

А. Б. СЕВЕРНЫЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ В СВЕЧЕНИИ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТУБЕРАНЦЕВ

(Представлено академиком Г. А. Шайном 22 V 1950)

Явление солнечных протуберанцев — одно из наиболее загадочных явлений астрофизики как в отношении природы движения и сил, вызывающих наблюдаемые изменения в протуберанцах, так и в отношении природы их свечения. Количественные данные наблюдений, которые получались до сих пор, — это данные о спектрах отдельных протуберанцев и данные о траекториях узлов и струй в протуберанцах; сами же процессы „возгорания“ и затухания протуберанцев почти не изучены количественным образом, в частности, в связи с их движениями и особенностями спектра.

Сконструированный и изготовленный в 1948 г. А. Б. Гильваргом и автором узкополосный (ширина полосы $1,8 \text{ \AA}$) интерференционно-поляризационный фильтр (^{1,2}) и коронограф типа Лио явились вполне эффективными средствами для одновременного изучения процессов движения и свечения узлов и струй протуберанцев в лучах водородной линии H_α ($\lambda 6562,8 \text{ \AA}$) посредством стандартизации и фотометрической калибровки кинофильмов (описание кинопроцесса см. в (³)). В ряде случаев этому материалу сопутствовали спектрограммы протуберанцев, полученные на спектрогелиоскопе со спектрографом (см. (⁴)). Были получены зависимости интенсивности свечения от времени для отдельных движущихся узлов и струй в протуберанцах, а также одновременные сведения о траекториях и скоростях; измерения спектрограмм в отдельных случаях дали сведения о движениях по лучу зрения. В соответствии с непосредственными наблюдениями обнаружилось характерные для большинства протуберанцев колебания свечения, выражающиеся в сравнительно быстрой вспышке и более медленном затухании; „продолжительность жизни“ узла (время затухания яркости до половины максимального значения) колеблется в пределах от одной минуты до нескольких десятков минут (для узлов, составляющих часть неподвижного протуберанца) и возрастает довольно быстро с размером узла (почти как квадрат размера).

На рис. 1 приведены обе эти зависимости: зависимость относительной интенсивности свечения от времени и зависимость времени затухания τ от размера l для ряда характерных узлов, движение которых протекало почти перпендикулярно лучу зрения. Интенсивность свечения в лучах H_α протуберанцев и узлов в момент наибольшего „разгорания“ колеблется, по нашим измерениям, от $5 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^5$ эрг/см² сек. \AA и не показывает, по видимому, зависимости от скорости движения (ср. данные Петита (⁵)). Но обнаруживается, с другой стороны, вторая характерная зависимость, наблюдаемая нами для эруптивных (взрываю-

щихся) протуберанцев, — это резкое увеличение свечения при внезапных изменениях скорости, столь характерных для движений узлов в эруптивных протуберанцах. Рис. 2 иллюстрирует эту зависимость в 6 случаях, когда узлы имели небольшие как положительные, так и отрицательные лучевые скорости. На рис. 3 воспроизведена фотография одного из эруптивных протуберанцев 27 X 1948 г.

Кинетическая температура протуберанцев, как о ней можно судить по спектру, не отличается заметно от температуры поверхности Солнца, $\sim 5000^\circ \text{K}$. В то же время окружающая протуберанцы корона имеет температуру около 1 млн. градусов. Поэтому, не касаясь неясного и

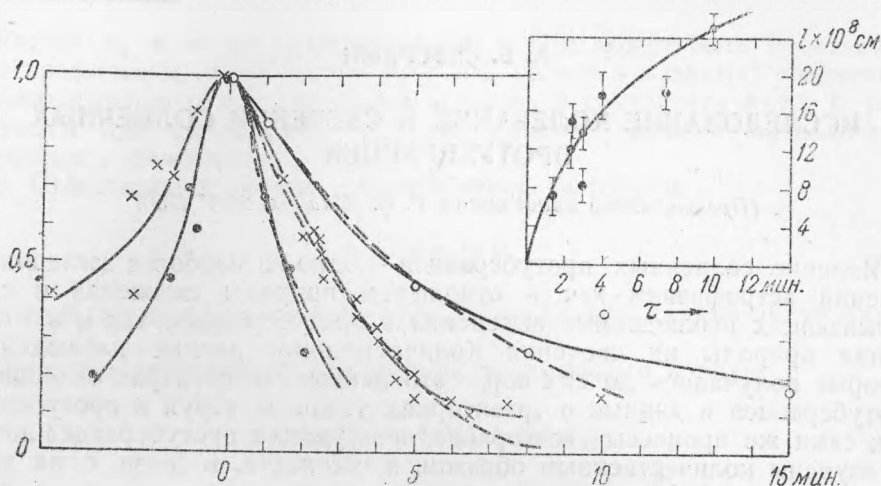


Рис. 1. Зависимость интенсивности от времени в некоторых характерных случаях (сплошная линия): точки — среднее для трех узлов активного протуберанца 14 XI 1949 г. $14^{\text{h}}50^{\text{m}}$; крестики — два узла для активного протуберанца от 25 X 1949 г. $15^{\text{h}}45^{\text{m}}$ и два узла эруптивного протуберанца от 13 VIII 1949 г. $15^{\text{h}}30^{\text{m}}$; кружки — характерный узел в большом эруптивном протуберанце 27 X 1948 г. $11^{\text{h}}30^{\text{m}}$ (время начала наблюдения местное). В правом углу — зависимость времени затухания от размера для тех же узлов

трудного вопроса об образовании „возгорания“ протуберанца и независимо от этого вопроса, мы можем, без сомнения, ожидать наличия процесса „прогрева“ протуберанцев короной, сопровождающегося ростом ионизации водорода и уменьшением числа рекомбинаций протонов и электронов со временем, т. е. уменьшением интенсивности рекомбинационного свечения. Энергия, возникающая от рекомбинаций электронов в основное состояние водородного атома, на единицу объема может быть вычислена по формуле ⁽⁶⁾

$$\varepsilon_\nu d\nu = N_i N_e \frac{K h e^{-h(\nu-\nu_0)/kT_e}}{4\pi T_e^{3/2}} d\nu, \quad K \equiv \frac{2^4}{3\sqrt{3}\pi} \frac{8\pi^2 e^2 R^2}{mc^3} \frac{h^3}{(2\pi mk)^{3/2}}, \quad (1)$$

где T_e — кинетическая (электронная) температура, N_i — число ионов, N_e — число электронов ($N_i \simeq N_e \simeq 5 \cdot 10^{10}$, так как по числу атомов водород подавляюще превосходит остальные элементы); остальные постоянные имеют обычный смысл. Уравнение переноса дает для интенсивности излучения выражение

$$I_\nu d\nu = \varepsilon_\nu d\nu \frac{1}{K_\nu} (1 - e^{-\tau_\nu}), \quad k_\nu = N_0 \alpha_\nu = 6,3 \cdot 10^{-18} N_0 \left(\frac{\nu_0}{\nu} \right)^3, \quad (2)$$

где α_ν — атомный коэффициент поглощения за границей серии Ляймана, N_0 — число нейтральных атомов водорода на 1 cm^3 (10^{10} , так как

ионизация водорода аномально высока), $\tau_v = k_v s$ — оптическая глубина (на границе серии Ляймана $\tau_v \cong 10$ или несколько больше для обычных узлов протуберанца, у которых $s = 10^8 - 10^9$ см). Простое вычисление по формулам (1) и (2) для протуберанцев размером $\sim 10^9$ см дает для интенсивности на границе серии Ляймана значение $\cong 10^8$ эрг/см² сек. Å, что в $\sim 10^8$ раз превышает излучение черного тела для той же длины волны и при той же температуре $T_e = 5000^\circ \text{K}$. Это показывает, что излучение протуберанцев существенно неравновесный процесс. Если, следовательно, протуберанцы покрывают заметную роль диска Солнца, то их ультрафиолетовое излучение значительно превосходит ультра-

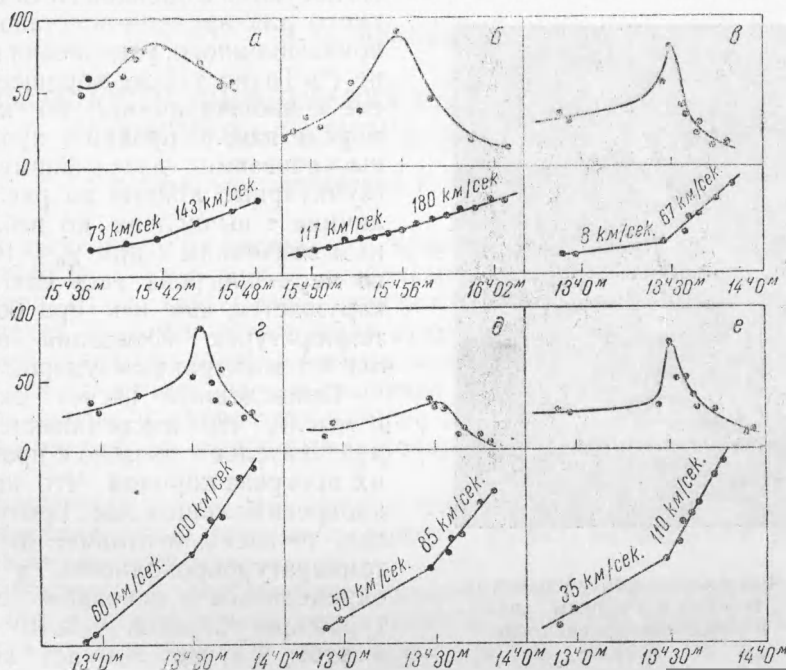


Рис. 2. Зависимость вспышки свечения от внезапных изменений скорости в эруптивных протуберанцах от 13 VIII 1949 г. (а, б) и от 27 X 1948 г. (в — е); для каждого узла сверху представлена зависимость интенсивности свечения (в произвольных единицах) от времени, внизу — зависимость высоты узла от времени

фиолетовое излучение всей фотосферы Солнца, а колебания этого излучения при вспышках больших узлов могут вызывать возмущения земной ионосферы (ср. аналогичный результат Киппенхайра⁽⁷⁾). Эти подсчеты ультрафиолетового излучения подтверждают также наши непосредственные измерения интенсивности узлов в линии H_α .

Прогрев узлов в грубых чертах можно изучать с помощью обычного уравнения теплопроводности с переменным коэффициентом температуропроводности χ , когда в начале процесса прогрева (пока $T_e \ll T_c$ — температуры короны) можно принять

$$\chi = \frac{1}{3} V \sqrt{\frac{3kT_e}{m_e}} \frac{1}{N_i \pi \sigma^2} \equiv \lambda T_e^{1/2}, \quad \frac{\partial T_e}{\partial t} \leq \frac{5}{2} \lambda T_e^{3/2} \left(\frac{T_c}{i/2} \right)^2, \quad (3)$$

где $\sigma = 2.8 \cdot 10^{-3} / T_e$ — сечение соударений электрона с ионами; в условиях солнечных протуберанцев $N_i \cong N_e \cong 5 \cdot 10^9$ и $\lambda \cong 5.8$ (ср. ⁽⁸⁾), а l — размер прогреваемой области. Прогрев идет несколько медленнее, чем это требует уравнение (3), а рекомбинационное свечение, согласно (1), (2) и (3), уменьшается несколько медленнее, чем это требовала бы формула

$$I = I_0 \left[1 - \frac{\sqrt[3]{2}-1}{\sqrt[3]{2}} \frac{t}{\tau} \right]^3, \quad \tau = \frac{l^2}{\chi_0}, \quad \chi_0 = \frac{\sqrt[3]{2}}{3} 5\lambda \sqrt{T_{e0} T_c} \quad (4)$$

где τ — время затухания свечения в два раза, χ_0 — „эффективная“ температуропроводность, T_{e0} — начальная температура ($\cong 5000^\circ \text{K}$). При $T_c = 5 \cdot 10^5$ величина $\chi_0 \cong 10^{16}$; наблюдаемая же связь между τ и l представляется лучше всего зависимостью $\tau = l^2 / \chi_{\text{набл}}$, где $\chi_{\text{набл}} = 8 \cdot 10^{15}$ (кривая в верхнем углу рис. 1). Заметим, что наши оценки хорошо

согласуются с оценкой И. С. Шкловского для времени восстановления ионизационного равновесия в короне ⁽⁹⁾. Точно так же хорошее согласие с наблюдениями, по крайней мере в начале процесса прогрева и высвечивания, дает формула (4) (пунктирные кривые на рис. 1); величина τ вычислена по наблюдаемым значениям l при $\chi_0 = 10^{16}$. Но по мере прогрева весь наш расчет нарушается, так как при больших температурах ионизация определяется электронным ударом.

Приведенный расчет склоняет к мысли, что высвечивание узлов действительно связано с процессом их прогрева короной. Что касается прогрева больших масс протуберанцев, то здесь, в отличие от узлов, температуропроводность χ будет определяться в основном температурой протуберанца ($\chi_0 \cong 10^{10} - 10^{11}$); в этом случае τ будет порядка

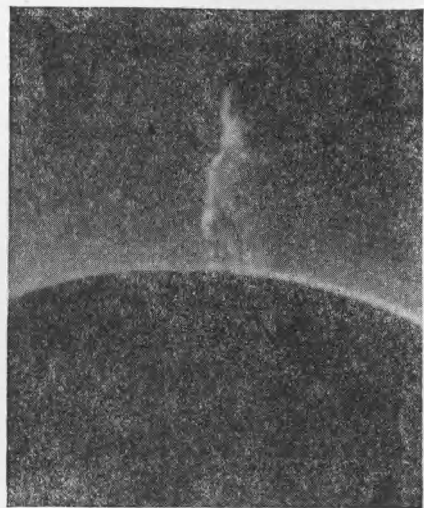


Рис. 3. Фотография протуберанца от 27 X с хорошо изученным движением и колебаниями свечения

суток, что и наблюдается для больших, спокойных протуберанцев.

Если теперь узел движется к короне с ее струйчатой структурой и неоднородностями и попадает в область, где плотность мала, то скорость узла внезапно возрастает благодаря уменьшению торможения. Одновременно узел расширяется, его плотность и температура уменьшаются, а вместе с тем рекомбинационное свечение увеличивается. Пройдя область низкой плотности, узел вновь высвечивается. Возможно, эти соображения объясняют связь вспышек и скачков скорости в эруптивных протуберанцах (рис. 2).

Что касается возникновения свечения протуберанцев, то здесь требуется дальнейшее детальное изучение; в то же время трудно отказаться от впечатления, что мы имеем здесь дело с адиабатным расширением и переохлаждением водорода, быстро выброшенного из глубин Солнца в раскаленную плазму солнечной короны.

Крымская астрофизическая обсерватория
Академии наук СССР

Поступило
3 V 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Б. Гильварг и А. Б. Северный, ЖТФ, 19, 997 (1949). ² А. Б. Северный и А. Б. Гильварг, Изв. Крымск. астрофиз. обсерватории, 4, 1 (1949). ³ А. Б. Северный и А. Б. Гильварг, Изв. Крымск. астрофиз. обсерватории, 6 (1950). ⁴ А. Б. Северный, Изв. Крымск. астрофиз. обсерватории, 4 (1949). ⁵ E. Pettit, Ap. Journ., 88, 244 (1938). ⁶ Д. Мензель и др. Физические процессы в газовых туманностях, М., 1948, стр. 14. ⁷ Kierpenheuer, Forschungsber., No. 5, Reichst. f. Hochfreg. Forsch., Freib., 1944. ⁸ T. Coroling, Proc. Roy. Soc. (A), 183, 453 (1945). ⁹ И. С. Шкловский, Изв. Крымск. астрофиз. обсерватории, 6 (1950).