

И. С. ШКЛОВСКИЙ

К ВОПРОСУ ОБ АНОМАЛЬНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПЛОТНОСТЕЙ В ХРОМОСФЕРЕ

(Представлено академиком Г. А. Шайном 1 VIII 1949)

Хорошо известно, что объяснение аномально низкого градиента плотностей материи в хромосфере является одной из основных трудностей современной астрофизики. Указанный градиент для различных элементов получается по хорошо разработанной методике из анализа интенсивностей линий излучения хромосферы, полученных во время полных солнечных затмений.

Если представлять концентрацию атомов (ионов) в хромосфере эмпирической формулой:

$$n(x) = n(0) e^{-\beta x}, \quad (1)$$

где $n(0)$ — концентрация атомов (ионов) у основания хромосферы ($x = 0$), то для водорода, например, согласно Мензелу (1), $\beta = 1,54 \times 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ (в предположении, что водород в хромосфере не ионизирован). Согласно Вилдту (2), для водорода $\beta = 0,92 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ в интервале $1500 \text{ км} < x < 10\,000 \text{ км}$.

Если бы хромосфера находилась в диффузионном равновесии при $T = 4830^\circ$, то для водорода $\beta_{\text{теор}} = 6,82 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$, т. е. наблюдаемый градиент в 4—7 раз меньше теоретического. В случае гелия расхождения между наблюдениями и теорией еще больше. Например, согласно (1) для гелия $\beta = 0,30 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$, а согласно (2) $\beta = 0,46 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ (для $x < 2000 \text{ км}$). Для металлов, согласно (3), различие в β для разных элементов лежит в пределах ошибок наблюдений.

В этом случае $n(x)$ нельзя представить одной экспонентой. Вместо (1) будем иметь (3):

$$n(x) = n(0) [0,982 e^{-5,9 \cdot 10^{-8} x} + 0,018 e^{-2,6 \cdot 10^{-8} x}]. \quad (2)$$

Примерно такие же результаты получены Вилдтом (2). Например, для FeI

$$n(x) = n(0) [e^{-8,09 \cdot 10^{-8} x} + 0,00020 e^{-1,76 \cdot 10^{-8} x}]. \quad (2a)$$

По поводу формулы (1) необходимо сделать следующие замечания. Наблюдения дают, в конечном итоге, населенность уровней, исходных при излучении линий спектра вспышки. Переход к населенности основного уровня (на котором находится большинство атомов и ионов) может быть сделан только при определенных предположениях о состоянии ионизации и возбуждения в хромосфере. Для этой цели все исследователи применяли формулы Больцмана и Саха, обычно при граничной температуре солнца (см., например, (2)).

Между тем, хорошо известные данные наблюдений с несомненностью указывают, что в хромосфере (а также и в протуберанцах) ионизация и возбуждение элементов отклоняются от состояния термодинамического равновесия при $T=5000^\circ$ тем сильнее, чем больше потенциалы возбуждения и ионизации (см., например, (3)). Вплоть до потенциалов порядка 7—8 в указанное отклонение совершенно незначительно.

Таким образом, можно считать, что для металлов переход от населенности возбужденных уровней к населенности основных уровней может быть достаточно корректно сделан при помощи формулы Больцмана с $T=4800-5700^\circ$. Физический смысл этого обстоятельства ясен: возбуждение и ионизация элементов с небольшими значениями потенциалов (металлы) осуществляется, главным образом, излучением фотосферы, идущим с различных эффективных уровней. Следовательно, формула (2) должна правильно описывать распределение плотностей металлов в хромосфере. В силу сказанного выше, мы, однако, не можем формулу (1) считать правильной для наиболее интересных элементов — водорода и гелия. Ионизированный кальций из-за величины своего потенциала ионизации занимает промежуточное положение между водородом и металлами. Заметим, что сравнительно малые значения β , полученные для Ca^+ и Mg (в резком отличии от других металлов), относятся к большим высотам. Например, для Ca^+ $10\,000\text{ км} < x < 14\,000\text{ км}$. Повидимому, условия в верхней и нижней хромосфере должны быть различны. Мы будем пока рассматривать нижнюю хромосферу ($x < 1500\text{ км}$), где обычно и наблюдаются слабые линии металлов.

Для дальнейшего существенен следующий основной факт. Как мы недавно показали (4), в солнечной короне отношение концентраций железа (во всех стадиях ионизации) и водорода остается постоянным на разных высотах (вплоть до $x \approx 1\,200\,000\text{ км}$, т. е. в области внешней короны) и близким к 1:10 000, т. е. примерно таким же, как и в обрабатываемом слое. То же самое относится и к никелю (вплоть до высот $x \approx 400\,000\text{ км}$; на больших высотах слабые линии никеля не наблюдаются).

Это обстоятельство заставляет нас сделать следующий основной вывод: вся материя в солнечной атмосфере (а следовательно, и в хромосфере) полностью перемешана. Это следует и из теоретических соображений, основанных на анализе турбулентных движений в короне и, особенно, в хромосфере (4).

Считая материю хромосферы полностью перемешанной и полагая относительное обилие элементов в ней таким же, как и в обрабатываемом слое, мы с необходимостью должны сделать вывод, что истинное распределение плотностей (во всех стадиях ионизации) одинаково для всех элементов. Следовательно, распределение плотностей водорода и гелия (в нижней хромосфере) должно описываться формулой (2).

Действительно, как видно из этой формулы, $\beta = 5,9 \cdot 10^{-8}\text{ см}^{-1}$, что близко к значению $\beta_{\text{теор}} = 6,8 \cdot 10^{-8}\text{ см}^{-1}$ в случае водорода при $T=4830^\circ$. Это и следовало ожидать, так как, в силу своего сравнительно небольшого обилия, металлы могут быть рассматриваемы как „примесь“ к „почти водородной“ хромосфере. Образно выражаясь, мы можем рассматривать эту „примесь“ как „краситель“ „почти водородной“ хромосферы: точно так же как введение красителя в полностью перемешанный турбулентный поток позволяет изучить характер движения жидкости по распределению концентрации красителя, распределение плотностей металлов в хромосфере дает распределение плотностей „невидимых“ водорода и гелия в основных состояниях.

Исследователи спектра вспышки, между прочим, ставили своей задачей изучение относительных обилий разных элементов в хромо-

сфере и зависимости их от высоты x . В частности, Вилдт (²) нашел, что в то время как относительное обилие металлов в хромосфере примерно такое же, как и в обрабатываемом слое, обилие водорода резко растет с высотой и в верхней хромосфере в сотни раз больше, чем в нижней.

Однако, если принять основное положение о полном перемешивании элементов в хромосфере, такая постановка задачи будет совершенно неправильной. Очевидно, результат Вилдта может быть истолкован в том смысле, что ионизация водорода растет с высотой. Излучение в линиях серии Бальмера и Пашена обусловлено рекомбинациями и, следовательно, резко зависит от степени ионизации водорода в хромосфере.

Те же самые соображения еще в большей степени относятся и к гелию.

Этот рост степени ионизации с высотой никоим образом не может быть объяснен уменьшением плотности электронов в хромосфере. Возможная причина этого явления будет изложена в следующем сообщении.

Резюмируя, следует сказать, что естественное предположение о полном перемешивании элементов в хромосфере, основанное на изучении спектра вышележащей короны, позволяет объяснить наблюдаемое распределение плотностей в хромосфере. При этом с необходимостью следует, что ионизация водорода и гелия должна быстро расти с высотой. Кинетическая температура нижней хромосферы оказывается весьма умеренной — около 5000° , что следует из значения β для водорода, близкого к $\beta_{теор}$. Заметим, что более высоких значений кинетической температуры в нижней хромосфере нельзя ожидать из-за отсутствия в спектре вспышки зеленой линии полярных сияний $\lambda 5577$ (⁴).

Крымская астрофизическая обсерватория
Академии наук СССР

Поступило
27 VII 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ D. Menzel and J. Cillió, Harv. Coll. Obs. Circ., 410 (1935). ² R. Wildt, *Astroph. Journ.*, 105, 36 (1947). ³ А. Унзольт, *Физика звездных атмосфер*, 1949.
⁴ И. С. Шкловский, Докторская диссертация, МГУ, 1949.