

АКАДЕМИК Г. А. ШАЙН

ОБ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ КОРОНЫ

§ 1. Одна из важных проблем солнечной короны — это проблема интенсивностей эмиссионных линий и их изменений, а также проблема взаимоотношения между линейчатым эмиссионным спектром, обязанным высокоионизованным ионам, и непрерывным эмиссионным спектром, обязанным рассеянию света свободными электронами.

W. Grotrian и др. ⁽¹⁾ на основании наблюдательных данных пришли к выводу, что имеется пропорциональность между градиентом интенсивности вдоль радиуса для эмиссионного линейчатого и непрерывного спектров. К противоположному выводу пришел автор этой статьи на основании обработки спектра короны, полученного во время затмения 1936 г. Ввиду задержки в печатании статьи, представленной в Пулковскую обсерваторию в 1938 г., результаты были доложены на заседании ОФМН 27 ноября 1939 г. и вкратце напечатаны в ДАН ⁽⁶⁾. По причине войны статья полностью могла быть напечатана лишь в 1947 г. ⁽⁸⁾. Как это стало мне известно теперь, M. Waldmeier ⁽²⁾ на основании исследования спектра короны вне затмения также пришел в 1940—42 гг. к выводу об отсутствии пропорциональности.

Вопрос о пропорциональности между градиентом интенсивности для эмиссионного непрерывного и линейчатого спектров короны имеет определенный физический смысл. Пропорциональность, объявленная W. Grotrian, должна означать, что во внутренней короне отношение концентраций ионов и электронов n_r/n_e является постоянной величиной, не зависящей от изменения давления в указанных пределах. При этом здесь принимается, что сравнительно с изменением n_r и n_e , в основном определяющим градиент интенсивности dl/dh , можно пренебречь в тех же пределах изменением фотосферного или иного излучения J_s , падающего на электроны, и неизвестной функцией J_s' , ионизирующей и возбуждающей ионы. Очевидно, n_i/n_e постоянно в том случае, если речь идет о ионах в таком состоянии, когда нет тенденции для перехода в ближайшую более высокую или более низкую степень ионизации. Однако с таким представлением едва ли можно согласовать наблюдаемое наличие сразу 5—6 степеней ионизации, представленных сильными линиями (например, Fe XIV, 5303 и Fe X, 6374), и вообще большой предел ионизации, от 233 до 814 eV. Если эмиссионные линии образуются в результате поглощения излучения за границами серий с последующей рекомбинацией, то для двух последовательных состояний теории ионизации дает $n_r/n_e \propto n_{r+1}f(T)$, и это вообще может дать для эмиссионных линий более значительный градиент dl/dh , чем для непрерывного спектра, обязанного свободным электронам. Можно думать, что поглощение с последующей рекомбинацией возможно и не является доминирующим фактором, определяющим распределение электронов и ионов

с высотой, как и вообще саму ионизацию. Далее, из того, что мы знаем сейчас о корональных линиях, едва ли можно пренебречь изменением I' с высотой.

В нашей работе было установлено, что градиент интенсивности для корональных линий значительно превосходит градиент интенсивности для непрерывного спектра, по крайней мере с расстояния $1'$. При переходе от наблюдаемой интенсивности к радиации на единицу объема и затем к плотности частиц различие в градиентах для плотности ионов и электронов может только усилиться. В пределах $1'.5-5'.5$ для исследованного нами случая плотность для ионов падает приблизительно в 9 раз быстрее, чем для электронов. Из вышеприведенных данных и соображений следует, что условия свечения корональной материи в самой внутренней части далеко отклоняются от той упрощенной схемы, которая должна вытекать из пропорциональности между непрерывной и линейчатой эмиссиями.

§ 2. Уже давно было замечено, что интенсивности корональных линий меняются при переходе от затмения к затмению. После применения метода наблюдений вне затмений и спектрофотометрического метода во время затмения выяснилось с полной уверенностью, что линии действительно меняются и во времени и при переходе от одного места короны к другому. Вторым фактором является, по видимому, более существенным. При сравнении результатов измерений для затмений 1929 и 1936 гг. выяснилось, что в 1936 г. линии 3987 и 3801 усилились не менее, чем в 4 раза. Увеличение такого же порядка наблюдалось и для 6374. Очень большие изменения выявились также при сравнении восточной и западной частей короны. Здесь речь идет не только об относительных, но и об абсолютных изменениях.

Сравнивая относительные интенсивности линий короны в спектрах, полученных в разные затмения, а также судя по характеру падения интенсивности этих линий с удалением от края диска, различные авторы пытались разбить корональные линии на группы. Хотя такие группировки, основанные главным образом на том, что несколько линий одновременно усиливаются или ослабляются при переходе от затмения к затмению, довольно противоречивы, тем не менее есть в них и нечто общее. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что в особенности некоторые линии выявляют сильную переменность в яркости. Во время затмения 1936 г. я отметил, что линия 4087 обнаруживает значительное ослабление по отношению к близкой 3987. Вообще, из 13 затмений в двух случаях (1908 и 1929 гг.) линия 4087 ярче 3987, в двух (1918, 1925 гг.) равна 3987, в четырех (1922, 1926, 1930, 1936 гг.) слабее 3987, и, по видимому, вовсе отсутствует в пяти случаях (1896, 1898, 1900, 1901 и 1905 гг.). Компиляция оценок яркости для 12 из упомянутых 13 затмений собрана S. Mitchell⁽³⁾.

Другой случай таких сильных колебаний представляет собой линия 3601, на которую обращают внимание ряд авторов. Начиная с 1900 г., можно отметить, что в 1900, 1901, 1905 гг. имело место, по видимому, полное или почти полное исчезновение как 3601, так и 4087. Большие интенсивности этих линий также большей частью приходится на одни и те же годы (1908, 1925, 1929, 1930 гг.). Еще более необычно ведет себя, как показали В. Lyot⁽⁴⁾ и, в особенности, М. Waldmeier⁽²⁾, линия 5694.

Ниже сопоставлены общие линии в пределах 3388 — 6374, повторяющиеся в группах корональных линий, которые время от времени выдвигались различными наблюдателями.

I	II	III	IV
3987	5303	4087	5694
3801	3388	3601	
(6374)			

I. Lockyer Fowler, 1898, Campbell—Moore, 1918, Davidson—Stratton, 1926—29, автор, 1936 (линия 6374 присоединяется только последними авторами).

II. Campbell—Moore, 1918, Mitchell, 1930.

III. Davidson—Stratton, 1926, автор 1936.

IV. Lyot, Wadmeier (вне затмения).

Другой путь для разбивки корональных линий по группам заключается в сравнении распределения интенсивности в монохроматических изображениях в зависимости от гелиографической широты. Делая сводку своих наблюдений вне затмений, В. Lyot⁽⁴⁾ в 1939 г. разделяет 11 наблюдаемых им корональных линий на три группы в зависимости от распределения интенсивности в монохроматических изображениях как функции гелиографической широты (см. ниже).

Связь распределения монохроматических изображений различных корональных линий с теми или иными образованиями на солнце, например с активными областями, удивительная „вспышка“ 5694 над некоторой активной группой пятен, очень большие колебания яркости некоторых линий и вообще колебания яркости всех или многих корональных линий указывают на то, что в солнечной короне мы имеем дело с условиями возбуждения, подверженными значительным изменениям. Все эти обстоятельства делают естественным предположение, что поведение корональных линий может зависеть от стадии возбуждения в данном месте короны и от потенциала ионизации ионов, ответственных за те или иные линии. В связи с этим интересно сопоставить существующие группировки линий с потенциалом ионизации. Ниже представлена группировка линий, как она дана выше нами, и отдельно группировка линий визуальной — инфракрасной области, как она дана В. Lyot⁽⁴⁾, но, разумеется, без указания потенциалов ионизации. В последнем случае мы изменили только порядок серий: I, II, IV соответствуют III, I, II у В. Lyot.

I			II			III			IV		
λ	Ион	J. P.	λ	Ион	J. P.	λ	Ион	J. P.	λ	Ион	J. P.
3987	Fe XI	261	3388	Fe XIII	35	3601	Ni XVI	455	5694?	Ca XV	814
3801	—	—	5303	Fe XIV	355	4087	Ca XIII	655			
6374	Fe X	233									
Среднее 247			340			555			814		
I			II			IV					
6374	Fe X	233	3388	Fe XIII	322				5694?	Ca XV	814
7892	Fe XI	261	5303	Fe XIV	355						
			5116	Ni XIII	350						
			6702	Ni XV	422						
			7059	Fe XV	390						
			8024	Ni XV	422						
			10747	Fe XIII	325						
			10798	Fe XIII	325						
Среднее 247			364						814		
Среднее 247 \pm 7			364 \pm 10			555 \pm 67			814		

Верхняя и нижняя серии почти независимы друг от друга, так как принципы, положенные для их классификации, совершенно отличны друг от друга. Необходимо подчеркнуть, что приведенные здесь группы линий были составлены до открытия В. Edlen⁽⁵⁾. Трудно думать, что обнаруживающаяся из наблюдений связь между потенциалом ионизации и поведением линий как в отношении распределения интен-

сивности в монохроматических изображениях как функции гелиографической широты, так и в отношении колебаний яркостей корональных линий является случайной. Приведенная выше группировка линий охватывает значительное большинство известных линий. Здесь не учтены только несколько слабых линий в фиолетовой области, для которых имеется слишком мало наблюдательных данных, либо 1—2 более яркие линии с промежуточным потенциалом возбуждения, например 4231. Характерно, что для визуальной и инфракрасной области, которая могла быть лучше изучена вне затмения, группировкой охвачены все линии.

На основании полученного выше соотношения можно предсказать с некоторой вероятностью, что неотожествленная до сих пор линия 3801, как входящая в группу I, принадлежит иону с относительно низким потенциалом возбуждения. Также можно ожидать значительного различия в градиентах интенсивности вдоль радиуса для линий, соответствующих различным потенциалам ионизации.

В свете гипотезы, что во внутренней короне царит крайне высокое возбуждение, следует сделать одно замечание относительно видимости линий поглощения в спектре короны. В этом отношении наибольший интерес представляют линии поглощения H и K, которые должны быть все же еще видны как очень размытые и очень слабые линии даже при скорости электронов порядка 5000 км/сек., соответствующей кинетической температуре порядка 500 000°. В связи с этим отметим, что во время затмения 1936 г. для расстояния около 2—4' от края солнца мы не могли обнаружить линий поглощения H и K (6,7). Если этот результат интерпретировать в рамках гипотезы о рассеянии света электронами, по крайней мере, в области внутренней короны, то исчезновение линий H и K можно объяснить, вероятно, лишь при скоростях, соответствующих кинетической температуре порядка миллиона градусов. При старых же представлениях ($T_e \sim 5000^\circ$) в спектре самой внутренней короны должны были бы быть видны не только линии H—K (сравнительно немного дисторгированные), но даже другие наиболее сильные фраунгоферовы линии. То обстоятельство, что линии поглощения вообще наблюдаются только с расстояния 5—7' от края диска, дает серьезный аргумент в пользу того, что условия крайне высокого возбуждения порядка 300—800 eV существует только в самой внутренней короне. Поэтому видимости эмиссионных линий и линий поглощения в спектре внутренней короны не совместимы.

Найденное выше соотношение между потенциалом ионизации и поведением корональных линий представляет собой серьезный независимый аргумент в пользу правильности идентификации В. Edlen. Это соотношение свидетельствует также о том, что условия необычайно высокого возбуждения в самой внутренней короне подвержены очень значительным локальным колебаниям, и все это вместе взятое предопределяет в известной степени характер спектра короны и его изменения. Неустойчивый характер корональных линий и их чрезвычайная чувствительность к условиям возбуждения следует также из того, что корональные линии кратковременно наблюдались лишь в спектрах двух новых звезд (повторных): R. S. Ophiuchi и T. Pyxid.

Крымская астрофизическая обсерватория
Академии Наук СССР
Симеиз

Поступило
27 IX 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹W. Grotrian, Z. f. Aph., 7, 26 (1933). ²M. Waldmeier, Physica, 12, 9—10, 733.
³S. Mitchell, Aph. J. 75, 15 (1932). ⁴B. Lyot, M. N., 99, 591 (1939). ⁵B. Edlen, Z. f. Aph., 22, 30 (1942). ⁶Г. А. Шайн, ДАН, 28, 9 (1940). ⁷D. Menzel, Trans. Inter. Astr. Union, 6, 437 (1938). ⁸Г. А. Шайн, Изв. Крымской астр. обсерватории, 1, 1, 99 (1947).