

О ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ В ЛАБОРАТОРНОЙ ПЛАЗМЕ

Д. А. Щеглов

Обсуждаются факторы, определяющие возможность регистрации в лабораторных условиях запрещенных линий, наблюдаемых в спектре солнечной короны. Некоторые результаты спектроскопических измерений на установке "Токамак-4" интерпретируются как наблюдение "зеленой линии" иона Fe XIV.

1. Наблюдение спектральных линий, принадлежащих многозарядным ионам и возникающих, как правило, вследствие магнитно-дипольных переходов, давно уже служит важным методом изучения физических условий в солнечной короне [1]. При попытке проводить измерение этих линий в газоразрядной плазме, возникает целый ряд трудностей, что

в первую очередь, связано с низкими вероятностями радиационных переходов ($A \approx 10^2 \text{ сек}^{-1}$). Однако в настоящее время в квазистационарных плазменных системах, получена плазма с временами удержания частиц τ_p , составляющими по оценкам десятки миллисекунд (при электронной температуре T_e в несколько килоэлектрон-вольт, плотности $n_e \approx 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ [2]). Для плазмы с подобными параметрами представляет интерес анализ возможности наблюдать рассматриваемые линии. Ограничимся переходами в конфигурациях типа ns^2np и ns^2np^5 . Численные оценки проведены для "зеленой линии" 530,3 нм (FeXIV, $^2P_{3/2} - ^2P_{1/2}$).

Обозначим g_1 и g_2 статистические веса верхнего и нижнего уровней, а их заселенности — N_1 и N_2 . Учитывается радиационный переход, возбуждение и девозбуждение электронами со скоростями процессов $S_{12}n_e$ и $(g_1/g_2)S_{12}n_e$ соответственно. В такой модели интенсивность линии равна

$$I = h\nu \frac{A n_e S_{12}}{A + (g_1/g_2) n_e S_{12}} N_1. \quad (1)$$

В отличие от солнечной короны ($n_e \approx 10^8 \text{ см}^{-3}$, $A \gg (g_1/g_2) n_e S_{12}$) для лабораторной плазмы типичны плотности $n_e \approx 10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и выражение (1) переходит в

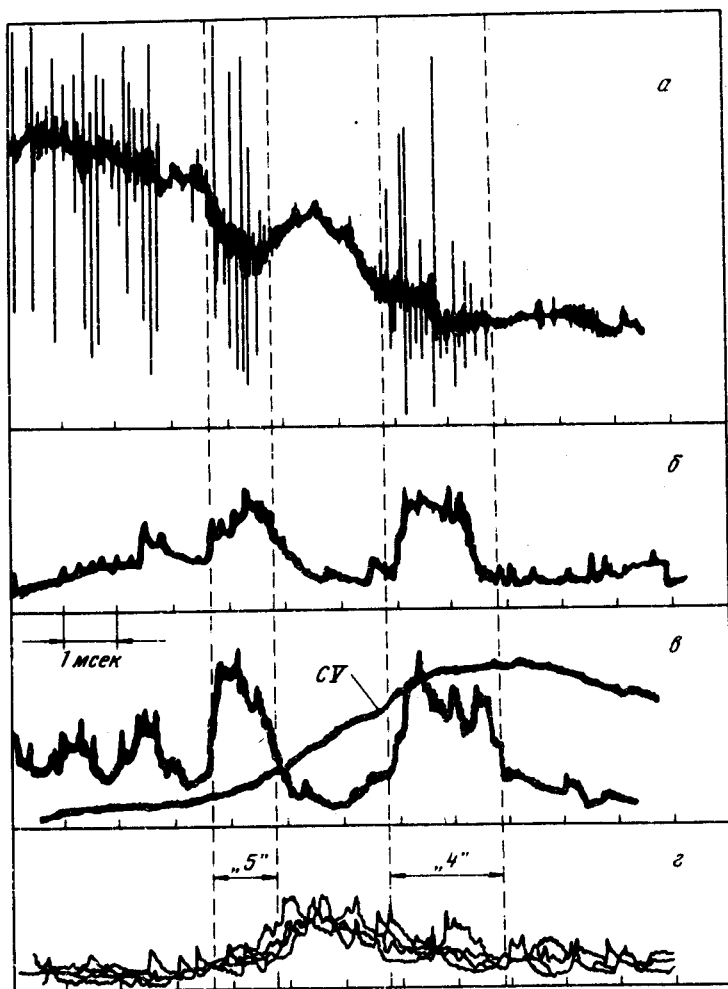
$$I = h\nu A (g_2/g_1) N_1. \quad (2)$$

т. е. случай бoльцмановского равновесия. Из (2) следует, что при фиксированной концентрации ионов n_j , ($n_j \approx N_1 + N_2$) не происходит увеличения интенсивности I с ростом n_e . При одновременном росте n_j и n_e , появляются ограничения, налагаемые ростом интенсивности континуума I_c , так как $I \sim n_j$, а $I_c \sim n_e n_j$. Так, для плазмы, состоящей из ионов FeXIV, интенсивности линии и континуума в интервале $\Delta\lambda$, где $\Delta\lambda$ — полуширина линии, сравниваются при $n_e \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, (принят доплеровский механизм уширения и $(T_e/T)^{1/2} \approx 1$).

В диапазоне интересующих нас параметров плотность составляет $n_e \approx 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$. В соответствии с (2) необходимо накопить в плазме достаточное количество ионов n_j в нужном состоянии j . Если t_j — время ионизации атома до состояния j , τ_j — время ионизации $j \rightarrow j+1$, тогда для получения высоких концентраций n_j желательно, чтобы выполнялись соотношения $\tau_p \gg t_j$; $\tau_j \gg t_j$. Для рассматриваемых ионов, однако второе условие практически противоречит первому, так как выполняется лишь при низких значениях T_e . Как показал анализ условий в плазме установки Т-4 (описание установки см. [3]) типичным является случай $\tau_p \geq t_j$, $\tau_j \approx t_j$; при обычных количествах примесей в плазме рассчитывать на высокие интенсивности "корональных" линий не приходится, но нет принципиальных трудностей для наблюдения этих линий в определенных стадиях разряда.

2. Для спектроскопических измерений использован монохроматор ВМС-1 с интерференционным фильтром на 530,3 нм и монохроматор ЭМР-3 в качестве вспомогательного.

Исследовалась начальная стадия разряда (до десятой миллисекунды). При росте тока имеет место прохождение резонансных значений запаса устойчивости q (см. [2]), что сопровождается развитием неустойчивос-



Поведение ряда спектральных линий в начальной стадии разряда на установке Т-4: а – производная тока разряда; б – интенсивность линии иона С III 229,7 нм; в – Fe I 371,99 нм, С V – 227,1 нм; г – $\lambda = 530,3$ нм

тей. Это видно из рисунка, где условно выделены зоны „5” и „4”, а также приведен ход производной тока (рис. а). В такие моменты увеличивается приток примесей в том числе и железа в плазменный шнур

(рис. б, в) при одновременном существовании невозмущенной горячей области шнура (см. поведение линии иона $C V$ — рис. в). Идея эксперимента заключается в подборе режима с такими значениями n_e , T_e (и, следовательно, t_j) между прохождением зон „5” и „4”, чтобы концентрация ионов $FeXIV$ достигала максимума именно в этот период, и, тем самым, линии $530,3 \text{ нм}$ оказалась бы отличной от многочисленных мешающих измерениям линий низкоионизованных примесей по своему временному ходу. Измерения T_e были проведены методом лазерного рассеяния, электронная плотность изучалась с помощью СВЧ интерферометра. В сравнительно узком диапазоне режимов разряда зарегистрирована спектральная линия $530,3 \text{ нм}$; временной ход ее показан на рис. 2. Наблюдаемое время достижения максимума интенсивности линии хорошо соответствует расчетному значению для иона $FeXIV$ при значениях параметров плазмы, измеренных между зонами (средняя плотность электронов $\bar{n}_e \approx 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $T_e = 300 \text{ эВ}$). Из абсолютных измерений интенсивности линии, используя выражение (2) можно оценить процент ионов $FeXIV$. Оказалось, что $n_j / \bar{n}_e \approx 0,02\%$.

Отметим еще одно возможное диагностическое приложение корональных линий такого типа. Одной из важнейших проблем физики высокотемпературной плазмы является задача о распределении ионов примесей по сечению плазменного шнура [4]. Выражение (2) показывает, что в данном случае для вычисления $n_j(r)$ из $I(r)$ не требуется детального знания ни $T_e(r)$, ни $n_e(r)$ — нужны лишь грубые оценки n_e , T_e для проверки применимости выражения (2).

Автор считает своим долгом поблагодарить А.Б.Берлизова и Г.Е.Ноткина за проведение измерений по лазерному рассеянию, коллектив установки Т-4 за помощь в проведении экспериментов, а Е.П.Горбунова за предоставление данных по электронной плотности.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
15 июля 1975 г.

Литература

- [1] И.С.Шкловский. Физика солнечной короны. М., Физматгиз, 1962.
- [2] L.A.Artsimovich, Nucl. Fusion, 12, 215, 1972.
- [3] L.A.Artsimovich et al. Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fusion Res., IAEA, Vienna, I, 443, 1971.
- [4] V.A.Vershkov, S.V.Mirnov. Proc. 5-th Eur. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Res., Grenoble, I, 1, 1972.