
Издаётся Международной общественной организацией “Астрономическое общество”
и Государственным астрономическим институтом имени П.К. Штернберга МГУ

№ 1643, 2018 июня 24

**Линии молекулярного водорода H_2 (4–0)
в атмосферах Юпитера и Сатурна**

А.А. Атаи, З.С. Фарзиев, Х.М. Микаилов и А.Э. Гумбатова

Шамахинская астрофизическая обсерватория имени Н. Туси

НАН Азербайджана

E-mail: atai1951@yahoo.com

Поступила в редакцию 23 мая 2018 г.

Резюме. На основе наблюдательного материала Юпитера и Сатурна, который был получен на эшелле спектрометре, оснащённом ПЗС-приёмником (матрицами) в Кассегреновском фокусе 2-м телескопа ШАО, исследованы слабые квадрупольные линии молекулярного водорода полосы (4–0) в видимой области спектра со спектральными разрешениями $R = 14\,000$ и $R = 56\,000$, определён верхний предел интенсивности линии $S(2)$ в спектрах Юпитера и Сатурна. По линиям полосы H_2 (4–0) $S(0)$ и $S(1)$ найдены некоторые параметры в различных деталях атмосфер Юпитера и Сатурна, играющие существенную роль в понимании их энергетического баланса.

Изучение химического состава атмосфер планет-гигантов необходимо для лучшего понимания их эволюции. КА «Juno», который в 2014 году приближался к Юпитеру, наряду с другими задачами, преследовал цель определения химического состава атмосферы планеты. В 1938 году Герхард Герцберг [1] предсказал, что квадрупольные полосы H_2 должны быть обнаружены в спектрах планет-гигантов, и первым показал [2], что слабая, неопознанная абсорбционная линия, найденная Койпером [3] в низкодисперсионном спектре Урана и Нептуна, несомненно, является линией $S(0)$ (3–0) второй оберточной полосы H_2 . Спустя 10 лет, Kiess C.C., Corliss C.H. и Kiess H.K. [4] удалось обнаружить три линии вращательно-вибрационного обертона (3–0) около 8200 \AA , а Spinrad H., Trafton L.M. [5] обнаружили в спектре Юпитера две линии H_2 (4–0) обертона около 6400 \AA . Позже линии обеих полос молекулярного водорода были обнаружены в спектрах всех планет-гигантов. Причём H_2 (4–0) обертон оказался наиболее полезным для количественных исследований планетных атмосфер. Его полезность заключается в том, что чрезвычайно малое значение его интенсивности позволяет утверждать, что линии H_2 (4–0) не насыщены даже в спектрах H_2 из глубоких атмосфер.

В нормальных условиях молекулярный водород является смесью двух изомеров: орто- и пара-водорода. Магнитные моменты ядер (спины) орто-водорода (o- H_2) имеют одинаковую ориентацию, а пара-водорода (p- H_2) – противоположную. Учёные узнали о водороде практически очень много. Однако этот простейший химический элемент, по всей видимости, скрывает в себе множество тайн; но ещё больше тайн хранит в себе молекулярный водород. Знание физических особенностей химического состава молекулярного водорода в атмосферных условиях планет-гигантов может обеспечить лучшее понимание энергетического баланса планет и структуры их атмосфер.

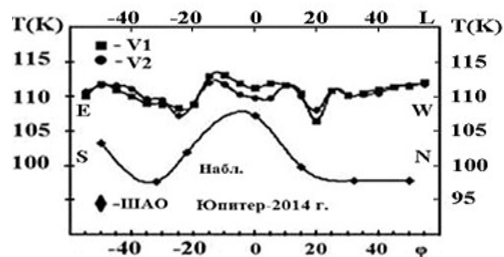


Рис. 1: Вычисленные значения температуры, соответствующие уровню 150 мбар на Юпитере по данным ИК наблюдений «Вояджер-1, 2» вдоль планетографической долготы $L(EW)$ (чёрные квадратики – V_1 – март 1979 г. кружки – V_2 – июль 1979 г.). По результатам наших наблюдений вычислены вращательные температуры в разных деталях диска по широте φ Юпитера (SN).

В 2014–2016 гг. в ШАО наблюдения Юпитера и Сатурна проводились со спектральными разрешениями $R = 14\,000$ и $R = 56\,000$ с использованием эшелле-спектрометра с ПЗС камерой (580×530 пкс), установленного в Кассегреновском фокусе 2-м телескопа [6]. Об этом и о другом спектрометре более подробно написано в работе Х.М. Микаилова и др. [7].

Наблюдения Юпитера на 2-м телескопе со спектральным разрешением $R = 56\,000$ позволили нам выявить другой слабый квадрупольный переход молекулярного водорода $H_2(4-0) S(2)$. Впервые об этом было сообщено в работе [8] и впоследствии в [9]. Необходимо отметить, что в работе Энкреназа и др. [8] предварительно были оценены верхние пределы поглощения в линии $H_2(4-0) S(2)$. А в спектре Сатурна линия $H_2(4-0) S(2)$ выявлена во время наших наблюдений. В спектре Юпитера интенсивность линии $H_2(4-0) S(2)$ в работе Смита [9] оценена ~ 1.8 mÅ, и такой же результат повторяется и по нашим измерениям. Во время обработки наблюдательного материала выявляется линия $H_2(4-0) S(2)$ в спектре Сатурна, и по нашим измерениям её интенсивность оказалась ~ 5 mÅ. В спектральной области, в которой находится линия поглощения $S(1) \lambda 6367.76 \text{ \AA}$ существует и слабая теллурическая линия 6368.46 \AA . Отметим, что для определения эквивалентной ширины линии и коррекции за доплеровское смещение параллельно измеряли солнечный спектр. В двух областях диска Сатурна – центре и полярном регионе – в 2014 г. был снят спектр вдоль меридиана в направлении севера.

Интенсивности $S(0) \lambda 6435.03 \text{ \AA}$ и $S(1) \lambda 6367.76 \text{ \AA}$ квадрупольных линий молекулярного водорода H_2 на Юпитере были определены вдоль меридиана, т.е. в разных областях планеты. После этого, по отношениям интенсивностей $S(0) \lambda 6435.03 \text{ \AA}$ и $S(1) \lambda 6367.76 \text{ \AA}$ была вычислена вращательная температура для наблюдаемых деталей Юпитера вдоль меридиана (Рис. 1). Результаты наших вычислений в центральном участке диска Юпитера хорошо совпадают с результатами вычисления значений температуры (105–110 К), соответствующих уровню 150 мбар на Юпитере по данным ИК наблюдений «Вояджер-1, 2» вдоль планетографической долготы L [10].

На диске Юпитера в разных деталях по полуширинам линий $\lambda 6367.76 \text{ \AA}$ и $\lambda 6435.03 \text{ \AA}$ в полосе (4–0) молекулярного водорода с учетом инструментальной полуширины были оценены значения давления на той глубине, где формируются эти линии (Таблица 1).

Таблица 1: Полуширины и эквивалентные ширины линий молекулярного водорода H_2 (4–0) $S(0)$, $S(1)$, вычисленные значения давления на уровнях их формирования в атмосфере Юпитера и содержание H_2 U (км·амага), A_L (км·амага) и $w_s \cdot 10^6$ (км·амага) cm^{-1} ($b = 5$) в разных деталях на диске планеты

Юпитер								
Детали	$S(1) \Delta\lambda(\text{Å})$	$S(0)\Delta\lambda(\text{Å})$	$P_1(\text{атм})$	$P_0(\text{атм})$	$W(\text{мÅ})$	A_L	U	$w_s \cdot 10^6$
NPR	0.16	0.26	0.343	0.546	10	3.02	15.1	7.55
NTrZ	0.16	0.12	0.34	0.25	9.6	2.87	14.33	7.16
NEB	0.21	0.131	0.45	0.275	11.8	3.76	18.82	9.41
EZ	0.15	0.09	0.32	0.19	15	5.27	26.34	13.2
GRS	0.12	0.235	0.257	0.49	10	3.02	15.1	7.55
STrZ	0.21	0.17	0.45	0.357	11	3.42	17.12	8.56
SPR	0.17	0.125	0.365	0.262	10.2	3.1	15.5	7.75
Центр[11]	b=5					2.4±0.4	12±2	4±0.7
	b=2					5.8±1.0	12±2	3.9±0.7

Как известно, наблюдаемый ход молекулярного поглощения по диску Юпитера неплохо интерпретируется в рамках двухслойной модели формирования линии (или полосы) поглощения, учитывающей роль многократного рассеяния и поглощения внутри оптически плотного облачного слоя. Для определения содержания водорода в рамках двухслойной модели атмосферы была использована кривая роста, построенная В.Г. Тейфелем [11]; необходимые параметры были выбраны по результатам исследований полос поглощения метана $g_s = 0.5$; $r_c = 0.75$; $b^* = 2.0$, где g_s – параметр асимметрии индикатрисы рассеяния, r_c – коэффициент диффузного отражения в непрерывном спектре, $b^* = \sigma_{a0} H_0$ (H_0 – шкала высот, σ_{a0} – объёмный коэффициент аэрозольного рассеяния).

С помощью этой кривой роста, а также по измеренным значениям интенсивности линии $S(1)$ $\lambda 6367.76$ Å были определены содержание молекулярного водорода в надоблачной атмосфере $U(H_2)$, количество поглощающего газа, приходящееся на среднюю длину свободного пробега фотонов между двумя актами рассеяния в облачном слое A_L и удельное содержание газа на единицу длины свободного пробега w_s для атмосфер Юпитера и Сатурна (Таблицы 1 и 2).

Ясно, что для разных деталей на диске Юпитера, а также для Сатурна значения давления должны отличаться. Это отчётливо замечается по Таблицам 1 и 2. Расхождения в значениях давления для атмосферы Юпитера возникают из-за неточности определения полуширины слабой линии $S(0)$ 6435.03 Å вследствие перекрытия линией аммиака 6435.30 Å длинноволнового крыла линии молекулярного водорода.

Мы решили сравнить результаты наших наблюдений с результатами вычислений, выполненных в рамках зонально-симметричной линейной радиационно-динамической модели, развитой в [12]. На рис. 2 показаны данные IRIS (Infrared Interferometer Spectrometer and Radiometer) по сравнению с модельными расчетами для Юпитера и Сатурна. Привлекает внимание хорошее согласие с сезонным эффектом для Сатурна и зональными струями на Юпитере. Плохое согласие наблюдается вблизи экватора, особенно для Сатурна, что связано, по-видимому, с недостатками линейной модели. Результаты наших наблюдений в 1971–1974 гг. также подтверждают выявление сезонного эффекта.

Усреднённые значения вращательной температуры, определённые по линиям молекулярного водорода, которые формируются в глубине атмосферы Юпитера, где дав-

Таблица 2: Полуширины линий молекулярного водорода H_2 (4-0) $S(0)$, $S(1)$, вычисленные значения давления на уровнях их формирования в атмосфере Сатурна и содержание H_2 U (км·амага), A_L (км·амага) и $w_s \cdot 10^6$ (км·амага) cm^{-1} в двух разных областях на диске планеты

Сатурн $R = 56\,000$								
Детали	$S(0)\Delta\lambda$ (Å)	P_0 (атм.)	$S(1)\Delta\lambda$ (Å)	P_1 (атм.)	A_L	U	$w_s \cdot 10^6$	
Центральн. ч	0.266	0.457	0.311	0.547	4.3	21.5	8.6	$b = 4.0$
Сев. полярн.р	0.146	0.25	0.146	0.25	4.2	20.8	8.3	
Центральн. ч					9.6	19.1	19.1	$b = 1.5$
Сев. полярн. х р					9.2	18.45	18.5	
Центр[11]	$b = 4.0$				6.4 ± 2	25 ± 9	8.5 ± 2.8	
	$b = 1.5$				15.6 ± 6	22 ± 9	7.5 ± 2.6	

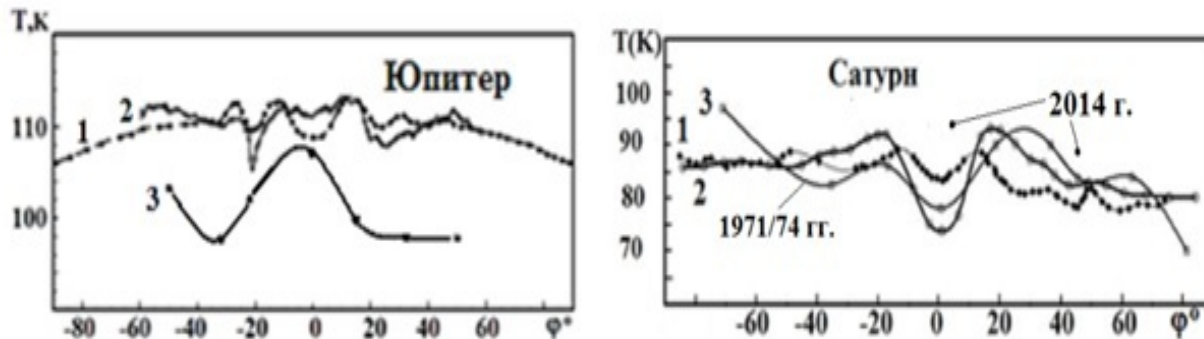


Рис. 2: Данные IRIS (2) по сравнению с модельными предсказаниями (1)[12] для Юпитера и Сатурна (температуры на уровне 150 мбар.) Видно хорошее согласие с сезонным эффектом на Сатурна и также с зональными струями Юпитера. Плохое согласие вблизи экватора, особенно для Сатурна, связано с недостатками линейной модели. (3) – наши расчеты [13]

ление соответствует 0.2–0.5 атм, достигают 110 К в центре диска планеты, и меньше 100 К в околополюсных областях. Для Сатурна температура измерялась для Северной полярной и центральной частей диска по наблюдениям 2013–2015 гг., которые хорошо согласуются с измерениями 1971–1974 гг. [13].

В условиях атмосфер планет-гигантов молекулярный водород имеет особый ход кривой ротационной теплоёмкости. В результате самопроизвольного установления равновесия в таких условиях происходит изменение со временем определённых тепловых свойств H_2 .

Обычный водород содержит $\sim 75\%$ о- H_2 . Превращение $\sim 25\%$ р- H_2 сопровождается выделением тепла (~ 1400 Дж/моль), но не происходит без участия катализаторов. Поэтому для детального анализа атмосферы планет необходимы точные данные о квадрупольном поглощении H_2 . Для понимания источника энергетического баланса атмосфер планет гигантов представляет особую важность изучение полос поглощения молекулярного водорода в видимой и ближней ИК областях спектра.

На основе наблюдательных данных по изучению квадрупольных линий H_2 (4-0) для разных деталей диска Юпитера вдоль его меридиана было установлено, что вариации

значений давления, температуры и количества молекулярного водорода не являются монотонными. Такое поведение давления и температуры на глубине формирования молекулярных линий водорода, возможно, связано с особенностями теплового излучения планеты. Высвобождение прибавочной энергии в различных деталях диска Юпитера может быть вызвано самопроизвольной конверсией орто-водорода в пара-водород в области над жидким молекулярным водородом, даже при отсутствии катализатора, который ускоряет этот процесс. Процесс конверсии, происходящий в разных поясах зонах и на различных глубинах, имеет разные скорости и пространственные масштабы и зависит от температуры и количества орто-водорода.

Дальнейшие исследования свойств квадрупольных линий указывают на целый ряд возможностей для их применения в физической химии.

Список литературы

- [1] Herzberg G. On the possibility of detecting molecular hydrogen and nitrogen in planetary and stellar atmospheres by their rotation-vibration spectra. *ApJ* **87**, 428 (1938).
- [2] Herzberg G. Spectroscopic evidence of molecular hydrogen in the atmospheres of Uranus and Neptune. *ApJ* **115**, 337 (1952).
- [3] Kuiper G.P. New absorptions in the Uranus atmosphere. *ApJ* **109**, 540 (1949).
- [4] Kiess C.C., Corliss C.H., and Kiess H.K. High-dispersion spectra of Jupiter. *ApJ* **132**, 221 (1960).
- [5] Spinrad H. and Trafton L.M. High-dispersion spectra of outer planets: I. Jupiter in the visual and red. *Icarus* **2**, 19 (1963).
- [6] Микаилов Х.М., Халилов В.М. и Алекперов И.А. Эшелле-спектрометр фокуса Кассегрена 2-х метрового телескопа ШАО НАН Азербайджана. *Циркуляр ШАО № 109*, 21 (2005).
- [7] Mikayilov Kh.M., Musayev F.A., Alakbarov I.A., Rustamov B.N., and Khalilov O.V. ShaFES: Shamakhy fibre echelle spectrograph, *Azerbaijani Astron. J.* **12**, No. 1, 4 (2017).
- [8] Encrenaz T. and Owen T. New observations of the hydrogen quadrupole lines on Saturn and Uranus. *A&Ap* **28**, 119 (1973).
- [9] Smith W.H, Conner C.P., Simon J., and Schempp W.V. The H₂ (4-0) S(0, 1 and 2) quadrupole features in Jupiter. *Icarus* **81**, 429 (1989).
- [10] Flasar F.M. Global dynamics and thermal structure of Jupiter's atmosphere. *Icarus* **65**, 280 (1986)
- [11] Тейфель В.Г. Оптические свойства атмосфер Юпитера и Сатурна. Докторская диссертация. Алма-Ата, 1980. С. 530.
- [12] Conrath B.J., Gierasch P.J., and Leroy S.S. Temperature and circulation in the stratosphere of the outer planets. *Icarus* **83**, 255 (1990).

**Lines of Molecular Hydrogen H₂ (4–0)
in the Spectra of Jupiter and Saturn**

A.A. Atai, Z.S. Farziev, Kh.M. Mikayilov, and A.E. Humbatova

*N. Tusi Shamakhi Astrophysical Observatory,
National Academy of Sciences of Azerbaijan
E-mail: atai1951@yahoo.com*

Received May 23, 2018

Abstract. Based on the observations of Jupiter and Saturn on the echelle spectrometer with a CCD receiver at the Cassegrain focus of the 2-m telescope of the ShAO, weak quadrupole lines of molecular hydrogen of the band H₂(4–0) in the visible region of the spectrum with spectral resolutions of $R = 14\,000$ and $R = 56\,000$ were detected; an upper limit on the intensity of the $S(2)$ line in the spectra of Jupiter and Saturn was determined. Using the lines of the H₂ bands (4–0), $S(0)$ and $S(1)$, some parameters were determined in various features of the atmospheres of Jupiter and Saturn, which play an important role in understanding their energy balance.