

С. Б. ПИКЕЛЬНЕР и К. К. ЧУВАЕВ

**О ВЕРОЯТНОМ МЕХАНИЗМЕ СВЕЧЕНИЯ НОЧНОГО НЕБА
В НЕПРЕРЫВНОМ СПЕКТРЕ**

(Представлено академиком Г. А. Шайном 28 XI 1952)

В 1951 г. было показано (1), что верхние слои земной атмосферы являются источником не только монохроматического излучения, но и излучения, имеющего непрерывный спектр. Недавно один из нас (2) подтвердил это при помощи более совершенной методики, используя несколько различных светофильтров. Распределение энергии в этом спектре определялось из наблюдений и оказалось в интервале 4720—5580 Å слабо зависящим от длины волны. Было показано, что интегральный поток излучения в этом интервале изменяется в различные ночи от $1,2 \cdot 10^{-8}$ до $6,8 \cdot 10^{-8}$ эрг/см² сек·град², т. е. иногда превышает в несколько раз поток излучения λ 5577.

В настоящей работе указан возможный механизм образования этого излучения. Обычного электронно-ионного излучения в непрерывном спектре (свободно-свободные переходы электронов в поле ионов и рекомбинации электронов на основной и возбужденные уровни ионов) здесь недостаточно, так как концентрация электронов и ионов в верхних слоях атмосферы не превышает 10^6 , что, при сравнительно малой протяженности атмосферы, не может дать сколько-нибудь заметного непрерывного спектра.

Обилие в атмосфере нейтральных атомов и молекул заставляет рассмотреть процесс образования отрицательных ионов. При этом должны излучаться кванты с частотой большей, чем частота ν_0 , соответствующая энергии ионизации отрицательного иона.

Единица объема газа, содержащая n_e электронов и n_{r+1} ионов (или, как в данном случае, нейтральных атомов), излучает в единицу телесного угла за 1 сек. энергию (3)

$$j_{\nu} d\nu = n_e n_{r+1} \frac{g_r}{u_{r+1}} \frac{h^4 \nu^3}{c^2} \frac{k'_\nu}{(2\pi m k' T_e)^{3/2}} e^{-\frac{h\nu - h\nu_0}{kT_e}} d\nu, \quad (1)$$

где g_r и u_{r+1} — статистические веса, T_e — электронная температура, k'_ν — коэффициент поглощения, рассчитанный на один отрицательный ион. Из всех отрицательных ионов величины ν_0 и k'_ν приближенно известны только для водорода, натрия, ртути, хлора и кислорода (4, 5). Поскольку кислород является одним из самых обильных элементов в атмосфере, мы рассчитаем его излучение.

Высота слоя, излучающего непрерывный спектр, определенная недавно довольно грубым способом (1), равна приблизительно 460 км. Однако определение высот здесь очень неточно, и этот результат означает лишь, что излучение исходит из не очень низких слоев. Так как излучение должно относиться скорее всего к одному из ионосферных слоев, мы мо-

жем допустить, что оно образуется в слое F , который ночью имеет высоту около 250 км, электронную концентрацию $n_e \approx 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ и концентрацию нейтральных атомов кислорода $n_o \approx 7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ (6), если считать химический состав атмосферы на этой высоте таким же, как в тропосфере, кислород диссоциированным, а азот слабо диссоциированным. Знание степени диссоциации азота здесь не очень существенно. Температура в этих слоях равна примерно $1500\text{--}2000^\circ$ (6). Концентрация отрицательных ионов меньше, чем концентрация электронов.

Энергия диссоциации отрицательного иона кислорода из лабораторных измерений по одним данным соответствует приблизительно λ 5620, по другим λ 4000. Бейтс (5) считает более вероятным первое значение. Коэффициент поглощения k_ν на некотором расстоянии от границы равен, как показывает квантово-механический расчет Бейтса, приблизительно $2\text{--}3 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$, но вблизи предела ход его неизвестен, так как он зависит от неизвестного параметра поляризуемости. Более вероятно возрастание k_ν от предела.

Рассчитаем излучение 1 см^2 для λ 5220 Å, где параметр поляризуемости уже не так сильно влияет на величину k_ν , которую можно положить равной $3 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$. Используя указанные выше значения остальных параметров, находим при помощи (1), что $j_{\lambda\rho} = 0,8 \cdot 10^{-14} \text{ эрг/см}^3 \cdot \text{сек} \cdot \text{стерад} \cdot \text{Å}$. Считая эффективную толщину излучающего слоя равной 70 км, получим, что энергия, излучаемая 1 см^2 за 1 сек. в пределах 1 квадратного градуса на 1 Å, равна $1,8 \cdot 10^{-11} \text{ эрг}$, что хорошо согласуется с данными наблюдений. Таким образом, излучение земной атмосферы в непрерывном спектре может быть целиком или частично обусловлено рассмотренным механизмом. Сравнение теоретического и наблюдаемого распределения энергии в спектре в настоящее время провести нельзя, так как неизвестен ход k_ν у предела спектра и неизвестно точное положение предела. Для отождествления необходимо провести наблюдения в более длинноволновой части спектра перед пределом. В случае правильности отождествления излучения там не должно быть.

Оценим, насколько существенными могут быть некоторые другие механизмы излучения в непрерывном спектре.

В подавляющем большинстве случаев непрерывный спектр излучается при частичном превращении в излучение кинетической энергии участвующих частиц. Как хорошо известно, тяжелые частицы не могут, в силу законов сохранения энергии и количества движения, превратить в излучение большую часть своей энергии. Поэтому для излучения спектра с энергией, изменяющейся в пределах свыше 0,4 эв, как в данном случае, требуется, чтобы энергия относительного движения взаимодействующих тяжелых частиц заметно превышала 1 эв. При $T_e \approx 1500\text{--}2000^\circ$ число таких частиц сравнительно невелико. Поэтому, не исключая этой возможности, следует искать источник излучения скорее во взаимодействии тяжелых частиц с электронами. Как уже указывалось, концентрация положительных ионов слишком мала, чтобы дать заметное излучение. Концентрация газов, отличных от кислорода и азота, также мала; кроме того, наиболее обильные из них — инертные газы — имеют очень малое электронное сродство, так что захват ими электрона маловероятен и излучаемая энергия должна лежать в далекой инфракрасной области спектра. Энергия связи атомного и молекулярного азота также очень мала, чем и объясняется химическая инертность его. По расчетам Месси, основанным на экстраполяции, энергия связи электрона с атомом азота около 0,04 эв (4).

Чтобы оценить роль молекул O_2 и N_2 , нужно учесть, что в слое E (высота около 100 км) плотность газа на 2 порядка больше, чем в слое F , а электронная концентрация ночью меньше, повидимому, на $1\text{--}1\frac{1}{2}$ порядка. Если бы излучение определялось молекулами; то онс

было бы сильнее в слое E , где диссоциация должна быть меньше, тогда как измерения высот указывают скорее на слой F , чем на E . Отсюда следует, далее, вывод, что в слое E кислород не может быть сильно диссоциирован, концентрация O в нем не должна превышать концентрацию в слое F больше, чем на $1-1\frac{1}{2}$ порядка. Более точные данные об электронной концентрации в слое E ночью позволят уточнить этот вывод. Можно сказать, что целый ряд процессов не может служить источником наблюдаемого излучения. Однако нельзя заранее считать, что рассмотренный механизм является единственным, — могут существовать и другие, пока еще неизвестные. Их наличие не отрицает излучения при образовании отрицательных ионов кислорода, которое должно входить в непрерывный спектр ночного неба.

При помощи (1) легко подсчитать, что в 1 см^3 за 1 сек. образуется около 50 отрицательных ионов кислорода. Если эти ионы будут сохраняться в течение ночи, то через $1-2$ часа электронная концентрация сильно уменьшится и свечение затухнет.

Поскольку r_e в течение ночи быстро не убывает, нужно предположить, что существует обратный механизм, разрушающий отрицательные ионы. Электронных ударов для этого, как легко подсчитать, недостаточно. Таким механизмом может быть какая-либо фотохимическая реакция или столкновения с возбужденными атомами. В частности, если окажется, что энергия диссоциации отрицательного иона кислорода на $0,1-0,2$ эв меньше, чем сейчас принимается, то весьма эффективными будут столкновения с возбужденными атомами O в состоянии 1D_2 , исходном для излучения красных линий $\lambda 6300$ и $\lambda 6364$. Эффективное сечение такого процесса при близких энергиях очень велико — порядка $10^{-13}-10^{-14} \text{ см}^2$. Если считать, что излучение $\lambda 6300$ и $\lambda 6364$ образуется в том же слое F , то концентрация возбужденных атомов кислорода, определенная по яркости этих линий, равна $n_2 \approx 10^4$.

Число столкновений этих атомов с отрицательными ионами, приводящее к разрушению последних, равно приблизительно

$$n_2 n_i v \sigma \approx 10^4 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^{-13} \approx 20 \text{ см}^{-3} \text{ сек}^{-1},$$

если принять концентрацию отрицательных ионов $n_i \approx 10^5$ — несколько меньше концентрации электронов, и относительную скорость атомов $v \approx 2 \text{ км/сек}$. Мы видим, что скорость разрушения отрицательных ионов в этом случае близка к скорости их образования. Могут иметь место и другие процессы, приводящие к разрушению отрицательных ионов, но характер их в данном случае не существен для рассмотренного механизма.

Крымская астрофизическая обсерватория
Академии наук СССР

Поступило
21 XI 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ D. Barbier, J. Dufay, D. Williams, Ann. d'Astrophys., 14, № 4, 399 (1951).
² К. К. Чуваев, ДАН, 87, № 4 (1952). ³ В. А. Амбарцумян, Э. Р. Мустель, А. Б. Северный, В. В. Соболев, Курс теоретической астрофизики, 1952.
⁴ В. Л. Грановский, Электрический ток в газе, 1, 1942, стр. 181, 186. ⁵ D. R. Bates, M. N., 106, 128 (1946). ⁶ И. С. Герзон, УФН, 48, № 4, 561 (1952).