

ASTROFİZİKA

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТЕЙ НЕТЕПЛОВЫХ ДВИЖЕНИЙ В КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЛЯХ

Д.М.КУЛИ-ЗАДЕ¹, С.Г.МАМЕДОВ²¹Бакинский Государственный Университет²Шемахинская Астрофизическая Обсерватория

ckulizade@mail.ru

Рассматривается вопрос об определении температуры и скоростей нетепловых движений в корональных петлях. Для корональных линий $\lambda 5303\text{\AA}$ Fe XIV и $\lambda 6374\text{\AA}$ FeX при двухуровневом приближении составляются уравнения стационарности и строится кривая зависимости отношения их наблюдаемых интенсивностей от температуры ионизации. По этой кривой определяется температура и далее скорости нетепловых движений в корональных петлях.

1. Введение

Как известно, одним из основных механизмов нагрева солнечной короны и его структурных образований считаются альфвеновские волны, генерируемые в нижних слоях атмосферы Солнца [1]. Наличие этих волн может привести к росту скоростей нетепловых движений с высотой в короне. Ибо, во-первых, альфвеновские волны плохо поглощаются в короне, во-вторых, плотность значительно уменьшается с высотой. В прежних работах результаты по определению скоростей нетепловых движений v_{nt} на различных высотах оказались противоречивыми [2-8]. По одним линиям v_{nt} растет с высотой, а по другим линиям, наоборот, уменьшается. Возможно это связано с тем, что при определении v_{nt} в качестве температуры принимались ее значение, соответствующее максимальной доле ионов на данной стадии ионизации. Эта температура берется из кривых ионизаций [9].

Мы считаем, что на каждой высоте короны температура T и скорость нетепловых движений v_{nt} должны быть определены одновременно. При этом мы исходим из того, что линии ионов FeXIV и FeX могут излучать не только при температуре T , соответствующей максимальной доле ионов, а при больших и меньших, а также равных температурах.

В [10-12] авторы определяют температуру по соотношению интенсивностей линий $\lambda 5303\text{\AA}$ и $\lambda 6374\text{\AA}$, учитывая излучение всей толщины короны вдоль луча зрения. А в [13] также произведен расчет профилей эмиссионных линий $\lambda 5303\text{\AA}$ и $\lambda 6374\text{\AA}$ по всей толщине спокойной короны вдоль луча зрения на различных высотах с учетом изменения с высотой температуры и плотности.

Ими были составлены уравнения стационарности для двухуровневых ионов FeX и FeXIV. Принималось, что верхние и нижние уровни этих ионов возбуждаются и опустошаются электронными ударами и облучением фотосферного излучения.

В данной работе мы ставим цель рассчитать отношение интенсивностей линий $\lambda 5303\text{\AA}$ и $\lambda 6374\text{\AA}$ в спектре корональных петель, используя методику и атомные данные, приведенные в [13]. В данном случае задача облегчается тем обстоятельством, что толщины корональных петель составляет всего несколько тысяч км, и поэтому изменения температуры и плотности с толщиной мы можем не принимать во внимание.

Определяя из наблюдений отношение интенсивностей этих линий и сравнивая их с теоретически рассчитанными, мы можем судить о физической структуре петель как по толщине, так и по высоте.

2. Расчет отношения интенсивностей линий $\lambda 5303\text{\AA}$ и $\lambda 6374\text{\AA}$

Поскольку корональные петли являются оптически тонкими образованиями, за интенсивность линий можно использовать энергию излучения единицы объема в частотах линий $\lambda 5303\text{\AA}$ и $\lambda 6374\text{\AA}$. Очевидно, что эта энергия

$$\varepsilon = \frac{N_2 A_{21} h \nu}{4\pi}. \quad (1)$$

Здесь N_2 -населенность верхнего уровня, A_{21} - вероятность спонтанного перехода с верхнего уровня на нижний уровень, h -постоянная Планка, ν - центральная частота рассматриваемой линии. Населенность N_2 может определяться из уравнения стационарности для рассматриваемого двухуровневого иона как

$$N_1 (R_{12} + C_{12} N_e) = N_2 (A_{21} + R_{21} + C_{21} N_e). \quad (2)$$

Здесь N_1 -населенность нижнего уровня, R_{12} и C_{12} -числа радиативных и ударных возбуждений второго уровня, соответственно, N_e - электронная плотность, R_{21} и C_{21} - число радиативных и ударных де-возбуждений соответственно.

Для двухуровневых ионов выполняется условие сохранения

$$N_1 + N_2 = N_i, \quad (3)$$

где N_i – число рассматриваемых ионов.

Представим N_2 в виде

$$N_2 = \frac{N_2}{N_i} \frac{N_i}{N_E} \frac{N_E}{N_H} N_H, \quad (4)$$

где N_i/N_E – доля ионов по отношению к числу атомов Fe, которая находится по кривым ионизации [9,12], N_e/N_H - обилие атомов железа по отношению к водороду, N_H -концентрация водородных атомов.

Из (2) и (3) имеем:

$$N_2 = \frac{N_i}{1 + \frac{A_{21} + R_{21} + C_{21} N_e}{R_{12} + C_{12} N_e}}. \quad (5)$$

Используя (4) и (5) для коэффициента излучения, получим

$$\varepsilon = \frac{A_{21} h \nu}{4\pi \left(1 + \frac{A_{21} + R_{21} + C_{21} N_e}{R_{12} + C_{12} N_e}\right)} \frac{N_i}{N_E} \frac{N_E}{N_H} N_H \quad (6)$$

Если энергию излучения для линий $\lambda_{5303\text{\AA}}$ и $\lambda_{6374\text{\AA}}$ обозначим через ε_R и ε_G , то для отношения интенсивностей можем написать

$$\frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_G} = \frac{A_{21,R}}{A_{21,G}} \frac{\lambda_G}{\lambda_R} \frac{1 + \frac{A_{21,R} + R_{21,R} + C_{21,R} N_e}{R_{12,R} + C_{12,R} N_e} \frac{N_i(X)}{N_E}}{1 + \frac{A_{21,G} + R_{21,G} + C_{21,G} N_e}{R_{12,G} + C_{12,G} N_e} \frac{N_i(XIV)}{N_E}} \quad (7)$$

Здесь

$$C_{12} = 8.63 \cdot 10^{-6} \Omega_{12} \exp\left(\frac{-1.44}{\lambda T_k}\right) + 1.112 \cdot 10^{-9}, \quad (8)$$

$$R_{12,R} = \frac{g_{2,R}}{g_{1,R}} A_{21,R} \exp\left[-\frac{1.44 \cdot 10^8}{\lambda_R T_R \left(\frac{r}{R_*}\right)}\right], \quad R_{12,G} = \frac{g_{2,G}}{g_{1,G}} A_{21,G} \exp\left[-\frac{1.44 \cdot 10^8}{\lambda_G T_G \left(\frac{r}{R_*}\right)}\right] \quad (9)$$

$$R_{21,R} = \frac{g_{1,R}}{g_{2,R}} R_{12,R}, \quad R_{21,G} = \frac{g_{1,G}}{g_{2,G}} R_{12,G}, \quad (10)$$

$$T_{R,R}(r, \lambda_R) = \frac{h \nu_R}{k} \frac{1}{\ln\left\{1 + \left(\frac{r}{R_*}\right)^2 \exp\left[\frac{h \nu_R}{k T_{R,R}(0)} - 1\right]\right\}}, \quad (11)$$

$$T_{R,G}(r, \lambda_G) = \frac{h \nu_G}{k} \frac{1}{\ln\left\{1 + \left(\frac{r}{R_*}\right)^2 \exp\left[\frac{h \nu_G}{k T_{R,G}(0)} - 1\right]\right\}}. \quad (12)$$

Значения параметров в этих выражениях:

$A_{21,R}=69\text{c}^{-1}$, $A_{21,G}=60\text{c}^{-1}$, $g_{1,R}=4$, $g_{2,R}=3$; $g_{1,G}=2$, $g_{2,G}=4$.
 $T_{R,R}(0)=5863\text{ K}$, $T_{R,G}=5973\text{ K}$, $\Omega_{12,R}=1.62$, $\Omega_{12,G}=2.84$,
 $\lambda_R=6374$, $\lambda_G=5303$.

При корональных температурах ($\sim 10^6\text{K}$) в выражении C_{12} можно полагать, что

$$\exp\left(\frac{-1.44}{\lambda T_k}\right) \approx 1.$$

Кроме в (8), второе слагаемое, на 3-4 порядка меньше первого слагаемого и его можно отбросить. Тогда подставляя числовые значения $\Omega_{12,G}$ и $\Omega_{12,R}$ получим:

$$C_{12,G}=2.45 \cdot 10^{-5} \text{ и } C_{12,R}=1.4 \cdot 10^{-5}$$

Расчеты числа радиативных переходов по выражениям (9)-(12) показывают, что при $N_e=10^8-10^9$, число электронных ударных переходов на 2-3 порядка больше радиативных переходов. Тогда выражение (7) получит вид:

$$\frac{\varepsilon_G}{\varepsilon_R} = \frac{A_{21,G} \lambda_R}{A_{21,R} \lambda_G} \frac{1 + \frac{C_{21,G}}{C_{12,G}} \frac{N_i(XIV)}{N_E}}{1 + \frac{C_{21,R}}{C_{12,R}} \frac{N_i(X)}{N_E}} = \frac{A_{21,G} \lambda_R}{A_{21,R} \lambda_G} \frac{1 + \frac{g_{1,G}}{g_{2,G}} \frac{N_i(XIV)}{N_E}}{1 + \frac{g_{1,R}}{g_{2,R}} \frac{N_i(X)}{N_E}} =$$

$$= 0,672 \frac{N_i(XIV)}{N_i(X)}. \quad (13)$$

3. Результаты определения

Определяя отношение интенсивностей линий по (13) с помощью кривой ионизации можно определить температуру корональных петель. Для этого мы несколько видоизменили кривую ионизации атомов железа, вычисленную Raju [12], которая приводится на рисунке 1. Учитывая, что интенсивность линии $\lambda 5303\text{\AA}$ больше интенсивности линии $\lambda 6374\text{\AA}$, и поэтому по кривым ионизаций следует пользоваться тем участком, где кривая Fe(XIV) выше кривой Fe(X). Как видно из кривых ионизаций, этому условию удовлетворяют область значения температур $6.3 \geq \log T_i \geq 6.2$. Для верхней границы температуры мы берем $\log T = 6.3$ по той причине, что при больших значениях температуры, Fe X полностью переходит в более высокие степени ионизации. Таким образом, в областях излучения линий $\lambda 5303\text{\AA}$ и $\lambda 6374\text{\AA}$ значение температуры корональных петель находится в пределах $6.3 \geq \log T \geq 6.2$

На рис 2 мы приводим кривую зависимости температуры от отношения интенсивностей линий $\lambda 5303\text{\AA}$ и $\lambda 6374\text{\AA}$ для области $6.3 \geq \log T_i \geq 6.2$, полученных из кривых ионизаций.

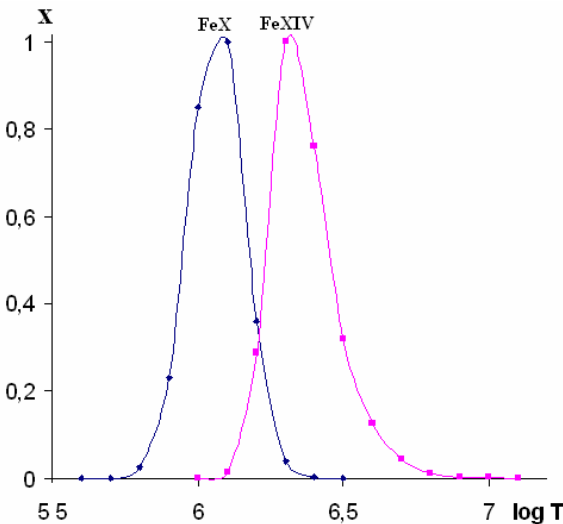


Рис. 1. Кривые ионизации атомов железа.

Предлагаемую нами методику применили к наблюдениям Singh и op [14], и Singh и др. [2]. В [14] приведена зависимость наблюдаемых значений отношений интенсивностей линий $\lambda 5303\text{\AA}$ и $\lambda 6374\text{\AA}$ от высоты для двух корональных петель, а в работе [2] – эта зависимость приведена для одной отдельной петли и по усредненным данным по многим петлям. Результаты приведены в таблице 1.

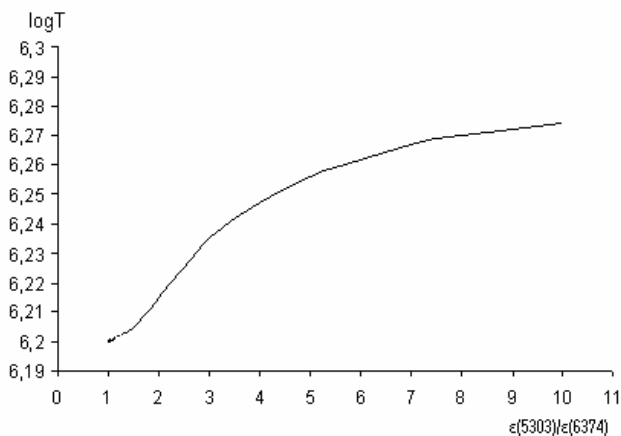


Рис. 2. Кривые зависимости температуры от отношения интенсивностей линий 5303 и 6374.

Таблица 1

Значения $\log T$ для четырех корональных петель на разных высотах

h''	Первая петля по [14]	вторая петля по [14]	усреднения петля по [2]	отдельная петля по [2]
20	6.230	6.259	6.267	6.274
60	6.234	6.720	6.261	6.269
120	6.237	6.274	6.258	6.262

Из выражения доплеровской ширины с учетом атомных постоянных железа для скоростей нетепловых движений, полагаем:

$$v_{nt}(5303) = (32 \cdot 10^{12} \cdot \Delta\lambda_D^2 - 3 \cdot 10^6 T)^{0.5} \quad (14)$$

$$v_{nt}(6374) = (22.2 \cdot 10^{12} \cdot \Delta\lambda_D^2 - 3 \cdot 10^6 T)^{0.5} \quad (15)$$

Здесь $\Delta\lambda_D$ выражен в ангстремах.

Используя соответствующую температуру из таблицы 1 мы вычислили скорости нетепловых движений на различных высотах петель.

Заметим, что при вычислении v_{nt} в некоторых случаях в выражениях (14) и (15) второй член оказывается больше первого и v_{nt} получается мнимым. Очевидно, что это связано с неточностью определения наблюдаемых доплеровских ширин или же методикой определения температуры. Ясно, что это может иметь место только тогда, когда v_{nt} близко к нулю, поэтому в таких случаях мы принимали $v_{nt} = 0$.

**Скорости нетепловых движений в двух отдельных
корональных петлях на различных высотах**

h''	первая петля по[14]		вторая петля по[14]		усредненная по многим петлям по[2]	
	$v_{nt}(G)$ км/с	$v_{nt}(R)$ км/с	$v_{nt}(G)$	$v_{nt}(R)$	$v_{nt}(G)$	$v_{nt}(R)$
20	16.8	0	16.9	0	33.6	4.7
60	11.6	0	11.9	0	30.1	10.0
120	0	7.8	0	3.7	24.6	18.2

В таблице $v_{nt}(G)$ и $v_{nt}(R)$ - скорости нетепловых движений, полученных по зеленой (G) и красной (R) линиям, соответственно.

4. Обсуждение

Проблема исследования изменения скоростей нетепловых движений в корональных петлях с высотой представляет интерес для выявления наличия альфвеновских волн в этих структурах. Так как эти волны плохо поглощаются в короне, то, вследствие уменьшения плотности с высотой, скорости нетепловых движений должны увеличиваться.

С этой целью, приняв двухуровневые ионы FeXIV и FeX, из уравнений стационарности для этих ионов нами найдено выражение зависимости отношения интенсивностей линий $\lambda 5303\text{\AA}$ и $\lambda 6374\text{\AA}$ от отношения количества вышеуказанных ионов. Зная из наблюдений отношение интенсивностей этих линий и используя кривые ионизации, можно определить температуру и, после этого, скорость нетепловых движений.

С этой целью нами были построены зависимости температуры $\log T$ от отношения интенсивностей линий $\lambda 5303\text{\AA}$ и $\lambda 6374\text{\AA}$. При этом были использованы наблюдения [2] и [14]. Результаты определения температуры приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, для первых двух петель температура не меняется с высотой. Рост температуры составляет всего 1,5-2%. Для последних двух петель температура уменьшается с высотой всего на 2-3%.

Таким образом, мы можем сказать, что в приближении одинаковости температур в обеих линиях в корональных петлях температура с высотой почти не меняется. Если это так, то наблюдаемое изменение полуширин рассматриваемых линий с высотой обусловлено только с изменением скоростей нетепловых движений с высотой.

Как видно из таблицы 2, для линии $\lambda 5303\text{\AA}$ нетепловые скорости для всех петель уменьшаются с высотой, в то время как для линии $\lambda 6374\text{\AA}$, увеличиваются. Этот противоречивый результат не позволяют сделать однозначный вывод относительно изменения нетепловых скоростей с высотой и их обусловленность движениями на альфвеновских волнах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klimchuk J.A. 2006, SoPh. v. 234, p. 4.

2. Singh G., Sakurai T. and Ichimoto K. 2006 ApJ , v.639, p475-483.
3. Doschek G.A., Feldman U., Laming J. M., Schule M., Wilhelm K. 2001 ApJ, v. 546, p. 559-568.
4. Doschek G.A., Feldman U. 2000 ApJ, v. 529, p. 599- 406
5. Doschek G.A., Feldman U., Van Hoosier M.E., Bartoe J. D. F. T. 1976 ApJS. v.31, 417-443.
6. Doyle J.G., Banerjee D., Perez M.E. Coronal line width variation. 1998 SoPh, v. 181, p. 91-101.
7. Hassler D.M., Rottman G.S. Shoub E.C., Holzer T.E. 1997 ApJ, v. 484, p. L87- L90.
8. Seely J. F., Feldman U., Schuhle U., Wilhelm K., Curdt W., Lemaire P. 1997 ApJ, 1997, v. 484, p. L87- L90.
9. Arnaud M., Raymond T. 1992, ApJ. , v398, p. 394-406.
10. Guhathakurta M., Fisher R. R., Strong K. 1996 ApJ, v. 471, p. L69-L71.
11. Guhathakurta M, Fisher M. M., Altorck R. S. .1993 ApJ , v.414, p.L145-L148.
12. Raju P.K., Singh J. 1987. SoPh, v. 110, p. 271-280.
13. Peraiah A., Varghese A. 1989, SoPh, v. 124, p. 53.
14. Singh I., Ichimoto K. Sakurai T., Mineer S. 2003, ApJ. v. 585, p. 516- 524.

TAC İLGƏKLƏRİNDƏ TEMPERATURUN VƏ QEYRİ-İSTİLİK HƏRƏKƏT SÜRƏTLƏRİNİN TƏYİNİNƏ DAİR

C.M.QULUZADƏ, S.H.MƏMMƏDOV

XÜLASƏ

Tac ilgəklərində qeyri-istilik hərəkət sürətlərinin və temperaturunun təyininə baxılır. İkisəviyyəli atom yaxınlaşmasında $\lambda 5303 \text{ \AA}$ Fe XIV və $\lambda 6374 \text{ \AA}$ FeX tac üçün stasionarlıq tənlikləri qurulur və xətlərin müşahidə olunmuş intensivliklərinin ionlaşma temperaturundan asılılıq ayrılması qurulur. Bu əyridən tac ilgəklərində istilik hərəkət sürətləri və temperatur təyin edilir.

DETERMINATION OF THE TEMPERATURE AND NON-THERMAL VELOCITIES IN THE CORONAL LOOPS

J.M.GULUZADE, S.G.MAMMADOV

SUMMARY

The article studies the determination of the temperature and non-thermal motion velocities in the coronal loops. Stationary equations for Fe XIV and FeX ions have been constructed accepting their two level structure, the dependence of the relative intensities of $\lambda 5303 \text{ \AA}$ Fe XIV and $\lambda 6374 \text{ \AA}$ FeX lines on ionization temperatures and the general temperature T for both lines have been defined. We have applied the technique to four series of observations in the coronal loops.