КОМПАКТНЫЙ ИСТОЧНИК УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОСНОВАНИЯХ МАГНИТНОЙ ТРУБКИ ИО

В.Е. Шапошников[1], В.В. Зайцев[1], Х.О. Рукер[2], Г.В. Литвиненко[3]

[1] Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
[2] Институт космических исследований, Грац, Австрия
[3] Институт радиоастрономии НУАН, Харьков, Украина

Ультрафиолетовое излучение из авроральных областей Юпитера известно сравнительно давно. Наблюдения последних лет, выполненные на космической станции Галилей, показали существование компактного ультрафиолетового источника вблизи оснований магнитной силовой трубки (МТИ), проходящей через спутник Юпитера Ио (Пранже и др., 1996, 1998; Кларк и др. 1996, 1998). Этот источник имеет небольшие размеры (≤ 400 км) и его движение по диску хорошо коррелирует с движением основания МТИ. Оценки показывают, что полная энергия, излученная этим компактным источником в ультрафиолетовом диапазоне, может достигать 5×10^{10} Вт, что составляет заметную долю от общей энергии, запасенной в цепи Юпитер-Ио ($\sim 10^{12}$ Вт). Ультрафиолетовое излучение компактного источника генерируется в атмосфере Юпитера молекулами и атомами водорода, возбужденными в результате упругих столкновений с электронами с энергией ≥ 10 эВ и/или ионами с энергией ≥ 25 кэВ.

Основная проблема любой модели ультрафиолетового источника - это тип и происхождение энергичных заряженных частиц, возбуждающих нейтральный водород в атмосфере Юпитера. Из условия $P_{\mathrm{UF}} \leq P$, где P_{UF} - мощность ультрафиолетового излучения и P - мощность, поступающая в источник благодаря энергичным заряженным частицам, нетрудно оценить плотность частиц (n), необходимую для возбуждения водорода. Полагая, что характерный размер источника ~ 400 км, сечение возбуждения максимально при энергиях $E_*^{\mathrm{e}} \simeq 30$ эВ при электронном возбуждении (Аджелло и др., 1984) и $E_*^{\mathrm{i}} \simeq 55$ кэВ - при протонном, находим соответственно $n^{\mathrm{e}} > 10^4$ см$^{-3}$ и $n^{\mathrm{i}} > 10$ см$^{-3}$. Традиционная модель ультрафиолетового источника в основаниях МТИ предполагает (по аналогии с моделями ультрафиолетовой авроры Юпитера и Земли), что энергичные частицы, возбуждающие нейтральный водород, попадают в атмосферу Юпитера из магнитосферы благодаря высыпанию вдоль силовых линий магнитного поля. Оценки показывают, что высыпающиеся частицы должны иметь энергию порядка $1 \div 200$ кэВ на частицу для электронного потока и $25 \div 500$ кэВ - для протонного (Пранже и др., 1998). Таким образом, на границе магнитосфера-атмосфера электроны в потоке должны иметь плотность, превышающую $(2 \times 10^3 \div 10^2)$ см$^{-3}$, а протоны $(10 \div 3)$ см$^{-3}$. Основная проблема здесь в том, что существование в нижней магнитосфере Юпитера таких потоков пока не подтверждается экспериментальными данными. С другой стороны, из приведенных выше оценок видно, что плотность электронов в источнике, необходимая для возбуждения нейтрального водорода, по порядку величины совпадает с плотностью ионосферной плазмы. Таким образом, сами заряды ионосферной плазмы могли бы быть теми частицами, которые эффективно возбуждают водород, при условии, что энергия относительного движения заряд-нейтральная частица была порядка $E_*^{\mathrm{e,i}}$ (в равновесном состоянии энергия теплового движения ионосферной плазмы Юпитера значительно меньше, ~ 0.1 эВ). В настоящей работе мы предлагаем модель источника ультрафиолетового излучения, в которой возбуждающими частицами являются электроны и ионы ионосферной плазмы. В основе нашей модели лежит хорошо известное явление движения свободной плазмы с электрическим током $\vec{I}$ под действием силы Ампера, обусловленной током $\vec{I}$ и его магнитным полем $\vec{B}_{\mathrm{I}}$. В случае частично ионизованной плазмы, какой является ионосфера Юпитера, сила Ампера индуцирует движение ионизованной компоненты плазмы относительно нейтральной. Проведенные на борту КА "Voyager" наблюдения выявили существование электрического тока вдоль МТИ, величина которого на момент наблюдений оценивалась как $\sim 5 \times 10^5$ А. При таком токе энергии движения электронной W_{em} и ионной W_{im} компонент плазмы относительно нейтрального газа

$$\frac{W_{\mathrm{im}}}{m_{\mathrm{i}}} \simeq \frac{W_{\mathrm{em}}}{m_{\mathrm{e}}} \simeq \frac{B_{\mathrm{I}} I}{2 m_{\mathrm{i}} c \sigma_{\mathrm{im}} n\, n_{\mathrm{m}} L_\perp^2}, \tag{1}$$

оказывается достаточной для эффективного возбуждения атомов и молекул нейтрального водорода при столкновении последних с зарядами. В (1) $\sigma_{\mathrm{im}} \simeq 2 \times 10^{-15}$ см^2 - поперечное сечение упругих столкновений иона с молекулами водорода, n и n_{m} - соответственно плотность ионизованной и нейтральной компонент плазмы, $L_\perp^2$ - поперечное сечение тока, m_{i} - масса иона, c - скорость света. В атмосфере Юпитера приведенная высота атмосферы ($L_\parallel$) определяется, в основном, нейтральной компонентой, плотность которой уменьшается с высотой. Поэтому энергия относительного движения (1) возрастает с высотой и ее распределение по высоте оказывается подобным высотному распределению энергии в потоке высыпающихся частиц. Скорость возбуждения нейтрального водорода электронами и ионами ионосферы достигает максимального значения

$$R_{\max} \simeq 4 \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\mathrm{im}}} \frac{2\pi}{m_{\mathrm{i}} c^2} \sqrt{\frac{m_{\mathrm{e}}}{2E_*^{\mathrm{e}}}} \frac{L_\parallel}{L_\perp} I^2 \tag{2}$$

на высоте, где энергия относительного движения соответствует максимуму сечения возбуждения $\sigma_{\max} \simeq 5 \times 10^{-17}$ см^2. В (2) m_{e} - масса электрона. Для наших оценок мы приняли следующие значения: $I \simeq 5 \times 10^5$ А, $L_\perp \simeq 10^7$ см и $L_\parallel \simeq 4 \times 10^7$ см. Заметим, что ни один из этих параметров не измерен непосредственно в эксперименте. Подставив эти параметры в (1) и (2), находим, что ультрафиолетовый источник (область с максимальной скоростью возбуждения нейтрального водорода) находится на высоте, где плотность нейтральной компоненты ионосферы равна $n_{\mathrm{m}}^* \simeq (4 \cdot 10^{12}/n^*)$ см$^{-3}$ (n^* - плотность ионизованной компоненты в источнике), а максимальная скорость возбуждения достигает величины $R_{\max} \simeq 1.6 \cdot 10^{27}$ частиц/с, что соответствует потоку излучения через боковую границу источника $\simeq 4 \cdot 10^3$ kR (1 kR $= 10^9$ фотон$\cdot$ см$^{-2}$с$^{-1}$) и мощности источника порядка $3 \cdot 10^9$ Вт. Для сравнения, наблюдения ультрафиолетового излучения от компактного источника в основании МТИ дают среднюю яркость $(1 \div 3) \cdot 10^2$ kR. Благодаря ограниченному пространственному разрешению, оценки мощности источника по наблюдаемому излучению приводят к большему разбросу значений, от $\leq 10^{10}$ Вт (Кларк и др., 1996) до $\sim 5 \cdot 10^{10}$ Вт (Пранже и др., 1996).

Таким образом, мы видим, что предлагаемый механизм способен обеспечить наблюдаемую яркость компактного ультрафиолетового источника. Однако эта яркость достигается при значении мощности источника значительно меньшим, чем максимальная величина, полученная в работе Пранже и др. (1996). Возможны два пути, чтобы придти к лучшему согласованию между моделью и наблюдениями. Во-первых, можно принять, что величина тока и его поперечные размеры, измеренные во время полета КА "Voyager" и взятые нами для оценок, отличаются от соответствующих величин в момент ультрафиолетовых наблюдений. Отметим, что такое предположение было сделано в работах Пранже и др. (1996), (1998). Во-вторых, принять во внимание другие эффекты, обусловленные движением плазмы относительно нейтралов под действием силы Ампера. Это добавочная ионизация атмосферы и аномальный джоулев нагрев плазмы. Дело в том, что благодаря упругим столкновениям электронов и ионов с нейтральным водородом, значительная доля энергии направленного движения зарядов ($W_{\rm em}$, $W_{\rm im}$) за одно столкновение переходит в тепловую. Как можно видеть из выражения (1) эта энергия растет с высотой. Максимум сечения ионизации достигается при энергиях более высоких, чем максимум сечения возбуждения. Таким образом, над ультрафиолетовым источником в атмосфере Юпитера располагается область с горячей и плотной плазмой, что приводит к появлению дополнительного потока частиц в ультрафиолетовый источник. Кроме того, благодаря медленной термолизации горячих электронов, этот поток (и, следовательно, ультрафиолетовый источник) будет вытянут в направлении движения спутника Ио, что соответствует наблюдениям.

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку работы Российскому фонду фундаментальных исследований (гранты 98- 02-16238 и 99-02-18244) и Комиссии по международному сотрудничеству Австрийской Академии наук.

Литература

Ajello J.M., Shemansky D.E., Kwork T.L., Yang Y.L., 1984, Phys.Rev.A, 29, 636
Clarke J.T., Ballester G.E., Trauger J. et al. 1996, Science, 274, 404; 1998, JGR, 103, 20217
Prange R., Rego D., Southwood D., Zarka P., Ip W., 1996, Nature, 379, 323
Prange R., Rego D., Paltier L., Connerney J.E.P., Zarka P., Queinnec J., 1998, JGR, 103, 20195