

И. С. ШКЛОВСКИЙ

**ОБ ИЗЛУЧЕНИИ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ  
В СПЕКТРАХ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ**

(Представлено академиком Г. А. Шайном 26 IX 1951)

Недавние исследования Мейнела (1) и Гартлейна (2) окончательно установили наличие линий излучения серии Бальмера в спектре полярных сияний и показали, что частицы, ответственные за это излучение, имеют солнечное происхождение и движутся в земной атмосфере с большими скоростями приблизительно вдоль силовых линий магнитного поля. Что касается природы указанных частиц, то все исследователи считают их протонами. Не подлежит никакому сомнению, что водородные атомы, выброшенные по какой-нибудь причине из Солнца, в межпланетном пространстве должны быть ионизованы. Однако, попадая в земную атмосферу, они в конце концов должны нейтрализоваться. Вопрос о том, принадлежит ли водородная эмиссия нейтральному или ионизованному водороду, непосредственно связан с механизмом возбуждения. Если излучение обусловлено рекомбинациями с образованием возбужденных атомов водорода, то можно считать, что излучают протоны. Если механизм возбуждения состоит в столкновении нейтрального атома водорода с какой-нибудь частицей земной атмосферы, то излучение обусловлено нейтральными атомами водорода.

Мыслимы следующие механизмы возбуждения:

- а) рекомбинации выброшенных Солнцем протонов со свободными электронами земной атмосферы;
- б) рекомбинации указанных протонов со свободными электронами корпускулярного потока, выброшенного Солнцем;
- в) перезарядка протонов с атомами и молекулами земной атмосферы, с образованием возбужденных атомов водорода;
- г) столкновения нейтральных атомов водорода солнечного происхождения с атомами и молекулами земной атмосферы.

Механизмы а) и б) должны быть сразу же отброшены из-за исключительно малого эффективного сечения радиативной рекомбинации на возбужденные уровни и, главным образом, небольшой концентрации свободных электронов как в земной атмосфере, так и в корпускулярном потоке. Элементарный расчет показывает, что для того, чтобы обеспечить свечение бальмеровских линий механизмами а) и б), необходима концентрация «солнечных» протонов в земной атмосфере порядка  $10^9$  см<sup>-3</sup>, что явно абсурдно.

Попадая в земную атмосферу, протоны будут быстро перезарядаться с молекулами и атомами атмосферы. Эффективное сечение перезарядки протонов сильно зависит от их скорости. Согласно исследованиям Гольдмана (3) о перезарядке протонов в разных газах, можно принять, что для скоростей протонов порядка 1000—1500 км/сек эффективное

сечение такого процесса будет примерно  $10^{-15}$  см<sup>-2</sup>. Это означает, что перезарядка влетающих с указанными скоростями в земную атмосферу «солнечных» протонов произойдет там, где концентрация атмосферных атомов будет около  $10^8$  см<sup>-3</sup>, т. е., повидимому, на высотах свыше 500 км. Начиная со скоростей 2000 км/сек эффективное сечение перезарядки быстро уменьшается (4), так что, например, протоны со скоростями свыше 7000 км/сек могли бы попасть на уровень 110—120 км над земной поверхностью не перезарядившись. Существенно, однако, что перезарядка с образованием возбужденных атомов водорода имеет весьма малое эффективное сечение. В случае сравнительно быстрых протонов эффективное сечение такого процесса асимптотически приближается к эффективному сечению рекомбинации свободного электрона на возбужденный уровень, т. е. при возбуждении третьего уровня, исходного при излучении  $H_{\alpha}$ , будет в 27 раз меньше эффективного сечения нейтрализации с образованием невозбужденного атома водорода. В случае сравнительно медленных протонов нейтрализация с возбуждением также маловероятна, так как такой процесс эквивалентен неупругому удару. Хорошо известно, однако, что при столкновениях тяжелых частиц со сравнительно небольшой энергией эффективные сечения неупругих ударов очень малы и быстро уменьшаются с ростом энергии возбуждения. Это обстоятельство, по нашему мнению, играет решающую роль в явлении полярных сияний и может быть рассматриваемо как ключ к пониманию спектров полярных сияний. Ниже мы остановимся на одной важной проблеме, связанной с отмеченной особенностью неупругих столкновений тяжелых частиц.

Таким образом, нейтральные атомы водорода (первоначально в виде протонов вторгшиеся в земную атмосферу) возбуждаются соударениями с атомами и молекулами земной атмосферы. То обстоятельство, что нейтральные атомы водорода движутся по силовым линиям земного магнитного поля, можно объяснить тем, что при столкновениях с молекулами атмосферы они, из-за своих сравнительно больших скоростей, очень мало отклоняются от первоначального направления движения, близкого к направлению силовых линий. Например, если в среднем угол отклонения при одном столкновении равен  $8^{\circ}$ , то, учитывая беспорядочность таких столкновений, можно найти, что значительное отклонение атома водорода (скажем, на  $50^{\circ}$ ) произойдет после 50 столкновений. Заметим, что на высотах 115—120 км, где концентрация молекул воздуха около  $4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, длина свободного пробега будет около  $2 \cdot 10^3$  см, в то время как радиус кривизны спирали, которую протон описывает в магнитном поле земли, будет около  $3 \cdot 10^4$  см. Это означает, что если бы упругие столкновения сопровождалось значительными отклонениями, то и протоны на таких высотах никак не могли бы двигаться по силовым линиям.

Хорошо известно, что одной из основных трудностей теории полярных сияний является истолкование наблюдаемого факта сравнительно глубокого проникновения солнечных корпускул в земную атмосферу. Ряд авторов (см., например, (5)), применяя известные формулы торможения быстрых заряженных частиц веществом, нашли, что протоны, движущиеся в земной атмосфере со скоростью 1000 км/сек, должны затормозиться на уровне свыше 200 км. При этом, однако, совершенно некорректно экстраполируются формулы торможения, полученные для больших энергий протонов, на область сравнительно низких значений энергий, где начинают действовать специфические закономерности. Например, становится существенной энергия «активации», быстро уменьшающая эффективные сечения неупругих ударов при росте потенциалов возбуждения (ионизации), что ведет к резкому уменьшению энергетических потерь. «Солнечные» корпускулы в полярных сияниях можно уподобить частицам в камере Вильсона на излете их пробега, когда они пере-

стают в заметной степени ионизовать и выходят из поля зрения экспериментатора. Учет особенностей столкновений атомов водорода (как упругих, так и неупругих), движущихся со скоростями около 1000 км/сек, позволяет непосредственно объяснить их проникновение в земную атмосферу до уровней 115—120 км, где чаще всего происходят полярные сияния. Необходимо, однако, заметить, что полярные сияния наблюдаются (правда, значительно реже) и на более низких уровнях — вплоть до 70 км. В этом случае солнечные корпускулы должны обладать гораздо большими энергиями.

При истолковании наблюдаемых контуров линии  $H_{\alpha}$  в спектре полярных сияний возникают две точки зрения. Во-первых, как это полагает Мейнел (1), можно считать, что пучок очень быстрых, однородных по скорости протонов, попадая в земную атмосферу, непрерывно тормозится. Во-вторых, можно полагать, что вторгающиеся в земную атмосферу корпускулы имеют широкий спектр скоростей.

Первая точка зрения нам представляется неправильной. Легко показать, что при торможении максимальная интенсивность линии  $H_{\alpha}$  соответствовала бы скорости, близкой к абсциссе максимума функции возбуждения при столкновении атома водорода с молекулами воздуха.

Учитывая наличие энергии «активации» и большую величину потенциала возбуждения водорода, следует ожидать, что эта скорость никак не меньше 2500—3000 км/сек, т. е. много больше полученной в (1). Непосредственно опровергает представление о торможении спектрограмма Гартлейна (2), где контур  $H_{\alpha}$  имеет два максимума. Это, разумеется, никак нельзя объяснить непрерывным торможением. Вывод о том, что корпускулярные потоки, вылетающие из Солнца, имеют широкий спектр скоростей, имеет принципиальное значение.

Когда скоро механизм возбуждения бальмеровских линий в спектрах полярных сияний выяснен, можно попытаться оценить концентрацию атомов водорода солнечного происхождения по наблюдаемой интенсивности  $H_{\alpha}$ .

Имеем соотношение:

$$I = \frac{h\nu}{4\pi} \int_{S_0}^{\infty} [H] [N] \sigma dS = \frac{h\nu}{4\pi} [H] V \sigma \int_{S_0}^{\infty} [N] dS,$$

где  $[H]$  и  $[N]$  — концентрации «солнечных» водородных атомов и молекул земной атмосферы, соответственно;  $h\nu$  — энергия кванта  $H_{\alpha}$ ,  $\sigma$  — эффективное сечение возбуждения атома водорода столкновением с молекулой земной атмосферы, которое мы примем равным  $5 \cdot 10^{-18}$  см<sup>2</sup> — максимальному значению функции возбуждения третьего уровня атома водорода электронным ударом (в действительности, в случае соударения с тяжелыми частицами  $\sigma$ , повидимому, меньше);  $V$  — скорость атомов водорода, которую мы положим равной 1000 км/сек;  $S_0$  — нижняя граница высоты свечения, для которой примем значение 115 км. Именно на такой высоте наблюдал полярное сияние Гартлейн, что следует из описания условий наблюдения.  $I$  — интенсивность  $H_{\alpha}$  — мы примем равной  $3 \cdot 10^{-4}$  эрг/см<sup>2</sup> · сек · стерадиан. В (2) указывается, что интенсивность  $H_{\alpha}$  была примерно такая же, как и интенсивность запрещенной линии кислорода  $\lambda$  6364 Å, в то время как наблюдавшееся полярное сияние было умеренной интенсивности.

Полагая  $\int_{S_0}^{\infty} [N] dS = 4 \cdot 10^{18}$  см<sup>-2</sup>, найдем, что искомая концентрация водорода  $[H] = 0,6$  см<sup>-3</sup>. Хотя эта оценка носит ориентировочный характер, порядок величины концентрации солнечных корпускул получается правильный.

Естественно ожидать, что наряду с водородом в земную атмосферу вторгаются и другие атомы солнечного происхождения. Согласно исследованию Э. Р. Мустеля <sup>(6)</sup>, в солнечных корпускулярных потоках должны присутствовать ионы кальция, концентрация которых должна составлять не меньше нескольких процентов от концентрации протонов. Эти ионы, так же как и протоны, в земной атмосфере должны быстро нейтрализоваться. Учитывая низкий потенциал возбуждения резонансной линии кальция  $\lambda$  4226,7, что особенно существенно при соударениях с тяжелыми частицами, следовало бы ожидать наличия кальциевой эмиссии в спектре полярных сияний, по интенсивности в несколько раз меньшей, чем  $H_{\alpha}$ , но все же наблюдаемой. В спектре полярных сияний наблюдаются две линии —  $\lambda$  4226,3 и  $\lambda$  4218. По Вегарду <sup>(7)</sup>, первая отождествляется с блендой двух линий, принадлежащих ионизированному и нейтральному атомарному азоту. Однако это отождествление весьма сомнительно. Как это следует из анализа спектров полярных сияний в инфракрасной области, в спектре полярных сияний линий НИ вообще нет, а линия NI  $\lambda$  4224,7 должна быть очень слабой. Не исключено, что линия  $\lambda$  4226,3 является резонансной линией кальция, наблюдавшейся несмещенной в магнитном горизонте. Другую линию  $\lambda$  4218 Вегард отождествляет с полосой Вегарда — Каплана (0,12). Это отождествление, повидимому, также неправильно. Обращает на себя внимание, что в спектре полярных сияний эта линия гораздо интенсивнее других полос Вегарда — Каплана, между тем как в спектре ночного неба этой полосы совсем нет. Возможно, что в этом случае наблюдалась резонансная линия кальция в магнитном зените, отчего длина волны ее сместилась в фиолетовый конец спектра. Как известно, у кальция есть еще более низкий уровень, исходный при излучении интеркомбинационной линии  $\lambda$  6572,8. Однако сила осциллятора у этой линии очень мала, и она будет гаситься ударами второго рода. Другие уровни имеют более высокий потенциал возбуждения и при соударениях с молекулами воздуха будут возбуждаться гораздо реже.

Окончательное решение вопроса о наличии кальциевой эмиссии в спектрах полярных сияний требует, очевидно, специальных экспериментальных исследований.

Крымская астрофизическая обсерватория  
Академии наук СССР

Поступило  
19 IX 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> A. Meinel, *Astroph. Journ.*, 113, 50 (1951). <sup>2</sup> C. Gartlein, *Phys. Rev.*, 81, 463 (1951). <sup>3</sup> D. Goldman, *Ann. Phys.*, 10, 460 (1931). <sup>4</sup> Th. Hall, *Phys. Rev.*, 79, 504 (1950). <sup>5</sup> D. Bates, *Monthly Notices of RAS*, 109, 215 (1949). <sup>6</sup> Э. Р. Мустель, *ДАН*, 81, № 3 (1951). <sup>7</sup> L. Wegard, *Geof. Publ.*, 12, No. 15 (1938).