}{T_e m_p} \right). \quad (17)$$

Подставляя в (17) параметры Солнца и солнечной короны, можно оценить электрический заряд Солнца:

$$q = 155 \frac{[1 - T_p m_e / (T_e m_p)]}{1 + T_p / T_e}, \text{ Кл.} \quad (18)$$

СРАВНЕНИЕ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПРОТОНЫ И ЭЛЕКТРОНЫ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СОЛНЦА

Для выяснения силы, движущей солнечный ветер, подставим в правую часть уравнение движения протонов (4) полученные нами решения для распределения протонов и электронов в плазме солнечного ветра $n(r)$ (14) и для электрического поля в солнечной короне $E(r)$ (15). Оценки показывают, что ускоряющими силами являются сила давления газа протонов,

пропорциональная $T_p/(T_p + T_e)$, и электростатическая сила, пропорциональная $T_e/(T_p + T_e)$. Учитывая, что в короне $T_e > T_p$, электростатическая сила отвечает за ускорение солнечного ветра.

Величина электрической силы кулоновского притяжения электрона в основании солнечной короны к центру Солнца равна электрической силе отталкивания приповерхностного протона от центра и составляет

$$F = \frac{GMm_p [1 - T_p m_e / (T_e m_p)]}{(1 + T_p / T_e) a^2}. \quad (19)$$

Эта сила в $(m_p/m_e - T_p/T_e)/(1 + T_p/T_e)$ раз превышает силу гравитационного притяжения электрона к центру Солнца. Для протона эта сила компенсирует гравитационное притяжение его к Солнцу на долю, равную отношению

$$\frac{\left(1 - \frac{T_p m_e}{T_e m_p}\right)}{\left(1 + \frac{T_p}{T_e}\right)}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, настоящую работу можно рассматривать как обоснование применения гидродинамического приближения Паркера к стационарному потоку плазмы, расширяющемуся в вакуум из Солнца. Силой, объединяющей частицы двух компонентов плазмы (протоны и электроны), является электростатическое поле.

Различие в величине действия гравитационного поля на протоны и электроны (из-за различия масс) поляризует плазму и создает электрическое поляризационное поле. Именно электрическое поле ускоряет протоны и создает стационарный поток, скорость которого увеличивается с расстоянием.

Таким образом, нами показано, что модель стационарного расширения короны Паркера позволяет определить электрический положительный заряд солнечной короны, о существовании которого и его движущей роли в образовании корпускулярных потоков Солнца впервые отмечалось в работах Крата [3] и киевской группы исследователей короны Всехсвятского, Никольского, Пономарева, Чередниченко [2].

1. Ван де Хюлст Х. К. Хромосфера и корона // Солнечная система. Солнце / Под ред. Дж. Койпера. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1957.—Т. 1.—С. 184—281.
2. Всехсвятский С. К., Пономарев Е. А., Никольский Г. М., Чередниченко В. И. О корпускулярном солнечном излучении // Физика солнечных корпускулярных потоков и их воздействие на верхнюю атмосферу Земли. — М.: Изд-во Академии Наук СССР, 1957.—С. 51—58.
3. Крат В. Электрические заряды в солнечной короне // Докл. АН СССР.—1948.—61,—№ 1.—С. 31—34.
4. Паркер Е. Н. Динамические процессы в межпланетной среде. — М.: Мир.—1965.—362 с.
5. Пономарев Е. А. К теории солнечной короны: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Киев, 1957.—233 с.—Машинопись.
6. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. — М.: Мир.—1976.—302 с.
7. Braginskii S. I. Reviews of plasma physics. — New York: Consultants Bureau, 1965.—1.—Р. 205—304.
8. Brandt J. C. An introduction to the solar wind. — San Francisco, W. H. Freeman, 1970.—199 p.
9. Chapman S. Notes on the solar corona and the terrestrial ionosphere // Smithsonian Contrib. Astrophys.—1957.—2, N 1.—Р. 1—12.
10. Geiss J., Hirt P., Leutwyler H. On acceleration and motion of ions in corona and solar wind // Solar Phys.—1970.—12, N 3.—Р. 458—483.

11. *Hartle R. E., Sturrock P. A.* Two-fluid model of the solar wind // *Astrophys. J.*—1968.—**151**, N 3.—P. 1155—1170.
12. *Lie-Svendsen O., Hansteen V. H., Leer E., Holzer T. E.* The effect of transition region heating on the solar wind from coronal holes // *Astrophys. J.*—2002.—**566**, N 1.—P. 562—576.
13. *Parker E. N.* Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields // *Astrophys. J.*—1958.—**128**, N 3.—P. 664—676.
14. *Parker E. N.* Comments on coronal heating // *The Solar Corona* / Ed. J. W. Evans. — New York: Academ. Press, 1963.—P. 11—19.
15. *Zirker J. B.* Coronal holes and high speed wind streams // *Rev. Geophys. Space Phys.*—1977.—**15**.—P. 257—269.

Поступила в редакцию 01.09.03