

Б. ТИМАН

К ВОПРОСУ О ЗАВИСИМОСТИ РАВНОВЕСНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ИОНОВ В ТЕРМИЧЕСКИ ИОНИЗОВАННОМ ГАЗЕ ОТ ДАВЛЕНИЯ

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 15 IV 1954)

В астрофизике одним из методов определения различных физических величин в атмосферах звезд является метод, основанный на измерении равновесных концентраций ионов, ионизованных до различной кратности вследствие термической ионизации, и использовании уравнения Саха ⁽¹⁾, которое может быть записано в виде ⁽²⁾

$$\frac{C_{n-1}}{C_n C} = p K_p^{(n)}(T), \quad (1)$$

где C_{n-1} , C_n и C — соответственно, концентрации $(n-1)$ - и n -кратно ионизованных ионов и электронов; p — давление газа; $K_p^{(n)}(T)$ — константа ионизационного равновесия.

Это уравнение, как известно, выведено без учета взаимодействия частиц газа. Однако, если в газе имеются заряженные частицы, то взаимодействие, очевидно, имеет место, и тем большее, чем больше давление газа. Учет взаимодействия ионов и атомов в случае малой концентрации ионов был произведен в нашей работе ⁽³⁾.

В случае высоких температур газ может быть термически полностью ионизован, и поэтому представляет интерес рассмотреть влияние взаимодействия ионов, ионизованных до различной кратности, на их равновесные концентрации.

Мы для определенности рассмотрим равновесие между одно- и двукратно ионизованным газом. При равновесии должно иметь место следующее равенство для химических потенциалов частиц:

$$\mu_2 + \mu_3 = \mu_1, \quad (2)$$

где μ_1 , μ_2 и μ_3 — химические потенциалы одно- и двукратно ионизованных атомов и электронов.

Для вычисления химических потенциалов частиц полностью ионизованного газа используем известное выражение для свободной энергии газа, выведенное методом Дебая — Хюккеля ⁽²⁾:

$$F = F_{ид} - \frac{2e^3}{3} \sqrt{\frac{\pi}{KT}} \left(\sum_a N_a Z_a^2 \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Химические потенциалы можно найти из соотношения $\left(\frac{\partial F}{\partial N_a} \right)_{T, V} = \mu_a$. После дифференцирования получим:

$$\mu_a = \mu_{a, ид} - \frac{e^3 Z_a^2}{KT} \sqrt{\pi} \left(\sum_a p_a Z_a^2 \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где $\mu_{aид}$ — химический потенциал ионов идеального газа a -го сорта, p_a — парциальное давление ионов a -го сорта и $Z_a e$ — заряд иона.

Подставляя в уравнение (2) выражение (4) и используя известные формулы ⁽²⁾ для химических потенциалов идеальных газов ионов a -го сорта, можно получить уравнение для равновесных концентраций ионов одно- и двукратно ионизованных с учетом взаимодействия частиц газа:

$$\frac{C_1}{C_2 C_3} = p K_p^{(n)}(T) \exp \left\{ -4 \frac{e^3 V \pi \left(\sum p_a Z_a^2 \right)^{1/2}}{(KT)^2} \right\}, \quad (5)$$

где C_1 , C_2 и C_3 — соответственно, равновесные концентрации одно-, двукратно ионизованных атомов и электронов. В случае, когда газ в основном однократно ионизован и число двукратно ионизованных атомов мало, можно считать, что сумма парциальных давлений $p_1 + p_3$ однократно ионизованных атомов и электронов равна общему давлению p . Тогда формула (5) примет вид:

$$\frac{C_1}{C_2 C_3} = p K_p^{(n)}(T) \exp \left\{ -4 \frac{e^3 V \pi p}{(KT)^2} \right\}. \quad (6)$$

Последняя формула отличается от выражения (1) экспоненциальным множителем в правой части, который существенно зависит от давления. Эта зависимость показывает, что с ростом давления, даже при небольших давлениях, равновесное число двукратно ионизованных атомов будет уменьшаться не так, как следует из формулы (1), а значительно медленнее.

Легко показать, что это уменьшение будет происходить до определенного давления p_{min} , которое определится из выражения

$$p_{min} = \frac{(KT)^4}{8\pi e^6}.$$

Для температуры $T = 10^4$ вычисление дает $p_{min} = 19$ атм. При значениях $p > p_{min}$ число двукратно ионизованных атомов с ростом давления, согласно уравнению (6), должно увеличиваться. Следует заметить, что для давлений $p < p_{min}$ метод Дебая — Хюккеля становится неприменимым. Однако надо ожидать, что и в этом случае для более высоких давлений взаимодействие ионов будет еще больше влиять на равновесную концентрацию ионов в сторону увеличения числа двукратно ионизованных атомов. Следовательно, уравнение (6) более точно учитывает зависимость равновесных концентраций одно- и двукратно ионизованных атомов от давления, чем уравнение Саха.

В заключение выражаю благодарность И. Л. Аптекарю за обсуждение настоящей работы.

Днепропетровский горный институт
им. Артема

Поступило
18 I 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. А. Амбарцумян, Э. Р. Мустель, А. Б. Северный, В. В. Соболев, Теоретическая астрофизика, 1952. ² Л. Ландау, Е. Лифшиц, Статистическая физика, 1951. ³ Б. Л. Тиман, ЖЭТФ, 25, 733 (1953).