УДК 621.373.826:533.9

РЕАБСОРБЦИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЛИНИЙ В РАЗЛЕТАЮЩЕЙСЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ

А.В. Боровский, А.Л. Галкин, В.В. Коробкин, В.Б. Мокров

Частные аналитические выражения для параметра Бибермана – Холстейна резонансной линии обобщаются на случай разлетающегося поперечно-неоднородного плазменного шнура (слоя).

Для многих кинетических схем, предложенных для получения усиления света в области длин волн $\lambda < 50$ нм на переходах многозарядных ионов в плазме, характерна радиационная очистка нижнего уровня рабочего перехода спонтанными излучательными распадами в основное состояние. Однако при увеличении поперечного размера активной среды, например, радиуса плазменного шнура (что желательно для увеличения энергетических параметров активной среды), возрастает реабсорбция (пленение) резонансных линий, что приводит к уменьшению эффективности радиационной очистки. Поэтому учет реабсорбции линейчатого излучения является необходимым элементом анализа коротковолновых кинетических схем.

Основы теории реабсорбции спектральных линий заложены в /2 – 4/. Однако в литературе отсутствуют простые формулы, с помощью которых можно учесть эффект реабсорбции линий в разлетающихся поперечно-неоднородных плазменных шнурах или слоях. Сложность рассмотрения реабсорбции спектральных линий в движущейся плазме обусловлена необходимостью учета динамических смещений частоты для квантов излучения, испускаемых в одних и поглощающихся в других точках пространства (динамический доплер-эффект /4 – 6/.) Как показано ниже, при достаточно быстром разлете вещества задача существенно упрощается.

В приближении стационарного стока учет реабсорбции резонансных линий приводит к следующей системе интегральных уравнений для определения населенностей N_i уровней $i = 1, 2, ..., \gamma$ иона (индекс $i = 0$ отвечает основному состоянию):

$$\sum_{j=1}^{\gamma} K_{ji}(r) N_j + P_i(r) + D_i(r;\ N_i) = 0, \tag{1}$$

где $K_{ji} \equiv K(j \to i)$ – релаксационная матрица иона; P_i – скорость внешнего заселения уровней; D_i – интегральный оператор, описывающий заселение уровня i вследствие поглощения квантов света, испущенных на переходе $i \to 0$ в других точках пространства и попадающих в точку r. Выражение для D_i в аксиально-симметричном случае имеет вид /7/:

$$D_i(r;\ N_i) = (\pi c^2 A_{io}^2/2\omega_{io}^2)\,(g_i/g_o)\,N_o(r) \int_0^R \Psi_i(r, r')N_i(r')dr', \tag{2}$$

где ω_{io} и A_{io} – частота и скорость радиационного перехода $i \to 0$; g_i, g_o – статвеса состояний; R – радиус шнура. Ядро оператора является трехкратным интегралом

$$\Psi_i(r, r') = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\infty} dy \int_0^{\infty} d\omega (r'/\rho^2) S_{io}(\omega;\ r') S_{io}(\omega + \Delta\omega_D(\rho, r, r', \varphi, y);\ r) \exp[-\Phi_{io}(\omega, r, r', \varphi, y)], \tag{3}$$

где $S_{io}(\omega;\ r)$ – локальный спектральный контур перехода $i \to 0$ в точке r. Экспоненциальный фактор описывает затухание излучения на пути s его распространения из точки испускания $r' \equiv (r', \varphi, y)$ в точку поглощения $r(r, 0, 0)$:

$$\Phi_{io}(\omega, r, r', \varphi, y) = (\pi^2 c^2 A_{io} g_i / \omega_{io}^2 g_o) \int_0^{\rho} S_{io}(\omega + \Delta\omega_D(s, r, r', \varphi, y);\ r_s)\, ds, \tag{4}$$

где $\rho = (r^2 + r'^2 + y^2 - 2rr'\cos\varphi)^{1/2}$. Доплеровский сдвиг частоты определяется следующим выражением:

$$\Delta\omega_D(s, r, r', \varphi, y) = (\omega/c\rho)[u(r')(r\cos\varphi - r') - u(r_s)(r\cos\varphi_s - r'\cos(\varphi - \varphi_s))],$$

$$\cos\varphi_s = [rs/\rho + r'\cos\varphi(1 - s/\rho)]/r_s, \tag{5}$$

$$r_s = [r^2(s/\rho)^2 + r'^2(1 - s/\rho)^2 + 2rr'(s/\rho)(1 - s/\rho)\cos\varphi]^{1/2},$$

где $u(r)$ – радиальное распределение скорости разлета шнура. При $s = 0$: $r_s = r'$, $\varphi_s = \varphi$. Выражение для $\Delta\omega_D$ в (3) определяется по формуле (5) при $s = \rho = |r - r'|$, $r_s = r$, $\varphi_s = 0$. Спектральный контур резонансной линии многозарядного иона описывается сверткой лоренцевского (естественное уширение) и гауссовского (тепловое доплеровское уширение) контуров. Обычно преобладает тепловое доплеровское уширение.

Преобразования ядра $\Psi_i(r, r')$, основанные на разложении экспоненты в ряд и на интегрировании получающихся выражений по частоте /8/, показывают, что в условиях преобладания теплового доплеровского уширения линии над естественным $\Delta\omega_L^{io} \sim \omega_{io} v/c \gg \gamma_{io}$ и при достаточно быстром разлете плазмы $\omega_{io} u(R)/c \gg \max_r \Delta\omega_L^{io}$ ($\Delta\omega_L^{io}$ – ширина локального контура S_{io} в точке r) $\Psi_i(r, r') \propto \delta(r - r')$. (Случай преобладания естественного уширения требует дополнительного исследования.) Радиус пространственного размытия ядра находится из условия равенства динамического смещения частоты локальной ширине линии в точке r: $\delta r = c\Delta\omega_L^{io}(r)/\omega_{io}|\nabla u(r)|$.

Свойство пространственной локализации ядра $\Psi_i(r, r')$ позволяет преобразовать интегральную задачу (1) к алгебраической путем введения для резонансных линий параметров Бибермана – Холстейна (БХ). (Параметр БХ $0 \leqslant \theta_{io}(r) \leqslant 1$ уменьшает вероятность спонтанного радиационного перехода в протяженной плазме $\widetilde{A}_{io}(r) = A_{io}\theta_{io}(r)$.) Переходим в новую цилиндрическую систему координат, ось которой проходит через точку r параллельно оси шнура и имеет скорость $u(r)$ относительно нее. Считая вещество однородным в пределах нескольких $\delta r \ll R$, сводим задачу к вычислению параметра БХ в новой системе координат на оси однородного равномерно разлетающегося шнура. После несложных, но громоздких преобразований /1/, получим:

$$\theta_{io}(r) = \int_0^1 d\mu \frac{1 - \exp[-\chi_{io}(r)/(1 - \mu^2)]}{\chi_{io}(r)/(1 - \mu^2)},$$

$$\chi_{io}(r) = (\pi^2 c^3 A_{io} g_i / \omega_{io}^3 g_o) N_o(r) |\nabla u(r)|^{-1}. \tag{6}$$

Формулу (6) можно с точностью 1,5% аппроксимировать алгебраическим выражением

$$\theta(r) = \frac{1 - \exp(-\chi(r))}{\chi(r)} \frac{\chi(r) + 1/2}{(3/2)\chi(r) + 1/2}. \tag{7}$$

Для плоской задачи результат следующий:

$$\theta(r) = \int_0^1 d\mu \frac{1 - \exp[-\chi(r)/\mu^2]}{\chi(r)/\mu^2}. \tag{8}$$

Таким образом, преобладание динамического доплер-эффекта в сочетании с контуром резонансной линии, быстро спадающим в крыльях, приводит не только к возможности корректного введения параметра БХ, но и к независимости последнего от конкретного вида спектрального контура. Впервые на аналогичное обстоятельство обратил внимание В.В. Соболев /9/ при изучении звездных спектров, возникающих при вспышках сверхновых. Им была получена универсальная формула для сферической задачи $\theta(r) = [1 - \exp(-\chi(r))]/\chi(r)$.

В заключение укажем основные предположения, в рамках которых получены выражения (6) – (8): (а) не учитывается вклад в D_i излучения рассеянного на атомных частицах среды; (б) считается, что спектральные контуры при испускании и поглощении совпадают; (в) населенность основного состояния существенно превышает населенность возбужденного; (г) пренебрегается вынужденным излучением на переходе $i \to 0$; (д) динамическое смещение частоты преобладает над локальной шириной линии; (е) локальный контур линии достаточно быстро спадает в крыльях. При нарушении условия (а) эффект реабсорбции несколько увеличивается; условия (б) и (г) выполняются в слабых световых полях, т.е. в отсутствие усиления на рассматриваемом переходе; условие (в) представляется очевидным для резонансной линии; при нарушении (д) или (е) задача является существенно интегральной и учет реабсорбции по БХ не применим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровский А.В., Коробкин В.В., Мухтаров Ч.К. Препринт ИОФАН № 21, М., 1985.
2. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика низкотемпературной плазмы. М., Наука, 1982.
3. Абрамов В.А., Коган В.И., Лисица В.М. Вопросы теории плазмы. М., Энергоиздат, 1982, т. 12, с. 114.
4. Держиев В.И., Жидков А.Г., Яковленко С.И. Излучение ионов в плотной неравновесной плазме. М., Энергоатомиздат, 1986.
5. Бойко В.А. и др. Квантовая электроника, 8, 28 (1981).
6. Боровский А.В. и др. Препринт ФИАН № 189, М., 1983.
7. Боровский А.В., Мокров В.Б. Препринт ИОФАН № 131, М., 1986.
8. Боровский А.В. и др. Препринт ИОФАН № 183, М., 1987.
9. Соболев В.В. Движущиеся оболочки звезд. Л., изд. ЛГУ, 1947.

Поступила в редакцию 20 июля 1987 г.