

ОГ УЧЕТЕ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОННОГО СОСТАВА ЧАСТИЧНО РАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ

Е. Ф. Гишкус, В. Н. Колесников

УДК 533.9

На примере гелиевой плазмы показана необходимость учета вклада возбужденных состояний при определении температуры электронов и ионного состава частично равновесной сильно ионизованной плазмы. Выражение для соответствующего поправочного члена получено в приложении ЧЛТР.

Температура электронов T_e в плазме, находящейся в состоянии частичного локального термического равновесия (ЧЛТР), может быть найдена, как известно, при низкой степени ионизации — по отношению заселенности N_n^0 высоко лежащего возбужденного уровня атома и концентрации электронов N_e , а при высокой — по отношению заселенности N_n^0 атомного уровня к заселенности N_m^+ возбужденного уровня иона при известном значении N_e . Все авторы, применявшие эти методы диагностики, как правило, предполагают, что сумма за-

селенностей возбужденных состояний $\sum_{m=1}^{m_{\max}} N_m^+$ пренебрежимо мала

по сравнению с заселенностью основного состояния иона N_0^+ . Однако это предположение справедливо только при относительно невысоких температурах T_e и степенях ионизации α . Граничные значения $T_e^{\text{ГР}}$ и $\alpha^{\text{ГР}}$, выше которых это предположение теряет силу, могут быть оценены по эмпирическим формулам $T_e^{\text{ГР}} \approx 0,1 E_{\text{ион}}^0$ и $\alpha^{\text{ГР}} \approx 0,2$, где $E_{\text{ион}}^0$ — энергия ионизации атома. В данном сообщении мы получим (в рамках модели ЧЛТР) более общие соотношения для определения температуры электронов, которые применимы и при $T_e > T_e^{\text{ГР}}$, $\alpha > \alpha^{\text{ГР}}$.

Пусть возбужденные уровни n атома и m иона удовлетворяют критериям применимости модели ЧЛТР /1/. Тогда заселенности этих уровней должны удовлетворять уравнениям Саха-Больцмана:

$$N_e N_o^+ = \frac{2g_o^+}{g_n} N_n^o F_n^o(T_e), \quad (1)$$

$$N_e N_o^{++} = \frac{2g_o^{++}}{g_m^+} N_m^+ F_m^+(T_e),$$

где g - статистические веса и $F(T_e)$ - функции Саха-Больцмана для уровней, указываемых индексами (верхний индекс указывает степень ионизации, нижний - номер уровня). Обычно к уравнениям (1) добавляется уравнение квазинейтральности. В общем случае при наличии нейтральной компоненты его следует записывать в виде:

$$N_e = N_o^+ + \sum_{m=1}^{m_{\max}} N_m^+ + 2 \left(N_o^{++} + \sum_{l=1}^{l_{\max}} N_l^{++} \right). \quad (2)$$

Если известны N_e и заселенности всех возбужденных уровней, то уравнения (1)-(2) представляют собой замкнутую систему, решение которой дает температуру T_e и ионный состав плазмы. Определение сумм заселенностей возбужденных уровней, вообще говоря, представляет собой очень сложную задачу. Однако мы можем воспользоваться тем упрощающим обстоятельством, что при $T_e \ll T_e^{IP}$ и $\alpha \ll \alpha^{IP}$ поправки можно не вводить, а при $T_e > T_e^{IP}$ и $\alpha > \alpha^{IP}$ эти суммы можно рассчитать с вполне удовлетворительной точностью в рамках модели ЧИТР с помощью (1), если известна степень ионизации атомов (ионов). При этом оказывается удобным неравновесную ионизацию характеризовать так называемой "температурой ионизации" $T_{\text{ион}}$, которая находится без особого труда (см. ниже уравнение (5)). Заметим, что при $\alpha > \alpha^{IP}$ такой способ учета неравновесной ионизации является вместе с тем и более надежным, нежели рекомендуемое в /2/ применение уравнений коронального равновесия. Расчет дает:

$$\sum_{m=1}^{m_{\max}} N_m^+ \approx N_o^+ \delta^+, \quad \text{где}$$

$$\delta^+ = \frac{Q^+(T_e) - g_o^+}{g_o^+} \left(\frac{T_{\text{ион}}^+}{T_e} \right)^{3/2} \exp \left\{ \frac{E_{\text{ион}}^+}{T_e} \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_{\text{ион}}^+} \right) \right\}, \quad (3)$$

$Q^+(T_e)$ - сумма по состояниям для иона. Аналогичное выражение можно получить и для δ^{++} .

Для определения ионного состава плазмы и температуры T_e целесообразно выбрать такие два уровня n и m , чтобы их энергии ионизации были равны (с точностью до величины снижения этой энергии в плазме). Измерив заселенности этих уровней, найдем их отношение

$$r = \frac{N_n^0/\varepsilon_n^0}{N_m^+/ \varepsilon_m^+} \approx \frac{N_o^+/\varepsilon_o^+}{N_o^{++}/\varepsilon_o^{++}}. \quad (4)$$

Далее, измерив концентрацию электронов, найдем температуру ионизации $T_{\text{ион}}^+$, пользуясь определяющим ее соотношением:

$$\frac{N_e g_o^+}{2r g_o^{++}} = F_o^+(T_{\text{ион}}^+). \quad (5)$$

Наконец, из соотношения

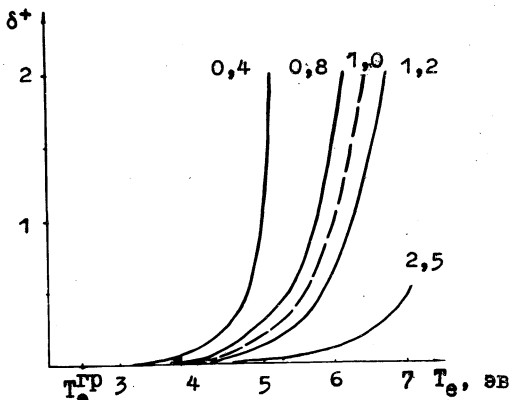
$$\frac{N_e^2}{N_m^+/\varepsilon_m^+} \frac{0,5}{2\varepsilon_o^{++}(1 + \delta^{++}) + \varepsilon_o^+ r(1 + \delta^+)} = F_m^+(T_e), \quad (6)$$

которое вытекает из (1)-(3), путем последовательных приближений можно найти значение T_e (обычно достаточную точность дает уже второе приближение). Ионный состав определяется затем из соотношений (2)-(4).

Для того, чтобы проиллюстрировать роль поправочного члена δ , рассмотрим конкретный пример - гелиевую плазму. В этом случае $\delta^{++} \approx 0$, а зависимость поправочного члена δ^+ от T_e при разных значениях параметра $T_e/T_{\text{ион}}^+$ показана на рис. I. Как видно из рис. I, учитывать вклад суммы возбужденных частиц в уравнение квазинейтральности (2) необходимо уже при температурах, не намного превышающих $T_e^{\text{ГР}}$ (для гелия $T_e^{\text{ГР}} \approx 2,5$ эв), причем вклад этот с увеличением температуры растет чрезвычайно быстро. На рис. I штриховой линией показан ход поправочного члена δ^+ при равновесной ионизации. Как и следовало ожидать, в неравновесной рекомбинирующей плазме ($T_e/T_{\text{ион}}^+ < 1$) поправка δ^+ играет существенно большую роль, не-

жели в равновесной, в то время как в неравновесной активной плазме ее роль, наоборот, заметно меньше.

Следует отметить, что поправка δ^+ значительно сильнее влияет на результаты определения ионного состава плазмы, нежели на результаты определения T_e .



Р и с. 1. Поправочный коэффициент δ^+ для гелия в зависимости от температуры электронов T_e и параметра T_e/T_{ion}^+ . Значения параметра указаны у кривых.

Авторы выражают благодарность Н. Н. Соболеву за полезное обсуждение результатов работы.

Поступила в редакцию
15 ноября 1976 г.

Л и т е р а т у р а

1. H.-W. Drawin, в книге "Progress in Plasmas and Gas Electronics", v.I, p. 591, Akademie Verlag, Berlin, 1975.
2. Г. Грим, Спектроскопия плазмы. Атомиздат, Москва, 1969 г.