

ОБ ОТСУСТВИИ НЕТЕПЛОВОЙ СКОРОСТИ
В ХОЛОДНОМ КОМПОНЕНТЕ ТЕНИ КРУПНОГО ПЯТНА

С.Г.МОЖАРОВСКИЙ

I. Введение

Нетепловыми скоростями в настоящей работе мы называем хаотические скорости, приводящие к доплеровскому уширению профилей спектральных линий. Часто эти скорости называют также микротурбулентными. Согласно обзору [1], по работам, выполненным до 1972 г., они составляют в тени пятна от 1 до 3 км/с. В упомянутых Беккересом [2] статьях, вышедших позднее 1970 г., нетепловые скорости V_t не превышают 0,7 км/с, однако в самой работе [2], выполненной очень тщательно, получены значения между 1,2 и 2,6 км/с по профилям немагнитных линий FeI $\lambda 5691,5 \text{ \AA}$ и TiI $\lambda 5713,9 \text{ \AA}$ в тени крупного пятна. Современная экспериментальная работа [3] для триплета FeI $\lambda 6302 \text{ \AA}$ требует отсутствия нетепловых скоростей. При построении моделей тени часто используется неизменная с глубиной микротурбулентная скорость величиной порядка 1 км/с [4-7]. В модели [8] нетепловые движения отсутствуют во всех слоях атмосферы, кроме самых верхних.

Предпринятое экспериментальное определение нетепловой скорости приводит к противоречию с результатами Беккера [2].

2. Материалы и методы

Использованные линии. Триплеты ZrI $\lambda\lambda 6127,5$ и 6143 \AA , описанные в работе [9], показывают отчетливое расщепление на компоненты в пятнах с полем порядка 3000 Гс. Из-за большой атомной массы циркония ($\mu = 91,2$ а.е.м.) температурная часть доплеровской ширины его линий оказывается достаточно узкой ($\Delta\lambda_D = 15,3 \text{ м\AA}$ при $T = 3100 \text{ K}$). Данные о линиях приведены в таблице. Длины волн, отождествление,

Длина волны, \AA	Элемент	Мультиплет № переход	g_H	g_B	g_{LS}	$W_{\text{ФК}}$, м\AA	ϵ_H , эВ	$lg(g_f)$
6127,475	ZrI	2 $a^3F_4 - z^3F_4^0$	1,24	1,23	1,250	3,5	0,15	-1,06
6143,183	ZrI	2 $a^3F_3 - z^3F_3^0$	1,06	1,08	1,083	2,5	0,07	-1,20

эквивалентные ширины в невозмущенной фотосфере и потенциалы возбуждения нижнего уровня взяты из таблиц [10], обозначения переходов – из таблиц мультиплетов [11], лабораторные значения факторов Ланде – из работы [12] и силы осцилляторов – из [13].

Линии мультиплета 2 циркония значительно усиливаются в пятне. Это означает, во-первых, что они образуются в наиболее холодных частях тени, а, во-вторых, можно пренебречь влиянием рассеянного из невозмущенной фотосферы света на профили этих линий.

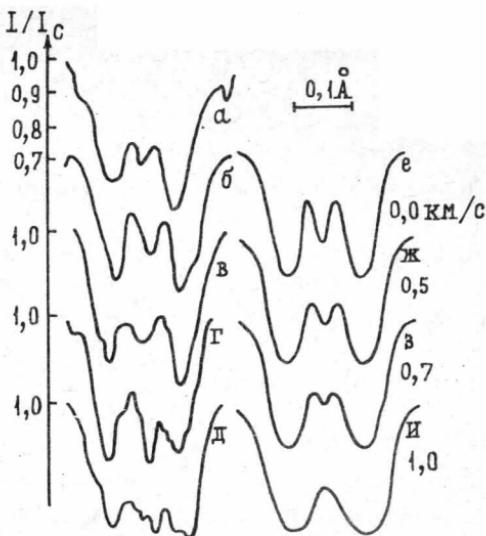
Наблюдения. Я воспользовался своими наблюдениями от II, I3 и I4 мая 1985 г. пятна № 26 (по бюллетеню "Солнечные данные") вблизи центра солнечного диска ($r/R = 0,60; 0,19$ и $0,33$ соответственно), где r/R — синус гелиоцентрического угла. Площадь пятна составляла около 400 м.д.п. Наблюдения проводились на телескопе АЦУ-5 со спектрографом АСП-20 Астрофизического отдела ИКИР ДВО АН СССР (г. Уссурийск). На пленку изопанхром тип-I7 с экспозицией I с без поляризационных анализаторов фотографировался спектральный диапазон $\lambda\lambda 6056-6174 \text{ \AA}$ с дисперсией $2,5 \text{ mm/\AA}$. Масштаб изображения Солнца на щели спектрографа $II,8''/\text{мм}$. Визуально оцененная амплитуда дрожаний на щели составляла около 1 мм (сильно замытое изображение), однако размер тени был достаточно велик, чтобы количество рассеянного света, достигающего центра тени, оказалось небольшим. Этот вывод следует из того, что контраст наиболее темной точки пятна при фотометрии поперек дисперсии составлял всего около 0,20 интенсивности фотосферы. В обычной серии наблюдений получалось по 5-6 одинаковых спектрограмм. Для фотометрии из них выбирались I-2 лучших.

Фотометрия. Полная фотометрия проведена на микроденситометре АМД-1 с ЭВМ СМ-4 СибИЗМИР. Щель фотометра соответствовала I'' по высоте щели и 20 m\AA вдоль дисперсии.

Вычисления. Теоретические профили триплетов циркония для таблично-заданной модели атмосферы получены с помощью созданного автором программного комплекса **SMAL**. Функционально настоящая версия **SMAL** является аналогом программы **MALIP** [14], т.е. она учитывает магнитооптический эффект, произвольное расщепление линий, принимает во внимание только чистое поглощение — без учета процессов рассеяния в линии. Однако два существенных момента реализованы пока более примитивным образом: а) учитывается только затухание Ван-дер-Ваальса по формулам [15]; б) коэффициент поглощения в непрерывном спектре определяется простой интерполяцией из таблицы поглощения отрицательным ионом водорода из книги [16]. В качестве модели тени взята модель [17] с постоянной по глубине величиной нетепловой скорости V_t .

3. Результаты

На рисунке приведены экспериментальные профили линии $ZrI \lambda 6127,5 \text{ \AA}$, измеренные по одной из спектрограмм за I4 мая 1985 г. с шагом I'' по высоте щели. Профили исправлены за рассеянный свет



Экспериментальные (а-д) и теоретические (е-и) профили линии $ZrI \lambda 6127,5 \text{ \AA}$. Рядом с теоретическими профилями приведены использованные в расчетах величины нетепловой скорости.

простым растяжением шкалы глубин линий в 2,5 раза (предполагаем, что истинный контраст пятна 8 %, измеренный – 20 %, а весь рассеянный свет приходит из фотосферы, где профиль данной линии практически отсутствует). Неровности, нерегулярности наблюдаемых профилей вызваны малостью отношения сигнал/шум – велико зерно фотоэмульсии и мала входная щель фотометра.

Теоретические профили рассчитаны методом Рунге–Кутта по модели тени Штельмакхера–Вира (1975 г.) [17] при постоянных с глубиной нетепловых скоростях, значения которых указаны справа от соответствующих графиков. Напряженность поля в данном расчете 3000 Гс, угол наклона силовых линий к лучу зрения 15° .

Сравнение профилей показывает, что наблюдаемым профилям наиболее соответствует теоретический с $V_t = 0 \text{ км/с}$, о чем можно судить по узости σ -компонентов и выраженности π -компонента (велико расстояние от верхушки π -компонента до его основания).

Еще раз подчеркнем, что наблюдаемый π -компонент не может быть вызван рассеянным светом, так как в фотосфере линия практически отсутствует, а в полутиени она уже достаточно сильно расщеплена.

Вид расчетных профилей изменяется не слишком сильно при изменении турбулентных скоростей от нуля до 0,5 км/с. Это вызвано тем, что доплеровская полуширина пропорциональна квадратному корню из

суммы квадратов тепловой и нетепловой скоростей, а тепловая скорость атомов циркония при температуре тени 3100 К составляет 0,75 км/с.

Таким образом, мы можем заключить, что нетепловые скорости в наиболее холодной части тени крупного пятна, наблюдаемого вблизи центра диска Солнца, могут быть менее 0,5 км/с.

4. Обсуждение

Полученный результат противоречит выводам Беккерса [2], хотя и подтверждается некоторыми другими работами [3, 18].

Наблюдения в [2] и в настоящей работе относятся к тени крупных стационарных пятен; в обоих случаях используются линии, усиливающиеся в пятне, даже фаза солнечного цикла примерно одна и та же. Различия остаются в типе линий (магнитные, немагнитные), в экспозициях (I с и 60–100 с), в конкретных экземплярах пятен. Кроме того, в случае моих наблюдений для обработки отбирались кадры, на которых наиболее отчетливо было заметно расщепление спектральных линий; таким образом, я не могу утверждать, что во все моменты времени нетепловые скорости в пятне отсутствовали.

Были проведены некоторые дополнительные вычисления в процессе поиска методических ошибок. Уменьшался до нуля параметр затухания a в линиях, варьировались силы осцилляторов q_f . Дело в том, что если используются неверные величины непрерывного поглощения (например, не те, что были приняты при построении модели), в первом приближении это эквивалентно изменению сил осцилляторов при расчетах профилей линий. При сочетании обоих факторов ($a=0$, $q_f = 1,4 \times q_f$) удалось добиться лишь того, что профиль, рассчитанный при $V_t = 0,7$ км/с, стал таким, каким был профиль с $V_t = 0,5$ км/с в нормальном расчете.

Из работы [2] не ясно, как именно проводились вычисления профилей. С помощью своей программы я провел расчеты для линии Ti I λ 5713,9 по модели тени Цвана [19] для гелиоцентрического угла, косинус которого равен 0,55, и сравнил результаты с профилем, приведенным в [2] в качестве примера. Оказалось, действительно, совпадение наступает при $V_t = 1,5\text{--}2,0$ км/с, но при этом силы осцилляторов приходится брать примерно вдвое меньше значений, получаемых из анализа спектра невозмущенной фотосфера [20].

Теоретические профили линий несколько различаются для разных моделей тени (что не меняет в принципе наших результатов). Это говорит о недостаточной достоверности моделей. Сама процедура вычисления профилей также должна совершенствоваться. Наблюдаемые профили не исправлены за влияние инструментального профиля спектрографа (его полуширина около 25 мА) и искажены рассеянным светом из полутени, где

напряженность поля в полтора раза меньше, чем в тени. Таким образом, σ -компоненты должны быть еще более узкими, т.е. уже, чем в случае $V_t = 0$ км/с (рис.е). Экзотические, порядка 2000 К температуры в тени пятна маловероятны. Скорее всего, факт узости σ -компонентов объясняется тем, что не учтены процессы рассеяния в линии, которые заостряют и углубляют профили.

ЛИТЕРАТУРА

- I. Обридко В.Н., Телицкая Р.Б. // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца.-М.: Наука, 1976. - Вып.40. - С.3-41.
2. Beckers J.M. // Astrophys. J. - 1976. - V.203, N 3. - P.739-752.
3. Skumanich A., Lites B.W. // Astrophys.J. - 1987. - V.322, N 1. - P.473-482.
4. Sobotka M. // Bull. Astron. Inst. Czechosl. - 1988. - V.39, N 4. - P.236-242.
5. Adjabshirzadeh A., Koutchmy S. // Astron. and Astrophys. - 1983. - V.122, N 1. - P.1-8.
6. Van Ballegooijen A.A.// Solar Phys. - 1984. - V.91, N 1.-P.195-217.
7. Stellmacher G., Wiehr E. // Astron. and Astrophys. - 1988. - V.191, N 1. - P.149-154.
8. Maltby P., Avrett E.H., Carlsson M. et al. // Astrophys. J. - 1986. - V.306, N 1. - P.284-303.
9. Гусейнов М.Дж. // Изв.Крымск. астрофиз. обсерв. - 1974. - Т.50.- С.168-174.
- IO. Moore C.E., Minnaert M.G.J., Houtgast J. The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å. Second revision of Rowland's preliminary table of Solar spectrum wavelengts. - Washington, 1966. - 349 p.
- II. Moore C.E. A Multiplet table of astrophysical interest. Contrib. Princeton Univ. Observ. - 1945.-N 20.
- I2. Moore C.E. Atomic energy levels, vol. II.Circ. Nat. Bur. Stand.- Washington, 1971.-N 3.
- I3. Гуртовенко Э.А., Костык Р.И., Орлова Т.В. // Кинематика и физика небесных тел. - 1986. - Т.2, № I. - С.20-23.
- I4. Landi E. Degl'Innocenti // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. - 1976. - V.25, N 2. - P.379-390.
- I5. Unsöld A. Physik der Sternatmosphären. - Berlin et al:Springer, 1955. - 866 p.
- I6. Аллен К.У. Астрофизические величины.-М.: Мир, 1977. - 446 с.
- I7. Stellmacher G., Wiehr E. // Astron. and Astrophys. - 1975. - V.45, N 1. - P.69-76.
- I8. Kneer F. // Astron. and Astrophys. - 1972. - V.18, N 1.-P.47-50.
- I9. Zwaan C. // Solar Phys. - 1974. - V.37, N 1. - P.99-111.
20. Костык Р.И. // Астрон. журн. - 1982. - Т.59, № 4. - С.693-698.

Астрофизический отдел ИКИР ДВО АН СССР, Уссурийск, СССР