

И. С. ШКЛОВСКИЙ

## О МЕХАНИЗМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ СВЕЧЕНИЯ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

(Представлено академиком Г. А. Шайном 4 X 1951)

Анализ относительных интенсивностей различных линий и полос в спектрах полярных сияний показывает, что преимущественно возбуждаются уровни с небольшим потенциалом возбуждения. В частности, если учесть большую продолжительность жизни атома кислорода в метастабильном состоянии  $^1D_2$  (исходном при излучении линий  $\lambda\lambda$  6300—6363 Å), вследствие чего удары второго рода становятся весьма эффективными, то число возбуждений уровня  $^1D_2$  будет значительно больше числа возбуждений уровня  $^1S_0$  (исходного при излучении линии  $\lambda$  5577 Å). Это особенно ясно видно в случае спектров полярных сияний больших высот, где роль ударов второго рода, повидимому, уже незначительна. В этих спектрах доминирует красная линия. Приведем другой пример: интенсивность полос первой положительной системы молекулы азота (потенциал возбуждения 7,35 эв) всегда больше, чем второй (потенциал возбуждения 10,96 эв).

К этим хорошо известным примерам необходимо добавить еще один. Как это следует из анализа спектра полярных сияний в близкой инфракрасной области, полученного Петри (<sup>1</sup>), в полярных сияниях не возбуждаются уровни атомарных кислорода и азота с потенциалами возбуждения, превышающими 12 эв. Из разрешенных линий кислорода присутствуют только две инфракрасные линии  $\lambda\lambda$  7772 и 8446 Å, у которых потенциалы возбуждения наименьшие (10,69 и 10,94 эв, соответственно). Отсужествление Вегардом многочисленных слабых эмиссий полярных сияний с некоторыми разрешенными переходами кислорода и азота ошибочно. Следовательно, одна из основных особенностей спектров полярных сияний — слабость разрешенных линий кислорода и азота по сравнению с запрещенными — должна объясняться низкими потенциалами возбуждения у запрещенных линий и высокими у разрешенных.

Однако представление о том, что в полярных сияниях преимущественно возбуждаются низковольтные уровни, находится в резком противоречии с наблюдаемой большой интенсивностью полос отрицательной системы молекулы азота. Большинство исследователей считает, что эта система полос (принадлежащая ионизованной молекуле азота) возбуждается из основного состояния нейтральной молекулы азота путем электронного удара (<sup>2</sup>). В этом случае потенциал возбуждения будет 18,66 эв, т. е. значительно больше потенциала возбуждения второй положительной системы полос молекулы азота, хотя последняя относительно слаба. Другого мнения держится Свингс (<sup>3</sup>), который считает, что отрицательная система возбуждается электронным ударом с ионизованной молекулой азота.

Рассмотрим сперва первый механизм возбуждения  $N^+$ . Существующие теории свечения полярных сияний ((4, 5) и др.) предполагают, что основным процессом возбуждения в полярных сияниях являются неупругие столкновения свободных электронов с молекулами азота. Не может быть и речи о том, чтобы эти электроны являлись первичными, „солнечными“ корпускулами, — они бы затормозились еще в самых верхних слоях земной атмосферы (6). Даже если бы этого торможения не было, то при скорости в 1000 км/сек (такая скорость следует из наблюдаемого запаздывания полярных сияний по отношению к возмущающим солнечным явлениям) их энергия (около 2,8 эв) была бы совершенно недостаточна. Если же эти электроны являются продуктами ионизации воздуха первичными тяжелыми „солнечными“ корпускулами (например протонами), то их энергия будет также недостаточна. Как известно, вторичный электрон, образовавшийся при столкновении молекулы воздуха с тяжелой частицей, должен иметь скорость, не превышающую удвоенной скорости ударяющей тяжелой частицы. Если, например, скорость атома водорода солнечного происхождения будет 1000 км/сек (это весьма вероятное значение, см. (7)), то энергия вторичного электрона будет заведомо меньше 11 эв. Полностью опровергает гипотезу о возбуждении отрицательной системы электронным ударом с нейтральной молекулой азота наблюдаемый факт отсутствия разрешенных линий кислорода и азота с потенциалом возбуждения больше 12 эв — нельзя себе представить, чтобы уровень с энергией 18,66 эв интенсивно возбуждался, а огромное число уровней O и N с гораздо меньшими потенциалами возбуждения совершенно не возбуждалось.

Гипотеза о возбуждении отрицательной системы соударениями свободных электронов с ионизованными молекулами также не выдерживает критики. Это можно показать, если исследовать ионизацию в полярных сияниях. В нашей работе (8) мы вычислили концентрацию [H] водородных атомов солнечного происхождения по наблюдаемой интенсивности линии  $H_\alpha$  в спектре полярных сияний. Количество энергии, которое вместе с этими частицами поступает через единичную площадку земной атмосферы за единицу времени, будет равно  $\frac{m[H]V^3}{2}$ , где  $V$  — скорость корпускул,  $m$  — их масса. Полагая, что вся эта энергия тратится на ионизацию атомов и молекул земной атмосферы, и считая, что на единичный акт ионизации расходуется в среднем  $\chi$  вольт, мы легко найдем верхнюю границу для среднего количества пар ионов, образующегося в единице объема за единицу времени:

$$J = \frac{m[H]V^3}{\chi l}, \quad (1)$$

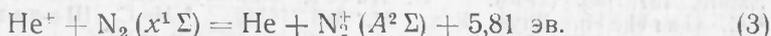
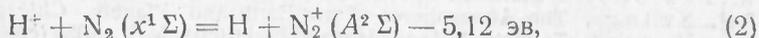
где  $l$  — высота однородной атмосферы над нижним уровнем полярного сияния. Если  $[H] = 1 \text{ см}^{-3}$ ,  $V = 1000 \text{ км/сек}$ ,  $\chi = 20 \text{ эв}$ ,  $l = 10 \text{ км}$ , то  $J = 10^4 \text{ см}^{-3}\text{сек}^{-1}$ . Если  $\alpha$  — коэффициент рекомбинации, то электронная концентрация при ионизационном равновесии будет  $n_e = \sqrt{J/\alpha}$ . Полагая, что  $\alpha = 10^{-9}$  (эмпирическое значение для слоя E ночью), найдем, что  $n_e = 3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ . Заметим, что ионизационное равновесие достигается довольно быстро — через несколько минут. Однако эти электроны будут иметь весьма незначительные скорости.

Дело в том, что вновь образуемые, достаточно быстрые вторичные электроны будут терять энергию, в основном, из-за неупругих столкновений. Если эффективное сечение таких столкновений  $10^{-17} \text{ см}^2$ , то „время релаксации“  $\tau$  вторичного электрона, определяемое как время, в течение которого он потеряет почти всю свою энергию, при концен-

трации молекул атмосферы, равной  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>, будет порядка  $10^{-4}$  сек. Следовательно, концентрация быстрых вторичных электронов будет порядка  $J\tau \approx 1$  см<sup>-3</sup>, т. е. того же порядка, что и концентрация первичных тяжелых частиц. Так как концентрация ионов  $N_2^+$  должна быть меньше, чем  $n_e$  (отрицательные ионы на этих высотах играют незначительную роль), то число возбуждений отрицательной системы столкновениями электронов и ионов  $N_2^+$  в единичном столбе за единицу времени будет  $J\tau N_2^+ V\sigma l \leq 3 \cdot 10^3$  см<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup>, в то время как согласно наблюдениям эта величина больше  $10^9$  см<sup>2</sup> сек<sup>-1</sup>. Очевидно, столкновения первичных тяжелых корпускул с ионами  $N_2^+$  также неэффективны. Что же касается столкновений этих корпускул с нейтральными молекулами  $N_2$ , то этот процесс имеет малое эффективное сечение, так как энергия возбуждения очень велика. Известно, что при столкновениях тяжелых частиц преимущественно возбуждаются уровни с небольшим потенциалом возбуждения.

Следовательно, можно констатировать, что все предложенные механизмы возбуждения отрицательной системы молекулы азота в полярных сияниях оказались несостоятельными.

Как нам представляется, естественно связать аномальное поведение отрицательной системы с тем обстоятельством, что она является единственной эмиссией, принадлежащей ионизованным частицам. Это заставляет предполагать существование некоторого селективного механизма возбуждения, связанного с ионизацией молекулы азота. Повидимому, единственным мыслимым элементарным процессом является перезарядка первичного протона (или, возможно, ионизованного атома гелия), в процессе которой образуется возбужденная ионизованная молекула азота, т. е. реакции типа



В случае перезарядки протона требуемый излишек энергии (сравнительно небольшой) должен браться из кинетической энергии протона. Перезарядка протонов в аргоне, требующая добавочной энергии 2,2 эв, наблюдалась Гольдманом<sup>(9)</sup>. Эффективное сечение для интересующих нас скоростей протонов было очень велико — около  $2 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup>. Повидимому, эффективное сечение процесса<sup>(2)</sup> не меньше  $10^{-16}$  см<sup>2</sup>. В связи с этим уместно вспомнить, что при фотоионизации молекулы азота преимущественно образуются ионы в возбужденном состоянии  $A^2\Sigma$ .

На своем пути через атмосферу протон, как можно показать, будет перезаряжаться около сотни раз, причем каждый раз, с определенной вероятностью, будет иметь место реакция (2). Следовательно, возбужденные молекулы  $N_2^+$  будут образовываться на всех уровнях. Число ионов  $N_2^+$  в возбужденном состоянии  $A^2\Sigma$ , образующихся в столбе единичного сечения за единицу времени, будет равно

$$Z = [H] VQ \frac{\sigma_0}{\Sigma\sigma}, \quad (4)$$

где  $Q$  — число перезарядок,  $\sigma_0$  — эффективное сечение перезарядки с образованием возбужденной молекулы  $N_2^+$ ,  $\Sigma\sigma$  — сумма всех других эффективных сечений перезарядки. Очевидно,  $Z$  есть также число излученных фотонов отрицательной системы в указанном столбе. Даже если отношение  $\sigma_0 / \Sigma\sigma = 1/10$ ,  $Z$  будет порядка  $10^9$  см<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup>, что близко к наблюдаемой величине интенсивности полос отрицательной системы для полярных сияний умеренной яркости.

Можно ожидать перезарядки протонов с атомами кислорода с образованием ионизованных и возбужденных атомов кислорода. При этом могли бы излучаться запрещенные линии  $\lambda\lambda 3727$  и  $7330 \text{ \AA}$ . Однако малая вероятность переходов делает удары второго рода очень эффективными; интенсивность этих линий будет совершенно ничтожна. Разрешенные же линии  $O^+$  имеют очень высокий потенциал возбуждения.

Таким образом, явление перезарядки первичных корпускул в земной атмосфере может объяснить аномально большую интенсивность полос отрицательной системы азота в спектрах полярных сияний. Другие полосы и линии будут возбуждаться либо соударениями с тяжелыми первичными частицами, либо с вторичными электронами. Так как энергия последних сравнительно невелика, то они, в основном, будут возбуждать низковольтные метастабильные уровни кислорода и азота. С другой стороны, при столкновениях с тяжелыми частицами также будут более часто возбуждаться уровни с более низким потенциалом возбуждения из-за наличия в этом случае „энергии активации“.

Развитые представления позволяют уяснить основные закономерности спектров полярных сияний — преимущественное возбуждение низковольтных уровней и аномальное поведение отрицательной системы полос молекулы азота.

Крымская астрофизическая обсерватория  
Академии наук СССР

Поступило  
27 IX 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> W. Petrie, Journ. Geoph. Res., **55**, 143 (1950). <sup>2</sup> D. Bates, H. Massey and R. Pearse, The Emission Spectra of the Night Sky and Aurorae, London, 1948 (сборн.).  
<sup>3</sup> P. Swings, The Atmospheres of the Earth and Planets, Chicago, 1949 (сборн.).  
<sup>4</sup> L. Vegard, Terrestrial Magnetism and Electricity, N. Y., 1939 (сборн.). <sup>5</sup> S. Mitra, Nature, **157**, 692 (1946). <sup>6</sup> D. Bates, Monthly Not. of RAS, **109**, 215 (1949).  
<sup>7</sup> C. Gartlein, Phys. Rev., **81**, 463 (1951). <sup>8</sup> И. С. Шкловский, ДАН, **81**, № 3 (1951). <sup>9</sup> D. Goldman, Ann. Phys., **10**, 460 (1931).