

Член-корреспондент АН СССР Э. Р. МУСТЕЛЬ

О МЕХАНИЗМЕ СВЕЧЕНИЯ ГЕЛИЕВЫХ ФЛОККУЛОВ

Для изучения вопроса о физической природе солнечных флоккулов как областей хромосферы, располагающихся непосредственно над факелами, весьма важно истолкование спектрогелиограмм, получаемых в линиях различных элементов. При этом следует выбирать элементы как можно больше отличающиеся друг от друга по своим оптическим свойствам (разумеется, при данных физических условиях). В первую очередь к таким элементам следует причислить водород, гелий и ионизованный кальций. Как известно, спектрогелиограммы, снимаемые в лучах линий бальмеровской серии, линиях H и K , Ca^+ и инфракрасной линии λ 10830 Å нейтрального гелия, резко различаются по своему характеру.

Вопрос о механизме свечения флоккулов в линиях H и K , Ca^+ и в линиях бальмеровской серии водорода уже обсуждался ранее автором (¹⁻³). В этих работах было найдено, что механизм свечения невозмущенной хромосферы и флоккулов в линиях H и K , Ca^+ — возбуждение уровней $4^2P_{1/2}$ и $4^2P_{3/2}$ электронным ударом (^{1, 2}), причем кинетическая температура, необходимая для создания наблюдаемой эмиссии в центрах линий H и K , должна быть не особенно высокой, возможно, даже значительно меньше чем 7500° . Рекомбинационные процессы не могут играть здесь никакой заметной роли.

С другой стороны, механизмом свечения хромосферы в центральных частях линий бальмеровской серии должны быть (возможно, за исключением тех мест диска, где наблюдается яркое флоккулярное излучение, см. далее) рекомбинационные процессы (^{1, 3}). Различие в механизмах свечения объясняет совершенно различный характер кальциевых и водородных спектрогелиограмм. Поскольку вероятность рекомбинации пропорциональна $n_e n_p$, где n_e и n_p — соответственно, электронная и протонная концентрации, вид водородной спектрогелиограммы (в частности, «вихри» и т. д.) должен в значительной степени отражать распределение средней плотности хромосферного вещества по солнечному диску, конечно, с учетом возможных изменений средней степени ионизации водорода. И так как (с указанным возможным исключением) кинетическая температура хромосферы недостаточна высока для заметной ионизации водорода (⁴, § 31), то распределение средней ионизации водорода по диску Солнца, а следовательно, и распределение яркости на водородной спектрогелиограмме, не должны быть обязательно связаны с изменениями по диску Солнца в величине средней кинетической температуры хромосферы.

Напротив, эти изменения (повышения) кинетической температуры, согласно вышесказанному, определяют само наличие флоккулов в H - и K -линиях ионизованного кальция, а «легкость» возбуждения атомов Ca^+ объясняет относительно большую площадь, занимаемую кальциевыми флоккулами на диске. Здесь изменения интенсивности свечения определяются изменениями по диску средней величины $n_e n_1(\text{Ca}^+) q_{12} F_{12}(T_e)$ в хромосфере, где $n_1(\text{Ca}^+)$ — средняя концентрация

атомов Ca^+ в основном состоянии, q_{12} — среднее сечение возбуждения электронным ударом и $F_{12}(T_e)$ — величина, являющаяся чувствительной функцией кинетической температуры. В выражении $n_e n_p$ и в только что написанном выражении общим множителем является только n_e ! В частности, величина n_p (близкая к n_e) может меняться совершенно независимо от изменений $n_1(\text{Ca}^+)$. Следует здесь же отметить, что из-за рекомбинационного характера свечения хромосферного водорода, связанного в основном с большим количеством водородных атомов, а следовательно, при данной ионизации и протонов, водородные спектрогелиограммы («вихри», волокнистый характер структуры спектрогелиограмм и т. д.) должны отличаться от всех остальных случаев. Можно заранее предсказать, что не только Ca^+ , но и все остальные металлы не должны давать спектрогелиограмм, сходных по своему характеру с водородными.

Выше мы сделали оговорку о том, что рекомбинационный механизм свечения хромосферных атомов водорода, возможно, не соблюдается в тех местах поверхности Солнца, где наблюдается само яркое флоккулярное излучение в линии H_α . Как указывалось ранее (³), не исключено, что в ряде мест солнечной поверхности кинетическая температура хромосферы может иметь уже столь высокое значение, что должен действовать механизм возбуждения атомов водорода электронным ударом. Быть может*, эти условия реализуются как раз там, где наблюдаются яркие водородные флоккулы в H_α . Однако, независимо от решения этого сложного вопроса (см. далее), представляется совершенно очевидным, что в тех местах солнечного диска, где наблюдаются яркие водородные флоккулы, должна или быть весьма высока кинетическая температура хромосферы или же должен действовать какой-то весьма эффективный ионизирующий механизм. Действительно, следует иметь в виду, что как ионизационный потенциал, так и потенциалы возбуждения уровней с основного уровня у атомов водорода относительно высоки. Но раз так, то следует ожидать, что гелиевы флоккулы во всех линиях должны по своим размерам и очертаниям приближаться к водородным, но не к кальциевым флоккулам; для образования последних достаточно, как мы говорили, относительно небольшого повышения кинетической температуры хромосферы.

Эти последние соображения о гелиевых флоккулах полностью подтверждаются наблюдениями. Согласно данным М. Д'Азамбужа и Л. Д'Азамбужа (⁵, ⁶), существует тесное соответствие в виде спектрогелиограмм, получаемых в лучах линии λ 10830 Å и в лучах линии H_α , с той только разницей, что флоккулы в H_α яркие, а в линии λ 10830 Å темные.

Однако, как показал А. А. Никитин (⁷), появление именно линии поглощения λ 10830 Å в спектре возмущенных областей на диске Солнца можно объяснить, считая, что она возникает за счет накопления атомов гелия в метастабильном состоянии 2^3S вследствие рекомбинаций на все триплетные уровни. Что же касается линии гелия λ 5876 Å, то ее отсутствие (как эмиссионной линии) в спектре флоккулов** следует объяснить тем, что ионизация гелия и кинетическая температура электронов во флоккулах недостаточно высоки для создания здесь необходимого числа эмиссионных актов.

Оставляя дальнейшее обсуждение этого вопроса для более подробной статьи, сделаем ряд замечаний о возможной природе механизма избыточной ионизации хромосферных водорода и гелия в тех

* Хотя здесь имеются трудности, см. далее.

** За исключением только очень ярких флоккулов, близких к хромосферным вспышкам.

местах солнечного диска, где наблюдается яркое флоккулярное свечение в линии H_α и одновременно ослабление яркости диска в линии $\lambda 10830 \text{ \AA}$. Следует сразу же отметить, что механизм ионизации хромосферы корональным излучением (см. (4), § 31) встречается в данном случае с той трудностью, что области короны с повышенной интенсивностью монохроматического коронального излучения обычно занимают на Солнце довольно большую протяженность по высоте и в стороны. Поэтому следовало бы ожидать, что площадь, занимаемая гелиевыми и водородными флоккулами, будет даже больше, чем площадь, занимаемая кальциевыми флоккулами. Это же полностью противоречит наблюдениям. Часто яркие области в H_α и, соответственно, темные в $\lambda 10830 \text{ \AA}$ имеют вид узких полосок, отдельных точек, в ряде случаев яркое излучение в H_α следует отдельным ветвям «вихрей» и т. д.

Предположение о том, что в рассматриваемых нами областях кинетическая температура самой хромосферы весьма высока, также встречается с рядом трудностей (см., например, (2), первая работа, стр. 36—37).

Автор считает в соответствии с уже изложенной им гипотезой (там же, стр. 39—40), что с обычной хромосферной материей во флоккулах сосуществует (как это часто наблюдается в протуберанцах) высоконагретая материя. Несмотря на возможное наличие электромагнитных барьеров между этими двумя фазами существования солнечных газов, часть электронов могла бы проникать в толщу собственно хромосферных конденсаций (струй) и ионизовать там атомы. Проведем ориентировочный подсчет того количества корональных электронов, которое необходимо для создания ожидаемой ионизации гелия во флоккулах. Пусть в 1 см^3 флоккулы будет n_0 нейтральных атомов гелия в основном состоянии, n_+ — однажды ионизованных атомов гелия. Пусть n_e будет концентрация хромосферных электронов, n_e^* — «эффективная» концентрация корональных электронов, т. е. тех электронов, которые могут попадать в хромосферную материю и ионизовать ее.

В силу стационарности мы можем написать

$$n_e^* n_0 F_{1f}(T_e^*) \cong n_+ n_e \Phi(T_e), \quad (1)$$

где $F_{1f}(T_e^*)$ — вероятность ионизации электронами, причем T_e^* — кинетическая температура коронального газа, которую мы примем равной 10^6 , T_e — температура хромосферы. Полагая $n_e^* = \alpha n_e$, получим:

$$\alpha \cong \frac{n_+}{n_0} \frac{\Phi(T_e)}{F_{1f}(T_e^*)}. \quad (2)$$

Принимая T_e равным 10000° ($\Phi(T_e)$ очень слабо зависит от T_e), получим

$$\alpha \cong 4,2 \cdot 10^{-5} \frac{n_+}{n_0}. \quad (3)$$

В основании невозмущенной хромосферы, согласно И. С. Шкловскому ((4), § 31), отношение $n_0 : n_+ \cong 6,8 \cdot 10^4$. Если во флоккулах это отношение даже в 10^3 раз меньше, то $\alpha \cong 6,2 \cdot 10^{-7}$. Следовательно, при $n_e = 5 \cdot 10^{11}$ величина $n_e^* \cong 3 \cdot 10^5$, что примерно в 2000 раз даже меньше, чем n_e в основании самой короны.

Не является ли аномально высокая степень ионизации водорода и гелия и в невозмущенной хромосфере причиной действия того же самого механизма? (Следует напомнить, что механизм ионизации хро-

мосферного водорода монохроматическим корональным излучением встречается с трудностями ((⁴), § 31.) В рассматриваемом случае n_e^* не превышало бы нескольких сотен!

Следует отметить, что влияние корональной материи на возбуждение оптических уровней в нейтральных и однажды ионизованных атомах металлов в хромосфере должно быть пренебрежимо мало.

Крымская астрофизическая
обсерватория
Академии наук СССР

Поступило
31 III 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Э. Р. Мустель, ДАН, 82, 21 (1952). ² Э. Р. Мустель, Крымск. астрофиз. obs., 9, 25 (1952); там же, 11, 165 (1954). ³ Э. Р. Мустель, там же, 11, 102 (1954). ⁴ И. С. Шкловский, Солнечная корона, 1951. ⁵ M. et L. d'Azambuja, C. R., 205, 554 (1937). ⁶ M. et L. d'Azambuja, Ann. de l'Observatoire de Paris, Section d'Astrophysique à Meudon, 6, fasc. VII (1948); D. Menzel, Our Sun, 1949, p. 144. ⁷ А. А. Никитин, Астр. журн., 29, 463 (1952).