

# АНАЛИЗ ОБРАЗОВАНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЛИНИЙ В РЕНТГЕНОВСКОМ СПЕКТРЕ КРОНАЛЬНЫХ КОНДЕНСАЦИЙ

Б. СИЛВЕСТЕР

*Астрономическая обсерватория Вроцлавского университета,  
Вроцлав, Польша*

Абстракт: В работе проведены расчёты потоков рентгеновского излучения корональной конденсации для некоторых резонансных линий. Расчёты были сделаны на основании модели конденсации, разработанной Ландини и Монсиньори Фосси. Сопоставление полученных теоретических потоков с наблюдениями служит как проверка принятой модели корональной конденсации. Из этого сопоставления видно, что модель Ландини и Монсиньори Фосси не вполне хорошо описывает действительное строение конденсаций.

Abstract: The values of the X-radiation fluxes in several resonance lines, which are formed in coronal condensations, have been calculated. The calculations were performed making use of the coronal condensation model, worked out by Landini and Monsignori Fossi. A comparison of the obtained theoretical values of the fluxes with observational data was made in order to verify the model. The analysis indicates that the coronal condensation model, given by Landini and Monsignori Fossi, does not describe the real structure of such a region adequately.

В связи с развитием исследований при помощи ракет и спутников, стала возможной регистрация спектра Солнца в рентгеновской области. Рентгеновское излучение соответствует очень высокой температуре, и его образование происходит в солнечной короне, особенно в её наиболее горячих областях — корональных конденсациях. Для нас особенный интерес представляет вопрос, как образуется поток энергии в короне. В этой работе мы будем заниматься только излучением в линиях, образующихся в корональных конденсациях. Кроме того, мы ограничимся рассмотрением только резонансных линий. Это наиболее сильные линии, наблюдаемые в рентгеновском спектре короны. Их образование хорошо описывает аппроксимация атома моделью с двумя энергетическими уровнями. Населённость верхнего уровня контролируется возбуждениями электронным ударом с основного уровня и спонтанной эмиссией. Чтобы рассчитать потоки в линиях, необходимо принять модель корональной конденсации. Под моделью надо понимать распределение материи в зависимости от температуры. В работе мы приняли модель конденсации, разработанную Ландини и Монсиньори Фосси (1971). На рис. 1 приведена модель конденсации. На оси ординат находится температура  $T$ , а на оси абсцисс — дифференциаль-

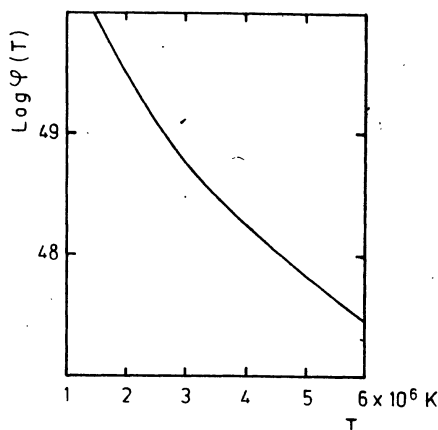


Рис. 1. Модель корональной конденсации.

ная мера эмиссии  $\varphi(T) = \frac{dV}{dT} = \frac{dY}{dT}$ . Она определяет, сколько материи находится в единичном интервале температуры. Для дальнейших расчётов удобнее будет ввести общепринятые обозначения: дифференциальной меры эмиссии  $N_c^2 \frac{dV}{dT} = \frac{dY}{dT}$  и объёмной меры эмиссии  $\int N_c^2 dV = Y$ .

Вычисление потоков в резонансных линиях начнём с проверки, все ли возникающие в конденсации кванты покидают её. Для этого

необходимо подсчитать оптическую толщину конденсации в отдельных линиях. Используем следующую формулу:

$$\tau_{\rightarrow 0} = \text{const} \int_R T^{-1/2} \frac{N_i}{N_{\text{EL}}} N_e dh,$$

причём  $\nu_0$  — частота, соответствующая середине линии,  $T(h)$  и  $N_e(h)$  мы взяли из модели конденсации, а относительное содержание ионов  $\frac{N_i}{N_{\text{EL}}}$  — из расчётов ионизационного равновесия, выполненных Бейгманом и др. (1971). Результаты расчётов для разных линий приведены в таблице 1. Для большинства линий оптическая толщина конденсации больше

Таблица 1

Ион	$\lambda$ [Å]	$\tau_{\infty}$
C V	40,3	0,86
C VI	33,7	6,26
S XIV	30,4	0,60
N VI	22,8	1,14
N VII	24,8	2,41
O VII	21,6	28,3
O VIII	19,0	15,7
Fe XVII	15,0	11,6
Fe XVIII	14,3	1,94
Ne IX	13,4	8,54
Ne X	12,1	2,68
Mg XI	9,2	4,66
Si XIII	6,7	3,73

1 ( $\tau_{\infty} > 1$ ), то есть конденсация в этих линиях не является оптически тонкой. Как показал Потташ (1963), несмотря на это, практически все рассматриваемые кванты покидают конденсацию. Это происходит из-за того, что для резонансных линий и для корональных условий некогерентное рассеяние в линии значительно превышает истинное поглощение. Перейдём теперь к подсчётам потоков энергии в резонансных линиях, образующихся в корональной конденсации. Пусть  $C_{12}$  обозначает скорость возбуждений соударениями в резонансной линии на один ион и один электрон. Тогда  $C_{12}N_iN_e$  представляет количество квантов, возникающих в единице объёма в единицу времени. Интегрируя эту величину по объёму конденсации получаем количество квантов, возникающих в конденсации. Этому соответствует полная энергия:

$$E(\nu_0) = \int_V h\nu C_{12}N_iN_e dV.$$

При предположении изотропного распределения излучения, поток энергии, наблюдаемый на расстоянии Земли, будет:

$$F(\lambda_0) = \int \frac{h\nu}{4\pi r^2} C_{12}N_iN_e dV.$$

Здесь  $r$  обозначает расстояние Солнце — Земля. Вводя обозначение

$$F_i = \frac{h\nu}{4\pi r^2} \frac{N_i}{N_e} C_{12},$$

получаем следующую формулу для потока энергии:

$$F(\lambda_0) = \int_{T_{\text{cor}}}^{T_{\text{max}}} F_i(\lambda_0, T) N_e^2 \frac{dV}{dT} dT =$$

$$\int_{T_{\text{cor}}}^{T_{\text{max}}} F_i(\lambda_0, T) \frac{dY}{dT} dT = \int_{T_{\text{cor}}}^{T_{\text{max}}} F'(T) dT.$$

Здесь  $\frac{dY}{dT}$  представляет модель конденсации, а значения функции  $F_i(\lambda_0, T)$  мы взяли по расчётам Бейгмана и др. (1971). Подынтегральное выражение  $F'(T)$  имеет смысл функции вклада. Оно определяет, какой вклад в полный поток дают отдельные интегралы температуры. На рис. 2 показана функция вклада для четырёх избранных линий: O VII  $\lambda$  21.6 Å, S XIV  $\lambda$  30.4 Å, Fe XVII  $\lambda$  15.0 Å, Mg XII  $\lambda$  8.4 Å. На основании таких графиков можно выбрать те линии, которые формируются только в конденсации, т.е. такие, для которых вкладом спокойной короны можно пренебречь. По указанной выше формуле были вычислены полные потоки энергии в рассматриваемых линиях, соответствующие принятой модели конденсации. Сопоставляя полученные потоки с наблюдаемыми, мы имеем возможность проверить принятую нами модель конденсации. Такое сравнение приведено на рис. 3. Если бы модель Ландини и Монсиньори Фосси хорошо описывала действительное строение конденсаций, существующих на Солнце во время используемых нами наблюдений, то точки на графике укладывались бы вдоль указанной на рисунке прямой. Как видно, почти все точки лежат ниже этой прямой. Это свидетельствует о том, что теоретические потоки в несколько раз завышены. Все наблюдения, за исключением наблюдений Арго и др. (1970), указывают на значительно меньшую объёмную меру эмиссии, заключённую в излучающей области на Солнце, чем дана в модели

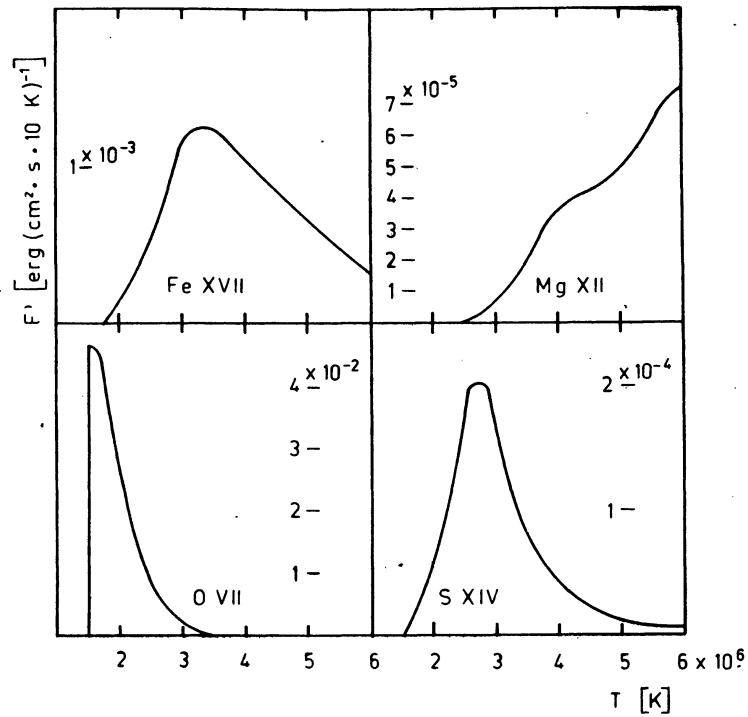


Рис. 2. Функция вклада для следующих линий: Fe XVII  $\lambda$  15.0 Å, Mg XII  $\lambda$  8.4 Å, O VII  $\lambda$  21.6 Å, S XIV  $\lambda$  30.4 Å.

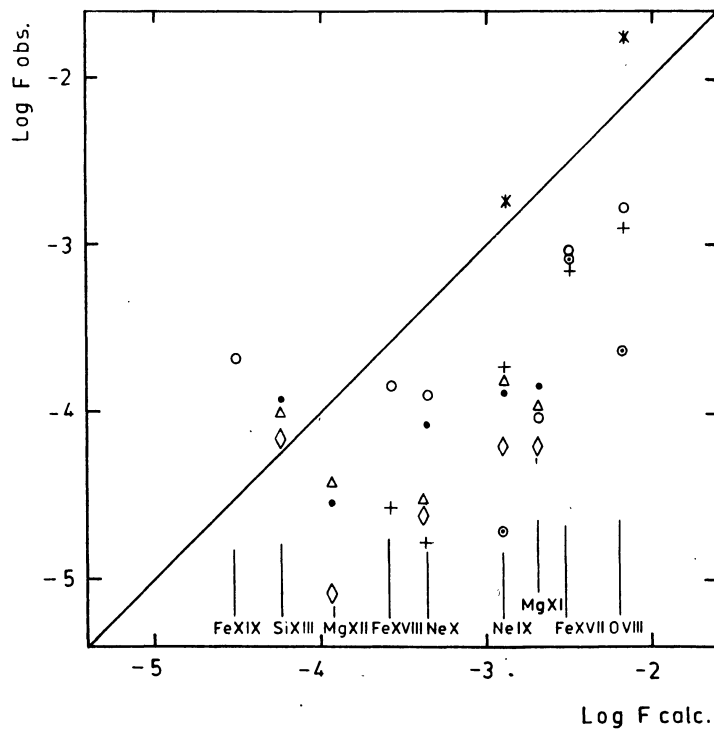


Рис. 3. Сравнение полученных теоретических потоков энергии в линиях с потоками наблюдаемыми.  
 + — Evans and Pounds (1968), O — Walker and Rugge (1968), ⊙ — Blake et al. (1964), \* — Argo et al. (1970), Δ — Batsone et al. (1970).

Ландини и Монсиньори Фосси. Несогласие тем большее, что за исключением наблюдений Батстона и др. (1970), все наблюдения относятся к целому диску Солнца и в них включено излучение от нескольких конденсаций, существующих в это время на Солнце. Поэтому точки, соответствующие отдельной конденсации, должны лежать ещё ниже, чем указанные на рисунке. Только для линий Si XIII  $\lambda$  6.7 Å и Fe XIX  $\lambda$  13.5 Å, которые формируются в области очень высоких температур (порядка  $7 \times 10^6$  · К) модель Ландини и Монсиньори Фосси довольно хорошо соответствует наблюдениям. Таким образом, анализ этого графика приводит к выводу, что модель Ландини и Монсиньори Фосси подразумевает слышком

большое количество материи в низких температурах, а довольно хорошо соответствует действительности в высоких температурах. Как указывалось выше, наблюдения Арго и др., которые существенно отличаются от других наблюдений, довольно хорошо согласуются с моделью конденсации Ландини и Монсиньори Фосси. Расхождение между наблюдениями Арго и наблюдениями других авторов вызваны, по-видимому, систематическими ошибками калибрации наблюдений.

Как видно, наблюдения активных областей в нескольких рентгеновских линиях дают большие возможности для исследования моделей корональных конденсаций.

### Литература

ARGO, H. V., BERGEY, J. A., and EVANS, W. D. (1970): *Astrophys. J.*, 160, 283.

BATSTONE, R. M., EVANS, K., and PARKINSON, J. H. (1970): *Solar Phys.*, 13, 389.

BEIGMAN, I. L., VAINSTEIN, L. A., and URNOV, A. M. (1971): Preprint No. 28, Lebedev Physical Institute, Moscow.

BLAKE, R. L., CHUBB, T. A., FRIEDMAN, H., and UNZICKER, A. E. (1964): *Science*, 146, 1037.

EVANS, K. and POUNDS, K. A. (1968): *Astrophys. J.*, 152, 319.

LANDINI, M. and MONSIGNORI FOSSI, B. C. (1971): *Solar Phys.*, 17, 379.

POTTASCH, S. R. (1963): *Astrophys. J.*, 137, 945.

WALKER, B. C., Jr. and RUGGE, H. R. (1968): In: *Solar Flares and Space Research*, p. 102. Symposium Tokyo.