

ASTROFİZİKA

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ И НЕТЕПЛОВЫХ
(ТУРБУЛЕНТНЫХ) СКОРОСТЕЙ В КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЛЯХ

Д.М.КУЛИ-ЗАДЕ*, С.Г.МАМЕДОВ**

Бакинский Государственный Университет**Шемахинская Астрофизическая Обсерватория**ckulizade@mail.ru*

Обычно считается, что температура корональных структур равна температуре излучения спектральных линий. В этом случае невозможно установить изменение температуры с высотой при максимальном значении доли ионов. Предлагается определить температуру корональных петель используя отношение наблюдаемых полных интенсивностей линий $\lambda 6374 \text{ \AA}$ FeX и $\lambda 5303 \text{ \AA}$ FeXIV и используя кривые ионизаций ионов FeX и FeXIV. Температуры излучения этих линий принимаются одинаковой.

После того как найдена температура, скорости нетепловых движений можно определить используя выражение для доплеровской ширины.

Этот метод был применен к трем сериям корональных петель. Найденные значения температур излучения этих линий оказались в интервале $5.90 \leq \log T_i \leq 5.58$. Значения скоростей нетепловых движений оказались в интервале $15 \text{ км/с} \leq v_{nt} \leq 30 \text{ км/с}$. Изменение этих параметров с высотой оказалось противоречивым.

Ключевые слова: Корона. Корональные петли. Температура. Скорость нетепловых движений.

1. Введение

В солнечной Короне наблюдаются яркие активные области, состоящие из систем тонких протяженных волокон в виде замкнутых магнитных петель. Их направления совпадают с направлением силовых линий магнитного поля. Эти магнитные трубки заполнены горячей корональной плазмой, где температура около $T \approx 2 \cdot 10^6 \text{ K}$.

Размеры петель превышают 30 диаметров Земли. Раньше предполагали, что причиной высокой температуры Короны являются магнитные поля, которые поднимают петли солнечной плазмы огромных размеров над фотосферой. Однако новые наблюдения корональных петель, проведенные на спутнике TRAGE, NASA указывает на иной источник энергии неизвестной природы. Снимки, сделанные на спутнике в области вакуумного ультрафиолета, свидетельствуют о том, что процесс нагрева происходит в нижней части Короны вблизи основания петель. Новые результаты опровергают общепринятую теорию равномерного нагрева петель.

Как известно, в корональных структурах, в том числе и в корональных петлях, наблюдается избыточное расширение эмиссионных линий помимо обычного теплового расширения. Это избыточное расширение вызвано нетепловыми движениями, обусловленными распространением гидродинамических волн различных мод [1-7].

Проблема определения температуры и скоростей нетепловых (турбулентных) движений в корональных петлях до сих пор не решена окончательно. Различные методы приводят к несовпадающим, скорее всего, сильно отличающимся результатам.

Обычно предполагается, что температура корональных структур, в том числе корональных петель, совпадает с температурой излучения корональных эмиссионных линий при максимальном значении доли ионов.

В таком приближении невозможно исследовать изменение температуры с высотой в Короне .

В данной работе предлагается новый метод для определения температуры и скоростей нетепловых движений в корональных петлях из отношения полных интенсивностей запрещенных линий $\lambda 6374.51 \text{ \AA}$ FeX и $\lambda 5302.80 \text{ \AA}$ Fe XIV с использованием ионизационных кривых FeX и FeXIV.

2. Определение температуры и скоростей нетепловых движений в корональных петлях

Суть нового метода определения температуры и скоростей нетепловых движений в корональных петлях заключается в следующем. Предполагается, что рассматриваемые эмиссионные линии образуются при одной и той же температуре. Очевидно, что интенсивность излучаемых эмиссионных линий корональной петли будет пропорциональна количеству атомов в единице объема в данной стадии ионизации. В работе Arnaud и Raymond [8] вычислена степень ионизации для широкого интервала температур от $\lg T=5.5$ до $\lg T=7.0$. По отношению интенсивностей линий можно определить температуру, при которой имеет место наблюдаемое отношение интенсивностей излучаемых линий. Кстати отметим, что отношение интенсивностей корональных эмиссионных линий зависит, в основном, от температуры, а не от плотности. Надо подчеркнуть, что предложенный нами метод определения температуры и скорости турбулентных движений в корональных петлях, следует применять только к тем линиям, которые наблюдались одновременно и с одинаковым временем экспозиции.

Таблица 1

Петли	h''	log T _i	v _{nt} , км/с	
			$\lambda 5302.80 \text{ \AA}$	$\lambda 6374.51 \text{ \AA}$
Первая петля (Singh et al. 2003)	20	5.90	23.2	16.8
	50	5.85	23.0	17.4
	150	5.90	15.4	21.2
Вторая петля (Singh et al. 2003)	20	5.90	23.2	16.3
	50	5.87	24.0	18.7
	150	5.58	18.6	23.6

Средняя по	20	5.86	25.5	17.9
многим петлям	100	5.90	30.5	22.9
(Singh et al.2004)	150	5.93	26.1	23.1

Мы использовали наблюдения Singh [1,12], которые отвечают этим требованиям. В указанной работе приведены наблюдаемые кривые зависимости отношений интенсивностей и полных полуширин линий $\lambda 5302.80 \text{ \AA}$ и $\lambda 6374.51 \text{ \AA}$ для разных высот по двум корональным петлям.

Мы определили температуру для двух корональных петель при высотах $h=20''$, $h=50''$ и $h=150''$. Результаты приведены в таблице 1.

После того, как определена температура, по доплеровской ширине линий можно определить скорости нетепловых турбулентных движений. При этом контур спектральной линии аппроксимируется доплеровским контуром; задавая равновесное значение температуры T_i , которая соответствует максимальной доли ионизационного состояния данного иона и используя выражение доплеровской ширины

$$\Delta\lambda_D = \frac{\lambda}{c} \sqrt{\frac{2kT_i}{m} + v_{nt}^2},$$

можно определить скорость нетепловых движений v_{nt} . Здесь λ -длина волны рассматриваемой линии, c - скорость света, k - постоянная Больцмана, m - масса иона. Значения T_i берутся из ионизационных кривых, рассчитанных, например в [8]. Здесь мы хотели бы отметить один существенный момент: наличие некоторой спектральной линии в спектре Короны некоторого иона (например, $\lambda 6374 \text{ \AA}$ FeXIV) не означает, что эта линия излучается только при T_i , соответствующей максимальному значению доли этого иона ($\log T_i=6.25$). Как видно из ионизационной кривой иона FeXIV, приведенной в [8], линии этого иона (в том числе и линия $\lambda 6374 \text{ \AA}$) могут излучаться в широком интервале температур: $\log T_i=6 \div 7$. То же самое можно сказать и про линии других ионов. Например, линия $\lambda 5303 \text{ \AA}$ FeXIV может излучаться в интервале значения температуры $\log T_i=5.6 \div 6.4$.

Таким образом, мы видим, что эти линии могут излучаться в широких интервалах температур и поэтому автоматическое принятие многими авторами для этих линий температуры излучения ($\log T_i=6.25$ для линии $\lambda 5303 \text{ \AA}$ и $\log T_i=6.0$ для линии $\lambda 6374 \text{ \AA}$) соответствующие максимальной доли ионов FeXIV и FeX нам представляется не совсем корректным.

Так как в различные эпохи и в различных направлениях зависимость плотности Короны значительно различаются, то результаты расчетов вышеотмеченных исследователей применять к нашей задаче, строго говоря, было бы не правильно. Кроме того, применять результаты этих работ к отдельным структурным элементам Короны, в частности, к корональным петлям (как это делают Singh et al. 2003) из-за их ограниченных размеров по лучу зрения также было бы неправильно.

Для того, чтобы удобно было пользоваться кривыми ионизации ионов Fe XIV и FeX, мы их несколько видоизменили. Они приведены на рисунке 1.

Определению температуры по соотношению интенсивностей линий $\lambda 5303 \text{ \AA}$ и $\lambda 6374 \text{ \AA}$ посвящены также работы [9-11]. В этих работах интенсивности

этих линий рассчитываются с учетом излучения по всей толщине Короны, принимая при этом во внимание изменение плотности Короны с высотой.

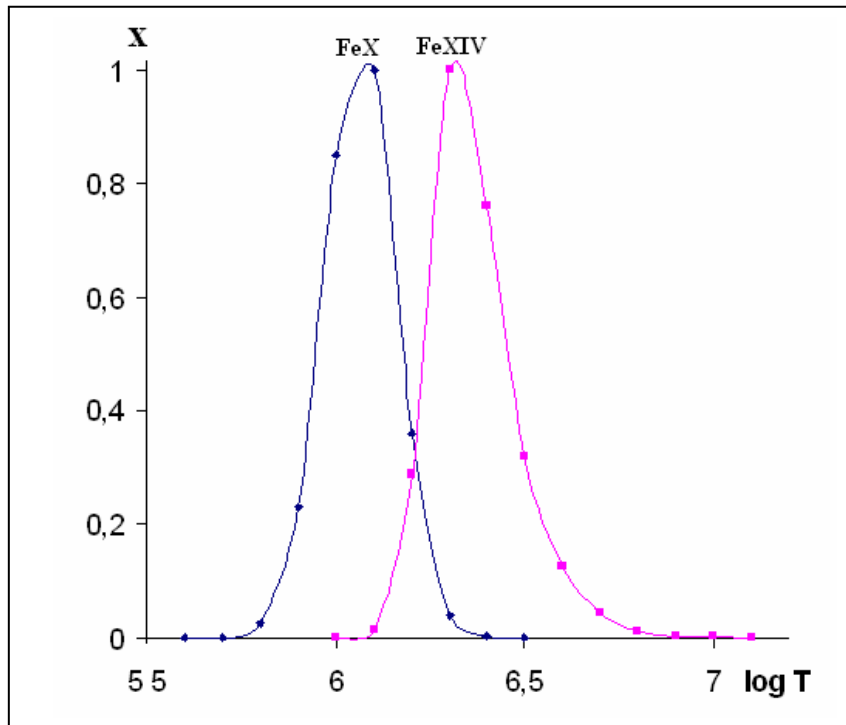


Рис.1. Ионизационные кривые ионов FeX и FeXIV

При определении T_t по ионизационным кривым следует пользоваться тем участком этих кривых, где ионизационная кривая FeX выше ионизационной кривой FeXIV, так как используемые наблюдаемые интенсивности линии λ 6374 Å больше таковых линии λ 5303 Å.

Если солнечная Корона (в том числе корональные структурные элементы) нагревается некоторыми модами МГД волн, то это должно влиять на изменение с высотой как температуры, так и скоростей нетепловых движений, если эти движения обусловлены распространением нагревающей волны. Изменения температуры и скоростей нетепловых движений с высотой приводит к изменению ширины спектральных линий с высотой. При малой диссипации волновой энергии ширина линий должна увеличиваться с высотой.

Наблюдаемые изменения ширины спектральных линий с высотой показывают противоречивые результаты. Кроме того, почти невозможно установить чем вызваны эти изменения: изменением температуры или скоростей нетепловых движений. Теоретические исследования равновесия корональных петель предсказывает увеличение температуры с высотой [13].

3. Заключение

По результатам первой серии наблюдений ионизационная температура

корональных петель T_i с высотой практически не меняется; по результатам второй серии она уменьшается от $\lg T_i = 5.90$ до $\lg T_i = 5.58$; а по средним результатам многих наблюдений $\lg T_i$ увеличивается от $\lg T_i = 5.86$ до $\lg T_i = 5.93$.

В изменениях скоростей нетепловых турбулентных движений в корональных петлях с высотой явная зависимость не наблюдается.

Для скорости нетепловых турбулентных движений по линиям $\lambda 5302.80 \text{ \AA}$ и $\lambda 6374.51 \text{ \AA}$ наблюдаются противоречивые результаты.

Для линии $\lambda 5302.80 \text{ \AA}$ скорости нетепловых движений с высотой в среднем уменьшаются, а для линии $\lambda 6374.51 \text{ \AA}$ несколько увеличиваются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Singh J., Sakurai T. and Ichimoto K. Do the line widths of coronal emission lines increase with height above the limb. *ApJ*. 2006, v.639, p.475-483.
2. Doschek G.A., Feldman U., Laming J. M., Schule M., Wilhelm K. Properties of Solar coronal plasmas observed above the limb. *ApJ*. 2001, v. 546, p. 559-568.
3. Doschek G.A., Feldman U. Extreme – Ultraviolet spectral line width in quiet Sun coronae plasmas. *ApJ*. 2000, v. 529, p. 599- 406.
4. Doschek G.A., Feldman U., Van Hoosier M.E., Bartoe J.D.F. The emission line spectrum above the limb of the quiet Sun. *ApJS*. 1976, v.31, p.417-443.
5. Doyle J.G., Banerjee D., Perez M.E. Coronal line width variation. *SoPh*. v. 181, p. 91-101.
6. Hassler D.M., Rottman G.S., Shoub E.C., Holzer T.E. *ApJ*. 1990, v. 348, p. 77-80. Line broadening of MGX 609 and 625 A coronal emission lines observed above solar limb. *ApJ*. 1997, v. 484, p. 87- 90.
7. Seely J.F., Feldman U., Schuhle U., Wilhelm K., Curdt W., Lemaire P. Turbulent velocities and ion temperatures in th solar corona obtained from SUMER line widths. *ApJ*. 1997, v. 484, p. 87- 90.
8. Arnaud M., Raymond T. Iron ionization and recombination rates and ionization equilibrium. *ApJ*. 1992, v.398, p. 394-406.
9. Guhathakurta M., Fisher R.R., Strong K. Temperature structure of the high latitude Corona. *ApJ*. 1996, v. 471, p. 69-71.
10. Guhathakurta M., Fisher M.M., Altorck R.S. Large –scale coronal temperature and density distribution . 1984-1992. *ApJ*. 1993, v.414, p.145-148.
11. Raju P.K., Singh J. Comparison of computed fluxes for FeX and FeXIV lines with observed values at 1980 eclipse. *SoPh*. 1987, v. 110, p. 271-280 .
12. Singh J., Ichimoto K., Sakurai T., Mineer S. Spectroscopic studies of the Corona. IV. Physical properties of coronal structure . *ApJ*. 2003, v. 585, p. 516- 524.
13. Singh J., Sakurai T., Ichimoto K., Wanfnabe N. Complex variations in the line intensity ratio of coronal emission lines with height above the limb *ApJ*. 2004, v. 617, p. 81-84.
14. Winebarger A.R., Warren H.P., Siton D.B. Evolving active region loops observed with TRASE. 1. Observation. *ApJ*. 2003, v. 593, p. 1164-1176.

TAC İLGƏKLƏRİNİN TEMPERATUR VƏ QEYRİ-İSTİLİK HƏRƏKƏT SÜRƏTLƏRİNİN TƏYİNİNƏ DAİR

C.M.QULUZADƏ, S.H.MƏMMƏDOV

XÜLASƏ

Adi qayda olaraq tac strukturlarının temperaturu spektral xətlərin şüalanma tempera-

turlarına bərabər olduğu hesab edilir. Belə olan halda ilgəklərdə temperaturun hündürlükdən asılı olaraq dəyişməsinə öyrənmək mümkün deyildir. Tac ilgəklərinin temperaturunu tapmaq üçün biz tacın $\lambda 6374 \text{ \AA}$ FeX və $\lambda 5303 \text{ \AA}$ FeXIV şüalanma xətlərinin intensivliklərinin nisbətindən və Fe X və FeXIV ionlarının ionlaşma əyrilərindən istifadə etməyi təklif edirik. Bu halda bu xətlərin şüalanma temperaturları eyni götürülür.

Temperatur tapıldıqdan sonra qeyri-istilik hərəkətlərinin sürətini dopler eninin ifadəsindən istifadə edərək tapmaq olar.

Bu metodu biz tac liflərinin üç seriya müşahidəsinə tətbiq etmişik. Bu şüalanma xətlərindən tapılan temperaturlar $5.90 \leq \log T_t \leq 5.58$ intervalında qeyri-istilik hərəkət sürətləri isə $15 \text{ km/s} \leq v_{nt} \leq 30 \text{ km/s}$ intervalında olduğu müəyyən edilmişdir. Bu parametrlərin hündürlükdən asılılığı ziddiyyətlidir.

Açar sözlər: Tac, Koronal ilgəklər, Temperatur, Qeyri-İstilik hərəkətlərin sürəti.

ON THE DETERMINATION OF TEMPERATURE AND NON THERMAL MOTION VELOCITIES IN CORONAL LOOPS

D.M.GULIZADEH, S.G.MAMMADOV

SUMMARY

Generally, one considers that temperature of the coronal structure equals to ion temperature of the spectral radiation line. In this case it is impossible to find how the temperature changes with height of a loop. We propose to determine the temperature of coronal loops using intensity relation of coronal lines $\lambda 6374 \text{ \AA}$ FeX and $\lambda 5303 \text{ \AA}$ FeXIV and using ionization curves of FeX and FeXIV ions. In that case the radiation temperature of these lines is supposed to be identical.

After determining the temperature one can find the non thermal motion velocities by using expression for Doppler width.

We applied this method to three sets of coronal loop observations. The found temperatures turned out in $5.90 \leq \log T_t \leq 5.58$; interval of non thermal velocities turned out in $15 \text{ km/s} \leq v_{nt} \leq 30 \text{ km/s}$. interval and variation with height of T_t and v_{nt} turned out contradictory.

Key words: Corona, Coronal Loops, Temperature, Nonthermal motion velocities.