

УДК 524-1/-8

С. Г. Мамедов¹, Д. М. Кули-Заде², З. Ф. Алиева², М. М. Мусаев¹¹Шемахинская астрофизическая обсерватория им. Н. Туси
Национальной академии наук Азербайджана
пос. Ю. Мамадалиева, Шемахинский район, Азербайджан
sabirmamedov@mail.ru, mamedovshao@gmail.com, mmusaev@mail.ru²Бакинский государственный университет Азербайджана
пр. Джавида 115, Баку, Az 1141
ckulizade@mail.ru, shabanova-zamina@yahoo.com

О доплеровской ширине спектральных линий

Приводятся примеры некорректных записей выражения для доплеровской ширины спектральных линий в некоторых литературных источниках, в результате чего соответствующие оценки нетепловых скоростей оказываются различными. В качестве примера показано, что оценки нетепловых скоростей, полученных в работе [Patsouracos S., Klimchuk J. A. *Astrophys. J.* 2006. 647. P. 1452], завышены на 30...40 % по сравнению с истинными значениями.

Ключевые слова: доплеровская ширина, нетепловые скорости, ошибки.

Введение. Доплеровская ширина спектральных линий определяется температурой излучающего элемента и нетепловыми движениями в излучающей среде. В случае оптически тонкого слоя выражение для доплеровского профиля спектральной линии записывается в следующем виде:

$$I(\lambda) = I_0 \exp \left(-\frac{\lambda^2}{D} \right). \quad (1)$$

Здесь $I(\lambda)$ — интенсивность спектральной линии на расстоянии λ от центра линии, I_0 — центральная интенсивность, D — доплеровская ширина.

Целью настоящей работы является разобраться с путаницей в выражении доплеровской ширины корональных линий, имеющей место в научной литературе.

Математическое выражение доплеровской ширины имеет следующий вид [1]:

$$D = \sqrt{\frac{2kT}{m}} + v_{nt}, \quad (2)$$

где T — температура, v_{nt} — скорость нетепловых движений. Определив из наблюдений тем или иным способом D , в принципе можно определить значения величин T и v_{nt} . Назовём выражение (2) «истинным» выражением доплеровской ширины.

В научной литературе, особенно в учебниках по общей астрофизике, приводимые выражения для доплеровской ширины в основном совпадают с «истинным» выражением доплеровской ширины (2). В то же время в книге В. В. Соболева [4] доплеровской шириной считается величина $2D$, а в двух учебниках А. В. Засова и К. А. Постнова [1, 3] выражение для доплеровской ширины записано в виде

$$D = \sqrt{\frac{1}{3} \frac{2kT}{m}} + v_{nt}.$$

Авторы утверждают, что «коэффициент 1/3 отражает равномерное распределение векторов скоростей по направлениям». Заметим, что именно выражение (1) как раз учи-

тывает «равнораспределение векторов скоростей по направлениям» (см. вывод выражения (1), например, в работе [1]).

В работе [15] выражение для профиля корональной спектральной линии, излучаемый единицей объема, записано следующим образом:

$$I(\lambda) = n^2 \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_c)^2}{2\lambda_c^2}\right).$$

Здесь n — плотность излучающих частиц, λ_c — длина волны центра линии, $\Delta\lambda$ — ширина линии, расширенной тепловыми движениями излучающих частиц, причем

$$\Delta\lambda = \lambda_c \frac{v_{th}}{c}.$$

Как видим, $\Delta\lambda$ — не что иное, как доплеровская ширина спектральной линии, однако в отличие от «истинного» выражения (1) в экспоненте перед λ_c стоит множитель 2. Ниже мы покажем, что множитель 2, появление которого не объясняется, встречается и в других литературных источниках.

В работе [11] выражение для «ширины линии» (не конкретизируя, что имеется в виду под этим термином) записано в следующем виде:

$$\frac{\sqrt{2}\sqrt{2kT/m}}{c}.$$

Видно, что $\frac{\sqrt{2}\sqrt{2kT/m}}{c}$ является доплеровской шириной, но появление множителя $\sqrt{2}$ в числителе не объясняется.

В работах [6—8, 13, 14, 17] выражение для доплеровской ширины написано в виде

$$\frac{1}{2c^2} \sqrt{\frac{2kT}{m}}.$$

Квадратный корень этого выражения

$$\frac{1}{c\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2kT}{m}}.$$

Как видно, это выражение отличается от «истинного» (2) наличием в знаменателе множителя $\sqrt{2}$.

В некоторых работах доплеровской шириной называют величину, равную половине полной ширины линии на половине интенсивности. Так, в работе [10] приведена формула

$$\Delta\lambda_D = \frac{2\sqrt{\ln 2}}{c} v_0,$$

где v_0 — наиболее вероятная скорость частиц. Легко можно показать, что это не доплеровская ширина, а полная полуширина $FWHM$.

В работе [5] полная полуширина спектральной линии записана в виде

$$FWHM = \frac{2\sqrt{2\ln 2}}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}}.$$

Это означает, что выражение для профиля линии должно иметь вид

$$I(\lambda) = I_0 \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_c)^2}{2\lambda_c^2 \Delta\lambda_D^2}\right),$$

что, конечно, неправильно (см. выражение (1)).

В работах [9, 12] доплеровская ширина записана в виде

$$\frac{1}{c} \sqrt{\frac{kT}{m}}$$

и названа «шириной линии». Слегка преобразуя это выражение, получим

$$\frac{1}{c} \sqrt{2} \sqrt{\frac{2kT}{m}}.$$

Как видим, это доплеровская ширина (без учета нетепловых скоростей) с непонятным множителем $\sqrt{2}$.

В работе [16] «ширина спектральной линии» записана в виде

$$\frac{2}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

Из рассуждений автора видно, что это удвоенная доплеровская ширина, иными словами — полная ширина линии на высоте e^{-1} центральной интенсивности.

Чтобы оценить, насколько влияет на результат расчетов использование некорректного выражения доплеровской ширины, остановимся несколько подробнее на работе [13]. Для определения нетепловых скоростей авторы пользовались доплеровским выражением в следующем виде:

$$\frac{2}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (3)$$

По профилям наблюдаемых трех корональных линий: Ne VIII 77.04, Mg X 62.49 и Fe XII 25.4 нм были определены значения доплеровских ширин. Для того чтобы найти соотношение между нетепловыми скоростями, найденными авторами $v_{nt}(au)$ по выражению (3) и $v_{nt}(tr)$, получаемому по истинному выражению (2), приравняем эти два выражения:

$$\frac{2}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}} v_{nt}(au) = \frac{2}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}} v_{nt}(tr),$$

откуда получим

$$v_{nt}(tr) = \sqrt{v_{nt}(au) \frac{1}{2} \frac{2kT}{m}} \quad (4)$$

Подставляя значения нетепловых скоростей v_{nt} , найденные из наблюдений в указанных трех линиях, а также значения тепловых скоростей v_{th} в выражение (4), получим значения $v_{nt}(tr)$ (см. табл. 1). Как видим, истинные значения нетепловых скоростей 30...40 % меньше значений, найденных в работе [13].

Заключение. В табл. 2 мы приводим список некорректных выражений для доплеровской ширины, найденных нами в различных литературных источниках.

Мы рассчитали заново полученные в [13] значения нетепловых скоростей, используя «истинное» выражение доплеровской ширины. Было показано, что значения, полученные в работе [13], завышены на 30...40 %.

Таблица 1. Значения скоростей v_{th} и $v_{nt}(au)$ по данным [13] и истинные значения $v_{nt}(tr)$

Линия, нм	v_{th} , км/с	$v_{nt}(au)$, км/с	$v_{nt}(tr)$, км/с
Fe XII 25.4	40	38	22
Mg X 62.49	24	20	13
Ne VIII 77.04	20	28	24

Таблица 2. Список некорректных выражений для доплеровской ширины

Выражение	Литературный источник	Выражение	Литературный источник
$\frac{2}{c} \sqrt{\frac{1}{3} \frac{2kT}{m}} v_{nt}$	[3, 4]	$\frac{\sqrt{2}}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}}$	[11, 16]
$I(\lambda) = n^2 \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2 \frac{2}{D}}\right)$	[5, 15]	$\frac{2}{c\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2kT}{m}} v_{nt}$	[6—12]

Заметим, что подавляющее большинство исследователей пользуются «истинным» выражением доплеровской ширины.

Авторы благодарны анонимному рецензенту, замечания которого позволили улучшить текст статьи.

1. Засов А. В., Постнов К. А. Общая астрофизика. 2006. М.: МГУ. 173 с.
2. Звездные атмосферы / Под ред. Дж. Л. Гринстейна. 1963. М.: ИЛ. 129 с.
3. Постнов К. А., Засов А. В. Курс общей астрофизики. 2005. М.: МГУ. 160 с.
4. Соболев В. В. Курс теоретической астрофизики. 1967. М: Наука. 95 с.
5. Antolin P., Rouypppe L. van der Voort. Observing the fine structure of loops through high-resolution spectroscopic observations of Coronal rain with the Crisp instrument at the Swedish telescope. *Astrophys. J.* 2012. 745. P. 152—173.
6. De Pontieu B., McIntosh S. W. Quasi-periodic propagating signals in the solar corona: the signature of magnetoacoustics waves of high-velocity up flows? *Astrophys. J.* 2010. 722. P. 1913—1029.
7. Dere K. P., Bartoe J.-D. F., Bruecner G. E., Cook J. W., Socker D. G. Discrete subresolution structures in the solar transition zone. *Solar Phys.* 1987. 114. N 2. P. 223—237.
8. Dere K. P., Mason H. E. Nonthermal velocities in the solar transition zone observed with the high resolution telescope and spectrograph. *Solar Phys.* 1993. 144. P. 217—229.
9. Harrison R. A., Hood A. W., Pike C. D. Off-limb line profiles and the search for wave activity in the Low Corona. *Astron. and Astrophys.* 2002. 392. P. 319—327.
10. Konjevic N., Dimitrijevic M. S., Wiese W. L. Experimental stark widths and shifts for spectral lines of neutral atoms (A critical review of selected data for the period 1976 to 1982). *J. Phys. and Chem. Ref. Data.* 1984. 13. P. 619—632.
11. McClemens K. G., Harrison R. A., Alexander D. The detection of wave activity in the solar corona using UV line spectra. *Solar Phys.* 1991. 131. P. 41—48.
12. O'Shea E., Banerjee D., Poedts S. Variation of coronal line widths on and of the disk. *Astron. and Astrophys.* 2003. 400. P. 1065—1070.
13. Patsouracos S., Klimchuk J. A. Nonthermal spectral line broadening and the nanoflare model. *Astrophys. J.* 2006. 647. P. 1452—1465.
14. Rankine W. J. M. On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbance. *Phil. Trans. Roy. Soc. London A.* 1870. 160. P. 277—291.
15. Verwichte E., Marsh M., Foullon C., Van Doosselaere T., De Moortel I., Hood A. W., Nakariakov V. M. Periodicspectral line asymmetries in solar coronal structures from slow magnetoacoustic waves. *Astrophys. J. Lett.* 2010. 724. P. L194—L198.
16. Zaqarashvili T. Spectral line non-thermal broadening and MHD in the Solar Corona. *AIP Conf.* 2009. 1121. P. 114—122.
17. Zhao G. Q., Wu D. J., Wang C. B. A study of line widths and kinetic parameters of ions in the solar corona. *Astrophys. and Space Sci.* 2014. 353. P. 373—386.

Статья поступила в редакцию 07.06.2017

С. Г. Мамедов¹, Д. М. Кули-Заде², З. Ф. Алиева², М. М. Мусаев¹

¹Шемахинська астрофізична обсерваторія ім. Н. Тусі

Національної академії наук Азербайджану

²Бакинський державний університет Азербайджану

ПРО ДОППЛЕРІВСЬКУ ШИРИНУ СПЕКТРАЛЬНИХ ЛІНІЙ

Приводяться приклади некоректних записів виразу для доплерівської ширини спектральних ліній в деяких літературних джерелах, внаслідок чого відповідні оцінки нетеплових швидкостей виявляються різними. Як приклад показано, що оцінки нетеплових швидкостей, отриманих в роботі [Patsouracos S., Klimchuk J. A. *Astrophys. J.* 2006. 647. P. 1452], завищені на 30... 40 % порівняно з істинними значеннями.

Ключові слова: доплерівська ширина, нетеплові швидкості, похибки.

S. G. Mamedov¹, D. M. Kuli-Zade², Z. F. Alieva², M. M. Musaev¹

¹Shemakha Astrophysical Observatory named after N. Tusi
of the Azerbaijan National Academy of Sciences

²Baku State University of Azerbaijan

DOPLER WIDTH OF SPECTRAL LINES

In this paper, cases of incorrect recording of expressions for the Doppler width of spectral lines by some authors analyzed in detail, resulting in the calculations of these authors of thermal velocities values are inaccurate. As an example it was re-calculated the values of thermal velocities calculated in the article by Patsouracos and Klimchuk [Astrophys. J. 2006. 647. P. 1452]. Calculations showed that the values obtained by the authors of nonthermal velocities are overestimated by 30—40 % compared to the true values.

Keywords: Doppler width, nonthermal velocities, mistakes.